

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Diplomová práce

Analýza vlivu velikosti kameniva na tlakovou pevnost HPC

Analysis of the influence of aggregate size
on the compressive strength of HPC

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

2017

Bc. Jiří Ort



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Ort</u>	Jméno: <u>Jiří</u>	Osobní číslo: <u>396416</u>
Zadávající katedra: <u>K133</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Analýza vlivu velikosti kameniva na tlakovou pevnost HPC</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Analysis of the influence of aggregate size on the compressive strength of HPC</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši k tématu maximální velikosti zrna kameniva použitého pro výrobu HPC, která bude obsahovat: - Způsob stanovení ideální křivky zrnitosti kameniva pro běžné betony a HPC - Vliv změny velikosti maximálního zrna kameniva k dávce cementu - Vliv změny zpracovatelnosti HPC v závislosti na změnu velikosti maximálního zrna kameniva - Rozdíl v působení ocelových drátků v cementové matici při změně velikosti maximálního zrna kameniva - Přehled receptur HPC s maximální velikostí zrna kameniva do 4 mm	
Na základě této rešerše se dále pokuste provést: - Sestavit křivku zrnitosti pro HPC s maximální velikostí zrna kameniva do 4 mm - Vyrobt zkušební vzorky s tímto kamenivem a stanovte jeho tlakovou pevnost - Vyrobt zkušební vzorky z HPC s kamenivem o maximální velikosti 16 mm a porovnejte s předchozími výsledky	
Seznam doporučené literatury: Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000 Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005 Colleparđi, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Josef Fládr</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>19.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>16.2.2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Ing. Josefa Fládra, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Jiří Ort

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Josefovi Fládrovi, Ph.D., a jeho kolegům, za cenné rady, odborné vedení a čas strávený při konzultacích a v laboratoři, které mi pomohly tuto práci dokončit.

Anotace:

Cílem diplomové práce je co nejlépe definovat podstatu vysokohodnotného betonu, popsat jednotlivé složky vysokohodnotného betonu a jejich vliv na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. A na základě teoretických znalostí navrhnout recepturu a vyrobit takový vysokohodnotný beton, s velikostí maximálního zrna kameniva do 4 mm, který bude vykazovat co možno nejvyšší tlakové pevnosti.

Klíčová slova:

Vysokohodnotný beton, HPC, tlaková pevnost, kamenivo, zrnitost, cement, přísady a příměsi, plastifikátor, ocelové vlákno (drátky).

Abstract:

The aim of the thesis is to characterize high performance concrete, to describe individual components of high performance concrete and their influences on the properties of fresh and hardened concrete. And on the basis of theoretical knowledge, to design a recipe and produce high performance concrete with maximum aggregate size up to 4 mm, with the possibly highest compressive strength.

Keywords:

High performance concrete, HPC, compressive strength, aggregate, grading, cement, admixtures and additives, plasticizer (water reducer), steel fibre.



Obsah

1	Úvod.....	- 7 -
2	Podstata vysokohodnotného betonu.....	- 8 -
2.1.1	Pórovitost betonu, vodní součinitel	- 8 -
2.1.2	Tranzitní zóna	- 11 -
3	Složení vysokohodnotného betonu (HPC).....	- 11 -
3.1	Cement	- 12 -
3.2	Voda	- 17 -
3.3	Kamenivo	- 20 -
3.3.1	Dělení kameniva	- 20 -
3.3.2	Vlastnosti kameniva.....	- 22 -
3.3.3	Kamenivo pro vysokohodnotný beton	- 39 -
3.4	Přísady a příměsi	- 41 -
3.4.1	Přísady	- 41 -
3.4.2	Příměsi	- 53 -
3.5	Vláknitá (rozptýlená) výztuž.....	- 60 -
4	Návrh receptury HPC.....	- 66 -
5	Praktická část	- 72 -
5.1	Použité materiály.....	- 72 -
5.2	Přístroje a zařízení.....	- 75 -
5.3	Sítový rozbor čediče frakce 0/4mm	- 77 -
5.4	Optimalizace zrnitosti	- 79 -
5.5	Návrh receptury HPC	- 83 -
5.6	Výroba betonu	- 89 -
5.7	Zkoušky tlakové pevnosti	- 91 -
6	Závěr	- 98 -
	Seznam použitých zdrojů.....	- 100 -
	Seznam obrázků.....	- 102 -
	Seznam tabulek.....	- 105 -



1 Úvod

V současné době patří betonové a železobetonové konstrukce k nejrozšířenějším druhům stavebních konstrukcí a to díky mechanickým vlastnostem, kterými se beton oproti ostatním stavebním materiálům vyznačuje. Mezi tyto vlastnosti patří vysoká trvanlivost betonových konstrukcí ve všech různých prostředích a vysoká pevnost v tlaku, která u vysokopevnostních betonů může přesahovat hodnotu 150 MPa. Dále je velkou předností monolitických betonových konstrukcí jejich tvárnost, díky které můžeme vytvářet nejrozmanitější tvary konstrukcí a průřezy konstrukčních prvků.

Se zvyšujícími se požadavky na technologii, kvalitu a mechanické vlastnosti betonu začaly být vytvářeny vysokohodnotné betony (HPC - High Performance Concrete), to jsou betony s jednou nebo více vylepšenými vlastnostmi oproti běžným betonům. Vylepšenou vlastností může být např. trvanlivost, pevnost, odolnost vůči pronikání tlakové vody, kvalita povrchu nebo zpracovatelnost betonu. Tyto speciální betony mají potom své označení, např. HSC a UHSC (Ultra High Strength Concrete = ultra vysokopevnostní beton) nebo SCC (Self Compacting Concrete = samozhutnitelný beton).

Podstatou výroby vysokohodnotného betonu je receptura betonu, jinými slovy specifikace jednotlivých složek a jejich poměrového zastoupení při výrobě čerstvého betonu. Každá složka ovlivňuje výsledné vlastnosti betonu. Následující kapitoly se budou věnovat návrhu receptury vysokohodnotného betonu, jednotlivým složkám vysokohodnotného betonu, především kamenivu, a jejich vlivu na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Na základě těchto teoretických poznatků, je cílem praktické části diplomové práce sestavit ideální křivku zrnitosti kameniva s maximální velikostí zrna do 4 mm, a navrhnout recepturu vysokohodnotného betonu pro dosažení co nejvyšší pevnosti výsledného betonu.



2 Podstata vysokohodnotného betonu

U běžných betonů jsou nejslabším článkem mikrostruktury betonu zhydratovaná cementová pasta nebo tranzitní zóna, což je rozhraní mezi ztvrdlou (zhydratovanou) pastou a kamenivem (za předpokladu, že beton obsahuje kamenivo s vysokou pevností). V těchto oblastech se při namáhání tlakem iniciuje lom. Pokud by beton obsahoval kamenivo s nízkou pevností, lom by se šířil i přes zrna kameniva. Tato skutečnost je ovlivňována vodním součinitelem. Vodní součinitel udává hmotnostní poměr obsahu vody a cementu v betonu, který ovlivňuje pórovitost zhydratované cementové pasty a tím i vlastnosti betonu. Důležitý je tvar a velikost pórů, jejich množství a prostorové uspořádání. Se zvyšujícími se tlakovými pevnostmi vysokohodnotných betonů přestávají být vlastnosti betonu řízeny pouze vodním součinitelem. Tlaková pevnost je pouze jedna z vlastností, kvůli které se vysokohodnotné betony používají, je to vlastnost ale velice důležitá. Se stejnými mikrostrukturálními vlastnostmi, které ovlivňují tlakovou pevnost jsou spjaty i další vlastnosti, jako je trvanlivost nebo modul pružnosti betonu.

Pro zvýšení pevnosti zhydratované cementové pasty je nutné ovlivnit její mikrostrukturu snížením pórovitosti. Velké množství velkých pórů, zejména koncentrovaných v jednom místě, negativně ovlivňují tlakovou pevnost. Dále na tlakovou pevnost zhydratované cementové pasty má vliv velikost jeho cementového zrna, pevnost krystalické fáze roste se snižujícími se rozměry zrn. Nehomogenita mikrostruktury zhydratované cementové pasty je rovněž zdrojem ztráty pevnosti.

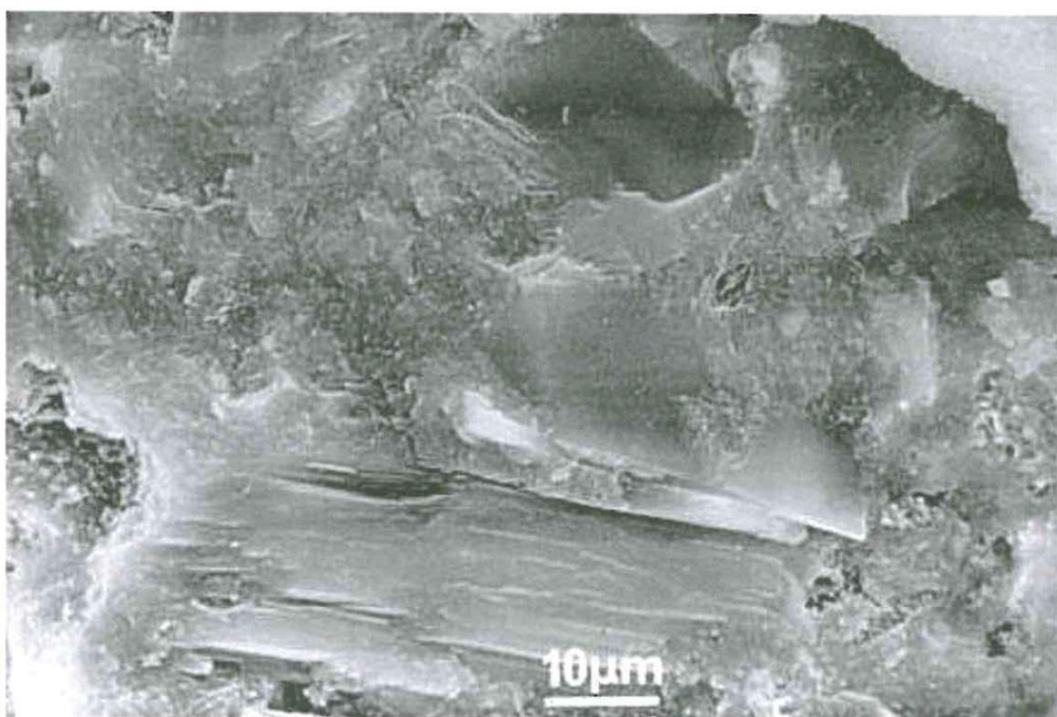
2.1.1 Pórovitost betonu, vodní součinitel

Při hydrataci cementu vznikají hydratační produkty, které zaplňují prostory původně zaplněné vodou. Postupně se tyto prostory zmenšují (snižuje se kapilární pórovitost) a hydráty, které vyplnily tyto prostory, jsou označovány jako „vnější produkty“ hydratace. Tyto vnější produkty se skládají ze shluků velkých krystalů s velkým množstvím mezer, jak je patrné na obr. 1. Hydratace následně zpomaluje a nezhydratované větší částice cementu hydratují prostřednictvím reakcí v pevném stavu. Tyto hydratační produkty, které reagují uvnitř původních hranic cementových zrn, se nazývají „vnitřní produkty“ viz obr. 2. Vnitřní produkt, který je kompaktnější a méně

krystalický má vyšší pevnost oproti vnějšímu produktu a z toho důvodu se ve zhydratované cementové pastě iniciuje lom spíše přes vnější produkt, než přes vnitřní. Ke zvýšení pevnosti vysokohodnotných betonů je potřebné získat mikrostrukturu zhydratované cementové pasty vnitřního produktu s omezením tvorby vnějšího produktu. Toho se docílí snížením vodního součinitele a užitím vhodných přísad a příměsí pro výrobu vysokohodnotného betonu.



Obr. 1: Vnější produkty hydratace [2]



Obr. 2: Vnitřní produkt hydratace [2]



Existuje další druh pórovitosti spojený s hydratací cementu, při němž se hydratující cementová pasta smršťuje, není-li dostatečně ošetřována vodou, a dochází k vývoji jemných mikrotrhlin.

Hlavními faktory, které ovlivňují pórovitost zhydratované cementové pasty popisuje Féretův vztah [2], podle kterého závisí na vodním součiniteli a množství vzduchu zachyceného během míchání:

$$f'_c = k \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2$$

f'_c tlaková pevnost zhydratované cementové pasty
 c, w, a objemy cementu, vody a vzduchu
 k konstanta závisící na druhu cementu

Po úpravě rovnice a zanedbání výrazu $\frac{a}{c}$ (objem zachyceného vzduchu během míchání je malý ve srovnání s objemem betonu), dostáváme rovnice ve tvaru:

$$f'_c = k \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{c} + \frac{a}{c}\right)^2}$$

$$f'_c = k \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{c}\right)^2}$$

Ze vztahu vyplývá, že snížením vodního součinitele dochází ke zvýšení tlakové pevnosti zhydratované cementové pasty. Zmenšení vodního součinitele má za následek přiblížení zrn cementu v čerstvé pastě více k sobě a dochází tak ke snížení kapilární pórovitosti a prostoru pro vývoj vnějšího produktu. Vazby mezi cementovými zrny vznikají rychleji, urychluje se vznik vnitřního produktu a dochází k rychlejšímu nárůstu počátečních pevností. Pro omezení pórovitosti zhydratované cementové pasty je tedy zapotřebí omezit zachycování vzduchu během mísení a zmenšit vodní součinitel. Snížením vodního součinitele se nesmí zhoršit reologické vlastnosti čerstvé směsi, směs musí zůstat dostatečně tekutá pro její zpracování.

Reologie betonu je ovlivňována fyzikálními a chemickými faktory. Fyzikálním faktorem je křivka zrnitosti a tvar zrn kameniva, u směsí s nízkým vodním součinitelem



může reologii betonu ovlivňovat také rozdělení zrnitosti a tvar zrn cementu. Mezi chemické faktory patří hydratace cementu. Dalšími faktory ovlivňující reologii betonu je teplota a způsob míchání čerstvého betonu. Ke zlepšení reologických vlastností betonu také slouží přísady a příměsi přidávané do betonu.

2.1.2 Tranzitní zóna

Tranzitní zóna je oblast bezprostředně u povrchu zrn kameniva v betonu. Při ukládání a zhutňování čerstvého betonu zabraňují zrna kameniva v homogenním rozložení vody v systému (záleží na textuře povrchu zrn, jejich velikosti a tvaru). Díky stěnovému efektu dochází k akumulaci záměsové vody u povrchu zrn a cementová pasta má v tranzitní zóně vyšší vodní součinitel. Vyšší vodní součinitel v oblasti tranzitní zóny způsobuje pórovitost betonu a vznik velkých hydratačních produktů. Vznikají tak nehomogenity v mikrostruktuře, které mají negativní vliv na pevnost betonu. Tranzitní zóna je nejslabším článkem běžných betonů, u vysokohodnotných betonů je zapotřebí tuto oblast zpevnit snížením vodního součinitele a použitím přísad a příměsí.

3 Složení vysokohodnotného betonu (HPC)

Beton je kompozitní stavební materiál, mezi základní složky betonu patří cement, kamenivo a voda. Doplnkovými složkami jsou přísady a příměsi, které jsou u vysokohodnotných betonů jejich důležitou a nedílnou součástí. Přísady a příměsi se do betonu přidávají kvůli zlepšení vlastností a z běžných betonů dělají betony speciální.

Při výběru jednotlivých složek vysokohodnotného betonu je důležité brát ohled na poměr složek, jejich druh i kvalitu. Jednotlivé složky vysokohodnotného betonu nesmí vyvolávat nežádoucí chemické reakce a nesmí se navzájem negativně ovlivňovat. Narozdíl od běžných betonů, jejichž receptury jsou ověřeny dlouholetou praxí a pro jejich přípravu lze použít základní a místně dostupné složky, je v daném regionu výběr materiálu pro vysokohodnotné betony stěžejní z hlediska ekonomické náročnosti.



3.1 Cement

Cement je anorganické, hydraulické pojivo. Představuje základní pojivovou složku betonu. Nejvíce používaným cementem pro vysokohodnotné betony je portlandský cement CEM I, díky vysokému obsahu slínku 95 - 100 % a nízkému obsahu doplňujících složek 0 - 5 %. Základem portlandského cementu je slínek, který je produktem vypalování vytěženého a nadrceného vápence a jílových surovin. Slínek obsahuje dva kalciumalumináty (C_3A a C_4AF), které hrají důležitou roli během tuhnutí, a dva kalciumsilikáty (C_3S a C_2S) důležité při tvrdnutí cementu. Slínek se dále rozemílá s regulátory tuhnutí a různými příměsemi, podle typu cementu viz *tab. 2.1*. Regulátory tuhnutí jsou používány proto, aby nedošlo k rychlému ztuhnutí směsi a beton by bylo možné zpracovat. Ke slínku je jako regulátor tuhnutí přimícháván sádrovec ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) nebo anhydrid ($CaSO_4$).

Dále jsou cementy rozdělovány podle tříd pevnosti viz *tab. 2*. Čísla 32,5 - 52,5 určují tlakovou pevnost v MPa cementu po 28 dnech. Symboly N a R označují rychlost vývoje počáteční pevnosti (N - normální, R - rychlý). Při výběru třídy cementu pro vysokohodnotné betony se volí většinou třída 42,5 R nebo 52,5 R. Důležitější než třída cementu je ale kvalita lomu, ve kterém se těží suroviny pro výrobu cementu. Při výběru cementu je také důležitým hlediskem jeho měrný povrch, který souvisí s velikostí a zrnitostí částic cementu. Měrný povrch cementu závisí na jemnosti mletí, obvykle se pohybuje v rozmezí 250 - 400 kg/m^2 . Jemněji mleté cementy (s vyšším měrným povrchem) hydratují rychleji a úplněji, jejich výroba je ale energeticky náročnější a je zapotřebí většího množství vody pro smáčení zrn cementu, také dochází ke většímu smršťování. Objemová hmotnost portlandského cementu se pohybuje v rozmezí 3050 až 3150 kg/m^3 . Množství dávky cementu u vysokohodnotného betonu je větší oproti běžným betonům (300 - 350 kg/m^3), obvykle se pohybuje v rozmezí 400 - 600 kg/m^3 , může být až 900 kg/m^3 .



Druh cem.	Název cementu	Označení cem.	Slínek (K)	Vysokopecní struska (S)	Křemičitý úlet (D) ³⁾	Pucolán přírodní (P)	Pucolán průmyslový (Q) ⁴⁾	Popílek křemičitý (V)	Popílek vápenatý (W)	Kalcinovaná břidlice (T)	Vápenec (L)	Doplňující složky ²⁾	
I	Portlandský cement	I	95 – 100	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
II	Portlandský struskový cement	II/A-S	80 – 94	6 – 20	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
		II/B-S	65 – 79	21 – 35	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
	Portlandský cement s křemičitým úletem	II/A-D	90 – 94	~	6 – 10	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
	Portlandský pucolánový cement	II/A-P	80 – 94	~	~	6 – 20	~	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-P	65 – 79	~	~	21 – 35	~	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/A-Q	80 – 94	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-Q	65 – 79	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	~	0 – 5
	Portlandský popílkový cement	II/A-V	80 – 94	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	0 – 5
		II/B-V	65 – 79	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	0 – 5
		II/A-W	80 – 94	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	0 – 5
		II/B-W	65 – 79	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	0 – 5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	II/A-T	80 – 94	~	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	0 – 5
		II/B-T	65 – 79	~	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	0 – 5
	Portlandský cement s vápencem	II/A-L	80 – 94	~	~	~	~	~	~	~	~	6 – 20	0 – 5
II/B-L		65 – 79	~	~	~	~	~	~	~	~	21 – 35	0 – 5	
Portlandský směsný cement	II/A-M	80 – 94	6 – 20 ⁵⁾										
	II/B-M	65 – 79	21 – 35 ⁵⁾										
	III/A	35 – 64	36 – 65	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
III	Vysokopecní cement	III/B	20 – 34	66 – 80	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
		III/C	5 – 19	81 – 95	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
IV	Pucolánový cement	IV/A	65 – 89	~	11 – 35			~	~	~	~	0 – 5	
		IV/B	45 – 64	~	36 – 55			~	~	~	0 – 5		
V	Směsný cement	V/A	40 – 64	18 – 30	~	18 – 30		~	~	~	~	0 – 5	
		V/B	20 – 39	30 – 50	~	30 – 50		~	~	~	0 – 5		

¹⁾ Hodnoty v tabulkách se vztahují na hlavní a doplňující složky cementu bez síranu vápenatého a přísad
²⁾ Jako doplňující složky mohou být použita plniva nebo jedna či více látek, používaných jako hlavní složky, pokud v cementu nejsou jako hlavní složky použity
³⁾ Obsah křemičitého úletu je limitován do 10 %
⁴⁾ Obsah jiných strusek než vysokopecní strusky je limitován do 15 %
⁵⁾ Obsah plniva je limitován do 5 %

Tab. 1: Rozdělení cementů podle EN 197-1: Druhy a složení [1,6]

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku [MPa]				Počátek tuhnutí [minut]	Objemová stálost (rozeptnutí) [mm]
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost			
	2 dny	7 dnů	28 dnů			
32,5 N	---	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	---				
42,5 N	≥ 10,0	---	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	---				
52,5 N	≥ 20,0	---	≥ 52,5	---	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	---				

Tab. 2: Třídy pevnosti cementů [7]



Cementová kaše vzniká při smíchání cementu s vodou a dochází k hydrataci cementových zrn. Při hydrataci, vlivem chemických reakcí, vznikají jemné krystalky (hydráty), které vzájemně prorůstají a tím dochází postupně k tuhnutí a tvrdnutí cementu.

Hydratace cementu má 5 stádií (výklad dle C. Verneta) [2]:

1. Smíchání s vodou - počátek hydratace, z cementu jsou uvolňovány ionty do roztoku a povrch částic cementu se začíná pokrývat hydratovaným kalcium-silikátem, označovaný jako CSH gel, vytvořeným z Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ a OH^- iontů, a ettringitem vytvořeným reakcí iontů Ca^{2+} , $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, SO_4^{2-} a OH^- .

2. Indukční perioda - v záměsové vodě rychle roste pH a koncentrace Ca^{2+} iontů, což má za následek spolu s hydráty vzniklými na povrchu částic snížení rozpustnosti silikátových fází a záměsová voda se stává nasyceným roztokem Ca^{2+} .

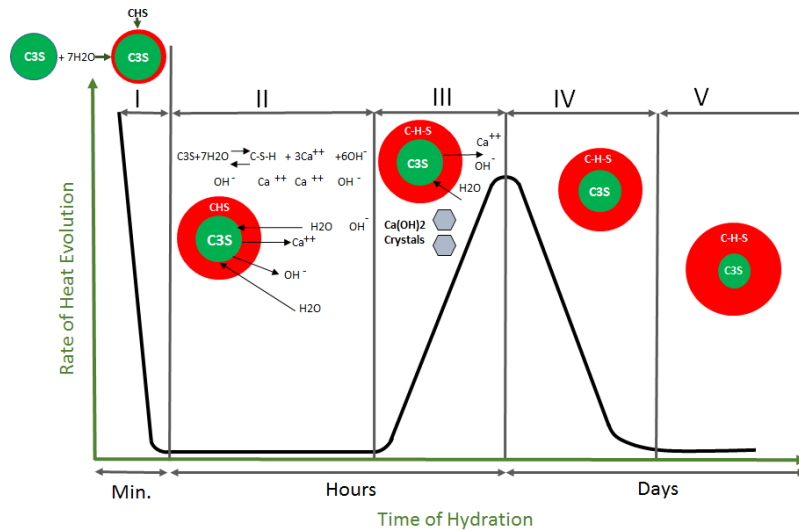
3. Počátek tuhnutí - na konci indukční periody se začíná snižovat koncentrace Ca^{2+} iontů precipitací (srážením) portlantidu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Tato reakce vyvolá náhlé snížení koncentrace Ca^{2+} a OH^- iontů a nastartuje opětovné rozpouštění všech fází cementu v záměsové vodě. Vývoj tepla roste zpočátku mírně, protože precipitace část tepla spotřebuje, ale postupně se zvyšuje. Se zrychlujícím se vývojem tepla začíná počátek tuhnutí, s výjimkou počátku tuhnutí z důvodu tvorby jehličkových krystalů ettringitu nebo tvorby sádrovce. Tuhnutí cementu začíná po několika hodinách smíchání cementu s vodou.

4. Tvrdnutí - v průběhu indukční periody dochází tvorbou ettringitu k vyčerpání SO_4^{2-} iontů. Bez přítomnosti SO_4^{2-} iontů dochází k rekrystalizaci ettringitu, tato reakce generuje další teplo a urychluje hydrataci silikátových fází. Tvrdnutí cementu začíná po jednom nebo několika dnech.

5. Zpomalení hydratace - vrstva hydrátů, pokrývající zrna jednotlivých fází slínku, je stále silnější. Dochází ke zpomalení hydratace z důvodu obtížného pronikání molekul vody k nezhydratovaným částicím slínku. Tato hydratovaná cementová pasta má pod vrstvou hydrátů vzhled kompaktní hmoty, je

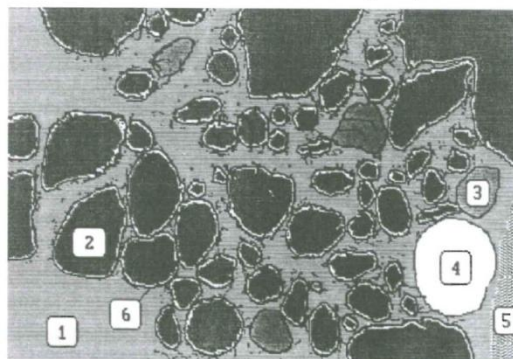


označována jako „vnitřní produkt“ (hydratační produkty v prvních fázích hydratace rostou do mezer mezi cementová zrna a proto jsou označovány jako „vnější produkt“).

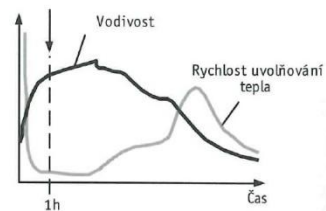


DORMANTNÍ (MRTVÁ) PERIODA

MIKROSTRUKTURA CEMENTOVÉ PASTY (t = 1h)



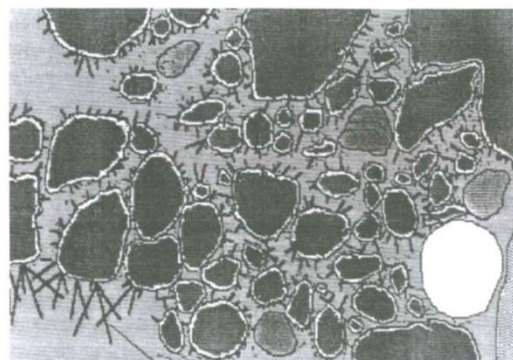
- 1 Voda
- 2 Slínek
- 3 Sádrovec
- 4 Vzduch
- 5 Kamenivo
- 6 Hydráty



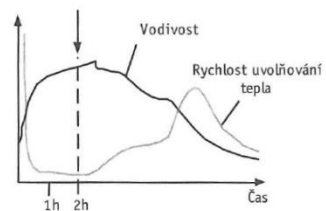
II. (1) Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 1 hodina (Vernet)

DORMANTNÍ (MRTVÁ) PERIODA

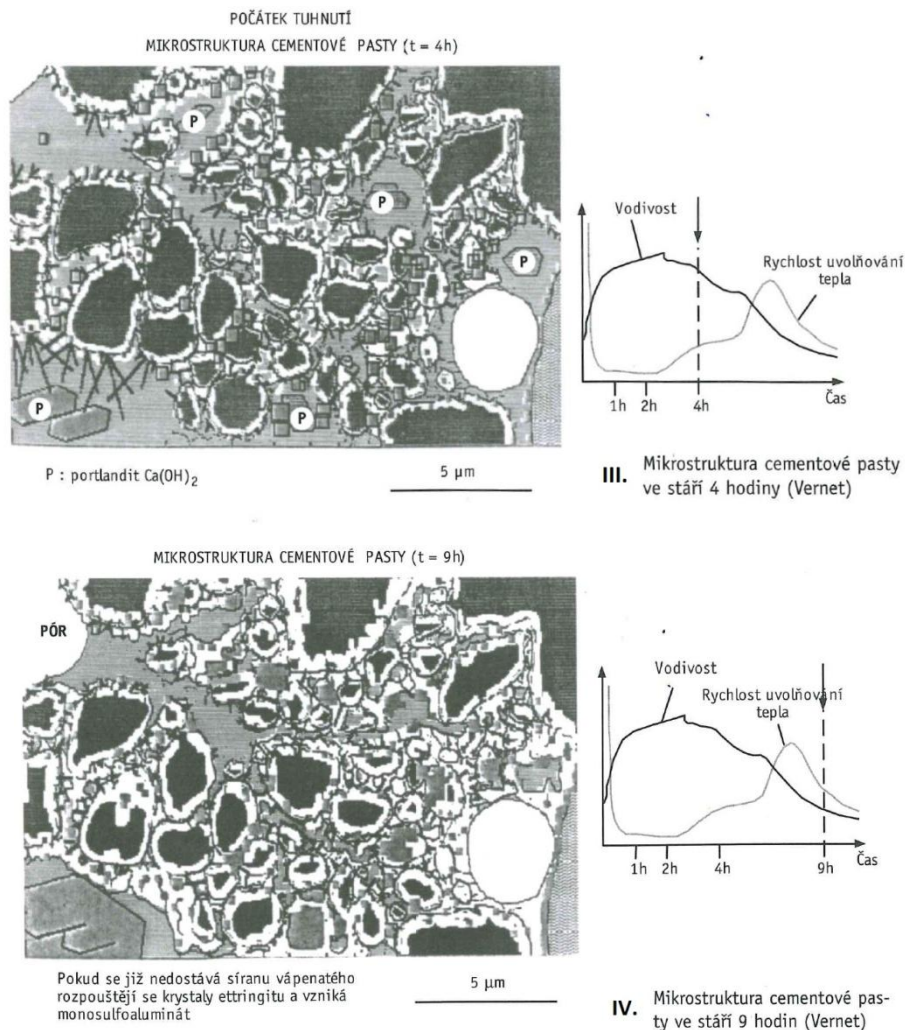
MIKROSTRUKTURA CEMENTOVÉ PASTY (t = 2h)



Dlouhé jehlicovité krystaly ettringitu



II. (2) Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 2 hodiny (Vernet)



Obr. 3: Vývoj tepla v průběhu hydratace (I - smíchání s vodou 0 - 15 min, II - indukční perioda 15 min - 4 hod, III - zrychlení hydratace a počátek tuhnutí 4 - 8 hod, IV - zpomalení hydratace 8 - 24 hod, V - doba zrání 1 - 28 dní i déle), a mikrostruktura cementové pasty v různém stáří betonu. [2]

Konec hydratace cementu nastane buď v případě hydratace veškerých částic systému (vysoký vodní součinitel a kvalitní ošetřování betonu), nebo když se v systému již nevyskytuje žádná volná voda (nízký vodní součinitel), případně když se voda nemůže dostat k nezhydratovaným částicím (kompaktní systém).

Pokud chceme docílit co největších hodnot pevnosti cementu v tlaku, je zapotřebí dosáhnout při hydrataci co nejkompaktnější struktury CSH gelu. Silikátové fáze jsou hlavními nositeli pevnosti. Kompaktní struktury se dá docílit snížením vodního součinitele, tím ale dochází k urychlení hydratace a ke zhoršení reologie, a v důsledku toho zpracování, čerstvých směsí.



3.2 Voda

Voda v betonové směsi plní 2 funkce. První funkce je **hydratační**, voda podmiňuje hydrataci cementu. U běžných betonů se hmotnostní poměr účinného obsahu vody a cementu (vodní součinitel - w/c) pohybuje okolo 0,5. U betonů vysokohodnotných je tato hodnota nižší, okolo 0,2 - 0,25. Beton s nižším vodním součinitelem se vyznačuje lepší trvanlivostí a mechanickými vlastnostmi. Veškerá voda nespotřebovaná při hydrataci snižuje pevnost betonu, v tab.3 jsou uvedeny maximální očekávané pevnosti vysokohodnotného betonu závislé na hodnotě vodního součinitele (hodnoty jsou pouze orientační). Druhá funkce je **reologická**, voda ovlivňuje konzistenci a zpracování čerstvých směsí. Voda spojuje všechny složky betonu. Kapilární síly zajišťují kohezi a viskozita plastičnost čerstvého betonu.

Voda se dle technologie rozděluje na dva druhy. Prvním druhem je voda **záměsová**, která se dává do betonové směsi při míchání čerstvého betonu. Druhým je voda **ošetřovací**, pomocí které se udržuje zatuhlý beton ve vlhkém stavu. Oba dva druhy musí vyhovovat kritériím pro záměsovou vodu, která jsou stanovena v souladu s požadavky normy ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu. Pro vysokohodnotné betony se nejčastěji používá pitná voda, kterou není potřeba před jejím použitím zkoušet.

Vodní součinitel: voda / cement + příměsi	Očekávaná pevnost v tlaku [MPa]
0,40 - 0,35	50 - 75
0,35 - 0,30	75 - 100
0,30 - 0,25	100 - 125
0,25 - 0,20	> 125

Tab. 3: Tlaková pevnost vysokohodnotného betonu v závislosti na hodnotě vodního součinitele. [2]

Návrh složení betonové směsi spočívá v určení množství každé jednotlivé složky betonu, aby byly dodrženy technologické požadavky (zpracovatelnost, vhodnost kameniva), konstrukční požadavky a požadavky na životnost betonu (pevnost, trvanlivost). V tomto smyslu existují dva základní principy pro návrh betonové směsi, které mají souvislost s množstvím záměsované vody, použité při výrobě betonu. Jedná se o Lyseho pravidlo a Abramsův zákon.



Lyseho pravidlo udává množství záměsové vody v závislosti na velikosti maximálního zrna kameniva a třídě konzistence (zpracovatelnosti) betonu viz tab. 4 a 5. Hodnoty množství záměsové vody uvedené v tab. 4 jsou pouze orientační, protože množství záměsové vody ovlivňují i další parametry (typ kameniva, křivka zrnitosti kameniva). Lyseho pravidlo lze shrnout do dvou zásad, pro danou velikost maximálního zrna kameniva je pro vyšší konzistenci potřeba většího množství záměsové vody, a čím větší je velikost maximálního zrna kameniva, tím nižší je množství záměsové vody potřebné pro dosažení dané konzistence betonu.

Max. zrno (mm)	Dávka vody* (kg/m ³) podle stupňů konzistence				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Tab. 4: Lyseho pravidlo: vliv maximálního zrna kameniva na dávku záměsové vody. [1]

Třída konzistence	Sednutí (mm)	Zažité označení
S1	10 – 40	tuhá
S2	50 – 90	plastická
S3	100 – 150	měkká
S4	160 – 210	velmi měkká
S5	> 210	tekutá

Tab. 5: Stupně konzistence a sednutí kužele. [1]



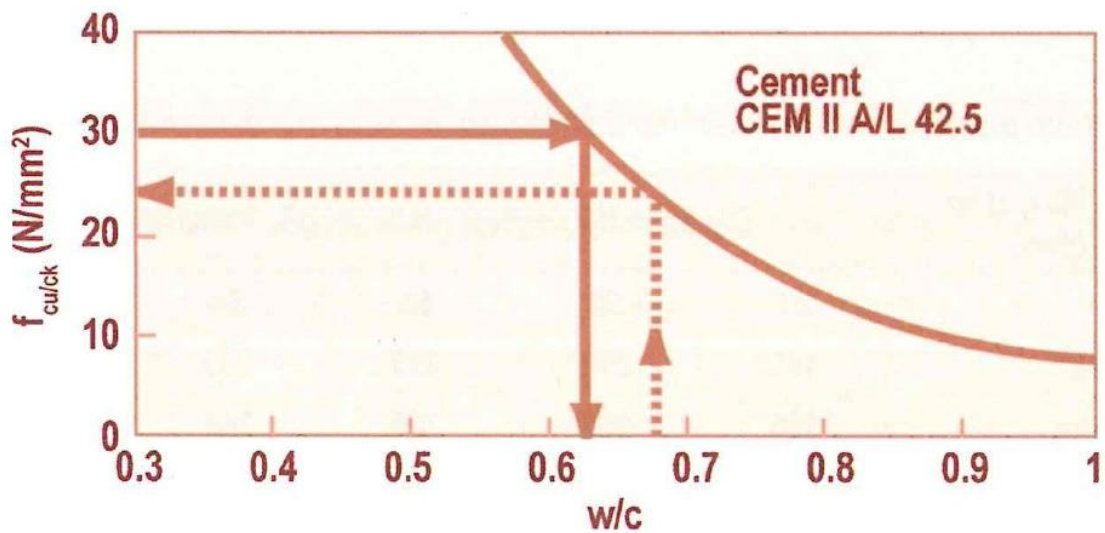
Abramsův zákon technologie betonu udává, že pevnost betonu v tlaku v daném stáří, při dané teplotě a s daným cementem roste s klesajícím vodním součinitelem podle rovnice:

$$f_c = K_1 / K_2^{w/c}$$

f_c pevnost betonu v tlaku

K_1, K_2 konstanty závislé na době zrání, teplotě a typu cementu

Na obr. 4 je znázorněna křivka dle výše uvedeného vztahu Abramsova zákona pro dobu zrání 28 dní, teplotu 20°C a w/c pro beton vyrobený z CEM 42,5 R.



Obr. 4: 28-denní krychelná charakteristická pevnost v závislosti na vodním součiniteli při okolní teplotě 20°C. [1]



3.3 Kamenivo

Kamenivo je zrnitý materiál, který plní funkci plniva v betonu. Vyplňuje 2/3 až 3/4 objemu betonové směsi. Kamenivo se přidává do betonu hlavně z ekonomických důvodů, protože je obvykle levnější než cement. Kamenivo zajišťuje lepší objemovou stabilitu a trvanlivost betonu, u vysokohodnotných betonů hraje velkou roli z hlediska pevnosti betonu.

3.3.1 Dělení kameniva

1. Podle velikosti

Kamenivo se skládá z množství samostatných zrn. Pokud jsou zrna menší než 4mm včetně, jedná se o **drobné kamenivo** (písek). Součástí drobného kameniva může být filler (kamenná moučka). Filler je kamenivo s velkým obsahem (minimálně 70 %) jemných částic menších než 0,063 mm, který vzniká jako odpadní produkt při úpravě kameniva. Kamenivo s velikostí zrn v rozmezí 4 až 125mm se označuje jako **hrubé kamenivo** (drt', štěrky).

2. Podle objemové hmotnosti

Kamenivo s objemovou hmotností do 2000 kg/m³ se nazývá **pórovité**, může být umělé i přírodní. Zrna pórovitého kameniva mají pórovitou strukturu, jsou nasákavá. Při návrhu receptury je nutno přihlídnout k většímu množství vody, které je potřebné ke smočení zrn. Pórovité kamenivo se užívá do lehkých betonů.

Dalším druhem je kamenivo **hutné**, jehož objemová hmotnost je v rozmezí 2000 - 3000 kg/m³. Do této skupiny patří většina přírodních těžných i drcených kameniv, z umělých kameniv je to především vysokopecní struska nebo betonové recykláty. Hutná kameniva jsou základem většiny betonů.

Kamenivo o objemové hmotnosti zrn větší než 3000kg/m³ se nazývá **těžké**. Těžké kamenivo se používá do těžkých betonů, které se využívají k odstínění elektromagnetického záření. Mezi těžká kameniva patří např. čedič, který je používán do vysokohodnotných betonů.



3. Podle původu

Dle původu dělíme kamenivo na přírodní, umělé a recyklované. **Přírodní** kamenivo získáváme těžením nebo drcením přírodních hornin. Zrna těženého kameniva mají oválný tvar s hladkým povrchem, oproti kamenivu drcenému, které vzniká drcením větších hornin a následným tříděním. Drcené kamenivo se vyznačuje nepravidelným tvarem a drsným povrchem. Drcené kamenivo může obsahovat více či méně hustou síť mikrotrhlin, způsobenou právě odstřelováním a drcením hornin, které mohou být rizikové a mohou oslabit beton. Při návrhu betonové směsi je z důvodů minimalizace dislokací, díky zaobleným tvarům zrn, výhodnější kamenivo těžené. Ovšem drcené kamenivo vykazuje větší pevnosti a pro vysokohodnotné betony je tak výhodnější, protože cementová matrice u vysokohodnotných betonů dosahuje vysokých pevností a pokud by kamenivo mělo malou pevnost, bylo by nejslabším článkem betonu. Při návrhu by se měla uvažovat pevnost kameniva 1,5 x větší, než je pevnost navrhovaného betonu.

Umělé kamenivo vzniká za přispění člověka, nejčastěji tepelným procesem (tavením kovů, teplotní expandací, spalováním). Příkladem hutného umělého kamenivem je vysokopecní struska, která vzniká jako odpadní produkt při metalurgii železa. Struska se chladí a následně drtí na struskové kamenivo. Dalším druhem umělého kameniva je pórovité kamenivo. Hlavním představitelem je liapor, který vzniká drcením a vypalováním jílu, při němž dochází k tepelné expanzi jílových granulí za vzniku lehkých keramických kuliček.

Recyklované kamenivo vzniká rozdrcením a roztříděním stávající stavební konstrukce. Drcené kamenivo má proměnlivé vlastnosti. Je zapotřebí vyšší dávky cementu pro dosažení požadovaných pevností betonu, oproti běžnému kamenivu, a hrozí riziko znečištění kameniva látkami, které mohou negativně ovlivňovat vlastnosti betonu.



3.3.2 Vlastnosti kameniva

Při výběru kameniva je důležitá jeho objemová hmotnost, pevnost zrn, nízká nasákavost (pórovitost) a trvanlivost. Důležitou roli při výběru kameniva do betonu má také velikost a tvar kameniva, tyto a další vlastnosti ovlivňující chování betonu jsou popsány v této části.

3.3.2.1 Zrnitost kameniva

Zrnitost kameniva vystihuje jeho zrnitý charakter, neboli rozdělení velikosti zrn kameniva od nejmenších částic po největší. Čím lépe vyplňují menší zrna kameniva mezery mezi těmi většími, tím menší je objem mezer mezi jednotlivými zrny a lepší (hutnější) kostra kameniva v betonu vzniká. Mezery mezi zrny jsou vyplněny cementovým tmelem a po jeho zatvrdnutí vzniká pevný umělý slepenec (beton).

Sítový rozbor

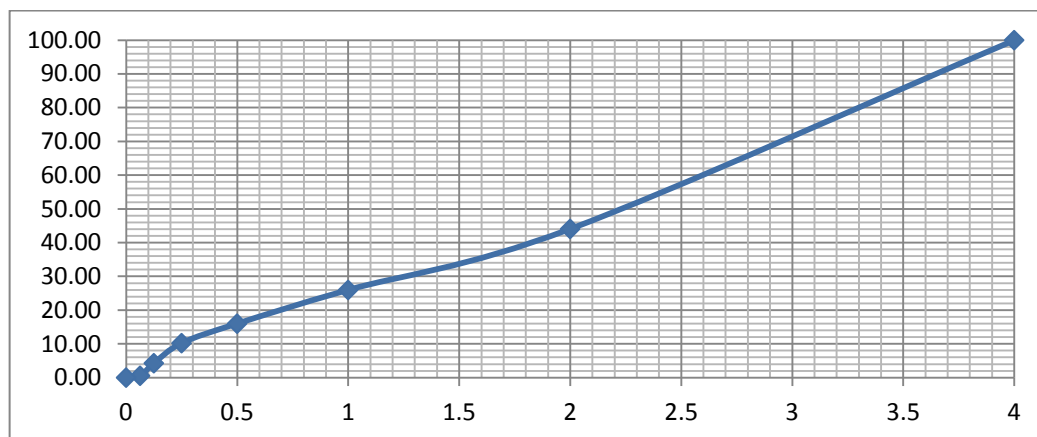
Zrnitost kameniva se zjišťuje pomocí sítového rozboru, při kterém se reprezentativní vzorek kameniva rozdělí na jednotlivé frakce. K tomu slouží sada normových sít, přes které se kamenivo prosévá. Síta jsou naskládána nad sebou, mají různé rozměry otvorů, třesením sloupce sít kamenivo propadá jednotlivými sítami, a při prosévání dojde k rozdělení kameniva do jednotlivých frakcí dle velikosti zrn. Sloupec sít obsahuje dno a víko, mezi nimi je určitý počet sít uspořádaných od horního síta k dolnímu podle zmenšující se velikosti otvorů. Frakce je tedy směs zrn v rozmezí dvou sít, při čemž síto s většími otvory zrna kameniva propouští a síto s menšími otvory je zadržuje. Frakce kameniva může být úzká nebo široká. Při úzké frakci je velikost ok horního síta menší jak dvojnásobek velikosti ok spodního síta ($D \leq 2d$), úzkou frakcí je např. frakce 2-4mm. Pro širokou frakci platí pravidlo $D > 2d$, široká frakce je např. 2-16mm. Postup stanovení zrnitosti popisuje ČSN EN 933-1, Zkoušení geometrických vlastností kameniva. V Evropě se nejpoužívanější zkušební sada sít skládá z 11 sít se čtvercovými oky, velikosti ok této normové sady sít jsou: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 a 63 mm.



Po prosetí kameniva se jednotlivé zbytky na sítích (frakce) zváží a hodnoty se zapíší do tabulky. Jednotlivé frakce je vhodné vyjádřit v procentech celkové hmotnosti zkušebního vzorku, získáme tak jednotlivé zbytky na sítích. Hmotnosti (procenta) veškerého materiálu, který byl zachycen na daném sítu a na sítích s většími otvory, se označují jako celkové zbytky na daných sítích. A hmotnost veškerého materiálu, který určitým sítem propadl, se nazývá celkový propad na daném síte. Jejich součet musí dát 100%. Výstupem síťového rozboru je tabulka obsahující velikosti otvorů jednotlivých sít, zbytky na síte, celkové zbytky a propady (Tab. 6). Vynesením celkových zbytků nebo propadů pro jednotlivá síta do grafu, získáme křivku zrnitosti (Obr. 5). Křivka zrnitosti může být plynulá nebo přetržitá (přerušovaná). V případě plynulé křivky zrnitosti zůstanou na všech sítích zbytky kameniva. Čára zrnitosti je přetržitá, pokud některá frakce chybí. Při síťovém rozboru se dále stanovuje hodnota nadsítného (a podsítného), což je souhrn všech zrn zadržovaných (a propadlých) horním (a dolním) sítem frakce vyjádřených v %.

Velikost otvoru [mm]	Zbytek na síte [g]	Zbytek na síte [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
16	0.00	0.00	0.00	100.00
8	0.00	0.00	0.00	100.00
4	167.95	16.84	16.84	100.00
2	390.00	39.10	55.94	44.06
1	180.40	18.09	74.03	25.97
0.5	99.60	9.99	84.02	15.98
0.25	57.50	5.77	89.78	10.22
0.125	59.30	5.95	95.73	4.27
0.063	37.20	3.73	99.46	0.54
0	5.40	0.54	100.00	0.00
Celkem	997.35			

Tab. 6: Síťový rozbor čediče frakce 0-4mm.



Obr. 5: Křivka zrnitosti čediče frakce 0-4mm.

Ideální křivka zrnitosti

Ideální křivka zrnitosti vyjadřuje hmotnostní rozdělení jednotlivých frakcí, ze kterých by se měla skládat celková dávka kameniva o předem určené maximální velikosti zrna, pro dosažení maximální možné hutnosti betonu, tedy minimálnímu objemu mezer mezi zrny. Ideálních křivek zrnitosti je více druhů a jsou popisovány různými rovnicemi, které vychází z vyplnění prostoru kulovitými obrazci o různých průměrech. Kulovité obrazce ve skutečnosti představují jednotlivá zrna kameniva o různých velikostech (frakcích). V nasypáném kamenivu nelze minimalizovat objem dutin a mezer mezi jednotlivými zrny, a zároveň minimalizovat povrch kameniva. Křivky zrnitosti se nazývají ideální, protože tyto parametry zohledňují a určují nejnižší dávky cementu, dobrou zpracovatelnost a vysokou pevnost betonu.

Rovnice pro ideální křivky zrnitosti závisí na velikosti maximálního zrna kameniva (D_{\max}), která je definována jako otvor síta, kterým propadne veškeré kamenivo, nebo na něm zůstane maximálně 5% zbytek. Volba D_{\max} musí zohledňovat následující omezení:

1. Nesmí přesáhnout 1/4 nejmenšího rozměru betonové konstrukce. Pokud by toto omezení nebylo splněno, došlo by k nadměrné heterogenitě materiálu.
2. Musí být o 5mm menší než je minimální vzdálenost mezi pruty ocelové výztuže, aby nedocházelo k blokování hrubých zrn.
3. Nesmí být větší než 1,3 násobek tloušťky krycí vrstvy výztuže, aby nedošlo k potížím při pohybu betonové směsi mezi stěnou bednění a výztuží.



Nejznámějším vztahem pro ideální křivku zrnitosti je rovnice dle **Füllera** [3]:

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{1/2}$$

P propad sítem o velikosti otvoru d [%]

D_{max} velikost maximálního zrna kameniva [mm]

Beton s křivkou zrnitosti dle Füllera vztahu se vyznačuje nízkou zpracovatelností. Proto zavedl Bolomey později modifikaci rovnice užitím součinitele A , jehož hodnota závisí na kvalitě kameniva a požadované zpracovatelnosti betonu viz tab.7. Součinitel A nabývá hodnot od 8 do 14. Vyšší hodnota součinitele A znamená vyšší podíl jemných částic kameniva. Pokud by byl součinitel $A = 0$, přechází Bolomeyova rovnice zpět na Füllera.

Bolomeyova rovnice má tvar [1]:

$$P = A + (100 - A) \cdot \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{1/2}$$

Kamenivo	Součinitel A pro beton s konzistencí:		
	tuhou (S1)**	plastickou (S2-S3)**	tekutou (S4-S5)**
těžené	8	10	12
drcené	10	12	14

Tab. 7: Hodnoty součinitele A v Bolomeyově rovnici podle typu kameniva a požadované zpracovatelnosti.[1]



Dalším autorem rovnice, která popisuje ideální křivku zrnitosti a vychází z Füllerovy rovnice, je **Hummel**. Jeho rovnice zohledňuje původ kameniva pomocí exponentu, který je rozdílný pro těžené a drcené kamenivo [3]:

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^n$$

n exponent - těžené kamenivo $n = 0,4$
drcené kamenivo $n = 0,3$

Ideální křivkou zrnitosti se zabývali i ve švýcarském federálním zkušebním a výzkumném centru materiálů (EMPA - Eidgenössische Materialprüfungs- und ForschungsAnstalt). Rovnice EMPA je omezená maximálním zrnem kameniva $D_{max} = 32\text{mm}$ a má tvar [3]:

$$P = 50 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}\right)$$

,nebo

$$P = 20 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}\right)$$

Je patrné, že ideální zrnitostí kameniva se zabývalo mnoho autorů. Použití některých rovnic je omezeno velikostí maximálního zrna kameniva. Některé rovnice zohledňují původ kameniva a konzistenci navrhovaného betonu. Některé berou v úvahu obsah cementu v kamenivu, v takovém případě je čerstvý beton méně kohezivní a hrubší. Je to způsobeno redukcí obsahu jemných částic kameniva kvůli započítání obsahu cementu. V tab.8 jsou zobrazena rovnice ideálních křivek zrnitosti, jejich autoři a různá omezení pro použití jednotlivých rovnic.



$$y = g \left(\frac{d}{D}\right)^i + (100 - g) \left(\frac{d}{D}\right)^h$$

Authority	Parameters			Limits for optimum		Remark
	g	i	h	n	D	
Fuller and Thompson [1907]	0	–	0.5	6	5–100	For aggregates only
EMPA [Ros 1950]	50	1	0.5	9	20–40	For aggregates only
				6	3–8	
Popovics [1962b]	$15\left(1 - \frac{3}{n}\right)$	0	$\frac{0.5}{1 - 1.6n}$	4–10	5–100	For aggregates only. See Fig. 12.1
Bolomey [1947]	8–10	0	0.5	6–8	20–80	For cement–aggregate mixtures
	10–12	0	0.5	6–8	20–80	For cement–crushed aggregate mixtures
Caquot and Faury [1937]	$\frac{100}{2.386 D^{1/5} - 1}$	0	0.20	?	For 0.0065– $D/2$ fraction	The blending proportion of these two size fractions recommended for cement–aggregate mixtures is determined by $y_{D/2}$ (see text)
	–672.5	0	0.20	?	For $D/2$ – D fraction	
Popovics [1962b]	15	0	0.5	4–10	5–100	For cement–aggregate mixtures
Popovics [1962b]	20	0	0.56	4–10	2.5–150	For cement–aggregate mixtures
Popovics	$\frac{100}{n + 1}$	0	0.5	6	5–100	For cement–aggregate mixtures. Aggregate has Fuller grading

Aggregate: sand and gravel unless indicated otherwise. Consistency: 3–5 in slump. n = aggregate–cement ratio, by weight. D = maximum particle size, mm.

Tab. 8: Parametry pro užití jednotlivých rovnic ideálních křivek zrnitosti kameniva. [5]

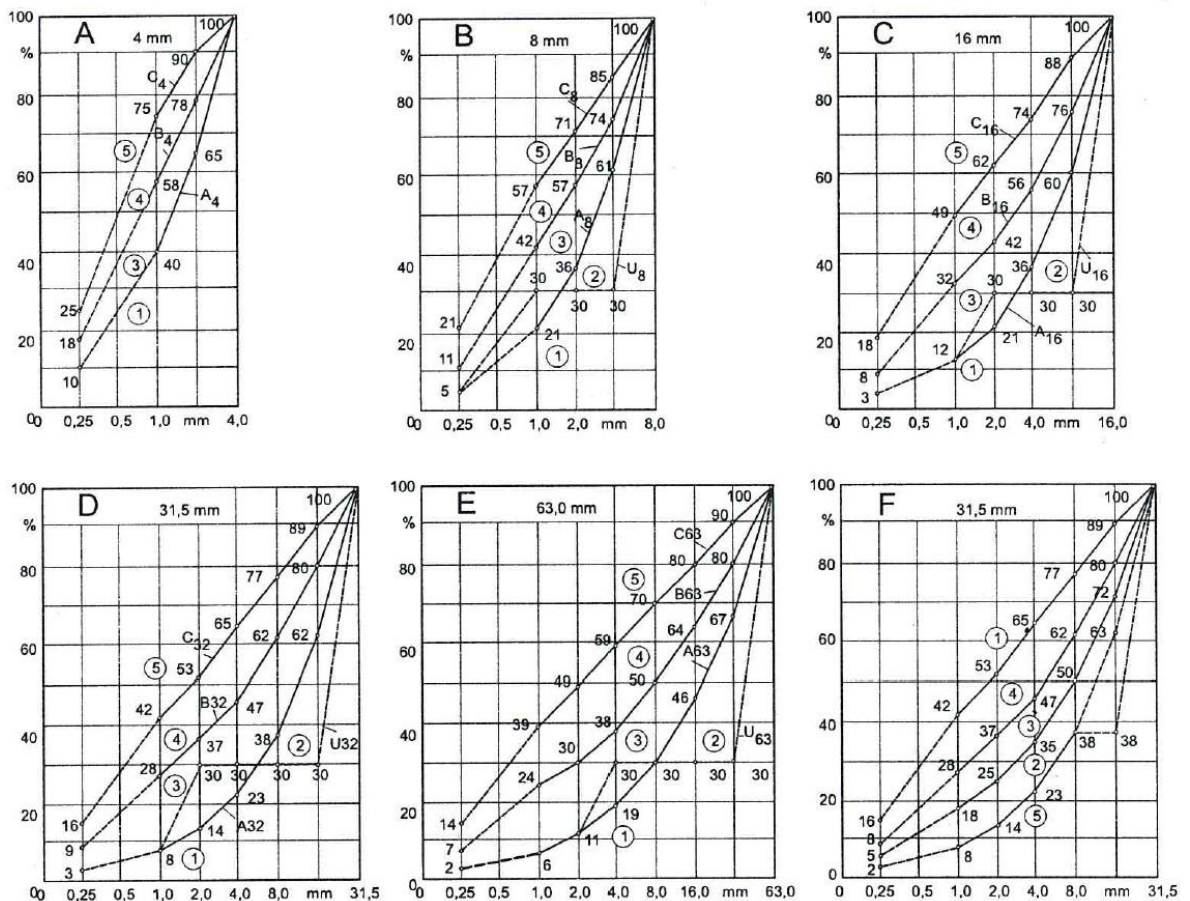
Čáry zrnitosti

Správná zrnitost kameniva je v praxi kontrolována pomocí stanovených hodnot podsítného (propad nejmenším sítem frakce) a nadsítného (zůstatek na největším sítu frakce). Množství podsítného a nadsítného se vyjadřuje v procentech hmotnosti vzorku a porovnává se s povolenými hodnotami (Tab.9) uvedenými v ČSN EN 12620 - Kamenivo do betonu. Tato norma stanovuje požadavky na vlastnosti kameniva a vymezuje kategorie, podle kterých je nutno deklarovat vlastnosti kameniva s ohledem na konkrétní použití. Kamenivo vyráběné a uváděné na trh podle této normy se dá použít do betonů s vysokými nároky na vlastnosti, jako jsou vysokohodnotné betony [8]. V praxi není možné tvary ideálních křivek zrnitosti přesně dodržet, proto jsou pro účely praxe vypracovány regulované čáry zrnitosti, které vymezují oblasti s dobrou a použitelnou zrnitostí a oblasti s nepřijatelnou zrnitostí kameniva. Tyto oblasti vhodnosti kameniva pro různě velké maximální zrno kameniva jsou zobrazeny na obr. 6. Hraniční čáry zrnitosti jsou označeny písmeny A, B, C s indexem D_{\max} .



Frakce	Velikost síta v mm										
	1	2	2,8	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	45
0/2		>85	100								
0/4				>85	100						
2/8	<5	<20				85-99	100				
4/8		<5		<20		85-99	100				
8/16				<5		<20		85-99	100		
16/32						<5		<20		85-99	100

Tab. 9: Požadavky na zrnitost dodávaných frakcí kameniva (čísla udávají propad síty v % hmotnosti, čtvercová síta v mm) [3]



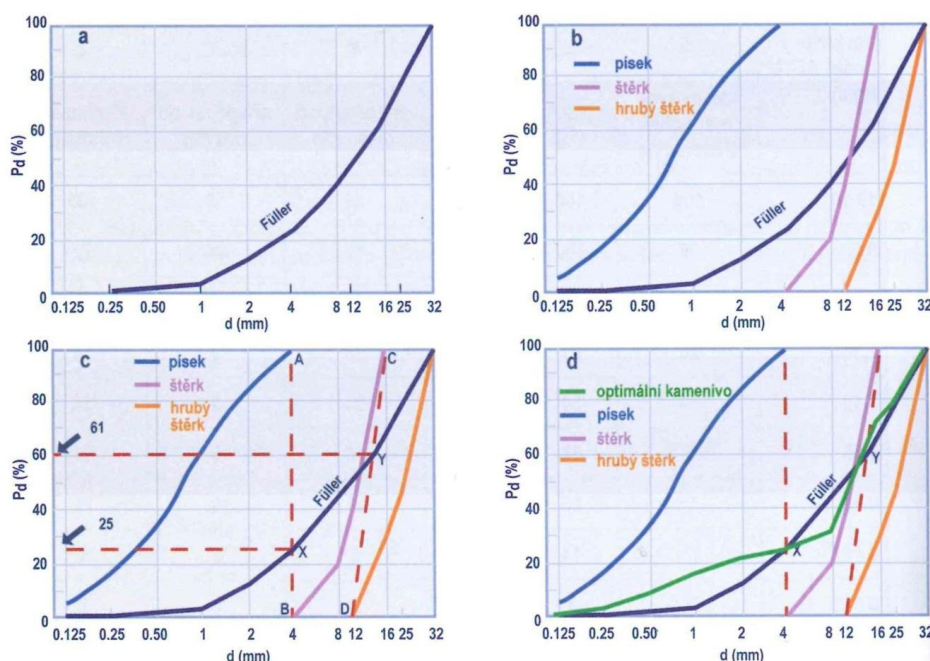
Obr. 6: Čáry zrnitosti kameniva (svislá osa = propad sítem v % hmotnosti, vodorovná osa = velikost síta v mm). Maximální zrno kameniva D_{max} : A=4mm, B=8mm, C=16mm, D=31,5mm, E=63mm. Oblasti: 1 a 5 - nevhodná zrnitost, 2 - křivka přerušované zrnitosti, 3 - dobrá zrnitost kameniva, 4 - ještě použitelná zrnitost kameniva. [3]



Optimální skladba kameniva

V reálu není snadné najít kamenivo, které by splňovalo požadavky optimální zrnitosti, kamenivo je buď příliš hrubé nebo příliš jemné. Docílit optimální zrnitosti kameniva s minimálním množstvím dutin a mezer mezi jednotlivými zrny je možné smícháním různých kameniv s rozdílnou frakcí.

Na obr. 7 je zobrazen postup skládání směsi kameniva z několika různých frakcí pro získání zrnitosti kameniva blížící se ideální křivce zrnitosti. Na obr.7a je ideální křivka podle Füllera, obr.7b je doplněn o křivky zrnitosti písku (0/4mm) a šterku (5/16mm a 20/32mm) získaných síťovým rozbořem. Body X a Y na obr.7c jsou průsečíky ideální Füllerovy křivky se souřadnicemi pro $d = 4\text{mm}$ a $d = 16\text{mm}$, což jsou hraniční hodnoty pro písek a šterk. Na ose Y odpovídají bodům X a Y hodnoty 25% a 61%. Frakci 0/4mm (písek) musí být nadávkováno 25%, všechen totiž propadne sítem 4mm. Frakce 0/4mm a 5/16mm (písek a šterk) musí být nadávkováno 61%, obě tyto frakce propadnou 16mm otvorem síta. Písku musí být 25%, na šterk tedy zbývá 61% - 25% = 36%. Obsah frakce 20/32mm (hrubý šterk) bude odpovídat doplňku 61% do 100%, tedy 39%. Vynásobením jednotlivých propadů všech tří druhů kameniva hodnotami 0,25, 0,36 a 0,39 a sečtením těchto tří hodnot získáme křivku zrnitosti optimální směsi kameniva (obr.7d)



Obr. 7: Křivka zrnitosti podle Füllera a síťový rozbor pro reálné a optimální kamenivo.[1]

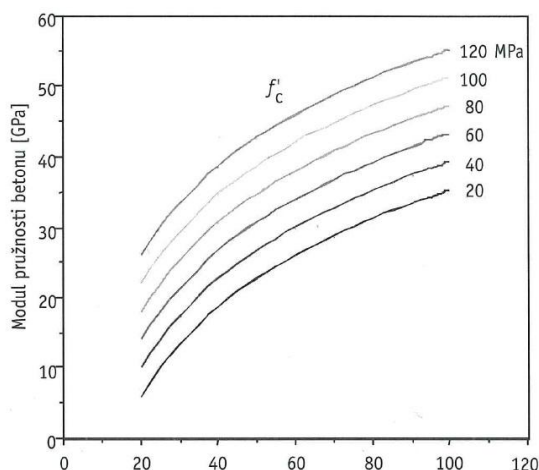


3.3.2.2 *Mechanické vlastnosti kameniva*

Pevnost zrn kameniva je jedním z nejdůležitějších faktorů při výběru kameniva do vysokohodnotných betonů. Jak už bylo zmíněno, tlaková pevnost betonu roste s klesajícím vodním součinitelem. Pokud ale zrna kameniva nemají dostatečnou pevnost, s poklesem vodního součinitele nemůže být očekáván růst tlakové pevnosti betonu a kamenivo se tak stává nejslabším článkem, protože jeho pevnost omezuje velikost tlakové pevnosti betonu. Pro vysokohodnotné betony je nejvhodnější přírodní kamenivo drcené, protože vykazuje oproti těženému kamenivu vyšší pevnosti. Při návrhu složení betonu by se měla uvažovat pevnost kameniva alespoň 1,5x větší, než je pevnost navrhovaného betonu.

Pevnost se určuje jako pevnost v tlaku vlastní hmoty kameniva (výřezem zkušebních krychlí matečné horniny) nebo jako pevnost sypaného kameniva stlačením ve válci. Pro posouzení mechanických vlastností kameniva (odolnosti proti drcení) se používá zkouška Los Angeles, při které se vloží kamenivo spolu s ocelovými koulemi do otáčejícího se bubnu, následně se proseje přes dané síto a zjistí se procentuální úbytek zbytku na síti. Čím vyšší má být pevnost a trvanlivost navrhovaného betonu, tím menší musí být úbytek kameniva.

Další důležitou mechanickou vlastností kameniva je modul pružnosti. Druh kameniva velice ovlivňuje výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu, s rostoucí hodnotou modulu pružnosti kameniva roste i modul pružnosti betonu viz obr.8. Moduly pružnosti kameniva se pohybují v širokých mezích od 10 GPa (pískovec) až po 115GPa u čediče. Pevnosti a moduly pružnosti různých druhů hornin jsou uvedeny v tab.10 a 11.



Obr.8 Předpokládané hodnoty modulu pružnosti betonu v závislosti na modulu pružnosti kameniva a na pevnosti betonu v tlaku. [2]



Hornina	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tvrdost dle Mohse	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Nasákavost [%]
Vyvěřeliny					
žula	2600–2800	6–7	120–240	10–35	0,2–1,2
diorit	2700–3000	6–7	135–215	20–40	0,2–0,7
gabbro	2800–3100	6–7	150–225	25–60	0,2–0,5
syenit	2500–2900	6–7	150–200	10–20	0,2–0,5
čedič	2050–3000	6	250–400	15–25	0,1–0,3
trachyt	2400–2900	6–7	60–70		1–2
diabas	2800–2980	6	120–220	20–45	0,1–0,8
porfyr, porfyrit	2550–2650	6–7	70–210	15–30	0,2–1,5
Vrstevnaté horniny					
pískovec – SiO ₂	2000–2400	proměnlivá	30–80	3,8	4,0–8,5
vápenec	2600–2850	3	40–180	10–25	0,2–0,6
dolomit	2650–2850	3,5	100–200	12–25	0,2–0,6
břidlice	2600–2750	7	100–190	30–100	0,3–1,5
Metamorfované horniny					
rula	2650–2750	6–7	120–250	24–50	0,1–1,2
křemenec	2500–2700	7	300		0,5
amfibolit	2700–3100	6	170–280		0,1–0,4
mramor	2700–2800	3	75–145	12–26	0,2–1,0
serpentin	2500–2850	3–4	60–140	10–23	0,1–2,0

Tab. 10: Druhy hornin a jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. [3]

Hornina	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti [GPa]
žula, syenit	160 – 280	40 – 70
diorit, gabro	170 – 300	40 – 100
křemenný porfyr, andezit	180 – 300	25 – 65
čedič, melafyr	290 – 400	55 – 115
diabas	180 – 250	70 – 90
křemenec, droba	150 – 300	60 – 75
křemenný pískovec	120 – 200	10 – 45
vápenec dolomit	80 – 180	20 – 85
rula	160 – 280	10 – 30
amfibolit	170 - 280	45 - 50

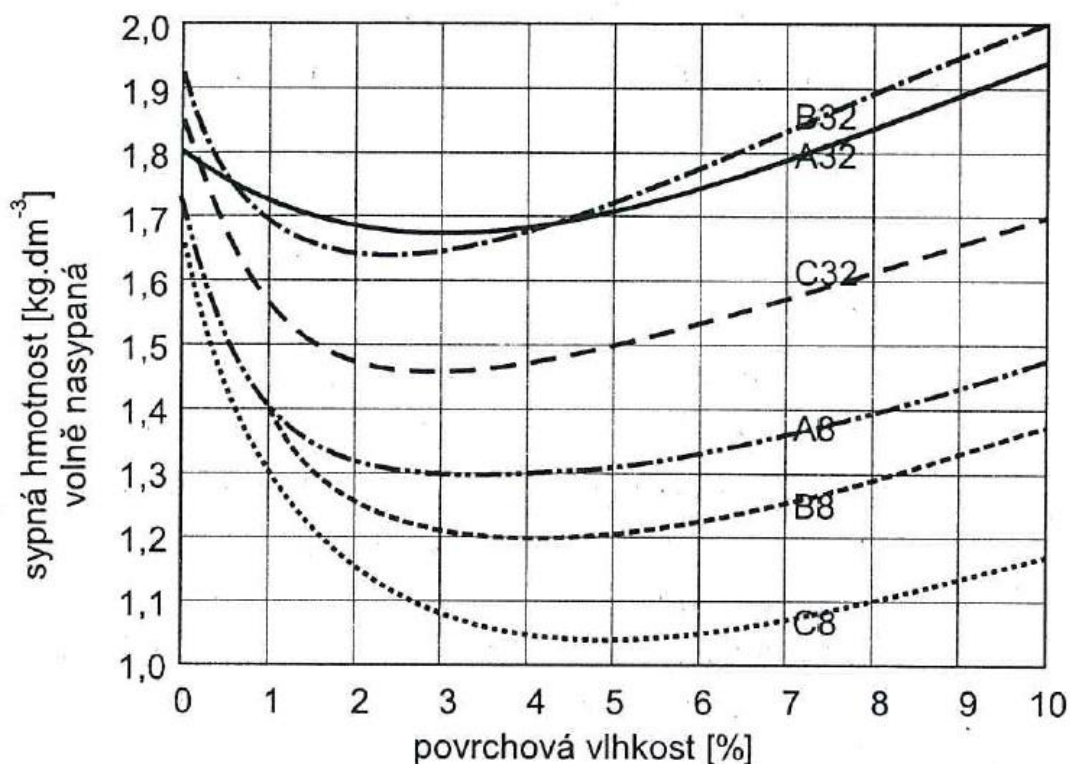
Tab. 11: Druhy hornin a jejich mechanické vlastnosti. [10]



3.3.2.3 Měrné hmotnosti kameniva

Měrné hmotnosti kameniva se uplatňují při jeho klasifikaci, při výpočtech různých charakterizujících hodnot určující vlastnosti kameniva, při návrhu betonové směsi a výpočtu množství jednotlivých složek, dále jsou měrné hmotnosti používány při dimenzování zásobníků kameniva apod.

1. **Měrná hmotnost** ρ [kg/m³] je hmotnost objemové jednotky hmoty kameniva bez pórů.
2. **Objemová hmotnost** ρ_K [kg/m³] je hmotnost objemové jednotky hmoty kameniva včetně pórů. Objemové hmotnosti různých druhů hornin jsou uvedeny v tab.8.
3. **Sypná hmotnost** ρ_K [kg/m³] je hmotnost objemové jednotky hmoty kameniva ve volně sypaném nebo setřeseném stavu. Sypnou hmotnost kameniva ovlivňuje jeho vlhkost viz obr.9 [3 Technologie betonu 35]



Obr. 9: Vliv vlhkosti na sypnou hmotnost kameniva podle zrnitosti na obr. 5. [3]



3.3.2.4 Tvar zrn a mezerovitost kameniva

Zrna kameniva mají různé velikosti a tvary. Tvar zrn kameniva je charakterizován tvarovým indexem, který udává poměr mezi největším a nejmenším rozměrem jednotlivých zrn kameniva, tedy poměr délky k šířce nebo tloušťce. Pro stanovení tvaru zrn se nejdříve roztřídí zkušební navážka kameniva na základě poměru jejich délky (L) k tloušťce nebo šířce (t) pomocí dvoučelistového posuvného měřidla. Následně se vypočítá tvarový index jako hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr největšího a nejmenšího rozměru (L/t) je větší než 3 a vyjádří se jako % z celkové hmotnosti zkoušených zrn. Tvarový index větší než 3 nemá být větší než 20-50%, z tohoto množství může připadnout nejvýše 15% na zrna s tvarovým indexem větším než 5. Tyto hodnoty nás informují o množství tvarově nevhodných (nekubických) zrn.

Rovnice pro výpočet tvarového indexu kameniva:

$$SI = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \cdot 100$$

M_1 hmotnost zkušební navážky [g]

M_2 hmotnost nekubických zrn [g] ($L/t > 3$)

Pro betonářské účely je ideální tvar zrn kameniva rovnoosý, tedy kulovitý nebo kubický, kdy poměr hlavních os a rozměrů jednotlivých zrn je přibližně stejný, tedy kamenivo s tvarovým indexem blízcím se hodnotě 1. Pokud mají zrna nepravidelný tvar, jako je jehlicovitý, plochý nebo destičkovitý, vytvářejí značnou mezerovitost, zvláště je-li jich větší množství. Pevnost betonů roste s jeho hutností, mezerovitost kameniva by měla být co nejmenší. Mezerovitost kameniva udává podíl dutin a mezer mezi jednotlivými zrny k celkovému objemu kameniva. Mezerovitost kameniva o dobré zrnitosti bývá v setřeseném stavu 0,16 - 0,24, tj. podíl dutin a mezer činí 16 -24 %.

Rovnice pro výpočet mezerovitosti kameniva:

$$M = \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_K} \right)$$

ρ_S sypná hmotnost [kg/m³]

ρ_K objemová hmotnost kameniva [kg/m³]



Protažená a plochá zrna, jejichž tvarový index je větší než 3, mají menší pevnosti a jsou z technologického důvodu nevhodná. Dále mají zrna s nepravidelnými tvary větší povrch oproti pravidelným kubickým zrnům, což vede ke zvýšení množství záměsové vody a z důvodu zachování vodního součinitele i ke zvýšení množství cementu.

3.3.2.5 *Vlhkost a pórovitost kameniva*

Jedním z faktorů, které ovlivňují výslednou kvalitu betonu je vlhkost kameniva. Vlhkost kameniva má vliv na pevnost, mrazuvzdornost, pórovitost a trvanlivost ztvrdlého betonu, a samozřejmě také na zpracovatelnost čerstvého betonu. Vlhkost kameniva totiž ovlivňuje množství záměsové vody v čerstvém betonu. Vodní součinitel u vysokohodnotných betonů musí být co nejmenší. Přidáním vlhkého kameniva do betonové směsi se zvýší vodní součinitel, to sice zlepší zpracovatelnost čerstvého betonu, ale negativně ovlivní tlakovou pevnost ztvrdlého betonu. Proto je důležité při návrhu betonové směsi brát vlhkost kameniva v úvahu.

Vlhkost kameniva je způsobena nasáknutím, případně ulpíváním vody na povrchu jednotlivých zrn. S vlhkostí úzce souvisí pórovitost kameniva. Pórovitost udává objem pórů a dutin v zrnech kameniva. Kamenivo obsahuje otevřené póry, které se naplňují vodou, této vlhkosti se nazývá nasákavost kameniva.

Rovnice pro výpočet pórovitosti kameniva:

$$P_K = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_K}{\rho}\right)$$

ρ_K objemová hmotnost [kg/m³]

ρ měrná hmotnost kameniva [kg/m³]

Množství celkové volné vody z povrchu a pórů kameniva se určuje vysušením zkušební navážky v sušárně, kdy je kamenivo sušeno na $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Vlhkost je potom vyjádřena jako hmotnostní úbytek v procentech po sušení.



Rovnice pro výpočet vlhkosti kameniva:

$$h = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100$$

m hmotnost vlhkého kameniva

m_0 hmotnost vysušeného kameniva

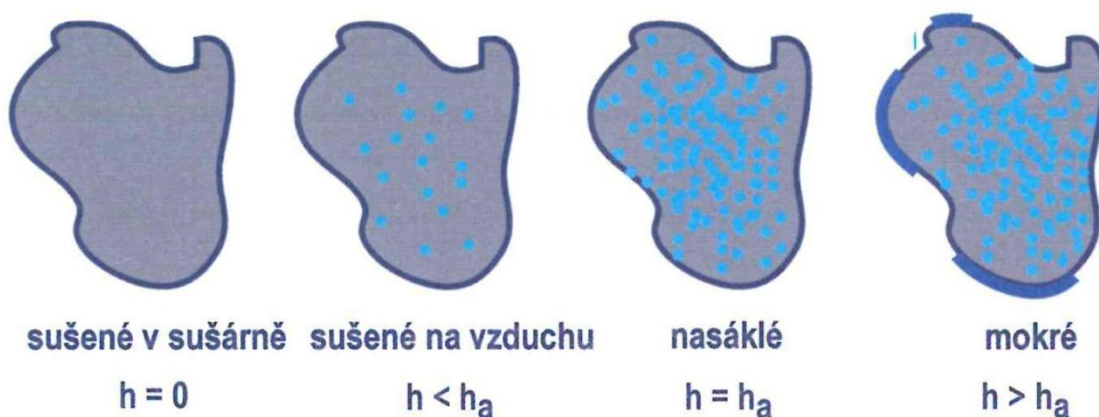
Nasákavost kameniva je vlhkost, při které je kamenivo nasycené vodou, ale jeho povrch je suchý. Stanovuje se podobným způsobem jako vlhkost kameniva, ale před sušením se zkušební navážka povrchově osuší. Procentuální hodnoty nasákavosti pro různé druhy hornin jsou uvedeny v tab.8.

Rovnice pro výpočet nasákavosti kameniva:

$$h_A = \frac{m_{NPSK} - m_0}{m_0} \cdot 100$$

m_{NPSK} hmotnost kameniva v nasyceném stavu, jehož povrch je suchý

Na obr.10 jsou schematicky znázorněny 4 vlhkostní stavy kameniva. První stav znázorňuje kamenivo vysušené v sušárně při $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($h = 0$), druhý stav zobrazuje kamenivo přirozeně suché ($h < h_A$), třetím stavem je kamenivo v nasyceném stavu ($h = h_A$) a poslední čtvrtý stav znázorňuje kamenivo vlhké, neboli mokré ($h > h_A$)



Obr. 10: Schematické znázornění různě vlhkého kameniva. [1]



Vliv vlhkosti na vlastnosti betonu

Kamenivo v nasyceném stavu povrchově suché má největší praktický význam, protože do tohoto stavu se kamenivo dostane krátce po namíchání betonové směsi, kdy záměsová voda vyplní otevřené vnitřní póry zrn. V tomto nasyceném stavu se také měří objemová hmotnost kameniva, aby mohla být jeho hmotnost převedena na objem a opačně. Pokud má kamenivo větší vlhkost, než v nasyceném stavu ($h > h_A$), musí být přebývající voda započítána do vodního součinitele. Dávka záměsové vody musí být o tuto vodu snížena. Pokud má naopak kamenivo vlhkost nižší než v nasyceném stavu ($h < h_A$), nebo je případně kamenivo vysušené ($h = 0$), bude kamenivo záměsovou vodu nasakovat a tím dojde ke snížení vodního součinitele. V tomto případě musí být množství záměsové vody navýšeno o vodu, kterou kamenivo po smíchání cementové směsi nasákne.

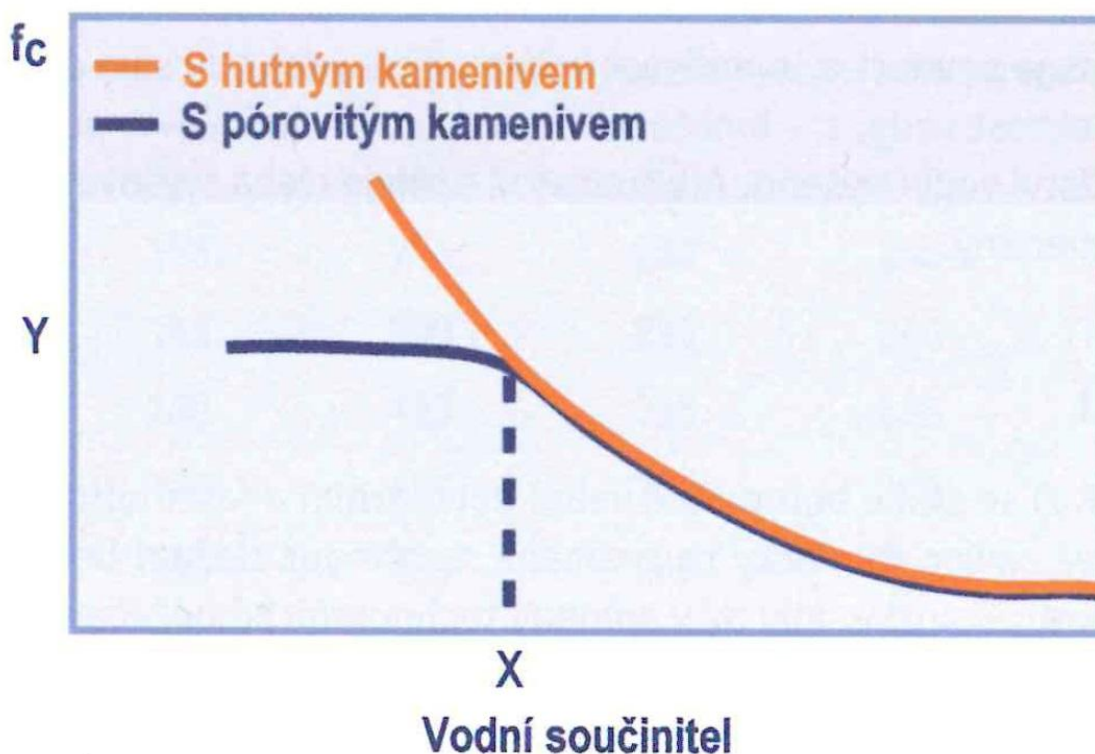
Mokrý kamenivo ($h > h_A$) způsobí nárůst vodního součinitele, zlepší zpracovatelnost betonu, ale sníží výslednou tlakovou pevnost betonu. Suché až vysušené kamenivo ($h < h_A$) má opačný účinek.

Mrazuvzdornost kameniva další vlastnost, která závisí na jeho pórovitosti. Kamenivo, které není odolné vůči působení mrazu není možné použít do betonu vystavenému střídavému zmrazování a rozmrazování. Provzdušňovací přísady napomáhají cementové matici před působením ledu, ale nezlepší vlastnosti kameniva, které není mrazuvzdorné. Porušení kameniva působením mrazu je zapříčiněno póry v kamenivu, které jsou zaplněny vodou. Po zamrznutí vody v pórech dochází ke zvětšení jejího objemu přibližně o 9% a dochází tak k vývoji hydraulických tlaků. Tyto škodlivá napětí vznikají pouze v pórech kameniva určité velikosti (několik μm). U menších pórů, díky zakřivení povrchu, k zamrznutí vody nedochází, protože v mikropórech je teplota tuhnutí menší. U větších pórů než několik μm také nedochází k vývoji nebezpečných napětí. Krystalky ledu se vytvoří, ale ještě nezamrzlá voda je vytlačována do cementové matrice a tím dochází k redukci napětí v kamenivu.

Pro vysokohodnotný beton je třeba použít velmi hutné kamenivo s vysokou pevností (se snižujícím vodním součinitelem u vysokohodnotných betonů roste pevnost cementové matrice a kamenivo se stává nejslabším článkem) a minimální pórovitostí. Na obr.11 je znázorněna závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli při použití



hutného a pórovitého kameniva. Při snížení vodního součinitele u pórovitého kameniva pod hodnotu X již nedochází k nárůstu pevnosti, pevnost zůstává konstantní na hodnotě Y , protože snižováním vodního součinitele roste pevnost cementové matrice a k porušení betonu dochází v kamenivu. V případě hutného a pevného kameniva dochází k nárůstu pevnosti betonu.



Obr. 11: Vliv pórovitosti kameniva na pevnost v tlaku. [1]

3.3.2.6 Škodlivé látky

Kamenivo používané do betonu musí splňovat podmínky zohledňující absenci škodlivých látek, které by mohli v průběhu životnosti konstrukce snižovat trvanlivost betonu. Mezi tyto látky patří chloridy, sírany, reaktivní silika, jíly a organické látky.

1. Chloridy - obsah chloridů v kamenivu u vyztužených betonů může být maximálně 0,05% z důvodu ochrany výztuže před korozi. U prostých betonů hrozí pouze krystalizace solí na povrchu betonu, tzv. výkvětů, které se objevují na konstrukcích vystavených střídavému mokru a suchu. Chloridy obsahuje především kamenivo těžené



z mořského dna. Chloridy jsou rozpustné ve vodě a proto je mořské kamenivo zbavováno chloridů v pračkách kameniva.

2. Sírany - limitní hodnota síranů v kamenivu je 0,2%. Vyskytují se ve formě sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nebo anhydritu (CaSO_4). V zatvrdlém betonu hrozí vlivem síranů ke vzniku vnitřní síranové koroze, při které dochází ke vzniku sekundárního ettringitu doprovázeného expanzí, která vyvolává nerovnoměrná napětí v betonu a hrozí jeho popraskání. V cementu se vyskytují také sírany, jsou přimíchávány ke slínku jako zpomalovače tuhnutí. Primární ettringit vzniká v prvních hodinách hydratace cementu, vzniká rovnoměrně kolem všech zrn cementu, když je beton ještě plastický a nemá negativní dopad na beton. Kamenivo obsahující sírany nebo sirníky, které mohou časem oxidovat na sírany, nemůže být těchto složek zbaveno a musí být z výroby betonu vyloučeno.

3. Reaktivní silika - některé formy křemene (SiO_2) reagují s alkáliemi (draslík a sodík) obsaženými v cementu a tvoří rozpínavé alkalicko-křemičité hydráty, které porušují cementovou matici. Tato reakce se nazývá alkalicko-křemičitá, projevuje se odprýskanými kousky betonu nebo mozaikou trhlin, a snižuje trvanlivost betonu. Jedná se o korozi betonu, která je těžko předvídatelná. Jako opatření proti vzniku alkalicko-křemičité reakce se užívá vysokopecních, pucolánových nebo směsných cementů, které působí jako inhibitory.

4. Jíly a jemné částice - jemné částice obsažené v kamenivu, jako jsou např. jíly, bahno nebo prach, nadměrně zvětšují povrch kameniva a mohou oslabovat vazby mezi zrny kameniva a cementovou maticí. Zhoršují tedy mechanické vlastnosti betonu, hlavně negativně ovlivňují pevnost betonu, ale nezpůsobují jeho degradaci. Jemné částice mohou být z kameniva odstraněny praním. Maximální dovolené množství odplavitelných částic drobného kameniva předepisují ČSN v rozmezí 1,5% až 3 % celkové hmotnosti kameniva podle druhu a třídy kameniva.

5. Organické látky - organické látky obsažené v kamenivu mohou ovlivnit hydratační proces a snížit mechanické vlastnosti betonu a neovlivňují přímo trvanlivost betonu.



3.3.3 Kamenivo pro vysokohodnotný beton

Obecně kamenivo v betonu ovlivňuje jeho objemovou hmotnost, modul pružnosti a tlakovou pevnost, dále zlepšuje objemovou stabilitu a trvanlivost betonu. Při výběru kameniva přidávaného do vysokohodnotných betonů je zapotřebí používat kamenivo kompaktní a hutné, s minimální pórovitostí, vysokou pevností a minimem dislokací. Z hlediska vlhkosti kameniva je optimální, když jsou zrna v nasyceném stavu, kamenivo nesmí být vlhké ani vysušené, jinak ovlivňuje velikost vodního součinitele. Z petrografického hlediska jsou vybírány horniny o vysokých pevnostech jako je vápenec, syenit, gabro, diabas, diorit, žula nebo čedič. Pevnost kameniva by měla být větší, než je pevnost navrhovaného betonu, aby nebylo kamenivo nejslabším článkem betonu a neomezovalo jeho tlakovou pevnost. Kamenivo drcené se vyznačuje vysokými pevnostmi, oproti kamenivu těženému, které má nižší pevnosti, ale z hlediska minimalizace dislokací je vhodnější. Kamenivo nesmí obsahovat škodlivé látky, které by snižovali trvanlivost betonu. Povrch kameniva musí být kvalitní, zbaven nečistot, vrstviček jílu, jemných částic a organických látek. Pro vysokohodnotné betony se používají menší frakce kameniva, s velikostí maximálního zrna kameniva do 10 - 12mm (kap. 3.3.3.1.). Tvar zrn kameniva by měl být kulovitý nebo kubický s tvarovým indexem blízcím se 1. Zrnitost kameniva ovlivňuje jeho soudržnost s cementovým tmelem, s hutností kameniva roste pevnost betonu, mezerovitost by tedy měla být co nejmenší. Ke stanovení vhodné zrnitosti kameniva slouží optimalizované granulometrické křivky, které stanovují poměrové zastoupení jednotlivých frakcí kameniva. Doporučené množství kameniva u běžných betonů je 70-75%, pro vysokohodnotné betony doporučené množství kameniva nelze určit, závisí totiž na množství použitého cementu, velikosti maximálního zrna kameniva a na množství jemnozrnných příměsí. Receptury vysokohodnotných betonů, které určují poměrové zastoupení jednotlivých složek betonu a tedy i množství kameniva v betonu, se navrhují experimentálně a za pomoci různých analytických metod (kap. 4).



3.3.3.1 Velikost maximálního zrna kameniva

Při volbě velikosti maximálního zrna kameniva (D_{\max}) existuje jistá kontroverze, která se týká účinků D_{\max} na pevnost betonu. Z hlediska betonářské praxe může být zvětšením D_{\max} dosaženo určité redukce množství záměsové vody, ovšem z hlediska technologie vysokohodnotného betonu nemusí být nárůst pevnosti v důsledku zvětšení D_{\max} dostatečný k tomu, aby vyvážil ztráty plynoucí z opačných důsledků. Prvním tímto důsledkem je, že při zvětšení D_{\max} se zóna mezi kamenivem a ztvrdlou cementovou pastou (tranzitní zóna) stává rozsáhlejší a více heterogenní. Druhým důsledkem zvětšení D_{\max} je snížení pevnosti zrn kameniva, protože pro většinu hornin jsou větší zrna méně pevnější než ta menší. Je tomu tak proto, že snížením velikosti zrna dochází k eliminaci vnitřních defektů zrn (póry, mikrotrhliny, inkluze měkkých minerálů). Při výrobě vysokohodnotných betonů o vysokých pevnostech je obecně používáno menších frakcí kameniva. Z praxe a na základě experimentálních poznatků je známo, že je obtížné vyrábět vysokohodnotné betony o vysokých pevnostech ($>100\text{MPa}$) s D_{\max} větším než 25mm. Maximální zrno hrubé frakce kameniva u vysokohodnotných betonů by nemělo přesáhnout 10 - 12mm. Větší zrna způsobují nerovnoměrnost betonu, koncentrace napětí při zatížení a jsou náchylnější k výskytu dislokací a to má za následek snížení tlakové pevnosti betonu.

Velikost D_{\max} ovlivňuje dávku záměsové vody, a z důvodu zachování hodnoty vodního součinitele (w/c) současně ve stejném poměru ovlivňuje i množství cementu, aby byla dosažena požadovaná pevnost ztvrdlého betonu a konzistence čerstvého betonu. Závislost D_{\max} na množství záměsové vody pro dosažení požadované konzistence betonu popisuje Lyseho pravidlo (kap. 3.2.), které říká, že čím větší je maximální zrno kameniva, tím méně vody bude třeba pro dosažení dané konzistence.



3.4 Přísady a příměsi

Přísady a příměsi se používají při výrobě vysokohodnotných betonů přimícháváním do betonu za účelem modifikace některých vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu.

3.4.1 Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během mísení do čerstvého betonu v množství od 0,2% do 5% hmotnosti cementu. Přísady jsou běžně kapalné látky a rozdělují se na několik typů charakterizujících jejich hlavní funkci, která ovlivňuje určitou vlastnost betonu.

Rozdělení přísad dle ČSN EN 934-2 +A1 Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem:

- Plastifikační (vodoredukující)
- Superplastifikační (silně vodoredukující)
- Provzdušňovací
- Stabilizační (zadržující vodu)
- Hydrofobizační (těsnící, odpuzující vodu)
- Urychlující tuhnutí
- Urychlující tvrdnutí
- Zpomalující tuhnutí (retardační)

Přísady působí na cementovou suspenzi a jejich působení je závislé na druhu cementu. Jemněji mleté cementy s vyšším měrným povrchem vytváří větší reakční plochu a tím usnadňují chemickou nebo fyzikálně-chemickou reakci, nevýhodou cementů s vyšším měrným povrchem je, že se zrna cementu snadněji shlukují (agregují a flokulují). Účinnost přísad také ovlivňuje mineralogické složení cementu, především obsah C_3A , $CaSO_4$ a minerálů strusky, popílku a pucolánu. Chování přísady a reakci se zrny cementu ovlivňuje také koncentrace přísady, která se vždy vztahuje k hmotnosti cementu, minimální dávka přísady je 2g/1kg cementu a maximální je 50g/1kg cementu.



Před přidáním přísady do betonu při míchání, je nutné předem rozmísit přísadu s částí záměsové vody.

Přísady lze rozdělit podle fyzikálně-chemického působení na částice cementu do dvou skupin:

1. Látky chemicky aktivní, které ovlivňují kinetiku hydratace cementu (rozpuštění slínkových minerálů).
2. Povrchově aktivní látky, které jsou zadržovány (adsorbují) na povrchu zrn cementu nebo nově tvořících se novotvarů a ovlivňují kontakt částic s vodou, jsou buď hydrofilní nebo hydrofobní.

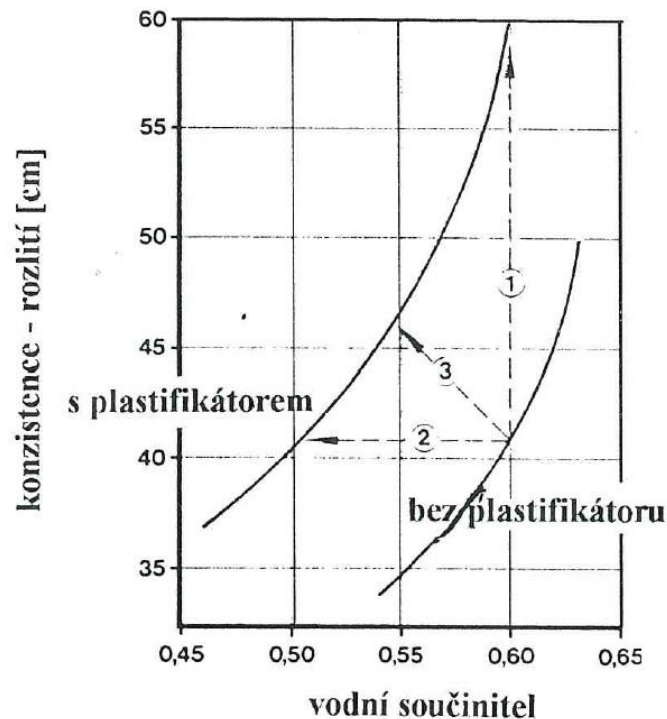
Pro zkoušení vlastností a účinností přísad jsou používány definované referenční složky, malta a beton. Přísady musí splňovat obecné požadavky na homogenitu (přísada nesmí segregovat), barvu, obsah efektivních složek přísady, relativní hustotu, hodnotu pH, obsah chloridů, odchylky od deklarovaného obsahu sušiny, obsah alkálií a další. Přísada nesmí korozivně napadat ocelovou výztuž.

3.4.1.1 Plastifikátory a superplastifikátory

Plastifikátory a superplastifikátory jsou nejdůležitější přísadou vysokohodnotných betonů, jsou to látky redukující potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu nebo umožňují zlepšit zpracovatelnost čerstvého betonu při zachování hodnoty vodního součinitele. Snížení hodnoty vodního součinitele má za následek zrychlení tuhnutí a snížení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Lepší zpracovatelnost čerstvého betonu je předpokladem pro snížení dotvarování a smrštění betonu. Kromě zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu dochází při snížení hodnoty vodního součinitele užitím plastifikátorů ke zvýšení pevnosti a trvanlivosti betonu. Záměry použití plastifikátorů dokresluje graf na obr.12, na kterém je vidět redukce záměsové vody za použití plastifikátorů pro dosažení stejné zpracovatelnosti betonu. Požadavkem je, že plastifikační přísadou musí být množství vody sníženo o více než 5% při zachování stejné konzistence čerstvého betonu a u superplastifikátorů o více jak 12%. Přidáním plastifikátoru má pevnost v tlaku za 7 a 28

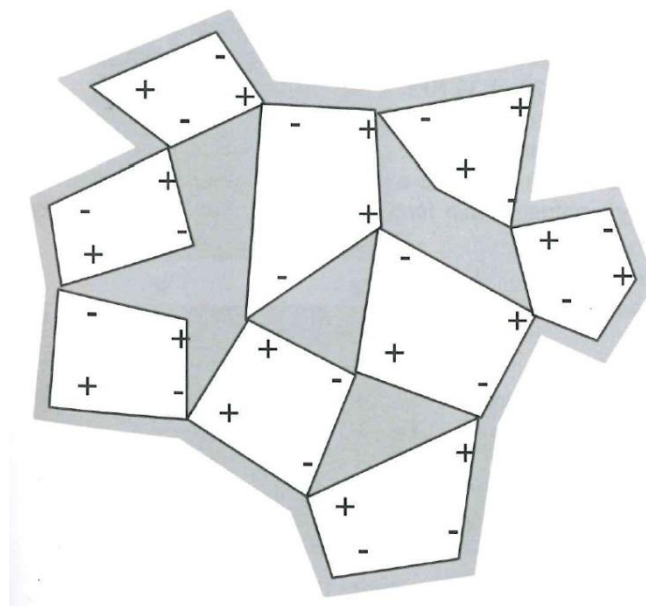


dní vzrůst nejméně na 110% pevnosti referenčního betonu, u superplastifikátorů má být pevnost navýšena nejméně na 115% pevnosti referenčního betonu. Konzistence čerstvého betonu s plastifikační přísadou se nesmí za 30 minut po přidání přísady změnit proti původnímu stavu, a musí vykazovat určitý vzrůst konzistence oproti referenčnímu betonu.



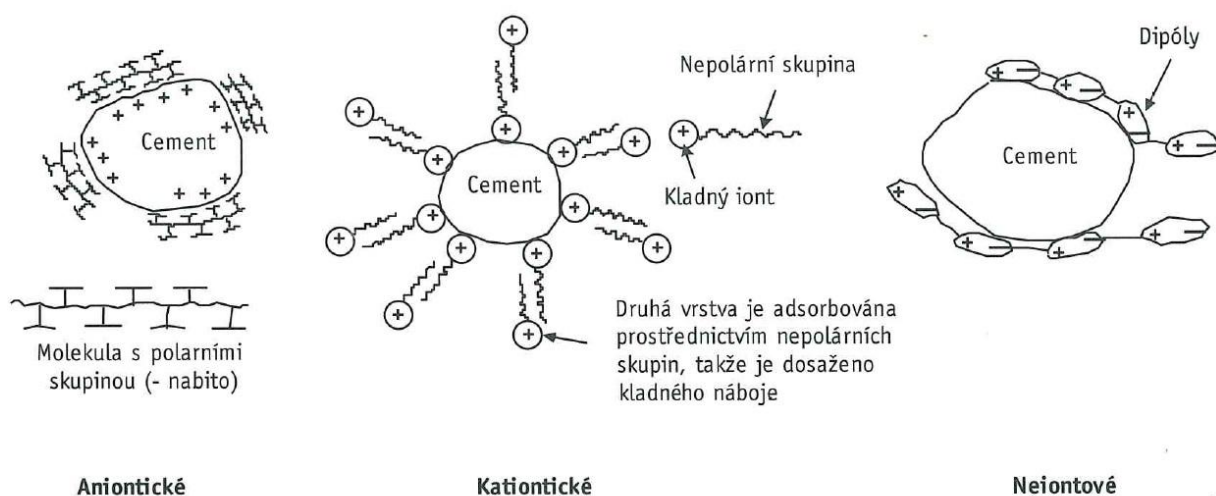
Obr. 12: Vliv plastifikační přísady na konzistenci při různém vodním součiniteli. [3]

Při smíchání cementu s vodou mají zrna cementu tendenci ke flokulaci (obr. 13), část vody se zachycuje uvnitř flokulí a pak tato voda není k dispozici na ztekucení směsi a pro zachování zpracovatelnosti betonu je zapotřebí použít více vody než je potřeba k úplné hydrataci cementových zrn. Molekuly plastifikačních přísad mají dispergační (rozptylující) účinky a neutralizují povrchové náboje na povrchu cementových zrn, tím mohou snížit jejich přirozený sklon k flokulaci a redukovat množství záměsové vody.



Obr. 13: Částice cementu ve flokulovaném stavu [2]

Plastifikační přísady mohou být dle chemismu kationtové (+), aniontové (-) nebo ne-iontové povahy. Kationtové a aniontové typy plastifikátorů se skládají z molekul, které mají na konci řetězce výrazný náboj. Tento náboj neutralizuje opačné elektrické náboje na povrchu cementových částic. Molekuly nepolárních plastifikátorů působí jako dipóly, které obklopují zrno cementu (obr. 14).



Obr. 14 Různé typy dispergujících činidel [2]



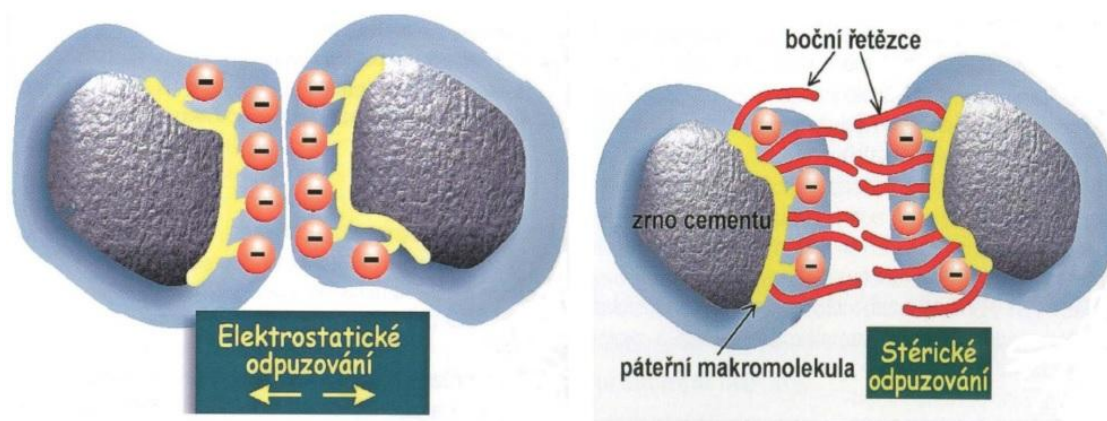
Jedním z prvních plastifikátorů byly lignosulfonáty, získávané z papírenských odpadů (ze sulfíťových výluhů po chemickém zpracování dřeva). Tento produkt byl levný a pro použití do betonu vyžadoval pouze jednoduchou úpravu. Použitím lignosulfonátů jako plastifikační přísady je možné redukovat množství vody v betonu pouze o 5-10%. Nedostatkem je zbytkový obsah sacharidů, při vyšší redukcí vody dochází k nežádoucím vedlejším účinkům způsobených sacharidy (retardace hydratace cementu) a povrchově aktivními činidly (zachycování vzduchových bublin) přítomnými ve dřevě. Použitím plastifikátorů na bázi lignosulfonátů je možné dosáhnout tlakové pevnosti betonu maximálně kolem 50-60 MPa. Tyto plastifikátory se v dnešní době nepoužívají.

Později byly vyvinuty přísady, které známe dnes. Nazývají se superplastifikátory a umožňují snížit hodnotu vodního součinitele pod 0,2 a současně zachovat dobu zpracovatelnosti na 45 - 90 minut.

Existují čtyři skupiny superplastifikátorů:

- sulfonáty naftalenu (naftalenové superplastifikátory),
- sulfonáty melaninu (melaninové superplastifikátory),
- lignosulfáty s nízkým obsahem sacharidů a povrchově aktivních činidel,
- polykarboxyláty.

Nejvyšší účinnost mají polykarboxyláty, díky tomu že jejich hlavní řetězec molekul, který nese záporný náboj a váže se na zrna cementu, je doplněn postranními elektricky zápornými řetězci. Postranní řetězce jsou orientovány do prostoru a zabraňují tak více v přiblížení cementových zrn k sobě (stérické odpuzování). Oproti přísadám na bázi sulfonátů, které postranní řetězce nemají, je působení polykarboxylátů díky postranním řetězcům rozsáhlejší a trvá delší čas, než hydratační produkty eliminují jejich plastifikační účinky (obr.15).



Obr. 15: Princip působení superplastifikátorů na bázi sulfonátů (vlevo) a polykarboxylátů (vpravo). [10]

3.4.1.2 Provdzušňovací přísady

Provdzušňovací přísady, přidávané do čerstvého betonu během mísení, vytváří velký počet uzavřených vzduchových pórů jemně rozložených v betonu (póry o velikosti 0,01-0,3mm navzájem vzdálené méně než 0,2mm, větší póry a větší vzdálenosti mezi nimi už negativně ovlivňují trvanlivost betonu). Póry přerušují síť kapilár a mění tak pórovitou strukturu cementového kamene. Betony s jemně rozptýlenými vzduchovými póry se vyznačují lepší odolností proti působení mrazu a agresivitě mořské vody. Póry snižují hydrostatický tlak v pórovité struktuře betonu, protože jsou expansním prostorem pro zvětšující se objem krystalů ledu při zamrznání vody v kapilárách, a krystalů solí (rozmrazovací soli, soli z mořské vody). Vedlejším příznivým účinkem provdzušňovacích přísad je snížení spotřeby záměsové vody (až o 5%), snížení segregace a odměšování vody v čerstvém betonu, zlepšená plasticita (u hubených čerstvých betonů).

Vliv provdzušňovací přísady na trvanlivost betonu určuje součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů, který udává kritérium na vzdálenost pórů od sebe navzájem. Objem pórů, jejich rozložení a velikost ovlivňují následující parametry [3]:

- Druh a množství provdzušňovací přísady (dávkovací množství je jen 0,05-0,5% hmotnosti cementu).



- Druh, jemnost mletí a množství cementu. Pro jemnější cement je zapotřebí větší dávky provzdušňovací přísady pro zachování stejného množství pórů.
- Vodní součinitel. Se zvětšujícím vodním součinitelem dochází ke zvětšení vzduchových pórů.
- Zrnitost kameniva, zvýšením podílu jemné frakce se zvyšuje obsah vzduchových pórů při zachování stejné dávky provzdušňovací přísady a stejné konzistenci betonu.
- Maximální velikost zrna kameniva, čím větší je maximální zrno kameniva, tím menší je potřebné množství pórů.
- Vibrací dochází k vytěsnění části pórů.
- Pevnost betonu klesá přibližně o 5% na každé 1% provzdušnění, pevnost nesmí klesnout v důsledku provzdušnění pod 75% pevnosti referenčního vzorku betonu za 28 dní.
- Provzdušňovací přísady mají často plastifikační účinky, při stejné zpracovatelnosti snižují množství vody asi o 2% s každým 1% vzduchových pórů.

3.4.1.3 Stabilizační a hydrofobizační (těsnící) přísady

Stabilizační přísady se používají za účelem redukce segregace, odlučování vody v suspenzi (bleeding - krvácení betonu). Odlučování nastává v důsledku sedimentace tuhých částic. Požadavkem při použití stabilizační přísady je, že se nesmí pevnost betonu snížit na více než 80% pevnosti referenčního betonu a současně musí být dosaženo minimálně 50% redukce odměšování vody. Použitím přísady dochází k redukci obsahu volné vody, která je vyjádřena jako rozdíl mezi celkovou vodou a vodou potřebnou ke smáčení tuhých částic, nebo ke zvýšení celkového měrného povrchu tuhých částic. Stabilizační přísady lze rozdělit do několika skupin podle jejich účinnosti. První skupinou jsou plastifikační nebo provzdušňovací přísady, které jsou zároveň stabilizačními přísadami, snižují totiž obsah volné vody při zachování stejné nebo zlepšené zpracovatelnosti čerstvého betonu. Druhou skupinou jsou anorganické přísady a především příměsi, které zvětšují měrný povrch tuhých částic v jednotce objemu čerstvého betonu. Třetím typem jsou organické a anorganické přísady, které nejdříve



zvětšují měrný povrch tuhých částic a následně reagují s volnou vodou a fyzikálně nebo chemicky ji vážou.

Hydrofobizační přísady jsou chemické látky, které omezují kapilární kondenzaci ve ztvrdlém betonu. Posouzení použití této přísady se děje podle dvou kritérií. Prvním kritériem je snížení kapilární kondenzace, při stejné konzistenci betonu, za 7 dní o 50% a za 90 dní o 60% oproti referenčnímu betonu. Druhé kritérium hodnotí betony o stejném vodním součiniteli, kapilární kondenzace musí být menší, než 80% kondenzace referenčního betonu za 7 a 28 dní. Při aplikaci hydrofobizačních látek dochází ke zvýšení povrchové energie částic, zvětšují smáčecí úhel, a tím snižují výšku elevace vody v kapilárách. Hydrofobizační látky se přimíchávají do čerstvého betonu, v tom případě je hydrofilní celá betonová hmota, mohou se ale aplikovat pouze na povrch hydrofilních látek, jako je beton, aby vodu odpuzovaly.

Mezi hydrofobizační látky patří také **těsíci přísady**, které snižují pórovitost cementového kamene (objem makropórů) a zvyšují jeho hutnost. Během hydratace dochází k tvorbě nerozpustných sloučenin, které zmenšují průřez kapilár nebo je zcela zaplní. Zamezení vzlinání a nasáknutí vody také napomáhají provzdušňovací přísady, které přerušují otevřené, souvislé kapiláry v betonu.

3.4.1.4 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu

Urychlovače jsou chemické látky přísady, které zvyšují stupeň hydratace cementu. Přísady urychlující tuhnutí zkracují dobu přechodu betonu ze stavu plastického do tuhého (působí v průběhu prvních minut hydratace cementu). Urychlovače tvrdnutí slouží k urychlení vývoje počátečních pevností betonu (působí v průběhu prvních dní hydratace cementu), urychlovače tvrdnutí mohou zároveň urychlovat tuhnutí betonu.

Vedle obecných požadavků nesmí urychlovače tuhnutí způsobit pokles pevnosti v tlaku po 28 dnech pod 80% pevnosti referenčního betonu, po 90 dnech musí být pevnosti srovnatelné. Minimální doba tuhnutí má být 30 min, při 20°C se zkracuje doba tuhnutí minimálně o 40%, při +5°C je doba srovnatelná s dobou tuhnutí referenčního betonu při 20°C. Požadavky na urychlovače tvrdnutí jsou posuzovány dle pevnosti v



tlaku, je požadováno dosáhnout minimálně 120% pevnosti referenčního betonu za 24 hodin a minimálně 90% pevnosti, kterou referenční beton dosáhne za 28 dní. Při snížené teplotě +5°C musí urychlovač tvrdnutí zajistit za 48 hodin minimálně 130% pevnosti referenčního betonu v normových podmínkách.

V současnosti jsou vyráběny dva druhy urychlovačů tuhnutí, přísady (alkalické) na bázi křemičitanu sodného (výrazně snižují dobu tuhnutí cementu, ale i dlouhodobou pevnost, mohou podpořit alkalicko-křemičitou reakci v případě přítomnosti amorfního oxidu křemičitého v kamenivu) a na bázi vodné emulze síranu hlinitého (mají menší účinnost ve zkrácení doby tuhnutí, ale neovlivňují dlouhodobou pevnost). Urychlovače tuhnutí jsou převážně používány do stříkaného betonu.

Urychlovače tvrdnutí jsou používány pro potřeby zvýšení počátečních pevností betonu, např. v zimních obdobích, kdy jsou počáteční pevnosti betonu sníženy vlivem klesající teploty. Dříve byly používány k urychlení kinetiky hydratace cementu chloridové urychlovače, v současné době není jejich používání dovoleno z důvodu zvýšené hrozby koroze výztuže. Pro obsah chloridových iontů vztažených na hmotnost cementu a příměsí platí následující limity, v prostém betonu maximálně 1% (Cl 1,0), v železobetonu maximálně 0,2 a 0,4% (Cl 0,20 a Cl 0,40) a v předpjatém betonu maximálně 0,1 a 0,2% (Cl 0,10 a Cl 0,20). V současné době se používají látky na bázi dusičnanu vápenatého, dusitanu vápenatého, vápenatých solí thiokyanatanu, thiosíranu nebo mravenčanu a tri-etanolaminu.

Většina těchto přísad je spojena s nežádoucími efekty jako je např. snižování dlouhodobé pevnosti betonu, výkvěty nebo koroze oceli. Rozhodující je také dávka přísady, některé přísady při nízkých dávkách akcelerují hydrataci cementu a při vyšších dávkách můžou působit jako zpomalovače.

Do přísad urychlujících tvrdnutí cementu patří také nemrzoucí (protizmrazovací) přísady, které zamezují zmrznutí vody v pórech cementového kamene. Tyto přísady obsahují obecně 2 složky, urychlovač tvrdnutí a chemickou látku, která snižuje bod tuhnutí vody (bod mrazu). Touto látkou je např. karbamid nebo vysokomolekulární alkoholy.



3.4.1.5 Retardační přísady

Retardační neboli zpomalovací přísady se používají k prodloužení doby manipulace s čerstvým betonem, především při vysokých, kdy okolní vysoká teplota urychluje hydrataci cementu. Tyto přísady prodlužují dobu tuhnutí cementu, dobu přechodu čerstvého betonu ze stavu plastického do stavu tuhé látky. V těchto látkách je omezen obsah chloridů do 0,1%, maximálně mohou provzdušňovat beton do 2% a pevnost betonu v tlaku za 7 dní musí být vyšší než 80% a za 28 dní vyšší než 90% pevnost tlaku referenčního betonu. Retardační přísady mají oddálit počátek tuhnutí minimálně o 90 minut a konec tuhnutí má být nejvíce o 360 minut delší než u referenčního betonu. Pokud není překročena kritická koncentrace přísady, při které může dojít k úplnému zastavení hydratace cementu, pomalé tuhnutí cementu omezuje vznik trhlinek a beton má obvykle po 28 dnech vyšší pevnosti oproti betonu bez zpomalovací přísady. Účinnosti přísad jsou závislé na jejich druhu, koncentraci a také na druhu cementu. Při použití retardačních přísad dochází v čerstvém betonu ke vzniku sloučenin na povrchu zrn cementu, které zpomalují difúzi molekul vody a zpomalují tak kinetiku (hydrataci) cementu. Principem zpomalovacího procesu hydratace je zamezit rozpouštění C_3A , zabránit tvorbě monosulfátů a růstu krystalů ettringtu. Pro zpomalovací přísady se používají organické látky jako je glukóza, lignosulfonát, karboxylové kyseliny apod., nebo anorganické látky na bázi solí mědi a zinku. Dále jsou používány speciální přísady ve formě superzpomalovačů, které se používají pro znovuoživení nespotřebovaných betonů, tyto přísady se skládají ze dvou složek a dávkují se odděleně. První složkou je stabilizátor, pomocí něhož lze dosáhnout stabilizace betonu v plastickém stavu několik hodin až dní. Druhou složkou je aktivátor (urychlující přísada), který opět nastartuje (zrychlí) hydrataci cementu.

3.4.1.6 Ostatní přísady

Do této skupiny přísad patří ojediněle používané přísady, kterými jsou:

Inhibitory koroze

Tyto přísady vytváří pasivní povrch oceli proti korozivnímu prostředí (agresivní prostředí pro korozi betonu). Korozivní prostředí v betonu nastává při použití kyselých



aktivačních přísad, při karbonataci betonu nebo při pronikání chloridů. Inhibitory koroze podle množství dávky urychlují nebo zpomalují tuhnutí cementu, proto by měly být kombinovány s dalšími sloučeninami, aby byl potlačen jejich urychlovací nebo zpozdřovací charakter. Tyto přísady neovlivňují reologické vlastnosti čerstvého betonu, ale většinu z nich snižuje pevnost betonu. Mezi inhibitory koroze patří např. dusitan sodný a vápenatý.

Inhibitory alkalicko-křemičité reakce

Alkalicko-křemičítá reakce vzniká mezi alkalickými solemi draslíku nebo sodíku a formami reaktivního oxidu křemičitého obsaženém v kamenivu. Tato reakce je rozpínavá a vyvolává vznik trhlin v betonu. Inhibitory na bázi solí lithia fungují na principu přeměnění nerozpustného a rozpínavého křemičitanu sodného a draselného, který způsobuje alkalicko-křemičitou reakci, na rozpustný a neškodný křemičitan lithný. Při porušení povrchu betonu z důvodu vzniku alkalicko-křemičité reakce se lithné soli nanášejí na povrch betonu. Dalším inhibitorem je silan, který má hydrofobní charakter a odpuzuje vodu potřebnou pro alkalicko-křemičitou reakci. Ekonomicky výhodnější způsob, jak zamezit v tvorbě alkalicko-křemičité reakce, je použití pucolánu nebo mleté strusky.

Biocidní přísady

Tyto přísady omezují biologickou korozi betonu, použití těchto přísad musí být zdravotně nezávadné a nesmí ovlivňovat vlastnosti betonu. Biologická koroze nastává v prostředí příznivém pro šíření, množení a aktivitu mikroorganismů (bakterie, plísně, řasy, lišejníky) snižujících trvanlivost betonu.

Přísady zamezující smrštění

Při nedostatečném ošetřování betonu dochází ke smršťování a vzniku tahových napětí a pokud jsou tyto napětí větší než pevnost betonu v tahu, dochází ke vzniku trhlin. Vznikem trhlin se zvyšuje riziko koroze výztuže, toto riziko je zvýšeno u konstrukcí z vysokohodnotných betonů, u kterých dochází k autogennímu smršťování. U betonů s nízkým vodním součinitelem dochází k tvorbě velmi jemné sítě mikropórů, která odvádí vodu ze silnějších kapilár. Tyto kapiláry vysychají v důsledku stále pokračující hydratace cementu a nedostatečného ošetřování betonu, tento jev se nazývá



samovysychání. Přísady zamezující smrštění snižují povrchové napětí vody a tím způsobují pokles kapilárního tlaku, který je vyvolán tvorbou kapilárních menisků zodpovědných za smršťování cementové pasty. Smršťování může být těmito přísadami při nedostatečném ošetřování betonu pouze potlačeno, ne úplně odstraněno. Nejlepším způsobem, jak předejít smršťování, je co nejdříve odstranit bednění a následně okamžitě zahájit ošetřování betonu vodou. Zmírnění tvorby trhlin od smršťování je dosahováno také použitím rozptýlené výztuže, především polymerových vláken.

Plynotvorné přísady

Plynotvorné přísady jsou chemické látky, které při míchání a ukládání betonu reagují za vzniku plynu, který nakypřuje beton. Používají se při výrobě pórobetonu. Příkladem plynotvorné přísady je hliníkový prášek, který v alkalickém prostředí reaguje za vzniku vodíku.

Pěnotvorné přísady

Během míchání se dostává do betonu, díky pěnotvorným přísadám, fyzikální cestou velké množství vzduchových bublin. Bubliny jsou dostatečně pevné a stálé, a umožňují tvorbu pěnobetonu s nízkou objemovou hmotností.

Expanzní přísady

Expanzivní přísady způsobují v průběhu hydratace cementu trvalé a nevratné rozpínání, které se využívá pro injektážní a záливkové malty.

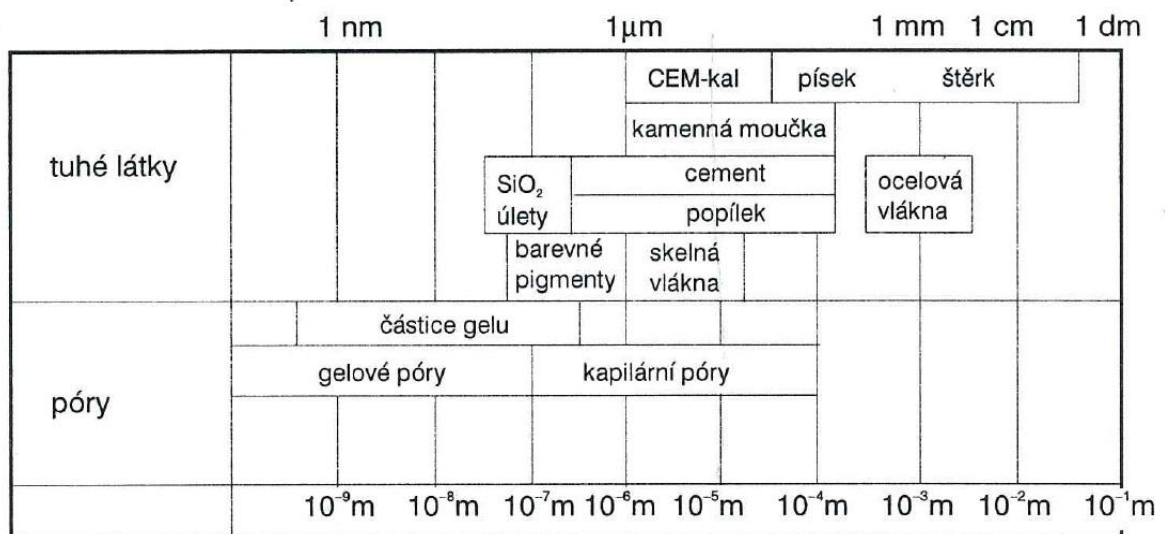
Adhezní přísady

Adhezní přísady zlepšují soudržnost a přídržnost betonu k již zatvrdlému betonu nebo k jiným materiálům.



3.4.2 Příměsi

Příměsi jsou látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. Jsou to většinou práškové látky omezené velikostí zrn do 0,125 mm (jemné částice), mezi další jemné částice betonu patří cement, podíl jemných zrn kameniva a jemné částice obsažené v cementovém kalu (odpadní voda). Porovnání velikostí různých částic je uvedeno na obr.16. Příměsi se dávají v množství okolo 20% hmotnostní dávky cementu. Přidávají se do cementu při mletí slínku nebo při míchání čerstvého betonu.



Obr. 16: Spektrum velikosti částic a pórů v betonu. [3]

Rozeznáváme dva typy příměsí. Prvním druhem jsou **inertní příměsi**, které se neúčastní procesu hydratace a plní většinou funkci mikroplniva v betonu. Jedná o jemné částice (do 0,125mm), které vyplňují prostory mezi hrubšími zrny kameniva, působí jako plnivo neboli filler. Množství jemných částic závisí na skladbě zrnitosti hrubších částic, optimální množství lze nejlépe stanovit zvážením setřesené směsi, která má mít co nejvyšší hmotnost (sypná hmotnost v setřeseném stavu). Mezi inertní příměsi patří jemně mleté horniny a moučky, především mletý vápenec, granodioritový a čedičový prach nebo křemenná moučka. Tyto inertní přísady snižují pórovitost betonu, zvyšují jeho hutnost, trvanlivost, vodonepropustnost a beton je odolnější proti chemické korozi. Zvyšují přídržnost k podkladu a soudržnost čerstvého betonu. Musí být ale stále



zachována zpracovatelnost čerstvého betonu. Dále inertní přísady zvyšují pevnost tranzitní zóny tím, že z ní vytlačují vodu, která se dále může podílet na hydrataci. Jemné částice přísad ale zvyšují množství potřebné záměsové vody, a tím i částečně snižují pevnost betonu a zvyšují jeho smrštění.

Mezi inertní příměsi se dále řadí anorganické pigmenty, které slouží k probarvení betonu. Inertní příměsi jsou i polymery, které jsou přidávány do čerstvého cementového betonu pro zvýšení pevnosti v tahu a přilnavosti k povrchu, tento beton je označován PPC (polymer cement concrete). Převládajícím pojivem je cementový kámen a příměs polymeru je pouze doplňkovým pojivem. Obě pojiva spolu chemicky nereagují, vzájemně spolupůsobí jen v rámci mezimolekulárních sil. Polymery mohou sloužit i jako výhradní pojivo, potom jsou takové betony označovány jako PC (polymer concrete), nebo mohou být ztvrdlé betony polymery impregnovány, potom se jedná o PIC (polymer impregnated concrete).

Druhým typem jsou **latentně hydraulické látky**, tyto látky mají schopnost zúčastnit se hydratace, tzn. při reakci s Ca(OH)_2 ve vodním prostředí ztvrdnou, při kombinaci s cementem se podílejí se na tvorbě C-S-H gelu. Podobné vlastnosti jako latentně hydraulické látky mají pucolány, které obsahují vysoký podíl aktivního SiO_2 . Rozdíl mezi pucolány a latentně hydraulickými látkami je pouze v obsahu některých minerálů, oba dva typy látek se účastní hydratace. Mezi latentně hydraulické látky se řadí popílky, silika (křemičitý úlet) a vysokopecní struska. Hydraulická aktivita je schopnost látky, reakcí s Ca(OH)_2 , ve vodním prostředí za normální teploty ztvrdnout. Podmínkou této reakce je alkalické prostředí vytvářené budiči hydraulicity. Hydroxid vápenatý (Ca(OH)_2) vzniká spolu s C-S-H gelem v prvotní fázi hydratace cementu. Ca(OH)_2 je zárodkem portlanditu, který je snadno vyluhovatelný a má malou pevnost. Latentně hydraulické příměsi tento nežádoucí produkt hydratace v přítomnosti vody přeměňují na C-S-H gel. Příměsi, podílející se na hydrataci, lze rozdělit do tří skupin dle jejich chemického složení [3]:

I. Látky, které vykazují pucolánové vlastnosti a obsahují více než 47% amorfního SiO_2 , který je rozpustný v kyselém i alkalickém prostředí. Do této skupiny patří křemičité úlety, dále uměle vyráběné křemičité látky (metakaolín), diatomity a opál.



2. Do druhé skupiny patří pálené hlíny, popílky a struska. Tato skupina látek, vykazující latentně hydraulické vlastnosti, obsahuje převážně SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a další příměsi.

3. Třetí skupinou jsou pucolány, jsou to látky obsahující sopečné sklo vzniklé rychlým ochlazením manganu. Mezi pucolány patří látky sopečného původu, jako tufy, trasy a sopečné sklo, které obsahují vysoký podíl SiO_2 . Pucolány se v dnešní době používají jen výjimečně.

Většina dnes používaných minerálních příměsí vzniká při výrobě jiných surovin, jako odpadní produkt. Své uplatnění našly až s příchodem vysokohodnotných betonů. Účinnost příměsí je závislá na jemnosti mletí, která se pohybuje v rozsahu $0,1-10\mu\text{m}$ a je pro každou příměs jiná. Příměsi pozitivně ovlivňují pevnost betonu (pevnost tranzitní zóny), zpracovatelnost a hutnost struktury betonu. Použitím minerálních příměsí dochází kromě zlepšení reologie čerstvého betonu a mechanických vlastností ztvrdlého betonu, také ke snížení spotřeby cementu a plastifikátorů, což je výhodné z ekonomického hlediska. Další výhodou příměsí je snižování hydratačního tepla, které se uvolňuje při hydrataci cementu, což je výhodné u masivních betonových konstrukcí. Příměsi je možné používat jednotlivě nebo kombinovat dva a více druhů, především s křemičitým úletem, protože je z hlediska nárůstu pevnosti nejúčinnější. Při návrhu složek betonové směsi je výběr druhů příměsí a jejich množství jednou z nejobtížnějších překážek.

3.4.2.1 Popílky

Popílky jsou zachycovány v odlučovačích v uhelných elektrárnách, jsou odpadním produktem spalování uhlí. Popílky mají proměnlivé chemické, mineralogické a granulometrické složení, závislé na druhu spalovaného uhlí a způsobu odlučování z exhalátorů (z elektrostatických odlučovačů je popílek jemnější, oproti mechanickým). Menší variabilitu vlastností mají popílky z černého uhlí. Pro příměsi do betonů se tedy hodí více, oproti hnědouhelným popílkům, které mají nepravidelný tvar zrn (v ČR 80% produkce popílků z uhlí hnědého). Popílky mají rozmanité složení a oproti křemičitému



úletu nebo strusce jsou nejméně reaktivní. Dle mineralogického složení, se popílků mohou a nemusí účastnit hydratace. Mineralogické složení popílků [3]:

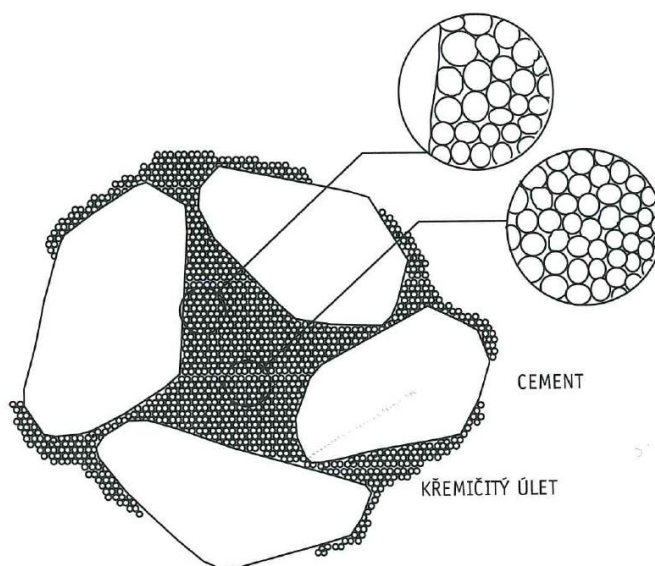
- Hydraulicky aktivní složky (různé formy vápníku, skla, hlinito-křemičité minerály),
- nehydraulické minerály, které někdy působí jako iniciátory hydraulicity (anhydrit, CaO, MgO),
- budící (iniciační) složky hydraulicity (sulfidy, alkalické kovy),
- inaktivní látky (krystalický křemen, hematit, magnetit, mullit, kyselé silikáty, nově vzniklé uhličitany).

Jemnost mletí popílků je srovnatelná s cementy ($250-400 \text{ m}^2/\text{kg}$), pohybuje v rozmezí $200-450 \text{ m}^2/\text{kg}$. Účinnost a kvalita popílků je závislá jejich chemickém složení a měrném povrchu. Většina popílků obsahuje větší množství skelné fáze (SiO_2) a působí jako pucolány. Množství popílkové příměsi se pohybuje v rozmezí 10-30% k dávce cementu. Příměsi popílků snižují hloubku karbonatace betonu, zvyšují odolnost proti krvácení (bleeding) a zpracovatelnost, ale současně zvyšují vodní součinitel, protože část záměsové vody je adsorbována na povrchu částic. Hydraulicky aktivní popílků nebo popílků v kombinaci s křemičitým úletem zvyšují dlouhodobou pevnost betonu. Vyšší dávky snižují počáteční pevnosti, ale zároveň redukuje produkci hydratačního tepla.

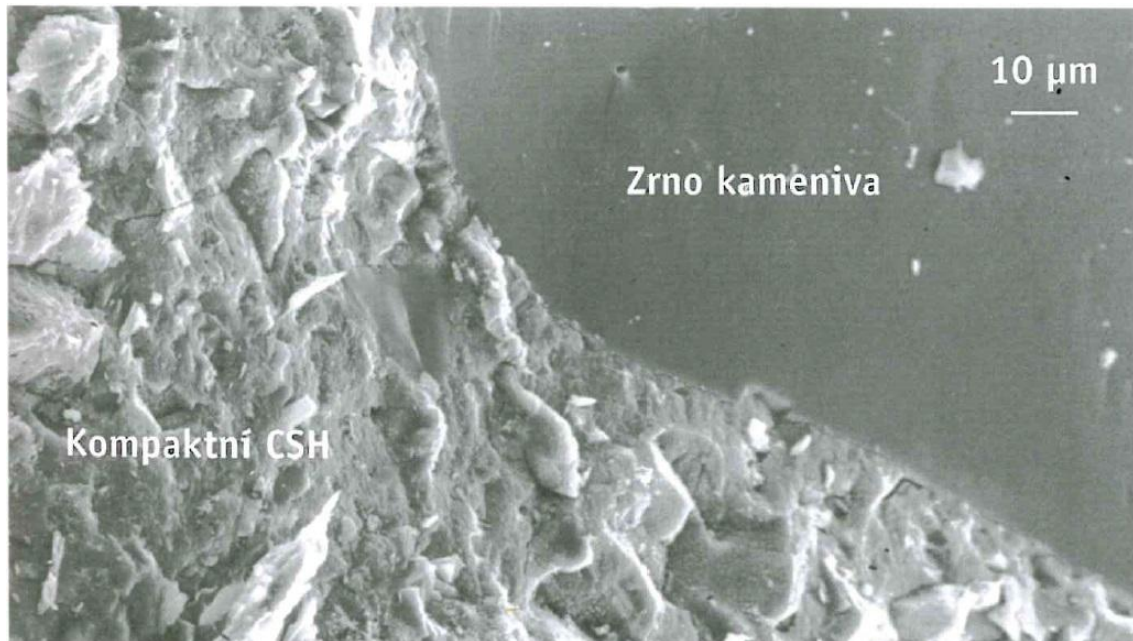
3.4.2.2 Křemičité úlety (mikrosilika)

Křemičité úlety jsou odpadním produktem některých hutnických provozů, při výrobě křemíku a jeho slitin (ferrosilicium) v elektrické obloukové peci. Během redukce křemíku vzniká plynný SiO. Tento plyn se následně ochlazuje, kondenzuje a oxiduje se ve formě velmi jemných částic SiO_2 , které jsou zachycovány v odlučovačích. Křemičité úlety mají stabilní složení, jsou tvořeny především sklovitou (amorfní) silikou - SiO_2 a malým množstvím nečistot, proto jsou označovány jako mikrosilika. Obsah siliky v křemičitých úletech závisí na typu prokukované slitiny, při výrobě čistého křemíku jsou hodnoty nejvyšší (více než 90%). Částice křemičitých úletů mají dokonalý kulovitý tvar o průměru v rozmezí $0,1-1(2) \mu\text{m}$, oproti průměrnému zrn

cementu, je průměrná částice křemičitého úletu 100x menší. Hodnoty měrného povrchu křemičitých úletů se pohybují v rozmezí 15000-25000 m²/kg. Křemičité úlety jsou dodávány ve čtyřech formách, v neupravené podobě (sypná hmotnost 200-250 kg/m³), v zahuštěné formě (sypná hmotnost 400-500 kg/m³), ve formě suspenze s přibližně 50% obsahem pevné složky nebo smíchané s cementem (6-10% příměsí). Křemičité úlety se vyznačují rychlou pucolanitou. Dokonale plní funkci filleru, v případě dobré dispergace cementových zrn za použití přídatku superplastifikátoru viz obr.17. S účinkem velmi jemných částic křemičitých úletů jako filleru také roste zpracovatelnost betonů s nízkým vodním součinitelem, mají ztekucující účinek. Tento reologický účinek křemičitých úletů (tvořen kuličkami) je přirovnáván k účinku ložiskových kuliček, jemné částice také vytěsňují vodu z mezer mezi flokulovanými cementovými zrny a tím zvyšuje podíl vody, která napomáhá lepší reologii čerstvého betonu. Díky křemičitému úletu je výsledná matrice betonu hutná a beton má vyšší tlakové pevnosti, jemné částice výrazně redukují segregaci (odměšování) vody a vytváří kompaktní mikrostrukturu s velice pevnou tranzitní zónou viz obr.18. Zároveň ale zvyšují potřebné množství záměsové vody. Křemičité úlety redukují pórovitost cementové pasty, čímž dochází ke snížení permeability (propustnost) betonu, a redukují hydratační teplo. Křemičité úlety se dávkuje v množství do 10% dávky cementu, při těchto hodnotách se projevují podstatné nárůsty pevnosti betonu, vyšší dávky už nemají výrazný vliv na tlakovou pevnost. Křemičité úlety jsou nenahraditelnou složkou vysokohodnotných betonů s pevnostmi přesahujícími 125MPa.



Obr. 17: Zaplnění prostoru mezi zrny cementu křemičitém úletem [2]



Obr. 18: Kompaktní C-S-H gel v betonu s křemičitými úlety. Ke zřejmé absence zóny rozhraní mezi ztvrdlou cementovou pastou a zrnem kameniva. [2]

3.4.2.3 Vysokopeční granulovaná struska

Struska vzniká jako odpadní produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Strusky jsou tvořeny nečistotami z železné rudy a koksu. Jejich složení je korigováno při metalurgickém procesu, mají tedy konstantní složení, hlavními sloučeninami jsou SiO_2 , CaO a Al_2O_3 s drobnými příměsemi Fe_2O_3 , MgO a síry (S^-). Roztavená struska má nižší objemovou hmotnost než surové železo, takže struska vždy plave na povrchu roztaveného železa. Zchlazování strusky může probíhat dvěma způsoby. Struska může být ponechána, aby volně chladla. V tomto případě vzniká krystalická struska, která nemá hydraulické vlastnosti a může být použita jako kamenivo do betonu. Druhý způsob chlazení strusky je vodou, při kterém tuhne ve skelném stavu a vyvíjí se u ní hydraulické vlastnosti. Hašení strusky může probíhat vypouštěním do vodního bazénu nebo může být hašena tekoucí vodou při vytékání z pece, v těchto případech vzniká granulovaná struska s drobnými částicemi o velikosti písku. Nebo může být hašena kombinací vody a vzduchu, tímto způsobem hašení vzniká peletizovaná struska používaná jako lehké kamenivo ve výrobě betonových tvárnic nebo tyto vzniklé sbalky peletizované strusky mohou být semlety a vzniká hydraulický prášek. Kvalita strusky je závislá na jemnosti mletí (většinou 340-420 m^2/kg) a na skelném charakteru. Struska



může být do betonů přidávána jako samostatná příměs nebo může být už přímo součástí (složkou) cementu. Dávkování strusky se pohybuje v rozmezí 15-30% hmotnosti cementu. Vysokopevní struska se účastní hydratace cementu, ovlivňuje tedy pevnost betonu. Hydratace je pomalejší, snižuje počáteční pevnosti, ale také velikost hydratačního tepla. Většinou se kombinuje s křemičitými úlety pro betony s tlakovou pevností do 125MPa.

3.4.2.4 Metakaolin

V případě metakaolinu se nejedná o odpadní produkt, ale o cílový výrobek. Tato látka s pucolánovými vlastnostmi vzniká vypalování kaolinů a kaolinitických jílu. Hlavními složkami je SiO_2 a Al_2O_3 . Měrný povrch metakaolinu se pohybuje v rozmezí 9000-18000 m^2/kg (velikost částic 1-10 μm). Díky svému složení, SiO_2 (cca 60%) a Al_2O_3 (cca 38%) s minimálním množstvím dalších příměsí, a jemným částicím se jedná o nejučinnější latentně hydraulickou (pucolánovou) přísadu. Metakaolin zlepšuje reologické vlastnosti čerstvého betonu, zvyšuje pevnost betonu a snižuje jeho permeabilitu. Má pozitivní vliv na smrštění betonu. Uzavřením povrchu brání průniku tlakové vody a tvorbě výkvětů, zvyšuje odolnost proti vlivům agresivního prostředí. Množství metakaolinu do 3% hmotnosti cementu zlepšuje plastické vlastnosti cementu bez ovlivnění mechanických vlastností betonu. Obvyklé dávky metakaolinu se pohybují okolo 10%, při tomto množství jsou mechanické vlastnosti betonu ovlivňovány nejméně. Kromě zvýšení pevností také betony s příměsí metakaolinu vykazují rychlejší nárůst modulu pružnosti.



3.5 Vlákniťá (rozptýlená) výztuž

Rozptýlená výztuž je systém náhodně prostorově rozmístěných vláken v betonu. Betony obsahující rozptýlenou výztuž (vlákna) jsou označovány jako vláknobetony nebo drátkobetony v případě použití ocelových vláken. Účelem vláknité výztuže je zmenšit křehkost betonu a vytvořit duktilní konstrukční materiál s omezenými deformacemi smrštěním. Vlákna zlepšují fyzikálně - mechanické vlastnosti betonu, záleží ovšem na množství a druhu vláken. Mezi tyto vlastnosti patří:

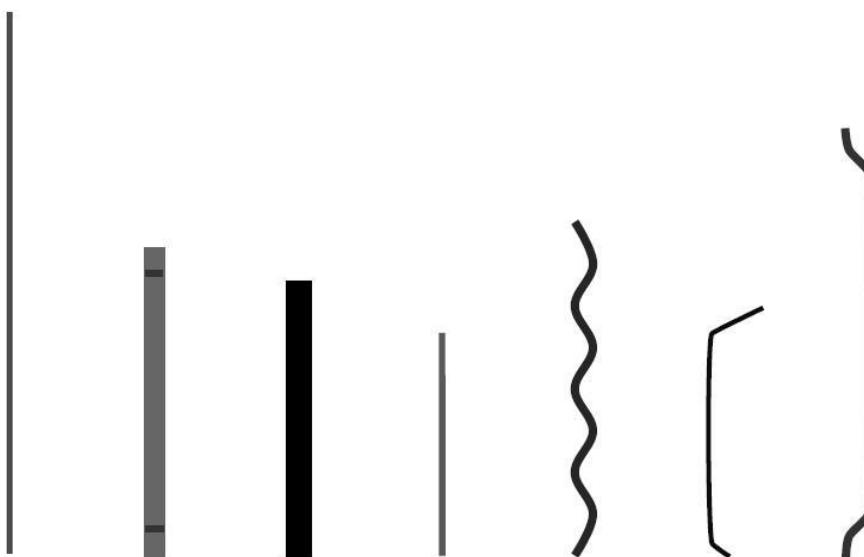
- Omezení nebo zamezení vzniku trhlin tím, že vláknitá výztuž zvyšuje pevnost betonu v tahu a v tahu za ohybu,
- Vlákniťá výztuž zvyšuje modul pružnosti a snižuje deformace betonu smrštěním,
- omezuje se křehkost betonu, dochází ke zvýšení houževnatosti (duktility) betonu a rázové pevnosti,
- Přidáním vláknité výztuže se zvyšuje únavová pevnost betonu tím, že vlákna přenáší sílu přes případnou trhlínu,
- Snižuje se vodopropustnost a zvyšuje odolnost vůči prudkým teplotním změnám.

V případě betonů vyztuženými vlákny jsou kladeny požadavky na technologickou kázeň během návrhu, výroby, zpracování a ošetřování betonu. Celkově se tedy použitím vláknité výztuže zvyšuje obtížnost technologie výroby betonu.

Vlákna jsou rozdělovány podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, na ocelová, syntetická (polymerová), skelná (skleněná), přírodní a karbonová(uhlíková). Na obr.19 a obr.20 jsou zobrazeny různé druhy vláknité výztuže. Účinnost vláken je ovlivněna jejich pevností, tvarem, průřezovým (štíhlostním) poměrem, což je poměr délky a ekvivalentního průměru vlákna, a objemovým zastoupením v betonu. Typ a materiál vláken se volí podle toho, co je od vláknité výztuže očekáváno. Vlastnosti různých druhů vláken jsou uvedeny v tab. 12.



Obr. 19: Polymerová mikrovlákná (nahore) a makrovlákná (dole). [4]



Obr. 20: Ocelová vlákna (drátky) do betonu [4]



Typ vláken	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Mezní protažení [%]	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Poznámka
akrylová	200–400	2,07	25–45	1100	
azbestová	550–960	82–138	asi 0,6	3200	
bavlněná	400–690	4,83	3–10	1500	
skelná	1000–3800	69	1,5–3,5	2500	
polyester houževnatý	720–860	8,28	11–13	1400	$d = 20\text{--}380 \mu\text{m}$
polyetylen	asi 690	0,14–0,41	asi 10	950	$d = 20\text{--}380 \mu\text{m}$
polypropylen	550–750	3,45	asi 25	900	$d = 20\text{--}380 \mu\text{m}$
minerální vlákna	480–750	69–117	asi 0,6	2700	
ocelová	270–2700	200	0,5–35	7800	
nylon houževnatý	750–820	4,14	16–20	1100	
celulózová, houževnatá	400–620	6,9	10–25	1500	
uhlíkatá	8,3	0,386		1630	$l = 3; 10 \text{ mm}$ $d = 14,5 \mu\text{m}$

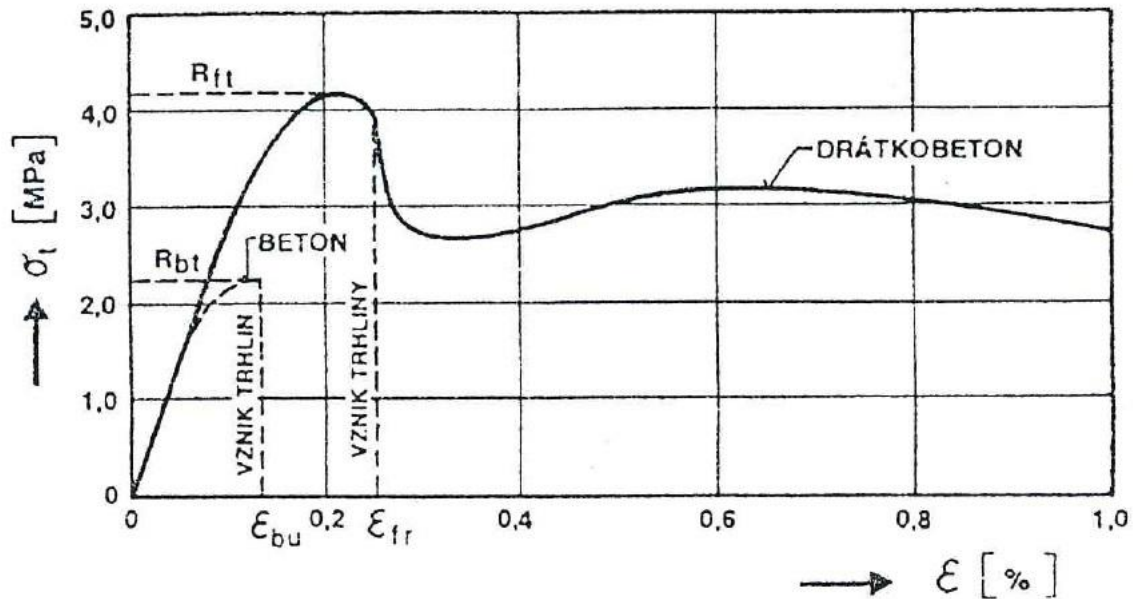
Štíhlostní poměr je 30 až 150; délka vláken 6 až 75 mm, průměr kulatých ocelových drátků je 0,25 až 0,76 mm, průměr profilovaných drátků (0,15–0,41) × (0,25–0,90) mm, skelná vlákna mají průměr 5–15 μm a mohou být ve svazcích 13 až 1300 μm.

Tab. 12: Vlastnosti vláken do betonu. [3]

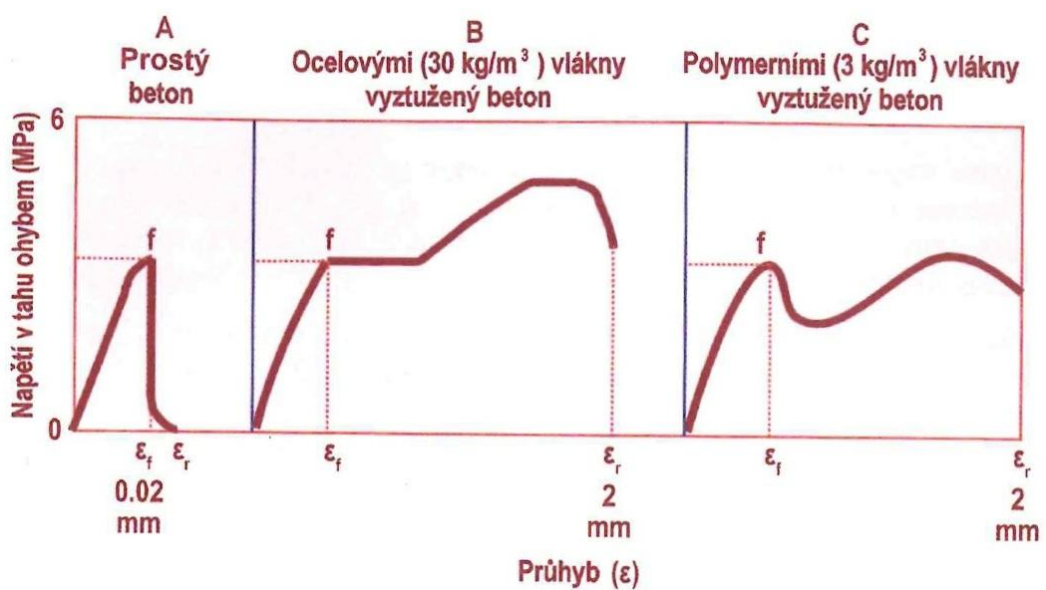
Pro zvýšení pevnosti v rázu, omezení objemových změn cementové matrice a vzniku trhlin jsou používány především jemná vlákna (přírodní, polymerová, skleněná). Pro zvýšení pevnosti betonu (především v pevnost v tahu ohybem) jsou zase nejpoužívanějším typem vlákna ocelová. Obr. 21 zobrazuje porovnání pracovních diagramů pro drátkobeton a prostý beton zkoušky tahu za ohybu, drátkobeton vykazuje o 50% vyšší pevnost v tahu ohybem, desetinásobnou houževnatost a nižší smrštění, oproti referenčnímu prostému betonu. Na obr. 22 je pracovní diagram prostého betonu, drátkobetonu a betonu vyztuženého polymerními vlákny, pro zkoušku tahu ohybem. Pro prostý beton (obr. 22 A) platí Hookeův zákon, mezi ohybovým napětím a deformací platí lineární vztah (deformace je přímo úměrná napětí). Tahovou pevnost v tomto případě představuje maximální napětí, při kterém dochází k prasknutí a porušení betonového prvku, prostý beton je křehký materiál. Drátkobeton (obr. 22 B) se zpočátku chová stejně jako prostý beton, až do vzniku prvních trhlin. Po vzniku trhlin nedochází ke kolapsu vzorku, ale po určité plastické prodlevě dochází k nárůstu napětí a poté



následuje jeho postupný pokles, drátkobeton vykazuje tažnost. Beton vyztužený polypropylenovými makrovláknými (obr. 22 C) vykazuje menší tahovou pevnost oproti drátkobetonu, ale z grafu je patrné zvýšení houževnatosti oproti prostému betonu. Betony s polymerovými jemnými vlákny se vyznačují dobrou zpracovatelností, oproti drátkobetonům.



Obr. 21: Pracovní diagram drátkobetonu ve srovnání s prostým betonem. [3]

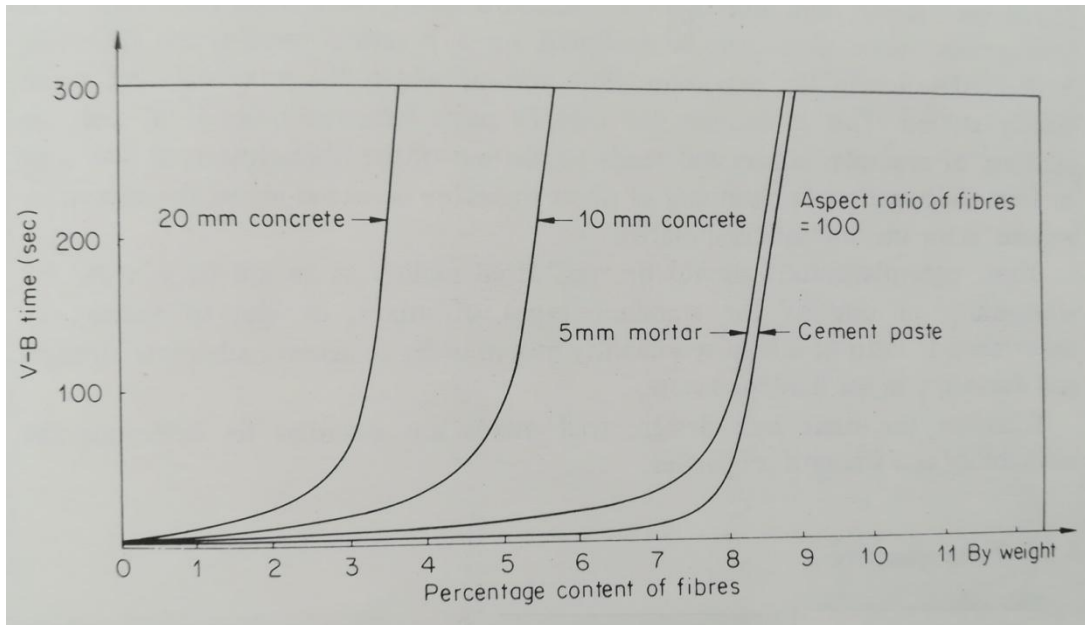


Obr. 22: Vliv vláken na průhyb betonu v závislosti na napětí v tahu ohybem. [2]

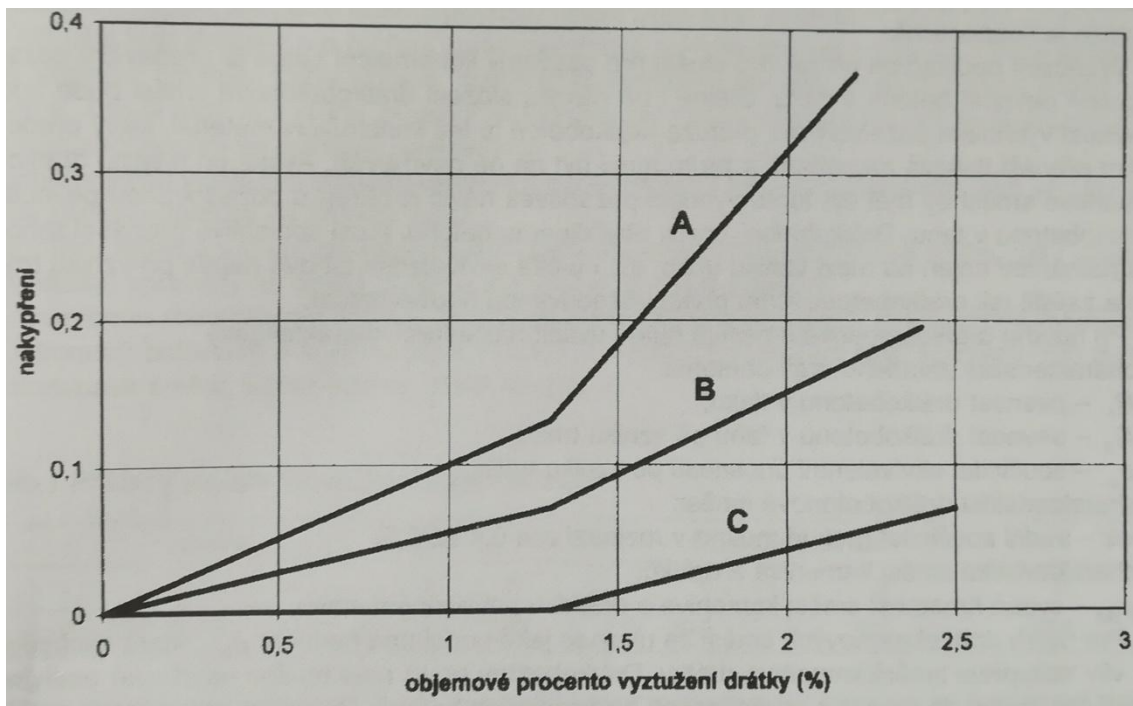


Ocelové drátky

Nejčastěji jsou používány v délkách 12 - 60 mm, tloušťky 0,25 - 1 mm a štíhlostního poměru 50 - 100. S větší štíhlostí drátků se zlepšuje jejich efektivnost, ovšem v betonu se štíhlejšími drátky dochází k většímu nakypření kameniva a zhoršuje se zpracovatelnost čerstvého betonu. Drátky mají různé tvary (přímá nebo tvarovaná - zalomené, ohnuté na koncích, zploštělé, profilované nebo jsou používány ocelové třísky) viz obr.20. Tvarová variabilita drátků má zajistit dostatečné kotvení v cementové matrici, dostatečné kotvení je podmínkou správného působení vláken. Z hlediska pevnosti se rozdělují ocelová vlákna na běžná (tahová pevnost 400 - 1450 MPa) a vysokopevnostní (tahová pevnost okolo 2000 MPa a více). Obvyklá dávka ocelových drátků je v rozmezí 40 - 200 kg/m³. Zpracovatelnost betonu ovlivňuje tvar, velikost, štíhlost, množství vláken a rozdělení vláken v betonu. Nerovnoměrně rozdělená vláknitá výztuž zhoršuje nejen zpracovatelnost betonu, ale i jeho fyzikálně - mechanické vlastnosti. Lepší zpracovatelnosti lze docílit použitím kratších vláken nebo zvýšením vodního součinitele, případně užitím plastifikačních přísad. Na zpracovatelnost drátkobetonů má také vliv velikost maximálního zrna kameniva. Graf na obr. 23 znázorňuje závislost zpracovatelnosti čerstvého betonu na množství drátků v betonu pro různé velikosti maximálního zrna kameniva. Svislá osa udává stupeň konzistence betonu podle VeBe testu (čas přetvoření), čím nižší hodnota, tím lepší konzistence betonu (konzistence podle VeBe testu se stanovuje podle času přetvoření čerstvého betonu). Vodorovná osa udává procentuální množství drátku k celkové hmotnosti betonu (percentage by weight). Se zvyšující se velikostí zrna kameniva nad 5mm dochází ke snížení zpracovatelnosti čerstvého betonu vyztuženého drátky. U vysokopevnostních drátkobetonů by neměla být velikost maximálního zrna kameniva větší než 10 - 12 mm (stejně jako u vysokohodnotných betonů nevyztužených vláknitou výztuží). Drátky působí na zrna kameniva tím, že je oddalují a brání jejich skloubení při zpracování směsi. Tento mechanismus se označuje nakypření, může být proměnné v závislosti na množství a velikosti zrn kameniva. Velikost nakypření směsi kameniva drátky k celkové jednotce objemu je zobrazena na obr. 24.



Obr. 23: Závislost zpracovatelnosti drátkobetonu na množství drátků při různých velikostech maximálního zrna kameniva. [17]

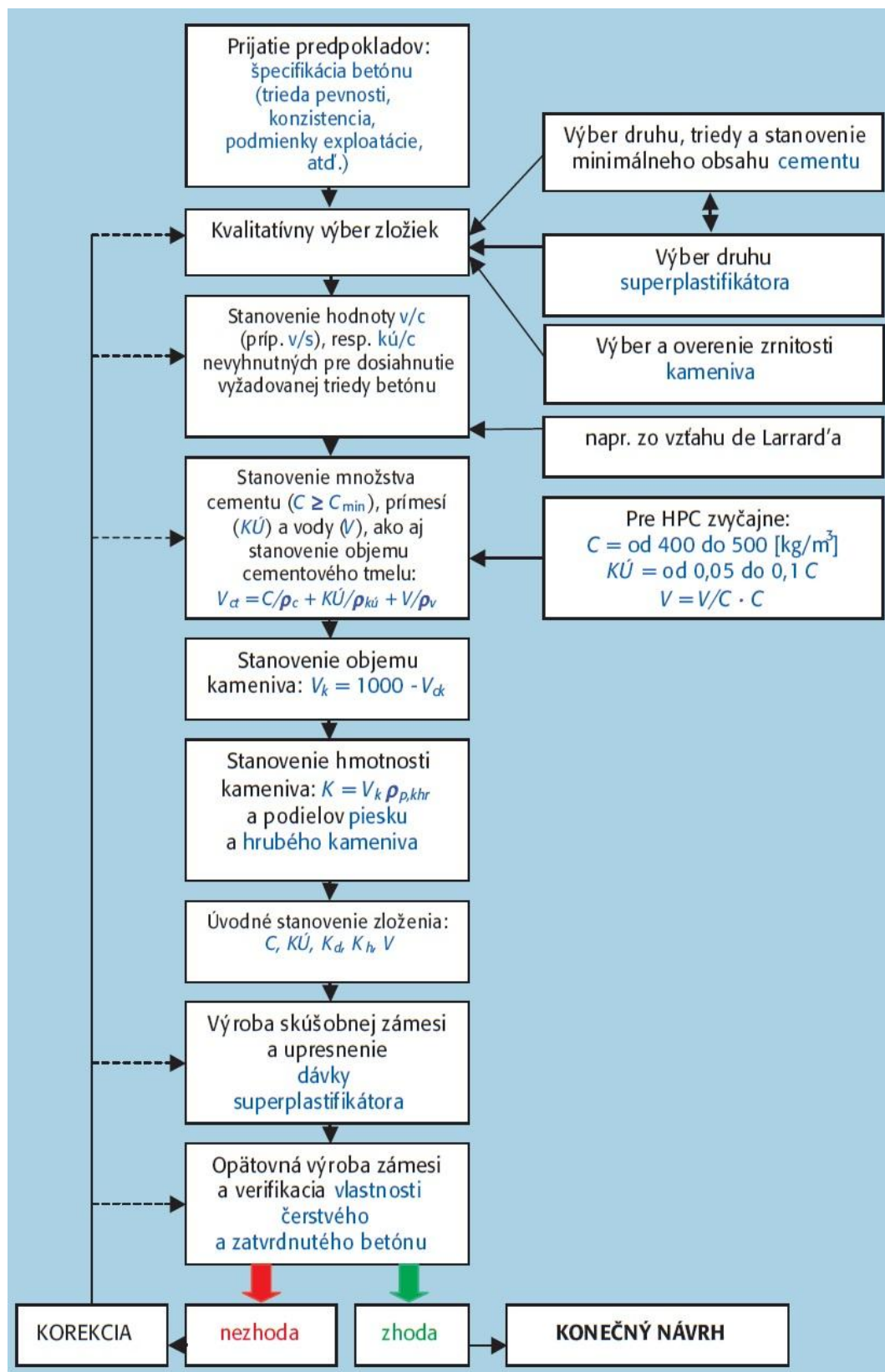


Obr. 24: Nakypření V_n [m^3] na $1 m^3$ setřesené směsi kameniva (o max. průměru zrna D_{max}) a drátků, pro beton s objemovým stupněm vyztužení drátky μ_v [%]. A: $D_{max} = 22$ mm, B: $D_{max} = 8$ mm, C: $D_{max} = 4$ mm. [24]



4 Návrh receptury HPC

Návrh receptury vysokohodnotného betonu je obtížný proces. Receptura se většinou stanovuje experimentálně a na základě zkušeností, existuje ale i řada návrhových metod, podle kterých lze navrhovat receptury HPC. Mezi tyto metody patří např. metoda doporučená ACI 363 Committee on high-strength concrete, metoda doporučená de Larrardem (PC verze - BETONLAB, používaná ve Francii) nebo metoda, kterou vyvinuli Mehta a Aïtcin. Pro návrh receptury vysokohodnotného betonu se dá použít i Bolomeyova metoda vodního součinitele nebo Kennedyho metoda stanovení tloušťky cementové vrstvy, tyto metody nezohledňují přísady, platí pro $w/c > 0,35$ a jsou založeny na metodě absolutního objemu. Bude ovšem vždy obtížné vyvinout univerzální teoretickou návrhovou metodu pro kombinaci portlandského cementu, minerálních příměsí, kameniva a přísad. Každá návrhová metoda pouze odstartuje návrh směsi, receptura je vždy více či méně modifikována, aby splňovala požadované vlastnosti. U vysokohodnotných betonů je důvodem obtížnosti návrhu to, že se dá dosáhnout stejných vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu se stejnými materiály, ale jinými způsoby. Návrhové metody pro běžné betony nelze použít pro vysokohodnotné betony z několika důvodů. Prvním důvodem je nízká hodnota vodního součinitele, nejsou splněny okrajové podmínky těchto metod. Dále nejsou z důvodu použití plastifikátorů splněny závislosti mezi konzistencí a množstvím základních složek betonu. A vysokohodnotné betony většinou obsahují jednu nebo více minerálních příměsí, které nahrazují značnou část cementu. Na obr. 25 je zobrazen obecný postup navrhování hmotnostního složení HPC.

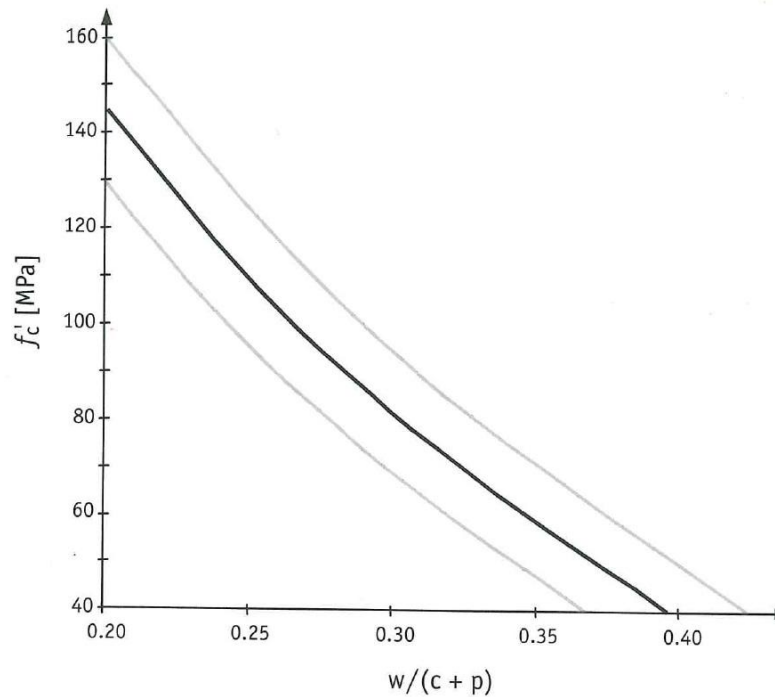


Obr. 25: Schéma postupu návrhu složení HPC.[19]



Příklad postupu pro návrh receptury vysokohodnotného betonu:

1. Určení hodnoty vodního součinitele. hodnota může být odhadnuta nebo být stanovena na základě různých vzorců, grafů a tabulek, které jsou uváděny v odborné literatuře. Příklad grafu pro stanovení hodnoty vodního součinitele v závislosti na pevnosti betonu je na obr. 26.



Obr. 26: Doporučená závislost mezi vodním součinitelem a pevností tlaku ($c + p$ značí cement a příměsí). [2]

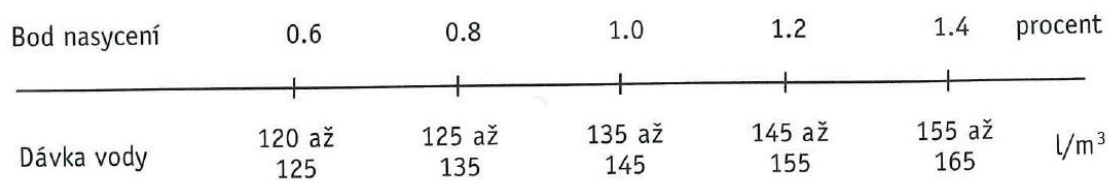
2. Stanovení množství příměsí podle předpisů výrobce nebo odhadem podle zkušeností.

3. Stanovení množství cementu. Množství cementu (m_c) se dá stanovit např. podle Bolomeye vyjádřením z této rovnice (obsah pórů v je vhodné uvažovat 1,05 až 1,1):

$$v \cdot \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_k}\right) = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{\frac{w}{c} \cdot m_c}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p}$$



Nebo je možné nejdříve určit množství záměsové vody. Tento bod je obtížný z hlediska zpracovatelnosti betonu, protože je ovlivňována několika faktory - počátečním množstvím vody, reaktivitou cementu, dávkou plastifikátoru a jeho jeho kompatibilitou s daným cementem. Je tedy obtížné najít optimální kombinaci záměsové vody a plastifikátoru, nejjednodušší přístup spočívá v nalezení bodu nasycení konkrétního plastifikátoru viz obr. 25. Tímto způsobem se odvodí minimální množství záměsové vody a pokud je určen vodní součinitel a množství příměsí, je možné odvodit i množství cementu ($\frac{w}{c+p}$).



Obr. 27: Odvození minimální dávky vody podle bodu nasycení [2]

4. Dalším bodem je stanovení množství kameniva (m_k) vyjádřením z této rovnice:

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{\frac{w}{c} \cdot m_c}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_k}{\rho_k} = 1 - \frac{V_z}{100}$$

5. Úprava dávky vody součinitelem k (jehož hodnota závisí na druhu příměsí viz obr. 28):

$$\frac{w}{c} = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p}$$

Příměs	Hodnota k
mikrosilika	2,0
elektrárenský popílek	0,4
vysokopecní struska	0,6

Obr. 28: Úprava dávky vody v závislosti na druhu příměsí [10]



6. Na konci návrhu je důležitá kontrola objemu, která by se měla vždy provést:

$$1 - \frac{V_z}{100} = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w}{c} \cdot \frac{m_c}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

Na obr. 29 je uveden příklad složení směsi HPC - C90/105.

Složení směsi	[%] (hmot.)	Hmotnost [kg/m ³]
Portlandský cement 52,5R	13 až 15	330 až 400
Granulovaná vysokopecní mletá struska 370 m ² kg ⁻¹ (Blaine), d ₅₀ = 11,8 μm	8 až 10	200 až 250
Mikrosilika < 1 μm	1 až 2	25 až 50
Mikromletý vápenec d ₅₀ = 3,6 μm	1,2 až 4	30 až 100
Superplastifikátor Glenium	0,16 až 0,56	4 až 14
Drcený čedič Libochovany Frakce 0–2, 5–8 mm	60 až 72	1500 až 1800
Voda	6 až 7,2	150 až 180

Obr. 29: Složení směsi HPC - C90/105. [18]

U vysokohodnotného betonu je důležité nejen jeho složení, ale také způsob výroby, který spočívá ve správném dávkování složek, míchání, ukládání, hutnění a ošetřování čerstvého betonu. Během míchání betonu je důležité správné pořadí dávkování jednotlivých složek betonu a správná časová prodleva mezi nimi. Jeden z možných postupů dávkování betonu je následující, nejprve do míchačky přijde dávka kameniva od nejhrubší frakce, po tu nejjemnější. Následuje dávka cementu a jemnozrnných příměsí, kamenivo s cementem a příměsemi se mísí za účelem vytvoření homogenního materiálu, cement obaluje jednotlivá zrna kameniva. Za soustavného míchání se přidává plastifikátor s vodou. Pokud je složkou betonu také vláknitá výztuž,



přidává se nakonec do homogenní směsi čerstvého betonu. Mísení probíhá tak dlouho, dokud nejsou drátky v čerstvém betonu rovnoměrně rozprostřeny. V případě krátkého mísení složek betonu nedojde k jejich dostatečnému promísení, vznikají shluky cementu a hluchá nespojená místa. Při dlouhém mísení může dojít k segregaci jemných složek od hrubých a k otlučení kameniva o stěny míchačky. Struktura betonu v obou případech vykazuje nehomogenitu. Ukládání betonu musí být věnována dostatečná pozornost, protože musí dobře ztuhnět. Nesmí být ale převibrován, aby nedocházelo k jeho segregaci. Ošetřování vysokohodnotných betonů je rozdílné od ošetřování běžných betonů, a je důležité mu věnovat velkou pozornost. Smršťování běžných betonů je způsobeno převážně odpařováním vody a plastickým smrštěním. U vysokohodnotných betonů, je kromě těchto druhů, smršťování způsobeno samovysycháním (autogenní smrštění) a následkem teplotních gradientů. Tyto mechanismy je důležité během ošetřování potlačit. Způsob ošetřování betonu musí být volen v závislosti na velikosti a typu konstrukčního prvku, který je z betonu vyráběn.



5 Praktická část

Praktická část se zabývá sestavením ideální křivky zrnitosti kameniva s maximální velikostí zrna do 4mm. Dále navržením různých receptur vysokohodnotných betonů s cílem dosáhnout co nejvyšší tlakové pevnosti betonu, za použití drobného kameniva s ideální zrnitostí, portlandského cementu, vody, přísad a příměsí. Po 21 dnech od uložení do forem budou odzkoušeny tlakové pevnosti betonových vzorků s různými recepturami a budou vzájemně porovnány.

5.1 Použité materiály

- Pitná voda
- Cement

Portlandský cement CEM I 42,5 R (Českomoravský cement, a.s.). [12]



Obr. 30: Foto použitého typu cementu, portlandský cement CEM I 42,5 R.



- **Kamenivo**

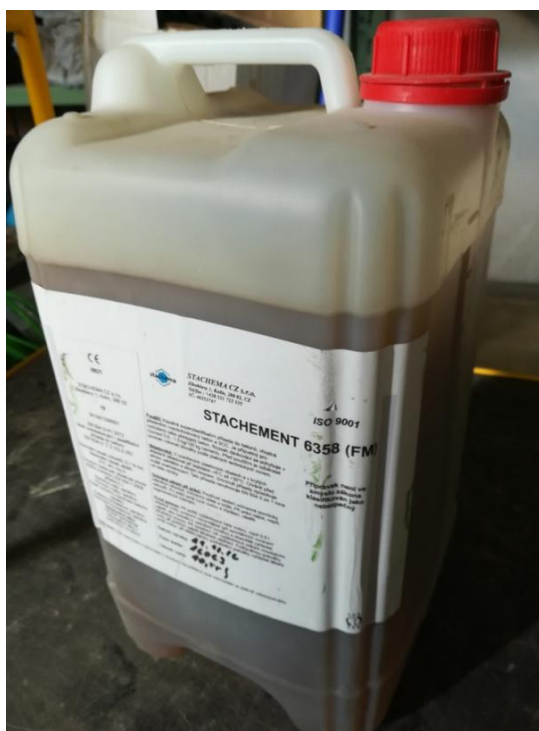
Čedič frakce 0/4 mm.



Obr. 31: Foto velkoobjemového vaku s použitým čedičem frakce 0/4mm.

- **Superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů**

STACHESIL 6358, jedná se o vodný roztok polykarboxyletherů
(STACHEMA CZ s.r.o.). [14, 15]



Obr. 32: Foto použitého superplastifikátoru, STACHESIL 6358.



- **Příměs**

STACHESIL S , prášková bezchloridová příměs, jedná se o prakticky amorfnní oxid křemičitý (úlet) SiO_2 (STACHEMA CZ s.r.o.). [13]



Obr. 33: Foto barelu naplněného použitou příměsí křemičitého úletu, STACHESIL S.

5.2 Přístroje a zařízení

- Laboratorní digitální váhy
- Pyktometr pro stanovení hustoty cementu



Obr. 34: Foto laboratorních vah s pyktometrem.

- Sada normových prosévacích sít



Obr. 35: Foto sady prosévacích sít s různými frakcemi kameniva při prosévací zkoušce.



- Laboratorní míchačka betonu
- Vibrační stůl pro zhutňování betonových těles
- Bednicí formy (krychle à 100mm)



Obr. 36: Foto laboratorní míchačky betonu a prázdné bednicí formy na vibračním stolku.

- Zařízení pro měření pevnosti v tlaku - tlakový lis



Obr. 37: Foto zkušebního (tlakového) lisu při zkoušce tlakové pevnosti betonu.

- A další pomůcky, jako jsou nádoby, drobné ruční nástroje a nářadí, svinovací metr, posuvné měřítko (šuplera), psací potřeby a různé protokoly o zkouškách.



5.3 Sítový rozbor čediče frakce 0/4mm

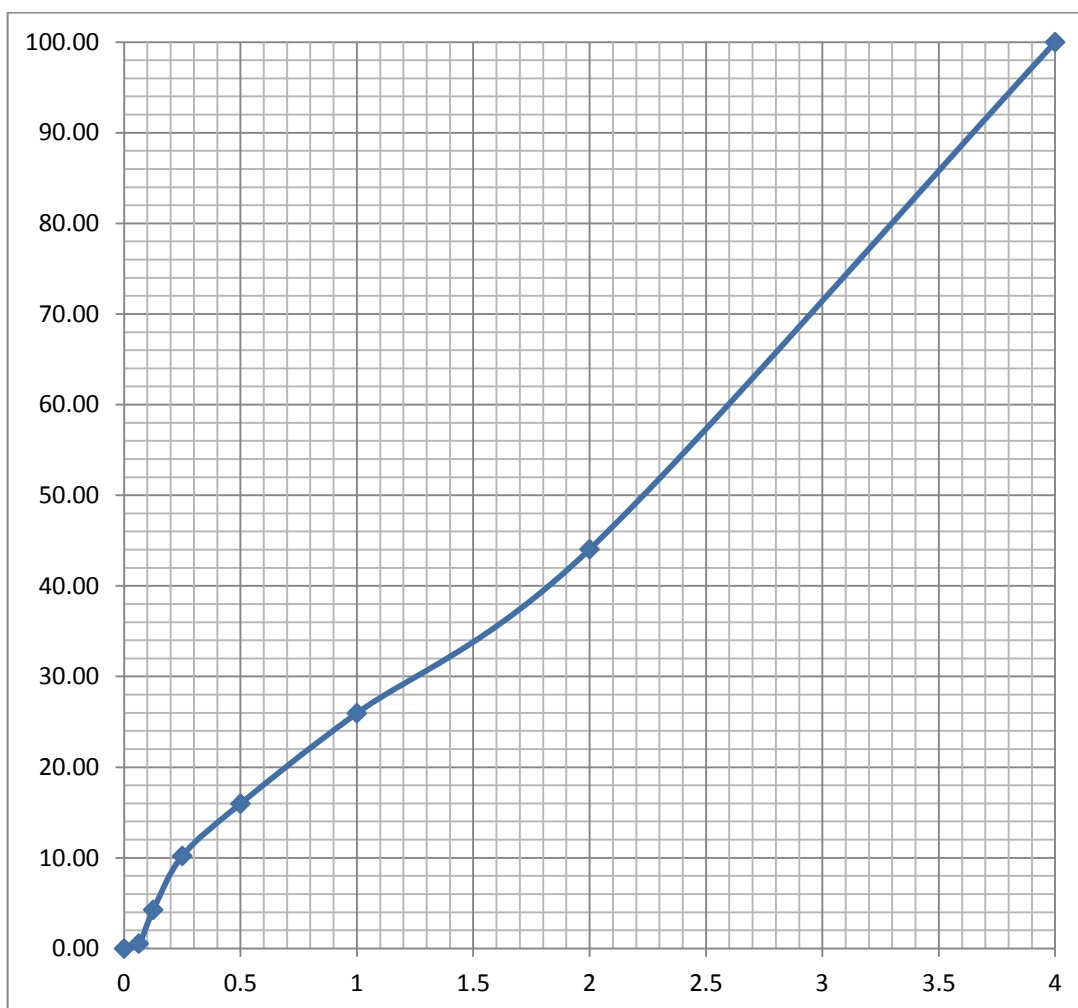
Pro návrh receptury HPC byl vybrán čedič, jedná se o druh drceného kameniva s dobrými mechanickými vlastnostmi. Čedič má vysokou pevnost v tlaku 250-400 MPa a modul pružnosti 55-115 GPa, jedná se o hutné kamenivo s objemovou hmotností 2850 kg/m³. Výběr správného druhu kameniva je důležitým bodem při návrhu HPC, protože svými vlastnostmi ovlivňuje výsledné vlastnosti betonu, jako je trvanlivost, tlaková pevnost, modul pružnosti a objemová hmotnost. Čedič je často používaným kamenivem pro vysokohodnotné betony. Na základě teoretických znalostí byla zvolena velikost maximálního zrna kameniva hodnotou do 4mm, pro HPC jsou doporučovány D_{\max} do 10-12mm, vyšší velikosti zrn kameniva mají za následek nerovnoměrnost betonu, koncentrace napětí při zatížení a jsou náchylnější k výskytu dislokací, a to má za následek snížení tlakové pevnosti betonu.

Sítovým rozbohem se zjišťuje zrnitost kameniva, neboli rozdělení zkušebního vzorku kameniva do jednotlivých frakcí podle velikosti zrn. Pro sítový rozbor čediče s $D_{\max} = 4\text{mm}$ byla použita normová sada sít s čtvercovými oky o velikostech 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2 a 4mm. Zkouška byla provedena dle ČSN EN 933-1, Zkoušení geometrických vlastností kameniva. Před zkouškou byl nejprve zvážen zkušební vzorek kameniva a následně bylo kamenivo proseto přes sadu sít. Po prosetí kameniva byly jednotlivé zbytky na sítích (frakce) zváženy, veškeré hodnoty byly zaznamenány do tabulky. Byly vypočítány jednotlivé zbytky na sítích, neboli procentuální vyjádření hmotností jednotlivých frakcí k celkové hmotnosti zkušebního vzorku. Dále byly spočítány celkové zbytky a propady na daných sítích, výstupem sítového rozboru je tabulka se všemi těmito hodnotami viz tab. 13. Zanesením hodnot celkových propadů byla získána křivka zrnitosti čediče frakce 0/4mm, která je zobrazena na obr. 36.



Síto [mm]	Zbytek na síť [g]	Zbytek na síť [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
4	167.95	16.84	16.84	100.00
2	390.00	39.10	55.94	44.06
1	180.40	18.09	74.03	25.97
0.5	99.60	9.99	84.02	15.98
0.25	57.50	5.77	89.78	10.22
0.125	59.30	5.95	95.73	4.27
0.063	37.20	3.73	99.46	0.54
0	5.40	0.54	100.00	0.00
Celkem	997.35			

Tab. 13: Výstupní tabulka síťového rozboru čediče frakce 0/4mm.



Obr. 38: Křivka zrnitosti čediče frakce 0/4mm.

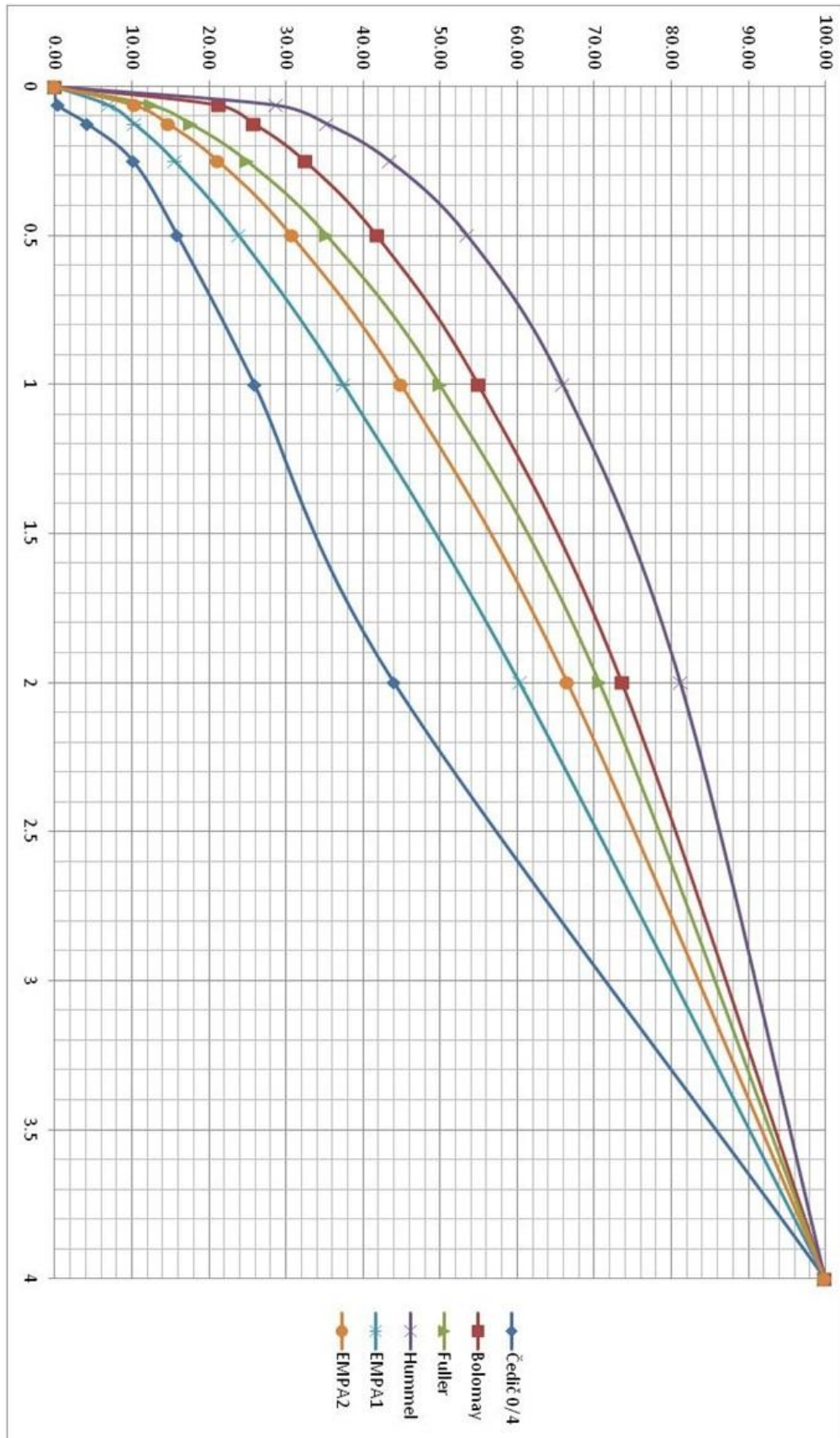


5.4 Optimalizace zrnitosti

Po zjištění zrnitosti kameniva bylo nutné sestavit ideální křivku zrnitosti, která udává optimální zrnitost kameniva pro dosažení maximální možné hutnosti betonu a minimální mezerovitosti mezi zrny kameniva, a porovnat ji s křivkou zrnitosti čediče frakce 0/4mm, která byla stanovena sítovým rozbořem. Pro sestavení ideální křivky zrnitosti existuje mnoho postupů a rovnic, všechny ale závisí na velikosti maximálního zrna kameniva. Na základě teoretických znalostí bylo sestaveno několik ideálních křivek zrnitosti pro $D_{\max} = 4\text{mm}$. Pro jejich návrh byly použity různé metody, Fullerova, Bolomeyova, Hummelova a metoda dle EMPA. Celkové propady ideálních křivek a čediče frakce 0/4mm jsou zobrazeny v tab. 14. Následně proběhlo zanesení těchto hodnot do grafu a porovnání ideálních křivek zrnitosti s křivkou zrnitosti stanovenou sítovým rozbořem viz obr. 37.

Síto	Sítový rozbor	Bolomey	Fuller	Hummel	EMPA1	EMPA2
	Čedič 0/4mm	$y = A + (100 - A) * (d/D)^{0,5}$ A= 10	$y = 100 * (d/D)^{0,5}$	$y = 100 * (d/D)^{0,3}$	$y = 50 * ((d/D) + (d/D)^{0,5})$	$y = 20 * ((d/D) + (d/D)^{0,5})$
4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	44.06	73.64	70.71	81.23	60.36	66.57
1	25.97	55.00	50.00	65.98	37.50	45.00
0.5	15.98	41.82	35.36	53.59	23.93	30.78
0.25	10.22	32.50	25.00	43.53	15.63	21.25
0.125	4.27	25.91	17.68	35.36	10.40	14.77
0.063	0.54	21.29	12.55	28.79	7.06	10.35
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tab. 14: Celkové procentuální propady čediče frakce 0/4mm a ideálních křivek zrnitosti.



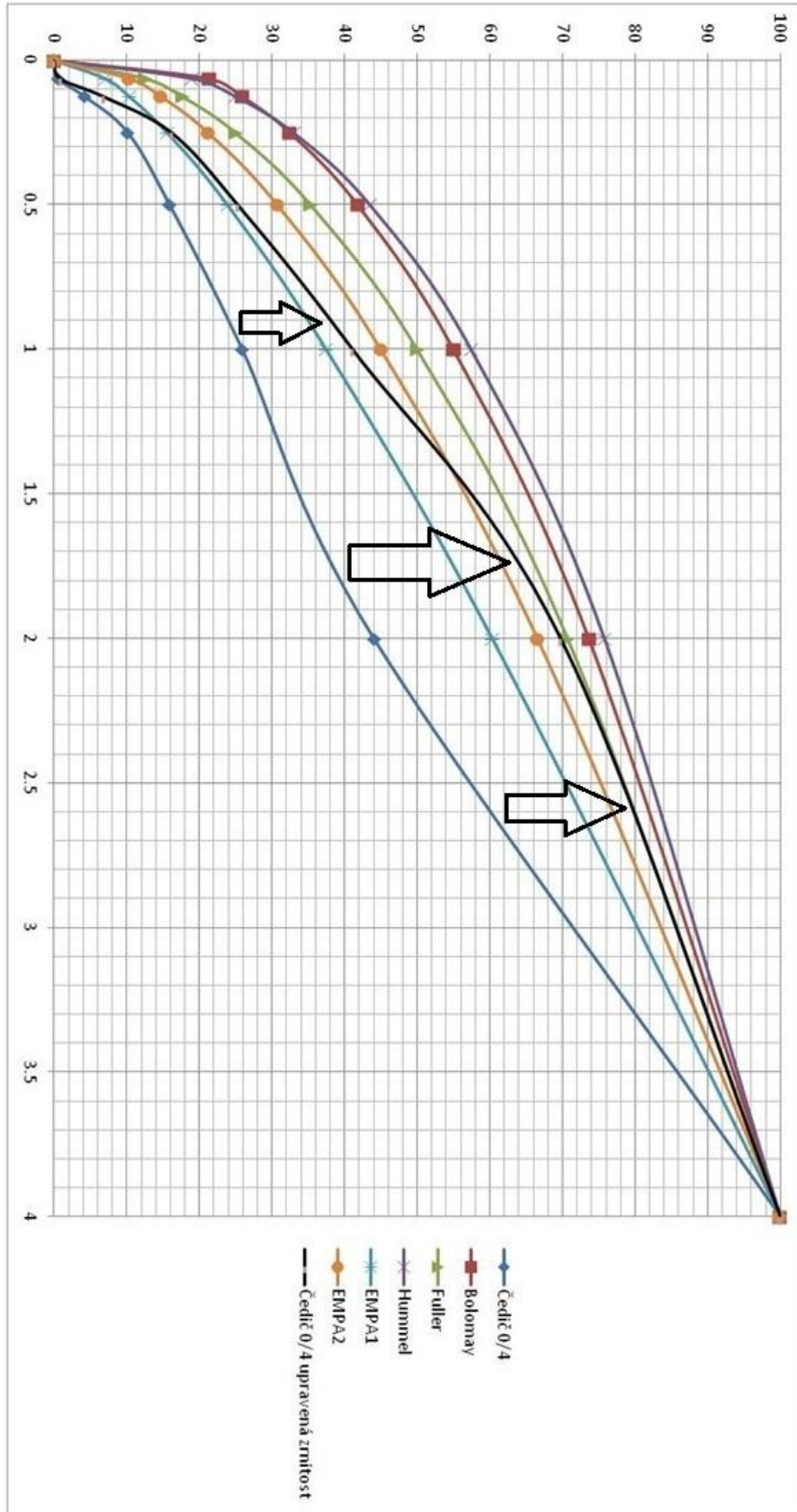
Obr. 39: Graf s různými ideálními křivkami zrnitosti a křivkou zrnitosti čediče frakce 0/4mm, stanovenou síťovým rozborem.



Na obr. 37 je vidět, že křivka zrnitosti čediče frakce 0/4mm se nachází v grafu níže, oproti ideálním křivkám zrnitosti. To znamená, že čedič nemá dostatečné množství frakcí menších než 4mm. Aby se křivka posunula v grafu směrem nahoru, do oblasti ideálních křivek zrnitosti, a zlepšila se zrnitost kameniva, je zapotřebí doplnit kamenivo o jemnější frakce. Výpočtem bylo zjištěno, že optimální zrnitost kameniva se docílí doplněním stávající frakce čediče 0/4 mm, frakcí 0/2 mm v poměru 1:0,85 (1 díl frakce 0/4 mm, 0,85 dílu frakce 0/2mm). Tohoto poměru bylo docíleno metodou pokus - omyl, kdy byly zkoušeny různé kombinace frakcí (menších než 0/4 mm), kterými byla doplňována frakce 0/4 mm, a byly sledovány posuny křivky zrnitosti v grafu. Jako optimální vyšla zrnitost kameniva, při které se doplnila stávající frakce 0/4mm, frakcí 0/2 mm v poměru 1 : 0,85. Celkové propady kameniva s upravenou zrnitostí jsou zobrazeny v tab. 15 v posledním sloupci. Posun křivky s upravenou zrnitostí je znázorněn v grafu na obr. 40.

Síto	Sítový rozbor	Bolomay	Fuller	Hummel	EMPA1	EMPA2	čedič 0/4
	čedič 0/4mm	$y=A+(100-A)*(d/D)^{0,5}$ A= 10	$y=100*(d/D)^{0,5}$	$y=100*(d/D)^{0,3}$	$y=50*((d/D)+(d/D)^{0,5})$	$y=20*((d/D)+(d/D)^{0,5})$	upravená zrnitost
4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	44.06	73.64	70.71	81.23	60.36	66.57	69.76
1	25.97	55.00	50.00	65.98	37.50	45.00	41.12
0.5	15.98	41.82	35.36	53.59	23.93	30.78	25.31
0.25	10.22	32.50	25.00	43.53	15.63	21.25	16.18
0.125	4.27	25.91	17.68	35.36	10.40	14.77	6.76
0.063	0.54	21.29	12.55	28.79	7.06	10.35	0.86
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tab. 15 Celkové procentuální propady čediče frakce 0/4mm, ideálních křivek zrnitosti a čediče s upravenou zrnitostí (1 díl frakce 0/4 mm + 0,85 dílu frakce 0/2mm).



Obr. 40: Posun křivky s upravenou zrnitostí do oblasti ideálních křivek zrnitosti.



5.5 Návrh receptury HPC

Po nalezení ideální zrnitosti kameniva se přistoupilo k návrhu prvotní receptury HPC. Pro návrh byla použita Bolomeyova metoda vodního součinitele. Tato metoda je sice omezena pro betony do pevnostní třídy C16/20 až C80/95, pro minimální vodní součinitel 0,35 a nezohledňuje přísady, pro prvotní návrh („náštel“) receptury je ale dostačující. Z počátku bylo stejně počítáno s tím, že se s první recepturou netrefíme do požadovaných vlastností (co možná nejvyšší pevnost v tlaku) a receptura bude dále modifikována, jak to u návrhu receptur vysokohodnotných betonů bývá zvykem.

Postup návrhu receptury HPC:

I. Nejprve byla stanovena hodnota **vodního součinitele** dle výpočtu níže. Požadovaná třída betonu, součinitel kvality kameniva a pevnost třídy cementu byly zvoleny na základě požadovaných pevnostních vlastností betonu, typu použitého kameniva a cementu.

$$\frac{w}{c} = \frac{1}{\frac{f_c}{a_k \cdot R_c} + 0,5}$$

f_c požadovaná třída betonu (C110/115 -> $f_c = 110\text{MPa}$)

a_k součinitel kvality kameniva (lepší kvalita -> $a_k = 0,6$)

R_c pevnostní třída cementu (CEM I 42,5 R -> $R_c = 42,5\text{MPa}$)

$$\frac{w}{c} = \frac{1}{\frac{110}{0,6 \cdot 42,5} + 0,5}$$

$$\frac{w}{c} = 0,20774$$



2. Dalším krokem je stanovení **množství cementu**. Vstupními hodnotami je součinitel zvětšení objemu vlivem pórů, který byl zvolen hodnotou 5 % z důvodu minimální pórovitosti díky zoptimalizované zrnitosti kameniva. Dále měrné hmotnosti kameniva, cementu, přísady a vody, které byly laboratorně změřeny. Pouze hmotnost přísady m_p byla odhadnuta (80 kg/m^3).

$$v \cdot \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_k}\right) = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w}{c} \cdot \frac{m_c}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

v zvětšení objemu vlivem pórů (5% $\rightarrow v=1,05$)

ρ_s sypaná hmotnost kameniva ($\rho_s= 1485,65 \text{ kg/m}^3$)

ρ_k objemová hmotnost kameniva (čedič $\rightarrow \rho_k= 2850 \text{ kg/m}^3$)

ρ_c objemová hmotnost cementu ($\rho_c= 3050 \text{ kg/m}^3$)

ρ_p objemová hmotnost přísady ($\rho_p= 1993,06 \text{ kg/m}^3$)

ρ_v objemová hmotnost vody ($\rho_v= 1000 \text{ kg/m}^3$)

m_p hmotnost přísady ($m_p= 80 \text{ kg/m}^3$)

$\frac{w}{c}$ vodní součinitel ($\frac{w}{c}= 0,20744$)

m_c hmotnost cementu [kg/m^3]

$$1,05 \cdot \left(1 - \frac{1485,65}{2850}\right) = \frac{m_c}{3050} + \frac{0,20774 \cdot m_c}{1000} + \frac{80}{1993,06}$$

$$m_c = 863,534 \text{ kg/m}^3$$

Obr. 41: Foto laboratorního měření sypané hmotnosti kameniva (vážení hmotnosti volně sypaného kameniva v nádobě o daném objemu).





3. Stanovení **množství kameniva**. Všechny vstupní hodnoty už byly známy, stačilo pouze dosadit do vzorce:

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w}{c} \cdot \frac{m_c}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_k}{\rho_k} = 1 - \frac{V_z}{100}$$

V_z množství pórů ($V_z = 5\%$)

ρ_k objemová hmotnost kameniva (čedič $\rightarrow \rho_k = 2850 \text{ kg/m}^3$)

ρ_c objemová hmotnost cementu ($\rho_c = 3050 \text{ kg/m}^3$)

ρ_p objemová hmotnost přísady ($\rho_p = 1993,06 \text{ kg/m}^3$)

ρ_v objemová hmotnost vody ($\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$)

m_p hmotnost přísady ($m_p = 80 \text{ kg/m}^3$)

m_c hmotnost cementu ($m_c = 863,534 \text{ kg/m}^3$)

$\frac{w}{c}$ vodní součinitel ($\frac{w}{c} = 0,20744$)

m_k hmotnost kameniva [kg/m^3]

$$\frac{923,749}{3050} + \frac{0,20744 \cdot 863,534}{1000} + \frac{80}{1993,06} + \frac{m_k}{2850} = 1 - \frac{5}{100}$$

$$m_k = 1274,93 \text{ kg/m}^3$$



4. Kontrola jemných částic v betonu. Pro tuto kontrolu je zapotřebí vypočítat poměr mezi jemným kamenivem k ostatnímu kamenivu ($p_{0,25}$), jedná se o poměr hmotnosti zbytku na síť 0,25 mm a celkové hmotnosti zkoušeného vzorku kameniva. Pro hodnotu maximální velikosti zrna kameniva do 4 mm není maximální limit množství jemných částic stanoven. Čím menší je maximální velikost zrna kameniva, tím větší je limit pro obsah jemných částic (viz obr. 42).

$$m_j = m_c + \frac{p_{0,25} \cdot m_k}{100} + m_p$$

m_p hmotnost přísady ($m_p = 80 \text{ kg/m}^3$)

m_k hmotnost kameniva ($m_k = 1274,93 \text{ kg/m}^3$)

$p_{0,25}$ poměr mezi jemným kamenivem k ostatnímu kamenivu
($p_{0,25} = \frac{57,5}{997,35} \cdot 100 = 5,765\%$)

m_c hmotnost cementu ($m_c = 863,534 \text{ kg/m}^3$)

m_j množství jemných částic [kg/m^3]

$$m_j = 923,749 + \frac{5,765 \cdot 1183,8}{100} + 80$$

$$m_j = 1017,038 \text{ kg/m}^3$$

D_{\max}	Maximální limit množství jemných částí
16 mm	530 kg/m^3
32 mm	460 kg/m^3
63 mm	430 kg/m^3

Obr. 42: Maximální limity množství jemných částic v závislosti na maximální velikosti zrna kameniva. [10]

5. Na závěr **kontrola objemu**, která musí být vždy provedena:

$$1 - \frac{V_z}{100} = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{\frac{w}{c} \cdot m_c}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p}$$

$$1 - \frac{5}{100} = \frac{863,534}{3050} + \frac{0,20744 \cdot 863,534}{1000} + \frac{1274,933}{2850} + \frac{80}{1993,06}$$

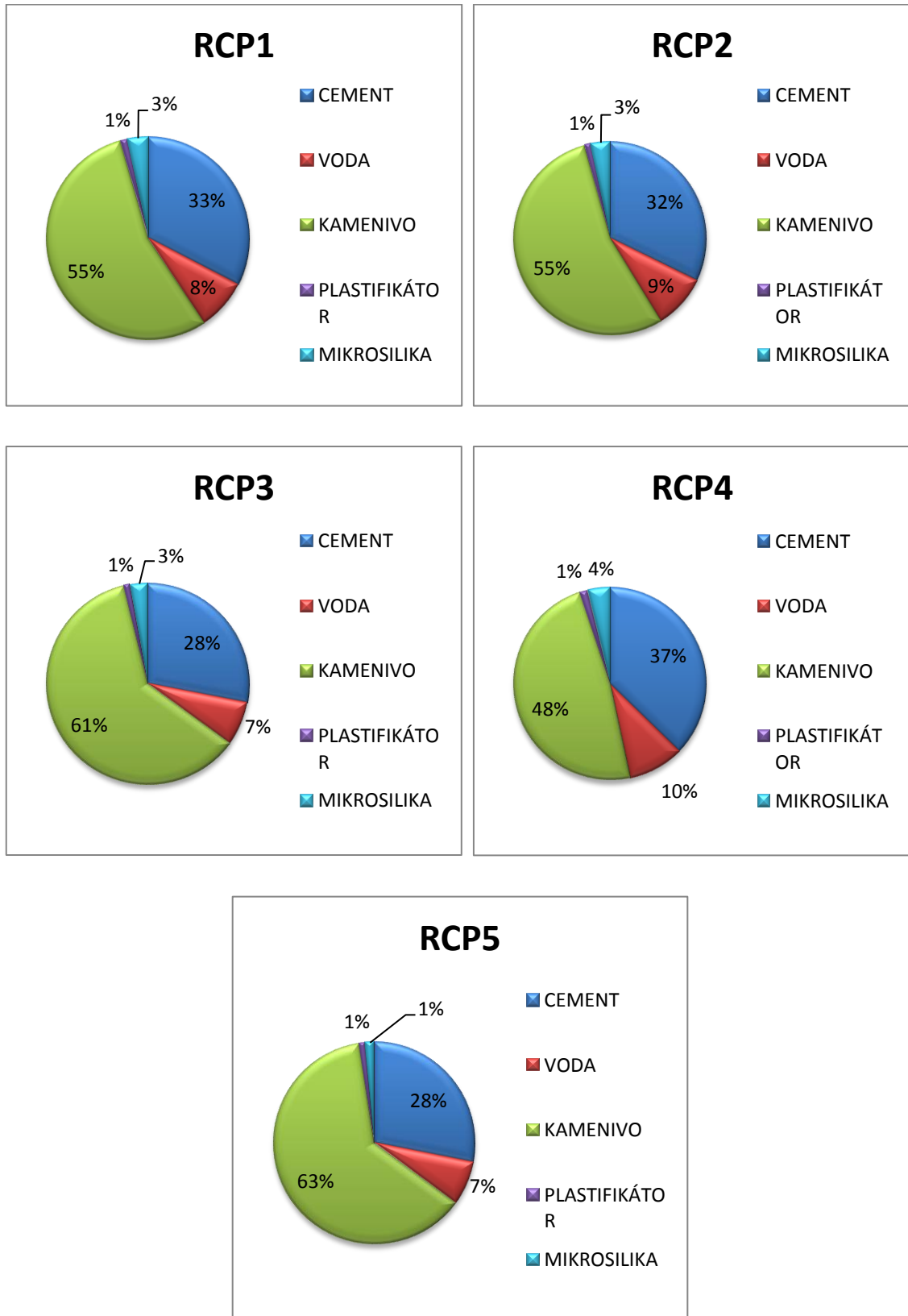
$$0,95 = 0,95$$



Na základě těchto výpočtů byly navrženy první dvě receptury HPC (RCP1, RCP2), které se od sebe lišily pouze hodnotou vodního součinitele. Podle těchto receptur byly vyrobeny první dva druhy HPC, po 21 dnech odzkoušeny tlakové pevnosti vzorků a na základě výsledků tlakových pevností byly navrženy další tři receptury (RCP3, RCP4, RCP5). Tyto receptury vznikly na základě úprav prvních dvou receptur za pomoci vedoucího diplomové práce, Ing. Josefa Fládra, Ph.D., díky jeho zkušenostem v této problematice. V tab. 16 a na obr. 43 je znázorněno složení všech 5 receptur (RCP1 - RCP5). Veškeré použité materiály jsou pro všechny receptury stejné, viz kap. 5.1 Použité materiály.

SLOŽKA BETONU	POPIS	RCP1 [kg/m ³]	RCP2 [kg/m ³]	RCP3 [kg/m ³]	RCP4 [kg/m ³]	RCP5 [kg/m ³]
CEMENT	CEM I 42,5 R	800.00	800.00	700.00	900.00	700.00
VODA	-	200.00	225.00	175.00	225.00	175.00
w/c	-	0.25	0.28	0.25	0.25	0.25
KAMENIVO (ČEDIČ)	0-2 mm	620.00	620.00	703.00	535.00	717.00
	0-4mm	730.00	730.00	827.00	630.00	843.00
	celkem	1350.00	1350.00	1530.00	1165.00	1560.00
PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA (roztok polykarboxyletherů)	STACHEMENT 6358	28.00	28.00	24.50	31.50	24.50
PŘÍMĚS (mikrosilika)	STACHESIL S	80.00	80.00	70.00	90.00	35.00

Tab. 16: Navržené receptury HPC



Obr. 43: Grafické znázornění procentuálního zastoupení jednotlivých složek navržených receptur HPC.



5.6 Výroba betonu

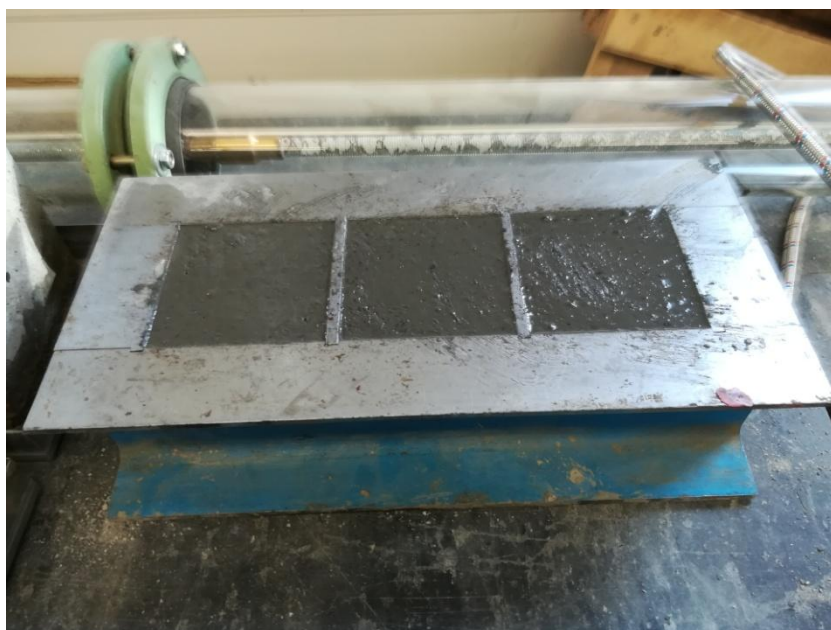
Výroba betonových vzorků probíhala v laboratoři, kdy byly nejprve zváženy složky betonu dle jednotlivých receptur (obr. 44). Následně proběhlo smíchání složek. Prvními složkami, které byly nasypány do míchačky, bylo kamenivo, cement a mikrosilika (křemičitý úlet). Tyto složky musely být určitou dobu promíchávány (cca 3 - 5 min), aby došlo k obalení všech zrn kameniva směsí cementu a příměsí. Po této době, za stálého míchání, byl přidán plastifikátor rozmísený v záměsové vodě. Míchání probíhalo, dokud neměl čerstvý beton správnou konzistenci a všechny složky nebyly řádně promíchány. Čerstvý beton se následně ukládal do olejem vymazaných bednicích forem (obr. 45, 46). Každá forma se skládá ze tří krychlí o rozměrech 100 x 100 x 100 mm. Čerstvý beton byl ve formách řádně zhutněn pomocí vibračního stolku, na němž byly formy položeny. Nakonec byly betonové vzorky označeny druhem receptury a po 24 hodinách proběhlo odbednění vzorků (obr. 47). Za 21 dní od uložení betonu do bednicí formy (standardní doba 28 dní), během kterých beton zrál, byla odzkoušena tlaková pevnost betonových vzorků. První dvě receptury (RCP1 a RCP2) byly umíchány 27.11.2017 a odzkoušeny 18.12.2017. Smíchání ostatních receptur (RCP 3, RCP4 a RCP5) proběhlo 9.1.2018 a odzkoušení 30.1.2018.



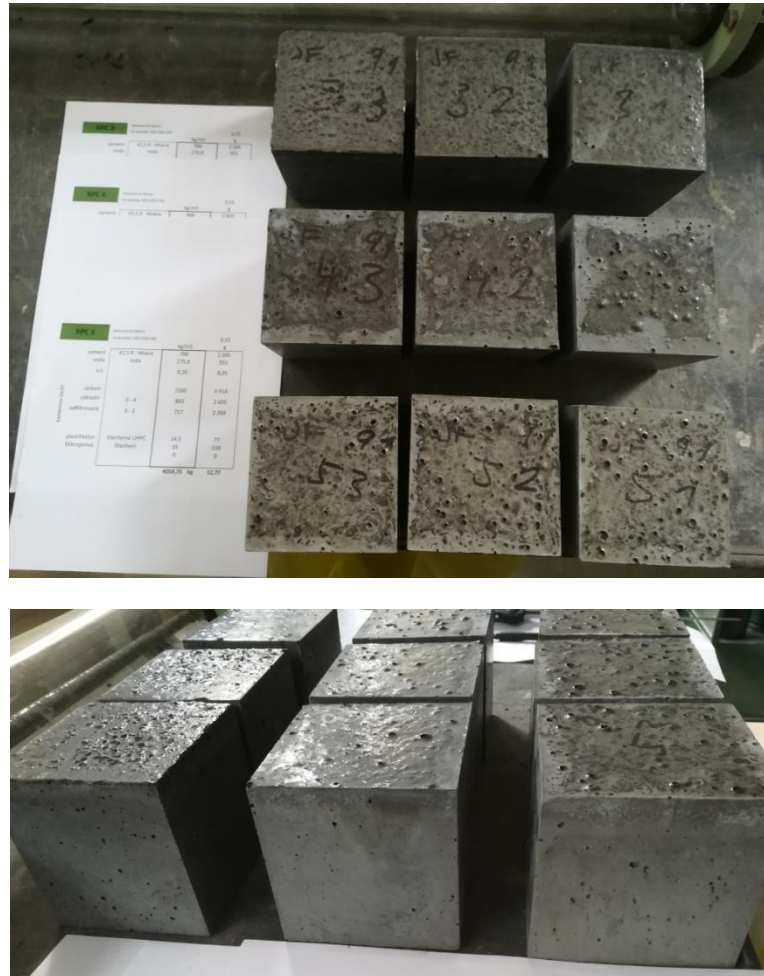
Obr. 44: Foto navážených složek HPC, připravených pro smíchání.



Obr. 45: Foto ukládání čerstvého betonu do bednicí formy.



Obr. 46: Foto čerstvého betonu uloženého v bednicí formě.



Obr. 47: Foto odbedněných betonových vzorků.

5.7 Zkoušky tlakové pevnosti

Zkoušky tlakové krychelné pevnosti betonových vzorků proběhly po 21 dnech od uložení do bednicí formy. Standardně se měří 28-denní pevnost, ale u prvních dvou receptur (RCP1, RCP2) vycházel tento termín do období, kdy byla laboratoř uzavřena. A z důvodu stejné doby zrání betonu a porovnatelnosti všech vzorků, byly zbylé receptury (RCP3, RCP4, RCP5) odzkoušeny rovněž po 21 dnech od uložení čerstvého betonu do bednicích forem. Před odzkoušením vzorků byla nejdříve ověřena jejich geometrie, byly změřeny délky stran jednotlivých krychlí (obr. 48), a vzorky byly zváženy pro výpočet objemových hmotností. Při zkoušce musí být zkušební těleso v lisu správně uloženo, lis musí těleso zatěžovat rovnoměrně a ve směru kolmém na směr hutnění betonu. S tím souvisí i měření rozměrů vzorků, při kterém je důležité správně určit délku, šířku a výšku krychle. Délka a šířka krychle vymezuje plochu, na kterou

bude dosedat zkušební lis, a slouží k výpočtu mezního napětí, kdy je síla potřebná k porušení vzorku podělena právě touto plochou. V průběhu zkoušek je pozorován tvar porušení, pokud by těleso nebylo porušeno správně, je zkouška neplatná. Správné porušení zkušební krychle je vidět na obr. 49. Výsledky tlakových zkoušek jsou uvedeny na obr. 50 a 51.



Obr. 48: Foto měření zkušebního vzorku.

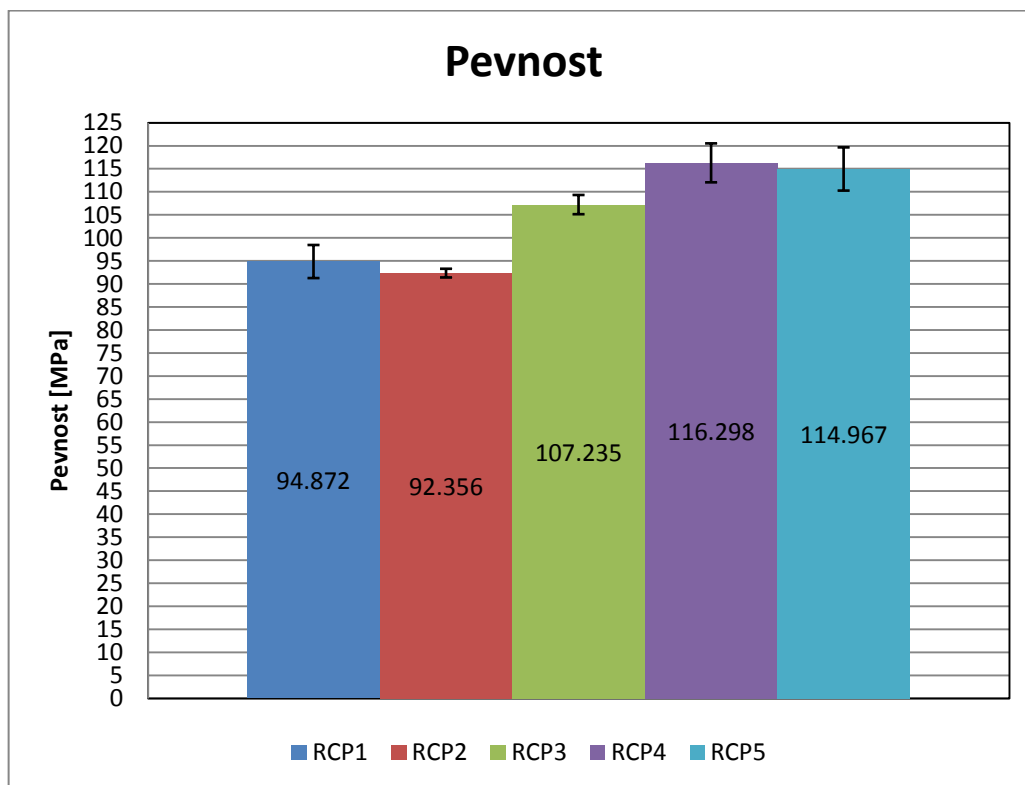


Obr. 49: Foto správného porušení zkušebního vzorku v lisu při tlakové zkoušce



Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m ³	Průměr Objem. hmot. kg/m ³	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Průměr pevnost MPa	směrodat. Odchyška pevnost
		Délka mm	Šířka mm	Výška mm				výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa		
RCP1	1	99.0	98.4	99.8	2346.2	2412		27.11.17	18.12.17	21	897.95	92.149	MPa	MPa
RCP1	2	98.8	98.0	99.5	2335.8	2426	2419.076	27.11.17	18.12.17	21	967.52	99.946	94.872	3.591
RCP1	3	99.1	98.7	99.8	2351.7	2419		27.11.17	18.12.17	21	904.69	92.521		
RCP2	1	99.5	97.8	99.9	2344.6	2412		27.11.17	18.12.17	21	887.25	91.205		
RCP2	2	99.6	97.2	99.7	2340.7	2426	2418.988	27.11.17	18.12.17	21	905.03	93.512	92.356	0.942
RCP2	3	99.7	97.6	99.9	2351.7	2419		27.11.17	18.12.17	21	898.47	92.351		
RCP3	1	100.0	99.8	99.3	2463.0	2486		09.01.18	30.01.18	21	1066.95	106.962		
RCP3	2	100.6	99.9	99.1	2465.6	2476	2477.677	09.01.18	30.01.18	21	1103.89	109.917	107.235	2.087
RCP3	3	102.2	100.1	99.0	2504.8	2471		09.01.18	30.01.18	21	1072.81	104.826		
RCP4	1	100.3	100.0	99.9	2412.6	2409		09.01.18	30.01.18	21	1225.75	122.221		
RCP4	2	100.4	100.2	99.7	2413.8	2408	2411.718	09.01.18	30.01.18	21	1147.04	114.053	116.298	4.229
RCP4	3	99.6	99.8	99.9	2399.1	2419		09.01.18	30.01.18	21	1118.56	112.620		
RCP5	1	97.9	99.8	100.1	2466.2	2523		09.01.18	30.01.18	21	1077.30	110.296		
RCP5	2	97.7	100.0	99.6	2470.3	2539	2530.336	09.01.18	30.01.18	21	1106.13	113.217	114.967	4.694
RCP5	3	98.7	99.7	99.5	2477.7	2530		09.01.18	30.01.18	21	1194.86	121.387		

Obr. 50: Výsledky laboratorních zkoušek pevnosti v tlaku.



Obr. 51: Grafické vyjádření laboratorních zkoušek pevnosti v tlaku (pevnost + směrodatná odchylka).

Dle výsledků zkoušek na obr. 50 a 51 je patrné, že první dvě záměsi vykazují nejmenší pevnosti, obě pod hodnotu 100 MPa. Při jejich návrhu složení bylo požadavkem dosáhnout alespoň hodnoty 100 MPa. Průměrná pevnost RCP2 (92,356 MPa) je oproti RCP1 (94,872 MPa) menší, maxima jednotlivých těles těchto receptur vykazují dokonce ještě vyšší rozdíly (RCP1 - 99,946 MPa > RCP2 - 93,512 MPa). Tyto dvě receptury jsou skoro totožné, liší se pouze v množství záměsové vody, jak je vidět v tab. 16 a na obr. 43. RCP2 obsahuje proti RCP1 navíc 25 kg/m^3 vody, důvodem rozdílných tlakových pevností mezi těmito dvěma recepturami je rozdílný vodní součinitel. Vyšší vodní součinitel u RCP2 způsobil pokles tlakové pevnosti.

Na základě výsledků tlakových zkoušek prvních dvou receptur, byly navrženy zbylé tři receptury (RCP3, RCP4 a RCP5) viz tab. 16 a obr. 43. Cílem tohoto návrhu bylo zvýšit tlakové pevnosti navrhovaného betonu. Všechny tyto receptury mají stejnou hodnotu vodního součinitele 0,25. RCP 4 se vyznačuje větším množstvím cementu a záměsové vody, oproti zbylým dvěma recepturám (RCP 3, RCP5). RCP4 dále obsahuje



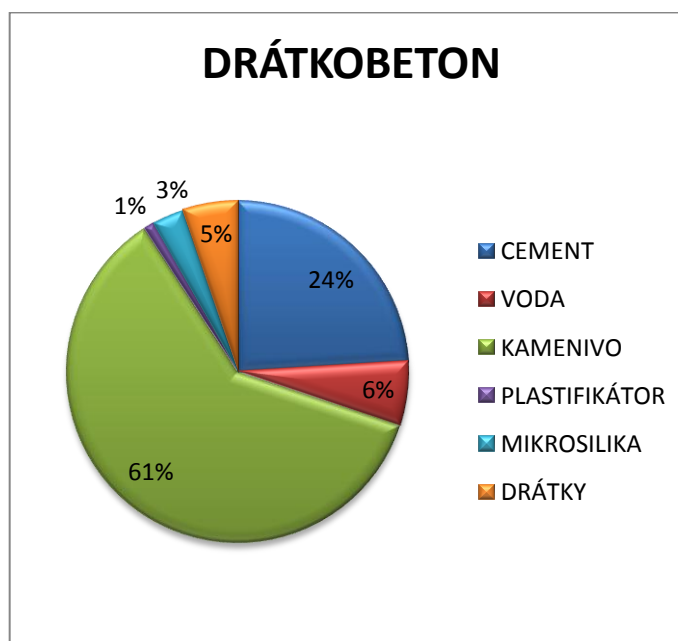
nejméně kameniva a největší podíl křemičitého úletu a plastifikační přísady, oproti všem zbylým recepturám. Z ekonomického hlediska je RCP4 tedy nejnákladnější. Zbylé dvě receptury (RCP 3 a RCP5) mají stejné množství cementu, záměsové vody a plastifikační přísady, a mírně se liší v množství kameniva. RCP3 má výrazně více mikrosiliky oproti RCP5, která obsahuje nejméně mikrosiliky ze všech receptur. Z hlediska tlakové pevnosti na tom vyšla lépe RCP5 (114,967 MPa), než RCP3 (107, 235 MPa). Z toho vyplývá, že zvýšené množství příměsi v podobě křemičitého úletu tlakové pevnosti přihoršilo. Nejvyšší tlakové pevnosti vykazovala RCP4 (116,298 MPa), důvodem může být vysoký obsah cementu v kombinaci s mikrosilikou a nízkým podílem kameniva, kdy zrna kameniva byla dokonale obalena a vznikla tak kompaktní tranzitní zóna o vysoké pevnosti. Tlakové pevnosti RCP4 a RCP5 jsou téměř stejné, průměrné hodnoty se liší o 1,331 MPa, i dílčí pevnosti jednotlivých zkušebních vzorků jsou podobné. RCP5 se vyznačuje nejvyšším podílem kameniva a sníženým množstvím ostatních složek, tato receptura je z hlediska trvanlivosti betonu a ekonomického hlediska nejvýhodnější, a vypovídá o dobré skladbě zrnitosti kameniva. Podobné hodnoty průměrných tlakových pevností RCP4 a RCP5 jsou dobrým příkladem, že vysokohodnotný beton o určitých vlastnostech (stejná pevnost) lze vytvořit různými způsoby (různé receptury). Receptury s nejvyššími pevnostmi (RCP4, RCP5) mají nejvyšší hodnoty směrodatných odchylek, oproti RCP2, která má nejmenší hodnotu směrodatných odchylek a zároveň nejnižší tlakové pevnosti.

Vedoucí diplomové práce, Ing. Josef Fládr, Ph.D., mi poskytl data ze zkoušky tlakové pevnosti pro beton vyztužený ocelovými vlákny (drátkobeton), k porovnání tohoto vysokohodnotného drátkobetonu s vysokohodnotnými betony vyrobenými pro účely této diplomové práce. Data pro zkoušky drátkobetonu jsou stará 2 roky, v té době byl v laboratoři používán jiný druh plastifikátoru a příměsi viz tab. 17, oproti těm, které jsou používány dnes (kap. 5.1). Dalším rozdílem je maximální velikost zrna kameniva, které je v případě drátkobetonu větší - 16mm. A posledním rozdílem je stáří betonu, při kterém zkoušky probíhaly. Drátkobeton byl odzkoušen po 28 dnech, zatímco vzorky RCP1 - RCP5 po 21 dnech. Receptura drátkobetonu je zobrazena v tab.17 a na obr. 52.



SLOŽKA BETONU	POPIS	DRÁTKOBETON kg/m ³
CEMENT	CEM I 42,5 R	650.00
VODA	-	163.00
w/c	-	0.25
KAMENIVO (ČEDIČ)	0-4 mm	832.00
	4-8 mm	460.00
	8-16 mm	350.00
	Celkem	1642.00
PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA	BERAMENT HT5341	30.00
PŘÍMĚS (mikrosilika)	Microsilica - SIOXID	80.00
DRÁTKY	Dramix ol 13/.02	140.00

Tab. 17: Receptura vysokohodnotného drátkobetonu.



Obr. 52: Grafické znázornění procentuálního zastoupení jednotlivých složek receptury drátkobetonu.

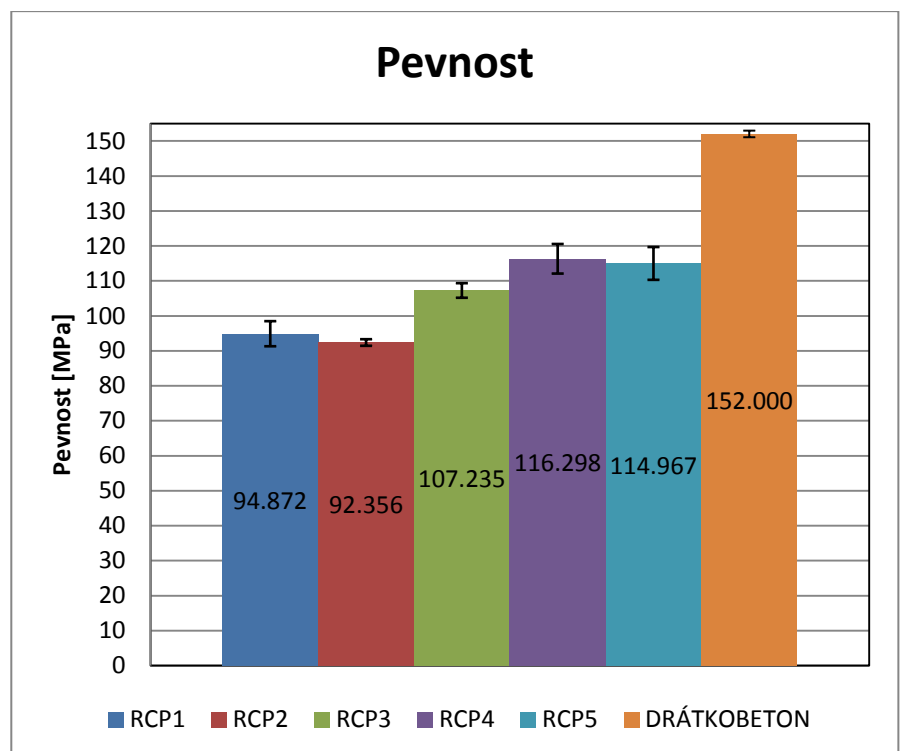
Po porovnání receptury drátkobetonu s recepturami RCP1-RCP5 je patrné, že receptura se nejblíže poměrově podobá receptuře RCP3. Drátkobeton ovšem vykazuje mnohem větší pevnosti viz tab. 18 a obr. 53., to je převážně způsobeno vláknitou výztuží rozptýlenou ve struktuře betonu a stářím betonu, kdy probíhaly tlakové zkoušky, drátkobeton je vyzrálejší. Rozdílné kvality přísad a příměsí mohou být také



důvodem tak rozdílné pevnosti. Drátkobeton má také nízkou směrodatnou odchylkou tlakových pevností, tlakové pevnosti všech vzorků byly navzájem hodně podobné. Betony vyztužené vláknitou výztuží se vyznačují zvýšenou pevností v tahu ohybem, vyšší houževnatostí a nižším smrštěním, oproti betonům nevyztužených vlákny, tato problematika je podrobněji popsána v kap. 3.5. Větší velikost maximálního zrna

kameniva u drátkobetonu by měla směřovat ke snížení tlakové pevnosti betonu, doporučená maximální velikost kameniva pro vysokohodnotný beton je 10 - 12 mm.

číslo	označení	geometrie			hmotnost [g]	objemová hmotnost		datum		stáří vzorku	Tlak		Průměr pevnost [MPa]	směrodat. odchylka [MPa]
		délka [mm]	výška [mm]	šířka [mm]		[kg/m ³]	výroby	zkoušení	síla [kN]		pevnost [MPa]			
1	P3	100	99.8	98.7	2610	2648	2.1.2016	30.1.2016	28	1502.11	152.4	152.000	0.942	
2	P3	100	99.1	100	2620	2645	2.1.2016	30.1.2018	28	1492.97	150.7			
3	P3	100	99.2	99.9	2602	2624	2.1.2016	30.1.2018	28	1516.27	152.9			



Obr. 53: Grafické porovnání pevnosti v tlaku drátkobetonu a vysokohodnotných betonů RCP1 - RCP5. (pevnost + směrodatná odchylka).

Tab. 18: Výsledky laboratorních zkoušek pevnosti v tlaku drátkobetonu.



6 Závěr

U vysokohodnotných betonů hraje důležitou roli pevnost tranzitní zóny, neboli rozhraní mezi kamenivem a zhydratovanou cementovou pastou. Velikost vodního součinitele ovlivňuje pórovitost zhydratované cementové pasty a s pórovitostí úzce souvisí pevnost tranzitní zóny. Podstatou vysokohodnotných betonů je malá hodnota vodního součinitele, protože snížením vodního součinitele dochází ke snížení pórovitosti a zvýšení pevnosti zhydratované cementové pasty. Snížení hodnoty vodního součinitele má současně za následek zrychlení tuhnutí a snížení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Z toho důvodu jsou pro vysokohodnotné betony používány plastifikační přísady, které redukuje množství záměsové vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti. Existuje celá řada přísad, kterými se upravují vlastnosti vysokohodnotného betonu. Se zvyšující pevností tranzitní zóny se zvyšují nároky na kvalitu kameniva. Kamenivo do vysokohodnotných betonů musí vykazovat vysoké pevnosti, aby se nestalo nejslabším článkem betonu. Optimální velikost maximálního zrna kameniva je do 10 - 12 mm, větší rozměry zrn kameniva způsobují rozsáhlejší tranzitní zónu, která je více heterogenní. Se zvětšením zrn kameniva dále klesá jejich pevnost, protože zmenšením velikosti zrna dochází k eliminaci vnitřních defektů. V praktické části této diplomové práce bylo použito kamenivo o velikosti maximálního zrna do 4mm, pomocí něhož a dalších složek (voda, cement CEM 42,5 R, mikrosilika a plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů) byl vytvořen vysokohodnotný beton o tlakové krychelné pevnosti 116 MPa. Firma TBG vyrábějící UHSC (Ultra-vysokopevnostní betony) s krychelnou pevností 180 MPa používá maximální velikost zrna do 8 mm. S jemnější frakcí kameniva roste rovněž množství cementu (příměsí), potřebné k obalení jednotlivých zrn. Ideální tvar zrn je rovnoosý. Kamenivo musí splňovat požadavky optimální zrnitosti, z důvodu dosažení maximální možné hutnosti betonu, tedy minimálnímu objemu mezer mezi zrny, protože pevnost betonů roste s jeho hutností. Kamenivo nesmí svou vlhkostí ovlivňovat hodnotu vodního součinitele a nesmí obsahovat škodlivé látky. Dalšími složkami vysokohodnotného betonu jsou příměsí, které plní funkci mikroplniva v betonu nebo se podílí na hydrataci cementu. Součástí receptury vysokohodnotných betonů může být i vláknitá výztuž, která zlepšuje fyzikálně - mechanické vlastnosti betonu, především zvětšuje pevnost betonu v tahu za ohybu, zvyšuje houževnatost a omezuje smrštění betonu. Návrh receptury HPC je



složitý proces založený na experimentálních pokusech, není možné definovat přesné postupy návrhu pro dosažení požadovaných vlastností. Se stejnými materiály se dá totiž dosáhnout stejných vlastností, ale rozdílnými postupy, jak se potvrdilo i v praktické části této diplomové práce. Podobné tlakové pevnosti betonu byly dosaženy naprosto odlišnými recepturami.



Seznam použitých zdrojů

- [1] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [4] *eBeton / eBeton - Specialista na beton* [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz>
- [5] POPOVICS, Sandor. *Concrete materials: properties, specifications, and testing*. 2nd ed. Park Ridge, N.J.: Noyes Publications, c1992. ISBN 9780815513087.
- [6] [online]. Dostupné z: <http://www.geologie.vsb.cz>
- [7] [online]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz>
- [8] EUROVIA Kamenolomy, a.s.. *EUROVIA Kamenolomy, a.s.* [online]. Dostupné z: <http://www.euroviakamenolomy.cz>
- [9] [online]. Dostupné z: <http://www.stavebnikomunita.cz>
- [10] [online]. Dostupné z: http://www.people.fsv.cvut.cz/~fladrjos/vyuka/YVHB/01_technologie.pdf
- [11] [online]. Dostupné z: http://www.people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_na_vrh_priprava_HSC_a_UHSC.pdf



- [12] CEM I 42,5 R [online]. Dostupné z:
<http://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [13] STACHESIL S. *Stachema - stavební hmoty a chemie* [online]. Dostupné z:
<http://www.prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/primesi-do-betonu:c165/stachesil-s:p250.htm>
- [14] STACHEMENT-6358. *Stachema - stavební hmoty a chemie* [online]. Dostupné z: <http://www.prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/superplastifikatory-ztekuovace-pce:c163/stachment-6358:p315.htm>
- [15] STACHEMENT-2483. *Stachema - stavební hmoty a chemie* [online]. Dostupné z: <http://www.prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/superplastifikatory-ztekuovace-pce:c163/stachment-2482:p310.htm>
- [16] [online]. Dostupné z:
http://www.people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2010/Vlastnosti_HSC_s_primesi_ocleovych_vlaken.pdf
- [17] HANNANT, D. J. *Fibre cements and fibre concretes*. New York: Wiley, c1978. ISBN 0471996203.
- [18] *Úvod | Časopis BETON - technologie, konstrukce, sanace (BETON TKS)* [online]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2003-6-10_0.pdf
- [19] *Úvod | Časopis BETON - technologie, konstrukce, sanace (BETON TKS)* [online]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2008-4-52_0.pdf
- [20] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití : směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.



Seznam obrázků

Obr. 1: Vnější produkty hydratace. [2]

Obr. 2: Vnitřní produkt hydratace. [2]

Obr. 3: Vývoj tepla v průběhu hydratace (I - smíchání s vodou 0 - 15 min, II - indukční perioda 15 min - 4 hod, III - zrychlení hydratace a počátek tuhnutí 4 - 8 hod, IV - zpomalení hydratace 8 -24 hod, V - doba zrání 1 - 28 dní i déle), a mikrostruktura cementové pasty v různém stáří betonu. [2]

Obr. 4: 28-denní krychelná charakteristická pevnost v závislosti na vodním součiniteli při okolní teplotě 20°C. [1]

Obr. 5: Křivka zrnitosti čediče frakce 0-4mm.

Obr. 6: Čáry zrnitosti kameniva (svislá osa = propad sítem v % hmotnosti, vodorovná osa = velikost síta v mm). Maximální zrno kameniva D_{max} : A=4mm, B=8mm, C=16mm, D=31,5mm, E=63mm. Oblasti: 1 a 5 - nevhodná zrnitost, 2 - křivka přerušované zrnitosti, 3 - dobrá zrnitost kameniva, 4 - ještě použitelná zrnitost kameniva. [3]

Obr. 7: Křivka zrnitosti podle Füllera a síťový rozbor pro reálné a optimální kamenivo.[1]

Obr.8: Předpokládané hodnoty modulu pružnosti betonu v závislosti na modulu pružnosti kameniva a na pevnosti betonu v tlaku. [2]

Obr. 9: Vliv vlhkosti na sypanou hmotnost kameniva podle zrnitosti na obr.5.[3]

Obr. 10: Schematické znázornění různě vlhkého kameniva. [1]

Obr. 11: Vliv pórovitosti kameniva na pevnost v tlaku. [1]

Obr. 12: Vliv plastifikační přísady na konzistenci při různém vodním součiniteli. [3]

Obr. 13: Částice cementu ve flokulovaném stavu [2]

Obr. 14 Různé typy dispergujících činidel [2]

Obr. 15: Princip působení superplastifikátorů na bázi sulfonátů (vlevo) a polykarboxylátů (vpravo). [10]

Obr. 16: Spektrum velikosti částic a pórů v betonu. [3]



- Obr. 17: Zaplnění prostoru mezi zrny cementu křemičitým úletem [2]
- Obr. 18: Kompaktní C-S-H gel v betonu s křemičitými úlety. Ke zřejmé absenci zóny rozhraní mezi ztvrdlou cementovou pastou a zrnem kameniva. [2]
- Obr. 19: Polymerová mikrovlákná (nahore) a makrovlákná (dole). [4]
- Obr. 20: Ocelová vlákna (drátky) do betonu [4]
- Obr. 21: Pracovní diagram drátkobetonu ve srovnání s prostým betonem. [3]
- Obr. 22: Vliv vláken na průhyb betonu v závislosti na napětí v tahu ohybem. [2]
- Obr. 23: Závislost zpracovatelnosti drátkobetonu na množství drátků při různých velikostech maximálního zrna kameniva. [17]
- Obr. 24: Nakypření V_n [m^3] na $1 m^3$ setřesené směsi kameniva (o max. průměru zrna D_{max}) a drátků, pro beton s objemovým stupněm vyztužení drátky μ_v [%]. A: $D_{max} = 22 mm$, B: $D_{max} = 8 mm$, C: $D_{max} = 4 mm$. [24]
- Obr. 25: Schéma postupu návrhu složení HPC.[19]
- Obr. 26: Doporučená závislost mezi vodním součinitelem a pevností tlaku ($c + p$ značí cement a příměsí). [2]
- Obr. 27: Odvození minimální dávky vody podle bodu nasycení [2]
- Obr. 28: Úprava dávky vody v závislosti na druhu příměsí [10]
- Obr. 29: Složení směsi HPC - C90/105. [18]
- Obr. 30: Foto použitého typu cementu, portlandský cement CEM I 42,5 R.
- Obr. 31: Foto velkoobjemového vaku s použitým čedičem frakce 0/4mm.
- Obr. 32: Foto použitého superplastifikátoru, STACHESIL 6358.
- Obr. 33: Foto barelu naplněného použitou příměsí křemičitého úletu, STACHESIL S.
- Obr. 34: Foto laboratorních vah s pyktometrem.
- Obr. 35: Foto sady prosévacích sít s různými frakcemi kameniva při prosévací zkoušce.
- Obr. 36: Foto laboratorní míchačky betonu a prázdné bednicí formy na vibračním stolku.



Obr. 37: Foto zkušebního (tlakového) lisu při zkoušce tlakové pevnosti betonu.

Obr. 38: Křivka zrnitosti čediče frakce 0/4mm.

Obr. 39: Graf s různými ideálními křivkami zrnitosti a křivkou zrnitosti čediče frakce 0/4mm, stanovenou sítovým rozborem.

Obr. 40: Posun křivky s upravenou zrnitostí do oblasti ideálních křivek zrnitosti.

Obr. 41: Foto laboratorního měření sypané hmotnosti kameniva (vážení hmotnosti volně sypaného kameniva v nádobě o daném objemu).

Obr. 42: Maximální limity množství jemných částic v závislosti na maximální velikosti zrna kameniva. [10]

Obr. 43: Grafické znázornění procentuálního zastoupení jednotlivých složek receptur HPC.

Obr. 44: Foto navážených složek HPC, připravených pro smíchání.

Obr. 45: Foto ukládání čerstvého betonu do bednicí formy.

Obr. 46: Foto čerstvého betonu uloženého v bednicí formě.

Obr. 47: Foto odbedněných betonových vzorků.

Obr. 48: Foto měření zkušební vzorku.

Obr. 49: Foto správného porušení zkušební vzorku v lisu při tlakové zkoušce.

Obr. 50: Výsledky laboratorních zkoušek pevnosti v tlaku.

Obr. 51: Grafické vyjádření laboratorních zkoušek pevnosti v tlaku (pevnost + směrodatná odchylka).

Obr. 52: Grafické znázornění procentuálního zastoupení jednotlivých složek receptury drátkobetonu.

Obr. 53: Grafické porovnání pevnosti v tlaku drátkobetonu a vysokohodnotných betonů RCP1 - RCP5. (pevnost + směrodatná odchylka).



Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení cementů podle EN 197-1: Druhy a složení [1, 6]

Tab. 2: Třídy pevnosti cementů [7]

Tab. 3: Tlaková pevnost vysokohodnotného betonu v závislosti na hodnotě vodního součinitele. [2]

Tab. 4: Lyseho pravidlo: vliv maximálního zrna kameniva na dávku záměsové vody. [1]

Tab. 5: Stupně konzistence a sednutí kužele. [1]

Tab. 6: Sítový rozbor čediče frakce 0-4mm]

Tab. 7: Hodnoty součinitele A v Bolomeyově rovnici podle typu kameniva a požadované zpracovatelnosti.[1]

Tab. 8: Parametry pro užití jednotlivých rovnic ideálních křivek zrnitosti kameniva. [5]

Tab. 9: Požadavky na zrnitost dodávaných frakcí kameniva (čísla udávají propad síty v % hmotnosti, čtvercová síta v mm) [3]

Tab. 10: Druhy hornin a jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. [3]

Tab. 11: Druhy hornin a jejich mechanické vlastnosti.[10]

Tab. 12: Vlastnosti vláken do betonu. [3]

Tab. 13: Výstupní tabulka sítového rozboru čediče frakce 0/4mm.

Tab. 14: Celkové procentuální propady čediče frakce 0/4mm a ideálních křivek zrnitosti.

Tab. 15 Celkové procentuální propady čediče frakce 0/4mm, ideálních křivek zrnitosti a čediče s upravenou zrnitostí (1 díl frakce 0/4 mm + 0,85 dílu frakce 0/2mm).

Tab. 16: Navržené receptury HPC

Tab. 17: Receptura vysokohodnotného drátkobetonu.

Tab. 18: Výsledky laboratorních zkoušek pevnosti v tlaku drátkobetonu.