

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

ADAM FENCL

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

**Analýza vlivu způsobu hutnění čerstvého betonu
na vlastnosti ztvrdlého betonu**

Bakalářská práce

Vypracoval: Adam Fencel
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fencel Jméno: Adam Osobní číslo: 437981

Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Analýza vlivu způsobu hutnění čerstvého betonu na vlastnosti ztvrdlého betonu

Název bakalářské práce anglicky: Analysis of the influence of the fresh concrete compacting method on the properties of set up concrete

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši k tématu hutnění betonu, která bude obsahovat:

- Vysvětlení fyzikální podstaty vzniku hutnicí síly.
- Přehled běžně používaných vibračních přístrojů.
- Zhodnocení vlivu vodního součinitele, maximálního zrna kameniva a příměsí na způsob hutnění.

Na základě znalosti z rešerše bude realizován experimentální program v následujících bodech:

- Výroba zkušebních těles trámců s výškovou orientací a proměnnou dobou hutnění.
- Vyhodnocení změny objemové hmotnosti po výšce trámce a jejich vzájemné porovnání.
- Stanovení optimální doby hutnění pro daný vodní součinitel.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000

Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005

Colleparđi, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[Redacted signature]

Podpis vedoucího práce

[Redacted signature]

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

22.2.2018

Datum převzetí zadání

[Redacted signature]

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s využitím poskytnutých odborných konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Jsem si vědom toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon). Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne 27. 5. 2018

.....
Adam Fencel

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a věcné návrhy při zpracování této závěrečné bakalářské práce, rovněž za jeho rady a pomoc při realizaci pokusů v laboratořích na půdě fakulty stavební ČVUT v Praze. A studentům pátého ročníku, oboru konstrukce dopravních staveb za pomoc při míchání betonových směsí v laboratoři. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petru Bílému, Ph.D. za jeho skvělý přístup k výuce předmětů týkajících se betonových konstrukcí napříč ročníky.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na praktické měření a vyhodnocování toho, jak způsob hutnění čerstvé betonové směsi ovlivňuje vlastnosti, jako je objemová hmotnost, pevnost a stejnorodost ztvrdlého betonu. V rešeršní části je projednáno, jak maximální zrno kameniva, druh a množství příměsí a vodní součinitel ovlivňují způsob hutnění. Následuje přehled běžných způsobů a prostředků pro hutnění a vysvětlení fyzikálního principu hutnicí síly. V praktické části je realizován experiment, na základě kterého, jsou stanoveny ideální doby hutnění.

Klíčová slova

Beton, hutnění, vibrace, konzistence, příměsí, maximální zrno kameniva, vodní součinitel.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the practical measurement and evaluation of how the method of compacting the fresh concrete mix influences properties such as density, strength and homogeneity of hardened concrete. In the research part it is discussed how the maximum aggregate grain, the type and quantity of admixtures and the water-cement ratio influence the method of compaction. The following is an overview of common methods and means for compaction and explanation of the physical principle of compaction force. In the practical part is realized an experiment on the basis of which are determined the ideal compaction times.

Keywords

Concrete, compaction, vibration, consistency, admixture, maximum grain aggregate, water-cement ratio.

Obsah

Obsah.....	8
1 ÚVOD.....	10
2 VLASTNOSTI BETONU A JEHO SLOŽEK.....	11
2.1 Kamenivo	11
2.1.1 Dělení kameniva	11
2.1.2 Zrnitost.....	12
2.1.3 Měrný povrch	14
2.1.4 Vliv maximálního zrna na způsob hutnění	14
2.2 Cement.....	15
2.3 Příměsi.....	17
2.3.1 Elektrárenské popílky	18
2.3.2 Křemičité úlety (mikrosilika)	19
2.3.3 Nanosilika	20
2.3.4 Struska	21
2.3.5 Mikromletý vápenec	21
2.3.6 Zhodnocení příměsí na způsob hutnění	22
2.4 Voda	23
2.4.1 Vodní součinitel.....	23
2.4.2 Zhodnocení vodního součinitele na způsob hutnění.....	24
3 HUTNĚNÍ BETONOVÉ SMĚSI	25
3.1 Proč je důležité hutnit.....	25
3.1.1 Hutnost betonu.....	26
3.2 Druhy hutnění.....	28
3.2.1 Dusání.....	29
3.2.2 Propichování.....	29
3.2.3 Střásání	30
3.2.4 Lisování	30
3.2.5 Válcování.....	31

3.2.6	Vibrování	32
4	POPIS EXPERIMENTU	39
4.1	Cíle experimentu	39
4.2	Testované směsi	39
4.3	Postup při provedení experimentu.....	40
4.3.1	Plán experimentu	40
4.3.2	Použité přístroje.....	41
5	ZKOUŠKY VZORKŮ.....	43
5.1	Sednutí kužele	43
5.2	Objemová hmotnost	43
5.2.1	Popis zkoušky	43
5.2.2	Výsledky zkoušky.....	44
5.2.3	Zhodnocení výsledků zkoušky	47
5.3	Pevnost v tlaku	47
5.3.1	Popis zkoušky	47
5.3.2	Výsledky zkoušky.....	47
5.3.3	Zhodnocení výsledků zkoušky	51
5.4	Homogenita	53
5.4.1	Popis zkoušky	53
5.4.2	Výsledky zkoušky.....	54
5.4.3	Zhodnocení výsledků zkoušky	56
6	ZÁVĚR.....	58
7	LITERATURA	59
7.1	Publikace	59
7.2	Normy.....	61

1 ÚVOD

Beton je stavební materiál s dlouhou tradicí ve stavebnictví, jde o kompozit sestávající z tří základních fází: plnivo, pojivo, voda. Plnivem se rozumí kamenivo (písek, šterk, drť) složené nejlépe z různých frakcí. Pojivo (cement) a voda tvoří takzvanou cementovou pastu. Tento základ tvořící matrici bývá v dnešní době hojně doplňován o další přísady a příměsi, které mají vliv na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. V první části této práce je představeno základní spektrum příměsí a způsob, kterým ovlivňují reologii čerstvého betonu. Dále to, jak kamenivo a jeho maximální zrno působí na zpracovatelnost směsi, která je dále ovlivněna vzájemným poměrem všech složek, vodu a cement nevyjímaje. Zpracovatelnost má přímý vliv na technologickou část ukládání a zhutňování směsi. Požadavky na vlastnosti betonu určí projektant, v betonárce ho namíchají a přivezou na stavbu, kde přichází na řadu ještě technologický proces a tím je správné uložení čerstvého betonu do formy a následné ošetřování. Se správným uložení do formy (bednění) je spjato vypuzení nežádoucího vzduchu, který se do čerstvého betonu dostal při procesu míchání a ukládání. Tento proces se nazývá hutnění betonové směsi. V teoretické části této práce je představeno spektrum hutnicí techniky. V praktické části je uveden experiment, ve kterém byli zkoumány vlastnosti ztvrdlého betonu s ohledem na to, jak byl beton v ranné fázi hutněn.

2 VLASTNOSTI BETONU A JEHO SLOŽEK

Tato kapitola je věnována popisům vlastností a vztahů, které ovlivňují způsoby hutnění čerstvého betonu. Převážně dobu trvání hutnění v závislosti na zpracovatelnosti. Je zde uveden pohled na maximální zrno kameniva, různé typy příměsí a vodní součinitel.

2.1 Kamenivo

Kamenivo se přidává do betonu proto, aby se snížilo množství cementu a tím dojde i ke snížení ceny betonu, protože kamenivo bývá levnější nežli cement. Kamenivo zabírá zhruba 70 až 80 % objemu betonu, a kromě snížení ceny má velký vliv i na trvanlivost, objemovou stálost a pevnost. Právě kvůli trvanlivosti a zpracovatelnosti je důležité, aby kamenivo neobsahovalo reaktivní látky, které by při reakci s cementovým tmelem vyvolávaly napětí uvnitř betonu a tím snižovaly jeho pevnost a zvyšovaly množství trhlin. [1] [3]

2.1.1 Dělení kameniva

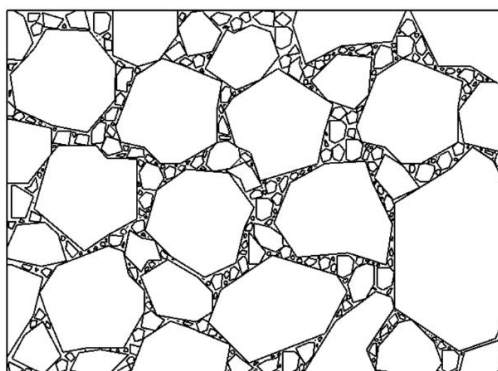
- Dle původu na:
 - Přírodní
 - Umělé
- Dle vzniku na:
 - Těžené (štěrk)
 - Drcené (drt')
- Dle velikosti zrna na:
 - Hrubé kamenivo – velikost zrn 4 až 125 mm
 - Drobné kamenivo – velikost zrn 0,25 až 4 mm
 - Jemné kamenivo – velikost zrn do 0,25 mm

Dále můžeme kamenivo dělit dle chemického složení, objemové hmotnosti, pórovitosti aj. [3]

2.1.2 Zrnitost

„Zrnitost kameniva vyjadřuje skladbu různě velkých zrn a různého tvaru. Cílem je dosažení skladby s minimálním objemem dutin-mezer. Velikost zrn a jejich podílové zastoupení v množině se stanovuje síťovým rozbořem. Množina zrn zachycená na síti se nazývá frakcí. Množina zrn mezi síty, která mají poměr velikosti otvorů 1:2, se nazývá úzká, pokud je poměr vyšší, hovoříme o frakci široké.“ [3]

Aby byla dosažena co možná největší hutnost kostry betonu, tedy nejmenší objem mezer mezi zrny kameniva a zrny cementu, musí mezery mezi větší frakcí kameniva vyplnit drobnější kamenivo. Mezery mezi drobným kamenivem jsou vyplněny pískem (jemným kamenivem) a nejmenší mezery vyplňují zrna cementu. [1]



Obr. 1: Ukázka vyplnění mezer menšími frakcemi

Vlastnost popisující množství mezer ve vzorku se nazývá mezerovitost a stanovuje se podle vztahu (1):

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \cdot 100 = [\%] \quad (1)$$

v = mezerovitost [%]

ρ_p = sypná hmotnost kameniva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ρ_b = objemová hmotnost kameniva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Mezerovitost drobného kameniva v setřeseném stavu je zhruba 16 až 24 %. [3] Čím hutnější a kompaktnější bude kostra zrnitých částic, tím hůře se bude pohybovat po smísení s vodou a povede k horší zhutnitelnosti a nižší zpracovatelnosti. Ideální zrnitost je pospána Füller-Thomasovou rovnicí (2).

$$P = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} = [\%] \quad (2)$$

P = propad sítem [%] o velikosti otvoru d [mm]

D_{max} = velikost maximálního zrna kameniva [mm]. Tedy taková velikost otvoru síta, kterým propadne všechno kamenivo, nebo na něm zůstane zbytek maximálně 5 %.

Pokud budeme chtít korigovat zpracovatelnost cestou vhodně navoleného složení frakcí, využijeme tentýž vztah upravený o Bolomeyův koeficient A , který náleží intervalu 8 až 14, podle požadované konzistence a druhu kameniva. [1]

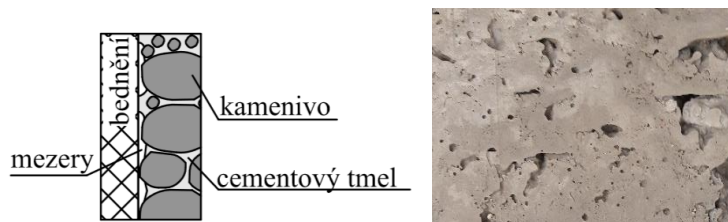
$$P = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} = [\%] \quad (3)$$

Tab. 1: Bolomeyův koeficient A pro různé třídy zpracovatelnosti [1]

Kamenivo	Součinitel A [-] pro beton s konzistencí		
	Tuhou (S1)	Plastickou (S2-S3)	Tekutou (S4-S5)
Těžené	8	10	12
Drcené	10	12	14

Protože v praxi je dodržování přesných matematických vztahů někdy obtížné, vhodná zrnitost se definuje také tzv. podsítnými a nadsítnými propady (nejčastěji formou tabulek), kde se k jednotlivým frakcím udává kolik procent kameniva propadlo sítem daného otvoru a kolik procent je nad tímto sítem. Zrnitost se vyjadřuje pomocí jednoduchého 2D grafu (křivka zrnitosti), kde na svislé ose je propad sítem v procentech hmotnosti a na vodorovné ose je velikost oka síta v milimetrech.

Pokud budeme hutnit beton v bednění, bude docházet k pohybu betonové směsi, tento pohyb však nemůže být všesměrný, neboť betonu brání stěny bednění (popř. betonářská výztuž). Na vnitřním povrchu bednění budou vznikat prostory nevyplněné betonovou směsí, takovýto jev se nazývá stěnový účinek bednění. Velikost a objem mezer při povrchu bednění je závislý na maximálním zrnu kameniva (D_{max}) a poměru povrchu bednění k objemu bedněného prostoru. Do povrchu bednění je započtena i nebedněná, většinou horní vodorovná, plocha. [5]



Obr. 2: Mezery podél stěny bednění

Stěnový účinek bednění lze popsat středním poloměrem bednění, se zmenšováním středního poloměru bednění se mezerovitost při povrchu zvětšuje: [5]

$$R = \frac{V}{P} = [m] \quad (4)$$

R = střední poloměr bednění [m]

V = objem bedněného prostoru [m³]

P = povrch bednění (započítává se i nebedněná horní plocha) [m²]

Hodnota poměru maximální velikosti zrna kameniva a poloměru bednění se doporučuje 0,8 až 1. [5]

$$0,8R < D_{max} < R \quad (5)$$

2.1.3 Měrný povrch

Měrný povrch kameniva je zásadní vlastností pro určení množství vody, které smáčí povrch kameniva, a také pro množství cementového tmele potřebné k obalení kameniva. Udává se v [m²/kg]. [3] Čím je kamenivo drobnější, tím větší má měrný povrch. Pokud idealizujeme situaci na zrno tvaru koule, tak s každým snížením poloměru zrna kameniva o jeden řád se jeho měrný povrch zvětší o jeden řád při zachování stejného objemu, neboť povrch koule je závislý na druhé mocnině jejího poloměru a objem koule je závislý na třetí mocnině poloměru.

2.1.4 Vliv maximálního zrna na způsob hutnění

Maximální zrno kameniva D_{max} ovlivní konzistenci směsi, při konstantní dávce vody. To je způsobeno měrným povrchem, který se při zvětšování D_{max} zmenšuje, množství vody v betonu tak smáčí menší povrch kameniva a o to větší část záměsové vody se může podílet na ztekucení čerstvého betonu.

Lyse definoval množství záměsové vody závislé na D_{max} a stupni konzistence. Z jeho závěrů vyplývají dvě tvrzení. Zaprvé, pro určitou velikost D_{max} je pro dosažení řidší konzistence zapotřebí větší množství záměsové vody. A zadruhé, pro určitou třídu konzistence čerstvého betonu platí, že čím je D_{max} menší, tím větší množství vody je potřeba pro dosažení této konzistence. [1] Lyseho práci demonstrují data uvedená v tabulce 2.

Tab. 2: Vliv maximálního zrna kameniva na množství záměsové vody [1]

D_{max} [mm]	Dávka vody podle stupně konzistence [kg/m ³]				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Toto pravidlo je pouze orientační a do jisté míry závisí na jiných parametrech kameniva, především na křivce zrnitosti a původu kameniva (těžené, drcené). Pro těžené kamenivo s oblými zrny je zapotřebí hodnoty v tabulce o 10 kg snížit, pro drcené kamenivo s ostrohrannými zrny je zapotřebí hodnoty v tabulce naopak o 10 kg zvýšit. [1] Při plynulé křivce zrnitosti dochází k tzv. ložiskovému efektu, kdy jednotlivá menší zrna kameniva fungují jako kuličková ložiska a posouvají po sobě větší zrna kameniva.

Maximální zrno kameniva má také vliv na délku a kvalitu hutnění, pro dosažení optimálního povrchu betonového prvku přiléhajícího na stěnu bednění. Čím je D_{max} větší, tím je zapotřebí delší doby hutnění pro eliminaci mezer u stěny bednění (obr. 2).

2.2 Cement

Jak již bylo řečeno v úvodu, cement je jednou ze tří základních složek betonu. Portlandský cement vzniká výpalem přírodních surovin (jíl = zdroj křemíku, vápenec = zdroj vápníku) v pecích s teplotou 1450 °C, kdy dojde ke slinutí. Jedná se o jemně mletý anorganický prášek, který po smísení s vodou začíná reagovat (hydratovat). V čase nastává postupně tuhnutí a následně tvrdnutí zhydratovaného

cementu. Jak doba tuhnutí, tak tvrdnutí jsou stanovovány Vicatovým přístrojem a liší se pro jednotlivé druhy cementů. Aby bylo možné cementy snadno zařadit, značení cementů v sobě zahrnuje druh cementu (I-IV), složení cementu a pevnost cementu. Například *CEM II-A/S 42,5N*, kde *II* značí, že jde o směsný portlandský cement, v tomto cementu převažuje obsah slínku. Další složka je zastoupena 6 až 20 %, což značí písmeno *A*. Písmeno za lomítkem *S* značí další složku cementu, kterou je struska (z anglického slag). Číslo *42,5* je minimální předepsaná pevnost po 28 dnech. Písmeno *N* charakterizuje požadavek na tlakovou pevnost ve stáří 2 dnů, 7 dnů. [1]

Tab. 3: Minimální tlakové pevnosti, předepsány pro různé třídy cementu [1]

Třída pevnosti	Pevnost v tlaku [MPa]		
	2 dny	7 dní	28 dní
32,5N	-	16	32,5
32,5R	10	-	32,5
42,5N	10	-	42,5
42,5R	20	-	42,5
52,5N	20	-	52,5
52,5R	30	-	52,5

Tab. 4: Druhy cementů [3]

Druh cementu	Název cementu	Označení	Obsah složek v % hmotnosti		
			slínek	složka	doplňující složky
I.	portlandský	I	95-100	-	0-5
II.	portlandský směsný	II/A-X	80-94	6-20	0-5
		II/B-X	65-79	21-35	0-5
III.	vysokopeční	III A	33-64	36-65	0-5
		III B	20-34	66-80	0-5
		III C	5-19	81-95	0-5
IV.	pucolánový	IV A	65-89	11-35	0-5
		IV B	45-64	36-55	0-5
V.	směsný	V A	40-64	18-30	0-5
		V B	20-39	30-50	0-5

Označení složek X:

CEM II.: *S* = struska, *D* = křemičitý úlet (max. 10%), *P* = přírodní pucolán, *Q* = průmyslový pucolán, *V* = křemičitý popílek, *W* = vápenatý popílek, *T* = kalcinovaná břidlice, *L* = vápenec.

CEM IV.: složky tvoří křemičitý úlet *D*, přírodní průmyslový pucolán *P*, *Q* a křemičitý popílek *V*.

CEM V.: složka je tvořena z poloviny vysokopecní struskou *S* a z poloviny *P*, *Q*, *V*. Minimální množství cementu v betonu je definováno třídou agresivity prostředí, ve kterém se konstrukce vyskytuje (X0, XC, XD, XS, XF, XA). [3]

2.3 Příměsi

Příměsi jsou anorganické jemně zrnité látky, které se do betonu přimíchávají kvůli docílení jiných nebo lepších vlastností jak betonu ztvrdlého, tak čerstvého. Dalším důvodem je ekonomický aspekt, kdy snížení množství cementu, za využití substituční levnější příměsí, sníží cenu betonu. Tyto důvody v posledních dvaceti letech zapříčinili výrazné zvýšení příměsí v betonech napříč pevnostními třídami. [16] Termín *obsah příměsí* v betonu lze chápat dvojím způsobem. Buď se jedná o příměs, která byla semleta v cementárně společně se slínkem portlandského cementu, vzniklý směsný cement má procentuální *obsah příměsí* vztažen k hmotnosti směsného cementu jako celku, včetně příměsí. Nebo se termín *obsah příměsí* používá pro množství příměsí přimíchaných v betonárně k portlandskému cementu, zde je *obsah příměsí* vztažen pouze k hmotnosti portlandského cementu. [4]

Dle normy ČSN EN 206+A1. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Část 5. 1. 6: Příměsi (včetně filerů a anorganických pigmentů). [24] se příměsi do betou dělí na:

- Inertní příměsi (typ I) – mají takové chemické složení, že v betonu neinicují tuhnutí a tvrdnutí (nehydratují). Nejčastěji se jedná o jemně mleté kamenivo (filer) a barevné pigmenty. Zařazení mikromletého vápence záleží na jeho měrném povrchu, většinou se chová inertně, ale se zvyšující se jemností mletí vykazuje jisté pojivé vlastnosti. Inertní příměsi zlepšují hutnost, zpracovatelnost, přilnavost čerstvého betonu ke stávajícím podkladům a soudržnost čerstvé směsi. [3] [16]
- Aktivní příměsi (typ II) – díky svému chemickému složení, popřípadě jemnosti mletí, v betonu chemicky reagují a zvyšují pevnost cementové matrice. Dle obsahu chemických sloučenin se dělí na latentně hydraulické a pucolánové. Latentně hydraulické příměsi reagují v alkalickém prostředí, kterého je dosaženo pomocí tzv. budičů. Pucolánová vlastnost a latentní hydrauličita je v zásadě totéž. Jde o reakci určité látky s Ca(OH)_2 , která za normálních teplot a přítomnosti vody tuhne a tvrdne. Řadí se sem příměsi s větším obsahem

amorfního SiO₂ než 47 % (křemičité úlety, opál, diatomity a uměle vyráběné křemičité látky), vypálené hlíny, struska a popílky (které vykazují latentní hydraulicitu) a pravé přírodní pucolány sopečného původu. [11]

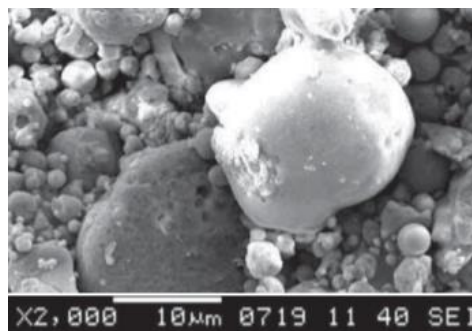
2.3.1 Elektrařenské popílky

Jsou produktem spalování převážně hnědého a černého, jemně mletého uhlí v elektrárnách, kde jsou pomocí mechanických a elektrických filtrů zachycovány ze zplodin. Zachycený popílek dosahuje potřebné jemnosti nebo se smílá. Disponují latentní hydraulicitou. Reakce popílku s Ca(OH)₂ probíhají v betonu dlouhodobě, v řádu let až dekád. Díky této schopnosti mohou částečně nahradit portlandský cement. Popílek není homogenní materiál, jeho částice jsou různorodé, liší se od sebe svými fyzikálními parametry a chemickým složením. Jejich heterogenita je dána chemickým složením paliva, teplotou spalování a geometrií pece. Ne vždy všechno palivo vyhoří, a tak popílky obsahují do jisté míry i malé procento nespáleného či částečně spáleného paliva. Proto je nezbytné neustále kontrolovat jejich kvalitu.

Tab. 5: Průměrné vlastnosti popílků z elektráren v ČR [17]

Chem. složka [%]	Lokalita elektrárny			
	Dětmarovice	Počerady	Mělník	Tušimice
SiO ₂	52,400	50,900	53,710	50,000
Al ₂ O ₃	24,200	30,200	30,940	23,400
CaO	4,000	1,810	2,080	3,420
Fe ₂ O	6,400	5,310	6,000	14,500
K ₂ O	2,800	1,590	1,670	1,065
MgO	2,800	1,080	1,280	1,720
MnO	0,100	0,041	0,020	0,092
Na ₂ O	0,300	0,205	0,280	0,291
P ₂ O ₂	0,400	0,134	0,240	0,164
SO ₃	0,000	0,080	0,270	0,723
TiO ₂	1,000	1,750	1,950	1,526
měrný povrch podle Blaina [m ² /kg]	396	297	242	247

Střední velikost zrn popílků se pohybuje od 10 do 30 μm, sytná hmotnost obvykle 800 až 1 200 kg/m³, objemová hmotnost 2 000 až 2 500 kg/m³ a měrný povrch od 200 do 400 m²/kg.



Obr. 3: Struktura popílku [16]

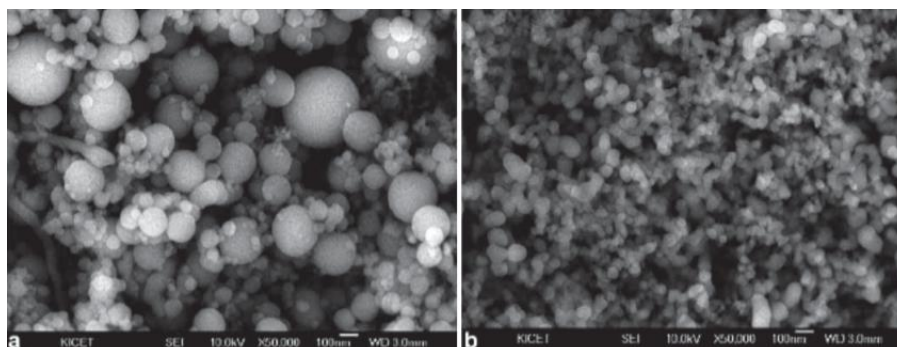
Jejich přínos spočívá hlavně ve zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu, snadnější čerpatelnosti, snížení vývinu hydratačního tepla, především u masivních konstrukcí (přehrad, základové desky) a větší odolnosti betonu proti působení agresivních činidel. Přidáním popílku do čerstvého betonu se rovněž zvyšuje jeho odolnost proti krvácení při nadměrnému účinku hutnění. Obecně se zlepšuje hutnost cementové matrice a její reologické vlastnosti. [18]

Bylo dokázáno, že u maltových směsí s obsahem popílku má tvar jeho částic vliv na zpracovatelnost a tekutost směsi. Čím více se střední částice popílku podobají tvaru koule s nízkou pórovitostí, tím horší tekutost vykazuje cementová pasta obsahující tento popílek. [17]

2.3.2 Křemičité úlety (mikrosilika)

Vznikají jako odpadní produkt při výrobě předslitiny (FeSi) v hutnických procesech, která se dále používá k výrobě oceli a litiny. Je to anorganická jemně zrnitá látka. Zrna mají téměř dokonalý tvar koule šedé barvy. Křemičité úlety obsahují okolo 85 až 98 % amorfního SiO_2 , díky kterému dobře reagují s Ca(OH)_2 . Pucolánovou reakcí dochází ke snížení hladiny pH v betonu, z toho důvodu je maximální množství křemičitých úletů v betonu omezoáno hodnotou 11 % k hmotnosti použitého cementu. Toto omezení zaručuje dostatečné pH betonu (min. 11,5) kvůli pasivaci ocelové výztuže. [16] Díky jejich jemnosti ideálně vyplňují mezery mezi zrny cementu, cementový tmel je pak kompaktnější a hutnější.

Měrný povrch je obvykle 15 000 až 25 000 m^2/kg a měrná hmotnost okolo 2 100 kg/m^3 . Velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,3 μm . Objemová hmotnost je závislá na skupenství, ve kterém se dodávají, jemný prášek (OH = 130 až 430 kg/m^3), suspenze (OH = 1 300 až 1 400 kg/m^3). [16]



Obr. 4: Srovnání velikosti křemičitých úletů (vlevo) a nano-SiO₂ (vpravo) [16]

Kvůli jejich jemnosti dochází k omezení segregace kameniva při působení hutnicích prostředků na čerstvý beton. Aby byla zachována stejná zpracovatelnost směsi, je potřeba do směsi přidat na každý kilogram úletů zhruba 1 litr vody navíc. [3] Kvůli tomuto faktu se započítávají do obsahu jemných podílů při stanovení vodního součinitele. Dále zvyšují homogenitu směsi a její pohyblivost. Napomáhají k lepší mrazuvzdornosti betonu a pevnosti tranzitní zóny (styk kameniva a cementové matrice). Díky těmto vlastnostem se v dnešní době využívají při výrobě samozhutnitelných betonů. [16] Využívají se i u vysokohodnotných (vysokopevnostních) betonů s nízkým vodním součinitelem, kde vyplňují mezery mezi zrny cementu, pokud jsou rovnoměrně rozptýleny pomocí superplastifikátoru. Betony s obsahem křemičitých úletů jsou tekutější, to je zejména důležité při procesech hutnění, které nejsou optimalizovány (např. špatná technologická kázeň při vibrování). Tekutost směsi (konzistence) má přímý vliv na obsah pórů v makrostruktuře při konstantní době hutnění. [1] Tento účinek křemičitých úletů zvýšení tekutosti lze též přirovnat k působení kolečkových ložisek. [4]

2.3.3 Nanosilika

Nanosilika je syntetická kyselina křemičitá s podílem SiO₂ téměř 100 %, řadí se mezi pucolány. Má větší měrný povrch než mikrosilika a díky tomu velmi dobře reaguje v betonu. Dodává se ve dvou skupenstvích, suchá ve formě sbalků, nebo jako suspenze. U suché nanosiliky je problém s jejím rovnoměrným rozptýlením ve směsi, může tak dojít k omezení hydratačních schopností. V C-S-H gelu napomáhá k vytvoření větších řetězců, což pozitivně ovlivňuje pevnost betonu. Cementová matrice obsahující nanosiliku má větší viskozitu a kratší dobu tuhnutí. Pokud je ve směsi obsažen i popílek, nanosilika docílí jeho větší pucolánové aktivity. [16]

Měrný povrch nanosiliky je závislý jejím skupenství (v suchém stavu 40 000 m²/kg, suspenze až 80 000 m²/kg). Velikost částic je 0,007 až 0,004 μm, objemová hmotnost okolo 2 200 kg/m³. [16] [11]

2.3.4 Struska

Granulovaná vysokopeční struska je odpadním produktem při výrobě železa ve vysoké peci, vzniká rychlým ochlazením taveniny, která obsahuje popel z koksu a hlušinu železné rudy. Rychlým ochlazením taveniny se zabrání krystalizaci strusky, ta si udrží sklovitý charakter a jako taková disponuje latentně hydraulickými vlastnostmi. Kritériem pro použití strusky jako latentně hydraulické příměsi je její modul zásaditosti M_z . Pokud je $M_z > 1$, struska se uvažuje jako aktivní příměs. [16]

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = [-] > 1 \quad (6)$$

Všechny oxidy se do vzorce dosazují v procentuálním hmotnostním zastoupení, v desetinném tvaru. [16] Chemické složení strusky je proměnlivé a záleží na lokalitě výroby, složení paliva, železné rudy, způsobu výroby aj.

Tab. 6: Chemické složení strusky [18]

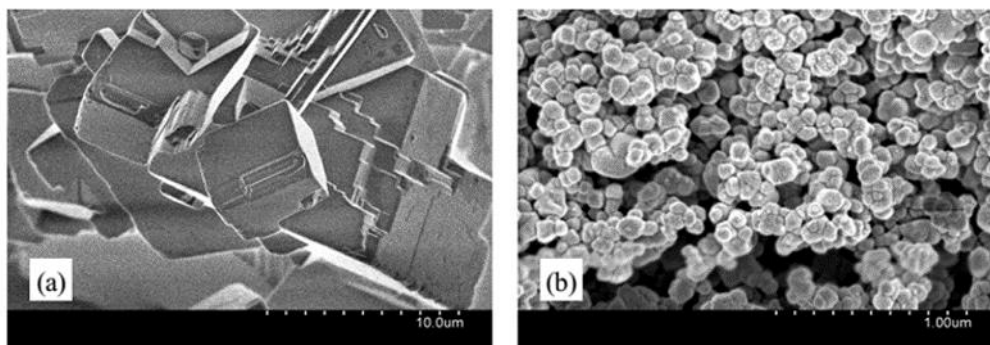
Chem. složka	Obsah [%]
CaO	30 - 50
SiO ₂	30 - 43
Al ₂ O ₃	5 - 18
MgO	1 - 15
FeO + Fe ₂ O ₃	0,2 - 3
S ²⁻	0,5 - 3
MnO	0,2 - 2

Měrný povrch strusky je obvykle 350 až 450 m²/kg a stejně jako velikost částic závisí na jemnosti mletí granutátu. [16]

2.3.5 Mikromletý vápenec

Vzniká mletím drceného vápence, jedná se o minerální mikromleté plnivo na bázi uhličitanu vápenatého (CaCO₃). Řadí se mezi inertní příměsi, avšak do jisté míry dokáže přispívat k pevnosti cementové matrice, zrychluje hydratační proces

aluminátových a silikátových fází a podporuje tvorbu krystalových zárodků portlanditu. S rostoucím podílem mikromletého vápence, jako náhrady cementu, se hydratační proces v rané fázi urychluje, ale z dlouhodobého hlediska je pak hydratace cementu pomalejší. [16] [19]



Obr. 5: Struktura CaCO_3 , a) zvětšeno 5 000x, b) zvětšeno 50 000x [20]

Mikromletý vápenec se tedy využívá jako inertní plnivo, jehož přínos spočívá především ve vytvoření hutnější struktury cementové matrice. Zásadní je jeho granulometrie (obecně se vyžaduje propad sítem s oky $0,063 \text{ mm} > 70 \%$). Objemová hmotnost je obvykle od $2\,000$ do $2\,900 \text{ kg/m}^3$, velikost částic je závislá na jemnosti mletí. [16]

2.3.6 Zhodnocení příměsí na způsob hutnění

Příměsí, jejich vlastnosti jako zejména velikost částic, tvar zrn, chemické a mineralogické složení, mají velký vliv na reologii a způsob jejího přetvárného chování betonu při zhutňování. Zlepšují homogenitu tím, že společně s cementem a jemnou frakcí kameniva tvoří velmi kompaktní strukturu plastické konzistence. Tekutější směsi lépe vyplní objem formy bez použití hutnicí síly a dosahují znatelně lepších pohledových kvalit.

Mikročástečky, s růstem jejich jemnosti, napomáhají k omezení segregace při hutnění tím, že zpomalují sedimentaci dle Stockesova zákona (7).

$$V_s = \frac{[(d_s - d_w) \cdot r^2 \cdot g]}{\eta} = [m/s] \quad (7)$$

V_s = rychlost sedimentace [m/s]

d_s = hustota pevných částic [kg/m³]

d_w = hustota vody [kg/m³]

r = poloměr pevných částic [m]

η = dynamická viskozita vody [N·s·m⁻²]

g = gravitační zrychlení [m/s²]

Dále podle jejich charakteru mohou urychlovat hydrataci cementu, tím zkracují dobu, po kterou může pevná fáze směsi sedimentovat.

2.4 Voda

Voda je klíčovou složkou. Má v betonu dvě základní funkce, první funkce je reologická, reologii čerstvého betonu se rozumí především její viskozita, potažmo zpracovatelnost. V tomto případě platí jednoduchá rovnice a to taková, že čím více vody přidáme do čerstvého betonu, tím bude jeho zpracovatelnost lepší. Ovšem toto pravidlo platí pouze do doby začátku krvácení. Vyrůstající množství vody však nepříznivě ovlivní například pevnost a trvanlivost, pokud k tomu úměrně nebudeme zvyšovat i množství cementu. Druhou funkcí vody je umožnit hydrataci cementu.

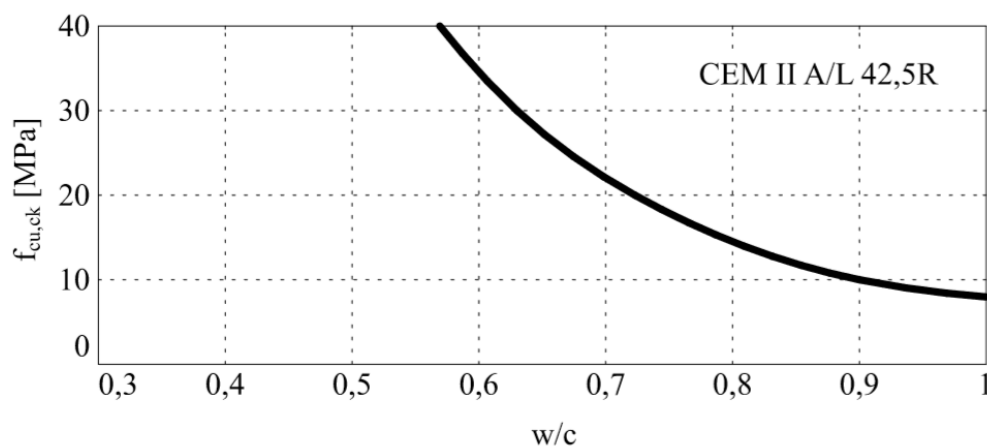
2.4.1 Vodní součinitel

Vodní součinitel je poměr mezi hmotností záměsové vody a hmotností silikátové fáze. S rostoucím vodním součinitelem roste zpracovatelnost směsi, ale klesá pevnost betonu. Stejným faktorem ovlivňujícím pórovitost ztvrdlé cementové pasty je poměr mezi množstvím vody, množstvím silikátové fáze (která může hydratovat) a množstvím vzduchu, který byl zachycen během míchání. [4] Féretův vztah to popisuje takto. [4]

$$f_c = k \cdot \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2 \quad (8)$$

Kde f_c je tlaková pevnost zhydratované cementové pasty, c je objem vody, w je objem portlandského cementu, a je objem vzduchu a k je konstanta závislá na druhu použitého cementu. [4]

Následující graf (obr. 6) ukazuje, jak podle D. A. Abramse klesá tlaková pevnost betonu při stáří vzorků 28 dnů a teplotě zrání 20 °C.



Obr. 6: tlaková pevnost betonu v závislosti na vodním součiniteli [1]

Pozn.: graf na obr. 6 je platný pouze pro dokonale zhutněný beton.

2.4.2 Zhodnocení vodního součinitele na způsob hutnění

Dle výše zmíněných faktů (tab. 2 a grafu na obr. 6) lze stanovit dávku vody tak, aby byly splněny požadavky na zpracovatelnost a pevnost zároveň. Předpokládejme požadavek na zpracovatelnost třídy S3, použité kamenivo je šterk (oblá zrna, $D_{max} = 25$ mm). Tab. 2 uvádí dávku vody pro tento případ 200 kg/m^3 . Dále předpokládáme, že požadovaná krychelná charakteristická pevnost $f_{cu,ck}$, která je vyžadována je např. 30 MPa. Graf na obr. 6 pro tuto pevnost udává vodní součinitel $w/c = 0,63$. Takže dávku cementu (CEM II A/L 42,5R) vypočteme z tohoto vztahu:

$$c = \frac{w}{0,63} = \frac{200}{0,63} = 318 \text{ kg/m}^3. [1]$$

Pokud by byl požadavek na konzistenci jiný, např. z důvodu technologie hutnění, podle uvedeného vztahu by šlo směs upravit na požadovanou konzistenci při zachování stejné pevnosti.

3 HUTNĚNÍ BETONOVÉ SMĚSI

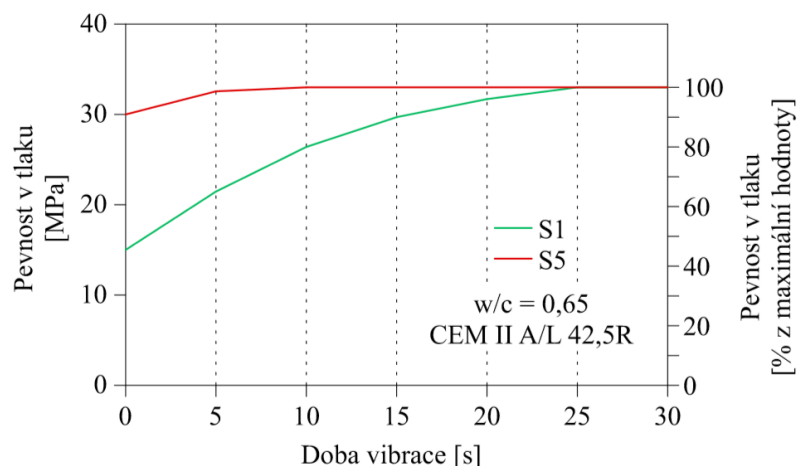
3.1 Proč je důležité hutnit

Hutnost betonu je nepřímo úměrná množství vzduchu obsaženému ve směsi a tím, že beton hutníme dochází k vytlačování vzduchu ze směsi na povrch. Množství a objem pórů v betonu ovlivní jeho pevnost, trvanlivost, modul pružnosti aj. [7] [2]

Při zhutňování dochází k vnesení sil do čerstvého betonu pomocí hutnicí techniky. Síly narušují rovnovážný stav mezi silami uvnitř směsi a silami působícími zvenčí. Mezi vnitřní síly patří kapilární síly, povrchová napětí, třecí síly mezi tuhými částicemi a fyzikálně-chemické vlivy. Vnější síly jsou všechna externě působící zatížení a gravitace. [3] Pro dobře zpracovatelný beton je potřeba zpravidla menší účinek zhutňování, aby beton dosáhl požadovaných kvalit oproti těmto betonům s horší zpracovatelností (pozn.: lepší zpracovatelnost byla u jednoho ze dvou totožných betonů dosažena přidáním plastifikátoru). [1]

Zpracovatelnost volí projektant podle rozměrů a druhu konstrukce, hustoty výztuže, technologické náročnosti provedení a podle možného způsobu hutnění. Hutnění se provádí nejčastěji vibrováním, což může někdy být poněkud neekonomické a hlučné s ohledem na charakter konstrukce. Například ve stavební společnosti PREFA PRAHA a.s. při výrobě betonových a železobetonových prefabrikovaných konstrukcí používají ze zhruba 90 % SCC betony (samozhutnitelný beton, z anglického self-compacting concrete) a pouze u 10 % případů dochází k vibrování. SCC betony mají nespornou výhodu v absenci procesu hutnění, jejich recepturu je však nutno obohatit o přísady, kvůli dobré zpracovatelnosti. [8] Přísady jsou finančně nejnákladnější složkou betonu, a tak je jejich užití při procesech na stavbách na pováženo.

Z následujícího grafu (obr. 7) je vidět, jak doba hutnění s požadavkem na určitou finální pevnost ovlivněna konzistencí. [1]



Obr. 7: Vliv doby vibrace na pevnost v tlaku betonů s třídou konzistence S1 a S5 [1]

Beton s horší zpracovatelností (S1) dosahuje 100 % své pevnosti až po 25 sekundách vibrace, zatímco beton s lepší zpracovatelností (S5) již po 5 sekundách vibrace. Bez vibrace má tekutý beton o zpracovatelnosti S5 pevnost 30 MPa, což je 86 % z finální pevnosti, zatímco beton o zpracovatelnosti S1 má pevnost pouhých 14 MPa, což je 40 % z jeho maximální hodnoty. [1] Pokud nemůže zaručit spolehlivé hutnění, je bezpečnější volit snáze zpracovatelnější betony.

3.1.1 Hutnost betonu

Objem vzduchu v čerstvém, dobře zhutněném, betonu je zpravidla okolo 1 až 3 %. S každým objemovým procentem vzduchu (1 % = 10 litrů/m³) klesá pevnost betonu v tlaku zhruba o 6 %. [3] Hutnost betonu lze stanovit podle vzorce: [3]

$$H_B = \frac{A}{B} [-] < 1 \quad (9)$$

$$A = \frac{m_C}{\rho_C} \cdot (1 + 0,38\alpha_H) + \frac{m_K}{\rho_K} = [-] \quad (10)$$

$$B = \frac{m_C}{\rho_C} \cdot (1 + 0,38\alpha_H) + \frac{m_K}{\rho_K} + \frac{m_V - 0,38\alpha_H \cdot m_C}{\rho_V} + \frac{V_Z}{100} = [-] \quad (11)$$

H_B = hutnost betonu [-]

m_C, m_K, m_V = hmotnost cementu, kameniva a vody v kg na 1 m³ betonu

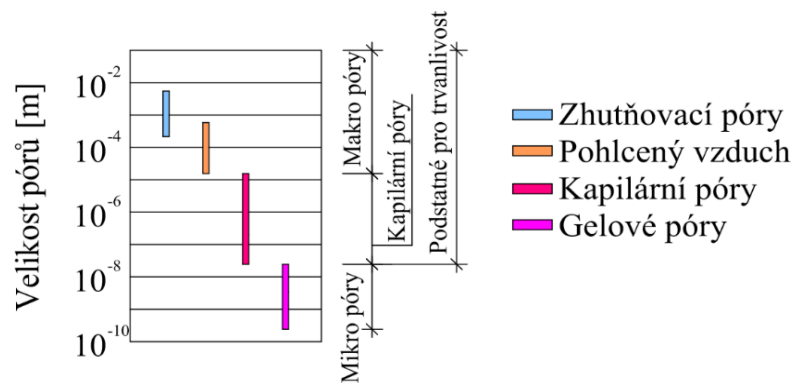
ρ_C, ρ_K, ρ_V = objemová hmotnost cementu, kameniva a vody [kg.m⁻³]

α_H = stupeň hydratace cementu, časově závislý ($\alpha_H < 1$)

V_Z = obsah vzduchu v čerstvém betonu v % objemu 1 m³ betonu

Betony dělíme podle hutnosti: [6]

- Hutný – obsah vzduchových pórů ve struktuře betonu je po dokončení hutnicího procesu nejvýše 5 % z objemu betonu. Póry nejsou navzájem propojeny a jejich velikost se různí. Jejich celkový objem ve struktuře ukazuje na kvalitu zpracování a hutnění, čím je menší, tím byl beton lépe zpracován. V čerstvých betonech s horší zpracovatelností a nedokonalým hutněním mají tyto větší (zhuňovací, technologické) póry většinou podobu kaveren. Snahou je těchto pórů se zbavit. [6]
- Provzdušněný – do tohoto betonu jsou přidávány chemické přísady (provzdušňovače), které v čerstvém betonu vytvoří velké množství mikroskopických kulových pórů o velikosti 100 až 300 μm . [1] Póry této velikosti příznivě vylepšují mrazuvzdornost betonu, jelikož zabraňují rozpínání kapiček vody při zmrazovacích cyklech. Dále zmírňují působení rozmrazovacích solí na betonovou konstrukci tím, že zmenšují síly vznikající působením posypových solí. [9] Objem pórů se běžně pohybuje v rozmezí 5 až 10 % objemu betonu. Takto provzdušněný beton má i lepší zpracovatelnost. [6]
- Pórovitý – objem pórů se pohybuje přes 10 % objemu betonu. [6] Póry jsou vytvořeny plynotvornou látkou (obvykle hliníkový prášek v poměru 0,25 až 0,5 kg/m^3), po přidání prášku začne v čerstvém betonu chemickou reakcí vznikat vodík v plynném stavu, který vyvolá nakypření. Z tohoto betonu je možno vyrábět prefabrikáty, které musejí projít procesem autoklávování, popř. musejí dozrát na skládkách. Tento beton se s objemovou hmotností pohybuje mezi 300 až 1 200 kg/m^3 a se vzrůstající objemovou hmotností logicky vzrůstá i pevnost a součinitel tepelné vodivosti. [10]
- Mezerovitý – oproti pórovitému a provzdušněnému betonu má mezerovitý beton navzájem propojené póry v podobě mezer. Pro výrobu se používá převážně hrubá frakce kameniva bez doplnění jemnější frakcí. Hrubé kamenivo se obalí malou vrstvou cementové pasty a při hutnění se kamenivo navzájem spojí za vytvoření spojitých mezer. Mezerovitý betonem je propustný pro kapaliny. [6] Jeho pevnost je nelineárně závislá na pórovitosti a mezerovitosti použitého kameniva. Při objemové hmotnosti betonu 900 až 1 400 kg/m^3 dosahuje pevností běžně okolo 1 až 10 MPa. [3]



Obr. 8: Velikosti pórů ve struktuře betonu [7]

3.2 Druhy hutnění

- Vnější síly – vykonávají na čerstvém betonu deformační práci, tím z něj vypuzují vzduch a dochází tak ke zmenšování objemu. Tyto vnější síly působí na jednotlivé částice, kterým udílejí odlišnou hybnost tím, že jim předávají kinetickou energii a zároveň působí na celý objem betonu. Napomáhají snížit viskozitu a vnitřní tření čerstvého betonu, následkem čehož se pak chová jako kapalina. Ke zhutňování pomocí vnějších sil je zapotřebí gravitačního působení. [3]
- Vnitřní síly – mezi částicemi kapalně složky navzájem působí přitažlivé kohezní síly, které jsou zapříčiněny elektrostatickým přitahováním a odpuzováním částic a drží beton pohromadě. Tyto síly působí v bezprostřední blízkosti částic a se vzdáleností prudce klesají. Snížení působení těchto sil lze docílit např. dynamickými kmity (vibrováním) a při současném působení gravitace dochází k usazování částic a vypuzování vzduchových pórů. [3]

Tab. 7: Rozdělení zhutňovacích způsobů [3]

Zhutňovací způsob	Konzistence	Použití
impuls	dusání	mech. C0, ručně C2
	odstředování	C1
	střásání	C1, V1
síla	lisování	C1, V1
	válcování	C2
	extrudování	C1, V1
dynamické kmity	vibrování	C0 až C2, V1 až V3
fyz-chem.	plastifikace	S4, F4
	vakuování	S1, S2
kombinace	vibrolisování	V0, C0
		základy, monolitické kce.
		trouby, stožáry
		velmi vyztužené dílce
		prefabrikáty
		vozovky
		výrobky z prostého betonu
		univerzální použití
		univerzální snížení w
		zvláštní případy
		prefabrikáty

3.2.1 Dusání

Dusání, nebo také pěchování, je realizováno pomocí impulsivních stejnosměrných nárazů mířených na povrch betonu. Dochází ke vzájemnému posunu hrubších zrn kameniva, zrna se k sobě přitlačují a mezi ně se vtlačuje cementová malta, zbylá cementová malta vystupuje na povrch. [2] Může být prováděno jak ručně, tak i mechanicky pomocí pěchů. Tento způsob hutnění je vhodný pro betony tužší konzistence, u řidší konzistence by docházelo k odstříkování a přelévání. Pěchy vyvozují silné rázy, které se šíří skrze beton do bednění, kde hrozí porušení bednicích desek, nebo změna geometrie bedněné části. Z tohoto důvodu je dusání vhodné pro konstrukce, u kterých se bednění nepoužívá (např. základové pasy a patky). Dusají-li se prvky vyztužené betonářskou výztuží, je nepřipustný kontakt pěchu s pruty. Krytí výztuže by mělo být nejméně 50 mm. [3]

Ruční dusání je prováděno závažím o hmotnosti zhruba 8 až 18 kg s výškou zdvihu 200 až 300 mm a frekvencí okolo 60 úderů za minutu. Dusaná výška by neměla přesáhnout 100 mm, a velikost maximálního zrna kameniva 32 mm. [3] Spuštěné závaží mění polohovou energii na kinetickou a s nárazem dochází k předání síly do betonu. Je-li závaží o hmotnosti m puštěno z výšky h s počáteční rychlostí $v_0 = 0$ m/s, při tíhovém zrychlení $g = 9,81$ m/s², pak rychlost takového tělesa při dopadu v se stanoví podle vzorce.

$$v = \sqrt{2g \cdot h} = [m/s] \quad (12)$$

Kinetická energie přecházející do betonu je pak rovna

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = [J] \quad (13)$$

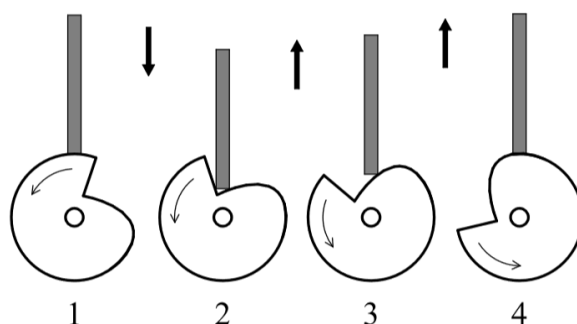
3.2.2 Propichování

Propichováním se beton zatlačuje do míst, která jsou v nižší části betonované vrstvy, nebo míst s horší přístupností. Tento způsob je vhodný pro řídké až tekuté konzistence. Využívá se např. při normové zkoušce pro stanovení konzistence čerstvého betonu, sednutí kužele. K propichování se používají tyče o průměru 15 až 25 mm, na konci tupé (ostré jsou nevhodné). Konstrukce hutněné tímto způsobem vykazují velké množství lokálních defektů a nedokonalostí, proto se uplatňuje především u prvků,

keré nevyžadují precizní zhutnění. [3] Problém s propichováním spočívá především v tom, že po každém vpichu a vytáhnutí tyče z čerstvého betonu v něm zůstane válcová dutina o rozměrech tyče. Tato dutina je pak, ne vždy zcela dokonale, zaplněna betonem.

3.2.3 Střásání

Je používáno nejspíš jen u hustě vyztužených dílců v některých prefáech, pro betony s tuhou konzistencí. Probíhá tak, že pomocí vačky (mechanismus pro převod pohybu z otáčivého na posuvný) je zdvihána forma s čerstvým betonem do výšky 10 až 25 mm a následně padá na podstavec volným pádem, při nárazu dochází k hutnění tzv. šokovou metodou. Frekvence je 4 až 7 pádů za sekundu. Dopadající forma je vystavena velkému namáhání a vyvozuje značný hluk, někdy i nad 100 dB. Pro eliminaci hluku i poškozování, formy dopadají na dřevěné špalíky z tvrdého dřeva. [3]



Obr. 9: Princip fungování vačky v jednotlivých fázích

3.2.4 Lisování

Lisování je hutnění pomocí síly působící kolmo k povrchu betonu. Dochází k posunu hrubého kameniva ve směru lisování a tím se zvyšuje vnitřní tření v čerstvém betonu. Následkem toho je růst sil k překonání vnitřního tření, disipativním procesům (tj. přeměna energie na jinou, např. mechanické na tepelnou) a sil k překonání vnějších odporů. Při zmenšování výšky se zmenšuje mezerovitost a zvětšuje se hutnost. Použití je vhodné pro betony tužších konzistencí. Vhodná je drobnější zrnitost kameniva ($D_{\max} \leq 8 \text{ mm}$) a obsah cementu 450 až 500 kg/m^3 betonu. Lisování se uplatňuje pro plošné prvky s malou výškou, kvůli rozdílnému průběhu tlaku po výšce při lisování. Železobetonové díly se mohou vyztužit jen jednou vrstvou sítě, a to řádně zakotvenou, aby po uvolnění tlaku nedošlo k pohybu výztuže. Tento způsob hutnění není vhodný

pro betony obsahující pórovité kamenivo malé pevnosti, neboť by při lisování došlo k jeho destrukci. [3]

- Nízkotlaké lisování – tlak nad 100 kPa, dnes se moc nevyužívá.
- Vysokotlaké lisování – tlak nad 5 MPa.

Závislost tlaku na objemu za předpokladu že, tepelná kapacita uvnitř uzavřené soustavy je konstantní je dána vztahem (14). [3] Při konstantním průřezu je objem nahrazen výškou.

$$p_L \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^n = \text{konstanta} \quad (14)$$

p_L = lisovací tlak [Pa], je poměre lisovací síly F k ploše S

$n = 1,3$ (polytropický exponent)

h_0 = původní výška sloupce čerstvého betonu [m]

h = stlačená výška sloupce čerstvého betonu [m]

Tlak v betonové směsi pod vlivem lisování je různý, největší hodnota je při povrchu (kontakt směsi s lisem/raznicí) a nejmenší je v dolní části formy. Jeho průběh po výšce průřezu je dán exponenciálním vztahem (15). [3]

$$\frac{p_1}{p_2} = \exp\left[\frac{-\alpha \cdot \mu \cdot (h_0 - h)}{O_F}\right] = [-] \quad (15)$$

p_1 = napětí vyvolané lisovací silou na dolní ploše směsi [Pa]

p_2 = napětí vyvolané lisovací silou na horní ploše směsi [Pa]

O_F = obvod lisovaného průřezu [m]

α = empirický součinitel závislý na charakteru (zrnitosti) čerstvého betonu [-]

μ = součinitel tření směsi o plochu formy [-]

3.2.5 Válcování

Válcovaný beton je v dnešní době nejčastěji používán na povrchy vozovek (II. a III. třídy), parkoviště a jiné povrchy pojižděných ploch. [12] Byl vyvinut mezi lety 1970 a 1980 v USA jako finančně adekvátní možnost pro vozovky odolávající velkému zatížení. [13] Vrstva z válcovaného betonu může tvořit jak podkladní vrstvu vozovky,

tak její kryt. Vozovky s betonovým krytem mají až dvojnásobnou životnost bez potřeby oprav oproti čistě asfaltovým vozovkám. Válcovaný beton je kladen pomocí asfaltových finišerů a poté hutněn pojížděním silničních válců. [12] Finišer by při pokládce měl dosáhnout zhruba 80% zhutnění betonu, zbylé hutnění je prováděno pomocí ocelových a pneumatických válců o hmotnosti okolo 4 až 10 tun. [14] Pevnost v tlaku se obvykle pohybuje v rozmezí 30 až 60 MPa. Bezprostředně po zhutnění má betonová vrstva vozovky dostatečnou únosnost pro pojíždění běžnými vozidly. Tato okamžitá únosnost je zapříčiněna samotným druhem hutnění, které působí na jednotlivá zrna kameniva a vyvozuje mezi nimi velké třecí síly. Důsledkem toho je, že různé frakce kameniva se do sebe navzájem zaklíní. [12]

Složení válcovaného betonu je obdobné jako složení běžného betonu (cement, voda a kamenivo), rozdílem je, že válcovaný beton obsahuje větší množství jemného kameniva. Jemná frakce napomáhá k vzniku uzavřené a kompaktní struktury betonu a dokonalejšímu hutnění. Použité kamenivo musí mít dostatečnou únosnost, aby při hutnění silničními válci nedošlo k jeho drcení. Válcovaný beton disponuje nižším obsahem cementového tmele a velmi nízkým vodním součinitelem, což vede k omezení smršťování. Tloušťka betonované vrstvy může být až 250 mm. [14]



Obr. 10: pokládka pomocí finišeru (vlevo), hutnění válcem (vpravo) [14]

3.2.6 Vibrování

Vibrování je v dnešní době vůbec nejrozšířenějším způsobem hutnění čerstvého betonu. Některé zdroje uvádějí, že se využívá u více než 90 % případů. [3] Už od roku 1900 bylo známo, že pokud je bednění poklepáváno (ručně) po uložení betonu, bude jeho výsledná kvalita lepší. Tento poznatek rozvinul snahu o urychlení a zefektivnění činnosti poklepávání a začala se vyvíjet pneumatiká strojní klepadla, která byla přikládána k povrchu bednění. Roku 1926 Francouz Deniau zkonstruoval první

vibrátor, který se při použití zanořoval. [2] V dnešní době jsou používány tři základní typy vibrátorů: příložné, ponorné a plovoucí.

Při vibrování málo pohyblivá směs získává větší pohyblivost díky působení kmitavých pohybů vibrátoru, dochází ke zvýšení gradientu rychlosti, což vyvolá snížení viskozity cementového tmele, které se nazývá thixotropie. [3] Viskozita cementového tmele je závislá na vodním součiniteli, teplotě, gradientu rychlosti deformace, koncentraci chemických přísad (plastifikátorů), měrném povrchu jemných částic, energii vnesené do systému při míchání a čase od doby smáčení hydraulických pojiv do doby měření. Zvýší-li se rychlost kmitání, zvýší se i gradient rychlosti D , zvýšením hodnoty gradientu rychlosti z hodnoty $0,5 \text{ s}^{-1}$ na hodnotu 63 s^{-1} se viskozita sníží o 92 %. Jedná se o nahodilou veličinu, která má při normálním rozdělení četnosti maximální hodnotu s pravděpodobností 40 %. S nižší viskozitou dochází při současném působení gravitačního pole k sedimentaci částic směsi a vypuzování vzduchu, tedy k hutnění. [3] Celkový účinek vibrování je závislý na vazkosti cementového tmelu, charakteru pevných částic (zejména tvaru, velikosti a vzájemném poměru), amplitudě a frekvenci budiče a v neposlední řadě i na lidském faktoru a technologické kázni.

Frekvence vibrátoru je počet jeho kmitů za jednotku času, udává se v hertzích (Hz). Kmity ve vibrátoru jsou důsledkem rotace excentrického závaží, takže frekvence je shodná s počtem rotací excentru za sekundu. Frekvence se u různých typů vibrátorů liší. Při určité (vlastní) frekvenci může dojít k rezonanci, která se objevuje u zhruba stejně velkých zrn. Frekvence má své omezení, aby se omezila energie vnesená do směsi, v případě velké vnitřní energie by mohlo dojít k roz míšení směsi, nebo k nasátí vzduchu do systému. [3]

$$f < \sqrt{\frac{5 \cdot 10^4}{d}} = [\text{Hz}] \quad (16)$$

d = průměr zrna kameniva [mm]

f = frekvence

Amplituda vibrátoru je jeho maximální výchylka od klidové polohy. Jedná se o polovinu rozkmitu. Je přímo úměrná hmotnosti excentru a jeho excentricitě. Působení vnějších odporů amplitudu snižuje, výrobci tedy amplitudu udávají pro stav,

kdy vibrátor není zanořený v čerstvé směsi. Čím je amplituda větší, tím lepšího hutnicího účinku přístroj dosáhne. [15] Neměla by být menší než 0,04 mm. Amplituda při vibrování udělí impuls zrnům kameniva, idealizujeme-li zrna na koule, dochází k tomu, že amplituda z budiče udělí zrychlení zrna A , to se pohybuje směsí, než narazí do zrna B , při nárazu mu předá část své pohybové energie a odrazí se zpět k budiči. Zrno B se pohybuje směsí a narazí do zrna C , předává mu část energie, uvádí ho do pohybu a odráží se zpět k zrnům A atd. Chaotický pohyb částic narušuje soudržnou strukturu čerstvého betonu. Tento princip bude fungovat jen tehdy, bude-li vzdálenost mezi zrny menší, než je velikost amplitudy. De facto i jiné veličiny mají svou amplitudu (např. rychlost, zrychlení), obvykle se výraz amplituda však používá pro polovinu rozkmitu. [3] Amplituda je také omezena. [3]

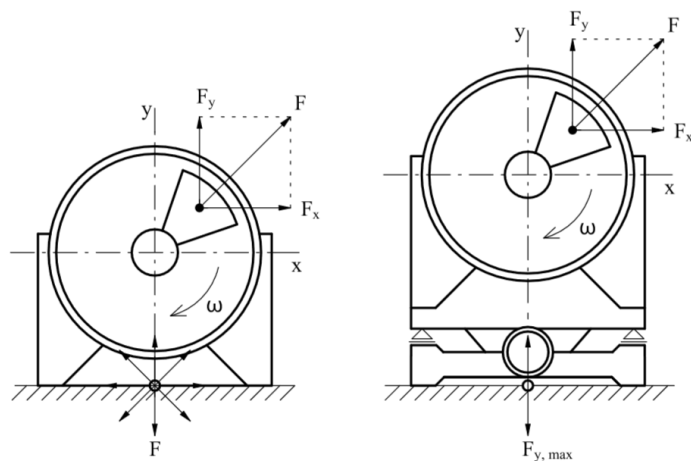
$$A \leq \frac{b}{(2\pi \cdot f)^2} = [m] \quad (17)$$

A = amplituda [m]

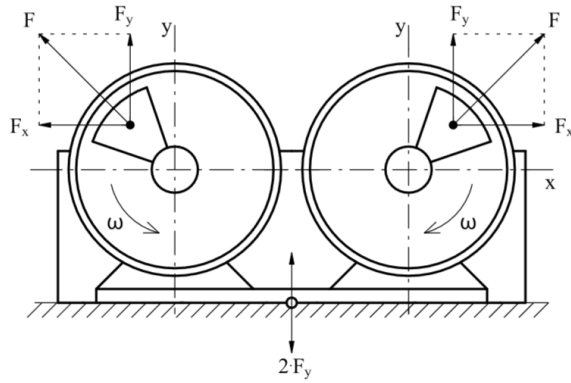
b = empirická konstanta, pro málo soudržné směsi $b = 500$, pro soudržné $b = 1\,000$

f = frekvence [Hz]

Fyzikální princip vibrace je v podstatě harmonické kmitání hmotného bodu okolo osy (rotování). Podle toho, zda je odebrán nějaký stupeň volnosti pohybu, dělíme přenos energie pomocí kmitů na usměrněný a neusměrněný. Kromě např. uchycení vibrátoru na tzv. kyvadlo lze usměrnit jeho silové působení za použití synchronního běhu totožného zařízení, ovšem s opačným směrem pohybu. [3]



Obr. 11: neusměrněné kmity (vlevo) usměrněné pomocí kyvadla (vpravo) [3]



Obr. 12: usměrněné kmity pomocí synchronního kmitání [3]

Vibrace je popsána následující diferenciální rovnicí (18), jedná se o buzený a tlumený kmitavý pohyb (druhá derivace výchylky částice na pravé straně rovnice = zrychlení). [3]

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = k \cdot \frac{dx}{dt} - c \cdot x + c \cdot A_B \cdot \sin(\omega_B \cdot t) \quad (18)$$

m = hmotnost vychylující se částice [kg]

x = výchylka částice o hmotnosti m [m]

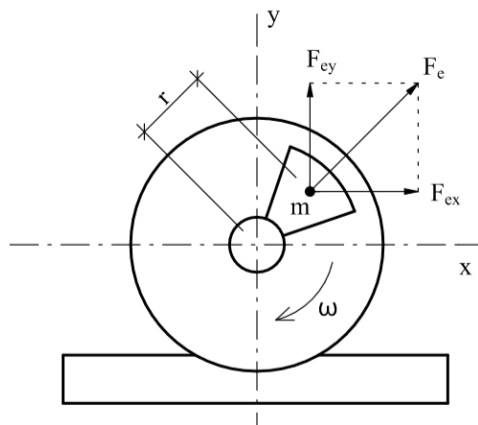
t = čas [s]

A_B = amplituda budiče [m]

ω_B = kruhová frekvence budiče [s^{-1}]

k = součinitel odporu tření [kg/s]

c = pružný odpor [kg/s^2]



Obr. 13: Princip fungování vibrátoru [3]

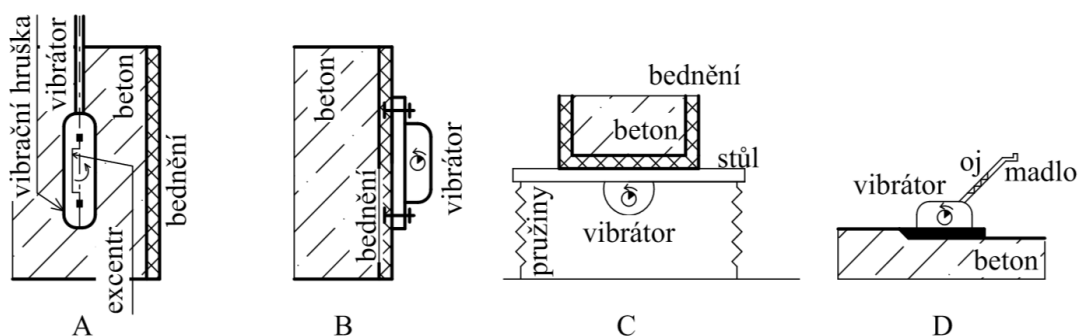
$$F_e = m \cdot r \cdot \omega_B = m \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = [N] \quad (19)$$

F_e = síla vyvozená excentrem [N]

m = hmotnost excentru

r = rameno excentru

f = frekvence



Obr. 14: Dělení vibrátorů [3]: A – ponorný; B – příložný; C – vibrační stůl; D – dusadlo (povrchový vibrátor)

- Ponorný vibrátor – vibrátor je přímo ve styku se směsí, doporučuje se používat pouze při zanoření (směs chladí vibrující excentr, nedochází k přehřívání). Dělí se podle tvaru a rozměrů vibrační hlavice (hrušky), dle typu pohonu (spalovací motory, elektromotor), na mechanické a pneumatické (hnané vzduchem), dle frekvence (různé typy obsahují tzv. měnič frekvence), dle výkonu (výkon ovlivní dosah působení vibrátoru).



Obr. 15: ponorný vibrátor (4 hlavy, 5 flexibilních hřídelí) [22]

Díky počtu hlav a hřídelí je např. tento typ možno využít až na 20 odlišných konfigurací.

-
- Příložný vibrátor – je umístěn na stěně bednění, energie vzniklá kmity se přenáší do betonu skrze bednění a na to tak působí silové rázy. V dnešní době využívají častěji pneumatické, mají rychlejší dobu náběhu a nehrozí tak, že by rozkmitaly stěny bednění, pokud by se dostaly v průběhu zrychlování excentru na vlastní frekvenci bednění.



Obr. 16: pneumatický příložný vibrátor [22]

- Vibrační stůl – stůl tvoří vibrující podložku pod bedněním, používá se pro betony měkčích konzistencí, důraz je kladen na utěsnění formy a její odolnost proti účinkům vibrace. Frekvence se pohybuje běžně okolo 50 až 150 Hz (u nízkofrekvenčních stolů). Zhutňovaná výška by neměla přesáhnout 300 mm. [3] Tento stroj se využívá převážně pro výrobu prefabrikovaných betonových prvků.



Obr. 17: vibrační stoly, nízkofrekvenční (vlevo); vysokofrekvenční (vpravo) [23]

Nízkofrekvenční stůl uvedený na obrázku má frekvenci 50 Hz, vysokofrekvenční má 190 Hz.

-
- Vibrační lišty – lišta se pohybuje na povrchu čerstvé směsi, účinná výška hutnění je dána parametry lišty. Používá se nejčastěji u betonových podlah a plošných konstrukcí.



Obr. 18: Vibrační lišta (posun po betonu) [22]



Obr. 19: Vibrační lišta (posun po kolejnicích) [22]

4 POPIS EXPERIMENTU

4.1 Cíle experimentu

Cílem experimentu bylo stanovit, jak doba hutnění čerstvých betonů ovlivní jejich vlastnosti po vyzrání. Vztah objemové hmotnosti vzorků v závislosti na době vibrace a vztah objemové hmotnosti k pevnosti v tlaku. Dále bylo potřeba stanovit od jaké doby vibrace se vzorky stávají nehomogenní v důsledku sedimentace kameniva. Posledním cílem experimentu je zjištění, jak se v závislosti na době vibrace mění hodnoty dynamického modulu pružnosti po výšce vzorku. Na základě těchto hodnot byla stanovena ideální doba hutnění pro dané směsi.

4.2 Testované směsi

Pro potřeby experimentu byly použity tři různé směsi s odlišnou velikostí maximálního zrna kameniva. Všechny směsi měli stejnou třídu konzistence, avšak jedna z testovaných směsí (A3) měla výrazně vyšší vodní součinitel než zbylé.

Tab. 8: Složení testovaných směsí v poměru na 1 m³

Ozn.	Kamenivo [kg]			Cement [kg]	Voda [kg]	Plastifikátor [kg]	Zpomalovač [kg]
	8/16	4/8	0/4				
A1	700	190	855	390	167	3	0,39
A2	0	820	920	395	172	4,3	0,395
A3	0	0	1780	460	270	7,2	0,4

- Kamenivo: drcený křemen, různé frakce
- Cement: portlandský CEM I 42,5 R (Českomoravský cement)
- Voda: pitná
- Plastifikátor: S 2180
- Zpomalovač: Retardal 500

Tab. 9: Parametry testovaných směsí

Ozn.	Konzistence [-]	D _{max} [mm]	w/c [-]
A1	S3	16	0,428
A2	S3	8	0,435
A3	S3	4	0,587

4.3 Postup při provedení experimentu

V laboratoři byly postupně připraveny jednotlivé receptury, a to vždy v časovém odstupu 7 dní. Postup přípravy a zkoušek jednotlivých směsí probíhal u všech tří směsí stejně.

4.3.1 Plán experimentu

- Den 1. – vytvoření směsi dle dané receptury v akreditované laboratoři ČVUT FSv. Směs byla rozmíchána a poté testována na třídu konzistence, pokud beton nespĺňoval parametry sednutí pro třídu konzistence S3, došlo k úpravě receptury a novému testu sednutí kužele. Po dosažení konzistence S3 byl beton rovnoměrně umístěn do zkušebních forem tvaru krychle s hranou 150 mm. K plnění forem byla použita klasická zednická lžíce. Jedna směs byla umístěna do patnácti forem, které byly označeny čísly 1 až 15. Následně byly formy rozděleny do skupin vždy po třech (1 až 3; 4 až 6 atd.) a na jednotlivých skupinách bylo realizováno odlišné hutnění. První skupina (1. až 3. krychle) se hutnila pouze poklepem pomocí gumové paličky na stěny formy, a to vždy jeden poklep na každou stěnu. Ostatní skupiny byly vibrovány pomocí vibračního stolu v odlišných časových intervalech, kde každá skupina náležela jednomu intervalu (15 s; 30 s; 60 s; 120 s). Po dokončení hutnění byly formy uskladněny v prostředí laboratoře po dobu 48 hodin. Teplota vzduchu v laboratoři se pohybovala v rozmezí 16 až 19 °C.



Obr. 20: Hutnění jedné skupiny krychlí na vibračním stole

- Den 3. – po uplynutí 48 hodin byly vzorky odbedněny pomocí stlačeného vzduchu. Následovalo označení jednotlivých vzorků, jejich přesné vážení a měření. Pro stanovení objemu vzorku sloužila aritmeticky zprůměrovaná data a to vždy 8 dat pro stanovení velikosti v půdorysném směru a 12 dat pro stanovení výšky. Nyní bylo možné stanovit objemovou hmotnost vzorku po dvou dnech.
- Den 28. – vzorky byly přesunuty do pece, kde po dobu 48 hodin byly vystaveny teplotě 110 °C. Tak došlo k odpaření volné vody z pórů.
- Den 31. – vzorky byly vyjmuty z pece a na vzduchu chladly na teplotu 10 až 30 °C. Poté byly vzorky zváženy. Následovalo měření pomocí ultrazvuku. Zjišťována byla rychlost šíření vlny v horní a dolní části vzorku, vždy ve dvou na sebe kolmých směrech. Po zaznamenání dat byly krychle zkoušeny na tlakovou pevnost pomocí lisu. Síla při destrukci byla přepočtena na napětí pomocí ploch jednotlivých krychlí, které se značně lišily, neboť s narůstající dobou hutnění klesala výška vzorků.

4.3.2 Použité přístroje

- Vibrační stůl (Stavostroj) – deska stolu je uváděna do pohybu pomocí dvou excentrů, každý má frekvenci 50 Hz s odstředivou silou 1 230 až 5 000 N



Obr. 21: Vibrační stůl

- Váha – digitální, kalibrovaná, s přesností na jednu setinu gramu
- Posuvné měřítko – digitální, kalibrované, přesnost na setinu milimetru
- Pec – značka Master
- Ultrazvuk – frekvence budiče 54 kHz (ozn. sond: P/N 325 40 131-D), kalibrovaný

-
- Lis – byly použity dva lisy z důvodu poruchy během experimentu. Směsi A1 a A2 byli zkoušeny na digitálním lisu s přesností měření působící síly na jednu setinu kN. Analogový lis použitý pro testování směsi A3 měl přesnost 5 kN. Oba lisy byly kalibrovány.



Obr. 22: Ukázka lisů (vlevo digitální, vpravo analogový)

5 ZKOUŠKY VZORKŮ

5.1 Sednutí kužele

Zkouškou sednutí kužele se určovala konzistence připravených betonových směsí. Cílem bylo, aby připravené směsi spadaly do třídy sednutí kužele S3. Zkouška byla provedena pro každou směs bezprostředně po jejím rozmíchání v souladu s normou ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. [26]

Tab. 10: Výsledky zkoušky sednutí kužele

Ozn.	Sednutí kužele [mm]	Konzistence [-]
A1	145	S3
A2	120	S3
A3	115	S3

5.2 Objemová hmotnost

5.2.1 Popis zkoušky

Objemová hmotnost vzorků byla zjišťována po dvou dnech od betonáže, bezprostředně po odbednění. Dále byla objemová hmotnost určována pro vzorky staré 31 dnů, které byly po dobu 48 hodin vystaveny teplotě 110 °C, vzorky tak byly zbaveny volné vody v pórech. Objemová hmotnost byla stanovena dle vzorce (20).

$$OH = \frac{m}{V} = [kg/m^3] \quad (20)$$

OH = objemová hmotnost [kg/m^3]

m = hmotnost vzorku [kg]

V = objem vzorku [m^3]

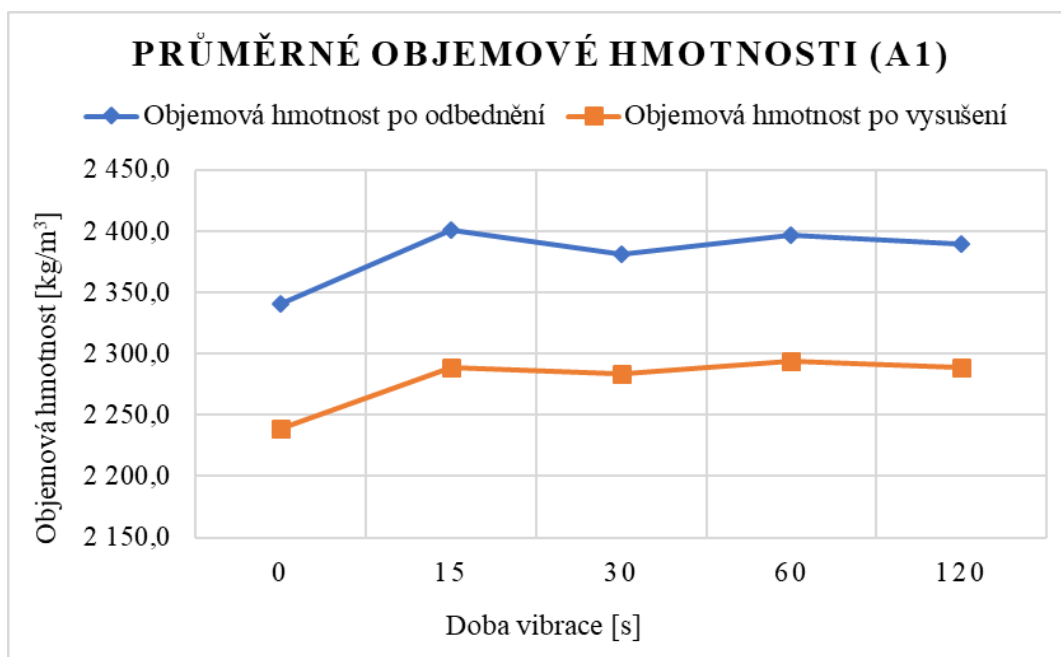
Hmotnost byla stanovena vážením. Pro výpočet objemu jednotlivých vzorků bylo použito celkem 20 rozměrových dat. Půdorysný rozměr vzorku byl stanoven z aritmetického průměru 8 rozměrů, výška byla stanovena z aritmetického průměru 12 rozměrů.

5.2.2 Výsledky zkoušky

Výsledné objemové hmotnosti byly zprůměrovány vždy pro jednotlivou směs a skupinu vzorků, které byly hutněny stejnou dobu. Průměrné hodnoty byly zaneseny do grafů.

Tab. 11: Objemové hmotnosti vzorků, směs A1

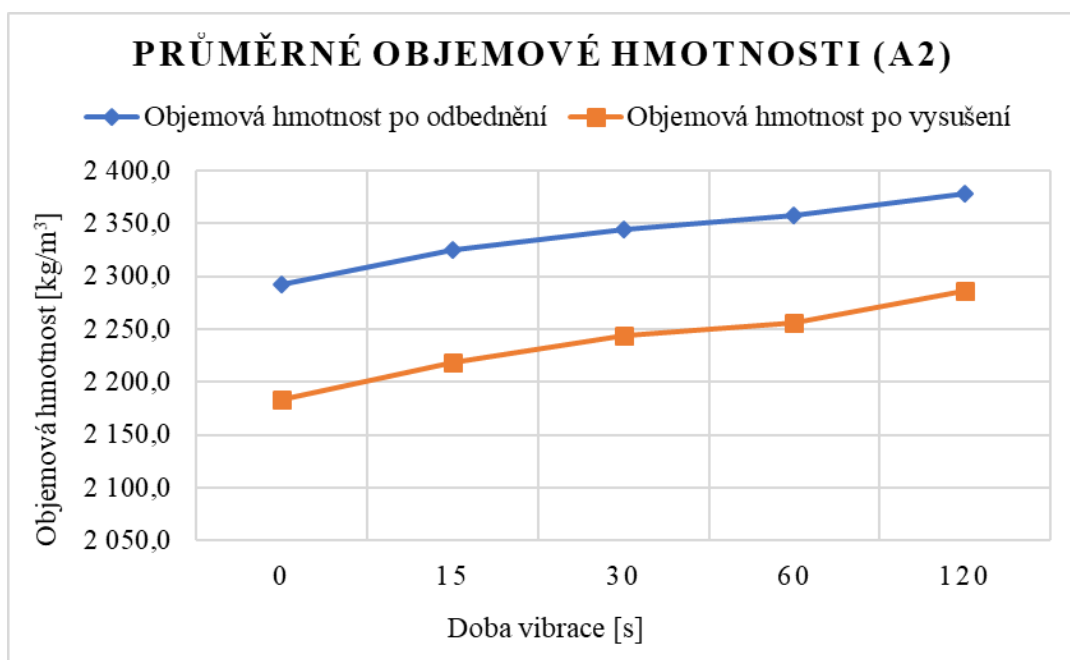
Č.	Doba vibrace [s]	Objem vzorku [cm ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]		Prům. objemová hmotnost [kg/m ³]	
			před vysušením	po vysušení	před vysušením	po vysušení
			2. den	> 28. den	2. den	> 28. den
1	0	3 405,22	2 342,4	2 242,1	2 340,5	2 238,9
2		3 364,42	2 354,2	2 252,3		
3		3 353,03	2 325,1	2 222,3		
4	15	3 328,55	2 380,1	2 280,0	2 401,1	2 288,5
5		3 244,26	2 441,3	2 292,5		
6		3 278,07	2 381,9	2 293,0		
7	30	3 262,94	2 382,8	2 292,8	2 381,2	2 283,7
8		3 239,24	2 390,3	2 291,0		
9		3 254,03	2 370,6	2 267,3		
10	60	3 203,45	2 412,9	2 313,8	2 396,6	2 294,2
11		3 237,17	2 392,6	2 290,0		
12		3 253,45	2 384,4	2 278,7		
13	120	3 148,61	2 386,3	2 284,6	2 389,7	2 289,2
14		3 161,87	2 385,8	2 286,2		
15		3 188,57	2 397,1	2 296,8		



Obr. 23: graf objemových hmotností, směs A1

Tab. 12: Objemové hmotnosti vzorků, směs A2

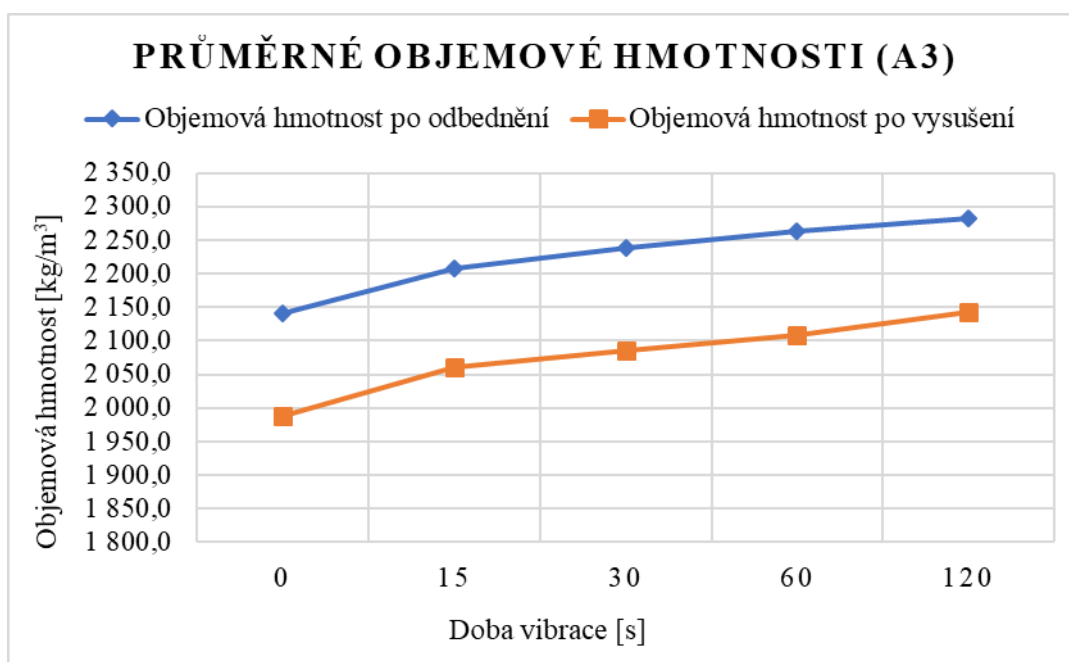
Č.	Doba vibrace [s]	Objem vzorku [cm ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]		Prům. objemová hmotnost [kg/m ³]	
			před vysušením	po vysušení	před vysušením	po vysušení
			2. den	> 28. den	2. den	> 28. den
1	0	3 317,79	2 295,2	2 185,9	2 292,2	2 184,0
2		3 285,12	2 287,6	2 179,8		
3		3 280,37	2 293,9	2 186,3		
4	15	3 287,32	2 339,3	2 228,9	2 325,4	2 218,6
5		3 236,48	2 315,8	2 212,0		
6		3 237,74	2 321,1	2 214,8		
7	30	3 151,77	2 340,0	2 235,6	2 344,8	2 243,3
8		3 104,45	2 340,2	2 243,1		
9		3 081,48	2 354,4	2 251,3		
10	60	3 021,71	2 354,6	2 255,3	2 357,3	2 255,5
11		3 017,72	2 354,4	2 252,7		
12		3 015,33	2 362,9	2 258,5		
13	120	3 077,33	2 386,8	2 293,1	2 377,9	2 286,5
14		3 067,48	2 378,2	2 287,0		
15		3 117,87	2 368,6	2 279,3		



Obr. 24: graf objemových hmotností, směs A2

Tab. 13: Objemové hmotnosti vzorků, směs A3

Č.	Doba vibrace [s]	Objem vzorku [cm ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]		Prům. objemová hmotnost [kg/m ³]	
			před vysušením	po vysušení	před vysušením	po vysušení
			2. den	> 28. den	2. den	> 28. den
1	0	3 198,32	2 134,9	1 980,3	2 141,3	1 987,6
2		3 299,00	2 147,3	1 990,6		
3		3 292,99	2 141,8	1 992,0		
4	15	3 227,94	2 213,2	2 051,7	2 208,5	2 061,4
5		3 246,66	2 207,2	2 064,1		
6		3 206,02	2 205,2	2 068,5		
7	30	3 124,15	2 232,3	2 078,9	2 237,5	2 086,1
8		3 095,37	2 241,1	2 099,5		
9		3 163,12	2 239,2	2 079,8		
10	60	3 013,33	2 262,3	2 104,3	2 263,9	2 108,9
11		3 066,13	2 268,0	2 120,7		
12		3 140,48	2 261,4	2 101,9		
13	120	2 944,22	2 276,0	2 136,9	2 282,2	2 142,6
14		2 934,14	2 283,1	2 147,3		
15		2 971,86	2 287,5	2 143,5		



Obr. 25: graf objemových hmotností, směs A3

5.2.3 Zhodnocení výsledků zkoušky

Na jednotlivých grafech je vidět, jak vzrůstá objemová hmotnost vzorků s narůstající dobou vibrování. Očekávaný průběh objemové hmotnosti měl být exponenciální, tomu se nejvíce přiblížila směs A1. Směsi A2 a A3 mají blíže k lineárnímu nárůstu objemové hmotnosti. Z průběhu křivek je patrné, že vzorky A1 by ani po delší době vibrování nedosáhly větší objemové hmotnosti a docházelo by pouze k segregaci kameniva, naopak vzorky ze směsi A2 a A3 by ještě mohly svou objemovou hmotnost v čase zvýšit.

5.3 Pevnost v tlaku

5.3.1 Popis zkoušky

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena dle zásad normy ČSN EN 12390–3.

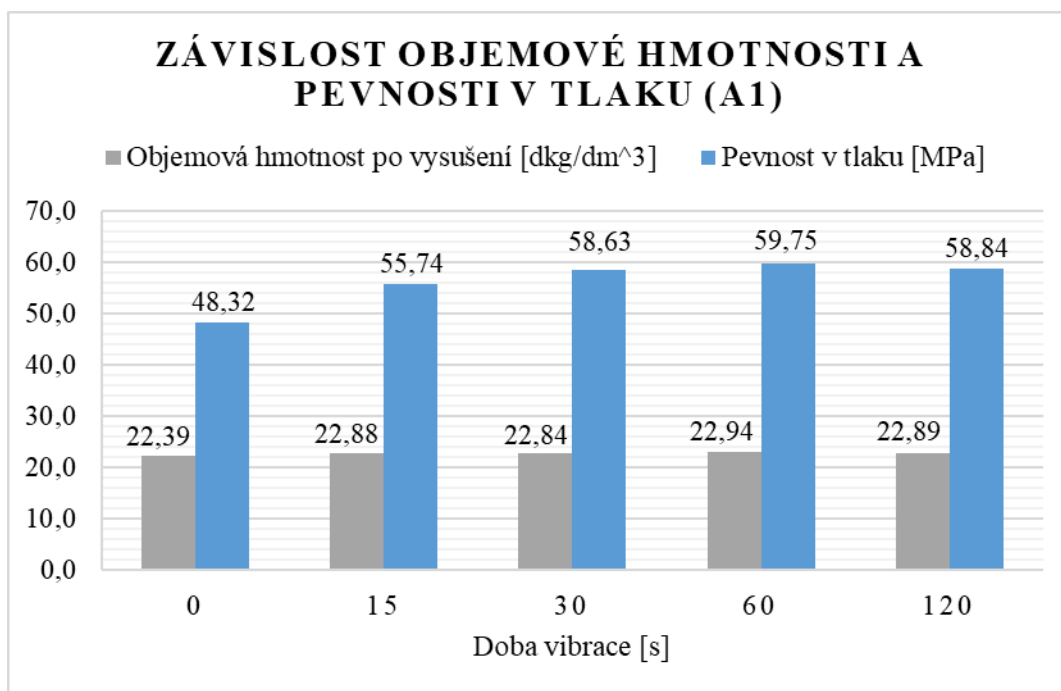
Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Zkušební postup. [27] Vzorky byly zkoušeny ve stáří 31 dnů po tom, co byly vyjmuty z pece, zváženy a změřeny pomocí ultrazvuku. Destruktivní zkouška probíhala pro směs A1 a A2 na digitálním lisu, směs A3 byla testována na analogovém lisu. Testované vzorky byly ukládány do lisu kolmo na směr hutnění a poté postupně zatěžovány, po destrukci vzorku byla změřena síla v kN dle které se stanovilo napětí podle plochy daného vzorku.

5.3.2 Výsledky zkoušky

Výsledky zkoušky jsou uvedeny v následující tabulce. Na grafu pod uvedenou tabulkou je vidět závislost objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku vždy pro danou skupinu vzorků.

Tab. 14: Pevnost v tlaku, směs A1

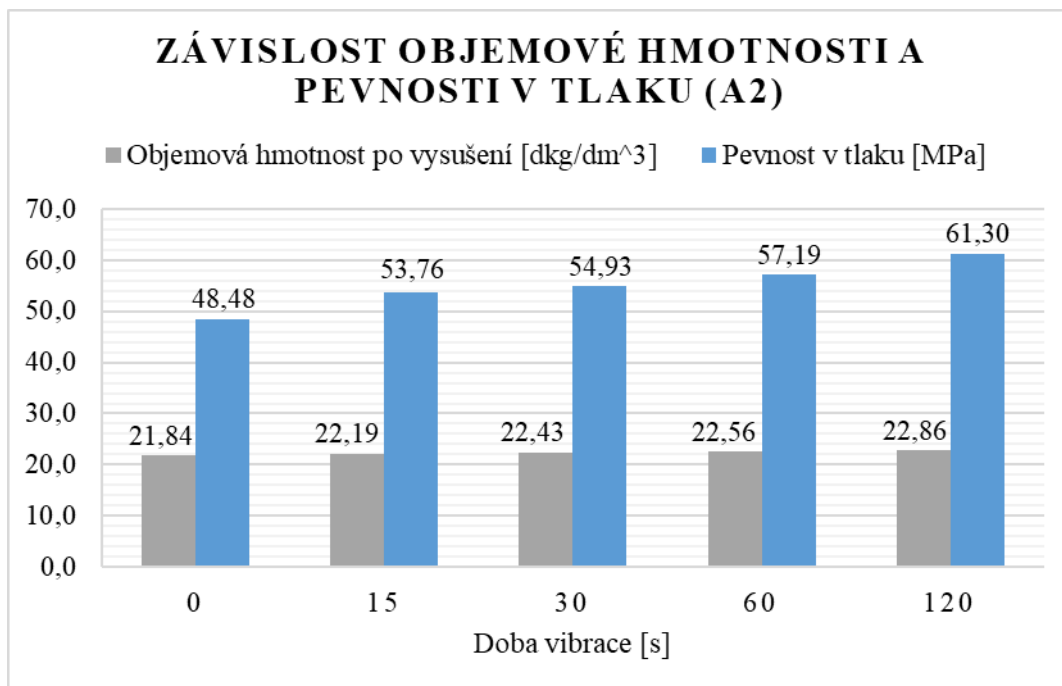
Č.	Doba vibrace [s]	Plocha	Síla	Tlaková pevnost	Prům. tlaková pevnost
		[cm ²]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	0	226,39	1 109,75	49,02	48,32
2		224,54	1 070,92	47,69	
3		223,04	1 076,27	48,25	
4	15	222,35	1 284,79	57,78	55,74
5		216,67	1 180,70	54,49	
6		218,68	1 201,59	54,95	
7	30	217,11	1 156,02	53,25	58,63
8		216,54	1 364,19	63,00	
9		216,55	1 291,52	59,64	
10	60	214,63	1 337,09	62,30	59,75
11		216,27	1 240,08	57,34	
12		217,31	1 295,15	59,60	
13	120	210,11	1 269,25	60,41	58,84
14		211,09	1 223,34	57,95	
15		213,25	1 240,08	58,15	



Obr. 26: Porovnání objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku, směs A1

Tab. 15: Pevnost v tlaku, směs A2

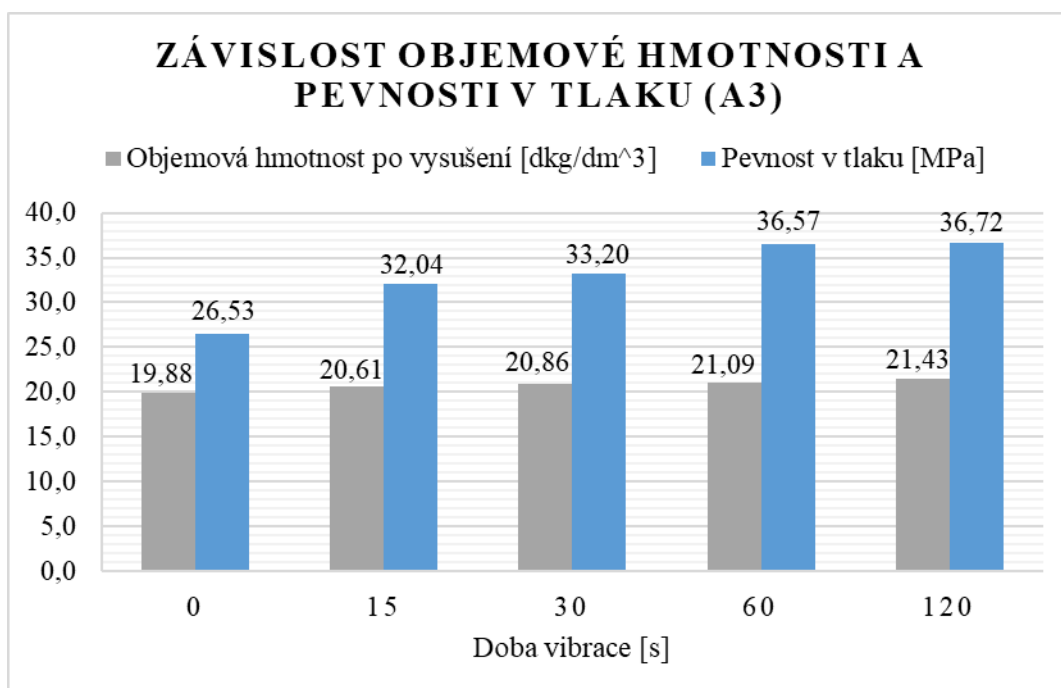
Č.	Doba vibrace [s]	Plocha	Síla	Tlaková pevnost	Prům. tlaková pevnost
		[cm ²]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	0	221,87	1 157,91	52,19	48,48
2		219,52	910,38	41,47	
3		219,30	1 135,82	51,79	
4	15	220,03	1 174,83	53,39	53,76
5		216,41	1 106,82	51,14	
6		216,44	1 227,83	56,73	
7	30	210,60	1 192,78	56,64	54,93
8		207,46	1 082,31	52,17	
9		205,80	1 152,42	56,00	
10	60	201,92	1 144,45	56,68	57,19
11		201,75	1 135,99	56,31	
12		201,38	1 180,01	58,59	
13	120	205,31	1 340,54	65,29	61,30
14		204,73	1 305,85	63,78	
15		208,30	1 142,03	54,83	



Obr. 27: Porovnání objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku, směs A2

Tab. 16: Pevnost v tlaku, směs A3

Č.	Doba vibrace [s]	Plocha	Síla	Tlaková pevnost	Prům. tlaková pevnost
		[cm ²]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	0	213,84	605,00	28,29	26,53
2		220,47	500,00	22,68	
3		220,03	630,00	28,63	
4	15	215,35	680,00	31,58	32,04
5		216,66	655,00	30,23	
6		214,26	735,00	34,30	
7	30	208,52	635,00	30,45	33,20
8		206,82	686,00	33,17	
9		211,19	760,00	35,99	
10	60	201,26	780,00	38,76	36,57
11		204,67	725,00	35,42	
12		209,63	745,00	35,54	
13	120	196,43	730,00	37,16	36,72
14		196,00	715,00	36,48	
15		198,46	725,00	36,53	



Obr. 28: Porovnání objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku, směs A3

5.3.3 Zhodnocení výsledků zkoušky

Předpokladem bylo, že s každým dalším procentem objemu vzduchu ve vzorku klesne jeho pevnost v tlaku přibližně o 6 %. [3] Z každé směsi, pro každý interval doby vibrování byla vzata maximální objemová hmotnost a k ní odpovídající pevnost v tlaku. Ostatní hodnoty pro jiné doby vibrování byly přepočteny tak, aby vyjadřovaly o kolik % se snížila pevnost v závislosti na procentuálním zvýšení objemu vzduchu v dané skupině vzorků dle těchto vzorců (21), (22).

$$Q_x = 100 - \left(\frac{OH_x \cdot 100}{OH_{max}} \right) = [\%] \quad (21)$$

Q_x = zvýšení objemu vzduchu oproti maximální objemové hmotnosti [%]

OH_x = objemová hmotnost zjišťované skupiny vzorků [kg/m^3]

OH_{max} = maximální objemová hmotnost skupiny vzorků dané směsi [kg/m^3]

$$R_x = 100 - \left(\frac{f_x \cdot 100}{f_{max}} \right) = [\%] \quad (22)$$

R_x = odpovídající snížení pevnosti v tlaku oproti maximální pevnosti [%]

f_x = pevnost v tlaku zjišťované skupiny vzorků [MPa]

f_{max} = maximální pevnost v tlaku skupiny vzorků dané směsi [kg/m^3]

Vypočtené hodnoty jsou uvedena v následující tabulce.

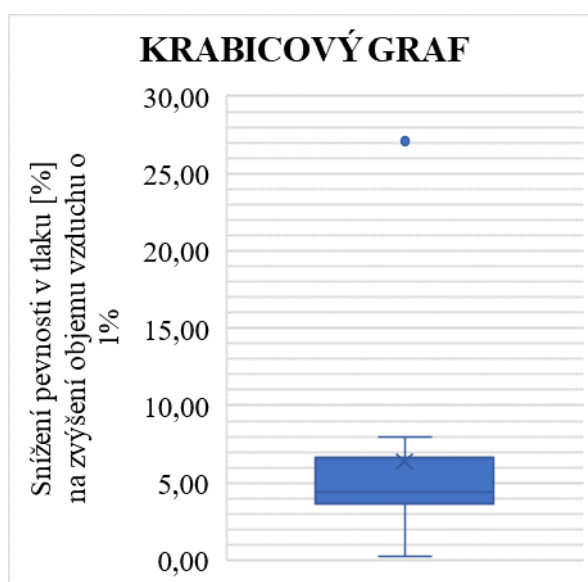
Tab. 17: Vypočtené procentuální hodnoty pro danou směs a délku vibrace

Směs	Max. objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost v tlaku pro danou OH. [MPa]	Doba vibrace [s]				
			0	15	30	60	120
			Zvýšení objemu vzduchu oproti maximu [%]				
			Odpovídající snížení pevnosti v tlaku oproti maximu [%]				
A1	2 294,2	59,75	2,41	0,25	0,45	0,00	0,22
			19,12	6,70	1,87	0,00	1,52
A2	2 286,5	61,30	4,48	2,97	1,89	1,35	0,00
			20,91	12,31	10,39	6,70	0,00
A3	2 142,6	36,72	7,23	3,79	2,64	1,57	0,00
			27,75	12,76	9,59	0,42	0,00

Tab. 18: Přepočítaná tabulka 17 (na zvýšení objemu vzduchu o 1 %)

Směs	Max. objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku pro danou OH. [MPa]	Doba vibrace [s]				
			0	15	30	60	120
			Přepočet snížení pevnosti v tlaku [%] na zvýšení objemu vzduchu o 1 %				
A1	2 294,2	59,75	7,94	27,10	4,11	-	7,06
A2	2 286,5	61,30	4,66	4,15	5,50	4,95	-
A3	2 142,6	36,72	3,84	3,37	3,64	0,26	-

Z vypočtených dat byl zkonstruován tzv. krabicový graf (boxplot), pomocí kterého lze detekovat odlehlá pozorování.



Obr. 2929: Krabicový graf (boxplot)

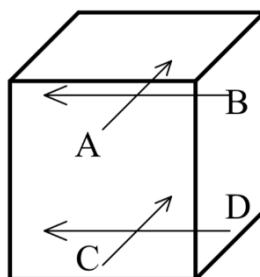
Hodnota 27,10 % leží mimo uvedený graf a musí být vyřazena z výpočtu průměrného snížení pevnosti v tlaku na 1 % zvýšení objemu vzduchu ve vzorku. Výsledná průměrná hodnota stanovená z tabulky 18 je pak 4,5 %, což se blíží předpokládaným 6 %. Lze tedy konstatovat, že tomto laboratorním experimentu se v průměru s každým procentuálním navýšením objemu vzduchu ve ztvrdlém betonu jeho pevnost v tlaku po vysušení snížila o 4,5 %.

Průměrné pevnosti v tlaku směsi A3 byli menší než u směsí A1 a A2, to bylo zapříčiněno větším vodním součinitelem.

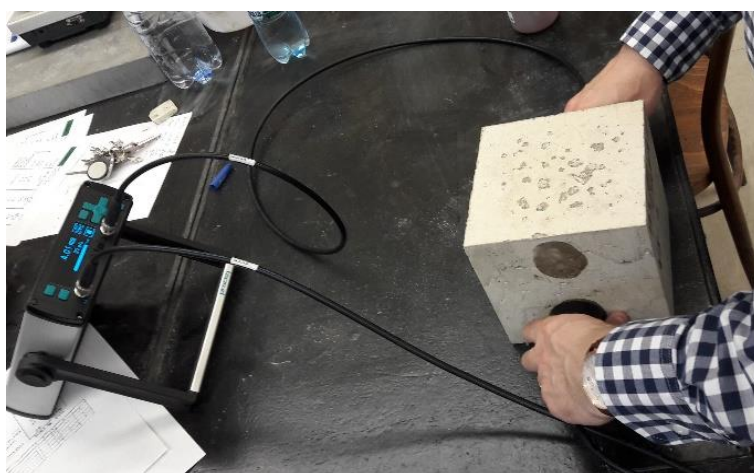
5.4 Homogenita

5.4.1 Popis zkoušky

Na vzorcích byla testována rychlost šíření ultrazvukové vlny v horní a dolní části, aby se z následného rozdílu rychlosti šíření vlny mohly stanovit dynamické moduly pružnosti pro horní a dolní část. Měření pobíhalo v souladu s normou ČSN 731371. Nedestruktivní zkoušky betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Část: 7. Zkušební postup. [25] Vzorky byly testovány poté co byly 31. den experimentu vyndány z pece, kde byly po dobu 48 hodin umístěny v teplotě 110 °C, po vyndání z pece vzorky chladly na vzduchu až do dosažení teploty 10 až 30 °C. Rychlost UZ vln byla změřena pro každou jednotlivou krychli čtyřikrát, u horního a dolního povrchu vždy ve dvou na sebe kolmých směrech, jak je vidět na obrázku.



Obr. 30: Místa testování (A, B = horní povrch; C, D = dolní povrch)



Obr. 31: Měření vzorku ultrazvukem

Výpočet dynamického modulu pružnosti byl stanoven podle vzorce (23).

$$E_{dyn,U} = D \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} = [MPa] \quad (23)$$

$E_{dyn,U}$ = dynamický modul pružnosti [MPa]

D = objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]

v_L = rychlost šíření ultrazvukového impulsu [m/s]

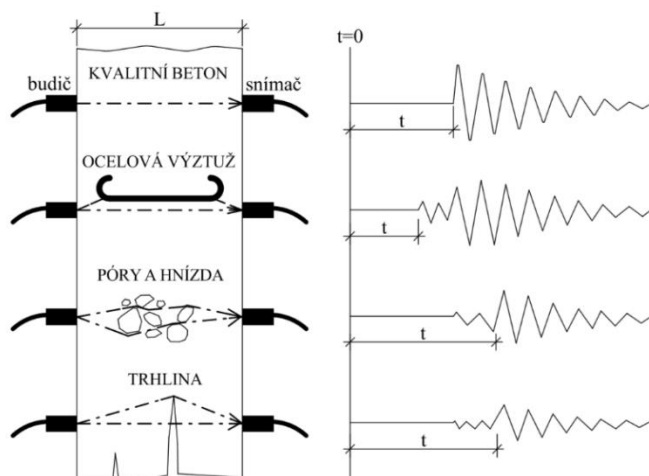
k = koeficient rozměrnosti prostředí [-]

$$k = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} = [-] \quad (24)$$

ν = Poissonův poměr pro daný materiál (beton: $\nu = 0,2$) [-]

5.4.2 Výsledky zkoušky

Výsledky dynamických modulů pružnosti pro obě části každé skupin vzorků jsou zaznamenány v následujících tabulkách. Poměr mezi dynamickými moduly horní a dolní části reprezentuje homogenitu vzorku, čím více se uvedený poměr blíží číslu 1, tím více se oba moduly sobě podobají a vzorek vykazuje větší míru stejnorodosti. Rychlost šíření UZ. vlny se ve většině případů se zvyšujícím se časem vibrace zrychluje. Důvodem je pokles obsahu vzduchových pórů ve vzorku, UZ. signál se šíří skrze beton rychleji nežli skrze vzduch. Na obrázku (obr. 32) je vidět, jak nedokonalosti betonu ovlivňují dobu šíření signálu.



Obr. 32: Průběh ultrazvukové vlny v betonu [21]

Tab. 19: Dynamické moduly pružnosti, směs A1

Č.	Doba vibrace [s]	Rychlost UZ. vlny		Prům. rych. UZ. vl.		$E_{dyn,u,H}$	$E_{dyn,u,D}$	$E_{dym,u,H} / E_{dym,u,D}$
		horní č.	dolní č.	horní č.	dolní č.	horní č.	dolní č.	
		[m/s]				[MPa]		
1	0	4 637	4 717	4 625	4 714	43 096,4	44 783,8	0,962
2		4 616	4 709					
3		4 622	4 718					
4	15	4 576	4 731	4 590	4 730	43 395,7	46 080,0	0,942
5		4 603	4 734					
6		4 593	4 726					
7	30	4 549	4 732	4 549	4 708	42 526,0	45 547,8	0,934
8		4 546	4 732					
9		4 552	4 659					
10	60	4 546	4 740	4 516	4 737	42 111,9	46 334,3	0,909
11		4 545	4 755					
12		4 458	4 717					
13	120	4 406	4 792	4 479	4 813	41 329,5	47 730,1	0,866
14		4 519	4 855					
15		4 512	4 793					

Tab. 20: Dynamické moduly pružnosti, směs A2

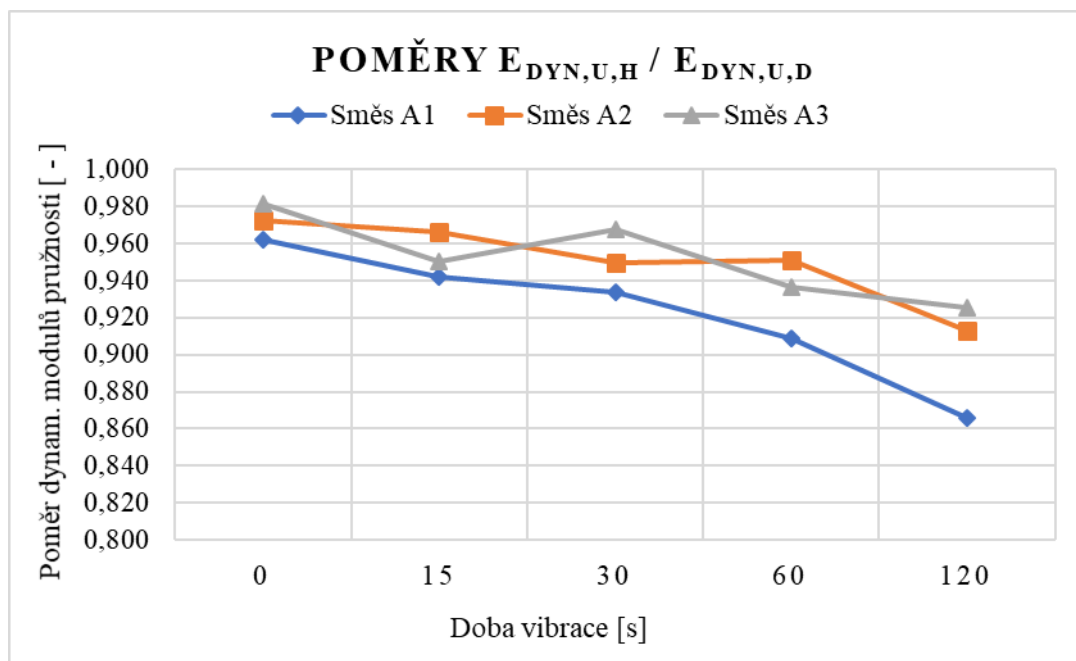
Č.	Doba vibrace [s]	Rychlost UZ. vlny		Prům. rych. UZ. vl.		$E_{dyn,u,H}$	$E_{dyn,u,D}$	$E_{dym,u,H} / E_{dym,u,D}$
		horní č.	dolní č.	horní č.	dolní č.	horní č.	dolní č.	
		[m/s]				[MPa]		
1	0	4 268	4 311	4 280	4 340	35 997,7	37 017,0	0,972
2		4 286	4 342					
3		4 286	4 367					
4	15	4 304	4 419	4 383	4 458	38 349,5	39 682,2	0,966
5		4 458	4 485					
6		4 386	4 471					
7	30	4 374	4 505	4 404	4 519	39 153,0	41 233,7	0,950
8		4 438	4 548					
9		4 399	4 505					
10	60	4 425	4 546	4 399	4 512	39 288,3	41 317,3	0,951
11		4 419	4 478					
12		4 355	4 512					
13	120	4 373	4 580	4 412	4 618	40 060,2	43 881,9	0,913
14		4 393	4 644					
15		4 471	4 630					

Tab. 21: Dynamické moduly pružnosti, směs A3

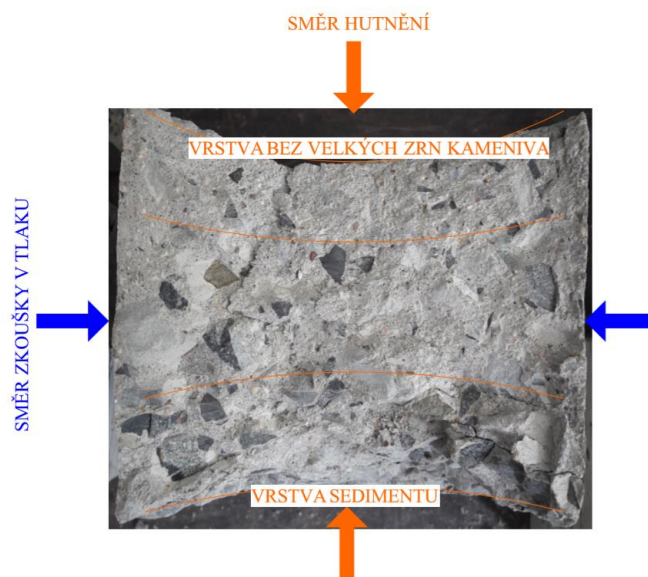
Č.	Doba vibrace [s]	Rychlost UZ. vlny		Prům. rych. UZ. vl.		$E_{dyn,u,H}$	$E_{dyn,u,D}$	$E_{dym,u,H} / E_{dym,u,D}$
		horní č.	dolní č.	horní č.	dolní č.	horní č.	dolní č.	
		[m/s]				[MPa]		
1	0	3 514	3 538	3 537	3 570	22 379,1	22 802,9	0,981
2		3 526	3 589					
3		3 572	3 584					
4	15	3 559	3 628	3 597	3 691	24 008,8	25 270,7	0,950
5		3 611	3 718					
6		3 623	3 727					
7	30	3 597	3 709	3 669	3 730	25 273,5	26 123,2	0,967
8		3 774	3 774					
9		3 637	3 709					
10	60	3 659	3 732	3 640	3 761	25 143,8	26 853,0	0,936
11		3 663	3 798					
12		3 597	3 755					
13	120	3 812	3 995	3 795	3 944	27 764,2	29 995,1	0,926
14		3 793	3 916					
15		3 779	3 922					

5.4.3 Zhodnocení výsledků zkoušky

Z výsledků je patrné, že čím delší byla doba hutnění, tím se zvětšoval rozdíl mezi dynamickými moduly pružnosti u obou povrchů, to je důsledek úbytku obsahu vzduchu v betonu. U směsí A2 a A3 je vždy trend rychlosti šíření UZ. vlny s prodlužující se délkou vibrování rostoucí, a to u obou povrchů. Důvodem může být menší míra sedimentace kameniva u horního povrchu z důvodu menší velikosti maximálního zrna kameniva těchto směsí. Vzorky ze směsi A1 jako jediné vykazují u horního povrchu klesající trend rychlosti šíření UZ. vlny s prodlužující se dobou trvání vibrace. Důvodem je nejspíš větší míra sedimentace částic kameniva, které u horního povrchu zcela vymizelo a vzorky taky byly při sušení v peci náchylnější na popraskání. Malé smršťovací trhliny prodloužily rychlost šíření UZ. vlny.



Obr. 33: Porovnání poměrů dynam. modulů pružnosti u všech směsí



Obr. 34: Ukázka vzorku směsi A1 (vibrováno 120 s) po provedení zkoušky v



Obr. 35: Pohled na dolní stěnu (vlevo) a horní stěnu (vpravo), směs A1, doba vibrace 120 s

6 ZÁVĚR

Cílem této práce byla výroba zkušebních těles s výškovou orientací a proměnnou dobou hutnění. Vzhledem k omezenému počtu forem pro výrobu trámčů ve školní laboratoři byly po dohodě s vedoucím práce použity formy tvaru krychle o hraně 150 mm. Tím bylo zajištěno větší množství dat a přesnější statistické ukazatele. Vyhodnocení změny objemové hmotnosti po výšce vzorku si kladlo za cíle stanovit homogenitu daného tělesa vzhledem k proměnné době hutnění. Jelikož byly použity jiné formy, homogenita byla zjišťována na základě odlišných rychlostí šíření ultrazvukové vlny. Všechny testované betony spadaly do kategorie směsí s běžným vodním součinitelem. Cílem bylo dosáhnout konzistence třídy S3 s podobným vodním součinitelem a odlišným maximálním zrnem kameniva. U směsí A1 a A2 se vodní součinitel blížil k 0,43. Beton A3, obsahující pouze drobné kamenivo ($D_{\max} = 4$ mm) nedosahoval potřebné konzistence ani po opakovaně navyšujícím se množství plastifikátoru. Do této směsi proto bylo přidáno více vody a vodní součinitel se navýšil na hodnotu 0,587. Pro stanovení optimální doby hutnění byla důležitá konzistence směsi a její maximální zrno kameniva, nikoli vodní součinitel. Tato optimální doba se pro různé směsi lišila, např. vzorky ze směsi A1 dosáhly maximální objemové hmotnosti (a k tomu maximální odpovídající pevnosti v tlaku) již po 60 sekundách hutnění. Vzorky z betonu A2 a A3 dosáhly těchto maximálních hodnot až po 120 sekundách. U vzorků A1 se po uplynutí doby 60 sekund už pouze zvyšovala nehomogenita mezi horní a dolní částí vlivem sedimentace. Nutno dodat, že uvedené doby závisí hlavně na použitém typu zhutňovací techniky a způsobu provedení.

7 LITERATURA

7.1 Publikace

- [1] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] BRANBERGER, Karel. Vibrování betonu: příručka zhutňování betonové směsi vibrátory na stavbách. Praha: Práce, 1952. Technické příručky Práce. ISBN není uvedeno.
- [3] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [4] 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 80-867-6939-9.
- [5] JÍLEK, Antonín a NOVÁK, Václav. Betonové stavitelství I. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Technický průvodce (SNTL). ISBN není neuváděno.
- [6] TRTÍK, Karel. Technologie betonu. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.
- [7] ŠMERDA, Zdeněk. Životnost betonových staveb. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999. Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902-6978-8.
- [8] Konzultace s technologem ve firmě PREFA a.s. Milan Strakoš.
[cit. dne 15. 2. 2018]
- [9] Pro vzdušněný beton, zpracování provzdušněného betonu, dostupné z <http://www.mujsbeton.cz/provzdušneny-beton> [cit. dne 18. 5. 2018]
- [10] VÝBORNÝ, Jaroslav. Nauka o materiálech 20 (21): pórobeton. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2063-0.
- [11] HELLA, Rudolf. Technologie betonu, Modul M01, BJ04 technologie betonu I. 2005 [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ04-Technologie%20betonu%20I/technologie%20betonu%20I.pdf>
-

-
- [12] Technologie válcovaného betonu, pro odolné vozovky s nízkým výskytem poruch. ASB-portal.cz [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/doprava/technologie-valcovaneho-betonu-pro-odolne-vozovky-s-nizkym-vyskytem-poruch>
- [13] Válcovaný beton. Cemex. Copyright © 2016 CEMEX Research Group AG, Switzerland [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <http://www.cemex.cz/Userfiles/RCC/Valcovan%C3%BD%20beton%20CEMEX%20-%20web.pdf>
- [14] Válcovaný beton – inovativní technologie pokládky betonových vozovek. Ing. Beneš Dalibor Ph.D. [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/valcovany-beton-inovativni-technologie-pokladky-betonovych-vozovek/>
- [15] Proč používat vibrátory do betonu – vnitřní vibrace. Libor Vaněček [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <https://www.kohut.cz/proc-pouzivat-vibratory-do-betonu-86-info>
- [16] Příměsi do betonu, Concrete admixtures. Rudolf Hela [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <http://www.betontks.cz.ezproxy.techlib.cz/sites/default/files/2015-2-04.pdf>
- [17] ELFMARKOVÁ, Veronika. *Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební. Vedoucí práce Rudolf HELA.
- [18] SOBOLEV K., SANCHEZ F., Flores I.: The use of nanoparticle admix - tures to improve the performance of concrete, Praha, 2012
- [19] Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, Reported by ACI Committee ACI 234R-06
- [20] Effect of nano-CaCo3 on hydration of cement containing supplementary cementitious materials NRCC-53922 Sato, T.; Beaudoin, J.J. October 2010 A version
- [21] ANTON, O. Základy zkušebnictví. Učební texty Vysokých škol. Brno: CERM s.r.o Brno, 2002. ISBN: 80-214-2079-0.
- [22] Ponorný vibrátor, příložný vibrátor, vibrační lišta. Nahoru© 2005 - 2018 KÁMEN BRNO, spol. s. r. o. [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <https://www.kamenbrno.cz>
- [23] Vibrační stoly. 2018, BRIO Hranice s.r.o. [online]. [cit. dne 18. 5. 2018] Dostupné z: <http://briohranice.cz/betony>
-

7.2 Normy

[24] ČSN EN 206+A1. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Část 5. 1. 6: *Příměsi (včetně filerů a anorganických pigmentů)*. © Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[25] ČSN 731371. Nedestruktivní zkoušky betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Část: 7. *Zkušební postup*. © Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[26] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. © Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

[27] ČSN EN 12390–3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. *Zkušební postup*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.