

Geochemie endogenních procesů – 11. část

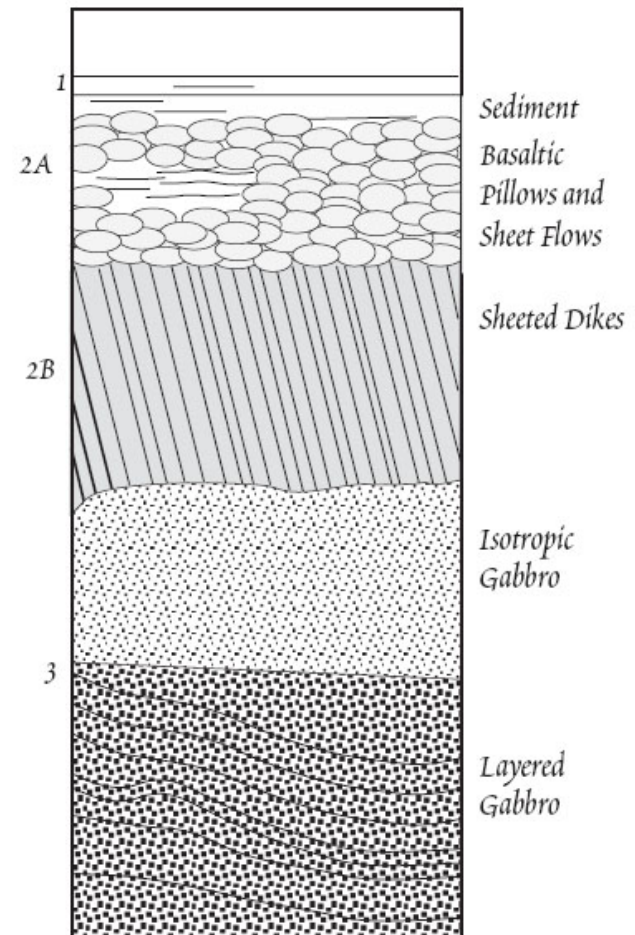
Geochemie kůry I

Zemská kůra

- pouze ~ 0.5 % z celkové Země
- nejvíce a nejlépe studována
- vznik a vývoj dlouhým procesem z tavenin generovaných ve svrchním plášti
- 2 základní typy kůry
 - oceánská – tenká, mladá, primitivní
 - kontinentální – variabilní mocnost, dlouhá a komplexní historie, velmi vyvinutá

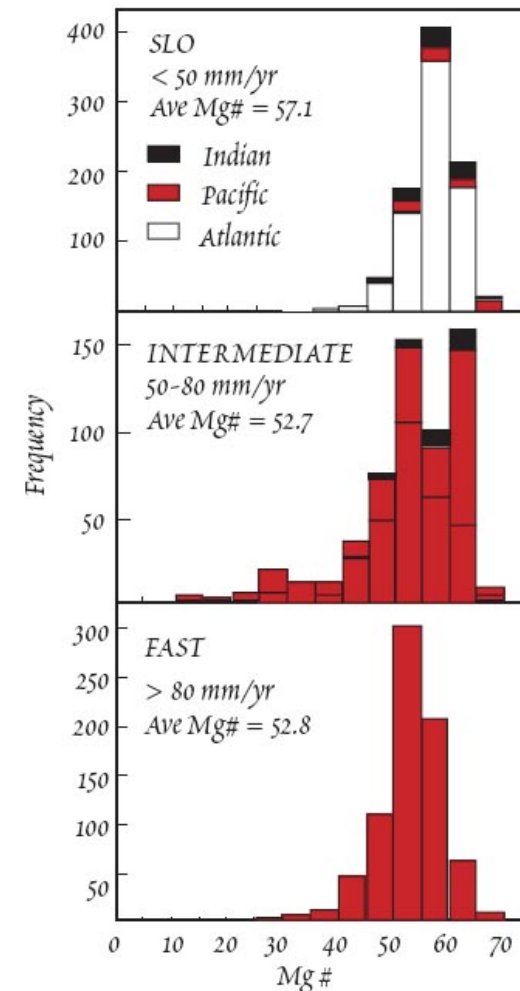
Oceánská kůra

- velmi homogenní primitivní (MORB) složení → derivace z DMM
- páskované složení (ofiolit)
- spodní partie mnohem více diferenciovány (frakční krystalizace) v porovnání s MORB



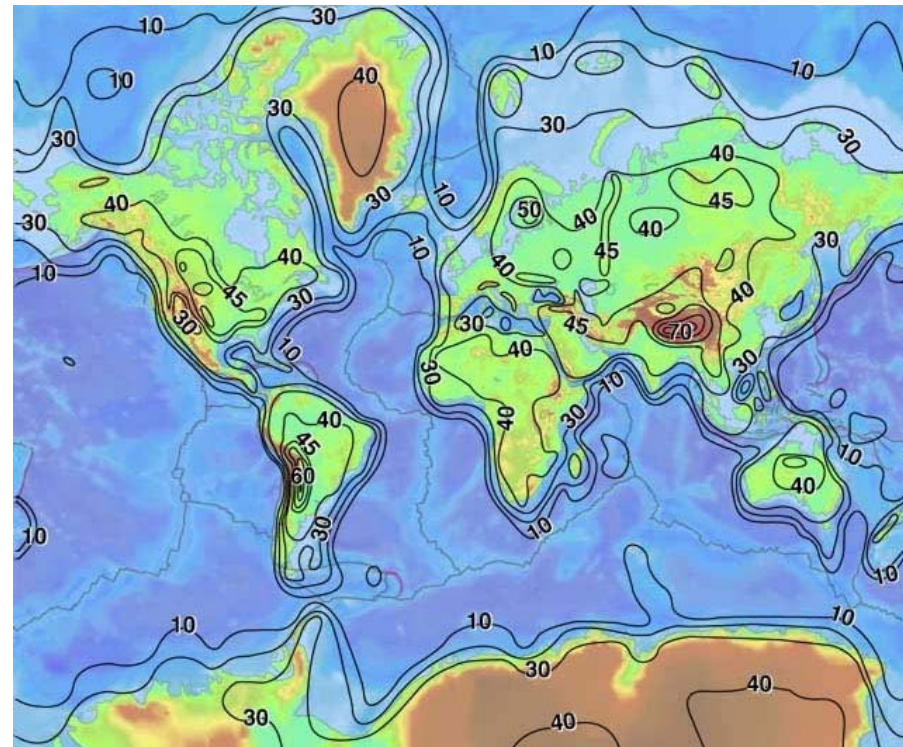
Geochemie oceánské kůry

- výrazná frakcionace
pravděpodobně
souvisí s rychlostí
rozpínání MOR
- chemismus také
velmi souvisí s F a
hloubkou tvoření
MORB magmat



Kontinentální kůra

- extrémně heterogenní složení
- velmi variabilní mocnost (rifty vs štítové oblasti)
- převážně nepřímé důkazy o složení (nejhlubší vrt pouze 12 km)
- spodní-střední vs svrchní kůra



<http://earthquake.usgs.gov/research/structure/crust/>

Geochemie svrchní kůry

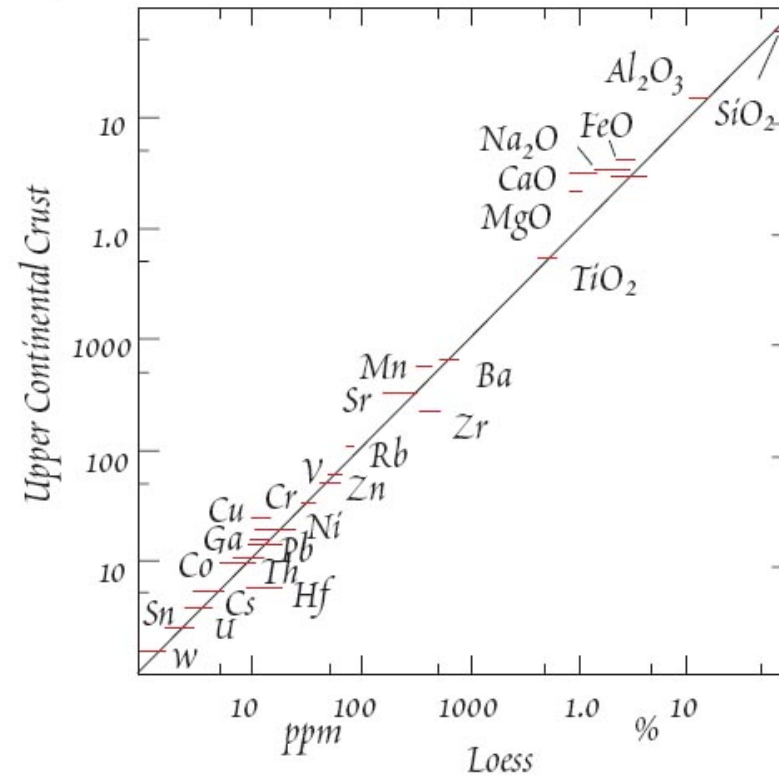
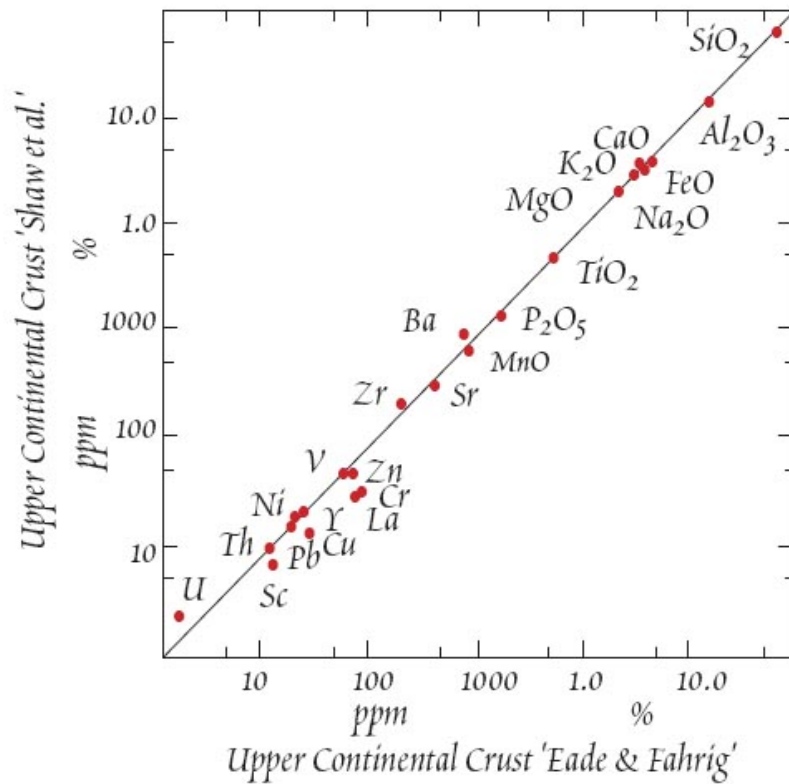
Plutonic Rocks	Volume %	Sedimentary Rocks	Volume %
Granite, Granodiorite	77	Shales	72
Quartz Diorite	8	Carbonates	15
Diorite	1	Sandstones	11
Gabbros	13	Evaporites	2
Syenites, anorthosites, peridotites	1		

From Taylor and McLennan (1985).

White (2001)

- určení % zastoupení jednotlivých hornin → celkové chemické složení
- sedimenty tvoří 8 až 11 % z celkového objemu svrchní kůry

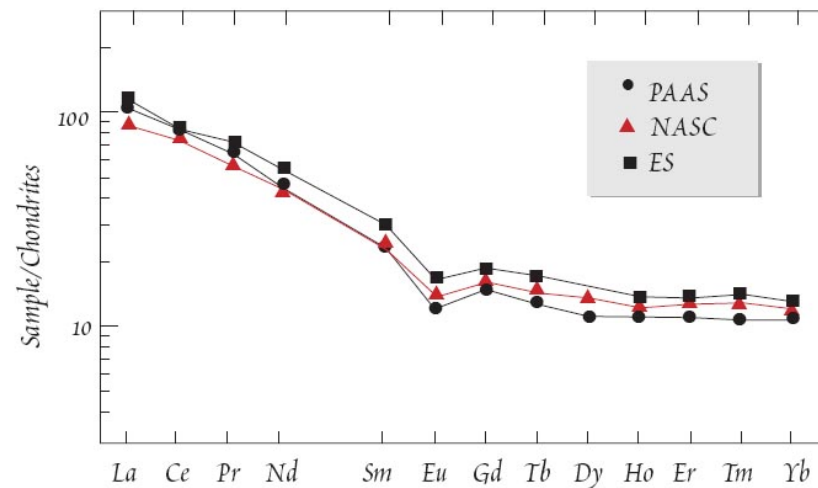
Geochemie svrchní kůry



White (2001)

Geochemie svrchní kůry

- studium sedimentů nebo glaciálního prachu
- 3 frakce sedimentu ze kterých je možné rekonstruovat složení svrchní kůry (resistentní minerály, jíly, roztoky)



White (2001)

Geochemie svrchní kůry

- granodioritové až tonalitové složení
- složení je podle různých modelů velmi podobné, **ALE** problémy s HFSE

Major Oxides (wt %)	T&M	Wedepohl	Normative Mineralogy (T & M)					
SiO ₂	66.0	64.9	Quartz			15.7		
TiO ₂	0.5 (0.76)	0.52	Orthoclase			20.1		
Al ₂ O ₃	15.2	14.6	Albite			13.6		
FeO	4.5	3.97	Diopside			6.1		
MgO	2.2	2.24	Hypersthene			9.9		
CaO	4.2	4.12	Il			0.95		
Na ₂ O	3.9	3.46						
K ₂ O	3.4	4.04						
	T & M	Wedepohl	T & M	Wedepohl	T & M	Wedepohl		
Li ppm	20	22	Ga ppm	17	14	Nd ppm	26	25.9
Be ppm	3	3.1	Ge ppm	1.6	1.4	Sm ppm	4.5	4.7
B ppm	15	17	As ppm	1.5	2	Eu ppm	0.88	0.95
C ppm		3240	Se ppm	0.05	0.083	Gd ppm	3.8	2.8
N ppm		83	Br ppm		1.6	Tb ppm	0.64	0.5
F ppm		611	Rb ppm	112	110	Dy ppm	3.5	2.9
Na %	2.89	2.57	Sr ppm	350	316	Ho ppm	0.8	0.62
Mg %	1.33	1.35	Y ppm	22	20.7	Er ppm	2.3	
Al %	8.04	7.74	Zr ppm	190	237	Tm ppm	0.33	
Si %	30.8	30.35	Nb ppm	25 (13.7)	26	Yb ppm	2.2	1.5
P ppm	700	665	Mo ppm	1.5	1.4	Lu ppm	0.32	0.27
S		953	Pd ppb	0.5		Hf ppm	5.8	5.8
Cl		640	Ag ppb	50	55	Ta ppm	2.2 (0.96)	1.5
K %	2.8	2.87	Cd ppb	98	102	W ppm	2	1.4
Ca %	3	2.94	In ppb	50	61	Re ppb	0.4	
Sc ppm	11	7	Sn ppm	5.5	2.5	Os ppb	0.05	
Ti ppm	3000 (4560)	3117	Sb ppm	0.2	0.31	Ir ppb	0.02	
V ppm	60	53	Te ppb			Au ppb	1.8	
Cr ppm	35	35	I ppm		1.4	Hg ppb		56
Mn ppm	600	527	Cs ppm	3.7 (7.3)	5.8	Tl ppb	750	750
Fe %	3.5	3.09	Ba ppm	550	668	Pb ppm	20	17
Co ppm	10	11.6	La ppm	30	32.3	Bi ppm	127	123
Ni ppm	20	18.6	Ce ppm	64	65.7	Th ppm	10.7	10.3
Cu ppm	25	14.3	Pr ppm	7.1	6.3	U ppm	2.8	2.5
Zn ppm	71	52						

T&M: Taylor and McLennan (1985,1995), Wedepohl: Wedepohl (1995). Values shown in parentheses are revisions of Plank and Langmuir (in press) to Taylor and McLennan's estimates.

Střední a spodní kůra

- přímé vs. nepřímé pozorování
 - **přímé** – **granulity** → problém s retrográdní metamorfózou (změna chemismu), mnohem více leukokráttní než xenolity spodní kůry ve vulkanitech.....
 - **nepřímé** – geofyzikální metody → seismické profily, tepelný tok apod.

Střední a spodní kůra

Geofyzikální pozorování

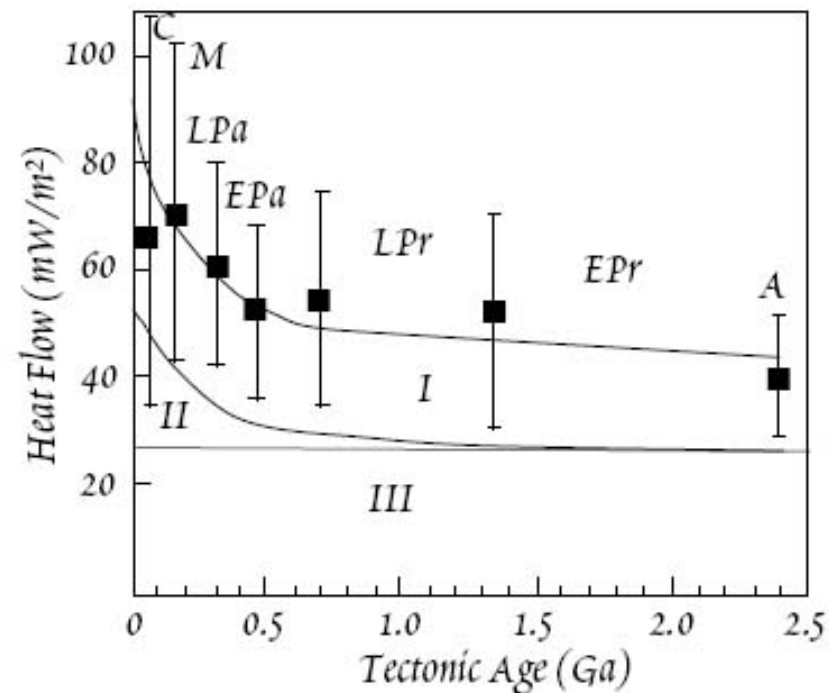
- **tepelný tok** – množství tepla produkované radioktivním rozpadem K-U-Th → odvození chemismu
- **seismické vlny** – rychlost závislá na hustotě, střižném modulu apod. → odvození chemismu

Igneous Rock Type	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Th/U	K/U	Density g/cm ³	Heat Production 10 ⁻⁶ W/m ³
Granite / Rhyolite	3.9	16.0	3.6	4.1	0.9×10 ⁴	2.67	2.5
Granodiorite / Dacite	2.3	9.0	2.6	3.9	1.1×10 ⁴	2.72	1.5
Diorite / Andesite	1.7	7.0	1.1	4.1	0.7×10 ⁴	2.82	1.1
Gabbro / Basalt	0.5	1.6	0.4	3.2	0.8×10 ⁴	2.98	0.3
Peridotite	0.02	0.06	0.006	3.0	0.3×10 ⁴	3.28	0.01
Continental Crust	1.25	4.8	1.25	3.8	1.0×10 ⁴	—	0.8

Střední a spodní kůra

Tepelný tok

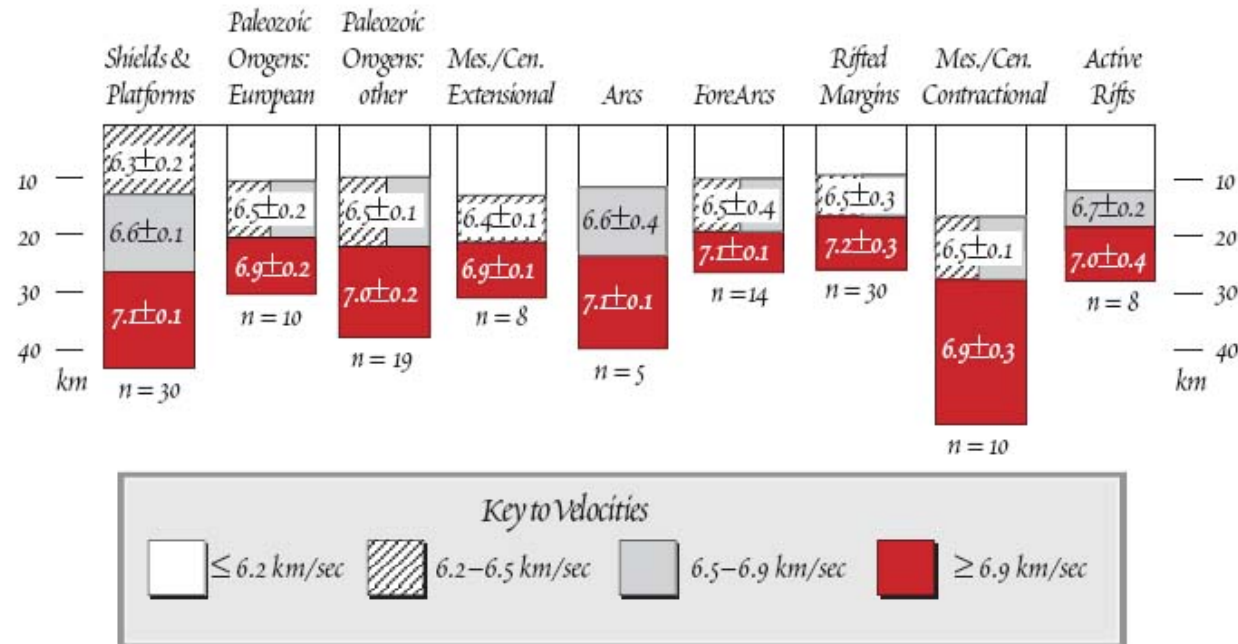
- velikost tepelného toku je silně závislá na
 - stáří a geotektonických podmínkách
 - tloušťce kůry
 - tepelném toku litosferického pláště



White (2001)

Střední a spodní kůra

Seismické vlny



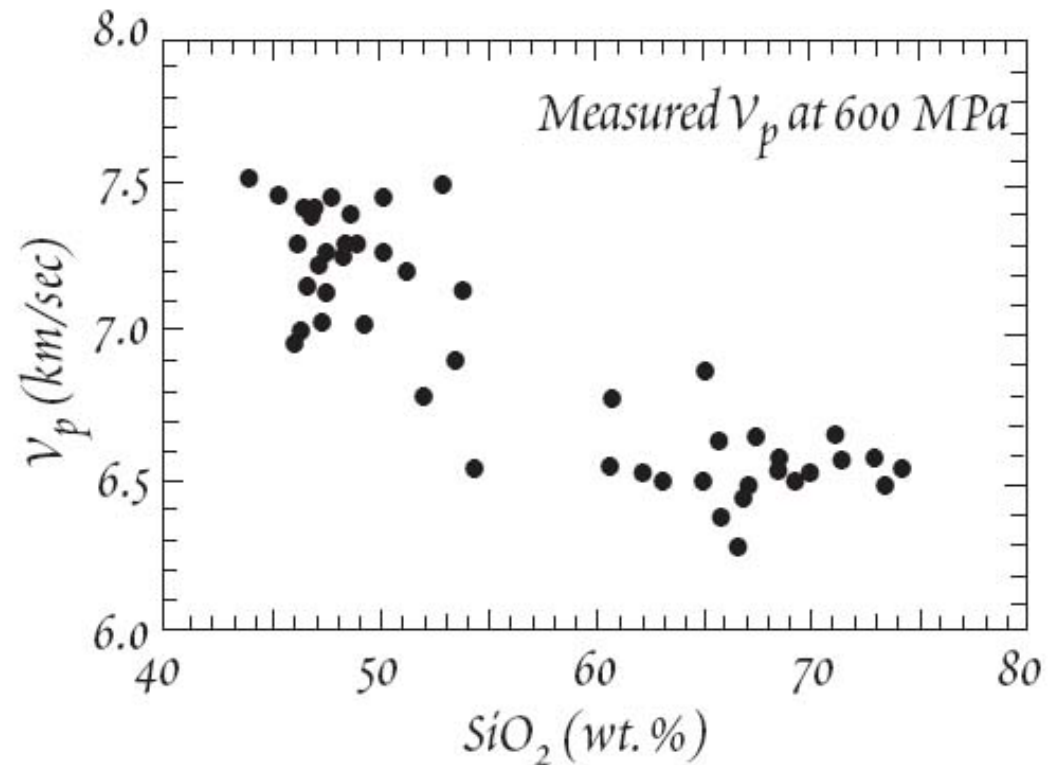
White (2001)

- „vrstevnatá“ kůra
- zvyšování rychlosti P-vln s hloubkou → zvyšování hustoty **a/nebo** snižování „komprese“

Střední a spodní kůra

Seismické vlny

- rychlost P-vln vykazuje korelace se stupněm saturace SiO_2



White (2001)

Geochemie střední a spodní kůry

Major Oxides, %			
	R & F Lower	R & F Middle	Wedepohl Lower
SiO ₂	52.3	60.6	58.05
TiO ₂	0.8	0.7	0.84
Al ₂ O ₃	16.6	15.5	15.52
FeO	8.4	6.4	7.34
MnO	0.1	0.1	0.12
MgO	7.1	3.4	5.23
CaO	9.4	5.1	6.80
Na ₂ O	2.6	3.2	2.86
K ₂ O	0.6	2.01	1.85
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.20

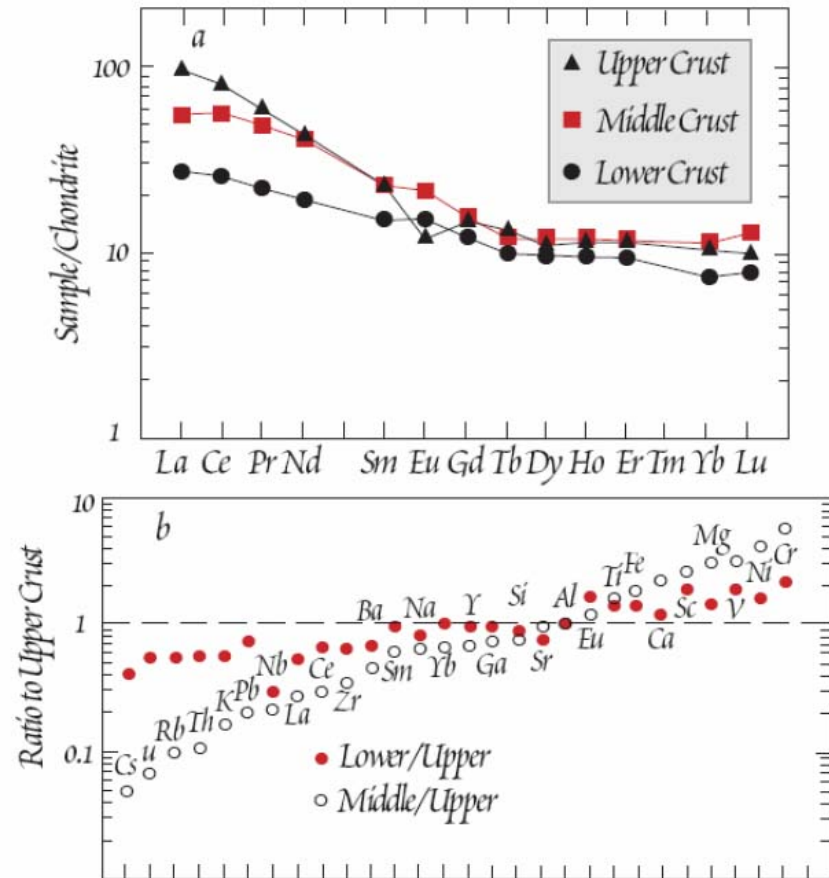
Trace Elements, ppm							
	R & F Lower	R & F Middle	Wedepohl Lower		R & F Lower	R & F Middle	Wedepohl Lower
Li	6	7	13	Sn			2.1
Be			1.7	Sb			0.3
B			5	I			0.14
C			588	Cs	0.3	2.4	0.8
N			34	Ba	259	402	568
F			429	La	8	17	26.8
S			408	Ce	20	45	53.1
Cl			278	Pr	2.6	5.8	7.4
Sc	31	22	25.3	Nd	11	24	28.1
V	196	118	149	Sm	2.8	4.4	6.0
Cr	215	83	228	Eu	1.1	1.5	1.6
Co	38	25	38	Gd	3.1	4	5.4
Ni	88	33	99	Tb	0.48	0.58	0.81
Cu	26	20	37.4	Dy	3.1	3.8	4.7
Zn	78	70	79	Ho	0.68	0.82	0.99
Ga	13	17	5.4	Er	1.9	2.3	
As			1.3	Tm			0.81
Se			0.17	Yb	1.5	2.3	2.5
Br			0.28	Lu	0.25	4.1	0.43
Rb	11	62	41	Hf	1.9	4	4.0
Sr	348	281	352	Ta	0.6	0.6	0.84
Y	16	22	27.2	W			0.6
Zr	68	125	165	Tl			0.26
Nb	5	8	11.3	Hg			0.21
Mo			0.6	Pb	4.2	15.3	12.5
Ag			0.08	Bi			0.037
Cd			0.101	Th	1.2	6.1	6.6
In			0.052	U	0.2	1.6	0.93

R & F: Rudnick and Fountain (1995), Wedepohl: Wedepohl (1995).

Geochemie střední a spodní kůry

- REE vykazují velké rozdíly → Eu anomálie reflektují fracionaci plg (granulit → granit)
- fracionace ostatních TR mezi LC a MC-UC

→ magmatické procesy hrály klíčovou roli ve stratifikaci kůry



White (2001)

Složení „celkové“ kontinentální kůry

Major Oxides, wt. %

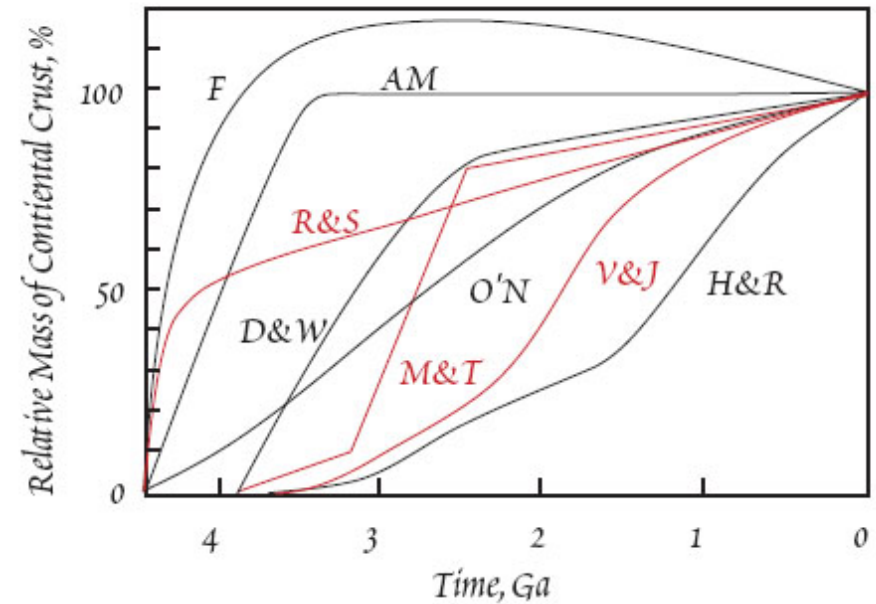
	R & F	T & M	W & T	We	Shaw
SiO ₂	59.1	57.3	63.2	61.5	63.2
TiO ₂	0.75	0.9	0.6	0.68	0.7
Al ₂ O ₃	15.8	15.9	16.1	15.1	14.8
FeO	6.6	9.1	4.9	5.67	5.60
MnO	0.1	0.18	0.08	0.10	0.09
MgO	4.4	5.3	2.8	3.7	3.15
CaO	6.4	7.4	4.7	5.5	4.66
Na ₂ O	3.2	3.1	4.2	3.2	3.29
K ₂ O	1.88	1.1	2.1	2.4	2.34
P ₂ O ₅	0.2		0.19	0.18	0.14

	R & F	T & M	We		R & F	T & M	We
Li	11	13	18	Sb		0.2	0.3
Be		1.5	2.4	Te, ppb			5
B		10	11	I, ppb			800
C			1990	Cs	3	1	3.4
N			60	Ba	390	250	584
F			525	La	18	16	30
S			697	Ce	42	33	60
Cl			472	Pr	5	3.9	6.7
Sc	22	30	16	Nd	20	16	27
V	151	230	98	Sm	3.9	3.5	5.3
Cr	119	185	126	Eu	1.2	1.1	1.3
Co	25	29	24	Gd	3.6	3.3	4.0
Ni	51	105	56	Tb	0.56	0.6	.65
Cu	24	75	25	Dy	3.5	3.7	3.8
Zn	73	80	65	Ho	0.76	0.78	0.8
Ga	16	18	15	Er	2.2	2.2	2.1
Ge		1.6	1.4	Tm		0.32	0.3
As		1	1.7	Yb	2	2.2	2.0
Se		0.05	0.12	Lu	0.33	0.3	0.35
Br			1.0	Hf	3.7	3	4.9
Rb	58	32	78	Ta	0.7	1	1.1
Sr	325	260	333	W		1	1.0
Y	20	20	24	Re, ppb		0.4	0.4
Zr	123	100	203	Os, ppb		0.005	0.05
Nb	8.5	11	19	Ir, ppb		0.1	0.05
Mo		1	1.1	Pt, ppb			0.4
Ru, ppb			0.1	Au, ppb		3	2.5
Rh, ppb			0.06	Hg, ppb			40
Pd, ppb		1	0.4	Tl, ppb		360	520
Ag, ppb		80	70	Pb	12.6	8	14.8
Cd, ppb		98	100	Bi, ppb		60	85
In, ppb		50	50	Th	5.6	3.5	8.5
Sn		2.5	2.3	U	1.42	0.91	1.7

R & F: Rudnick and Fountain (1995) as revised by Plank and Langmuir (in press), T & M: Taylor and McLennan (1985, 1995), We: Wedepohl (1995), Shaw: Shaw et al. (1986), W & T: Weaver and Tarney (1984).

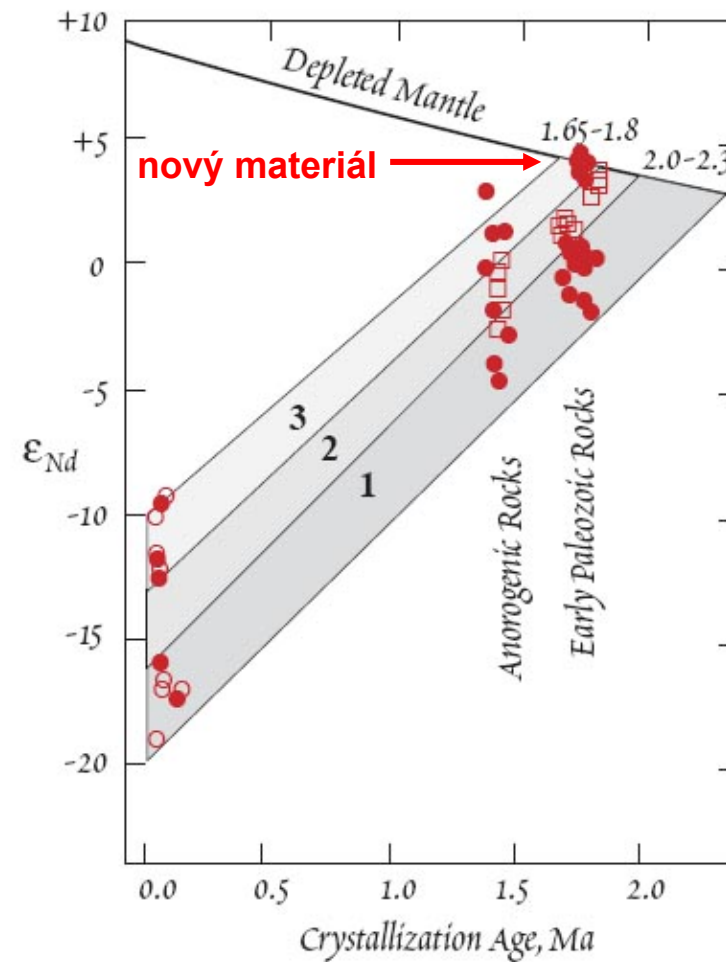
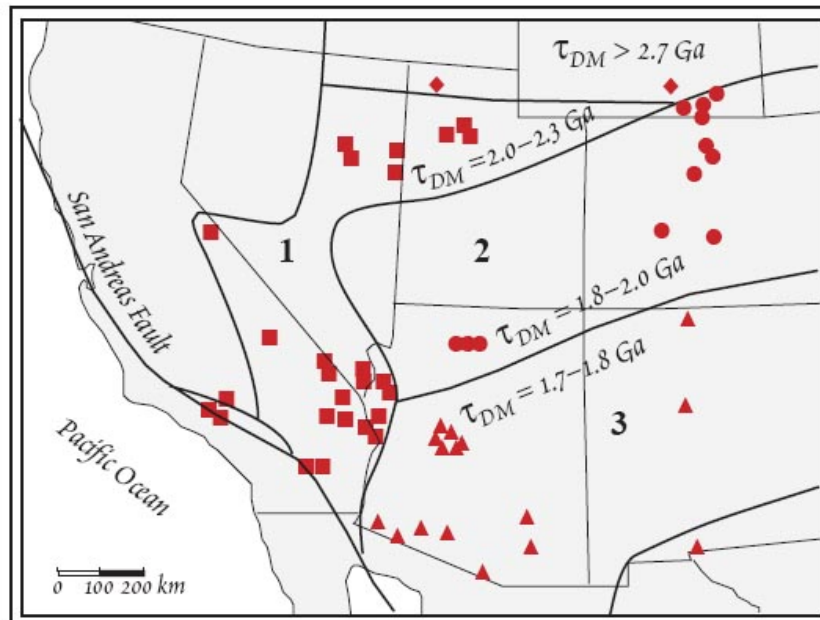
Růst kontinentální kůry

- kůra je příliš SiO_2 bohatá a TE nereflektují jednoduchou taveninu → **komplexní vznik a vývoj**
- všechna data ukazují na velmi vysoké stáří první kůry



White (2001)

Růst kontinentální kůry



Mechanismy kontinentálního růstu

- vulkanismus vázaný na subdukční zóny
 - např. Andy
- akrece oceánské kůry
 - tlustá oceánská deska → NE subdukce → akrece ke kontinentálnímu okraji
- kontinentální vulkanismus
 - rifty, plášťové chocholy
- underplating
 - zachycení plášťových basalt. magmat na hranici plášť-kůra
- intruze tavenin vzniklých nízkým F
 - extrémní chemismus (kimberlity, lamproity apod.)

Růst kontinentální kůry

Subdukce

Table 12.8. COMPARISON of CONTINENTAL CRUST WITH ANDESITE

	Continental Crust	Average Andesite
SiO ₂	57.3-63.2	59.7
TiO ₂	0.6-0.9	0.7
Al ₂ O ₃	14.8-16.1	17.1
FeO	5.6-9.1	6.3
MnO	0.08-0.18	0.12
MgO	2.8-5.3	3.2
CaO	4.7-7.4	6.6
Na ₂ O	3.1-3.2	3.3
K ₂ O	1.1-2.4	1.5
P ₂ O ₅	0.14-0.20	0.19

Continental Crust from Table 12.7. Average medium-K orogenic andesite from Gill (1981).

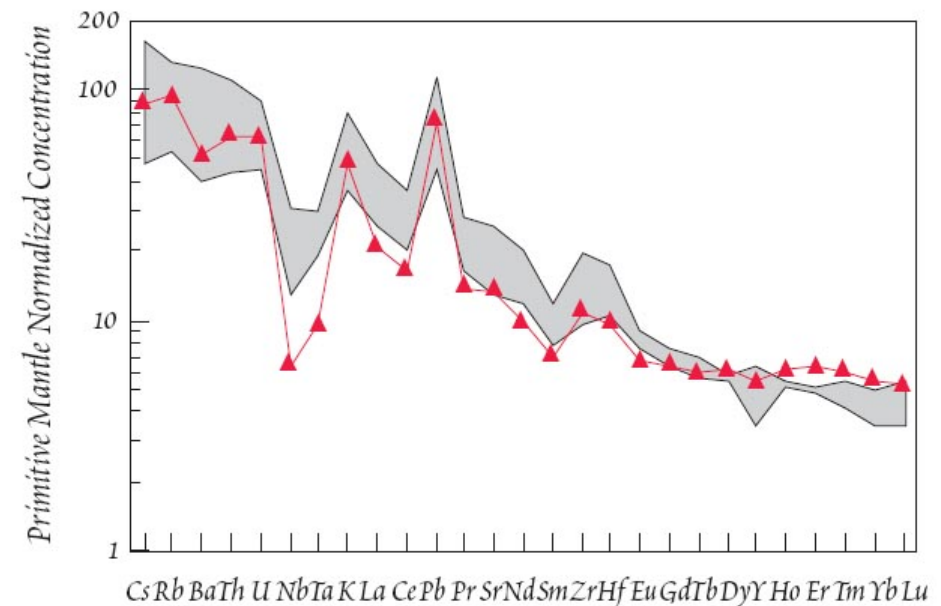


Figure 12.38. Comparison of incompatible element concentrations in a siliceous andesite from the Banda arc (red triangles) with the range of estimated concentrations in the continental crust (gray field). Both share a relative depletion in Nb and Ta and a relative enrichment in Pb.

Subdukce představuje od cca. Proterozoika klíčový proces pro růst kontinentální kůry

Růst kontinentální kůry v Archaiku

Pásky „zelenokamenů“ (Greenstone Belts)

- např. provincie Abitibi (Kanada)
- série vulkanických a sedimentárních hornin metamorfovaných v nízké facii
- tholeitické a komatiické vulkanity, granity (bimodální magmatismus)

Růst kontinentální kůry v Archaiku

HT-HP ruly

- např. západní Grónsko
- série světlých rul a vulkanických/
sedimentárních hornin metamorfovaných ve
vysoké facii
- TTG (tonalit-trondhjemit-granit) plutonity →
vysoké Na/K poměry, primitivní REE
distribuce, + ϵNd

Vznik TTG série

- strmé REE distribuce, absence Eu anomálie → derivace z velkých hloubek (>60 km) kde je stabilní granát
- + ϵNd → přímá derivace z pláště????

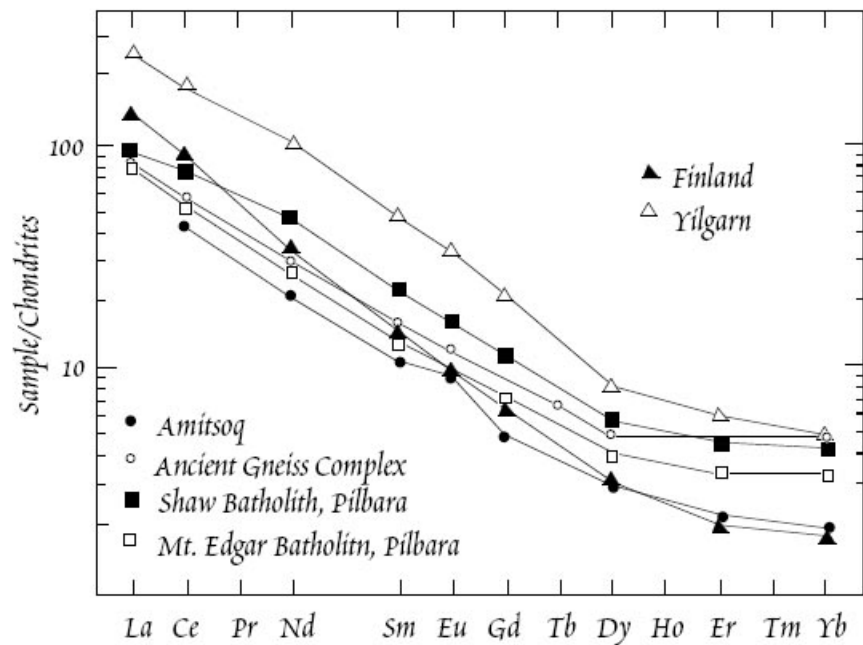
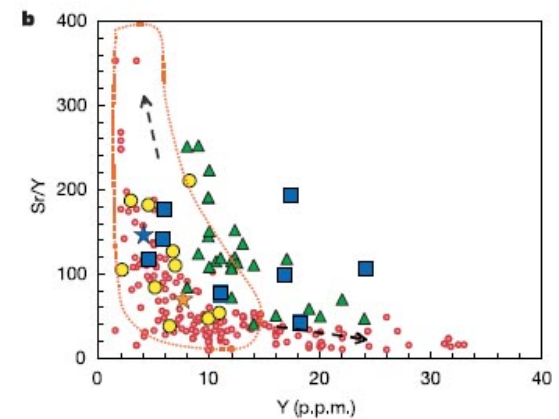
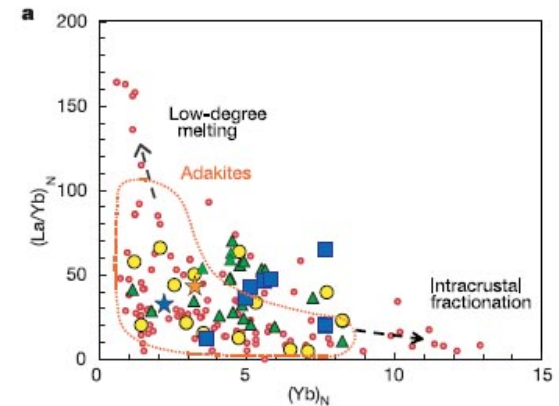


Figure 12.39. REE patterns of typical Archean tonalites and trondhjemites. From Taylor and McLennan (1985).

Vznik TTG série

- experimenty ukazují že TTG vznikly pravděpodobně parciálním tavením eklogitů (subdukce)



- ★ Average early-mid Archaean TTG^{1,2}
- ★ Average Superior Province TTG²
- Early-mid Archaean TTG (3.0–3.8 Gyr ago)^{1-3, 5-7}
- ▲ Late-Archaean sanukitoids (3.0–2.5 Gyr ago)⁴
- Experimental TTG melts (2–4 GPa; this study)
- Mantle-hybridized TTG (3–4 GPa; this study)

Rapp et al. (2003) - Nature

Archaická vs. Fanerozoická kůra

- odlišný chemismus
 - archaická – greenstone belts, komatiity, TTG
 - fanerozoická – andezity
- jiný tepelný tok
- odlišná mocnost
- různá role deskové tektoniky