



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

OPTIMALIZACE TYPŮ, GRANULOMETRIE A TVARU JEMNÝCH ČÁSTIC PRO SPECIÁLNÍ BETONY

OPTIMIZATION OF TYPES, GRANULOMETRY AND FINE PARTICLE SHAPE FOR
SPECIAL CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaromír Jobánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.,

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jaromír Jobánek
Název	Optimalizace typů, granulometrie a tvaru jemných částic pro speciální betony
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Literatura: Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných sympozií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2014 – 2017

Hela,R.: Technologie betonu I, II, studijní opory VUT FAST Brno

Colepardi,M.: Moderní beton, ČBS, 2009

Rozsah: min 70 stran

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Moderní technologie betonu se ubírá cestou tzv. vysokopevnostních betonů (HSC), která dosahují pevností 80 až 110 MPa. Současně tyto betony mají vysokou trvanlivost vůči působení kapalných chemicky agresivních prostředí a cyklickému zmrazování. Důvodem je dosažení velmi hutné struktury cementového kamene. Zásadní možností jak toho dosáhnout je optimalizovat granulometrii jemných částic do 0,125 mm. Cílem práce bude navrhnout optimální křivky zrnitosti do 0,125 mm pro směsi různých cementů, fillerů, el. popílků, mikromletých vápenců a jemně mleté strusky pro zajištění minimální mezerovitosti v suchém stavu. Následně vyrobí kaše pro ověření vlivu na pevnosti v tlaku. Poté vybrat nejlepší varianty a navrhnout betony s pevnostmi min. 80 MPa a ověřit opět dopady na pevnosti v tlaku, mrazuvzdornost, nasákavost zatvrdlých betonů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci křivky zrnitosti použitím příměsí. K návrhu betonu výborných vlastností je často třeba dosáhnout vyšší hutnosti směsi, a to pomocí návrhu vhodné křivky zrnitosti. Také jsou v práci popisovány betony speciálních vlastností a různé druhy příměsí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optimalizace, granulometrie, jemné částice, příměsí, pórovitost, tvar zrn, hutnost, křivka zrnitosti

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on optimization of particle size distribution using concrete additions. To design a concrete of excellent properties, it is often necessary to achieve a higher packing density of the mixture by designing a suitable particle size distribution curve. Concrete with special properties and various types of powder additions are also described.

KEYWORDS

Optimization, granulometry, fine particles, additions, porosity, grain shape, density, particle size distribution

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. JOBÁNEK, Jaromír. Optimalizace typů, granulometrie a tvaru jemných částic pro speciální betony. Brno, 2019. 73 s. 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Optimalizace typů, granulometrie a tvaru jemných částic pro speciální betony* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Jaromír Jobánek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Optimalizace typů, granulometrie a tvaru jemných částic pro speciální betony* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Jaromír Jobánek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci poděkovat svému vedoucímu prof. Rudolfu Helovi, Csc. za vedení při práci, dále pak Denise Jančaříkové, Phd. za pomoc při provádění praktické části práce a také pracovníkům výzkumného centra AdMas a školních laboratoří za pomoc při provádění zkoušek. Také bych chtěl poděkovat rodině a všem blízkým za podporu a pochopení během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	10
CÍL PRÁCE	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 SPECIÁLNÍ BETONY.....	12
1.1 Vysokohodnotný beton (HPC).....	13
1.2 Vysokopevnostní beton (HSC).....	14
1.2.1 Reaktivní práškové kompozity	14
1.2.2 Ductal®.....	15
1.3 Samozhutnitelný beton (SCC)	16
1.4 Vláknobeton	17
1.4.1 Polymerní mikrovlákná	18
1.4.2 Polymerní makrovlákná	18
1.4.3 Ocelová vlákna.....	18
1.4.4 Jiná vlákna	19
1.5 DSP betony	19
1.6 Těžký beton.....	20
2 STRUKTURA BETONU	21
2.1 Tranzitní zóna betonu	22
3 OPTIMALIZACE SKLADBY PEVNÝCH ČÁSTIC	23
3.1 Křivky zrnitosti.....	26
3.2 Modely zhutňování	28
4 CEMENT.....	29
5 SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADY.....	30
6 KAMENIVO	31
7 PŘÍMĚSI	31
7.1 Popílek.....	33
7.1.1 Vysokoteplotní popílek.....	33
7.1.2 Fluidní popílek	34
7.2 Mikromletý vápenec.....	35
7.3 Vysokopevní struska.....	35
7.4 Mikrosilika (křemičité úlety)	36
7.5 Metakaolin	37

7.6	Nanočástice	38
7.7	Filery	38
7.8	Pigmenty	38
PRAKTICKÁ ČÁST.....		39
8	SCHÉMA PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	39
9	POUŽITÉ METODY	40
9.1	Stanovení granulometrie	40
9.2	Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky	40
9.3	Mezerovitost jemných materiálů.....	41
9.4	Reologie cementové pasty	43
9.5	Rtuťová porozimetrie	44
9.6	Objemová hmotnost	45
9.7	Pevnost v tahu za ohybu.....	45
9.8	Pevnost v tlaku	46
10	ZKOUŠKY NA VSTUPNÍCH SUROVINÁCH.....	46
11	VYTVOŘENÉ KOMBINACE PŘÍMĚSÍ A NA NICH PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY	49
12	ZKOUŠKY NA CEMENTOVÝCH PASTÁCH	53
13	ZKOUŠKY NA CEMENTOVÝCH MALTÁCH	60
ZÁVĚR.....		65
14	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	67
15	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
16	SEZNAM TABULEK	73

ÚVOD

Beton je nejpoužívanějším stavebním materiálem, a tak není divu, že se tento kompozitní materiál dále vyvíjí a vznikají různé druhy speciálních betonů, které se poněkud liší od běžného betonu. Buď svými vlastnostmi nebo chováním, jak v čerstvém či ztvrdlém stavu.

S neustálým stavebním rozvojem, s omezenými plochami v moderních městech jsou budovány stále vyšší a obdivuhodnější budovy, které by nevznikly bez vývoje určitých speciálních betonů. Dnes se pod souhrnným názvem vysokohodnotný, případně ultra vysokohodnotný beton, skrývá několik zásadních druhů betonů s velmi dobrými vlastnostmi. K dosažení těchto vlastností bylo třeba dlouhého vývoje v technologii betonu a z posledních několika vývojově bohatých desetiletí je třeba zmínit vynalezení superplastifikačních přísad, které daly možnost vytvoření právě těchto speciálních betonů, zejména samozhutnitelné betony by se bez této velmi účinné přísady neobešly. K dalšímu zlepšení neméně přispělo použití příměsí, hlavně těch aktivních, ale i pasivních. Je třeba se ale také zaměřit na správný návrh směsi, aby bylo dosaženo co nejpevnější struktury, čemuž napomáhá vhodná skladba všech tuhých částic betonové směsi. Proto se v poslední době dává význam i skladbě těch nejjemnějších zrn.

CÍL PRÁCE

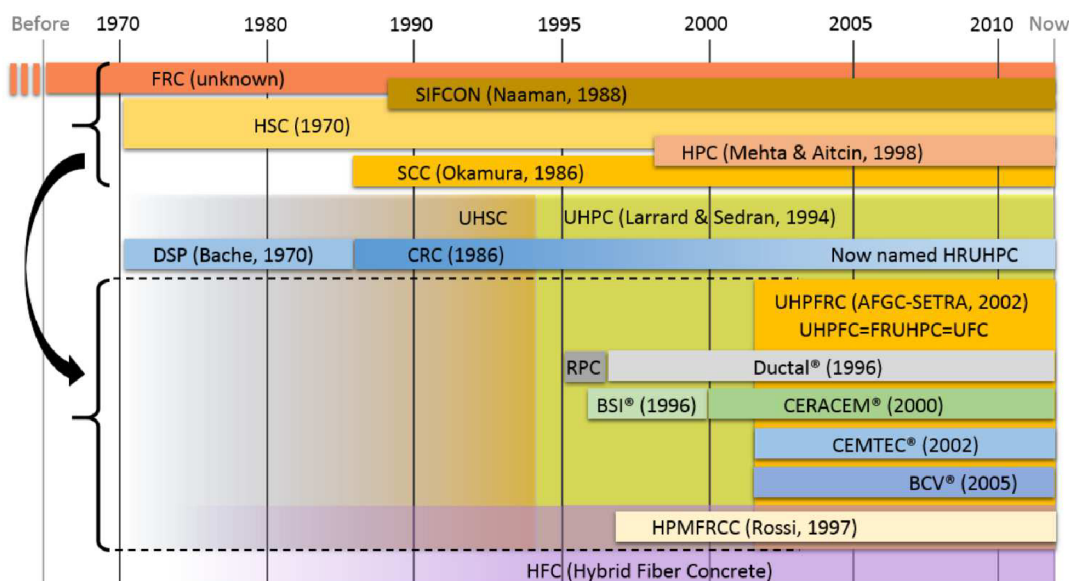
V teoretické části budou popisovány speciální betony obecně a pak i u některých zástupců konkrétně. Dále bude popisována struktura betonu s důrazem na dosažení co nejmenší mezerovitosti. Principy návrhu množství zejména jemných podílů v betonu. Také bude popsáno fungování superplastifikačních přísad, protože jsou nedílnou součástí těchto betonů. Na konci teoretické části bude věnována pozornost jemným podílům v betonech, mezi které patří cement, jemné kamenivo a mnoho různých příměsí.

Praktická část se věnuje zkoušení různých příměsí s cílem smísení několika z nich v ideálním poměru, za účelem dosažení co nejnižší mezerovitosti a co nejvyšší pevnosti.

TEORETICKÁ ČÁST

1 SPECIÁLNÍ BETONY

S rostoucími požadavky na všechny stavební materiály se neustále vyvíjí i technologie betonu, nachází se nové typy betonů, jejichž dosažené kvality by se ještě poměrně nedávno zdály nereálné. Od Pantheonu v Římě prošel beton mnoha proměnami. Mezi významné kroky můžeme řadit vynález železobetonu na konci 19. století ve Francii, dále inovaci výztuže předepínáním na začátku 20. století. Dále se přes vynález plastifikační přísady používané od 30. let 20. století dostáváme až k vývoji vysokopevnostních betonů, které se začaly používat v USA v 70. letech minulého století. V té době se tímto termínem označovaly betony, které měly po 28 dnech pevnost v tlaku alespoň 40 MPa. Požadavky na betony dále rostly s tím, jak se projekty staveb stávaly více a více náročnějšími. Byly vyvíjeny další a efektivnější postupy a nacházeny další suroviny pro výrobu betonu. Velký pokrok přineslo použití superplastifikačních přísad, které svou významnou redukcí záměsové vody umožnily zlepšení i dalších vlastností mimo pevnosti, například modul pružnosti, otěruvzdornost, vodotěsnost a s tím související trvanlivost. Z toho plynul vznik tzv. vysokohodnotných betonů, anglicky High Performance Concrete (HPC). Díky superplastifikačním přísadám mohl také vzniknout samozhutnitelný beton (SCC), který eliminuje poruchy vzniklé špatným hutněním v případě běžných vyztužených betonů. Tyto betony jsou velmi náchylné na přesnost dávkování složek, a i při malé změně v dávkování může dojít k velkým změnám ve vlastnostech výsledného betonu. Také zde bývá vyšší spotřeba pojiva, tedy cementu, který bývá nejčastěji používán CEM I, doplněný o aktivní příměs, případně kombinací více z nich. Jednotlivé složky betonu se také nesmí negativně ovlivňovat. [1, 8, 14]



Obrázek 1: vývoj některých speciálních betonů na časové ose [26]

1.1 Vysokohodnotný beton (HPC)

Vysokohodnotné betony se od běžných betonů liší menší pórovitostí, a to má následně vliv na důležité vlastnosti betonu. Mezi tyto vlastnosti nepatří pouze pevnosti, ale také odolnost proti vnějším vlivům, životnost, menší propustnost, vyšší modul pružnosti. Zkratka HPC vychází z anglického High Performance Concrete. Díky zlepšeným vlastnostem mohou být poté konstrukce subtilnější, což navíc konstrukci mírně odlehčí. Těchto speciálních vlastností je dosaženo použitím vhodného kameniva, u kterého je sledována granulometrie, použitím cementu a příměsí, superplastifikační přísady a omezením vodního součinitele. Cementový kámen musí obsahovat co nejméně pórů, které běžně způsobují defekty. K zaplnění těchto pórů slouží jemné podíly v betonu a hydratační produkty reakcí. Nejreaktivnější příměsí je mikrosilika, protože je velmi jemná a obsahuje velké množství reaktivního oxidu křemičitého. Vysokohodnotný beton zahrnuje velké množství podkategorií, řadíme sem například vysokopevnostní, ultra-vysokopevnostní, ultravysokohodnotné, samozhutnitelné betony a další. [1, 3, 5, 8]

1.2 Vysokopevnostní beton (HSC)

U tohoto betonu je pozornost směřována hlavně k jeho fyzikálně mechanickým vlastnostem. Obvykle sem řadíme betony od pevnostní třídy C 60/75 až do C 110/115 nebo lehké betony od třídy LC 50/55 do LC 80/88. Pro dosažení těchto pevností se používá hrubé kamenivo, které má také vyšší pevnosti, což může mírně zvýšit objemovou hmotnost tohoto betonu. U těchto betonů může být zlepšen i poměr pevnosti v tahu za ohybu k pevnosti v tlaku, který je běžně 1 : 10, může zde být dosaženo poměru až 1 : 8. S pevnostmi také roste i modul pružnosti, který samozřejmě také závisí na modulu pružnosti použitého kameniva. [1, 8]

1.2.1 Reaktivní práškové kompozity

Jsou speciální materiály vyznačující se velmi jemným složením, bez výskytu hrubého kameniva. Tento kompozit je často nazýván také reaktivním práškovým betonem, ale toto označení není zcela správné z důvodu chybějícího hrubého kameniva. I přesto se všeobecně řadí mezi UHPC – ultravysokohodnotné betony. Tento materiál je extrémně mechanicky odolný, pevnost v tlaku dosahuje až 350 MPa. Nízká mezerovitost kompozitu bude znamenat vyšší trvanlivost a společně s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi také dlouhou životnost. Pojivem v tomto kompozitu je portlandský cement vyšší pevnostní třídy, společně s některou z aktivních betonářských příměsí. Jako plnivo je zde použit pouze velmi jemný písek, který musí mít velmi dobré fyzikálně – mechanické vlastnosti. Maximální velikost zrna je do 300 μm . Důležitou podmínkou pro dosažení požadovaných vysokých pevností je použití superplastifikační přísady a s tím spojená redukce vodního součinitele, protože nadměrné množství vody by znamenalo zvýšení porozity v mikrostruktuře a tím i zhoršení důležitých vlastností. Ve struktuře kompozitu je kladen důraz na minimální mezerovitost, proto je důležitá křivka zrnitosti i takto jemné směsi. Křivka zrnitosti by měla být plynulá, aby mohly být případné mezery mezi většími zrny zaplněny těmi jemnějšími. Také bychom se většinou při přípravě neobešli bez vláken, ta mohou být buď ocelová,

nebo organická. Avšak vzhledem k jemnosti směsi jsou tato vlákna jiná než u běžných betonů s rozptýlenou výztuží. Ocelová vlákna mají obvykle průměr 0,5 mm a délku 12 mm, nicméně tyto rozměry jsou v poměru k maximálnímu zrnům kameniva (0,3 mm) velmi výhodné pro mechanickou odolnost. Nevýhodou těchto kompozitů je vysoká cena, která vzniká kombinací více faktorů, kterými jsou vyšší spotřeba cementu, použití nejúčinnějších superplastifikačních přísad, které jsou dražší než běžně používané přísady a velmi často používaná mikrosilika, která je nejdražší z běžně využívaných příměsí nebo potřeba náročnějšího ošetřování. Zmiňované ošetřování může probíhat různými způsoby, podle složení materiálu a potřeby rychlosti nárůstu pevností. [1, 14]

1.2.2 Ductal®

Jedním z nejznámějších a nejstarších RPC kompozitů je Ductal®, dodávaný v podobě suché směsi, kterou poté stačí rozmíchat s určeným množstvím vody. Tento kompozit byl vyvinut známou firmou Lafarge a dosahuje pevnosti v tlaku až 200 MPa. Směs se skládá z cementu, křemičitého písku a moučky, mikrosiliky, ocelových nebo organických vláken a superplastifikační přísady. Čerstvá směs má i přes relativně nízký vodní součinitel poměrně dobrou tekutost, která je dána velkým množstvím jemných částic a použitím superplastifikační přísady. Využití tento materiál nalézá v různých odvětvích stavebnictví. Příkladem použití mohou být dopravní stavby, jako jsou lávky, mosty a další, nebo třeba občanská výstavba. Díky jemnosti směsi a její pro ukládání výhodné konzistenci lze Ductal® vytvářet jako pohledový materiál. [14, 16, 28]

Tabulka 1: ukázková receptura RPC kompozitu Ductal

složka	Množství na 1 m ³
CEM I	750 kg
Voda	145 l
Vodní součinitel	0,19
Křemičitý písek (maximální zrno 0,6 mm)	1000 kg
Křemenná moučka	260 kg
Mikrosilika	260 kg
Ocelová vlákna	160 kg
Superplastifikační přísada	Dávkování podle výrobce



Obrázek 2: fasádní desky z Ductalu [27]

1.3 Samozhutnitelný beton (SCC)

Jak už název napovídá, tento speciální druh betonu se vyznačuje ukládáním bez potřeby dalšího hutnění. Vývoj těchto betonů probíhal přibližně od roku 1975 v Japonsku, avšak v té době už byl v Evropě známý beton velice podobný, který potřeboval jen nepatrnou vibraci. Výhodou je, že eliminuje chyby při provádění vibrace, které mohou způsobit problémy a jejich oprava je obtížná a někdy i nemožná. Další výhodou je rychlost ukládání a snížení počtu dělníků při ukládání a také omezení hlučnosti na stavbě. Tím, že je samozhutnitelný beton typický svou

tekutostí, musí vynikat odolností proti segregaci, aby nedocházelo ke zhoršení kvality betonu. Oproti běžnému betonu potřebuje SCC pro svoji pohyblivost zvýšený objem cementové matrice v poměru k objemu kameniva. Kamenivo je omezeno maximální velikostí zrna, která je u SCC menší, protože větší zrna by se hůře pohybovala a narážela do sebe, následně by mohlo docházet k blokaci. Samozhutnitelný beton je vhodný i jako architektonický, protože perfektně vyplňuje i složitější bednění. [1]

V Japonsku byla také vytvořena pravidla pro návrh SCC betonu:

1. Objem cementu s příměsmi a jemnou frakcí kameniva (do 0,125 mm) musí být v intervalu 170 až 200 l/m³.
2. Objemový poměr mezi vodou a součtem cementu s příměsmi má být v intervalu 0,85 až 1,20.
3. Objem hrubého kameniva má být nižší než 340 l/m³.
4. Velikost maximálního zrna kameniva má být pod 25 mm, ideálně pod 20 mm.

Mimo nutnosti použití přísady (super)plastifikační se také používá i přísada upravující viskozitu, tzv. stabilizátor. Pro měření reologických vlastností samozhutnitelných betonů byly zavedeny speciální zkoušky. [1]

1.4 Vláknobeton

Je to beton vyztužený vlákny, která se do něj přidávají při míchání za účelem zlepšení některých specifických vlastností. Tento beton lze kombinovat s běžnou ocelovou výztuží, ale někdy je navrhován tak, aby běžné výztuže nebylo třeba, to se týká hlavně vysokohodnotných betonů. Vkládáním vláken do betonu často chceme předejít objemovým změnám betonu, jako jsou různé druhy smrštění, ale můžeme dosahovat i jiných praktických vlastností, například zlepšení tahových vlastností nebo houževnatosti betonu. Používaná vlákna se navzájem liší rozměrově i materiálově a každý druh má specifické využití. Vlákna musí být v betonu rovnoměrně rozptýlena, aby nedocházelo ke vzniku nehomogenit. [1]

1.4.1 Polymerní mikrovlákna

Používají se k redukci mikrotrhlin, vznikajících plastickým smrštěním. To se týká zejména betonových podlah nebo maltových omítek. Plastické smrštění závisí na vlhkosti okolí, na teplotě a větru. K redukci mikrotrhlin je vhodné také využít přísady redukující množství vody, protože vlákna nemohou zamezit vzniku trhlin, jen je tzv. přemostují. Materiálem těchto vláken bývá polypropylen, polyester a další. [1]

1.4.2 Polymerní makrovlákna

Tato vlákna používáme pro zastavení růstu makrotrhlin, které vznikají smrštěním vysycháním. Velmi důležitou oblastí využití je ale zlepšení reakce betonu na vysoké teploty. Polymerní vlákna se používají všude tam, kde může docházet k narušení betonu vlivem například ohně, typicky silniční tunely. Při vysokých teplotách se v betonu vytváří vodní pára, nejprve z vody fyzikálně vázané a poté i chemicky vázané, tím se vytváří tlak, kterým beton odprýskává, protože pára nemůže odcházet. V případě betonu s polymerními vlákny dojde při vysokých teplotách k jejich vyhoření a vytvoření prostoru pro odchod vodní páry a tím snížení poškození betonu. [1]

1.4.3 Ocelová vlákna

Využívají se ke zlepšení tahových vlastností betonu, ke zlepšení houževnatosti a rázové odolnosti betonu. Beton vyztužený ocelovými vlákny se může nazývat drátkobetonem, takto se velmi často vyztužují průmyslové podlahy. Ocelová vlákna mají různě profilovaný povrch a zakončení pro lepší soudržnost s cementovou matricí. Nejčastěji se používají vlákna v délkách 12 až 60 mm, tloušťky 0,25 až 1 mm. [1]

1.4.4 Jiná vlákna

Mimo tato vlákna se používají vlákna modifikovaná skelná nebo na bázi PVA (polyvinylalkoholu), případně uhlíková. Skelná vlákna se musí upravovat kvůli alkalickému prostředí v betonu a přidávají se do betonu zejména za účelem redukce smršťovacích trhlin, zabránění rozměšování a zvýšení houževnatosti. Dříve byla využívána vlákna výborných vlastností z azbestu, ale ta jsou již zakázaná jako většina výrobků z tohoto materiálu z důvodu negativních vlivů na lidské zdraví. [1]

1.5 DSP betony

Jsou to jemnozrnné betony s důrazem na hutnou matici, název pochází z angličtiny (Densified systems with small particles). O vývoj těchto betonů se nejvíce zasloužil Bache, který navrhl recepturu obsahující mikrosiliku a redukoval vodní součinitel, tím dosáhl snížení pórovitosti a zlepšení pevnosti a hutnosti tranzitní zóny. Také se zaměřoval na kamenivo a zjistil, že snížením maximálního zrna lze zlepšit pevnost v tlaku, což je způsobeno omezením množství vody zadržované pod zrny hrubého kameniva. Také se ukázalo, že drcené kamenivo může díky svému hrubému povrchu dosahovat vyšších pevností tranzitní zóny. Ke svému výzkumu využíval kameniva vysokých pevností (žula, diabas, tavený bauxit), k dosažení co nejvyšších pevností výsledného betonu. Nevýhodou DSP betonů je jejich křehkost, po dosažení kritického napětí prakticky nevykazuje plastickou deformaci. Z důvodu hutné mikrostruktury je beton velmi náchylný na působení vysokých teplot, protože voda uvolněná z betonu ve formě páry nemá kam unikat. Přes hutnou strukturu pára neprojde a tím roste tlak, který může způsobit až odprýskávání betonu. Tomuto jevu lze zabránit použitím polymerních vláken (kapitola 1.4). Díky hutné struktuře se tento materiál vyznačuje vysokou vodotěsností, odolností proti obrusu a také trvanlivostí. Beton je často znám pod svou komerční značkou DENSIT[®], který se používá jako reprofilační malta, jako ochranné konstrukce v dolech nebo jako tvářící nástroje. [2]

1.6 Těžký beton

Je to beton, který se vyznačuje objemovou hmotností vyšší než $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ve vysušeném stavu. Nejčastější použití těžkého betonu je pro tzv. stínící betony, které se využívají k ochraně proti škodlivému záření. Nejčastěji se z těchto betonů staví v jaderné energetice, ve výzkumných centrech týkajících se záření a v nemocnicích na onkologických odděleních. Dalším využitím mohou být závaží různých druhů a velikostí, dále může tento beton sloužit jako podstavec pro dynamicky namáhané stroje nebo pro mechanickou ochranu, například pro trezory bank. Nejčastěji je zvýšené objemové hmotnosti dosahováno pomocí těžkého kameniva, které se vyznačuje objemovou hmotností vyšší než $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a je buď přírodního původu, nebo průmyslově vyráběné. [24]

Kamenivo pro těžké betony, ke stavební ochraně proti záření

kamenivo	objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	chemické složení
PŘÍRODNÍ TĚŽKÉ		
baryt (BaSO_4)	4000–4300	obsah $\text{BaSO}_4 \geq 85 \%$
magnetit (Fe_3O_4)	4650–4800	obsah Fe 60–70 %
hematit (Fe_2O_3)	4700–4900	obsah Fe 60–70 %
ilmenit (FeTiO_3)	4550–4650	obsah Fe 35–40 %
UMĚLÉ TĚŽKÉ		
ferosilicium	5800–6200	obsah Fe 80–85 %
železné granule (Fe)*	6800–7500	obsah Fe 90–95 %
ocelový písek (Fe)*	7500	obsah Fe cca 95 %
ferofosfor	6000–6200	obsah Fe 65–70 %
S OBSAHEM KRYSTALICKÉ VODY		
limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$)	3500–3650	obsah krystalické vody cca 11 %
serpentin ($\text{Mg}_6[(\text{OH})_6\text{Si}_4\text{O}_{11}]\cdot\text{H}_2\text{O}$)	cca 2600	obsah krystalické vody cca 12 %
S OBSAHEM BÓRU		
bórcalcit ($\text{B}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{H}_2\text{O}$)	2300–2400	obsah bóru cca 13 %
bórkarbid (B_4C)	cca 2500	obsah bóru cca 78 %

Obrázek 3: těžká kameniva a jejich vlastnosti [25]

2 STRUKTURA BETONU

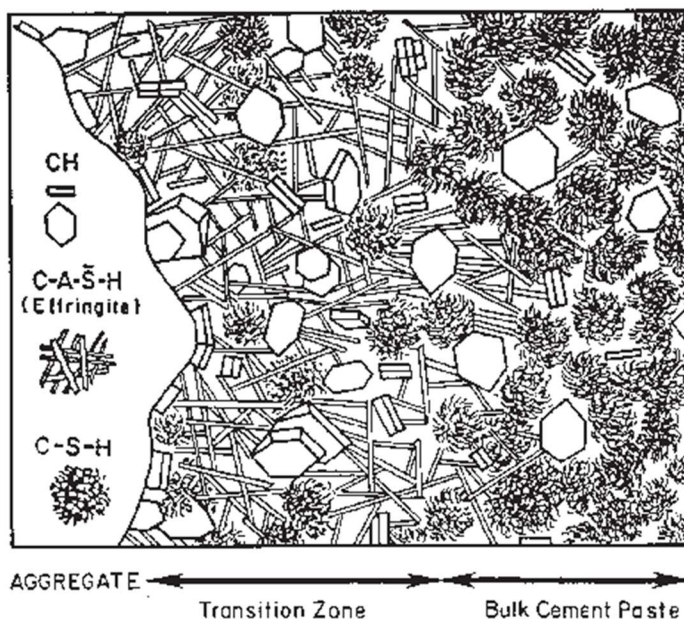
U většiny speciálních betonů je kladen důraz na více vlastností, pro které je velmi důležitá struktura cementového tmele. Bez zvýšení hutnosti struktury (oproti běžným betonům) nelze dosáhnout extrémně vysokých pevností a odolností jako je tomu například u HSC resp. HPC. Beton je heterogenní materiál a pro dosažení špičkových výsledků je třeba se zaměřit i na jeho mikrostrukturu. V poslední době jsou prováděny pokusy i se skladbou nanostruktury. Největší částí cementové matrice je kalciumhydrosilikátová složka, která se při hydrataci rozrůstá a tvoří pojivou část betonu. Dalším hydratačním produktem je portlandit, který se téměř nepodílí na pevnosti betonu, ale vytváří vysoké pH betonu, které je zásadní pro pasivaci ocelové výztuže. Portlandit také snižuje chemickou odolnost betonu svou reaktivitou, které se ale využívá v případě použití aktivních příměsí, portlandit zreaguje a vytvoří se nové odolnější C-S-H sloučeniny, které se mohou podílet i na pevnosti betonu. Dalším hydratačním produktem jsou kalciumsulfoalumináty, které zhoršují chemickou odolnost. Nejprve se vyskytují ve formě jehličkovitého ettringitu a později se mění na monosulfát. Také se ve struktuře nacházejí nezhydratovaná zrna cementu, jejich množství se v průběhu hydratace snižuje a výsledné zastoupení je závislé na více faktorech, všeobecně je však nežádoucí výskyt nezhydratovaných zrn cementu, protože tato zrna působí pouze jako jemné podíly kameniva, což je ekonomicky nevýhodné. [1]

Zásadním faktorem pro dosažení co nejlepších vlastností je porozita. Faktory, které ovlivňují vznik pórů jsou: vodní součinitel, vlastnosti cementu, ošetřování betonu, použité příměsi a přísady a jejich spolupůsobení s cementem a navzájem, stupeň hydratace, ad. Běžně se póry rozlišují podle Dubininovy klasifikace na mikropóry, mezopóry a makropóry. Mikropóry vznikají mezi hydratačními produkty a jejich rozměr nepřevyšuje 2 nm. Pórům takto malé velikosti se nepřisuzuje nějaký vliv na pevnost a propustnost směsi. Mezopóry se vyznačují velikostí od 2 nm do 50 nm a řadí se sem kapilární póry, které vznikají jako mezivrstva s vodou mezi produkty hydratace. Mezivrstva vzniká, protože produkty

hydratace zabírají méně prostoru než původní objem vody a cementu. Tvar těchto pórů je nepravidelný, jejich množství a velikost závisí na vodním součiniteli, množství cementu a stupni hydratace. Makropóry jsou větší než 50 nm a na rozdíl od kapilárních pórů mají většinou kulovitý tvar. Póry vzniklé vnesením nebo zachycením vzduchu se pohybují na úrovni mikronů, většinou od 10 μm do 200 μm . Tyto póry už mohou mít výrazný vliv na pevnost a propustnost betonu. [1, 2]

2.1 Tranzitní zóna betonu

U běžného betonu je nejslabším článkem tranzitní zóna, která se nachází mezi cementovou matricí a povrchem kameniva. V tomto místě totiž dochází k nepříznivému jevu – lokálnímu zvýšení vodního součinitele, kdy je povrch zrn kameniva pokryt velmi jemnou vrstvou vody. Výsledkem toho je vznik pórů a vzniká nehomogenita v mikrostruktuře betonu a tím je snížena významně pevnost betonu, ale pochopitelně nejen ta. U speciálních betonů, zejména tedy u HPC a UHPC je tato problematika řešena, a to tím, že je pomocí superplastifikačních přísad redukován vodní součinitel a jsou používány aktivní příměsi, ze kterých poté vznikají hydratační produkty, které napomáhají snižovat mikroporozitu, ale také tyto póry zaplňují svými jemnými zrny. Pro dosažení vyšší pevnosti cementové matrice v oblasti tranzitní zóny je vhodné drcené kamenivo, protože má hrubší povrch. Na obrázku 4 je graficky znázorněna tranzitní zóna (vlevo zrno kameniva, vpravo cementová pasta). [1, 3]



Obrázek 4: tranzitní zóna mezi zrnem kameniva a cementovou pastou [12]

3 OPTIMALIZACE SKLADBY PEVNÝCH ČÁSTIC

Pro jednodušší vysvětlení si představíme betonovou směs složenou z cementové pasty a kameniva, tvořeného velikostně i tvarově shodnými zrny. U takového betonu je potřeba k vyplnění všech mezer velmi velký objem cementové pasty. Pokud místo kameniva se shodnými zrny použijeme kamenivo vícenásobných rozměrů, budou menší zrna vyplňovat mezery mezi většími zrny. Účelem je najít takovou skladbu, aby se takto doplňovala do maximální hutnosti. Výsledkem je možnost ušetření cementové pasty k vyplnění mezer, v případě neredukování množství cementu zbývá více cementové pasty na obalení částic a zlepšuje se zpracovatelnost směsi. V důsledku toho by bylo možné s lepší skladbou dosáhnout redukce vodního součinitele při zachování potřebné zpracovatelnosti. Redukce vodního součinitele by vedla k menší porozitě ve struktuře cementového kamene, ale hlavně ke zpevnění tranzitní zóny. Toho jevu je zatím využíváno hlavně u vysokohodnotných betonů. To, že třídění částic může mít velký vliv na pevnost a další vlastnosti betonu, je poměrně známo už dlouhou dobu, ale tyto částice mají různé parametry ovlivňující výslednou hutnost skladby pevných podílů. [7]

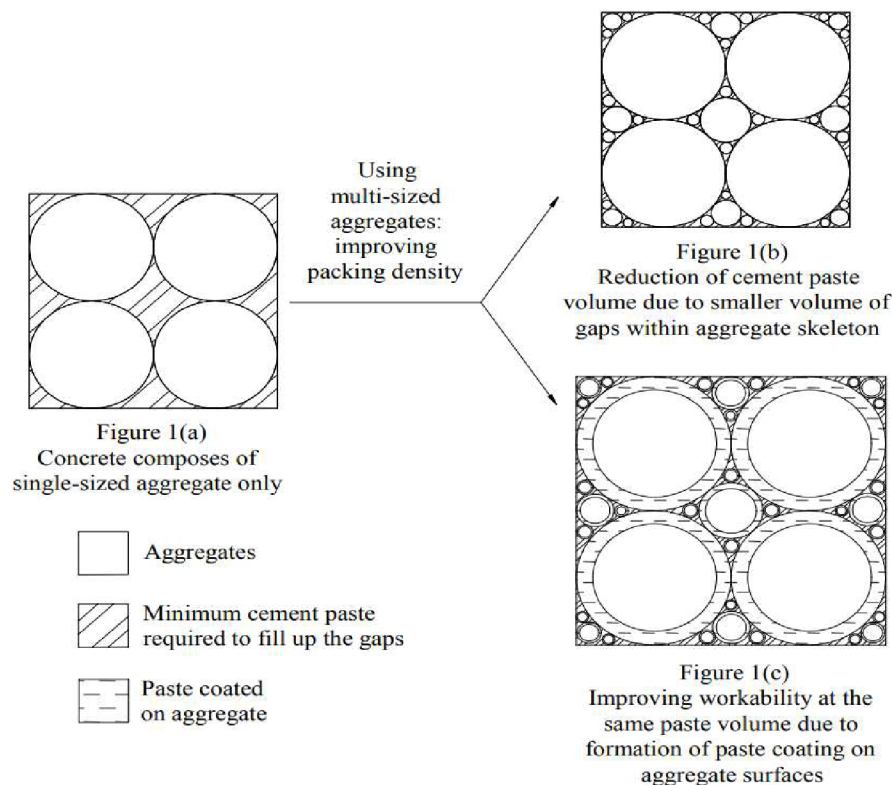
Hutnost skladby lze vyjádřit pomocí koeficientu těsnosti (Packing Factor):

$$PF = \frac{V_{sol}}{V_{uni}}$$

V_{sol} je objem, který zaujímají pevné látky a V_{uni} je jednotkový objem, ve kterém se pevné částice nacházejí. [11]

Jelikož jednotkový objem, ve kterém se částice nacházejí, zahrnuje i objem mezer, vyšší koeficient znamená menší objem těchto dutin a opačně.

Na obrázku 5 vlevo je vidět, jaký prostor zabírají částice o stejné velikosti zrna, vpravo na obrázku je vidět vyšší efektivita skladby vícezrnného materiálu, tedy zvýšení hutnosti skladby. Na obrázku 5 vpravo nahoře je vidět redukce množství cementové pasty díky vkládání jemnějších zrn a dole je vidět zlepšení zpracovatelnosti vlivem zachování původního množství cementové pasty v kombinaci s použitím vícezrnného materiálu. [7]



Obrázek 5: schéma zaplnění mezer mezi zrny [7]

Kromě efektu zlepšení zpracovatelnosti, vlivem zvýšení objemu pasty pro obalení částic kameniva nebo zlepšení pevnosti vlivem zvýšení hutnosti, lze také dosáhnout zlepšení rozměrové stability betonu. Cementová pasta v betonu vytváří hydratační teplo, způsobující zpočátku tepelnou expanzi a při vysychání zase

smršťování. Čím je vyšší objem pasty, tím větší jsou rozměrové změny vytvrzovaného betonu. Hydratační teplo a smršťování je samozřejmě také závislé na vodním součiniteli. Čím vyšší je vodní součinitel, tím vyšší je hydratační teplo a také smrštění. Zvýšení hutnosti zrn plniva, která vede k redukci množství cementové pasty při zachování zpracovatelnosti, tedy umožňuje zlepšení rozměrové stability betonu. [6, 7]

Princip tohoto fungování lze použít i na skladbu jemných podílů, do které vstupují příměsi a cement. I mezi těmito materiály jsou rozdíly ve velikosti zrn, takže lze mísením různých materiálů, případně různých granulometrií v určitých poměrech dosáhnout dříve popsaných výhod.

Výsledky výzkumu (Feng a kol. 2000) prokázaly, že při použití superplastifikační přísady a použití jemně mleté granulované vysokopecní strusky s vyšší jemností než cement, se může zlepšovat zpracovatelnost. Ve studii (Kwan 2000) bylo používáno mikrosiliky s průměrnou velikostí částic 0,1 μm (tedy na hranici úrovně nanopříměsí) a byl zkoumán zejména vliv na zpracovatelnost a pevnost v závislosti na množství příměsi a na vodním součiniteli. I přes výrazné zvýšení měrného povrchu docházelo ke zlepšení zpracovatelnosti směsi, a to i v koncentraci 15 % hmotnosti cementu (vyšší množství nebylo zkoušeno). S klesajícím vodním součinitelem samozřejmě klesá zpracovatelnost, ale bylo prokázáno, že přidáním mikrosiliky lze tento efekt omezit. Závislost byla pozorována na vodním součiniteli v rozmezí 0,22 až 0,32. Toto chování lze přisuzovat tomu, že jemnou mikro (až nano) silikou, byly vyplněny mezery cementovými zrny a tím byla z původních mezer vytlačena voda, která poté zlepšila zpracovatelnost. [6]

Zlepšení skladby pevných částic z hlediska hutnosti má několik významných pozitiv. První je tedy menší spotřeba vody, tzn. redukce vodního součinitele, což je výhodné pro dosažení vyšší pevnosti. Druhým pozitivem je zmenšení propustnosti cementové pasty a také omezení krvácení (bleedingu). Za třetí je to zmenšení porozity tranzitní zóny, díky zaplnění ultra jemnými částicemi. Tato vlastnost v kombinaci s redukcí bleedingu má další významný vliv na pevnost betonu. Také

může být díky možné redukci vodního součinitele zlepšena odolnost proti segregaci (rozmísení částic v betonu – nehomogenita). Hutnější skladbou je samozřejmě zmenšena propustnost a s tím související vyluhovatelnost betonu a dochází ke zlepšení chemické odolnosti. [6, 7]

Lze tedy tvrdit, že dosažením co nejhutnější skladby pevných podílů v betonu můžeme zlepšit fyzikálně mechanickou i chemickou odolnost a v důsledku toho zvýšit trvanlivost betonu, případně i životnost betonových staveb.

3.1 Křivky zrnitosti

Už v roce 1892 uvedl Féret, že vhodná (hutná) skladba kameniva zlepšuje pevnost betonu. V dnešních dobách je třeba zohlednit i další pevné složky, zejména příměsi. Pro vhodnou skladbu směsi jsou navrhovány křivky zrnitosti. Fuller a Thompson vytvořili dodnes známou a používanou křivku vyjádřenou rovnicí:

$$P(d) = \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^q$$

D je velikost zrna, D_{max} je velikost největšího zrna a q je distribuční koeficient, který je u Fullerovy křivky roven 0,5. Andreasen a Andersen pro Fullerovu křivku v roce 1930 navrhli q v rozmezí 0,33 až 0,5. Přesná hodnota se určuje podle typu částic, u hrubých a hranatých částic je tato hodnota nižší, kvůli vyšší potřebě jemných částic. Tato rovnice je ale navržena tak, jako by nejmenší částice byly prakticky nulových rozměrů. Proto v roce 1980 navrhli Funk a Dinger následující rovnici s omezením nejmenších částic d_{min} . V případě této rovnice má být distribuční koeficient q roven 0,37. [21, 22, 23]

$$P(d) = \frac{d^q - d_{min}^q}{D_{max}^q - d_{min}^q}$$

Burminster vytvořil na základě výzkumů různé typy distribučních křivek, ty jsou uvedeny na obrázku 6.

Typ A - velmi úzký rozsah velikosti částic, většinou písky nebo šterk.

Typ B - velmi široká a rovnoměrná distribuce částic.

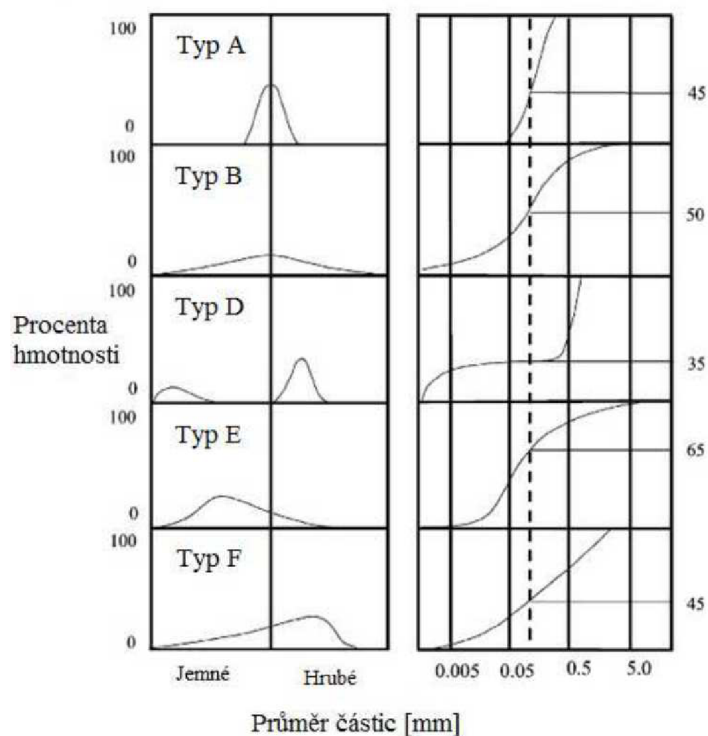
Typ D - dominující jemná a hrubá frakce distribuce částic.

Patří sem písek nebo naopak jemnější / hrubší kamenivo.

Typ E - převažující obsah jemnějších částic.

Typ F - převažující obsah hrubších částic.

Peronius a Sweeting tyto křivky popisují tak, že směs A s malým rozsahem velikosti částic je nejpórovitější a naopak směs F s velkým rozsahem a spojitou plynulou křivkou vykazuje pórovitost nejnižší. [21, 22]

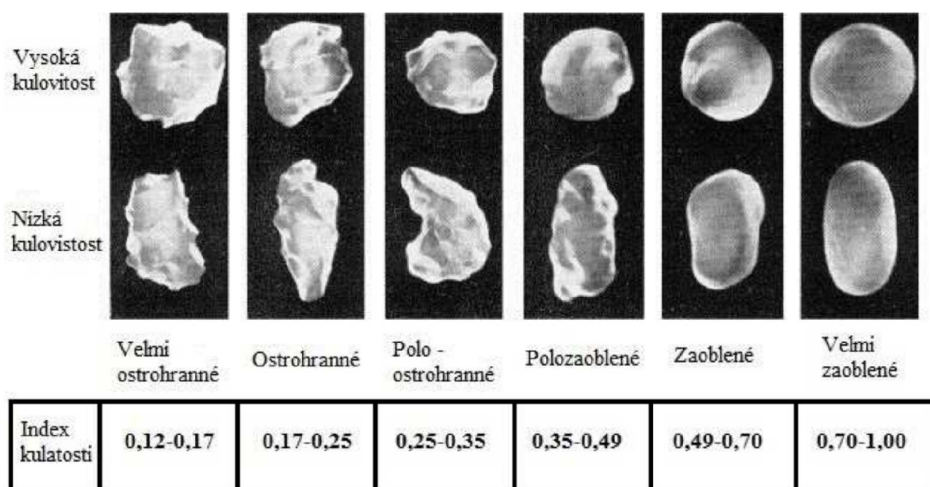


Obrázek 6: distribuční křivky zrnitosti podle Burmistera [21, 22]

Předchozí způsoby návrhu křivky zrnitosti by měly vést k dosažení směsi co nejnižší mezerovitosti optimálním množstvím různě velkých částic. Tyto návrhy křivky zrnitosti ale nezohledňují například tvar částic, který zásadně ovlivňuje hutnost skladby. Proto Zheng a kol. 1990 navrhli hodnoty q v závislosti na velikosti a tvaru částic a následná hodnota q má být určena jako průměr dílčích q . Peronius a Sweeting navrhli v roce 1985 rovnici pro výpočet v závislosti na kulatosti částic a odchylky od Fullerovy křivky. Další vědci (Brouwers a Radix v roce 2005, Garas a Kurtis v roce 2008, Hlad v roce 2010, Kumar a Santham v roce 2003, Vogt a

Lagerblad v roce 2006) použili návrh podle Funka a Dingera a upravovali hodnotu q podle jejich experimentálních výsledků. [21, 23]

Powers se také věnoval zkoumání tvaru zrn a rozdělil je do různých kategorií podle kulovitosti a tvaru povrchu. Ke každé kategorii přiřadil index kulatosti (obrázek 7). Tzv. prodloužení neboli Aspect ratio se rovná poměru šířky částice k její délce, která je volena nejdelším rozměrem částice, šířka se měří na kolmici podélné strany. Hodnota rovnající se 1 odpovídá kulaté částici. Podobně lze zhodnotit i hladkost povrchu tzv. Form factor, který se získá poměrem druhé mocniny obvodu kruhové částice a skutečného obvodu zrna, pokud se hodnota rovná 1 je částice naprosto hladká. Mletá zrna mají často hrubý a nepravidelný povrch, což je nevhodné pro reologické vlastnosti. Naopak kulatá zrna, například elektrárenského (vysokoteplotního) popílku, reologii zlepšují. Obecně čím jemnější jsou částice a jejich tvar se přibližuje kulovitému tvaru, má beton lepší reologii, ale výsledná mezerovitost může být vyšší. [13, 21, 22]



Obrázek 7: rozdělení podle tvaru a index kulatosti dle Powerse [21, 22]

3.2 Modely zhutňování

Ve 20. a 30. letech minulého století se hutností zabýval Furnas, který pro svůj návrh uvažoval směs s částicemi dvou rozměrů v poměru 2:1, což je ve skutečnosti nepoužitelné, protože částice v betonu dosahují různých rozměrů s vyššími poměry vzájemných velikostí. Furnas měřil hutnost směsi pomocí průchodu plynu.

Pro tento systém vytvořili Westman a Hugil v roce 1930 grafický systém pro návrh směsi s maximální hutností. Ten vycházel z objemu volně sypaného materiálu. V roce 1994 používali pro svoje zkoumání vhodnější poměry částic 100 : 1, 20 : 1 a 10 : 1. [11]

V dnešní době už jsou vyvinuty počítačové modely, které vypočítávají optimální složení k dosažení co nejlepší hutnosti skladby směsi. O tyto modely se zasloužil zejména De Larrard a kolektiv, příkladem modelů jsou LPDM (linear packing density model), SSM (solid suspension model) nebo CPM (compressive packing model). [11, 23]

I přes zapojení výpočetní techniky do návrhů, je třeba ověřovat směsi v praxi, protože ve směsi může docházet k různým nevhodným jevům, například mezi jemnými částicemi může docházet ke shlukování vlivem van der Waalsových sil, také je třeba zohlednit vznikající tření.

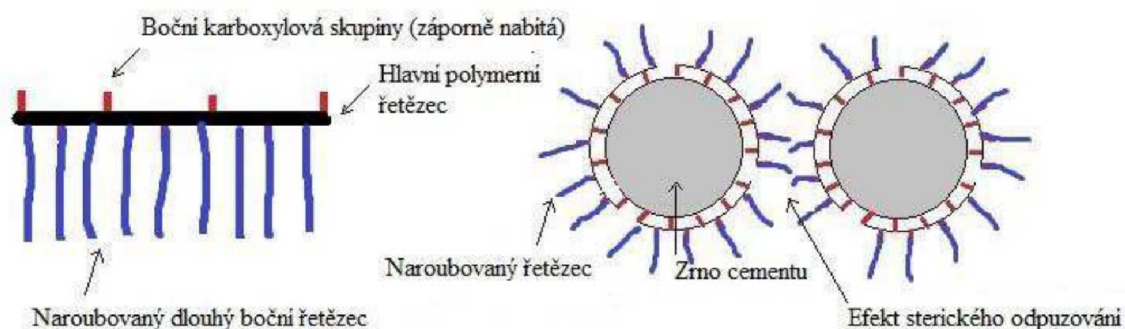
4 CEMENT

Je základním pojivem v betonu a cementových kompozitech. Také je většinou nejdražší složkou těchto materiálů. Je vyráběn v cementárnách z jílu, vápence a případných korekčních surovin, při teplotě nejčastěji okolo 1450 °C. Po vypálení vzniká portlandský slínek, který se ještě musí pomlít a smíchat s regulátorem tuhnutí – sádrovcem, abychom získali cement.

Z hlediska mikrostruktury jsou zrna cementu podobná drcenému kamenivu tvarem i hrubým povrchem, velikostně se zrna cementu pohybují řádově od jednotek po několik desítek μm , nejčastěji se však velikost zrn pohybuje okolo 20 až 30 μm . Cement je rozdělován do pevnostních tříd, kdy vyšší pevnostní třídy se dosahuje vyšší jemností mletí oproti cementu nižší pevnostní třídy. Zrna cementu je tedy vhodné doplňovat ještě jemnějšími příměsmi pro dosažení hutnější matrice.

5 SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍŠADY

Jednou z nejdůležitějších složek betonu je také přísada snižující spotřebu vody. Pro betony speciálních parametrů je nezbytné, aby neměly vysoký vodní součinitel, který by měl negativní vliv na výsledné vlastnosti. Snahou je dosahovat minimálního vodního součinitele, při zachování potřebné zpracovatelnosti čerstvého betonu. A tak bylo jedním z největších pokroků posledních několika desetiletí zavedení superplastifikačních přísad do praxe. Superplastifikační přísady musí splňovat určité požadavky, mezi které patří: zlepšení zpracovatelnosti ve srovnání s kontrolním betonem, udržení stejné zpracovatelnosti alespoň 30 minut, obsah vzduchu čerstvého betonu maximálně o 2 % vyšší než u kontrolního betonu, spotřeba záměsové vody minimálně o 10 % nižší při zachování zpracovatelnosti, dále pevnost v tlaku vyšší nejméně o 40 % po dvou dnech, o 15 % po 28 dnech, při srovnání s kontrolním betonem. Nejběžněji používanou superplastifikační přísadou jsou estery polykarboxylových skupin (PC), jejich základem je aktivní negativně nabitá karboxylová skupina COOH. Tato negativně nabitá část, která je napojena na tzv. páteřní polymerní řetězec, svým nábojem způsobí adsorpci přísady na zrno cementu. Dále jsou na páteřní řetězec také napojeny boční řetězce, které nemají žádný náboj, ale lze je různě modifikovat a tím měnit jejich účinky. S rostoucí délkou těchto řetězců dochází ke zlepšení tekutosti. Díky těmto neutrálním bočním řetězcům dochází k oddálení zrn cementu, tento jev je nazýván stérickým odpuzováním. Nevýhodou těchto přísad používaných od 90. let minulého století je vyšší cena než u plastifikačních přísad. [1, 19]



Obrázek 8: princip sterického odpuzování [1]

6 KAMENIVO

V případě speciálních betonů je potřeba věnovat velkou pozornost všem složkám, včetně kameniva. Proto, aby beton dosahoval co nejvyšší pevnosti, musí i kamenivo v něm použité být co nejpevnější a výsledná směs by ideálně měla být co možná nejméně mezerovitá. Je třeba věnovat pozornost granulometrii, konkrétně křivkám zrnitosti (popsány v kapitole 3.1) a dalším vlastnostem kameniva.

Pro samozhutnitelné betony a pro betony, u kterých je požadavek na dobrou tekutost, je třeba vybírat kamenivo s co nejkulatějšími a nejhladšími zrny. Jsou tedy vhodné například kopané písky.

7 PŘÍMĚSI

Jsou to jemné většinou práškovité látky s maximální velikostí zrna 0,25 mm (případně 0,125 mm), které se do betonu přidávají z důvodu zlepšení některých vlastností nebo k dosažení speciálních vlastností. Lze je používat pro redukcii množství cementu nebo pro doplnění jemných podílů v betonu. Díky jejich vlastnostem, zejména tedy velikosti, jsou důležitou až zásadní složkou betonů samozhutnitelných, voděodolných, čerpatelných, vysokohodnotných, vysoko-pevnostních, atd. Je třeba zmínit i fakt, že většina z příměsí je vedlejším produktem jiné výroby, a proto je jejich použití i ekonomicky výhodné. Kvůli malé velikosti zrn představuje přidavek těchto látek zvýšení měrného povrchu, který je potřeba při míchání čerstvého betonu namočit, proto přidavek těchto částic zvyšuje potřebné

množství záměsové vody, ale například popílek díky kulatému tvaru částic je výjimkou. V případě náhrady části cementu, který má zrna tvarem podobná drcenému kamenivu, může dojít i ke zmenšení spotřeby vody, protože kulatá zrna popílku mají ideální (minimální) tvar pro smáčení.

Podle reaktivity se dělí na:

- inertní – typ I (pasivní)
- aktivní – typ II (pucolány nebo latentně hydraulické látky)

Inertní příměsi nehydratují ani se na hydrataci nepodílejí, případně je jejich působení zanedbatelné. Přidávají se do betonu za účelem zvýšení hutnosti betonu a tím zlepšení určitých vlastností (např. kvalita povrchu, vodotěsnost) nebo pro zlepšení reologie čerstvého betonu, případně k probarvení betonu. Nejčastějšími inertními příměsmi jsou kamenné odprašky – filery nebo pigmenty, používané právě ke zmiňovanému probarvení. Dříve byl k inertním příměsím řazen i mletý vápenec, ale v dnešní době už je prokázána určitá reaktivnost, takže už se vápenec řadí spíše k aktivním příměsím. Nicméně podle norem je mletý vápenec stále považován za inertní příměs.

Aktivní příměsi jsou takové materiály, které nejsou hydraulické. To znamená, že po smíchání s vodou nereagují – netuhnou a netvrdnou, ale za určitých podmínek reagovat mohou. Takové látky jsou latentně hydraulické nebo pucolánové. Latentně hydraulické látky potřebují k reakci přítomnost alkalického aktivátoru (iniciátoru), kterého stačí k nastartování poměrně malé množství. V betonu je aktivátorem cement a příkladem takto reagující látky je vysokopepnicí struska. Pucolány reagují díky obsahu SiO_2 s hydroxidem vápenatým (portlanditem) a vodou. Výsledkem reakce jsou podobné produkty, jako při hydrataci portlandského cementu (C-S-H gel). Rychlost této reakce je závislá na teplotě a na obsahu skelné fáze, čím více jí je, tím je reakce rychlejší. Spotřebování portlanditu, za vzniku C-S-H gelu, dochází ke zlepšení chemické odolnosti cementové matrice.

Kvůli používání aktivních příměsí byla zavedena koncepce k-hodnoty, která je podstatou výpočtu ekvivalentního vodního součinitele. Příměsi ovlivňují k-hodnotu hlavně velikostí svého měrného povrchu.

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

w_k ...ekvivalentní vodní součinitel [-]

m_v ...množství záměsové vody [kg]

m_c ...množství cementu [kg]

k ...k-hodnota závislá na použité příměsi, cementu a na stupni vlivu prostředí

m_p ...množství příměsi [kg]

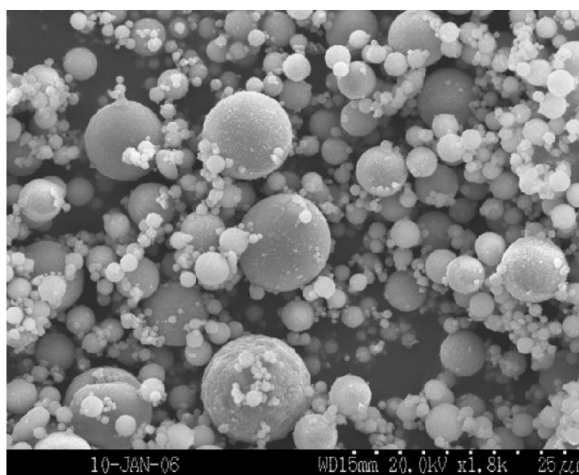
7.1 Popílek

Popílek je jemná látka, která vzniká jako vedlejší energetický produkt při spalování tuhých paliv a získává se zachycováním na filtrech spalin. Tyto filtry jsou buď mechanické nebo elektrostatické. Z hlediska chemického složení popílek obsahuje hlavně oxidy SiO_2 a Al_2O_3 , přičemž obsah SiO_2 má být minimálně 25 %. Popílků obvykle dělíme do dvou tříd. Třída F se získává ze spalování černého uhlí. Ve srovnání s další třídou je vhodnější do betonu, protože obsahuje velké množství amorfního SiO_2 , je tedy reaktivnější. V ČR se ale tohoto popílku vyrábí velice málo. Třída C vzniká při spalování hnědého uhlí, obsahuje vyšší množství CaO , který je v betonu nevhodný. Podle způsobu spalování dělíme popílek obvykle do dvou kategorií, které budou následně popsány. [22]

7.1.1 Vysokoteplotní popílek

Vzniká při spalování v teplotách přibližně 1100 až 1500 °C. Při takto vysokých teplotách se původní minerální látky roztavují a při odvodu spalin dochází vlivem zchlazení ke ztuhnutí ve sklovitě-amorfní fázi. Amorfní částí popílku je SiO_2 a tou krystalickou jsou hlavně mullit a beta-křemen, případně hematit a magnetit. Popílků obsahují plerosféry a cenosféry, které jsou kulaté a duté, svým tvarem mohou zlepšovat zpracovatelnost směsi a dutiny mohou zadržovat vodu, která

potom zjednodušuje ošetřování betonu. V případě potřeby lze tohoto využít i pro zlepšení tepelně izolačních vlastností. Nevýhodou ale je, že při delším míchání může docházet k rozbíjení cenosfér a tím pádem ke zvětšení povrchu a následně snížení zpracovatelnosti. Samotný popílek prakticky nemá hydraulické schopnosti, ale má pucolánové vlastnosti. [22]

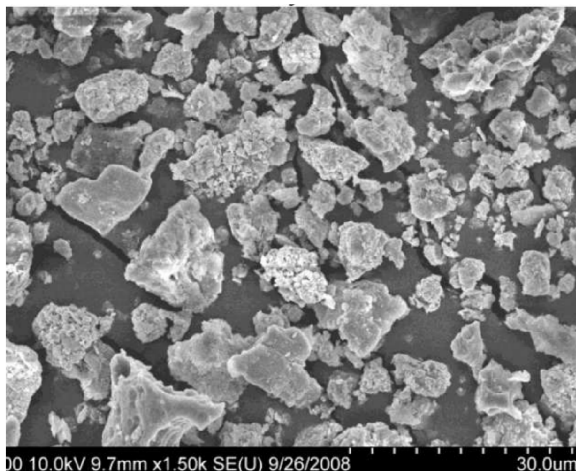


Obrázek 9: zrna vysokoteplotního popílku pod mikroskopem [20]

7.1.2 Fluidní popílek

Tento popílek vzniká při fluidním spalování, které se liší v tom, že palivo je spalováno společně s látkou, která na sebe váže oxidy síry. Tato látka se nazývá sorbent, a v případě spalování uhlí je to většinou mletý vápenec, proto má výsledný popílek vyšší obsah CaO, který za vysokých teplot z vápence vzniká. Spalování probíhá při teplotě okolo 850 °C. Z fluidního spalování vznikají popílky ložové – hrubší, těžší částice, které padají z fluidního lože (vznosu) na rošt a popílky filtrové – úletové, které odcházejí se spalinami, od kterých se oddělují ve filtrech (cyklonech). Spalování se provádí při atmosférickém nebo při zvýšeném tlaku. Fluidní popílek obsahuje ve srovnání s úletovým popínkem více volného vápna a také více anhydritu, kvůli tomuto složení je tento popílek hydraulický, začíná tuhnout po smíchání s vodou. Filtrový popílek je jemný, avšak na rozdíl od vysokoteplotního popílku nejsou jeho zrna kulatá, ale tvarově podobná mletým uhelným zrnům. Fluidní popílky mají často vyšší obsah oxidů síry a oproti

vysokoteplotním popílkům vyšší ztrátu žíháním. Z hlediska normových požadavků na popílky jsou fluidní popílky pro použití do betonu nevhodné. [22]



Obrázek 10: zrna fluidního popílku pod mikroskopem [20]

7.2 Mikromletý vápenec

Vápenec je přírodním materiálem vyskytujícím se v usazených (sedimentárních) horninách: křídě, vápenci a mramoru, a to ve dvou krystalických soustavách (aragonit a kalcit). Mimo to, že je vápenec základní složkou pro výrobu portlandského cementu, lze ho přidávat také do betonu jako příměs. Pro toto použití je třeba vápenec upravit na vhodnou jemnost, která je charakterizována 70% propadem sítem s velikostí oka 0,063 mm. Úprava probíhá mletím drceného vápence. [9]

7.3 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska vzniká jako vedlejší produkt výroby surového železa. Surovinami pro výrobu železa jsou železná ruda, koks a struskotvorná přísada – vápenec, který na sebe váže nekovové části. Granulát se získává prudkým ochlazením roztavené strusky vodou, tak aby nedošlo ke krystalizaci, protože vhodné vlastnosti má amorfni fáze strusky. Ochlazení strusky lze provádět dvěma způsoby, buď je tekutá horká struska vypouštěná do vody nebo je vodou zkrápěna, častěji je využíván druhý způsob. Chlazení je zásadní po teplotu 800 °C, pod touto

teplotou už nedochází k zásadním změnám struktury. Po zchlazení se přistupuje k vysušení a mletí, které je velice podobné mletí cementu, ale struska se mele o něco obtížněji. Výsledná velikost částic je podobná jako u cementu, tedy i výsledný měrný povrch se pohybuje od asi 300 m²/kg dle Blaina. Pro použití strusky do betonu nebo do směsného cementu je důležitým hodnocením modul (index) bazicity. Pokud je modul vyšší než 1 je struska zásaditá a vhodná pro použití do betonu, pokud je modul menší než 1, používá se struska například jako kamenivo do lehkých betonů. [2]

Výpočet modulu bazicity:

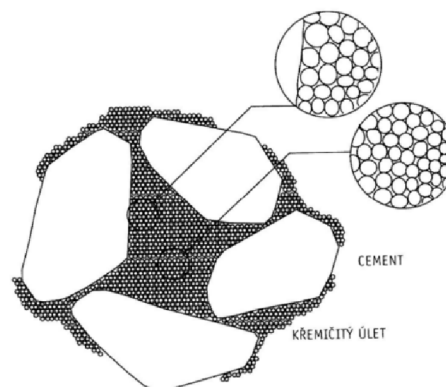
$$m_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} [-]$$

Tabulka 2: chemické složení strusky [2]

	Česká republika	Francie	Severní Amerika
SiO ₂	25 – 45 %	29 – 36 %	33 – 42 %
Al ₂ O ₃	4 – 15 %	13 – 19 %	10 – 16 %
CaO	26 – 45 %	40 – 43 %	36 – 45 %
Fe ₂ O ₃	< 1,5 %	< 4 %	0,3 – 20 %
MgO	4 – 15 %	< 6 %	2 – 12 %
S ⁻	< 3,0 %	< 1,5 %	-

7.4 Mikrosilika (křemičité úlety)

Mikrosilika vzniká jako vedlejší produkt výroby křemíku nebo ferosilicia (FeSi). Tato výroba probíhá v elektrických obloukových pecích. Požadovaná teplota je cca 1750 °C, kdy vzniká plyn SiO₂, který poté zcondenzuje. Jiným názvem pro mikrosiliku jsou také křemičité úlety, z důvodu velikosti zrna jsou prašné a zdraví nebezpečné. Při výrobě



Obrázek 11: zaplnění prostoru mezi zrny cementu mikrosilikou [10]

křemíku se tedy musí zachycovat filtrací. Výrobou jedné tuny ferosilicia vznikne asi 0,2 až 0,3 tuny mikrosiliky. V případě zabudování úletů do betonu nemají žádný negativní vliv na prostředí. Jejich použití ale závisí na přidání superplastifikačních přísad, právě kvůli extrémní jemnosti, která se pohybuje od asi 0,1 μm do 1 μm . V betonu bez superplastifikační přísady se tedy použitím mikrosiliky zvyšuje množství záměsové vody, což má samozřejmě většinou negativní následky. Použití mikrosiliky tedy plně nastalo až po zavedení superplastifikačních přísad do praxe. Ze všech zatím používaných příměsí má mikrosilika nejlepší pucolánové vlastnosti, to je dáno vysokým obsahem oxidu křemičitého a vysokému měrnému povrchu, který plyne z velikosti zrn. [10]

7.5 Metakaolin

Vzniká kalcinací kaolinu nebo kaolinitického jílu při teplotách 600 až 800 $^{\circ}\text{C}$ a není tedy vedlejším produktem žádné výroby, ale musí se záměrně vyrábět. Surovinou pro jeho výrobu je hornina bílé nebo světle šedé barvy, která obsahuje alespoň 80 % minerálů kaolinitické skupiny. Metakaolin je hlavně kvůli primární výrobě drahým materiálem, ale i přesto je mírně levnější než mikrosilika. V případě velmi jemného metakaolinu, může být reaktivita díky vysokému měrnému povrchu srovnatelná s mikrosilikou, tudíž může být její levnější alternativou. Metakaolin obsahuje oxidy SiO_2 a Al_2O_3 , díky tomu reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku C-S-H gelu a tím se podílí na hydrataci betonu. Díky této reakci také redukuje možnost vzniku výkvětů a v kombinaci s bílou barvou je tedy vhodným materiálem pro architektonické betony. Spotřebováním snadno rozpustného $\text{Ca}(\text{OH})_2$ při reakci, dochází ke zvýšení trvanlivosti betonu. Experimentálně bylo dokázáno, že nahrazením části cementu metakaolinem, dojde ke zlepšení pevnosti v tlaku, ale i dalších vlastností. Jako ideální dávka se uvádí v některých studiích 10 %, v další studii 15 % a ve studii se superplastifikační přísadou dokonce 20 %. Při vyšších dávkách nahrazení cementu už nedochází k reakci všech zrn metakaolinu, zbylá zrna slouží jako jemné plnivo (kamenivo). [15, 18]

7.6 Nanočástice

Jsou to extrémně jemné materiály, u kterých se velikost částic pohybuje mezi 1 až 100 nm. V technologii betonu se pracuje na možnosti použití uhlíkových nanotrubiček, nanosiliky, nano TiO_2 , nanojílů, nanocementů a nano Fe_2O_3 . Pokud se bude dařit takto jemné částice rovnoměrně rozmíchávat v betonu bez vzniku shluků, předpokládá se dosažení zlepšení některých a získání nových, speciálních vlastností, příkladem mohou být samočistící betony, samoopravovací betony nebo betony s chytrými schopnostmi (snímání teploty, vlhkosti nebo napětí). [15, 17]

7.7 Filery

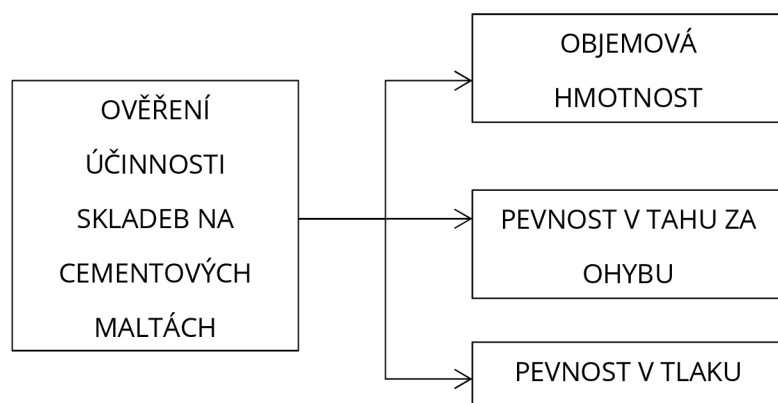
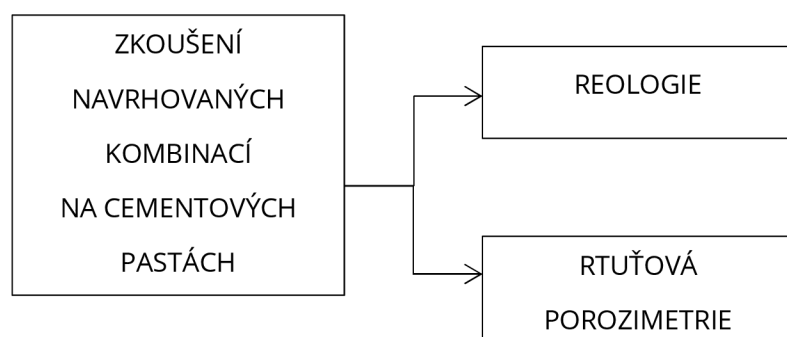
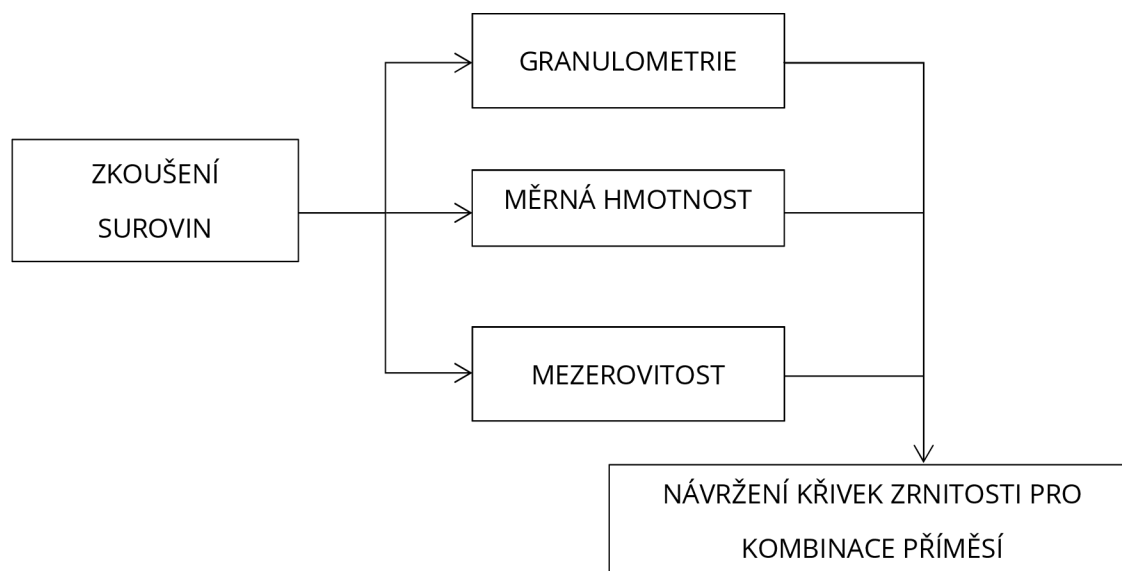
Filery jsou velmi jemná zrna velikosti asi 10 μm až 0,125 mm (125 μm). Vznikají při drcení a třídění kameniva, nejčastěji tedy vznikají přímo v lomech, kde jsou považovány za odpadní produkt a zachycují se ve filtrech. Jiným názvem tohoto materiálu jsou také kamenné odprašky nebo kamenná moučka. Důvody použití do betonu jsou zejména snížení mezerovitosti směsi, a tím dosažení vyšší hutnosti betonu nebo také pro zlepšení reologie betonu. Jemná zrna mohou zmírnit tření směsi a také napomáhají proti segregaci. [9]

7.8 Pigmenty

Jsou to anorganické látky, které se do betonu přidávají za účelem probarvení. Jsou buď ve formě prášku nebo tekuté suspenze, která nepráší a je výhodnější na dávkování. Při skladování se ale musí suspenze čeřit, aby nedošlo k sedimentaci pigmentu. Patří mezi pasivní příměsi, nepodílejí se tedy na reakcích v betonu, ale svou granulometrií ovlivňují reologii čerstvého betonu a také potom strukturu betonu ztvrdlého. [24]

PRAKTICKÁ ČÁST

8 SCHÉMA PRAKTICKÉ ČÁSTI



9 POUŽITÉ METODY

9.1 Stanovení granulometrie

Stanovení granulometrie bylo prováděno na laserovém granulometru MASTERSIZER 2000 od firmy Malvern s dispergační jednotkou Hydro 2000 MU.

Princip laserových granulometrů

Jedná se o laserovou difrakční metodu, při měření totiž dochází k difrakci (ohybu, rozptylu) laserových paprsků. Měření probíhá tak, že jsou kompresorem vháněny zkoumané částice do prostoru, kde míří laserové paprsky. Procházející částice paprsky rozptylují pod určitými úhly, které se poté měří na stínítku pomocí detektoru. Podle tohoto úhlu je poté určena velikost procházející částice. Čím je částice jemnější, tím více je světlo z laserového paprsku rozptylováno, tedy měřený úhel je větší, tato závislost je logaritmická. Rozsah přístroje závisí na možnostech změřit úhly různých rozsahů, dnešní přístroje měří v rozsahu úhlů $0,02^\circ$ až 135° .

9.2 Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky

Principem zkoušky je zjištění objemu zrn materiálu pomocí měření hmotnosti pyknometru. Pro vyplnění mezer mezi zrny se využívá kapaliny, pro cement to musí být nereaktivní látka, aby nedocházelo k tuhnutí, pro nehydraulické látky to může být destilovaná voda. Součástí pyknometru je zátka, která musí být při každém měření také vážena. [31]

Postup:

- 1) Nejprve se zváží prázdný a suchý pyknometr.
- 2) Poté se zváží pyknometr naplněný destilovanou vodou.
- 3) Destilovaná voda se vyleje a pyknometr se vysuší.
- 4) Pyknometr se naplní nereaktivní kapalinou a zváží.
- 5) Znovu se pyknometr vyprázdí a vysuší.
- 6) Dále se do pyknometru vloží vysušený vzorek (přibližně 2 až 3 gramy) a přesně se pyknometr se vzorkem zváží.

- 7) Zalití vzorku vodou případně nereaktivní kapalinou, otáčením pyknometru a jemným poklepáváním je ze vzorku vypuzen vzduch.
- 8) Nakonec je pyknometr doplněn kapalinou a zvážen.
- 9) Výpočet měrné hmotnosti.

Měrná hmotnost cementu se vypočte podle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{m - (m_4 - m_3)} \cdot \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} [g \cdot cm^{-3}]$$

Měrná hmotnost inertních látek se vypočte podle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{m - (m_4 - m_3)} [g \cdot cm^{-3}]$$

m_1 ...hmotnost suchého prázdného pyknometru

m_2 ...hmotnost pyknometru s destilovanou vodou

m_3 ...hmotnost pyknometru s nereaktivní kapalinou (etylalkohol)

m ...hmotnost pyknometru s vloženým vysušeným vzorkem

m_4 ...hmotnost pyknometru s vzorkem a kapalinou (po vypuzení vzduchu a doplnění)

9.3 Mezerovitost jemných materiálů

Pro určování vhodnosti skladby z hlediska maximálního vyplnění objemu, byla použita metoda zkoušení mezerovitosti v suchém stavu podle ČSN EN 1097-4 Zkoušení fyzikálních a mechanických vlastností kameniva Část 4: - Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru. Zkouška je původně vytvořena pro filery – inertní příměsi, ale pro zkoušení cementu nebo aktivních přísad či jejich směsí v suchém stavu se metoda zdá být také vhodná. Principem zkoušky je zhutňování zkoušeného materiálu v suchém stavu ve speciálním ručním přístroji, který je opatřen zhutňovacím pístem. Z výsledné výšky po zhutnění je určen objem vzorku v přístroji a poté lze určit za pomoci měrné hmotnosti mezerovitost. [29]

Příprava vzorků

Zkušební navážka musí být získaná normovým postupem v množství nejméně 150 g. Vzorek se vysuší při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ C$ do ustálené hmotnosti a

poté se nechá vychladnout v exsikátoru. Pokud navážka obsahuje hrudky, tak se musí rozmělnit a rozmíchat. Poté se vzorek přeseje přes síto 0,125 mm.

Postup:

- 1) Vložení filtračního papíru a pístu do berana.
- 2) Ustanovení nulové výšky posuvným měřítkem nebo číselníkovým úchylkoměrem.
- 3) Zvážení berana s jedním filtračním papírem, bez pístu (m_0).
- 4) Odstranění filtračního papíru.
- 5) Vložení (10 ± 1) g vzorku do berana.
- 6) Umístění filtračního papíru na vzorek a zasunutí pístu do berana.
- 7) Beran se vloží se vzorkem a pístem mezi vodící tyče.
- 8) Zvedne se beran k zarážce a nechá volně spadnout na základní desku. Takto se opakuje stokrát.
- 9) Změření výšky zhutněného vzorku.
- 10) Vyjmutí berana z vodících tyčí a vytažení pístu.
- 11) Zvážení berana se vzorkem a filtračním papírem (m_1). Výpočet hmotnosti zhutněného fileru: $m_2 = (m_1 - m_0)$.
- 12) Výpočet mezerovitosti podle následujícího vzorce:

$$v = \left(1 - \frac{4 \times 10^3 \times m_2}{\pi \times \alpha^2 \times \rho_f \times h}\right) \times 100$$

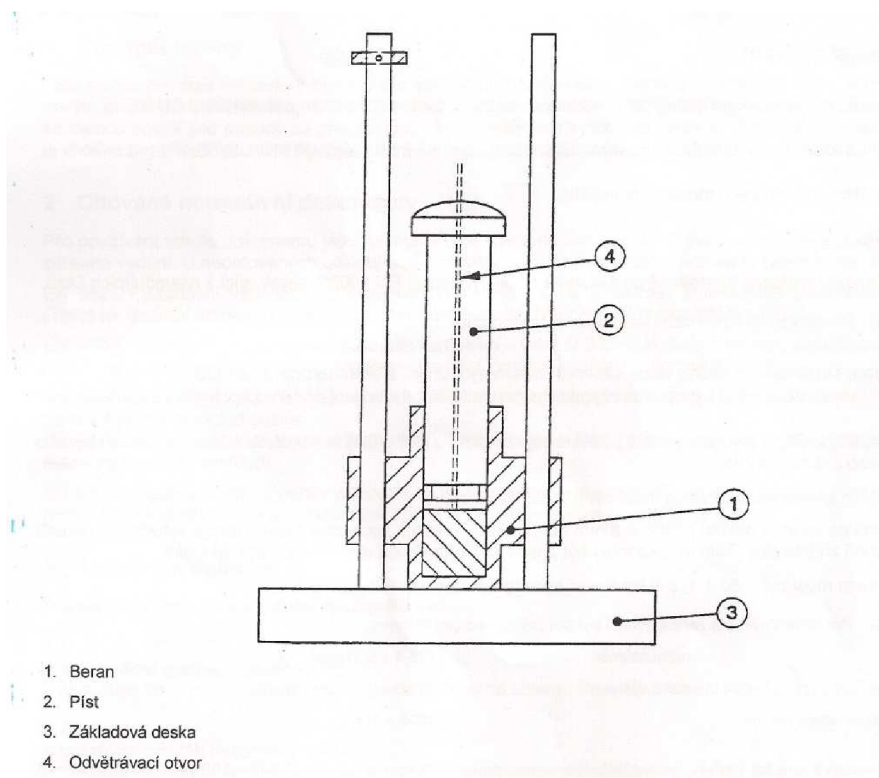
v ...mezerovitost [%]

m_2 ...hmotnost zhutněného fileru [g]

α ...průměr válce berana [mm]

ρ_f ...měrná hmotnost fileru [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]

h ...výška zhutněného fileru [mm]



Obrázek 12: schéma zařízení pro měření zhutnitelnosti [29]

9.4 Reologie cementové pasty

Pro měření reologie bylo využíváno rotačního viskozimetru Viskomat NT od firmy Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH. Na tomto přístroji lze měřit směsi s velikostí zrna do 2 mm. Lze také nastavit různé otáčky přístroje od 0,001 do 600 ot./min. Principem přístroje je stanovení torzního (kroucího) momentu působícího na speciální vřeteno. Přístroj se skládá právě z odnímatelného vřetena, které má různý tvar podle druhu měřené směsi, toto vřeteno je při měření ve stále



Obrázek 13: přístroj Viskomat NT

stejné poloze. Zkoumaný vzorek se vkládá po namíchání do válce, který lze z přístroje odejmout pro usnadnění naplnění. Ve válci je označeno, jaký objem má vzorek zaujímat. Po naplnění se válec vrací do přístroje, a to tak, že je upevněn na hřídeli. Během měření se válec s měřenou směsí nachází ve větším válci a v mezikruží se nachází chladicí kapalina. Oba tyto válce při měření rotují a tím se vytváří torzní moment působící na vřeteno, které je na měřící hřídeli s pružinou, její vychýlení je snímáno potenciometrem. Výsledky jsou poté softwarem přístroje zaznamenávány v závislosti na čase. Rozsah měření kroutícího momentu je 0 až 250 Nmm s přesností 0,1 Nmm. [32]

Postup:

- 1) Příprava vzorku (bude popsáno konkrétně později).
- 2) Naplnění kelímku pastou do vyznačeného množství.
- 3) Osazení kelímku a vřetena do přístroje.
- 4) Po pěti minutách od smísení vzorku s vodou bylo spuštěno měření torzního momentu.
- 5) Také bylo spuštěno chlazení, které udržovalo teplotu okolo kelímku na 20 °C, pro udržení konstantních podmínek pro všechny vzorky po celou dobu měření.
- 6) Měření probíhalo 45 minut. Přístroj automaticky zaznamenal hodnoty torzního momentu v čase.
- 7) Nakonec se odejmul kelímek, vyprázdnil a společně s vřetenem očistil.

9.5 Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je založena na vtlačování rtuti do pórů zkoumaného materiálu. Rtuť se používá proto, že nesmáčí většinu povrchů pevných látek. Princip měření spočívá v tom, že je vzorek umístěn do baňky, ta se poté naplní rtuťí na předem definovaný známý objem. Zvyšováním tlaku v baňce se postupně vyplňují póry a při každé změně tlaku je zaznamenáno snížení hladiny rtuti v baňce, které je způsobeno právě vtlačováním rtuti do pórů. Pro každou hladinu tlaku lze

vypočítat průměr pórů, které byly právě zaplněny. Póry se plní od největších po nejmenší se vzrůstajícím tlakem.

Postup měření:

- 1) Vysušení vzorků.
- 2) Vytvoření úlomků takové velikosti, aby se vešly do měřicí baňky.
- 3) Vložení vzorků do baňky.
- 4) Zazátkování baňky a vložení do přístroje.
- 5) Vakuování.
- 6) Naplnění baňky rtutí.
- 7) Měření.



Obrázek 14: přístroj pro měření rtuťové porozimetrie

9.6 Objemová hmotnost

Z naměřené hmotnosti zkušebních těles a objemu určeného pomocí naměřených rozměrů byla stanovována objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu po 28 dnech. Objemová hmotnost D je vypočítána podle následující rovnice:

$$D = \frac{m}{V} [kg \cdot m^{-3}]$$

m ...hmotnost zkušebního tělesa [kg]

V ...objem zkušebního tělesa [m³]

Po 28 dnech zrání ve vodním prostředí bylo provedeno zkoušení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu:

9.7 Pevnost v tahu za ohybu

Zkušební těleso se vloží jednou z bočních ploch na válcové podpěry, podélná osa vzorku by měla být na podpěry kolmá. Válcové podpěry jsou od sebe osově vzdáleny 100 mm. Zatěžuje se válcem z opačné strany uprostřed, než jsou podpěry, zatěžovací síla by měla rovnoměrně růst $(50 \pm 10) \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ až do zlomení vzorku.

Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot l}{b^3} [N \cdot mm^{-2}]$$

F_t ...nejvyšší zatížení při porušení [N]

b ...šířka zkušební vzorku [mm] [30]

9.8 Pevnost v tlaku

Po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla prováděna zkouška pevnosti v tlaku. Zkušebními vzorky byly poloviny těles vzniklé při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu. Pro měření na zkušebním lisu bylo třeba využít ocelové destičky pro vytvoření přesné tlačné plochy 1600 mm² (destička má čtvercovou plochu o délce hrany 40 mm). Pevnost v tlaku se vypočítá podle následující rovnice:

$$R_c = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{1600} [N \cdot mm^{-2}]$$

F_c ...nejvyšší zatížení při porušení [N]

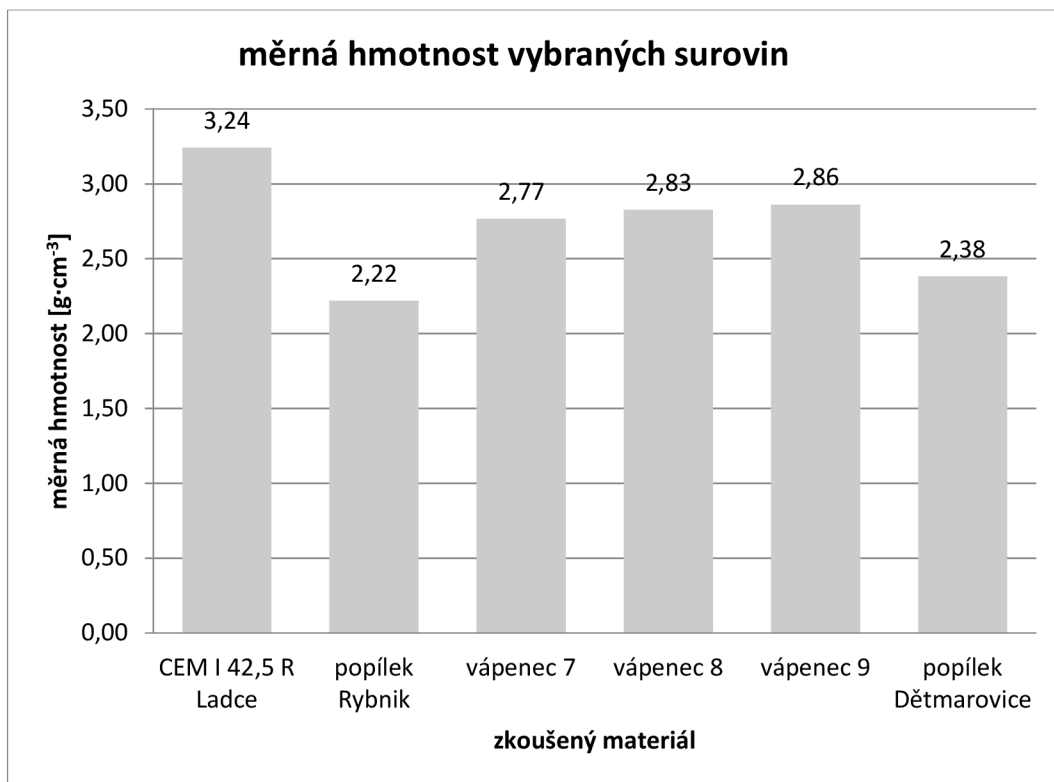
A ...zatěžovaná plocha vymezená ocelovými destičkami (1600 mm²) [30]

10 ZKOUŠKY NA VSTUPNÍCH SUROVINÁCH

- Cement CEM I 42,5 R Ladce
- Vysokoteplotní černouhelný popílek z elektrárny Dětmorovice
- Vysokoteplotní popílek z elektrárny Rybnik (Polsko)
- Vápenec Carmeuse s odlišnou jemností mletí, označení vápenců 7, 8, 9 (7 je nejhrubší a 9 nejjemnější)

Tabulka 3: porovnání měrných povrchů použitých surovin

	měrný povrch dle Blaina cm ² ·g ⁻¹
CEM I 42,5 R Ladce	4050
Popílek Dětmorovice	3360
Vápenec 7	3810
Vápenec 8	3890
Vápenec 9	4310



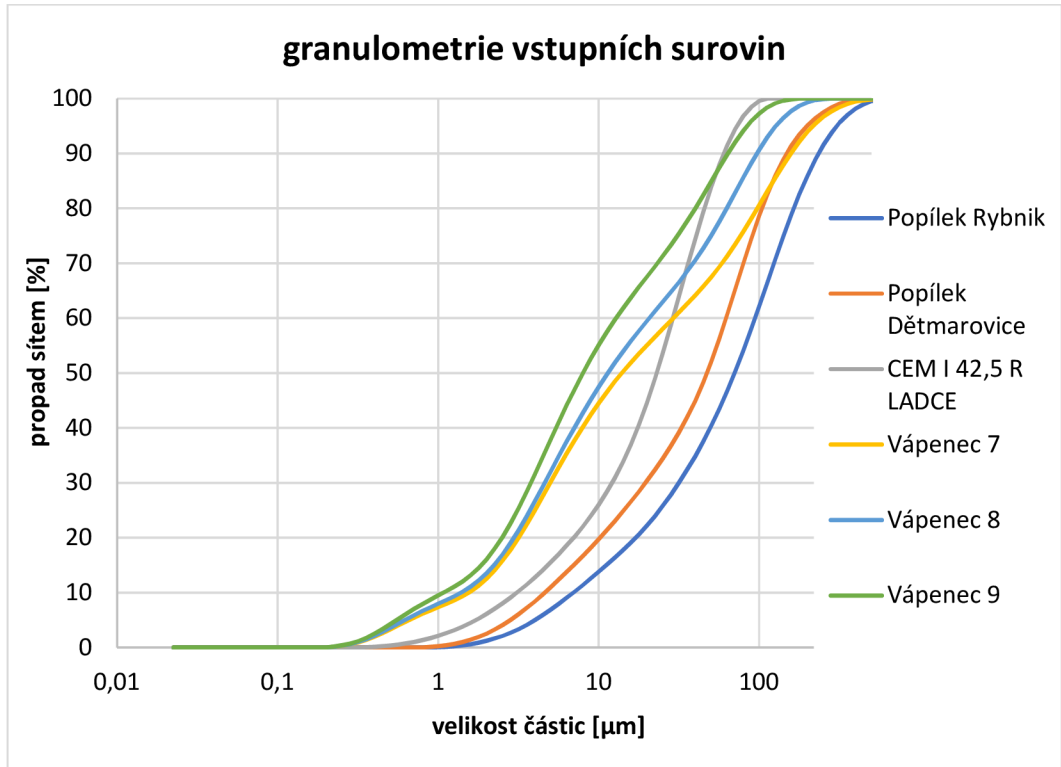
Obrázek 15: porovnání měrné hmotnosti jednotlivých surovin



Obrázek 16: porovnání mezerovitosti jednotlivých surovin

Ze zkoušky mezerovitosti jednotlivých surovin je patrné, že všechny příměsi mají menší mezerovitost, tedy dokáží lépe (hutněji) zaplňovat prostor než zkoušený cement CEM I 42,5 R Ladce. Toto zjištění lze přisoudit méně plynulé zrnitosti

cementu ve srovnání s ostatními surovinami, což můžeme pozorovat u srovnání křivek zrnitosti, které bude ihned následovat. Nejnižší mezerovitosti dosahuje vápenec 7, a to 31,7 %, což už je patrný rozdíl od zkoumaného cementu, který má mezerovitost 41,6 %.



Obrázek 17: křivky zrnitosti jednotlivých surovin

Pro navržení různých míscích poměrů zkoušených složek bylo třeba zjistit granulometrii těchto materiálů. Z grafického znázornění vyplývá, že vápenec je jemnější než cement, naopak popílek hrubší. Ve srovnání popíleků je jemnější ten z Dětmárovic. Při porovnání vápenců se prokázalo, že vápenec 9 je nejjemnější, vápenec 7 nejhrubší a vápenec 8 se nachází mezi nimi. Použité vápenec mají výrazně vyšší zastoupení částic velikosti do 10 μm oproti cementu a popílkům, což je velmi vhodné pro zaplnění mezer této velikosti.

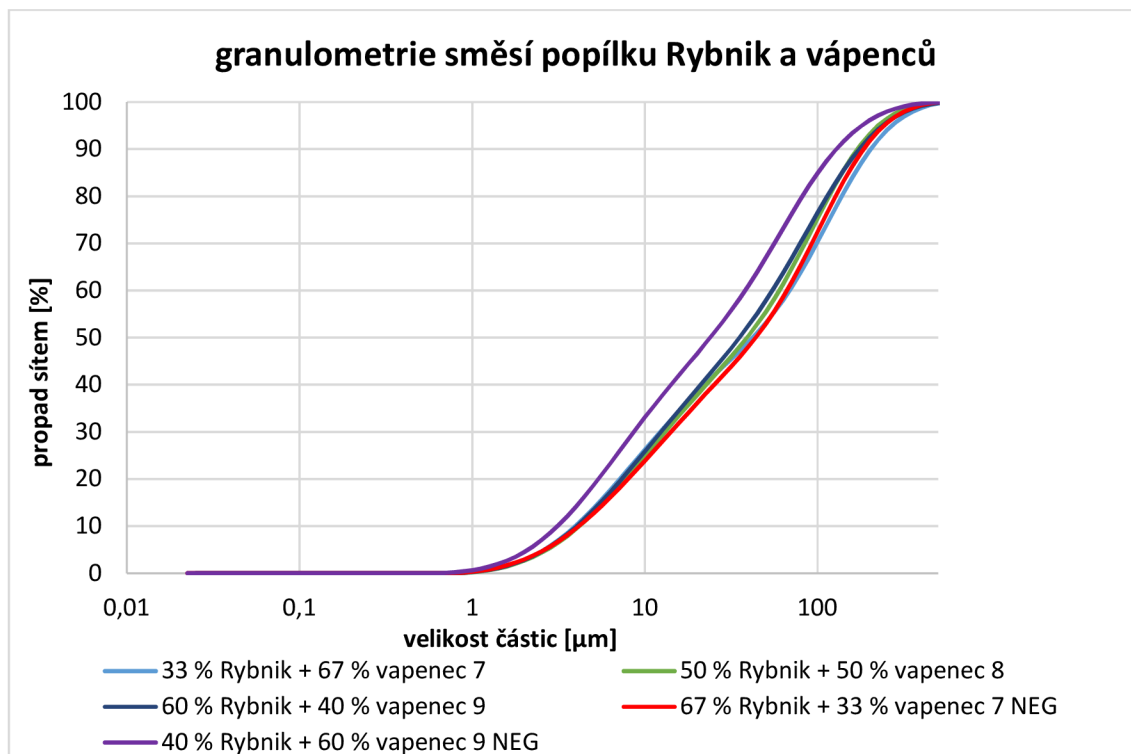
11 VYTVOŘENÉ KOMBINACE PŘÍMĚSÍ A NA NICH PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY

Pomocí počítačového softwaru byly na základě křivek zrnitosti navrženy kombinace příměsí s cílem dosažení minimální mezerovitosti. Pro zhodnocení efektivity skladby byly zároveň vytvořeny směsi s opačnými poměry složek (označované NEG).

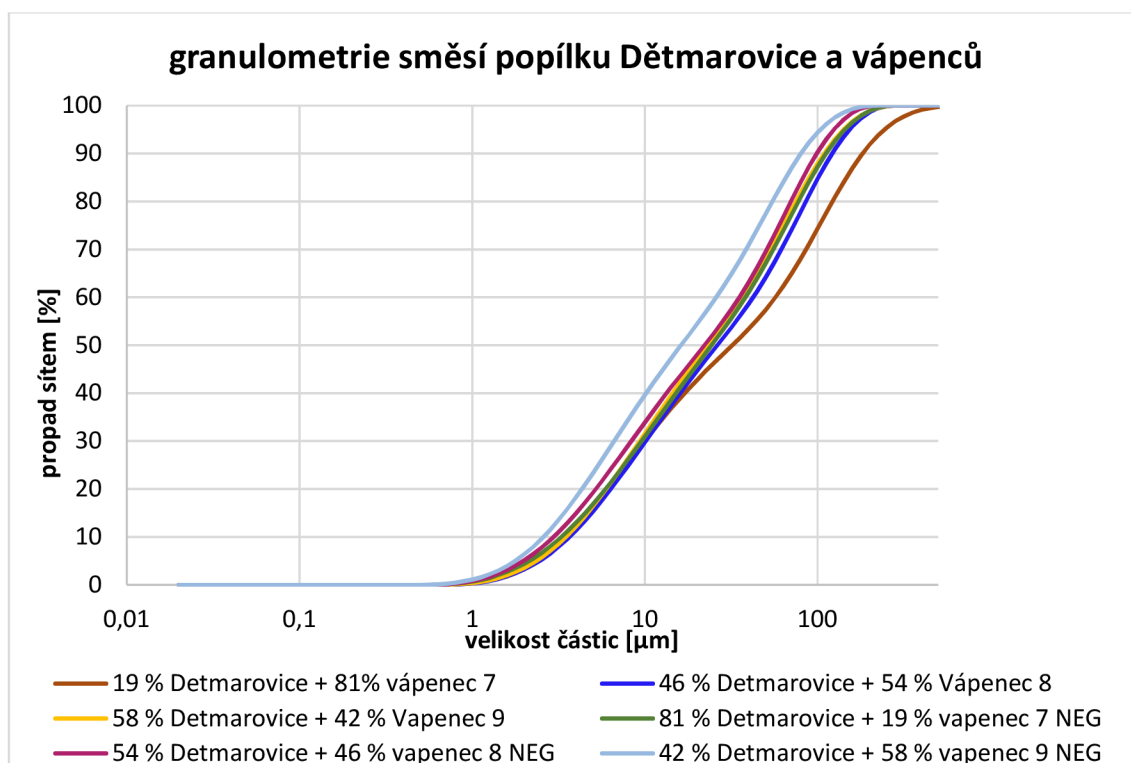
- 1) Referenční vzorek složený pouze z cementu CEM I 42,5 R Ladce
- 2) 33 % popílek Rybník + 67 % vápenec 7
- 3) 50 % popílek Rybník + 50 % vápenec 8
- 4) 60 % popílek Rybník + 40 % vápenec 9
- 5) 19 % popílek Dětmárovice + 81 % vápenec 7
- 6) 46 % popílek Dětmárovice + 54 % vápenec 8
- 7) 58 % popílek Dětmárovice + 42 % vápenec 9
- 8) 67 % popílek Rybník + 33 % vápenec 7 (NEG)
- 9) 40 % popílek Rybník + 60 % vápenec 9 (NEG)
- 10) 81 % popílek Dětmárovice + 19 % vápenec 7 (NEG)
- 11) 54 % popílek Dětmárovice + 46 % vápenec 8 (NEG)
- 12) 42 % popílek Dětmárovice + 58 % vápenec 9 (NEG)
- 13) 75 % popílek Dětmárovice + 25 % popílek Rybník
- 14) 25 % popílek Dětmárovice + 75 % popílek Rybník (NEG)

Podle těchto navržených poměrů byly smíchány směsi v suchém stavu, které byly homogenizovány v plastové uzavíratelné nádobě, která byla vždy po smísení vyprázdněna a vyčištěna tlakem vzduchu, aby nedošlo k ulpění materiálu a ovlivnění následně míchané směsi.

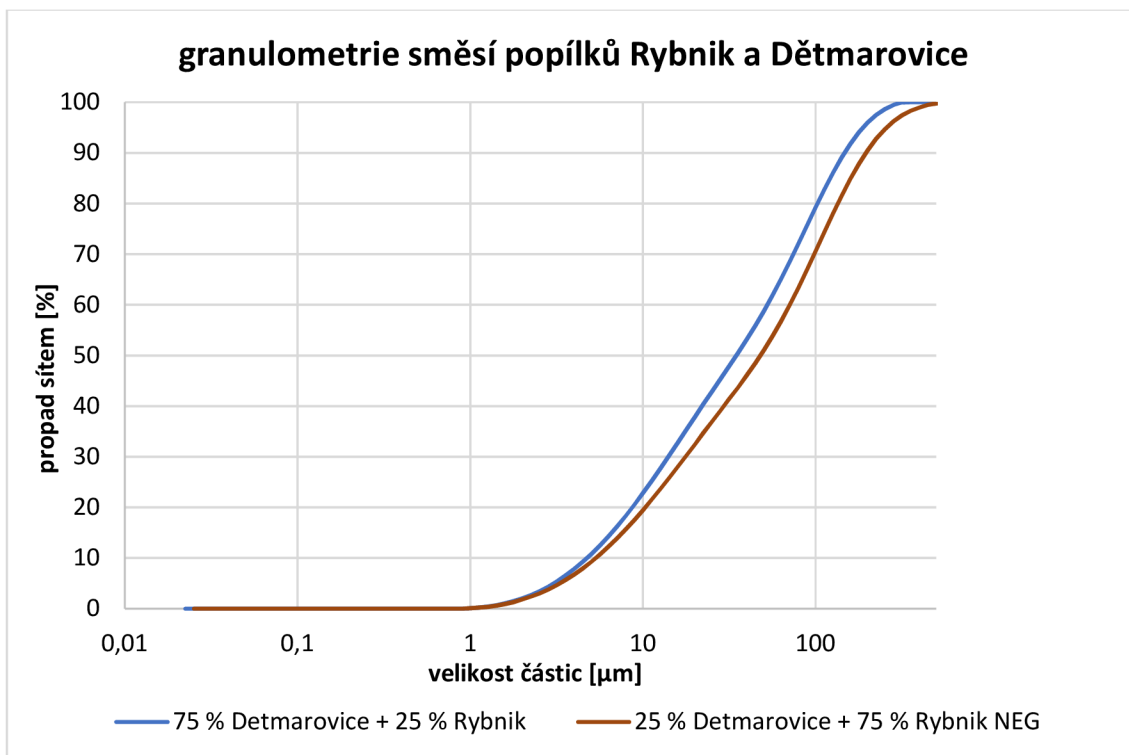
Křivky zrnitosti vytvořených směsí



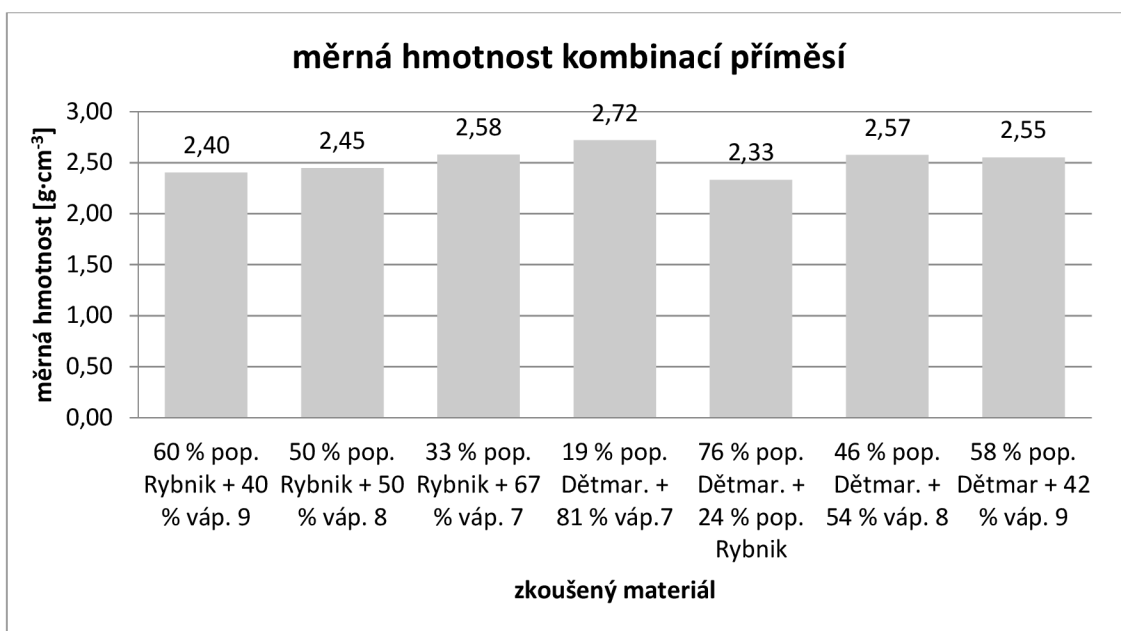
Obrázek 18: křivky zrnitosti směsí popílku Rybník s vápenci



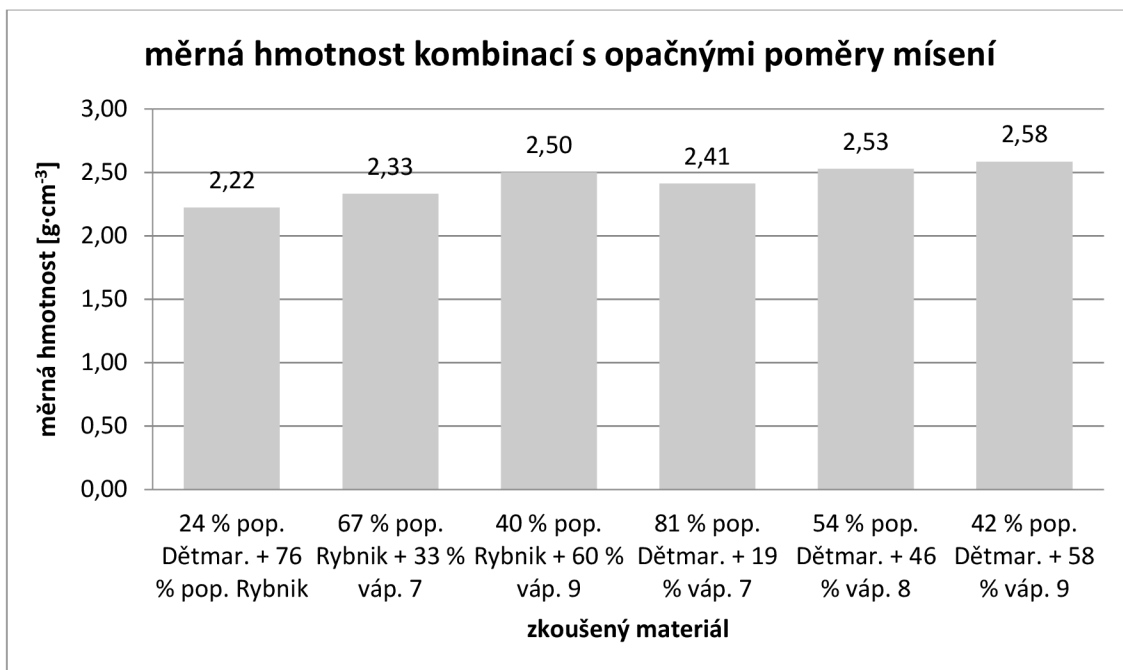
Obrázek 19: křivky zrnitosti popílku Dětmárovice s vápenci



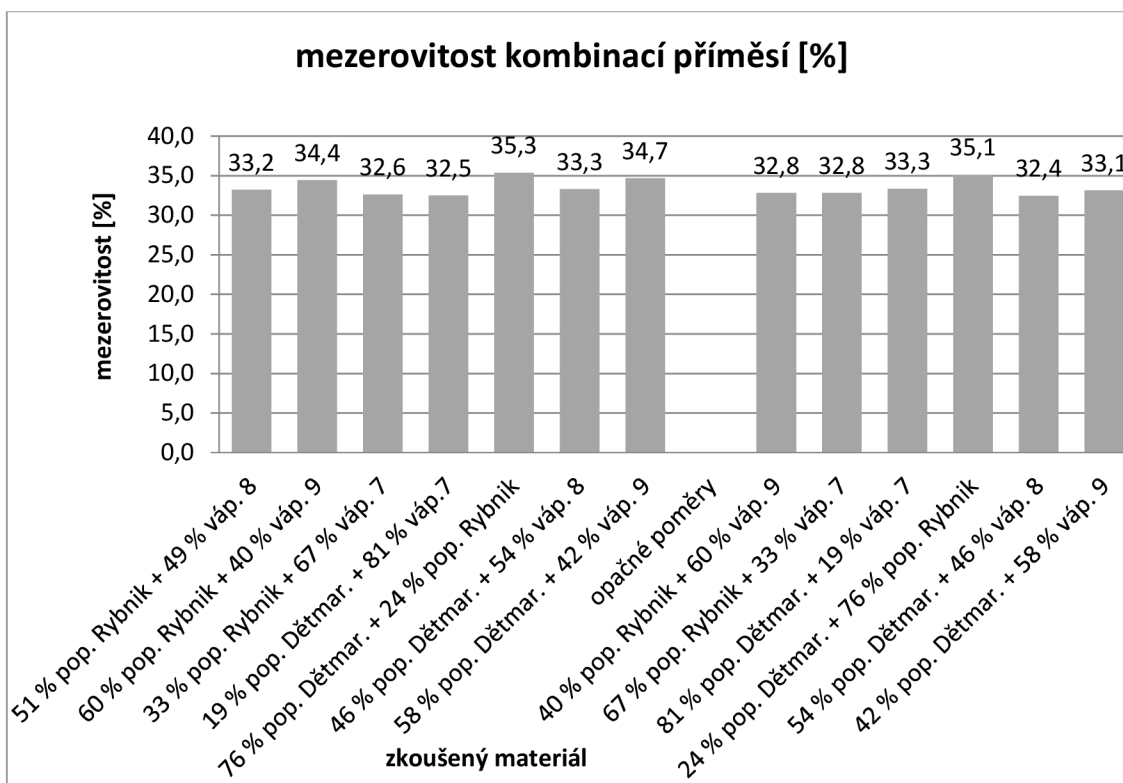
Obrázek 20: křivky zrnitosti směsí popílků Dětmovice a Rybník



Obrázek 21: porovnání měrných hmotností u kombinací příměsí



Obrázek 22: porovnání měrných hmotností u kombinací příměsí s opačnými poměry mísení



Obrázek 23: porovnání mezerovitosti všech kombinací příměsí

Na homogenizovaných směsích v navržených poměrech v suchém stavu byla provedena zkouška mezerovitosti. Předpokladem bylo, že se v této zkoušce prokáže vhodnost skladby materiálů odlišných granulometrií rozdílnou

mezerovitostí. Rozptyl hodnot mezerovitosti jsou přibližně 3 %, výsledky zkoušky neukazují výrazné rozdíly mezi jednotlivými směsmi. Navíc při srovnání jednotlivých směsí s příslušnými směsmi v negativním (opačném) poměru, došlo v některých případech k lepším výsledkům právě u opačného poměru, například u směsi popílku Dětmárovice a vápence 9 je tento rozdíl 1,6 %. Nejvyšší mezerovitosti (přes 35 %) dosáhly směsi popílků, což může být způsobeno hrubší granulometrií těchto popílků ve srovnání s použitými vápenci a také tvaru zrn, která jsou v případě popílku kulatá, což může být pro minimalizaci mezerovitosti také nevýhoda. Nejnižší hodnotu mezerovitosti dosáhly směsi popílku Dětmárovice a vápence 7 (32,5 %) a také ale popílku Dětmárovice s vápencem 8 v opačném poměru, než by mělo být optimální (mezerovitost 32,4 %). Poměr této směsi je ale 54 : 46, takže je zde zastoupení obou složek velmi podobné. Při porovnání mezerovitosti směsí surovin a mezerovitosti samotných surovin lze pozorovat lepší výsledky u směsí o několik procentních bodů, ovšem s výjimkou vápence 7, který samostatně vykazoval mezerovitost pouze 31,7 %, což je menší hodnota než ta, které dosahovaly směsi až tedy na směs, která byla právě z většiny tvořena právě vápencem 7. Tato směs dosahovala podobné mezerovitosti 32,4 % a skládala se z 81 % zmíněným vápencem a 19 % z popílku Dětmárovice, který měl při srovnání mezerovitostí jednotlivých surovin menší mezerovitost než popílek Rybník.

12 ZKOUŠKY NA CEMENTOVÝCH PASTÁCH

Zkoušení reologie cementové pasty

Podle dříve popsaných poměrů byly vytvořeny receptury pro zkoušení vlivu příměsí na reologii cementové pasty. Receptury jsou zobrazeny v tabulce 4, první receptura je složena pouze z cementu a vody a slouží jako referenční (srovnávací). Další receptury jsou vytvořeny tak, že je 25 % cementu nahrazeno kombinací příměsí ve stanoveném poměru. Vodní součinitel byl jednotný 0,4 pro všechny receptury a byl počítán ze všech suchých složek (cement i příměsí).

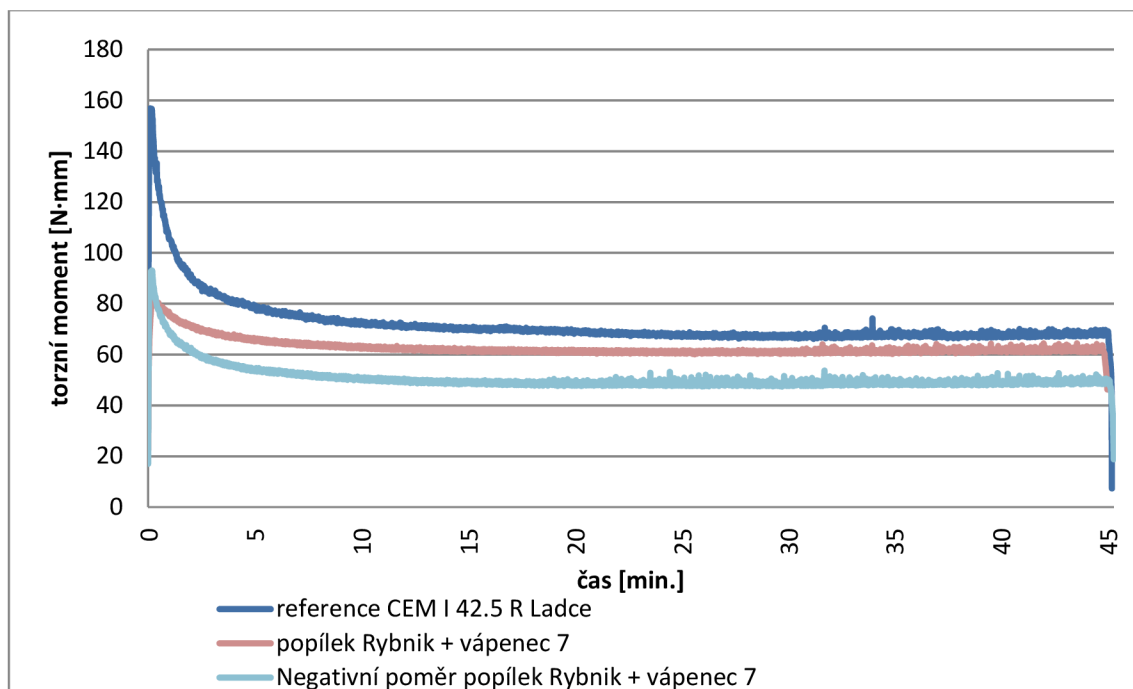
Tabulka 4: receptury pro stanovení reologie cementové pasty a rtuťové porozimetrie

	CEM I 42,5 R Ladce [g]	voda [g]	popílek Rybník [g]	popílek Dětmarovice [g]	vápenec 7 [g]	vápenec 8 [g]	vápenec 9 [g]
Receptura 1	600	240	-	-	-	-	-
Receptura 2	450		50	-	100	-	-
Receptura 3			75	-	-	75	-
Receptura 4			90	-	-	-	60
Receptura 5			-	29	121	-	-
Receptura 6			-	69	-	81	-
Receptura 7			-	87	-	-	63
Receptura 8			100	-	50	-	-
Receptura 9			60	-	-	-	90
Receptura 10			-	121	29	-	-
Receptura 11			-	81	-	69	-
Receptura 12			-	63	-	-	87
Receptura 13			38	112	-	-	-
Receptura 14			112	38	-	-	-

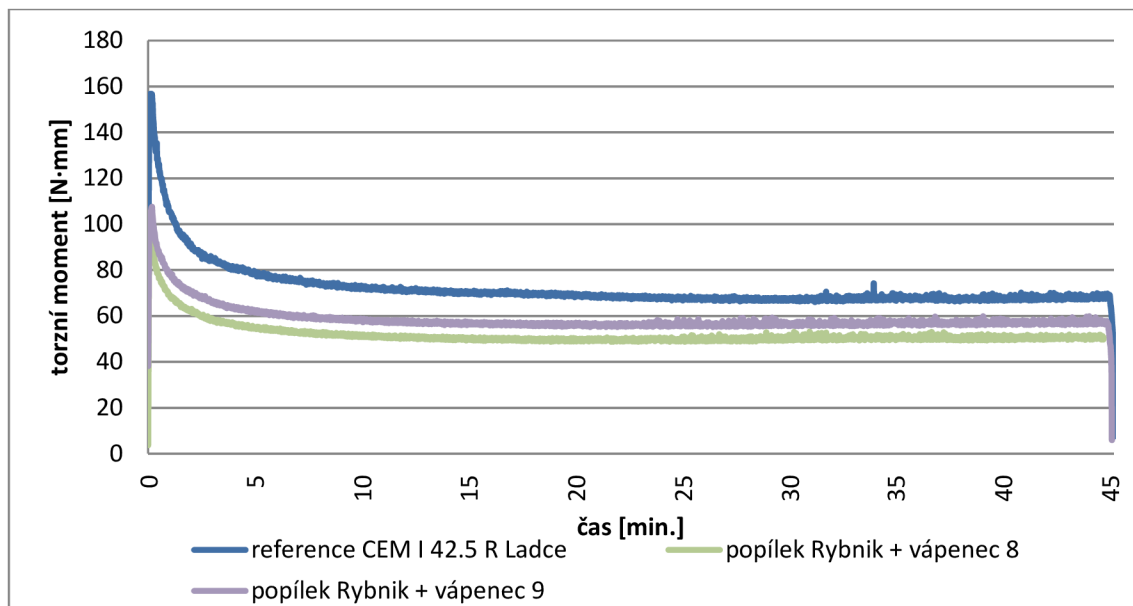
Příprava vzorků cementové pasty

- 1) Nejprve byly podle receptury smíchány sypké složky.
- 2) Následně byla přidána voda.
- 3) Míchání probíhalo 3 minuty v Hobartově míchačce při nízkých otáčkách (140 ± 5 ot./min.).
- 4) Namíchaná cementová pasta byla dále přelita ve stanoveném množství do kelímku pro měření reologie.
- 5) Po provedení měření na Viskomatu NT byla pasta z kelímku odebrána a byly plněny zkušební tělesa o rozměrech (10 × 10 × 100) mm, hutnění probíhalo poklepáním formy o stůl z důvodu tekuté konzistence.
- 6) Ze zkušebních těles byly po dozrání ve vodním prostředí vytvořeny vzorky pro měření rtuťové porozimetrie.

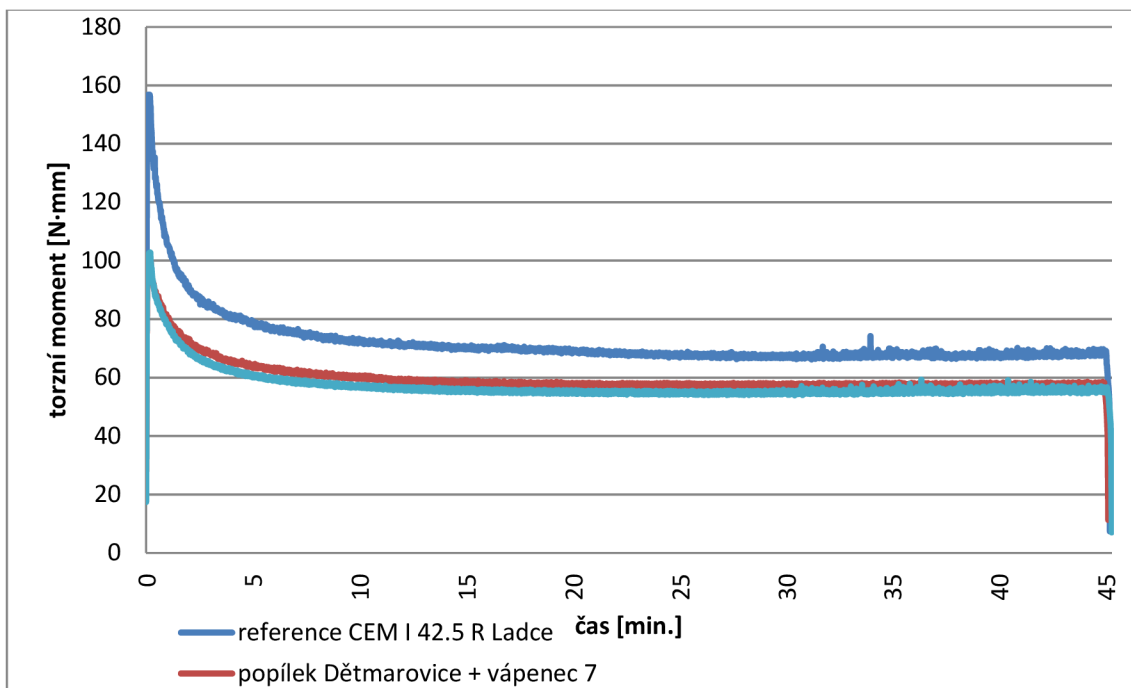
Receptury jsou v grafech pojmenovány podle kombinace příměsí, z důvodu přehlednosti.



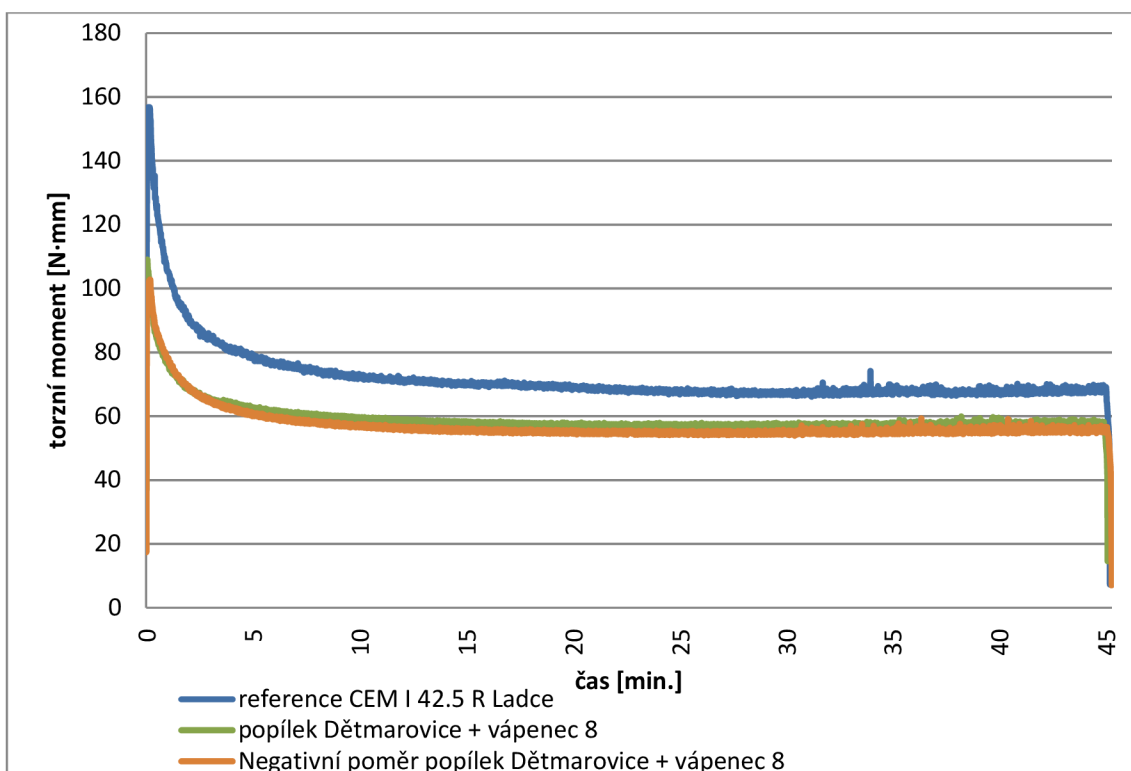
Obrázek 24: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Rybnik a vápenec 7)



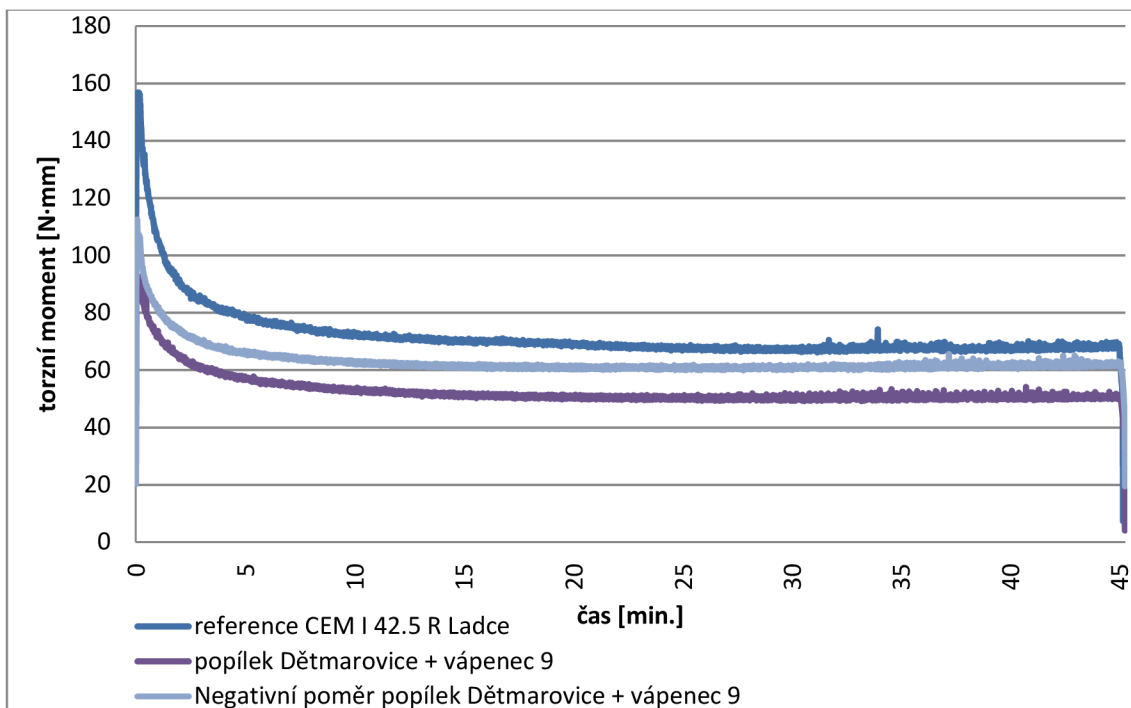
Obrázek 25: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Rybnik a vápenec 8 a 9)



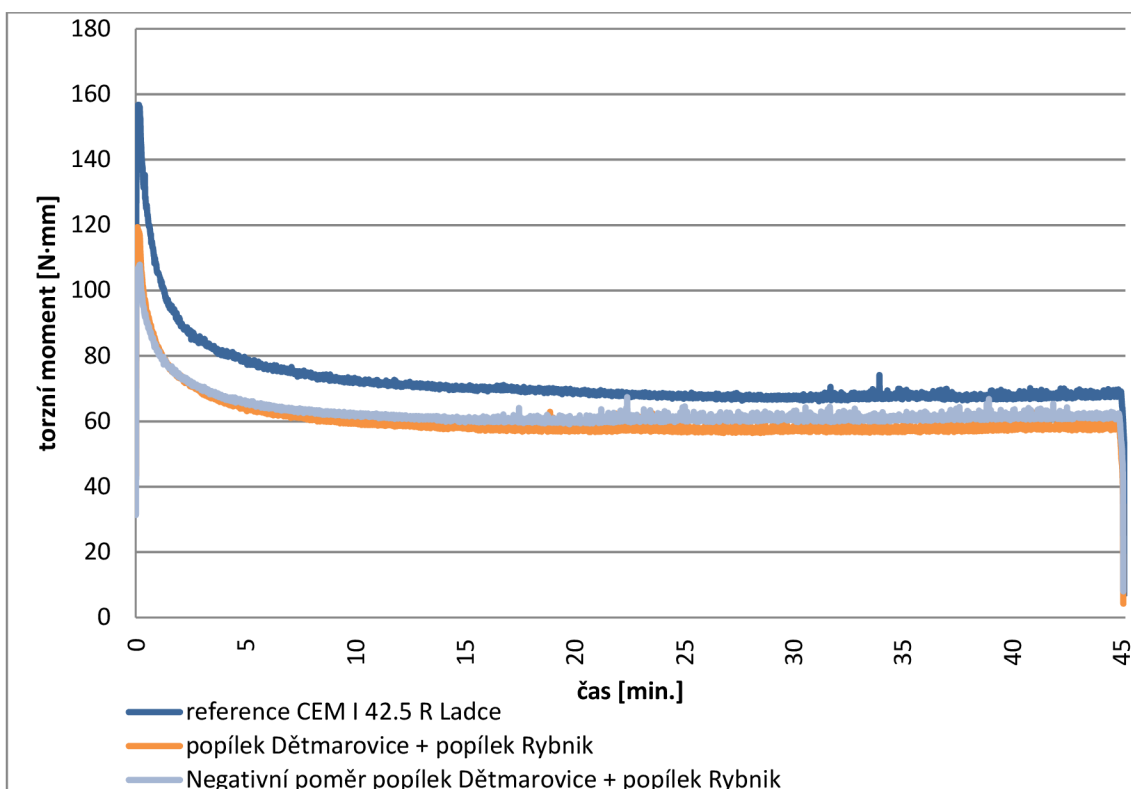
Obrázek 26: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Dětmarovice a vápence 7)



Obrázek 27: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Dětmarovice a vápence 8)



Obrázek 28: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Dětmarovice a vápence 9)

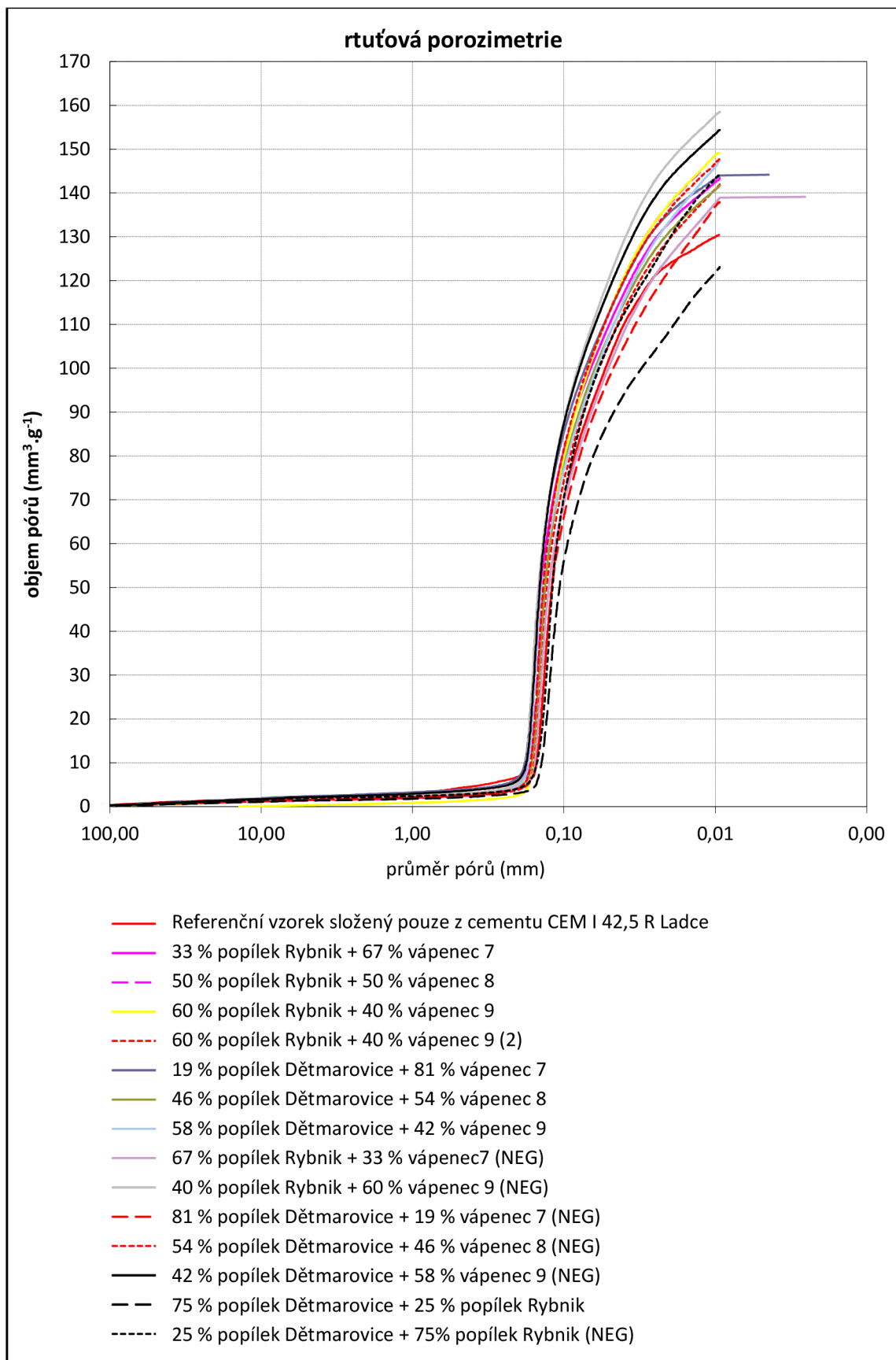


Obrázek 29: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílků)

Z porovnání torzních momentů pouze cementové pasty a cementových past s částečnou náhradou příměsmi vyplývá, že všechny navržené směsi mají přídatkem příměsí lepší reologické vlastnosti než pasta ze samotného cementu. Toho může být dosaženo díky doplnění jemných částic, zejména vápenců a také tvarově vhodných částic, které jsou zase u popílků. U většiny past složených z cementu a kombinací příměsí došlo po 15 až 20 minutách téměř k ustálení torzních momentů, oproti tomu u pouze cementové pasty docházelo o něco déle k ustalování torzního momentu.

Nejmenšího torzního momentu, a tedy nejlepší reologie dosáhly směsi s náhradou části cementu ve složení: 58 % popílek Dětmarovice + 42 % vápenec 9, 67 % popílek Rybník + 33 % vápenec 7 (NEG) a směs 50 % popílek Rybník + 50 % vápenec 8. Mezi těmito směsmi lze těžko najít souvislost, z které by vycházela logika reologických chování těchto past ve srovnání s ostatními.

Je možné, že výsledky této zkoušky byly ovlivněny nechtěnou chybou při výrobě past, která měla poté vliv na reologii past, například nepřesnost dávkování složek.



Obrázek 30: porovnání objemu pórů v zatvrdlých cementových pastách po 45 dnech zrání

Rtuťová porozimetrie

Z namíchaných cementových past byla vytvořena tělesa, která byla po odformování uložena ke zrání do vody. Ve stáří 45 dnů byly z těchto těles vytvořeny vzorky, které byly podrobeny zkoušení rtuťové porozimetrie. Výsledky této zkoušky jsou zobrazeny na obrázku 30. Nejvyšší porozity dosahovaly směsi obsahující vápenec 9, ať už v kombinaci s popílkem z Dětmovic nebo s popílkem z polského Rybníku. Nejmenší mezerovitost vykazovala směs popílků v poměru 75 % popílek Dětmovice a 25 % popílek Rybník. Ostatní směsi vykazují buď podobné nebo vyšší zastoupení pórů jako je tomu u referenční pouze cementové pasty. Znamená to, že se nepovedlo dosáhnout zvýšení hutnosti směsi.

Pro zkoušení vlivu skladby příměsí jako náhrady části cementu byly vytvořeny vzorky cementové malty, na kterých byly po 28 dnech zrání zkoušeny pevnosti v tahu za ohybu a tlaku a také objemová hmotnost.

13 ZKOUŠKY NA CEMENTOVÝCH MALTÁCH

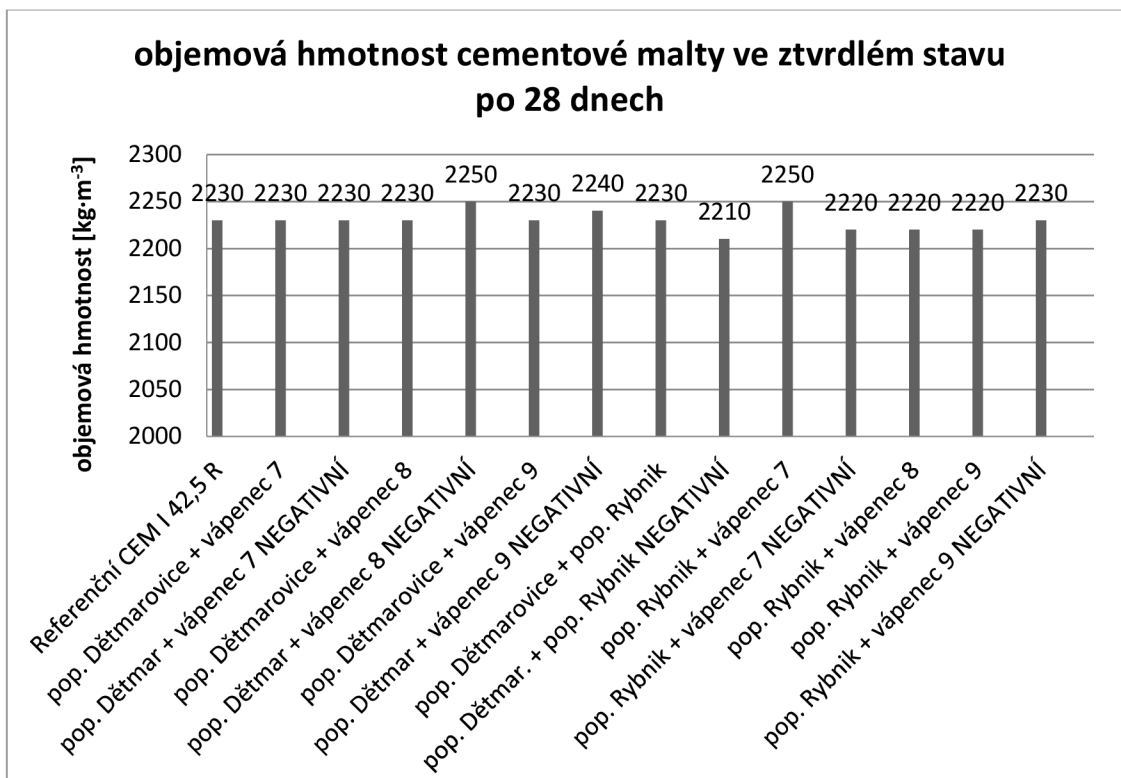
Příprava vzorků cementové malty

Míchání probíhalo v Hobartově míchačce.

- 1) Nejprve byly podle receptury naváženy sypké složky, které se poté míchaly nízkou rychlostí (140 ot./min.) po dobu 30 sekund.
- 2) V dalších 30 sekundách byla přidána voda.
- 3) Poté probíhalo ještě 60 sekund míchání na nízké otáčky.
- 4) Dále bylo míchání zastaveno na 30 sekund, během kterých byly stěrkou otřeny nesmíchané zbytky směsi po krajích nádoby nebo na lopatce.
- 5) Nakonec bylo mícháno ještě 60 sekund na rychlé otáčky (285 ot./min.).
- 6) Poté byly ve dvou vrstvách plněny formy o rozměru (40 × 40 × 160) mm.
- 7) Každá vrstva byla zhutněna na elektrickém hutnícím stolku.
- 8) Povrch vzorku byl zarovnán a vzorky označeny.
- 9) Po zatvrdnutí byly vzorky odformovány a uloženy do vodního prostředí.

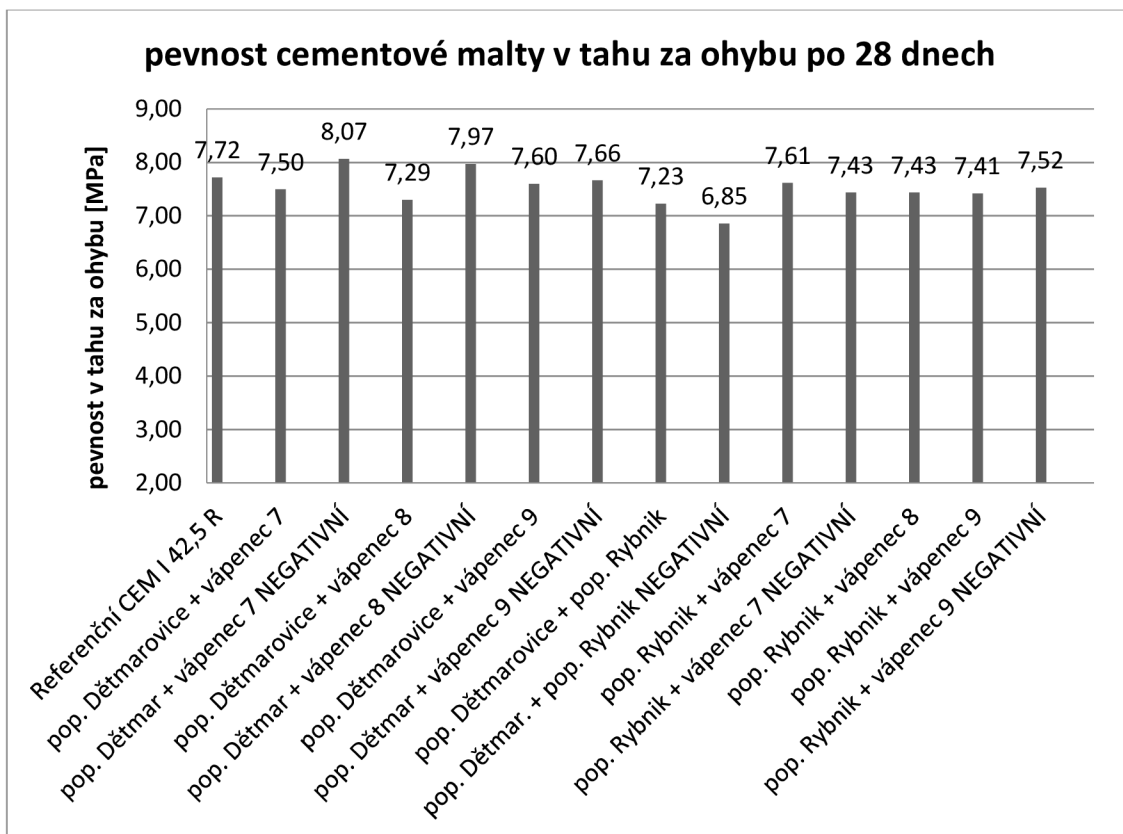
Tabulka 5: receptury cementové malty

	CEM I 42,5 R Ladce [g]	Normalizovaný písek CEN [g]	voda [g]	popílek Rybník [g]	popílek Dětmovice [g]	vápenec 7 [g]	vápenec 8 [g]	vápenec 9 [g]
Receptura 1	450	1350	225	-	-	-	-	-
Receptura 2	337,5			37,1	-	75,4	-	-
Receptura 3				56,3	-	-	56,3	-
Receptura 4				67,5	-	-	-	45
Receptura 5				-	21,4	91,1	-	-
Receptura 6				-	51,8	-	60,8	-
Receptura 7				-	65,3	-	-	47,3
Receptura 8				75,4	-	37,1	-	-
Receptura 9				45	-	-	-	67,5
Receptura 10				-	91,1	21,4	-	-
Receptura 11				-	60,8	-	51,8	-
Receptura 12				-	47,3	-	-	65,3
Receptura 13				28,1	84,4	-	-	-
Receptura 14				84,4	28,1	-	-	-

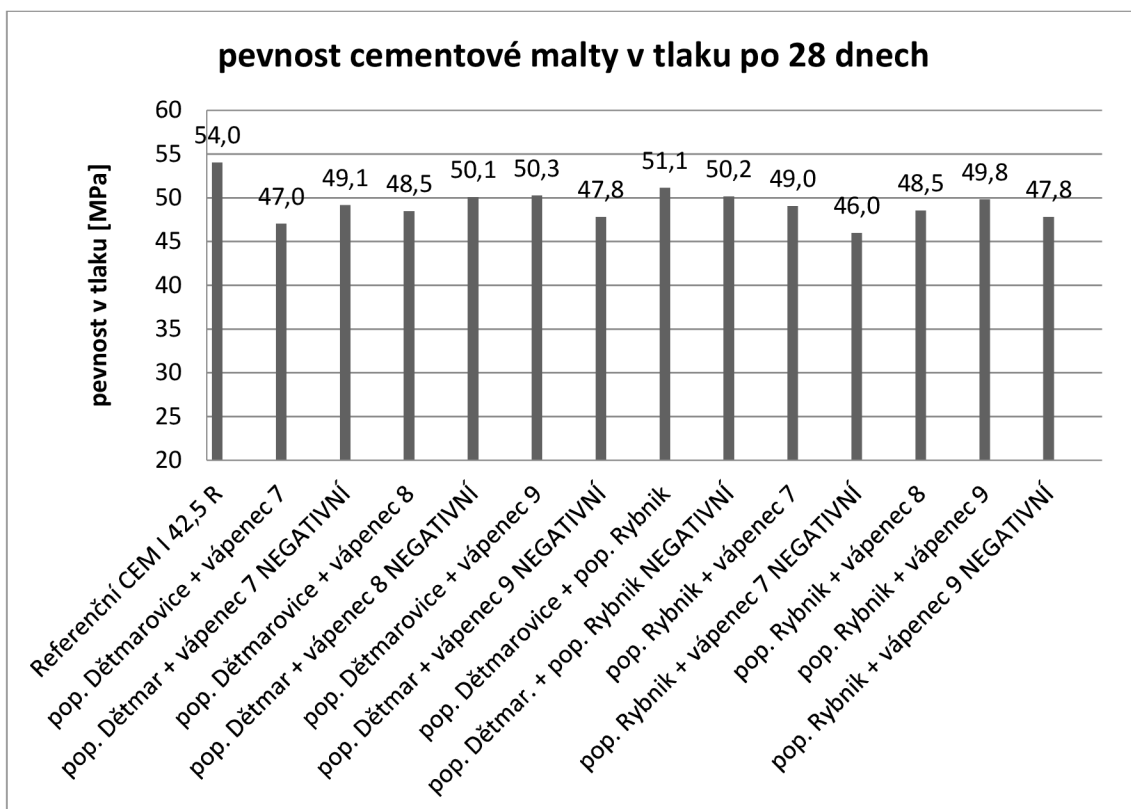


Obrázek 31: porovnání objemových hmotností cementových malt ve ztvrdlém stavu po 28 dnech

Z porovnání objemových hmotností cementových malt není patrné zmenšení mezerovitosti, které by vedlo ke zvýšení objemové hmotnosti. Jelikož byly míchány složky s odlišnými měrnými hmotnostmi, dojde pak k ovlivnění výsledné objemové hmotnosti. Použitou surovinou s nejmenší měrnou hmotností byl popílek Rybník, můžeme potom počítat s tím, že ve směsích, ve kterých byl zastoupen ve vyšší míře, bude tímto snížena objemová hmotnost.



Obrázek 32: porovnání pevností cementových malt v tahu za ohybu ve stáří 28 dní



Obrázek 33: porovnání pevností cementových malt v tlaku ve stáří 28 dní

U pevnosti v tahu za ohybu není patrná žádná závislost na složení malt, výsledky s výjimkou směsí popílků, kde byly dosaženy nižší hodnoty pevností než u ostatních směsí.

Z porovnání pevností v tlaku lze pozorovat, že směsi s navrženými poměry příměsí dosahují vyšších pevností než směsi s opačnými poměry. Toto tvrzení se nepotvrdilo u dvou receptur, a to u směsi popílku Dětmárovice a vápence 7 a u směsi popílku Dětmárovice a vápence 8. U těchto receptur došlo k dosažení vyšší pevnosti při opačném míšicím poměru, než který byl navržen. U první jmenované receptury by se tento výsledek dal přičíst reaktivitě popílku. V receptuře s opačným poměrem příměsí totiž byl popílek zastoupen 81 % a vápenec 19 %.

U zjištěných pevností je třeba uvážit rozdílnou reaktivitu příměsí, kdy popílký patří jednoznačně do aktivních příměsí, protože se podílejí na průběhu hydratace a tím budou ovlivňovat i pevnosti. U vápenců jsou vlivy na hydrataci diskutovány, poslední dobou se vápenec uznává jako aktivní příměs, ale vliv bude u popílků určitě výraznější. Na druhou stranu pevnost byla zkoušena po 28 dnech zrání vzorků cementové malty a v této době ještě nemusí být vliv popílků tolik patrný.

ZÁVĚR

Teoretická část se zabývala speciálními betony, popisuje některé příklady a jejich specifické vlastnosti a požadavky. Dále je zde rozebírána struktura betonu s ohledem na potřebu zhutnění i mezi jemnými podíly. Velmi důležitou roli také hraje granulometrie směsi, k dosažení specifických vlastností je třeba věnovat návrhu vhodné křivky zrnitosti velkou pozornost. Mimo jiné bývá pro dosažení vhodné granulometrie betonové směsi využíváno příměsí. Příměsí svou jemností mohou vyplňovat mezery ve struktuře betonu a tím zlepšovat mnoho vlastností, v čerstvém stavu například reologické vlastnosti a ve ztvrdlém stavu těsnost, pevnost, trvanlivost. Mimo to se navíc aktivní příměsí podílejí na hydrataci a tím umožňují zvýšení pevnosti, případně možnost redukce potřebného cementu, což je výhodné ekologicky i ekonomicky. Při betonování velmi objemných staveb mohou být příměsí vhodné ke zmenšení vytvářeného hydratačního tepla, této vlastnosti bývá využíváno například při stavbě přehrad. Speciální betony by se také většinou neobešly bez přísad, zejména zavedení superplastifikačních přísad umožnilo další velký pokrok v technologii betonu, kterým jsou samozhutnitelné betony a vysokopevnostní či vysokohodnotné betony.

V praktické části byly nejprve zkoušeny použité suroviny. Byla na nich zjištěna měrná hmotnost, která byla potřebná pro následné zjištění mezerovitosti v suchém stavu. Také byla na všech surovinách vyhodnocena granulometrie. Na základě granulometrií byly pomocí počítačového algoritmu vytvořeny směsi popílků s vápenci. Tyto směsi by měly mít takový poměr složek, aby bylo dosaženo minimální mezerovitosti. Po navržení směsí popílků a vápenců byly tyto kombinace nejprve zkoumány v suchém stavu a pak také v cementových pastách a cementových maltách. V suchém stavu byla zkoumána mezerovitost zjištěná pomocí zkoušky mezerovitosti fileru. Směsi příměsí dosahovaly menší mezerovitosti než samotné suroviny (kromě vápence 7, který dosahoval nízké mezerovitosti 31,7 %). Výsledky mezerovitosti směsí se však vzájemně nijak významně nelišily. Při zkoušení vlivu na reologii cementové pasty došlo použitím

příměsí k dosažení menšího torzního momentu, a tedy lepších reologických vlastností než u pasty bez příměsí. Ve třech případech cementových past s částečnou náhradou příměsmi bylo dosaženo výrazně lepší reologie ve srovnání s ostatními recepturami, nebyla ale zjištěna souvislost mezi těmito směsmi a je otázkou, zda nebyla tato zkouška ovlivněna chybou při přípravě pasty. Z cementových past byly vytvořeny vzorky, které byly podrobeny zkoušení rtuťovou porozimetrií. Při této zkoušce nebyla potvrzena vhodnost skladby směsi, protože vzorky dosahovaly porozity velmi podobné nebo vyšší než vzorek z čistě cementové pasty. Pouze vzorek cementové pasty se směsí popílků dosáhl lepších výsledků, které by mohly naznačovat vhodnost takto složené receptury.

Směsi příměsí byly také použity pro výrobu cementových malt, na kterých byla zkoumána objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Objemová hmotnost byla však ovlivněna různou měrnou hmotností vstupních surovin, takže nebyla nalezena závislost objemové hmotnosti na složení směsí. U pevnosti v tahu také nebyla nalezena závislost na složení receptur. Pouze u pevností v tlaku byl pozorován trend, který by mohl potvrzovat určitý vliv skladby směsí. Kromě dvou receptur byla vždy pevnost v tlaku navržené receptury vyšší než pevnost receptury s opačným (negativním) poměrem mísení příměsí.

14 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. 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] HILAL, Ameer A. Microstructure of Concrete. YILMAZ, Salih a Hayri Baytan OZMEN, ed. *High Performance Concrete Technology and Applications* [online]. InTech, 2016, 2016-10-05 [cit. 2019-01-04]. DOI: 10.5772/64574. ISBN 978-953-51-2650-8. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/high-performance-concrete-technology-and-applications/microstructure-of-concrete>
- [4] Miroslav Gabko Studium vlastností vysokopevnostních betonů s využitím mikro a nano příměsí. Brno, 2015. 91 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [5] Steven H. & Panarese, Beatrix KERKHOFF a William C. Panarese PANARESE. High-Performance Concrete. Design and Control of Concrete Mixtures EB001 [online]. Portland Cement Assn, 2003, 14th edition , Pages 299-314 [cit. 2017-05-05]. ISBN 0-89312-217-3. Dostupné z: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap17.pdf
- [6] Kumar, S.V. & Santhanam, Manu. (2003). Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *Indian Concrete Journal*. 77. 1324-1331.

- [7] Fennis, Sonja & Walraven, J.C.. (2012). Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Heron*. 57. 73-101 [online]. [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/285993464_Using_particle_packing_technology_for_sustainable_concrete_mixture_design
- [8] Kristýna Vobinušková Studium vysokopevnostních betonů s ohledem na současný vývoj a využití ve stavebnictví. Brno, 2017. 59 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Klára Křížová, Ph.D.
- [9] HELA, R., BETON – technologie – konstrukce – sanace 2/2015 – Příměsi do betonu, odborný časopis, Beton TKS, s. r. o. 2015
- [10] JEDLA, Pavel. Přísady a příměsi pro výrobu vysokohodnotných betonů. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.
- [11] Lédl, M.: Návrh koncepce využívání mikropříměsí pro betony vysokých užitných vlastností, diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2014
- [12] Hooton, Doug. (2011). Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27. 754-760. 10.1139/cjce-27-4-754.
- [13] ELFMARKOVÁ, Veronika. Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu. Brno, 2013. 133 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavení, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc..
- [14] Bc. Miroslav Gabko Reaktivní práškové kompozity (RPC). Brno, 2017. 80 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav

technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

- [15] VLČ, Viktor. Využití mikro a nanotechnologií pro vývoj ultra vysoce pevnostních a vysokohodnotných betonů se speciálními vlastnostmi: diplomová práce. Brno, 2012. 111 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [16] REBENTROST, Mark a Pavel VANĚK. Návrh nosné konstrukce z Ductalu. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2008, č. 2, s. 16-18. ISSN 1213-3116
- [17] Bc. Martin Labaj Betony s vysokoteplotními popílky aktivovanými nanočásticemi.. Brno, 2016. 127 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [18] MIKHAILOVA O. Studium možností efektivního využívání a aktivace aktivních přísad do betonu. Brno, 2014. 89 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc..
- [19] TERZIJSKI, Ivailo. *Polyfunkční přísady do betonu - principy a možnosti návrhu podle požadavku konkrétní aplikace: Multifunctional admixtures for concrete - principles and possibilities of their design according to demands of actual application : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru konstrukce a dopravní stavby*. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4331-0.
- [20] The Cementitious and Pozzolanic Properties of Fluidized Bed Combustion Fly Ash. Stevens, W., Robl, T. a Mahboub , K. Lexington, KY, USA : autor neznámý, 2009. Proceedings: World of Coal Ash Conference.
- [21] Latham , P. J. , Munjiza , A. a Lu, Y. On the prediction of void porosity and packing of rock particulates. Powder Technology. 2002, 125, stránky 10-27.

- [22] Ing. Denisa Jančaříková Stanovení možností zvyšování vazného potenciálu el. popílků pro výrobu cementových kompozitů. Brno, 2017. 124 s., Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [23] Hüsken, G., A Multifunctional Design Approach for Sustainable Concrete: With Application to Concrete Mass Products. University Press, 2010, Pages 254, ISBN 9789068146318.
- [24] Jaromír Jobánek Vývoj receptur těžkých betonů pro závaží. Brno, 2017. 60 s., 8 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [25] BETON, HEIDELBERG CEMENT Group, Příručka technologa 2010 1. vydání [online] Dostupné z: http://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/publikace/dd005446dfc8af01490e11d6a4f2c0df43bb981a_uploaded_prirucka-technologa-beton.pdf
- [26] TORREGROSA, E.C. Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties. Valencie, Spain, 2013. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
- [27] Ductal®, Latticework Panels [online] Dostupné z: <https://www.ductal.com/en/private-villa-ductalr-latticework-panels>
- [28] ACKER, Paul a Mouloud BEHLOUL. Ductal® Technology: A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications. SCHMIDT, M a Ekkehard FEHLING. Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13-15, 2004. Kassel: Kassel University Press, 2004, 12-24. ISBN 3899580869.
- [29] ČSN EN 1097-4 Zkoušení fyzikálních a mechanických vlastností kameniva Část 4: – Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru. Praha: Český normalizační institut, 2008

- [30] ČSN EN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2000
- [31] ČSN 72 2113 Stanovení měrné hmotnosti cementu.
- [32] VISKOMAT NT - rotační viskozimetr [online] Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/viskomat-nt-rotacni-viskozimetr.html>

15 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: vývoj některých speciálních betonů na časové ose [26]	13
Obrázek 2: fasádní desky z Ductalu [27]	16
Obrázek 3: těžká kameniva a jejich vlastnosti [25]	20
Obrázek 4: tranzitní zóna mezi zrnem kameniva a cementovou pastou [12]	23
Obrázek 5: schéma zaplnění mezer mezi zrny [7]	24
Obrázek 6: distribuční křivky zrnitosti podle Burminstera [21, 22].....	27
Obrázek 7: rozdělení podle tvaru a index kulatosti dle Powerse [21, 22].....	28
Obrázek 8: princip stérického odpuzování [1].....	31
Obrázek 9: zrna vysokoteplotního popílku pod mikroskopem [20].....	34
Obrázek 10: zrna fluidního popílku pod mikroskopem [20]	35
Obrázek 11: zaplnění prostoru mezi zrny cementu mikrosilikou [10].....	36
Obrázek 12: schéma zařízení pro měření zhutnitelnosti	43
Obrázek 13: přístroj Viskomat NT.....	43
Obrázek 14: přístroj pro měření rtuťové porozimetrie	45
Obrázek 15: porovnání měrné hmotnosti jednotlivých surovin	47
Obrázek 16: porovnání mezerovitosti jednotlivých surovin	47
Obrázek 17: křivky zrnitosti jednotlivých surovin	48
Obrázek 18: křivky zrnitosti směsí popílku Rybník s vápencí	50
Obrázek 19: křivky zrnitosti popílku Dětmárovice s vápencí.....	50
Obrázek 20: křivky zrnitosti směsí popílků Dětmárovice a Rybník.....	51
Obrázek 21: porovnání měrných hmotností u kombinací příměsí	51
Obrázek 22: porovnání měrných hmotností u kombinací příměsí s opačnými poměry mísení.....	52
Obrázek 23: porovnání mezerovitosti všech kombinací příměsí.....	52
Obrázek 24: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Rybník a vápence 7).....	55
Obrázek 25: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Rybník a vápence 8 a 9)	55

Obrázek 26: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Dětmárovice a vápence 7).....	56
Obrázek 27: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Dětmárovice a vápence 8).....	56
Obrázek 28: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílku Dětmárovice a vápence 9).....	57
Obrázek 29: porovnání torzních momentů cementových past (referenční a s příměsí popílků).....	57
Obrázek 30: porovnání objemu pórů v zatvrdlých cementových pastách po 45 dnech zrání.....	59
Obrázek 31: porovnání objemových hmotností cementových malt ve ztvrdlém stavu po 28 dnech.....	62
Obrázek 32: porovnání pevností cementových malt v tahu za ohybu ve stáří 28 dní	63
Obrázek 33: porovnání pevnosti cementových malt v tlaku ve stáří 28 dní	63

16 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: ukázková receptura RPC kompozitu Ductal	16
Tabulka 2: chemické složení strusky [2]	36
Tabulka 3: porovnání měrných povrchů použitých surovin	46
Tabulka 4: receptury pro stanovení reologie cementové pasty a rtuťové porozimetrie	54
Tabulka 5: receptury cementové malty	61