

Metamorfni petrologie II

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	$\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

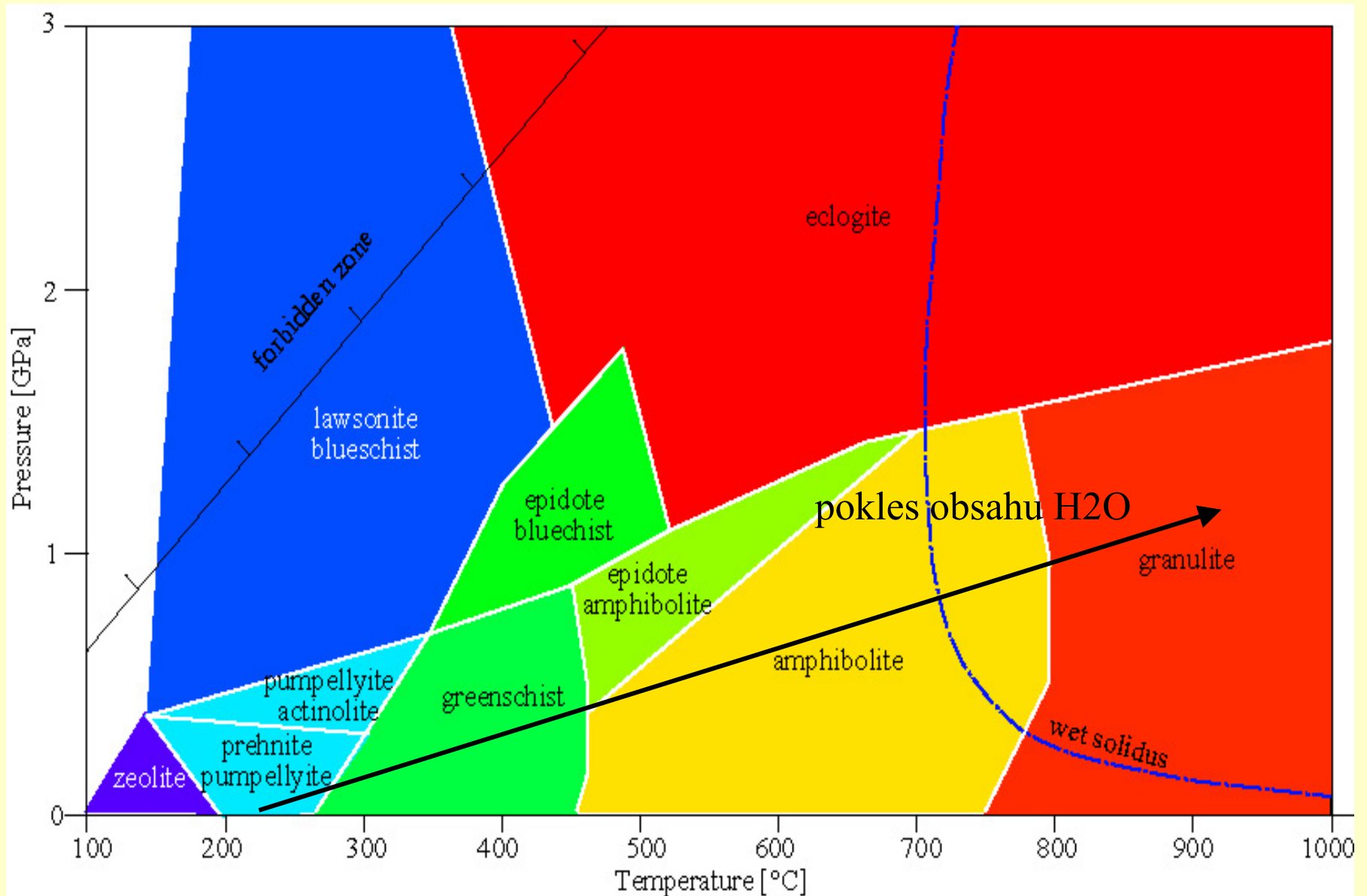
Jiné chemické systémy (méně časté)

- 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

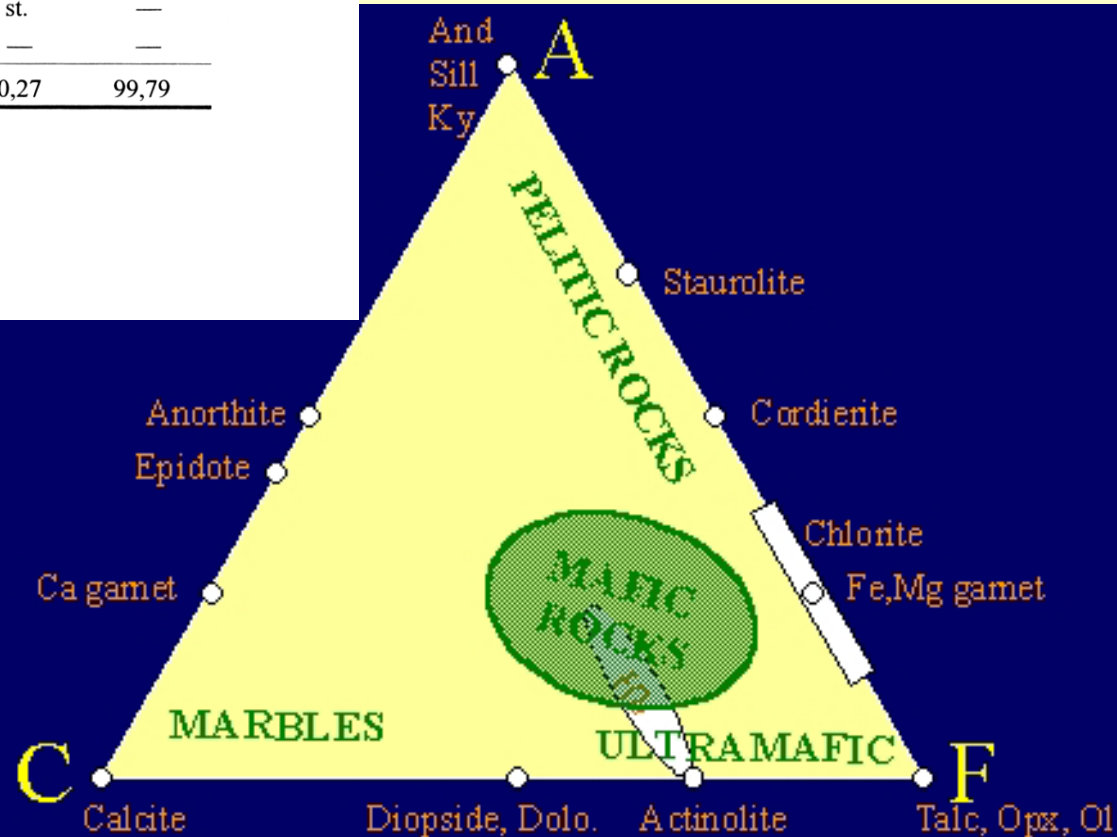
1. Metabazalt z polštářové lávy, Koterov.
2. Zelená břidlice, Bližejov.
3. Amfibolit pestré série moldanubika, Chýnov-Pacova hora.
4. Granátický amfibolit, Broumov.
5. Pyroxenický granulit, Zrcadlová Hut' u Českého Krumlova.
6. Eklogit, Křížová hora, saxothuringikum.

protolit: intermediární až bazické
 vyvřelé horniny → metabazity

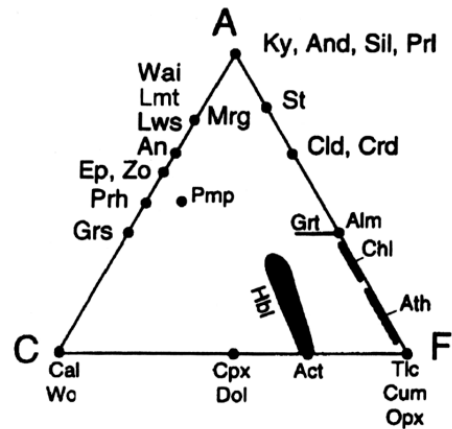
- 1) bazalty - oceánická kůra (MORB)
 více MgO, FeO a CaO vs. andezity
- 2) andezity – ostrovní oblouky,
 kontinentální okraje pacifického
 typu, více SiO₂, Al₂O₃ a alkálií

Systémy: CNFMASH, NASH,
 CASH, CNASH

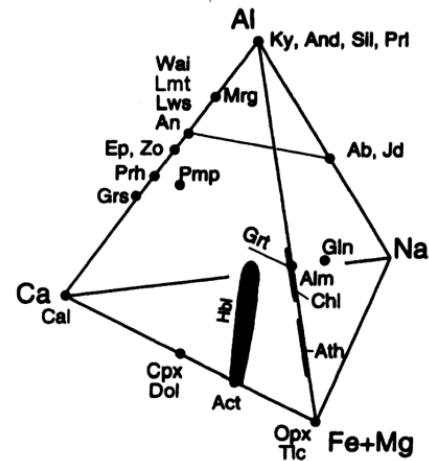
Diagramy: ACF, AFM, ACFM



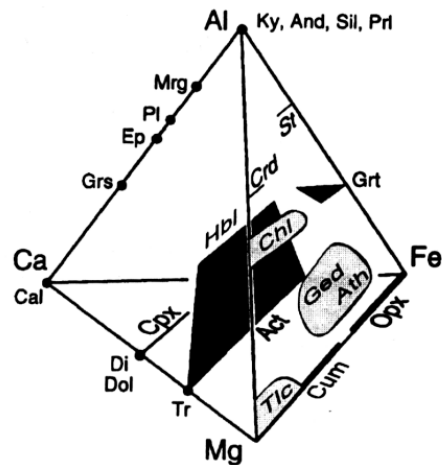
- Mafické horniny jsou vhodnější pro studium metamorfózy za velmi nízkých a nízkých stupňů a dále za vysokých stupňů (hlavně HP). Během středního stupně probíhá řada kontinuálních reakcí v širokém poli PT podmínek, je zde stabilní asociace amfibol + plagioklas, a metabazity jsou mnohem méně citlivé na 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)



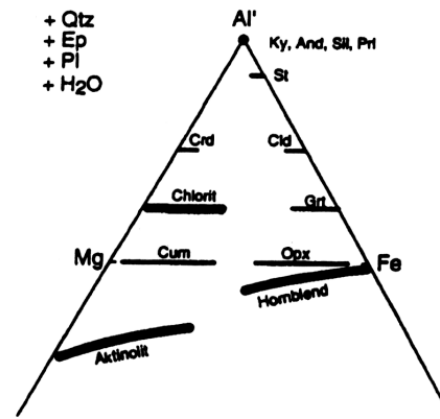
Obr. 5-1. Diagram ACF s projekcí charakteristických minerálů metabazitů. Převzato ze Speara (1993).



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, kde je hlavní fluidní fází H_2O , bývá v metabazitech někdy přítomno také větší množství CO_2 .
- - Většina primárních minerálů metabazitů 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



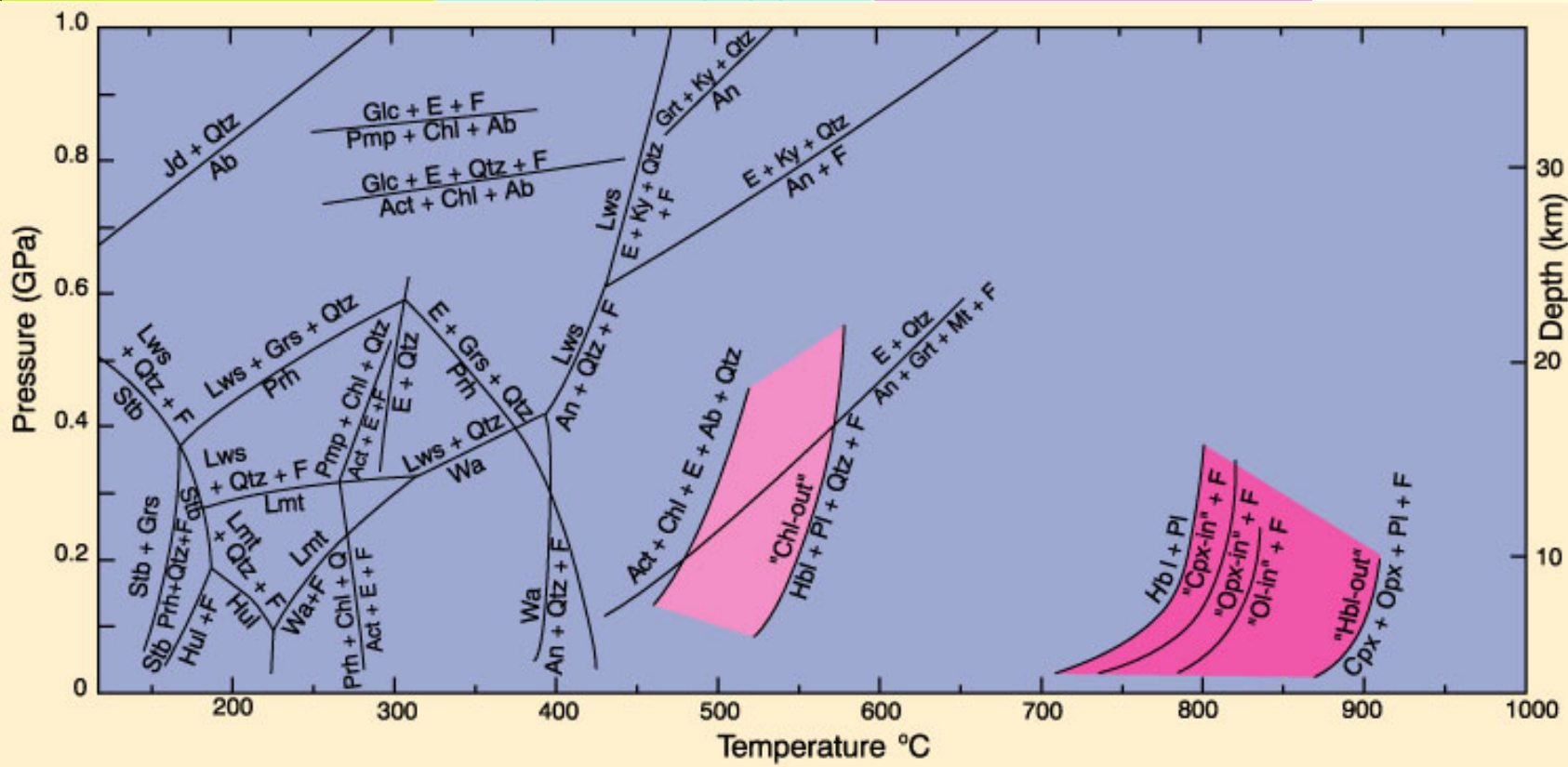
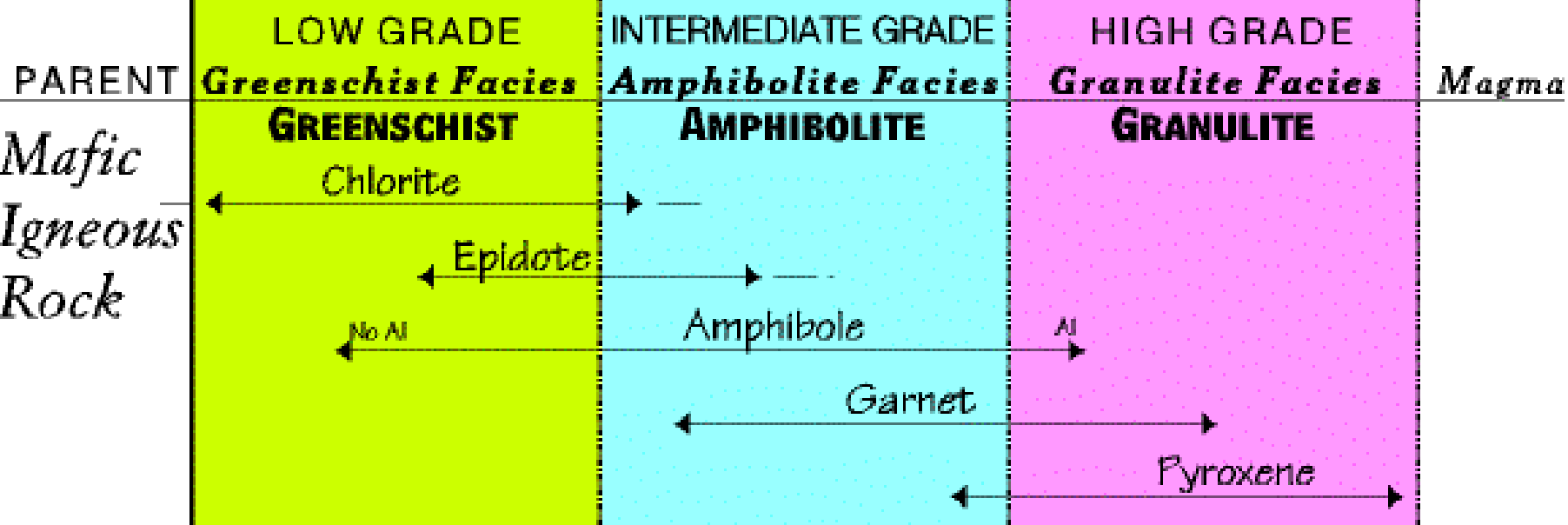
Bazalt



Zelená břidlice



Facie	metamorfni asociace metabazitu
<i>nizkotlaké (LP) :</i>	
zeolitová	Laumontit, analcim, heulandit, wairakit. Hojné relikticky minerálů.
albit-epidotických rohvců	Albit + epidot + aktinolit + chlorit. Aktinolit + oligoklas.
amfibolických rohvců	Hornblend + plagioklas ± cummingtonit.
pyroxenických rohvců	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, H₂O), 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 (PP)

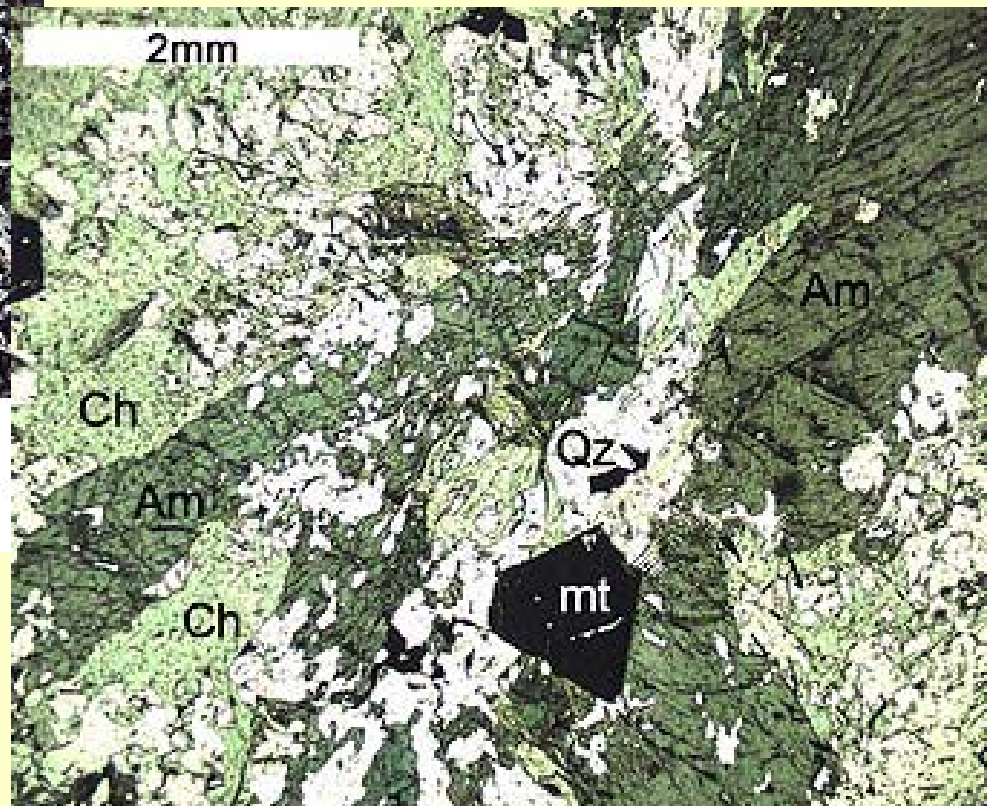
CASHCO₂: laumontit + kalcit = **prehnit** + křemen + H₂O + CO₂ ca 3kbar/300-400°C (PP)

0.25mm



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

2mm

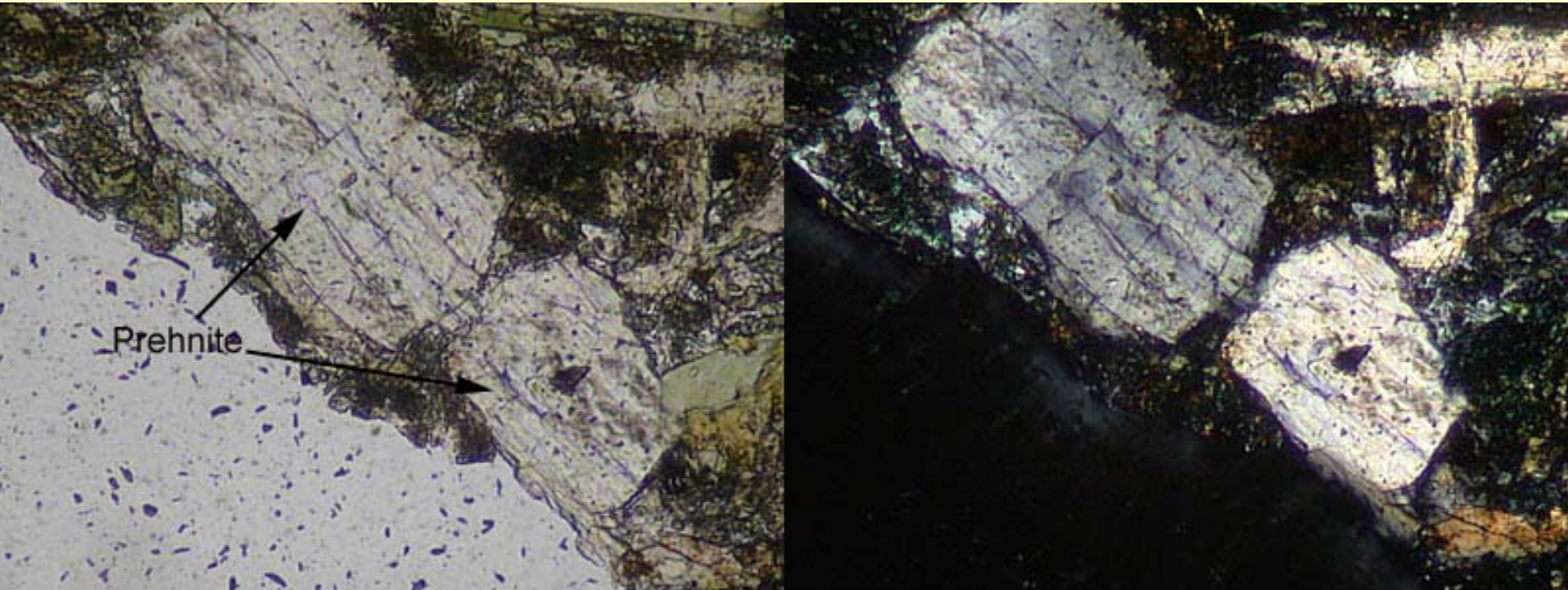


Amphibole rock, intermediate gold mineralisation-related alteration zone at Meurastuksenaho, Kuusamo Schist Belt. Am = amphibole, Ch = chlorite, mt = magnetite, Qz = quartz. Parallel polarisers. Photo Erkki Vanhanen.

• **2. Prehnite-pumpellyitová facie**

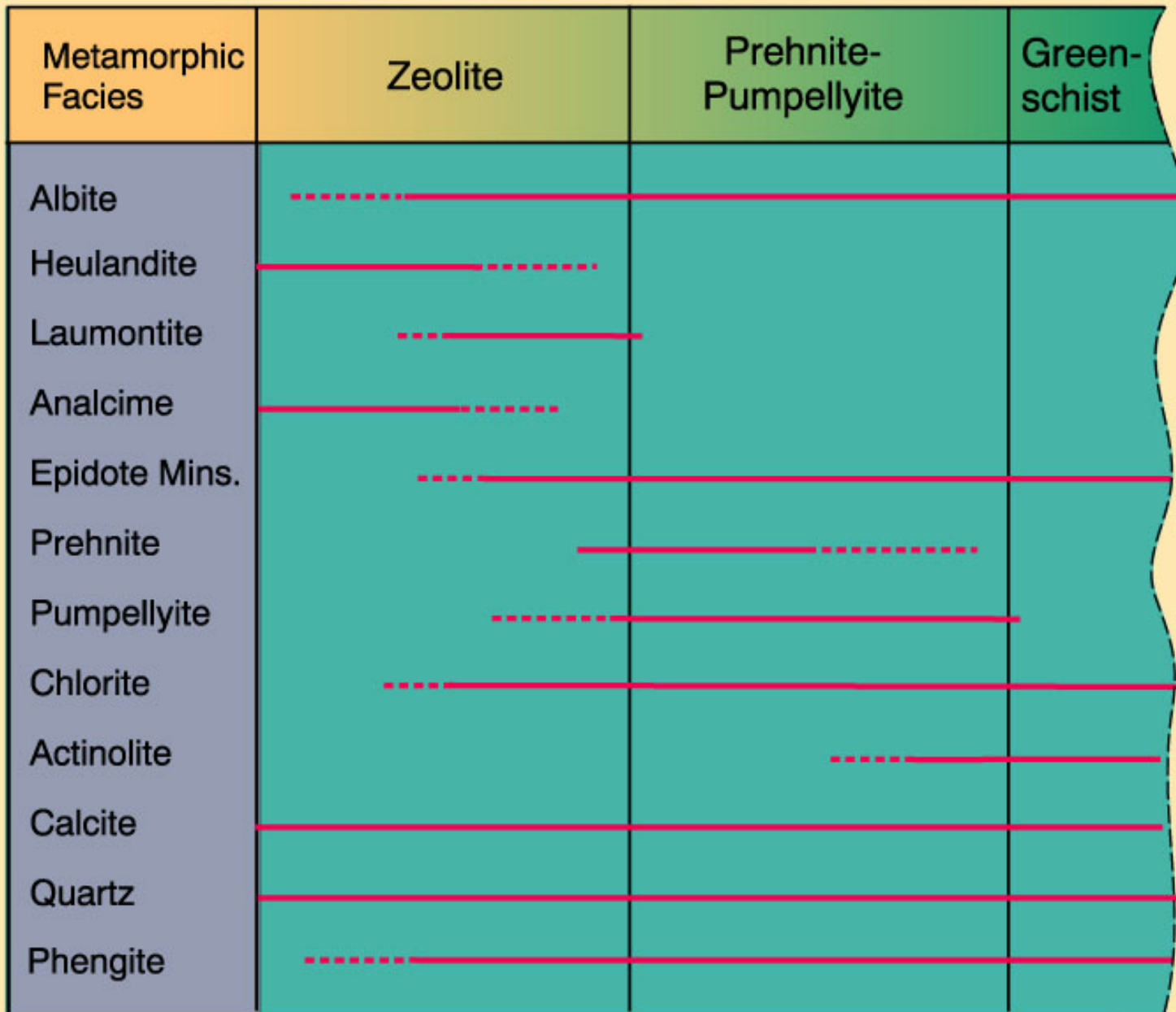
- typické minerály: prehnit, pumpellyit, aktinolit, chlorit, albit kalcit, muskovit, lawsonit, stilpnomelan
- důležitá je přítomnost CO₂: při jeho vyšší aktivitě vznikají Ca-karbonáty a minerály zeolitové facie ani facie prehnit-pumpellyitové nevznikají
- Typické reakce:

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



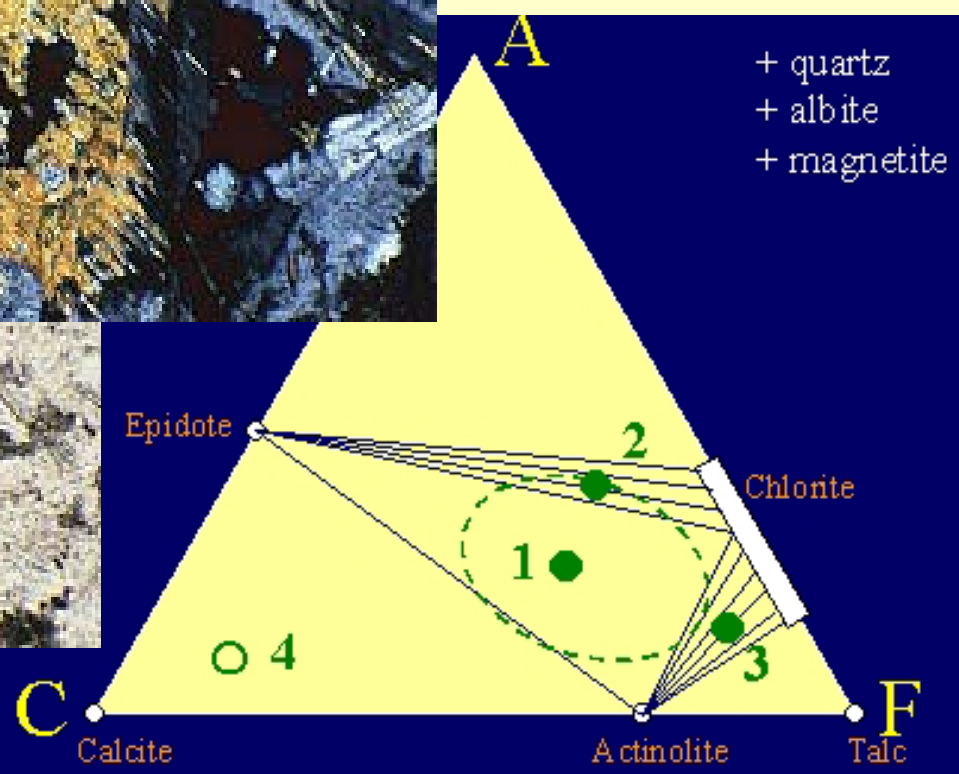
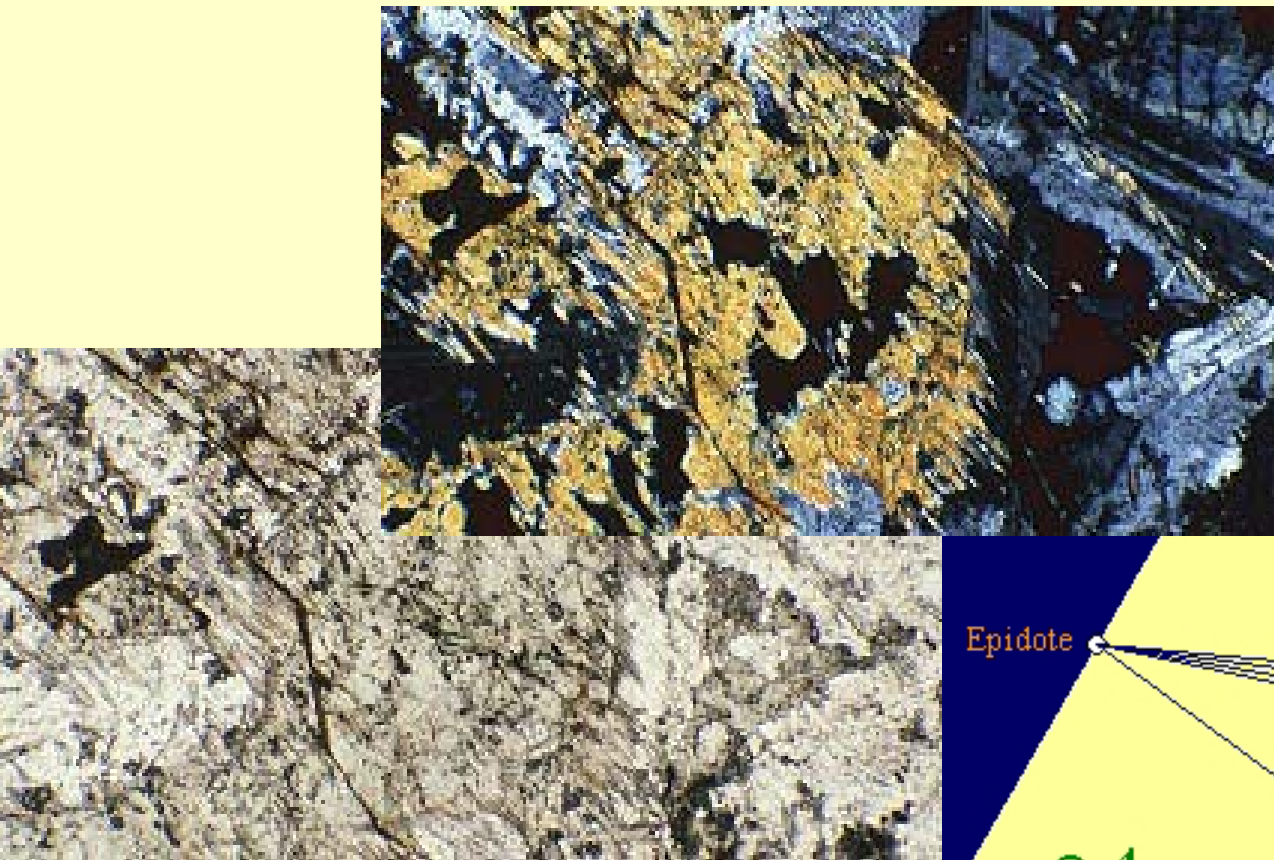
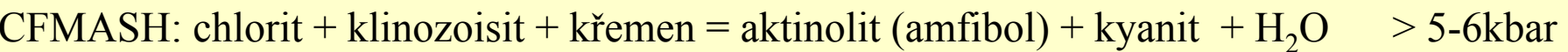
Prehnite crystals. Note the high relief and crystal shape. Birefringence usually stronger than appears here. Coexisting with pumpellyite and chlorite. Check prehnite #2!

Metamorphic Grade →



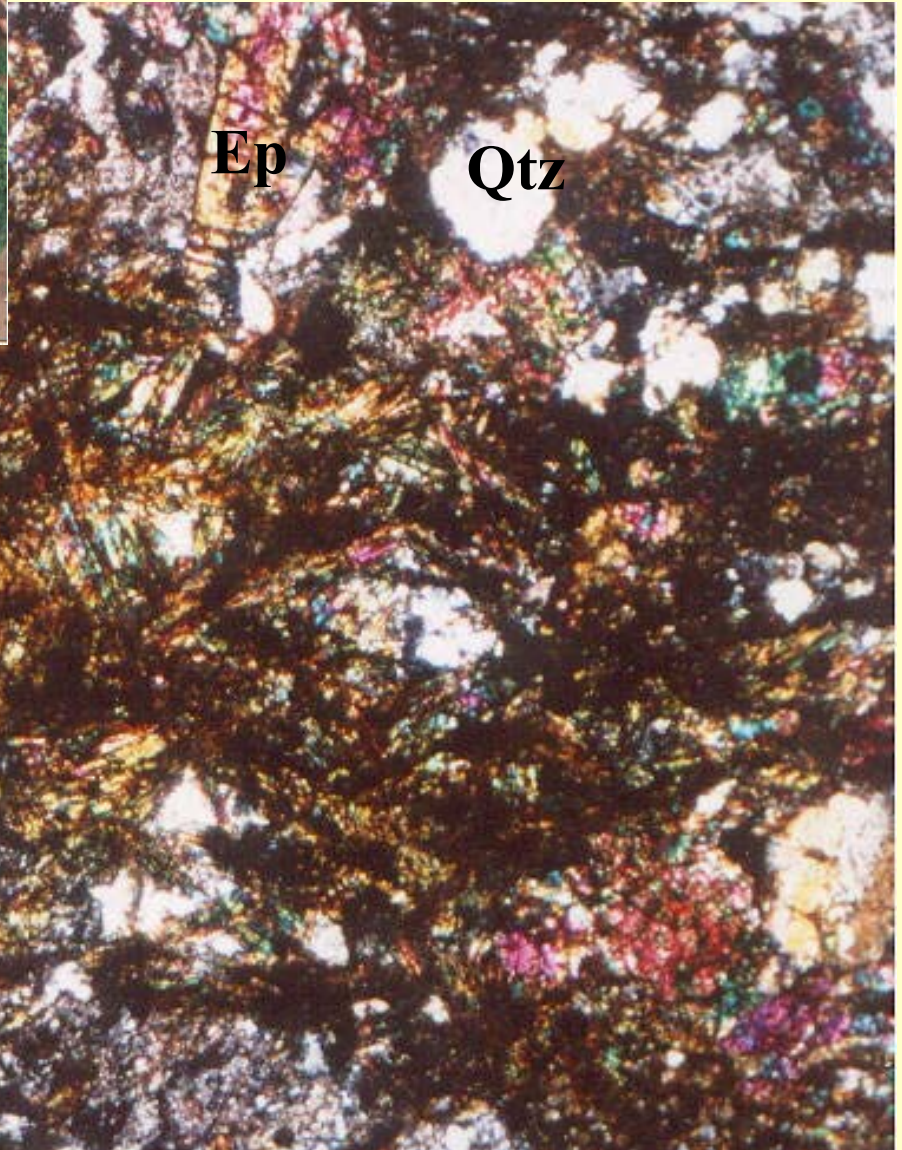
3. *Facie zelených břidlic*

- 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)

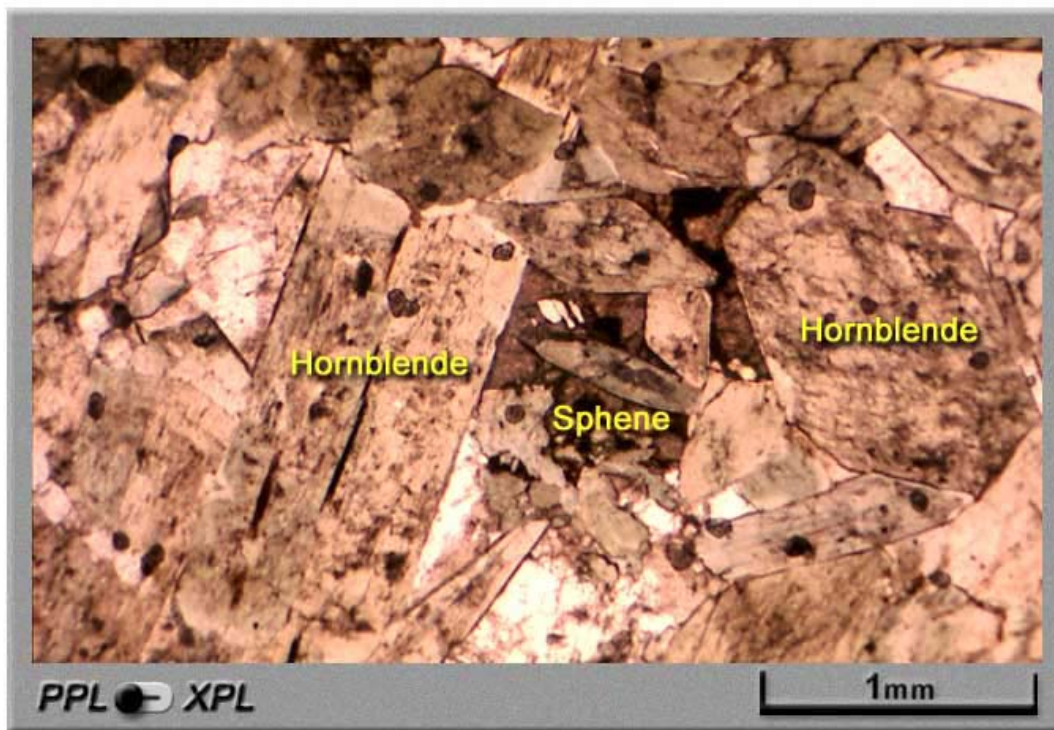


Epidotický amfibolit
Amp+Pl+Ep+Qtz

1cm

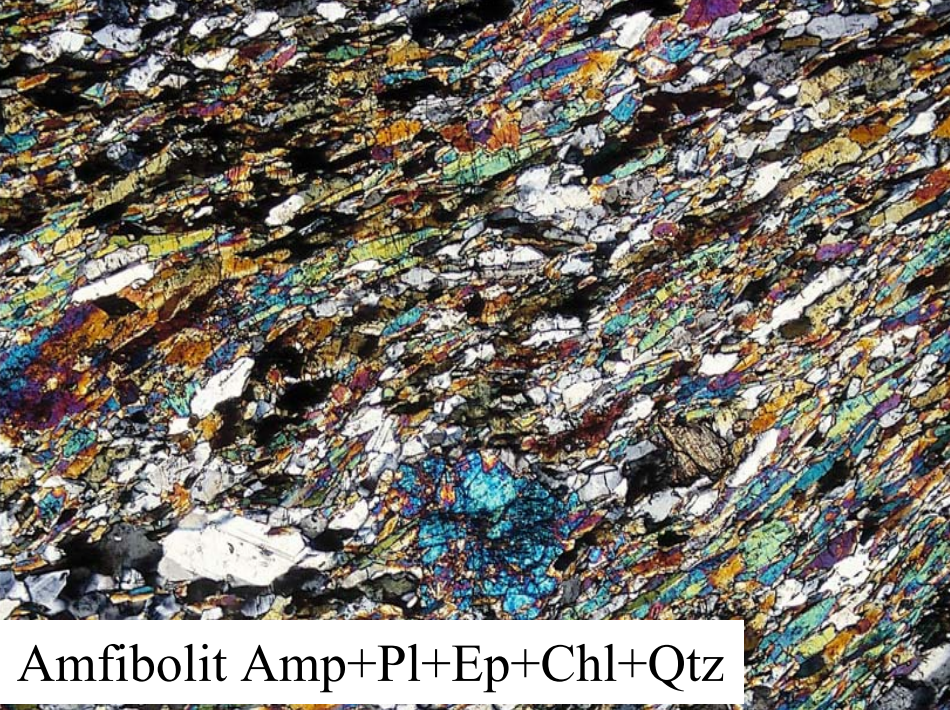


1cm



Amfibolit Amp+Pl+Qtz+Ttn

Metabazit metamorfovaný v amfibolitové facii

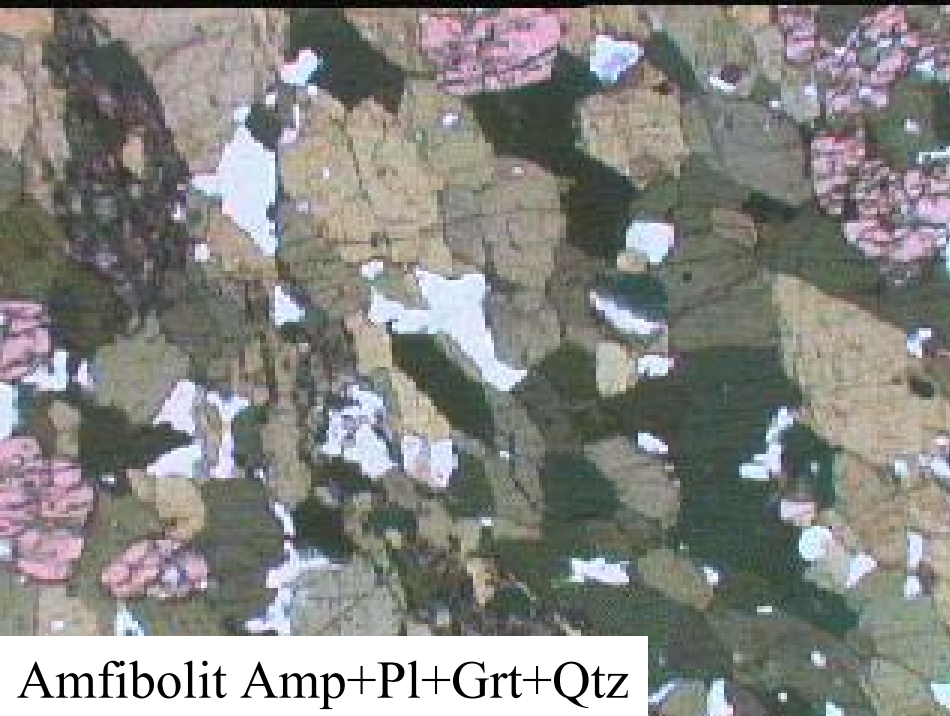
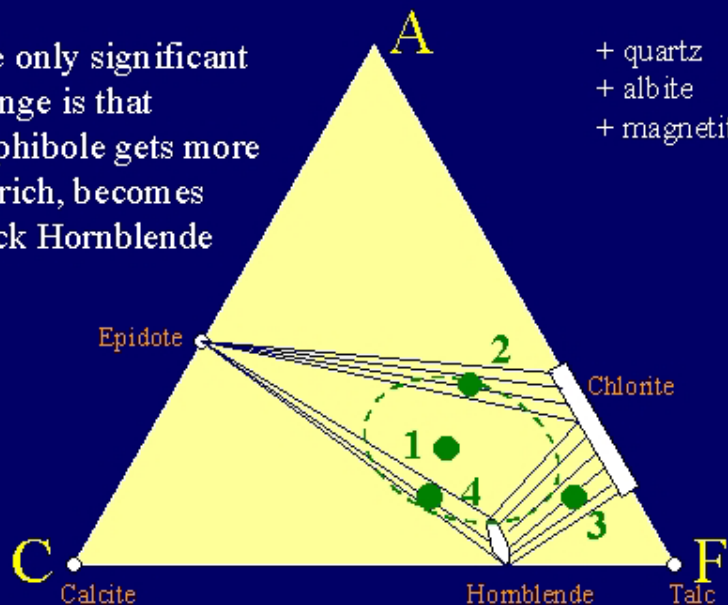


Amfibolit Amp+Pl+Ep+Chl+Qtz

at higher T - Epidote Amphibolite Facies

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

- + quartz
- + albite
- + magnetite

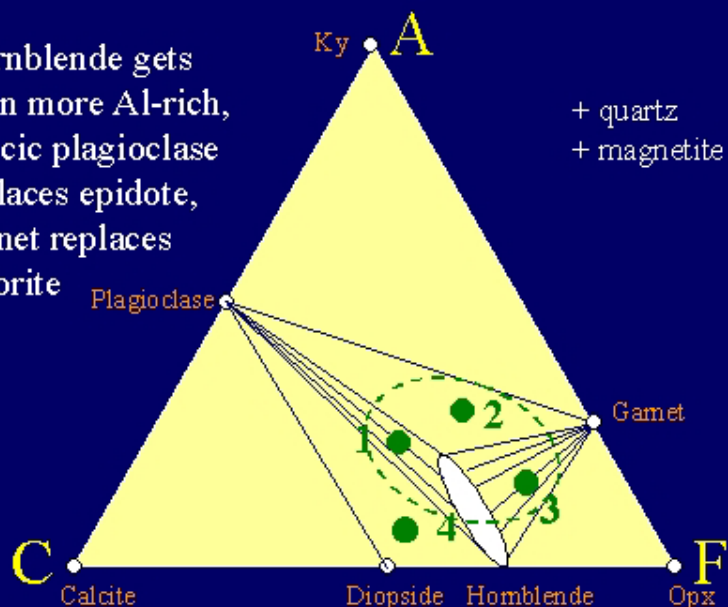


Amfibolit Amp+Pl+Grt+Qtz

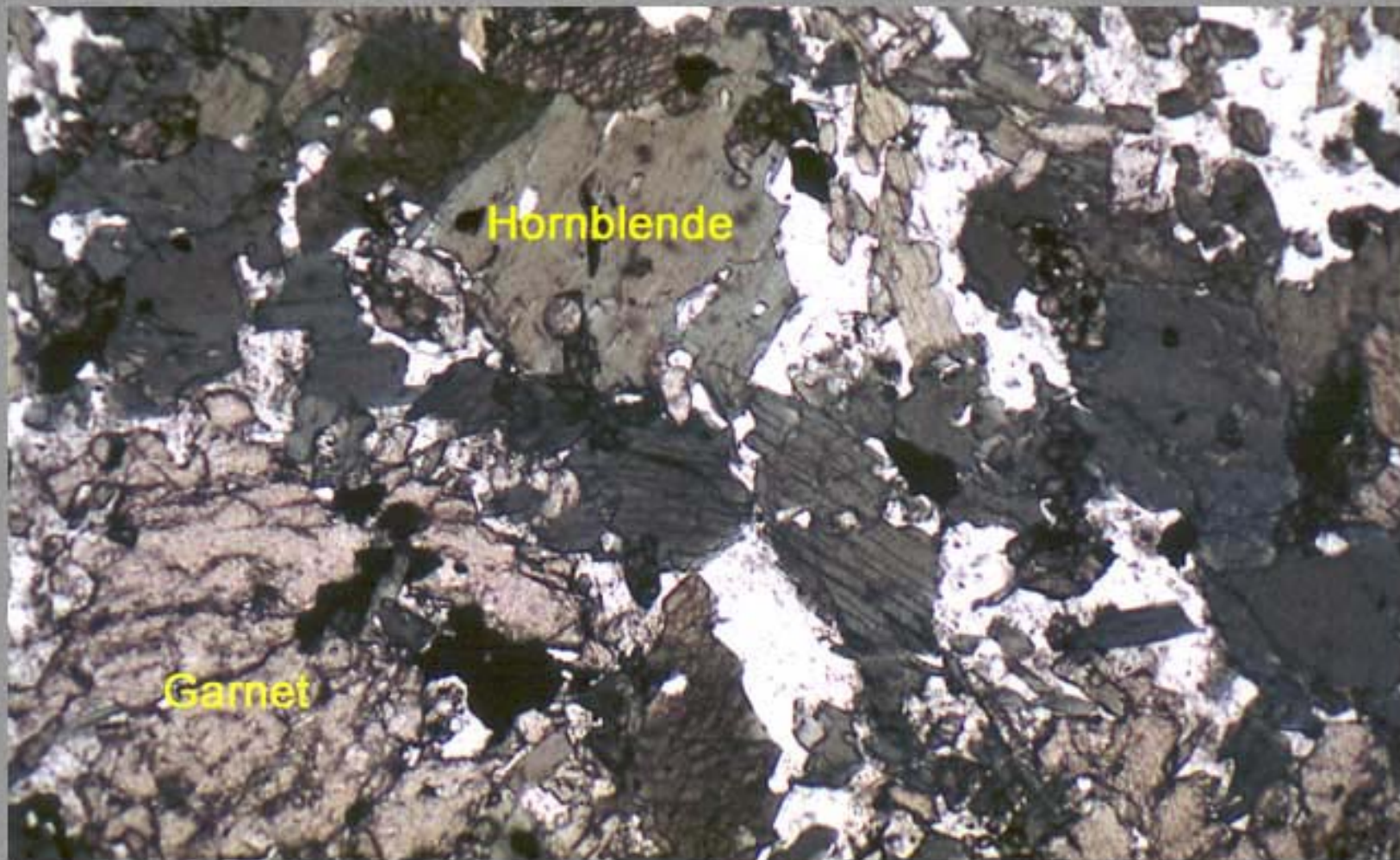
still higher T - Amphibolite Facies

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

- + quartz
- + magnetite



Granátický amfibolit



Hornblende

Garnet

PPL XPL

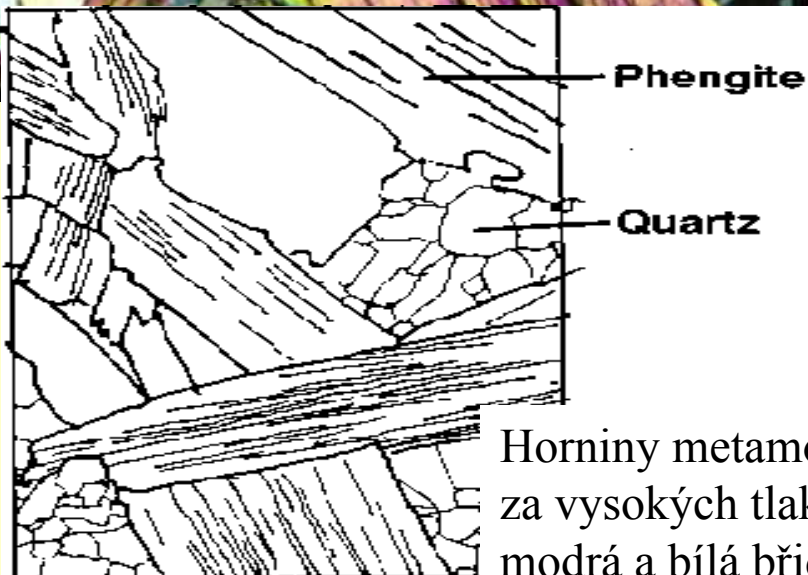
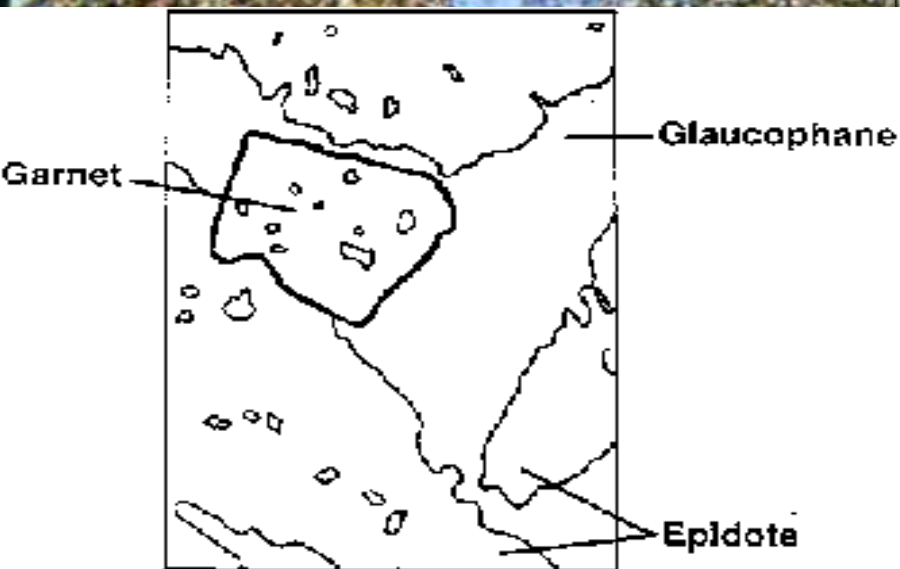
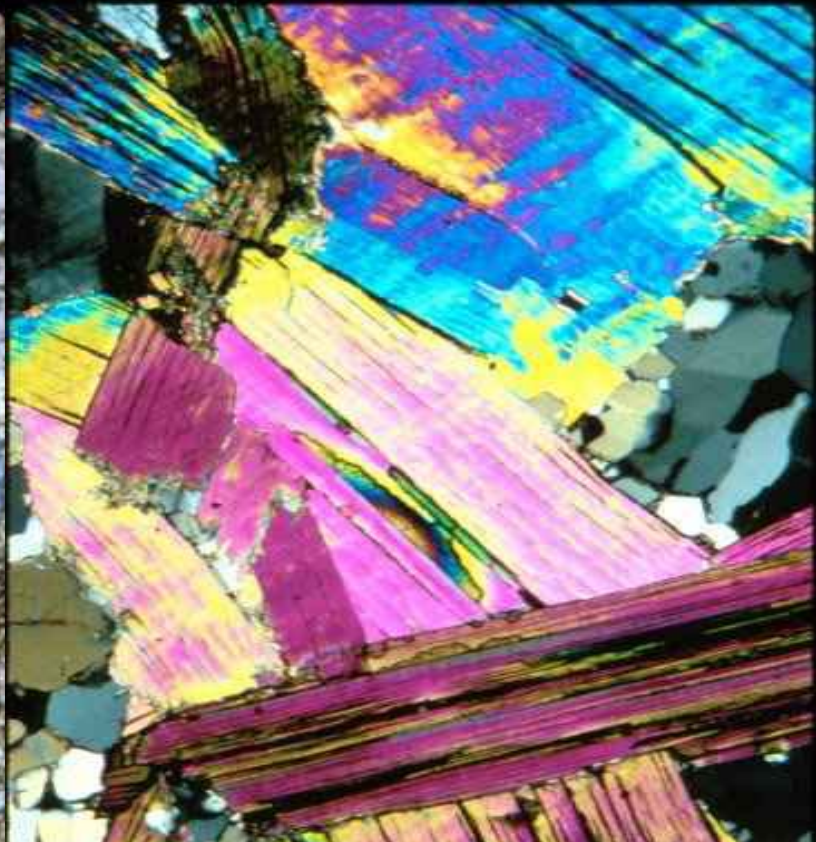
1mm

Metamorphic Grade \longrightarrow

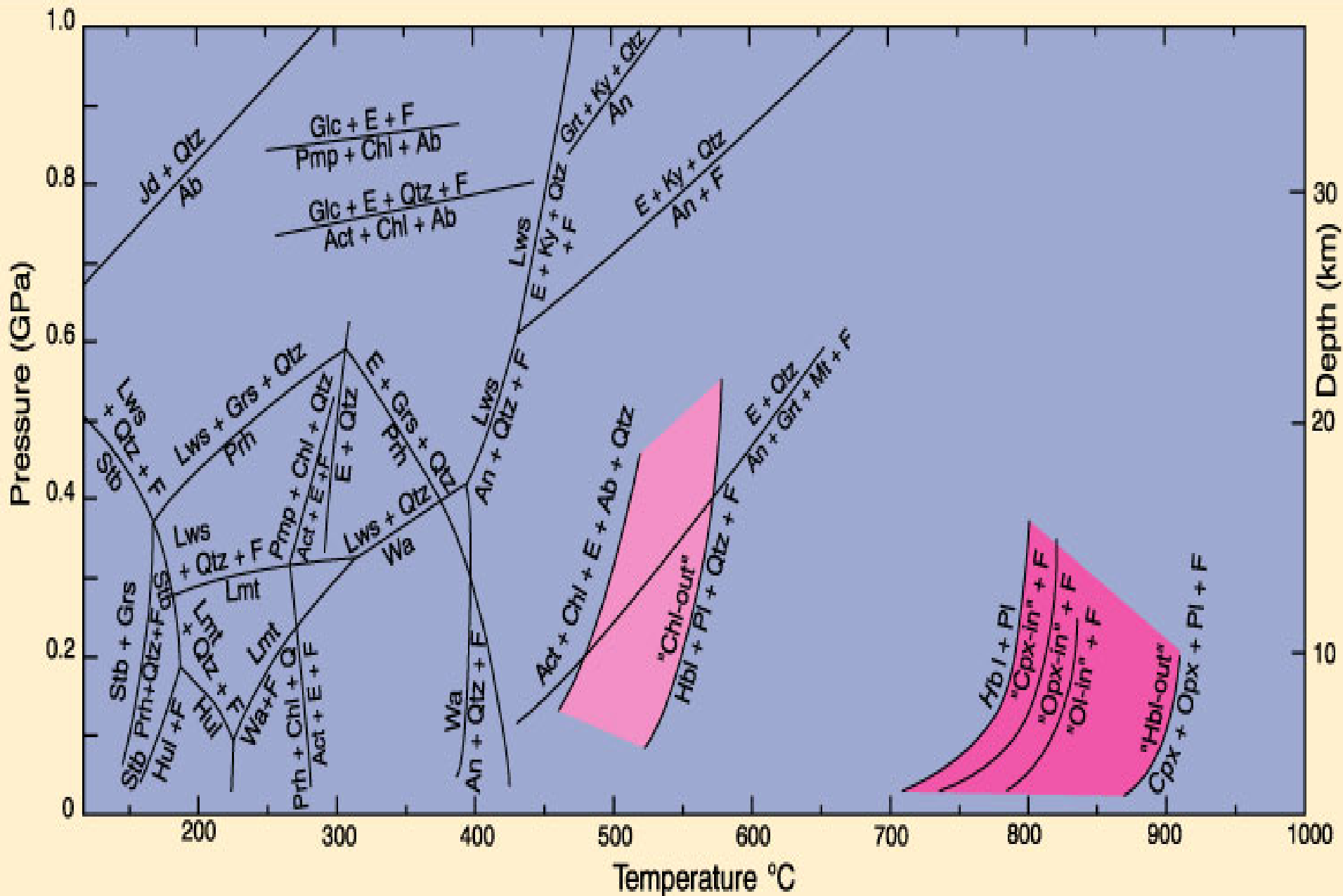
Metamorphic Facies	Greenschist		Transitional States		Amphibolite		Granulite	
Albite	—————		- - - - -					
Plagioclase > An ₁₂			Oligoclase				Andesine	
Epidote	—————		- - - - -					
Actinolite	—————		- - - - -					
Hornblende	—————		—————		—————		- - - - -	
Augite					- - - - -		—————	
Orthopyroxene							—————	
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 Blue a E facie:**
- NAS: albit = **jadeit** + křemen
- **horní tlakový limit:**
- NASH: paragonit = **jadeit** + kyanit + H₂O

Facies		Zeolite	Prehnite Pumpellyite	Blueschist	Eclogite
Metabasins	Quartz	-----	-----	-----	-----
	Plagioclase	-----	Albite	-----	-----
	Laumontite	-----	-----	-----	-----
	Other Zeolites	-----	-----	-----	-----
	Prehnite	-----	-----	-----	-----
	Pumpellyite	-----	-----	-----	-----
	Lawsonite	-----	-----	-----	-----
	Epidotes	-----	-----	-----	-----
	Clays	-----	-----	-----	-----
	White micas	-----	-----	-----	-----
	Stilpnomelane	-----	-----	-----	-----
	Chlorite	-----	-----	-----	-----
	Garnet	-----	-----	-----	-----
	Ca-Amphibole	-----	Actinolite	-----	-----
	Na-Amphibole	-----	-----	Glaucophane	-----
	Na-Pyroxene	-----	-----	Jadeite	Omphacite
	Calcite	-----	-----	-----	-----
Aragonite	-----	-----	-----	-----	
Sphene	-----	-----	-----	-----	
Rutile	-----	-----	-----	-----	
Metavolcanics (SAG Rocks)	Quartz	-----	-----	-----	?
	Plagioclase	-----	Albite	-----	-----
	Laumontite	-----	-----	-----	-----
	Prehnite	-----	-----	-----	-----
	Pumpellyite	-----	-----	-----	-----
	Lawsonite	-----	-----	-----	-----
	Na-Amphibole	-----	-----	Glaucophane	-----
	Na-Pyroxene	-----	-----	Jadeite	?
	Mixed layer mics	-----	-----	-----	-----
	White micas	-----	-----	-----	-----
	Stilpnomelane	-----	-----	-----	-----
	Chlorite	-----	-----	-----	-----
	Sphene	-----	-----	-----	?
	Calcite	-----	-----	-----	-----
Aragonite	-----	-----	-----	-----	
Metapelites	Clays	-----	-----	-----	?
	White mica	-----	-----	-----	-----
	Stilpnomelane	-----	-----	-----	-----
	Chlorite	-----	-----	-----	-----
	Chloritoid	-----	-----	-----	-----
	Mg-Carpholite	-----	-----	-----	-----
	Na-Amphibole	-----	-----	Glaucophane	-----
	Na-Pyroxene	-----	-----	Jadeite	?
	Epidote	-----	-----	-----	-----
	Lawsonite	-----	-----	-----	-----
	Pumpellyite	-----	-----	-----	-----
	Laumontite	-----	-----	-----	-----
	Plagioclase	-----	-----	-----	-----
	Quartz	-----	-----	-----	?
Calcite	-----	-----	-----	-----	
Aragonite	-----	-----	-----	-----	



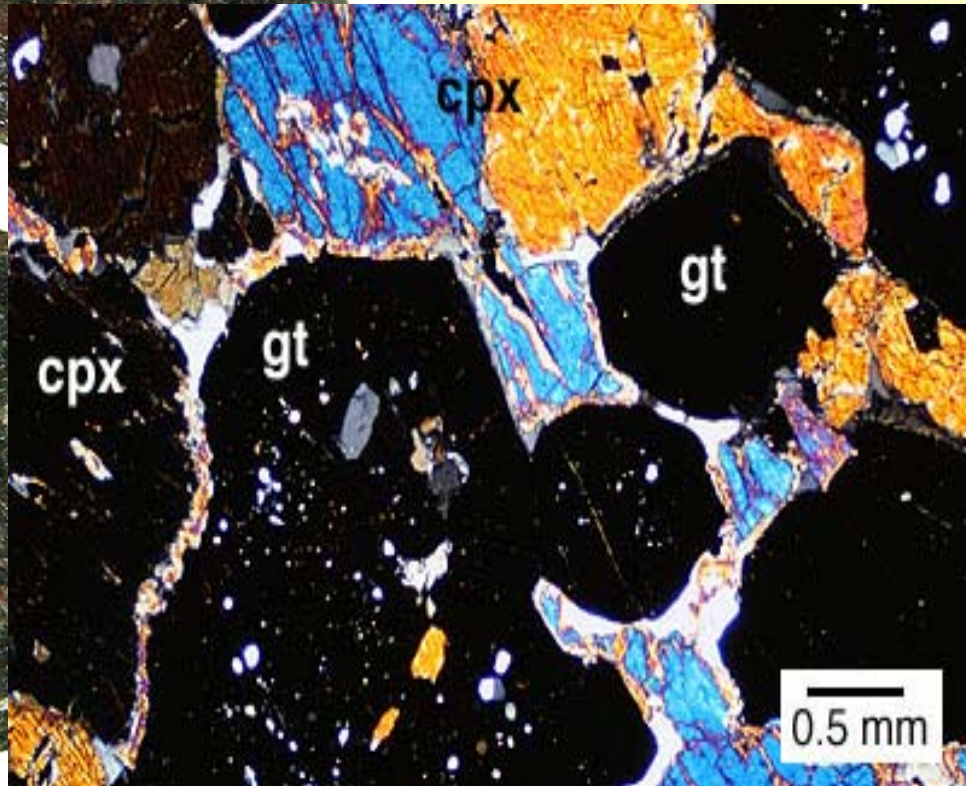
Horniny metamorfované
za vysokých tlaků:
modrá a bílá břidlice



- **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 nížetlaké 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 - **NaFe³⁺** - 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 + H₂O

Eklogit



1cm

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 subdukcii, vznikají z modrých břidlic, obsahují minerály s H₂O
- 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