

Petrografie pro analytické geochemiky

Metamorfované horniny

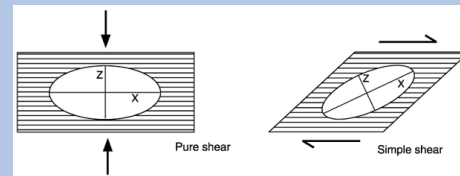
Metamorfóza

Obvykle:

- Zvýšená teplota
 - Minerály se zbavují vody, oxidu uhličitého (vyšší metamorfóza vede k sušším horninám)
 - Minerální zrna jsou větší (hrubší)
- Zvýšený tlak
 - Minerály zvyšují svoji hustotu (vyšší metamorfóza vede k „těžším“ horninám)

Na kontinentech

- Skoro vždy spojená s deformací
- Vzniká **foliace** („metamorfní břidličnatost“), někdy i lineace (usměrnění minerálů v ploše)
- Dvě možnosti:
 - Stlačením = čistý stříh (pure shear)
 - Prokluzem = jednoduchý stříh (simple shear)



Vrstevnatost vs. foliace (klivář)



Metamorfní protolit

Protolit představuje původní horninu, která to byla před metamorfózou. Za nižších metamorfních podmínek je stavba protolitu často zachována. Za vyšších metamorfních podmínek původní stavba protolitu setřena metamorfni foliací a rekrystalizací. Na protolit potom usuzujeme jen z chemického složení horniny.

Horniny různého složení (protolitu) se během metamorfózy chovají odlišně, za stejných PT podmínek tedy z hornin různého chemického složení vzniknou jiné metamorfované horniny.

Pelity: jedná se o Al bohaté sedimentární horniny (původně jílové minerály, slídy, živce) s vysokým obsahem vody. Vyšší obsah Al_2O_3 než v jiných horninách, tedy při metamorfóze vznikají charakteristické Al-bohaté minerály: slídy (Ms) kyanit, sillimanit, andalusit, Grt, Tur, staurolit,...

Quartzo-Feldspathic: granitoidy, arkózy s vysokým obsahem stabilních křemene a živců a nízkým obsahem minerálů s vodou. Oba stabilní za velkého rozpětí PT podmínek. Při metamorfóze (nižší až střední stupně) tyto horniny značně stabilní, bez výrazných změn.

Vápenaté horniny: Ca bohatý protolit. Obvykle vápence, slínovce. S rostoucí metamorfózou vedle karbonátů vznik Phl, Chl, tremolit (Ca-amfibol) za ještě vyšších diopsid (Cpx), forsterit (Mg olivín) wollastonite, grosulár (CaAl granát), Ca plagioklas.

Bazické/ultrabazické horniny: bazalty a gabra/peridotity. Protolit s vysokým podílem tmavých minerálů a plagioklasy bazické. V metamorfovaných horninách rovněž.

Fe-bohaté horniny: Fe-bohaté sedimentární rudy (např. BIF). Při metamorfóze vznik Fe bohatých silikátů (Fe-Mg amfibolů, Fe mastek, hematit, magnetit za nízkých metamorfních podmínek, Fe bohaté olivíny, pyroxeny (Opx, Cpx), granáty za vyšších metamorfních stupňů.

Koncept metamorfních facií

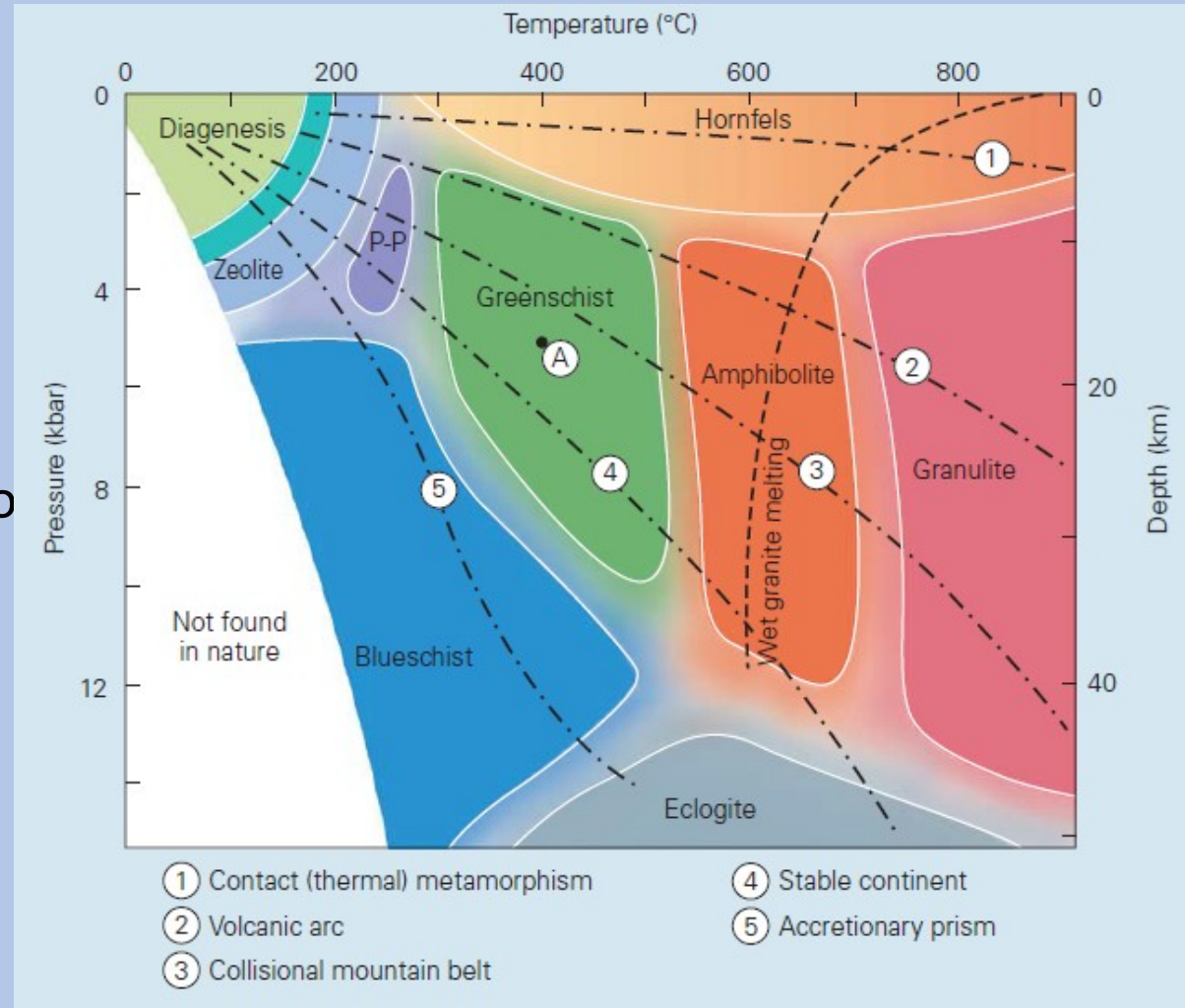
- Navržený Eskolou (1915) na základě studia metamorfovaných bazických hornin.
- **Metamorfní facie** je dána skupinou metamorfních minerálů (minerální asociace) vzniklých typicky za daných PT podmínek v horninách různé litologie. Rozlišeno několik facií, jejich **názvy podle minerálů**, které jsou charakteristické pro **metabazika**. Ale stejný název facie užíváme i pro horniny jiného protolitu (např. metapelity) metamorfované za stejných PT podmínek společně s těmito metabaziky, i když v těchto horninách (např. metapelitech) nejsou metamorfní minerály, které vznikají v metabazikách a definují tuto facii. Např. ve facii amfibolitové, vznikají amfiboly (hornblend) jen v metabazikách, ale nevznikají v metapelitech. Přesto hovoříme o tom, že tyto metapelity jsou metamorfované v amfibolitové facii (ale jsou tam jiné indexové metamorfní minerály, charakteristické pro metapelity v amfibolitové facii).
- **Hranice facií** jsou **definované vznikem/zánikem** těchto indexových **minerálů** v dané metabazické hornině, **ne** přesnými **PT podmínkami**. PT podmínky vzniku a zániku jednotlivých minerálů se v závislosti na chemickém složení metabazik mírně liší a tedy pro každý region je pozice PT podmínek jednotlivých facií mírně odlišná.

Meetamorfní režimy a facie v různých geotektonických prostředích

- PP = prehnit-pumpellyitová facie

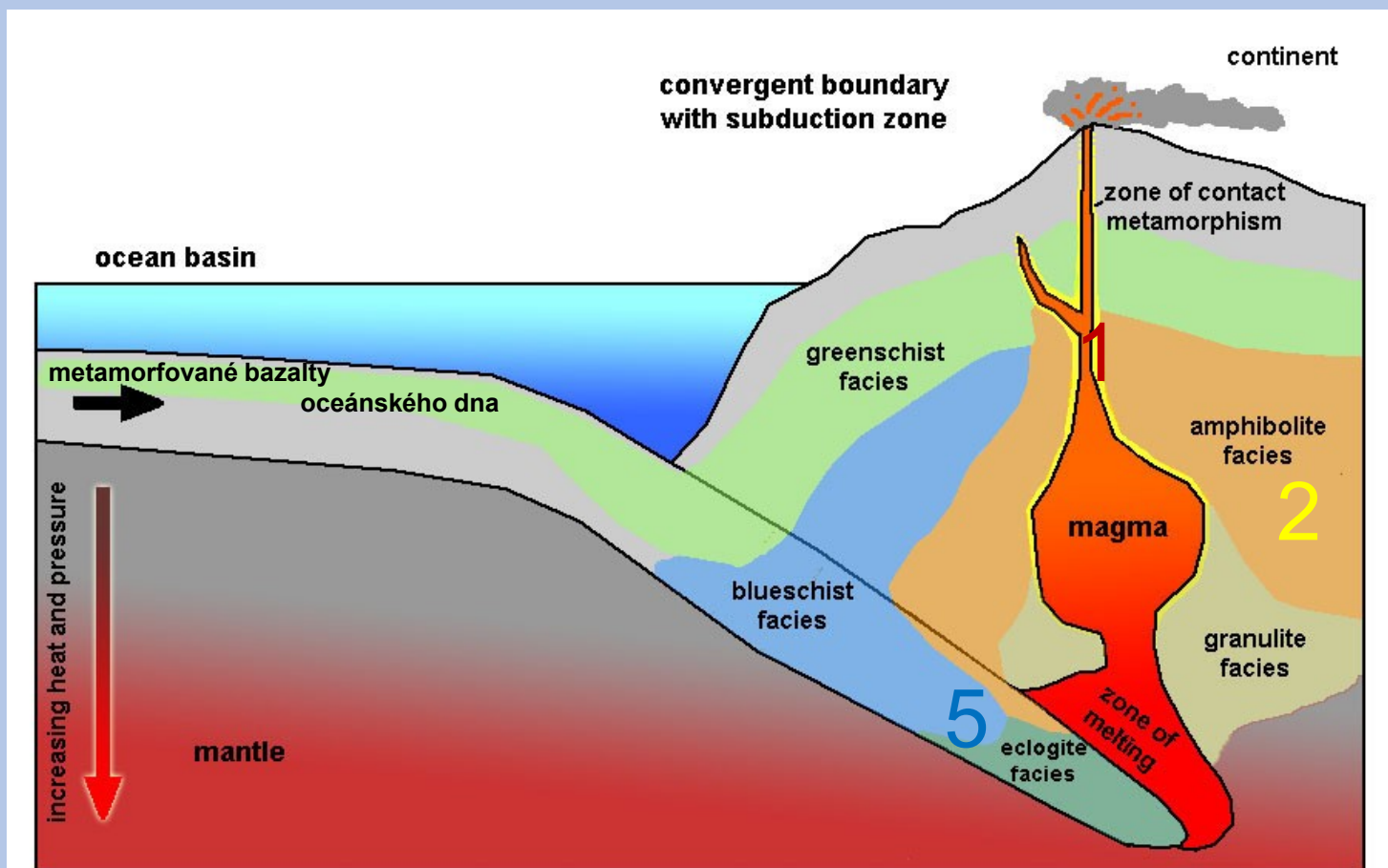
Meetamorfní režimy v různých geotektonických prostředích

- 1 – kontaktní metamorfóza
- 2 – reg. metamorfóza v oblasti hornin ostrovní oblouku
- 3 – reg. met. kolize kontinent-kontinent
- 4 – metamorfóza stabilních kontinentů
- 5 - metamorfóza v subdukované oceánské desce pod kontinent



VZNIK METAMORFOVANÝCH HORNIN

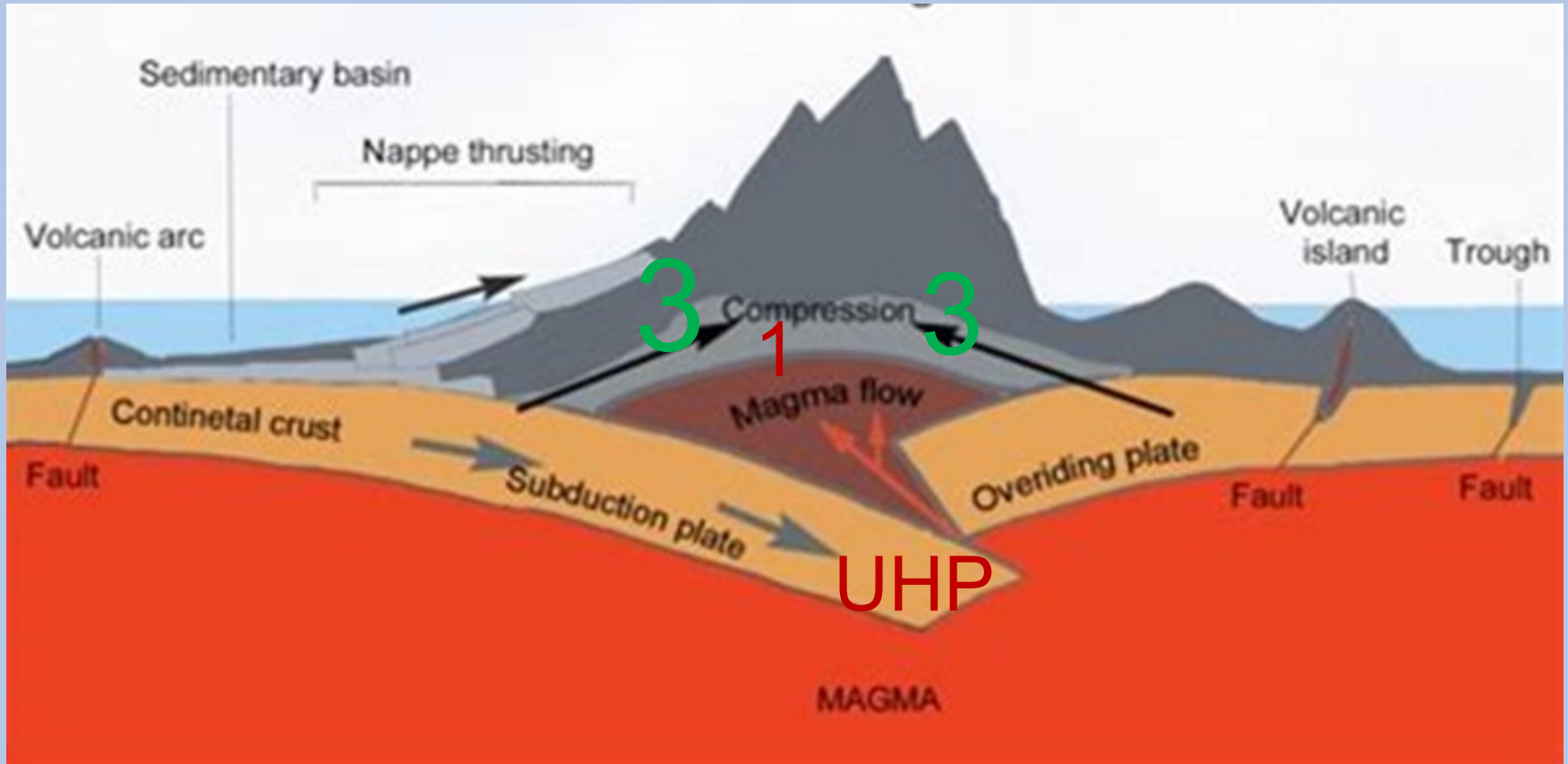
- kolize oceán – kontinent (2 – regionální metamorfóza v ostrovním oblouku, 5 – metamorfóza high P/low T subdukované desky, 1 – kontaktní metamorfóza)
- pozor – horniny svrchní části oceánské kůry (bazalty oceánského dna) jsou metamorfované ve faciích zelených břidlic – tzv. metamorfóza oceánského dna (nesouvisí s kolizí oceánské desky s kontinentální)



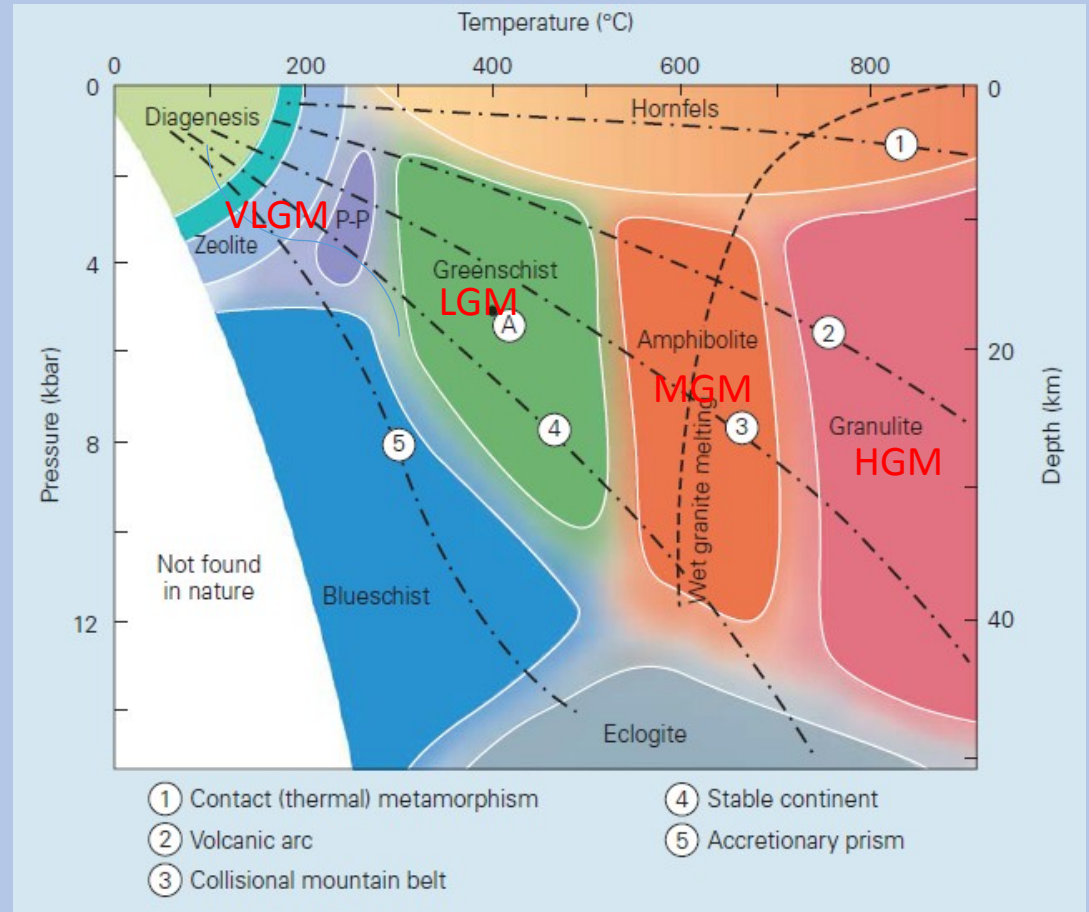
Vztah metamorfních režimů a geotektonického prostředí

Srážka kontinentálních desek – kolize kontinent - kontinent

Vznik Alp či Himalájí (vrásových pohoří), s intenzivní regionální metamorfózou korových hornin v důsledku komprese (typ 3) a periplutonickou metamorfózou (typ 1) a UHP metamorfózou



Koncept metamorfních facií



diagenese

VLGM - very low grade metamomorphism

LGM - low grade metamomorphism

MGM - medium grade metamomorphism

HGM - high grade metamomorphism

UHP metamorphism (mimo toto PT pole)

Prográdní a retrográdní metamorfóza

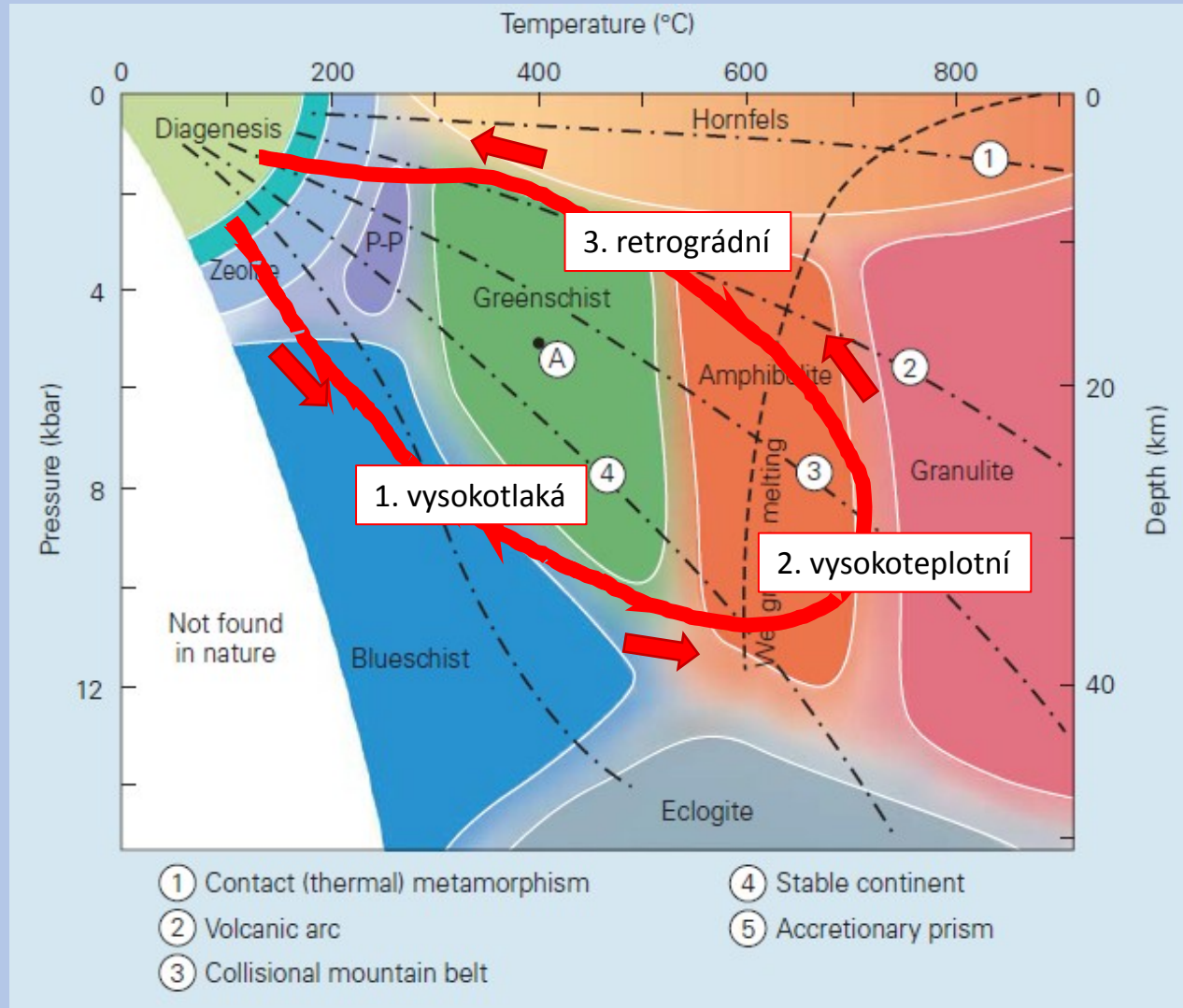
Průběh metamorfózy:

Prográdní metamorfóza
(s růstem PT podmínek – ponoření hornin)

1. Studené zasouváno do hloubky → vysokotlaká met.
2. Zahřátí v hloubce → vysokoteplotní met.

Retrográdní metamorfóza
(s poklesem PT podmínek = cesta hornin k povrchu)

3. Chladnutí a výzdvih → retrográdní met.



Metamorfóza ve facii zeolitové

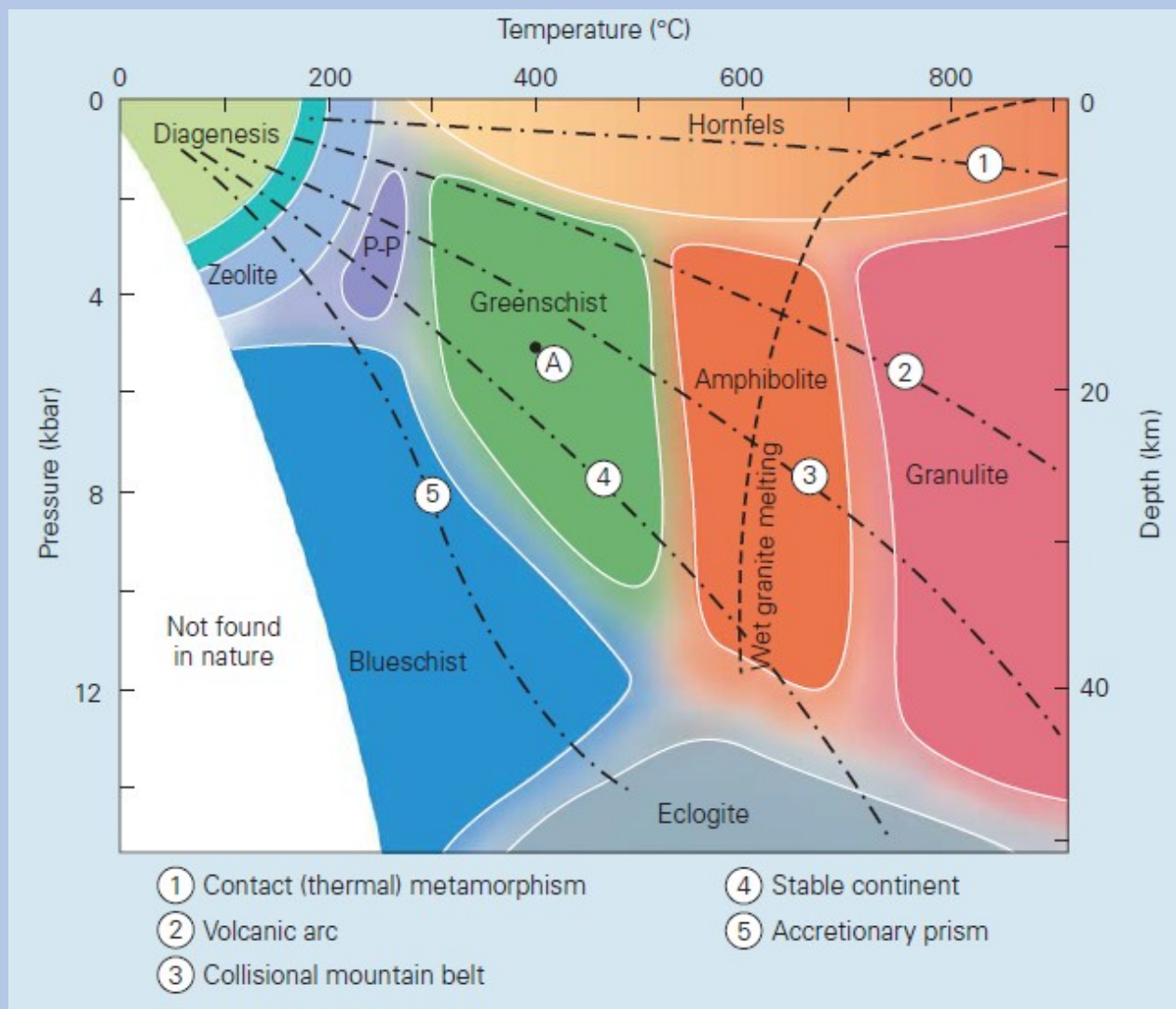
Metabazika

Minerály: zeolity

Typická pro
oceánské dno

Metapelity

Žádný indexový
metamorfní
minerál (nic moc
se ještě neděje)



Metamorfóza ve facii prehnit-pumpellyitové

Metabazika

Minerály: **prehnit + pumpellyit**

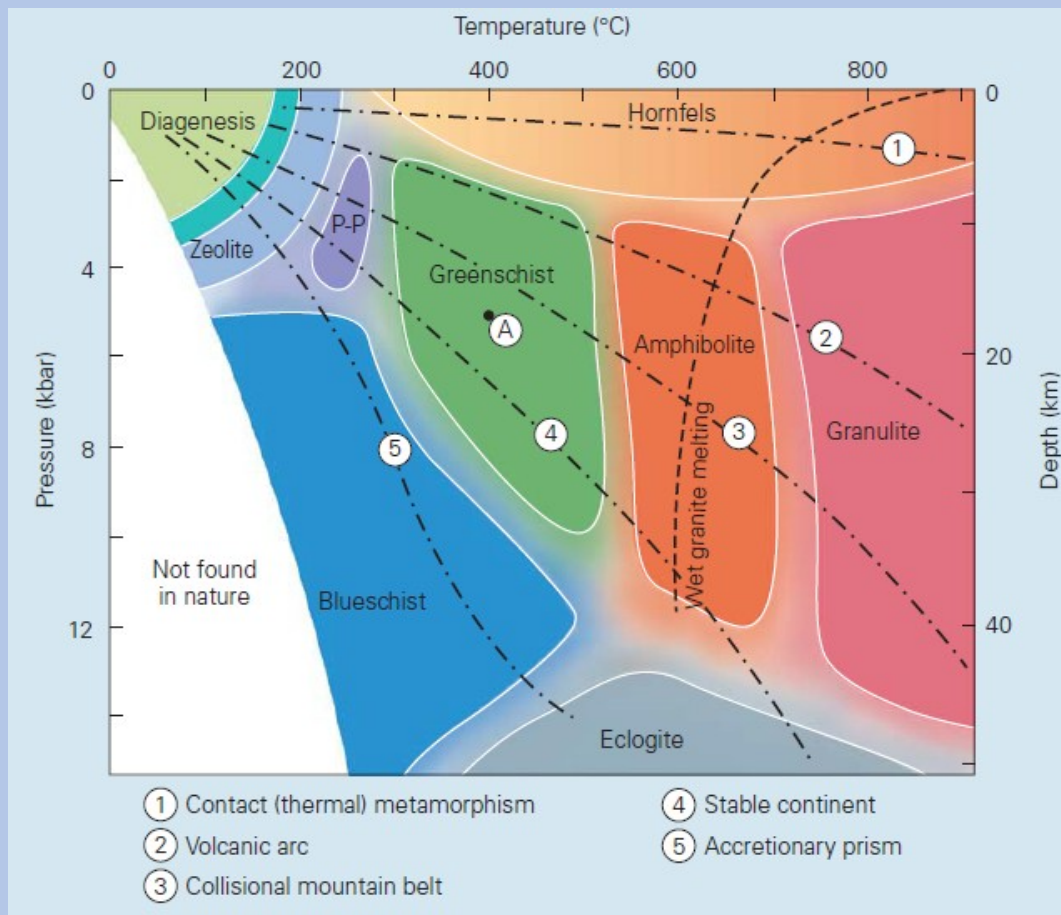
Prehnit – inosilikát $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$

Pumpellyit-(Mg) – sorosilikát

$\text{Ca}_2\text{MgAl}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$

Metapelity

Minerály: fylosilikáty - **illit, chlorit**



Metamorfóza ve facii zelených břidlic

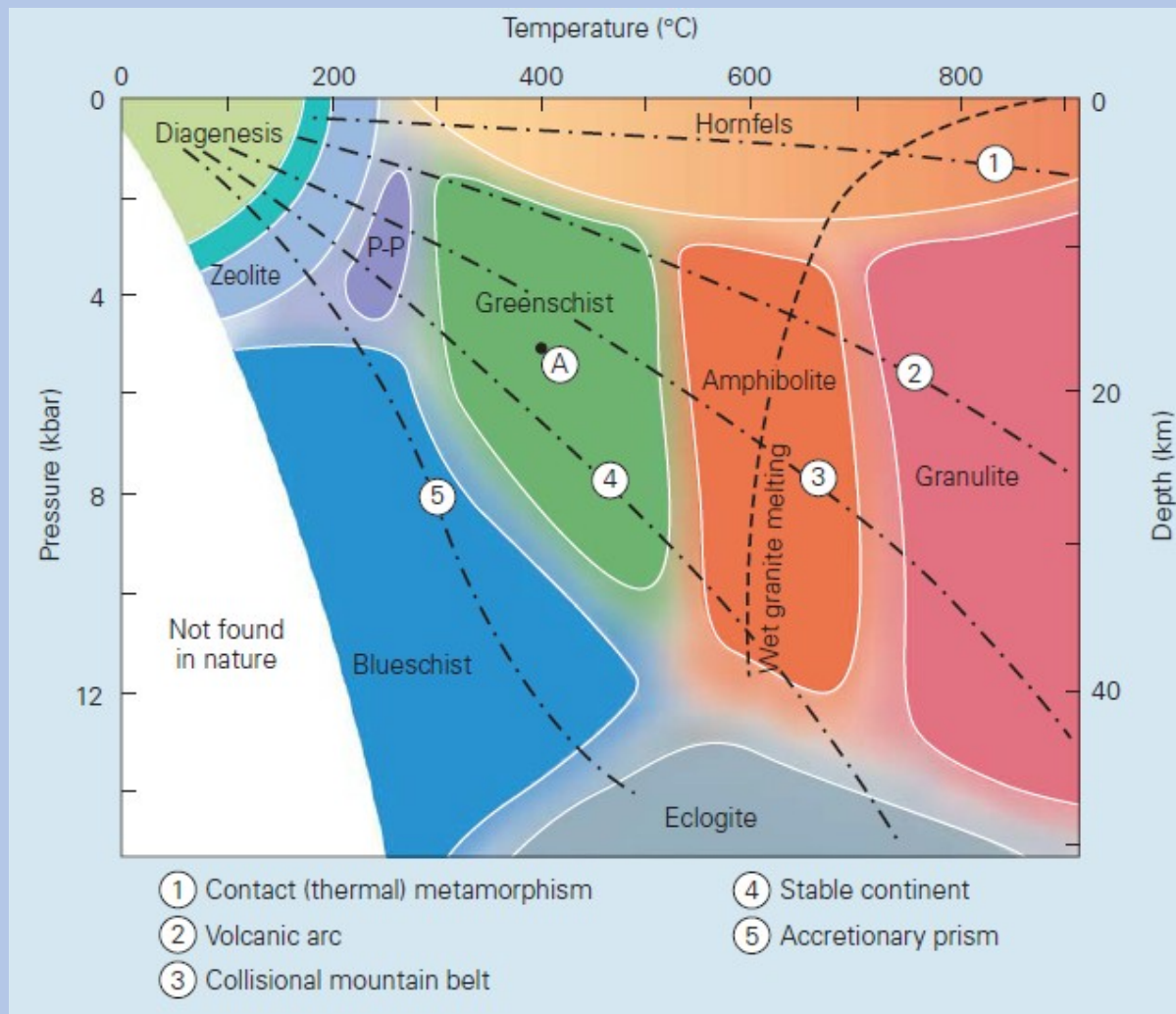
~ 300–450 °C, 1–8 kbar

Název **metabazika** =
zelená břidlice

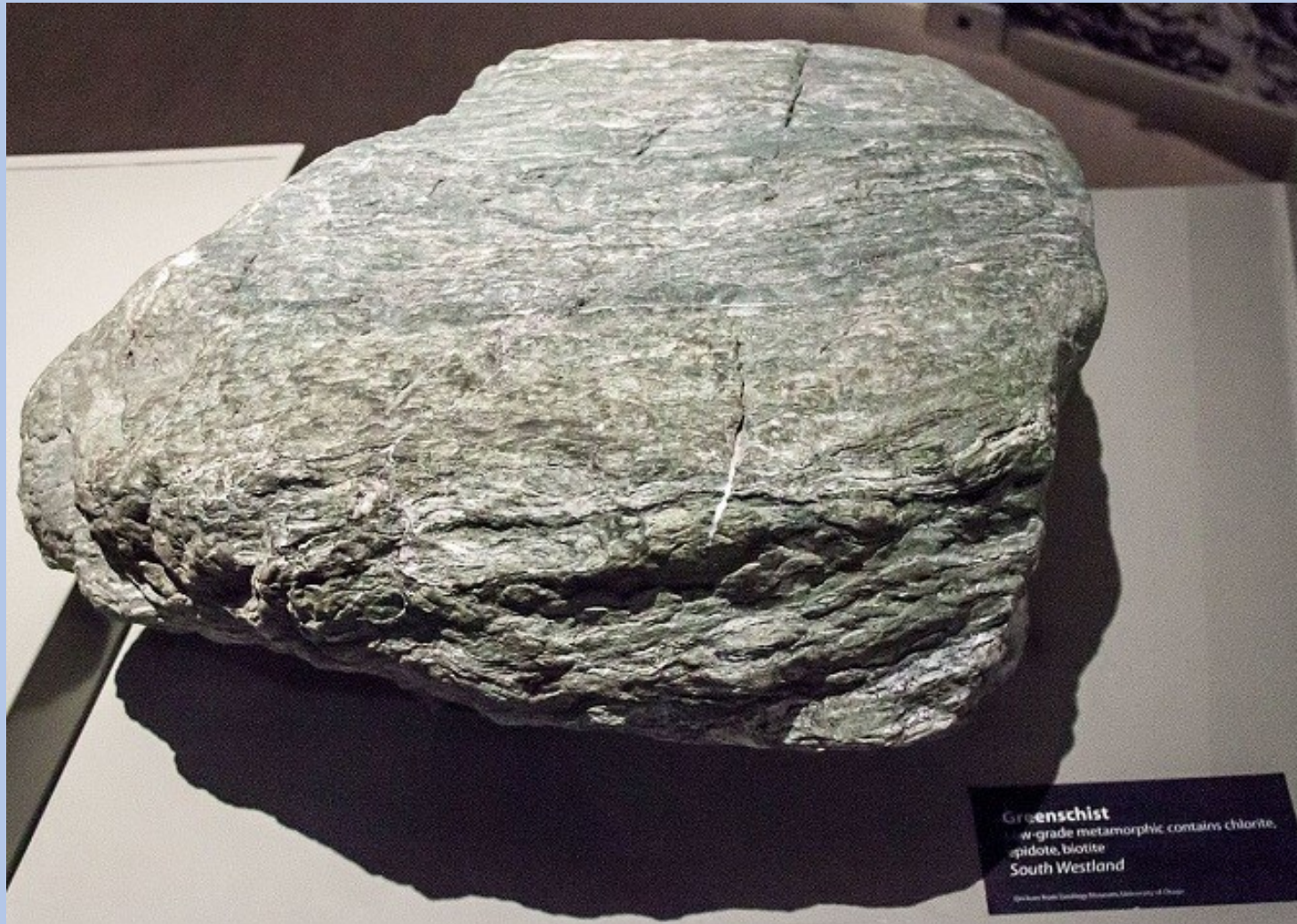
Minerály: **aktinolit**
(zelený Ca amfibol) +
chlorit + **albite** +/-
epidote

V metapelitech

chlorit + **albit** + **biotit** +
muscovit +/-
andalusite/kyanite +/-
chloritoid



Zelená břidlice



Zelená břidlice



Chlorit (zelená), aktinolit (amfibol, zelená), albit, muskovit

Metamorfóza ve facii amfibolitové

500-750 °C, 4-9 kbar

Metabazika:

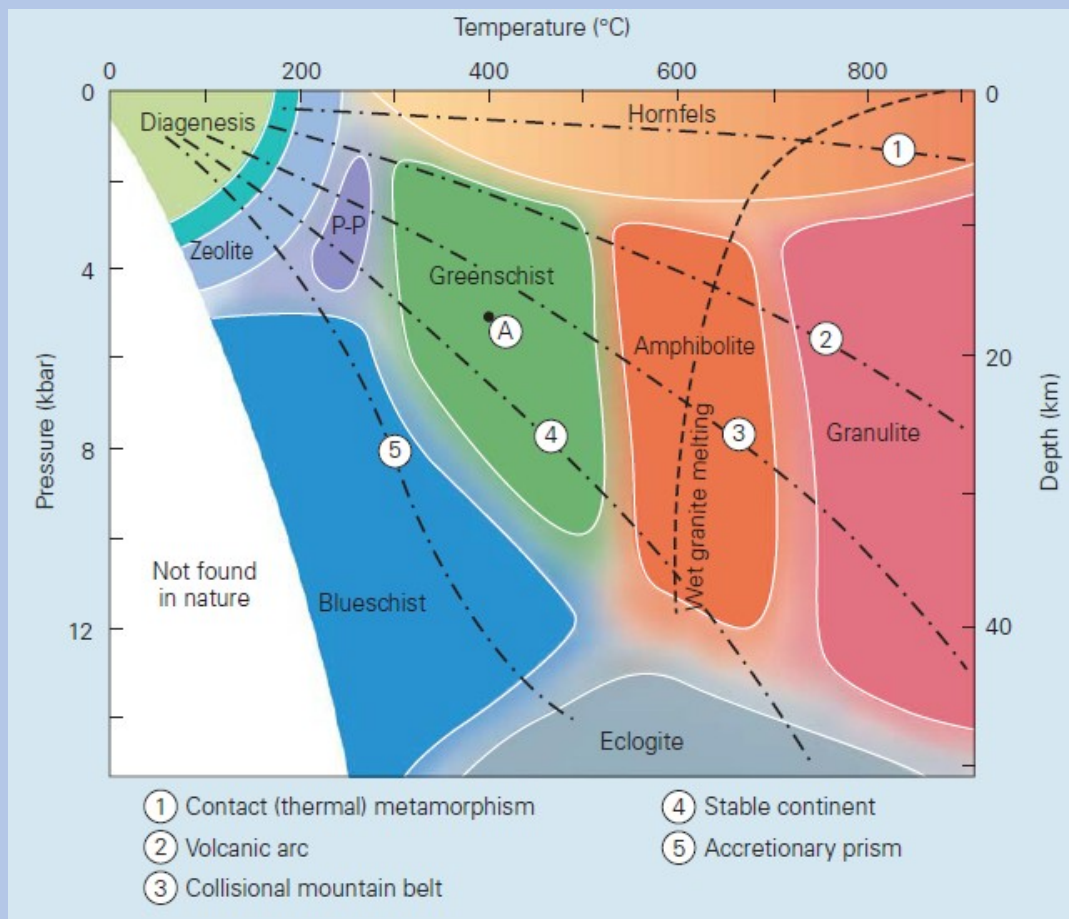
Hornina: **amfibolit**

Minerály: amfibol
(**hornblend**) + **plagioclas**
(andesin) +/- garnet +/-
epidote +/- diopside

Metapelity:

Hornina: **rula/migmatit**

Minerály: **Grt + staurolite**
+ Ms + Bt +/- And/Ky/Sill
in metapelites.



Amfibolit



Amfibolit - plagioklas, hornblend

Neplést s dioritem (vzhledově) - amfiboliti má metamorfní stavby, často granát

Neplést s amfibolovcem (názvy) = magmatickou h. tvořenou převážně amfiboly



Amfibolit - Pl, Hbl, Grt

Metamorfóza ve facii granulitové

650-1000°C, 5-12 kbar (20-45 km)

Nevyšší stupeň regionální metamorfózy

Metabazika:

Hornina: **granulit (mafický)**

Bezvodá asociace, Hbl zánik, vznik Opx

Minerály: Pl + (Opx) + diopside (Cpx) + Grt + Sp

Bazické složení

Metapelity, metagranity

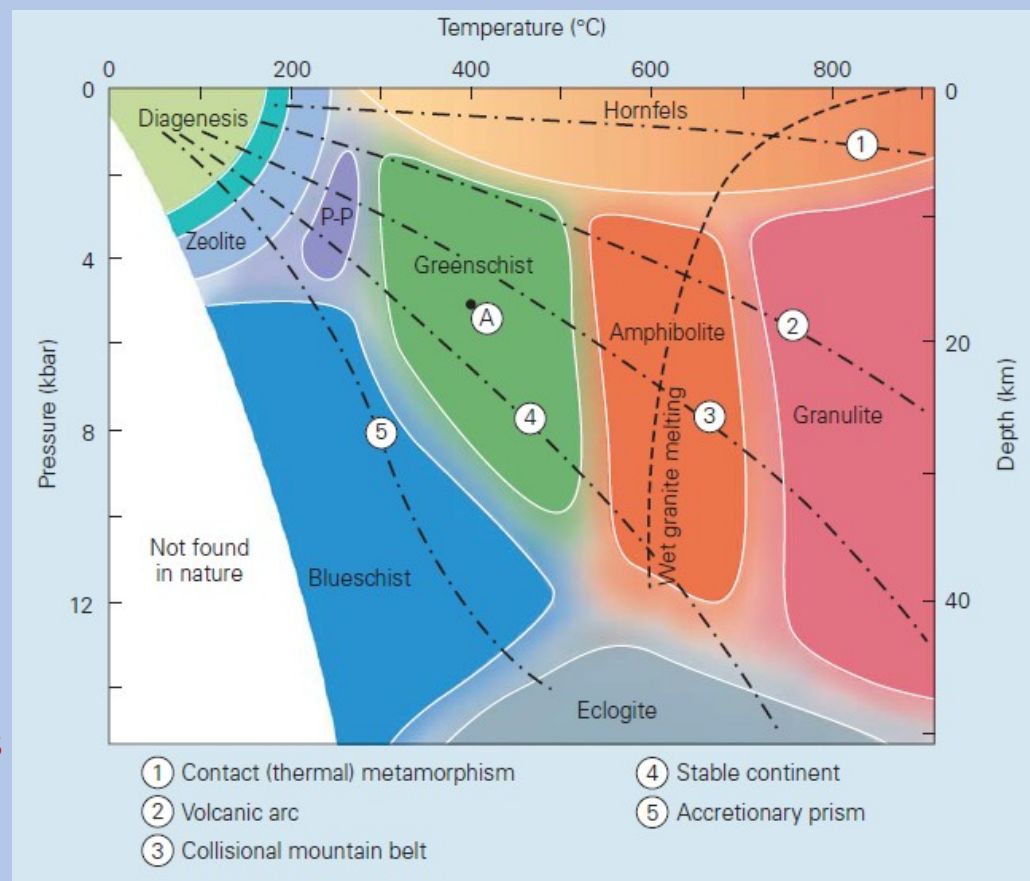
Hornina: **granulit felsický**

Al-bohatý v případě protolitu – metapelitu (s Al_2SiO_5)

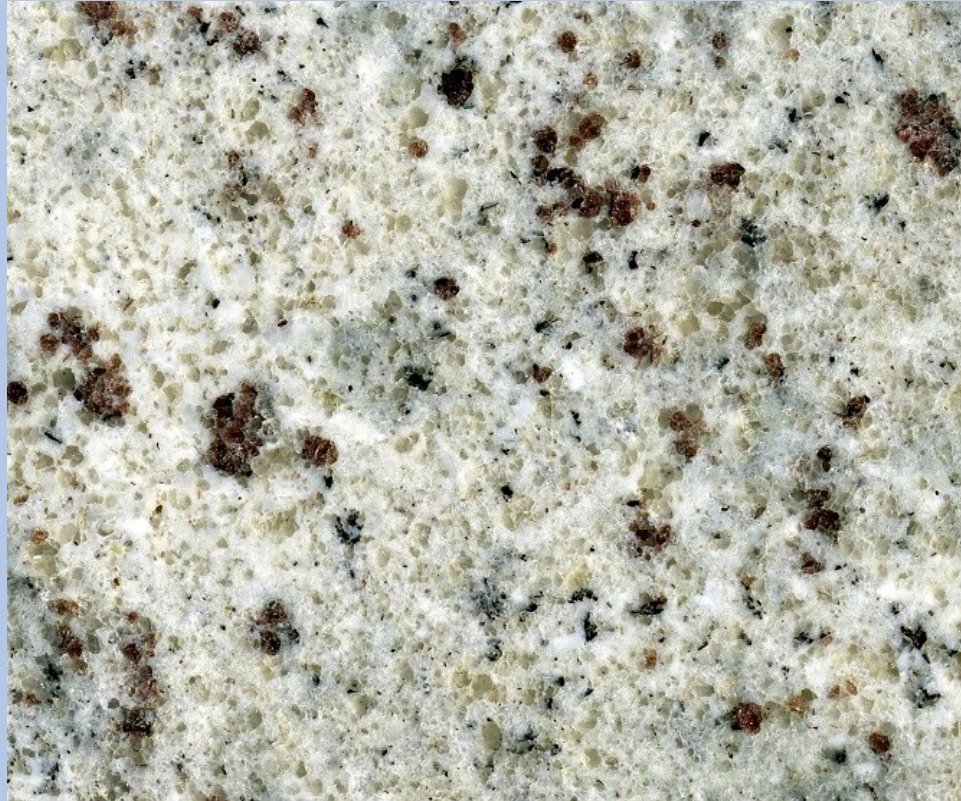
Bezvodá asociace (není Ms)

Ve sp. granulitové ještě může přežít trocha Bt

Mesoperthit (Kfs + Pl) + Al_2SiO_5 /Cdr + Grt +/- Opx



Granulit



Felsický granulit

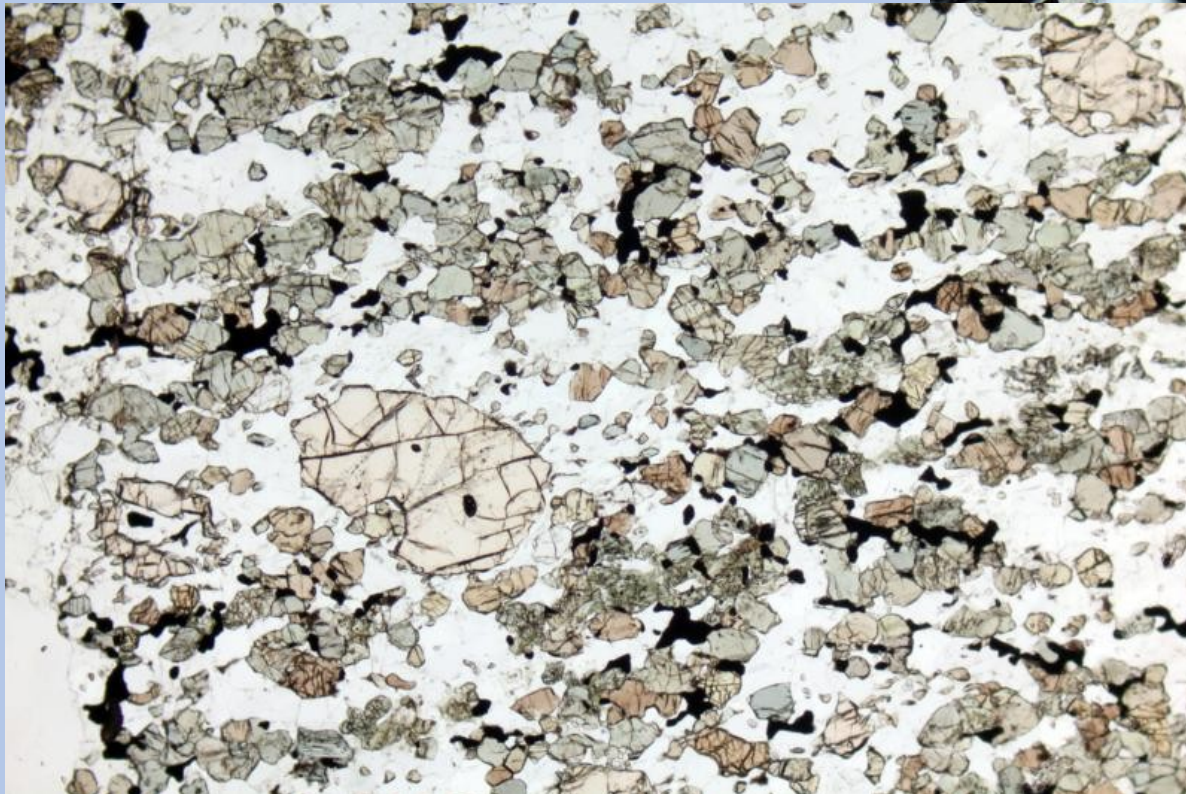
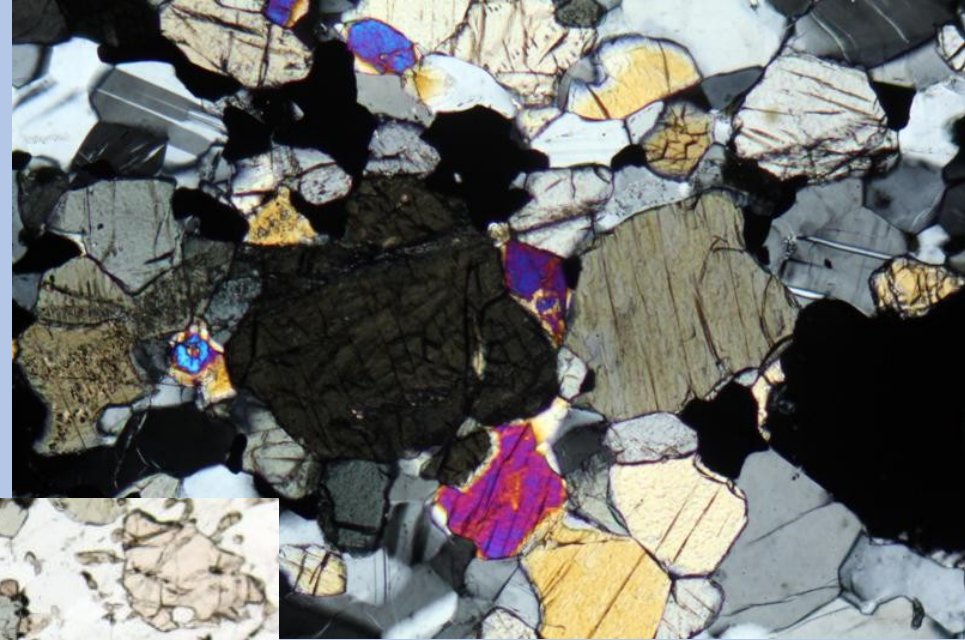


mafický granulit

Granulit

PPL, mafický granulit, Pl, Cpx
(zelený), Opx (růžový), Grt
(narůžovělý)

XPL, mafický granulit, Pl, Cpx, Opx



Metamorfóza ve facii modrých břidlic

<500°C, P > 6 kbar, 30-60 km

metabazika:

Hornina: modrá břidlice

(a) lawsonit-albitová subfacie:

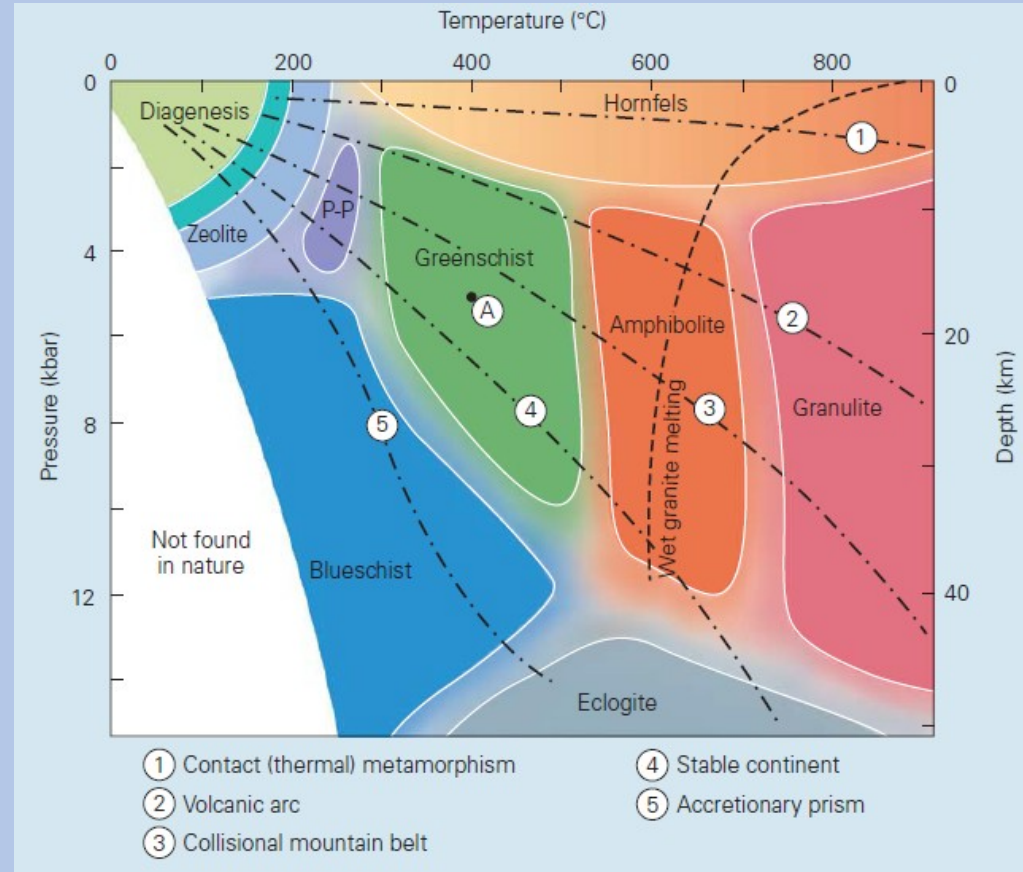
Glaukofán (Na amfibol) + lawsonite + Ab + Chl.

(b) subfacie epidot-modrých břidlic: glaucophane (Na amfibol) + epidote + Chl/Grt + phengite + Ab

metapelite:

chloritoid + paragonite (Na slída) + Chl + phengite + mastek

phengite (Mg, Fe bohatý muskovit) místo biotitu



S růstem P, glaukofán (+Ab) přechází na omfacite (Na Cpx) a Chl na Grt (přechod do eklogitové facie)

Zdroj fluid pro tavení pláště nad sudukční zónou

Modrá břidlice

Modrá břidlice s galukofánem



Modrá břidlice s modrých galukofánem
Ab a Grt

Modrá břidlice



Modrá břidlice s galukofánem (modrý) epidotem (výrazný reliéf), křemenem (čočka)

Metamorfóza ve facii eklogitové

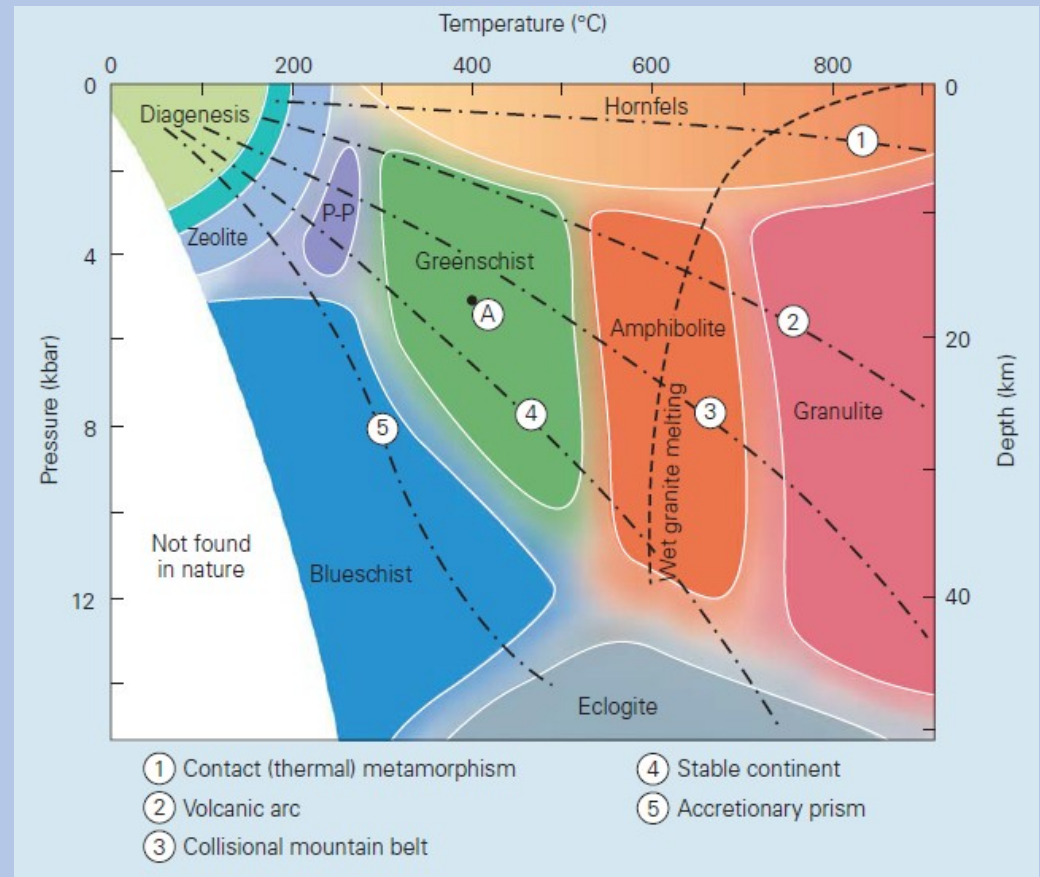
Metabazika

Hornina - Eklogit:

Minerály: Grt (Mg-rich almandin) omfacit (Na-Ca-Al-Mg klinopyroxen)

± Kyanit ± křemen ± phengit ± rutil

Neobsahuje Pl



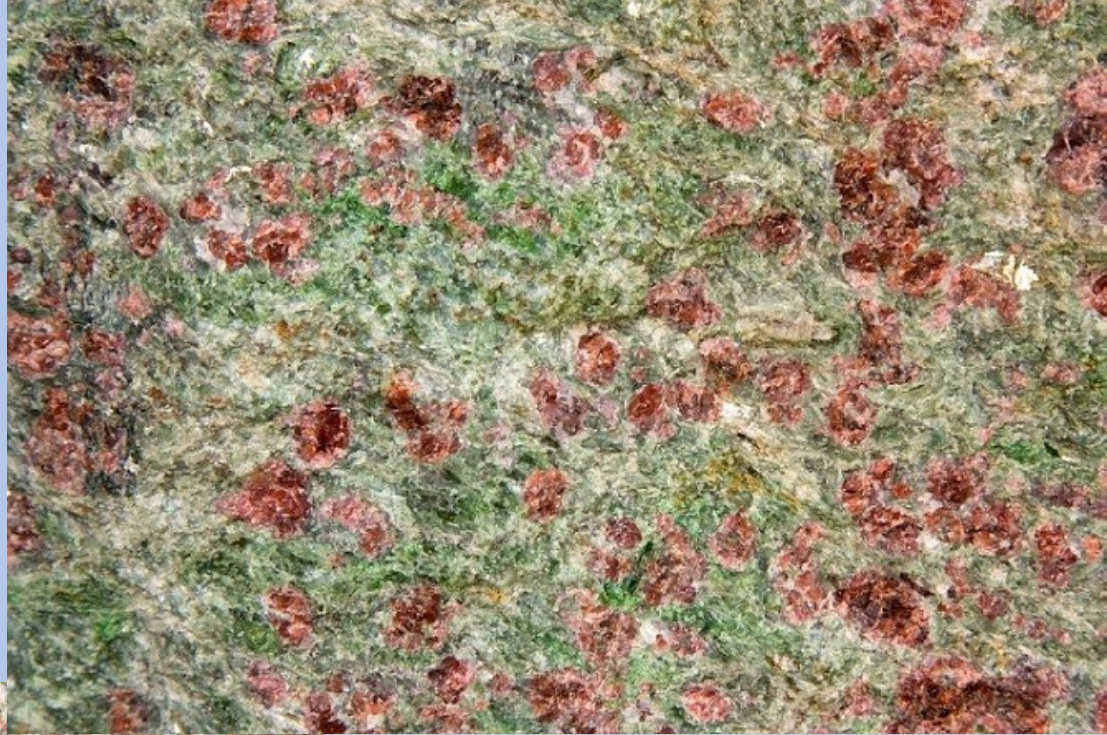
High-T (>900°C) – v asociaci s plášťovými horninami, UHP

medium-T (900–550°C). V asociaci s rulami, granulity (kolize kontinent-kontinent)

low-T (<550°C) – oceánská deska, subdukce oceánské desky pod kontinent

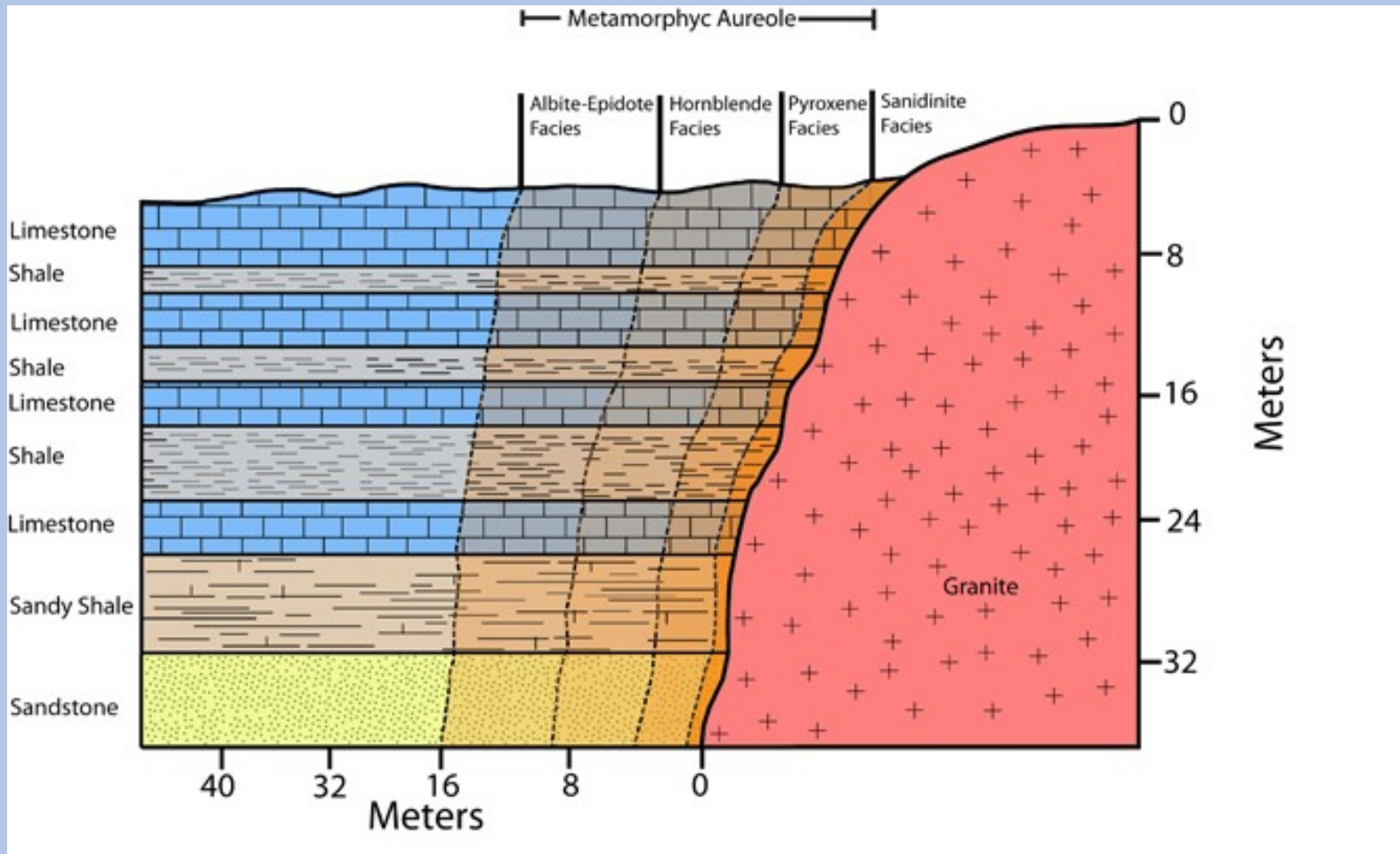
Eklogit

Eklogit – omfacit, granát, křemen



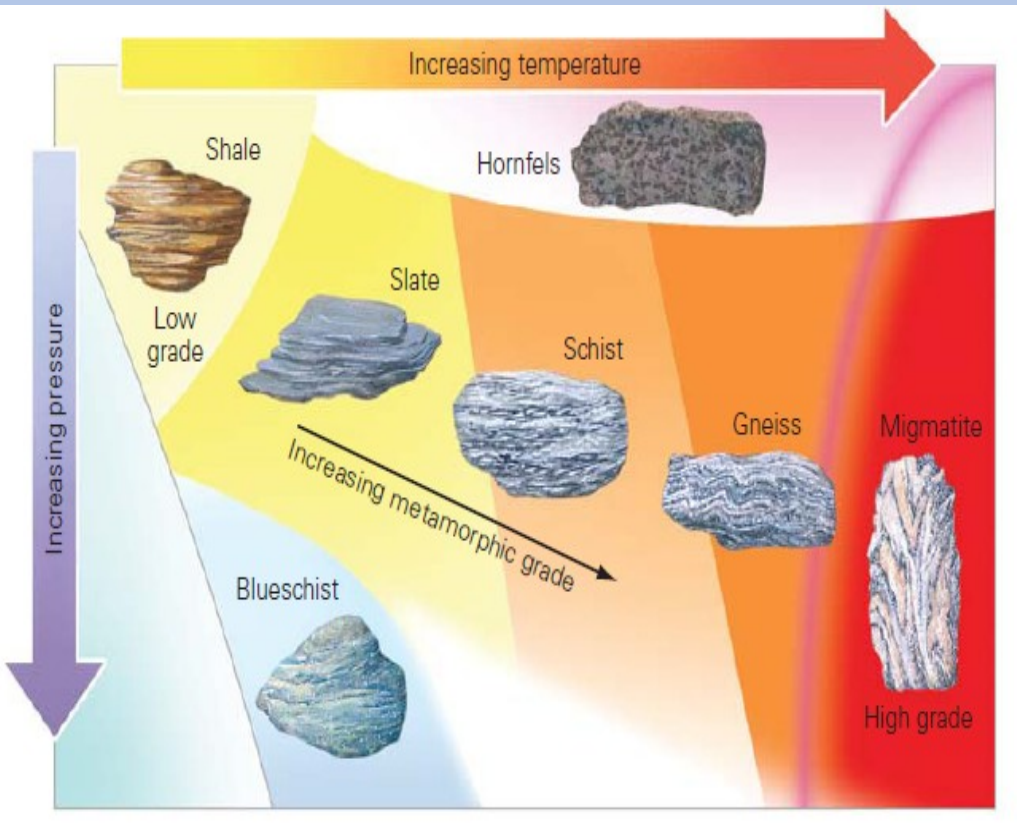
Eklogit – omfacit, granát, křemen
a phengit (světle hnědý)

Kontaktní metamorfóza - rohovce



Kontaktní aureola kolem granitové intruze a facie kontaktních rohovců.

Metamorfóza sedimentů - metapelity



Sedimentární horniny

Jíl (clay) - jílovec (claystone) – jílová břidlice (shale)

Metamorfované horniny

„Pokrývačská břidlice“ (slate)

Fylit (phyllite) - **sericit**

Svor (mica-schist) – **muskovit**

Rula (gneiss) – **draselný živec**

částečně natavení ruly (amfibolitová

facie) = **Migmatit** (migmatite) –

– část světlá = roztavená


– část tmavá = neroztavený (restit)

Silné roztavení ruly – tavenina –

migrace - **Granit**

Granulit - granulitová facie; **Opx**

Metamorfóza sedimentů - metapelitey

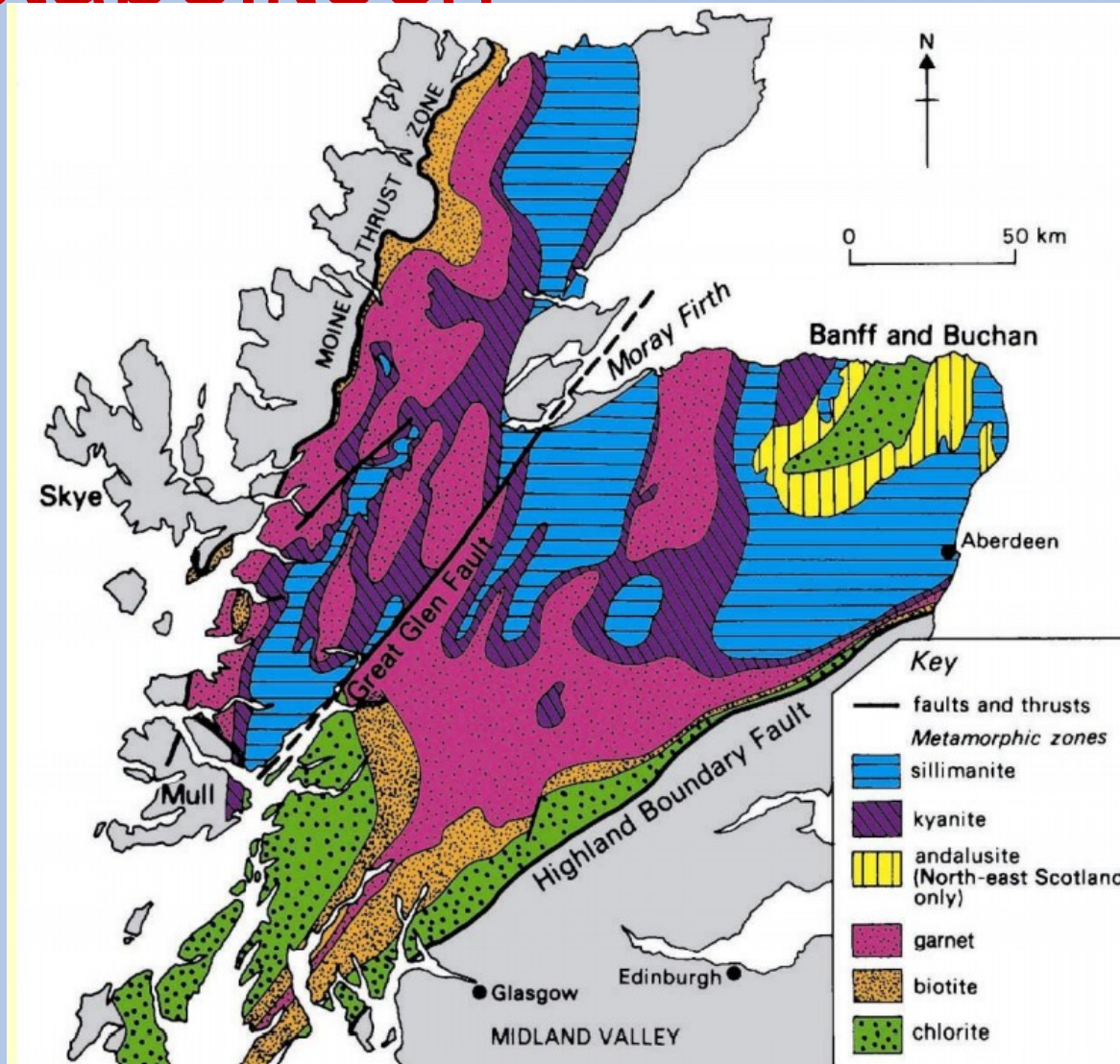
- indexové minerály - přítomnost těchto minerálů může indikovat:
- metamorfní podmínky 
- specifické chemické složení •
- jejich použití v názvu horniny nám může rychle poskytnout důležitou informaci, například staurolitický svor dosáhl teplotních podmínek nejméně 550 C
- termín metamorfní zóna byl zaveden Barrowem (1893) v metapelitech oblasti Dalradian ve Skotsku (**střednětlaká metamorfóza**, (dráha 3))

podle zvyšujícího metamorfního stupně vstupují další (indexový) minerál: **chlorit – biotit – granát – staurolit – kyanit – sillimanit**

- později byla definována další posloupnost pro nízkotlakou metamorfózu (dráha 2) v oblasti **Buchan**

posloupnost minerálů: **biotit – cordierit – andalusit – sillimanit**

Metamorfni zóny v metapelitech



Metamorfóza sedimentů - metapelity

- Oproti tomu, jiné minerály mohou v pelitech být v širokém rozmezí PT podmínek a nehovoří tedy o podmínách metamorfózy
- Např. křemen, plagioklas, turmalín, muskovit

Fylit

- Jemnozrnná hornina, vzniklá rekrystalizací břidlic (pelitů) v podmínkách nízkého stupně metamorfózy, větší velikost zrna než pelity (nižší část facie zelených břidlic)
- Výrazná foliace (uspořádání fylosilikátů)
- **Chloritová zóna**: metamorfované břidlice se mění na fylity
Minerální složení (blízké břidlici): **muskovit, chlorit, a křemen, albit.**
- **Biotitová zóna**: ve fylitech se objevuje biotit který je v asociaci s **chloritem, muskovitem, křemenem a albitem**
- Akcesorie hojné: magnetit, pyrit

Fylit



Krenulační kliváž ve fylitu

Svor = mica schist / rula = gneiss

vzniklá rekrytalizací břidlic (**pelitů**) v podmínkách nízkého stupně metamorfózy, větší velikost zrna než pelity (nižší část facie zelených břidlic)

Výrazná **foliace** (uspořádání fylosilikátů v důsledku působení tlaků – při kmpresi při kolizi nebo tlakem nadloží) = schistosity

Metamorfní reakce s rostoucími podmínkami metamorfózy vede ke snižování foliace v důsledku růstu nových minerálů (zejména živců) na úkor fylosilikátů a zvětšování velikosti zrna. U ruly (pararula) málo fylosilikátů (není nazývána schist).

Vznik nových minerálů s růstem metamorfních podmínek (vedle Ms, Chl, Qz):

chloritoid, biotit, granát, staurolit, cordierit, andalusit, kyanit

často tvoří **porfyroblasty** v základní hmotě s převahou fylosilikátů.

časté inkluze v porphyroblastech - indikující dřívější minerální asociace, vzniklé během vývoje horniny a růstu porfyroblastu.

Vznik jednoho minerálu na úkor jiného, tedy vznik nového může vést k kompletnímu zániku předešlého.

V matrix obvykle minerály reekvilibrují na asociaci stabilní za daných PT podmínek

Svor = mica schist / rula = gneiss

- **Granátová zóna:** Svory až ruly obsahují porfyroblasty granátu v základní hmotě složené z **biotitu, chlorit, muskovit, křemen a albit až oligoklas**.
- **Staurolitová zóna:** Svory až ruly se **staurolitem, biotitem, muskovitem, křemenem, granátem a plagioklasem**. Může být přítomen chlorit ale jen v malém množství.
- **Kyanitová zóna:** Svory až ruly s **kyanitem, staurolitem, biotitem, muskovitem, křemenem, granátem a plagioklasem**. Není chlorit
- **Silimanitová zóna:** Svory až ruly se **silimanitem, dále biotit, muskovit, křemen, granát a plagioklas**. Někdy může být přítomen staurolit a reliktů kyanitu.

Svor = mica schist



granátický svor



Kyanitový svor

Svor = mica schist



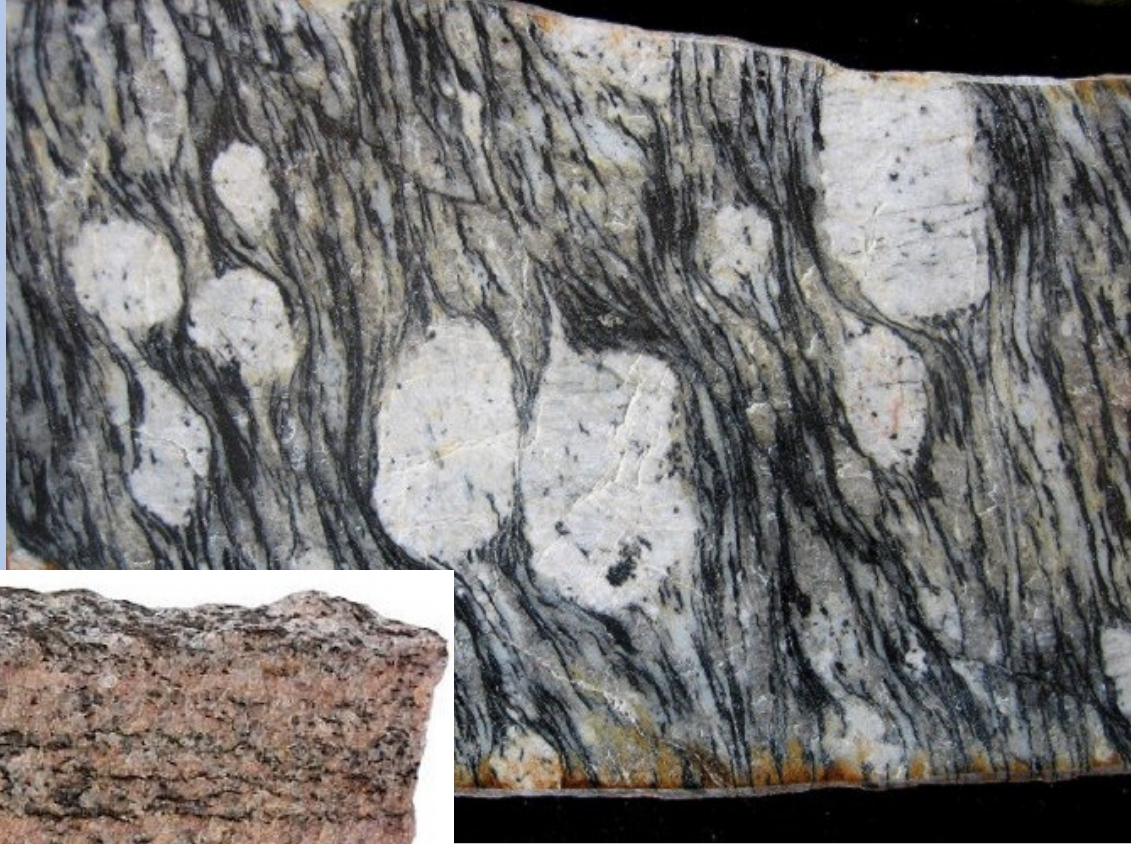
staurolitový svor s Grt



muskovitický svor s
turmalínem

Rula

Okatá rula, oka živců, dále
křemen a Bt



Rula s růžovým K-
živcem, křemenm a Bt

Rula

Granátická rula, Bt,
Qz, živce



sillimanitická rula,
Grt, Bt, Qz, živce



Migmatity – natavení metapelitů

- T 800-900 °C; P >7 ; minimálně 20 km pod zemským povrchem.
- Migmatity jsou vysoce metamorfované horniny s typickou páskovanou stavbou, kde došlo k částečnému natavení, ale vzniklá tavenina nebyla zcela segregovaná a neunikla mimo horninu.
- Tmavé pásy (tzv. restit) obsahují neroztavené minerály metamorfované horniny (granát, Opx, cordierit, spinel; ale i zbytek Bt či světlých min.)
- světlé partie představují krystalizaci nových minerálů z taveniny (křemen, živce).
- Vzhledem k přítomnosti produktů tavení tvoří migmatity přechod od přeměněných hornin k horninám vyvřelým.
- Světlé minerály, jako například křemen nebo živce, se taví za relativně nižších teplot než tmavé minerály
- Směs roztavených a dosud pevných minerálů se rozděluje do zřetelně odlišných pásků, které se s nabývajícím podílem taveniny propojují. Nepravidelná tloušťka světlých a tmavých pásků, jejich provrásnění a usměrnění mají původ v orientovaném tektonickém napětí, tj. tlaku, který vyvolaly procesy deskové tektoniky při kolizi kontinentů.

Migmatity – natavení metapelitů

Dehydratační tavení hornin (nejčastěji metapelitů) - **kolize kontinent-kontinent** (při metamorfóze – amfibolitová/granulitová facie a tavení hornin) a

Dehydratační tavení metapelitů

Protože v metapelitech (amfibolitová/granulitová facie), v nichž dochází k natavení, množství fluid v hornině nízké, je nutná pro tavení přítomnost minerálu se zvýšeným obsahem vody, většinou slíd. Voda, která se uvolní ze slíd sníží teplotu tavení a hornina se začne tavit.

Dehydratační tavení **muskovitu** - produkují malé množství taveniny, hornina s 25 obj.% muskovitu vyprodukuje max. 11-12 hm.% taveniny

dehydratační tavení **biotitu** - velmi efektivní pro vznik taveniny, především pro velké rozšíření biotitu v horninách zemské kůry

Např. reakce v subsolidu při **metamorfóze hornin s biotitem** (biotit zaniká) uvolňuje vodu



V metapelitu vzniká 30-60 % taveniny při teplotě 800-900 °C a tlaku asi 7 kbar

Migmatity – natavení metapelitů

- Pokud při natavení nedošlo k segregaci a úniku taveniny, vzniká **migmatit** (obvykle při nižším procentu taveniny) = **smíšená hornina, pásy restitu a taveniny**
- Pokud při natavení dojde k segregaci a úniku taveniny vzniká restit - **Al bohatý granulit** (granulit sedimentárního původu) tvořený převážně granátem, ortopyroxenem, cordieritem, (akcesorie spinel) **a tavenina** (v případě tavení metapelitů **kyselá**), která migruje a utuhne výše jako těleso **S-typových** granitoidních hornin.

Migmatit

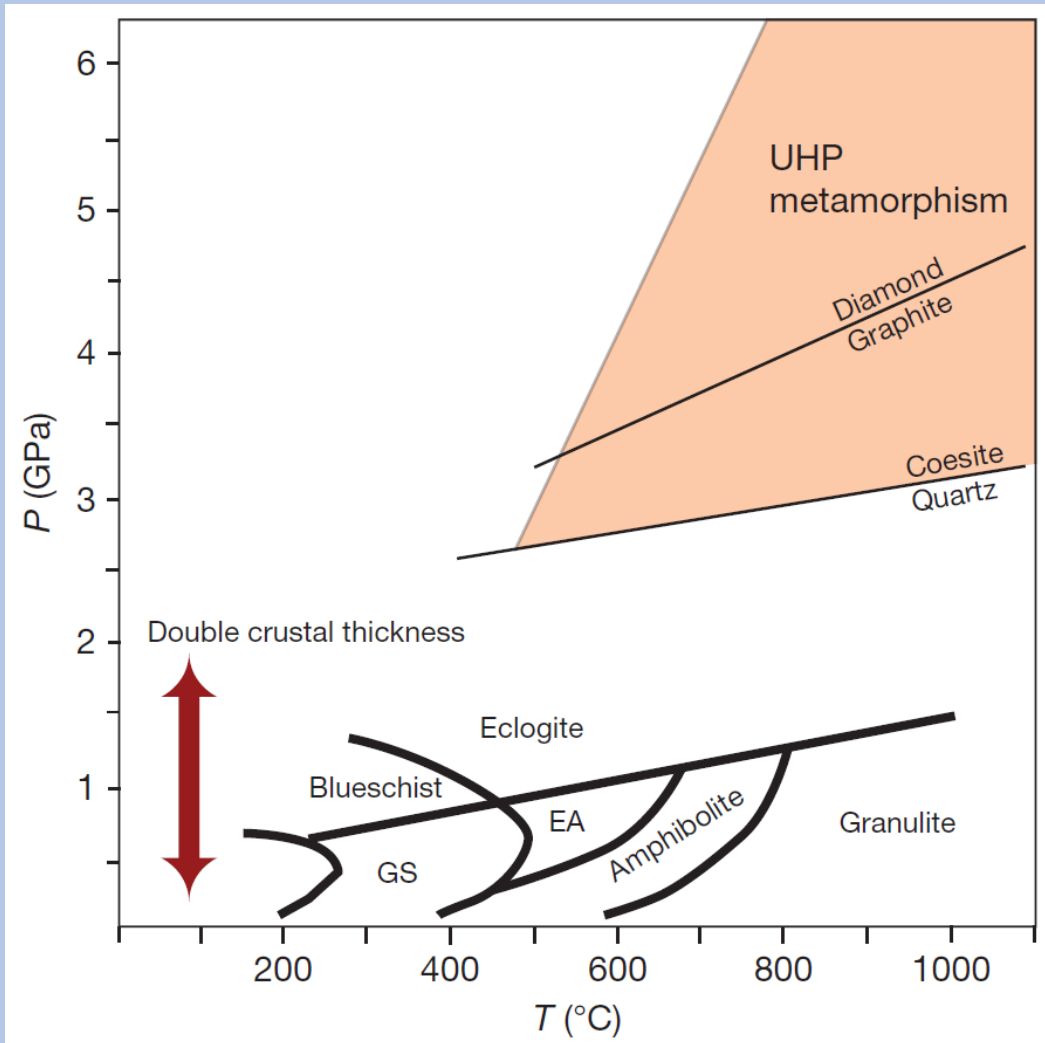
Migmatit, výchoz, Sand River,
S. Africa



Migmatit, tmavý granáty bohatý
restit

UHP metamorfóza

kolize kontinent - kontinent



UHP metamorfóza odpovídá tlakům při **zdvojení tloušťky kontinentální kůry** při subdukci kontinent-kontinent.

Rozdělení pole eclogitové-facie na nížetlakou (stabilní křemen) UHP pole (**coesit** stabilní).

Často pozorovaný výskyt **nanodiamantů**

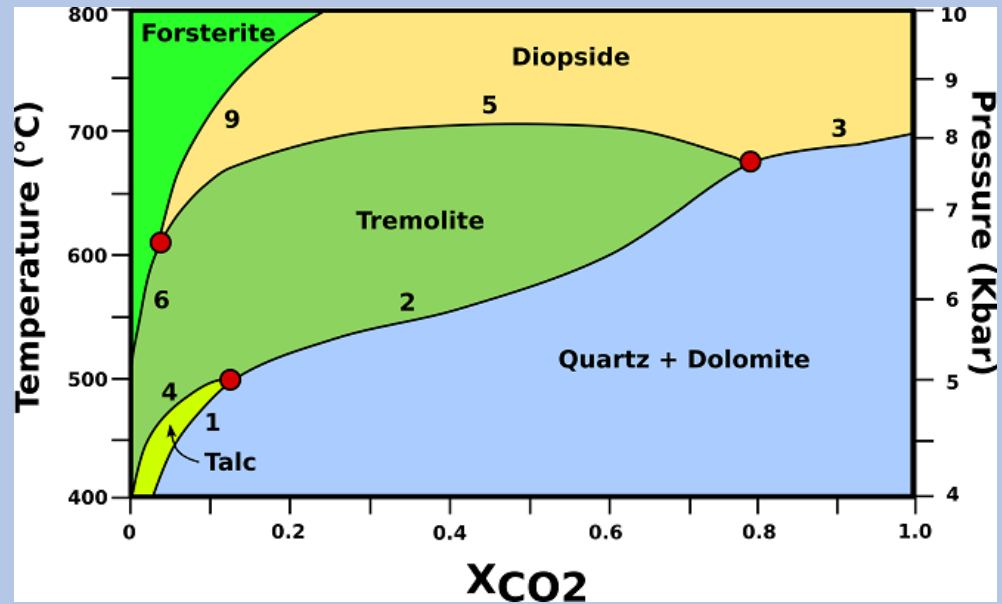
Horniny UHP spolu: **eklogity, granátické peridotity, granulity**
UHP

Metamorfóza vápenců

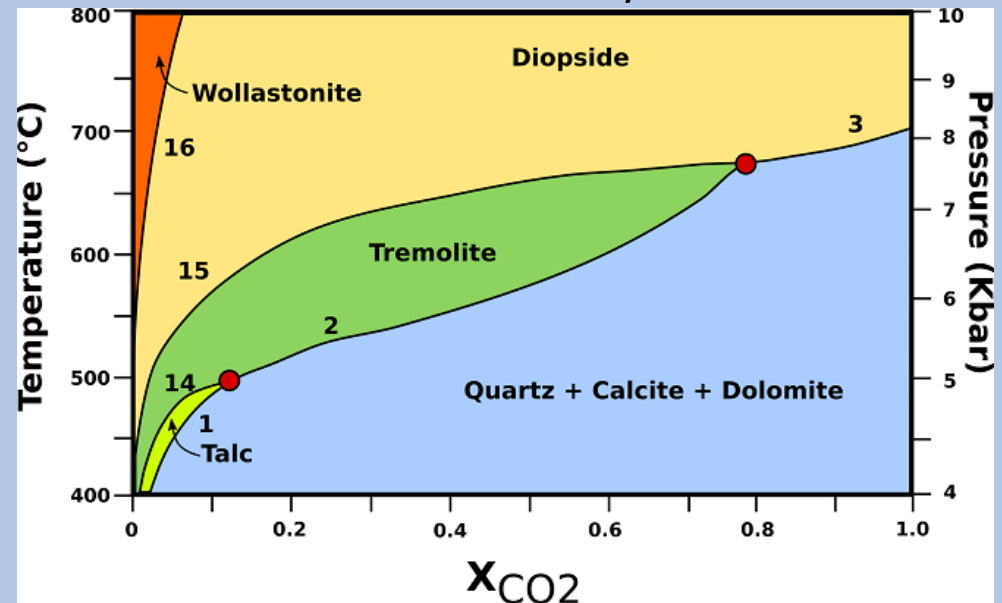
Nečisté vápence – příměs křemene a jiných sedimentárních částic (např. jílu) – vznik řady minerálů (silikátů)

Grafy pro stabilitu fází při regionální metamorfóze mramorů

Dolomitické mramory



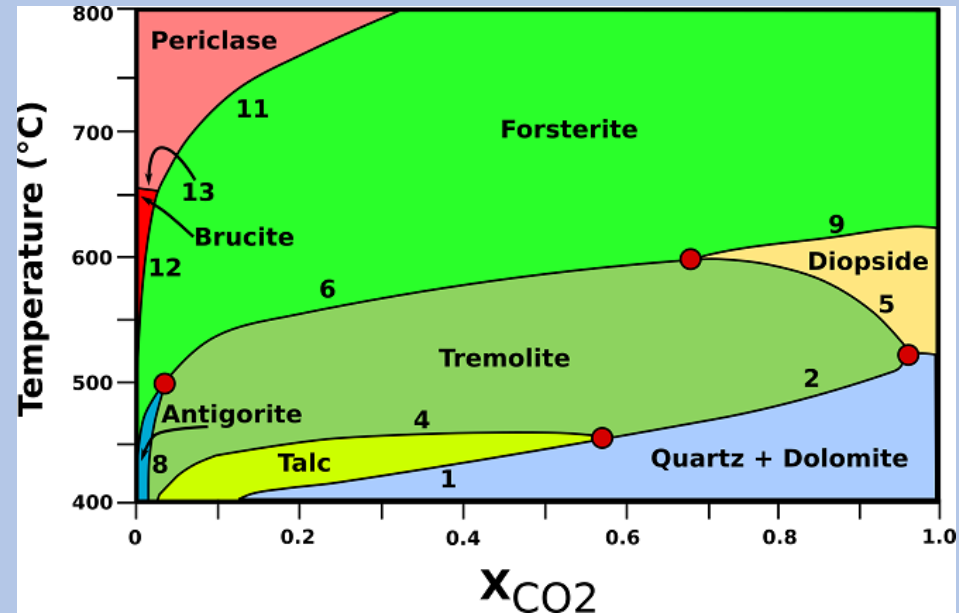
Kalcitické mramory



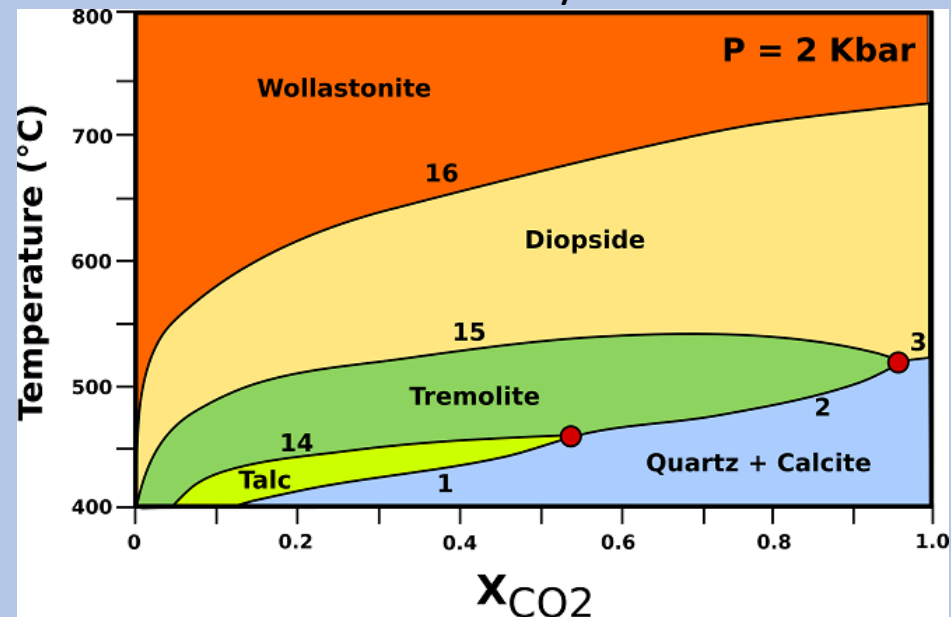
Metamorfóza vápenců

Grafy pro stabilitu fází při kontaktní metamorfóze mramorů (neuplatňuje se rostoucí tlak, jen teplota)

Dolomitické mramory



Kalcitické mramory



Metagranity/ortorula

Ortorula – rula, jejíž protolit je granit, obvykle leukokrátnější (světlejší) než pararula

- produkt regionální metamorfózy křemen-živcových hornin, tedy kyselých a intermediárních magmatitů v amfibolitové facii
- Za nižších metamorfních podmínek nedochází k mnoha změnám (příliš leukokrání a suché)
- Jde o hrubo- až střednozrné, výrazně břidličnaté horniny
- Minerály: **křemen**, **Bt**, **Ms**, **Kfs**, **Pl**, **granát** (odlišné složení od magmatického, je rovněž almandin-spessartinový, ale má vyšší obsahy pyropové a grosulárové komponenty), **turmalín**, kyanit, amfibol.

Felsický granulit – produkt regionální metamorfózy křemen-živcových hornin (granitoidů), v granulitové facii (viz. granulitová facie).
Minerály: **mesoperthit** (Kfs + Pl), Al_2SiO_5 (Ky, Sill), **Cdr**, **Grt** +/- **Opx**

Ortorula

Stébelnatá ortorula



Turmalínická ortorula