

Magmatická a metamorfní petrologie

3. Anatexe

Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Osnova:

- 1. Úvod**
- 2. Dehydratační tavení**
- 3. Migmatity**
- 4. Anatexe**
- 5. Restity**

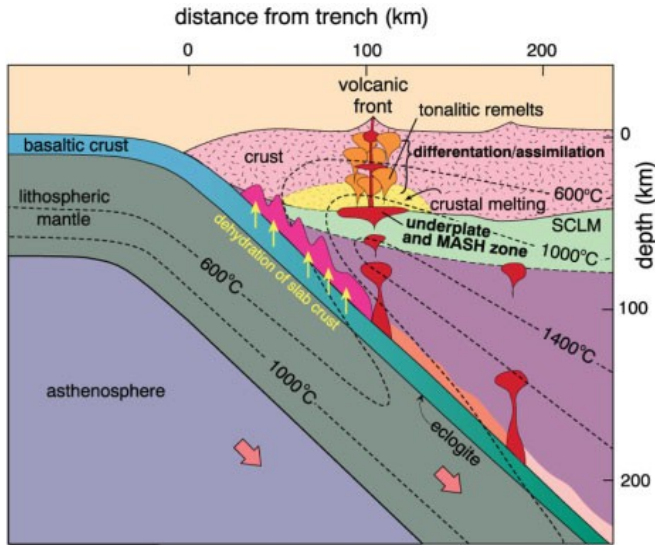
1. Úvod

- **Anatexe (tavení) je jedním z nejdůležitějších procesů probíhajících v horninách. Dochází při něm k natavení (popř. úplnému roztavení) hornin různých typů (magmatických, metamorfovaných) s různým chemickým složením (nejčastěji metapelity ale i jiné např. metadroby a amfibolity) v různých úrovních zemské kůry i v plášti. Při segregaci taveniny od protolitu tak vzniká široká škála magmatických hornin, pokud k segregaci nedojde, vznikají migmatity. Důležité je také to, že při tomto procesu dochází k zásadní redistribuci chemických prvků, hlavních i stopových, a tak tento proces zásadně podporuje diferenciaci látek v zemské kůře a zemském plášti.**

1. Úvod

- K (na)tavení dochází v různých prostředích zemské kůry a pláště (např.):
 - na kolidujících se deskách
 - na riftových zónách
 - na kontaktu taveniny s velmi vysokou teplotou s okolní horninou
 - při přínosu H_2O do horniny v kombinaci s relevantní teplotou
 - dehydratačním tavením

1. Úvod



1. Úvod

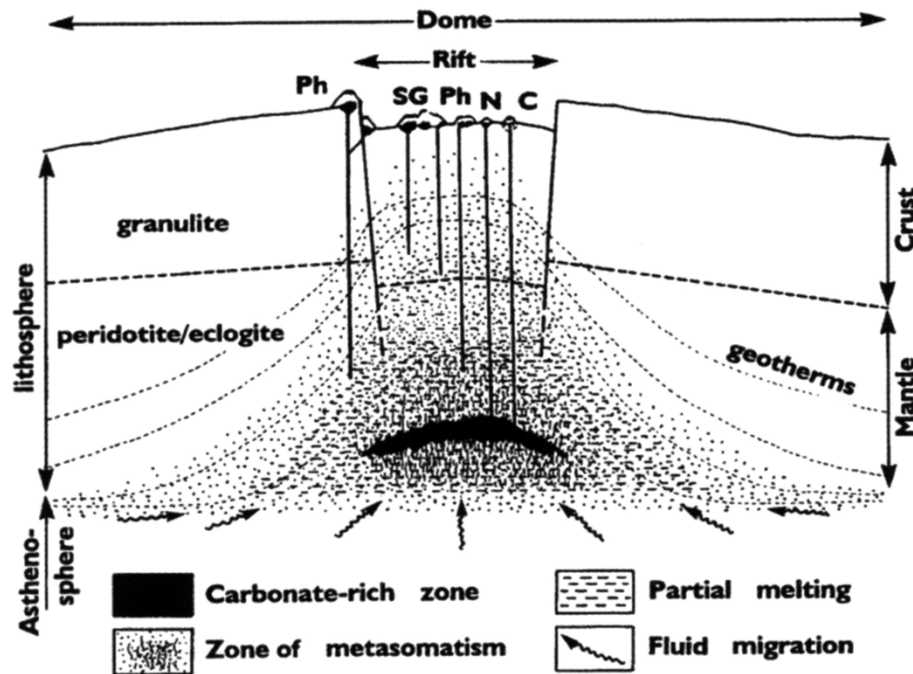
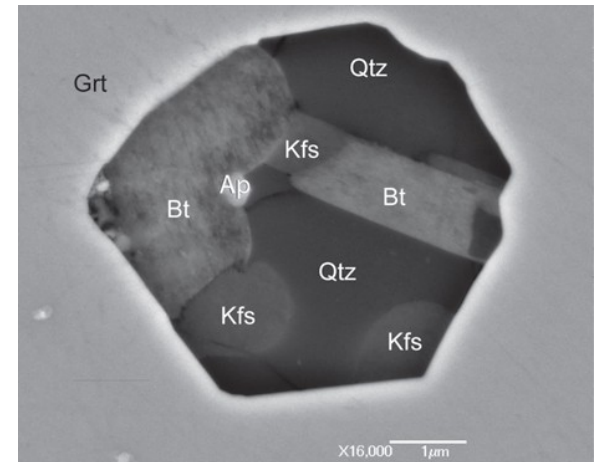
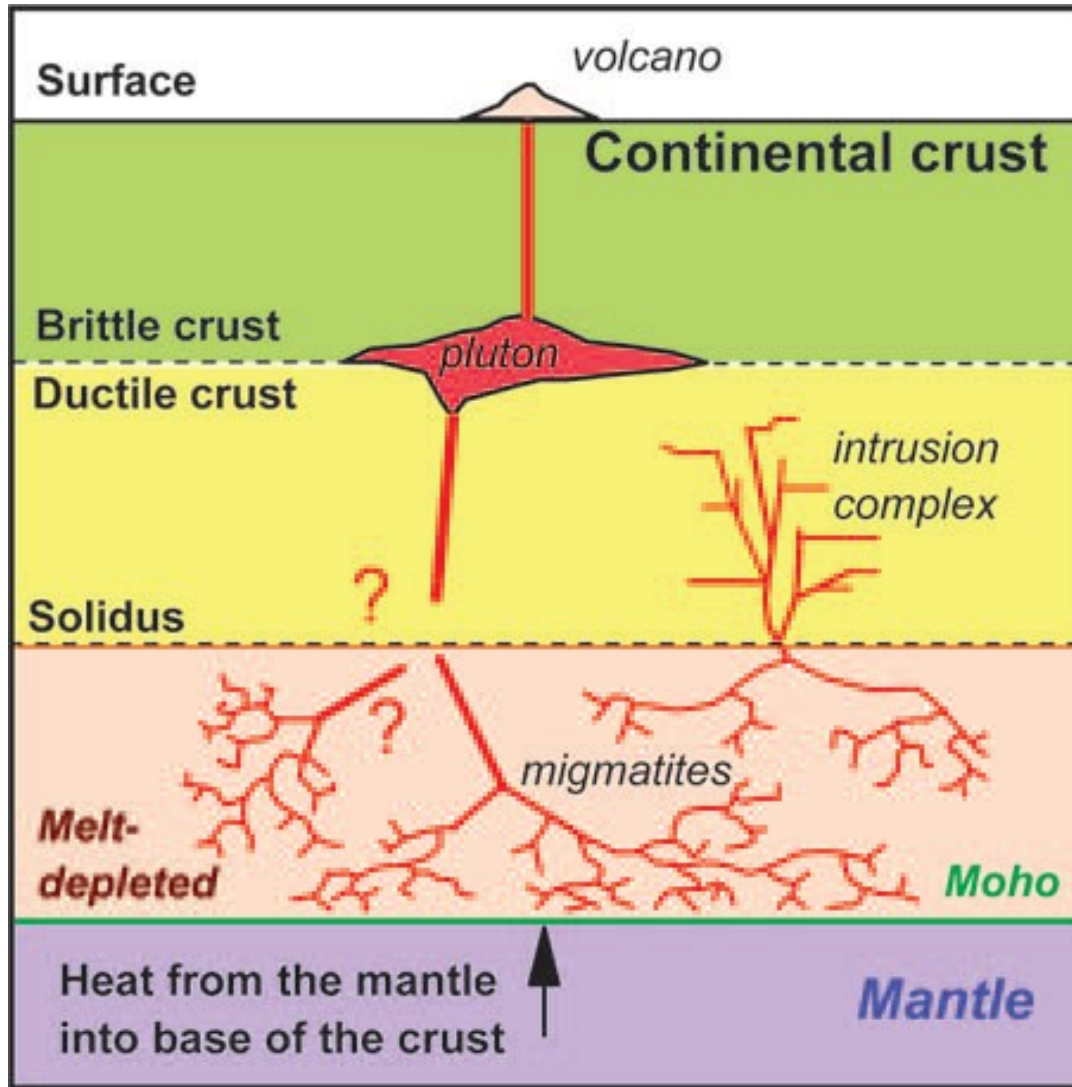


FIG. 2. Schematic cross-section of a zone of active rifting in a continental setting. The upward bulge in the asthenospheric mantle is due to a focusing of mantle degassing and thermal expansion. Here, as in Figure 1, the upward migration of fluid offers a very efficient mechanism of transfer of heat into the lower and middle crust. The degassing mantle emits both H_2O and CO_2 , the proportion of which is of primordial importance in determining the nature of elements transported upward into the crust, and the nature of the melting reaction. Where the metasomatizing agent is dominantly H_2O , granitic melts of A type will result. The metasomatic steps leading up to partial melting have involved the preferential mobilization of alkalis over Al, which is reflected an alkaline character of the partial melt. Carbonatitic and nephelinitic melts will result in areas where CO_2 is the dominant metasomatizing agent. Here, the metasomatic step leading up to partial melting has caused a major enrichment in high field-strength elements and the rare-earth elements, and these patterns of enrichment are reflected in the magmas produced. Of course, all intermediate cases between these two end-member situations are likely to be encountered, which explains the juxtaposition of silica-oversaturated and silica-undersaturated suites along belts of anorogenic igneous activity. The anomalously high temperatures at the base of the crust promote granulite-facies assemblages, even though the environment is far from being anhydrous. Diagram courtesy of Alan Woolley (1987), and reproduced with permission of the publisher.

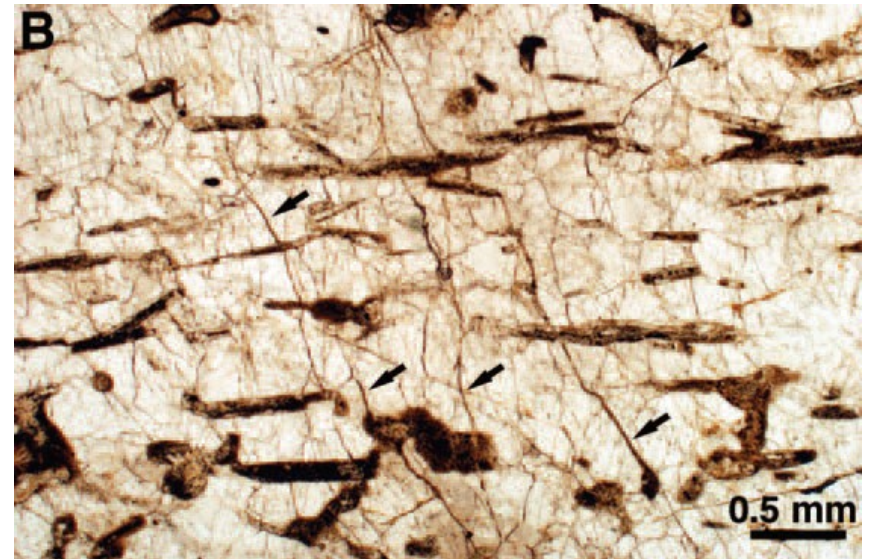
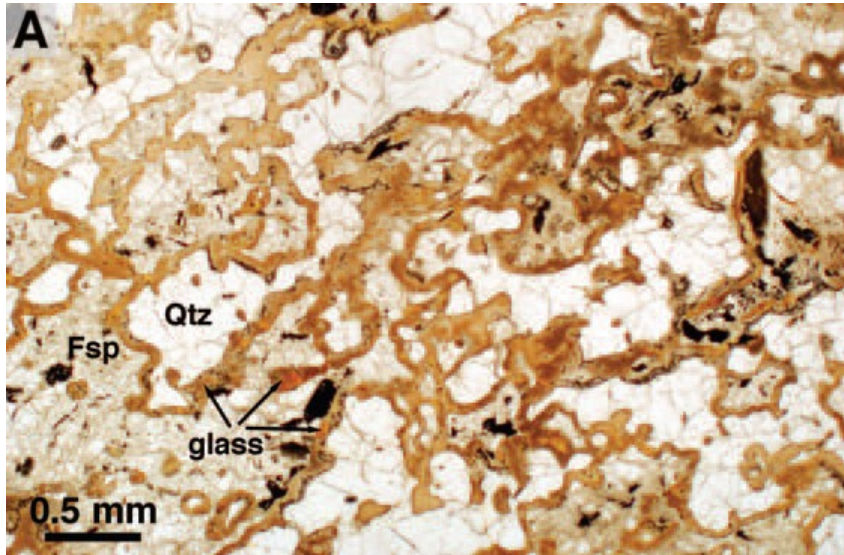
1. Úvod



**Inkluze granitu v granátu
Sawyer 2011**

**Schematická
presentace anatexe
v zemské kůře.
Sawyer 2011**

1. Úvod



Přítomnost taveni v horninách, 2 příklady, A – Mull, Skotsko, B - muskovitická rula; Holness et al. 2011

2. Dehydratační tavení

- Dehydratační tavení

Pro proces tavení je důležité chemické složení horniny a složení a množství fluidní fáze (H_2O , CO_2 , F, B aj.).

Protože je v běžných metamorfovaných horninách (vyšší amfibolitová facie), v nichž dochází k natavení, množství fluid v hornině nízké, je nutná pro tavení přítomnost minerálu nebo minerálů se zvýšeným obsahem vody, většinou slíd, také amfibolů popř. i jiných minerálů (např. epidot).

- Hydratační tavení

Je nutný přínos H_2O po nějakých oslabených zónách z okolí.

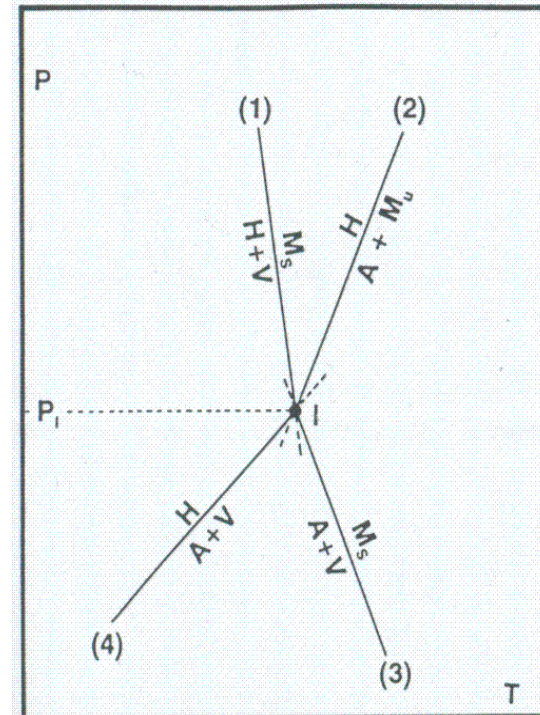
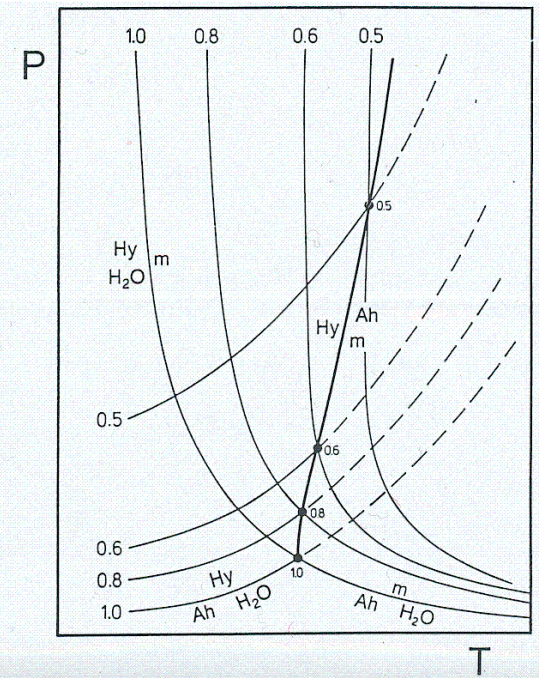


Fig. 1. Generalized pressure-temperature diagram showing the relationships between dehydration-melting (curve 2), vapour-saturated melting (curves 1, 3) and subsolidus dehydration (curve 4). Hydrous minerals cannot coexist stably with melt at pressures lower than P_I .

2. Dehydratační tavení

- Kombinací různých aktivit H_2O odvodíme křivku dehydratačního tavení.
- **Důležité termíny:**
- **solidus**
- **subsolidus**
- **protolit**
- **leukosom – metatekt**
- **mesosom**
- **melanosom – restit**

Fig. 9.2. Pressure-temperature diagram depicting phase relationships in the system Ah-Hy-H₂O (Ah anhydrous, Hy hydrous crystalline phase). Subsolidus dehydration curves and solidus curves are drawn for the water activities 1.0, 0.8, 0.6, and 0.5. At the intersections of these curves the dehydration melting reaction $\text{Hy} = \text{Ah} + \text{melt}$ (heavy almost vertical curve) is generated. The $a_{\text{H}_2\text{O}}$ of the system decreases on this curve with increasing pressure. (See also Clemens and Vielzeuf 1987; Vielzeuf and Clemens 1992)



2. Dehydratační tavení



Leucosom

Restit

Paleosom

2. Dehydratační tavení

- Tavení hornin s muskovitem (+křemen)
- horniny: muskovitické ruly a popř. svory, křemen-živcové horniny s muskovitem
- **System: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$**
- Byla provedena řada experimentů v solidu a subsolidu a vzhledem k relativní jednoduchosti systému, jsou výsledky různých autorů dobře srovnatelné.

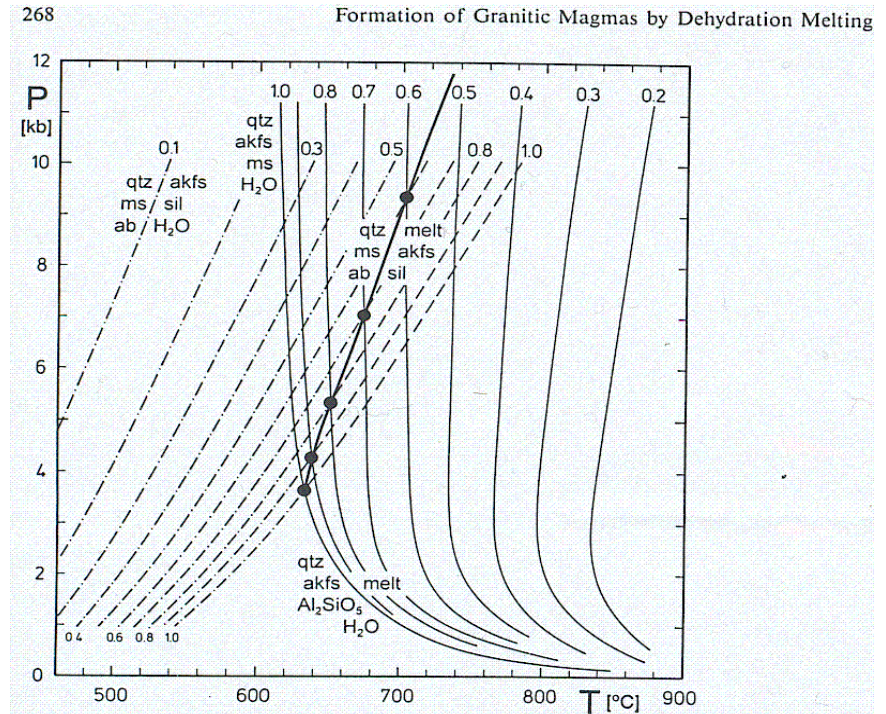
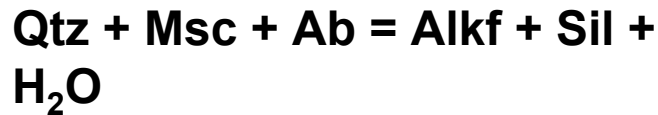


Fig. 9.4. Pressure-temperature diagram for parts of the system $\text{K}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, showing the relationship between subsolidus dehydration equilibrium curves, beginning of melting curves, and solidus for dehydration melting of muscovite-quartz-albite assemblages. Dash-dotted curves Equilibrium curves of the $a_{\text{H}_2\text{O}}$ -controlled dehydration reaction quartz+muscovite+albite = alkali feldspar+sillimanite+ H_2O . Continuous curves: $a_{\text{H}_2\text{O}}$ -controlled solidus curves of the melting reactions quartz+alkali feldspars+muscovite+ H_2O = melt, and quartz+alkali feldspar+sillimanite+ H_2O = melt; dots and heavy continuous curve solidus for dehydration melting reaction quartz+muscovite = melt + alkali feldspar + sillimanite; dashed curves metastable portions of the dehydration reaction. Abbreviations see Appendix. For further explanations see text

2. Dehydratační tavení

- důležité reakce:

- subsolidus



- solidus

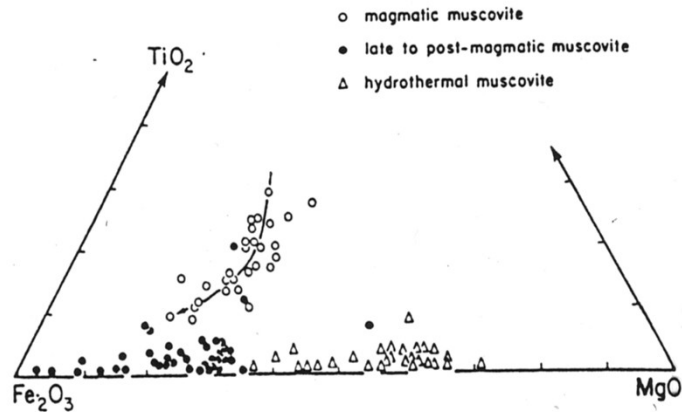
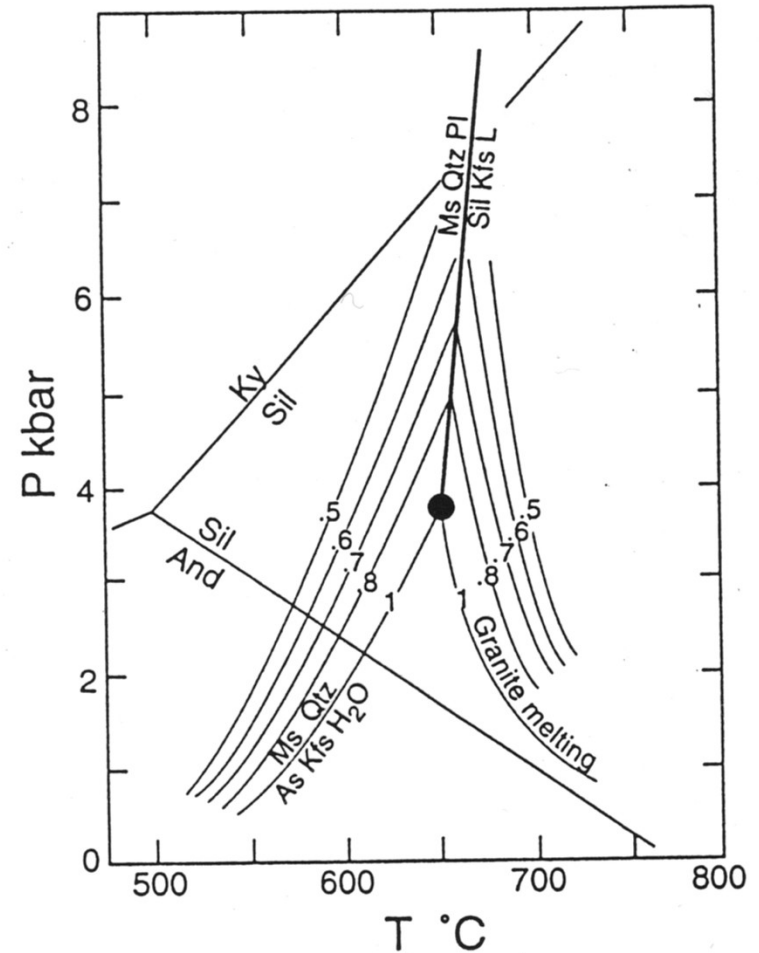


Figure 22. Compositions of white micas of the St. Julien leucogranite projected onto (total Fe as) Fe_2O_3 - MgO compositional triangle. The data are from Monier et al. (19) recognize three generations of white micas: magmatic muscovites, late- to postmagmat covite, and hydrothermal illite and smectite. The arrow is the changing compositions magmatic muscovites with the magmatic evolution of the granite.

Phase Relations in the CKNASH System



2. Dehydratační tavení

- **Petrogenetický význam:**
- **Muskovitické granity vznikají v poměrně úzkém poli PT podmínek - 640 °C pro 4 kbar až 700 °C pro 9-10 kbar, pokud není přítomen ve fluidech např. F a B.**
- **Horniny s muskovitem produkují jen malé množství taveniny a nemohou být protolitem pro velkoobjemové granitové taveniny, hornina s 25 obj.% muskovitu vyprodukuje max. 11-12 hm.% taveniny složením blízké granitickému minimu.**



**Muskovitický granit s
turmalínem, Lavičky**

2. Dehydratační tavení

- Tavení hornin s biotitem (+křemen)
- horniny: různé typy biotitických rul a metadrob
- Systém: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-MgO-H}_2\text{O}$
- Dehydratační tavení metapelitických hornin s biotitem bylo studováno v řadě experimentů a byla jim věnována největší pozornost. Vzhledem k poněkud větší komplikovanosti systému, jsou výsledky experimentů jednotlivých autorů poněkud méně konzistentní než u muskovitických hornin.

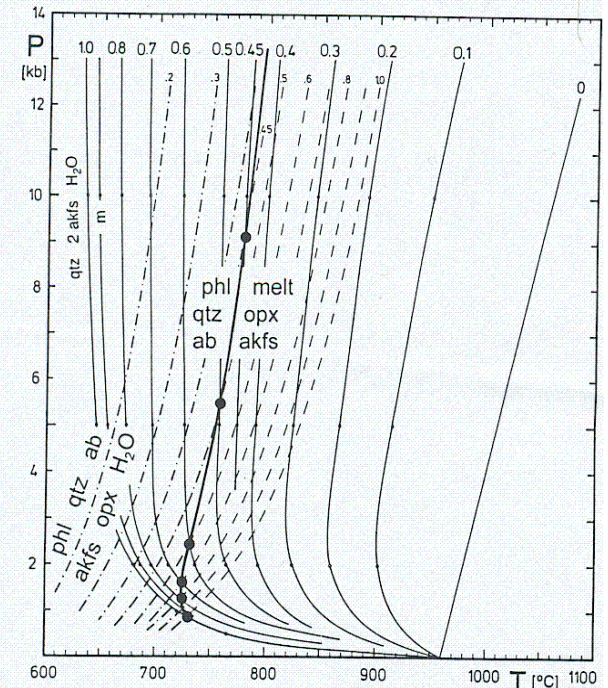
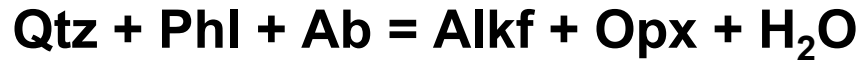


Fig. 9.5. Pressure-temperature diagram for parts of the system $\text{K}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-H}_2\text{O}$, showing the relationship between subsolidus dehydration equilibrium curves, beginning of melting curves and solidus for dehydration melting of phlogopite-quartz-albite assemblages. *Dash-dotted curves* Equilibrium curves of the $a_{\text{H}_2\text{O}}$ -controlled dehydration reaction: phlogopite + quartz + albite = alkali feldspar + orthopyroxene + H_2O ; *continuous curves* solidus curves for given $a_{\text{H}_2\text{O}}$ of the haplogranite system (as in Fig. 2.13); *dots and heavy continuous curve* solidus for the dehydration melting reaction: phlogopite + quartz + albite = akfs + orthopyroxene + melt; *dashed curves* metastable portions of the dehydration reaction. Abbreviations as in Appendix

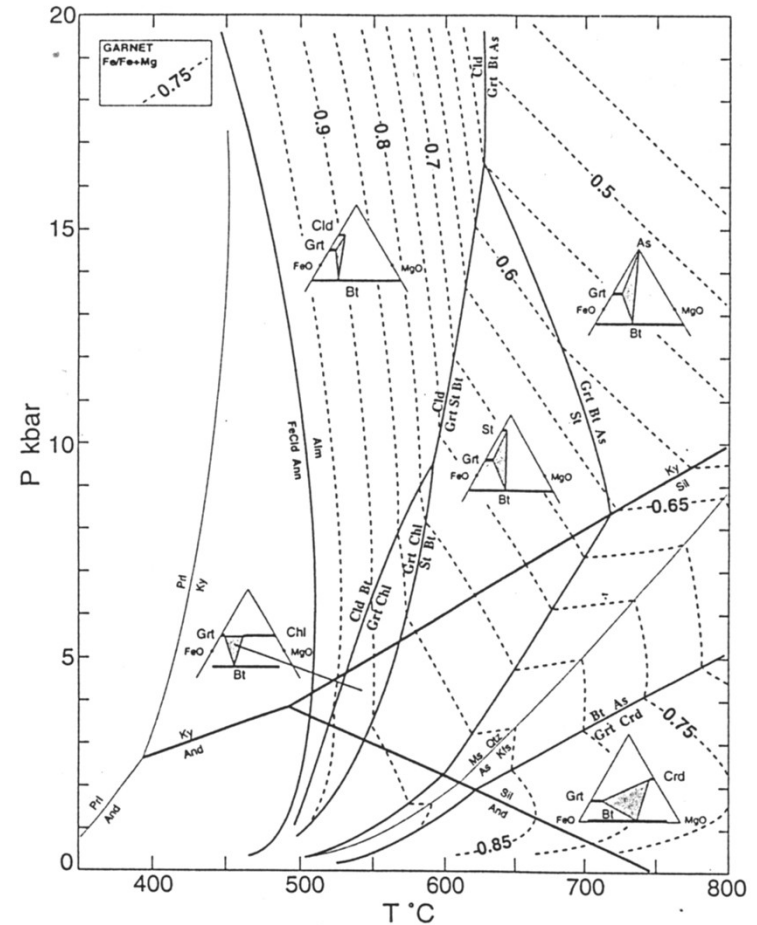
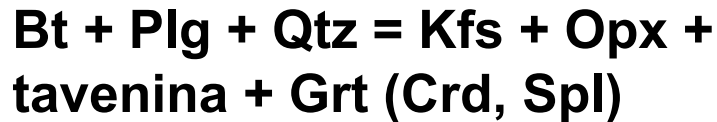
2. Dehydratační tavení

- důležité reakce:

- subsolidus



- solidus



2. Dehydratační tavení

- **Petrogenetický význam:**
- Dehydratační tavení biotitu je velmi efektivní pro vznik taveniny především pro velké rozšíření biotitu v horninách zemské kůry.
- Začátek tavení, množství taveniny a její složení jsou závislé na složení protolitu (např. obsah Na_2O , CaO , poměr Fe/Mg)
V metapelitu může vznikat 30-60 % taveniny při teplotě 800-900 °C a tlaku asi 7 kbar, metadroby vyžadují pro efektivní tavení asi o 100 ° vyšší teploty.
- Vyšší obsahy F, Ti a Al zvyšují pole stability biotitu do vyšších teplot a snižují množství taveniny.
- Granát, ortopyroxen, cordierit a spinel jsou typické produkty natavení a tak vznikají Al bohaté granulity, popř. Al-přesycené restity.

2. Dehydratační tavení

- Tavení hornin s amfibolem (\pm křemen)
- horniny: amfibolity, různé typy metabazitů
- Systém: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- Byla provedena řada experimentů, ale jejich interpretace nejsou jednoduché vzhledem ke komplikovanosti systému ve srovnání s horninami s muskovitem i biotitem.
- důležité reakce:
- solidus
- $\text{Amf} + \text{Plg} + \text{Qtz} = \text{Cpx} + \text{Opx} + \text{Plg (vyšší An)} + \text{tavenina} + \text{Ilm}$
- $\text{Amf} + \text{Plg} = \text{Cpx} + \text{Opx} + \text{Plg (vyšší An)} + \text{tavenina} + \text{Ilm}$
- Petrogenetický význam:
- Dehydratační tavení amfibolitů začíná za nižšího tlaku, pod 10 kbar za teplot kolem $850\text{ }^\circ\text{C}$, pro vyšší tlaky i kolem $650\text{ }^\circ\text{C}$. Složení taveniny je relativně chudé Fe, Mg a Ca ve srovnání s tonality, teprve za teplot vyšších než $900\text{ }^\circ\text{C}$ vznikají tonalitové taveniny.
- Restity mají složení granátických granulitů, amfibolitů nebo pyroxenických granulitů za nižších tlaků.
- SiO_2 , K_2O a Na_2O jsou v tavenině vyšší než v protolitu, Ca, Fe a Mg se koncentrují v restitu.
- Tonalitové magma může vznikat natavením amfibolitů.

3. Migmatity

- Horniny, u nichž nedošlo k segregaci taveniny od restitu a které svým vznikem leží mezi metamorfovaným a magmatickými horninami. Podle textury, která je úzce svázána z množstvím vyprodukované taveniny je dělíme na:
 - oftalmity
 - stromatity
 - agmatity
 - nebulity
 - a řada dalších typů založených na texturních vztazích



Migmatit, Ihosy

3. Migmatity



Leukosom

Restit

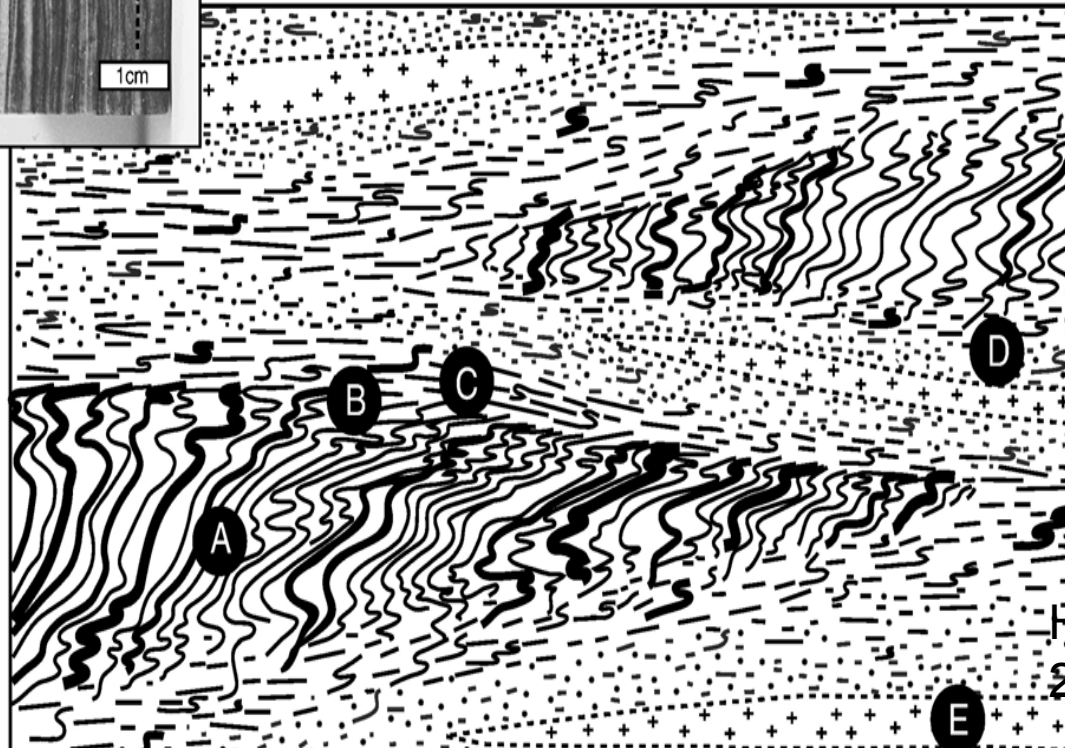
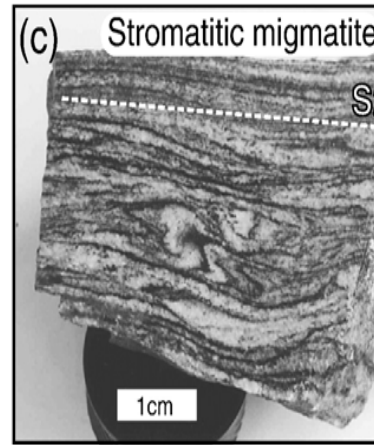
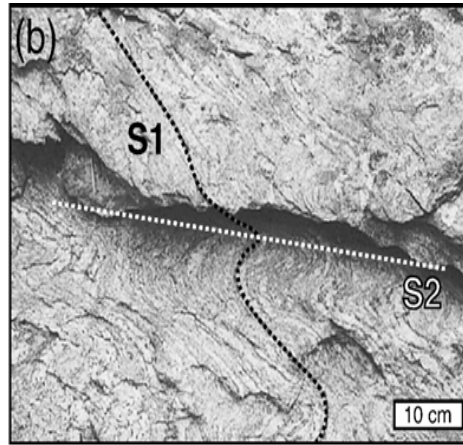
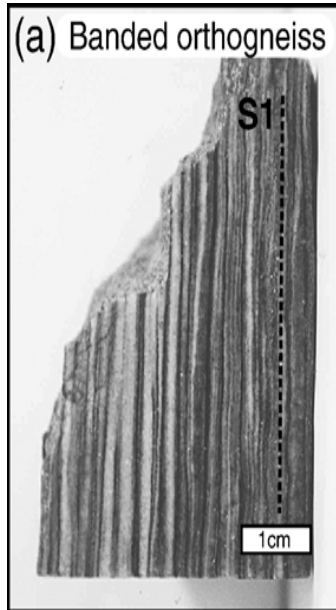
Paleosom

3. Migmatity



Migmatity, Japonsko

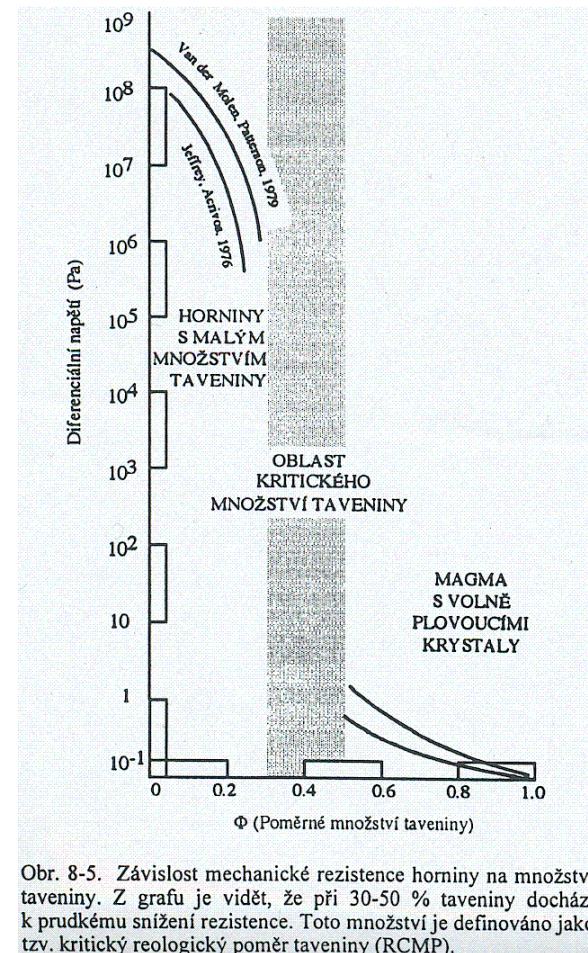
3. Migmatity



Hasalová et al.
2007

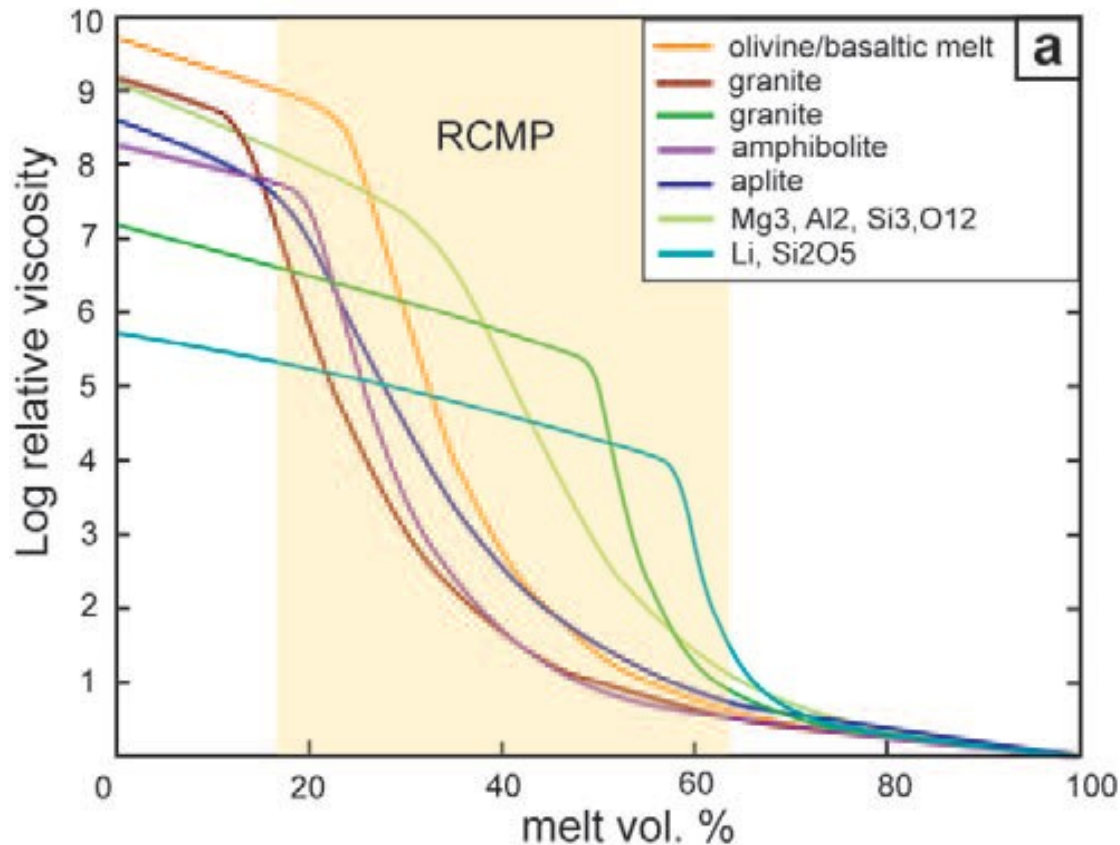
3. Migmatity

- **Segregace taveniny od restitu**
- **Mechanismus segregace (oddělení) taveniny od restitu není dosud spolehlivě vysvětlen, i když jde o velmi důležitý proces v geologii. Pravděpodobně dochází k vytlačování taveniny do prostoru nižšího napětí (filter pressing).**
- **RCMP (Rheological critical melt percentage) – množství taveniny, které vede ke zborcení horniny (kostry taveniny a restitu) a k následnému uvolnění taveniny.**



Obr. 8-5. Závislost mechanické rezistence horniny na množství taveniny. Z grafu je vidět, že při 30-50 % taveniny dochází k prudkému snížení rezistence. Toto množství je definováno jako tzv. kritický reologický poměr taveniny (RCMP).

3. Migmatity



Viskosita versus množství taveniny pro různé horniny (látky). Jamieson et al. 2011

3. Migmatity

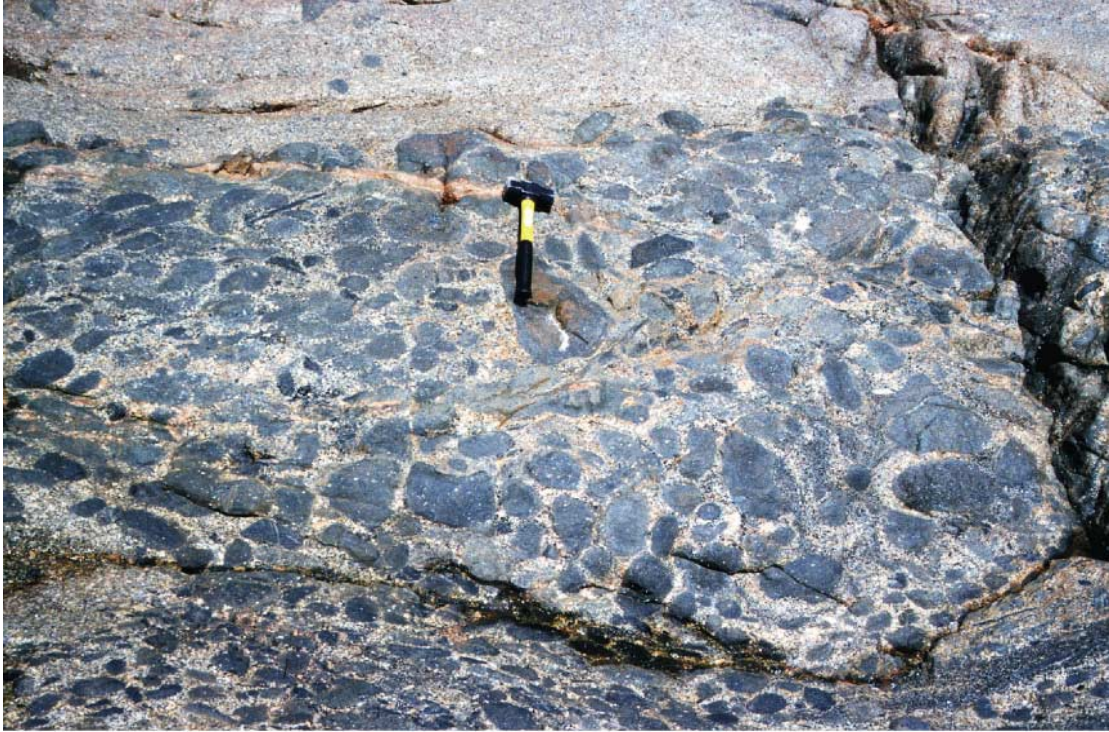


(b)

3. Migmatity



3. Migmatity



(e)

4. Anatexe

- Chemické složení taveniny a produktivita tavení
- Experimentální práce především v systémech blízkých metapelitům popř. metadrobám prokazují závislost množství vyprodukované taveniny na chemickém (mineralogickém) složení protolitu a teplotě tavení. Vzhledem ke složitosti systému a poněkud rozdílných experimentálních přístupech nejsou výsledky publikovaných prací zcela konsistentní, níže uvedené závěry jsou ale společné většině prací.
- Granitické taveniny vznikají podle zjednodušených rovnic:
 - $Bt + Plg + Als + Qtz = Grt + \text{tavenina}$
 - $Bt + Plg + Als + Qtz = Cor + \text{tavenina}$
 - $Als + Grt = Spl + Qtz + \text{tavenina}$

4. Anatexis

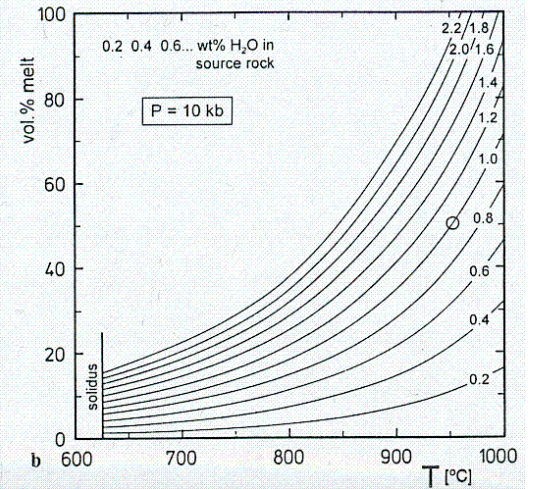
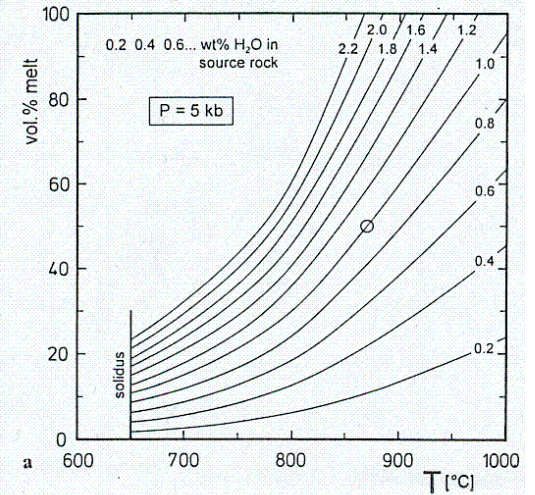
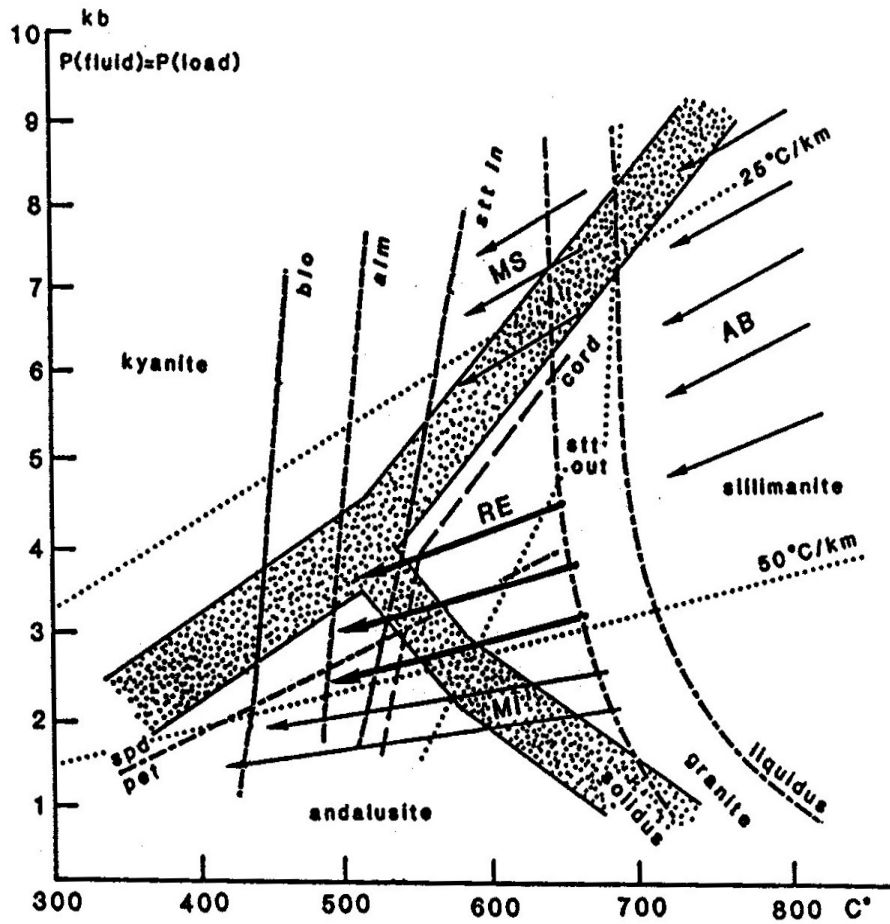


Fig. 9.8a, b. Temperature vs. vol.% melt diagram showing the amounts of melt formed in pelites and quartzofeldspathic rocks as a function of temperature and content of water available for partial melting at a 5 kbar and b 10 kbar. (After Fig. 4, Clemens and Vielzeuf 1987). For explanation of circles see text

4. Anatexe

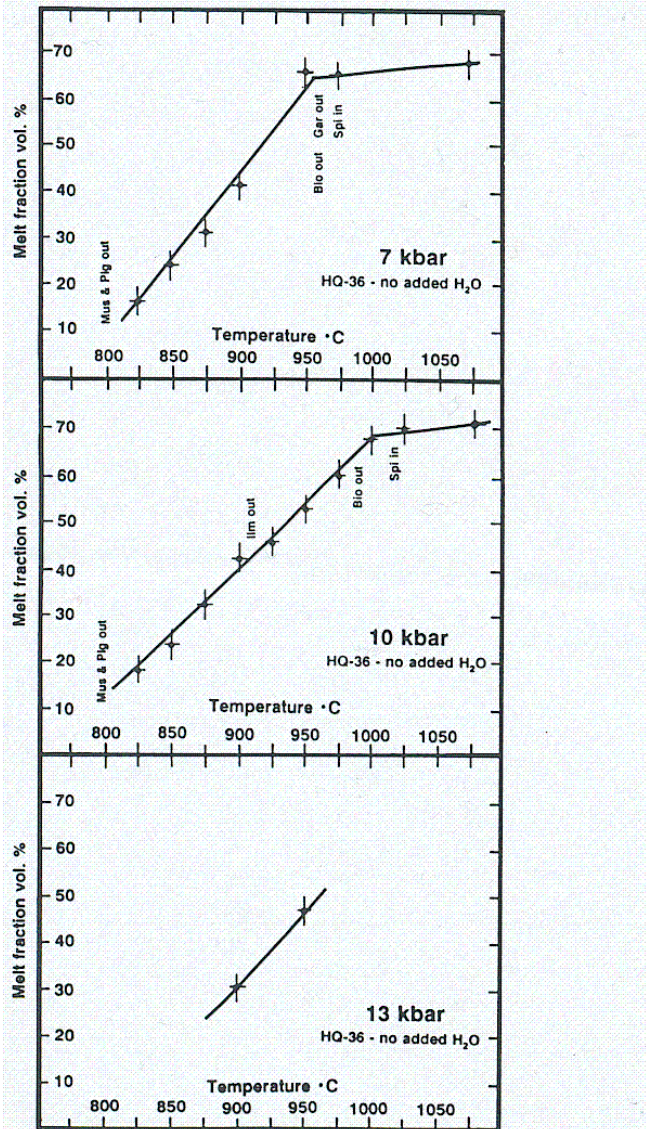


Fig. 3. Vapor-absent melt productivities (vol%) of HQ-36 at 7, 10 and 13 kbar. Straight lines approximated by eye

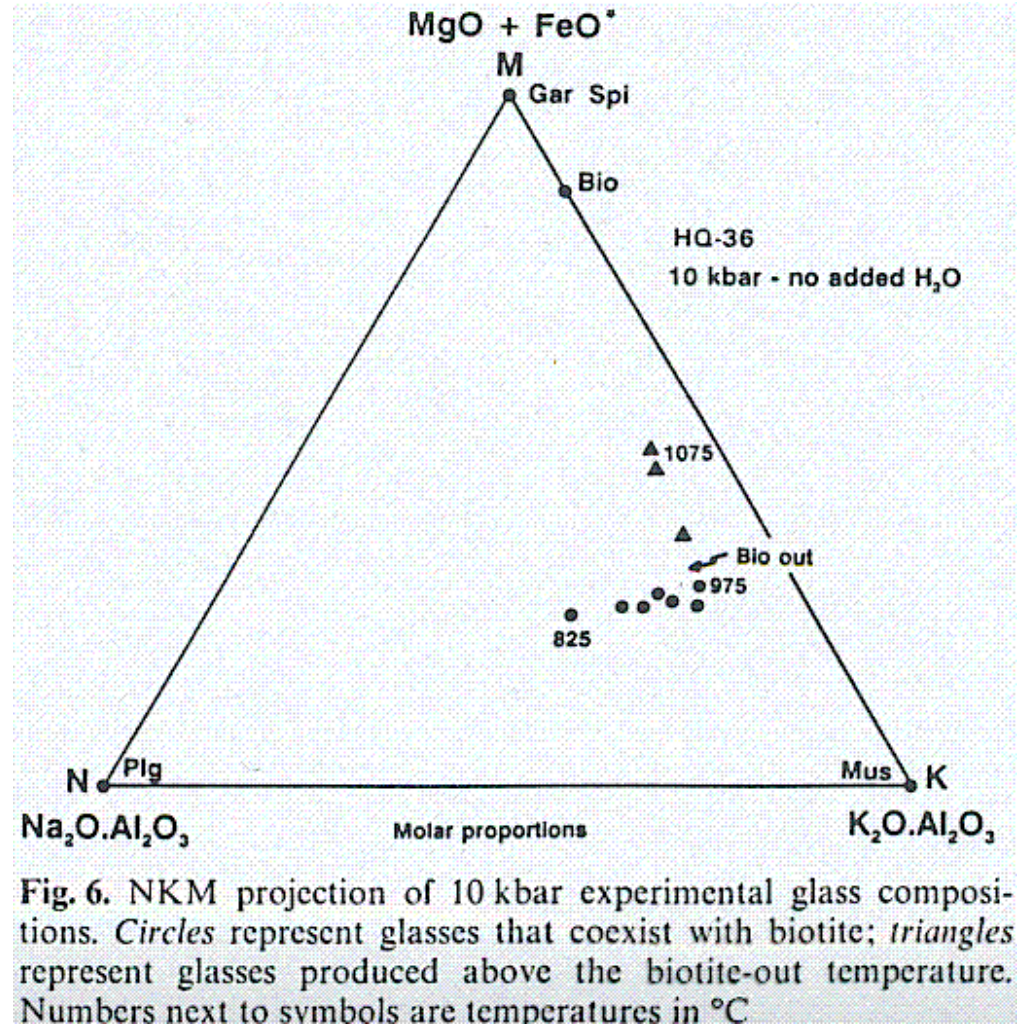


Fig. 6. NKM projection of 10 kbar experimental glass compositions. Circles represent glasses that coexist with biotite; triangles represent glasses produced above the biotite-out temperature. Numbers next to symbols are temperatures in °C

4. Anatexe

Table 4. Glass compositions (wt%)

Temperature (°C)	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO*	CaO	MnO	TiO ₂	F	P ₂ O ₅	H ₂ O	Total
7 kbar													
825	3.18	5.22	0.31	13.56	67.22	1.50	0.55	0.04	0.08	0.05	0.09	3.45	95.25
850	2.23	5.60	0.33	13.34	70.06	1.55	0.30	0.07	0.10	0.00	0.00	5.48	99.06
875	1.77	5.61	0.35	14.85	69.72	1.65	0.35	0.00	0.13	0.01	0.05	4.09	98.58
900	1.32	5.31	0.35	13.72	70.85	1.72	0.24	0.02	0.38	0.11	0.05	3.33	97.40
950	0.87	6.52	0.39	13.84	71.41	1.78	0.15	0.03	0.28	0.16	0.06	3.06	98.56
975	0.85	6.38	0.87	13.14	70.79	1.99	0.39	0.15	0.51	0.11	0.07	2.98	98.22
1000	0.89	6.72	0.66	13.25	70.21	2.14	0.39	0.10	0.61	0.17	0.09	3.13	98.36
1075	0.82	6.23	0.88	12.90	72.95	2.01	0.38	0.13	0.61	0.14	0.07	2.90	100.02
10 kbar													
825	2.89	5.32	0.45	13.55	69.36	1.62	0.60	0.01	0.02	0.00	0.14	4.67	98.64
850	2.24	5.69	0.41	14.25	70.86	1.70	0.39	0.05	0.13	0.10	0.05	4.33	100.19
875	1.65	6.20	0.37	13.65	70.39	1.62	0.28	0.01	0.17	0.11	0.09	4.72	99.26
900	1.29	6.06	0.41	13.46	71.54	1.61	0.23	0.03	0.21	0.08	0.10	3.47	98.48
925	1.22	6.13	0.37	13.80	71.85	1.60	0.21	0.02	0.26	0.08	0.07	3.23	98.85
950	1.10	6.86	0.33	13.46	73.66	1.65	0.13	0.05	0.37	0.08	0.04	3.55	101.29
975	0.97	6.92	0.49	13.62	73.13	1.74	0.13	0.03	0.37	0.15	0.10	3.49	101.14
975 ^a	0.93	6.69	0.86	13.37	70.86	2.93	0.17	0.04	0.42	0.15	0.06	3.38	99.86
1000	0.85	6.40	0.70	13.48	72.63	2.07	0.20	0.04	0.35	0.12	0.08	3.00	99.93
1025	0.79	5.98	1.04	13.40	70.62	3.26	0.26	0.11	0.65	0.10	0.11	2.79	99.12
1075	0.84	6.05	1.09	13.64	69.44	3.04	0.28	0.08	0.73	0.17	0.06	2.95	98.37
13 kbar													
900	1.79	5.92	0.41	14.14	68.15	1.51	0.21	0.02	0.28	0.11	0.05	7.14	99.74
950	1.21	7.72	0.34	13.51	68.46	1.40	0.10	0.04	0.26	0.12	0.09	5.33	98.57

All elements analyzed with 5 nA beam currents, except Na₂O and H₂O calculated by mass balance. K₂O values corrected as described in text. All values are averages of 5–12 individual analyses

^a BaCO₃ cell assembly

4. Anatexe

- **Petrogenetický význam:**
- **Muskovit a plagioklas se taví za relativně nižších teplot (pod 800 °C), produktivita tavení je ale nízká, do zhruba 10 %, protože i obsah obou minerálů v protolitech, především muskovitu, je poměrně nízký.**
- **Biotit je zřejmě nejdůležitějším minerálem pro produkci taveniny.**
- **Taveniny mají granitické složení, se zvyšováním teploty tavení se zvyšuje produkce taveniny a postupně mění také její chemické složení. V tavenině se vzrůstem teploty tavení přibývá Fe, Mg, Al a Ti, zvyšuje se poměr K/Na, tento nárůst ale není zcela pravidelný. Někdy se mění postupně, jindy téměř skokem.**

5. Restity

- **Chemické a mineralogické složení restitů**
- Srovnáním chemického složení protolitu (např. metapelitu) a granitů (naše tavenina nebo sklo) je zřejmé, že restit je při tavení neustále obohacován na Al, Ti, Mg a Fe, klesá ale poměr Fe/Mg. Zároveň se mění mineralogické složení restitů, přibývá granátu, alumosilikátů (sillimanit, kyanit), oxidů Ti (rutil, ilmenit), v počátku přibývá také biotitu (s vysokým obsahem Ti) při vysokých teplotách se objevuje spinel (hercynit). Postupně se mění také chemické složení minerálů v restitu.

5. Restity

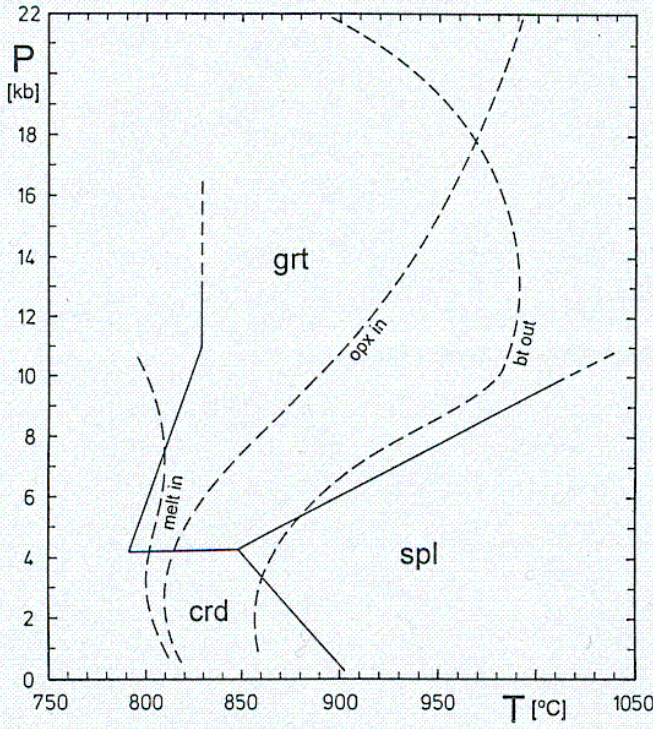


Fig. 9.9. Pressure-temperature diagram showing beginning of melting, upper thermal stability of biotite, lower thermal stability of orthopyroxene, and stability fields of cordierite, spinel, and garnet for the investigated peraluminous metagreywacke. (After Figs. 2 and 3, Vielzeuf and Montel 1994)

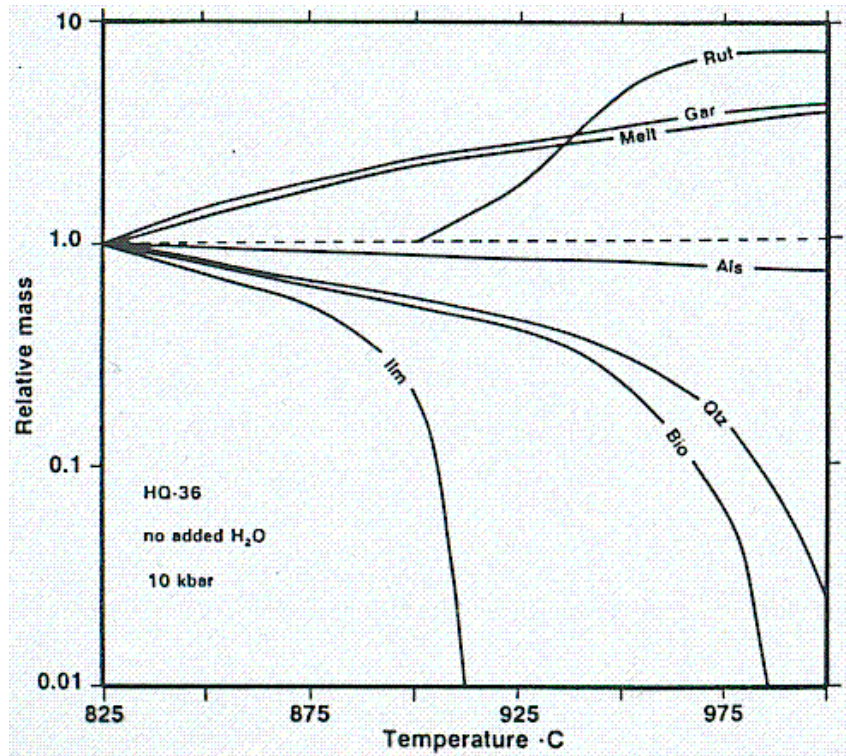


Fig. 5. Variations in modal compositions of 10 kbar experimental run products relative to the mode at 825° C, 10 kbar. Data from Table 5a

5. Restity

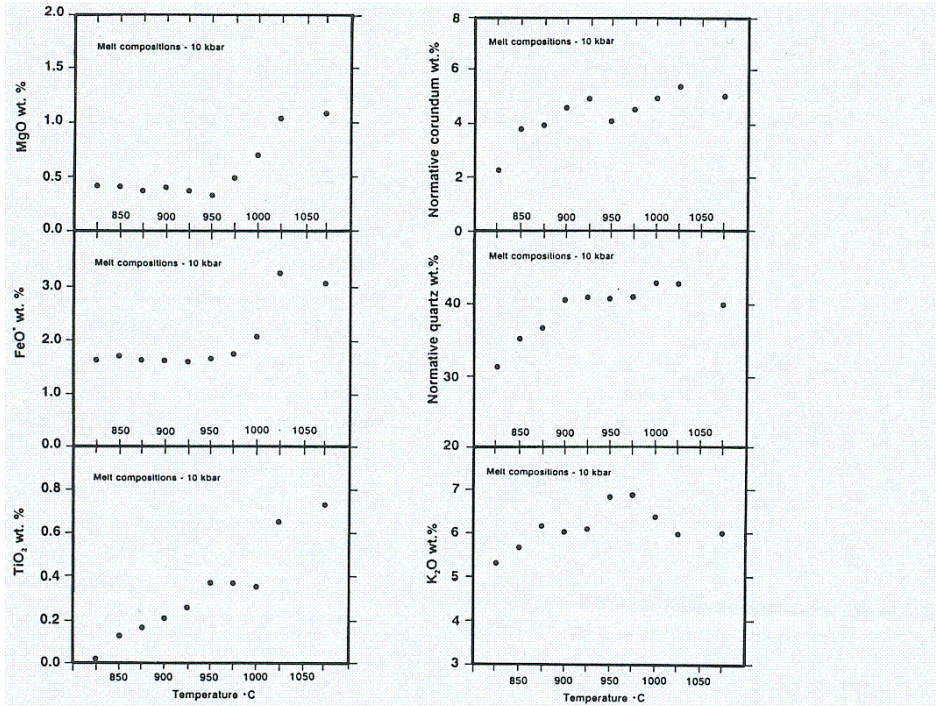
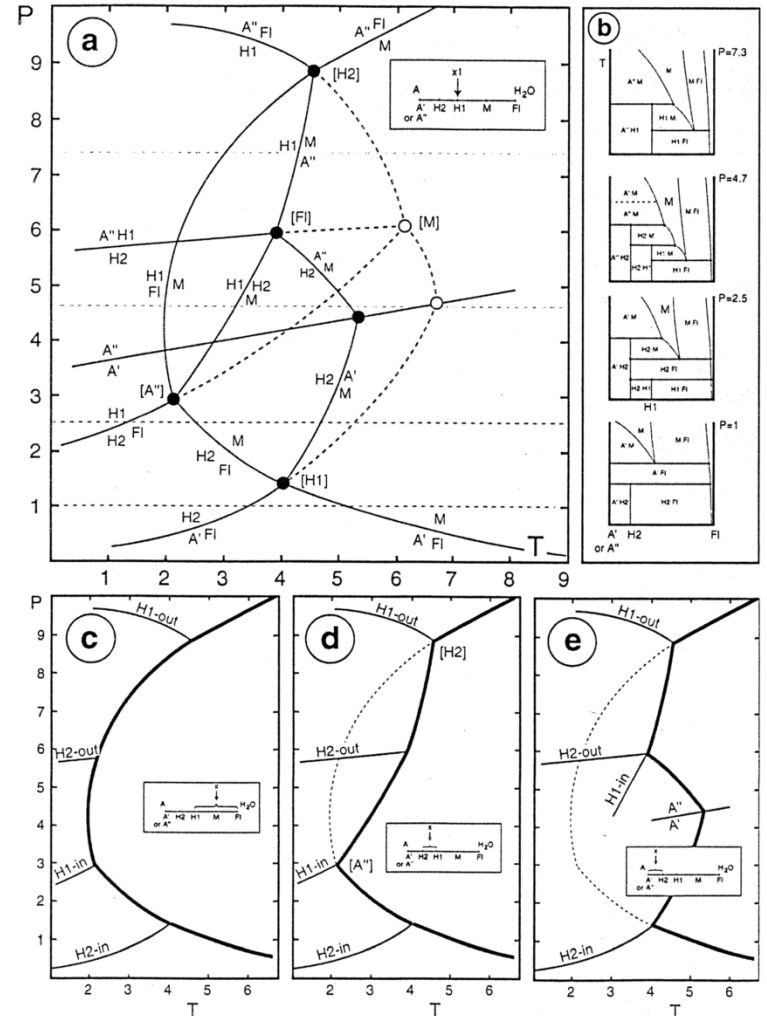
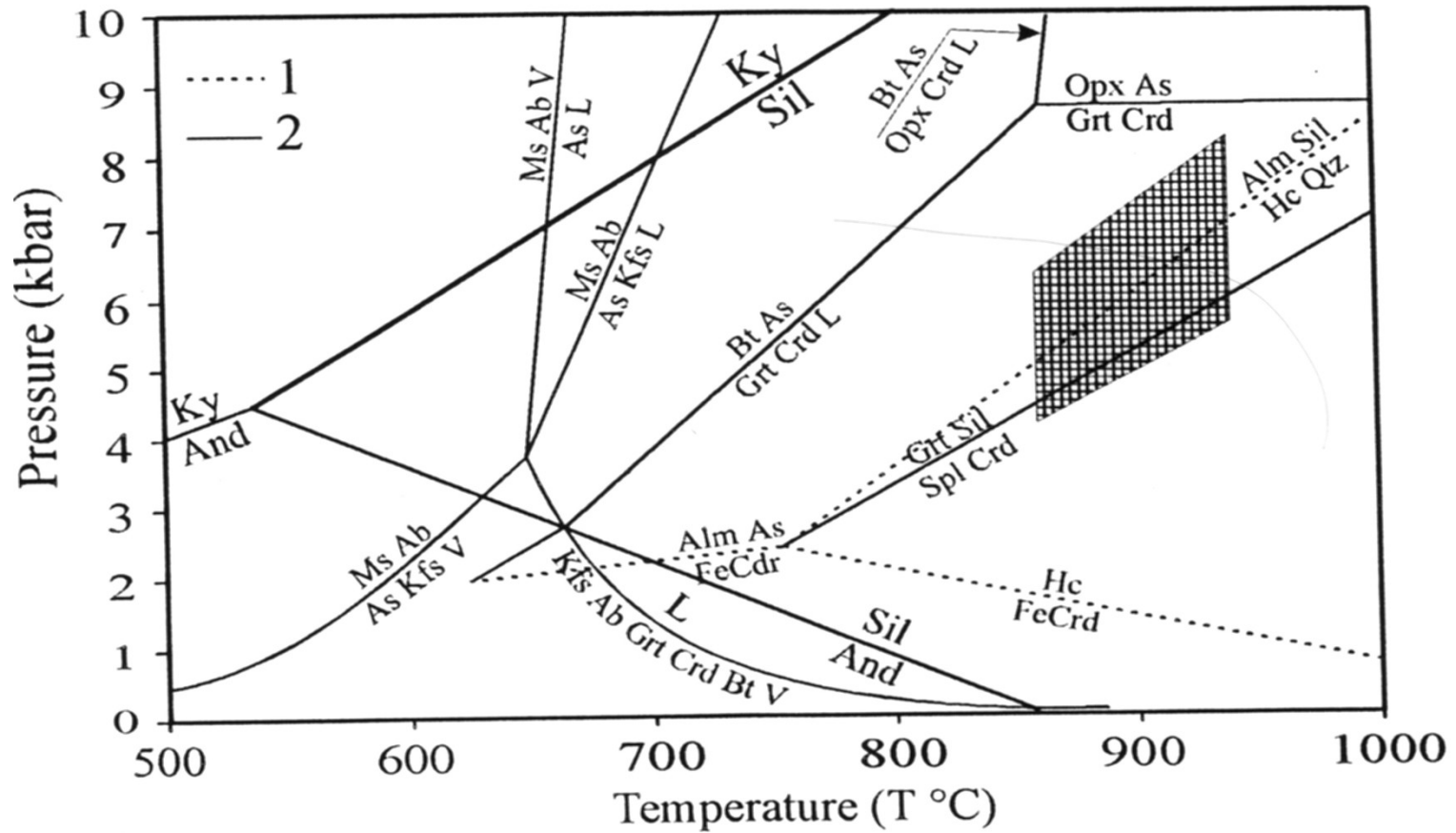


Fig. 7. Compositional variation of glasses produced in 10 kbar experiments. Points up to 975° C correspond to reaction (3), whereas points above this temperature correspond to reaction (5). Note the different behaviours of the mafic components along these two reactions



5. Restity



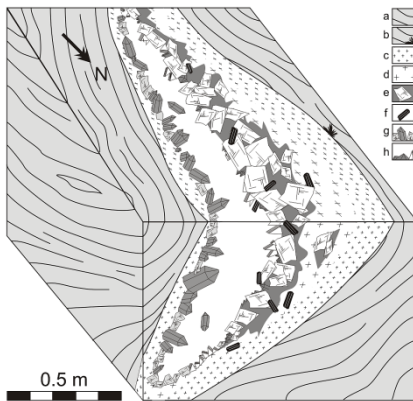
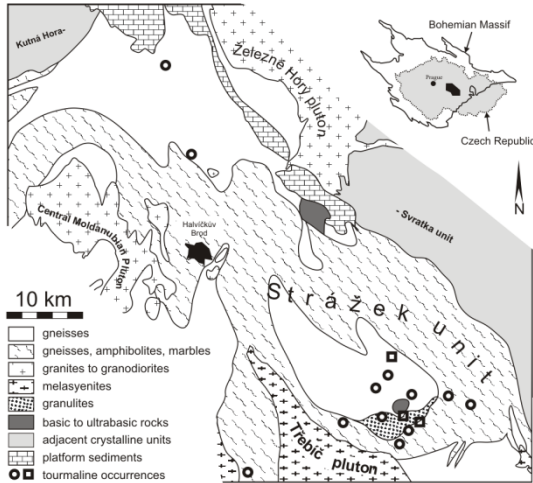
PT-podmínky v restitu z Petrovic

5. Restity

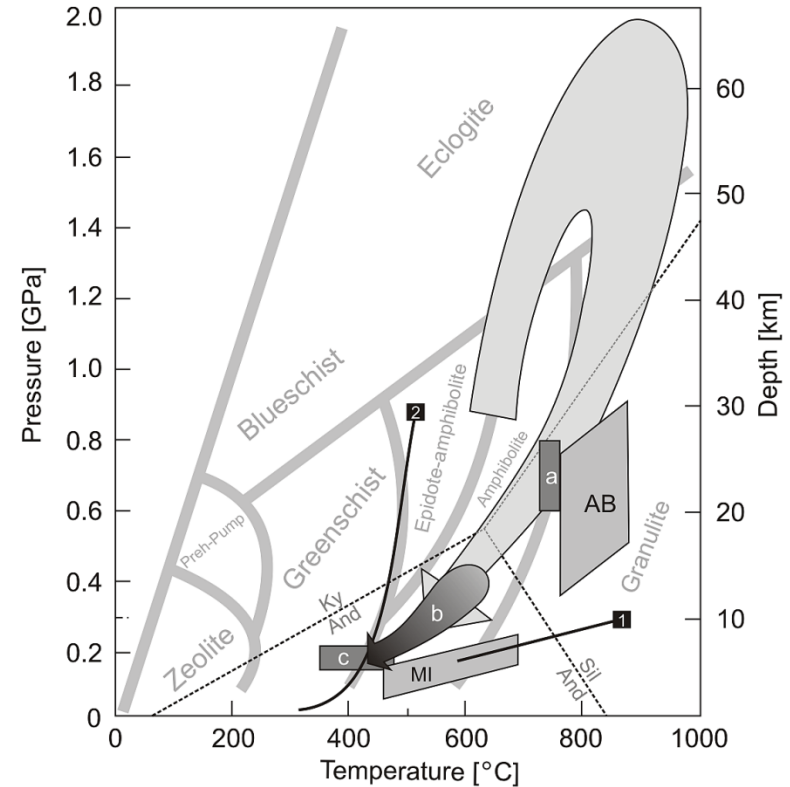
- **Petrogenetický význam:**
- **Složení restitů se mění v závislosti na složení protolitu a především na množství vytavené a segregované taveniny. Obecně jsou restity horniny bohaté Al, Fe, Mg a Ti, naopak ubývá H_2O , složené hlavně z granátu, alumosilikátu (nejčastěji sillimanitu), rutilu a při vysokých teplotách také hercynitu. Bývá přítomen biotit, cordierit, popř. další minerály (safirín).**
- **Restity patří mezi vzácné horniny, i když je jasné, že vzhledem k množství granitických hornin v zemské kůře musí být poměrně hojné. K restitům se řadí Al-bohaté granulitické horniny a jiné granátem bohaté horniny.**
- **Rozpoznávání restitů v přírodě je velmi komplikované. Především proto, že při retrográdních reakcích, je-li dostatek vody popř. alkálií hlavně K, dochází k tzv. back reakcím a v restitu se zpětně objevují minerály s OH hlavně biotit.**

6. Anatektické pegmatity

Dutinové anatektické pegmatity v migmatizovaných rulách, Strážecké moldanubikum, Gadas et al. 2012



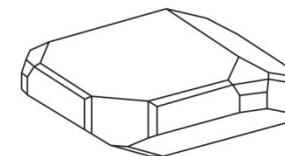
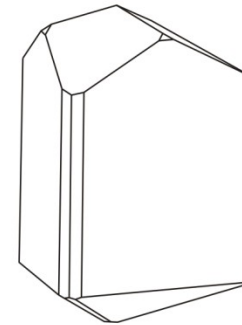
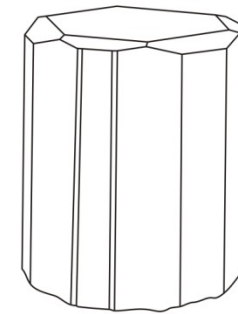
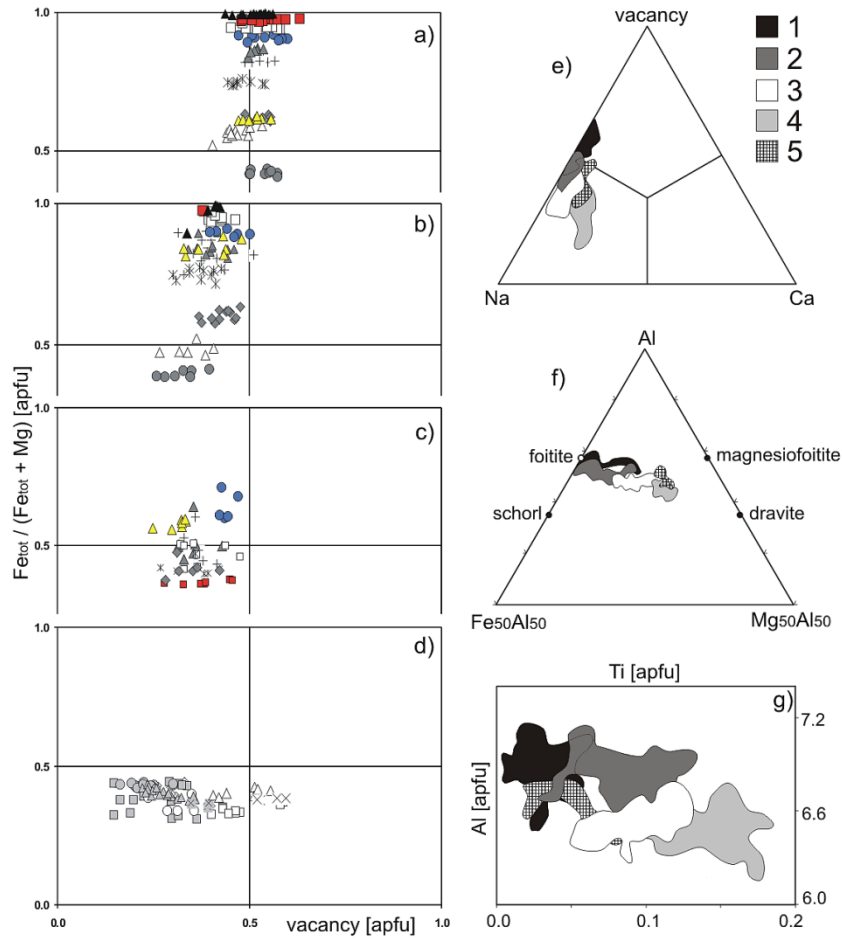
Znetínek



Typické minerály – křemen, K-živec, albit, muskovit, biotit, turmalíny, cordierit, andalusit, apatit

Všechny relevantní minerály - vysoký obsah Mg, nízký obsah F – minerální asociace pegmatitu je téměř totožná s okolními horninami s výjimkou andalusitu

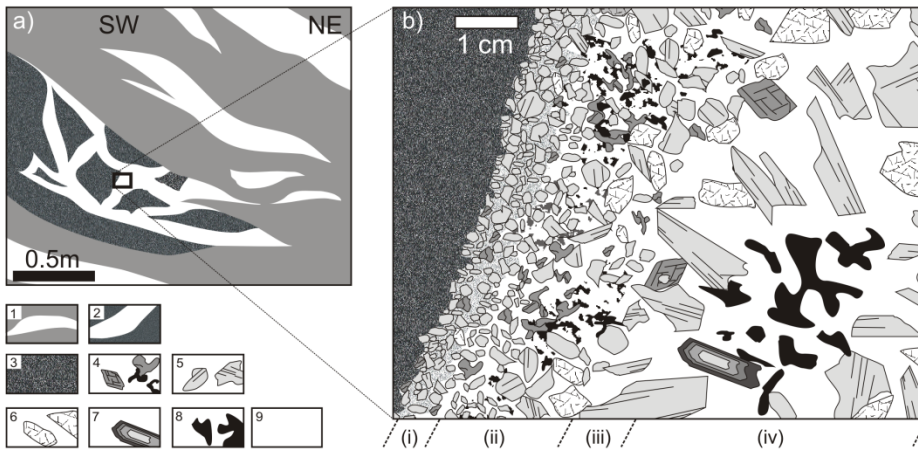
6. Anatektické pegmatity



Krystaly turmalínu

6. Anatektické pegmatity

Mirošov u Strážku – anatektický pegmatit v erlánu

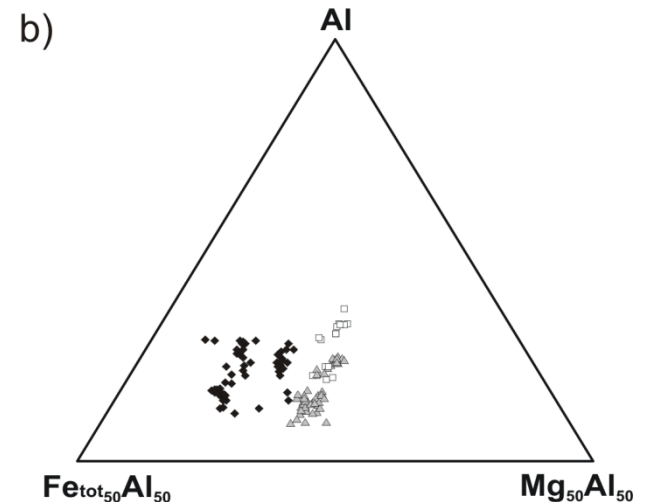
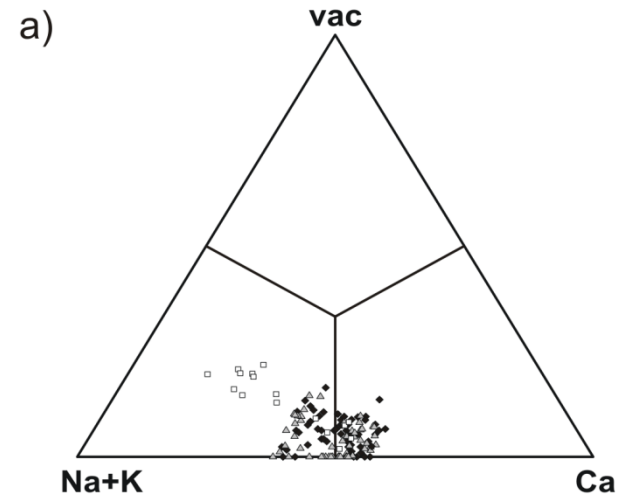


Schematic diagrams showing a) geological setting of metatectes in amphibolites + pegmatite in pyroxene gneiss; b) simple zoning of the Mirošov pegmatite.

1 - metatect in amphibolite, 2- pegmatite in pyroxene gneiss, 3 - pyroxene gneiss, 4 - amphibole 1 + TU1, 5 - amphibole 2, 6 - , 7 - allanite, 8 - TU2, 9 - quartz.

Gadas et al. 2014

Složení turmalínu



Závěr

Anatektické procesy jsou jedním z nejdůležitějších procesů ovlivňujících geologický vývoj zemské kůry a svrchní části pláště. Dochází při nich k jednomu z nejdůležitějších přerozdělení chemických prvků v geologii vůbec a vzniku magmatických hornin. V této přednášce je prezentována jen počáteční stádium vývoje – natavení, tedy jen parciální tavení. Vlastní procesy vzniku magmatických hornin jsou řešeny v magmatické petrologii.