

Petrofyzika – Hustota, pórovitost, propustnost



Martin Chadima
(František Hrouda a Marta Chlupáčová)

AGICO, s.r.o., Brno (chadima@agico.cz)

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Praha



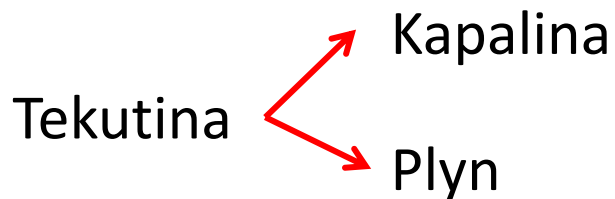
ADVANCED
GEOSCIENCE
INSTRUMENTS
COMPANY



Institute of Geology of the CAS, v. v. i.

Studované vlastnosti hornin

Horniny se skládají z pevné fáze (minerály), kapalná fáze (voda, ropa) a plynná fáze (plyn v pórech).

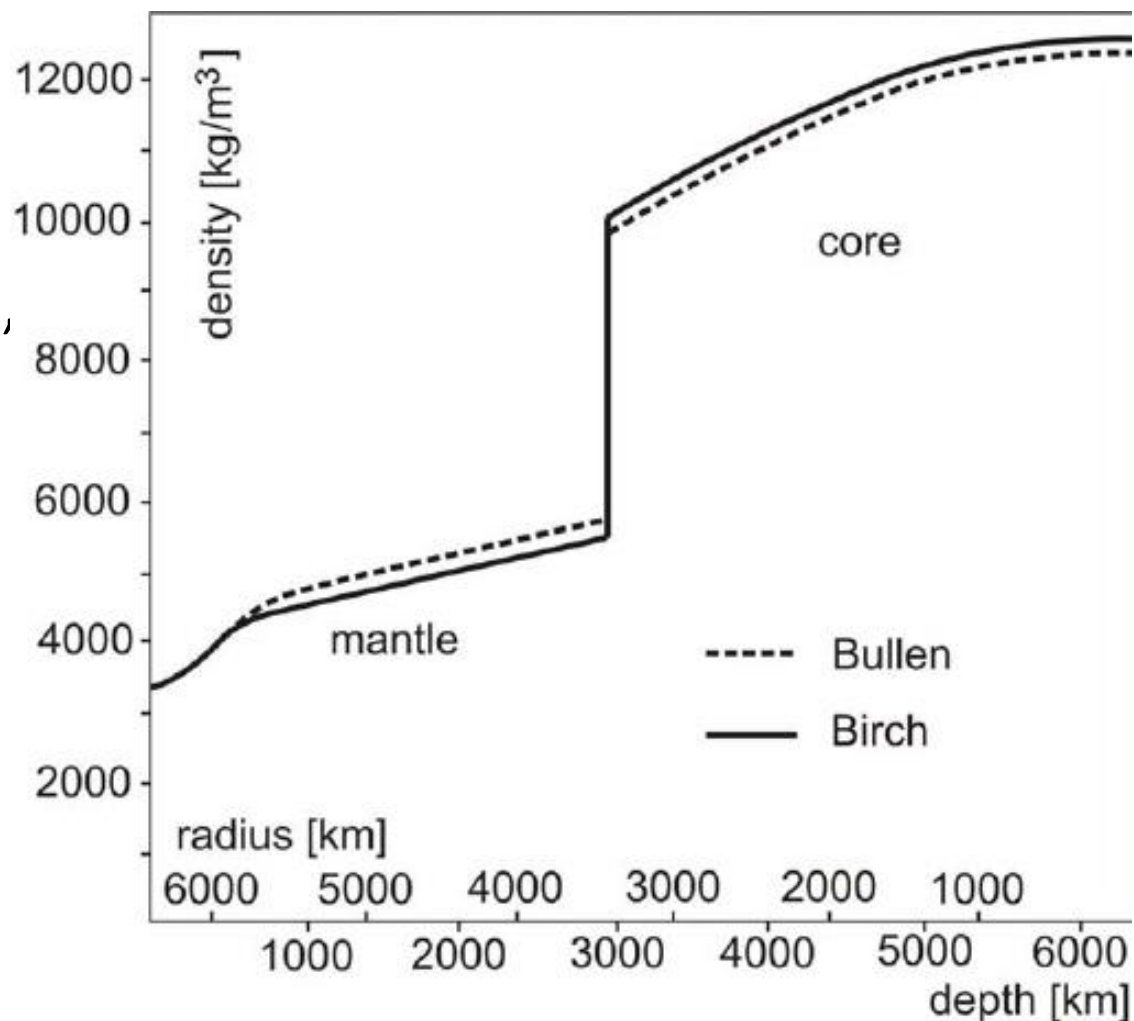


1. **Mineralogická hustota** – hustota pevné fáze horniny, která se řídí nerostným složením
2. **Objemová hustota** – hustota suché horniny včetně pórů nebo včetně tekutiny (vody) v pórech, závislá na složení hornin i na pórovém prostoru a jeho výplni
3. **Pórovitost** – udává relativní velikost pórového prostoru
4. **Propustnost (permeabilita)** – schopnost propouštět tekutiny vlivem gradientu napětí

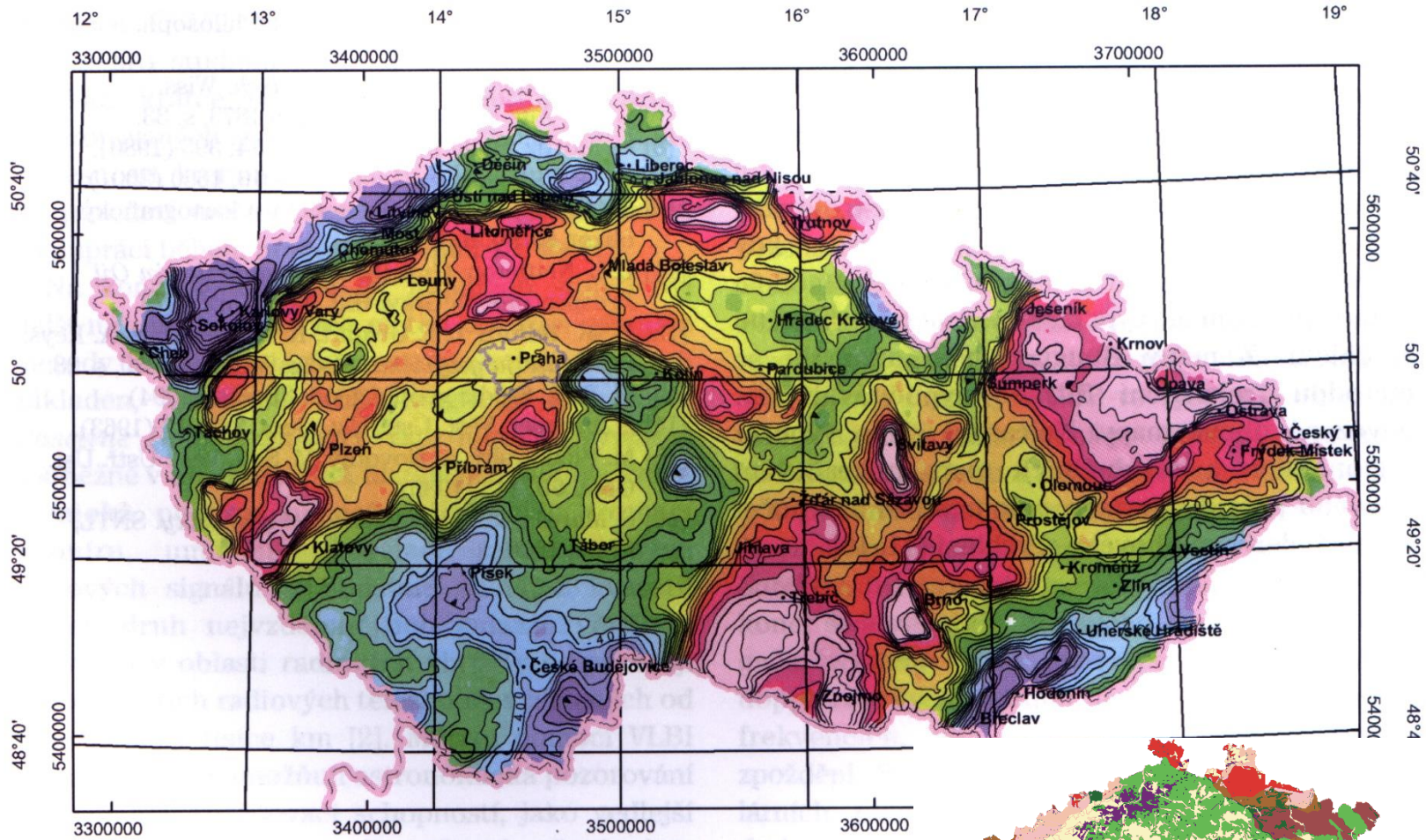
Hustotní stavba Země

Hustotní skok na hranici pláště a jádra potvrzuje seismologie, ale existuje několik modelů k jeho vysvětlení.

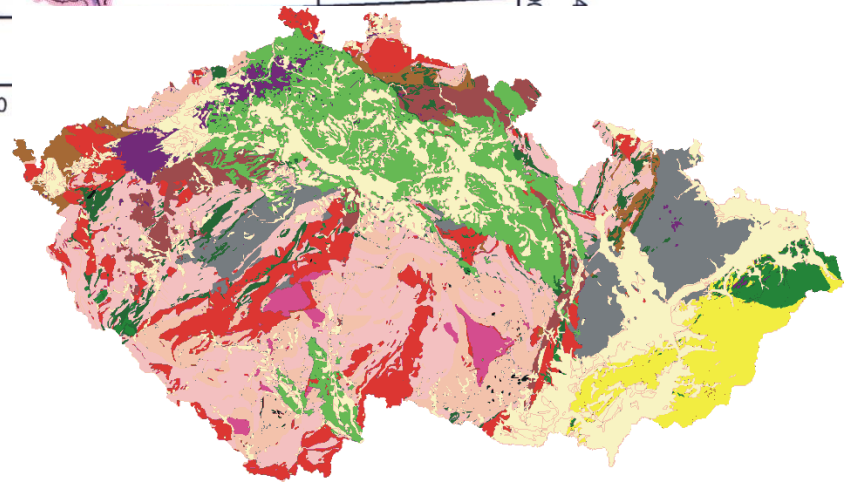
Na hranici Moho je hustota svrchního pláště $3,3 \text{ g/cm}^3$



Gravimetrická mapa České republiky



tíhová anomálie (mikrometr.sekunda-2)



Hustotní parametry

Hustota = **specifická hmotnost** = hmotnost objemové jednotky

Hustota: $D = m/V$ (rozměr $kg.m^{-3}$ [SI], $g.cm^{-3}$ [CGS])

- Mineralogická hustota $D_m = m_t / V_t$
- Objemová hustota $D_o = m_t / V$

Metody měření:

- D_o, D_m - metoda trojího vážení
- D_m - pyknometrická metoda

m_t - hmotnost pevné fáze

V_t - objem pevné fáze

V - celkový objem

V_p - objem pórů

1. Mineralogická hustota

- **Mineralogická hustota (D_m)** - hustota pevné fáze horniny
- Poměr hmotnosti pevné nerostné složky a jejího objemu

$$D_m = m_t / V_t$$

kde m_t - hmotnost pevné fáze, V_t - objem pevné fáze

- Skalární charakter
- Závisí pouze na nerostném složení
- Vážený průměr hustot jednotlivých minerálů podle jejich objemového zastoupení
- Mineralogickou hustotu lze přibližně vypočítat, známe-li objemové zastoupení jednotlivých minerálů, např. z planimetrické analýzy
- Zjišťuje se v laboratoři na velkých vzorcích (100 – 250 g)

2. Objemová hustota

- **Objemová hustota (D_o)**
- Poměr hmotnosti suché horniny (bez tekutiny v pórech) k jejímu celkovému objemu

$$D_o = m_t / V$$

kde m_t - hmotnost horniny, V – celkový objem

- Důležitý parametr pro geofyzikální interpretace i ve stavebnictví
- V horninách s přibližně konstantní mineralogickou hustotou je negativní lineární korelace mezi objemovou hustotou a pórovitostí
- V přírodních podmínkách se suché horniny téměř nevyskytují, pórový prostor je částečně nebo úplně pod hladinou spodní vody
- **Přirozená hustota (D_n)**, kde se musí uvažovat hmotnost horniny + hmotnost tekutiny v pórech (voda, ropa, plyn)

3. Pórovitost

- **Pórovitost (P)** – poměr objemu pórů k celkovému objemu suché horniny

$$P = V_p / V_d [\%]$$

- Základní parametr charakterizující pórový prostor
- Skalární veličina (i když vlastní pórový prostor má často strukturu, podmiňující anizotropii vlastností, které jsou na pórovém prostoru závislé)
- Pórovitost vypovídá pouze o relativní velikosti pórů
- **Celková pórovitost** – zahrnuje všechny póry (bez ohledu na to, zda komunikují nebo ne)
- **Otevřená pórovitost (P_o)** – zahrnuje jen otevřené póry (často $P = P_o$)
- Zavřená pórovitost (P_c)
- Efektivní pórovitost (P_{ef}) – poměr objemu pórů, ze kterých může být těžena ropa (charakterizuje prostor, ve které může dojít k filtraci tekutiny)

4. Propustnost

- **Propustnost, permeabilita (K)** – schopnost hornin propouštět tekutiny vlivem gradientu napětí

$$Q = KA / \mu \times dp / l$$

kde Q – průtočné množství; A – plocha, kterou tekutina kolmo protéká; μ – dynamická viskozita; dp / l – změna napětí na délce l , kterou tekutina protéká

- *Jednotky K* v soustavě SI [m^2 , μm^2]
- Dříve jednotka *darcy* [D] – 1D = průřez 1 cm^2 propustí za 1 s 1 cm^3 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ čisté vody); převodní vztah: $1 \text{ D} = 0,987 \mu m^2$
- V ideálním případě propustnost závisí pouze na geometrii pórového prostoru, ne na povaze filtrované tekutiny ani na nerostném složení horniny = absolutní propustnost
- Skutečná propustnost je však nižší
- Pro plyny je propustnost vyšší než pro kapaliny

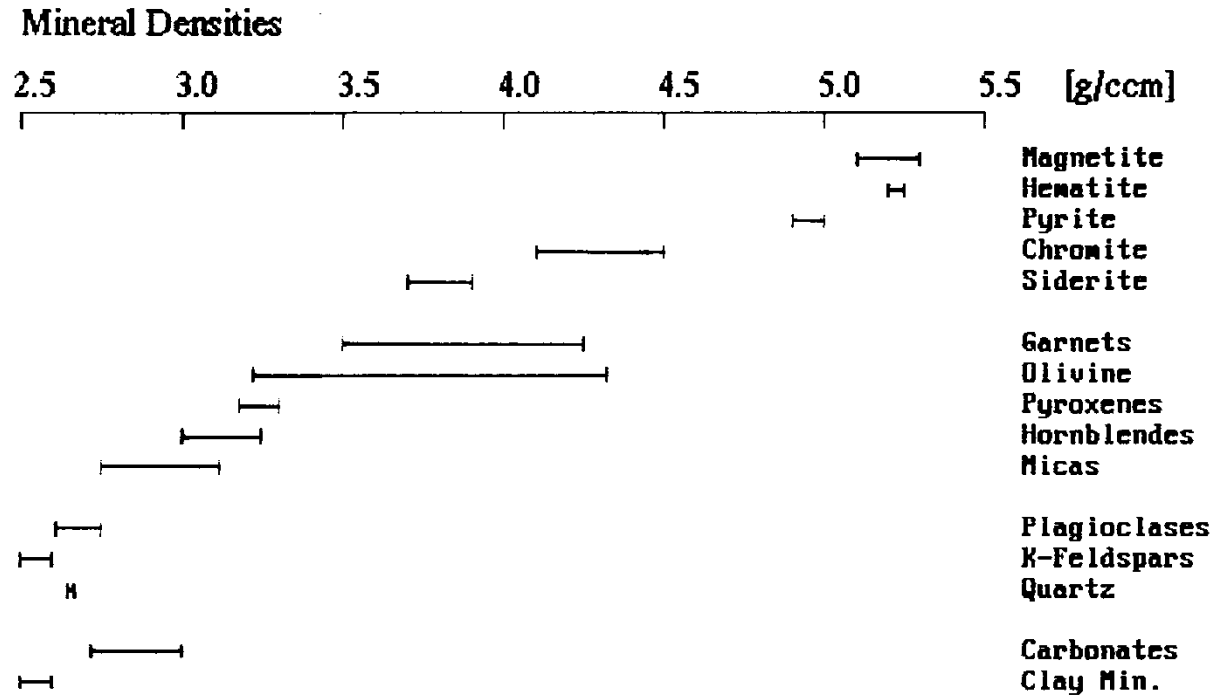
Mineralogická hustota

Hustoty minerálů

Mineral Compositions	Classification	Density (g/cm ³)
Quartz	/	2.65
Potassium Feldspar	/	2.55~2.63
Plagioclase	/	2.62~2.76
Calcite	/	2.71
Dolomite	/	2.84~2.86
Pyrite	/	4.95~5.10
Analcite	/	2.24~2.29
Clinoptilolite	/	2.15~2.16
Clay Minerals	Kaolinite	2.60~2.63
	Chlorite	2.60~3.30
	Illite	2.60~2.90
	Montmorillonite	1.70~2.00

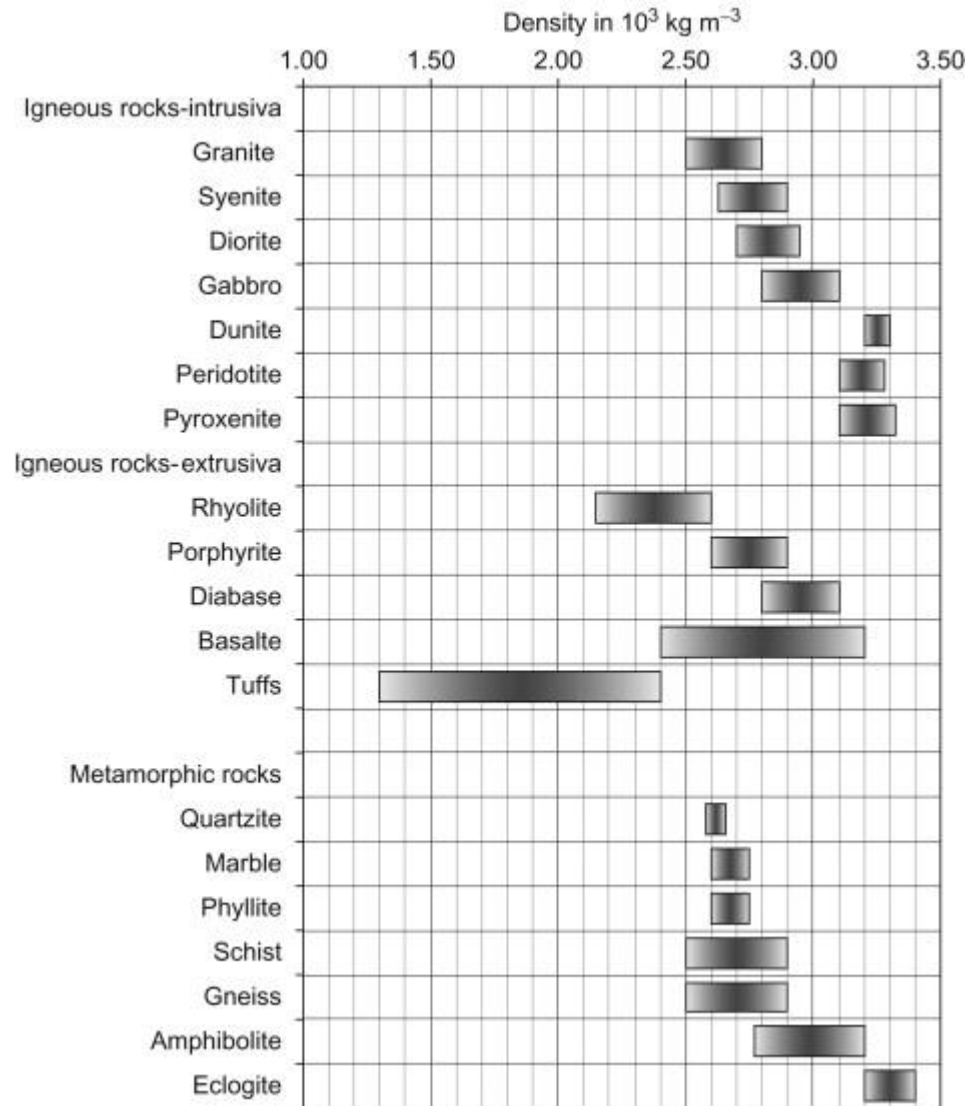
Mineralogická hustota

Hustoty minerálů



Mineralogická hustota

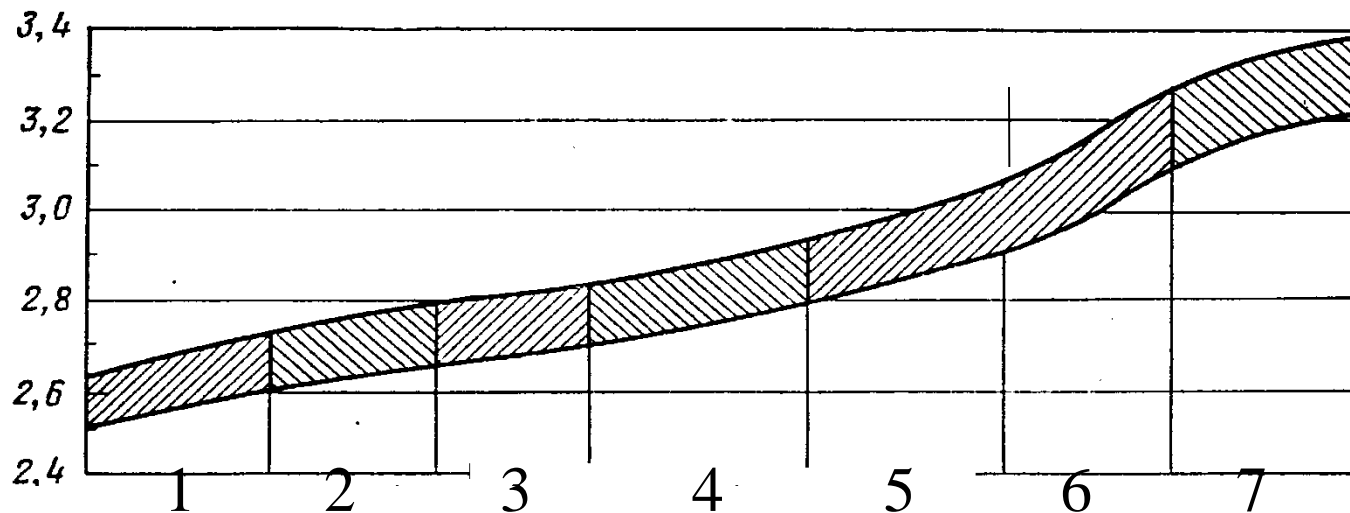
Hustoty hornin



Objemové hustoty hlubinných magmatických hornin

- závisí na minerálním složení
- u hlubinných vyvřelin rostou obecně s bazicitou
- u granitů s. l. závisí především na obsahu křemene a obsahu a povaze živců, varírují s obsahem slíd a amfibolu
- u gaber a ultrabazik mají na ně vliv i minerály rudní

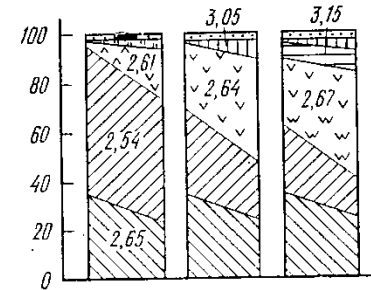
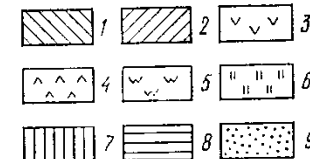
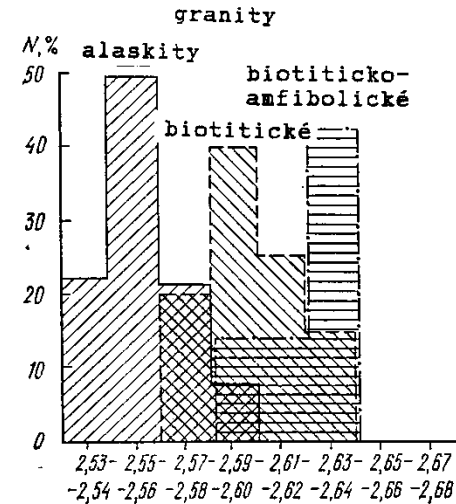
$D, \text{g/cm}^3$



1. *granit*
2. *granodiorit*
3. *křem. diorit*
4. *diorit*
5. *gabro*
6. *pyroxenit*
7. *peridotit*

Objemové hustoty granitů

Objemová i mineralogická hustota granitů stoupá s přibývajícím množstvím slíd a amfibolu



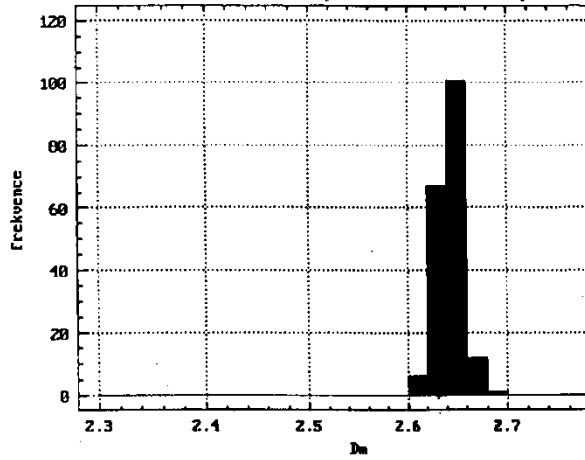
1 křemen, 2 mikroklin, 3 albit, 4 oligoklas, 5 andezin
6 muskovit, 7 biotit, 8 amfibol, 9 akcesorie

Hustota a minerální složení

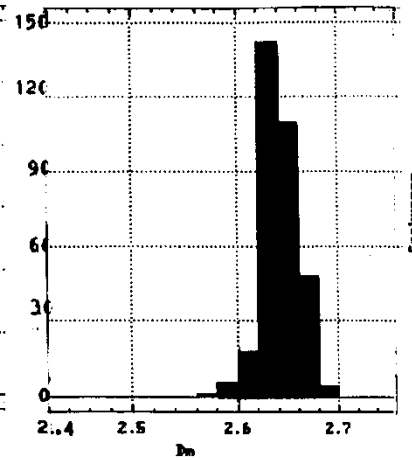
granitických hornin kyselého složení

Hustoty granitů Českého masívu

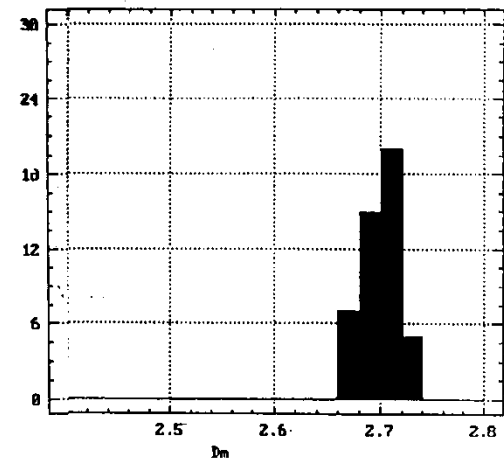
Karlovarský masív, krušnohorské žuly



Karlovarský masív, horaké žuly

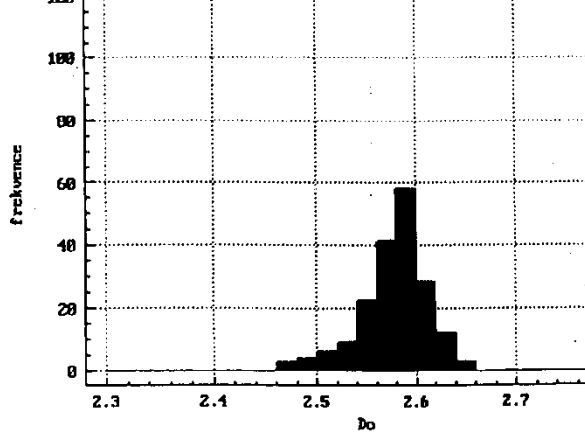


Středočeský pluton, blatenský granodiorit

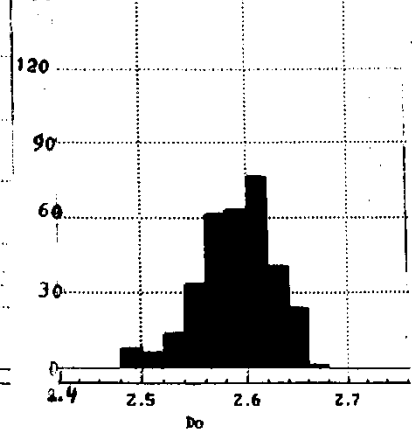


D_m [g/cm³]

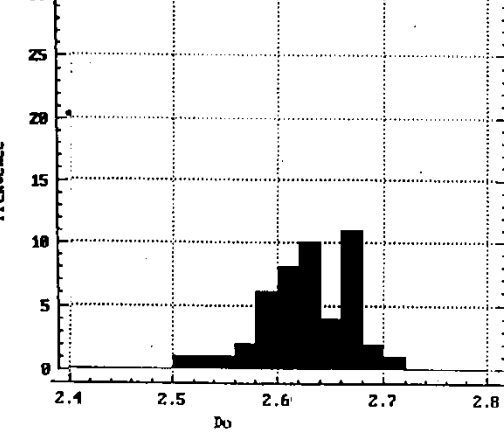
Karlovarský masív, krušnohorské žuly



Karlovarský masív, horaké žuly



Středočeský pluton, blatenský granodiorit



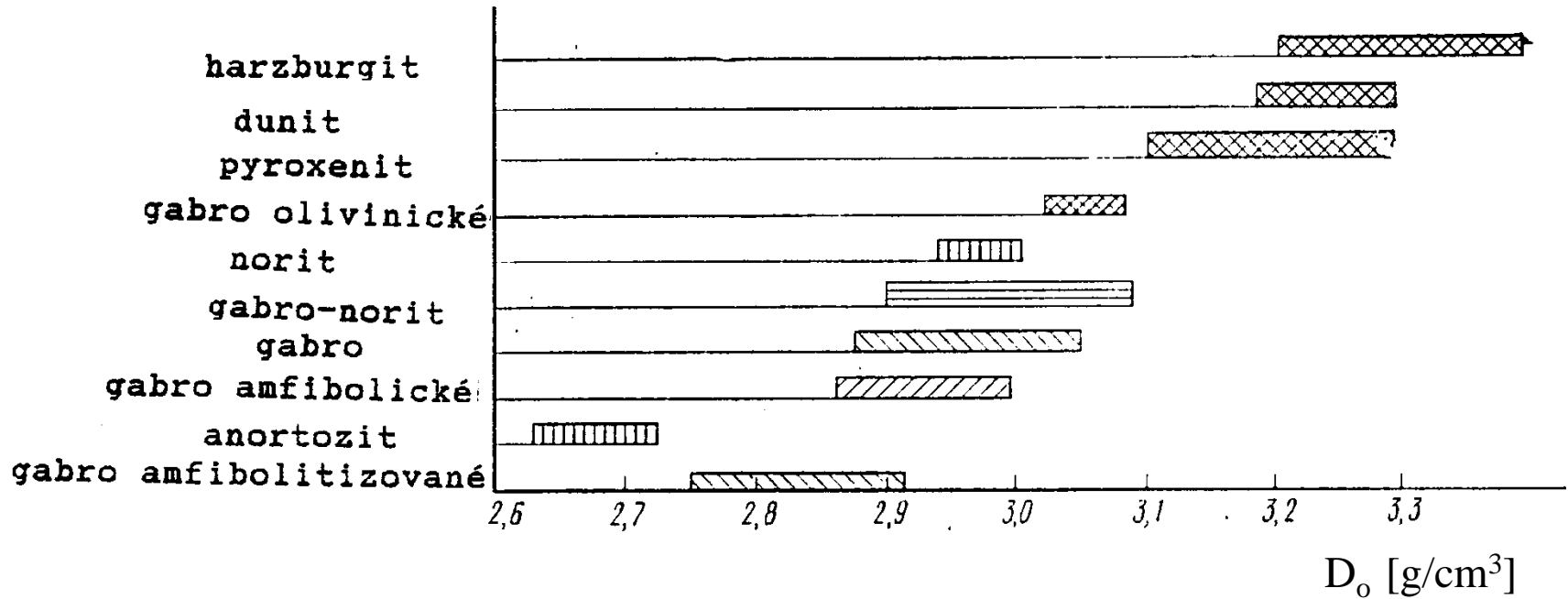
65

64

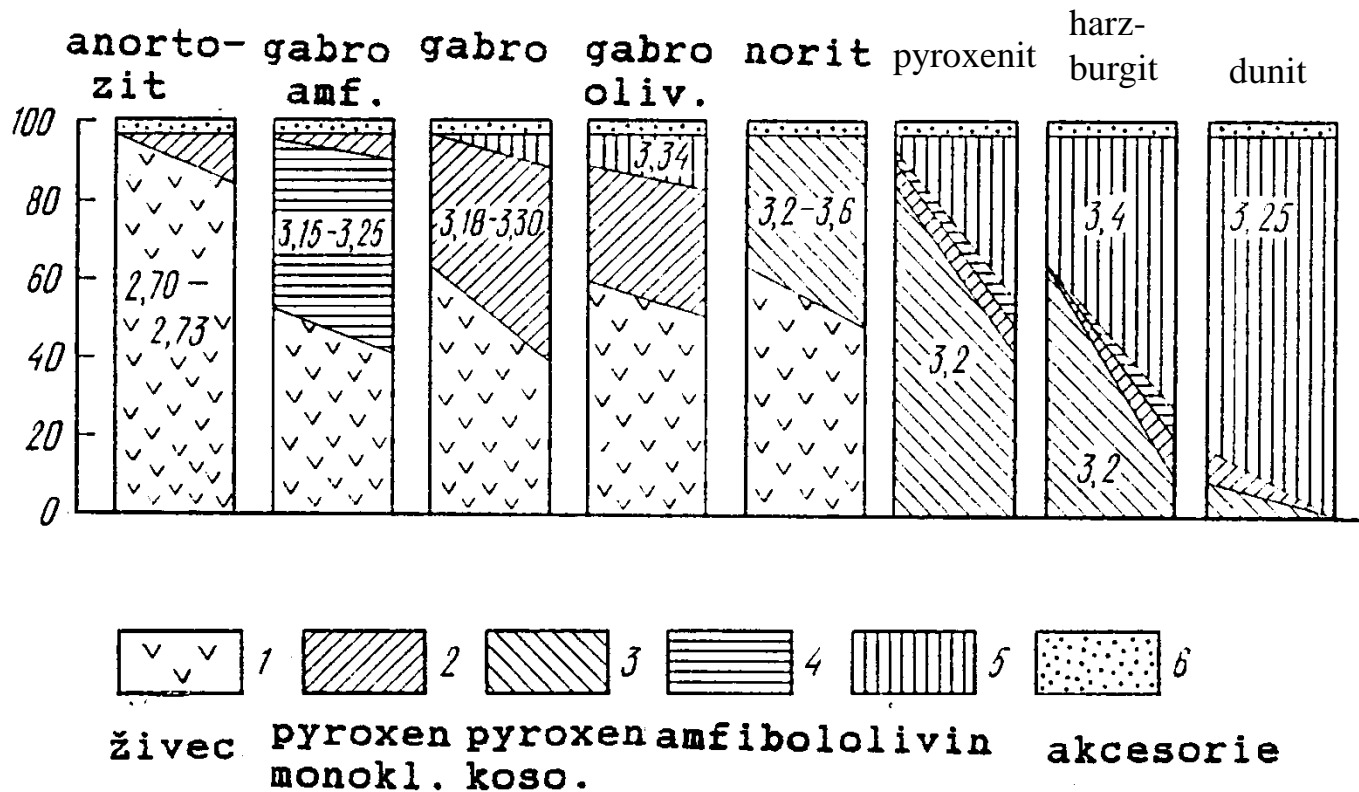
66

D_o [g/cm³]

Objemové hustoty bazických a ultrabazických hornin



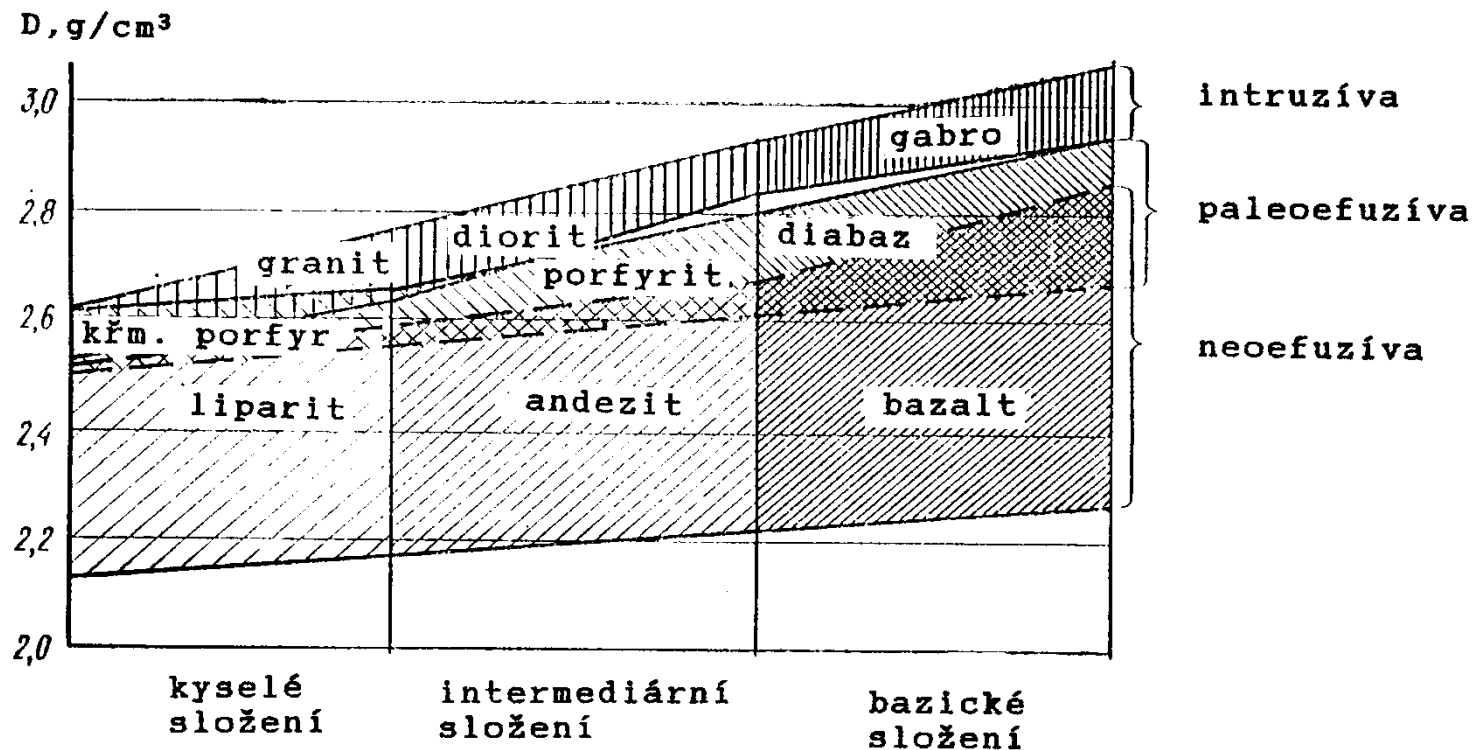
Hustoty bazik a ultrabazik



Rozpětí změn hustoty a minerální složení hornin skupiny gabra a metabazitů

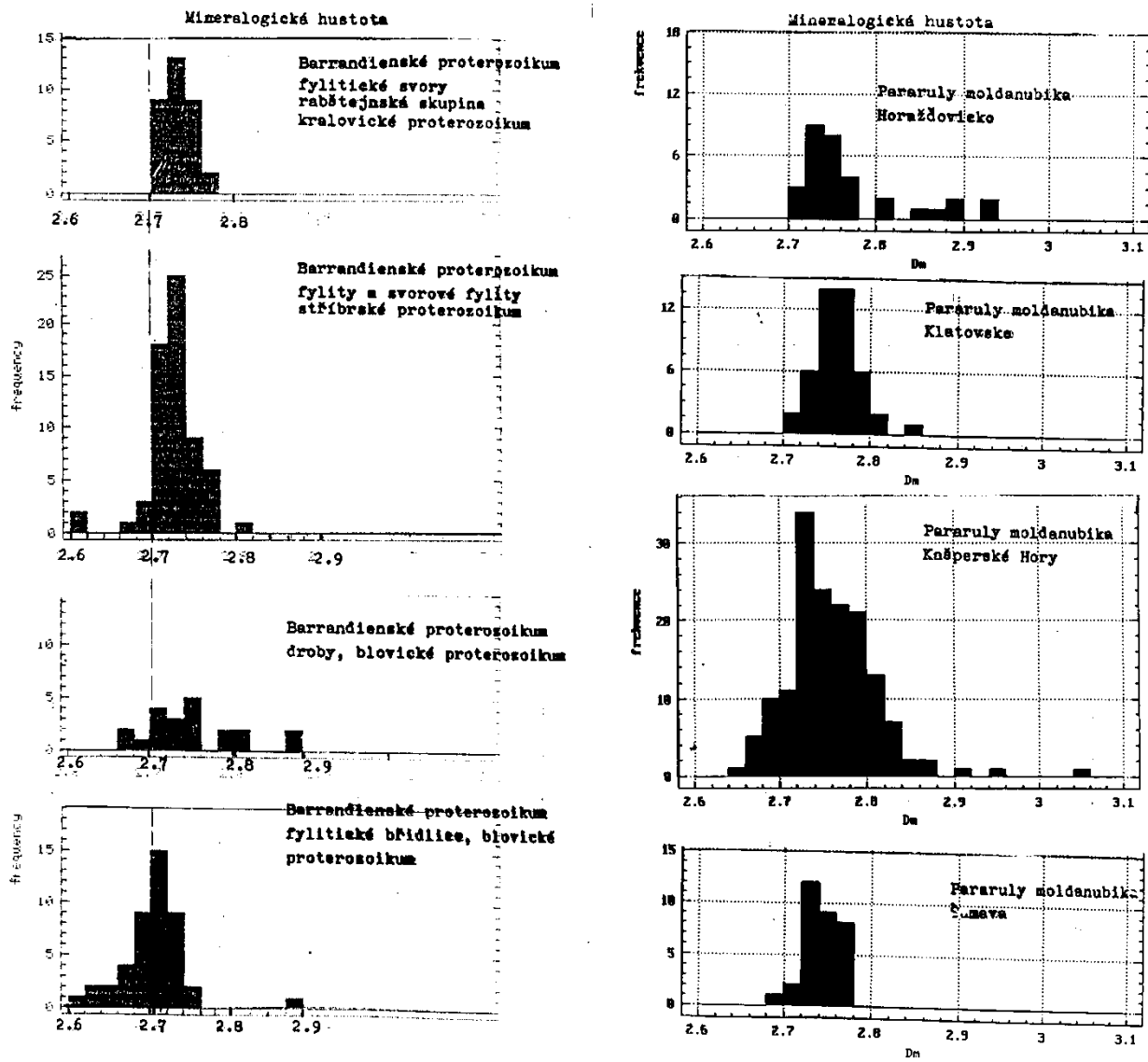
Objemové hustoty vulkanických hornin

- závisí na složení, struktuře (sklovitá, pórovitá), stáří
- jsou nižší než u intruzív stejného chemického složení
- jsou nižší u neovulkanitů než u paleovulkanitů (rekrystal., deform.)
- u pórových láv nízké, nejvyšší u masívní, nejnižší u pemzové textury, velmi tedy závisí na pórovitosti



Hustoty metamorfitů Českého masívu

Dm [g/cm³]



Hustoty eklogitů

Eklogity jsou horniny s nejvyšší hustotou v zemské kůře, až $3,5 \text{ g cm}^{-3}$.

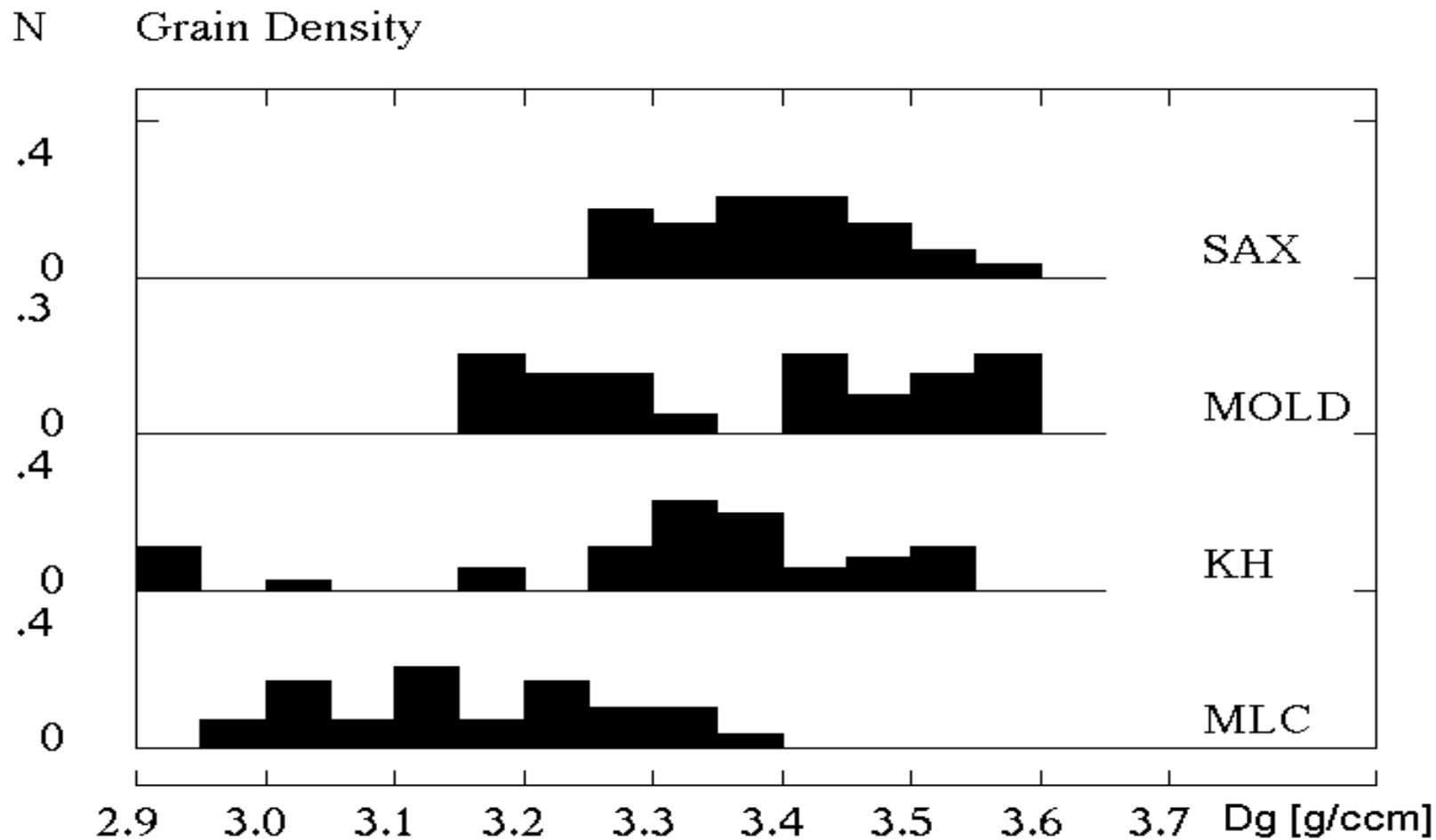
(Vyšší hustoty mají jen horniny silně zrudněné a rudy.)

Jejich mineralogická hustota se od hustoty objemové liší jen nepatrně, pórovitost je okolo 0,1 %.

- Vyšší hustotu mají eklogity vzniklé z oceánské kůry, menší mají eklogity vzniklé z peridotitů (pokud vznikají ve stejné hloubce)
- Hustota eklogitů závisí na maximální hloubce, které dosáhly při subdukci a proběhla hlavní fáze jejich metamorfózy
- Hustota eklogitů klesá s intenzitou retrogrese. Symplektizace a amfibolizace hustotu eklogitů snižují.

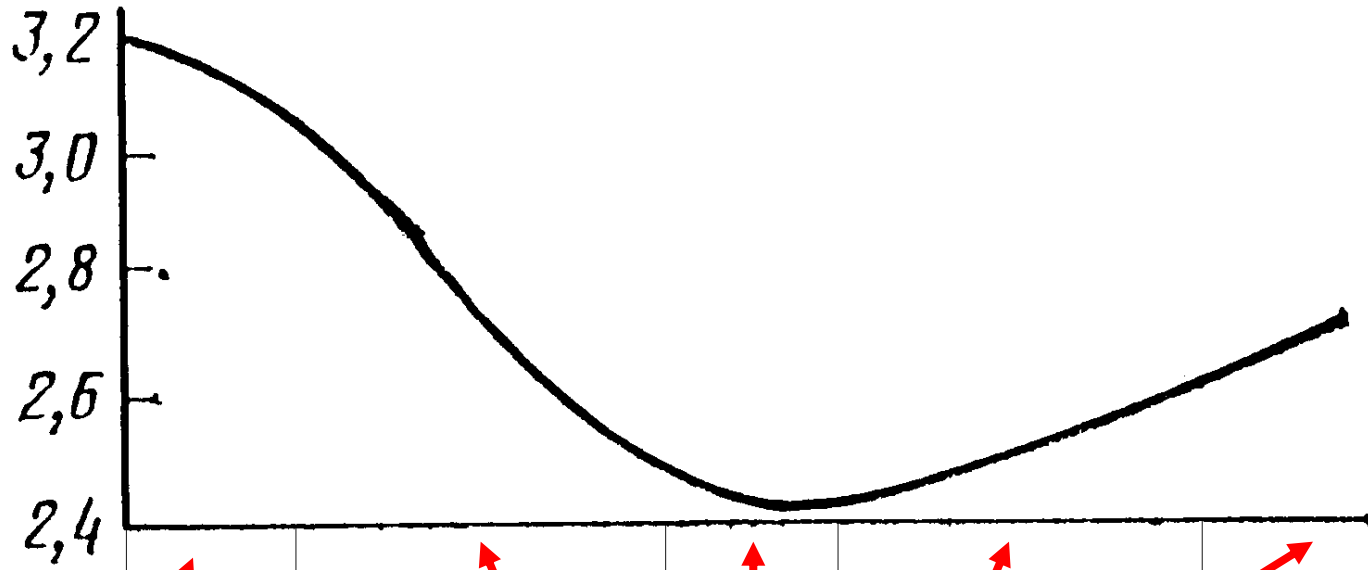
Eklogitům se hustotně blíží některé modré břidlice.

Hustoty eklogitů ČM



Hustoty a serpentinizace

$D, g/cm^3$



ultrabazity

serpentinizované ultrabazity
serpentinizované ultrabazity

karbonatizované serpentinity

karbonatizované serpentinity

Vysokoteplotní přeměny

- Migmatitizace - snižuje hustotu rul až k $2,65 \text{ g/cm}^3$ – vliv živců a křemene
- Cordieritizace - snižuje hustotu rul až k $2,68 \text{ g/cm}^3$ - vliv křemene a cordieritu
- Retrogrese eklogitů do granulitové a amfibolitové facie - snižuje hustotu až ke $2,80$ z původních $3,30 - 3,50 \text{ g/cm}^3$ - vznik plagioklasů, přeměna granátů a pyroxenů, vznik amfibolů a křemene

Metasomatóza v okolí rudních ložisek

- **Silicifikace** - Do i Dm se přibližuje k hustotě křemene, zmenšuje se i pórovitost (póry se ucpávají)
- **Kaolinizace**, zjílovatění živců - klesá Dm a výrazně Do, zvyšuje se pórovitost
- **Karbonatizace** - v případě dolomitizace, ankeritizace a sideritizace stoupá s obsahem Fe a intenzitou procesu Do i Dm a klesá pórovitost (póry se ucpávají)
- **Sericitizace** - stoupá Dm, někdy i Do, ale pórovitost se obvykle značně zvětšuje
- **Adularizace** - **přínos K, Na**, nízkoteplotní živce. Snižuje se Dm, ale zmenšuje se i pórovitost (póry se ucpávají)
- **Alkalická metasomatóza** - **přínos K, Na** - jílové minerály, alkalické živce - Dm se snižuje
- **Zrudnění** - Do i Dm se podstatně zvyšují - viz hustoty rudních minerálů - v okolí rudních ložisek pyrit, pyrhotin, magnetit-aureoly

Hustoty sedimentů

- Řídicí parametry: minerální složení a významně se podílí **pórovitost**
- Objemové hustoty jsou zpravidla nižší než u metamorfitů a hlubinných magmatitů, neplatí to pro železité slepence, dolomity, ankerity a siderity.
- V pánvích existuje závislost na diagenetickém zpevnění a hloubce, ale mocnost není rozhodující pro pórovitost příkrovových sekvencí, např. karpatského flyše.
- Recentní nezpevněné sedimenty se vyznačují vysokou pórovitostí, až do 50 %, a velice nízkou D_0 .
- Nízké hustoty, jsou charakteristické pro uhlí, diatomity a organogenní břidlice.

Pórovitost sedimentů Českého masívu

psamity

prachovce

pelity

