

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální porovnání metod destruktivního a nedestruktivního
zkoušení betonů a vláknobetonů

Leoš Jirovský

Bakalářská práce

2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Leoš Jirovský**
Osobní číslo: **D10237**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Experimentální porovnání metod destruktivního a nedestruktivního zkoušení betonů a vláknobetonů**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V tematice zkoušení betonů (metody destruktivní a nedestruktivní) se požaduje vypracovat rešerše stávající míry poznání v ČR a v zahraničí. Následně budou zhotovena zkušební tělesa (prostý beton, vláknobeton a drátkobeton) pro potřeby realizace vlastních experimentálních zkoušek.

Požadované výstupy:

Úvod

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání

2) Experimentální část

Zpracování čerstvého betonu

Provedení zkoušek čerstvého betonu (stanovení konzistence, určení obsahu vzduchu, objemová hmotnost)

Provedení zkoušek ztvrdlého betonu

Destruktivní zkoušení (krychelná pevnost betonu, pevnost v tahu ohybem, objemová hmotnost)

Nedestruktivní zkoušení (ultrazvuková impulzová metoda, metoda Schmidtova tvrdoměru)

Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ČSN EN 12 350. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

ČSN EN 12 390. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

ČSN EN 206. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

ČSN 73 1371. Nedestruktivní zkoušení betonu Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

ČSN 73 1373. Nedestruktivní zkoušení betonu Tvrdoměrné metody zkoušení betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

ČSN 73 2011. Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA. Drátkobetonové konstrukce. 1. vyd. Praha: ČKAIT, 1999. ISBN 80-86364-00-3.

PAVLÍK, Adolf a Jaroslav DOLEŽEL. Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977.

PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Suchánek

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce:

30. listopadu 2014

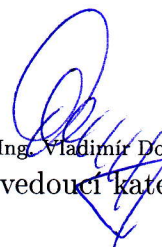
Termín odevzdání bakalářské práce:

29. května 2015



doc. Ing. Ivo Drahošský, Ph.D.
děkan

L.S.



doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. dubna 2015

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 29. 5. 2015

Leoš Jirovský

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Vladimíru Suchánkovi, za věcné připomínky, rady a konzultace k teoretické i experimentální části práce.

ANOTACE

Práce je věnována teorii a zkoušení prostého betonu, vláknobetonu s polypropylénovými vlákny a drátkobetonu nedestruktivními a destruktivními metodami. Jako nedestruktivní metody zkoušení byly zvoleny ultrazvuková impulzová metoda a metoda odrazového tvrdoměru, které byly doplněny destruktivními zkouškami. Získané výsledky jednotlivých záměsí jsou vyhodnoceny pomocí kalibračních vztahů a vzájemně porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

beton, vláknobeton, drátkobeton, nedestruktivní zkoušení, destruktivní zkoušení

TITLE

Experimental Comparison of Methods of Destructive and Non-destructive Testing of Concrete and Fiber-reinforced Concrete

ANNOTATION

This bachelor thesis focuses on theory and practical methods of non-destructive and destructive testing of concrete, polypropylene fiber-reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete. Performed non-destructive tests are ultrasonic impulse testing method and the hardness testing method. The results are evaluated using calibration functions and compared.

KEYWORDS

concrete, fibre-reinforced concrete, steel fibre-reinforced concrete, nondestructive testing, destructive testing

Obsah

0	Úvod	12
1	Teorie vláknobetonů	14
1.1	Druhy používaných vláken	15
1.2	Vlastnosti vláknobetonů.....	16
1.3	Drátkobeton.....	16
1.3.1	Složky drátkobetonové směsi.....	16
1.3.2	Technologie provádění drátkobetonových konstrukcí.....	21
1.3.3	Vlastnosti čerstvého drátkobetonu.....	22
1.3.4	Vlastnosti ztvrdlého drátkobetonu	23
1.3.5	Určení obsahu drátků v betonu	27
1.4	Vláknobeton.....	28
1.4.1	Druhy polypropylénových vláken.....	29
1.4.2	Použití polypropylénových vláken	30
1.5	Použití vláknobetonů a drátkobetonů ve stavební praxi.....	31
2	Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí	33
2.1	Historie nedestruktivního zkoušení	33
2.2	Metody nedestruktivního zkoušení betonu	34
2.2.1	Radiografická metoda.....	37
2.2.2	Radiometrická metoda.....	37
2.2.3	Tvrdoměrné metody.....	37
2.2.4	Rezonanční metoda zkoušení betonu.....	39
2.3	Tvrdoměrné metody zkoušení betonu	40
2.3.1	Princip zkoušení tvrdoměry.....	40
2.3.2	Zkušební postup	42
2.4	Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu	43
2.4.1	Šíření mechanického vlnění v tělesech.....	43
2.4.2	Princip měření ultrazvukem	45
2.4.3	Druhy prozvučování	47
2.4.4	Vlivy na měření ultrazvukovou impulzovou metodou	48
2.4.5	Určení fyzikálně mechanických vlastností betonu na základě stanovené rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v betonu.....	51
3	Experimentální část	56
3.1	Definice záměsí betonu a výroba zkušebních těles	56

3.2	Zkoušení čerstvého betonu.....	59
3.2.1	Zkouška sednutím.....	59
3.2.2	Stupeň zhutnitelnosti.....	60
3.2.3	Objemová hmotnost čerstvého betonu.....	61
3.2.4	Obsah vzduchu.....	63
3.2.5	Zhodnocení zkoušek čerstvého betonu.....	64
3.3	Nedestruktivní zkoušení ztvrdlého betonu.....	66
3.3.1	Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.....	66
3.3.2	Metoda Schmidtova odrazového tvrdoměru.....	73
3.3.3	Kombinace ultrazvukové impulzové metody v kombinaci se Schmidtovým tvrdoměrem typu N.....	80
3.3.4	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.....	82
3.3.5	Zhodnocení nedestruktivních zkoušek betonu.....	84
3.4	Destruktivní zkoušení ztvrdlého betonu.....	90
3.4.1	Pevnost v tlaku zkušebních těles.....	90
3.4.2	Pevnost v příčném tahu zkušebních těles.....	91
3.4.3	Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.....	93
3.4.4	Zhodnocení destruktivních zkoušek betonu.....	94
4	Závěr	97
4.1	Destruktivní zkoušení.....	97
4.2	Nedestruktivní zkoušení.....	97
5	Literatura	100

Dokladová část

Obsah dokladové části

- A. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 0/4 – Pískovna Čeperka
- B. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 4/8 – Pískovna Čeperka
- C. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 8/16 – Pískovna Čeperka
- D. Technický list cementu CEM II/A-LL 42,5 R
- E. Osvědčení o stálosti vlastností portlandského cementu CEM II/A-LL 42,5 R
- F. Statistické hodnocení kvality cementu CEM II/A-LL 42,5 R
- G. Technický list superplastifikační přísady Stachement ML

Seznam obrázků

Obr. 1: Ocelová vlákna Dramix 3D	19
Obr. 2: Schéma působení drátků typu 5D [5].....	20
Obr. 3: Působení drátků v trhlině [5]	20
Obr. 4: Selhání drátků typu 3D vytažením při zatěžování v tahu ohybem (hranol Z4II 3).....	21
Obr. 5: Sortiment drátků firmy Arcelor Mittal, typ HE, TABIX a TWINCONE [6].....	21
Obr. 6: Pracovní diagram při namáhání tlakem drátkobetonu a prostého betonu [1].....	24
Obr. 7: Pracovní diagram při namáhání tahem drátkobetonu a prostého betonu [1].....	25
Obr. 8: Schéma metody magnetické indukce [9].....	28
Obr. 9: Makrovlákna, mikrovlákna a sdružená vlákna firmy Rindler [12]	30
Obr. 10: Fibrilovaná polypropylénová vlákna	31
Obr. 11: Příčné, podélné a povrchové vlnění	44
Obr. 12: Princip měření ultrazvukem [14].....	46
Obr. 13: Rozšíření ultrazvuku do stran [14].....	47
Obr. 14: Přímé prozvučování	47
Obr. 15: Polopřímé a nepřímé prozvučování	48
Obr. 16: Zjišťování hloubky trhliny v betonu ultrazvukem [22]	50
Obr. 17: Stanovení rychlosti šíření UZ impulsu při nepřímém prozvučování [21].....	51
Obr. 18: Deformace dokonale pružného tělesa při zatížení silovým impulzem	52
Obr. 19: Pracovní diagram betonu pro nízká napětí [14]	54
Obr. 20: Zkouška sednutím pro záměs Z2PP	60
Obr. 21: Zkouška stupně zhutnitelnosti pro záměs Z3I.....	61
Obr. 22: Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu, záměs Z1R	63
Obr. 23: Zkouška obsahu vzduchu.....	64
Obr. 24: Objemová hmotnost čerstvého betonu.....	65
Obr. 25: Obsah vzduchu	65
Obr. 26: Příprava měření ultrazvukovou impulzovou metodou.....	67

Obr. 27: Měření na krychlích, snímač signálu	68
Obr. 28: Příprava nepřímého prozvučování hranolů.....	71
Obr. 29: Schmidtovo kladívko 58-C0181/G	73
Obr. 30: Síť zkušebních bodů pro tvrdoměrnou a ultrazvukovou metodu	75
Obr. 31: Zkoušení krychlí vodorovným směrem (způsob B).....	75
Obr. 32: Určení pevnosti v tlaku z rychlosti šíření UZ impulzů a odrazu beranu Schmidtova kladívka podle Pavlíka [15]	81
Obr. 33: Určení pevnosti v tlaku z rychlosti šíření UZ impulzů a odrazu beranu Schmidtova kladívka, přístroj Controls [22].....	81
Obr. 34: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu	83
Obr. 35: Průměrné objemové hmotnosti těles jednotlivých záměsí.....	84
Obr. 36: Průměrné pevnosti v tlaku podle zkoušky Schmidtovým tvrdoměrem na krychlích	85
Obr. 37: Průměrné pevnosti v tlaku podle zkoušky Schmidtovým tvrdoměrem na válcích	85
Obr. 38: Průměrný čas průchodu ultrazvukových vln jednotlivými vrstvami	87
Obr. 39: Průměrné dynamické moduly pružnosti určované na krychlích	89
Obr. 40: Průměrné dynamické moduly pružnosti určované na válcích.....	89
Obr. 41: Průměrné dynamické moduly pružnosti určované na hranolech.....	89
Obr. 42: Průměrné rychlosti šíření UZ vln v tělesech	88
Obr. 43: Průměrné pevnosti v tlaku vypočtené kombinací odrazové a ultrazvukové metody	90
Obr. 44: Porušení krychle záměsí Z4II po zkoušce příčným tahem	92
Obr. 45: Zkouška v tahu ohybem u hranolu ze záměsí Z4II	94
Obr. 46: Průměrné krychelné pevnosti v tlaku.....	94
Obr. 47: Průměrné válcové pevnosti v tlaku	95
Obr. 48: Průměrné pevnosti v příčném tahu krychlí.....	95
Obr. 49: Průměrné pevnosti v tahu ohybem hranolů	96

Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiálové charakteristiky vybraných druhů vláken [2], [3].....	15
Tabulka 2: Rychlost šíření ultrazvuku v materiálech [15].....	49
Tabulka 3: Počty vyrobených těles a provedené destruktivní zkoušky	59
Tabulka 4: Počty těles, na nichž byly provedeny nedestruktivní zkoušky	59
Tabulka 5: Zkouška sednutím	60
Tabulka 6: Stupeň zhutnitelnosti.....	61
Tabulka 7: Objemová hmotnost čerstvého betonu.....	62
Tabulka 8: Obsah vzduchu	64
Tabulka 9: Shrnutí zkoušek čerstvého betonu.....	66
Tabulka 10: Zkoušení přímým prozvučováním ultrazvukem na krychlích.....	69
Tabulka 11: Zkoušení přímým prozvučováním ultrazvukem na válcích	70
Tabulka 12: Zkoušení hranolů přímým a nepřímým prozvučováním	72
Tabulka 13: Výsledky tvrdoměrného měření na krychlích záměsí Z1R a Z2PP	76
Tabulka 14: Výsledky tvrdoměrného měření na krychlích záměsí Z3I a Z4II	77
Tabulka 15: Výsledky tvrdoměrného měření na válcích záměsí Z1R a Z2PP.....	78
Tabulka 16: Výsledky tvrdoměrného měření na válcích záměsí Z3I a Z4II.....	79
Tabulka 17: Pevnosti v tlaku stanovené odrazovou metodou a impulzovou metodou v kombinaci.....	82
Tabulka 18: Objemová hmotnost těles	83
Tabulka 19: Dosažené maximální zatížení F a pevnost v tlaku těles f_c	91
Tabulka 20: Dosažené maximální zatížení F a pevnost v příčném tahu těles f_{ct}	92
Tabulka 21: Dosažené maximální zatížení F a pevnost v tahu ohybem těles f_{cf}	93
Tabulka 22: Průměrné pevnosti v tlaku určené nedestruktivně a destruktivně	98

0 Úvod

Tématem této bakalářské práce je problematika nedestruktivního a destruktivního zkoušení prostých vibrovaných betonů a vláknobetonů, včetně tzv. drátkobetonů.

Vláknobetony lze charakterizovat jako všesměrně vyztužený krátkovláknový kompozit. Jejich vlastnosti závisí na rozložení vláken a na jejich vzájemné fyzikální interakci s cementovou matricí. Díky náhodnému rozmístění vláken ve vláknobetonech a značné nepravidelnosti výsledné struktury je obtížné stanovit výpočtovými teoretickými postupy modely chování těchto látek. Proto je nutné se spoléhat na výsledky experimentálních zkoušek, ať už destruktivních nebo nedestruktivních. Právě nedestruktivní zkoušky mohou být nápomocné při odhadování pevnosti betonu a často představují jedinou možnost identifikace poruch vnitřní struktury betonových konstrukcí.

Tato práce je rozdělena do dvou částí. První část, teoretická, shrnuje současné poznatky o vláknobetonech a soustředí se zejména na drátkobetony a betony s přidanými polypropylénovými vlákny. Prostor je věnován i teoretickým poznatkům z oblasti nedestruktivního zkoušení betonových konstrukcí.

Druhá část, experimentální, se zaměřuje na praktické provedení a následné vyhodnocení nedestruktivních i destruktivních zkoušek na zhotovených tělesech. Pro nedestruktivní zkoušení byla zvolena metoda odrazového tvrdoměru, což je v současnosti stále jedna z nejpoužívanějších nedestruktivních metod zkoušení betonu v konstrukcích. Dalším způsobem zkoušení je ultrazvuková impulzová metoda, která využívá znalosti o šíření mechanických vln v tělesech. Provedené experimenty si kladou za cíl ověřit možnosti nedestruktivního zkoušení vláknobetonů a po porovnání výsledků s destruktivními zkouškami učinit závěry shrnující věrohodnost naměřených hodnot a způsobu jejich zpracování pomocí kalibračních vztahů.

Možnosti stavební aplikace vláknobetonů se neustále rozšiřují a s ohledem na současný výzkum a vývoj nových vláken lze i v nejbližší době očekávat další rozmach tohoto druhu betonu. Z tohoto důvodu je nutné věnovat pozornost zdokonalování méně přesných nedestruktivních metod zkoušení a v součinnosti s metodami destruktivními zajistit jejich dostatečnou vypovídající schopnost o reálném stavu betonu v konstrukci.

Cíle této bakalářské práce jsou následující:

- zachytit současný stav poznání v oblasti drátkobetonů a vláknobetonů,
- shrnout a popsat dnešní normové i dříve používané metody nedestruktivního zkoušení betonových konstrukcí,
- zkouškami ověřit vlastnosti čerstvého prostého betonu, vláknobetonu a drátkobetonu,
- porovnat výsledky zkoušek Schmidtovým tvrdoměrem na různých površích a v různých směrech,
- stanovit dynamický modul pružnosti a pevnost v tlaku pomocí ultrazvukové impulzové metody jak přímým, tak nepřímým prozvučováním,
- ověřit vypovídající schopnost vztahů, na jejichž základě lze určit pevnost v tlaku kombinací tvrdoměrné a ultrazvukové metody,
- porovnat pevnosti v tlaku určené nedestruktivními zkouškami z kalibračních vztahů s hodnotami stanovenými destruktivně,
- prověřit vyšší pevnosti v tahu ohybem na hranolech a v příčném tahu na krychlích z drátkobetonu a vláknobetonu.

1 Teorie vláknobetonů

Vláknobeton, obecně FRC – Fibre-Reinforced Concrete, je označení pro beton s různými druhy všesměrně rozptýlené výztuže. Rozptýlená výztuž má většinou tvar vláken a významným způsobem ovlivňuje některé nedostatky běžného betonu. Výhoda vláken je dobře patrná zejména při prostorovém mechanickém namáhání, kdy zachycuje tahové síly v oblastech cementového tmele a zmírňuje obvykle křehký charakter porušení betonu. Vláknobeton lépe odolává objemovým změnám vlivem smršťování při tuhnutí a tvrdnutí a vlivem okolní teploty. Mezi základní vlastnosti vláknobetonu patří také vysoká odolnost vůči rázovému a dynamickému namáhání, vyšší vodotěsnost a s tím související zvýšená mrazuvzdornost, odolnost proti tvoření mikrotrhlin a prudkým změnám teplot (např. při požáru).

Myšlenka betonu vyztuženého vláknou není záležitostí posledních desetiletí, již ze starověku jsou známy příklady použití malt vyztužených rostlinnými stonky, zvířecími chlupy nebo jiným organickým materiálem. Další příklad historického použití zastupují cihly vepřovice, tedy cihly z nepálené jílovité hlíny s přidanou slámou nebo štetinami. V Československu byly podnikány první experimenty s rozptýlenou výztuží od 60. let skupinou odborníků kolem prof. Ing. Jindřicha Cigánka, CSc. z VŠB TU Ostrava a Ing. Karola Komloše, DrSc. z VÚIZ Bratislava [1]. Po otevření trhu v 90. letech došlo ke vstupu mnoha zahraničních firem na český trh a v dnešní době je k dispozici velké množství materiálů nejrůznějších vlastností.

Využití vláknobetonu lze předpokládat v konstrukcích, jejichž provádění by bylo náročné z technologických, časových a finančních důvodů, pokud by byl použit běžný železobeton s klasickou ocelovou výztuží. Při použití rozptýlené výztuže dochází tedy k úspoře klasické podélné i příčné výztuže.

Existuje i tlaková rozptýlená výztuž ve tvaru krátkých tuhých prvků, která plní polohovací funkci pro jednotlivá zrna kameniva a jejímž účelem je eliminování objemových změn při tuhnutí betonu, při změnách teploty a při tlakovém namáhání [1].

1.1 Druhy používaných vláken

Tahovou rozptýlenou výztuž je možné rozdělit do následujících skupin [2]:

- organická vlákna
 - vlákna přírodního původu (např. piliny, sláma, rákosí, stonky rostlin, bambusová vlákna, zvířecí chlupy, koňské žíně)
 - vlákna syntetického původu (polypropylénová, celulózová, PVA, PE vlákna)
- anorganická vlákna
 - vlákna přírodního původu (azbest)
 - vlákna syntetického původu skleněná vlákna, ocelová vlákna (drátky)

Beton s rozptýlenou výztuží tvořenou ocelovými vlákny je též označován jako drátkobeton.

Dříve používaný azbestocement, tedy cementová matrice vyplněná azbestovými vlákny, měl velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, vzhledem k negativním účinkům na lidské zdraví je jeho používání v České republice zakázáno.

Skleněná vlákna se používají nejméně, v budoucnosti by však mohlo dojít k jejich rozšíření, protože se vyznačují odolností vůči působení alkalického prostředí cementového kamene. Rovněž možnost používání hliníkových, nylonových nebo vysokopevnostních uhlíkových vláken je předmětem současného výzkumu. Materiálové charakteristiky vybraných vláken jsou uvedeny v tabulce 1. Platí, že vlákna s nižším modulem pružnosti mají význam spíše při tuhnutí betonu a zamezují vzniku objemových změn. Vlákna s vyšším modulem pružnosti zvyšují pevnost betonu při dynamickém nebo ohybovém namáhání, čímž zabraňují tvorbě trhlin.

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Průměr vlákna [μm]	Hustota [kg/m^3]
Polypropylénová vlákna	200 – 700	3,5 – 18	10 – 300	910
Ocelová vlákna	1500 – 3800	170 – 300	100 – 600	7850
Skleněná vlákna	1500 – 3600	60 – 90	10 – 15	2700
Uhlíková vlákna	1700 – 3500	200 – 700	15 – 200	2000

Tabulka 1: Materiálové charakteristiky vybraných druhů vláken [2], [3]

Největší podíl ve výrobě vláknobetonu mají drátkobetony, následují betony s polypropylénovými vlákny. Cena vláknobetonů, zejména drátkobetonů, je vyšší než cena nevyztužených betonů [1].

1.2 Vlastnosti vláknobetonů

Vlastnosti vláknobetonů závisí mimo jiné na [1]:

- druhu materiálu použitých vláken,
- hmotnostním obsahu vláken v betonu
- tvaru a geometrii vláken (např. na štíhlostním poměru délky a průměru ocelových vláken),
- soudržnosti vláken s betonem,
- orientaci a rovnoměrném rozptýlení vláken v betonu,
- technologii výroby vláknobetonu.

Pozornost je nutné věnovat i složení vlastní betonové směsi a již při jejím návrhu je potřeba počítat s účinky vláken na výsledné vlastnosti betonu. Při samotné výrobě vláknobetonu se musí zabezpečit rovnoměrné rozprostření vláken v celé záměsi a jejich dokonalé obalení cementovou kaší. Proto jsou např. polypropylénová vlákna lubrikována, aby se zvýšila jejich smáčivost cementovou kaší. U ocelových vláken bývá problém s tvorbou shluků, tzv. ježků. Z tohoto důvodu se používá rozdružovací a dávkovací zařízení, které odděluje spleená vlákna od sebe a postupně je dávkuje do již hotové betonové směsi. Vlákna v čerstvém betonu je možné usměrňovat elektromagneticky, tento postup je však nerealizovatelný pro konstrukce větších rozměrů a finančně nákladný. Někdy může dojít k nechtěnému usměrnění vláken, zejména v tenkých konstrukcích. Svůj vliv na směr vláken má také tekutost drátkobetonové směsi, postup ukládání, způsob zpracování a přítomnost klasické železové výztuže. Přitom směr vláken je rozhodující při namáhání a vzniku trhlin. Platí-li, že vlákna jsou rozmístěna po objemu tělesa zcela rovnoměrně, pak v prostoru působí ve směru namáhání jen jedna třetina vláken a zbylé dvě třetiny jsou nevyužity [2].

1.3 Drátkobeton

1.3.1 Složky drátkobetonové směsi

Jelikož nelze očekávat získání vhodné drátkobetonové směsi prostým přidáním drátků k receptuře obyčejné betonové směsi, je potřeba ji navrhnout. Při návrhu se vychází z požadavku hutné betonové směsi a při zpracování je nutné eliminovat nakypření kameniva drátky. Výchozím požadavkem při návrhu je pevnost drátkobetonu v tlaku, který je rozšířen o pevnost drátkobetonu

v tahu při vzniku trhlin. Dále se zohledňuje vodní součinitel a sypaná hmotnost kameniva a drátků (vliv nakypření) [1].

Drátkobeton, též označován jako SFRC – Steel Fibre-Reinforced Concrete – beton vyztužený ocelovými vlákny, je tvořen z následujících složek [1]:

- Kamenivo

Kvalita kameniva do drátkobetonových směsí by měla být obdobná jako u běžných osvědčených konstrukčních betonů. Během zpracovávání působí drátky na hrubá zrna kameniva oddalujícím účinkem a brání jejich zaklínění při hutnění. Dochází tedy k nakypření objemové jednotky betonu, a proto je nutné při návrhu drátkobetonové směsi brát ohled na třídění kameniva podle frakcí.

- Cement a voda

Pro dávkování cementu platí stejná pravidla jako u běžných betonů. Vodní součinitel by se měl pohybovat v rozmezí 0,4 – 0,5, aby byla snížena pravděpodobnost tvorby shluků drátků.

- Přísady

Jelikož bývá konzistence čerstvého drátkobetonu zpravidla velmi tuhá, doporučuje se pro snadnější zpracování a hutnění přidání ztekucujících přísad a superplastifikátorů.

- Ocelová vlákna

Existují různé druhy ocelových vláken pro drátkobetony. Odlišují se nejen tvarem, ale i pevností a druhem použitého materiálu. Řada typů se dnes vyrábí už i v České republice. Ocelová vlákna do betonu je možné rozdělit do několika skupin podle tvaru a průřezu a podle druhu materiálu použitého na jejich výrobu. Platí, že drátky se zahnutými konci nebo se zdrsňeným či jinak upraveným povrchem mají větší soudržnost s cementovým kamenem než hladké drátky. Víceméně lze podle tvaru odlišit dva typy vláken: vlákna se zahnutými kotvícími konci a vlákna s kotvením po celé délce.

Délka použitých vláken závisí na velikosti konstrukčního prvku a na velikosti a množství hrubé frakce kameniva. Předpokládá se, že by se vlákna měla při zatížení opírat o zrna kameniva a tedy zasahovat za ně. Ohybová tuhost drátků by měla být dostatečná s ohledem na způsob zpracování (míchání, ukládání, hutnění) – drátky by si měly zachovávat přímost a hrubé kamenivo nesmí způsobovat jejich deformování.

Ocelová vlákna se vyznačují vysokou pevností, vysokým modulem pružnosti a značnou ohybovou tuhostí. Pevnost ztvrdlého betonu v tahu zlepšují až o 100 %, pevnost v tlaku je ovlivněna méně – cca o 10 %. Vlákna také výrazně eliminují nebezpečí vzniku křehkého lomu betonu.

Dávkování ocelových vláken do betonu se pohybuje v rozmezí od 20 kg do 100 kg na 1 m³ betonu, nebo 0,5 – 2 % objemu betonu [4].

Podle způsobu výroby lze drátky dělit na [4]:

- Ocelová vlákna

Tato vlákna mají pevnost v tahu od 900 do 2400 N/mm² a průměr od 0,15 do 1,2 mm. Délka je v rozmezí od 12 do 70 mm podle konkrétního použití. Povrch může být hladký nebo vroubkovaný (rilovaný). Používají se zvlněná i segmentovaná vlákna s možností protikorozní ochrany pozinkováním.

- Vlákna z válcovaného materiálu

Materiál těchto vláken musí vyhovovat tahovému napětí od 300 do 1000 N/mm², délka je obdobná jako u ocelových vláken. Hlavní rozdíl spočívá v obdélníkovém profilu vláken z válcovaného materiálu, jehož šířka je pro různé typy vláken variabilní. Tato vlákna je možné vyrábět jako rovná, zvlněná, profilovaná, eventuálně i se zahnutými kotvícími konci.

- Vlákna frézovaná z brám

Frézovaná vlákna jsou dlouhá 30 mm a pevnost dosahuje 900 N/mm². Odlišnost od předchozích typů je ve vlastnostech povrchu – na jedné straně vláken je hrubý povrch, který dobře přilíná k cementovému tmelu.

Požadavky na ocelová vlákna do betonu upravuje norma ČSN EN 14889-1.

V experimentální části práce byly použity drátky Dramix 3D (obrázek 1) délky 35 mm, průměru 0,75 mm, pevnosti v tahu 1 225 MPa a modulu pružnosti 210 GPa [5]. Drátky vyrábí firma BEKAERT, jejíž sídlo je v Belgii. Tato firma začala s výrobou ocelových drátků se zahnutým koncem (kotvou) v 70. letech 20. století. V polovině 70. let byla vyvinuta technologie lepení drátků do svazků. Drátky jsou slepeny lepidlem, které je ve vodě rozpustné, a během míchání betonu se touto úpravou eliminuje nabalování drátků na sebe a tvoření jejich shluků, což je předpoklad pro rovnoměrné rozptýlení drátků v celé záměsi. V 90. letech byla vyvinuta nová

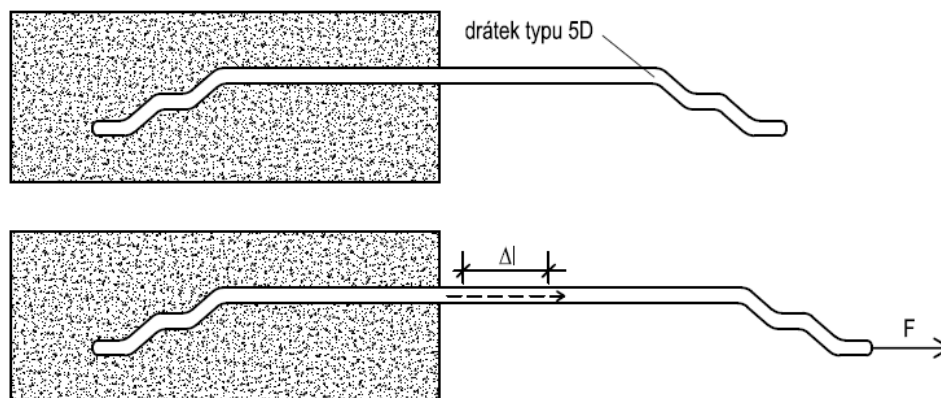
metoda dávkování drátků při výrobě betonu. Metoda je plně automatická, řízená počítačem a spočívá ve vsypávání balíků drátků o hmotnosti 250 g přímo do mixážního sila. Obaly jednotlivých balíků jsou rozpustné ve vodě. V roce 2012 začala výroba odolných drátků pro namáhané konstrukce – typů 4D a 5D. Tyto výrobky vznikly zdokonalením drátků typu 3D a svým tvarem zajišťují lepší ukotvení v betonu, vyšší tahovou únosnost a vyšší tažnost.



Obr. 1: Ocelová vlákna Dramix 3D

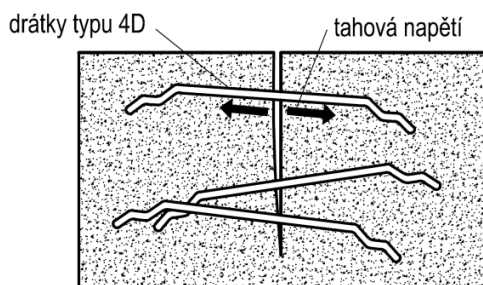
Drátky Dramix jsou charakteristické zahnutými konci pro lepší soudržnost s betonem. Zahnuté konce fungují jako zakotvení rozptýlené výztuže v betonu a způsobují plné využití únosnosti drátků při namáhání tahem. Po vzniku trhliny je namáhání přenášeno drátky a při dále se zvětšující síle přestanou drátky plnit svou funkci, protože je dosaženo tahové únosnosti drátků a kotev a dochází k jejich vytržení (typy 3D a 4D) nebo přetržení (typ 5D). Povrch vláken je možné upravit galvanizací zinkem.

Drátky Dramix 5D zabezpečují svým tvarem únosnost v tahu až 1 kN a jsou ze všech tří uvedených druhů nejodolnější. Při tahovém namáhání se nedeformuje kotva samotná, ale přímá část drátku. Nedochozí tedy k pohybu kotvy drátku, ale k prodloužení té části, kterou je v trhlíně přenášena tahová síla, čímž je docíleno zvýšení pevnosti betonu. Po dosažení mezní síly selže drátek přetržením, nikoliv vytržením. Toto je zajištěno speciálním tvarem kotvy drátku (obrázek 2). Drátky tohoto typu vykazují nejvyšší únosnost při daném poměru délky a průměru a jejich využití je možné pro namáhané části konstrukcí pozemního stavitelství nebo pro mostní stavitelství.



Obr. 2: Schéma působení drátků typu 5D [5]

Tvar drátků Dramix 4D (obrázek 3) umožňuje eliminaci trhlin od 0,1 do 0,3 mm, což je vhodné např. pro vodotěsné betonové konstrukce. Při tahovém namáhání se drátek tohoto typu postupně vytahuje z betonu za současného prodlužování. Oproti drátkům typu 5D mají tyto komponenty méně dokonalé kotvení, což vysvětluje způsob selhání drátků při mezní síle. Použití je výhodné i u namáhaných litých podlah v průmyslových provozech nebo v konstrukcích desek cementobetonových krytů pozemních komunikací. Tato technologie je vhodná i pro konstrukce, které jsou vyztuženy jak rozptýlenou, tak klasickou výztuží.



Obr. 3: Působení drátků v trhlině [5]

Drátky typu 3D, které byly použity pro tuto bakalářskou práci, jsou ze všech tří typů drátků geometricky nejjednodušší a nejméně únosné. Charakteristiky a princip kotev je shodný s typem 4D. Tyto drátky se používají zejména pro tunelová ostění a pro podlahy a povrchy betonových chodníků, kde mohou do jisté míry nahradit tradiční výztuž [5].

Oproti tradičnímu způsobu vyztužování spočívá výhoda drátků v úspoře času při betonování a s tím souvisejícím snížením finančních nákladů a v jednoduché technologii provádění.



Obr. 4: Selhání drátků typu 3D vytažením při zatěžování v tahu ohybem (hranol Z4II 3)

Mezi české výrobce drátků do betonu patří např. firma Zelený – START. Široký sortiment drátků nabízí firma Arcelor Mittal (obrázek 5).



Obr. 5: Sortiment drátků firmy Arcelor Mittal, typ HE, TABIX a TWINCONE [6]

1.3.2 Technologie provádění drátkobetonových konstrukcí

- Klasická technologie

Při provádění drátkobetonových konstrukcí je možné použít klasickou technologii, tj. postupné ukládání drátkobetonové směsi do bednění a její následné hutnění vibrováním např. vnější vibrací (příložné vibrátory, vibrační stoly). Je třeba však zohlednit konzistenci směsi, která je klíčová pro její zpracování [1].

- Technologie nástřikem [7]

Stříkané betony jsou známé již od počátku 20. století, vlákna se začala přidávat až v 70. letech. Na našem území byl stříkaný beton poprvé použit ve 30. letech 20. století při sanaci klenby Krasíkovského tunelu. Dnes je nástřik základní technologií při stavbě tunelových ostění.

Existují dva způsoby nástřiku – suchý a mokrý. Suchý způsob nástřiku spočívá v přidání potřebného množství vody do suché betonové směsi až v prostoru komory před tryskou stříkacího stroje. Takto přidávaná voda často obsahuje urychlující přísadu. Nevýhodou tohoto postupu je poměrně nepříjemné pracovní prostředí z důvodu prašnosti. Při nástřiku mokré směsi se nastříkává betonová směs s předem přidanou vodou. Tento způsob nástřiku dnes celosvětově převládá a jeho výhodou je, že vede většinou k stejnomějším fyzikálně mechanickým vlastnostem drátkobetonu.

Ocelová vlákna pro stříkané betony mohou být přímá, nebo tvarovaná z drátu taženého za studena. Použití ocelových vláken stříhaných z ocelových plechů je možné, avšak méně časté. Délka vláken bývá zpravidla 25 – 35 mm a drátky, které mají náchylnost k tvoření ježků, by se u stříkaných betonů kvůli spadům neměly používat. Při použití drátků je vhodná mokrá metoda nástřiku, při suché cestě hrozí nerovnoměrné rozptýlení drátků a vysoký spad. Ze syntetických vláken se aplikují většinou polypropylénová vlákna, která jsou dostatečně jemná a výrazným způsobem zvyšují požární odolnost stříkaného betonu.

Při návrhu drátkobetonové směsi je potřeba mít na paměti, že průměr stříkacího potrubí by měl být větší než délka drátku, aby nedocházelo k usměřování drátků během proudění potrubím a k jeho ucpávání. Problémem může být pružné chování drátků při nástřiku, kdy se vlákna odráží od podkladu, na který jsou nanášena, a je tedy nutné počítat s jejich vyšším spadem. Bylo zjištěno, že tento spad má jiné složení než beton, který se udrží na podkladu, obsahuje totiž větší množství ocelových vláken. Je tedy nutné zajistit vždy co nejrovnoměrnější rozptýlení vláken v betonu.

1.3.3 Vlastnosti čerstvého drátkobetonu

Při výběru forem zkušebních těles se musí brát ohled na minimální rozměr tělesa, který by měl podle [8] být alespoň dvojnásobek délky drátku. Příliš malé rozměry zkušebního tělesa mohou ovlivnit uspořádání drátků v betonu a tím způsobit anizotropní chování tělesa při namáhání.

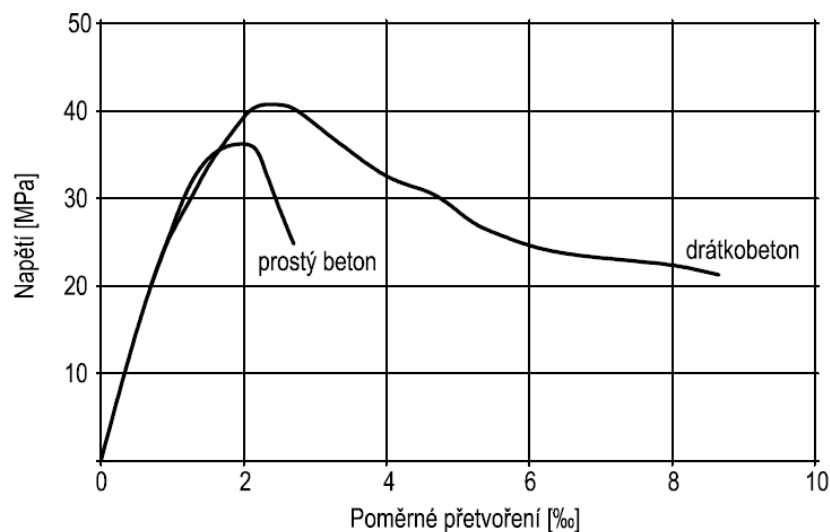
Pohybuje-li se obsah drátků v betonové směsi od 100 do 150 kg.m⁻³, lze směr jen velmi obtížně zpracovat. Volba vhodné zkoušky zpracovatelnosti čerstvého drátkobetonu závisí na množství přidávaných drátků, na hodnotě vodního součinitele a na obsahu kameniva hrubé frakce. Obecně lze doporučit zkoušku stupeň zhutnitelnosti dle „ČSN EN 12350 – 6 Zkoušení čerstvého betonu – Stupeň zhutnitelnosti“ s měřením času potřebného k úplnému zhutnění. Je-li obsah drátků nízký, lze použít i zkoušku rozlitím podle „ČSN EN 12350 – 7 Zkoušení čerstvého betonu – Zkouška rozlitím“. Metody, které jsou založeny na mechanickém zpracování betonové směsi (zkouška sednutím podle Abramse, zkouška VeBe), se nemají používat. Při těchto zkouškách dochází vlivem užití ocelové propichovací tyče k deformaci a vzájemnému propletení drátků, což má významný vliv na výsledek zkoušky. Drátkobeton také vykazuje kvůli přítomnosti drátků vyšší obsah vzduchu [1].

Při míchání a následném zpracování betonu by měl být kladen důraz na co nejrovnoměrější rozptýlení drátků v betonové směsi. Příliš jednosměrné uspořádání drátků vede k anizotropii drátkobetonů a podle způsobu a směru namáhání může působit pozitivně i negativně. Platí, že při ukládání drátkobetonu do bednění zaujímají drátky náhodnou polohu, s výjimkou oblastí styku betonu s elementy bednění. Při plnění bednění může mít pohyb betonu vliv na uspořádání drátků, stejně tak příliš intenzivní hutnění způsobuje sedimentaci drátků a jejich pohyb ve směru gravitace. Všechny tyto okolnosti do jisté míry ovlivňují výslednou nosnost konstrukce [8].

1.3.4 Vlastnosti ztvrdlého drátkobetonu

- Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je závislá na podobných okolnostech jako u běžných betonů a je zhruba o 10 až 30 % vyšší než u prostého betonu. Zkouší se na obdobných tělesech jako u betonů bez rozptýlené výztuže. Pro drátkobeton je charakteristické duktilní chování a reziduální pevnost i po vzniku trhliny, které se vyznačuje tím, že daný konstrukční prvek je schopen přenášet zatížení vyšší než vrcholové, a to při poklesu nebo stejné úrovni zatížení (obrázek 6) [1]. Z obrázku je patrné velká schopnost plastického přetváření po dosažení maximálního napětí, kdy se v trhlínách aktivují drátky a začnou působit duktilně. Klesne-li napětí na 50 %, má pracovní diagram drátkobetonu vodorovný směr a přetváření se podobá tečení. Mezní poměrné přetvoření je až trojnásobné v porovnání s prostým betonem. U prostého betonu dochází k porušení křehkými trhlínami z důvodu hlavních tahových napětí [8].



Obr. 6: Pracovní diagram při namáhání tlakem drátkobetonu a prostého betonu [1]

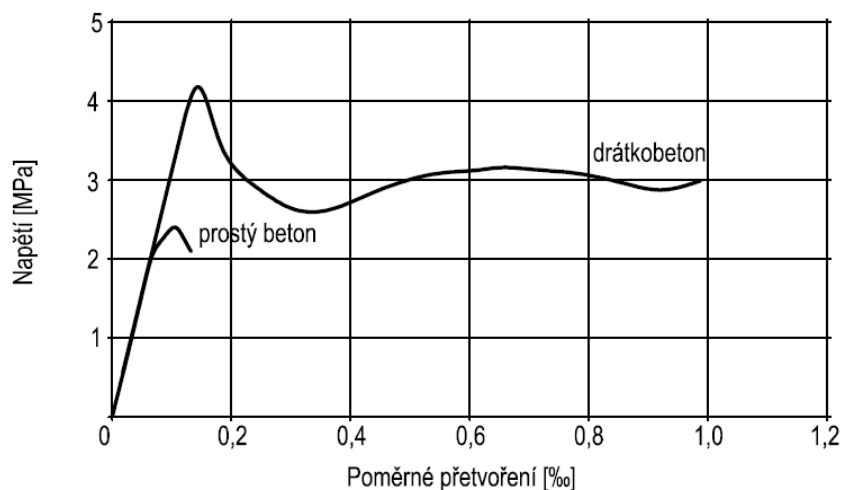
- Pevnost v tahu

Pevnost v tahu u drátkobetonů je o 50 až 100 % vyšší než u prostého betonu a závisí na množství přidaných drátků, jejich typu (tvar kotev) a na geometrii zkušební tělesa. Právě přidání rozptýlené ocelové výztuže může do jisté míry eliminovat typický problém prostého betonu – velmi nízkou pevnost v tahu.

Pevnost v příčném tahu se provádí pro svou jednoduchost na tělesech tvaru krychle o délce hrany 150 mm. Pro hrubé zjištění rovnoměrnosti rozprostření a orientace drátků v betonu je možné provést druhou stejnou zkoušku na porušeném tělese v rovině kolmé na rovinu, ve které proběhla první zkouška [8].

Pevnost v tahu ohybem se provádí standardně na trámčích. Pracovní diagram při zatížení v tahu ohybem vykazuje zpočátku běžný průběh (obrázek 7). Drátky působí příznivě proti vzniku počátečních mikrotrhlin. Po dosažení maximální hodnoty zatížení je však u drátkobetonů na rozdíl od běžných betonů zachována schopnost přenášet zatížení, která závisí na odporu drátků překlenujících vzniklou trhlinu proti vytržení nebo přetržení, dále na jejich typu, ukotvení a orientaci. Po vzniku trhliny dochází k aktivaci drátků a drátkobeton je schopen, jako houževnatý materiál, přenášet reziduální tahová napětí. Mezní protažení drátkobetonu je až desetkrát větší než u prostého betonu, který se poruší křehkým lomem už při malé deformaci [1].

Dle [1] se přítomnost drátků více projevuje na tahové pevnosti u betonů nižších pevnostních tříd (do C 16/20). U těchto betonů nedojde k úplné aktivaci drátků, které se díky malé tahové pevnosti betonu vytrhávají při zatížení z matrice. U betonů vyšších pevnostních tříd je drátek v trhlině plně využit a v kombinaci s kvalitním ukotvením se poruší přetržením při růstu trhliny. Vliv drátků na pevnost kvalitnějších betonů se projevuje méně.



Obr. 7: Pracovní diagram při namáhání tahem drátkobetonu a prostého betonu [1]

- Modul pružnosti

Modul pružnosti je ovlivněn přidáním drátků do betonu jen málo. Poissonovo číslo nabývá u drátkobetonů stejných hodnot jako u prostých betonů [8].

- Soudržnost s betonářskou výztuží

Soudržnost drátkobetonu s klasickou betonářskou výztuží je vyšší než u prostých betonů. Tento fakt je důležitý zejména u nosných prvků z železového drátkobetonu [1].

- Smršťování a dotvarování

Vliv drátků na smršťování a dotvarování je pozitivní. Při koncentraci drátků 80 kg.m^{-3} se podle dosud provedených pozorování zmenší hodnoty smršťování až o 40 % oproti hodnotám, které vykazuje prostý beton. Vyšší obsah cementového pojiva může také u drátkobetonů způsobit určité změny tvaru při zrání betonu [1].

- Víceosé namáhání

Přítomnost drátků pozitivně ovlivňuje chování prvků při víceosém namáhání, např. v oblasti podpor u spojitých nosníků, nebo pod bodovým zatížením, tedy na místech konstrukcí, kde lze očekávat vyšší hodnoty posouvajících sil [8].

- Rázové zatížení

Odolnost povrchu betonu vůči rázovému zatížení je u betonu s přidanými drátky obecně vyšší. Drátky pozitivně ovlivňují houževnatost konstrukce, uvádí se, že energie potřebná k přeražení trámku rázem je u drátkobetonů s 80 kg drátků na 1 m³ záměsi až desetkrát vyšší než energie potřebná k přeražení trámku z prostého betonu [1]. Tyto vlastnosti drátkobetonu se využívají u dynamicky namáhaných konstrukcí (vozovky pozemních komunikací, železniční pražce, piloty).

Orientační zkoušky rázové pevnosti lze provádět Charpyho kladivem na tělesech tvaru desek s rozměry 40x100x400 mm. Údery nutné na porušení tělesa je nutné opakovat až do vzniku trhliny. Rázová pevnost se určí na základě sumy energie jednotlivých úderů.

- Dynamické namáhání

Přidání drátků pozitivně ovlivňuje chování při dynamickém namáhání. Po vzniku trhlin vykazuje drátkobeton vyšší hodnoty tlumení kmitů než prostý beton, dochází tedy ke snížení amplitudy kmitání konstrukce při dosažení vlastní frekvence [8].

- Koroze povrchu

Obavy z nebezpečí zvýšené náchylnosti drátkobetonových konstrukcí ke korozi povrchových ploch, které jsou vystaveny přímému působení negativních vlivů (klimatické podmínky, chemické působení), se prokázaly jako neopodstatněné a k odprýskávání betonu v takových místech podle dosavadních zkušeností zpravidla nedochází. Z estetických důvodů je možné použít speciální povrchové úpravy, např. u průmyslových podlah se jedná o položení tenké svrchní povrchové cementové vrstvy. Při této úpravě dojde nejen k překrytí vyčnívajících drátků, ale také ke zvýšení povrchové odolnosti podlahy. Dále je možné použít drátky z oceli se speciální úpravou proti korozi [8].

- Tepelná a elektrická vodivost

Tepelná a elektrická vodivost drátkobetonů je shodná s betony bez drátků [8].

1.3.5 Určení obsahu drátků v betonu

Pokud se přidávají drátky do betonu až na staveništi, je vhodné ověřit, zda jsou drátky v celé záměsi rovnoměrně rozděleny. Pro tyto účely se používají tyto způsoby [8]:

- Čerstvý beton
 - manuální zkouška rozplavením

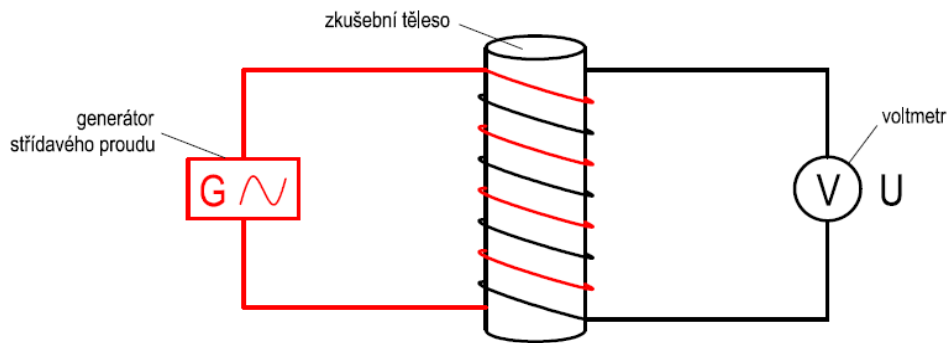
Drátky se z odběrů o známém objemu vyplavují vodou nebo za použití magnetů, nakonec je určena hmotnost oddělených drátků v jednotlivých odběrech provedených v různých místech záměsi.
 - metoda magnetické indukce

Nádoba tvaru válce se naplní čerstvým betonem a změří se indukční napětí vyvolané v drátkobetonové směsi. Ze zjištěného napětí se vyjádří obsah drátků pomocí empiricky stanovených křivek.

- Ztvrdlý beton
 - manuální metody

Vývrt tvaru válce odebraný z konstrukce se rozruší pomocí vhodného mechanismu. Drátky se od betonu mohou oddělovat magneticky nebo manuálně.
 - metoda magnetické indukce

Princip je obdobný jako v případě zkoušení čerstvého drátkobetonu. Zkouška je založena na principu elektromagnetické indukce a probíhá na tělesech tvaru válce (obrázek 8). Jelikož ocelové drátky v tělese mají ferromagnetické vlastnosti, fungují jako jádro cívky. Pokud ale beton obsahuje kamenivo s vyšším množstvím železa, může dojít ke zkreslení výsledků. Po přivedení střídavého napětí G na válec je změřeno napětí U , které se indukuje na cívce – válci. Pomocí kalibračních křivek se pak vyjádří přibližný obsah drátků ve zkoušeném tělese [9].



Obr. 8: Schéma metody magnetické indukce [9]

- CT analýza (Computer Tomography)

Metoda trojrozměrné počítačové tomografie je vhodná pro určení přesné polohy jednotlivých drátků. Spočívá ve vyhotovení velkého množství rentgenových snímků zkušebního tělesa. Různé složky drátkobetonu mají odlišné absorpční a odrazové vlastnosti, což je podstata analýzy vnitřní struktury pomocí rentgenového záření. Těleso je snímáno z různých úhlů a získaná data jsou zpracována výkonným softwarem. Výsledkem je trojrozměrný model tělesa s dobře patrným vnitřním uspořádáním drátků [8].

1.4 Vlákno-beton

Polypropylénová vlákna se používají jako přísada do betonu z důvodu omezení vzniku trhlin při plastickém smršťování a sedání. Takový beton je označován zkratkou PFRC – Polypropylen Fibre-Reinforced Concrete – beton vyztužený polypropylenovými vlákny. Beton s těmito vlákny je celkově houževnatější a spolehlivější materiál. Polypropylénová vlákna mají nízký modul pružnosti, zlepšují tedy modul pružnosti betonu, ovlivňují jeho reologické vlastnosti a zvyšují adhezi čerstvého betonu. Vliv na vlastnosti vlákno-betonu má objem přidaných vláken a jejich rovnoměrné rozptýlení. Pro dobrou smáčitelnost a dokonalé rozmísení vláken v celém objemu betonu jsou vlákna lubrikována. Tato lubrikace je vodou rozplavitelná. Při míchání čerstvého betonu mají vlákna tu výhodu, že jsou pružná a tažná, a nedochází tedy k jejich porušení při mechanickém zpracování. Obecně je mechanická pevnost a soudržnost polypropylénových vláken nižší než u ocelových vláken a k vyčerpání jejich únosnosti dochází vytržením vláken z matrice nebo jejich přetržením [4]. S tím souvisí jejich nevhodnost do konstrukcí namáhaných

ohybem nebo do štíhlých konstrukcí, naopak vhodná jsou do průmyslových podlah, kde se může uplatnit i velká produktivita strojního hlazení.

Polypropylen, z kterého se tato vlákna vyrábí, je látka odolná proti kyselinám i zásadám nebo proti biologickému působení. Vlákna jsou nenasákavá, mají tedy stejné vlastnosti ve vlhkém i vysušeném stavu [4].

1.4.1 Druhy polypropylénových vláken

Polypropylénová vlákna lze podle nabídky na současném trhu rozdělit do těchto základních skupin:

- Vlákna monofilamentní (vlasová, tažená)

Hlavním efektem monofilamentních vláken je redukce vzniku a rozvoje trhlin v tuhoucím plastickém betonu. Jsou vyráběna vytlačováním taveniny tryskou do vzduchu a následným tažením. Až po výrobě jsou rozdělena na požadovanou délku s hladkým kruhovým průřezem. Průměr monofilamentních mikrovláken bývá od 15 do 40 μm , délka 3 až 12 mm a tloušťka 0,02 mm. Vyrábí se také makrovlákna s průměry až do 1 mm. Za optimální vlákna se považují zvlněná vlákna, kdy připadá 10 až 12 obloučků na 10 mm délky vlákna. Dávkování je většinou 2 až 3 g na 1 kg cementu, zpravidla tedy 1 až 2 kg na 1 m^3 betonu [4].

- Vlákna fibrilovaná (rozvlákněná, síťovaná)

Fibrilovaná vlákna se vyrábí z předepruté polypropylénové fólie rozřezáním na určitou délku. Jejich povrch je drsnější a průřez hranatý s běžnými rozměry 0,03 x 0,1 mm. Drsnost povrchu má za následek zvýšení účinnosti kotvení vlákna v cementové matici a z toho vyplývá význam tohoto typu vláken při tahovém namáhání ztvrdlého betonu. Průřez vláken je několikanásobně větší než monofilamentních mikrovláken, což sice znamená, že dosahují větších pevností, při stejné dávce je ovšem počet vláken a s tím související jejich výztužný účinek nižší [4].

- Vlákna sdružená

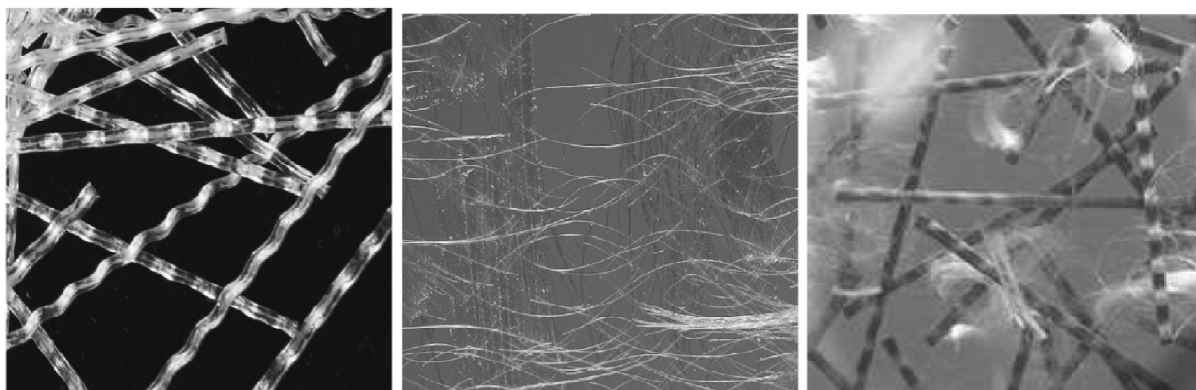
Nově jsou používána i vlákna vyrobená kombinací obou výše uvedených postupů, tzv. sdružená vlákna. Vlákna mají podobu zkroucených svazků monofilamentních a fibrilovaných vláken, jejichž pevnost dosahuje až 700 MPa. Vlastnosti obou typů vláken se tedy příznivě doplňují a jejich kombinace výrazně zvyšuje houževnatost betonu. Průměr sdružených vláken bývá větší než 0,3 mm [2].

Požadavky na polymerová vlákna do betonu upravuje norma ČSN EN 14889-2.

1.4.2 Použití polypropylénových vláken

Z důvodu vyšší odolnosti betonů s polypropylénovými vlákny vůči účinkům požáru se tyto kompozity často používají při výstavbě tunelových ostění. Beton vyztužený polypropylénovými vlákny byl poprvé na území České republiky použit při stavbě ostění tunelu na dálnici D 47 v Klímkovicích u Ostravy. Během vysokých teplot při požáru dochází k vysoké kontrakci a následnému vypaření polypropylénových vláken a ve struktuře betonu tedy vznikají jemné póry, do kterých se vlhkost obsažená v betonu v důsledku silných žárů může rozpínat. Nedochozí tedy k takové destrukci a oprýskávání jako v případě betonu bez vláken. Pro vláknobeton se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám se osvědčila polypropylénová vlákna o průměru menším než 20 μm a délky zhruba 6 mm dávkovaná v množství 2 kg na 1 m^3 betonu [10].

V této bakalářské práci byla použita vlákna Texzem (Obrázek 10) slovenské firmy Bonar geosynthetics délky 35 mm, která jsou vyrobena z fibrilovaných polypropylénových pásků. Tato vlákna se používají nejen do betonu, ale i jako výztuž zemního tělesa. Vlákna umožňují efektivní hydrataci a dosažení vyšší pevnosti po 24 hodinách od zpracování a redukuje nebezpečí odprýskávání a napětí při plastickém vysychání. Působí rovněž příznivě při únavovém namáhání, při zatížení mrazem a omezují smršťování a dotvarování tělesa pod vlivem stálého zatížení (tečení). Vlákna jsou odolná proti působení chemikálií, prostředí s vysokým pH, UV záření a působení mikroorganismů. Při dávkování vláken 1 kg na 1 m^3 uvádí výrobce zvýšení pevnosti v tahu za ohybu z 2,2 MPa na 3,4 MPa a při dávkování 3 kg na 1 m^3 stoupne pevnost až na 4,2 MPa [11].



Obr. 9: Makrovlákna, mikrovlákna a sdružená vlákna firmy Rindler [12]

Mezi další firmy patří např. česká firma Fibribet, která nabízí kromě polypropylénových vláken také polymerová vlákna, která mohou svými vlastnostmi do jisté míry nahradit i ocelová vlákna. Dalším výrobcem vláken je firma Sika CZ, nebo rakouská firma Rindler. Výběr ze sortimentu vláken této firmy je na obrázku 9.



Obr. 10: Fibrilovaná polypropylénová vlákna

1.5 Použití vláknobetonů a drátkobetonů ve stavební praxi

- Průmyslové podlahy z drátkobetonu [13]

Jedno z nejtypičtějších použití drátkobetonu představují průmyslové podlahy. Jedná se o relativně tenké betonové deskové konstrukce, které jsou po celé své ploše nesené podkladem. Podlahy bývají vystaveny mimořádně vysokým zatížením (skladové haly), působení agresivních chemických látek (chemické provozy), teplotním změnám a dynamickým jevům – např. brzdným účinkům a třením. Všechny tyto vlivy je nutno zohlednit již při návrhu podlahy, aby bylo možné předejít nadměrným přetvořením, trhlinám a poškození při užívání podlahy. Další požadavek souvisí s postihnutím objemových změn v době zrání betonu (smršťování). Vysoké nároky jsou dnes kladeny i na rovinnost podlahy, což souvisí s používáním vysokozdvizných vozíků s malými tvrdými koly. Povrchy podlah mohou být upraveny dvěma způsoby: Buďto se konečná úprava povrchu provádí současně s betonáží, nebo je mezi betonáží desky a prováděním povrchové úpravy nutná technologická přestávka. V prvním případě hovoříme o takzvaných

vsypech a potěrech, ve druhém případě jde o nátěry, stěrky nebo dlažby. Pro konstrukci podlah se používají běžné betony do C 50/60, perspektivní oblast zastupují vysokohodnotné betony a samozhutnitelné betony.

Z hlediska typu výztuže existují podlahy vyztužené klasickou prutovou výztuží, rozptýlenou výztuží a předepnuté podlahy. Jednotlivé druhy lze i vzájemně kombinovat.

Betony podlah s rozptýlenou výztuží tvořené ocelovými vlákny mají odlišné mechanické vlastnosti od prostých betonů jak v prvních hodinách tuhnutí směsi, tak i po ztvrdnutí. Mají schopnost přenášet větší ohybové momenty a jejich statická účinnost se projevuje v celém příčném profilu na rozdíl od betonových podlah vyztužených klasicky.

- Prefabrikáty – trouby, štěrbinové žlaby, skruže, schodnice, nadokenní překlady, betonová svodidla, předepnuté pražce, vazníky a TT panely [4]
- Cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací a letištních ploch
- Tunelová ostění ze stříkaného vláknobetonu
- Mostovky, prefabrikované mostní římsy
- Základové desky (hlavně při dynamickém namáhání)
- Tenkostěnné konstrukce (obtížné umístění klasické výztuže)
- Nádrže (požadavek na nepropustnost)
- Stabilizace svahů [4]

2 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí

2.1 Historie nedestruktivního zkoušení

Vývoj nedestruktivních metod zkoušení betonových konstrukcí začal ve 40. letech 20. století. Teorie těchto postupů byla založena na dobře známých fyzikálních zákonitostech, které byly již dříve používané pro zkoušení oceli ve strojírenství. Potřeba obnovy po druhé světové válce, nedostatek oceli a dostupnost betonu vytvořily živnou půdu pro rozmach tohoto oboru a s tím související nutnost vyvinout přesný a spolehlivý systém zkoušení vlastností betonu. Podmínky, ve kterých se nachází beton v konstrukci, se v mnoha ohledech liší od laboratorních podmínek, kde se připravují, ošetřují a zkouší zkušební tělesa a na tomto místě nachází nedestruktivní zkoušky své největší uplatnění.

První pokusy s nedestruktivními zkouškami spočívaly v rozezvučení tělesa mechanickými kmity [14]. Tato metoda byla běžná například v továrnách na porcelán, kdy se po poklepání na hotový výrobek dalo podle zvuku empiricky určit, zda výrobek neobsahuje okem neviditelné trhliny. Dnes se tyto znalosti využívají v železničním stavitelství – při poklepání kladivem na kolejnice je možné rozpoznat jejich lomy, nebo při provádění betonových konstrukcí do bednění – při úderu na bednění je zkušební člověk schopen určit míru ztuhnutí uložené betonové směsi. Z principu šíření mechanických kmitů ve hmotě vychází v současné době používané a normované metody Schmidových tvrdoměrů, ultrazvuková impulzová metoda nebo rezonanční metoda. Jsou založeny na faktu, že každé těleso je při odpovídajícím buzení schopno kmitat. Tato vlastnost těles je ovlivněna jejich materiálem (elastické vlastnosti) a tvarem. Nachází-li se v tělese trhlina, dojde ke změně a k útlumu kmitů tělesa, což je změřeno vhodným přístrojem a měření následně vyhodnoceno. Správná interpretace naměřených hodnot nedestruktivních měření je podmíněna znalostí teoretických základů konkrétní metody.

Výhody nedestruktivního zkoušení:

- jednoduché a rychlé provedení zkoušek,
- zkouška se provádí přímo na konstrukci,
- nedochází k porušení konstrukce,
- možnost opakování měření na stejných místech i po několika letech,
- nízká finanční náročnost.

Nevýhody nedestruktivního zkoušení:

- je nepřesné,
- zkoušení zasahuje většinou jen povrchové vrstvy betonu,
- nutnost vytvoření kalibračních vztahů,
- nutnost doplnit nedestruktivní zkoušky destruktivními zkouškami (pro upřesnění kalibračních vztahů).

Kromě destruktivních zkoušek existují i tzv. semidestruktivní metody zkoušení. Jedná se o jádrové vývrty, při nichž je z konstrukce odejmut vzorek betonu, který je následně upraven pro běžnou destruktivní zkoušku. Patří sem i zkouška síly na vytržení, kdy se z konstrukce vytrhává těleso tvaru válce. Cílem je získat představu o pevnosti podpovrchových vrstev betonu. Zkušební místo by mělo být vhodně zvoleno tak, aby nedošlo k ovlivnění stability a únosnosti zkoušené konstrukce [15].

V praktické části této bakalářské práce byly na tělesech všech záměsí provedeny dvě nedestruktivní zkoušky betonu: ultrazvuková impulzová metoda a metoda měření odrazovým tvrdoměrem (Schmidtovým kladívkem typu N). Tyto způsoby zkoušení jsou v následujícím textu detailně popsány. Pro úplnost přehledu nedestruktivních zkoušek je uveden stručný popis principu některých vybraných normových a nenormových, zejména dříve používaných metod (špičáková metoda, metoda brusných kotoučů, Waitzmannovo kladívko atd.).

2.2 Metody nedestruktivního zkoušení betonu

Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí je zkoušení betonu na zkušebních tělesech, konstrukcích nebo dílcích, při kterém se beton vůbec neporuší, nebo pouze do té míry, že není ohrožena jeho statická funkce [16].

Samotná nedestruktivní zkouška zahrnuje přípravu měření, výběr zkušebních míst, nedestruktivní měření a vyhodnocení výsledků. Výsledky z jedné nedestruktivní zkoušky je vhodné doplnit měřeními destruktivními na vyrobených tělesech nebo na tělesech odebraných z konstrukce, případně druhou nedestruktivní zkouškou na stejném zkušebním místě. Cílem tohoto postupu je eliminace chyb a zpřesnění konečných výsledků.

Proto lze nedestruktivní měření považovat za orientační a pouze při stanovení příslušných kalibračních vztahů, které se určí podle provedených destruktivních zkoušek, nebo doplněním druhou nezávislou nedestruktivní zkouškou, je možné tyto hodnoty považovat za upřesněné [16].

Většina destruktivních zkoušek stanovuje vlastnosti nepřímo, tj. sledovaná vlastnost betonu je určena z jiné jeho naměřené vlastnosti (například dynamický modul je stanoven z měření času průchodu ultrazvukových vln tělesem).

Nedestruktivními zkouškami je možno určit [16]:

- Rovnoměrnost betonu
 - Usuzuje se na ni z výsledků zkoušek pevnosti v tlaku, tahu, rychlosti šíření ultrazvukových vln nebo objemové hmotnosti.
- Pevnost betonu v tlaku a tahu
 - Tvrdoměrné metody
 - Ultrazvuková impulzová metoda
 - Kombinace ultrazvukové impulzové metody a tvrdoměrné metody
- Dynamický modul pružnosti betonu
 - Ultrazvuková impulzová metoda
 - Rezonanční metoda
- Objemová hmotnost betonu
 - Radiometrická metoda
 - Ultrazvuková impulzová metoda
- Vlhkost betonu
 - Radiometrická metoda
- Hutnost betonu
 - Ultrazvuková impulzová metoda
 - Radiometrická metoda
- Množství a poloha výztuže
 - Radiografická metoda
 - Elektromagnetický indikátor výztuže

- Únosnost a tuhost konstrukce při statickém zatížení
 - Stanoví se na základě naměřené pevnosti v tlaku, modulu pružnosti a polohy a množství výztuže v požadovaných místech.
- Mrazuvzdornost a vodotěsnost betonu
 - Stanoví se z naměřené pevnosti betonu v tlaku, objemové hmotnosti nebo hutnosti pomocí kalibračních vztahů.
- Vady a poruchy betonu
 - Vady povrchových vrstev betonu
 - Na tyto vady se usuzuje z nerovnoměrnosti betonu, na těchto plochách se zpravidla navyšuje počet zkušebních míst.
 - Vady ve vnitřní části betonu
 - Jedná se o trhliny a pukliny, cizí tělesa v betonu, nez hutněná místa nebo hnízda kameniva nebo cementu. Tyto vady lze zjistit ultrazvukovou impulzovou metodou nebo radiograficky.

Počet zkušebních míst, jejich velikost a rozmístění závisí na zvolené zkušební metodě, stavu betonu konstrukce a na objemu zkoušené konstrukce. Platí, že zkušební místa by měla být rozložena rovnoměrně po ploše konstrukce a je vhodné je volit s ohledem na stav povrchové vrstvy betonu.

Pro upřesnění nedestruktivních zkoušek je výhodné odebrat zkušební vzorky přímo z konstrukce, a to z míst, kde byly provedeny nedestruktivní zkoušky. Beton se vyřeže z konstrukce pilami na kámen ve formě nepravidelného bloku a následně se upraví do tvaru normových zkušebních těles. Válce se získávají jádrovými vrty. Počty takto odebraných těles závisí na velikosti konstrukce a na účelu zkoušení. Odběr vzorků nesmí ohrozit stabilitu konstrukce [16].

Pro nedestruktivní vyšetřování konstrukcí je možné použít níže uvedené metody. Metodě Schmidových tvrdoměrů a ultrazvukové impulzové metodě jsou věnovány zvláštní podkapitoly.

2.2.1 Radiografická metoda

Měření radiografickou metodou se provádí na konstrukcích na staticky významných místech a jeho cílem je zjištění množství, polohy, případně i průměru výztuže v betonu. Železobeton se zkouší prozařováním rentgenovými nebo gama paprsky. Na jedné straně konstrukce je zdroj záření, na opačné straně je umístěn citlivý fotografický materiál, nejčastěji radiografický film o rozměrech 0,3 x 0,4 m. Hmotu betonu nacházející se mezi zářičem a filmem pohlcuje část vysílaného záření úměrně své hmotnosti. Doba nutná pro pořízení snímku je závislá na tloušťce konstrukce, přičemž platí, že pro gama paprsky je potřeba delší doba expozice než pro rentgenové paprsky. Při měření je nutno dbát na to, že ionizující záření je škodlivé lidskému zdraví [14].

Polohu výztuže je možné určit také magnetickým indikátorem výztuže (pachometrem), který funguje na principu elektromagnetických změn, které jsou zaznamenány, pokud je v blízkosti měřiče ocelový prvek – prut výztuže. Dosah přístroje do hloubky a jeho schopnost indikace výztuže je cca 160 mm a závisí na konkrétním typu použitého přístroje [15].

2.2.2 Radiometrická metoda

Radiometrickou metodou je možné stanovit objemovou hmotnost a vlhkost materiálu. Zdrojem záření gama pro určení objemové hmotnosti jsou radioizotopy kobaltu ^{60}Co , cesia ^{137}Cs a iridia ^{192}Ir . Pro stanovení vlhkosti se používají rychlé neutrony atomu vodíku. Po průchodu ionizujícího záření betonem dochází k jeho zeslabení, což je změřeno přijímačem umístěným na opačné straně konstrukce a následně vyhodnoceno [14].

2.2.3 Tvrdoměrné metody

Tvrdoměrné metody umožňují nepřímo stanovit některé vlastnosti betonu, zpravidla pevnost v tlaku [17]. Podle druhu použitého způsobu zkoušení se získá hodnota ukazatele nedestruktivní zkoušky (velikost odrazu, počet rázů, rozměry vtisku atd.), která se pomocí kalibračních vztahů převede na hledanou fyzikálně mechanickou vlastnost. Tvrdoměrné zkoušení předpokládá homogenitu betonu, takže rozdíly v pevnostech vedle sebe ležících zkušebních míst jsou statisticky zanedbatelné. Důležitý předpoklad pro tvrdoměrné zkoušení je i homogenita do hloubky, beton v jádru konstrukce by měl mít stejné vlastnosti jako beton na povrchu [15].

Na nedestruktivní zkoušení tvrdoměry se uplatňuje řada vlivů. Jedná se zejména o vlhkost betonu, hutnost betonu, zrnitost kameniva, stáří betonu nebo napětí v betonu. Vlhkost a stáří betonu lze při vyhodnocování výsledků zohlednit součiniteli uvedenými např. v ČSN 73 1373.

V následujícím textu je uveden přehled základních i méně používaných tvrdoměrných metod. Schmidovým tvrdoměrem je věnována zvláštní podkapitola.

- Špičákové tvrdoměrné metody

Do této kategorie nedestruktivních metod patří dnes již málo nepoužívaný a nenormový Maškův a Cigánkův špičák, oba vyvinuté v ČSSR. Obě metody jsou subjektivní a bývaly používány spíše jako informativní a doplňkové k ostatním druhům měření. Hlavní využití spočívalo v možnosti zkoušení ne plně vyzrálých betonů, např. při kontrole po odbedňování. Zkoušení Maškovým špičákem je založeno na zaražení ocelového dláta s jehlanovým zakončením předepsaných rozměrů 20 údery do betonu pomocí kladiva o hmotnosti 2 kg z výšky 70 cm. Podle hloubky zaražení špičky špičáku do betonu se z obecného kalibračního vztahu určí pevnost betonu v tlaku. Cigánkův špičák funguje obdobným způsobem, výška dopadu je na rozdíl od předchozího přístroje 20 cm [15].

- Brusná tvrdoměrná metoda podle Vyšinky

Obrusnost betonu se dá nenormově zkoušet brusnou metodou podle Ing. Vyšinky. Brusným diamantovým kotoučem daných rozměrů se při 200 impulsech a stanoveném množství spotřebované energie vybrousí do betonu stopa, podle jejíž délky se určí na základě informativního kalibračního vztahu pevnost betonu v tlaku. Tato metoda je vhodná pro zkoušení tenkostěnných konstrukcí a jemnozrných betonů [15].

- Waitzmannovo kladívko

Waitzmannovo kladívko patří mezi vtiskové tvrdoměrné metody. Spočívá v měření velikosti vtisku polokulového ocelového hrotu do cementového tmelu povrchu betonu. Zároveň se měří vtisk hrotu do ocelové srovnávací tyčky, kde se po úderu vytvoří stopa zatlačením kuličky. Zatížení je rázové a realizuje se úderem paličkou o hmotnosti 1 až 2 kg z výšky asi 20 cm. Pro vyhodnocení měření se použije kalibrační vztah mezi pevností a velikostí průměru vtisku. Tato metoda nachází své uplatnění u betonů do pevnosti 60 MPa [15].

- Kuličkové kladívko

Kuličkové kladívko je pružinové kladívko, které funguje na principu podobném Schmidovým tvrdoměrům. Po dopadu hmoty beranu na razník kladívka opatřený kuličkou o průměru 10 mm se změří pomocí lupy průměr zanechané stopy ve dvou na sebe kolmých směrech. Pevnost betonu se vyhodnotí podle obecných kalibračních vztahů z velikosti stopy. Možnosti použití jsou podobné jako u Waitzmannova kladívka [15].

- Metoda špičkového tvrdoměru

Tato metoda je upravena normou ČSN 73 1373 a zjišťuje se při ní počet rázů, který je nutný na zaražení ocelové kuželové špice přístroje do betonu do předepsané hloubky 5, 10 nebo 15 mm. Z počtu rázů se stanoví s nezaručenou přesností hodnota pevnosti betonu v tlaku podle obecného kalibračního vztahu [17]. Tvrdoměry bývají pružinové nebo elektromagnetické s dopadovou energií 5 J. Metoda je vhodná na zkoušení mladých betonů a ne zcela zatvrdlého betonu (cca od 3 MPa do 30 MPa [15]).

2.2.4 Rezonanční metoda zkoušení betonu

Tato metoda spočívá v buzení zkušebního tělesa určitými frekvencemi, dokud v něm nevznikne stojaté mechanické vlnění a frekvence buzení je rovná vlastní frekvenci tělesa. Elektrický signál tvořený generátorem je pomocí budiče převeden na mechanické kmitání, které přechází do tělesa a šíří se jím jako podélné, příčné nebo ohybové mechanické vlnění v závislosti na uspořádání sond [18]. Snímač umístěný na tělese snímá okamžité výchylky kmitajícího tělesa a opět je převádí zpět na elektrický signál, který je vyhodnocen pomocí osciloskopu. Buzení tělesa probíhá postupným nárůstem frekvence od 50 Hz do zhruba 20 000 Hz, dokud těleso nezačne kmitat s nejvyššími amplitudami. V tomto okamžiku je dosaženo vlastní frekvence. Její hodnota je ovlivněna především elastickými vlastnostmi tělesa, dále pak rozdělením hmotnosti po délce tělesa a jeho rozměry. Zjištěné vlastní frekvence pro jednotlivé druhy vlnění se dále použijí pro výpočet dynamického modulu pružnosti v tahu nebo tlaku, smykového dynamického modulu, nebo pro určení dynamického Poissonova koeficientu.

Jako budič se dříve používaly elektrodynamické reproduktory vysílající akustické signály, které se převáděly na povrch tělesa pomocí ocelové jehly umístěné ve středu reproduktoru [14]. Dnes se zkouší sondami obsahujícími piezoelektrický materiál, např. křemen. Dokonalé spojení budiče

a zkušební tělesa má pro správný průběh zkoušky rozhodující význam. Jako snímače mechanických kmitů se používají piezoelektrické snímače zrychlení.

Ohled je potřeba brát zejména na uložení tělesa během zkoušky. Je možné těleso podepřít v místech očekávaných uzlů stojatého vlnění, nebo ho umístit na silnou a dostatečně pružnou pryžovou podložku, aby mohlo volně kmitat [14].

Rezonanční metoda je určena pro zkoušky prováděné v laboratoři. Jako zkušební tělesa se většinou používají hranoly nebo válce standardních rozměrů. Norma [18] dovoluje provádět měření i na krychlích nebo na krátkých válcích a krátkých hranolech.

Výhoda rezonanční metody je jako u ostatních nedestruktivních zkoušek v možnosti opakování pro různé stáří betonu, nebo pro beton podrobený účinkům mrazu nebo jinému agresivnímu působení. Na základě měření touto metodou je možné usuzovat na degradaci betonu, nebo na přítomnost trhlin nebo nehomogenit ve zkušebním tělese [18].

2.3 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu

Tvrdoměrné (sklerometrické) zkoušení betonu Schmidtovým kladívkem je metoda nedestruktivního zkoušení, která je založená na měření pružných reakcí povrchu betonu (odrazů) vzniklých po vyvození úderu a na vyhodnocení takto získaných údajů [17]. Při zkoušce může být stanovena homogenita povrchu betonu, a pokud se měří zároveň na zkušebních tělesech, tak je možné orientačně určit pevnost betonu v tlaku.

2.3.1 Princip zkoušení tvrdoměry

Při zkoušení pevnosti v tlaku odrazovým tvrdoměrem, Schmidtovým kladívkem, se zjišťuje velikost odrazu úderného beranu přístroje od zkoušeného povrchu. Běžný odrazový tvrdoměr se skládá z ocelového závaží (beranu) a pružiny, která po uvolnění vymrští beran na ocelový razník, který je při zkoušce opřený svým kulovým zakončením o povrch betonu. Při odrazu beranu od razníku je vlečným ukazatelem zaznamenána výška odrazu beranu na stupnici, která je pomocí tabulky převedena na pevnost v tlaku [17].

Tvrdoměry se dělí podle velikosti dopadové energie na tři typy:

- Typ L s energií 0,75 J

Typ L je určen pro zkoušení velmi subtilních konstrukcí s pevností do 50 MPa [15].

- Typ N s energií 2,25 J

Schmidtova kladívka typu N jsou určena pro měření pevností betonu v rozsahu 13 – 60 MPa. V současné době se používají nejvíce.

- Typ M s energií 30,0 J

Toto kladívko se hodí pro zkoušení masivních konstrukcí o větších pevnostech. Používá se při zkouškách vozovkových betonů, mostních konstrukcí nebo opěrných zdí. Pro svou značnou hmotnost se tento typ tvrdoměru používá spíše výjimečně.

Nejlépe pracuje Schmidtovo kladívko v horizontální poloze (pod úhlem 0°), pro kterou byly vypracovány obecné kalibrační vztahy, je proto vhodné pro zkoušení vertikálních ploch konstrukcí [14]. Pro zkoušení v jiné poloze je potřeba hodnoty odrazu převést na horizontální pomocí příslušných tabulek.

Uvádí se, že při zkoušce je zasažena povrchová vrstva betonu o hloubce 3 cm, ČSN z tohoto důvodu stanovuje požadavek na minimální tloušťku konstrukce 20 cm. Zkouší-li se vodorovná plocha konstrukce, jsou zpravidla naměřené hodnoty nepřesné, protože se během betonování na vodorovných plochách konstrukce tvoří místa bez kameniva se zatvrdlým cementovým mlékem. Takovým místům je nutné se při zkoušení vyhnout [14].

Kalibrace přístroje by měla probíhat pravidelně s ohledem na četnost používání tvrdoměru nebo po každých asi 2000 odrazech. Pro kalibraci se používá kalibrační ocelová kovadlina o určité tvrdosti. Hodnota odrazu od této kovadliny se nesmí lišit od hodnoty stanovené výrobcem přístroje.

Zkušební místa by měla být zvolena tam, kde je beton stejnoměrný, nepoškozený, přirozeně vlhký nebo suchý a bez štěrkových nebo vysoce porézních míst. Zkouška by měla být provedena na cementovém tmelu, který rozhoduje o pevnosti betonu. Je-li povrchová vrstva betonu zkarbonatovaná nebo jinak poškozená, odstraní se broušením. Beton s pevností stanovenou na krychlích vyšší než 40 MPa se může zkoušet i na neobroušeném povrchu nebo na povrchu uhlazeném hladítkem, pokud bylo porovnávacími zkouškami na hladkém povrchu dokázáno, že velikosti odrazu jsou téměř stejné [17]. Na zbroušení zkušebních míst je vhodný brusný kámen vyrobený ze středně zrnitého karborundu nebo obdobného materiálu. Při zkoušení konstrukcí se musí zkušební místa volit tak, aby svým rozložením a množstvím dostatečně reprezentovala

zkoušenou plochu. Zkušební místo by mělo být pro tvrdoměry typu N min. 0,02 m² veliké a vzdálené min. 30 mm od hran konstrukce nebo hran zkušebního tělesa [17], min. 25 mm od sebe [19].

2.3.2 Zkušební postup

Tvrdoměr s uvolněným razníkem se přiloží hrotem razníku kolmo nebo pod úhlem k povrchu zkoušené konstrukce. Plynulým pohybem se zatlačuje razník do těla tvrdoměru, až ocelový beran vyvodí ráz a je vymršťen ocelovou pružinou proti razníku. Velikost odrazu úderného beranu od razníku závisí na elastických vlastnostech betonu a odečte se na ukazateli tvrdoměru a zaznamená. Tuto velikost je možné také získat z energetické bilance proběhnutého jevu, nebo z rozdílu rychlostí před nárazem beranu a po něm. Ke každé hodnotě odrazu se určí hodnota pevnosti v tlaku s nezaručenou přesností f_{be} podle kalibrační tabulky, grafu nebo rovnice, které jsou uvedeny např. v ČSN 73 1373. Jednotlivé pevnosti se nesmí lišit o více než $\pm 20\%$ od svého aritmetického průměru. Pokud pevnosti nevyhovují této podmínce, vyloučí se ze statistického souboru a ze zbývajících platných měření se vypočte nový aritmetický průměr pevnosti, který se zaokrouhlí na celý MPa [19].

Tato hodnota pevnosti s nezaručenou přesností stanovená z obecného kalibračního vztahu se dále může upřesnit součinitelem α [17].

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{bi}}{\sum_{i=1}^n f_{bei}}, \quad (1)$$

kde f_{bi} je hodnota krychelné pevnosti v tlaku stanovené destruktivně a f_{bei} je hodnota pevnosti s nezaručenou přesností stanovená z obecného kalibračního vztahu pro i -té zkušební těleso. Poté je možné vypočítat upřesněnou hodnotu pevnosti betonu v tlaku f_b .

$$f_b = \alpha \cdot f_{be} \quad (2)$$

Samotný obecný kalibrační vztah platí pro obyčejné hutné betony, vyrobené z běžného hutného kameniva a z portlandského cementu. Dále platí pro betony vlhké, nebo přirozeně vlhké a pro betony stáří 14 až 56 dnů. Je-li beton starší než 56 dní, je potřeba upravit odvozenou hodnotu pevnosti z obecného kalibračního vztahu příslušným součinitelem. Podobný postup platí pro beton, který je nasycený vodou, nebo suchý [17].

Zkušební krychle se zkouší v lise zatížené na 10 % své pevnosti v tlaku na dvou protilehlých stranách rovnoběžných se směrem hutnění. Takto se na každé ploše provede minimálně 9 platných měření.

Vyhotovená tělesa tvaru válce se zkouší na spodní ploše, pevně přichycené k ocelové desce a provede se minimálně 5 platných měření [17].

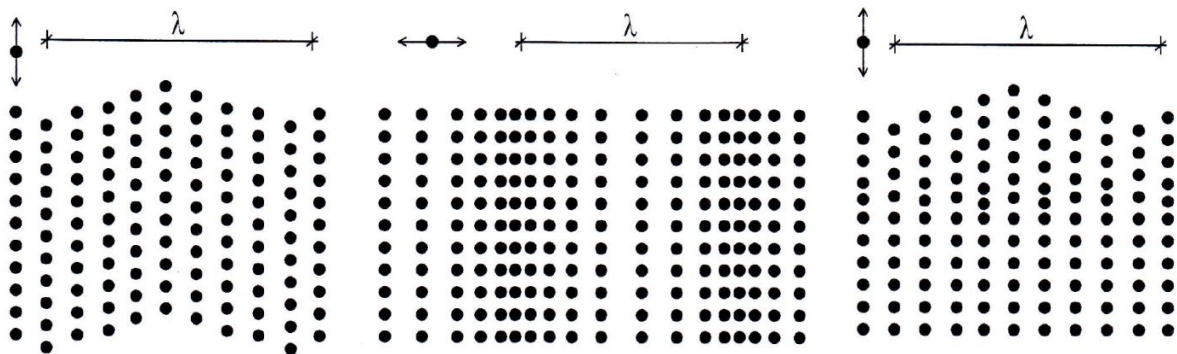
2.4 Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu

Ultrazvuková impulsová metoda je jedna z používaných metod nedestruktivního zkoušení betonových konstrukcí. Její princip je založen na měření doby průchodu svazku ultrazvukových vln, tzv. ultrazvukového impulsu na měřicí základně známé délky. Z vypočtené rychlosti impulsu je možné stanovit dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a tahu, případně určit pevnost betonu v tlaku a tahu, nebo učinit závěry o kvalitě povrchu betonu včetně identifikace případných nehomogenit nebo trhlin.

U betonových konstrukcí se používá metoda průchodová, tzn. vlnění prochází tělesem a je nutno měřit vždy dvěma sondami – budičem a snímačem. Metoda odrazová se používá u ocelových konstrukcí a její princip spočívá ve vyslání impulsu do konstrukce, jeho odrazu od nehomogenit nebo od rozhraní dvou prostředí (např. ocel – vzduch) a následném přijetí odraženého signálu tou samou sondou.

2.4.1 Šíření mechanického vlnění v tělesech

Beton je látka značně pórovitá a nehomogenní – skládá se z kameniva, cementového tmele a vody a každá z těchto látek má jiný modul pružnosti a tedy i odlišné vlastnosti při přenosu vlnění. Pro zjednodušení je proto v teoretických úvahách uvažováno dokonale pružné homogenní prostředí. Pokud je hmota trvale buzena impulzy o určité frekvenci, dojde u jejích částic k mechanickému kmitání kolem rovnovážných poloh. Sousední částice si předávají tuto energii a společně vytvářejí prostorové mechanické vlnění v tělese. Podle směru kmitání jednotlivých částic hmoty rozlišujeme v zásadě vlnění podélné (longitudální), příčné (transverzální) a povrchové (Rayleighovy vlny). Při podélném vlnění kmitají částice ve směru šíření vlny, u příčného vlnění kmitají kolmo na směr šíření vlnění a Rayleighovy vlny jsou charakteristické tím, že se šíří po povrchu konstrukce (obrázek 11). Pro zkoušení ultrazvukem jsou rozhodující vlny podélné [15].



Obr. 11: Příčné, podélné a povrchové vlnění

Na rozhraní dvou odlišných prostředí nastává zpravidla lom nebo odraz mechanického vlnění. Lom nastává, jestliže směřuje vlna šikmo na rozhraní prostředí, odraz nastane při šikmém i přímém dopadu na rozhraní prostředí, a to tehdy, má-li druhé prostředí větší modul pružnosti než původní prostředí, ze kterého vlna směřuje [15].

Rychlost vlnění v je závislá na frekvenci a vlnové délce se a vypočte podle vztahu (3).

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (3)$$

Převrácená hodnota frekvence je perioda mechanického vlnění T . Skutečnost, že vlnová délka λ závisí na frekvenci vlnění f , se musí brát v úvahu při zkoušení konstrukcí a při výběru použitých sond. Na délce vlny λ závisí přesnost měření, rozměry konstrukce a rozměrnost prostředí je vždy nutné porovnat s vlnovou délkou použitého ultrazvukového vlnění. Vlnění se šíří hmotou vždy prostorově, proto je potřeba zohlednit ohraničenost prostředí, respektive rozměry zkušebních těles. Doporučuje se, aby vlnová délka byla minimálně dvojnásobkem největšího zrna kameniva použitého v betonu [15].

Dle [20] rozeznáváme tato prostředí:

Jednorozměrné prostředí je reprezentováno např. zkušebními tělesy tvaru hranolů o rozměrech příčného řezu 100 mm x 100 mm a délce 400 mm. Pro jednorozměrné prostředí platí, že minimální rozměr příčného řezu je menší nebo roven $0,2\lambda$.

Dvojrůzoměrné prostředí mohou být např. tenké desky, jejichž tloušťka je menší nebo rovna $0,2\lambda$.

Většina prostředí je trojrozměrná (zkušební tělesa krychle, válce, kvádry, nosníky, reálné konstrukce), to znamená, že rozměry příčného řezu kolmého na směr prozvučování jsou větší než

2 λ . Trojrozměrné prostředí uvažujeme také při zkoušení desek prozvučovaných z čelních ploch, jejichž tloušťka je větší než 0,9 λ .

Aby bylo možné porovnat veličiny naměřené v prostředích různé rozměrnosti, musí se rychlost určená na tělesech jednorozměrných nebo dvojrozměrných přepočítat na rychlost v trojrozměrném prostředí pomocí součinitele pro přepočet rychlosti v trojrozměrném, resp. dvojrozměrném prostředí. Součinitele jsou závislé na dynamickém Poissonově koeficientu pro beton ν_{cu} . Pro beton stáří 28 dní je $\nu_{cu} = 0,2$ [20].

Součinitel pro trojrozměrné prostředí:

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - \nu_{cu}}{(1 + \nu_{cu}) \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{cu})}} \quad (4)$$

Součinitel pro dvojrozměrné prostředí:

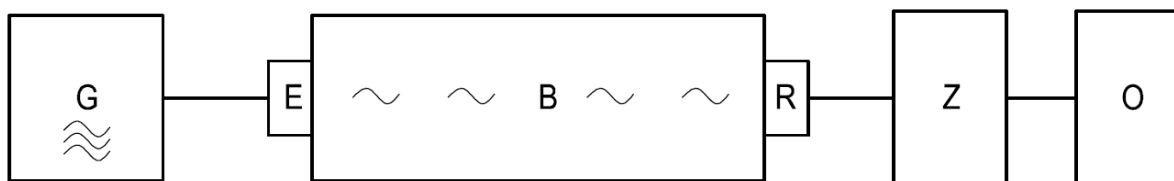
$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu_{cu}^2}} \quad (5)$$

Součinitel pro jednorozměrné prostředí:

$$k_1 = 1 \quad (6)$$

2.4.2 Princip měření ultrazvukem

Princip ultrazvukových přístrojů na zkoušení betonu je zobrazen na obrázku 12. Pro zkoušení betonu se zásadně používá metoda průchodová, k realizaci měření jsou tedy potřeba dvě sondy – budič (Emitor **E**, vysílač, generátor, vysílá ultrazvukové vlnění) a snímač (Receiver **R**, přijímač, přijímá ultrazvukové vlnění). Generátor **G** je zařízení schopné vytvářet elektrické impulzy o určité frekvenci a amplitudě, které jsou v elektroakustickém budiči **E** přeměněny na mechanické kmitání za využití piezoelektrického jevu. Např. pro frekvenci generovaného signálu 50 kHz je vysláno během 1 s 50 000 krátkých elektrických impulzů, jeden impulz trvá cca 20 μ s. Tyto impulzy jsou přenášeny betonem **B**, ve kterém vzniká podélné mechanické vlnění. Dojde-li vlnění k snímači **R**, jsou mechanické impulzy opět převedeny zpět na elektrický signál, který je zesílen zesilovačem **Z** a jeho časový průběh zobrazen na obrazovce osciloskopu **O**, kde je možné zjistit dobu průchodu prvního náběhu (prvního náběhového čela svazku podélných vln) a tvar přijímaného signálu.



Obr. 12: Princip měření ultrazvukem [14]

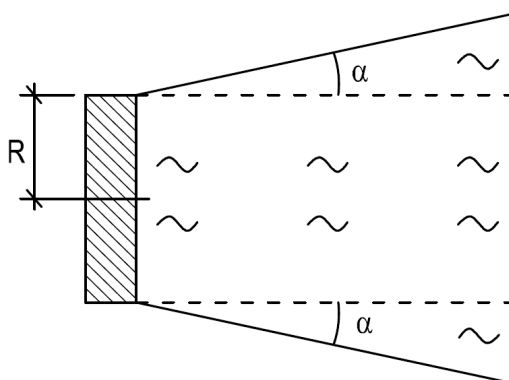
Pracovní kmitočet sond použitých na měření impulzovou metodou by se měl pohybovat v rozmezí od 20 kHz do 150 kHz [15]. Frekvence vyšší se v betonu značně utlumují, proto se doporučuje používat toto rozmezí frekvencí. Konkrétní použitá frekvence budiče závisí na nejmenším bočním rozměru tělesa, délce měřicí základny a pevnosti betonu.

Pracovní kmitočty budiče podle [21]:

- 60 kHz – 200 kHz pro měřicí základny do 50 mm
- 10 kHz – 40 kHz pro měřicí základny do 15 m

Je tedy zřejmé, že čím nižší je frekvence prozvučování, tím větší měřické základny lze pro měření uvažovat. Pro většinu případů zkoušení betonových konstrukcí jsou vhodné sondy s pracovním kmitočtem 40 kHz – 60 kHz. Ocelové konstrukce se zkouší při frekvencích od 1 MHz do 10 MHz. Při těchto frekvencích lze zjistit v oceli i malé nehomogenity. Tento fakt je dán tím, že při vyšších frekvencích od 500 kHz je svazek vln schopen zachovat svůj směr, aniž by se rozšiřoval do stran (obrázek 13) [14]. Při nižších frekvencích se svazek vysílaných vln šíří i od směru daného budičem pod úhlem α . Jelikož není možné při nižších frekvencích zachovat směr vlnění v betonu, nelze případné poruchy o velikosti menší než vlnová délka s jistotou identifikovat. Úhel α lze určit ze vztahu (7), kde R je poloměr plochy budiče a λ je vlnová délka vlnění v betonu. Např. pro tělesa tvaru krychle o délce hrany 150 mm, frekvenci budiče 50 kHz, rychlost šíření vln betonem 4 km/s a poloměr plochy budiče 1,5 cm dostáváme úhel $\alpha \doteq 20^\circ$, což má za následek rozšíření svazku vln o cca 5 cm na všechny strany po uběhnutí dráhy 150 mm.

$$\sin \alpha = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{R} = 0,61 \cdot \frac{v}{f \cdot R} \quad (7)$$

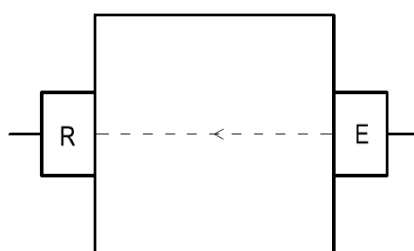


Obr. 13: Rozšíření ultrazvuku do stran [14]

2.4.3 Druhy prozvučování

Z hlediska uspořádání sond na zkušebním tělese nebo na konstrukci rozlišujeme prozvučování přímé, polopřímé a nepřímé [21].

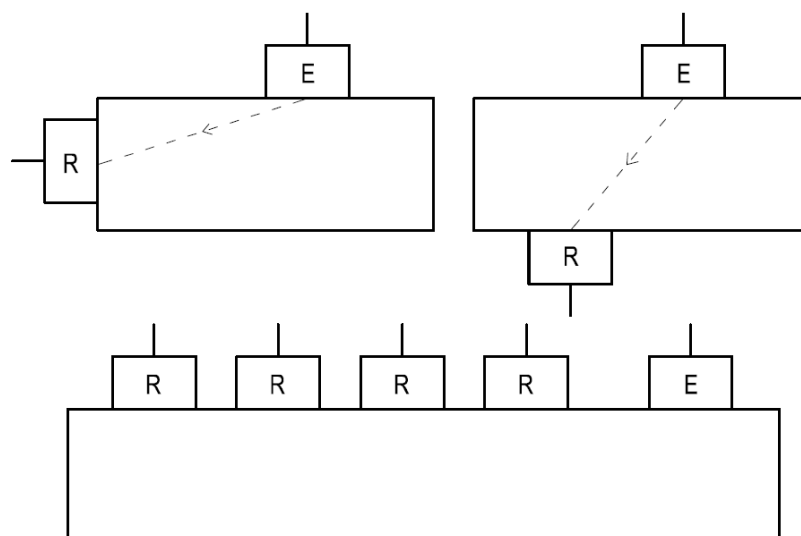
Přímé prozvučování spočívá v umístění budiče a snímače proti sobě na dvou protilehlých rovnoběžných stěnách zkušebního tělesa.



Obr. 14: Přímé prozvučování

V případě polopřímého (šikmého) prozvučování se sondy umístí na sousední boční stěny tělesa, nebo na protilehlé stěny tělesa, ne však přímo proti sobě (obrázek 15).

Při nepřímém (povrchovém) prozvučování jsou obě sondy na stejné straně. Tato metoda slouží k měření průchodu povrchových vln a používá se pro zjištění kvality povrchových vrstev betonu a jejich degradaci, nebo pro identifikaci trhlin. Nepřímé prozvučování nachází své uplatnění zejména u konstrukcí, které jsou přístupné pouze z jedné strany (cementobetonové vozovky pozemních komunikací, průmyslové betonové podlahy). Toto měření je pro svou nízkou přesnost pouze informativní.



Obr. 15: Polopřímé a nepřímé prozvučování

Osazení sond na povrch betonu musí umožňovat dokonalé akustické propojení s betonem. K tomuto účelu se na hladký povrch betonu nanáší mazací tuk, vazelína nebo mazlavé mýdlo s následným přitlačením sond k povrchu betonu. Hrubé povrchy je možné upravit broušením. Pro povrchy nepravidelných tvarů jsou vhodné zvláštní sondy specifických tvarů [21].

Délku měřicí základny pro přímé a polopřímé prozvučování se doporučuje volit v rozmezí 20 až 60 cm, závisí však na použitém budiči a jeho frekvenci. Určení této délky se provádí měřením vzdálenosti vhodným zařízením od středu budiče ke středu snímače. Pro nepřímé prozvučování platí zvláštní pravidla uvedená v [21].

2.4.4 Vlivy na měření ultrazvukovou impulzovou metodou

- Složení betonu

Beton se skládá zjednodušeně z kameniva, cementu, vody, vzduchu a případně ocelové výztuže a všechny tyto složky se podílí na výsledném modulu pružnosti a rychlosti ultrazvukových vln. Rychlosti šíření ultrazvuku v jednotlivých materiálech jsou v tabulce 2.

Platí, že větší zrna kameniva zvyšují rychlost průchodu vlnění, obdobně větší množství písku rychlost vln snižuje. Množství přidaného cementu, vody a superplastifikátoru ovlivňuje pozitivně hutnost betonu a s hutností roste i rychlost šíření impulzů. Je-li do betonu přidána naopak provzdušňující přísada, rychlost vlnění klesne z důvodu vzniku vzduchových pórů [15].

Materiál	Rychlost UZ vlnění v km/s
Kamenivo	2,8 – 7,0
Voda (20 °C)	1,5
Cement	3,0 – 4,5
Vzduch	0,330
Ocel	5,0 – 6,0

Tabulka 2: Rychlost šíření ultrazvuku v materiálech [15]

- Pórovitost betonu

Vzduchové dutiny obsažené v betonu vytváří překážku pro přímý průchod ultrazvukového impulzu. Vlna je tedy ohnuta a odchýlena po obvodu mezery a čas potřebný na průchod je vyšší než v prostředí bez dutin. Amplituda vlny zachycené snímačem je také nižší. Tato skutečnost platí pro dutiny, které mají polohu kolmou na směr prozvučování a jejichž délka je větší než vlnová délka vysílaného vlnění. Dutiny menších rozměrů se na průchodu vlny neprojevují [21].

- Měření v blízkosti výztuže

Kvůli možnému zkreslení výsledků se nedoporučuje měřit podél ocelové výztuže betonu. Ultrazvukové vlnění se šíří v betonu rychlostí 2,5 – 5 km/s, zatímco v oceli je to 5 – 6 km/s. Při měření podél výztuže dojde tedy ke snížení doby průchodu impulzu. Do určité míry se projevuje i výztuž kolmá na směr šíření vlnění, je-li poměr součtu průměrů prutů výztuže k délce měřicí základny větší nebo roven 0,1 [21].

- Měření na narušeném betonu

Při hodnocení změn ve struktuře betonu, který je narušen povětrnostními vlivy, účinky agresivního prostředí, mimořádnými teplotami a vlivy, trhlinami vzniklými dynamickým a statickým namáháním, je vždy nutno znát hodnotu času průchodu v neporušeném betonu, aby bylo možné srovnávat naměřené nebo vypočtené veličiny [21].

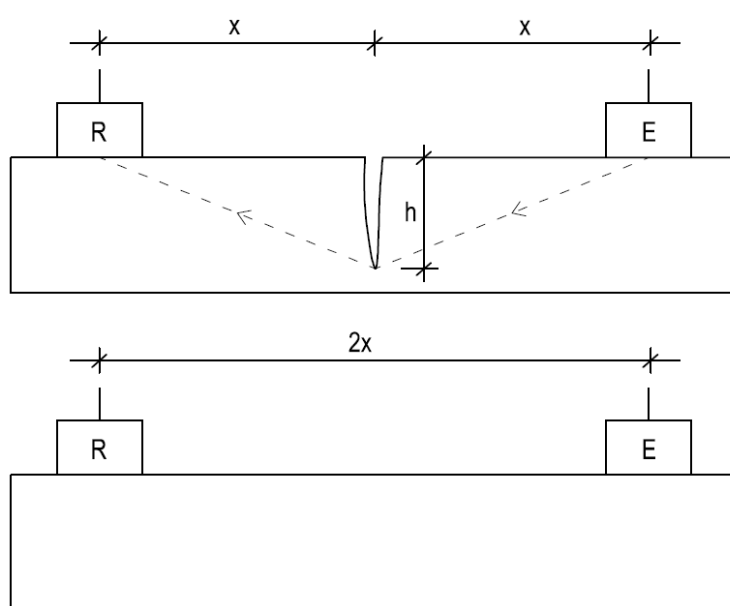
- Trhliny v betonu

Nachází-li se v povrchové vrstvě betonu trhliny, je možné určit jejich hloubku pomocí nepřímého prozvučování. Předpokladem je, že signál je odchýlen nejkratší cestou po obvodu trhliny, jak je vidět na obrázku 16. Hloubka trhliny se určí podle různých vztahů, např. vztah (8) uvádí norma [16], vztah (9) je obsažen k manuálu k použitému přístroji [22].

$$h = \frac{1}{2} \cdot v_L \cdot \sqrt{t_{u1}^2 - t_{u2}^2} \quad (8)$$

$$h = x \cdot \sqrt{\frac{t_{u1}^2}{t_{u2}^2} - 1} \quad (9)$$

V uvedených vzorcích je v_L rychlost průchodu impulzu na místě povrchu bez trhliny, t_{u1} je čas průchodu kolmo v místě trhliny a t_{u2} je čas průchodu v neporušeném betonu mimo trhlínu. Budiž a snímač jsou od sebe ve vzdálenosti $2x$ a při měření kolmo přes trhlínu je tato vzdálenost trhlínou půlena.



Obr. 16: Zjišťování hloubky trhliny v betonu ultrazvukem [22]

Další vliv na změnu rychlosti průchodu vlnění má například vlhkost obsažená v pórech betonu, která snižuje pórovitost a tedy zvyšuje rychlost, teplota betonu, stáří betonu (s hydratací cementu se rychlost zvyšuje), nehomogenní zpracování čerstvého betonu (nezhutněná místa) nebo přítomnost cizích hmot v betonu [21]. Pro správnou a přesnou identifikaci poruch je potřeba zhustit síť zkušebních míst na konstrukci. Pro měření musí být rovněž přístupné dva protilehlé povrchy konstrukce.

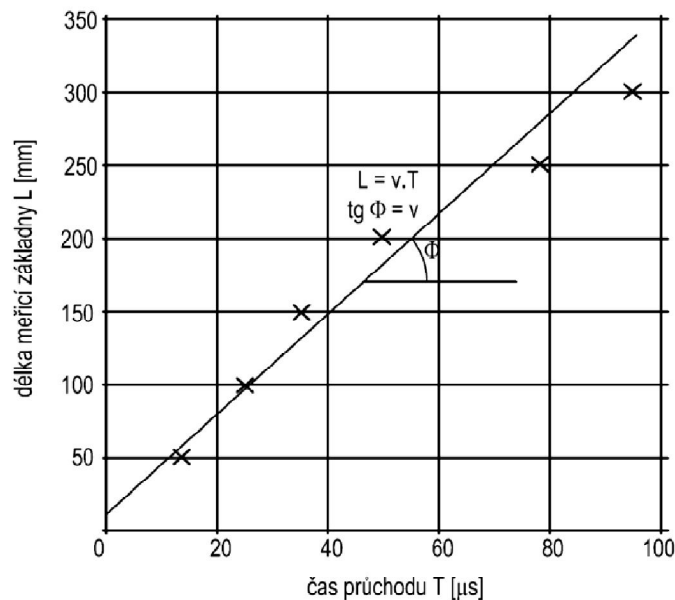
2.4.5 Určení fyzikálně mechanických vlastností betonu na základě stanovené rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v betonu

Rychlost šíření impulzu při přímém prozvučováním se vypočte podle vzorce (10) [21].

$$v_L [km \cdot s^{-1}] = \frac{L [mm]}{T [\mu s]} \quad (10)$$

Při nepřímém prozvučování je nutné určit rychlost šíření impulzu způsobem daným v příloze A normy [21]. Na povrchu tělesa se vyznačí zkušební místa, která mají od sebe konstantní vzdálenost. Poloha budiče je neměnná, pouze snímač se přesouvá do jednotlivých poloh L_i , aby zaznamenal dobu T_i potřebnou na průchod impulzu povrchem betonu. Vzdálenosti budiče a snímače L_i v mm a jim příslušné naměřené časy T_i v μs vyneseme do grafu, kde na vodorovnou osu nanese čas a na svislou osu vzdálenost. Izolovanými body proložíme přímkou a její směrnice je podle vztahu (11) rychlost šíření ultrazvukového vlnění povrchovou vrstvou betonu v $km \cdot s^{-1}$ (obrázek 17). Pokud tyto body vykazují nespojitost, není povrch betonu homogenní, naměřená rychlost není relevantní a těleso je nutné ze zkoušení touto metodou vyloučit.

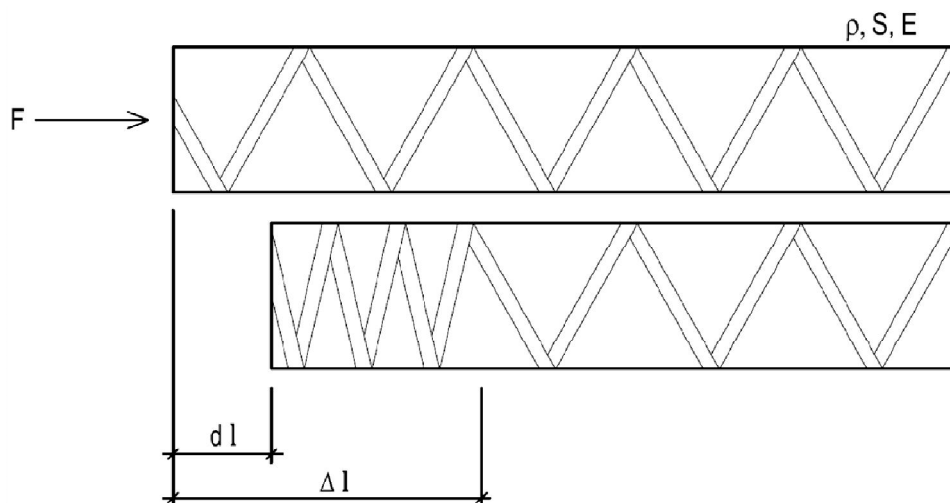
$$L = \text{tg } \Phi \cdot T = v_L \cdot T \quad (11)$$



Obr. 17: Stanovení rychlosti šíření UZ impulzu při nepřímém prozvučování [21]

Pro odvození závislosti dynamického modulu pružnosti E_{cu} na rychlosti šíření impulzu v_L vyjdeme z představy zobrazené na obrázku 18. Dokonale pružné těleso o objemové hmotnosti ρ ,

modulu pružnosti E a ploše příčného řezu S se znázorní jako pružina, která je zatížena rázovým silou F po čas dt . Tento vzruch se postupně šíří po délce tělesa a v čase dt dosáhne do vzdálenosti Δl [14].



Obr. 18: Deformace dokonale pružného tělesa při zatížení silovým impulzem

Pro lineární vztah deformace a napětí platí:

$$\varepsilon = \frac{dl}{\Delta l} = \frac{\sigma}{E_{cu}}, \quad (12)$$

kde Δl je ta část tělesa, kde částice vykonávají kmitavý pohyb v okamžiku dt působení rázového zatížení F . Dále víme, že

$$v_L = \frac{\Delta l}{dt}, \sigma = \frac{F}{S}. \quad (13)$$

Po dosazení těchto dvou vztahů do rovnice (12) vyjádříme podíl $\frac{dl}{dt}$:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{v_L}{E_{cu}} \cdot \frac{F}{S}. \quad (14)$$

Pokud dále uvažujeme, že impulz síly F je roven změně hybnosti

$$F dt = v_L dm, \quad (15)$$

můžeme element hmotnosti vyjádřit jako

$$dm = \rho S dl. \quad (16)$$

Po dosažení do rovnice hybnosti

$$\rho S dl v_L = F dt \quad (17)$$

lze opět vyjádřit podíl $\frac{dl}{dt}$:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{F}{\rho S v_L} \quad (18)$$

Porovnáním obou podílů $\frac{dl}{dt}$ získáváme rovnici

$$\frac{v}{E_{cu}} \cdot \frac{F}{S} = \frac{F}{\rho S v_L}, \quad (19)$$

z které se vyjádří dynamický modul pružnosti E_{cu} :

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \quad (20)$$

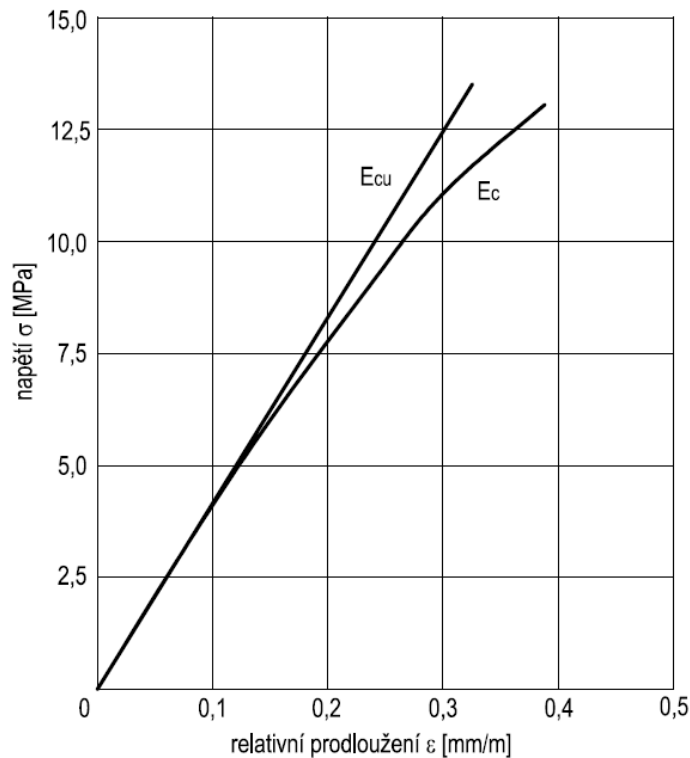
Vzorec uvedený v ČSN 73 1371 je navíc upraven koeficientem zohledňujícím rozměrnost prostředí:

$$E_{cu} [MPa] = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2}, \quad (21)$$

kde ρ je objemová hmotnost betonu v $kg \cdot m^{-3}$, v_L je rychlost šíření impulzu v $km \cdot s^{-1}$ a k je bezrozměrný součinitel rozměrnosti prostředí. Zjišťování statického modulu pružnosti E_c statickými zkouškami je zatíženo chybami, protože už při malé deformaci přestává platit lineární závislost mezi deformací a napětím (Hookeův zákon), a deformace, které vznikají, jsou trvalé [14]. Zkouší-li se však těleso pomocí mechanického kmitání, při němž jsou deformace tělesa zanedbatelné, získáme dynamický modul pružnosti E_{cu} . Ten odpovídá směrnici tečny jdoucí počátkem ke grafu pracovního diagramu zkoušeného betonu (obrázek 19). Dynamický modul pružnosti v tlaku E_{cu} zjištěný ultrazvukovou impulzovou metodou je tedy značně větší (až o 40 % [15]) než modul statický E_c . Přepočet dynamického modulu na statický uvádí např. [23], viz vzorce (22) a (23).

$$E_c = 0,83 \cdot E_{cu} \quad (22)$$

$$E_c = 1,25 \cdot E_{cu} - 19 \quad (23)$$



Obr. 19: Pracovní diagram betonu pro nízká napětí [14]

V publikaci [14] je uvedeno, že přibližně do hodnoty napětí cca $\sigma = 4$ MPa je možné nahradit statický modul modulem dynamickým, protože dosahují téměř stejných hodnot (obrázek 19). Pro napětí větší než 4 MPa se statický modul vypočítá ze známého dynamického modulu dle vztahu Le Camuse [14]:

$$E_c [MPa] = E_{cu} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \frac{\sigma - 4}{100} \right) \quad (24)$$

Přepoččet na statický modul pomocí tzv. zmenšovacích součinitelů κ_u závislých na třídě betonu je uveden v ČSN 73 2011. Pro beton C 8/10 je součinitel $\kappa_u = 0,62$, pro třídu C 45/55 je $\kappa_u = 0,90$.

Upřesněnou pevnost betonu v tlaku je možné stanovit buď upřesněním obecného nebo směrného kalibračního vztahu součinitelem α , nebo podle úzkého nebo širokého kalibračního vztahu.

Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností f_{be} v MPa vypočteme dle [20] pomocí směrného kalibračního vztahu (25). Pavlík uvádí jako vhodný směrný kalibrační vztah vzorec (26) [15].

$$f_{be} = 9,9 \cdot v_{L3}^2 - 56 \cdot v_{L3} + 87,8 \quad (25)$$

$$f_{be} = 2,3 \cdot v_{L3}^2 \quad (26)$$

V těchto vztazích je v_{L3} rychlost impulzu v trojrozměrném prostředí v $km \cdot s^{-1}$.

Takto získanou pevnost je možné dále upřesnit koeficientem α , kde $\sum_{i=1}^n f_{ci}$ je suma všech destruktivně určených krychelných, resp. válcových pevností v tlaku a $\sum_{i=1}^n f_{cei}$ je suma všech pevností v tlaku na stejných krychlích, resp. válcích, vypočtených pomocí rychlosti ultrazvukového impulzu ze směrného kalibračního vztahu. Pro upřesnění je potřeba minimálně 9 kalibračních vzorků vyrobených ze stejných složek betonu nebo 3 vzorky odebrané z konstrukce na objem betonu do $10 m^3$.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{\sum_{i=1}^n f_{cei}} \quad (27)$$

Upřesněnou pevnost betonu v tlaku získáme vynásobením pevnosti určené ze směrného kalibračního vztahu součinitelem α [24].

$$f_b = \alpha \cdot f_{be} \quad (28)$$

3 Experimentální část

Tato část obsahuje popis provedených zkoušek čerstvého a ztvrdlého betonu. Zkoušky ztvrdlého betonu jsou rozděleny do dvou podkapitol. Nejprve je prostor věnován popisu a vyhodnocení provedených nedestruktivních zkoušek, poté následuje část popisující destruktivní zkoušení. K výsledkům jednotlivých zkoušek je vypracováno stručné zhodnocení, které je uvedeno na konci každé podkapitoly.

3.1 Definice záměsí betonu a výroba zkušebních těles

Pro zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu byly vyrobeny tyto čtyři záměsi:

a) Záměs Z1R

Tato záměs je tvořena prostým betonem C 25/30 odebraným z autodomíchávače v množství cca 0,240 m³ z betonárny Cemex v Pardubicích v Semtíně. Byla uvažována jako referenční.

Specifikace betonu této záměsi je podle dodacího listu následující (dle [25]):

Beton C 25/30 X0, XC3, XD1, XA1, XF1

Konzistence: S3 – Velmi měkká

Největší frakce kameniva: $D_{\max} = 16 \text{ mm}$

Obsah chloridů: Cl 0,2

Složení betonu:

- cement CEM II/A-LL 42,5 R (Holcim Česko, a. s.)

Jedná se o portlandský cement s vápencem, který je vyráběn a zkoušen podle normy EN 197-1. Přidaný jemně mletý vápenec zlepšuje zpracovatelnost a čerpatelnost betonové směsi a stabilizuje barevnost betonu. Vyšší vývin hydratačního tepla při tuhnutí a tvrdnutí umožňuje betonáž i v nižších teplotách. Po 28 dnech je garantována minimální pevnost v tlaku 42,5 MPa a minimální počáteční pevnost je 20 MPa po 2 dnech (viz Dokladová část).

- kamenivo 0/4 (Čeperka)
- kamenivo 4/8 (Čeperka)

- kamenivo 8/16 K (Čeperka)

Kamenivo je těžené, prané, pochází ze šterkovny v Čeperce a vyhovuje jako kamenivo do betonu podle ČSN EN 12620+A1.

- přísada Stachement ML (Stachema Kolín)

Stachement ML je superplastifikační a ztekucující přísada do betonových směsí. Při jejím použití je možné snížit množství záměsové vody až o 30 %, přičemž neklesá zpracovatelnost a počáteční pevnost roste až na dvojnásobek původní hodnoty, což se pozitivně projevuje při efektivnějším použití bednění a forem. Zvyšuje se také vodotěsnost a trvanlivost betonu. Tato přísada nemá vliv na obsah vzduchu ve směsi a neovlivňuje provzdušnění dosažené provzdušňovací přísadou např. pro zvýšení mrazuvzdornosti a odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám. Dávkování Stachementu se pohybuje od 1 % do 2 % z hmotnosti cementu. Příklad se dávkuje buďto do záměsové vody, nebo pro zvýšení účinku již do vlhké směsi ke konci míchání (viz Dokladová část).

- voda kalová
- voda čistá
- voda proplachová

Technické listy a další dokumenty k jednotlivým složkám čerstvého betonu jsou uvedeny v dokladové části.

b) Záměs Z2PP

Záměs s označením Z2PP byla zhotovena z referenčního betonu přidáním polypropylénových fibrilovaných vláken (PP) Texzem od firmy Bonar geosyntetics s dávkováním 2 kg PP/m³.

c) Záměs Z3I

Pro tuto záměs byla zvolena kombinace polypropylénových vláken a ocelových vláken. Dávkování do referenčního betonu bylo stanoveno na 2kg PP/m³ a 75 kg drátků Dramix 3D/m³.

d) Záměs Z4II

Aby bylo možné podrobit zkoušení dva podobné typy betonů a sledovat tak odlišnosti v chování, byla čtvrtá záměs namíchána také s polypropylénovými vlákny a s drátky, ovšem dávkování PP

vláken bylo sníženo na 1 kg/m^3 . Objem drátků byl shodný se záměsí Z3I, tj. 75 kg drátků Dramix 3D/ m^3 .

Zpracování záměsí Z1R a Z2PP proběhlo 17. února 2015, záměsí Z3I a Z4II byly zpracovány 24. února 2015 ze stejného referenčního betonu. Beton byl po přivezení dávkován do běžné stavební míchačky s maximální kapacitou 140 dm^3 . Z praktických důvodů se však objem jednotlivých míchaných záměsí pohyboval kolem 80 dm^3 . Čerstvý beton byl nejprve po dobu cca 60 s míchán bez vláken, následně byla bez přerušení míchání přidána vlákna a míchání pokračovalo zhruba 120 s, dokud nebylo pohledem patrné rovnoměrné rozmístění vláken. V případě záměsí Z3I a Z4II byla nejprve do betonu přidána ocelová vlákna a po určité době polypropylénová vlákna. Doba míchání nepřesáhla v žádném z případů 4 min.

Pro jednotlivé zkoušky byla vyrobena tělesa, která odpovídají jmenovitým rozměrům „ČSN EN 12390-1 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy“ [26]. Jedná se tedy o krychle s délkou hrany 150 mm, válce s průměrem podstavy 150 mm a výškou 300 mm a hranoly s příčnými rozměry 100 mm x 100 mm a délkou 400 mm nebo 350 mm. Všechny formy byly před použitím očištěny a vymazány formovacím olejem. Hutnění čerstvého betonu ve formách probíhalo maximálně po třech vrstvách na vibračním stole s pracovní frekvencí 40 Hz. Forma s betonem byla během hutnění pevně přitlačována k vibračnímu stolu. Po naplnění forem a urovnání povrchu těles zednickou lžící nebo ocelovým hladítkem byla tělesa následně uložena v laboratoři za teploty $22 \text{ }^\circ\text{C}$, která odpovídá normě [27]. Odformování těles bylo provedeno vždy druhý den po betonáži, tedy cca po 18 hodinách od uložení do forem a zhutnění. Po popsání a označení těles byly vzorky ošetřovány ve vodě o teplotě cca $22 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 28 dní.

Jelikož některá tělesa nebyla vyrobena v kalibrovaných formách, byla po vyjmutí z vody po 28 dnech změřena a do výpočtů vždy dosazovány skutečné rozměry těles. Po změření těles bylo možné přistoupit k jednotlivým zkouškám. Počty vyrobených těles z jednotlivých záměsí a výčet provedených destruktivních zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3. Na některých tělesech byly také provedeny nedestruktivní zkoušky – zkouška odrazovým tvrdoměrem a zkouška ultrazvukovou impulzovou metodou. Tyto zkoušky a počty vyzkoušených těles shrnuje tabulka 4.

V textu níže jsou uvedeny jednotlivé provedené nedestruktivní a destruktivní zkoušky spolu s výsledky. Zkoušky probíhaly od 16. března do 19. března pro záměsi Z1R a Z2PP a od 23. března do 25. března pro záměsi Z3I a Z4II.

Záměs	Krychle		Válce		Hranoly
	Tlak	Příčný tah	Tlak	Statický modul	Tah ohybem
Z1R	3	3	3	2	3
Z2PP	3	3	3	2	3
Z3I	3	3	3	2	3
Z4II	3	3	2	x	3

Tabulka 3: Počty vyrobených těles a provedené destruktivní zkoušky

Záměs	Krychle			Válce				Hranoly	
	Schmidt		UZ	Schmidt			UZ	UZ 1	UZ 2
	A	B		A	B	C			
Z1R	3	3	6	x	5	x	5	3	3
Z2PP	3	3	6	x	5	x	5	3	3
Z3I	3	3	6	3	3	3	5	3	3
Z4II	3	3	6	2	2	2	2	3	3

Tabulka 4: Počty těles, na nichž byly provedeny nedestruktivní zkoušky

Určení statického modulu pružnosti v tlaku je uvažováno v další části této práce. Tělesa určena pro tuto zkoušku byla zatím využita k měření objemové hmotnosti a rychlosti šíření ultrazvukových vln. Hodnoty naměřené na těchto válcích jsou zahrnuty v celkovém vyhodnocení jednotlivých zkoušek.

3.2 Zkoušení čerstvého betonu

3.2.1 Zkouška sednutím

Pro zkoušku sednutím kužele byl použit komolý kužel bez násadky, který odpovídá požadavkům „ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím“ [28]. Výška ocelového kužele je 300 mm, průměr spodní základny 200 mm, průměr horní základny 100 mm. Jako hutnící náčiní byla použita ocelová propichovací tyč délky 600 mm a průměru 15 mm. Plnění kužele probíhalo v souladu s normovým předpisem – beton byl ukládán do navlhčené formy ve třech vrstvách, jejichž výška odpovídala třetině výšky formy, a hutněn vždy 25 vpichy propichovací tyče tak, že vpichy téměř nezasahovaly do nižší vrstvy a byly rovnoměrně rozloženy po povrchu vrstvy. Po dohutnění poslední vrstvy, uhlazení povrchu zednickou lžící

a očištění podkladní desky od betonu byl kužel sejmут během 2 až 5 sekund rovnoměrným svislým pohybem vzhůru. Po sednutí byla změřena vzdálenost mezi horním okrajem kuželové formy a horní vrstvou betonu. Při zkoušce byl vždy dodržen maximální čas provádění zkoušky, tj. 150 s. Sednutí bylo vždy správné a nedošlo tedy k usmyknutí.

Projevilo se, že zkouška sednutím není vhodná pro vláknobetony. Vláknata přítomná v betonu mají za následek ztrátu viskózních vlastností betonu při ručním zpracování a hutnění. Proto byla v případě záměsí Z3I a Z4II provedena zkouška Stupeň zhutnitelnosti. Tabulka 5 obsahuje výsledky zkoušky sednutím pro všechny čtyři záměsi.

Záměs	Z1R	Z2PP	Z3I	Z4II
Sednutí h [mm]	50 (S2)	15 (S1)	0	0

Tabulka 5: Zkouška sednutím



Obr. 20: Zkouška sednutím pro záměs Z2PP

3.2.2 Stupeň zhutnitelnosti

Zkoušku Stupeň zhutnitelnosti upravuje norma „ČSN EN 12350-4 Zkoušení čerstvého betonu – Část 4: Stupeň zhutnitelnosti“ [29]. Tato zkouška je obecně doporučitelná pro vláknobetony, proto byla provedena u záměsí Z3I a Z4II. Pro tuto zkoušku byla použita ocelová nádoba výšky 400 mm, jejíž příčný řez je čtverec o straně 200 mm. Princip zkoušky spočívá v naplnění navlhčené nádoby betonem bez hutnění až po okraj. K tomuto účelu byla použita zednická lžice,

která odpovídá normovému předpisu. Při zarovnávání povrchu betonu je nutno postupovat opatrně, protože pohybem ocelové tyče nesmí docházet k jakémukoliv hutnění. Po urovnání povrchu byla nádoba umístěna na vibrační stůl s pracovní frekvencí 40 Hz (2400 cyklů za minutu). V okamžiku, kdy již nedocházelo k dalšímu hutnění, byla změřena vzdálenost mezi horním okrajem formy a betonem vždy uprostřed každé strany nádoby. Výsledný bezrozměrný stupeň zhutnitelnosti c byl poté vypočten ze vztahu:

$$c = \frac{h}{h - s}, \quad (29)$$

kde h je výška nádoby a s je průměrná hodnota čtyř vzdáleností mezi horní hranou formy a povrchem zhutněného betonu. Rozměry se do vzorce dosazují v milimetrech.

Výsledky obou záměsí odpovídají stupni zhutnitelnosti C1 dle [25].

Shrnutí zkoušek stupně zhutnitelnosti pro všechny záměsí udává tabulka 6.

Záměs	Z1R	Z2PP	Z3I	Z4II
Stupeň zhutnitelnosti c [-]	–	–	1,33 (C1)	1,37 (C1)

Tabulka 6: Stupeň zhutnitelnosti



Obr. 21: Zkouška stupně zhutnitelnosti pro záměs Z3I

3.2.3 Objemová hmotnost čerstvého betonu

Pro stanovení objemové hmotnosti podle „ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost“ [30] bylo zapotřebí nejprve určit objem nádoby použité ke zkoušce.

K určení objemové hmotnosti byl využit tlakový hrnec ze zkoušky obsahu vzduchu. Objem této nádoby byl stanoven v souladu s Přílohou A předpisu [30], pouze skleněná deska nebyla použita.

Nejprve byla zvážena prázdná nádoba a poté byla nádoba zcela naplněna vodou o teplotě $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ a opět zvážena s přesností na 0,01 g.

Hmotnost prázdné nádoby: $m_{\text{prázdná}} = m_1 = 4,00 \text{ kg}$

Hmotnost nádoby naplněné vodou: $m_{\text{plná}} = 12,00 \text{ kg}$

Celková hmotnost vody:

$$m_{\text{voda}} = m_{\text{plná}} - m_{\text{prázdná}} = 12,00 - 4,00 = 8,00 \text{ kg} \quad (30)$$

Objemová hmotnost vody podle [30]: $\rho = 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$

Objem nádoby s přesností na 0,01 dm^3 :

$$V = \frac{m_{\text{voda}}}{\rho} = \frac{8,00}{998} = 0,008 016 = 8,02 \text{ dm}^3 \quad (31)$$

Pro zjištění objemové hmotnosti čerstvého betonu byla tato nádoba ve třech vrstvách naplněna betonovou směsí a pokaždé zhutněna 25 rovnoměrně rozloženými vpichy ocelové propichovací tyče se zaoblenými konci. Po naplnění byl povrch urovnán ocelovým hladítkem a nádoba byla na vnějším povrchu očištěna. Následně došlo k určení hmotnosti nádoby naplněné betonem m_2 v kilogramech a objemová hmotnost čerstvého betonu byla určena pomocí vztahu (32). Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližších 10 kg/m^3 .

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} [\text{kg} \cdot \text{m}^3] \quad (32)$$

Výsledky zkoušek všech záměsí uvádí tabulka 7.

Záměs	Z1R	Z2PP	Z3I	Z4II
Objemová hmotnost D [kg/m^3]	2320	2340	2350	2390

Tabulka 7: Objemová hmotnost čerstvého betonu



Obr. 22: Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu, záměs Z1R

3.2.4 Obsah vzduchu

Zkouška obsahu vzduchu probíhala podle „ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody“ [31]. Jako metoda zkoušení byla zvolena tlakoměrná metoda. Beton byl ukládán do válcové nádoby ve třech vrstvách a hutněn vždy 25 vpichy propichovací tyče s následným poklepáním na stěny nádoby paličkou k vypuzení vzduchových bublin. Norma umožňuje i hutnění na vibračním stole s frekvencí 40 Hz, praktickým ověřením však bylo zjištěno, že způsob hutnění neměl v případě zkoušení daných betonů na výsledek zkoušky podstatný vliv. Po naplnění celé nádoby, urovnání povrchu hladítkem a ořtení styčných ploch s víkem bylo na nádobu nasazeno víko s tlakoměrem. Po dokonalém připevnění čtyřmi svorkami byly otevřeny ventily, kterými byl prostor nad povrchem betonu zcela vyplněn vodou z pryžové stříčky. V okamžiku naplnění mohly být ventily uzavřeny a nádoba natlakována vzduchovou hustilkou na hodnotu, které přísluší nulové čtení na stupnici tlakoměru. Po otevření hlavního ventilu vzduchu byla na stupnici odečtena hodnota v procentech udávající obsah

vzduchu v čerstvém betonu. Před sejmutím víka bylo nutné otevřít plnicí ventily, aby došlo k uvolnění tlaku. Opravný součinitel pro kamenivo byl uvažován roven nule.

Záměs	Z1R	Z2PP	Z3I	Z4II
Obsah vzduchu A_C [%]	3,1	2,4	6,6	7,0

Tabulka 8: Obsah vzduchu

Z tabulky 8 je vidět, že vláknobetony s přidáním ocelovými drátky vykazovaly větší obsah vzduchu – u záměsi Z3I je to 6,6 % a u záměsi Z4II je obsah vzduchu 7,0 %.



Obr. 23: Zkouška obsahu vzduchu

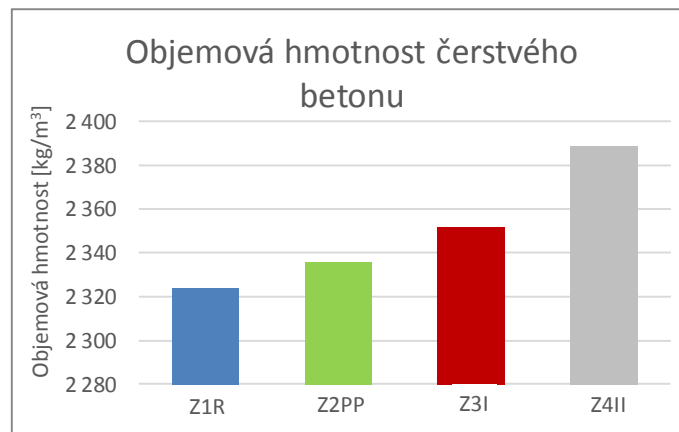
3.2.5 Zhodnocení zkoušek čerstvého betonu

- Sednutí kužele a zhutnitelnost

Zkouška sednutím se projevila jako nerealizovatelná pro vláknobetony a drátkobetony. U záměsi Z3I a Z4II byla provedena zkouška stupně zhutnitelnosti. Hodnota stupně zhutnitelnosti je pro tyto záměsi poměrně vysoká – 1,33 a 1,37, což odpovídá stupni C1.

- Objemová hmotnost čerstvého betonu

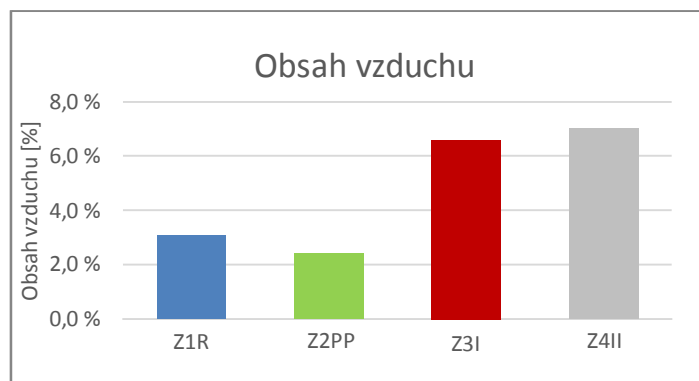
Obrázek shmuje zkoušku objemové hmotnosti všech záměsí. Podle očekávání dosahovaly záměsí s drátky vyšších hodnot objemové hmotnosti než záměs referenční a záměs s polypropylénovými vlákny.



Obr. 24: Objemová hmotnost čerstvého betonu

- Obsah vzduchu

U záměsí s přidáními ocelovými vlákny byl zjištěn více než dvojnásobný obsah vzduchu v porovnání s referenční záměsí a se záměsí s polypropylénovými vlákny (Obrázek 25). Doba míchání všech záměsí byla však přibližně shodná. Důvod toto výsledku je pravděpodobně dán tím, že se drátky při míchání neobalí dokonale cementovou kaší, betonová směs není tolik hutná a obsahuje více vzduchových pórů. Drátky také mohou způsobit oddálení hrubých zrn kameniva a při hutnění propichovací tyčí vznik míst s uzavřeným vzduchem. Záměs Z2PP s polypropylénovými vlákny měla naopak nepatrně menší obsah vzduchu než záměs referenční Z1R.



Obr. 25: Obsah vzduchu

Všechny zkoušky čerstvého betonu shrnuje pro přehlednost tabulka 9.

Záměs	Objemová hmotnost	Obsah vzduchu	Konzistence			
			Zkouška sednutím		Zhutnitelnost	
Z1R	2320 kg/m ³	3,1 %	50 mm	S2	–	–
Z2PP	2340 kg/m ³	2,4 %	15 mm	S1	–	–
Z3I	2350 kg/m ³	6,6 %	0 mm	–	1,33	C1
Z4II	2390 kg/m ³	7,0 %	0 mm	–	1,37	C1

Tabulka 9: Shrnutí zkoušek čerstvého betonu

3.3 Nedestruktivní zkoušení ztvrdlého betonu

3.3.1 Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu

Měření bylo prováděno přístrojem PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyzer 58-E4900 od italské firmy Controls. Přístroj odpovídá požadavkům normy [21].

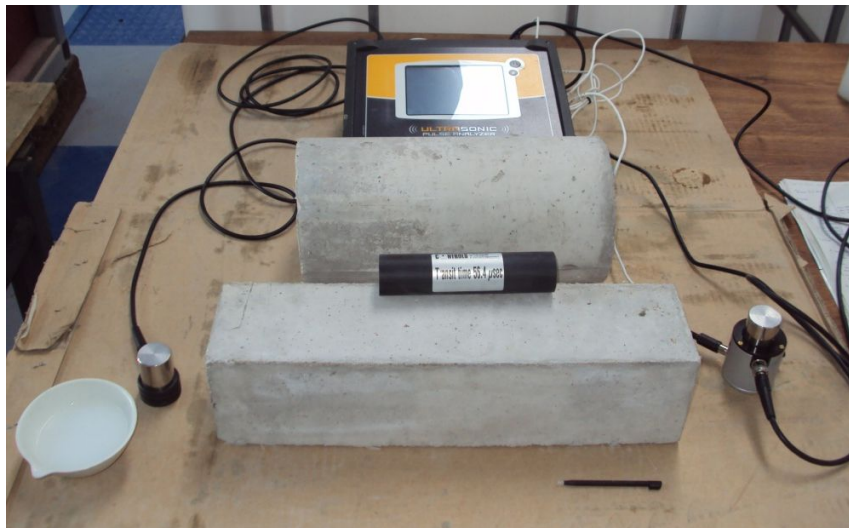
Přístroj se skládá z následujících částí (obrázek 26) [22]:

- generátor signálu a vyhodnocovací zařízení s digitálním osciloskopem
- piezoelektrické sondy: snímač a budič o jmenovitém pracovním kmitočtu 50 kHz
- propojovací koaxiální kabely délky 3 m s konektory BNC
- ruční spouštěč
- gelová vazelína
- kalibrační těleso
- sériový port RS232 pro připojení počítače nebo Schmidtova tvrdoměru

Frekvenci vysílání impulzů je možno měnit mezi 1, 2 nebo 5 Hz. Zesílení vstupního signálu je možné na 0, 6, 14, 20, 26, 34, 40 dB. Na kratší měřicí základny se používá měření bez zesílení (0 dB), na delší základny je nutné použít zesílený signál.

Přístroj umožňuje určit čas průchodu impulzu tělesem dvěma metodami: metodou Threshold a metodou Akaike Information Criterion. Metoda Threshold je metodou tradiční a měří první náběh signálu tím, že porovnává velikost jeho amplitudy a frekvence s danou hraniční hodnotou, která je vždy vyšší než šum signálu. Jako alternativu lze použít tzv. metodu AIC, která považuje signál za sloučení dvou nezávislých signálů – nosné vlny a šumu. Jejich analýzou je docíleno

přesného stanovení náběhu impulsu. Výhodou AIC je skutečnost, že naměřený čas není ovlivněn amplitudou signálu. Měření probíhala vždy metodou Threshold [22].



Obr. 26: Příprava měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Přístroj také umožňuje zpracovat naměřená data rychlou Fourierovou transformací (FFT), ukládat naměřená data na SD kartu a propojení se Schmidtovým tvrdoměrem pomocí sériového portu, kdy je na základě nahraných nebo uživatelem definovaných korelačních křivek vypočítána pevnost tělesa v tlaku v závislosti na době průchodu impulsu tělesem a na odrazu beranu Schmidtova kladívka.

Před začátkem měření bylo nutno přístroj kalibrovat pomocí kalibračního tělesa. Jeho základny byly pro tento účel natřeny vazelínou a na analyzátoru spuštěna kalibrace. Po přiložení budiče a snímače mohl být přečten čas průchodu ultrazvukového impulsu na obrazovce přístroje. Odchylky od stanoveného času $56,4 \mu\text{s}$ byly upraveny v kalibračním režimu a uloženy, čímž byla kalibrace dokončena.

Pro měření byla zvolena frekvence vysílání impulsů 2 Hz a zesílení vstupního signálu bylo vždy upraveno podle délky měřicí základny – 0 dB u krychlí, 34 dB u hranolů a válců a při nepřímém prozvučování povrchů hranolů bylo zesílení nastaveno na 20 dB.

Před měřením byly určeny měřické základny všech zkoušených těles s přesností na 1 % posuvným měřítkem s noniem s přesností 0,02 mm. Měření probíhalo v laboratoři za teploty $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Měření ultrazvukem odpovídalo vždy návodu výrobce. Na budič, snímač i zkušební místa těles byla před samotným zkoušením nanесena tenká vrstva gelové vazelíny, aby byl zabezpečen dokonalý kontakt sondy s povrchem tělesa. Následně byly sondy slabě přitisknuty ke stěnám tělesa a spuštěno měření. Na obrazovce přístroje byl po průchodu několika impulzů přečten čas náběhového čela prvního impulzu v mikrosekundách a ihned zaznamenán. Takto byla provedena vždy tři měření na jednom zkušebním místě, aby bylo možné eliminovat chyby vzniklé případným nedostatečným akustickým spojem mezi oběma sondami a betonem. Tato měření byla následně zprůměrována. Po ukončení měření na jednom zkušebním místě byla provedena další měření na ostatních zkušebních místech tělesa. Následně mohly být provedeny výše uvedené výpočty. Ze známé měřicí základny L a průměrného času průchodu \bar{T} náběhového čela impulzu byla vypočítána rychlost šíření ultrazvuku v_L v tělese. Poté byl spočítán dynamický modul pružnosti v tlaku E_{cu} a nezaručená pevnost v tlaku f_{be} podle směrného kalibračního vztahu. Po získání výsledků destruktivních zkoušek pevnosti v tlaku a po určení hodnoty koeficientu α mohla být stanovena upřesněná pevnost betonu v tlaku. Výsledky měření uvádí následující tabulky.

- Zkoušení krychlí

Krychle byly zkoušeny podle normy [21] na dvou protilehlých stěnách rovnoběžných se směrem hutnění čerstvého betonu ve třech různých výškových úrovních (obrázek 27). Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 10.



Obr. 27: Měření na krychlích, snímač signálu

Z1R		$\alpha = 1,95$		
Krychle				
Krychle	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μs]	40,7	38,1	36	
	39,5	38	35,7	
	36,5	38,7	34,8	
\bar{T} [μs]	38,9	38,3	35,5	
L [mm]	149,14	148,91	148,99	
v_L [km/s]	3,83	3,89	4,20	
E_{cu} [MPa]	34 500	35 500	41 300	
f_{be} [MPa]	18,6	19,8	27,1	
f_c [MPa]	42,5	41,8	43,6	
f_b [MPa]	36,3	38,6	52,9	

Z2PP		$\alpha = 1,61$		
Krychle				
Krychle	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μs]	35,0	38,4	37,2	
	35,6	37,8	37,1	
	36,0	37,2	35,1	
\bar{T} [μs]	35,5	37,8	36,5	
L [mm]	149,25	149,17	149,15	
v_L [km/s]	4,20	3,95	4,09	
E_{cu} [MPa]	41 100	36 400	39 000	
f_{be} [MPa]	27,2	21,0	24,3	
f_c [MPa]	39,2	38,7	39,0	
f_b [MPa]	43,8	33,8	39,2	

Z3I		$\alpha = 1,72$		
Krychle				
Krychle	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μs]	37,2	35,2	35,3	
	37,6	34,8	35,0	
	37,9	35,6	34,5	
\bar{T} [μs]	37,6	35,2	34,9	
L [mm]	149,19	149,31	149,10	
v_L [km/s]	3,97	4,24	4,27	
E_{cu} [MPa]	38 500	43 900	44 400	
f_{be} [MPa]	21,5	28,4	29,1	
f_c [MPa]	45,0	44,9	46,1	
f_b [MPa]	37,1	48,8	50,1	

Z4II		$\alpha = 1,61$		
Krychle				
Krychle	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μs]	36,4	36,1	35,6	
	35,7	36,2	35,3	
	35,2	35,8	35,8	
\bar{T} [μs]	35,8	36,0	35,6	
L [mm]	149,63	149,09	149,71	
v_L [km/s]	4,18	4,14	4,21	
E_{cu} [MPa]	42 800	41 800	43 400	
f_{be} [MPa]	26,8	25,6	27,5	
f_c [MPa]	41,2	44,8	42,7	
f_b [MPa]	43,2	41,2	44,3	

Tabulka 10: Zkoušení přímým prozvučováním ultrazvukem na krychlích

- Zkoušení válců

Měření na tělesech tvaru válce bylo provedeno na podstavkách na čtyřech měřicích základních rovnoběžných s osou válce. Z těchto čtyř měření bylo vyloučeno měření nejvíce se lišící od aritmetického průměru a v dalších výpočtech bylo pracováno se zbylými třemi hodnotami. Tento postup byl zvolen s ohledem na způsob měření, snímač byl totiž přikládán na plochu uhlazenou hladítkem, která nebyla obzvlášť u drátkobetonů dostatečně hladká, a měření na jednom přidávaném zkušebním místě se mělo docílit eliminace chyb. Tabulka 11 uvádí výsledky měření.

Z1R		$\alpha = 1,05$		
Válec				
Válec	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μ s]	66,7	66	67,5	
	66,5	64,3	68,6	
	65,3	64,8	68	
\bar{T} [μ s]	66,2	65,0	68,0	
L [mm]	300,97	303,31	300,19	
v_L [km/s]	4,55	4,66	4,41	
E_{cu} [MPa]	48 300	51 000	45 300	
f_{be} [MPa]	37,9	42,0	33,5	
f_c [MPa]	40,4	38,3	40,2	
f_b [MPa]	39,788	44,047	35,109	

Z2PP		$\alpha = 1,58$		
Válec				
Válec	3	4	5	
Přímé prozvučování T [μ s]	78,4	74,5	70,1	
	77,5	75	71,7	
	79,2	74,7	70,5	
\bar{T} [μ s]	78,4	74,7	70,8	
L [mm]	301,40	301,27	299,90	
v_L [km/s]	3,85	4,03	4,24	
E_{cu} [MPa]	34 500	38 000	41 800	
f_{be} [MPa]	18,9	23,0	28,3	
f_c [MPa]	36,8	36,6	37,4	
f_b [MPa]	29,8	24,1	29,7	

Z3I		$\alpha = 1,54$		
Válec				
Válec	1	2	5	
Přímé prozvučování T [μ s]	73,6	72,5	73,2	
	74,2	72,9	74,8	
	73,5	71,6	73,4	
\bar{T} [μ s]	73,8	72,3	73,8	
L [mm]	301,60	301,34	301,50	
v_L [km/s]	4,09	4,17	4,09	
E_{cu} [MPa]	40 300	41 600	40 300	
f_{be} [MPa]	24,3	26,3	24,3	
f_c [MPa]	39,6	38,0	37,6	
f_b [MPa]	37,4	40,5	37,3	

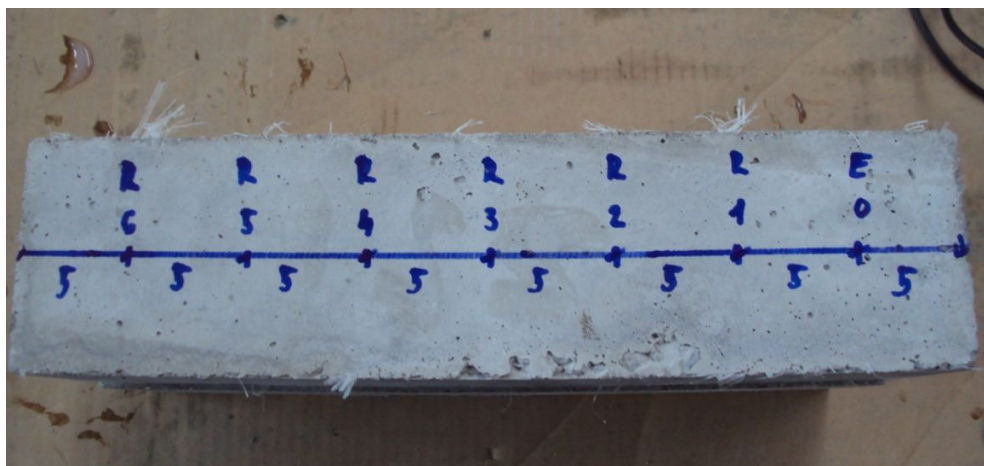
Z4II		$\alpha = 1,30$		
Válec				
Válec	1	2	–	
Přímé prozvučování T [μ s]	69,7	71,8	–	
	69,8	71,4	–	
	69,8	71,8	–	
\bar{T} [μ s]	69,8	71,7	–	
L [mm]	301,08	301,86	–	
v_L [km/s]	4,32	4,21	–	
E_{cu} [MPa]	45 500	43 300	–	
f_{be} [MPa]	30,5	27,6	–	
f_c [MPa]	35,5	39,8	–	
f_b [MPa]	39,6	35,8	–	

Tabulka 11: Zkoušení přímým prozvučováním ultrazvukem na válcích

- Zkoušení hranolů

Hranoly byly zkoušeny dvojím způsobem. Nejprve bylo použito metody přímého prozvučování podél délky hranolů. Takto byly u každého tělesa naměřeny vždy čtyři hodnoty průchodu. Z těchto hodnot byla vyloučena hodnota nejvíce vzdálená od střední hodnoty čtyř měření, podobně jako u válců. Poté byla vyzkoušena i metoda nepřímého prozvučování (obrázek 28). Budič byl osazen na místo „E“ vzdálené 50 mm od hrany hranolu a snímač byl postupně posouván do poloh „R“ vzdálených 50, 100, 150, 200, 250 a 300 mm od budiče. Výsledkem tedy bylo naměření šesti časů průchodu vlnění pro šest různých vzdáleností snímače od budiče. Z těchto dvojic hodnot byl sestrojen graf závislosti dráhy na čase a ze směrnice přímky proložené

těmito body mohla být určena rychlost povrchových vln. Z výsledků v tabulce 12 je zřejmé, že je tento způsob nepřímého prozvučování nevhodný pro určování rychlosti šíření impulzu. Následné výpočty dynamického modulu pružnosti potvrzují tuto skutečnost.



Obr. 28: Příprava nepřímého prozvučování hranolů

Po provedení měření ultrazvukovou impulzovou metodou byla tělesa tvaru krychle a válce vyzkoušena Schmidovým tvrdoměrem a následně na pevnost v tlaku podle ČSN EN 12390-3 [32].

Z1R				
Hranol	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μ s]	84,8	82,6	83,0	
	87,1	84,0	85,5	
	87,9	86,5	85,0	
\bar{T} [μ s]	86,6	84,4	84,5	
L [mm]	399,60	399,73	399,55	
v_L [km/s]	4,61	4,74	4,73	
E_{cu} [MPa]	44 400	46 900	46 500	
Nepřímé prozvučování T [μ s]	50 mm	22,5	23,3	16,3
	100 mm	42,2	40,2	37,1
	150 mm	56,8	53,1	53,1
	200 mm	75,9	67,1	61,1
	250 mm	86,6	79,6	74,2
	300 mm	96,3	83,5	83,5
v_L [km/s] = tg Φ	3,05	3,48	3,51	
E_{cu} [MPa]	19 400	25 300	25 700	
f_{cf} [MPa]	4,6	4,8	5,6	

Z2PP				
Hranol	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μ s]	84,0	85,6	82,3	
	83,0	84,4	83,8	
	83,5	86,3	83,9	
\bar{T} [μ s]	83,5	85,4	83,3	
L [mm]	399,59	399,51	399,15	
v_L [km/s]	4,79	4,68	4,79	
E_{cu} [MPa]	47 600	45 800	47 500	
Nepřímé prozvučování T [μ s]	50 mm	14,1	15,0	14,8
	100 mm	25,9	26,4	26,7
	150 mm	35,9	55,0	41,0
	200 mm	50	65,4	50,2
	250 mm	79,3	75,0	63,6
	300 mm	94,2	91,4	92,2
v_L [km/s] = tg Φ	3,12	3,18	3,44	
E_{cu} [MPa]	20 200	21 200	24 400	
f_{cf} [MPa]	5,9	5,2	5,4	

Z3I				
Hranol	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μ s]	89,8	89,3	79,0	
	89,7	89,8	78,8	
	89,3	89,2	79,1	
\bar{T} [μ s]	89,6	89,4	79,0	
L [mm]	399,37	400,58	350,19	
v_L [km/s]	4,46	4,48	4,43	
E_{cu} [MPa]	44 000	44 200	43 000	
Nepřímé prozvučování T [μ s]	50 mm	22,0	18,2	28,6
	100 mm	37,3	43,3	41,2
	150 mm	53,6	63,7	62,2
	200 mm	66,5	70,2	77,5
	250 mm	79,7	80,6	105,3
	300 mm	90,6	89,6	–
v_L [km/s] = tg Φ	3,3	3,2	2,5	
E_{cu} [MPa]	24 500	22 200	13 600	
f_{cf} [MPa]	7,7	7,0	6,4	

Z4I				
Hranol	1	2	3	
Přímé prozvučování T [μ s]	90,0	89,5	89,4	
	89,5	89,0	88,3	
	89,6	88,8	88,6	
\bar{T} [μ s]	89,7	89,1	88,8	
L [mm]	400,12	399,10	400,00	
v_L [km/s]	4,46	4,48	4,51	
E_{cu} [MPa]	44 000	44 200	44 800	
Nepřímé prozvučování T [μ s]	50 mm	15,8	20	20,6
	100 mm	38,1	36,8	41,5
	150 mm	45,9	52	51,7
	200 mm	59,6	61,3	58,8
	250 mm	81,7	70,8	76,2
	300 mm	89,3	82,4	89,6
v_L [km/s] = tg Φ	3,28	3,67	3,45	
E_{cu} [MPa]	23 900	29 600	26 300	
f_{cf} [MPa]	7,6	9,1	6,5	

Tabulka 12: Zkoušení hranolů přímým a nepřímým prozvučováním

3.3.2 Metoda Schmidtova odrazového tvrdoměru

Pro tvrdoměrné zkoušky byl použit přístroj od firmy Controls s označením 58-C0181/G Digital Concrete Hammer (obrázek 29) [33]. Tento přístroj je reprezentant nejmodernějších typů odrazových tvrdoměřů.

Jedná se o kladívko typu N s dopadovou energií beranu 2,2 J. Přístroj disponuje pamětí a automaticky ukládá všechny hodnoty odrazů pro jednotlivou sadu měření. K napájení přístroje se používají běžné baterie, nebo elektrický proud ze sítě. Data je možné exportovat do počítače pomocí sériového portu.



Obr. 29: Schmidtovo kladívko 58-C0181/G

Po sedmi provedených odrazech začne přístroj automaticky vyhodnocovat naměřená data. Z hodnot odrazů je vyloučena minimální a maximální hodnota a ze zbylých hodnot je vypočten aritmetický průměr odrazu (33), k němuž je na základě obecného kalibračního vztahu přiřazena pevnost betonu v tlaku. Přístroj zobrazí rovněž směrodatnou odchylku naměřených dat (34), ze které je možné učinit závěry o rovnoměrnosti betonu ve zkoušené konstrukci.

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (33)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n - 1}} \quad (34)$$

Před měřením je nutno nastavit, zda se jedná o určování krychelné nebo válcové pevnosti a pod jakým úhlem proběhne zkouška (+90°, +45°, 0°, -45° nebo -90°). Dále je možné definovat až pět různých kalibračních křivek tvaru polynomu nejvýše třetího stupně pro výpočet pevnosti. Standardní softwarovou výbavu tvoří vztahy pro beton stáří 7 a 28 dní. Uživatel může také před zkouškou zadat koeficienty zohledňující stáří nebo vlhkost betonu.

Při zkoušení bylo využito i možnosti propojení kladívka sériovým portem s ultrazvukovým přístrojem a vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku kombinací tvrdoměrné a ultrazvukové impulzové metody.

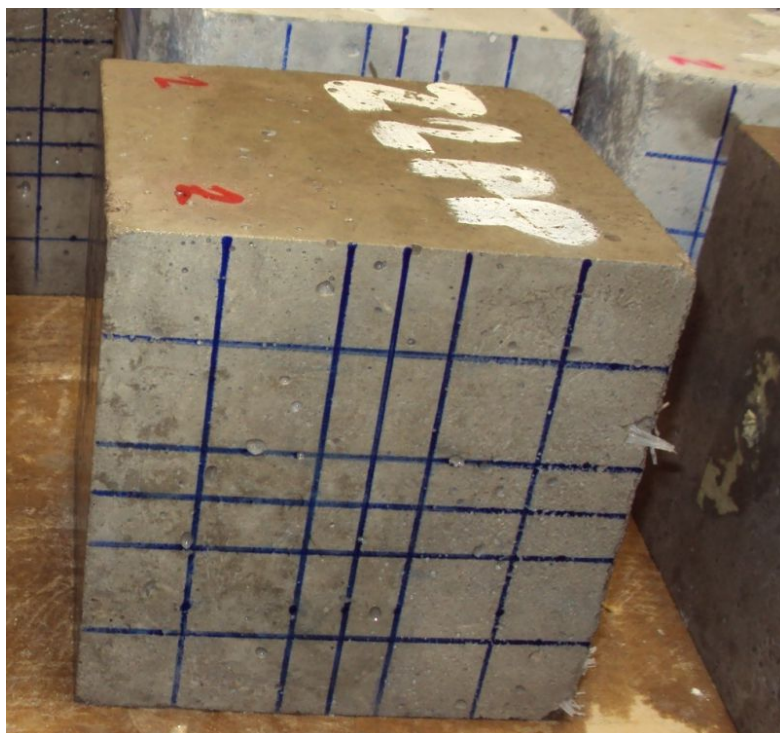
Schmidtovým tvrdoměrem byla zkoušena tělesa tvaru krychle a válce.

- Zkoušení krychlí

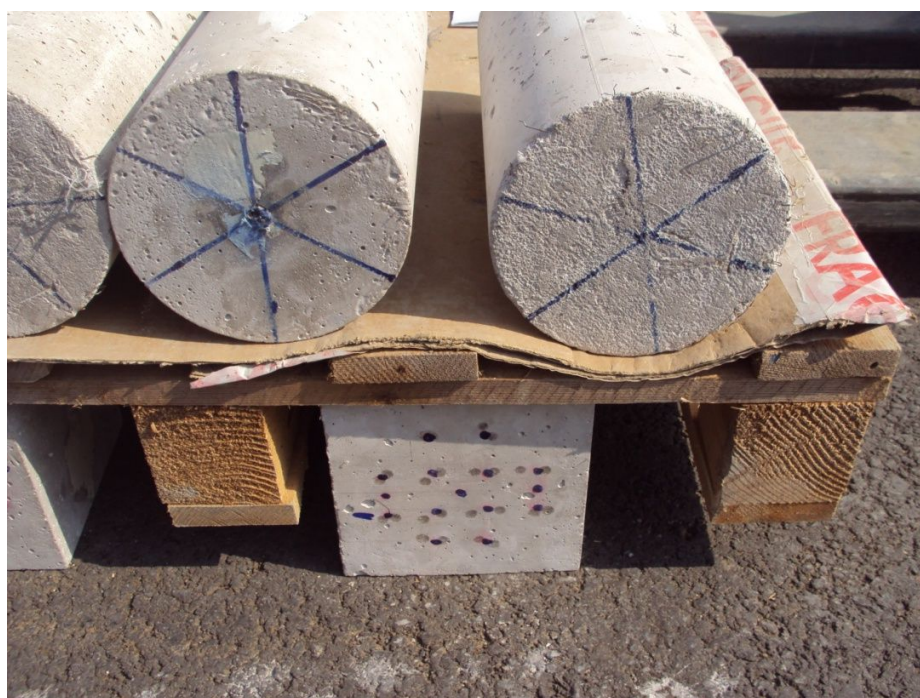
Pro zkoušení krychlí byly zvoleny tyto dva způsoby:

A. Zkoušení probíhalo směrem svisle dolů, tedy pod úhlem -90° na dvou protilehlých plochách (Plocha 1 a 2) rovnoběžných se směrem hutnění. Při tomto postupu nebyly krychle nijak znehybněny proti pohybu. Celkem bylo na každé ploše vyznačeno 12 zkušebních míst vzdálených od sebe a od hran krychle 3 cm. Na každém místě byl proveden jeden odraz (obrázek 30).

B. Druhý způsob zkoušení byl zvolen vodorovně pod úhlem 0°. Aby bylo zabráněno horizontálnímu pohybu těles při zkoušce, byly krychle zatíženy určitou hmotností, na jednu krychli připadala síla cca 0,5 kN. Měření bylo provedeno opět na stejných plochách a na stejných zkušebních místech jako v případě A (obrázek 31).



Obr. 30: Síť zkušebních bodů pro tvrdoměrnou a ultrazvukovou metodu



Obr. 31: Zkoušení krychlí vodorovným směrem (způsob B)

Z1R						
	A		B			
	$\alpha = 1,95$		$\alpha = 2,08$			
Krychle 1						
Plocha	1	2	$\overline{f_{be}}$	1	2	$\overline{f_{be}}$
u [-]	25,9	25		27,1	29,3	
s [-]	2,6	1,9		2,1	3	
f_{be} [MPa]	22,2	20,9	22	19,3	22,5	21
f_c [MPa]	42,5					
f_b [MPa]	42,0			43,6		
Krychle 2						
Plocha	1	2	$\overline{f_{be}}$	1	2	$\overline{f_{be}}$
u [-]	25,3	25,1		28,1	26,3	
s [-]	2,2	2,3		2,6	2,1	
f_{be} [MPa]	21,2	21,1	21	20,8	18	19
f_c [MPa]	41,8					
f_b [MPa]	41,2			40,5		
Krychle 3						
Plocha	1	2	$\overline{f_{be}}$	1	2	$\overline{f_{be}}$
u [-]	26,1	26,5		28	28,5	
s [-]	1,8	2,4		3,6	3,7	
f_{be} [MPa]	22,5	23,2	23	20,6	21,3	21
f_c [MPa]	43,6					
f_b [MPa]	44,6			43,7		

Z2PP						
	A		B			
	$\alpha = 1,85$		$\alpha = 1,88$			
Krychle 1						
Plocha	1	2	$\overline{f_{be}}$	1	2	$\overline{f_{be}}$
u [-]	26,3	24,1		28,2	27,7	
s [-]	3,2	1,6		2,6	2,1	
f_{be} [MPa]	22,8	19,5	21	20,9	20,1	21
f_c [MPa]	39,2					
f_{cu} [MPa]	39,2			38,4		
Krychle 2						
Plocha	1	2	$\overline{f_{be}}$	1	2	$\overline{f_{be}}$
u [-]	25,8	23,7		30,3	27,7	
s [-]	3,1	2,5		3,2	2,0	
f_{be} [MPa]	22,0	19	21	24,1	20,1	22
f_c [MPa]	38,7					
f_{cu} [MPa]	38,019			41,4		
Krychle 3						
Plocha	1	2	$\overline{f_{be}}$	1	2	$\overline{f_{be}}$
u [-]	25,6	25,0		27,2	27,7	
s [-]	2,5	1,9		3,8	2,8	
f_{be} [MPa]	21,8	20,9	21	19,3	20,1	20
f_c [MPa]	39,0					
f_{cu} [MPa]	39,6			36,9		

Tabulka 13: Výsledky tvrdoměrného měření na krychlích záměsí Z1R a Z2PP

Z3I						
	A		B			
	$\alpha = 2,01$		$\alpha = 2,03$			
Krychle 1						
Plocha	1	2	\bar{f}_{be}	1	2	\bar{f}_{be}
$u [-]$	27,4	24,5		30,7	29,9	
$s [-]$	2,5	2,9		3,8	3,2	
$f_{be} [MPa]$	24,4	20,1	22	24,7	23,4	24
$f_c [MPa]$	45,0					
$f_b [MPa]$	44,7			48,9		
Krychle 2						
Plocha	1	2	\bar{f}_{be}	1	2	\bar{f}_{be}
$u [-]$	23,7	28,4		29,4	26,6	
$s [-]$	1,8	2,1		5,1	1,9	
$f_{be} [MPa]$	19,1	26	23	22,7	18,6	21
$f_c [MPa]$	44,9					
$f_b [MPa]$	45,3			42,0		
Krychle 3						
Plocha	1	2	\bar{f}_{be}	1	2	\bar{f}_{be}
$u [-]$	26,2	26,6		28,3	29,7	
$s [-]$	2,7	1,5		2,6	3,9	
$f_{be} [MPa]$	22,6	23,3	23	21,1	23,2	22
$f_c [MPa]$	46,1					
$f_b [MPa]$	46,1			45,1		

Z4II						
	A		B			
	$\alpha = 2,13$		$\alpha = 2,29$			
Krychle 1						
Plocha	1	2	\bar{f}_{be}	1	2	\bar{f}_{be}
$u [-]$	23,3	24,1		26,7	28,1	
$s [-]$	3,1	2,5		2,2	4,1	
$f_{be} [MPa]$	18,4	19,7	19	18,8	20,7	20
$f_c [MPa]$	41,3					
$f_{cu} [MPa]$	40,5			45,3		
Krychle 2						
Plocha	1	2	\bar{f}_{be}	1	2	\bar{f}_{be}
$u [-]$	24,5	25,0		26,8	25,6	
$s [-]$	3,2	2,4		2,0	2,9	
$f_{be} [MPa]$	20,2	21,0	21	18,8	17,1	18
$f_c [MPa]$	44,9					
$f_{cu} [MPa]$	43,8			41,2		
Krychle 3						
Plocha	1	2	\bar{f}_{be}	1	2	\bar{f}_{be}
$u [-]$	24,1	25,9		26,0	27,1	
$s [-]$	1,9	2,4		1,9	2,9	
$f_{be} [MPa]$	19,6	22,2	21	17,7	19,2	18
$f_c [MPa]$	42,7					
$f_{cu} [MPa]$	44,4			42,3		

Tabulka 14: Výsledky tvrdoměrného měření na krychlích záměsí Z3I a Z4II

- Zkoušení válců

Tvrdoměrné zkoušení válců probíhalo třemi způsoby. Válce záměsí Z1R a Z2PP byly vyzkoušeny jen způsobem A, tělesa záměsí Z3I a Z4II byla zkoušena všemi třemi způsoby.

A. Pro tento způsob zkoušení byla zvolena spodní podstava válců, tj. ta plocha, která byla během tuhnutí betonu ve formě. Pod úhlem -90° bylo provedeno 9 měření na 9 zkušebních místech rozložených rovnoměrně po kružnici vzdálené 3 cm od hrany válce.

B. Toto zkoušení bylo provedeno na ploše válce, která byla uhlazena hladítkem. Tento způsob zkoušení byl zvolen proto, že povrchová vrstva vláknobetonů a drátkobetonů nevykazuje takovou hladkost jako u prostého betonu, což dle předpokladů ovlivní odrazy beranu.

C. Třetí způsob spočíval ve vyzkoušení válců 9 platnými měřeními provedenými rovnoměrně po výšce válce, tedy po zaoblené ploše. Cílem bylo stanovit rozdíl mezi zkouškou na hladké rovné ploše a na hladké zakřivené ploše.

Záměs Z1R				Záměs Z2PP			
	A	B	C		A	B	C
	$\alpha = 1,45$	–	–		$\alpha = 1,25$		

Válec 1				Válec 3			
u [–]	30,1	–	–	u [–]	34,1	–	–
s [–]	1,8	–	–	s [–]	3,2	–	–
f_{be} [MPa]	24,3	–	–	f_{be} [MPa]	29,8	–	–
f_c [MPa]	40,4			f_c [MPa]	36,8		
f_b [MPa]	35,4	–	–	f_b [MPa]	37,4	–	–

Válec 2				Válec 4			
u [–]	33,1	–	–	u [–]	32,1	–	–
s [–]	0,6	–	–	s [–]	1,9	–	–
f_{be} [MPa]	28,3	–	–	f_{be} [MPa]	27	–	–
f_c [MPa]	38,3			f_c [MPa]	36,6		
f_b [MPa]	41,2	–	–	f_b [MPa]	33,9	–	–

Válec 3				Válec 5			
u [–]	32	–	–	u [–]	35,3	–	–
s [–]	1,2	–	–	s [–]	3,6	–	–
f_{be} [MPa]	26,8	–	–	f_{be} [MPa]	31,5	–	–
f_c [MPa]	40,2			f_c [MPa]	37,4		
f_b [MPa]	39,0	–	–	f_b [MPa]	39,5	–	–

Tabulka 15: Výsledky tvrdoměrného měření na válcích záměsí Z1R a Z2PP

Záměs Z3I			
	A	B	C
	$\alpha = 1,41$	$\alpha = 1,79$	$\alpha = 1,99$

Záměs Z4II			
	A	B	C
	$\alpha = 1,21$	$\alpha = 1,53$	$\alpha = 1,90$

Válec 1			
$u [-]$	30,6	28	26,3
$s [-]$	1,4	1,1	2,3
$f_{be} [MPa]$	25	21,6	19,4
$f_c [MPa]$	39,6		
$f_b [MPa]$	35,3	38,7	38,7

Válec 1			
$u [-]$	35,9	30,1	27,3
$s [-]$	1,2	1,9	2,1
$f_{be} [MPa]$	32,3	24,3	20,7
$f_c [MPa]$	35,5		
$f_b [MPa]$	38,9	37,1	39,3

Válec 2			
$u [-]$	32,7	28,2	28,1
$s [-]$	1,7	1,9	1,4
$f_{be} [MPa]$	27,9	21,8	21,7
$f_c [MPa]$	38,0		
$f_b [MPa]$	39,4	39,0	43,3

Válec 2			
$u [-]$	34,3	30,6	26
$s [-]$	2,9	1,3	2,7
$f_{be} [MPa]$	30,2	25	19
$f_c [MPa]$	39,8		
$f_b [MPa]$	36,4	38,2	36,1

Válec 5			
$u [-]$	33,2	27,6	24,2
$s [-]$	1,7	1,3	2,5
$f_{be} [MPa]$	28,6	21	16,7
$f_c [MPa]$	37,6		
$f_b [MPa]$	40,4	37,6	33,3

Tabulka 16: Výsledky tvrdoměrného měření na válcích záměsí Z3I a Z4II

Vyhodnocení výsledků tvrdoměrných měření proběhlo z části automaticky pomocí softwaru Schmidtova kladívka (viz výše).

Tělesa zkoušená tvrdoměrnou metodou a ultrazvukovou impulzovou metodou byla následně vyšetřena destruktivně na pevnost v tlaku, aby mohly být pevnosti s nezaručenou přesností upřesněny pomocí součinitele α .

Tabulky 13 až 16 uvádí výsledky všech tvrdoměrných zkoušek.

3.3.3 Kombinace ultrazvukové impulzové metody v kombinaci se Schmidovým tvrdoměrem typu N

Kombinace ultrazvukové impulzové metody a Schmidova tvrdoměru typu N umožňuje získat krychelnou pevnost v tlaku bez nutnosti doplňujícího destruktivního zkoušení, což je výhodou hlavně u starších betonových konstrukcí, ze kterých není možné odebrat vzorky na zhotovení zkušebních těles, aniž by došlo k poškození konstrukce. Takto určené hodnoty pevnosti sice nemají váhu upřesněné zkoušky ve smyslu ČSN 73 1370, jsou však přesnější než zkoušky s nezaručenou přesností.

Při praktickém měření byla zkušební tělesa tvaru krychle zkoušena oběma metodami na stejných zkušebních plochách. Výsledkem ultrazvukové zkoušky byla rychlost průchodu svazku ultrazvukových vln přes základnu známé délky a výsledkem ze zkoušení Schmidovým tvrdoměrem vodorovným směrem byla hodnota odrazu beranu.

Vyhodnocení naměřených hodnot proběhlo třemi způsoby:

- Podle Přílohy C v ČSN 73 2011 [16]

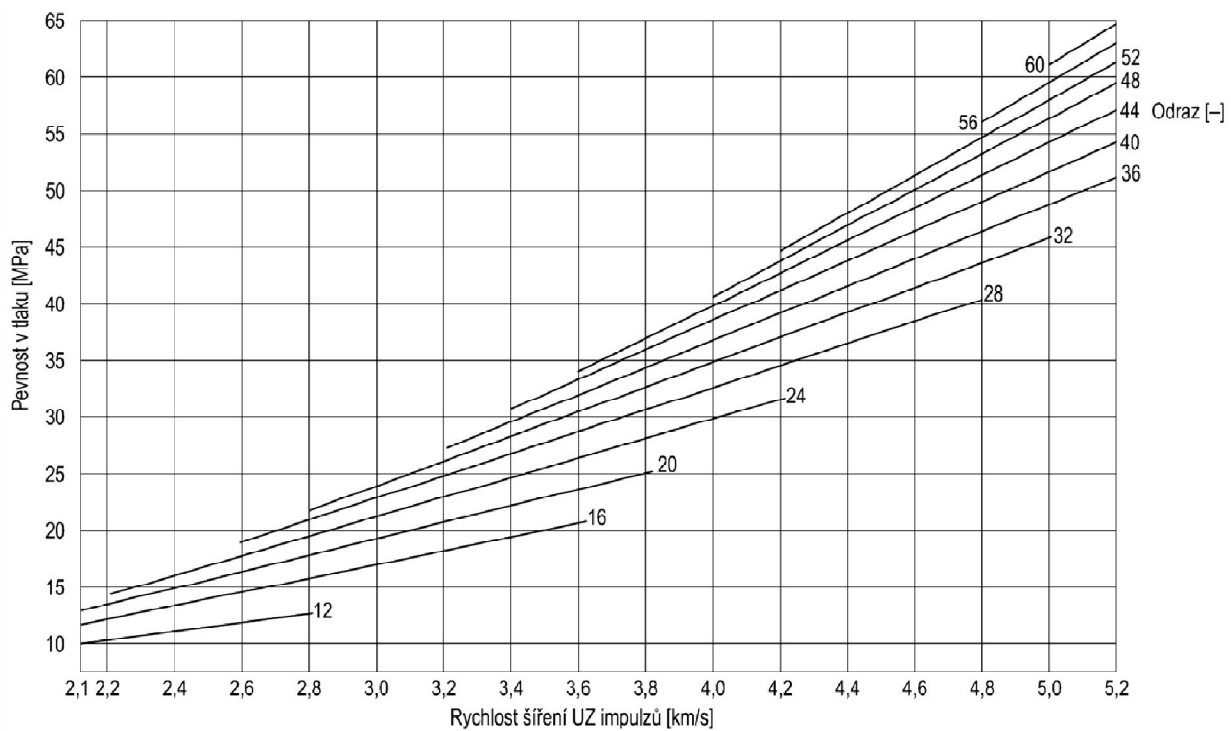
Krychelná pevnost betonu v tlaku po 28 dnech s nezaručenou přesností f_{ce} v MPa je

$$f_{ce} = 0,0286 \cdot v_L^{1,85} \cdot u^{1,246}, \quad (35)$$

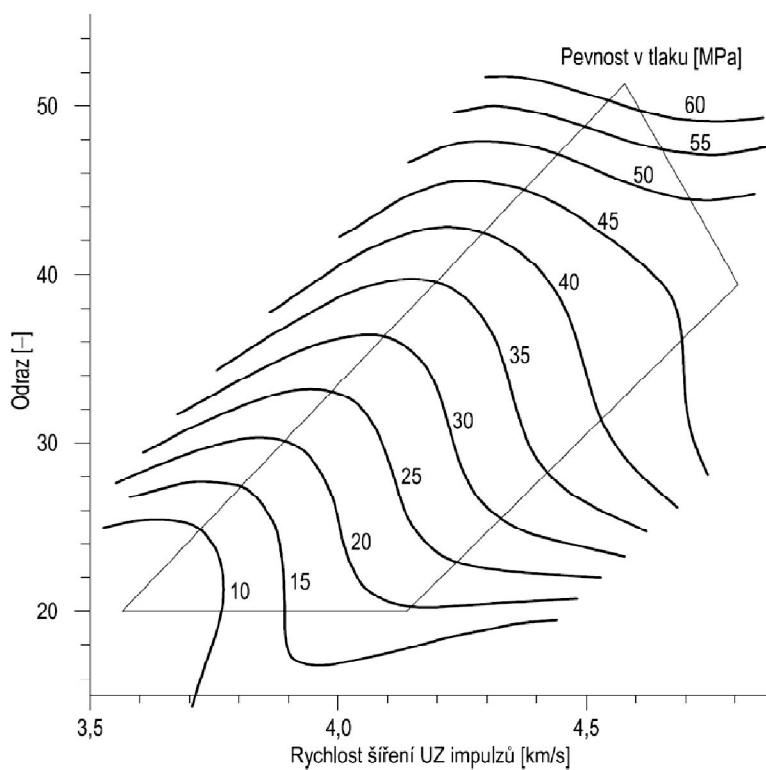
kde v_L je rychlost šíření čela podélných ultrazvukových vln v betonu v km/s a u je hodnota odrazu Schmidova tvrdoměru při zkoušení ve vodorovné poloze.

- Podle řešení Ing. Dr. A. Pavlíka [15]

Toto řešení bylo vypracováno pro konstrukční beton z běžného kameniva a z cementu na bázi portlandského slínku. Vztah platí pro přirozeně vlhký beton nenarušený korozi. Odchylky od krychelné pevnosti stanovené destruktivně jsou do 25 % při pravděpodobnosti 95 %. Závislost rychlosti ultrazvukového vlnění a odrazu beranu Schmidova tvrdoměru typu N na pevnosti betonu v tlaku je na obrázku [15].



Obr. 32: Určení pevnosti v tlaku z rychlosti šíření UZ impulzů a odrazu beranu Schmidtova kladívka podle Pavlíka [15]



Obr. 33: Určení pevnosti v tlaku z rychlosti šíření UZ impulzů a odrazu beranu Schmidtova kladívka, přístroj Controls [22]

- Automaticky z předem definované křivky přístroje Controls [22]

Po propojení Schmidtova kladívka s ultrazvukovým přístrojem je možné zvolit jednu z korelačních křivek, podle které se vypočítá pevnost v tlaku na základě hodnot naměřených oběma přístroji. Pro výpočet byla zvolena křivka odpovídající běžnému portlandskému cementu (obrázek 33).

Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 17.

Krychle	v_L [km/s]	Odraz u [-]	Pevnost v tlaku f_{ce} [MPa]		
			ČSN	Pavlik	UZ přístroj
Z1R 1	3,83	28,2	22	32	17
Z1R 2	3,89	27,2	22	31	18
Z1R 3	4,20	28,3	26	35	28
Z2PP 1	4,20	28,0	26	35	28
Z2PP 2	3,95	29,0	24	33	20
Z2PP 3	4,09	27,5	24	33	24
Z3I 1	3,97	30,3	26	33	22
Z3I 2	4,24	28,0	26	35	30
Z3I 3	4,27	29,0	28	36	31
Z4II 1	4,18	27,4	25	34	26
Z4II 2	4,14	26,2	23	33	26
Z4II 3	4,21	26,6	24	34	28

Tabulka 17: Pevnosti v tlaku stanovené odrazovou metodou a impulzovou metodou v kombinaci

3.3.4 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Hmotnost tělesa na vzduchu m_a byla určena na váze za stavu nasycení vodou po otření vody z povrchu tělesa. Pro stanovení objemu těles byla vzhledem k určitým odchylkám od normových rozměrů zkušebních těles zvolena metoda určení hmotnosti tělesa ponořením do vody. Podle „ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu“ [34] je tato metoda metodou referenční. Nejprve byla určena hmotnost třmenu ponořeného ve vodě m_{st} . Následně byla do třmenu umísťována postupně zkušební tělesa (krychle, válce a hranoly) a zaznamenány jejich hmotnosti spolu se třmenem za stavu, kdy byla tělesa zcela ponořena ve vodě ($m_{st} + m_w$). Objem tělesa V byl určen ze vztahu (36), kde hustota vody při 20 °C je $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$. Výpočet objemové hmotnosti byl proveden podle vztahu (37). Tabulka 18 udává výsledky zkoušky pro všechna tělesa.

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (36)$$

$$D = \frac{m_a}{V} \quad (37)$$



Obr. 34: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

	Těleso	D [kg/m ³]	Těleso	D [kg/m ³]	Těleso	D [kg/m ³]	Těleso	D [kg/m ³]
Krychle	Z1R 1	2350	Z2PP 1	2330	Z3I 1	2440	Z4II 1	2440
	Z1R 2	2350	Z2PP 2	2340	Z3I 2	2440	Z4II 2	2440
	Z1R 3	2340	Z2PP 3	2330	Z3I 3	2440	Z4II 3	2450
	Z1R+1	2340	Z2PP +1	2330	Z3I 4	2450	Z4II 4	2430
	Z1R+2	2330	Z2PP +2	2330	Z3I 5	2440	Z4II 5	2440
	Z1R+3	2320	Z2PP +3	2320	Z3I 6	2430	Z4II 6	2440
Válce	Z1R 1	2340	Z2PP 1	2330	Z3I 1	2410	Z4II 1	2440
	Z1R 2	2350	Z2PP 2	2340	Z3I 2	2400	Z4II 2	2440
	Z1R 3	2330	Z2PP 3	2330	Z3I 3	2410	–	–
	Z1R 4	2330	Z2PP 4	2340	Z3I 4	2400	–	–
	Z1R 5	2330	Z2PP 5	2330	Z3I 5	2420	–	–
Hranoly	Z1R 1	2320	Z2PP 1	2310	Z3I 1	2460	Z4II 1	2460
	Z1R 2	2320	Z2PP 2	2330	Z3I 2	2450	Z4II 2	2450
	Z1R 3	2310	Z2PP 3	2300	Z3I 3	2430	Z4II 3	2450

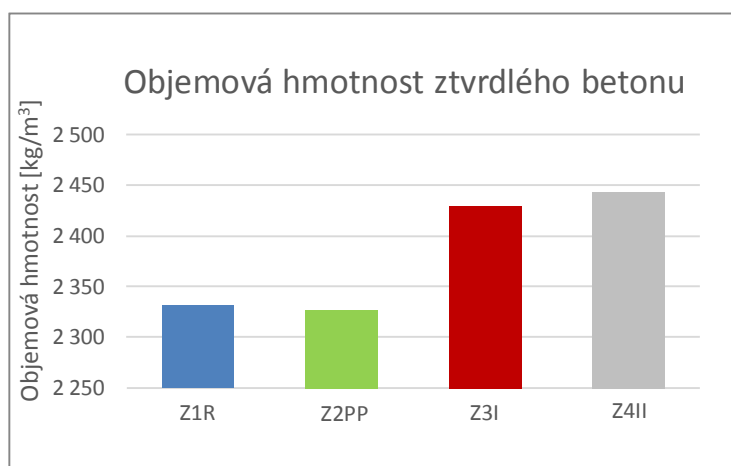
Tabulka 18: Objemová hmotnost těles

3.3.5 Zhodnocení nedestruktivních zkoušek betonu

Po vyjmutí zkušebních těles z vody po 28 dnech ošetřování proběhla kontrola rozměrů těles, při které bylo zjištěno, že maximální dovolené odchytky od normou stanovených jmenovitých rozměrů byly v některých případech překročeny – jedná se o krychle Z2PP+ 1, Z2PP+ 2, Z3I 2, Z3I 3, Z3I 5, Z4II 3, Z4II 5 a hranoly Z1R 3, Z3I 1, Z3I 2, Z3I 3, Z4II 1 a Z4II 3. Příčinou může být použití nekalibrovaných forem z překližky, nebo nedůslednosti při uhlazení betonu. Tato tělesa nebyla ze zkoušení vyloučena, byly na nich provedeny všechny zkoušky a do výpočtů byly vždy dosazovány skutečné naměřené rozměry.

- Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost drátkobetonů převyšovala objemovou hmotnost betonu záměsí Z1R a Z2PP o zhruba 100 kg/m^3 . Porovnání s objemovou hmotností čerstvého betonu ukazuje, že rozdíly mezi oběma zkouškami mohou být až cca 70 kg/m^3 (záměs Z3I).



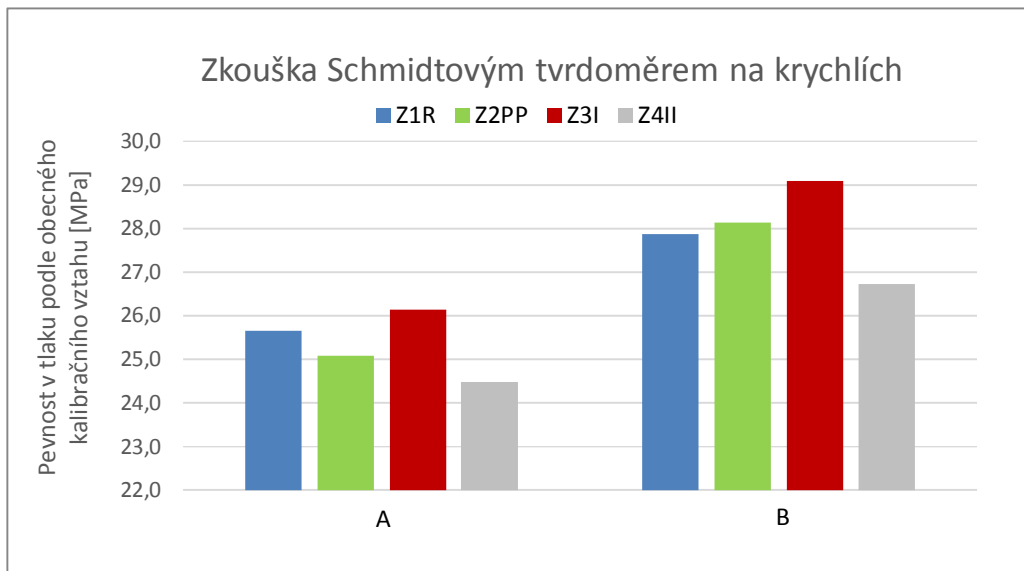
Obr. 35: Průměrné objemové hmotnosti těles jednotlivých záměsí

- Zkoušky Schmidovým tvrdoměrem

Odrazovým tvrdoměrem byla zkoušena tělesa tvaru krychle a válce.

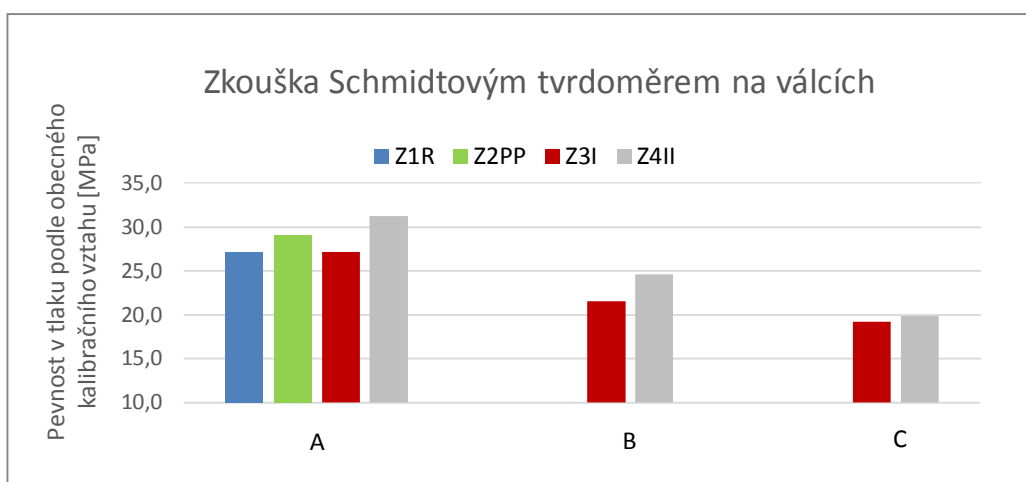
Při zkoušení krychlí vyšlo při porovnání obou způsobů A a B najevo, že zkoušení pod minimální zátěží vodorovným směrem vede již při zlomku normou stanovené zátěže (10 % z očekávané krychelné pevnosti) k větším odrazům beranu tvrdoměru. Při zkoušení krychlí bez zátěže směrem svisle dolů se část energie přenášené razníkem přemění na pohybovou energii a odskok beranu tedy nedosahuje takových hodnot jako v případě zatížené krychle. Pro reprezentativní výsledky je

tedy nutné dodržení postupu stanoveného normou a rychle zatěžovat předepsaným způsobem a zkoušet vodorovným směrem.



Obr. 36: Průměrné pevnosti v tlaku podle zkoušky Schmidovým tvrdoměrem na krychlích

Válce byly podrobeny zkouškám na různých površích (způsoby A, B, C). Největší hodnoty odrazů byly zjištěny při měření na spodní hladké podstavě válce, tj. na podstavě, která byla ve formě. Nejnížší hodnoty byly naměřeny na zaoblené, ale hladké ploše při zkoušení po výšce válce. Při výběru zkušebního místa je tedy nutné věnovat zvýšenou pozornost jeho stavu, protože pevnosti v tlaku zjištěné z obecného kalibračního vztahu se mohou dle kvality a úpravy povrchu lišit až o 10 MPa.

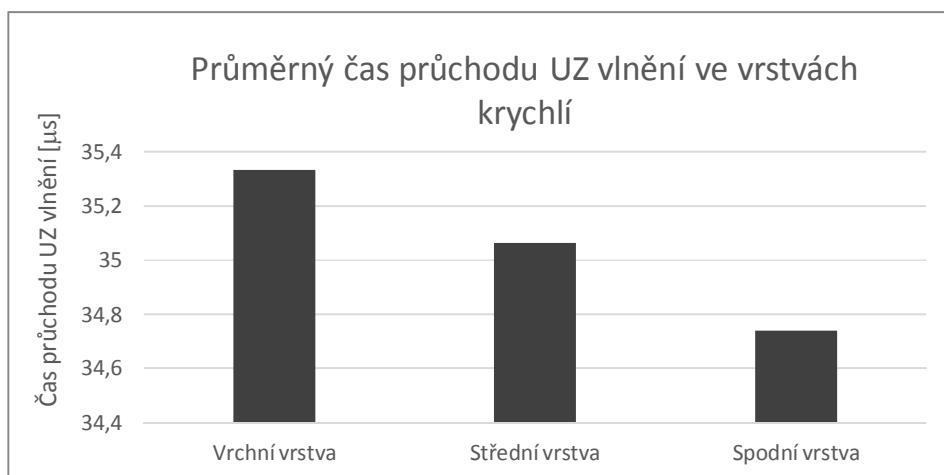


Obr. 37: Průměrné pevnosti v tlaku podle zkoušky Schmidovým tvrdoměrem na válcích

Původní myšlenka, že přítomnost vláken v betonu ovlivní výsledky tvrdoměrné zkoušky Schmidtovým kladívkem, která je založena na pružném odrazu od povrchu betonu a rázovém zatížení, se nepotvrdila. Nabízí se vysvětlení, že odolnost vůči rázovému zatížení by byla patrná při zkoušce ve větším měřítku (např. Charpyho kladivem). Při zkoušce hrotem razníku kladívka o velmi malé ploše se přítomnost vláken neprojeví, protože dojde k zasažení jen malé plochy povrchu betonu. Pevnost v tlaku určená z obecného kalibračního vztahu při zkouškách směrem svisle dolů se lišila u krychlí až o 50 % od pevnosti v tlaku stanovené destruktivně, měření válců na hladké ploše vedlo k přesnějším výsledkům, rozdíly od pevnosti v lisu jsou nižší zhruba o 25 %. Důvodem může být vyšší hmotnost válců a tedy menší odskoky tělesa při zkoušení v porovnání s krychlemi. Energie tedy zůstane v razníku, což má za následek naměření vyšších odrazů.

- Zkoušky ultrazvukovou impulzovou metodou

Při zkoušení krychlí bylo vyzkoušeno velké množství těles a bylo zjištěno, že časy průchodu ultrazvukových vln tělesem se liší v závislosti na zkušebním místě. Norma předepisuje zkoušet krychle na třech místech na stěnách rovnoběžných se směrem hutnění a zároveň ve třech výškových úrovních. Pokud si uvědomíme, že plnění forem zkušebních krychlí probíhá maximálně ve třech vrstvách, přičemž nejprve je forma naplněna zhruba do poloviny své výšky, následně je provedeno hutnění na vibračním stole a poté je beton opět přidán a zhutněn, je možné udělat si představu o hutnosti jednotlivých vrstev. Je-li spodní vrstva „hutněna dvakrát až třikrát“, je její hutnost největší z obou nebo ze všech tří vrstev. Tato skutečnost vyšla najevo při měření ultrazvukem po vrstvách. Pro spodní vrstvu byl naměřen v průměru nejkratší čas průchodu ultrazvukového vlnění. Obrázek 38 zahrnuje měření na 24 krychlích všech záměsí a je z něj patrné, že ve spodní vrstvě byl průchod vln nejrychlejší, naopak ve vrstvě vrchní, a tedy „nejméně hutněné“, je čas potřebný na průchod vln nejvyšší. Odchytky spodní vrstvy nebyly ale natolik velké, že by ohrozily přesnost měření, a většinou se pohybovaly v mezích daných normou ČSN 73 1371, tedy ± 1 % od střední hodnoty z jednotlivých měření na jednom zkušebním tělese.



Obr. 38: Průměrný čas průchodu ultrazvukových vln jednotlivými vrstvami

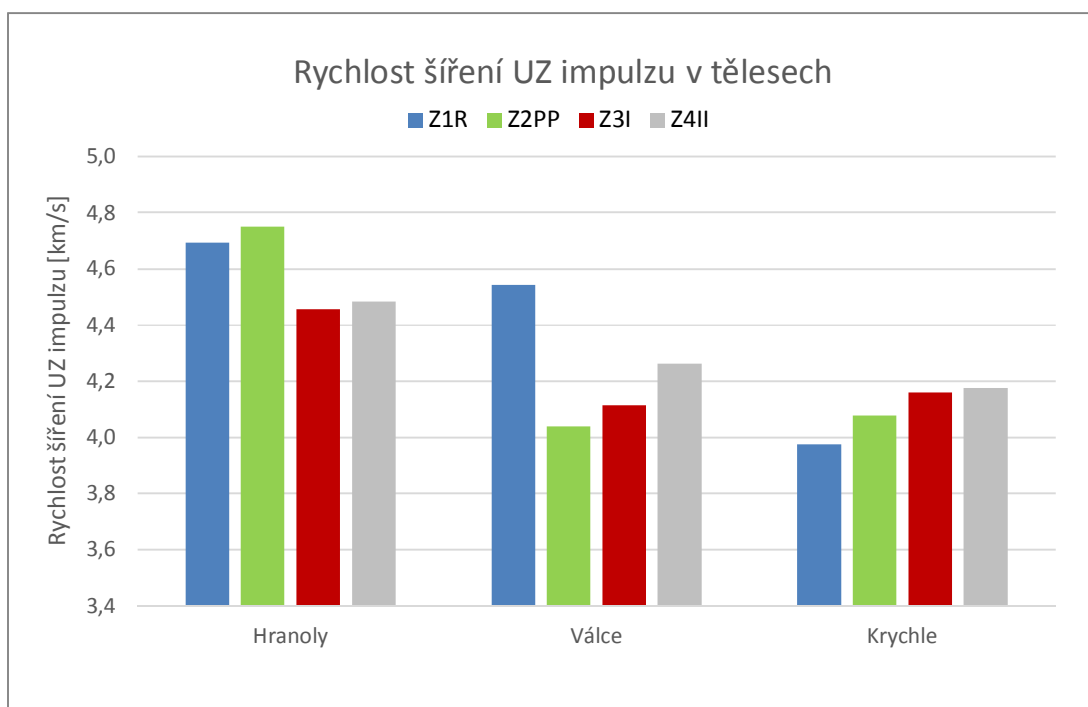
Hranoly byly podrobeny přímému i nepřímému (povrchovému) prozvučování. Při povrchovém měření a následném vyhodnocení se ukázalo, že tato metoda je nevhodná pro určování dynamického modulu pružnosti. Je-li tedy konstrukce přístupná pouze z jedné strany, není možné přesně určit dynamický modul a je nutné zvolit alespoň metodu polopřímého prozvučování. Rychlost šíření povrchových vln byly ve všech případech nižší než rychlosti stanovené z přímého prozvučování po délce hranolů. Moduly pružnosti stanovené z těchto rychlostí byly v mnoha případech až o 20 % nižší než moduly získané z prozvučování po délce. Moduly pružnosti trámců byly vyšší než moduly naměřené na krychlích nebo na válcích.

Na hranolech zhotovených z vláknobetonu nebo drátkobetonu, na kterých již byla provedena zkouška v tahu ohybem a na kterých se nacházely trhliny, bylo provedeno orientační měření na stanovení tvaru vlny a rychlosti jejího šíření. V těchto případech dojde k deformaci tvaru obdrženého signálu a ke zvýšení času průchodu vln. Tohoto času je možné využít při výpočtu hloubky trhliny.

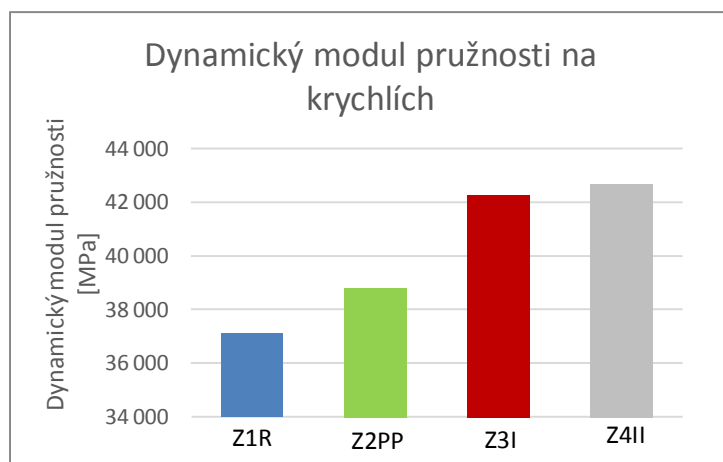
Platí, že rozdíly mezi jednotlivými měřeními času průchodu vlnění na jednom tělese a jejich aritmetickým průměrem nesmí být vyšší než $\pm 1 \%$, což se projevilo jako významný problém při zkoušení. Bylo zjištěno, že tělesa jsou pravděpodobně značně nehomogenní, jelikož i při opakovaném měření byly naměřeny na jednom zkušebním tělese hodnoty, které se navzájem poněkud lišily, a potřebná tolerance $\pm 1 \%$ nemohla být dodržena. Některá velmi se odlišující měření tedy musela být vyloučena a do výpočtů byla zahrnuta jen taková měření, která víceméně odpovídají dané toleranci.

Výsledky zkoušek na tělesech jsou uvedeny na obrázcích 40 až 39. U válcových těles ze záměsi Z1R stojí za zmínku výjimečně dobrá přiléhavost směrného kalibračního vztahu, koeficient α dosahuje hodnoty 1,05, což je nejvyšší přesnost ve vztahu k destruktivním zkouškám mezi všemi tělesy. Průměrně se lišila nezaručená pevnost v tlaku u válců od pevnosti určené v lise cca o 40 %, u této záměsi to bylo jen o 5 %.

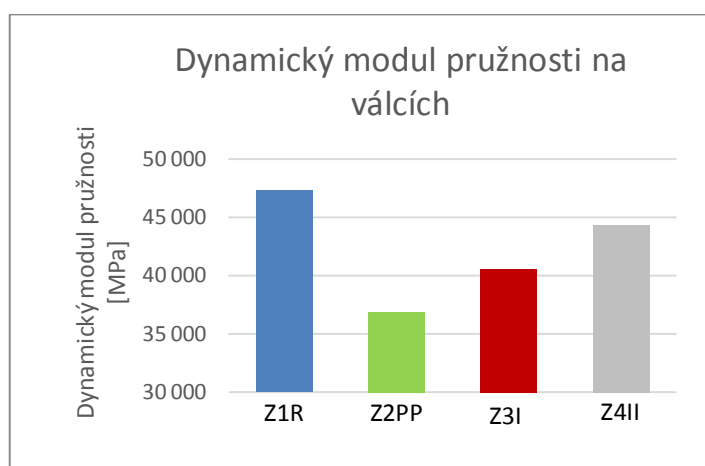
Za pozornost stojí i velmi značný rozdíl dynamických modulů pružnosti určovaných na krychlích, válcích a na hranolech jednotlivých záměsí. Zatímco moduly těles ze záměsi Z1R se pohybují od 37 000 MPa u krychlí do 47 000 MPa u válců, u těles záměsí Z3I a Z4II je hodnota modulu poměrně stálá u všech těles. Srovnatelné rozptyly hodnot jako záměs Z1R vykazuje také záměs Z2PP. Zkouška provedená na hranolech (obrázek 42) vyvrací původní předpoklad, že drátkobetonu mají vždy vyšší modul pružnosti než betony bez rozptýlené výztuže.



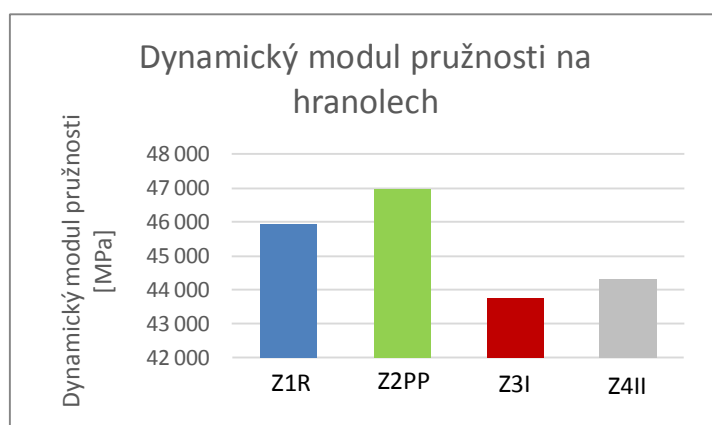
Obr. 39: Průměrné rychlosti šíření UZ vln v tělesech



Obr. 40: Průměrné dynamické moduly pružnosti určované na krychlích



Obr. 41: Průměrné dynamické moduly pružnosti určované na válcích

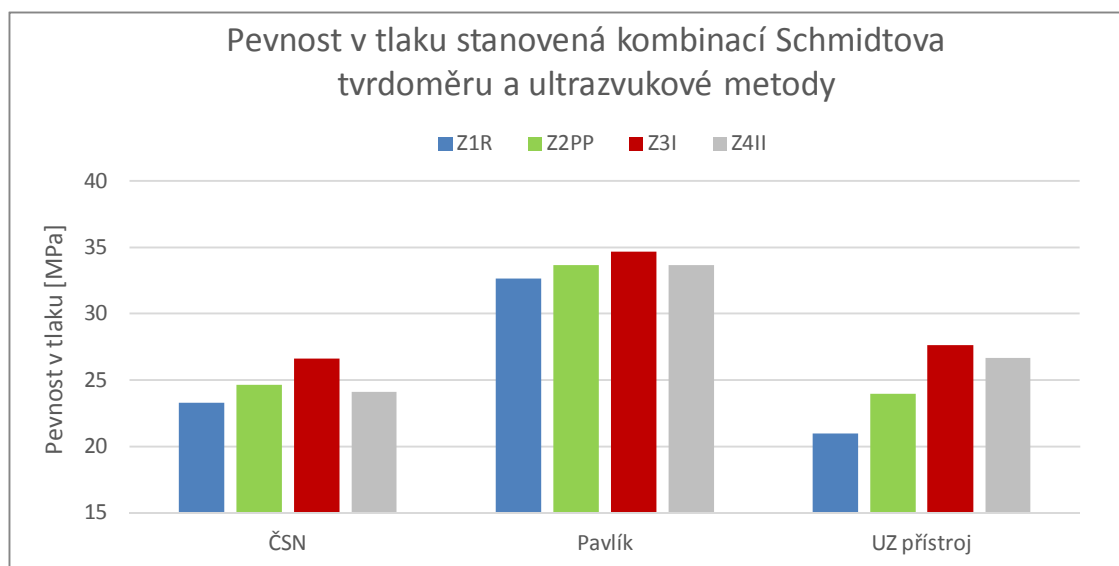


Obr. 42: Průměrné dynamické moduly pružnosti určované na hranolech

- Zkoušky odrazovým tvrdoměrem v kombinaci s ultrazvukovou impulzovou metodou

Při tomto zkoušení byla testována přesnost a vypovídající schopnost vztahů uvedených v platných normách, ve starší literatuře a v návodu k ultrazvukovému přístroji.

Výpočet podle normy se liší o 50 % od pevností stanovených v lisu, u výpočtu podle ultrazvukového přístroje jsou výsledky zhruba srovnatelné s normovým výpočtem. Pevnost určená podle Pavlíka se nejvíce blížila pevnosti stanovené destruktivně. Stále však byla o asi 25 % nižší než destruktivně stanovená pevnost, proto lze tuto metodu pokládat pouze za hrubě orientační, stejně jako obě nedestruktivní metody při samostatném použití. Na obrázku 43 jsou průměrné vypočtené hodnoty pevnosti pro jednotlivé záměsi pro tři typy výpočtu.



Obr. 43: Průměrné pevnosti v tlaku vypočtené kombinací odrazové a ultrazvukové metody

3.4 Destruktivní zkoušení ztvrdlého betonu

3.4.1 Pevnost v tlaku zkušebních těles

Pevnost v tlaku byla provedena na krychlích o hraně 150 mm a na válcích s průměrem podstavy 150 a výškou 300 mm. Před samotným zkoušením těles tvaru válce bylo zapotřebí koncovat jejich podstavy. K tomuto účelu byla použita sirtá malta (příloha A normy [32]), a koncovací souprava. Sirtá malta Rediron 9000 od firmy Gilson mění skupenství na kapalné mezi teplotami 116 – 127 °C a tvrdne během několika minut bez objemových změn, zejména bez smršťování. Pevnost v tlaku této malty dosahuje po 2 hodinách hodnoty kolem 55 MPa. Zkoušky probíhaly ve zkušebním lisu firmy Matest, jehož parametry vyhovují normě [35]. Pro zkoušky byla zvolena

normová rychlost zatěžování 0,6 MPa/s. Umístění tělesa na střed spodní tlačné desky lisu bylo prováděno s maximální možnou přesností. Směr zatěžování krychlí byl vždy kolmý na směr ukládání betonu. Způsoby porušení byly vždy vyhovující dle [32]. Pevnost v tlaku těles f_c byla vypočtena v souladu s „ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles“:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (38)$$

Hodnota maximální síly při porušení F byla přečtena z monitoru ovládacího panelu zkušebního lisu. Průřezová plocha zkušebního tělesa A_c byla určena u krychlí i u válců podle přílohy B normy [32] pomocí průměrných hodnot naměřených rozměrů x_m a y_m u krychlí a d_m u válců. Výsledky zkoušky uvádí tabulka 19.

Tlak Krychle	F [kN]	f_c [MPa]	Tlak Válec	F [kN]	f_c [MPa]
Z1R 1	950,752	42,5	Z1R 1	709,326	40,4
Z1R 2	935,189	41,8	Z1R 2	682,275	38,3
Z1R 3	983,545	43,6	Z1R 3	705,631	40,2
Z2PP 1	881,811	39,2	Z2PP 3	649,298	36,8
Z2PP 2	866,124	38,7	Z2PP 4	652,296	36,6
Z2PP 3	878,604	39,0	Z2PP 5	663,939	37,4
Z3I 1	1010,432	45,0	Z3I 1	690,293	39,6
Z3I 2	1015,643	44,9	Z3I 2	662,894	38,0
Z3I 3	1041,558	46,1	Z3I 5	661,360	37,6
Z4II 1	931,367	41,2	Z4II 1	630,963	35,5
Z4II 2	1002,859	44,8	Z4II 2	698,102	39,8
Z4II 3	974,930	42,7	–	–	–

Tabulka 19: Dosažené maximální zatížení F a pevnost v tlaku těles f_c

3.4.2 Pevnost v příčném tahu zkušebních těles

Zkoušky pevnosti v příčném tahu byly provedeny na krychlích o hraně 150 mm. Zatížení bylo realizováno pomocí zkušebního lisu Matest, a to v úzkém pruhu po celé své délce L . K tomuto účelu byly použity roznášecí proužky o tloušťce 4 mm a šířce 15 mm vyrobené před zkoušením z dřevovláknité desky. Jelikož nebyly použity vodící přípravky na centrování roznášecích proužků na těleso, bylo nutné vyznačit na tělesech rysky umožňující správné usazení roznášecích lišt. Rovina zatěžování byla vždy kolmá k ploše uhlazené hladítkem. Výška tělesa je pro výpočet

označena d . Rychlost ztěžování 0,05 MPa/s byla stanovena v souladu s normou [36]. Po dosažení maximální síly F následoval výpočet pevnosti v příčném tahu f_{ct} podle přílohy A normy „ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6“.

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (39)$$

Tabulka 20 uvádí výsledky zkoušky.

Příčný tah	F [kN]	f_{ct} [MPa]
Z1R+ 1	110,315	3,15
Z1R+ 2	119,260	3,40
Z1R+ 3	98,674	2,80
Z2PP+ 1	93,789	2,65
Z2PP+ 2	114,585	3,25
Z2PP+ 3	117,516	3,30
Z3I 4	170,900	4,85
Z3I 5	161,619	4,40
Z3I 6	195,534	5,50
Z4II 4	174,040	4,90
Z4II 5	176,832	4,80
Z4II 6	158,828	4,45

Tabulka 20: Dosažené maximální zatížení F a pevnost v příčném tahu těles f_{ct}



Obr. 44: Porušení krychle záměsi Z4II po zkoušce příčným tahem

3.4.3 Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles

Zkouška pevnosti v tahu ohybem se prováděla na zkušebním lisu Matest. Jako zkušební tělesa byly použity hranoly o délce 400 mm, resp. 350 mm a rozměru příčného řezu $d_1 \times d_2 = 100 \times 100$ mm. Vzdálenost mezi spodními podpěrnými válečky byla vždy $l = 300$ mm a zatěžování probíhalo jedním horním otočným a výkyvným zatěžovacím válečkem uprostřed rozpětí. Směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu, rychlost zatěžování byla dle [37] stanovena na 0,05 MPa/s. Výpočet pevnosti v tahu ohybem f_{cf} při tomto způsobu zatěžování jedním břemenem uprostřed je podle „ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles“:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (40)$$

Síla F odpovídá maximální naměřené síle v okamžiku, kdy dojde k destrukci tělesa nebo ke vzniku trhlin. Tabulka 21 obsahuje výsledky zkoušek.

Tah ohybem	F [kN]	f_{cf} [MPa]
Z1R 1	10,474	4,6
Z1R 2	10,862	4,8
Z1R 3	12,862	5,6
Z2PP 1	12,896	5,9
Z2PP 2	11,882	5,2
Z2PP 3	11,782	5,4
Z3I 1	18,202	7,7
Z3I 2	16,263	7,0
Z3I 3	14,547	6,4
Z4II 1	17,696	7,6
Z4II 2	20,2	9,1
Z4II 3	14,706	6,5

Tabulka 21: Dosažené maximální zatížení F a pevnost v tahu ohybem těles f_{cf}

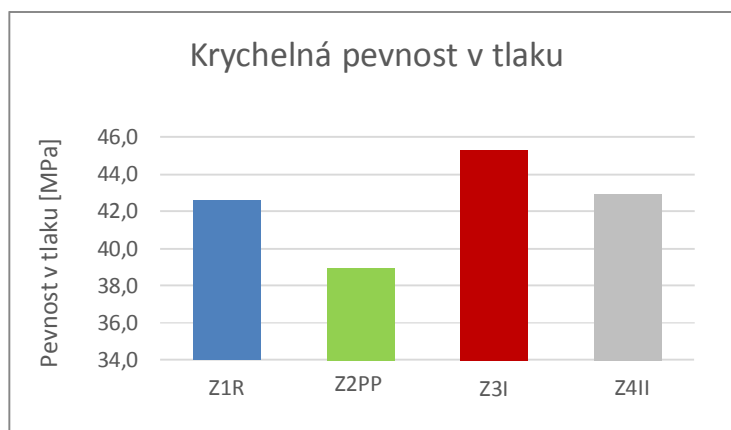


Obr. 45: Zkouška v tahu ohybem u hranolu ze záměsi Z4II

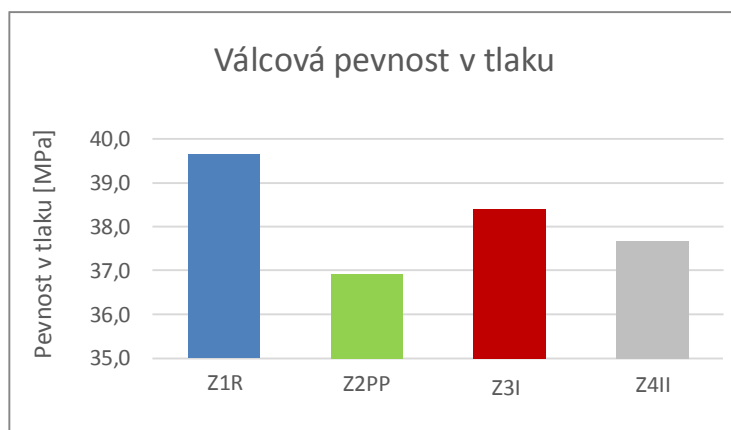
3.4.4 Zhodnocení destruktivních zkoušek betonu

- Pevnost v tlaku

Přidání vláken se tolik neprojeví na pevnosti v tlaku. U krychlí vykazovala záměs Z2PP s přidáním polypropylénovými vlákny dokonce menší pevnost. Při zkoušce pevnosti v tlaku na tělesech tvaru válce dosahovala nejvyšších hodnot tělesa referenční záměsi, tj. záměsi bez přidání vláken. Vysvětlením může být tlakové zatěžování vláken, zejména drátků, při probíhající zkoušce a z toho vyplývající vznik napětí, které přispívá k předčasnému vzniku trhlin. Výsledky pevnosti v tlaku krychlí víceméně korespondují s naměřenými odrazy metodou A – nejvyšší pevnost v tlaku byla oběma metodami naměřena u záměsi Z3I (viz obrázek 36 a 46).



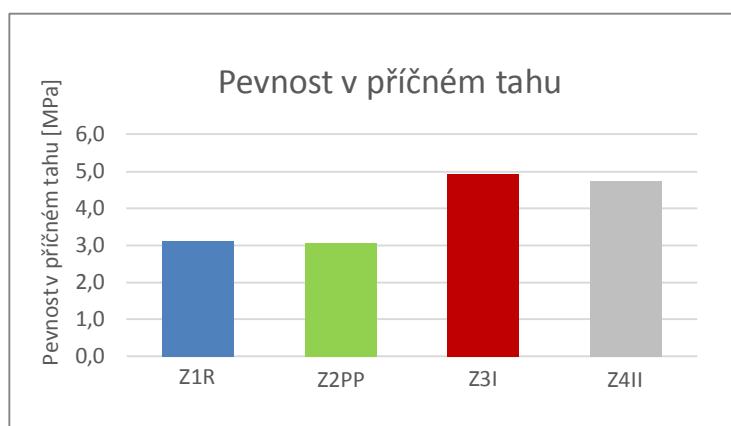
Obr. 46: Průměrné krychelné pevnosti v tlaku



Obr. 47: Průměrné válcové pevnosti v tlaku

- Pevnost v příčném tahu

Tato zkouška byla provedena jako doplnění zkoušek pevnosti v tlaku a v tahu ohybem. Bylo zjištěno, že přidání polypropylénových vláken výrazně neovlivní výslednou pevnost v tahu, naopak přidáním ocelových vláken se zvýší tato hodnota o cca 60 % v porovnání s referenčním prostým betonem.

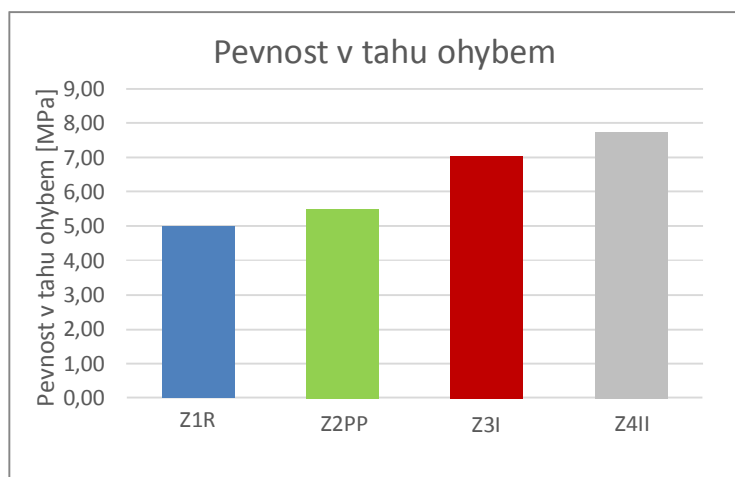


Obr. 48: Průměrné pevnosti v příčném tahu krychlí

- Pevnost v tahu ohybem

U této zkoušky došlo k nárůstu pevnosti v tahu ohybem u záměsi Z2PP i u obou drátkobetonů. Zatímco u vláknobetonu se jedná o nepatrný nárůst, u betonů s ocelovými vlákny je nárůst znatelnější, v průměru o 50 % oproti referenčnímu betonu.

Výhodou vláknobetonů zůstává zejména schopnost plnit částečně nosnou funkci i po vzniku trhlin. Vlákna v betonu se při vzniku trhlin aktivují a nedochází ihned k destrukci.



Obr. 49: Průměrné pevnosti v tahu ohybem hranolů

4 Závěr

4.1 Destruktivní zkoušení

Po zhodnocení všech výsledků je patrné, že vlastnosti vláknobetonů a drátkobetonů se uplatní zejména v tahem namáhaných konstrukcích a jejich částech. Pevnost v tlaku po přidání polypropylénových nebo ocelových vláken do betonové směsi roste jen minimálně a v některém případě se na daných tělesech i snížila (viz kapitola 3.4.1).

Projevilo se, že pevnost v příčném tahu a v tahu ohybem roste u vláknobetonů a drátkobetonů již více (viz kapitoly 3.4.2 a 3.4.3). Nespornou výhodou těchto všesměrně vyztužených kompozitů je schopnost plnit nosnou funkci i po inicializaci ohybových trhlin. Vlákná v betonu se při vzniku trhlin aktivují a nedochází ihned k destrukci. Reziduální pevnost těchto konstrukcí může být předmětem dalšího výzkumu.

Stále platí, že rozptýlená výztuž nemůže zcela převzít funkci běžné betonářské výztuže, použití vláken ale rozšiřuje možnosti uplatnění betonu.

4.2 Nedestruktivní zkoušení

Zkoušení Schmidtovým tvrdoměrem velmi závisí na směru zkoušení, na volbě zkušebního místa a na dokonalém upevnění tělesa, aby byly vyloučeny přeměny dopadové energie beranu na pohybovou energii tělesa. Rovněž úprava povrchu má znatelný vliv na naměřené odrazy (viz kapitola 3.3.2).

Zkoušení ultrazvukovou impulzovou metodou má význam pro určování dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku a pro výpočet pevnosti v tlaku s nezaručenou přesností. Další část práce bude proto zaměřena na zjištění statického modulu pružnosti na vyhotovených tělesech a na jeho porovnání s již stanoveným dynamickým modulem.

Výhodou při měření ultrazvukem je možnost identifikace trhlin a nehomogenit v tělese nebo v konstrukci. Podle vzorců uvedených v kapitole 2.3.3 je možné určit hloubku trhliny s dostatečnou přesností, což může být velmi cenná informace pro návrh opravy konstrukce. Ultrazvuková metoda se ve výzkumu osvědčuje při stanovování rovnoměrnosti a stejnoměrnosti

betonu – zejména na konstrukcích přístupných z dvou protilehlých stran, např. u sloupů, deskových konstrukcí nebo mostních podpěr.

Následující tabulka shrnuje pevnost v tlaku určenou třemi způsoby: Výpočtem z obecného kalibračního vztahu na základě naměřených odrazů tvrdoměrnou metodou, dále výpočtem ze směrného kalibračního vztahu na základě rychlosti ultrazvukových vln a nakonec zkouškou pevnosti v tlaku, tedy zkouškou destruktivní. Po provedení destruktivních zkoušek byly hodnoty určené nedestruktivně upřesněny. Je patrné, že nedestruktivní zkoušení vede k naměření značně nízkých hodnot pevnosti a je tedy nevhodné určovat pevnost v tlaku na základě malého počtu provedených nedestruktivních měření a teprve po upřesnění je možné výsledky považovat za vypovídající (více viz kapitoly 3.3.1 a 3.3.2).

	Schmidt, B f_{be} [MPa]	UZ f_{be} [MPa]	f_c [MPa]		Schmidt, A f_{be} [MPa]	UZ f_{be} [MPa]	f_c [MPa]
Z1R Krychle	20,3	21,8	42,6	Z1R Válce	26,5	37,8	39,6
Z2PP Krychle	21,0	24,2	39,0	Z2PP Válce	29,4	23,4	36,9
Z3I Krychle	22,3	26,3	45,3	Z3I Válce	27,2	25,0	38,4
Z4II Krychle	18,7	26,6	42,9	Z4II Válce	31,3	29,1	37,7

Tabulka 22: Průměrné pevnosti v tlaku určené nedestruktivně a destruktivně

Nevýhodou obou těchto nedestruktivních zkoušek je jejich malá přesnost a tedy nutnost doplnit měření destruktivními zkouškami provedenými na tělesech připravených ze stejného betonu v laboratoři nebo vyjmutých z konstrukce. Následně je vhodné upřesnit obecné nebo směrné kalibrační vztahy a na jejich základě provádět další měření např. v časových odstupech za účelem zjištění nárůstu pevnosti betonu po odbednění, nebo změn ve vnitřní struktuře betonu po mimořádných jevech (výbuch, požár, náraz dopravního prostředku do mostní podpěry atd.), nebo nárůstu modulu pružnosti, případně i změny objemové hmotnosti.

Nedestruktivní metody zkoušení nacházejí své uplatnění i při rozpoznávání hnízd špatně ztuhlého betonu, přítomnosti cizích těles v betonu, nebo hnízd štěrku či cementu. Po pečlivě provedeném měření je tak možné tato místa jednoznačně označit a za použití dalších metod nedestruktivního zkoušení (např. indikace výztuže) i destruktivního zkoušení (vývrty) navrhnout

další opatření, která je nutné přijmout na odstranění závad, nebo postup opravy konstrukce. Z toho vyplývá, že nedestruktivní zkoušky mohou být jako první v pořadí diagnostických metod a s ohledem na jejich výsledky je možné optimalizovat návaznost dalších zkušebních metod.

5 Literatura

- [1] KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití : směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999, 107 s. ISBN 80-863-6400-3.
- [2] KOLÍSKO, Jiří. *Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů*. České vysoké učení technické, 2008. 24 s. ISBN 978-80-01-04072-0.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [4] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [5] Dramix® steel fiber reinforcement for residential applications. *BEKAERT* [online]. 2014 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.bekaert.com/en/products/construction/concrete-reinforcement/dramix-steel-fiber-reinforcement-for-residential-applications>
- [6] Steel Fibres. *ArcelorMittal Distribution* [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://ds.arcelormittal.com/wiresolutions/steelfibres/products/products/language/EN>
- [7] HILAR, Matouš. 2008. *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. Vyd. 1. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 68 s. Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA-AITES, sv. 3. ISBN 978-802-5412-626.
- [8] DBV-Merkblatt. *Stahlfaserbeton: Fassung Oktober 2001*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V., 2001.
- [9] SCHNELL, Jürgen, Frank SYCH a SCHULER. *Analyse der Faserverteilung in Betonen mit Hilfe der Computer-Tomographie*. 2012 [cit. 2015].

- [10] GLATZL, Johann et al. *PP-Faserbeton für erhöhte Brandbeständigkeit: Untersuchungen zu dessen Wirksamkeit und Ermittlung des Polypropylen-Fasergehalts am Festbeton*. ZEMENT+BETON 3/2004. Wien, 8 s. [cit. 2015].
- [11] Texzem. *Bonar* [online]. 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.texiplast.sk/page/catalog/texzem30.php?cat_id=1&number=0
- [12] Kunststoff-Fasern. *Rindler GmbH* [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.rindler-gmbh.at/de/kunststoff-fasern.html>
- [13] HELA, Rudolf. *Betonové průmyslové podlahy*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006, 142 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6973-9
- [14] POHL, Erwin. *Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1966, 152 s. ISBN 905/77/65.
- [15] PAVLÍK, Adolf a Jaroslav DOLEŽEL. *Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 275 s. 04-705-77.
- [16] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [17] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [18] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Rezonanční metoda zkoušení betonu*. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [19] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích: Část 2: Nedestruktivní zkoušení: Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [20] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [21] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu: Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 2005. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- [22] CONTROLS. *PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyser 58-E4900: INSTRUCTION MANUAL*. 2012 [cit. 2015].
- [23] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. 2008. *Modul pružnosti betónu*. 1. vyd. Tmava: Edícia betón racio. ISBN 978-80-969182-3-2.
- [24] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Společná ustanovení*. 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [25] ČSN EN 206. *Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [26] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. 2013. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [27] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [28] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [29] ČSN EN 12350-4. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 4: Stupeň zhutnitelnosti*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [30] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [31] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 7: Obsah vzduchu: Tlakové metody*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [32] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [33] CONTROLS. *58-C0181/G Digital Concrete Hammer: INSTRUCTION MANUAL*. 2012 [cit. 2015].

- [34] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [35] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 4: Pevnost v tlaku – Požadavky na zkušební lisy*. 2001. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [36] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 2010. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [37] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

Dokladová část

Obsah dokladové části

- A. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 0/4 – Pískovna Čeperka
- B. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 4/8 – Pískovna Čeperka
- C. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 8/16 – Pískovna Čeperka
- D. Technický list cementu CEM II/A-LL 42,5 R
- E. Osvědčení o stálosti vlastností portlandského cementu CEM II/A-LL 42,5 R
- F. Statistické hodnocení kvality cementu CEM II/A-LL 42,5 R
- G. Technický list superplastifikační přísady Stachement ML

A. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 0/4 – Pískovna Čeperka

Pískovna Čeperka

Výsledky zkoušek, zkoumajících vlastností frakce uvedené v tabulce pocházejí z akreditovaného protokolu Zkušební kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, podle platných norem systému ČSN.

Frakce 0/4 - pískovna Čeperka

Vlastnosti

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic	ČSN EN 933-1	% hm.	0,3	
Jakost jemných částic				
Zkouška ekvivalentu písku	ČSN EN 933-8	–	97	
Zkouška methylenovou modří	ČSN EN 933-9	g/kg	0,3	
Humusovitost	ČSN EN 1744-1	–	Světlejší než rozloak	
Obsah volné slůdy	ČSN 72 1180	% hm.	0,0	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0002	
Obsah síranů rozpustných v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,030	
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,037	
Obsah ve vodě rozpustných síranů	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,001	
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0	
Nasákavost	ČSN EN 1097-6	% hm.	1,4	
Trvanlivost zkouškou síranem hořčnatým – úbytek po 5 cyklech	ČSN EN 1367-2	% hm.	–	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – úbytek po 10 cyklech	ČSN EN 1367-1	% hm.	–	
Rozlišené částice (nečistoty)	ČSN 72 1180	% hm.	–	
Hmotnost kameniva				
Objemová hmotnost	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,551	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,568	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,841	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	38,5	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	27,8	

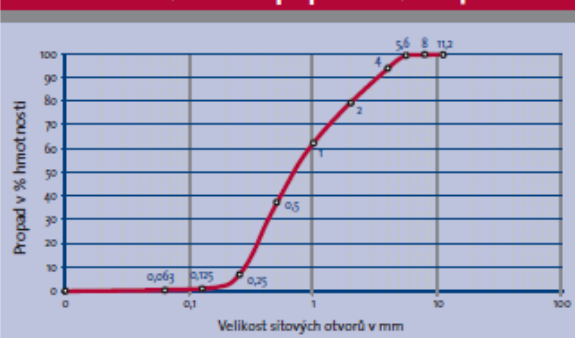
Výsledky zkoušek rozboru zrnitosti uvedené v tabulce pocházejí z akreditovaného protokolu Zkušební kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, podle platných norem systému ČSN.

Zrnitostní rozbor

Frakce	Podíl zrnitosti		Propad sítím		Hodnota
	1. stanovení		Velikost sit. otvorů		
mm	g	% hm.	–	mm	% hm.
11 / 16	0,0	0,0		16	100,0
8 / 11	0,0	0,0	2D	11,2	100,0
5,6 / 8	0,0	0,0	1,4D	8	100,0
4 / 5,6	69,4	6,3	D	4	93,7
2 / 4	158,2	14,4	D/2	2	79,3
1 / 2	189,0	17,2	D/4	1	62,1
0,5 / 1	274,4	25,0		0,5	37,1
0,25 / 0,5	336,0	30,5		0,25	6,6
0,125 / 0,25	65,1	5,9		0,125	0,7
0,063 / 0,125	4,8	0,4		0,063	0,3
Jemné částice celkem	0,3	0,3		0	0,0
Celkem	1100,6	100,0			

Výsledky zkoušek zrnitosti při propadu síťovými otvory ve Zkušební kamene a kameniva, s.r.o., Hořice zobrazuje graf.

Křivka zrnitosti propadu frakce 0/4



Aktuální protokoly jsou k dispozici na jednotlivých provozovnách.

Oblasti použití

- kamenivo do betonu podle ČSN EN 12620+A1
- kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch podle ČSN EN 13043
- kamenivo pro malty podle ČSN EN 13139
- kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a komunikace podle ČSN EN 13242+A1, ČSN EN 13043+Z2

Srpen 2012

Holcim (Česko) a.s., člen koncernu pískovna Čeperka, Čeperka 330, Staré Ždánice 533 45, Česká republika • kamenivo-cze@holcim.com, www.holcim.cz

B. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 4/8 – Pískovna Čeperka

Frakce 4 / 8 - pískovna Čeperka

Výsledky zkoušek, zkoumajících vlastnosti frakce uvedené v tabulce pocházejí z akreditovaného protokolu Zkušebny kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, podle platných norem systému ČSN.

* Zkouška byla provedena na frakci 10/14

Vlastnosti

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic	ČSN EN 933-1	% hm.	0,1	
Tvar zrn – tvarový index >3	ČSN EN 933-4	% hm.	10,5	
Podíl zrn ostrohranných				
– zrna drčená nebo ostrohranná	ČSN EN 933-5	% hm.	–	
– zrna drc. nebo ostrohr. nebo částečně ostrohr.	ČSN EN 933-5	% hm.	–	
– zrna oblá	ČSN EN 933-5	% hm.	–	
Odolnost proti drčení – součinitel LA ⁹⁾	ČSN EN 1097-2	–	28,5	
Nasákavost vodou	ČSN EN 1097-6	% hm.	1,4	
Trvanlivost zkouškou síranem hořečnatým – úbytek po 5 cyklech	ČSN EN 1367-2	% hm.	–	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ⁹⁾ – úbytek po 10 cyklech	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,4	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0002	
Obsah síranů rozpustných v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,030	
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,037	
Obsah ve vodě rozpustných síranů	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,001	
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0	
Hmotnost kameniva				
Objemová hmotnost	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,541	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,425	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,530	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	43,9	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	39,8	

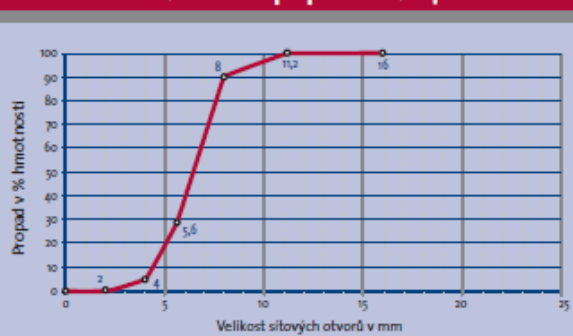
Výsledky zkoušek rozboru zrnitosti uvedené v tabulce pocházejí z akreditovaného protokolu Zkušebny kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, podle platných norem systému ČSN.

Zrnitostní rozbor

Frakce	Podíl zrnitosti		Propad sítím		Hodnota
	1. stanovení		Velikost sít. otvorů		
mm	g	% hm.	–	mm	% hm.
16 / 22	0,0	0,0	2D	22,4	100,0
11 / 16	0,0	0,0	1,4D	11,2	100,0
8 / 11	505,0	9,6	D	8	90,4
5,6 / 8	3208,0	61,5	D/1,4	5,6	28,9
4 / 5,6	1254,0	24,1	d	4	4,8
2 / 4	216,0	4,2	d/2	2	0,6
0,063 / 2	29,0	0,5	–	0,063	0,1
Jemné částice	0 / 0,063 T	3,0	–	–	–
celkem	0 / 0,063 P	9,0	–	0	0,0
Celkem	5224,0	100,0	–	–	–

Výsledky zkoušek zrnitosti při propadu sítovými otvory ve Zkušebně kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, zobrazuje graf.

Křivka zrnitosti propadu frakce 4 / 8



Aktuální protokoly jsou k dispozici na jednotlivých provozovnách.

Oblasti použití

- kamenivo do betonu podle ČSN EN 12620+A1
- kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch podle ČSN EN 13043
- kamenivo pro malty podle ČSN EN 13139
- kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a komunikace podle ČSN EN 13242+A1, ČSN EN 13043+Z2

Srpen 2012

Holcim (Česko) a.s., člen koncernu pískovna Čeperka, Čeperka 330, Staré Ždánice 533 45, Česká republika • kamenivo-cze@holcim.com, www.holcim.cz

C. Vlastnosti a zrnitostní rozbor kameniva 8/16 – Pískovna Čeperka

Frakce 8 / 16 - pískovna Čeperka

Výsledky zkoušek, zkoumajících vlastností frakce uvedené v tabulce pocházejí z akreditovaného protokolu Zkušební kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, podle platných norem systému ČSN.

⁹ Zkouška byla provedena na frakci 10/14

Vlastnosti				
Vlastnost	Identifikace metody	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic	ČSN EN 933-1	% hm.	0,1	
Tvar zrn – tvarový index >3	ČSN EN 933-4	% hm.	15,9	
Podíl zrn ostrohranných				
– zrna drčená nebo ostrohranná	ČSN EN 933-5	% hm.	–	
– zrna drč. nebo ostrohr. nebo částečně ostrohr.	ČSN EN 933-5	% hm.	–	
– zrna oblá	ČSN EN 933-5	% hm.	–	
Odolnost proti drčení – součinitel LA ⁹	ČSN EN 1097-2	–	28,5	
Nasákavost	ČSN EN 1097-6	% hm.	1,2	
Trvanlivost zkouškou síranem hořečnatým – úbytek po 5 cyklech	ČSN EN 1367-2	% hm.	–	
Trvanlivost zkouškou síranem sodným – úbytek po 5 cyklech	ČSN 72 1176	% hm.	–	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ⁹ – úbytek po 10 cyklech	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,4	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0002	
Obsah síranů rozpustných v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,030	
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,037	
Obsah ve vodě rozpustných síranů	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,001	
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0	
Rozlišné částice (nečistoty)	ČSN 72 1180	% hm.	–	
Hmotnost kameniva				
Objemová hmotnost	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,539	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,346	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,532	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	47,0	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	39,7	

Výsledky zkoušek rozboru zrnitosti uvedené v tabulce pocházejí z akreditovaného protokolu Zkušební kamene a kameniva, s.r.o., Hořice, podle platných norem systému ČSN.

Zrnitostní rozbor					
Frakce	Podíl zrnitosti		Propad sítím		
	g	% hm.	Velikost síť. otvorů		Hodnota
mm				mm	% hm.
32 / 45	0,0	0,0	2D	45	100,0
22 / 32	0,0	0,0	1,4D	31,5	100,0
16 / 22	551,0	9,4	D	16	90,6
11 / 16	3781,0	65,1	D/1,4	11,2	25,5
8 / 11	1425,0	24,6	d	8	0,9
4 / 8	26,0	0,5	d/2	4	0,4
0,063 / 4	209,0	0,3	–	0,063	0,1
Jemné částice 0 / 0,063 T	2,0	–	–	–	–
celkem 0 / 0,063 P	7,0	0,1	–	0	0,0
Celkem	5812,0	100,0	–	–	–

Výsledky zkoušek zrnitosti při propadu síťovými otvory ve Zkušební kamene a kameniva, s.r.o., Hořice zobrazuje graf.



Aktuální protokoly jsou k dispozici na jednotlivých provozovnách.

Oblasti použití

- kamenivo do betonu podle ČSN EN 12620+A1
- kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch podle ČSN EN 13043
- kamenivo pro malty podle ČSN EN 13139
- kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a komunikace podle ČSN EN 13242+A1, ČSN EN 13043+Z2

Srpen 2012

Holcim (Česko) a.s., člen koncernu
pískovna Čeperka, Čeperka 330, Staré Ždánice 533 45, Česká republika • kamenivo-cze@holcim.com, www.holcim.cz

D. Technický list cementu CEM II/A-LL 42,5 R (část 1)



CEM II/A-LL 42,5 R

Portland cement with limestone with high initial strength
In accordance with SR EN 197-1:2011



Application fields

in accordance with CP 012-1:2007

- cast-in-place elements and structures of normal and reinforced concrete, made also in cold weather conditions, for the following types of constructions:
 - buildings (civil, industrial, agricultural): foundations, columns, beams, floors, walls, etc.
 - civil engineering works: reservoirs, silos, bridges, tunnels, viaducts, structural walls, etc.
 - indoor platforms
- precast products made of normal and reinforced concrete (tubes, paving slabs, roof tiles, fencing elements etc.)
- repair / consolidation works
- special mortars and adhesives

Recommended concrete types and classes

- normal and reinforced concrete of the following classes: C20/25 ... C40/50
- light concrete of the following classes: LC25/28 ...LC50/55
- micro concrete (fine concrete) of the following classes: C25/30...C40/50

	ALEȘD	CÂMPULUNG	TURDA	BUCHAREST TERMINAL
PRODUCED IN:	✓	✓	✓	
DELIVERED FROM:	✓	✓	✓	✓

Packaging

- Bulk

Warranty

- 60 days from the date of delivery, following the transport and storage conditions provided in the product declaration of conformity

Zdroj:

http://www.holcim.ro/fileadmin/templates/RO/doc/Product_information/Fise_ciment_2013/Fisa_CEM_II_A-LL_42_5_R_ENG.pdf

D. Technický list cementu CEM II/A-LL 42,5 R (část 2)



CEM II/A-LL 42,5 R

Portland cement with limestone with high initial strength
In accordance with SR EN 197-1:2011



Constituents (in accordance with SR EN 197-1:2011)

- **Portland clinker:** 80 - 94%
- **Additives:** 6 - 20%

PHYSICAL, MECHANICAL AND CHEMICAL FEATURES	U.M.	Values in accordance with SR EN 197-1: 2011
Strength at 2 days	N/mm ²	min. 20
Strength at 28 days	N/mm ²	min. 42,5 - max. 62,5
Initial setting time	minutes	min. 60
Stability	mm	max. 10
Sulphate content (SO ₄)	%	max. 4
Chloride content	%	max. 0,1



Exposure environments / classes where CEM II/A-LL 42,5 R can be used

In accordance with CP 012-1:2007

- **X0** no risk of corrosion or attack
- **XC1, XC2, XC3, XC4** carbonation-induced corrosion
- **XD1, XD2, XD3** corrosion caused by non-marine chlorides
- **XS1** corrosion caused by sea-water chlorides
- **XF1, XF2, XF3, XF4** freeze / thaw attack in a state of water saturation, with or without thawing agents
- **XA1, XA2*, XA3*** chemical attack
- **XM1, XM2, XM3** mechanical stress on the concrete caused by wear

* In the event of a chemical attack of sulphatic nature, when the presence of SO₄²⁻ leads to an exposure class XA2 and XA3, it is essential to use sulphate-resistant cement.

Note

- The concrete classes, the minimum cement dosages, the maximum water-cement ratios as well as other measures (e.g. concrete protection) according to the technical regulations in force (e.g. CP 012-1:2007, NE 012-2:2007) will have to be observed.

Zdroj:

http://www.holcim.ro/fileadmin/templates/RO/doc/Product_information/Fise_ciment_2013/Fisa_CEM_II_A-LL_42_5_R_ENG.pdf

E. Osvědčení o stálosti vlastností portlandského cementu CEM II/A-LL 42,5 R

	TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p. Technical and Test Institute for Construction Prague <small>Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznamovaný subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgán, Inspekční orgán / Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Body, Inspection Body. Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic</small>
Oznámený subjekt 1020	
OSVĚDČENÍ O STÁLOSTI VLASTNOSTÍ certificate of constancy of performance	
č. 1020 – CPR – 040 029319	
<small>V souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011 (nařízení o stavebních výrobcích nebo CPR) se vydává toto osvědčení pro stavební výrobek:</small>	
Portlandský cement s vápencem EN 197-1 – CEM II/A-LL 42,5 R	
Výrobek je určen pro přípravu betonu, malt, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a výrobu stavebních výrobků.	
vyrobený výrobcem nebo pro výrobce:	
CEMEX Cement, a.s.	
Tovární 296, 538 04 Prachovice IČ 15 05 23 20	
ve výrobním závodě:	
cementárna Prachovice	
Tovární 296, 538 04 Prachovice	
<small>Toto osvědčení prokazuje, že všechna ustanovení týkající se posuzování a ověřování stálosti vlastností popsaná v příloze ZA normy</small>	
EN 197-1:2011	
podle systému 1+ pro vlastnosti stanovené v tomto osvědčení byla uplatněna a že	
výrobek splňuje všechny předepsané požadavky pro tyto vlastnosti.	
<small>Toto osvědčení bylo poprvé vydáno 17. prosince 2007 a zůstává v platnosti, dokud se nezmění zkušební metody a/nebo požadavky na řízení výroby, obsažené v harmonizované normě použité při posuzování vlastností deklarovaných základních charakteristik, a pokud se výrazně nezmění stavební výrobek a/nebo výrobní podmínky v místě výroby nebo pokud oznamovaný subjekt pro osvědčení výrobku nepozastaví nebo nezruší platnost tohoto osvědčení.</small>	
Teplice, 1. března 2015	
	 Ing. Pavel Rubáš, Ph.D. zástupce vedoucího oznamovaného subjektu

F. Statistické hodnocení kvality cementu CEM II/A-LL 42,5 R



Holcim (Česko) a.s.
Tovární 296
538 04 Prachovice

Statistické hodnocení kvality cementu
dle ČSN EN 197-1

Období: 01/ 2015	Cement: CEM II/A-LL 42,5 R				Futuris	
	jedn.	průměr	min.	max.	st.d.	četnost
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI						
Specifický povrch	cm ² /g	3961	3726	4060	116	8
Záměsová voda	%hm.	28.8	28.0	29.2	0.39	8
Počátek tuhnutí	min.	218	201	226	8	8
Doba tuhnutí	min.	306	275	369	29	8
Objemová stálost (Le Chat)	mm	1.6	1.0	2.0		5
PEVNOSTI						
Tlak 2-dny	MPa	29.7	28.4	32.6	1.42	8
Tlak 28-dny	MPa	51.3	49.7	54.6	1.52	8
Ohyb 2-dny	MPa	5.9	5.5	6.4	0.32	8
Ohyb 28-dny	MPa	8.6	8.1	8.9	0.25	8
CHEMISMUS						
C ₃ A (ve slínku)	%hm.	9.06	8.49	9.61	0.33	13
Ztráta žiháním	%hm.					
Nerozpustný podíl	%hm.					
SO ₃	%hm.	3.33	3.29	3.36	0.03	8
Cl	%hm.	0.087				1
K ₂ O	%hm.	0.80	0.79	0.81	0.01	8
Na ₂ O	%hm.	0.33	0.32	0.36	0.01	8
Na ₂ O-ekvivalent	%hm.	0.85	0.84	0.88	0.01	8

Holcim (Česko) a.s.,
člen koncernu
Tovární ul. 296, 538 04 Prachovice
Kvalita a technologie

Obch.oddělení :
tel : 469 810 450
fax : 469 810 451

Datum : 9.3.2015

Ing. Vlastimil Holas
Kvalita a technologie

G. Technický list superplastifikační přísady Stachement ML (část 2)

TECHNICKÝ LIST



STACHEMENT ML

Superplastifikační přísada

Skladování
V uzavřených plastových obalech je skladovatelnost 1 rok. Skladovat v teplotním rozmezí +5 až +30°C. Chránit před silným zahříváním a před mrazem. Výrobek je nehořlavý. Při skladování dodržujte platné právní předpisy BOZP a ochrany ŽP. Výrobek je vhodné pravidelně homogenizovat.

Balení a dodávání

- volně ložený v cisterně
- v návratných a zálohovaných 1000 litrových kontejnerech
- v nevratných 200 litrových PE sudech
- v nevratných malých PE obalech po 20, 50 litrech

Bezpečnost práce a ochrana zdraví
(podrobněji viz Bezpečnostní list výrobku)
Výrobek patří mezi mírně nebezpečné látky pro zdraví. Přítomné složky přísady mají mírně dráždivý účinek na pokožku a sliznici. Nebezpečné je požití přísady. Při práci s přísadou je třeba používat osobní ochranné pracovní pomůcky zabraňující přímému styku pokožky a očí, zejména ochranné pracovní rukavice a obličejový štít nebo ochranné brýle. Při vzniku aerosolů nebo prachu používat respirátor. Při práci nejíst, nepít, nekouřit. Před každou přestávkou a po skončení práce je třeba ruce důkladně umýt vodou a mýdlem, ošetřit regeneračním krémem.

První pomoc
(podrobněji viz Bezpečnostní list výrobku)

- při inhalaci par nebo dýmu vzniklém při požáru vynést postiženého na čerstvý vzduch, zajistit dýchání a zajistit lékařské ošetření
- při vniknutí do očí tyto důkladně vymýt velkým množstvím tekoucí vody po dobu 10 min. a vyhledat lékaře
- potřísněnou pokožku umýt vodou a mýdlem a ošetřit regeneračním krémem, např. Indulonou, v případě přetrvávajícího podráždění vyhledat lékaře
- při požití vypláchnout ústa vodou, vypít 0,2 - 0,5 litru chladné vody a vyhledat lékaře. Zvracení nevyvolávat, při spontánním zvracení zajistit, aby nedošlo k zadušení zvratky.

Ve všech vážnějších případech léčbu postiženého konzultovat:
Klinika nemocí z povolání, Toxikologické informační středisko, Na Bojišti 1, 128 08 Praha 2, tel. 224 91 92 93.

Upozornění
Technický list má pouze informativní charakter. Používání výrobku vyžaduje odzkoušení podle platných technických norem např. ČSN EN 206-1 apod.
Pro další dokumenty jako Certifikát, Prohlášení o shodě, Bezpečnostní list, Podmínky pro skladování přísad apod. se obraťte na výrobce popř. dodavatele tohoto produktu.
Výrobce přísady je STACHEMA KOLÍN, spol. s r.o., Zibohlavý 1, Kolín, 28002 IČ: 46353747.
STACHEMA KOLÍN, spol. s r.o. nepřebírá odpovědnost za případné škody způsobené neodborným používáním výrobku a neručí za kvalitu výrobku plněného do obalů odběratele.

Datum revize: 3. 9. 2009

CE ISO 9001

STACHEMA KOLÍN, spol. s r. o.
Zibohlavý 1, 280 02 Kolín
tel./fax: +420 321 722 335
zibohlav@stachema.cz
www.stachema.cz

stavební chemie • dáváme betonu charakter