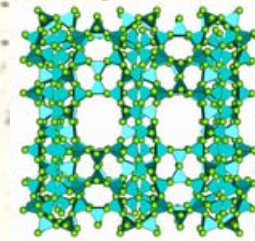


# Geopolymerní materiály



Doc. RNDr. František Škvára DrSc

Ústav skla a keramiky  
Vysoká škola chemicko-technologická  
v Praze

# Počátky geopolymérů



Prof. V.D. Gluchovskij  
1958



Рис. 13. Фрагмент стены жилого дома из gruntosilikatnykh блочков.

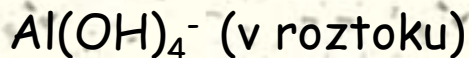
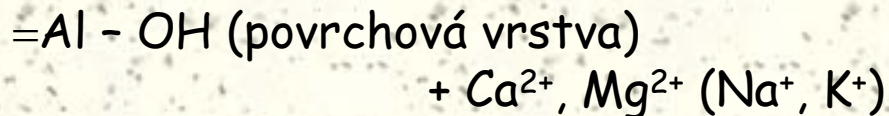
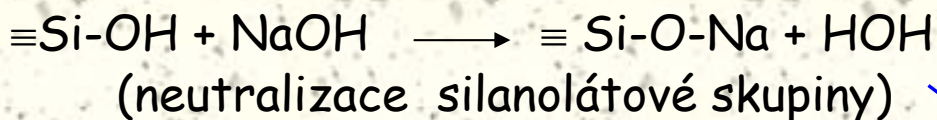
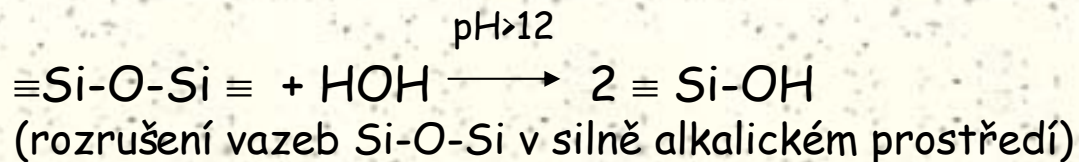
gruntosilikaty...gruntocementy  
...soilcement...geocement

Stavba z „gruntosilikátových“ bloků  
asi 1958

Popsány principy alkalické aktivace  
kaolinitických látek, popílků a strusek

Další výzkum na Ukrajině: prof. Pavel Krivenko, prof. Myroslav Sanycky  
Kongresy od roku 1978

# Mechanismus alkalické aktivace aluminosilikátových látek

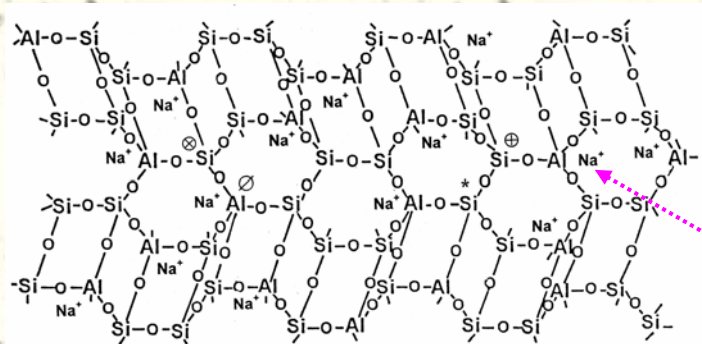


**Fáze typu**  
 $(\text{Na}, \text{K}_n\{-(\text{Si}-\text{O})_z-\text{Al}-\text{O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O})$   
+  
C-S-H, C-A-H  
fáze  
+  
případně vznik další  $\text{H}_2\text{O}$   
v důsledku polykondenzace

**Produkt alkalické aktivace:**  
podle charakteru surovin a podmínek alkalické aktivace  
(amorfni, částečně amorfni nebo krystalické produkty)

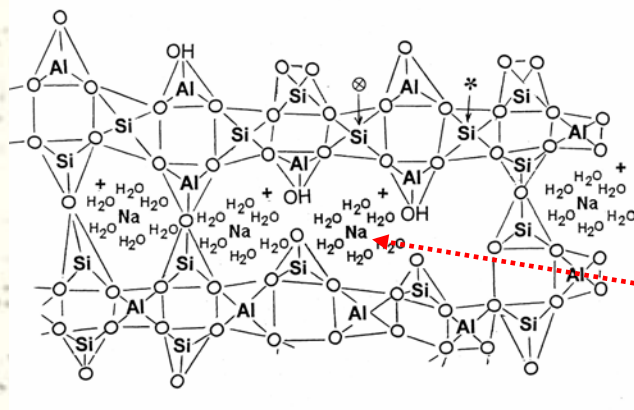
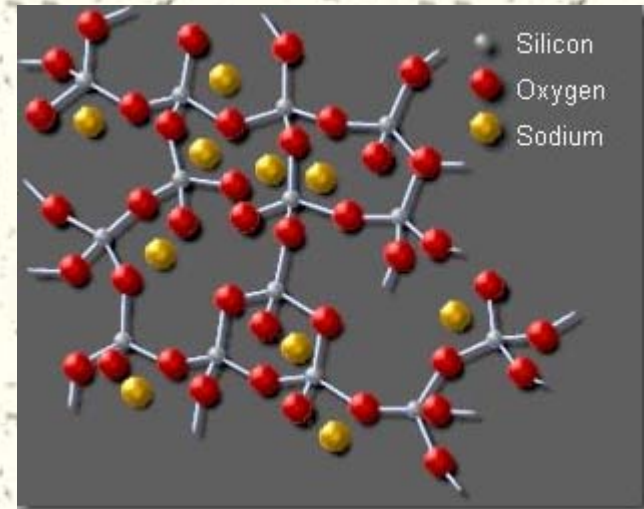
**Převážně mechanismus „přes roztok“**

# Pojetí geopolymérů



Struktura geopolyméru podle Davidovitse (monolitický polymer)

Předpoklad: Na vázán iontovou vazbou



Současný pohled na strukturu geopolyméru, (náhodné uspořádání)

souhlasí s našimi výsledky,

Na v solvované formě slaběji vázán (výkvěty!!)

## Skelná struktura

- Struktury geopolyméru a skla jsou velmi podobné (NMR)
- Si, Al, Fe, P sklotvorné prvky; Na, K, Ca, Mg modifikující prvky, O můstky
- Náhodné uspořádání 3D
- Není přítomna voda
- Není prakticky porézní

## Geopolymer

- Nemá jedolitou strukturu typu polysialato-siloxo,
- Náhodné uspořádání 3D
- Obsahuje vodu v pórech a v gelu
- Porézní struktura
- Voda hraje roli jen jako nosič alkalického aktivátoru a jako „reologická“ voda
- Krystalické a amorfnní hydráty přítomny jen výjimečně jen za přítomnosti strusky či látek obsahujících Ca

## Vztah ke struktuře hydratovaného portlandského cementu

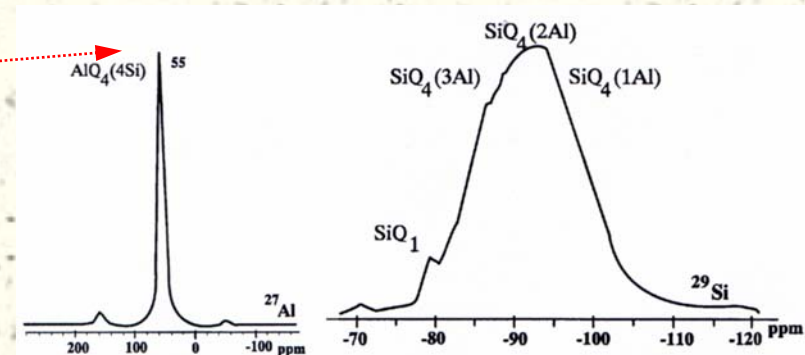
- Krystalické i amorfnní hydráty
- Voda je „konzumována“ v PC na hydráty
- Voda v pórech
- Porézní struktura (póry od nm do mm)

# Co je tedy geopolymery?

(Davidovits 1999, 2005)

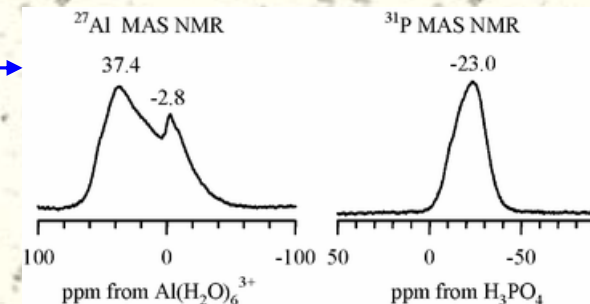
..."  $^{27}\text{Al}$  NMR spektra musí mít pík při 55 ppm  
Al smí být jen a pouze v koordinaci 4 ...  
Jinak to nesmí být nazýváno geopolymery,  
nýbrž jen pouze alkalicky aktivované látky, ...

Tato striktně prosazovaná definice  
vyhovuje jen pro látky vzniklé  
alkalickou aktivací čistého metakaolinu



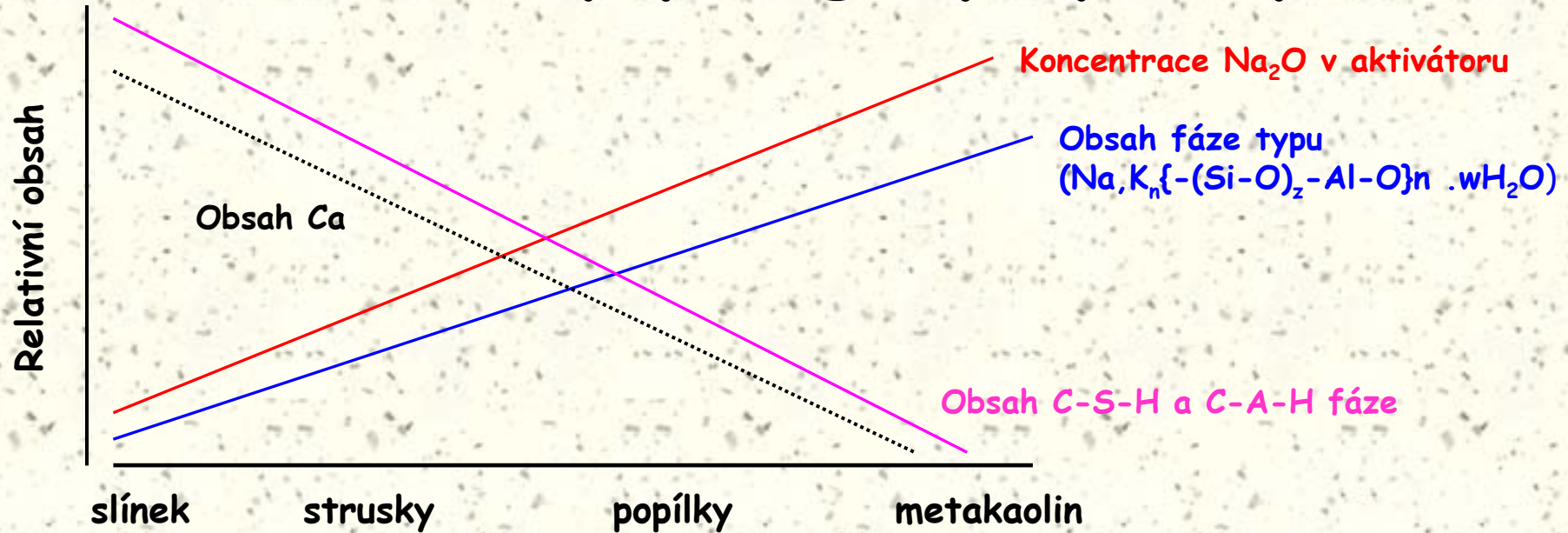
Při analýze a klasifikaci látek vzniklých alkalickou aktivací – geopolymery  
vzniká řada otázek :

- Jsou geopolymery látky vzniklé i z jiných surovin než je čistý metakaolin?
- Jsou látky obsahující Al v koordinaci 6 např. ze zbytků mullitu také geopolymery?
- Jsou látky obsahující i fázi C-S-H také označitelné jako geopolymery ?
- Jsou geopolymery látky vznikající jen při 20°C nebo i při hydrotermální syntéze či při vyšší teplotě?
- Jsou látky obsahující vedle atomů Al také atomy B a P rovněž geopolymery?



Je nutná vědecká diskuze.

# Suroviny pro geopolymery



## Suroviny - obecně aluminosilikátové látky

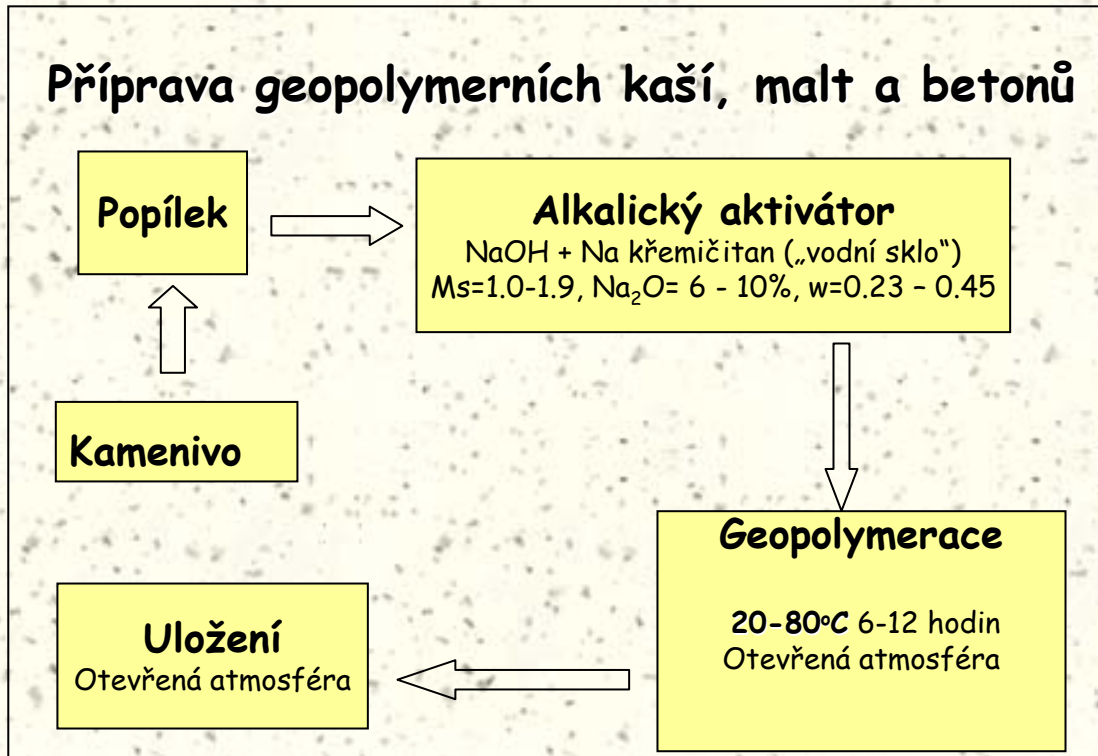
Od slínku k metakaolinu nutný vyšší obsah Na<sub>2</sub>O v alkalickém aktivátoru  
Nutnost silnější aktivace (od uhličitanu ke směsím hydroxidu a křemičitanu)

Koexistence CSH fáze a fází typu (Na,K)<sub>n</sub>{-(Si-O)<sub>z</sub>-Al-O}<sub>n</sub> · wH<sub>2</sub>O

# Typy geopolymerních materiálů

- ▶ Alkalicky aktivovaný portlandský cement (Pyrament)
- ▶ Alkalicky aktivovaný portlandský slínek  
(bezšádrovcový portlandský cement)
- ▶ Geopolymer jako produkt alkalické aktivace strusek  
(struskoalkalické cementy)
- ▶ Geopolymer jako produkt alkalické aktivace popílků
- ▶ Geopolymer jako produkt alkalické aktivace metakaolinu
- ▶ Geopolymer na bázi kapalného prekurzoru

# Příprava betonu



- Charakter výchozí suroviny
- Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> a  $\Sigma$  Na<sub>2</sub>O v aktivátoru
- Poměr SiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: CaO (MgO) v surovině
- Složení kameniva
- Způsob přípravy (teplota, hydrotermální podmínky)
- Nutná experimentální optimalizace podmínek přípravy

Je možné užít i alkalický aktivátor obsahující K, vyšší cena, nižší pevnosti

„Geopolymerní beton na bázi popílku“  
Společný projekt Fakulty stavební ČVUT  
A VŠCHT v Praze

# Geopolymerní beton



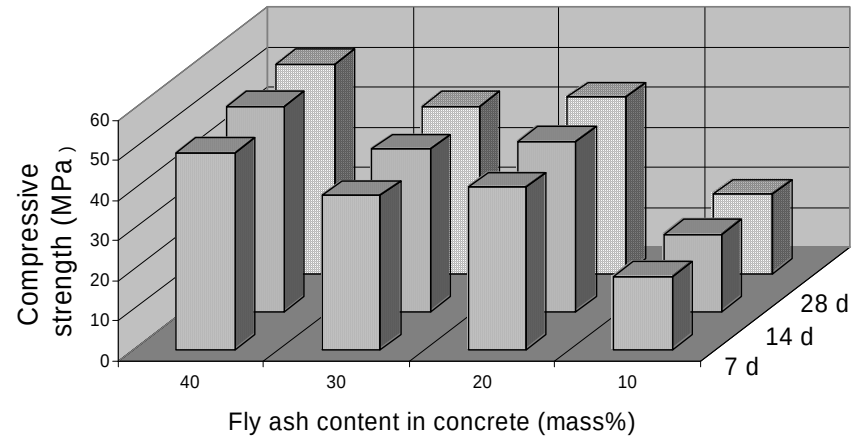
**Špatně složený geopolymerní beton**



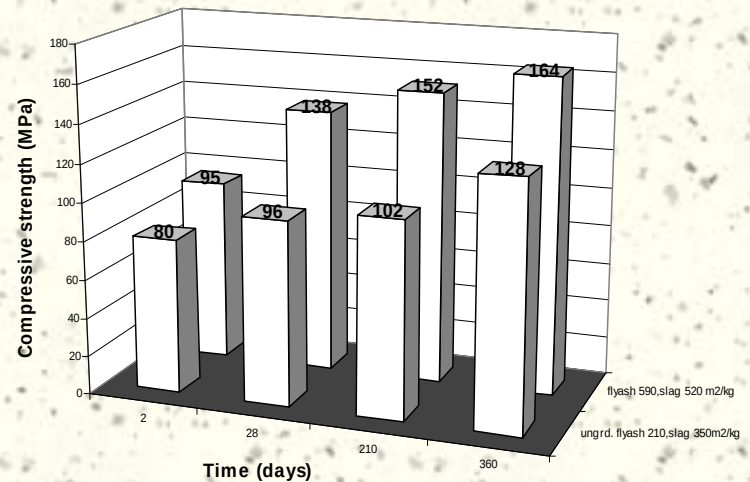
**Správně složený a zhutněný geopolymerní beton**

# Mechanické vlastnosti

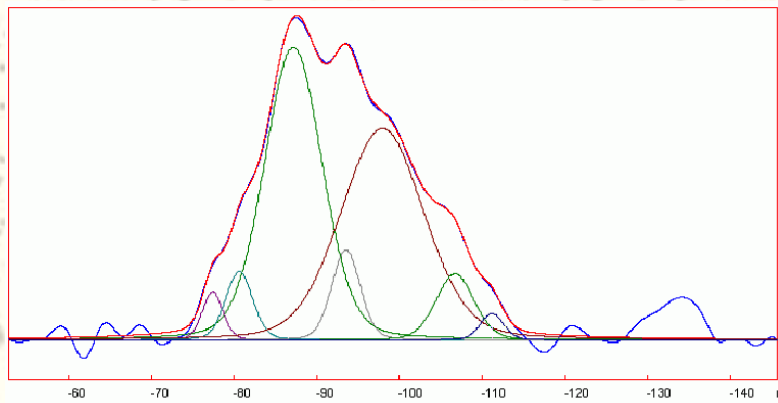
- # Pevnosti v tlaku rostou i v časovém období 360 – 520 dnů (vývoj pevností sledován již 9 let)
- # Jiný poměr pevnosti v tlaku a v prostém tahu
- # Smrštění (po termální přípravě minimální, při volném tuhnutí měřitelné)



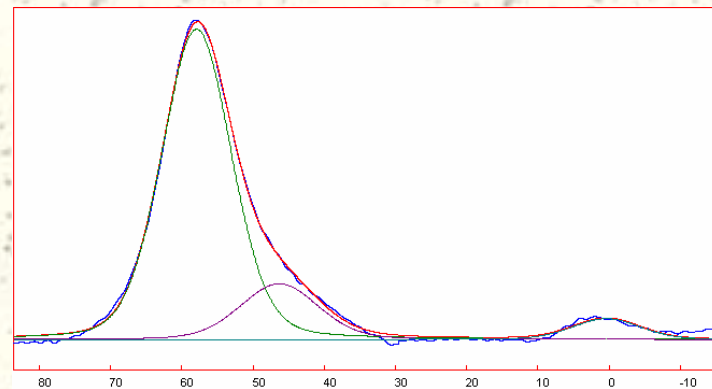
**Maximální dosažená  
pevnost  
geopolymeru  
163 MPa**



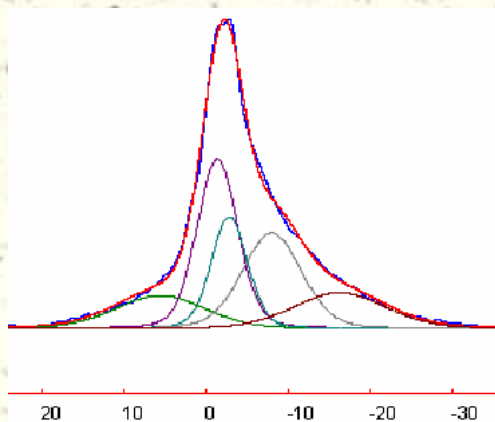
# Mikrostruktura geopolymeru



NMR MAS Si

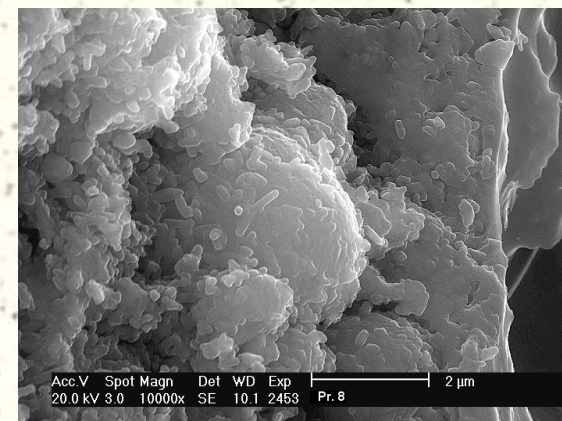


Al

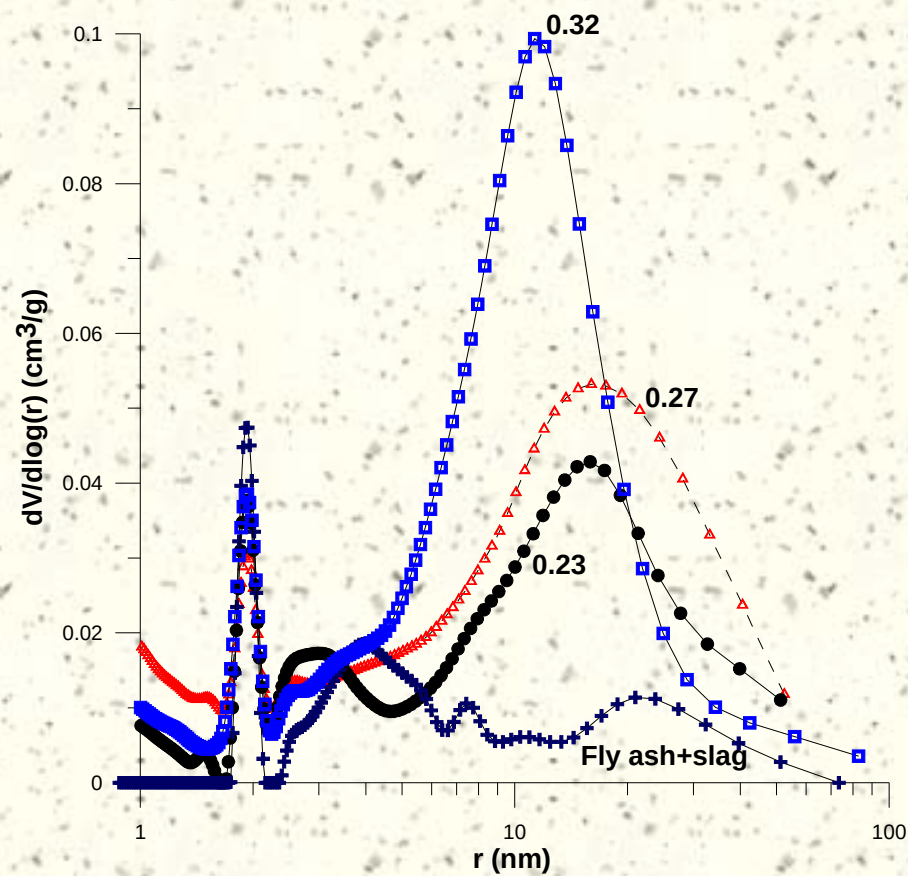
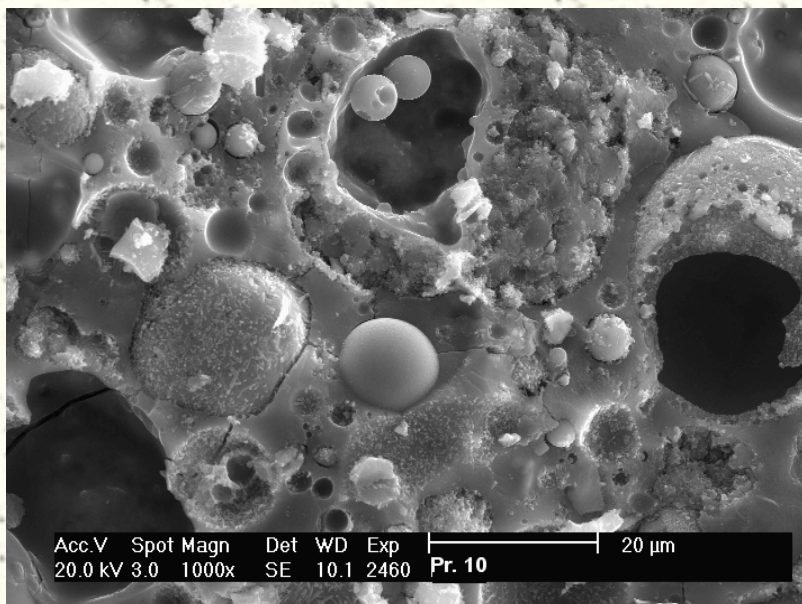


Na

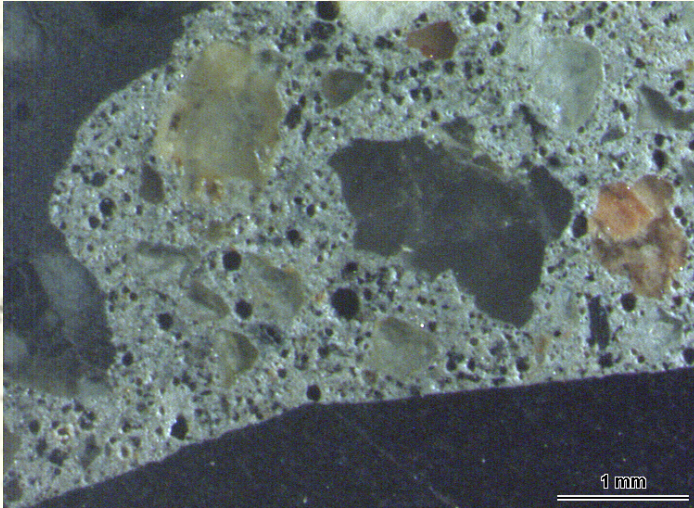
SEM



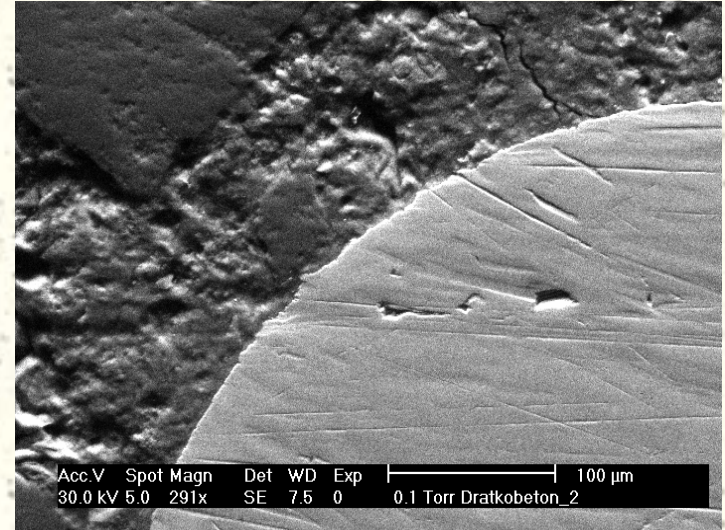
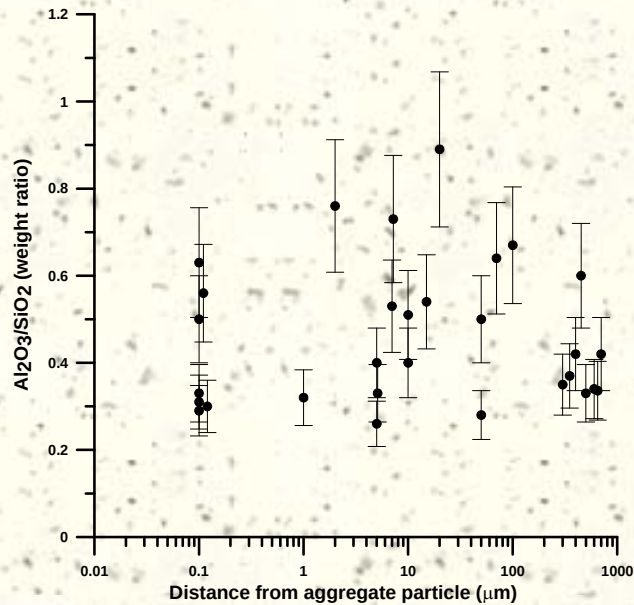
# Porozita geopolymeru



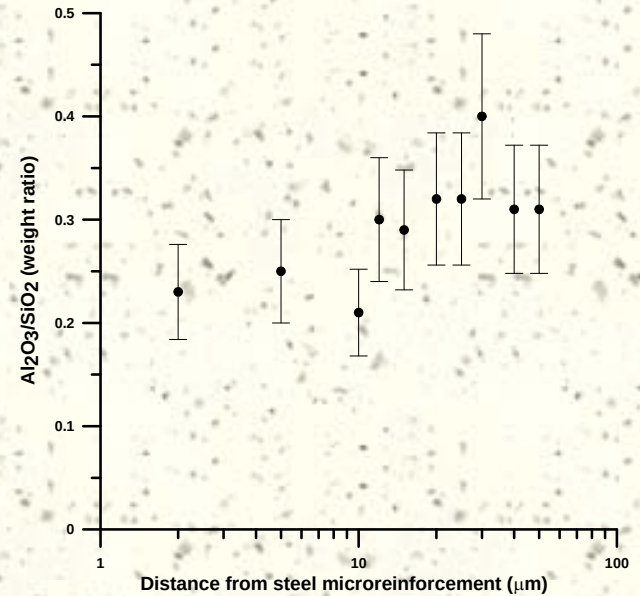
# Rozhraní v geopolymerním betonu



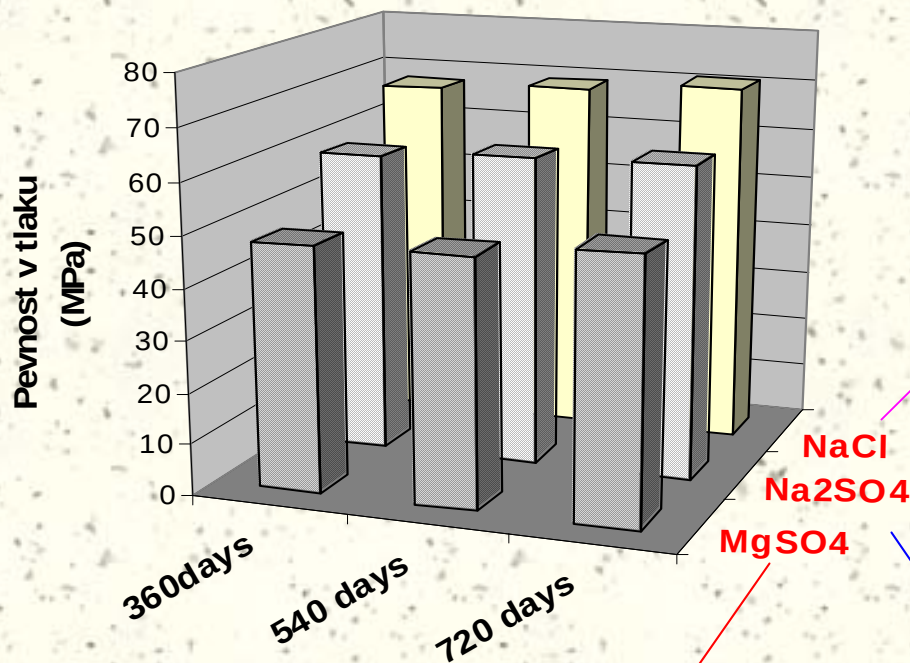
Geopolymer concrete



Geopolymer reinforced concrete



# Koroze geopolymery na bázi popílku



Roztok NaCl (164g/dm<sup>3</sup>)



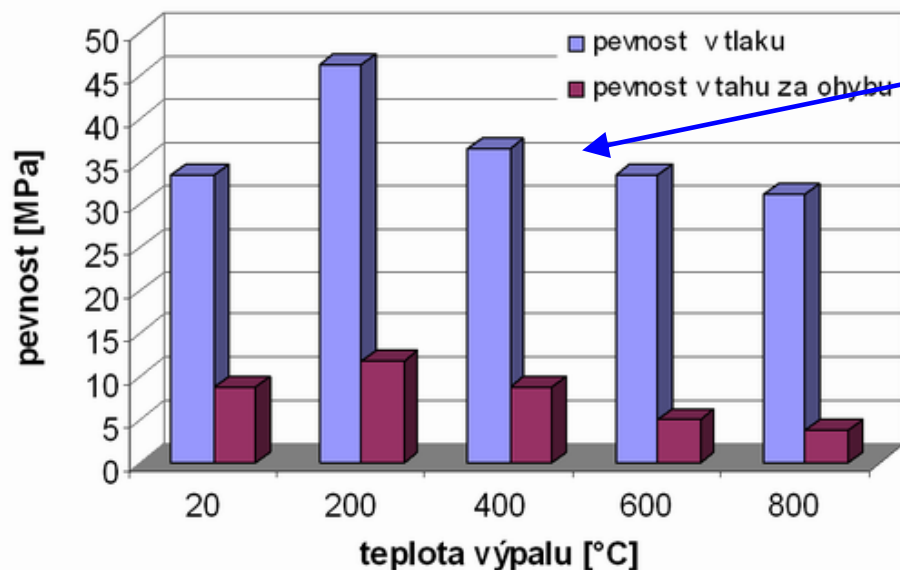
Roztok Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (44g/dm<sup>3</sup>)

**600 dnů expozice**  
žádné sekundární  
produkty



Roztok MgSO<sub>4</sub> (5g/dm<sup>3</sup>)

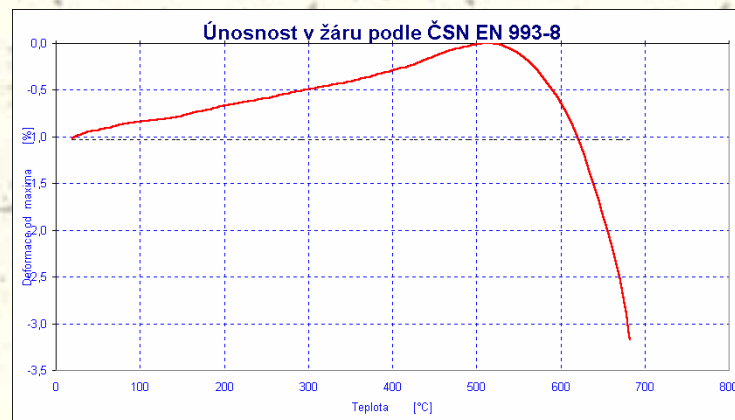
# Vysokoteplotní vlastnosti geopolymery na bázi popílku



Vysoké zbytkové pevnosti geopolymery po výpalu

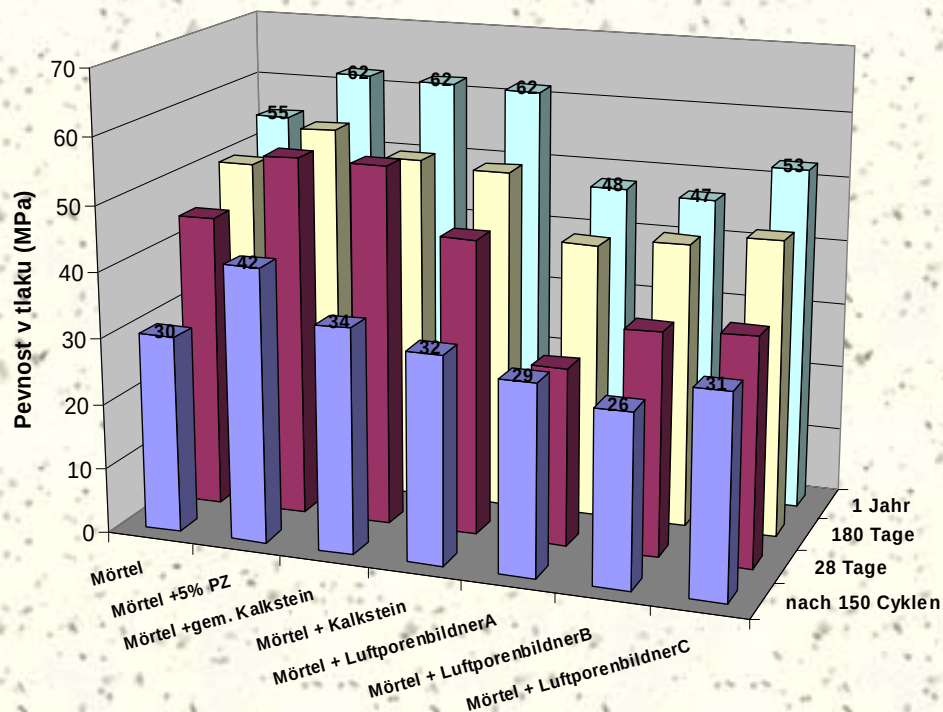
U PC dehydratace C-S-H fáze,  $\text{Ca(OH)}_2$ , rozpad

$$T_{0.5} = 630^\circ\text{C}$$

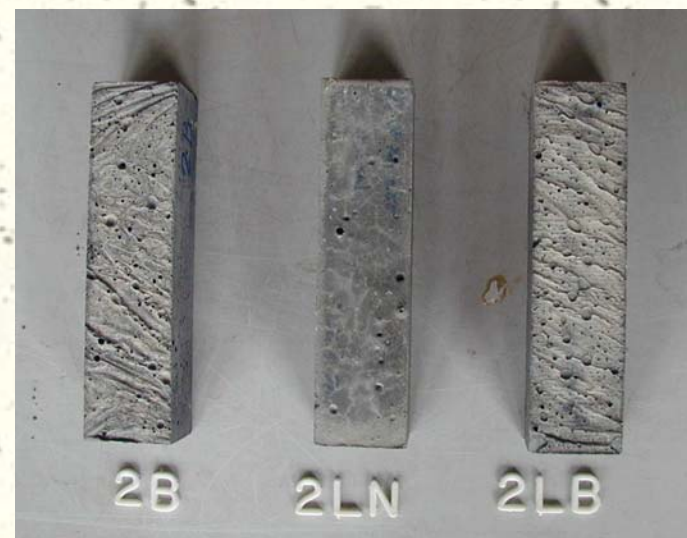


T.Jílek : Diplomová práce 2004, VŠCHT v Praze  
R.Žyla: Diplomová práce 2006, VŠB, VŠCHT

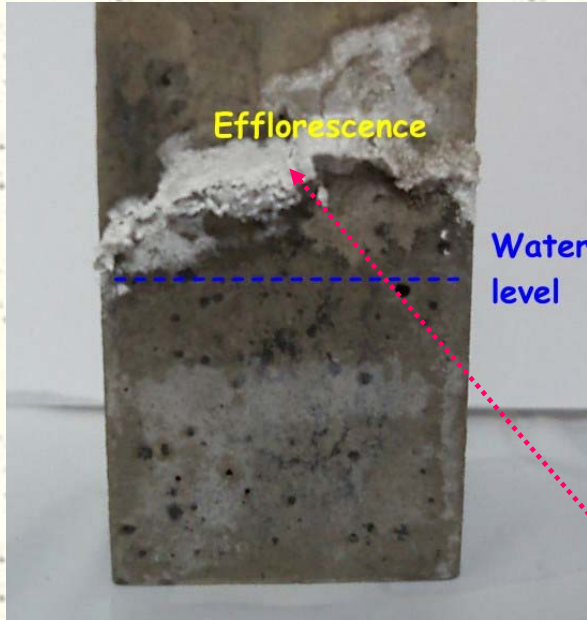
# Mrazuvzdornost geopolymery na bázi popílku



Po 150 cyklech (malta)



# Výkvěty na povrchu geopolymerů (popílek, metakaolin)



Existuje tendence k tvorbě výkvětů u geopolymerů bez ohledu na suroviny, nejsou známy detailně podmínky pro jejich tvorbu.



V rámci intenzivního výzkumu jsou hledány způsoby pro zabránění výkvětů.

Použití K aktivátoru ( $\text{K}_2\text{CO}_3$  netvoří hydráty) není optimální, vysoká cena, nízké pevnosti geopolymerů na bázi popílků i metakaolinu

T.Vojta : Diplomová práce 2006, VŠCHT v Praze  
L.Alberovská: Bakalářská práce 2007, VŠCHT v Praze

# Perspektivy alkalicky aktivovaných pojiv - geopolymerů

- # Nové materiály ( „Chemically bonded ceramics“, „Cold ceramics“)
- # Recyklace anorganických odpadů (silný ekologický podtext)
- # Potenciální možnost snížení emisí  $\text{CO}_2$  při výrobě anorganických pojiv a stavebních hmot
- # Fixace toxických a radioaktivních odpadů
- # Využití surovin obsahující Al, Si (velmi široký sortiment)
- # Kompozitní materiály



Děkuji Vám za pozornost