

# Kamenivo, ASR.


doc. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D.

K123, D1045

224 354 688, milena.pavlikova@fsv.cvut.cz

[www.tpm.fsv.cvut.cz](http://www.tpm.fsv.cvut.cz)

# Kamenivo

- *Zaujímá 70 – 80 % objemu betonu (nosná kostra)  velký vliv na vlastnosti a chování.*
- Původ:
  - Přírodní horniny (drcené, či valouny)
  - Písky
  - Syntetické materiály (expandované jíly)
  - Druhotné suroviny (odpadní materiály) (strusky, popílký, cihelné střepy, drcený beton)
- Důvody používání kameniva:
  - Ekonomické – výplň (nejekonomičtější betony s obsahem blízko 40% drobného kameniva)
  - Fyzikální – zlepšení stability a zvýšení odolnosti proti abrazi
- Klasifikace dle hmotnosti:
  - Těžké
  - Normální
  - Lehké
- Požadavky na kamenivo:
  - Kompaktní a pevné (měkké porézní kamenivo limituje pevnost a abrazivzdornost)
  - Bez nečistot (bahno, jíl, prach, organika)
  - Chemicky stálé

# Kamenivo

## ◎ Dělení:

- Hutné (křemen, křemičitany, živce, vápence)
- Pórovité (pískovec, čedič, křemelina)

## ◎ Kamenivo se skládá alespoň ze dvou frakcí:

- Drobné kamenivo (písek)
- Hrubé kamenivo (štěrk, drtě, štěrpísek).

Při výrobě jakostních betonů je lepší skládat kamenivo z více frakcí.

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí

- Znát:
  - Tvar a strukturu kameniva
  - Granulometrii
  - Obsah vlhkosti
  - Objemovou hmotnost kameniva
  - Sypnou hmotnost kameniva



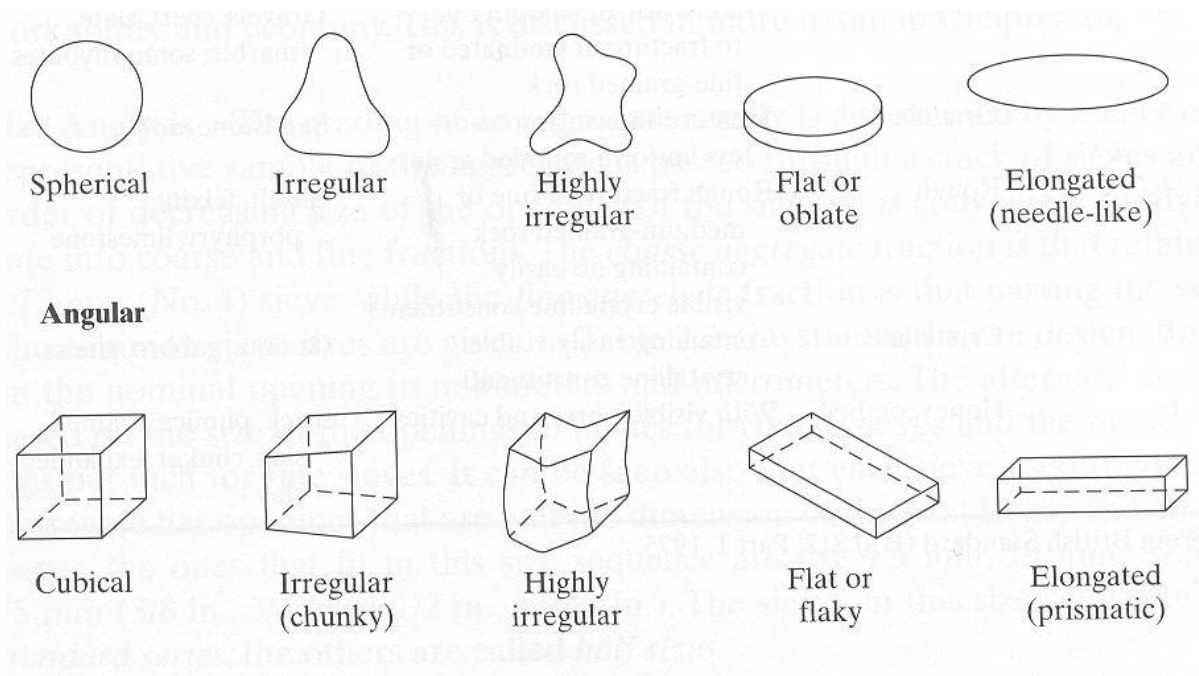
požadavky na cementovou pastu určenou pro dobře zpracovatelný beton.

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *tvar a struktura*

- Vliv na zpracovatelnost čerstvé záměsi betonu – dobře navržená pasta obaluje kamenivo a snižuje interakci mezi jednotlivými zrny během míchání.
- Ideální tvar kameniva – co nejvíce kulatozrné s relativně hladkým povrchem (přírodní písky a štěrkopísky).
- Drcené kamenivo – spíše hranaté s hrubým povrchem → větší spotřeba cementové pasty
- Velice nepravidelné kamenivo s vystupujícími hranami → velké interakce během míchání a zpracování
- Zploštělé kamenivo – zvyšuje interakce mezi zrny, sklony k segregaci a usazování → nedoporučuje se
- Vliv na mechanické vlastnosti – vliv zejména na pevnost v tahu – s rostoucím povrchem zrn stoupá plocha reakce s pastou
- Extrémně velké kamenivo – může způsobit velké vnitřní napětí a pevnost snižovat

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *tvar a struktura*

- Klasifikace tvarů zrn kameniva



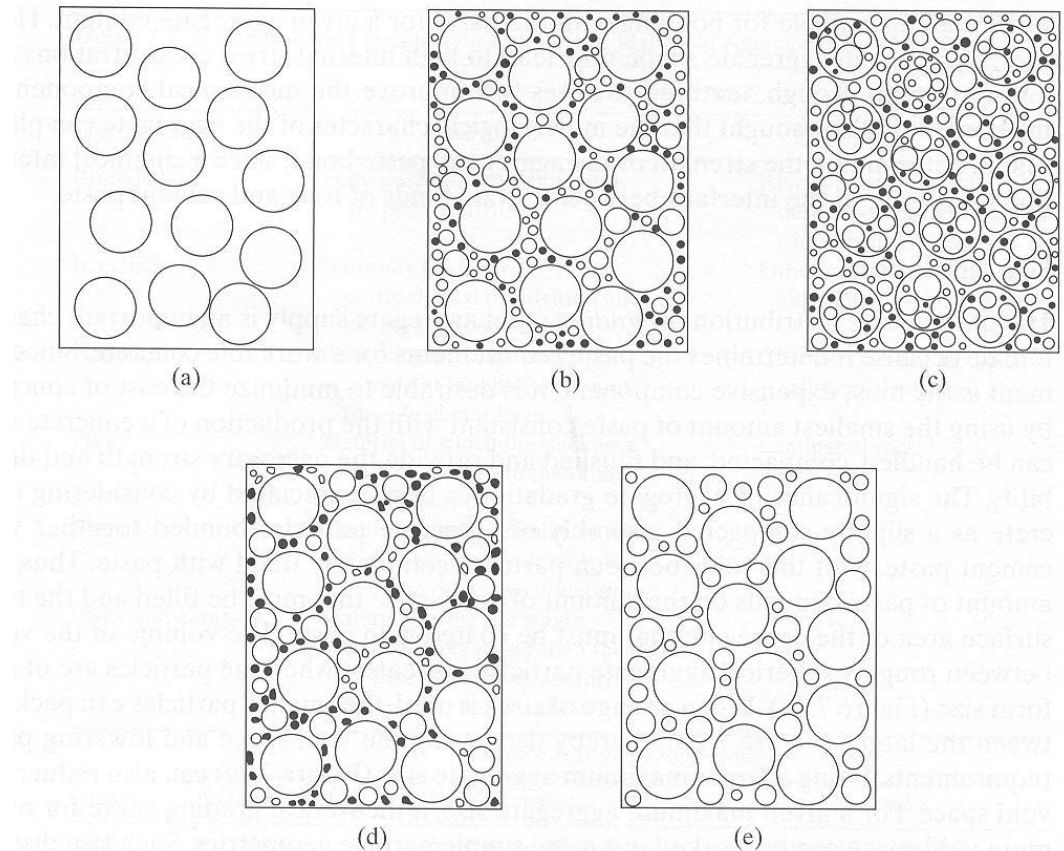
# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *granulometrie*

- Schematické znázornění uspořádání systémů s různou velikostí zrn

kameniva:

Schématické znázornění uspořádání různě velkých zrn kameniva a jeho skládání:

- a) jednotná velikost
- b) rostoucí granulometrie
- c) nahrazení velký částic za malé
- d) vynechání frakcí
- e) bez jemného kameniva.



# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *granulometrie*

- Analýza velikosti zrn:
  - Prosévací metoda
    - Hrubé kamenivo – 9,5 – 75 mm
    - Drobné kamenivo – 0,15 – 4,75 mm
- Maximální velikost zrn kameniva:
  - Velikost 1/5 nejmenšího rozměru formy
  - Největší zrna -  $\frac{3}{4}$  velikosti vzdálenosti výztuže
  - Většinou do 40 mm.
  - Ručně do základů – 50 – 150 mm
- *Čím větší kamenivo, tím nižší spotřeba pasty.*
- *Pro danou zpracovatelnost roste pevnost betonu s rostoucí velikostí zrn, protože lze snížit v/c → zvýšení odolnosti betonu.*



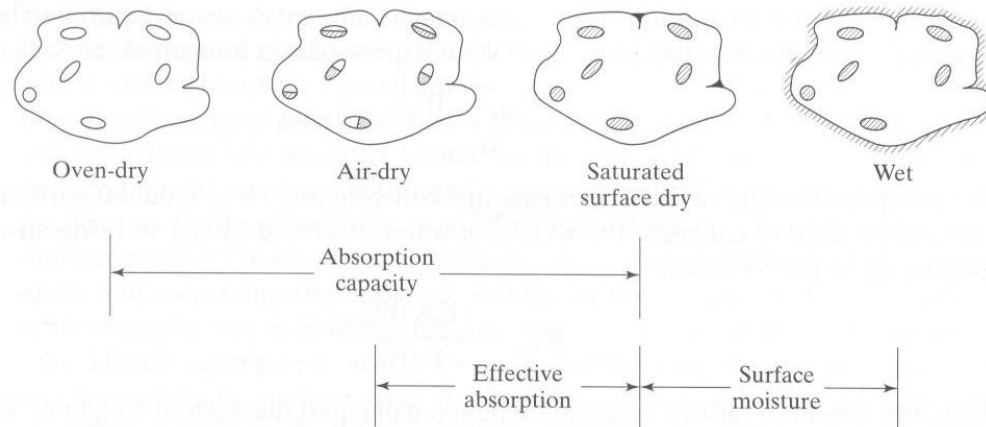
# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *granulometrie*

- ◎ Množství drobného kameniva (0,15 - 0,3 mm) ovlivňuje -  
*zpracovatelnost, odměšování*
- ◎ Drobné kamenivo – důležité pro přílnavost a plasticitu záměsí
- ◎ *Kombinovaná granulometrie kameniva – optimalizace zpracovatelnosti, pevnosti a ekonomických nároků*
  
- ◎ Někdy výhodné vynechat frakci kameniva – pro tuhé záměsí s velice nízkou zpracovatelností, které nejsou hutněny vibračně.
- ◎ Betony bez drobného kameniva – nízká pevnost, vysoká propustnost, nehutněné, pouze sednuté, zpevněné pastou → *nízká hustota, malé smrštění vysycháním, tepelný izolant*

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *obsah vlhkosti*

- ⊙ Absorpce póry či film vlhkosti na povrchu kameniva
  - ⊙ Nutná znalost – úprava  $v/c$
- ⊙ Stavy vlhkosti:
  - Sušení v sušárně (OD) – odstranění veškeré vlhkosti při 105°C do ustálené hmotnosti, všechny otevřené póry jsou prázdné
  - Sušení na vzduchu (AD) – vlhkost odstraněna z povrchu, póry částečně zaplněné
  - Sušení saturovanou vlhkostí (SSD) – póry zcela zaplněné
  - Smáčení (WD) – póry zcela zaplněné a povrch pokryt vodím filmem
- ⊙ Pouze sušení v sušárně a saturovanou vlhkostí slouží jako referenční stavy pro výpočet obsahu vlhkosti.
- ⊙ Sušení saturovanou vlhkostí nejvýhodnější – rovnovážný obsah vlhkosti po zamíchání s cementovou pastou, vyjadřuje přirozený stav kameniva, lze dobře určit objemovou hmotnost kameniva

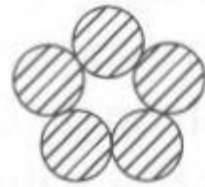
# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *obsah vlhkosti*



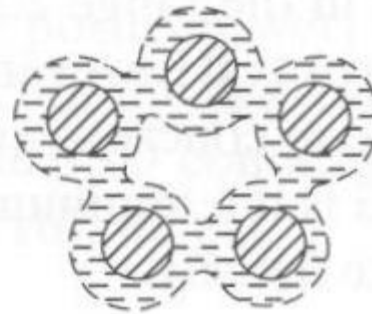
- Stavy vlhkosti kameniva
- Výpočet množství vody absorbované kamenivem po zamíchání s pastou:
- Absorpční kapacita  $A = \frac{w_{SSD} - w_{OD}}{w_{OD}} \times 100\%$  (obvykle 1 – 2 % X porézní)
- Efektivní absorpce  $EA = \frac{w_{SSD} - w_{AD}}{w_{SSD}} \times 100\%$
- Povrchová vlhkost  $PV = \frac{w_{WD} - w_{SSD}}{w_{SSD}} \times 100\%$  (obvykle 2 – 6 % pro drobné kamenivo)

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *obsah vlhkosti*

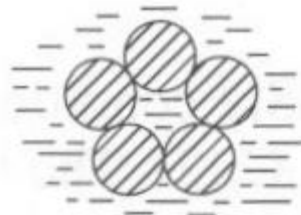
- Fenomén růstu objemu drobného kameniva



(a)



(b)



(c)

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *objemová hmotnost kameniva*

- Specifická hmotnost  $SH = \frac{\text{hustota pevné fáze}}{\text{hustota vody}}$
- Zdánlivá specifická hmotnost  $SH = \frac{\text{hmotnost pevné fáze}}{\text{objem pevné fáze}}$
- Objemová specifická hmotnost  $OSH = \frac{\text{hmotnost pevné fáze} + \text{pórů}}{\text{objem pevné fáze} + \text{pórů}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{vody}}}$
- Objemová hmotnost (unit weight, bulk density) (pro drobné a hrubé normální kamenivo 1 450 – 1 750 kg/m<sup>3</sup>)
- Metody měření:
- OSH – pomocí Archimedovy metody (vakuová nasákavost)

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – fyzikální*

- Zmrazovací cykly:

- Vývoj vnitřního napětí v kamenivu – funkcí porózy, jeho propustnosti, stupně nasycení a velikosti.
- Testování pomocí simulace krystalizace ledu v pórech:
  - ponoření kameniva do nasyceného roztoku síranu sodného či hořečnatého a následní vysušení v sušárně
  - Určuje se hmotnostní úbytek po daném počtu cyklů
  - Není zcela přesné, velké nesrovnalosti měření při srovnávacích testech

- Abrazivzdornost:

- Los Angeles test:
  - Mletí kameniva s ocelovými koulemi po danou dobu, následné prosetí přes 1,7 mm síto a určení hmotnostní ztráty

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – chemická*

- Alkalicko – křemičitá reakce (ASR):
  - Komplex složitých fyzikálně chemických reakcí mezi částicemi reaktivního  $\text{SiO}_2$  v kamenivu a alkalickými roztoky v betonu
  - Velmi problematické – vysokoalkalické cementy ( $> 0,9\% \text{Na}_2\text{Oekv.}$ )X nízkoalkalické ( $< 0,6\% \text{Na}_2\text{Oekv.}$ )
  - + přenos alkálií z vnějšího prostředí (horniny)
  - Podmínky pro vznik ASR:
    - Přítomnost reaktivní formy  $\text{SiO}_2$  v kamenivu (cristobalit, opál, chalcedon, tridymit, křemence, bulžníky, rohovce)
    - Vyšší obsah alkálií v betonu ( $> 0,6\% \text{Na}_2\text{Oekv.}$ )
    - Vysoká vlhkost betonu

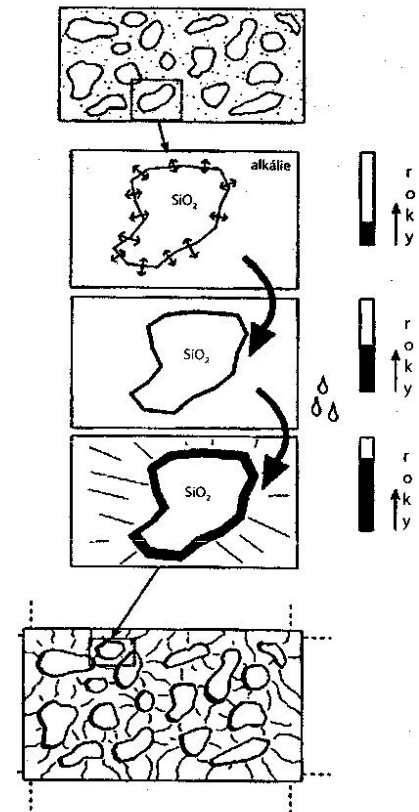
# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – chemická*

## • Alkalicko – křemičitá reakce (ASR):

- Výsledkem tvorba alkalicko – křemičitého gelu ( C-N(K)-S-H a bobtnající N(K)-S-H) a osmotického tlaku

### – Reakční kroky:

1. Křemičitany depolymerizují, rozpouští se a bobtnají → poškození betonu díky objemovým změnám
2. Alkalické a vápenaté ionty difundují do nabobtnaného kameniva a tvoří se C-N(K)-S-H gel (obdobný CSH gelu s určitým obsahem alkálií)
3. Pórový roztok difunduje dosti porézní vrstvou C-N(K)-S-H gelu do křemičitanu, pokud CaO tvoří 53% a více C-N(K)-S-H hmotnosti bezvodého gelu → nebobtnající forma X pro vysoké koncentrace alkálií (potlačena rozpustnost CH) → bobtnající gel s malým obsahem Ca, C-N(K)-S-H gel má nízkou viskozitu a snadno difunduje z kameniva, výsledkem – vzrůst viskozity a pokles porózy
4. C-N(K)-S-H gel poutá osmózou vodu → vzrůst objemu, vývoj lokálního napětí a tvorba trhlin, které jsou postupem času zaplněny reakčními produkty





# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – chemická*

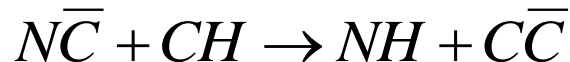
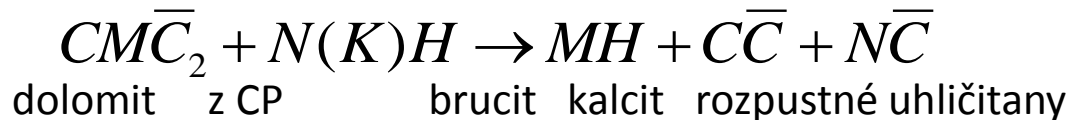
- Alkalicko – křemičitá reakce (ASR):
  - Jak kontrolovat?
    1. Kontrola pH pórového roztoku
    2. Kontrola koncentrace alkálií
    3. Kontrola obsahu reaktivního křemíku
    4. Kontrola vlhkosti
    5. Změna ASR
  - Minerální příměsi – redukují efekty ASR:
  - Snižují pH, zvyšují rozpustnost Ca → tvorba neobtahnající formy gelu
    - Např. 15-20% náhrada cementu popílkem F, 10-15% mikrosilikou, více než 50% struskou

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – chemická*

## ⊙ Alkalicko – uhličitá reakce (ACR):

- dochází k tzv. dedolomitizaci kameniva a destrukci materiálu
- Zejména u dolomitických vápenců obsahujících jíly
- Podmínky vzniku reakce:

1. Velmi drobné kamenivo (malé krystaly dolomitu)
2. Srovnatelné množství jemného vápence
3. Intersticiální jíly
4. Krystaly rovnoměrně rozptýlené v jílové matrici



- ⊙ dedolomitizace rychlá – pokud poměr kalcit/dolomit cca 1, krystaly menší než 40μm a obsah jílu 5-25% (nejasná role jílu)

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – chemická*

- Škodlivé sloučeniny:

- Nečistoty:

- Pevné materiály (velmi jemné částice, pod  $75\mu\text{m}$ ) či rozpustné sloučeniny.
- Přináší vyšší spotřebu záměsové vody
- Jemné frakce přilnou ke kamenivu a zamezí jeho kontaktu s pastou → snížení pevnosti betonu
- Př. Prach, bahno, organické materiály

- Vadné částice:

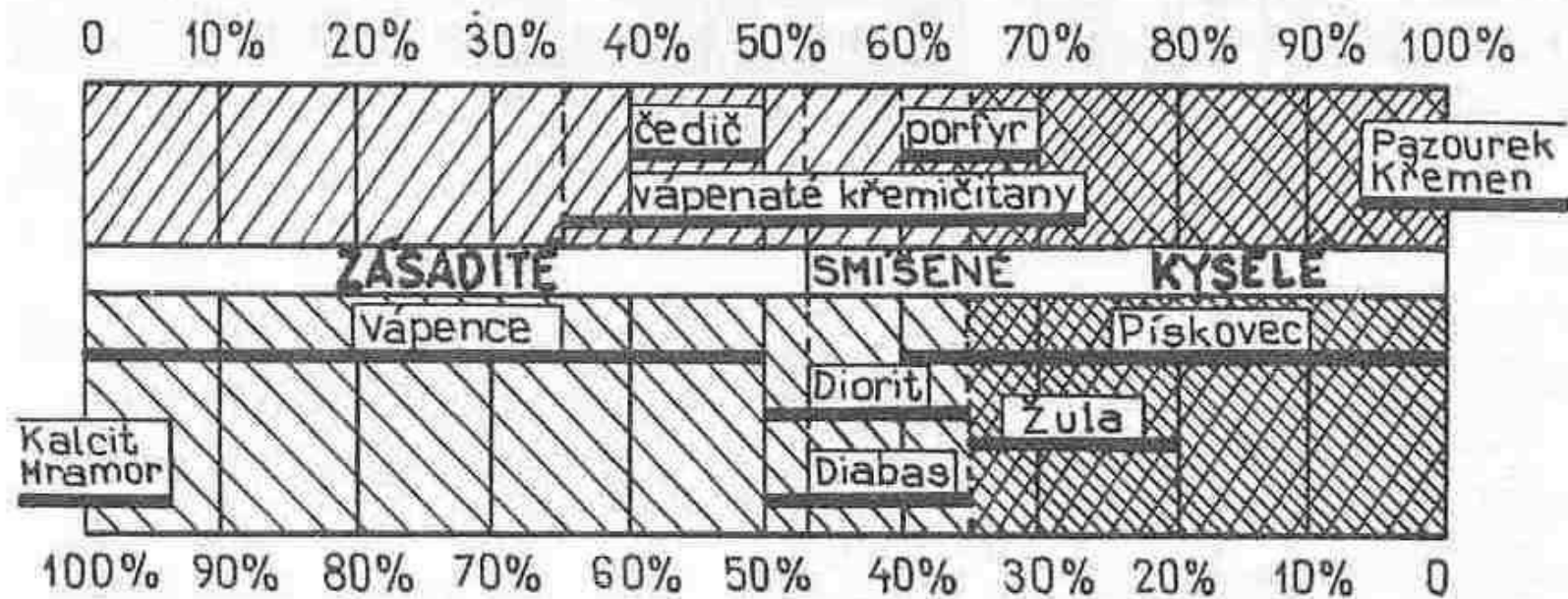
- Měkké částice (dřevo, uhlí, jílové částice), lupky, reaktivní materiály (sírany) atd.

# Kamenivo – vlastnosti doporučené pro návrh záměsí – *odolnost kameniva – chemická*

- Pyrit:  $FeS_2 + H_2O + 3,5O_2 \rightarrow FeSO_4 + H_2SO_4$   
 $FeSO_4 + H_2O + O_2 \rightarrow \underline{Fe(OH)_3} + H_2SO_4 \Rightarrow Ca^{2+} \rightarrow CaSO_4$

rezavá barva+rozpad

- Strusky ocelářenské, z výroby ferrosilitin a barevných kovů:
  - vyšší obsah oxidů železa



Rozdělení kameniva podle reaktivnosti

# Nestandardní kamenivo - zušlechťení

- Měkké, křehké kamenivo – odstranit rozmělněním a doplavením
- Přítomné dřevo – odstranit průtokem vody
- Dřevo, uhlí, jílové vměstky, pískovce, křída atd. – odstředěním
- Drcení a mísení – požadovaná granulometrie kameniva

# Nestandardní kamenivo – odpadní materiály

- Důležité:
  - Ekonomické důvody – zvážit dostupnost a náročnost transportu
  - Kompatibilita s dalšími materiály – zbytky skla, reaktivita (ASR)
  - Vlastnosti betonu – pevnost částic (drcený beton 2/3 oproti přírodnímu kamenivu)
  - Pucolánové vlastnosti

# Nestandardní kamenivo – lehké kamenivo

- Přírodní či syntetické materiály s vyloučením dřeva, pilin, korku atd.
- Vysoká vnitřní poróznost – nízká specifická objemová hmotnost
- Expandované jíly – surovina je drcena a peletizována, pak zahřívána na 1 000 – 1200 °C – rychlý vývoj plynu – expanze
- Perlit (vulkanické sklo), strusky (křemičitovápenatá skla), odpadní sklo
- Přírodní – pemza, škvára, tufy
- Expandovaný vermikulit
- Rozličná struktura a tvary



# Nestandardní kamenivo – těžké kamenivo

- Betony pro ochranu před radiací, vyvažovací betony
- Goethit, limonit, barit, ilmenit, magnetit, hematit, ocel

# Degradace kameniva

- Vyvřelé
  - křehké, praská
  - chemicky velmi odolné
- Usazené
  - snadno hydratuje
  - méně odolné zvětrávání
    - Opuka – nadměrné sušení způsobuje mechanické poškození
    - Pískovec – odolnější proti působení vody a kyselých axhalátů
    - Vápenec – koroduje kyselými látkami, málo mechanicky odolné
- Přeměněné (matamorfované)
  - mramor

# Mezifázová přechodová zóna

- Mikrostruktura CSH ovlivněna sousedními doprovodnými materiály:
  - Kamenivem
  - Vlákny
  - Výztuhovou ocelí atd.
- MPZ (interfacial transition zone ITZ):
  - Změna ve formování krystalů
  - Vyšší poróznost
  - „wall effect“
  - Šířka 20 – 40  $\mu\text{m}$  – proměnlivá
  - Stejně jako v povrchové zóně se nejprve tvoří CH a ettringit
- Důležitá pro modifikaci vlastností betonu
- V mnohých případech dominantní faktor – např. mezifázová poróznost je spojena s makropóry → silně ovlivněna permeabilita