

G4021 Magmatická a metamorfní petrologie

2. Metamorfóza bazických hornin

1. Celkové chemické složení horniny (zjednodušené)

- kvarcity	SiO_2
- křemen-živcové horniny	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-CaO-H}_2\text{O}$
- metapelity	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- metabazity	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- vápenatosilikátové horniny	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO-H}_2\text{O}$
- metakarbonáty	$\text{MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- křemité dolomity	$\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- ultramafity	$\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

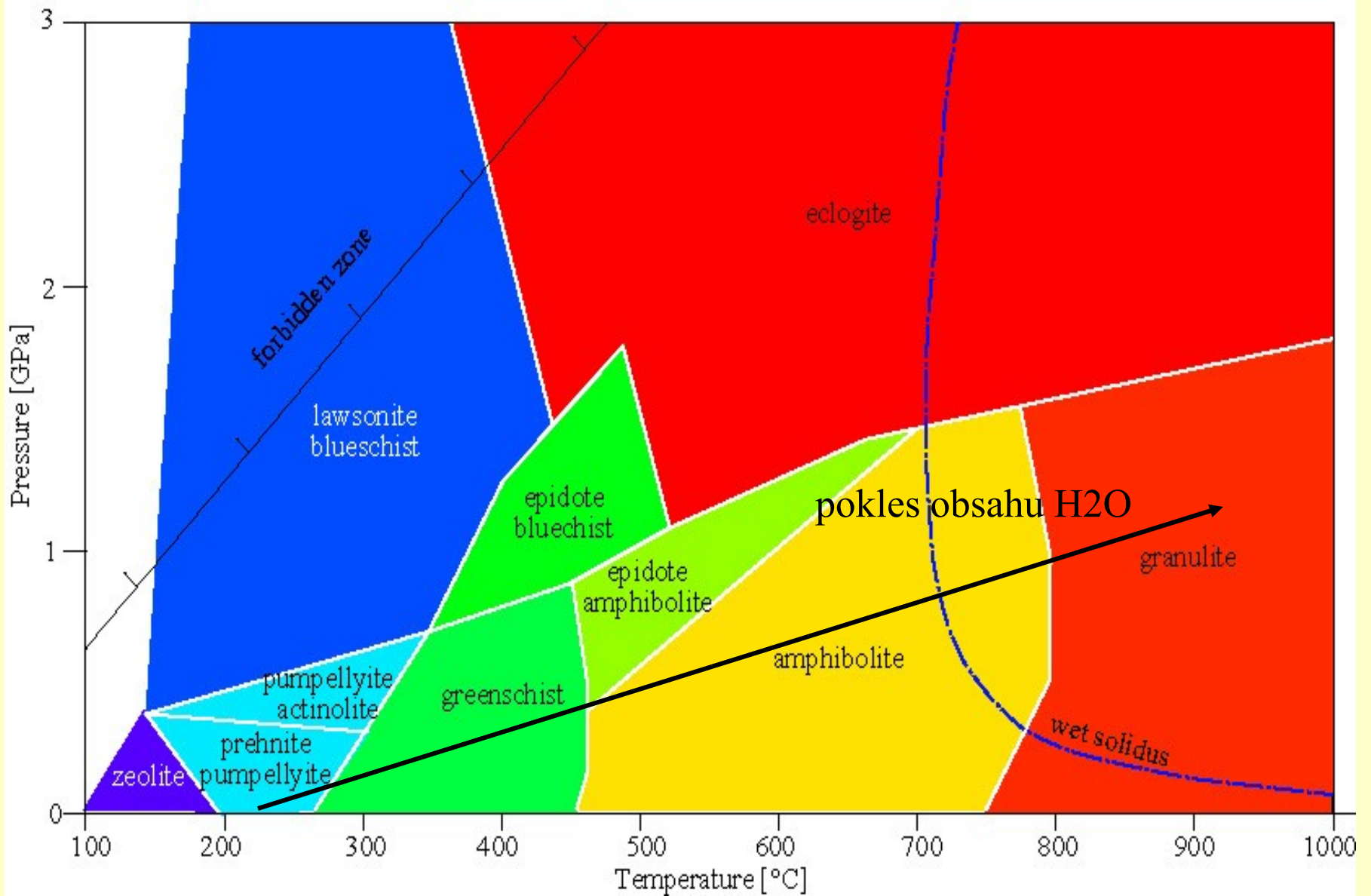
Jiné chemické systémy (méně časté)

- cordierit-antofylitové horniny	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- železná formace	$\text{SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$
- manganolity, smirky	

Jiná označení chemických systémů:

- křemen-živcové horniny	NASH, CASH a CKNASH
- metapelity	KMASH, KFASH a KFMASH
- ultramafity	MS-H ₂ O-CO ₂ , CMS-H ₂ O-CO ₂

Metamorfóza bazických hornin

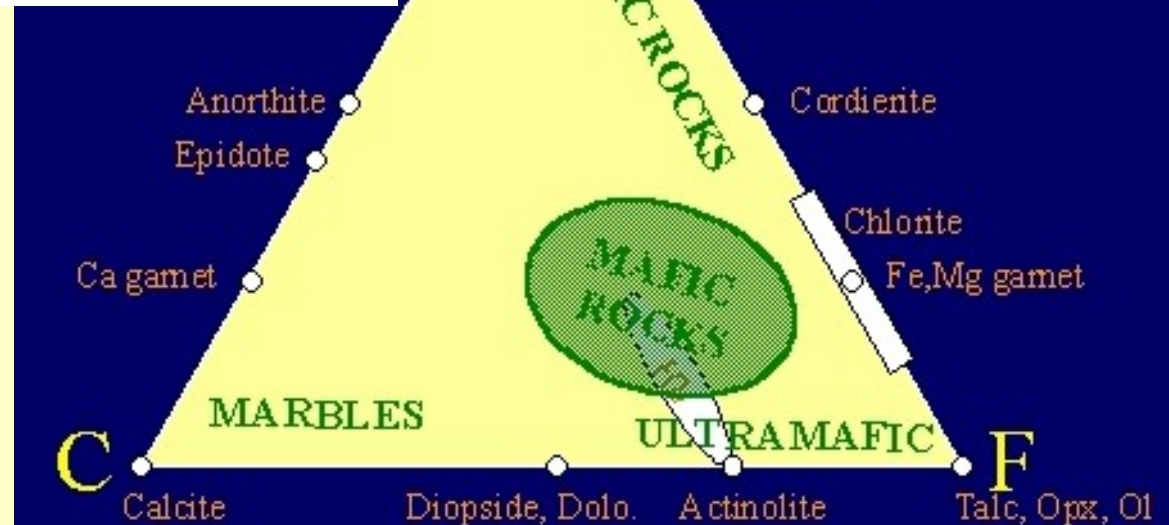


	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	48,98	50,82	46,06	46,90	50,97	50,02
TiO ₂	1,17	1,45	0,82	2,10	1,00	1,26
Al ₂ O ₃	16,27	13,19	13,02	12,68	14,84	14,34
Fe ₂ O ₃	1,59	2,43	1,98	0,93	0,83	1,92
FeO	5,73	7,03	7,96	12,00	8,45	9,12
MnO	0,16	0,15	0,06	0,22	0,22	0,19
MgO	6,92	8,95	13,10	7,68	7,55	7,71
CaO	9,96	8,40	10,90	12,97	10,36	11,58
Na ₂ O	3,79	2,61	1,08	2,18	4,29	2,79
K ₂ O	0,38	1,02	0,45	0,26	0,70	0,25
H ₂ O ⁺	4,89	3,51	3,18	1,45	0,93	0,44
H ₂ O ⁻	0,33	0,34	0,12	0,04	st.	st.
P ₂ O ₅	0,12	0,12	0,10	0,17	0,13	0,17
CO ₂	st.	0,13	1,08	0,14	st.	—
S	0,05	0,04	st.	—	—	—
Suma	100,34	100,19	99,91	99,72	100,27	99,79

1. Metabazalt z polštářové lávy, Koterov.
2. Zelená břidlice, Blížejov.
3. Amfibolit pestré série moldanubika, Chýnov-Pacova hora.
4. Granátický amfibolit, Broumov.
5. Pyroxenický granulit, Zrcadlová Hut' u Českého Krumlova.
6. Eklogit, Křížová hora, saxothuringikum.

protolit: intermediární až bazické
 vyvřelé horniny → metabazity

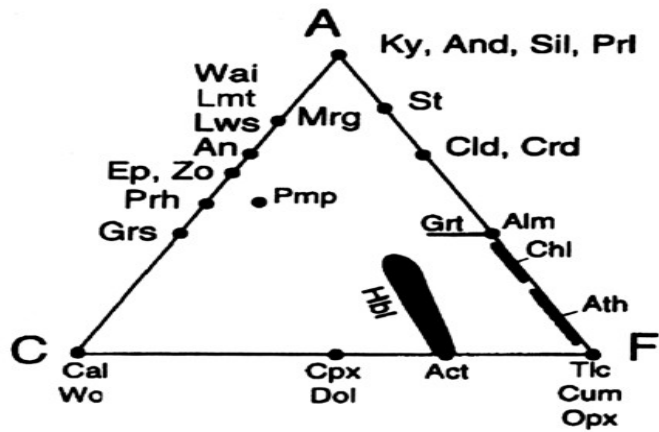
- 1) bazalty - oceánická kůra (MORB)
 více MgO, FeO a CaO vs. andezity
- 2) andezity – ostrovní oblouky,
 kontinentální okraje pacifického
 typu, více SiO₂, Al₂O₃ a alkálií



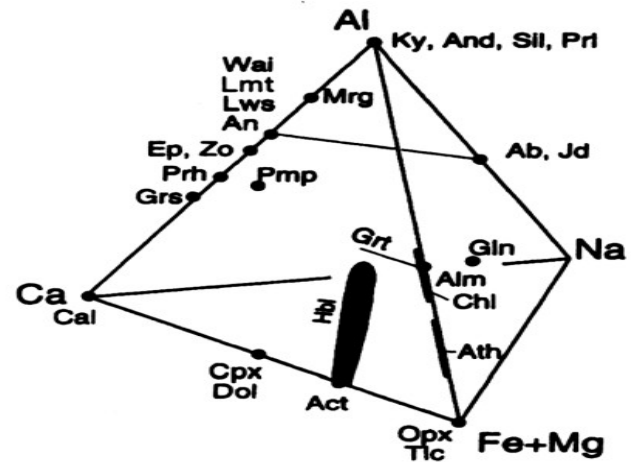
Systémy: CNFMASH, NASH,
 CASH, CNASH

Diagramy: ACF, AFM, ACFM

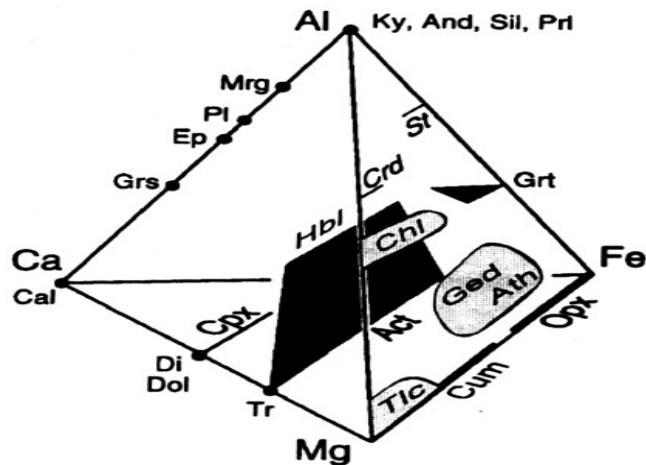
- Mafické horniny jsou vhodnější pro studium metamorfózy za velmi nízkých a nízkých stupňů a dále za vysokých stupňů (hlavně HP). Během středního stupně probíhá řada kontinuálních reakcí v širokém poli PT podmínek, je zde stabilní asociace amfibol + plagioklas, a metabazity jsou mnohem méně citlivé na progresivní změny než metapelity.
- **Mineralogie metabazitů**
- primární - olivín, pyroxen, plagioklas, amfibol (většinou bezvodé minerály)
- metamorfní – zeolity, prehnit, pumpellyit, chlorit, epidot, aktinolit, amfiboly, plagioklasy, klinopyroxen, granát, ortopyroxen, glaukofan, lawsonit, jadeit, biotit (Ti-HT)



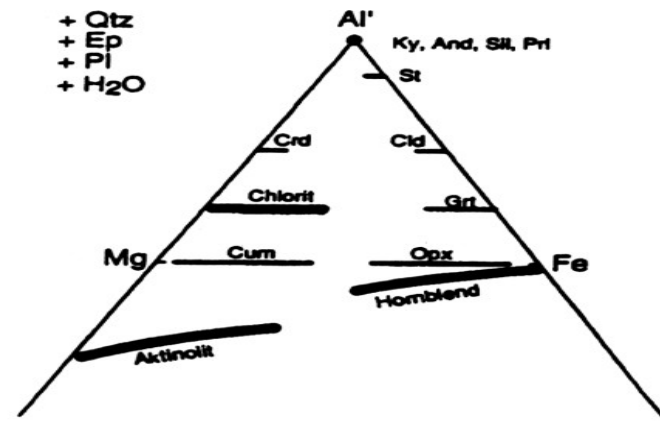
Obr. 5-1. Diagram ACF s projekcí charakteristických minerálů metabazitů. Převzato ze Speara (1993).



Obr. 5-2. Diagram ACFN s projekcemi typických minerálů nacházejících se v metabazitech. Pověšně si, že Fe a Mg jsou sloučeny do jediné komponenty. Plagioklas se promítá na linii mezi albit (Ab) a anortit (An). Převzato ze Speara (1993).



Obr. 5-3. Diagram ACFM s projekcí pozic charakteristických minerálů metabazitů. Všimněte si rozsahu pevných roztoků Fe-Mg v mnoha zobrazených fázích. Převzato ze Speara (1993).



Obr. 5-4. Diagram AFM zobrazený z pozice křemene, epidotu a H₂O ukazující projekce typických minerálů metabazitů. Převzato ze Speara (1993).

Metamorfóza metabazitů

1) Bazalt: Pl (labradorit, bytownit) + Px (augit)
± olivín ± amfibol ± biotit



3) Amfibolit:
amfibol + plagioklas
(oligoklas – andesin)
± biotit ± pyroxeny ±
granáty ± titanit



2) Zelená břídlice:

(aktinolit + albit + epidot +
chlorit ± křemen ± titanit ±
karbonáty

4) Eklogit:

Px (omfacit)
+ Grt (pyrop)

± Ky
± Pl



- ***Význam fluid při metamorfóze metabazitů (hydratace hornin)***
- ve srovnání s metapelity (hlavní fluidní fází H_2O), bývá v metabazitech často větší množství CO_2 .
- většina primárních minerálů je bezvodých – stabilních za HT (pyroxen, olivín, plagioklas), proto při nedostatku H_2O nemusí k metamorfóze vůbec dojít
- při pohřbení do prostředí, kde jsou „mokrě“ metasedimenty, dochází k hydratačním (retrográdním) reakcím
- prostupnost horniny pro fluida určuje rozsah retrográdní přeměny (porézní tufy vs. masivní žíly) a přispívá k ní deformace
- k hydrataci dochází také při metamorfóze oceánského dna (+ hydrotermální fluida)
- při hydratačních reakcích dochází k uvolňování tepla (exotermní reakce), proto dojde-li k nastartování reakcí, probíhají dokud trvají příznivé metamorfní podmínky a dokud se nevyčerpá všechna H_2O
- nepravidelné rozmístění H_2O v hornině vede k tomu, že se často v metabazitech vyskytují nerovnovážné asociace (asociace nepřeměněné spolu s různými generacemi nízkých metamorfních stupňů)
- relikty vyvřelých minerálů a mikrostruktur v hornině jsou zachované většinou v nízkých stupních, do vyšších stupňů v hrubozrnných gabroidních horninách (bez deformace).
- zvýšená aktivita CO_2 vede ke vzniku karbonátů, a to ovlivňuje aktivitu Ca v hornině



Gabro



Bazalt



Zelená břidlice



Facie	metamorfnní asociace metabazitu
<i>nížkotlaké (LP) :</i>	
zeolitová	Laumontit, analcim, heulandit, wairakit. Hojné reliкty minerálů.
albit-epidotických rohovců	Albit + epidot + aktinolit + chlorit. Aktinolit + oligoklas.
amfibolických rohovců	Hornblend + plagioklas ± cummingtonit.
pyroxenických rohovců	Klinopyroxen + ortopyroxen + plagioklas ± olivín ± hornblend.
sanidinitová	V metabazitech asociace není dobře definována.
<i>střednětlaké (MP) :</i>	
prehnit-pumpellyitová	Prehnit + pumpellyit ± chlorit ± albit ± epidot (nížeteplotní zóna). Pumpellyit + aktinolit (výšeteplotní zóna). Lawsonit + albit (rel. výšetlaká zóna).
zelených břidlic	Aktinolit + epidot ± albit ± chlorit ± stilpnomelan (nížeteplotní zóna). Hornblend ± aktinolit + albit + chlorit + epidot ± granát (výšeteplotní zóna).
amfibolitová	Hornblend + plagioklas ± epidot ± granát.
granulitová	Ortopyroxen + klinopyroxen + plagioklas ± olivín ± hornblend (nízký tlak). Granát + klinopyroxen + ortopyroxen + plagioklas ± hornblend (střední tlak). Granát + klinopyroxen + křemen + plagioklas ± hornblend (vysoký tlak).
<i>vysokotlaké (HP) :</i>	
modrých (glaukofanických) břidlic	Glaukofan + lawsonit.
eklogitová	Omfacit + granát. Chybí plagioklas a lawsonit.

- ***1 Zeolitová facie***

- typická asociace: **zeolit + křemen** (NASH, CASH)
- typické minerály:
- analcim, laumontit, stilbit, heulandit, wairakit (zeolity), albit (výše: prehnit, pumpellyit)

- **důležité reakce (se stoupající T):**

NASH: **analcim** + křemen = **albit** + H₂O 200 C, horní hranice diagenese

NASH: analcim = jadeit + H₂O P > 5kbar

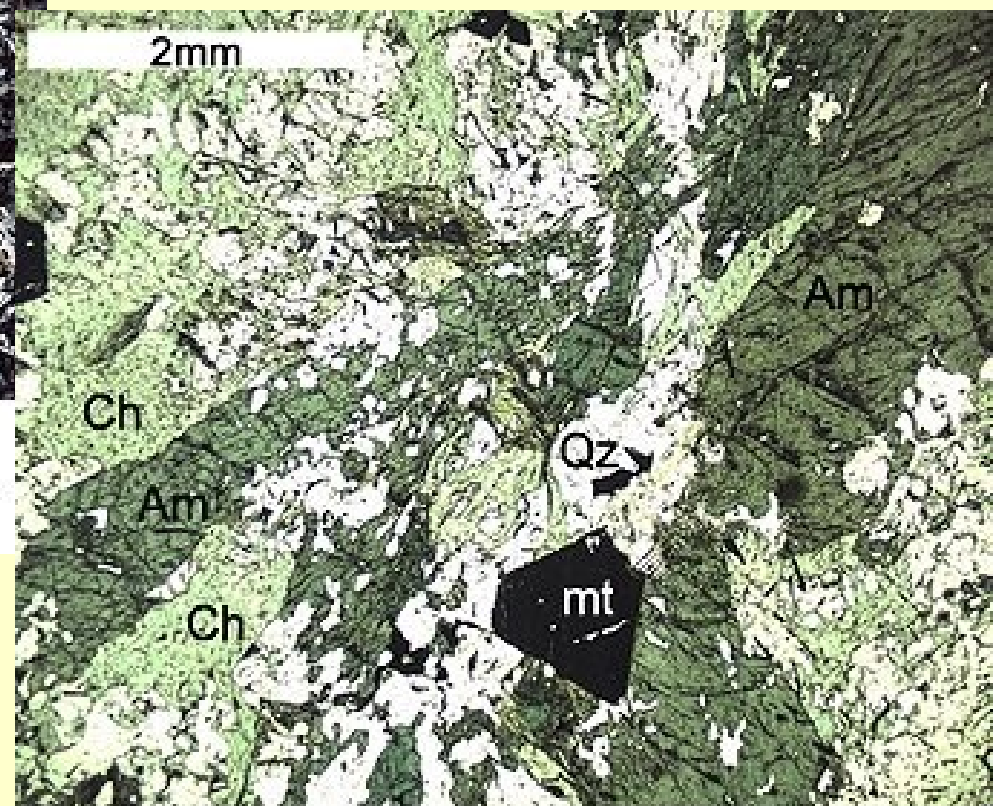
CASH: **stilbit** = **laumontit** + křemen + H₂O ≤ 200 C

CASH: laumontit = lawsonit + H₂O 200-250 C, P > 3kbar

CASHCO₂: laumontit + kalcit = **prehnit** + křemen + H₂O + CO₂ ca 3kbar/300-400 C



Subophitic albite-carbonate rock, altered mafic lava or dolerite. Meurastuksenaho, Kuusamo Schist Belt. Crossed polarisers. Photo Erkki Vanhanen.

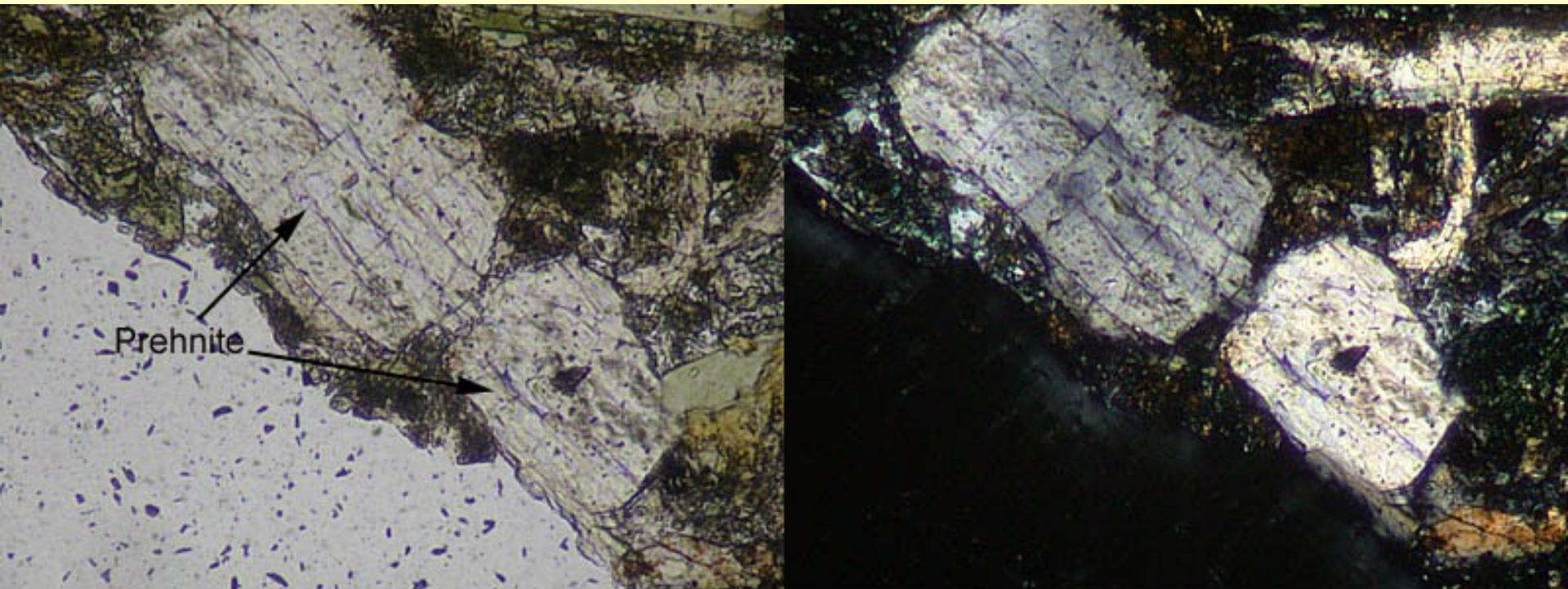


Amphibole rock, intermediate gold mineralisation-related alteration zone at Meurastuksenaho, Kuusamo Schist Belt. Am = amphibole, Ch = chlorite, mt = magnetite, Qz = quartz. Parallel polarisers. Photo Erkki Vanhanen.

• **2. Prehnit-pumpellyitová facie**

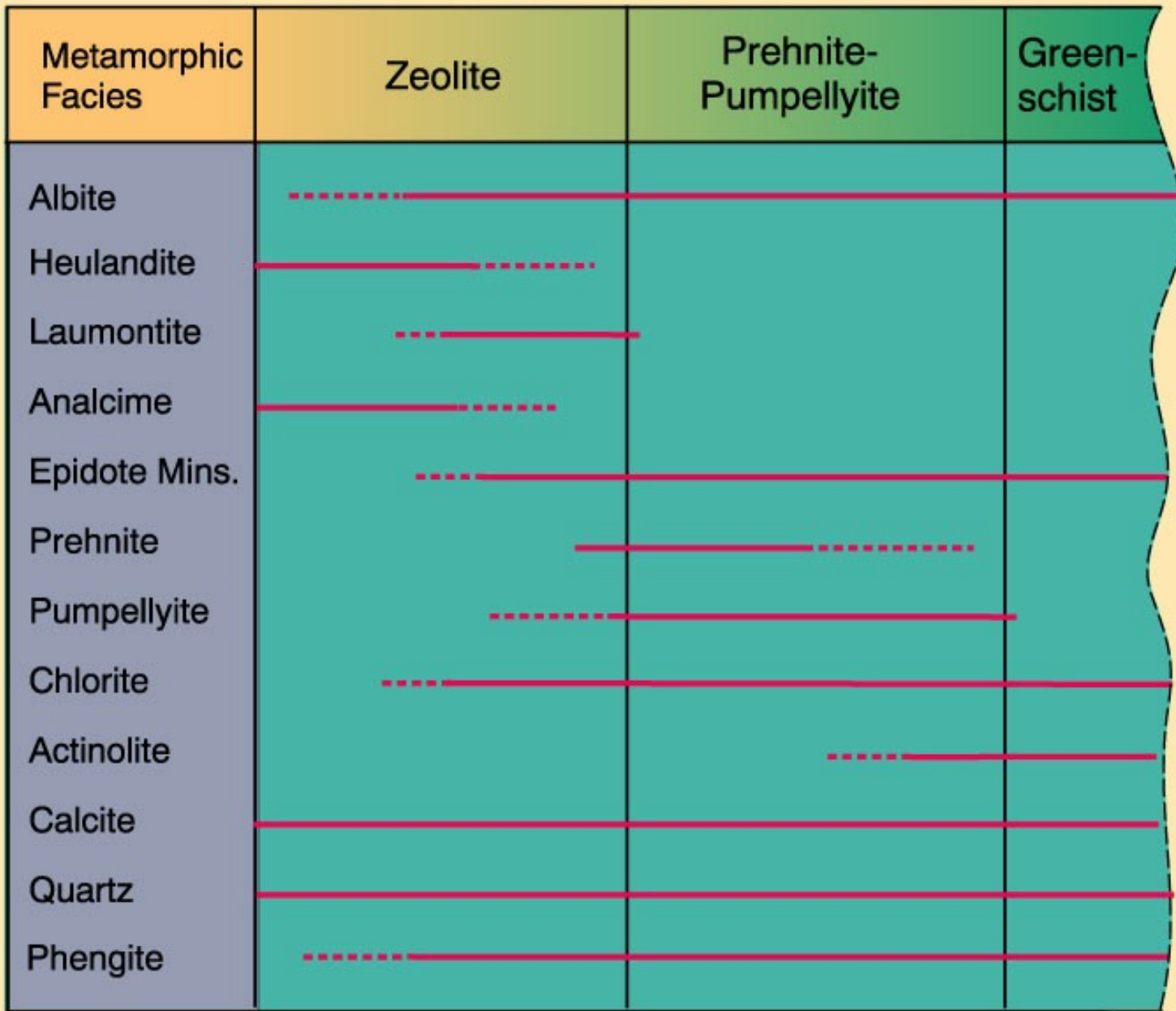
- typické minerály:
- prehnit, pumpellyit, aktinolit, chlorit, albit, kalцит, muskovit, lawsonit, stilpnomelan
- důležitá je přítomnost CO₂: při jeho vyšší aktivitě vznikají Ca-karbonáty a minerály zeolitové facie ani facie prehnit-pumpellyitové nevznikají
- **typické reakce:**

CASH: **prehnit** = *zoisit* + grossular + křemen + H₂O (terminální reakce)



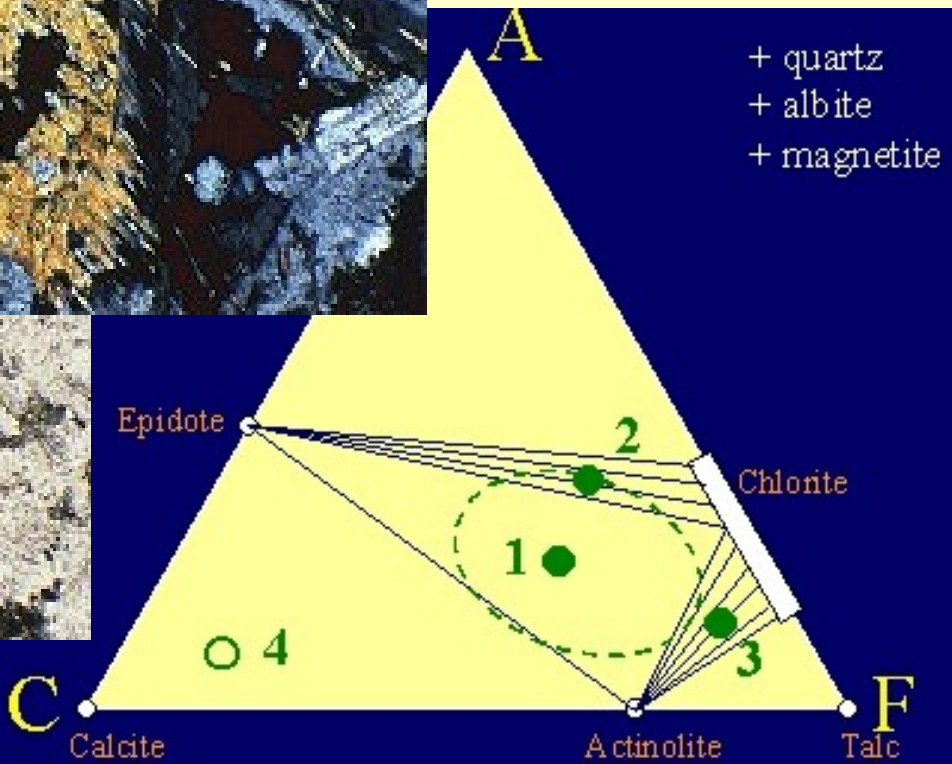
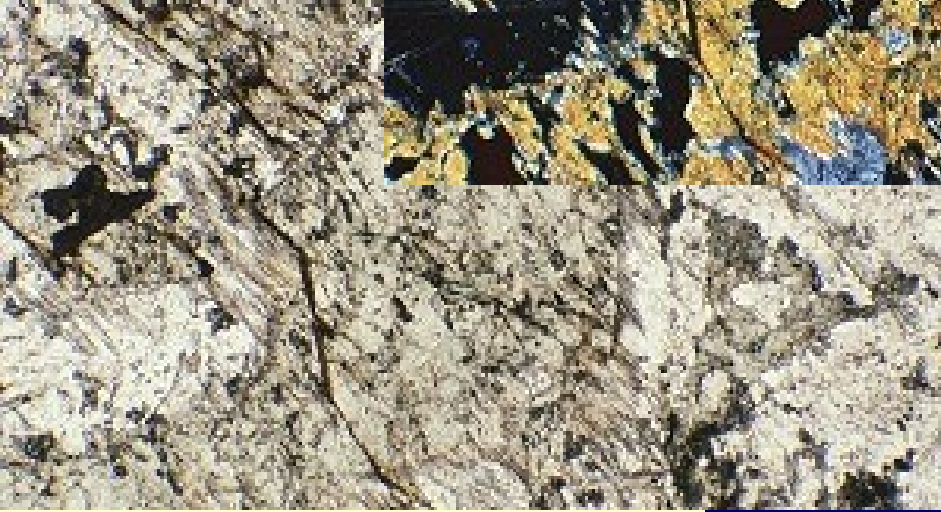
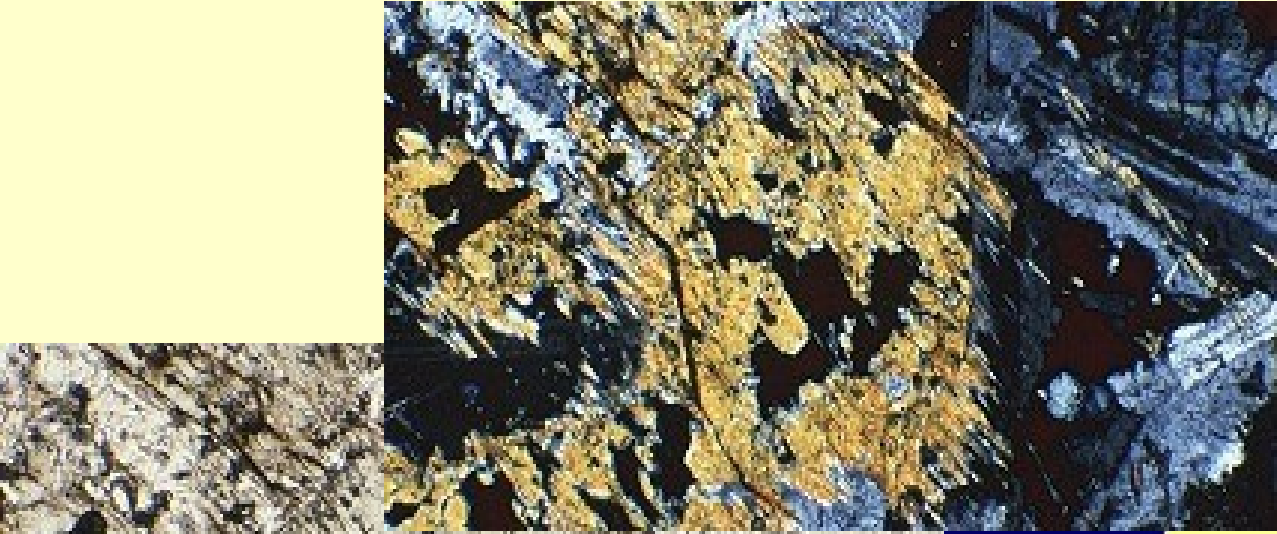
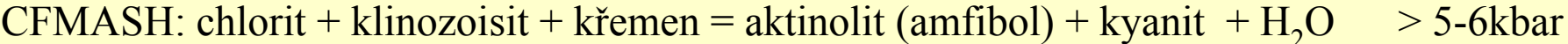
Prehnite crystals. Note the high relief and crystal shape. Birefringence usually stronger than appears here. Coexisting with pumpellyite and chlorite. Check prehnite #2!

Metamorphic Grade →



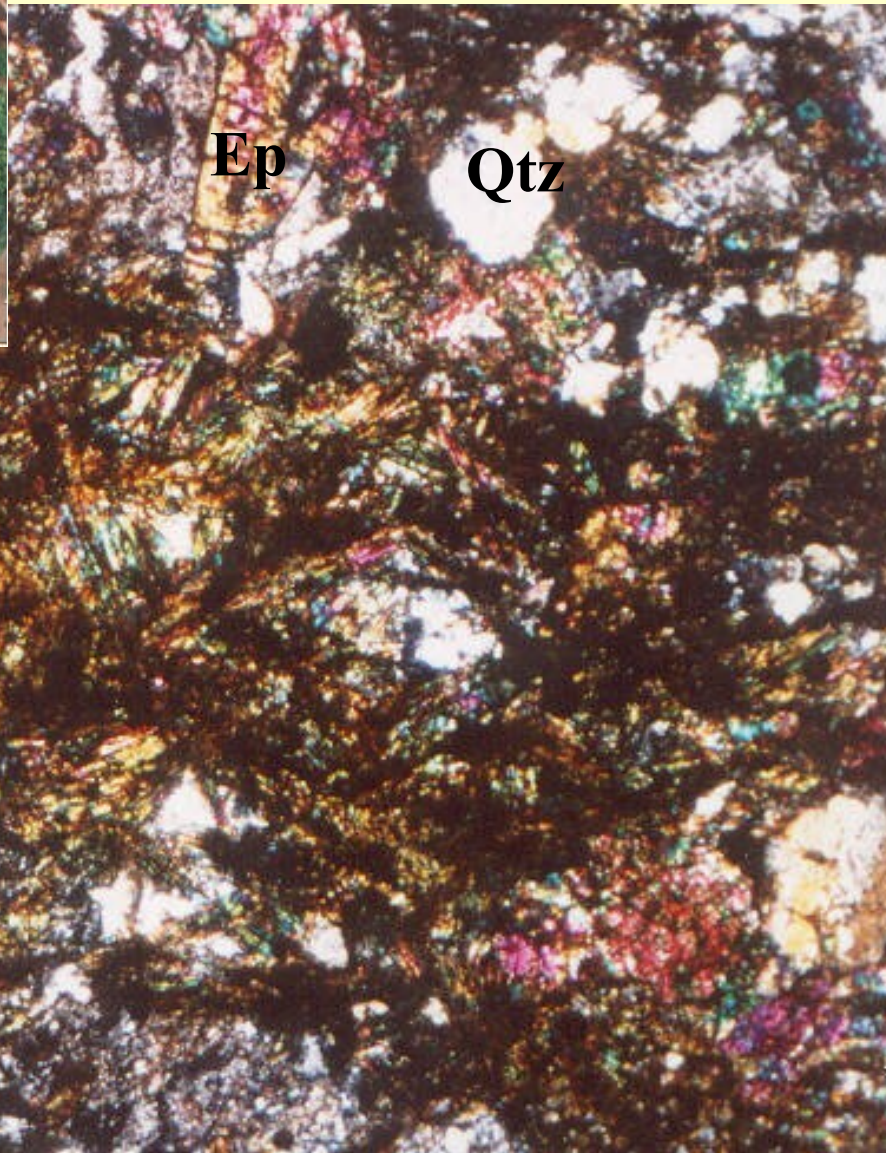
3. *Facie zelených břidlic*

- typické minerály: chlorit, aktinolit, epidot, **albit**, křemen, titanit, kalcit
- v metapelitech odpovídá tato facie chloritové, biotitové a někdy i granátové zóně
- **typické reakce:**



Metagabro: primární min. (Px+Pl) zatlačují aktinolit+chlorit+albit

Facie zelených břidlic



• **4. Amfibolitová facie a facie epidotických amfibolitů**

- typické minerály:
- **amfibol, plagioklas** a někdy epidot, granát, biotit, diopsid, kalcit, Ilm, Ttn
- **přechod facie zelených břidlic a amfibolitové facie (kolem 500 °C pro 5 kbar)**

složité minerální asociace: chlorit + aktinolit + epidot + albit a křemen ± muskovit ± titanit ± epidot ± karbonát (clc, dol, ank)

nahrazeny jednoduchou: **amfibol + plagioklas ± Qtz ± Ilm**

- **důležité reakce:**

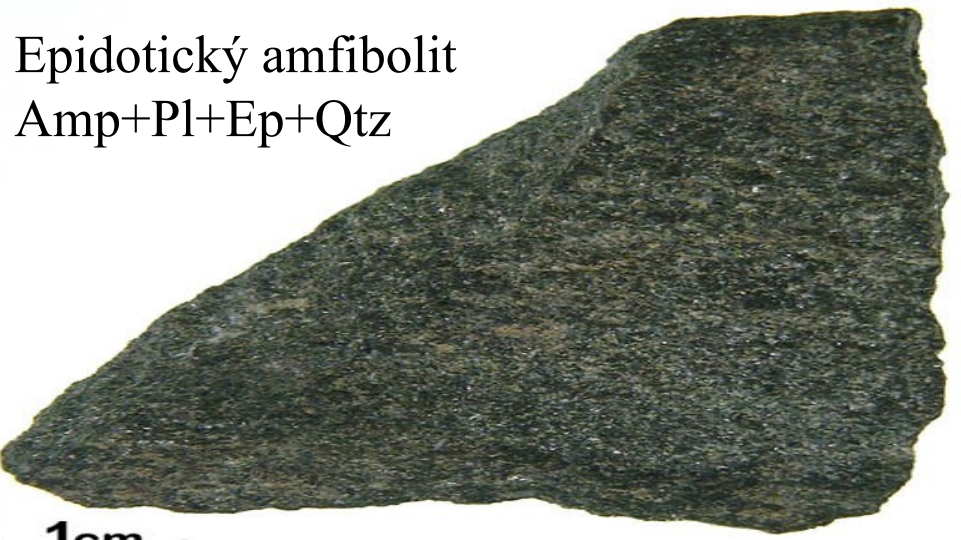
CASH: klinozoisit (Ep) + chlorit + křemen = **tscherm. Hb** + **anortit** + H₂O

Při progresivní metamorfóze během amfibolitové facie

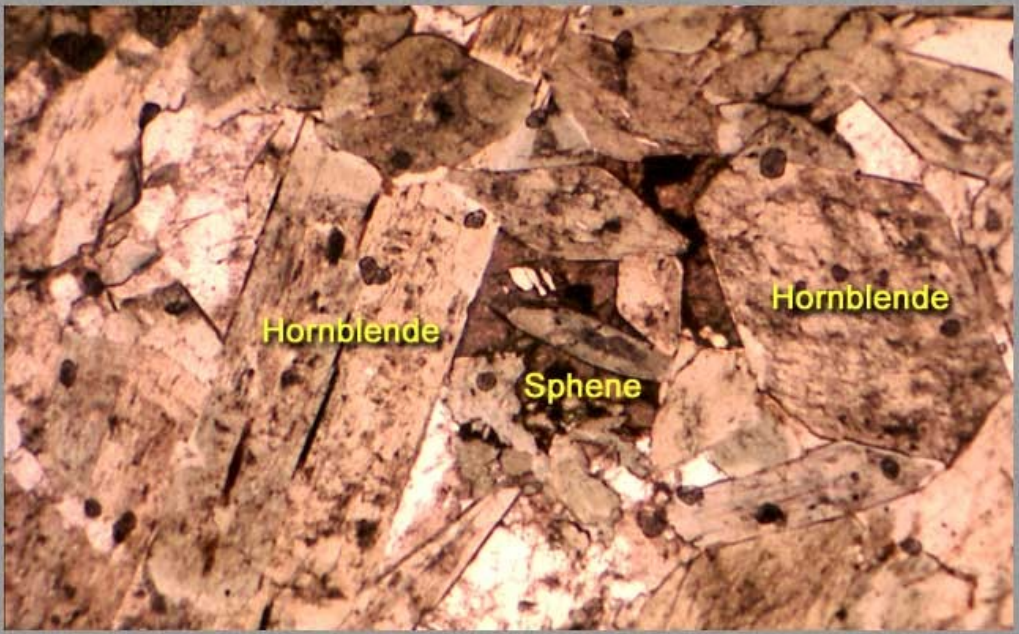
- 1) zvyšuje bazicita plagioklasu - objevuje se oligoklasu (skokem od An₃ do An₁₈ – peristerite gap), oligoklasová izograda má značný význam v zónografii
- 2) z aktinolitu vzniká obecný amfibol (+ Al, alkálie, Ti – zelený tscherm. či pargasitic. Hb)
- 3) u chloritu se zvyšuje X_{Mg} nebo zcela mizí (pak tscherm. složka v Hb) a snižuje se množství epidotu (Ca do Pl) - postupně dochází k vymizení chloritu (cca 550 °C) a epidotu (cca 600 °C)
- 4) Za vyšších teplot se objevují klinopyroxen (cca 650 °C) – hranice svrchní A facie (kontinuální reakce – nelze definovat izogradu v terénu) a granát (pozor na relikty pyroxenů popř. granátů z původní horniny)



1cm



1cm



PPL XPL

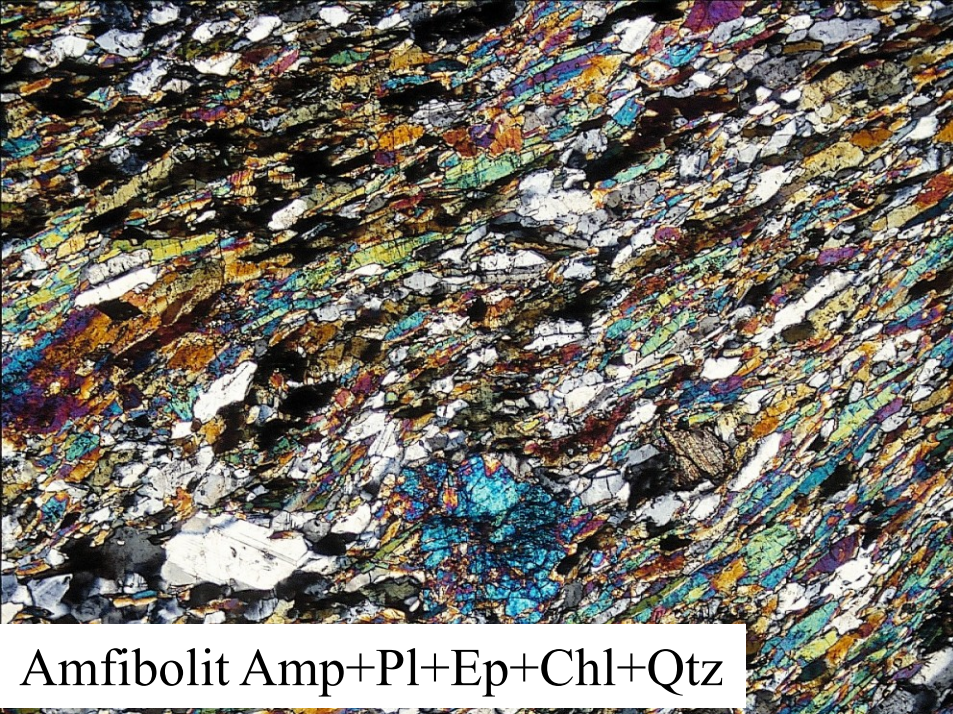
1mm

Epidotický amfibolit
Amp+Pl+Ep+Qtz



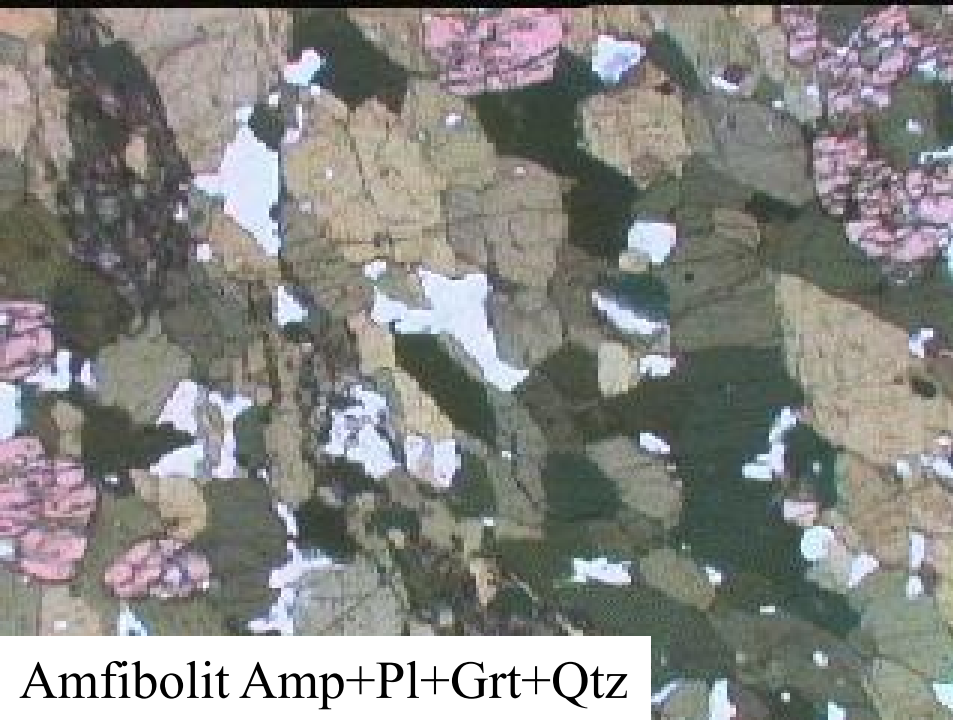
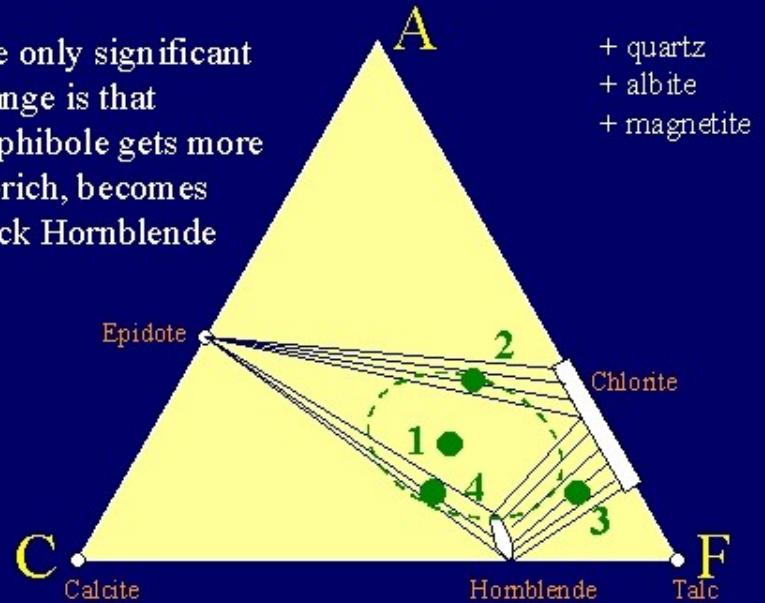
Amfibolit Amp+Pl+Qtz+Ttn

Metabazit metamorfovaný v amfibolitové facii



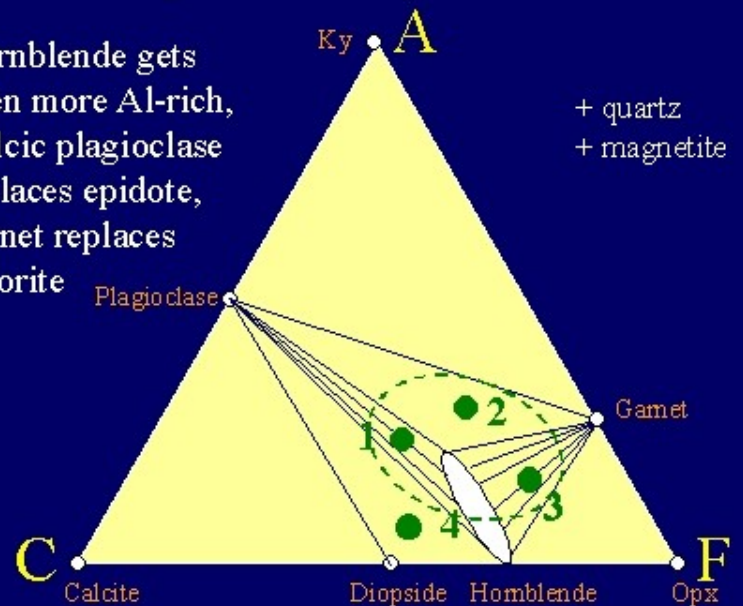
at higher T - Epidote Amphibolite Facies

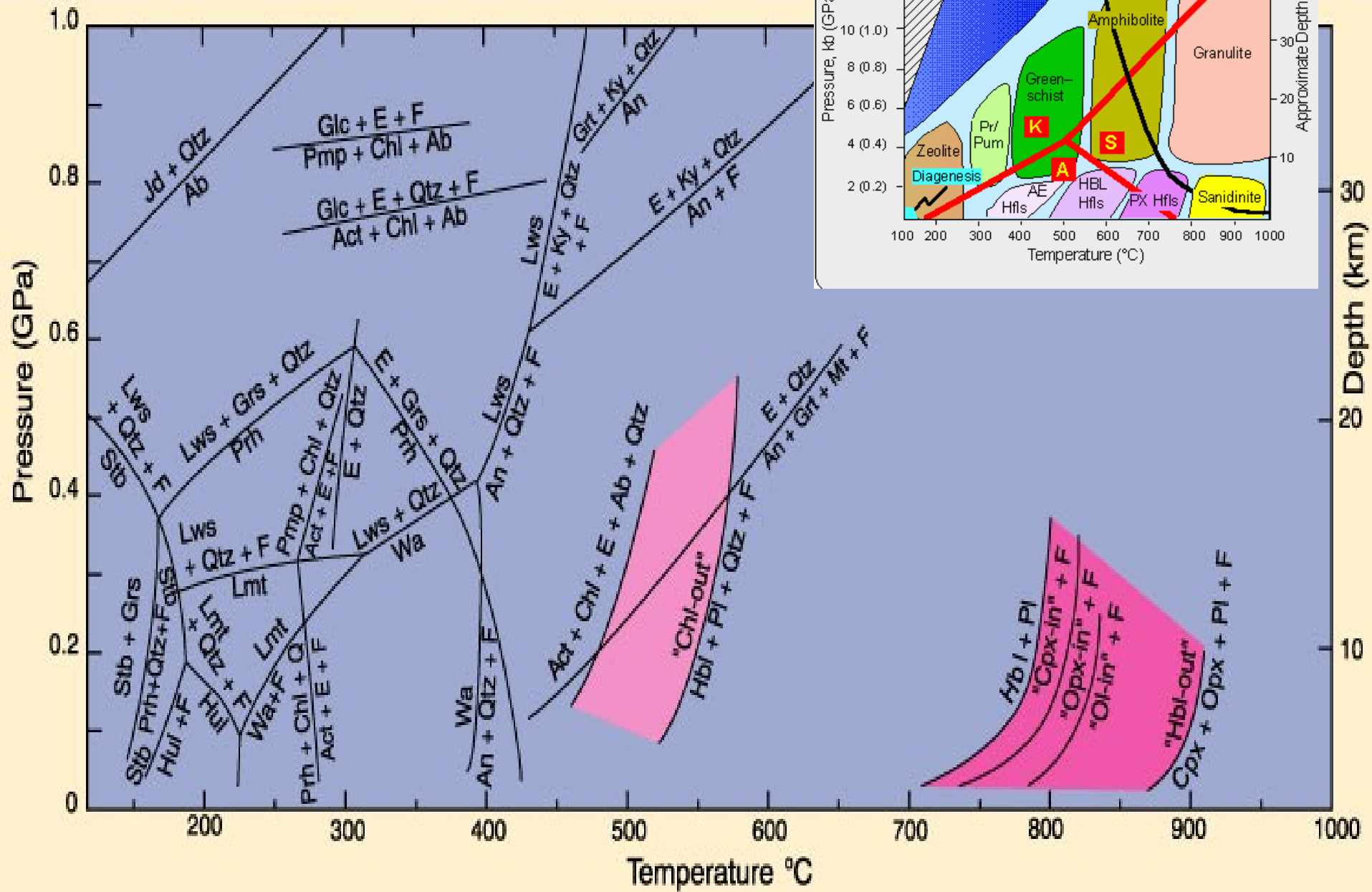
The only significant change is that amphibole gets more Al-rich, becomes black Hornblende



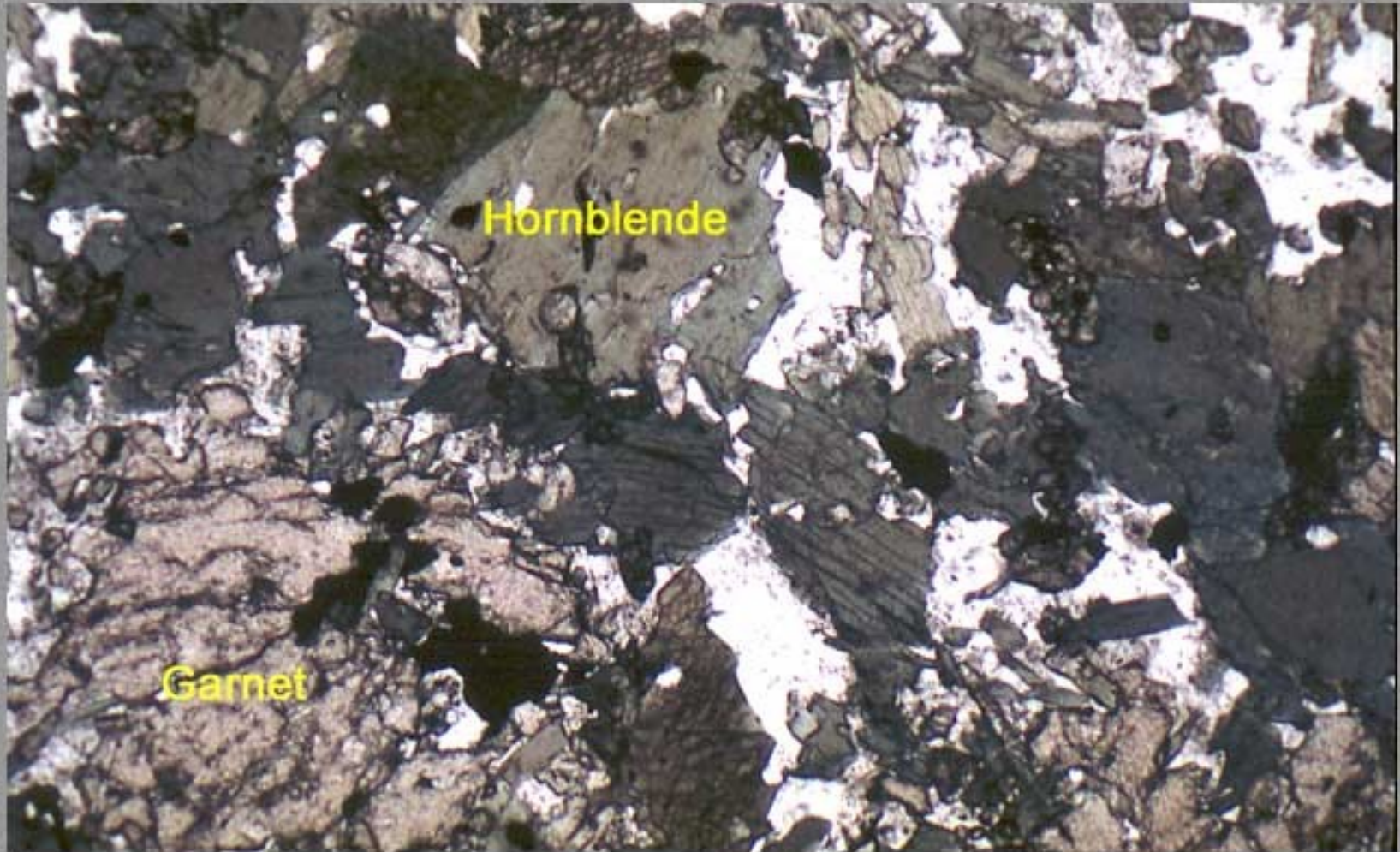
still higher T - Amphibolite Facies

Hornblende gets even more Al-rich, Calcic plagioclase replaces epidote, garnet replaces chlorite





Granátický amfibolit



Hornblende

Garnet

PPL XPL

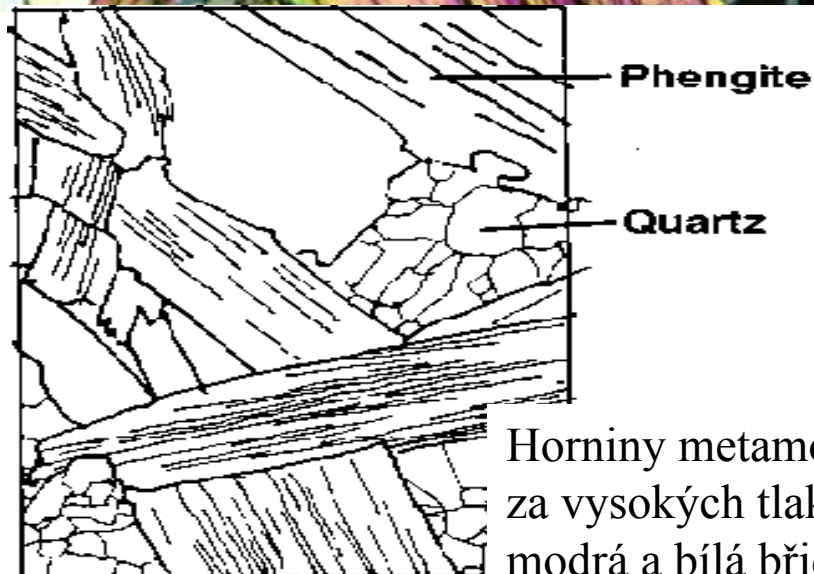
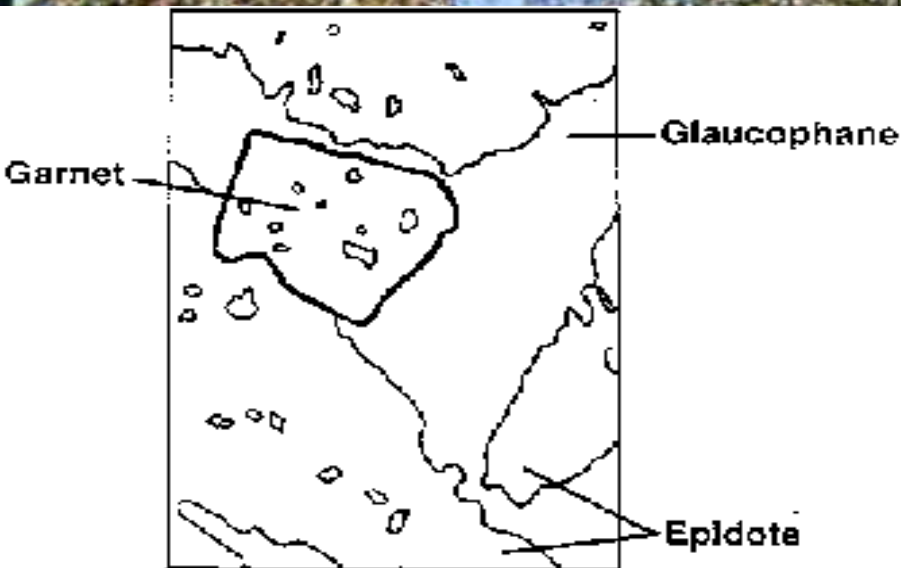
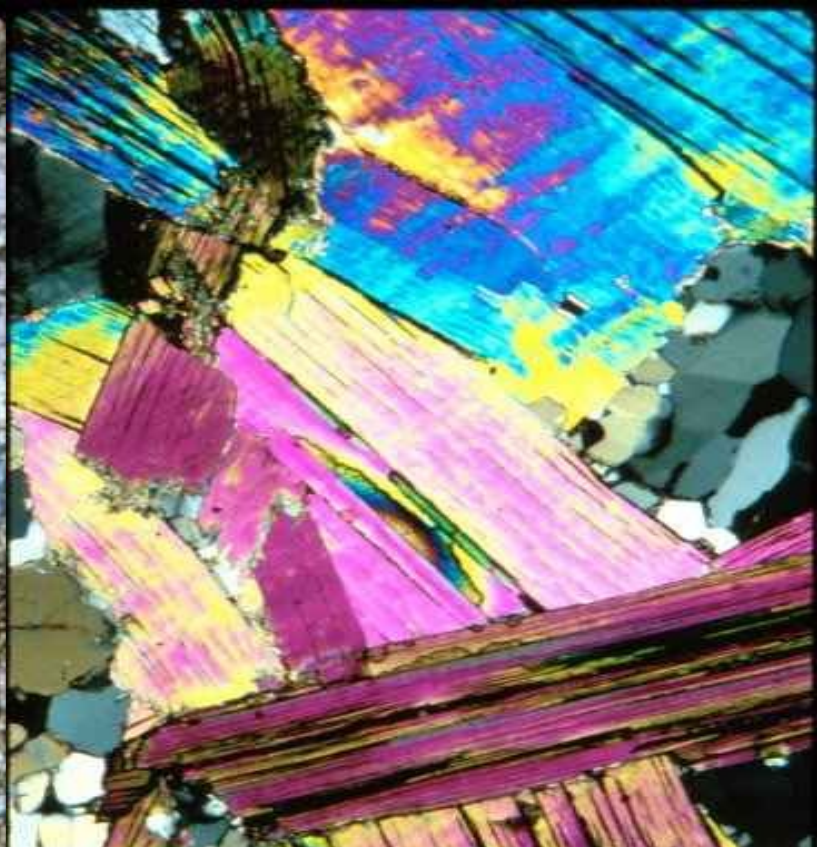
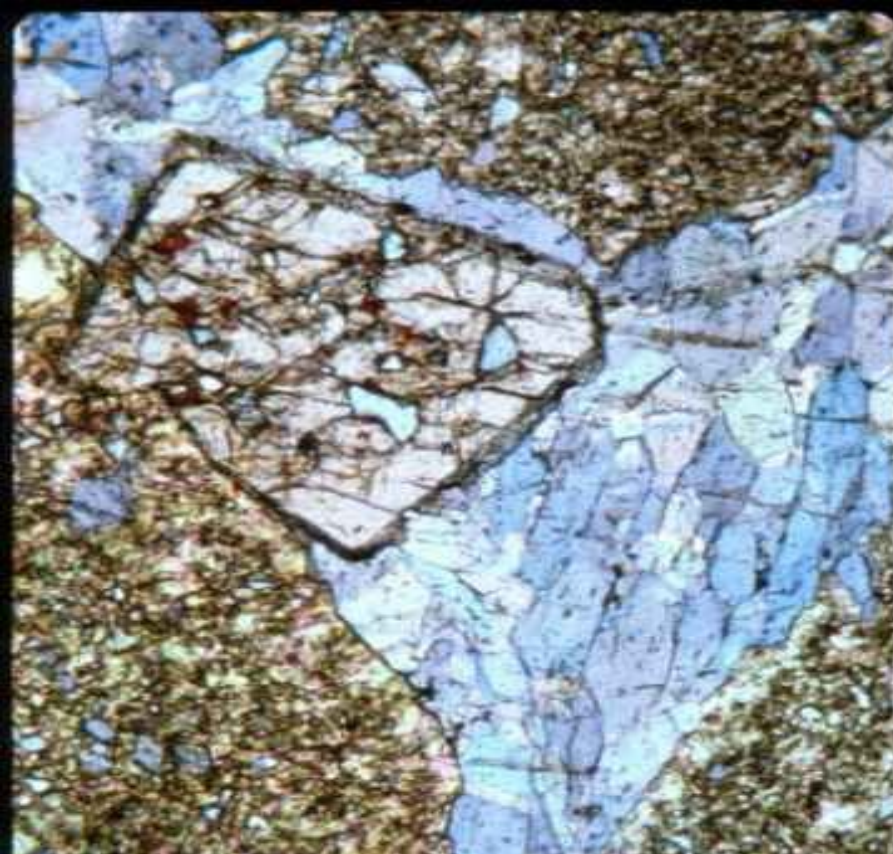
1mm

Metamorphic Grade \longrightarrow

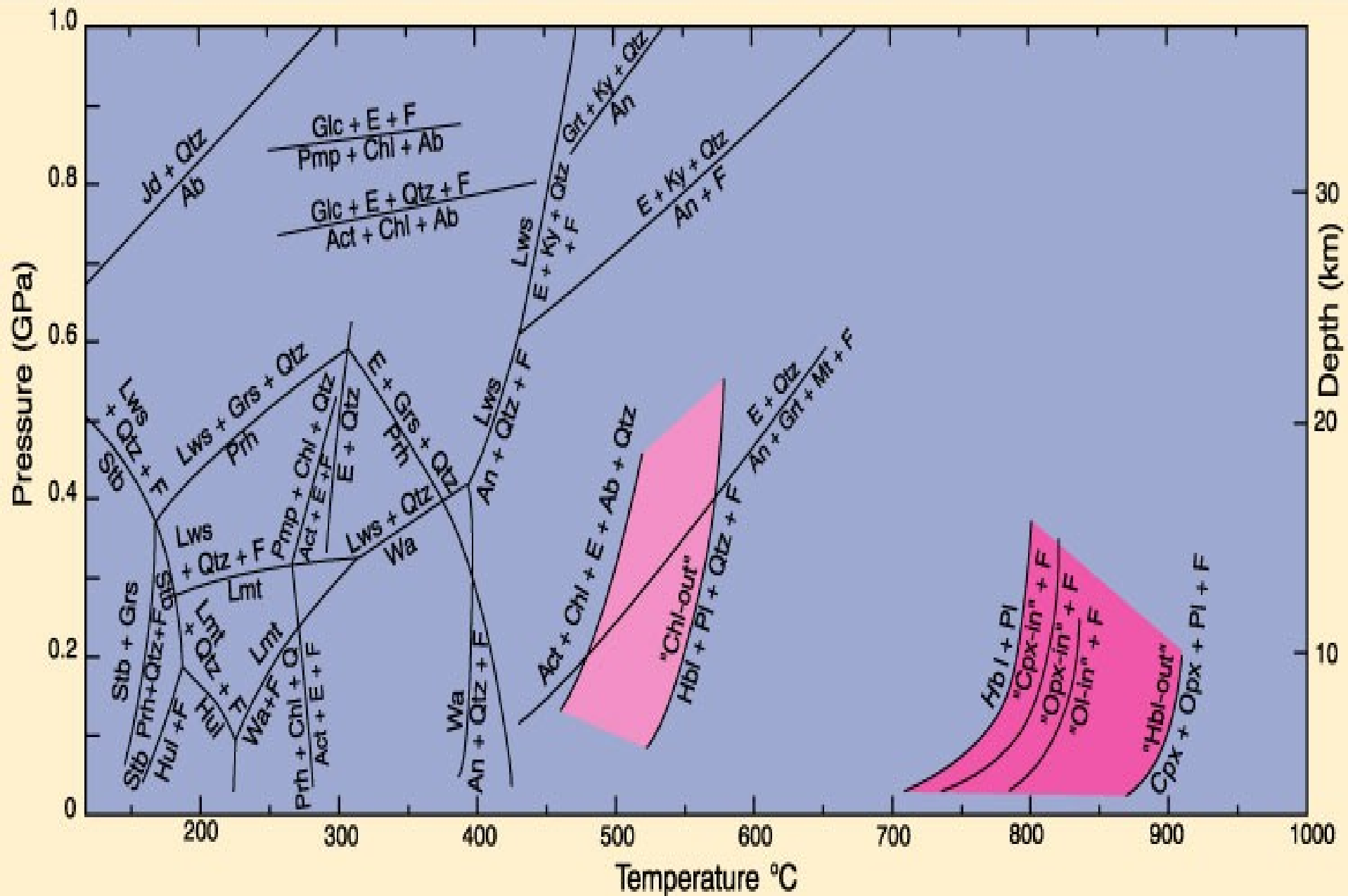
Metamorphic Facies	Greenschist		Transitional States		Amphibolite		Granulite	
Albite	—————		.....				
Plagioclase > An ₁₂			Oligoclase				Andesine	
Epidote	—————		.....				
Actinolite	—————		.....				
Hornblende	—————		.....				.....
Augite					.....		—————
Orthopyroxene							—————	
Chlorite	—————		.....				
Garnet			.....				—————
Biotite	.....		.....				.....
Quartz	.....		.....				.....
Phengite	.....		.....		
Cummingtonite			.....		.....		.....
Zone for associated metapelites	Chlorite Zone	Biotite Zone	Garnet Zone	Staurolite and Kyanite Zones	Sillimanite-Muscovite Zone	K-feldspar-Sillimanite Zone	Cordierite-Garnet Zone	

- **6. *Facie modrých břidlic***

- teplotně odpovídá zhruba facii zelených břidlic, ale za vyšších tlaků
- typické minerály:
- alkalické amfiboly (glaukofan, riebekit, crossit) – modré/fialové pleo., lawsonit, chlorit, granát, paragonit, fengitický muskovit, mastek, omfacit, kyanit, kalcit/aragonit (HP), rutil
- subdukční zóny
- Typické reakce:
- **přechod z prehnit-pumpellyitové facie**
- CASH-CO₂: prehnit + kalcit = **lawsonit** + zoisit + H₂O + CO₂
- NMFASH: albit + chlorit = **glaukofan** + H₂O
- **přechod z facie zelených břidlic**
- CNMFASH: aktinolit + chlorit + albit = **glaukofan** + zoisit + křemen + H₂O
- CNMFASH: aktinolit + chlorit + albit + křemen = **glaukofan** + **lawsonit** + H₂O
- **přechod do eklogitové facie**
- CNMFASH: albit + epidot + glaukofan = **omfacit** + paragonit + ob. amfibol + H₂O
- CNMFASH: zoisit + glaukofan = granát + **omfacit** + paragonit + křemen + H₂O
- **přechod z nižších tlaků do modrých břidlic a eklogitová facie:**
- NAS: albit = **jadeit** + křemen
- **horní tlakový limit:**
- NASH: paragonit = **jadeit** + kyanit + H₂O



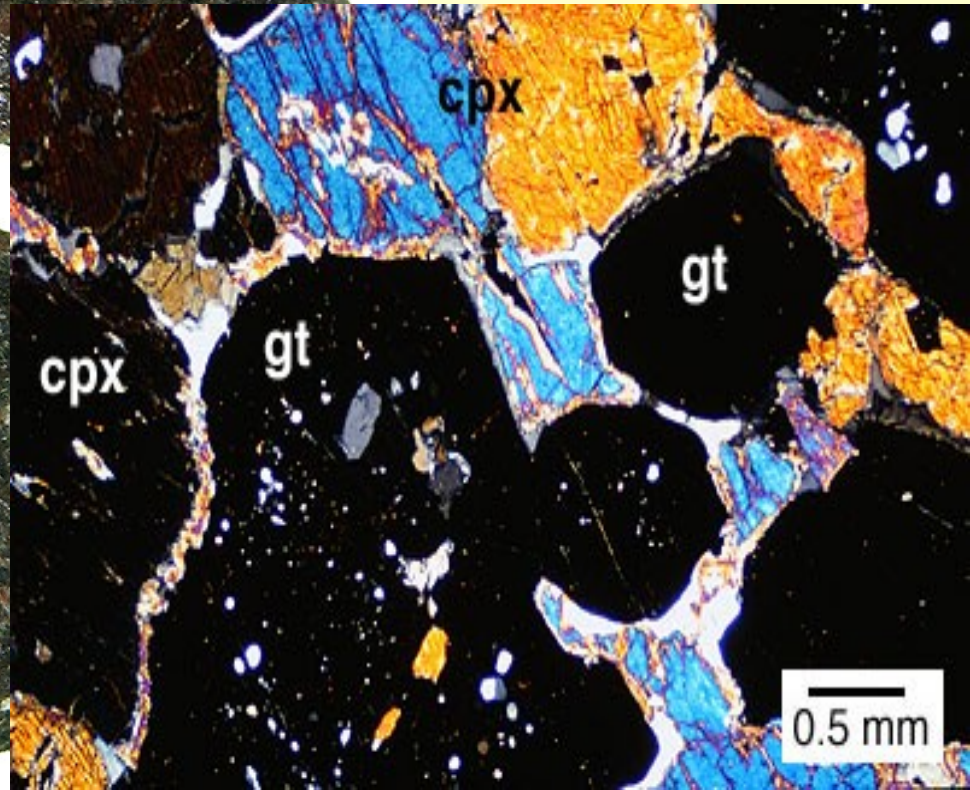
Horniny metamorfované
za vysokých tlaků:
modrá a bílá břidlice



- **5. Granulitová facie (asi od 650-850 C)**
- typické minerály: pyroxeny - **ortopyroxen** + klinopyroxen, **plagioklas**, granát , hercynit, skapolit, hnědý amfibol (HT)
-
- **typické reakce (vznikají mafické granulity):**
- CMSH: tremolit = klinopyroxen + ortopyroxen + SiO₂ + H₂O
- CMASH: tschermakit amf. = klinopyroxen + ortopyroxen + An komponenta + H₂O
- CMASH: tremolit + grosular = klinopyroxen + ortopyroxen + An komponenta + H₂O
- reakce oddělující pyroxenické granulity (pod 5-7 kbar) od výšetlakých granátických granulitů a eklogitů:
- CMAS: Opx (*En*) + Pl (*An*) = Cpx (*Di*) + Grt (*Prp*) + Qtz
- **typy granulitů podle výše tlaku:**
- LP: plagioklas + klinopyroxen + **ortopyroxen** (HT – intruze bazických magmat)
- MP: granát + plagioklas + klinopyroxen + ortopyroxen + amfibol (hnědý)
- HP: klinopyroxen + **granát** + křemen, někdy plagioklas

- **7. Eklogitová facie**
- typická asociace: granát + omfacit (**nepřítomnost plagioklasu**), křemen (coesit), kyanit, rutil, paragonit, fengitický muskovit, amfibol, zoisit, karbonát
- typické horniny: eklogity, mafické, s vysokou hustotou $> 3,3 \text{ gcm}^{-3}$
- Typické reakce:
- **hranice granulitové a eklogitové facie:**
- CNFMAS: ortopyroxen + plagioklas = granát + klinopyroxen + křemen
- NAS: albit = jadeit + křemen
- CAS: anortit = grosular + kyanit + křemen
- Grosular a jadeit se ve skutečnosti vyskytují pouze jako součást pevných roztoků granátu resp. pyroxenu.
- omfacit = klinopyroxen složený ze složek jadeitu - NaAl , akmitu - NaFe^{3+} - diopsidu a hedenbergitu - Ca (Mg, Fe)
- paragonit = jadeit + kyanit
- **kontinuální reakce uvnitř eklogitové facie:**
- CMAS: grosular + pyrop + křemen = diopsid + kyanit (vysokotlaké eklogity)
- CMAS: grosular + ortopyroxen = diopsid + pyrop
- CMASH: zoisit + pyrop + křemen = kyanit + diopsid + H_2O

Eklogit



1 cm

0.5 mm

• **Typy eklogitů:**

podle vzniku:

- metamorfní eklogity vznikající HP metamorfózou v orogenních pásmech v zemské kůře
- magmatické eklogity (granátické pyroxenity) vznikající krystalizací z taveniny v plášti

podle složení granátu:

- eklogity spjaté s kimberlity, dunity a peridotity (plášťové) s obsahem pyropové složky > 55 mol.% (často magmatické)
- eklogity z terénů metamorfovaných ve středním a vysokém stupni a granátem s 30-55 mol.% pyropu
- eklogity spjaté s glaukofanovými (modrými) břidlicemi s granátem < 30 mol.% pyropu

podle teploty vzniku:

- LT eklogity: úzký vztah k subdukci, vznikají z modrých břidlic, obsahují minerály s H_2O
- MT eklogity: vznikají při kontinentální kolizi z amfibolitů
- HT eklogity: vznikají v hlubších částech zemské kůry nebo v plášti přímo z magmatu, nezbytný je silný přínos tepla, typicky bezvodé minerály