# Petrofyzika: hustoty a pórovitosť

## motivácia: prečo musíme hovoriť o hustotách?

- určovanie a analýza hustôt sú úzko prepojené najmä s gravimetriou (zemské tiažové pole je modulované prítomnosťou hustotných nehomogenít v litosfére) a seizmikou / seizmológiou (rýchlosť šírenia seizmických vĺn závisí okrem pružnostných vlastností aj od hustoty), ale aj s ostatnými geofyzikálnymi metódami

# Petrofyzika, hustoty

**obsah prednášky:**

- definície, jednotky, druhy hustôt
- metódy určovania hustôt
- hustoty minerálov
- hustoty hornín
- pórovitosť

# hustoty

**definícia:**

hustota (špecifická hmotnosť) = hmotnosť jednotkového objemu látky

**fyzikálne jednotky pre hustotu:**

systém SI: $kg/m^3 = kg \cdot m^{-3}$

používané sú však násobky:

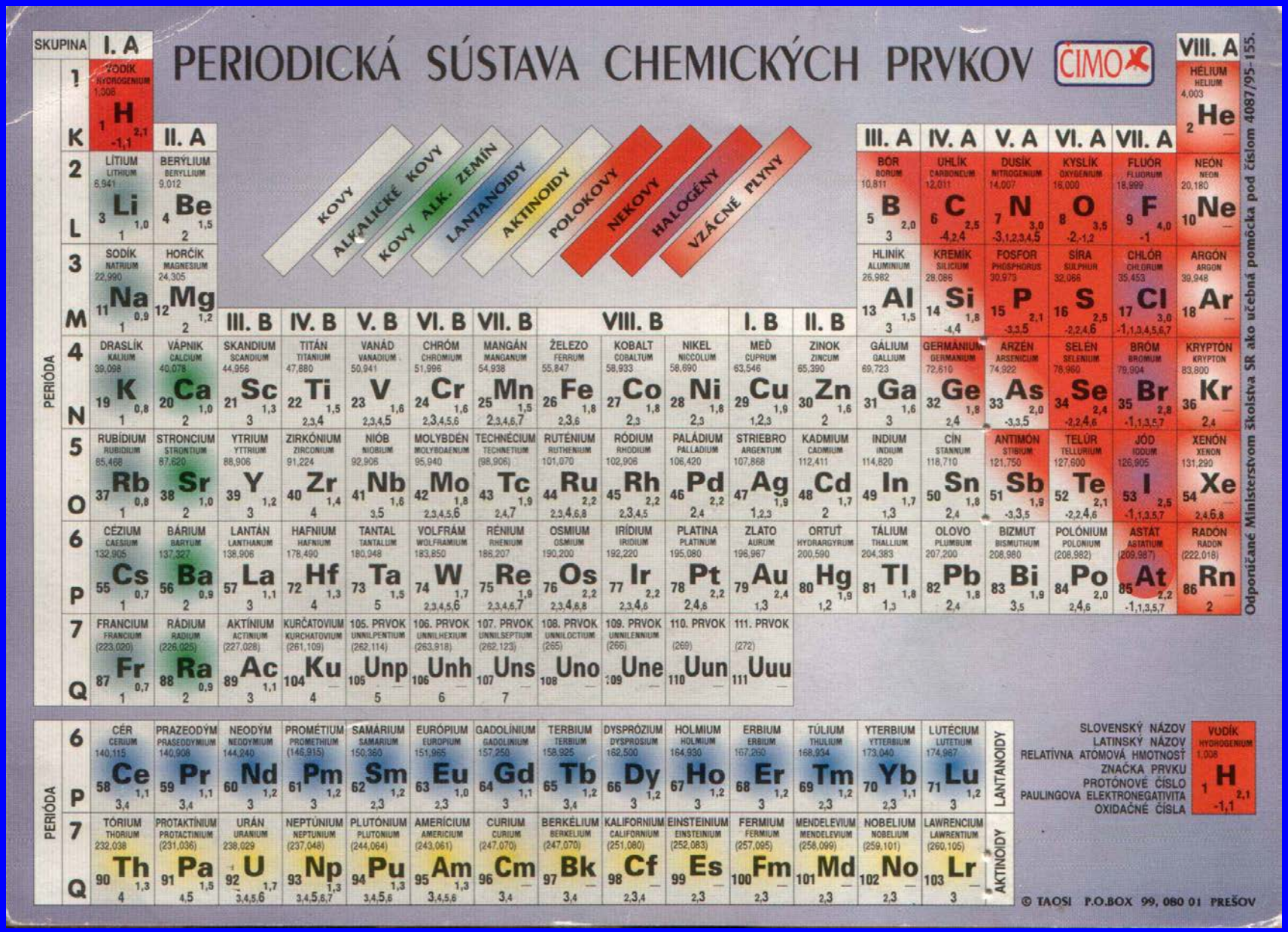
$1\ g \cdot cm^{-3} = 1\ kg \cdot dm^{-3} = 1\ Mg \cdot m^{-3} = 1\ t \cdot m^{-3} = 1000\ kg \cdot m^{-3}$

príklad : $2.75\ g \cdot cm^{-3} = 2750\ kg \cdot m^{-3}$ (fylit)

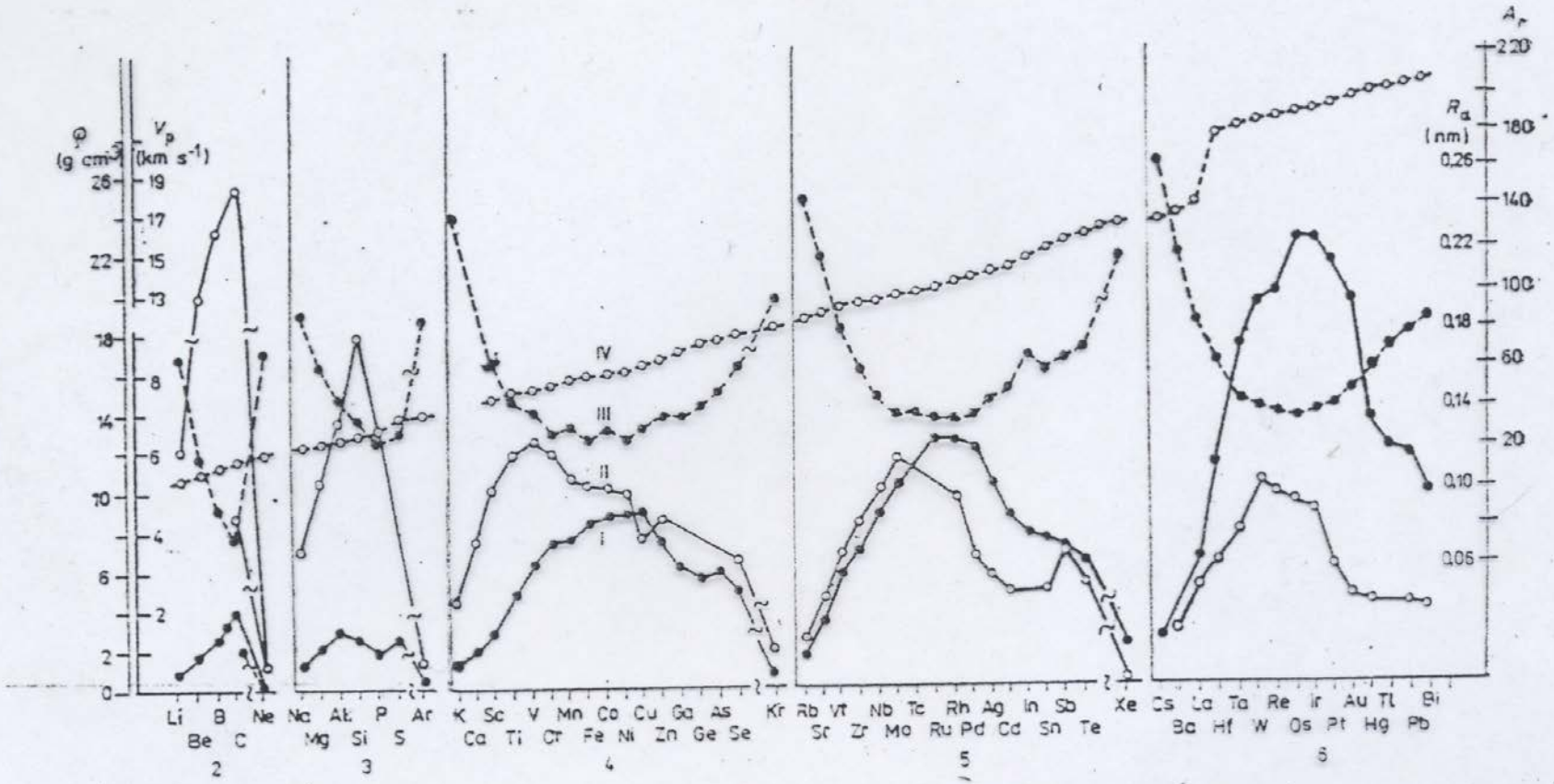
(priemerná hustota vrchnej časti zemskej kôry $\approx 2.67\ g \cdot cm^{-3}$)

(do pozornosti dávam vedecký článok:
Hinze, W.J., 2003: Bouguer reduction density, why 2.67?
Geophysics Vol.68, Nr.5, 1559-1560 )

# *hustoty – vlastnosti, súvislosti*



# *hustoty – vlastnosti, súvislosti*




*Obr.* 2. Závislost fyzikálních vlastností chemických prvků na jejich postavení v periodické soustavě

I — hustota, II — rychlost šíření podélných vln, III — atomový poloměr, IV — poměrná atomová hmotnost; 2 až 6 — periody soustavy prvků (Dortman. Magid 1969)

# hustoty (densities)

<u>fázy stavby horniny:</u>

rozpoznávame **tvrdú (pevnú)**, **kvapalnú** a **plynnú fázu** horniny,

s odpovedajúcimi hmotnosťami ($m_{tv}$, $m_{kv}$ a $m_{pl}$) a objemami ($V_{tv}$, $V_{kv}$, $V_{pl}$),

<u>druhy hustôt:</u>

**mineralogická hustota:** $\rho_m = m_{tv} / V_{tv}$

(matrix density)

**objemová hustota:** $\rho_o = m_{tv} / (V_{tv}+V_{kv}+V_{pl})$

(suchej horniny) (dried sample density)

**prirodzená hustota:** $\rho_n = (m_{tv}+m_{kv}) / (V_{tv}+V_{kv}+V_{pl})$

(natural density or bulk density)

(pri nasýtení pórov a zanedbaní hmotnosti plynnej fázy)

# pórovitosť

**pórovitosť (koeficient pórovitosti, porosity)**

s odpovedajúcimi objemami ($V_{tv}$, $V_{kv}$, $V_{pl}$):

**pórovitosť:**

$$\phi = (V_{pl} + V_{kv}) / (V_{tv} + V_{kv} + V_{pl})$$

**koeficient pórovitosti:**

$$k_p = (V_{pl} + V_{kv}) / / (V_{tv} + V_{kv} + V_{pl}) \cdot 100 \ [\%]$$

<u>pozn.:</u> platí zaujímavý vzťah: $\phi = 1 - \rho_o / \rho_m$

a ešte jeden: $\rho_n = \rho_m(1 - \phi) + \rho_{kv}\,\phi$

(kde $\rho_{kv}$ je hustota kvapalnej fázy v póroch)

# hustoty

**<u>metódy určovania hustôt:</u>**

- priame (laboratórne)

- nepriame (geofyzikálne):

<u>priame:</u> tzv. dvojité váženie, použitie denzitometra, použitie pyknometra

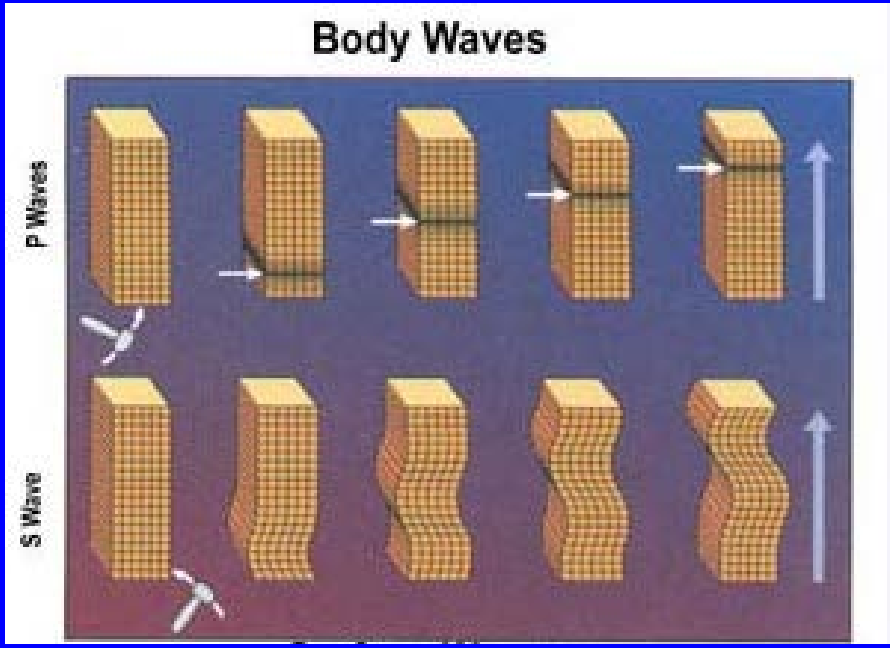
<u>nepriame:</u> výstupy zo seizmológie, seizmiky, gravimetrického modelovania, Nettletonova metóda v gravimetrii, výsledky vrtnej gravimetrie, $\gamma$-$\gamma$ karotáž (rádiometrická vrtná metóda)

# nepriame metódy určovania hustôt

**zo seizmických dát:**

- z teórie šírenia mechanických (seizmických) vĺn vyplýva, že ich rýchlosť (pozdĺžnych aj priečnych; P-vlny a S-vlny) súvisí s hustotou a elastickými parametrami

- viacej autorov zistilo (empiricky) závislosť medzi rýchlosťou pozdĺžnych vĺn a hustotou:



# nepriame metódy určovania hustôt

## zo seizmických dát – empirické závislosti:

hlavne pre sedimentárne horniny:

Nafe, Drake (1957)

Birch (1961)

Ludwig et al. (1970)

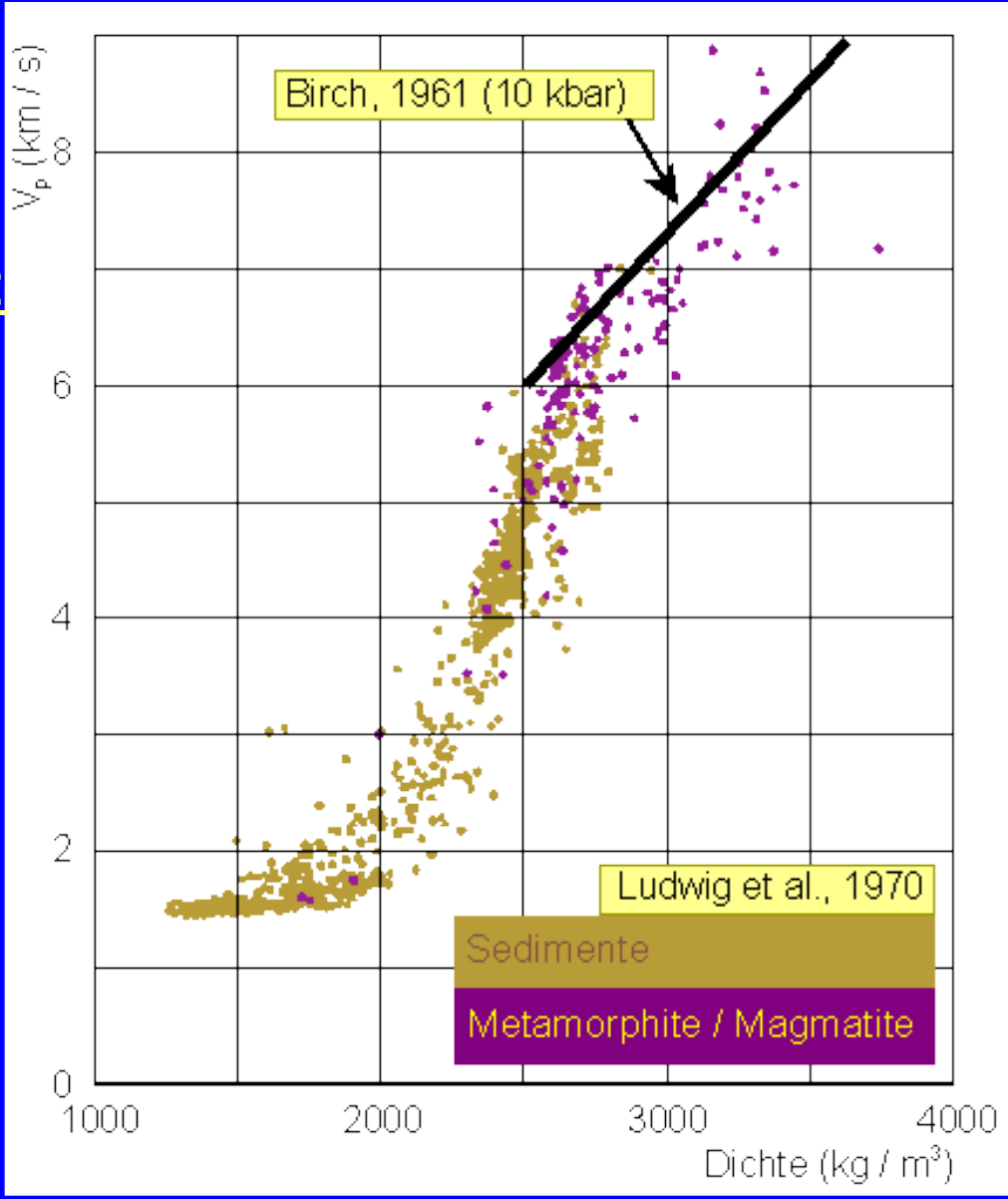
Gardner et al. (1974)

pre hlbinné horniny:

Lachenbruch, Morgan (1990)

Sobolev, Babeyko (1994)

Christensen, Mooney (1995)



# nepriame metódy určovania hustôt

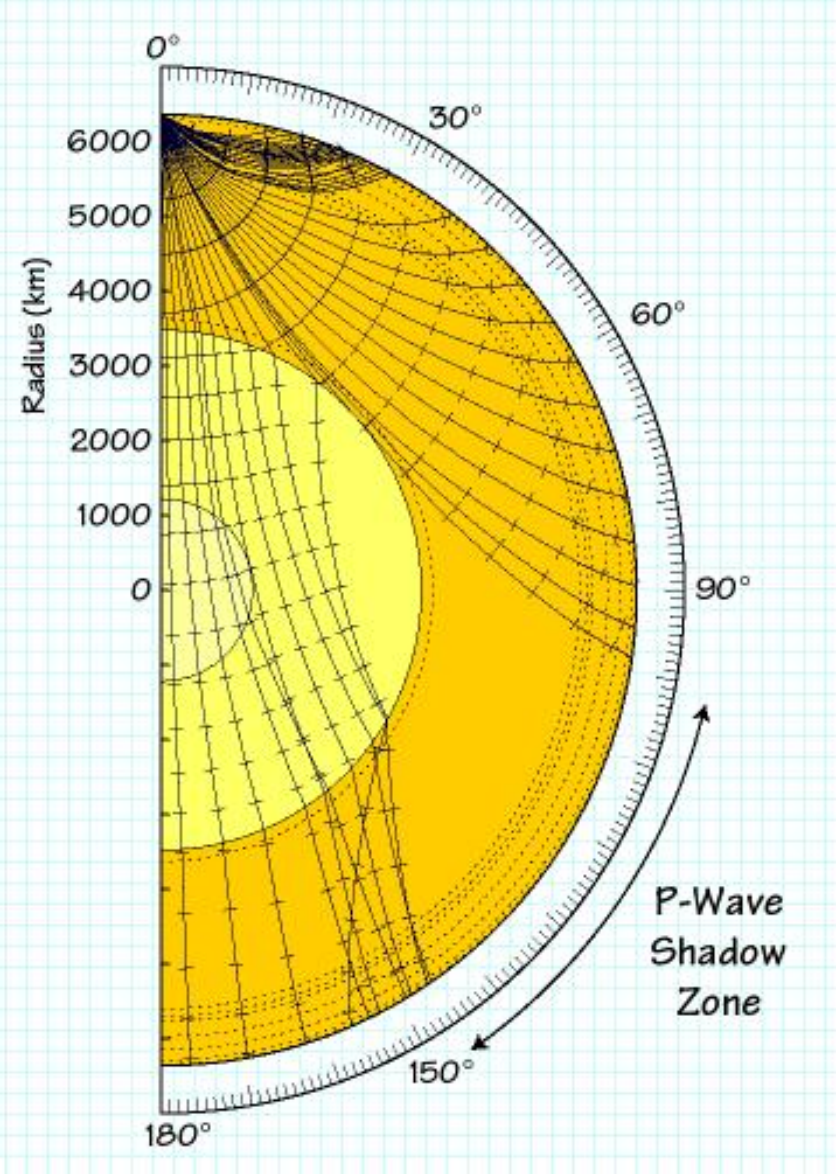
## zo seizmológie:

**model rozvrstvenia zemského telesa:**

- Bullenov model

- PREM (Dziewonski, Anderson, 1981)
  = Preliminary Earth Reference Model

- IASPEI model
  = International Association
  of Seismology and Physics
  of the Earth's Interior



# nepriame metódy určovania hustôt

| horná hranica [km] | spodná hranica [km] | “horná” hustota [g.cm$^{-3}$] | “spodná” hustota [g.cm$^{-3}$] |
|---|---|---|---|
| 0 | 30 | 2.76 | 2.82 |
| 30 | 80 | 3.32 | 3.36 |
| 80 | 800 | 3.87 | 4.30 |
| 800 | 2900 | 4.41 | 5.57 |
| 2900 | 6371 | 9.74 | 17.90 |

**tzv. Bullenov model Zeme (70.roky 20.storočia)**

# nepriame metódy určovania hustôt

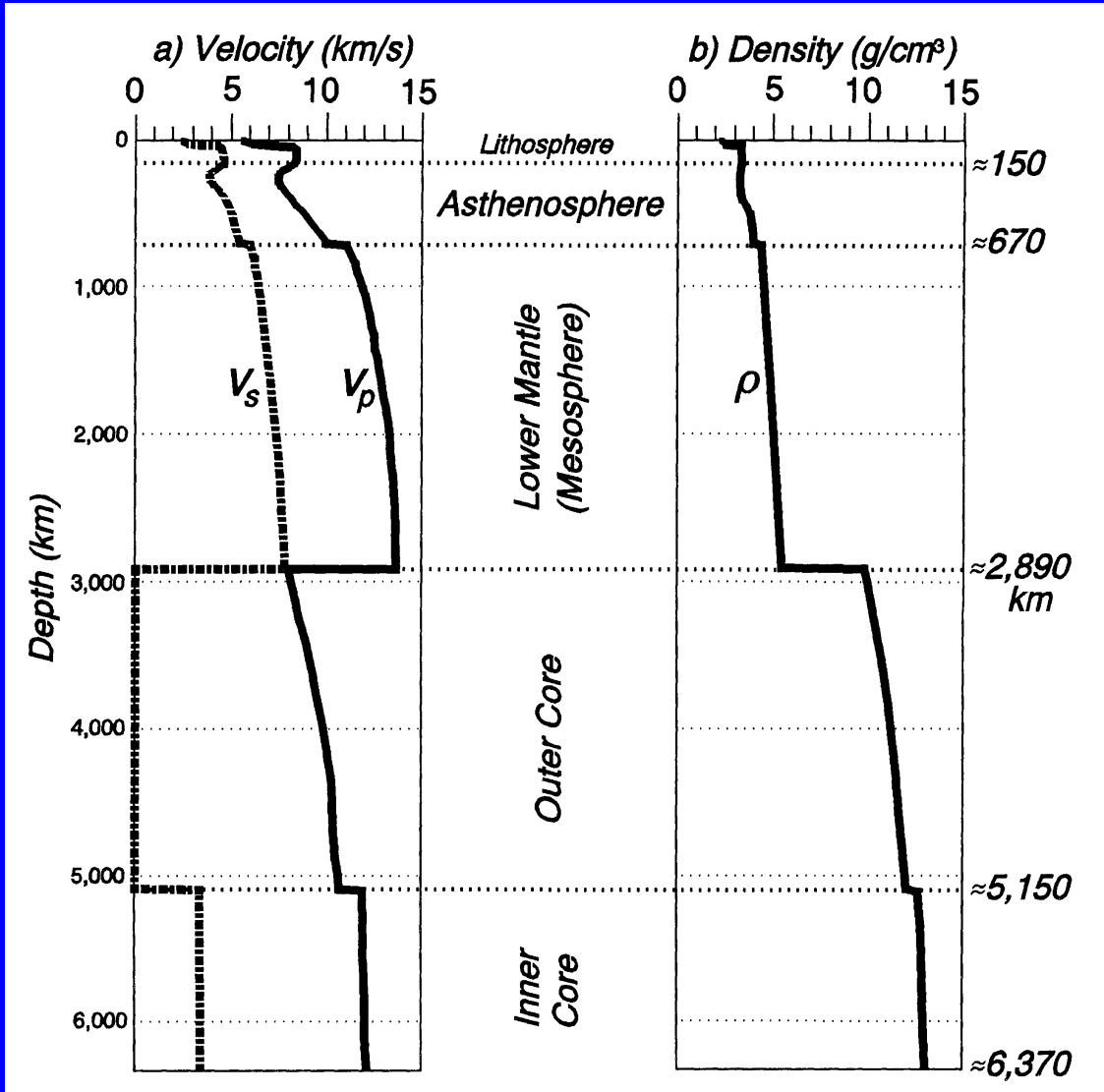
| horná hranica [km] | spodná hranica [km] | “horná” hustota [g.cm$^{-3}$] | “spodná” hustota [g.cm$^{-3}$] |
|---|---|---|---|
| 0 | 33 | 2.84 | 3.32 |
| 33 | 245 | 3.32 | 3.51 |
| 245 | 984 | 3.51 | 4.49 |
| 984 | 2000 | 4.49 | 5.06 |
| 2000 | 2700 | 5.06 | 5.4 |
| 2700 | 2886 | 5.4 | 5.69 |
| 2886 | 4000 | 9.95 | 11.39 |
| 4000 | 4560 | 11.39 | 11.87 |
| 4560 | 4710 | 11.87 | 12.3 |
| 4710 | 5160 | 12.3 | 12.74 |
| 5160 | 6378.137 | 12.74 | 13.03 |

**Ochaba, Š. (1986)**

# nepriame metódy určovania hustôt

## PREM model rozvrstvenia zemského telesa (zo seizmológie):

**rýchlosť** **hustota**




**kvízové otázky:**

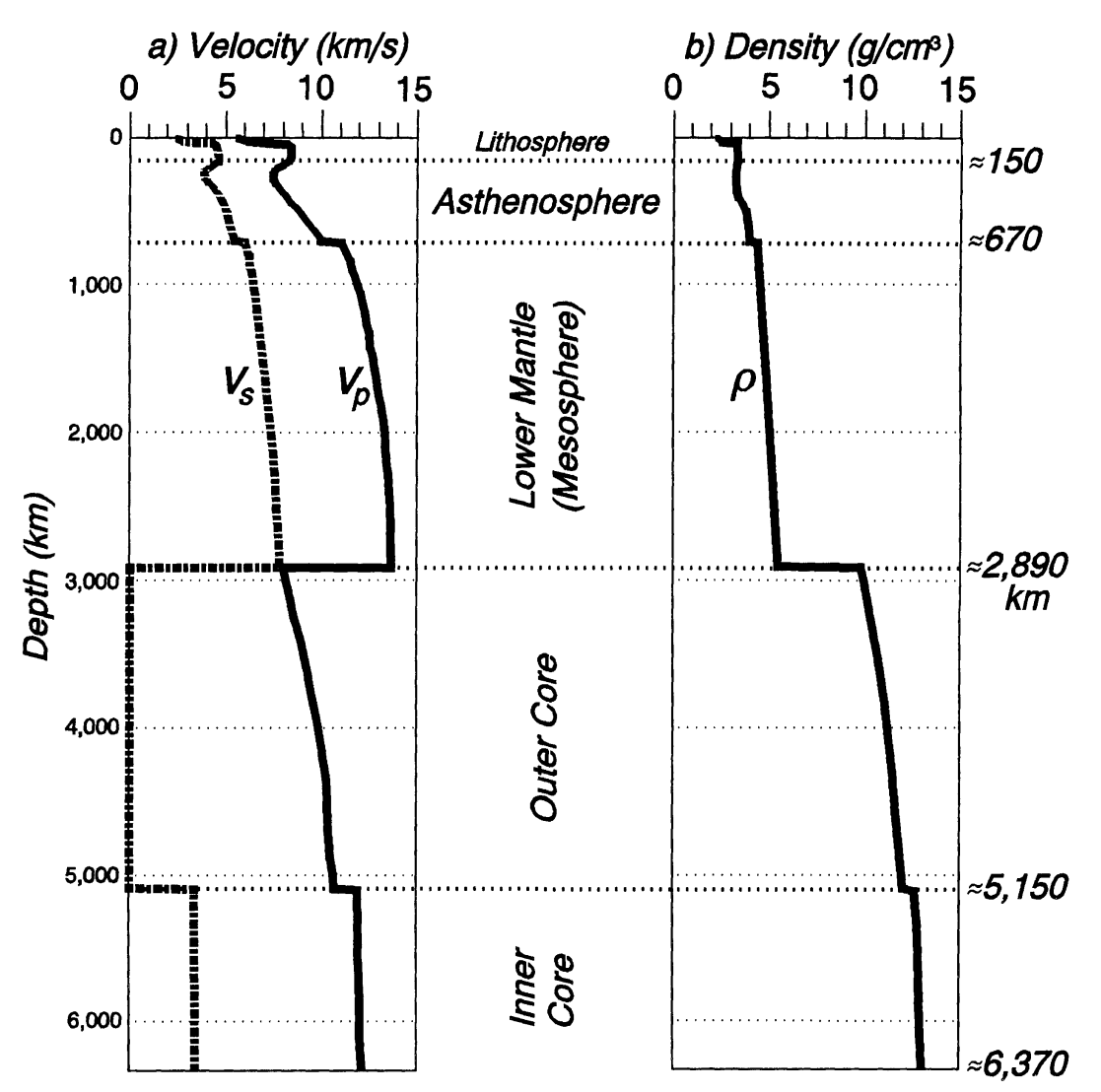
**Ako sa volá diskontinuita medzi plášťom a vonkajším jadrom?**

**A medzi vnútorným a vonkajším jadrom?**

# nepriame metódy určovania hustôt

## PREM model rozvrstvenia zemského telesa (zo seizmológie):

**rýchlosť** **hustota**

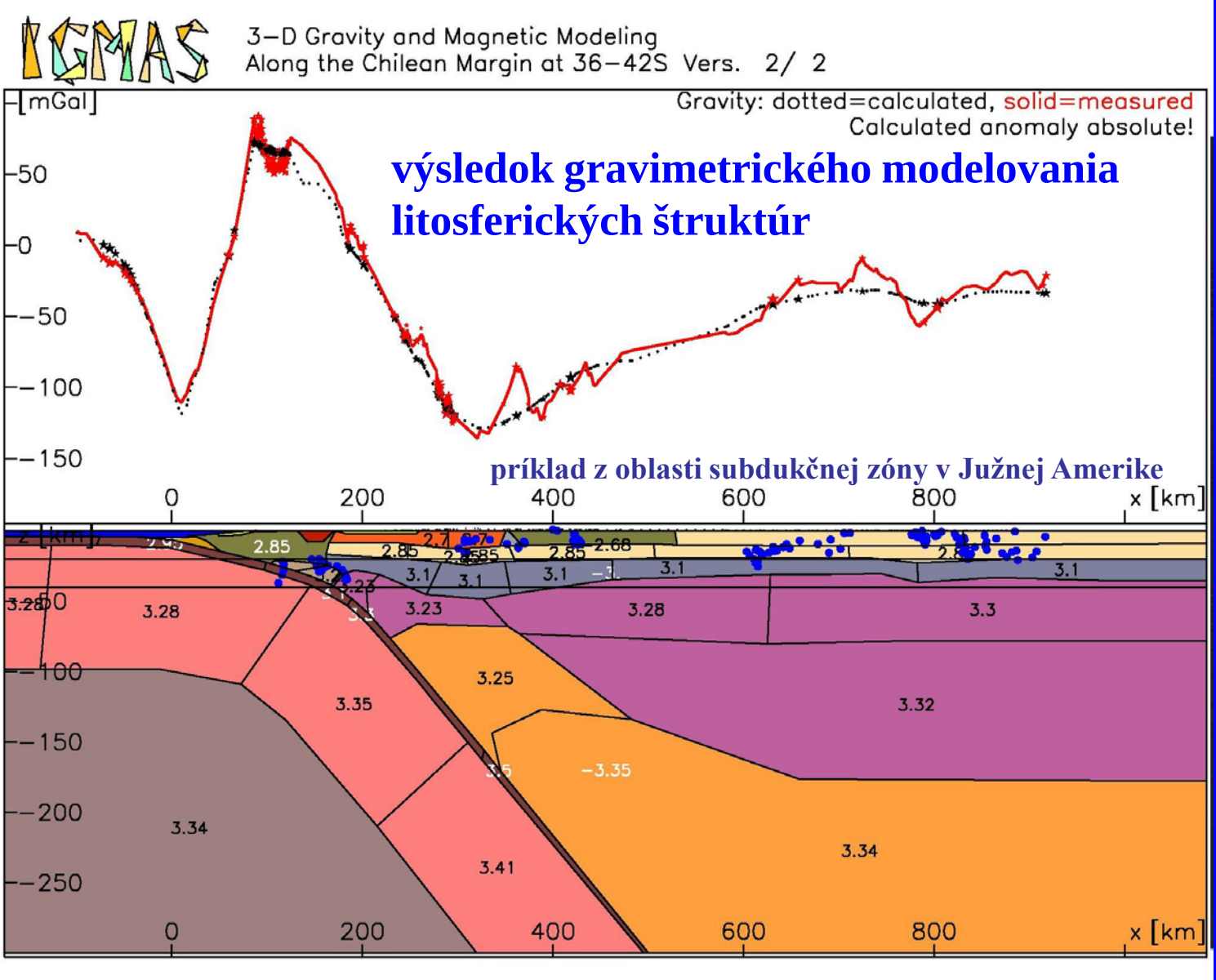



**Ako sa volá diskontinuita medzi plášťom a vonkajším jadrom? Gutenberg-Wiechert**

**A medzi vnútorným a vonkajším jadrom? Lehmann-Bullen**

# nepriame metódy určovania hustôt

## gravimetrické modelovanie:



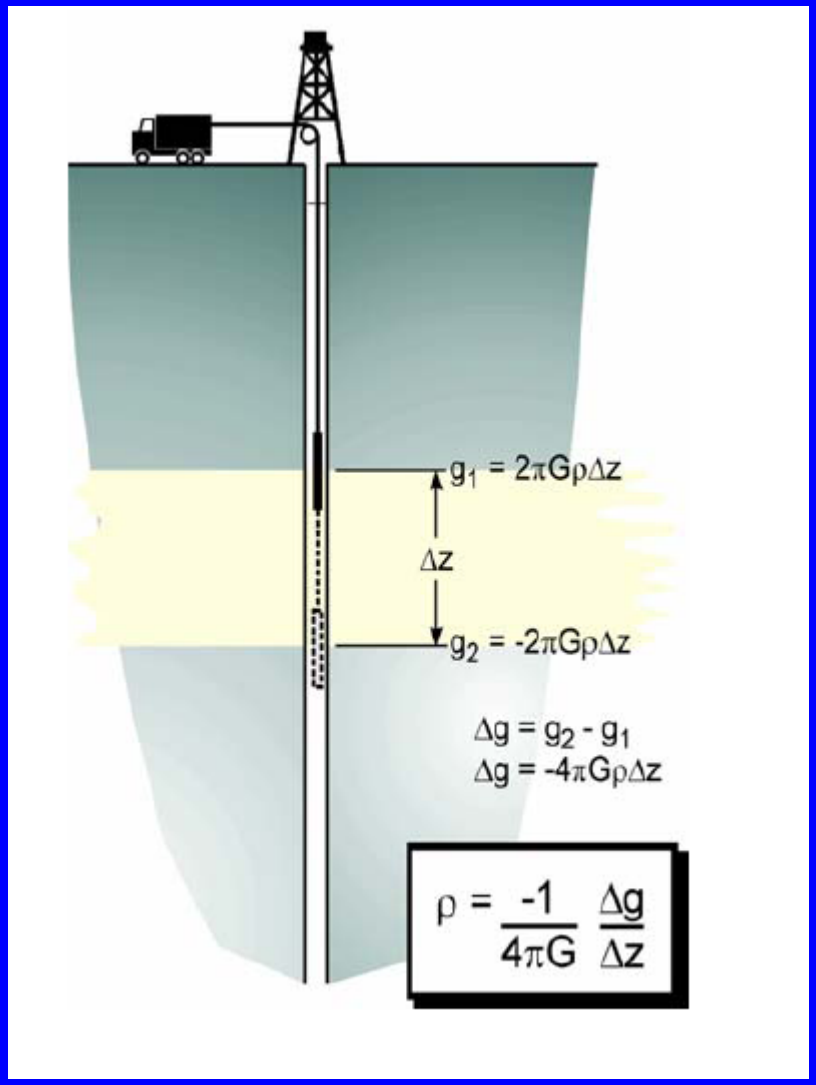

výsledok gravimetrického modelovania litosferických štruktúr

príklad z oblasti subdukčnej zóny v Južnej Amerike

# nepriame metódy určovania hustôt

**vrtná gravimetria**

relatívny gravimeter
(v špeciálnom prevedení)
je spúšťaný pozdĺž vrtu a
z rozdielov $\Delta g$ na úsekoch
$\Delta z$ je možné odhadnúť
hustotu vrstvy



# priame (laboratórne) metódy určovania hustôt

**<u>váženie vzoriek + denzintometer</u>**

a) určenie objemovej hustoty $\rho_o$ pomocou dvojitého váženia,

b) určenie objemovej hustoty $\rho_o$ pomocou denzitometra,

c) určenie mineralogickej hustoty $\rho_m$ pomocou dvojitého váženia,

d) určenie mineralogickej hustoty $\rho_m$ pyknometricky (tzv. trojité váženie)

e) originálny spôsob určenia mineralogickej hustoty od doc. Dydu – zmenou hustoty kvapaliny (dá sa relatívne dobre regulovať) a pozorovaním vznášania sa vzorky minerálu v nej.

# priame (laboratórne) metódy určovania hustôt

## a) dvojité váženie (určenie objemovej hustoty):

a) Vzorka sa vysuší v peci (hmotnosť vzorky: 100 až 500 g).

b) Vzorka sa zváži najprv na vzduchu (m) a potom ponorená v kvapaline (voda) (m').

c) Objemová hustota sa potom určí podľa vzťahu (kde $\rho_k$ je hustota kvapaliny - vody):

$$\rho_o = \frac{m}{m - m'} \rho_k$$

**odvodenie**

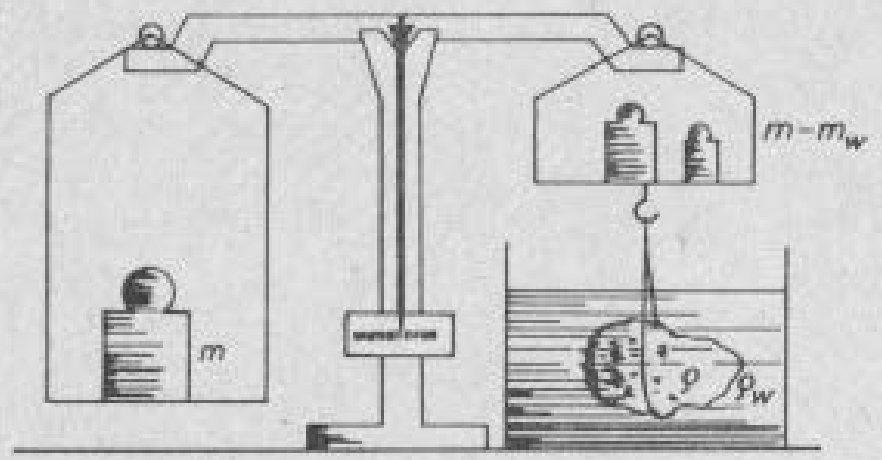



Abb. 2.54. Dichtebestimmung mit der hydrostatischen Waage

# a) dvojité váženie (určenie objemovej hustoty):

V prípade pórovitej vzorky je postup trošku zložitejší:

a) Vzorka sa vysuší v peci a pokryje sa vrstvičkou parafínu alebo laku.

b) Vzorka sa zváži najprv na vzduchu – bez parafínovej vrstvičky (m) a s ňou ($m_p$) a až potom ponorená (zaparafínovaná) v kvapaline (voda) ($m_p$').

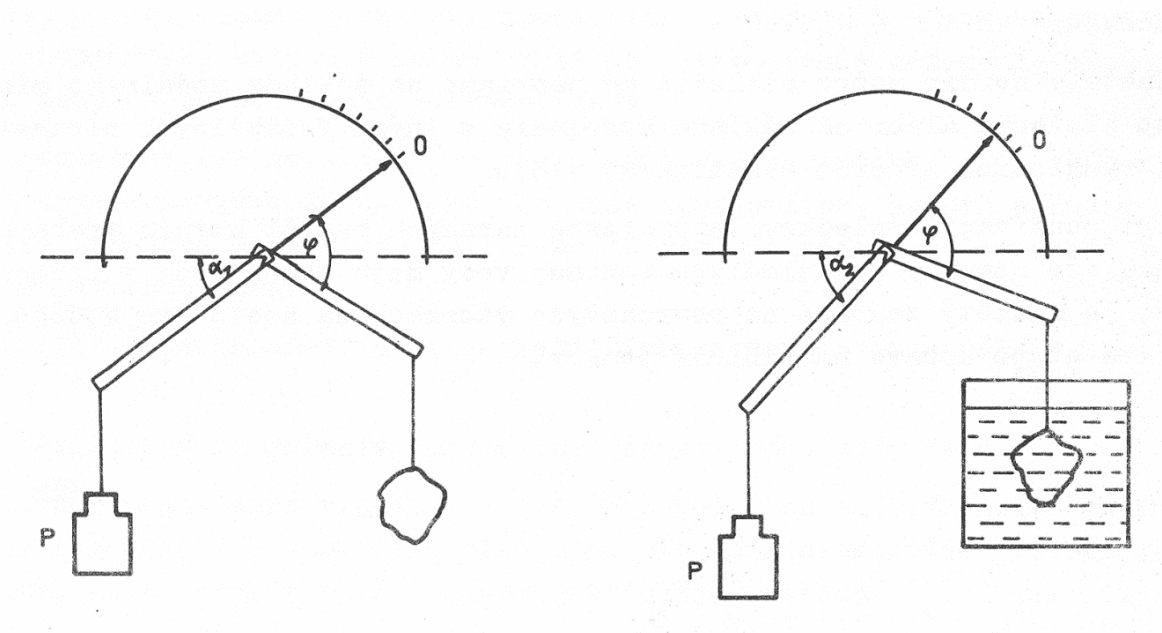
c) Objemová hustota sa potom určí podľa vzťahu (kde k je konštanta na korekciu parafínovej vrstvičky):

$$\rho_o = \frac{m}{m - m'_p - k\left(m_p - m\right)}\rho_k$$

**bez odvodenia**

# b) odhad hustoty pomocou denzitometra:

a) Vzorka sa zavesí na rameno denzitometra a vykompenzuje sa závažím (aby ukazovala šípka na nulu).
b) Vzorka sa ponorí do vody a šípka ukáže na hodnotu hustoty.




Obr. 2.25: Určovanie hustôt denzitometrom

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ctg}(\varphi) + \rho_o \operatorname{ctg}(\alpha_1)}{\rho_o - 1}$$

**odvodenie**

# priame (laboratórne) metódy určovania hustôt

## c) dvojité váženie (určenie mineralogickej hustoty):

a) Vzorka sa naopak nasycuje kvapalinou (aby prenikla do všetkých pórov), nehodí sa na to voda ale nejaká prchavá látka (napr. toluén).

b) Vzorka sa zváži najprv na vzduchu (m) a potom ponorená a nasýtená v danej kvapaline ($m_k$).

c) Mineralogická vá hustota sa potom určí podľa vzťahu (kde $\rho_k$ je hustota kvapaliny - vody):

$$\rho_m = \frac{m}{m - m_k} \rho_k$$

# priame (laboratórne) metódy určovania hustôt

## d) určenie mineralogickej hustoty pyknometricky:

a) Vzorka sa rozdrví na prášok a vysuší sa.

b) Najprv sa zváži čistý pyknometer (špeciálna sklenená nádobka) ($m_1$), potom s práškom naplneným asi do tretiny ($m_2$) a na záver s kvapalinou aj s práškom ($m_3$). Je potrebné vedieť aj hmotnosť pyknometra s kvapalinou bez prášku (M).

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - M - m_1 - m_2} \rho_k$$

# priame (laboratórne) metódy určovania hustôt

**usporiadanie lab. metód podľa presnosti:**

najmenej presné – určenie hustoty denzitometrom (ale najrýchlejšie)

metóda dvojitého váženia – stredne presná

najpresnejšia - pyknometrická metóda (tiež nazývaná ako trojité váženie), ale najpomalšia.

Všetky tieto laboratórne metódy dokážu určiť hustoty s presnosťou menej ako $\pm 0.02\ g \cdot cm^{-3}$ (pyknometricky až na úrovni $\pm 0.01\ g \cdot cm^{-3}$)

# hustoty jednotlivých fáz

- **plynná fáza** (najmä vzduch, ale aj uhlovodíkové plyny)
- **kvapalná fáza** (najmä voda, ale aj ropa)
- **tvrdá (pevná) fáza** (minerály)
- plazmatické skupenstvo sa v prípade minerálov a hornín nevyskytuje

# hustoty jednotlivých fáz

## plynná fáza

Dôležité : Hustota závisí v tomto prípade od teploty a tlaku!

Pri tzv. „izbových podmienkach“, t.j. 20°C a 0.1 MPa sa rovná hustota vzduchu 0.0012 $g \cdot cm^{-3}$.
Pri mnohých výpočtoch ju považujeme za nulovú.

Pri uhľovodíkových plynoch sa pohybuje v intervale:
od 0.000715 $g \cdot cm^{-3}$ (metán) do 0.00317 $g \cdot cm^{-3}$ (pentán).
Často sa však uvažuje blízka vzduchu, čiže nulová.

# hustoty jednotlivých fáz

## kvapalná fáza

Opäť - hodnota hustoty závisí od teploty a tlaku (!)

Pri tzv. „izbových podmienkach“, t.j. 20°C a 0.1 MPa závisí hustota prírodnej pórovej vody od jej mineralizácie a mení sa: od 1.010 $g \cdot cm^{-3}$ (sladká) do 1.240 $g \cdot cm^{-3}$ (silný soľný roztok).

Pri sladkej vode sa pri výpočtoch uvažuje hodnota 1.0 $g \cdot cm^{-3}$, Pri slanej morskej vode to je hodnota 1.03 $g \cdot cm^{-3}$ .

Hustota ropy závisí značne od jej chemického zloženia a Pohybuje sa v intervale od 0.61 (ľahké) po 1.05 $g \cdot cm^{-3}$ (ťažké). V priemere sa často berie ako hodnota 0.9 $g \cdot cm^{-3}$.

# hustoty jednotlivých fáz

## tvrdá (pevná) fáza = minerály

V priemere sa pohybuje $\rho_m$ v intervale od 1.0 po 6.0 $g \cdot cm^{-3}$.
- v skutočnosti od 0.92 (ľad) po 22.59 $g \cdot cm^{-3}$ (čisté Os).

Platí, že hustota minerálov závisí od dvoch skutočností:

1) od koncentrácie atómov s vyššou pomernou atómovou hmotnosťou a nižším atómovým polomerom (prevažne pri rudných mineráloch)
2) od usporiadania – iónových pomolerov, valencie, typu väzby, mriežky; inými slovami od kryštalografickej sústavy (prevažne pri horninotvorných mineráloch)

Príklady:

uhlík – grafit (2.2, hexagonálna) vs. diamant (3.5, kubická)

$CaCO_3$ – aragonit (2.9, rombická) vs. kalcit (2.7, trigonálna)

# hustoty jednotlivých fáz

## tvrdá (pevná) fáza = minerály

V priemere sa pohybuje $\rho_m$ v intervale od 1.0 po 6.0 $g \cdot cm^{-3}$.

- v skutočnosti od 0.98 (ľad) po 22.59 $g \cdot cm^{-3}$ (čisté osmium).

Podľa hustoty delíme minerály na:

a) husté ($\rho_m > 4\ g \cdot cm^{-3}$)
(Se. Te, drahé kovy – Au, Ag, Cu, sulfidy – pyrit, pyrotín, galenit oxidy a hydroxidy – napr. hematit; zirkón, monazit, ceruzit, barit)

b) so strednou hustotou ($\rho_m \cong 2.5$ až $4\ g \cdot cm^{-3}$)
(väčšina minerálov)

c) s malou hustotou ($\rho_m < 2.5\ g \cdot cm^{-3}$)
(grafit, síra, opál, silikáty, karbonáty, chloridy – halit, sylvín)

# hustoty hornín (prirodzené)

## magmatické horniny

- vo všeobecnosti patria medzi horniny s vyššou hustotou,
- hustota stúpa lineárne s bázicitou (zvyšovaním koncentrácie Fe-Mg minerálov a s poklesom koncentrácie $SiO_2$),
- plutonické horniny majú vo väčšine prípadov vyššiu hustotu v porovnaní s ich extruzívnymi ekvivalentami,
- pri rudných horninách stúpa hustota spolu so zvyšovaním koncentrácie rudných kovov, ich sulfidov a oxidov,

# hustoty hornín (prirodzené)

## magmatické horniny

Plutonické magmatické horniny:

syenit (2.6), granit (2.65), granodiorit (2.7), diorit (2.9), gabro (3.0), anortozit (), peridotit (3.4)

Extruzívne magmatické horniny:

trachyt (), ryolit (2.5), andezit (2.6), dacit (), bazalt (3.0)

Pozn.: Zaujímavosťou je pemza – ktorá má niekedy objemovú hustotu (suchej vzorky) menšiu ako 1 $g \cdot cm^{-3}$ (vďaka jej pórovitosti) a tým je schopná aj plávať na vode.

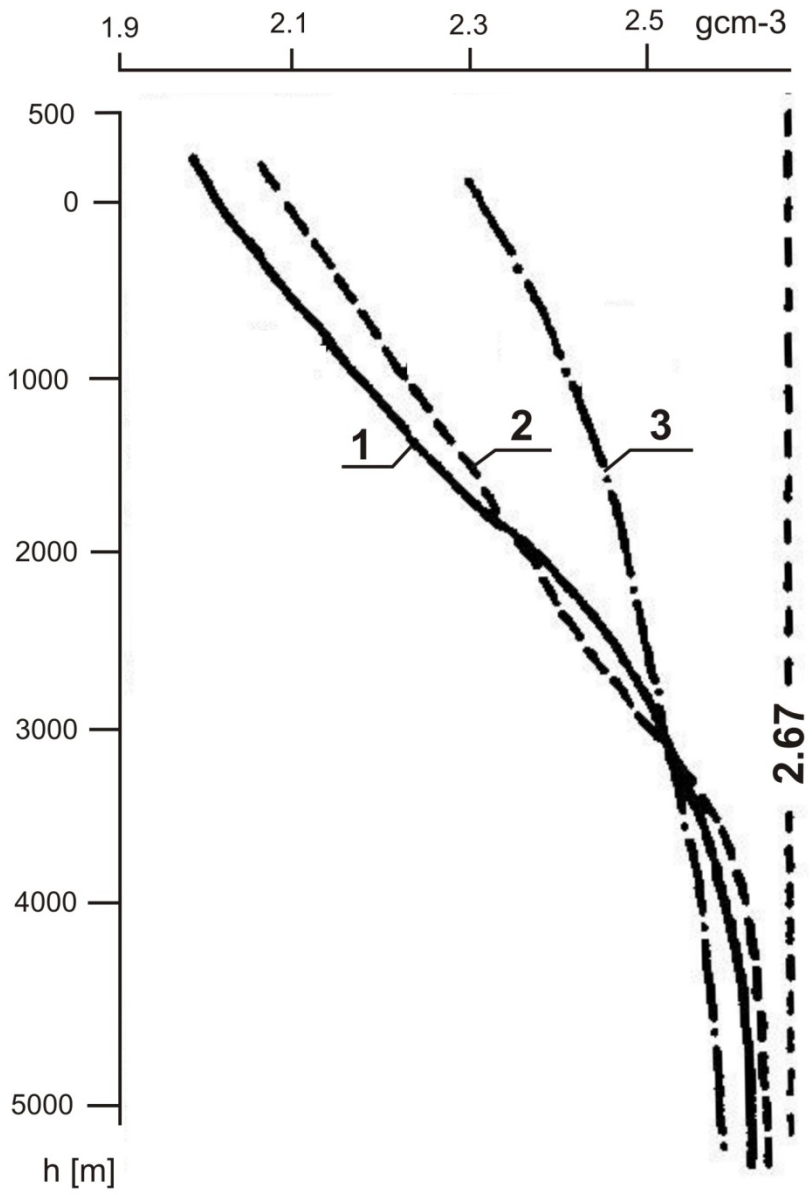
# hustoty hornín (prirodzené)

## sedimentárne horniny

- vo všeobecnosti patria medzi horniny s nižšou hustotou,
- hustota stúpa s vekom a hĺbkou, v sedimentárnych panvách dochádza v dôsledku vyššieho tlaku ku nasledujúcim fenoménom:
  a) premeny v usporiadaní a uložení zŕn,
  b) vypudzovanie vody, obsiahnutej v zrnách,
  c) deformácia a drtenie zŕn,
  d) rekryštalizácia minerálov do kompaktnejších sústav.
- priemerný rozsah: 2.0 - 2.6 $g \cdot cm^{-3}$)

## sedimentárne horniny

- dôležitý je nárast hustoty s hĺbkou




Obr. 3. Závislosť prirodzených hustôt na hĺbke panví. Vysvetlivky: 1 - viedenská panva, 2 - dunajská panva, 3 - Východoslovenská nížina (Šefara et al., 1987)

# hustoty hornín (prirodzené)

## sedimentárne horniny

Príklady:

hliny (2.0 – 2.2), íly (1.9), pieskovce (2.3), zlepence (2.4), aleurity (2.5), vápence (2.6), anhydrit (2.8), fulorit (3.0)

druhy uhlia: rašelina (0.8), hnedé uhlie (1.0), čierne uhlie (1.3), antracit (1.5)

Pozn.: Pri sedimentárnych horninách sa hustota veľmi mení pri suchej a vodou nasýtenej vzorke. Pre účely modelovania v gravimetrii používame výlučne hodnoty vodou nasýtených vzoriek.
Zaujímavé sú vlastnosti ílovitých hornín – v dôsledku zmršťovania ílov môže dôjsť ku poklesu hustoty až o 0.2 $g \cdot cm^{-3}$.

# hustoty hornín (prirodzené)

## **metamorfované horniny**

Príklady: kvarcit (2.6), fylit (2.75), mramor (2.8), serpentinit (2.8), chloritická bridlica (2.9), amfibolit (3.0)

- patria medzi horniny so strednou až vyššou hustotou,
- hustota je silne závislá od typu metamorfózy: pri kompakcii, prínose bázickejšej magmy a vzniku skarnov hustota stúpa, pri granitizáciia a prínose kyslej magmy klesá (aj pri serpetinizácii),

# hustoty hornín (prirodzené)

## metamorfované horniny

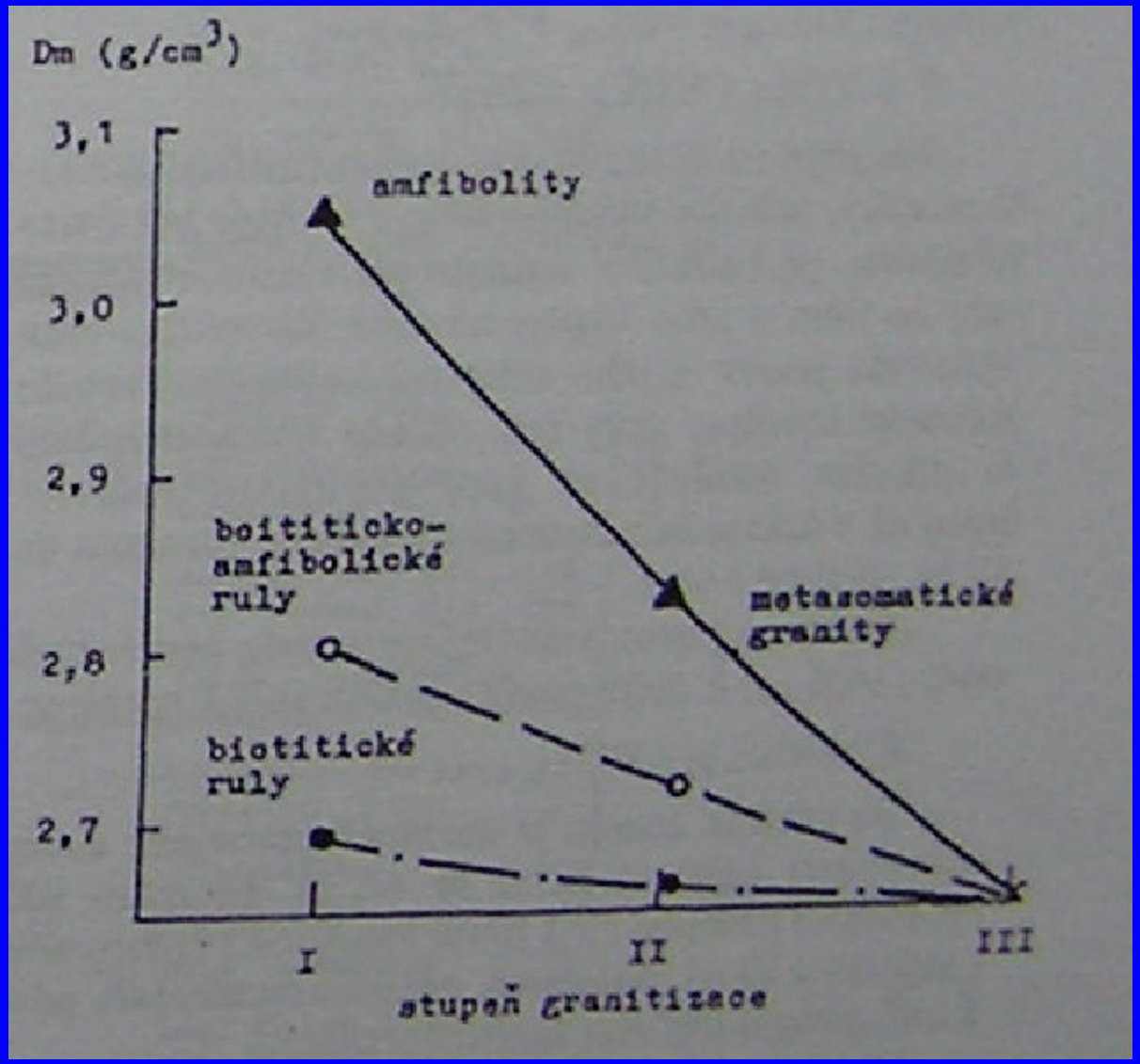
- zvetrávanie môže viesť u magmatických hornín ku poklesu až -0.05 $g \cdot cm^{-3}$.

- známy prípad poklesu hustoty je serpentinizácia ultrabázik - znižuje sa ich hustota so zvýšením serpentinizácie (olivín: 4.0 $\rightarrow$ serpentín: 2.6 $g \cdot cm^{-3}$)

- tektonicky postihnuté zóny vykazujú zníženú hustotu oproti svojmu okoliu (v dôsledku drtenia a hydrotermálnych premien).

# hustoty hornín (prirodzené)

## metamorfované horniny - granitizácia



# hustoty hornín, tabuľka príkladov

ktoré by sme mali (ako geofyzici) vedieť spamäti?

granit, bazalt, fylit, eklogit, pieskovec, vápenec, dolomit, nafta, uhlie, siderit, magnetit,...

| Horniny a nerastné suroviny | Interval hustôt [g.cm$^{-3}$] | Stredná hustota [g.cm$^{-3}$] | Horniny a nerastné suroviny | Interval hustôt [g.cm$^{-3}$] | Stredná hustota [g.cm$^{-3}$] |
|---|---|---|---|---|---|
| *Vyvrelé horniny* | | | | | |
| ryolit | 2,36-2.70 | 2,52 | diorit | 2,72-2,99 | 2,86 |
| andezit | 2.40-2,80 | - | diabáz | 2,60-3,20 | 2,91 |
| granit | 2,50-2,81 | 2,61 | bazalt | 2,70-3,30 | 2,99 |
| granodiorit | 2,67-2,79 | 2,73 | gabro | 2,70-3,50 | 3,03 |
| porfýr | 2,60-2,89 | 2,74 | pyroxenit | 2,93-3,34 | 3,17 |
| *Metamorfované horniny* | | | | | |
| kvarcit | 2,50-2,70 | 2,60 | serpentinit | 2,40-3,10 | 2,78 |
| fylit | 2,68-2,80 | 2,76 | chlor.bridl. | 2,75-2,98 | 2,87 |
| mramor | 2,60-2,90 | 2,77 | amfibolit | 2,90-3,04 | 2,96 |
| krem.bridl. | 2,63-2,91 | - | eklogit | 3,20-3,54 | 3,37 |
| *Sedimentárne horniny* | | | | | |
| *vodou nasýtená vzorka* | | | *suchá vzorka* | | |
| aluvium | 1,96-2,00 | 1.98 | | 1,50-1,60 | 1.54 |
| hlina | 1,63-2,50 | 2,21 | | 1,30-2,24 | 1,70 |
| piesok | 1,70-2,30 | 2,00 | | 1,40-1,80 | 1,60 |
| íl | 1,80-2,20 | 1,93 | | 1,20-1,80 | 1,43 |
| pieskovec | 1,61-2,76 | 2,35 | | 1,60-2,68 | 2,24 |
| vápenec | 1,93-2,90 | 2,55 | | 1,74-2,76 | 2,11 |
| dolomit | 2,23-2,90 | 2,70 | | 2,04-2,54 | 2,30 |
| *Nerudné minerály a niektoré nerastné suroviny* | | | | | |
| nafta | 0,60-0,90 | - | kamenná soľ | 2,10-2,60 | 2,22 |
| lignit | 1,10-1,25 | 1,19 | kaolinit | 2,20-2,63 | 2,53 |
| hnedé uhlie | 1,20-1,50 | 1,32 | kremeň | 2,50-2,70 | 2,65 |
| antracit | 1,34-1,80 | 1,50 | biotit | 2,70-3,20 | 2,92 |
| grafit | 1,90-2,30 | 2,15 | magnezit | 2,90-3,12 | 3,03 |
| *Rudné minerály* | | | | | |
| siderit | 3,70-3,90 | 3,83 | sfalerit | 3,50-4,00 | 3,75 |
| ilmenit | 4,30-5,00 | 4,67 | chalkopyrit | 4,10-4,30 | 4,20 |
| magnetit | 4,90-5,20 | 5,12 | pyrit | 4,90-5,20 | 5.00 |
| hematit | 4,90-5,30 | 5,18 | argentit | 7,20-7,36 | 7,25 |
| kasiterit | 6,80-7,10 | 6,92 | galenit | 7,40-7,60 | 7,50 |

**Príklad: tabuľka zo správy Husák a kol. (1991)**

HUSTOTY LITOSTRATIGRAFICKÝCH SÚBOROV V OBLASTI ŠTIAVNICKÝCH VRCHOV A POHRONSKÉHO INOVCA

Tab.č.9

| Litostratigrafické súbory | n | Do ($gcm^{-3}$) | | Dm ($gcm^{-3}$) | | p (%) | | Dp ($gcm^{-3}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\bar{x}$ | ds | $\bar{x}$ | ds | $\bar{x}$ | ds | $\bar{x}$ | ds |
| 1. Spodná stratovulk. stavba | 2226 | 2,37 | 0,28 | 2,67 | 0,09 | 11,11 | 9,70 | 2,48 | 0,19 |
| 2. Tanádsky intruz.kompl. | 709 | 2,61 | 0,10 | 2,70 | 0,05 | 3,22 | 3,16 | 2,64 | 0,07 |
| 3. Vulkanicko-sediment. komplex spod.bádenu | 124 | 2,11 | 0,27 | 2,62 | 0,08 | 19,28 | 9,88 | 2,30 | 0,19 |
| 4. Sebechlebská formácia | 24 | 1,89 | 0,31 | 2,57 | 0,09 | 26,33 | 11,94 | 2,15 | 0,20 |
| 5. Hodrušsko-štiavnický intruzívny komplex | 1002 | 2,63 | 0,08 | 2,69 | 0,06 | 2,14 | 2,21 | 2,65 | 0,07 |
| 6. Červenostudn.súvrst. | 43 | 2,16 | 0,27 | 2,68 | 0,07 | 19,49 | 9,78 | 2,36 | 0,20 |
| 7. Studenská formácia | 326 | 2,37 | 0,23 | 2,65 | 0,09 | 10,67 | 8,15 | 2,48 | 0,16 |
| 8. Intruz.kompl.Baniska | 116 | 2,59 | 0,10 | 2,67 | 0,06 | 2,87 | 2,97 | 2,63 | 0,08 |
| 9. Intruz.kompl.Zlatna | 289 | 2,63 | 0,08 | 2,69 | 0,06 | 2,09 | 2,08 | 2,65 | 0,06 |
| 10. Hlinícke ryolity | 94 | 2,32 | 0,23 | 2,59 | 0,10 | 10,51 | 6,83 | 2,43 | 0,17 |
| 11. Vrchná stratovul.stav. | 68 | 2,20 | 0,28 | 2,73 | 0,06 | 19,75 | 9,32 | 2,40 | 0,19 |
| 12. Ladzianské súvrstvie | 7 | 1,47 | 0,16 | 2,43 | 0,06 | 39,35 | 6,12 | 1,86 | 0,10 |
| 13. Badánská formácia | 21 | 2,24 | 0,42 | 2,54 | 0,05 | 11,93 | 15,60 | 2,36 | 0,27 |
| 14. Drastvická formácia | 46 | 2,24 | 0,25 | 2,73 | 0,06 | 17,93 | 9,40 | 2,42 | 0,15 |
| 15. Breznický komplex | 19 | 2,04 | 0,30 | 2,57 | 0,09 | 21,22 | 9,96 | 2,25 | 0,20 |
| 16. Inovecká formácia | 60 | 2,37 | 0,33 | 2,65 | 0,08 | 11,12 | 11,68 | 2,48 | 0,24 |
| 17. Jastrabská formácia | 32 | 2,20 | 0,32 | 2,58 | 0,09 | 13,73 | 12,53 | 2,34 | 0,22 |
| 18. Alkalické bazalty a bazanity | 7 | 2,78 | 0,13 | 2,81 | 0,11 | 1,30 | 0,91 | 2,79 | 0,10 |
| 19. Sedimenty Žiars.kotl. | 11 | 1,78 | 0,17 | 2,64 | 0,10 | 32,60 | 5,28 | 2,11 | 0,12 |
| 20. Pliocén | 6 | 2,10 | 0,54 | 2,64 | 0,10 | 21,03 | 17,51 | 2,31 | 0,37 |
| Predneogénne podložie | | | | | | | | | |
| 1. Paleogén | 46 | 2,58 | 0,20 | 2,72 | 0,06 | 5,00 | 7,06 | 2,63 | 0,16 |
| 2. Mezozoikum | 747 | 2,71 | 0,10 | 2,76 | 0,08 | 1,89 | 2,06 | 2,73 | 0,09 |
| 3. Mladšie paleozoikum | 941 | 2,67 | 0,08 | 2,72 | 0,07 | 1,65 | 1,63 | 2,69 | 0,09 |
| 4. Kryštalinikum | 227 | 2,68 | 0,08 | 2,72 | 0,07 | 1,30 | 1,13 | 2,69 | 0,08 |

## Zaujímavosť – hustoty rôznych druhov látok:

| | |
|---|---|
| asfalt | 1.3 |
| azbest | 2.1 – 2.8 |
| bakelit | 1.3 |
| betón | 2.3 – 2.4 |
| brondz | 7.8 – 8.8 |
| celuloid | 1.4 |
| tehla | 1.8 – 2.4 |
| cín | 7.31 |
| cukor | 1.6 |
| diamant | 3.5 |
| drevo (dub) | 0.63 – 0.72 |
| drevo (jaseň) | 0.56 – 0.64 |
| drevo (jedľa) | 0.48 – 0.56 |
| drevo (mahag) | 0.7 |
| dural | 2.8 |
| grafit (tuha) | 2.1 |
| guma | 0.96 – 1.30 |
| hliník | 2.7 |
| horčík | 1.74 |
| kaolín | 2.2 |
| keramika | 2.0 – 3.0 |
| korok | 0.15 – 0.2 |
| kosti | 1.7 – 2.0 |
| krieda | 1.8 – 2.6 |
| koža | 0.85 – 1.0 |
| ľudské telo po nadýchnutí | 0.945 |
| ľudské telo priemer | 0.985 |
| ľudské telo po vydýchnutí | 1.025 |
| meď | 8.96 |
| mosadz | 8.40 – 8.75 |
| nikel | 8.9 |
| nylón, polyamid | 1.1 |
| oceľ | 7.85 |

# Zaujímavosť – hustoty rôznych druhov látok:

zdroj:
http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm

| | |
|---|---|
| olovo | 11.34 |
| papier | 0.7 – 1.1 |
| parafín | 0.87 – 0.93 |
| platina | 21.45 |
| plexisklo | 1.18 |
| porcelán | 2.1 – 2.4 |
| PVC | 1.2 – 1.5 |
| sklo | 2.4 – 2.8 |
| striebro | 10.5 |
| soľ kuchynská | 2.16 |
| teflón | 2.1 – 2.3 |
| titán | 4.54 |
| uhlík | 2.25 |
| vosk | 0.95 – 0.98 |
| wolfrám | 19.3 |
| zinok | 7.14 |
| zlato | 19.32 |
| železo | 7.87 |

# pórovitosť

**pórovitosť:**

objem v hornine, ktorý je zaplnený kvapalnou a plynnou fázou

$$\phi = (V_{pl} + V_{kv}) / (V_{tv} + V_{kv} + V_{pl})$$

**koeficient pórovitosti:**

$$k_p = (V_{pl} + V_{kv}) / / (V_{tv} + V_{kv} + V_{pl}) \cdot 100 \ [\%]$$

**póry (podľa vzniku):**

- primárne (pri vzniku horniny),
  magmatické – pri tuhnutí magmy
  sedimentárne – priestor medzi granulami (úlomkami)
  metamorfované – medzikryštalické priestory
- sekundárne (neskôr vzniknuté)
  pri zvetrávaní, biochemických a biologických procesoch, tektonických procesoch, rekryštalizácii, ...

# pórovitosť

**póry (podľa rozmerov):**

určuje tzv. efektívny (stredný) priemer $d_{ef}$,
podľa veľkosti $d_{ef}$ delíme póry na:

1. hrubé nadkapilárne póry ($d_{ef}>10^{-1}$ mm)
   (hrubozrnné sedimenty, kavernózne karbonáty)
2. kapilárne póry ($d_{ef}\approx10^{-4}$ - $10^{-1}$ mm)
   (jemnozrnné sedimenty, stmelené horniny)

*póry kategórie 1 + 2 nazývame ako megapóry, v nich sa pórová voda pohybuje samovoľne*

3. tenké subkapilárne póry ($d_{ef}\approx10^{-6}$ - $10^{-4}$ mm)
   (prírodné adsorbenty, íly, dolomity, tufy)
   pórová voda sa takmer nehýbe
4. malé mikropóry ($d_{ef}<10^{-6}$ mm)
   (íly - zeolity)
   pórová voda pevne naviazaná na štruktúru horniny

# pórovitosť

**póry (podľa komunikácie):**
prepojené (odkryté) a neprepojené (zakryté),
pri odkrytých póroch sa ešte hovorí o tzv. účinnej a retenčnej pórovitosti

pozn.: v tejto súvislosti je dôležité spomenúť dva dôležité pojmy:

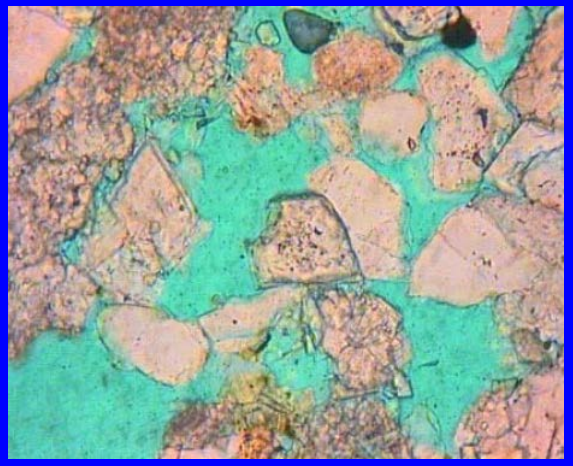
tzv. efektívna pórovitosť: popisuje maximálny objem pórov, v ktorých sa nachádza (môže nachádzať) voľná kvapalná fáza; rozlišuje sa prietoková a odtoková efektívna pórovitosť,

tzv. dynamická pórovitosť: popisuje objem pórov, v ktorých sa nachádza pohybujúca sa kvapalná fáza (pod vplyvom zmeny tlaku)

# metódy určovania pórovitostí

**výpočtom**

z určených hustôt (objemovej a mineralogickej) (podľa vzťahu: $\phi = 1 - \rho_o / \rho_m$)

**meraním**

- optickým spôsobom (z výbrusov)
- vtláčaním vody alebo ortute (vodná a ortuťná porometria)