

# KŘIVKY ZRNITOSTI V OBLASTI FILLERŮ A CEMENTU

Luboš Musil, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
lubos.musil@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Článek popisuje návrh složení kameniva dle křivky zrnitosti. Modeluje a porovnává jednotlivé typy, které jsou dosud používané. Zaměřuje se především na oblast jemných příměsí a cementu, proto jsou křivky zrnitosti porovnány detailně i do velikosti zrn 0,25 mm v logaritmickém měřítku. Graficky popisuje vztah mezi jednotlivými křivkami a vhodnost použití pro složení kameniva speciálních betonů, jako jsou samozhutnitelné, vysokohodnotné a ultravysokopevnostní betony. Dále je článek zaměřen na nedostatky spojené s návrhem složení kameniva, příměsí a pojiva (cementu) pomocí křivky zrnitosti, které mohou mít podstatný vliv na konečné mechanicko-fyzikální charakteristiky výsledného kompozitu. Tyto nedostatky porovnává na normové zkoušce pevnosti cementu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Křivka zrnitosti • Příměs • Cement • Kamenivo • Návrh složení směsi

## ABSTRACT

In the paper describes is the design of the composition of the aggregate according to the grading curves. It models and compares the individual types that are currently in use. It mainly focuses on the zone of fine additions and cement, therefore the grading curves are compared in detail even up to a grain size of 0.25 mm on a logarithmic scale. It graphically describes the relationship between individual curves and the suitability of use for aggregate composition of special concretes, such as self compacting concrete, high performance concrete and ultra high performance concrete. Furthermore, the article is focused on the shortcomings associated with the design of the composition of aggregates, additions and cement using the grading curve, which can have a significant effect on the resulting mechanical-physical characteristics of the resulting composite. He compares these shortcomings on a standard of testing cement: Determination of strength.

## KEYWORDS

Grading Curve • Addition • Cement • Aggregate • Mix Design

## 1. ÚVOD

Určení vhodného složení kameniva betonové směsi je klíčové pro dosažení požadovaných mechanických vlastností betonu. Pro navrhování složení kameniva se používají křivky zrnitosti, které popisují procentuální zastoupení zrn různých velikostí v kamenivu. Existuje několik typů křivek zrnitosti, z nichž se každý typ hodí pro jiný druh betonu.

Článek porovnává křivky zrnitosti pro běžné betony, ale i křivky zrnitosti pro speciální aplikace s velkým podílem jemných plniv, jako jsou samozhutnitelné betony (SCC), vysokohodnotné betony (HPC) a ultravysokopevnostní betony (UHPC). Tyto křivky jsou navrženy tak, aby maximalizovaly objemovou hmotnost kompozita, minimalizovaly objem vzduchu a pórů, čímž zlepšují pevnostní charakteristiky, odolnost vůči agresivnímu prostředí atd. Všechny tyto metody a křivky jsou neustále objektem výzkumu a vývoje, aby se dosáhlo nejlepších výsledků pro konkrétní aplikace

Ačkoliv je navrženo velké množství křivek zrnitosti a s velkými detaily se určují koeficienty a exponenty u jednotlivých typů křivek, málo diskutovaným problémem je rozdílná měrná hmotnost jednotlivých složek kameniva, cementu a příměsí. Křivky zrnitosti totiž znázorňují procentuální podíl hmotnosti zrn o dané velikosti vzhledem k celkové hmotnosti zrn. Velmi dobrým příkladem jsou základní suroviny betonu – cement a například křemičité kamenivo. V případě použití hmotnostních poměrů v křivce zrnitosti budou objemové poměry podstatně rozdílné, čímž nedochází k požadovanému maximálnímu vyplnění veškerých dutin a pórů.

## 2. METODY

Nejprve je popsána základní křivka zrnitosti dle Fullera včetně úpravy rovnice pouze v exponentu. Z této křivky (rovnice) vychází další křivky, které jsou popsány v kapitole 2.2. Zde se jedná už o úpravu celé rovnice nebo doplnění konstantou. V kapitole 2.3 jsou porovnány základní jemné příměsí, filery a cement s ohledem na měrnou hmotnost a křivku zrnitosti. Veškeré modelované křivky jsou navrhované na maximální zrno kameniva  $D_{\max} = 4$  mm. Velikost maximálního zrna kameniva byla volena s ohledem na složení směsi samozhutnitelných betonů (SCC), vysokohodnotných betonů (HPC) a

\* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc., školitel specialista: Ing. Hana Hanzlová, CSc.

ultravysokopevnostních betonů (UHPC), které mají obvykle velké množství jemných příměsí, cementu a maximální zrno kameniva 2 mm nebo 4 mm. Potřebné  $D_{min}$  aplikované v rovnicích křivky zrnitosti dle Funka a Dingera bylo zvoleno se zřetelem na graf křivky zrnitosti mikrosiliky, jemně mletého vápence (viz Obrázek 3) s hodnotou 0,00001 mm.

V kapitole 2.3 jsou porovnané křivky zrnitosti a měrné hmotnosti jednotlivých příměsí, cementu. Dále je popsán porovnání křivky zrnitosti s poměrem hmotností a měrnou hmotností, který proběhl na zkoušce pevnosti cementu dle ČSN EN 196-1. Ta má přesně dané hmotnostní poměry složek včetně určených propadů sítím pro normové kamenivo.

### 2.1. Fullerova křivka a její optimalizace

Existuje mnoho typů křivek zrnitosti, které jsou založeny na různých teoriích a aplikacích. Jednou z nejznámějších metod je Fullerova křivka s exponentem 0,5, která se používá převážně pro běžné betony. Tato křivka je nejstarší známou běžně používanou křivkou zrnitosti pro betonové směsi. V průběhu doby byla křivka zdokonalovaná jak samostatným Fullerem, tak mnoha dalšími odborníky zkoumajících návrhy složení kameniva a cementových kompozit. Křivka zrnitosti dle Fullera popisuje podíl hmotnosti zrn o dané velikosti vzhledem k celkové hmotnosti. Je také nazývána Fullerovou parabolou a základní vzorec slouží pouze k návrhu složení kameniva, nikoli pro směs kameniva a pojiva, jak je často milně předpokládáno. Tato křivka se popisuje pomocí rovnice:

$$y = \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^q \times 100 [\%] \quad (1)$$

Kde:

y	celkový propad sítím d, v % hmotnosti
d	uvažovaná velikost zrna (mm)
$D_{max}$	uvažovaná maximální velikost zrna kameniva (mm)
q	exponent (v základní metodě pro běžné betony 0,5)

V roce 1930 se Andreasen pokusil vylepšit Fullerovu křivku. Navrhl použít exponent q v rozsahu 0,33 – 0,5 s ohledem na jemné příměsí, které zajišťují větší hutnost kompozitu a tím i jeho mechanicko fyzikální vlastnosti. Andreasen a Andersen [1] zjistili, že optimálního uspořádání se dosáhne, když je přibližně  $q = 0,37$ . Tento návrh je často označován jako A&A. Proměnné q činí model A&A vhodným pro částice o velikosti menší než 500  $\mu\text{m}$ . Obecně platí, že čím více jemných částic (< 250  $\mu\text{m}$ ) ve směsi, tím menší q nejlépe charakterizuje křivku zrnitosti směsi [2]. Ověřením této hypotézy a aplikací modelu A&A byla tzv. japonská metoda provedená vědci Okamura a Ouchi specializovaných na SCC. Dále je známá tzv. čínská metoda pro návrh křivky zrnitosti s parametrem  $q = 0,3$ . Dle nejnovějších výzkumů se pro návrh křivky zrnitosti SCC a UHPC používají ještě menší parametry q. Nejčastěji v rozmezí 0,22 – 0,27 [3]. Hummel v roce 1959 uvedl jinou hodnotu  $q = 0,4$  pro těžené kamenivo a  $q = 0,3$  pro drcené kamenivo pro dosažení maximální hustoty plniva s proměnlivým tvarem kameniva. De Larrard v roce 1999 konstatoval, že hodnoty exponentu pro optimalizaci hustoty plniva se měnily s hustotou

výplně jednotlivých velikostních frakcí a stupněm zhutnění. Proto není možné stanovit optimální distribuci velikosti částic pro všechny případy [4].

### 2.2. Modifikace křivky zrnitosti

Ve skutečnosti musí existovat konečná spodní hranice velikosti zrn křivky zrnitosti. Funk a Dinger [5] proto navrhli upravený model založený na A&A rovnici, který je popsán následovně:

$$y = \frac{d^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \times 100 [\%] \quad (2)$$

Kde:

y	celkový propad sítím d, v % hmotnosti
d	uvažovaná velikost zrna (mm)
$D_{max}$	uvažovaná maximální velikost zrna kameniva (mm)
$D_{min}$	uvažovaná minimální velikost zrna kameniva (mm)
q	exponent (dle studií uvažovaný 0,25)

Fuller a Thompson studovali širokou škálu typů kameniva a směsí, aby dosáhli maximální hustoty navržené směsi kameniva. Nejprve objevili základní křivku s exponentem  $q = 0,5$ , která je správně označovaná jako Fullerova parabola a lze ji použít pouze pro výpočet optimální zrnitosti kameniva (viz předchozí odstavce), ale neplatí pro směs kameniva a pojiva jak se často zaměňuje a jak je uvedeno později Fullerem [6]. Proto již na počátku 20. století provedli Fuller a Thompson úpravu paraboly. Je tomu tak proto, že směs kameniva, která poskytuje maximální hustotu v suchém stavu, nemusí nutně dosáhnout nejvyšší hustoty, když je namíchaná s cementem a vodou. Nově navržená, tzv. ideální Fullerova křivka pro zrnitost kameniva a jemných materiálů je definovaná elipsou a křivkou. Teoreticky se skládá z elipsy ve spodní části přecházející v přímkou tečnou k eliptické části:

Eliptická část:

$$\frac{(y-7)^2}{b^2} + \frac{(x-a)^2}{a^2} = 1 \quad (3)$$

Přímá část:

$$y = \frac{100-y_1}{D_{max}-x_1} \times (x_0 - x_1) + y_1 \quad (4)$$

Kde:

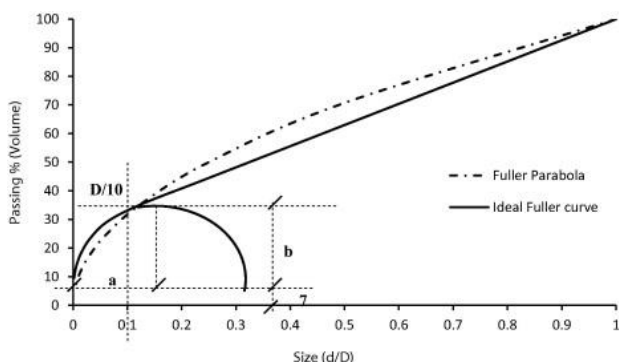
a, b jsou osy elipsy (závislé na tvaru částic a maximálním zrnu kameniva)

$$x_0 = \left(\frac{D_{max}}{10}; D_{max}\right) \quad (5)$$

$$x_1 = \frac{D_{max}}{10} \quad (6)$$

$$y_1 = y \left(\text{při } \frac{D_{max}}{10}\right) \quad (7)$$

Výsledné porovnání Fullerovy paraboly pro složení kameniva a Fullerovy ideální křivky zrnitosti kameniva, jemného plniva a pojiva je vidět na Obr. 1. S ohledem na složitost návrhu, který zde závisí mimo jiné na tvaru částic, nebyla křivka modelovaná, ale pouze znázorněna na obrázku.



Obrázek 1. Porovnání Fullerovy paraboly a Fullerovy ideální křivky [9]

Jeden z neznámějších návrhů betonových směsí je dle Bolomeye. Ten rozšířil Fullerovu parabolickou rovnici přidáním empirické konstanty A, která zahrnuje i zpracovatelnost a tvar zrna, aby zlepšil navrhovanou směs:

$$y = A + (100 - A) \times \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{0,5} \quad (8)$$

Kde:

y celkový propad sítem d, v % hmotnosti

d uvažovaná velikost zrna (mm)

$D_{max}$  uvažovaná maximální velikost zrna kameniva (mm)

A empirická konstanta dle tabulky na Obrázku 2.

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

Obrázek 2. Konstanta A dle typu kameniva a konzistence [7]

Další modifikace Fullerovy křivky probíhaly i ve švýcarském federálním zkušebním a výzkumném centru materiálů (EMPA - Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungs Anstalt). Výsledkem jsou dvě rovnice křivky zrnitosti:

$$y = 50 \times \left(\frac{d}{D_{max}} + \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{0,5}\right) \quad (9)$$

$$y = 20 \times \left(\frac{d}{D_{max}} + 4 \times \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{0,5}\right) \quad (10)$$

Kde:

y celkový propad sítem d, v % hmotnosti

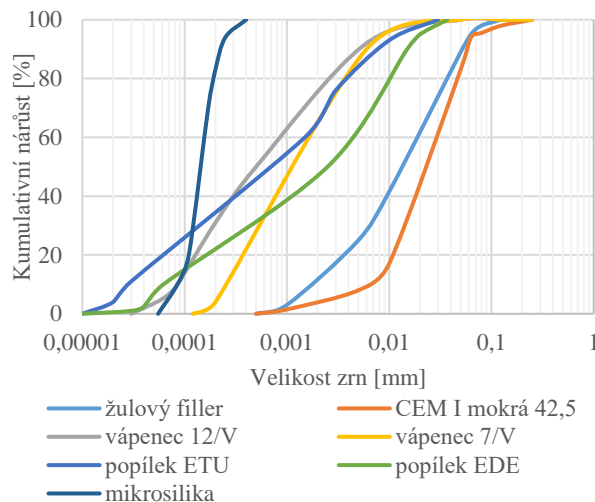
d uvažovaná velikost zrna (mm)

$D_{max}$  uvažovaná maximální velikost zrna kameniva (mm)

### 2.3. Charakterizace kameniva, příměsí a cementu

Aby bylo možné navrhnout přesné složení křivky kameniva včetně jemných částic a cementu, jsou na Obrázku 3 znázorněny křivky zrnitosti běžně používaných jemných příměsí do betonu, včetně cementu, zde uvažovaným CEM I 42,5 Mokrý. Měření distribuce takto jemných částic se neprovádí na běžných sítích, ale přesně např. pomocí laserové difrakce. Křivka žulového filleru byla součástí vlastního výzkumu, ostatní křivky byly převzaty [8], [9]. Některé příměsí mohou mít určitý rozptyl, proto u vápenců byly vybrány krajní hodnoty, které se dle normy

ve stavebnictví používají. Obdobně je to i u popílků, kde byly vybrané také 2 druhy „EDE“ (elektrárna Dětmorovice, klasický, černouhelný popílek) a „ETU“ (elektrárna Tušimice, klasický, hnědouhelný popílek). Obdobně to může být i u mikrosiliky, které je rovněž více typů. V tomto článku byly použity hodnoty šedé mikrosiliky FeSi75%.



Obrázek 3. Křivky zrnitosti jednotlivých mikroplniv, cementu [8], [9]

Důležitým aspektem pro tento článek je měrná a objemová hmotnost jednotlivých složek, která je uvedena v Tabulce 1. Hodnoty jsou zde pouze přibližné pro základní porovnání. V praxi se musí průběžně ověřovat, jelikož závisí na přesném složení suroviny, které se může i v průběhu těžby nebo výroby surovin měnit.

Tabulka 1. Měrná hmotnost cementu, příměsí a kameniva

[kg/m <sup>3</sup> ]	Uvažované hodnoty	Obvyklý rozsah	
cement	3100	3050	3150
mikrosilika	2200	2100	2500
popílek	2100	2000	2600
struska	2900	2400	3000
vápenec	2700	2400	2900
mletý křemen	2650		
žulový filer	2550		
křemičité kamenivo	2600		

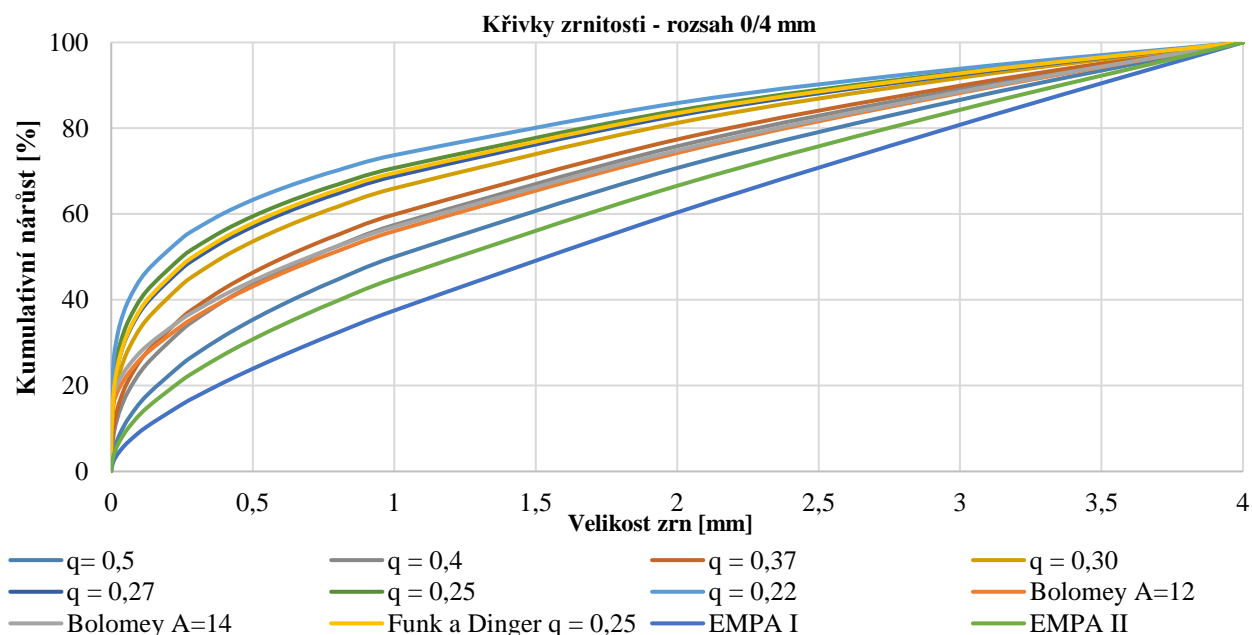
Z uvedené tabulky 1 je vidět, že složky mají široký rozptyl hodnot. Rovněž mezi jednotlivými složkami je podstatný rozdíl. Základním předpokladem je, že kompozit vždy obsahuje nejvíce kameniva a cementu. Ostatní příměsí jsou v menší míře. Proto je tento poměr nejvíce rozhodující. Z těchto důvodů proběhlo porovnání křivek zrnitosti na normové zkoušce pevnosti betonu ČSN EN 196-1, která má pevně daný hmotnostní poměr cementu, kameniva a vody. Kamenivo v této zkoušce má rovněž přesně určené propady sítem, čili křivku zrnitosti kameniva.

### 3. VÝSLEDKY

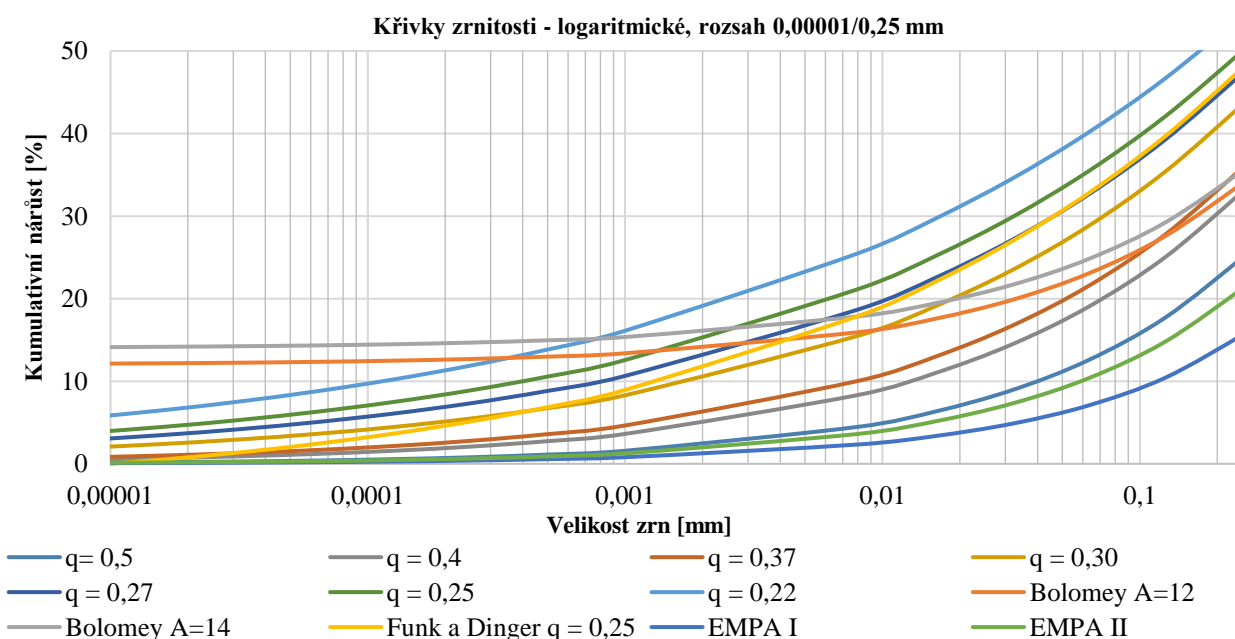
#### 3.1. Porovnání křivek zrnitosti

V programu Microsoft Excel byly vymodelovány všechny popsané typy křivek kromě upraveného typu Fullera a Thompsona s elipsou ve spodní části. Křivky jsou s ohledem na množství a přehlednost zobrazeny ve dvou grafech – celé křivky (viz Obrázek 4) a křivky v logaritmickém měřítku do velikosti zrna 0,25 mm (viz Obrázek 5). Výsledky lze rozdělit do základních 3 typů. Křivky zrnitosti pouze kameniva – Fullerova parabola, EMPA I, EMPA II. U těchto typů křivek je směs

tvořena spíše většími zrny kameniva. Druhý proud křivek je návrh dle Bolomeye ( $A = 12$ ,  $A=14$ ) a Fullerova křivka s exponentem  $q = 0,4$ ,  $q = 0,37$ . Tento typ křivek lze označit jako křivky zrnitosti kameniva, mikroplnivna a cementu. Výrazný rozdíl u těchto křivek je především u malých zrn, kdy návrh dle Bolomey obsahuje velké množství malých zrn a to 12 – 14 % dle použité konstanty A (viz Obrázek 5). Posledním typem křivek je Fullerova parabola s exponentem  $q = 0,3$ ,  $q = 0,27$ ,  $q = 0,25$ , Funk a Dinger s exponentem  $q = 0,25$ , které lze charakterizovat jako křivky zrnitosti s cementem a výrazným podílem jemných zrn (celkem i přes 50% složení kameniva menší než 0,25 mm – viz Obrázek 5).

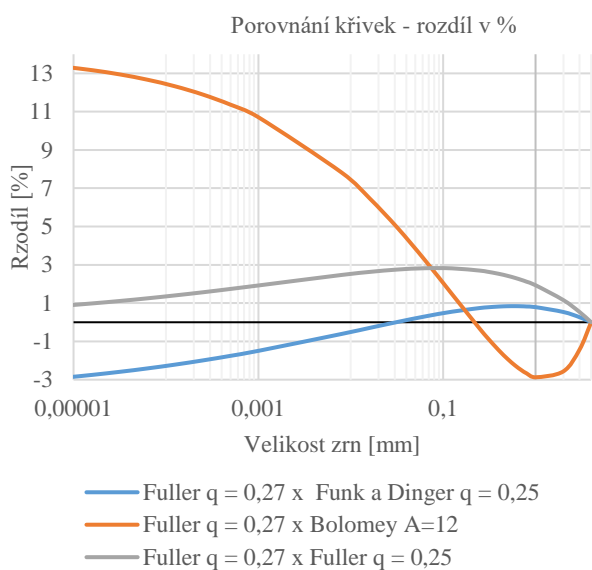


Obrázek 4. Prorovnání – celé křivky zrnitosti



Obrázek 5. Porovnání – křivky zrnitosti do 0,25 mm

Jako speciální případ lze označit Fullerovu parabolu ( $q = 0,27$ ) a křivku, kterou navrhl Funk a Dinger s exponentem  $q = 0,25$ . Tyto dvě křivky se takřka shodují s výjimkou zrn do velikosti 0,01 mm, kde Fullerova parabola má i pro nejmenší zrna propad cca 2,9 %, zatímco křivka dle Funka a Dingera jde do 0 (viz Obrázek 5, Obrázek 6). Současně je porovnaná Fullerova parabola s různými exponenty, kde je vidět na Obrázku 6, že v případě změny exponentu o 0,02 je maximální rozdíl mezi křivkami do 3 %. Znatelný rozdíl (necelých 7 %) je už při změně exponenta o hodnotu 0,05. Pro přehlednost je u těchto křivek přesné porovnání v logaritmickém měřítku, kde je vyneseno procentuální rozdíl mezi jednotlivými křivkami u dané velikosti zrna kameniva.

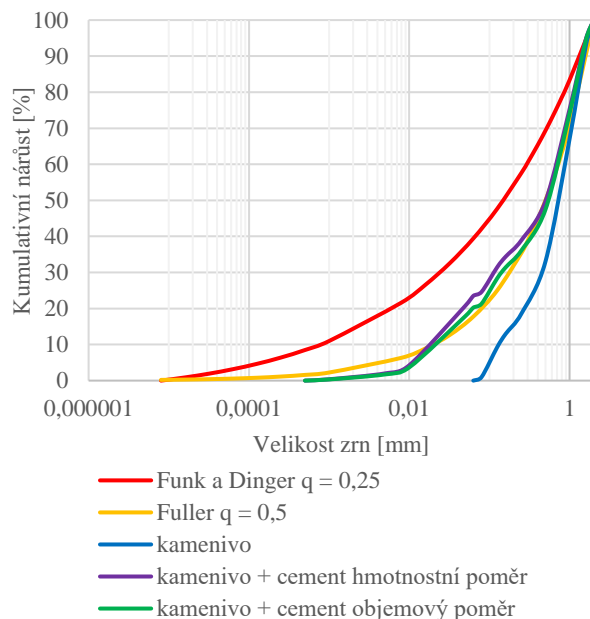


Obrázek 6. Procentuální rozdíl mezi křivkami

### 3.2. Porovnání křivek zrnitosti včetně cementu a měrné hmotnosti

Vhodnou ukázkou je zkouška pevnosti cementu dle ČSN EN 196-1. Ta má přesně dané hmotnostní poměry včetně určené křivky zrnitosti pro normové kamenivo. Na Obrázku 7 je znázorněná křivka zrnitosti pro zkoušku pevnosti cementu dle normy, kde zkoušený cement je CEM I Mokrý 42,5. Jak si lze v grafu všimnout, křivka zrnitosti kameniva včetně cementu kopíruje Fullerovu parabolu s exponentem  $q = 0,5$ . Jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích, tato křivka slouží pouze pro návrh kameniva, nikoliv mikroplniv a cementu. Pro porovnání je v grafu znázorněna i křivka zahrnující mikroplniva od Funka a Dingera s exponentem  $q = 0,25$ . Z těchto výsledků tudíž vyplývá, že je zde ještě velký prostor pro přidání mikroplniv, které mohou ztuhnout strukturu kompozita, čímž může kompozit vykazovat lepší mechanicko fyzikální vlastnosti. V níže uvedeném Obrázku 7 je porovnaná i křivka zrnitosti kameniva a cementu v hmotnostním i objemovém poměru. U jemných částic můžeme vidět mezi křivkami rozdíl, který je v maximální hodnotě 3,4 %.

Porovnání křivek zrnitosti s ohledem na cement a jeho měrnou hmotnost

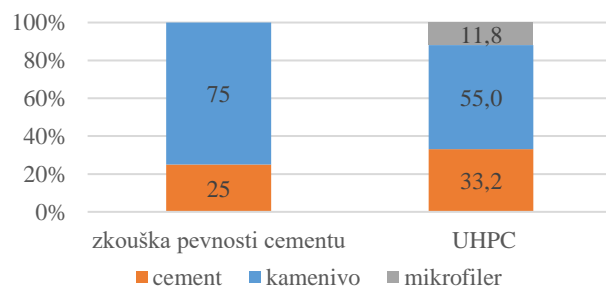


Obrázek 7. Porovnání křivek zrnitosti s ohledem na cement a jeho měrnou hmotnost

## 4. DISKUZE

Závažným nedostatkem je uvažování křivek zrnitosti dle hmotnostních poměrů. To bylo potvrzeno u předešlých vlastních výzkumů, kdy při náhradě cementu žulovým filerem jsou při normových zkouškách cementu naměřeny a spočteny větší pevnostní charakteristiky. S tímto souvisí právě měrná hmotnost, jelikož byl cement nahrazován hmotnostním poměrem, nikoliv objemovým [10].

Obdobně jako u zkoušky pevnosti cementu s uvážením měrných hmotností by to mohlo být i u vysokohodnotných a ultravysokopevnostních betonů, jelikož obsahují velké množství cementu ve směsi. Největší rozdíly měrných hmotností jsou právě mezi cementem a křemičitým kamenivem. Dle typu takto navzrženého betonu, může směs obsahovat i přes 1000 kg cementu na  $m^3$ . Například v metodice pro UHPC z roku 2014 v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze bylo složení UHPC: 700 kg cementu, 1160 kg křemičitého kameniva (frakce 0/2) a 250 kg mikrofilérů (křemičitý úlet + struska) [11]. Což je v poměru více cementu ve směsi než při zkoušce pevnosti cementu (viz Obrázek 8).



Obrázek 8. Hmotnostní poměr pevných složek [%]

## 5. ZÁVĚR

Pro složení cementových kompozit existuje mnoho návrhů i mnoho typů křivek zrnitosti. Křivky zrnitosti lze rozdělit do základních proudů, z nichž některé uvažují kamenivo včetně mikroplniva, pojiva (cementu) a některé tyto složky neuvažují. V průběhu let jsou křivky zrnitosti stále vyvíjené a to zejména v oblasti samozhutnitelných, vysokohodnotných a ultravysokopevnostních betonů. Dle výše uvedených poznatků spolu některé křivky téměř korelují. Rozdíl mezi křivkami je minimální, například u návrhu dle Fullera s koeficientem  $q = 0,27$  a návrhem dle Funka a Dingera s exponentem  $q = 0,25$  je maximální rozdíl mezi křivkami 3,1 %. Obdobně je rozdíl 3 % mezi křivkami při změně exponentu u základní Fullerovi rovnice o 0,02.

Nezanedbatelnou a velmi opomíjenou skutečností při návrhu křivek zrnitosti je poměr jednotlivých složek. Obvykle se uvádí hmotnostní poměry kameniva, pojiva, příměsí a zapomíná se na rozdílné měrné hmotnosti jednotlivých složek, což může mít v případě některých návrhů zásadní vliv na výsledné charakteristiky navrženého kompozita. Při porovnání křivky zrnitosti pro zkoušku pevnosti cementu s a bez uvažování měrné hmotnosti cementu je rozdíl mezi křivkami zrnitosti 3,4 %. Rozdílná hodnota křivek zrnitosti při úvaze měrné hmotnosti jednotlivých složek je větší, než některé rozdílné hodnoty mezi jednotlivými typy křivek zrnitosti. Z těchto výsledků vyplývá, že je vhodné uvažovat i měrné hmotnosti a nazaměřovat se pouze na samostatnou křivku zrnitosti. Větší chyby při návrhu křivky zrnitosti lze předpokládat u speciálních betonů (HPC, UHPC), které obsahují velké množství cementu a jemných příměsí, jak bylo naznačeno v diskuzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS22/091/OHK1/2T/11.

## Reference

- [1] A.H.M. Andreasen, J. Andersen, Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus lost Körnern (mit einigen Experimenten), Kolloid-Zeitschrift, 50 ( 1930 ) , s . 217-228
- [2] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, Cement and Concrete Research, 35, 2005, s. 2116-2136, ISSN 0008-8846
- [3] S.V. Kumar, Santhanam, Manu. (2003). Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. Indian Concrete Journal. 77. 1324-1331
- [4] Wang, Xuhao. (2014). Proportioning and performance evaluation of self-consolidating concrete.
- [5] J.E. Funk, D.R. Dinger, Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions, Applied to Ceramic Manufacturing, Kluwer Academic Publishers, Boston, the United States (1994)
- [6] W.B. Fuller, S.E. Thompson, Zákony dávkování betonu ASCE J Transp, 59 (1907), s. 67-143
- [7] 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
- [8] ELFMARKOVÁ, Veronika. Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórovitého systému betonu. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Rudolf Hela.
- [9] V. M. MALHOTRA, et col. Condensed Silica Fume in Concrete. 2. CRC Press, 2018. ISBN 0-8493-5657-1.
- [10] L. Musil, T. Cibulka, J. Vodička, R. Chylík, Characterization of Fillers Made of Natural Stones as a Cement Substitute In: International Conference Building Materials, Products and Technologies (ICBMPT 2020), 2021. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. vol. 1039. ISSN 1757-899X.
- [11] Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014