

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

**Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky
železobetonových nosníků**

**Mechanical Properties of Concrete and Experimental Tests of
Reinforced Concrete Beams**

Student:

Jan Jeřábek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.

Ostrava 2021

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Jeřábek**

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky
železobetonových nosníků**
**Mechanical Properties of Concrete and Experimental Tests of
Reinforced Concrete Beams**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte bakalářskou práci na téma mechanické vlastnosti betonu, které budou následně ověřeny u experimentálních zkoušek konstrukčních prvků. Součástí práce bude také stručný souhrn současného stavu standardů testování betonu. V rámci práce se provede a vyhodnotí ucelený experimentální program laboratorních zkoušek. Na laboratorní testování budou navazovat zkoušky konstrukčních prvků ze železobetonu, kde se ověří získané mechanické vlastnosti a mechanismus kolapsu.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Model Code 2010 – Final Draft, fib, Bulletin No 65 and 66. 1-2. 2012.
2. RILEM (2011): About Rilem [Online], url: <https://www.rilem.net> [Accessed on 4 May 2011].
3. Sucharda, O., Konecny, P. Recommendation for the modelling of 3D non-linear analysis of RC beam tests, Computers and Concrete, 21 (1), pp. 11–20, 2018. DOI:10.12989/cac.2018.21.1.011
4. Bazant, Z. and Planas, J. (1998), Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press Boca Raton, FL.
5. <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18218-nelinearni-analyza-zelezobetonoveho-nosniku-bez-smykove-vyztuze-na-zaklade-charakteristik-betonu>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021



doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne.....

.....

podpis studenta

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Autorský zákon zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnutou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě.....

.....

Podpis studenta

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Poděkování

Tímto chci poděkovat zejména vedoucímu bakalářské práce Ing. Bc. Oldřichu Suchardovi, Ph.D. za pomoc, vstřícnost a odborné rady při vedení bakalářské práce a zejména při tvorbě a testování zkušebních vzorků v praktické části. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radce Hédlové a Ing. Davidu Bujdošovi za ochotnou pomoc při testování vzorků během praktické části v laboratoři stavební fakulty. Poslední poděkování patří spolužákovi Radoslavu Gandelovi, zejména za asistenci při výrobě zkušebních vzorků.

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Anotace

Bakalářská práce se zabývá ověřením mechanických vlastností jemnozrnného betonu s velikostí zrna do 4 mm a zkouškami železobetonových nosníků bez smykové výztuže. Teoretická část práce popisuje stručnou historii betonu, jeho hlavních složek (cement, voda a kamenivo) a popisem laboratorních zkoušek. V rámci ověřování vlastností betonu se během praktické části provedly zkoušky pevností v tlaku pro krychle a válce ve vícero variantách, následované zkouškami v příčném tahu a statického i dynamického modulu pružnosti. Experimentální část dále také zahrnovala zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou, odolnosti vůči mrazu a CHRL a objemových změn betonu. Poslední položkou praktické části bylo zkoušení dvou variant železobetonových nosníků bez smykové výztuže s rozdílným stupněm vyztužení.

Klíčová slova: beton, pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, modul pružnosti, železobetonový nosník

Annotation

The bachelor's thesis deals with the verification of mechanical properties of fine-grained concrete with a grain size of up to 4 mm and tests of reinforced concrete beams without shear reinforcement. The theoretical part of the thesis describes a brief history of concrete, its main components (cement, water and aggregates) and a description of laboratory tests. As part of the verification of concrete properties during the practical part, compressive strength tests for cubes and cylinders were performed in several variants, followed by split tensile tests, static and dynamic modulus of elasticity. The experimental part also included tests of depth penetration of pressurized water, resistance to frost and defrosting chemicals and volume changes of concrete. The last entry of the practical part was the testing of two variants of reinforced concrete beams without shear reinforcement with different degrees of reinforcement.

Keywords: concrete, compressive strength, tensile splitting strength, module of elasticity, reinforced concrete beam

Seznam použitých zkratk

CHRL	Chemické a rozmrazovací látky
ŽB	Železobeton

Seznam použitých veličin

E_{cu}	[GPa]	Dynamický modul pružnosti
F_{max}	[N]	Maximální hodnota zatížení při porušení
$f_{c,cube}$	[MPa]	Krychelná pevnost v tlaku
$f_{c,cyl}$	[MPa]	Válcová pevnost v tlaku
f_{ct}	[MPa]	Pevnost v příčném tahu
$f_{ct,fl}$	[MPa]	Pevnost v tahu ohybem
k_2	[-]	Součinitel trojrozměrného prostředí
k_3	[-]	Součinitel dvojrozměrného prostředí
ν_{cu}	[-]	Poissonův součinitel
ν_L	[km·s ⁻¹]	Rychlost impulzu podélného UZ vlnění
$\varepsilon_{s,n}$	[μm]	Poměrné přetvoření

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Beton	2
2.1	Historie Betonu.....	2
2.2	Klasifikace betonu	3
2.2.1	Klasifikace dle pevnosti v tlaku	4
2.1.2	Klasifikace dle stupně konzistence čerstvého betonu	5
2.1.3	Klasifikace dle stupně vlivu prostředí	7
3	Složky betonu.....	9
3.1	Cement.....	9
3.1.2	Klasifikace cementů	9
3.2	Voda.....	11
3.2.1	Rozdělení a požadavky na vodu do betonu	12
3.3	Kamenivo.....	13
3.3.1	Rozdělení podle objemové hmotnosti	13
3.3.2	Rozdělení podle původu	14
3.3.3	Rozdělení podle velikosti zrna	15
4	Zkoušení ztvrdlého betonu.....	16
4.1	Pevnost v tlaku.....	16
4.2	Pevnost v příčném tahu.....	17
4.3	Pevnost v tahu ohybem.....	18
4.3.1	Tříbodová zkouška tahu ohybem	18
4.3.2	Čtyřbodová zkouška tahu ohybem	19
4.4	Odolnost proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL).....	21
4.3.2	Metoda A.....	21
4.5	Hloubka průsaku tlakovou vodou.....	21
4.6	Ultrazvuková impulzová metoda.....	23
4.7	Stanovení objemových změn betonu	25
5	Experimentální část.....	27
5.1	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu	27
5.2	Stanovení pevnosti v tlaku.....	28
5.3	Stanovení pevnosti v příčném tahu.....	34
5.4	Doplňková zkouška v tahu ohybem.....	37
5.5	Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou	38

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

5.6	Stanovení odolnosti proti chemickým a rozmrazovacím látkám.....	40
5.7	Stanovení objemových změn.....	43
5.8	Statický a dynamický modul pružnosti	45
5.8.1	Statický modul pružnosti.....	45
5.8.2	Dynamický modul pružnosti	46
5.8.3	Doplňkové porovnání statického a dynamického modulu pružnosti	47
5.9	Únosnost železobetonových nosníků v ohybu.....	48
6	Závěr	51
	Seznam použitých zdrojů a norem	53
	Seznam obrázků	55
	Seznam grafů.....	56
	Seznam tabulek	57

1 Úvod

V dnešní době je beton stále jeden z nejrozšířenějších (ne-li nejrozšířenější) stavební materiál. Dříve označován jako umělý kámen, dnes jej považujeme za kompozitní stavební látku složenou z plniva a z pravidla hydraulického pojiva. Norma ČSN EN 206 beton definuje jako „materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami, příměsemi nebo s vlákny nebo bez nich, který získá své vlastnosti hydratací cementu“. Nejčastěji používanými pojivy do betonu jsou cementy. Mezi nejčastější plniva můžeme zařadit šterk a písek.

Beton je výhodný zejména díky jeho vlastnostem jako je vysoká pevnost v tlaku, odolnost proti negativním vlivům prostředí, nepropustnost pro vodu nebo možnost za čerstvého stavu z něj vytvořit různé tvary konstrukce. Mezi jeho méně chtěné až nevýhodné vlastnosti patří vysoká objemová hmotnost (tím i váha), špatná opracovatelnost ve ztvrdlém stavu nebo vysoká tepelná a zvuková vodivost.

Největší nevýhodou prostého betonu můžeme spatřovat v malé pevnosti v tahu, tahu ohybem a smyku. Zmíněné vlastnosti dosahují pouze desetiny své hodnoty pevnosti v tlaku. Z tohoto důvodu se prostý beton používá je na tlakem namáhané konstrukce. Možností, jak zvýšit únosnost betonu v tahu je přidáním tahové/smykové výztuže. V tomto případě mluvíme zejména o možnosti přidání ocelových prutů. Takovéto konstrukce nazýváme železobetonem. V železobetonové konstrukci využívá beton své vysoké pevnosti v tlaku, a přenášení pevnosti v tahu ponechává na ocelové výztuži.

V dnešní době bývá čím dál častější i použití rozptýlené výztuže (např. skleněná a polymerová vlákna), a tím vytvoření vláknobetonu. V případě použití ocelových vláken hovoříme o drátkobetonu.

Účelem této práce bude stručně projít beton z hlediska jeho rozdělení a zkoušení a následně výše zmíněné mechanické vlastnosti prostého betonu a železobetonových nosníků ověřit a vyhodnotit.

2 Beton

Technologie betonu je vědní a technická disciplína, která se zabývá složením, výrobou a vlastnostmi betonu za účelem dosažení potřebných vlastností s minimální energetickou náročností a zejména v poslední době na minimální zatížení životního prostředí. [1]

Tato kapitola popisuje stručnou historii betonu a různé dnes používané klasifikace.

2.1 Historie Betonu

Slovo „betón“ poprvé použil Francouzský inženýr B.F. de Belidor v roce 1753 a ve své publikaci jej použil pro označení hrubé malty. Spolu s latinským slovem betonium, které znamená kamenná malta, jsou tyto dvě slova označována za předchůdce dnešního názvu.

První zmínky o použití umělého kmene se datují do roku 3600 př. n. l. ve starověkém Egyptě pro stavbu sloupů. Největší rozmach beton však zaznamenal během Římské říše. Římané ve své době dokázali velice rozvinout a propracovat využití hydraulických malt. Zdivo vzniklé spojením této malty složené z hydraulického pojiva a písku s drceným kamenem nebo šterkem (s velikostí zrna max. 70 mm) a vodou vlastnostmi připomínalo materiál dnes známý jako beton. Nejznámějším příkladem takovéto betonové stavby je Římský pantheon. S kopulí postavenou z lehkého betonu mezi lety 120 až 125 n. l., s váhou cca 5 000 tun a průměrem 49 metrů se jedná o vskutku působivou stavbu. Rozvrácením Západořímské říše roku 476 barbarskými kmeny a nástupem raného středověku (dobou temna můžeme říci) se takovéto velkolepé stavitelství dostalo do úpadku. [1] [2]

Další velký rozvoj zažil beton až v 17. století během rozvoje průmyslové revoluce. Velký rozvoj průmyslu zapříčinil i velkou poptávku po stavební činnosti, čímž přirozeně stoupal i zájem o suroviny pro výstavbu, zejména pak hydraulických pojiv. Opakovaně se se objevovaly pokusy o výrobu hydraulického pojiva z běžně přístupných surovin až do roku 1825 kdy byla J. Aspdinem založena továrna na výrobu dnes již známého Portlandského cementu. Současně s vývinem hydraulických pojiv se vyvíjelo i jejich použití k výrobě betonu, který umožnil řešit do té doby obtížně řešitelné problémy (např. vodní stavby).

Velkou zásluhu si vysloužil Francouzský zahradník J. Monier, který v roce 1867 použil beton v kombinaci s drátěnou sítí na výrobu květináčů a stal se tak otcem železobetonu. Dalšími velkými průkopníky byli F. Hennebique jako průkopník železobetonových konstrukčních systémů a E. Freyssinet s nápadem předpjatého betonu. [1] [2]

2.2 Klasifikace betonu

Klasifikace (rozdělení) betonu nám umožňuje beton dle různých kritérií zařadit do jednotlivých kategorií, tříd a druhů:

Podle stavu [3]:

- Čerstvý beton – beton, který je zcela zamíchán a je ještě v takovém stavu, který umožňuje jeho ztuhnutí zvoleným způsobem;
- Ztvrdlý beton – beton v pevném stavu, který již nabyl určité pevnosti.

Podle objemové hmotnosti [2]:

- Lehký beton – LC ($\rho_0 = 800 - 2000 \text{ kg/m}^3$);
- Obyčejné – C ($\rho_0 = 2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$);
- Těžké – HC ($\rho_0 > 2600 \text{ kg/m}^3$).

Podle statických a konstrukčních vlastností [2]:

- Prostý beton – nijak nevyztužený, použití na konstrukce namáhané zejména tlakem;
- Železobeton – vyztužený ocelovými pruty nebo svařenými sítěmi, u kterých se předpokládá, že se budou podílet na přenášení vnitřních sil, zejména při tahu;
- Předpjatý beton – předem nebo dodatečně se v betonu pomocí předpínací výztuže vnáší předpětí a tím se vytváří tahová rezerva;
- Vláknobeton – obsahuje rozptýlená krátká vlákna výztuže (např. ocelová, skleněná, polypropylenová) které opět zlepšují některé vlastnosti betonu, zejména pevnost v tahu a v tahu za ohybu.

Podle funkce v konstrukci [2]:

- Konstrukční beton;
- Výplňové beton.

Podle způsobu uložení do konstrukce [2]:

- Monolitický beton – uložený do bednění přímo na stavbě;
- Prefabrikovaný beton – betonový výrobek je zhotoven a ošetřován na jiném místě, než je místo jeho konečného použití.

Další kritéria [2]:

- Podle maximální velikosti zrna kameniva (např. do 16 mm);
- Podle povrchové úpravy (např. hlazené);
- Podle způsobu hutnění (např. vibrování, propichování střešání nebo samohutnicí beton).

Norma ČSN EN 206-1 nám napomáhá při základním nejběžněji užívaném popisu betonu a klasifikuje jej do tří hlavních kategorií [3]:

- Klasifikace dle pevnosti v tlaku
- Klasifikace dle stupně konzistence čerstvého betonu
- Klasifikace dle stupně vlivu prostředí

2.2.1 Klasifikace dle pevnosti v tlaku

Pevnostní třída je nejzákladnějším kritériem při charakterizaci betonu. Betony se dělí do pevnostních tříd podle charakteristické pevnosti zkoušeného válce/krychle po 28 dnech kde zkušební krychle má rozměry 150x150x150 mm a válec výšku 300 mm a průměr základny 150 mm. Písmeno C pak stojí pro beton (z anglického concrete), písmena LC poté označují lehký beton (z anglického light weight concrete). První se zapisuje válcová pevnost $f_{ck,cyl}$, za lomítko se následně uvádí krychelná pevnost $f_{ck,cube}$. Válec je oproti krychli vyšší, při zkoušce má tedy význam štíhlost a válcová pevnost má nižší hodnoty pevnosti než krychle. Pevnostní třídy pro obyčejné betony jsou uvedeny v tabulce 1, pevnostní třídy pro lehké betony pak v tabulce 2. Pevnostní třídy C 55/67 a výše, respektive LC 55/60 pro lehké betony jsou již označovány jako vysokopevnostní betony. [1] [3] [4]

Tabulka 1: Pevnostní třídy obyčejných betonů [3]

Pevnostní třída v tlaku	$f_{ck,cyl}$ (válec) [MPa]	$f_{ck,cube}$ (krychle) [MPa]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tabulka 2: Pevnostní třídy lehkých betonů [3]

Pevnostní třída v tlaku	$f_{ck,cyl}$ (válec) [MPa]	$f_{ck,cube}$ (krychle) [MPa]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/28	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.1.2 Klasifikace dle stupně konzistence čerstvého betonu

V závislosti na použité zkušební metodě lze klasifikovat čerstvý beton dle normy ČSN EN 12350 zkoušení čerstvého betonu. Konzistence určené různými uvedenými zkušebními metodami nejsou navzájem srovnatelné ani nikterak převoditelné.

- Klasifikace dle zkoušky sednutí kužele;

Tabulka 3: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky sednutím kužele [3]

Stupeň	Směs	Sednutí [mm]
S1	Tuhá	10 až 40
S2	Plastická	50 až 90
S3	Měkká	100 až 150
S4	Velmi měkká	160 až 210
S5	tekutá	≥ 220

- Klasifikace dle zkoušky rozlití kužele;

Tabulka 4: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky rozlitím [3]

Stupeň	Směs	Průměr rozlití [mm]
F1	Tuhá	≤ 340
F2	Plastická	350 až 410
F3	Měkká	420 až 480
F4	Velmi měkká	490 až 550
F5	Tekutá	560 až 620
F6	Velmi tekutá	≥ 630

- Klasifikace dle Vebe;

Tabulka 5: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě Vebe [3]

Stupeň	Směs	Vebe čas [s]
V0	Velmi tuhá	≥ 31
V1	Tuhá	30 až 21
V2	Plastická	20 až 11
V3	Měkká	10 až 6
V4	Velmi měkká	5 až 3

- Klasifikace dle zhutnitelnosti.

Tabulka 6: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě zhutnitelnosti [3]

Stupeň	Směs	zhutnění [mm]
C0	Velmi tuhá	≥ 1,46
C1	Tuhá	1,45 až 1,26
C2	Plastická	1,25 až 1,11
C3	Měkká	1,10 až 1,04

2.1.3 Klasifikace dle stupně vlivu prostředí

Podstatným způsobem klasifikace betonu je zatřídění dle stupně vlivu prostředí. V tabulce 7 jsou uvedeny druhy vnějšího prostředí, kterým může být konstrukce z betonu vystavena. Reálně na beton většinou nepůsobí pouze jeden vliv prostředí, v případě, že je vlivů více, v tomto případě dochází k vyjádření stupně vlivu prostředí jako jeho kombinace. Díky tomu může konečná klasifikace zapříčinit zatřídění betonu do vyššího stupně odolnosti. [1] [3]

Tabulka 7: Klasifikace betonu podle stupně vlivu prostředí [3]

Stupeň	Popis prostředí	Max. v/c	Min. tříd betonu	Min. množství cementu [kg.m ⁻³]
X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	-	C 12/15	-
XC	Koroze vlivem karbonatace			
XC1	Suché nebo stále mokré	0,65	C 20/25	260
XC2	Mokré, občas suché	0,60	C 20/30	280
XC3	Středně mokré, vlhké	0,55	C 30/37	280
XC4	Střídavě mokré a suché	0,5	C 30/37	300
XD	Koroze způsobená chloridy jinými než z mořské vody			
XD1	Středně mokré, vlhké	0,55	C 30/37	300
XD2	Mokré, občas suché	0,55	C 30/37	300
XD3	Střídavě mokré, suché	0,45	C 35/45	320
XS	Koroze způsobená chloridy z mořské vody			
XS1	Vystaven slanému vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou	0,50	C 30/37	300
XS2	Trvale ponořen ve vodě	0,45	C 35/45	320
XS3	Smáčený a ostříkovaný přílivem	0,45	C 35/45	340
XSF	Střídavé působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich			
XF1	Mírně nasycen vodou, bez rozmrazovacích prostředků	0,55	C 30/37	300
XF2	Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky	0,55	C 25/30	300
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků	0,50	C 30/37	320
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou	0,45	C 30/37	340
XA	Chemicky agresivní prostředí			
XA1	Slabě agresivní chemické prostředí	0,55	C 30/37	300
XA2	Středně agresivní chemické prostředí	0,50	C 30/37	320
XA3	Vysoce agresivní chemické prostředí	0,45	C 35/45	360

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Na základě výše zmíněných charakteristik lze pak libovolný typový beton popsat. Např.:

C 30/37 – XF4 – Dmax 4 – S1

Kde:

- C 30/37 – stanovuje pevnostní třídu betonu;
- XF4 – stanovuje třídu odolnosti vlivu prostředí (Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou);
- Dmax 4 – Maximální velikost zrna 4 mm;
- S1 – Stupeň konzistence podle zkoušky sednutí kužele (tuhá).

3 Složky betonu

Zjednodušeně můžeme složky betonu rozdělit na [1]:

Základní:

- Cement;
- Kamenivo;
- Voda.

Doplňkové:

- Přísady (od 0,2 do 5% hmotnosti cementu, modifikují vlastnosti čerstvého nebo tvrdnoucího betonu);
- Příměsi (práškovité látky, které zlepšují zpracovatelnost a přispívají k hydrataci).

Výztuž:

- Betonářská ocel (pruty, sítě, třmínky);
- Předpjatá výztuž;
- Rozptýlená výztuž (vláknobetony).

3.1 Cement

Funkci pojiva v betonu nejčastěji tvoří právě cement. Jedná se o jemně mletou anorganickou látku, která po smíchání s vodou vytváří kaši se schopností tuhnout a tvrdnout na vzduchu i ve vodě. Cement pro docílení své pevnosti nevyžaduje stálý přístup ke vzduchu, to z něj činí pojivo hydraulické. [1] [2] [5]

Počátek tuhnutí se liší podle druhu cementu a odvíjí se od řady faktorů jako jemnost mletí nebo množství sádrovce. Počátek tuhnutí obvykle nastává do 60 minut a trvá přibližně 5 hodin (maximálně 12 hodin). Doba tuhnutí se dá zvýšit přidáním většího množství vody nebo naopak zkrátit zvýšením teploty. Tvrdnutí cementu má rychlý náběh a postupem času zpomaluje až do úplného ustálení (řády měsíců), k největšímu nárůstu pevnosti dochází v prvních 28 dnech kdy nabývá již 75 až 85 % konečné pevnosti. [1] [2] [5]

3.1.2 Klasifikace cementů

Podle druhu a složení:

Cementy pro obecné použití můžeme podle normy ČSN EN 197-1 rozdělit do 5 hlavních kategorií [5]:

- CEM I – Portlandský cement;

Portlandský cement se z 95 až 100 % skládá se slínku. [5]

- CEM II – Portlandský směsný;

Jedná se o druh cementu, ve kterém je majoritní složkou stále portlandský slínek, ale již obsahuje příměsi (např. popílky, pucolány, vysokopecní strusku, vápenec atd.) [5]

- CEM III – Vysokopecní cement;

Část portlandského slínku je nahrazena vysokopecní struskou. [5]

- CEM IV – Pucolánový cement;

Zde je část portlandského slínku nahrazena pucolánovými složkami, křemičitými úlety a popílky. [5]

- CEM V – Směsný cement;

Poslední tzv. Směsný cement krom portlandského slínku obsahuje vysokopecní strusku, pucolány a křemičité popílky. [5]

Dále existují i speciální cementy jako síranovzdorný, bílý, rozpínavý, hlinitanový a další. [5]

Podle normalizované pevnosti

Podle hodnoty pevnosti v tlaku cementu stanovené po 28 dnech dle ČSN EN 196-1 rozeznáváme tři třídy podle normalizované pevnosti [5]:

- 32,5;
- 42,5;
- 52,5.

Podle počáteční pevnosti [5]:

Počáteční pevností rozumíme pevnost v tlaku stanovenou po 2 nebo 7 dnech dle ČSN EN 196-1. Podle stanovené počáteční pevnosti rozeznáváme opět tři třídy.

- **R** – třída s vysokými počátečními pevnostmi;
- **N** – třída s normálními počátečními pevnostmi;
- **L** – třída s nízkými počátečními pevnostmi (zejména kategorie cementů CEM III.).

3.2 Voda

Voda v betonu má 2 základní funkce:

Hydratační:

Voda se chemicky váže na cement a vytváří tak jeho pevnou strukturu.

Reologická:

Umožňuje zpracování čerstvého betonu, ale větší množství přidané vody způsobuje horší kvalitu výsledného betonu. Čím více vody použijeme do záměsi, tím vyšší bude pórovitost ztvrdlého betonu, což zapříčiní vyšší nasákavost, nižší pevnost, a tudíž i celkově nižší trvanlivost betonu.

Množství záměsové vody v betonu můžeme vyjádřit tzv. vodním součinitelem (w), který můžeme uchopit jako poměr hmotnosti vody (v) k hmotnosti cementu (c) v čerstvém betonu. [1] [2] [6]

$$w = v/c [-] \tag{1}$$

Vodní součinitel nám kromě kvality výsledného betonu určuje i jeho zpracovatelnost v čerstvém stavu. Teoreticky by pro hydrataci cementu mělo stačit množství vody odpovídající přibližně 20 % z hmotnosti cementu ($w = 0,2$), v tomto stavu je však příliš tuhý a špatně

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků zpracovatelný. Zvýšení zpracovatelnosti můžeme kromě ne příliš žádaného přidání vody dosáhnout i pomocí plastifikátorů a superplastifikátorů. Některé superplastifikátory již jsou na takové úrovni, že podporují i hydrataci cementu a hodnoty vodního součinitele mohou dostat až pod úroveň vodního součinitele $w = 0,2$, i přes zachování dobré zpracovatelnosti pod dobu až 90 minut. [1] [2] [6]

Voda samotná se pak přidává nejen do směsi (záměsová) ale následně i při ošetřování čerstvého/mladého betonu (ošetřovací voda). Záměsová voda plní reologickou a hydratační funkci od počátku, voda ošetřovací pak má za úkol hlavně doplnit odpařenou záměsovou vodu a zároveň mírně ochlazuje povrch betonu, když je například vystaven slunci během letních dní. [1] [2]

3.2.1 Rozdělení a požadavky na vodu do betonu

Je nutno vzít v potaz, že ne každá voda je vhodná do betonu. Vhodnost vody se zkouší na množství požadavků týkajících se jejího znečištění dle ČSN EN 1008. Četnost zkoušení se také liší podle původu. Samotný původ můžeme klasifikovat následovně:

- **Pitná voda;**

Jedná se o vodu z vodovodního řádu. Obecně je považována za vhodnou a není nutno jí testovat. [6]

- **Užitková voda;**

Jak podzemní, tak povrchová voda může být vhodná pro použití do betonu, před použitím by se však měla otestovat především na přítomnost nežádoucích solí, organických látek, tuků a olejů. [6]

- **Voda mořská a brakická (poloslaná);**

Oba druhy jsou použitelné, ale kvůli obsahu soli pouze do prostého betonu bez výztuže. Používá se zejména v přímořských oblastech s nedostatkem pitné vody. Obecně se ale nedoporučuje jejich použití. [6]

- **Recyklovaná voda;**

Voda vzniklá jako vedlejší produkt při výrobě betonu v betonárnách je do betonu použitelná. Obsahuje však pevné částice, vodu je nutno zkoušet zejména na objemovou hmotnost, která nesmí přesáhnout 1010 kg.m^{-3} . Obecně se pak nesmí používat do vysokopevnostních betonů. [6]

- **Splašková voda.**

Odpadní a splašková voda se obecně uvažuje jako nepoužitelná do betonu. [6]

3.3 Kamenivo

Plnivo do betonu tvoří většinou kamenivo, které tvoří mezi 70 až 80 % objemu betonu. Jedná se o sypký, zrnitý, většinou anorganický materiál přírodního nebo umělého původu. Účelem kameniva je v betonu vytvořit pevnou kostru s nejmenšími možnou mezerovitostí, z toho důvodu obsahuje různé velikosti zrn ve vhodném poměru. [1] [2] [7]

Kamenivo pak můžeme rozdělit podle [1] [2] [8]:

- Objemové hmotnosti;
- Původu (Přírodní, umělé a recyklované);
- Velikosti zrn.

3.3.1 Rozdělení podle objemové hmotnosti

Pórovité:

Anorganická kameniva s objemovou hmotností do 2000 kg/m³. U přírodních kameniv můžeme zmínit tufy nebo pemzu, význam přírodních kameniv však upadá a větší využití nalézají ty umělá jako liapor nebo expandovaný perlit a vermikulit. Z těch recyklovaných jde o cihelný recyklát. Pórovité kameniva mají využití zejména u lehkých betonů a u betonů s dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi. [1] [8]

Hutné:

Anorganická kameniva s objemovou hmotností mezi 2000-3000 kg/m³. Patří zde většina drcených nebo těžných přírodních kameniv, z umělých pak např. vysokopecní struska a z recyklovaných betonový recyklát. V tabulce 8 jsou uvedeny příklady nejznámějších hornin v hutných kamenivech. [1] [8]

Tabulka 8: Příklady nejznámějších hornin pro hutná kameniva do betonu [1]

Hornina	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Tvrдость podle Mohse	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu	Nasákavost [% hm.]
Vyvřelé horniny					
Žula	2600-2800	6-7	120-240	10-35	0,2-1,2
Diorit	2700-3000	6-7	135-215	20-40	0,2-0,7
Gabro	2800-3100	6,7	150-225	25-60	0,2-0,7
Čedič	2900-3050	6	250-400	15-25	0,1-0,3
Sedimentární horniny					
Pískovec	2000-2400	proměnlivá	30-80	3-8	4-8,5
Vápenec	2600-2850	3	40-180	10-25	0,2-0,6
Břidlice	2600-2750	3	100-190	30-100	0,3-1,5
Přeměněné horniny					
Rula	2650-2750	6-7	120-250	24-50	0,1-1,2
Amfibol	2700-3100	6	170-280		0,1-0,4
Mramor	2700-2800	3	75-145	12-26	0,2-1,0

Těžké kamenivo:

Anorganická kameniva s objemovou hmotností nad 3000 kg/m³. Z přírodních kameniv patří mezi ty těžká např. masivní čedič nebo amfibol, z umělých kameniv pak můžeme zařadit např. syntetický korund. Těžká kameniva mají uplatnění zejména ve speciálních těžkých betonech v jaderných elektrárnách nebo zdravotnictví, kde slouží jako ochrana proti radiaci. [1] [8]

3.3.2 Rozdělení podle původu

Přírodní:

Kamenivo anorganického původu vzniklé pouze pomocí mechanického zpracování hornin, minerálů a zemin. Přírodní kategorie pak můžeme ještě rozdělit na:

- **Těžené** – Vzniklé přirozeným rozpadem hornin a těžené většinou z ložisek pod vodní hladinou (např. povodí větších řek). Pro těžené kamenivo bývá typický zaoblený a ohlazený povrch jednotlivých zrn. [8]
- **Drcené** – Horniny pro výrobu drceného kameniva se získávají většinou z povrchových lomů. U drceného kameniva nemusí být brán ohled na jeho vzhled/neporušení, nejčastější metodou těžby je tedy pomocí odstřelů, velké kusy horniny se následně drtí na menší zrna. Pro drcené kamenivo bývá typický ostrohranný tvar zrn a drsný lomový povrch. [8]

- **Těžené předrcené** – Získání drcením těženého kameniva s podílem již drcených zrn. [8]

Umělé:

Kamenivo anorganického původu vyrobené člověkem cíleně, nebo jako vedlejší produkt jiných procesů. V případě vedlejšího produktu můžeme hovořit o vysokopecní strusce, vzniklé jako odpadní produkt při výrobě železa a následně drcené na hutné struskové kamenivo. Jako příklad pórovitého umělého kameniva můžeme uvést liapor vzniklý drcením a následným vypalováním jílu. [8]

Recyklované:

Anorganické kamenivo, které bylo dříve použito jako stavební materiál v jiných konstrukcích. Recyklované kamenivo vzniká rozdrčením a následně přetřízením předchozí části konstrukce. [8]

3.3.3 Rozdělení podle velikosti zrna

Na základě roztržení kameniva skrze sadu sít, jej můžeme rozdělit na 3 základní kategorie (tab. 9):

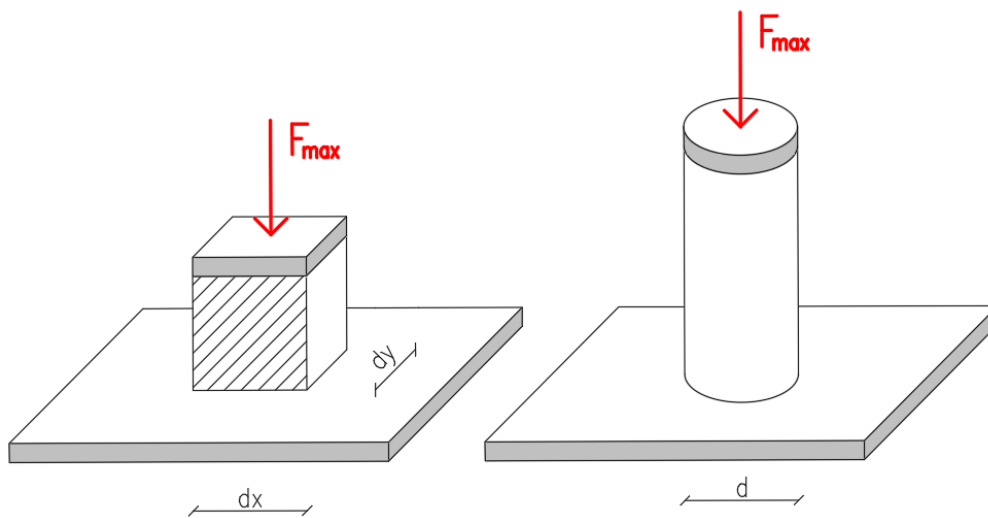
Tabulka 9: Rozdělení kameniva podle velikost zrna [8]

	Velikost zrna
Hrubé kamenivo	4-125 mm
Drobné kamenivo	do 4 mm
Filer (kamenná moučka)	Pod 0,063 mm

4 Zkoušení ztvrdlého betonu

4.1 Pevnost v tlaku

Před vložením do zkušební lisu je nutno plochy vzorku očistit od případných nečistot a otřít vodu z jeho povrchu. Vzorek se zatěžuje s plynule s konstantní rychlostí $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$) (obrázek 1) až do porušení vzorku, počáteční zatížení při zkoušce by pak nemělo být vyšší než cca 30 % zatížení při porušení. [4]



Obrázek 1: Schéma zkoušky pevnosti v prostém tlaku [4]

Z hodnot naměřených při zkoušce vypočítáme pevnost v tlaku podle vzorce [4]:

$$f_{ck,cube} = \frac{F_{max}}{A_{c,cube}} = \frac{F_{max}}{d_x \cdot d_y} \quad (2)$$

$$f_{ck,cyl} = \frac{F_{max}}{A_{c,cyl}} = \frac{F_{max}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (3)$$

Kde:

$f_{c,cube}$ krychelná pevnost v tlaku [MPa]

$f_{c,cyl}$ válcová pevnost v tlaku [MPa]

F_{max} maximální hodnota zatížení při porušení [N]

$A_{c,cube}$ plocha zkušební krychle, na kterou působilo zatížení [mm^2]

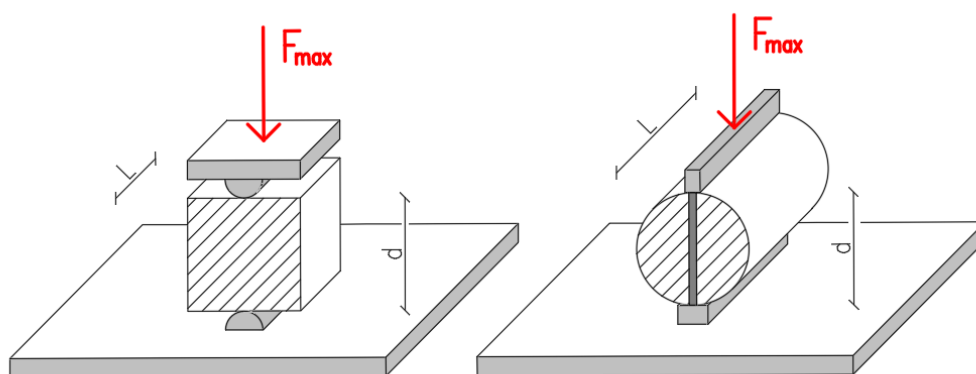
$A_{c,cyl}$ plocha zkušební válce, na kterou působilo zatížení [mm^2]

d_x, d_x rozměry zkušební krychle [mm]

d průměr zkušební válce [mm]

4.2 Pevnost v příčném tahu

Před vložením do zkušebního lisu je nutno plochy vzorku očistit od případných nečistot a otřít vodu z jeho povrchu. Vzorek se zatěžuje s plynule s konstantní rychlostí od 0,04 do 0,06 MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$) (obrázek2) až do porušení vzorku, počáteční zatížení při zkoušce by pak nemělo být vyšší než cca 20 % zatížení při porušení. [9]



Obrázek 2: Schéma zkoušky pevnosti v příčném tahu [9]

Z hodnot naměřených při zkoušce vypočítáme pevnost v příčném tahu podle vzorce [9]:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (4)$$

Kde:

f_{ct} pevnost v příčném tahu [MPa]

F_{max} maximální hodnota zatížení při porušení [N]

L délka dotykové přímky tělesa [mm]

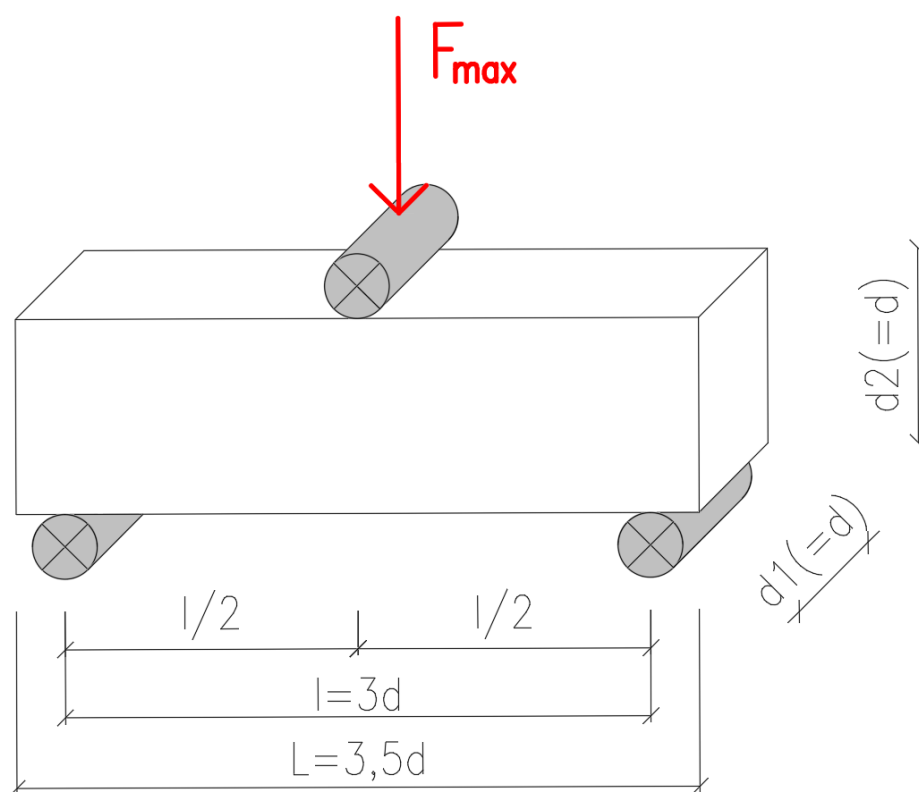
d příčný rozměr tělesa [mm]

4.3 Pevnost v tahu ohybem

Před vložením do zkušebního lisu je nutno plochy vzorku očistit od případných nečistot a ořit vodu z jeho povrchu. Vzorek se zatěžuje s plynulou s konstantní rychlostí od 0,04 do 0,06 MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$) až do porušení vzorku, počáteční zatížení při zkoušce by pak nemělo být vyšší než cca 20 % zatížení při porušení. Pevnost v tahu ohybem můžeme rozdělit na dva druhy podle množství břemen kterými zatěžujeme [10] [11]:

4.3.1 Tříbodová zkouška tahu ohybem

V případě tříbodové zkoušky se vzorek zatěžuje pomocí jen jednoho zatěžovacího břemena (obrázek 3). [10] [11]



Obrázek 3: Schéma tříbodové zkoušky tahu ohybem [10]

Z hodnot naměřených při tříbodové zkoušce vypočítáme pevnost v tahu za ohybu podle vzorce [10] [11]:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (5)$$

Kde:

$f_{ct,fl}$	pevnost v tahu ohybem [MPa]
F_{max}	maximální hodnota zatížení při porušení [N]
l	vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]
L	délka tělesa [mm]
d_1, d_2	příčné rozměry tělesa [mm]

V případě tříbodové zkoušky ohybem lze provést i variantu se zářezem, ten se vytvoří v polovině zkoušeného vzorku ze spodní strany v místě zatěžovaném břemenem. Zářez vzorek oslabuje a porušení vzorku vznikne právě v tomto místě, kdežto v případě nepoužití zářezu, dojde k porušení vzorku v jeho nejslabším místě, které nemusí být nutně přímo uprostřed. Tento postup se uplatňuje zejména u vláknobetonů. [10] [11]

Z hodnot naměřených při tříbodové zkoušce se zářezem vypočítáme pevnost v tahu za ohybu podle upraveného vzorce [10]:

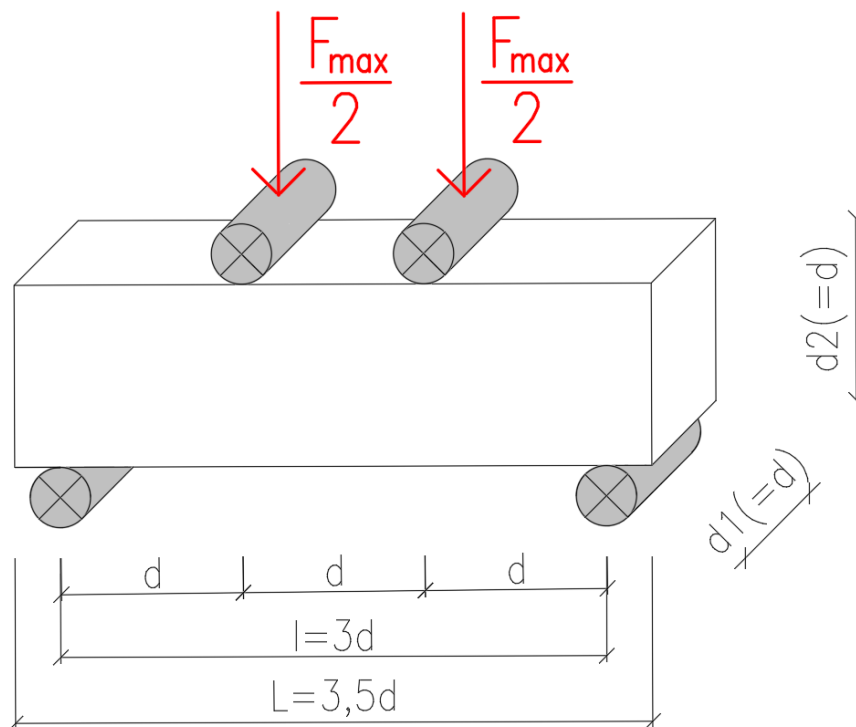
$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot (d_2 - a_0)^2} \quad (6)$$

Kde:

a_0 výška zářezu

4.3.2 Čtyřbodová zkouška tahu ohybem

V případě čtyřbodové zkoušky se vzorek zatěžuje pomocí dvou zatěžovacích břemen (obrázek 4). Zatěžovací břemena jsou umístěna po třetinách zkoušeného vzorku. Hlavní rozdíl od tříbodové zkoušky je v maximálním ohybovém momentu. V případě tříbodové zkoušky je působí maximální moment pouze uprostřed vzorku, kdežto u čtyřbodové zkoušky vzniklý maximální moment působí po celé vnitřní třetině zkoušeného vzorku a může tak odhalit nejslabší místo ve vzorku. [10] [11]



Obrázek 4: Schéma čtyřbodové zkoušky tahu ohybem [10]

Z hodnot naměřených při čtyřbodové zkoušce vypočítáme pevnost v tahu za ohybu podle vzorce [10]:

$$f_{ct,fl} = \frac{F_{max} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (7)$$

Kde:

$f_{ct,fl}$ pevnost v tahu ohybem [MPa]

F_{max} maximální hodnota zatížení při porušení [N]

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1, d_2 příčné rozměry tělesa [mm]

4.4 Odolnost proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL)

Účelem zkoušky odolnosti proti CHRL je stanovit odolnost povrchu betonu proti agresivnímu prostředí s rozpuštěnými solemi a zmrazovacím cyklům simulujícím předpokládané prostředí výskytu konstrukce. Zkouška se dá provést třemi různými metodami s označením A, B a C. V rámci této práce byla použita metoda typu A, dále bude tedy pospána jen tato metoda. [1] [2]

4.3.2 Metoda A

Metoda A, jinak také Metoda automatického cyklování I. Pro zkoušku se používají většinou zkušební krychle o délce hrany 150 mm, ty jsou po vzniku uloženy do vodního prostředí na 28 dní. Poté se uloží do laboratorního prostředí a 35 den je zahájena zkouška. Zkušební krychle jsou ponořeny do misky s 3% roztokem NaCl tak, aby hladina roztoku dosahovala výšky 5 mm vzorku. Vzorek je následně podroben cyklům chlazení na teplotu -15 °C a následnému ohřevu na 20 °C. Nejnižší a nejvyšší teplota se udržuje po dobu 15 minut, celý cyklus pak trvá přibližně 2 až 2,5 hodiny. Každých 25 cyklů se misky se vzorkem vyjmou a pomocí stříčky splaví veškeré uvolněné částice odpadu. Získaný odpad se vysuší při teplotě přibližně 105 °C a následně zváží. Zkouška je ukončena po 100 cyklech. [1] [2] [12]

Množství odpadu je nutno přepočítat v závislosti na zkoušené ploše podle vzorce [12]:

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A} \quad (8)$$

Kde:

ρ_a	hmotnost odpadu na jednotku plochy [g.m ⁻²]
$\sum m$	součet hmotností odpadů [g]
A	plocha zkušební plochy [m ²]

4.5 Hloubka průsaku tlakovou vodou

Účelem zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou je stanovit odolnost vůči průsaku např u vodohospodářských staveb nebo u konstrukcí, na které působí podzemní voda. Zkouška má pak simulovat tyto podmínky. [13]

Ihned po odformování je důležité jednu stranu zkušební vzorku zdrsňit ocelovým kartáčem před uložením do vodní lázně. Samotná zkouška se pak provádí minimálně 28 dní od vzniku

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků vzorku. Zkušební vzorek se upne do zařízení (obrázek 5) a nechá se na něj působit vodní tlak 500 ± 50 kPa na plochu o průměru 75 mm (toho se dosáhne gumovým těsněním) po dobu 72 ± 2 hodin. Po této době se vzorek vyjme ze zařízení, zkoušená plocha se osuší od přebytečné vody a vzorek se v lisu rozlomí v polovině, kolmo na povrch, na který působil vodní tlak. [13]



Obrázek 5: Přístroj na zkoušku průsaku tlakovou vodou, zdroj: vlastní

Po dostatečném oschnutí lomové plochy a řádně viditelného průsaku se označí hranice průsaku vody a změří se největší hloubka průsaku od zkoušené plochy. Výsledkem pak je největší naměřená hloubka průsaku. [13]

4.6 Ultrazvuková impulzová metoda

Na rozdíl od všech předchozích zkoušek ztvrdlého betonu, se jedná o zkoušku nedestruktivní. Pomocí této zkoušky dokážeme zjistit určité vlastnosti betonu na základě stanovení rychlosti šíření impulsu ultrazvukových podélných vln. [14]



Obrázek 6: Přístroj pro měření ultrazvukovou metodou, zdroj: vlastní

Sondy měřicího zařízení (obrázek 6) jsou pokryty kluznou složkou a následně přitisknuty na 5 libovolných míst, v podélném směru vždy naproti sobě a měříme čas, za který vlna projde tělesem. [14]

Pomocí změřeného času průchodu vlny vzorkem vypočteme rychlost impulsu ze vztahu [14]:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (9)$$

Kde:

v_L rychlost impulsu podélného UZ vlnění [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$]

L délka měřicí základny [mm]

T čas průběhu impulsu měřicí základnou [μs]

Z vypočtené rychlosti impulzu pak lze vypočítat dynamický modul pružnosti ze vztahu [15]:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k_x^2} \quad (10)$$

Kde:

ρ objemová hmotnost betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_L rychlost impulzu podélného UZ vlnění [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$]

k_x součinitel rozměrnosti prostředí [-]

V případě, že se vlnění nešíří v jednorozměrném prostředí (pruty, válce, trámce) kdy $k_1 = 1$, je nutno vypočítat pomocí Poissonova koeficientu součinitel rozměrnosti pro dvojrozměrné prostředí k_2 (desky) ze vztahu: [14] [15]

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{(1-\nu_{cu}^2)}} \quad (11)$$

A pro trojrozměrné prostředí k_3 (krychle, kvádry, válce) ze vztahu [14]:

$$k_3 = \sqrt{\frac{1-\nu_{cu}}{(1+\nu_{cu}) \cdot (1-2 \cdot \nu_{cu})}} \quad (12)$$

Kde:

ν_{cu} Poissonův součinitel (pro beton 0,2)

Pomocí kalibračních vztahů lze pak kromě dynamického modulu pružnosti vypočítat i statický modul pružnosti a pevnosti (pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu atd.). [15]

4.7 Stanovení objemových změn betonu

Zkouška stanovuje podélnou deformaci betonu způsobenou autogenní smršťováním (objem vody a pojiva před hydratací je větší než výsledný objem vzniklého cementového tmele) a smršťováním vlivem vysychání. [16] [17]

Čerstvý beton se ukládá a hutní do měřicího žlabu opatřeného nenasákavou a hladkou neoprenovou folií (obrázek 7) s účelem minimalizace tření betonu o stěny žlabu a jedním posuvným čelem s vysoce citlivým snímačem. Žlaby je nutné umístit do stabilního prostředí jak z hlediska teploty, tak i ochrany před vibracemi atd. (je nutné zajistit takové prostředí, aby nedocházelo smršťování/nabývání betonu či vlivu na snímací sondu nežádoucími vlivy). Posuvné čelo je při plnění zajištěno kolíkem, který je po naplnění žlabu vyjmut a nahrazen snímací sondou napojenou do datové sběrné, v tento moment začíná měření. [16] [17]



Obrázek 7: Zkušební žlab značky Schleibinger v místě připojení sondy, zdroj: vlastní

Ze získaných měření se vyhodnotí hodnota smršťování/nabývání jako poměrné přetvoření ze vztahu [16]:

$$\varepsilon_{s,n} = \frac{\Delta z_n}{z_0} \cdot 1000 \quad (13)$$

Kde:

$\varepsilon_{s,n}$ poměrné přetvoření [μm]

Δz_n délková změna základny oproti výchozímu stavu [mm], vypočtená ze vztahu:

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

$$\Delta z_n = z_n - z \quad (14)$$

z změřená délka základny při zahájení měření [mm]

z_n změřená délka měřné základny v n-tý den tvrdnutí betonu [mm]

z_0 původní délka základny [mm]

5 Experimentální část

Účelem experimentální části bylo stanovení mechanických vlastností betonu destruktivními i nedestruktivními metodami v laboratorním prostředí VŠB-FAST. Zkoušené vlastnosti budou následovné:

- Objemová hmotnost ztvrdlého betonu;
- Pevnost v tlaku;
- Pevnost v tahu;
- Únosnost železobetonových nosníků v ohybu;
- Statický a dynamický modul pružnosti;
- Odolnost vůči chemickým a rozmrazovacím látkám (dále jen CHRL);
- Objemové změny při zrání betonu;
- Hloubka průsaku tlakovou vodou.

Zkoušený materiál

Pro účely práce byla použit vodonepropustný jemnozrnný beton s maximální velikostí zrna 4 mm s vyšší konečnou pevností, vysokou odolností vůči mrazu, posypovým solím a s certifikací pro styk s pitnou vodou. Beton je určen pro běžné a konstrukční účely. [18]

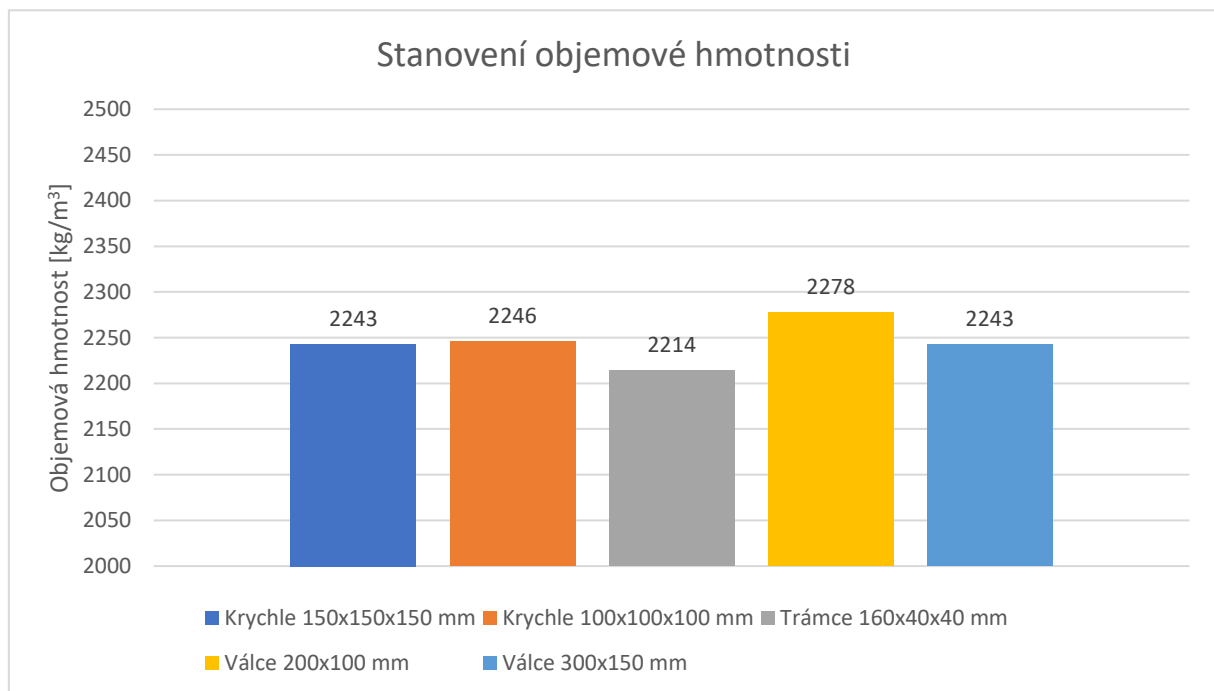
5.1 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Vzorky byly 6 hodin předem vytaženy z vodní lázně a nechaly se sušit na vzduchu v prostředí laboratoře. Po 6 hodinách se na vzorcích změřili 3 na sebe kolmé rozměry a hmotnost. Následně se vypočítal objem vzorků a po něm jejich objemová hmotnost. Výsledná objemová hmotnost by se poté měla zaokrouhlit na nejbližších 10 kg/m^3 . Pro naše potřeby bude výhodnější zaokrouhlit jen na celé jednotky [19]. Stanovení objemové hmotnosti uvádí tabulce 10.

Tabulka 10: Stanovení objemové hmotnosti

Typ vzorku	Průměr objemové hmotnosti [kg/m^3]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Krychle 150	2243	15,41	0,69
Krychle 100	2246	19,82	0,88
Trámce 160x40x40	2214	13,85	0,63
Válce 200x100	2278	5,00	0,22
Válce 300x150	2243	12,71	0,57

Objemová hmotnost není závislá na tvaru vzorku, a měla by tedy být pro všechny vzorky stejná, působením lidského faktoru však není téměř možné získat identické hodnoty. Z grafu 1 lze vidět, že objemové hmotnosti se v závislosti na tvaru vzorku liší jen minimálně, a průměrná objemová hmotnost betonu byla stanovena na 2250 kg/m^3 .



Graf 1: Stanovení objemové hmotnosti

5.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku betonu po 28 dnech byla zkoušena ve variantách:

- Krychle 150x150x150 mm (tab. 11);
- Krychle 100x100x100 mm (tab. 12);
- Válec 100x200 mm (tab. 13);
- Válec 150x300 mm (tab. 14);
- Půlkách trámce 160x40x40 mm (zbytcích trámů z ohybové zkoušky) (tab. 15).

Všechny vzorky byly 6 hodin před provedením zkoušky vytaženy z vodní lázně, očištěny od povrchových nečisto a nechaly se po tuto dobu sušit v laboratorním prostředí. Zkouška se prováděla vždy na 6 vzorcích, s výjimkou velkých válců 150x300mm (4vzorky) a malých trámů 160x40x40 mm, které jsou získány ze zkoušky v tahu za ohybu, tudíž byly zkoušeny

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků obě vzniklé poloviny, a tedy dohromady 12 vzorků. Souhrnné stanovení pevnosti v tlaku je uvedeno v tabulce 16.

Tabulka 11: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	7438	2246	1061,3	47,87
2	7493	2262	1148,4	51,8
3	7405	2233	1021,3	45,97
4	7445	2248	1079	48,7
5	7444	2228	1061,6	47,4
6	7467	2233	1055,8	47,14

Tabulka 12: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 100x100x100 mm

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	2265	2263	536,6	53,71
2	2254	2256	563,9	56,73
3	2222	2229	538,9	54,16
4	2206	2258	549,2	54,65
5	2279	2268	601,6	59,74
6	2184	2263	515,2	51,47

Tabulka 13: Pevnost v tlaku na zkušebních válcích 200x100 mm

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	3514	2271	396	50,32
2	3525	2284	420,1	53,38
3	3506	2280	391,9	49,90
4	3517	2271	411,7	52,52
5	3536	2281	329,3	41,93
6	3536	2280	428	54,28

Tabulka 14: Pevnost v tlaku na zkušebních válcích 300x150 mm

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	11455	2229	761,2	43,25
2	11456	2234	812,1	46,08
3	11561	2262	829,5	47,38
4	11588	2247	863,6	49,07

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

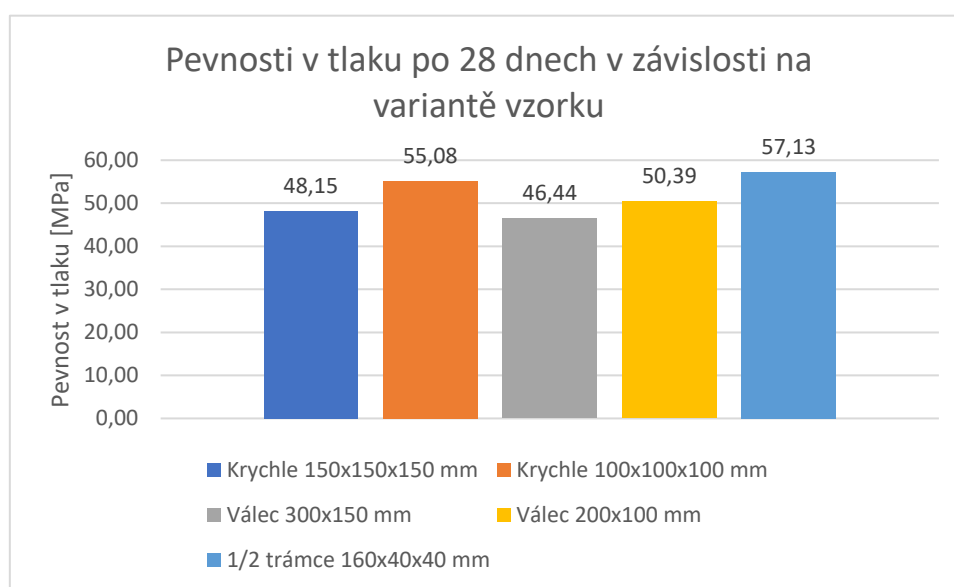
Tabulka 15: Pevnost v tlaku na zkušebních krychlich 40x40 mm

vzorek	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	2210	96,1	59,37
2	2216	96,3	59,49
3	2232	90,99	56,21
4	2189	89,65	55,38
5	2227	96,07	59,35
6	2208	84,27	52,06
7	2210	100,4	62,02
8	2216	93,4	57,70
9	2232	87,01	53,75
10	2189	88,47	54,65
11	2227	96,33	59,51
12	2208	90,86	56,13

Tabulka 16: Směrodatné odchytky a variační koeficienty různých variant vzorků pevnosti v tlaku

	Krychle 150x150x150 mm	Krychle 100x100x100 mm	Válec 200x100 mm	Válec 300x150 mm	Krychle 40x40 mm
Průměrná pevnost [MPa]	48,15	55,08	50,39	46,44	57,13
Směrodatná odchytky [MPa]	1,83	2,59	4,09	2,13	2,79
Variační koeficient [%]	3,79	4,71	8,12	4,58	4,89

Souhrnné porovnání pevnosti v tlaku je zobrazeno v grafu 2 kde průměrné pevnosti v tlaku byly zjištěny od 46 do 57 MPa.



Graf 2: Pevnosti v tlaku po 28 dnech v závislosti na variantě vzorku

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Pro nejběžnější variantu krychle (150x150x150 mm) a válce (150x300 mm) (obrázek 8) bylo typické že výsledné pevnosti byly nižší než u menších variant daného vzorku. Současně dle předpokladu, nejběžnější varianta krychle dosahovala větších průměrných pevností v tlaku než nejběžnější varianta válce. Nejvyšších pevností v tlaku dosáhly vzorky půlek trámů.



Obrázek 8: Zkušební vzorky krychle 150x150x150 mm a válec 300x150 během zkoušky v tlaku, zdroj: vlastní

Pro hodnocení vývoje nárůstu pevnosti v tlaku (graf 3) se také prováděly zkoušky na krychlích 150x150x150 mm po odbednění (72 hodin) (tab. 17), 7 dnech (tab. 18), 14 dnech (tab. 19) a 28 dnech (tab. 20). Z grafu 3 a tabulky 21 lze vidět, že nárůst pevnosti probíhal především v prvních 14 dnech.

Tabulka 17: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 72 hodinách

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	7443	2235	684,4	30,66
2	7476	2251	805,0	36,36
3	7498	2243	772,9	34,60

Bakalářská práce
Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Tabulka 18: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 7 dnech

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	7420	2209	926,3	41,36
2	7508	2223	982,2	43,91
3	7440	2212	888,6	39,70

Tabulka 19: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 14 dnech

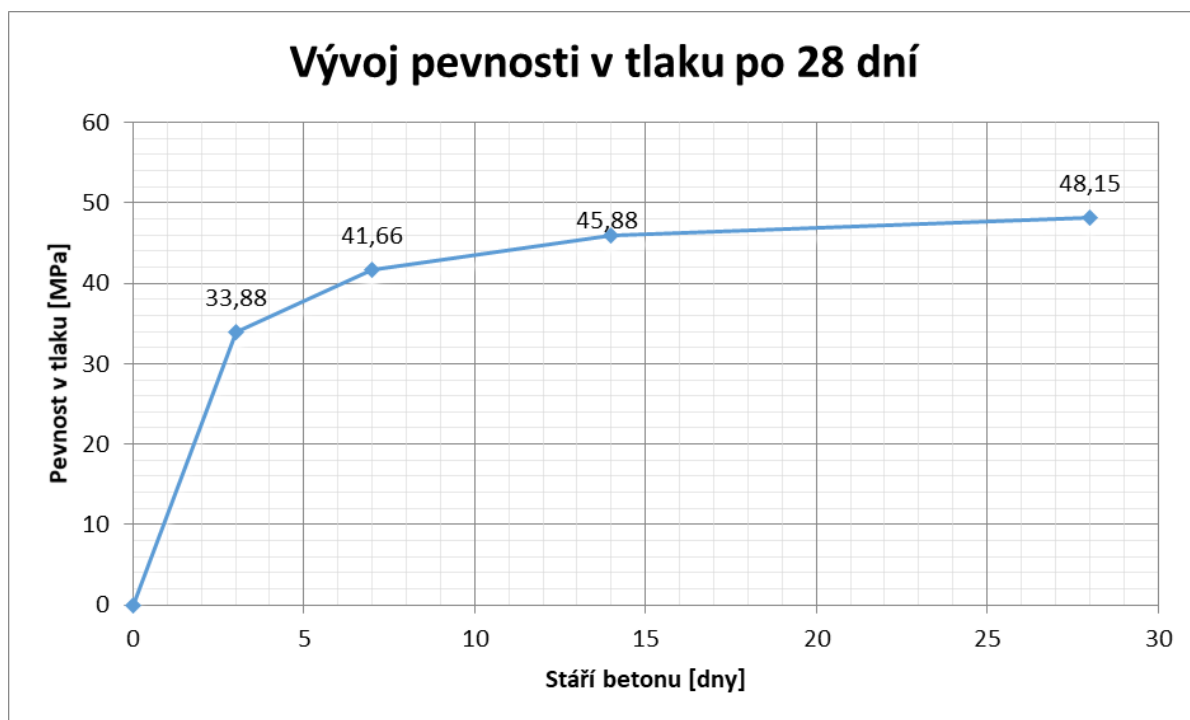
vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	7434	2232	1004,5	45,09
2	7507	2266	1057,8	47,74
3	7541	2229	1014,5	44,79

Tabulka 20: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dnech

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{ck} [MPa]
1	7438	2244	1061,3	47,87
2	7493	2266	1148,4	51,80
3	7405	2274	1021,3	45,97
4	7445	2277	1079,0	48,70
5	7444	2257	1061,6	47,40
6	7467	2255	1055,8	47,14

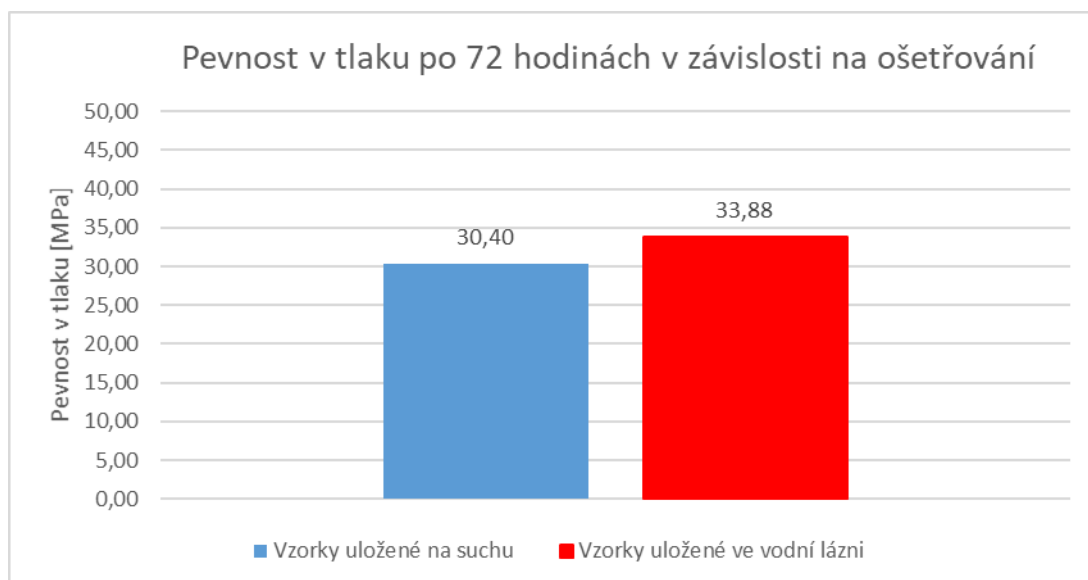
Tabulka 21: Směrodatné odchylky a variační koeficienty vzorků zkoušení pevnosti v tlaku v závislosti na čase

	72 hodin	7 dny	14 dní	28 dní
Průměrná pevnost [MPa]	23,32	41,66	45,88	48,15
Směrodatná odchylka [MPa]	0,83	1,73	1,33	1,83
Variační koeficient [%]	3,54	4,16	2,89	3,79



Graf 3: Vývoj pevnosti v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dní

Doplňkově byla provedena zkouška vzorku s odlišným ošetřováním po 72 hodinách. První 3 vzorky byly pouze odformovány a ponechány vzduchu v prostředí laboratoře, zbylé byly uloženy do vodní lázně. Dle očekávání byla pevnost vzorků před tím uložených ve vodní lázni vyšší než u vzorků uložených na suchu, rozdíl byl však relativně malý (graf 4).



Graf 4: Pevnost v tlaku po 72 hodinách v závislosti na ošetřování

5.3 Stanovení pevnosti v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu po 28 dnech byla zkoušena na variantách:

- Krychle 150x150x150 mm (tab. 22 a 24);
- Krychle 100x100x100 mm (tab. 23 a 24).

Všechny vzorky byly 6 hodin před provedením zkoušky vytaženy z vodní lázně, očištěny od povrchových nečisto a nechaly se po tuto dobu sušit v laboratorním prostředí. Zkouška se prováděla vždy na 6 vzorcích.

Tabulka 22: Pevnost v příčném tahu na krychlích 150x150x150 mm

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	f_{ct} [MPa]
1	7515	2249	113,8	3,24
2	7390	2242	100,2	2,89
3	7513	2228	104,2	2,94
4	7495	2270	102,0	2,94
5	7507	2217	113,5	3,19
6	7580	2261	105,1	2,98

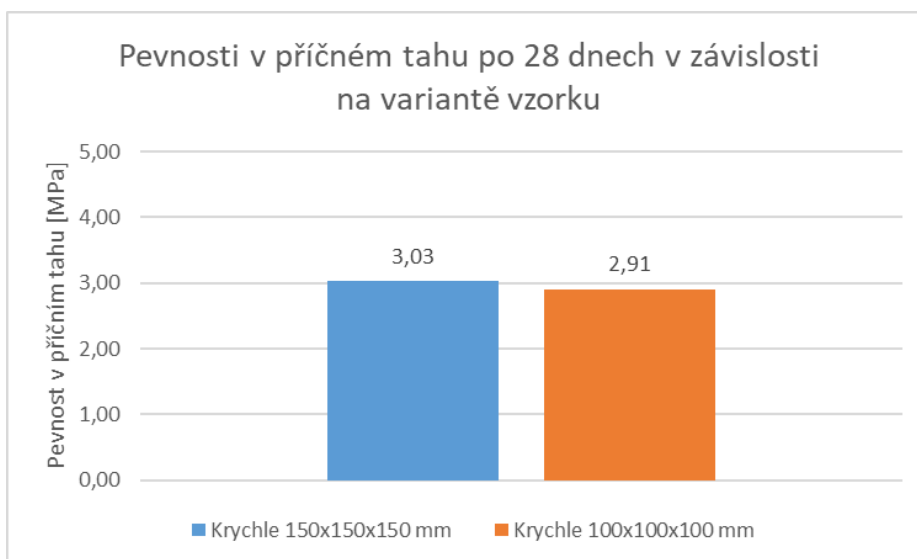
Tabulka 23: Pevnost v příčném tahu na krychlích 100x100x100 mm

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	f_{ct} [MPa]
1	2214	2250	49	3,17
2	2284	2230	43,9	2,72
3	2208	2267	46,7	3,05
4	2259	2243	42,1	2,67
5	2161	2205	40,8	2,66
6	2170	2219	48,5	3,16

Tabulka 24: Směrodatné odchylky a variační koeficienty různých variant vzorků pevností v příčném tahu

	Krychle 150x150x150 mm	Krychle 100x100x100 mm
Průměrná pevnost [Mpa]	3,03	2,91
Směrodatná odchylka [MPa]	0,13	0,23
Variační koeficient [%]	4,45	7,74

Z grafu 5 lze vyčíst, že pevnosti v příčném tahu u krychlí 150x150x150 mm byly vyšší, rozdíl je však téměř nepatrný.



Graf 5: Pevnosti v příčném tahu po 28 dnech v závislosti na variantě vzorku

Současně se zkouškami pevností v tlaku se prováděly i zkoušky v příčném tahu. Pro hodnocení vývoje nárůstu pevnosti v příčném tahu (graf 6) se prováděly zkoušky na krychlích 150x150x150 mm po odbednění (tab. 25), 7 dnech (tab. 26), 14 dnech (tab. 27) a 28 dnech (tab. 28). Z grafu 6 a tabulky 29 lze vidět, že významný nárůst pevnosti také probíhal především v prvních 14 dnech a charakter průběhu je velice podobný nárůstu pevnosti v tlaku.



Obrázek 9: Zkušební krychle 150x150x150 mm během zkoušky v příčném tahu, zdroj vlastní

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Tabulka 25: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 72 hodinách

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	f_{ct} [MPa]
1	7503	2237	77,2	2,19
2	7462	2253	73,2	2,09
3	7514	2234	77,5	2,19

Tabulka 26: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 7 dnech

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	f_{ct} [MPa]
1	7537	2217	86,6	2,43
2	7461	2209	98,1	2,76
3	7507	2238	93,6	2,66

Tabulka 27: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 14 dnech

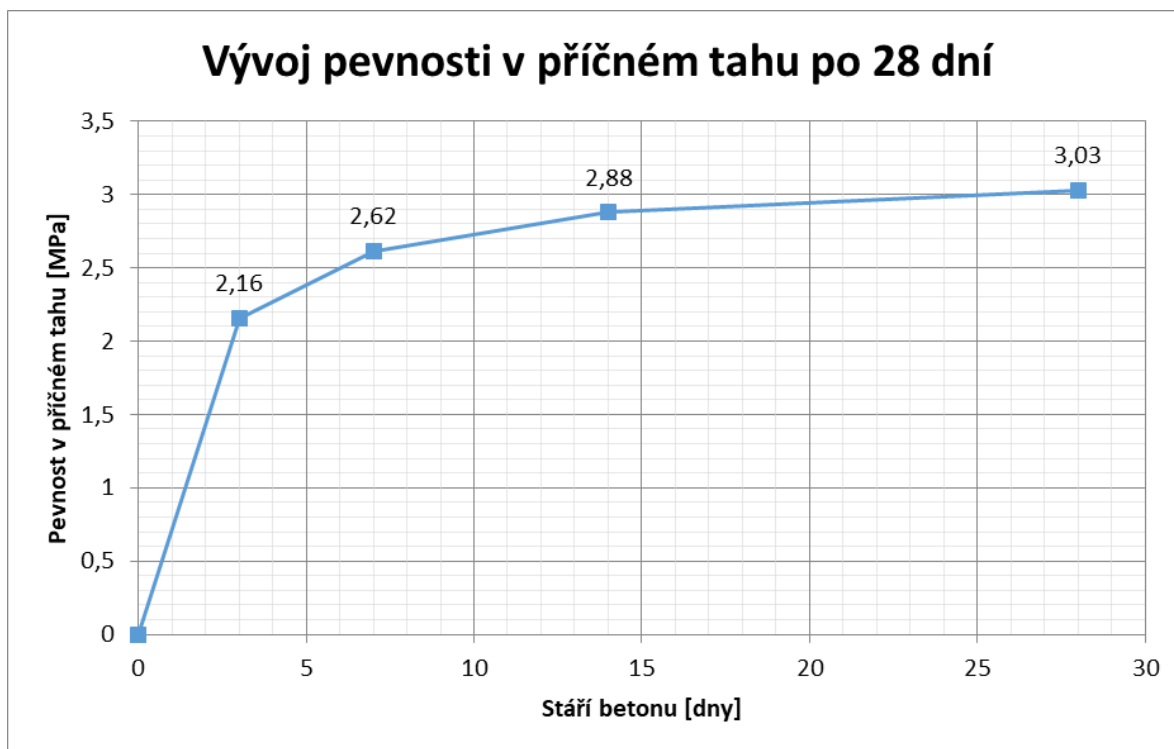
vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	f_{ct} [MPa]
1	7564	2258	85,7	2,43
2	7494	2250	102,3	2,92
3	7537	2257	114,9	3,28

Tabulka 28: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dnech

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	f_{ct} [MPa]
1	7515	2264	113,8	3,24
2	7390	2294	100,2	2,89
3	7513	2243	104,2	2,94
4	7495	2291	102,0	2,94
5	7507	2213	113,5	3,19
6	7580	2248	105,1	2,98

Tabulka 29: Směrodatné odchylky a variační koeficienty vzorků zkoušení pevnosti v příčném tahu v závislosti na čase

	72 hodin	7 dny	14 dní	28 dní
Průměrná pevnost [MPa]	2,16	2,62	2,88	3,03
Směrodatná odchylka [MPa]	0,05	0,14	0,35	0,13
Variační koeficient [%]	2,13	5,34	12,05	4,45



Graf 6: Vývoj pevnosti v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dní

5.4 Doplnková zkouška v tahu ohybem

Zkouška v tahu za ohybu (obrázek 10) se prováděla na zkušebních trámcích 160x40x40 mm. Všechny vzorky byly 6 hodin před provedením zkoušky vytaženy z vodní lázně, očištěny od povrchových nečisto a nechaly se po tuto dobu sušit v laboratorním prostředí. Zkouška se prováděla na 6 vzorcích a její výsledky jsou vidět v tabulce 30 a 31. Vzniklé půlky zkušebních trámců poté byly využity i na zkoušku v tlaku v jedné z předchozích kapitol.

Tabulka 30: Pevnost v tahu za ohybu zkušebních trámců 160x40x40 mm po 28 dnech

vzorek	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	$f_{ct,fl}$ [MPa]
1	572	2210	2,4	8,91
2	579	2216	2,5	9,20
3	571	2232	2,5	9,38
4	566	2189	2,4	8,93
5	573	2227	2,5	9,33
6	573	2208	2,3	8,52

Tabulka 31: Směrodatné odchylky a variační koeficienty vzorků zkoušení pevnosti v tahu za ohybu

Průměrná pevnost [MPa]	9,04
Směrodatná odchylka [MPa]	0,29
Variační koeficient [%]	3,29



Obrázek 10: Zkouška v tlaku za ohybu trámce 160x40x40 mm, zdroj: vlastní

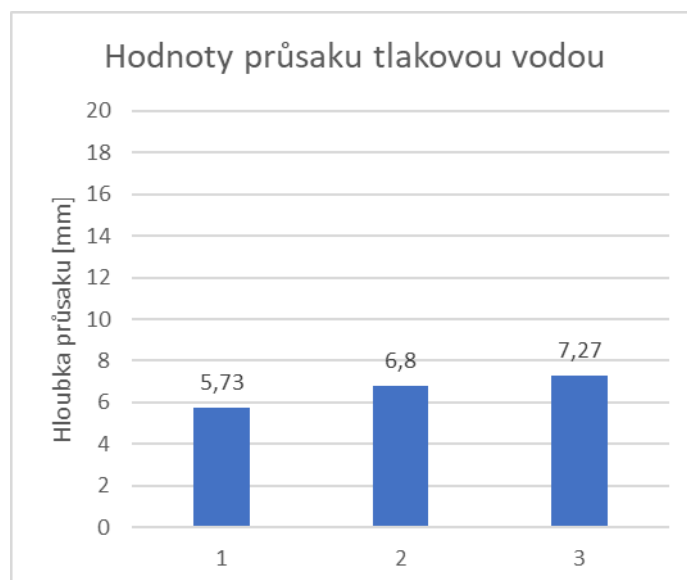
5.5 Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Vzorky se zkoušely na hloubku průsaku tlakovou vodou po 28 dnech. Zkušební vzorky byly upnuty do zkušebního zařízení a na plochu o průměru 75 mm se nechala působit voda pod tlakem 500 ± 50 kPa po dobu 72 hodin. Po 72 hodinách se vzorky povrchově osušili od přebytečné vody a rozlomily v polovině, kolmo na zkoušený povrch, poté byla zaznačená a změřena hloubka maximálního průsaku. Maximální hodnota průsaku byla naměřena 7,27 mm (obrázek 11), zbylé 2 hodnoty činí 6,8 a 5,73 mm. [13]

Jak lze vidět na obrázku 11 a v grafu 7, i maximální průsak je velmi malý. Beton tedy splňuje nejpřísnější kritéria průsaku tlakovou vodou dle vlivu prostředí 20 mm, a je možné jej tím zařadit do kategorie XA3.



Obrázek 11: Maximální hloubka průsaku, zdroj: vlastní



Graf 7: Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou

5.6 Stanovení odolnosti proti chemickým a rozmrazovacím látkám

Vzorky byly testovány na 3 zkušebních krychlicích o délce hrany 150 mm metodou A zkoušení odolnosti betonu proti CHRL. Vzorky byly ponořeny částečně ponořeny do roztoku NaCl a podrobeny celkem 200 cyklům.



Obrázek 12: Odpad vzniklý po 100 odolnosti proti CHRL, zdroj: vlastní

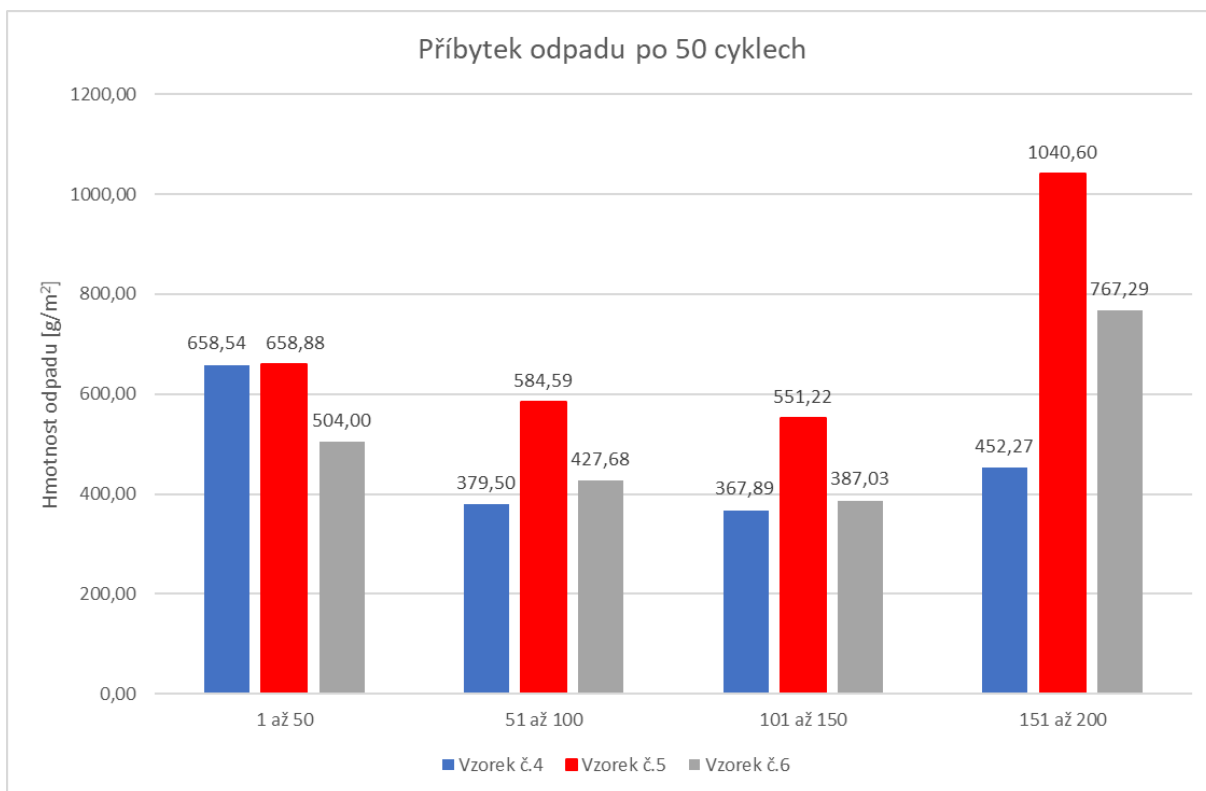
V grafu 8 jsou zaznamenány hodnoty přírůstku odpadu každých 50 cyklů. V tabulce 33 a grafu 9 pak lze vidět souhrné množství odpadu po cyklech. Vzorky byly testovány metodou A, celkové výsledné odpady (obrázek 12) tedy se stanovují po 100 cyklech (hodnoty vyznačeny červeně v tab. 32). [12]

Tabulka 32: Množství odpadu měřených cyklů

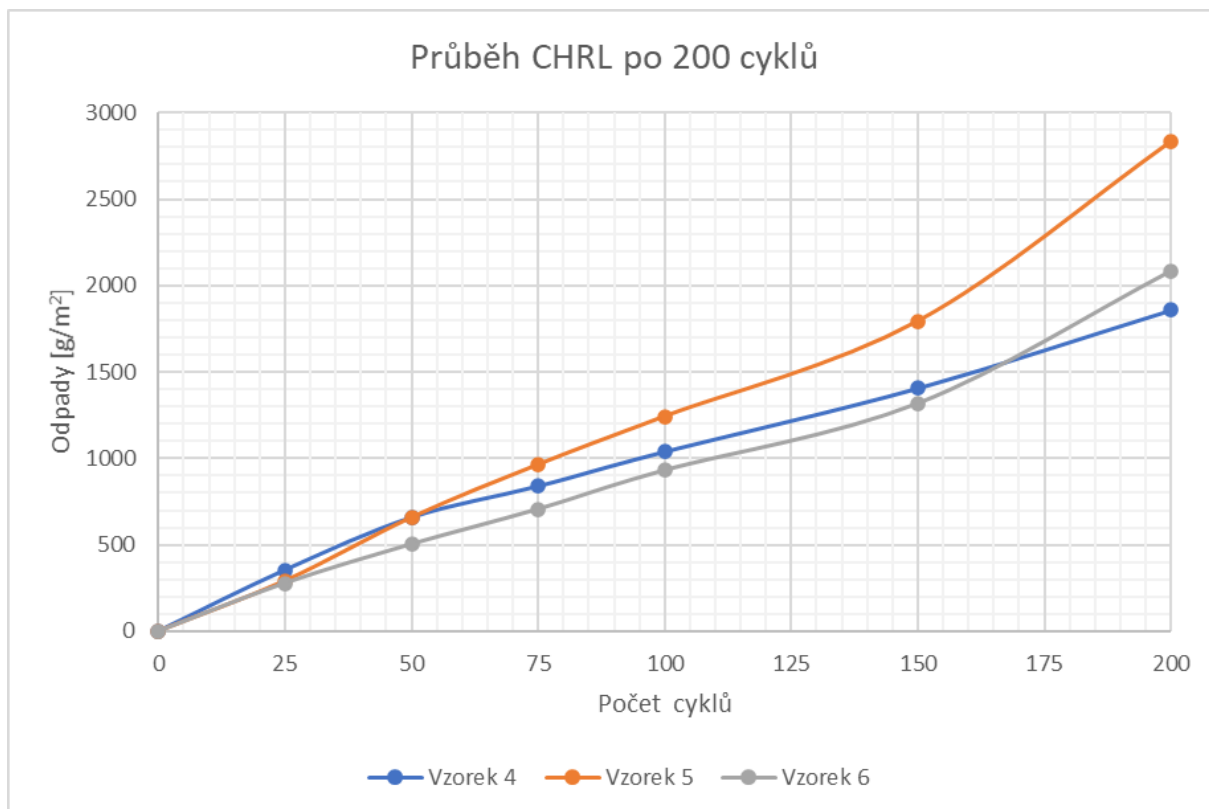
Vzorek	Odpady (g/m ²)					
	1 až 25	1 až 50	1 až 75	1 až 100	1 až 150	1 až 200
4	354,49	658,54	838,91	1038,03	1405,92	1858,19
5	291,40	658,88	964,52	1243,47	1794,69	2835,28
6	278,19	504,00	706,78	931,68	1318,72	2086,01

Tabulka 33: Průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient odpadu po měřených cyklech

Vzorek	Odpady (g/m ²)					
	1 až 25	1 až 50	1 až 75	1 až 100	1 až 150	1 až 200
Průměr	308,03	607,14	836,74	1071,06	1506,44	2259,83
Směrodatná odchylka	33,29	72,93	105,23	129,41	206,91	417,40
Variační koeficient [%]	10,81	12,01	12,58	12,08	13,73	18,47



Graf 8: Příbytek odpadu po 50 cyklech



Graf 9: Průběh CHRL po 200 cyklů

Odolnost vůči stupni vlivu prostředí se stanovuje podle výsledku s nejméně příznivými (nejvyššími) hodnotami. Množství odpadu pro splnění podmínek pro kategorii stupně vlivu prostředí XF3 činí 1250 kg/m^2 po 100 cyklech dle normy ČSN P 73 2404. Pro kategorii XF 3 je nutno splňovat i maximální povolenou hloubku průsaku tlakovou vodou do 35 mm, čeho bylo s maximálním 7,27 mm. Z tabulky 33 je pak patrné, že námi naměřená nejvyšší hodnota činí $1243,47 \text{ g/m}^2$, zkoušený vzorek by tuto kategorii tedy měl těsně splňovat. Je nutno dodat, že zkouška CHRL se velmi odvíjí od pečlivosti příprav (např. zahlazení povrchu). Vzhledem k faktu, že jsem tuto zkoušku prováděl poprvé a jen na 3 vzorcích, změřené hodnoty odpadu můžeme považovat za neprůkazné, a lze předpokládat, že hodnoty odpadu by za profesionálního přístupu byly nižší. [1] [12]

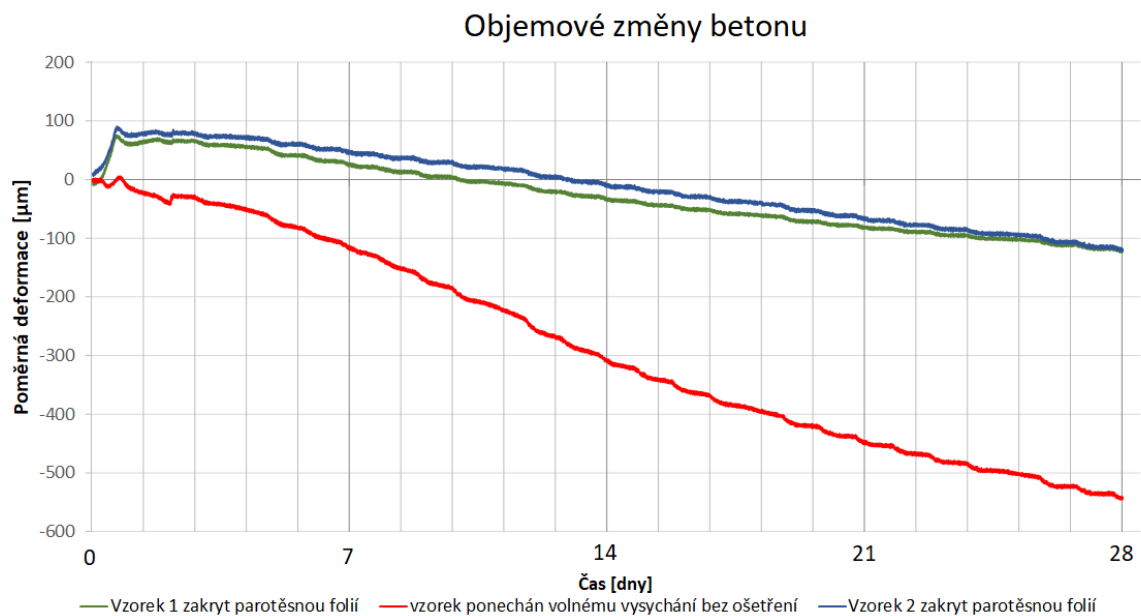
Zkouška nadále pokračovala i po 100 cyklech za účelem sledování změn příbytku odpadu. Dle měření do 150 cyklu se nárůst příbytku odpadu neustále zmenšoval, jak je ale patrné z grafů 8 a 9, přírůstek odpadu se téměř zdvojnásobil v porovnání s předchozími 50 cykly.

5.7 Stanovení objemových změn

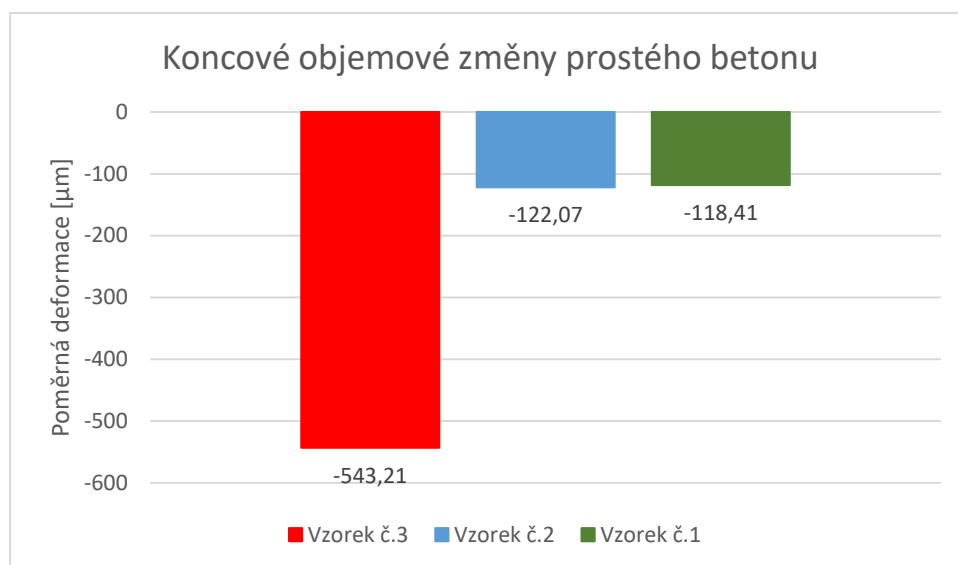
Zkouška sledovala objemové změny celkem tří vzorků, přičemž 2 vzorky byly zakryty po celých 28 dní zraní ochranou fólií a jeden byl ponechán zrán na vzduchu (obrázek 13). Všechny 3 vzorky byly uloženy v měřicích žlabech SCHLEIBINGER GERÄTE o délce 1000 mm a průřezu 100/60 mm. Je nutno dodat, že vzorky pro prostý beton v této práci poslouží i Radoslavu Gandelovi v jeho práci pro porovnání s drátkobetonem.



Obrázek 13: Probíhající zkouška objemových změn, zdroj: vlastní



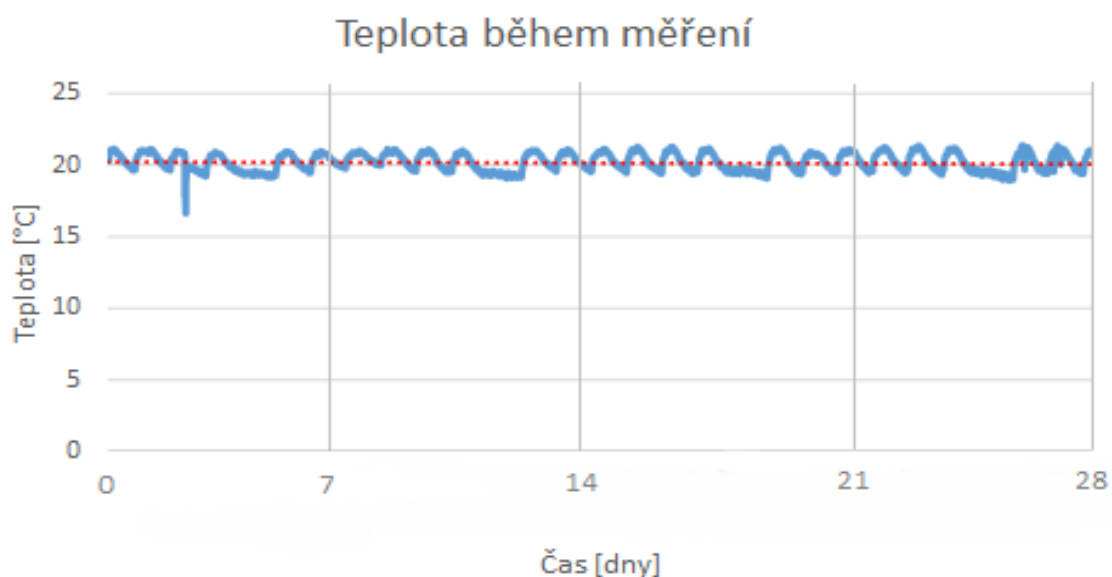
Graf 10: Objemové změny betonu v čase



Graf 11: Koncové objemové změny betonu

V grafu 10 a 11 lze vyčíst, že vzorky zakryté ochrannou fólií během prvního dne zkoušky nabývaly na objemu a až poté jej začali ztrácet, kdežto u nezakrytého vzorku ke smrštění docházelo od počátku a po celou dobu zkoušky i ve větší míře než u vzorků zakrytých. Výsledné objemové změny nezakrytého vzorku jsou pak přibližně 4,5 krát vyšší než u vzorků zakrytých.

Během měření objemových změn docházelo i k monitorování teploty. Jak lze z grafu 12 vidět, teplota v laboratoři se pohybovala mezi 21 až 19 °C během střídání dne a noci. Jedinou výjimkou je bod během třetího dne měření. Místo měření se nalézá vedle vstupu do laboratoře a s frekvencí měření každé 2,5 minuty lze předpokládat, že se jedná o průvan způsoben otevřením dveří.



Graf 12: Teplota během měření

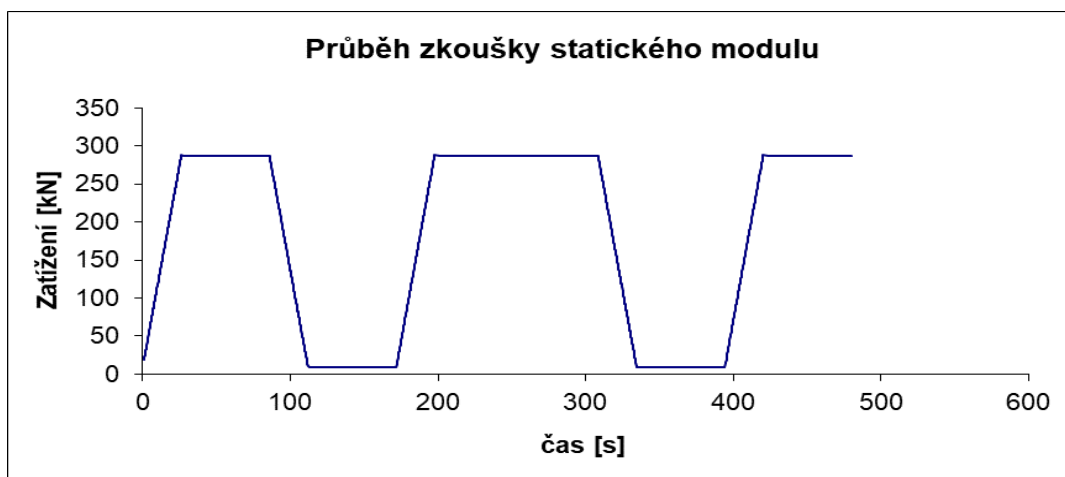
5.8 Statický a dynamický modul pružnosti

5.8.1 Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti (tab. 34) v tlaku (jinak také sečnový modul) byl měřen na 3 válcových vzorcích o rozměrech 300x150 mm. Průběh působeného zatížení a vzniké deformace během zkoušky pro vzorek č.1 je patrný z grafů 13 a 14. Z naměřených hodnot se vypočítal statický modul pružnosti.

Tabulka 34: Výsledné hodnoty zkoušky statického modulu pružnosti

č. vzorku	σ_a [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	$\Delta\epsilon_a$	$\Delta\epsilon_b$	E_c [GPa]
1	16,28	0,5	0,0005067	0	31,1
2			0,00052	2,33333E-05	31,8
3			0,00056	2,66667E-05	29,6
průměr	16,28	0,5	0,0005289	1,66667E-05	30,8



Graf 13: Typický průběh zatížení v závislosti na čase během zkoušky statického modulu pružnosti



Graf 14: Typický průběh deformace v závislosti na čase během zkoušky statického modulu pružnosti

5.8.2 Dynamický modul pružnosti

Pro zkoušku dynamického modulu pružnosti (tab. 35 a 36) byla použita ultrazvuková impulzivní metoda (obr. 14). Měření bylo prováděné na 6 válcích o rozměrech 200x100 mm a 4 válcích o rozměrech 300x150 mm. Poté co byl vzorek zvážen a zjištěny jeho rozměry, bylo provedeno samotné měření, jehož výsledkem byl čas průchodu impulzu UZ záření. Následně byl ze zjištěných hodnoty vypočítán dynamický modul pružnosti stanovený touto metodou.

Tabulka 35: Výsledné hodnoty výpočtu dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzivní metodou

	vzorek	T [μm]	L [mm]	v [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	E_{cu} [GPa]
Válec 200x100 mm	1	43,6	196,6	4,5091743	2271	46,2
	2	43,6	196,1	4,4977064	2284	46,2
	3	44,1	195,8	4,4399093	2280	44,9
	4	43,9	197,6	4,501139	2271	46,0
	5	43,2	197,4	4,5694444	2281	47,6
	6	43,2	196,7	4,5532407	2280	47,3
Válec 300x150 mm	1	67,1	292	4,3517139	2229	42,2
	2	66,2	291	4,3957704	2234	43,2
	3	66,1	292	4,4175492	2262	44,1
	4	66,4	293	4,4126506	2247	43,8
	Průměr:					45,1



Obrázek 14: Měření ultrazvukovou impulzivní metodou, zdroj: vlastní

Tabulka 36: Směrodatná odchylka a variační koeficient dynamického modulu pružnosti

	Válec 200x100 mm	Válec 300x100 mm
Průměrný modul pružnosti [Gpa]	46,4	43,3
Směrodatná odchylka [GPa]	0,88	0,73
Variační koeficient [%]	1,89	1,68

5.8.3 Doplnkové porovnání statického a dynamického modulu pružnosti

Existuje vztah mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, vyjádřený koeficientem zmenšení uvedeným v tabulce 37. Tento koeficient je dle normy ČSN 73 2011 odlišný podle pevnostní třídy betonu a druhu měření, kde k_u je symbolem pro ultrazvukovou metodu a k_r pro metodu rezonanční. [20]

Tabulka 37: Koeficienty zmenšení mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti [20]

Třída betonu	Zmenšovací koeficient k_u	Zmenšovací koeficient k_r
C 8/10	0,62	0,81
C 12/15	0,71	0,86
C 16/20	0,76	0,88
C 25/30	0,81	0,9
C 30/37	0,83	0,91
C 35/45	0,86	0,93
C 40/50	0,88	0,94
C45/55	0,9	0,95

Koeficienty pro typový beton zpracovaný v rámci této práce jsou zvýrazněny červeně. Je nutno dodat, že ačkoliv se jedná o normu z roku 2012, tak tyto hodnoty byly převzány ze staršího vydání normy z osmdesátých let 20. století. Hodnoty jsou tedy přes 30 let stále pro betony vyráběné odlišnými technologiemi než dnes a dnešní hodnoty zmenšovacích součinitelů bývají podstatně nižší. [15] Nižší je i námi vypočtený koeficient zmenšení a to $k_u=0,69$.

Tabulka 38: Vypočtený koeficient zmenšení

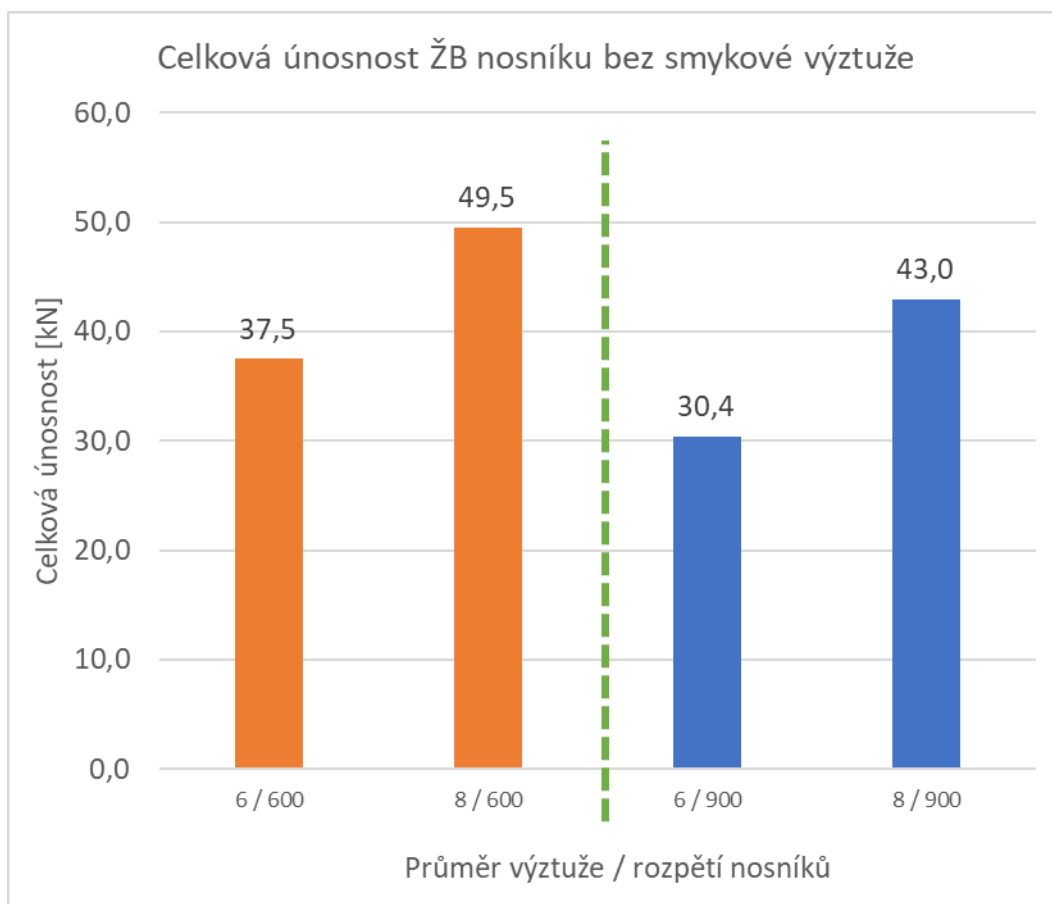
Třída betonu	Vypočtený Zmenšovací koeficient k_u
C 30/37	0,69

5.9 Únosnost železobetonových nosníků v ohybu

Pro konstrukční ověření mechanických vlastností betonu a železobetonového konstrukčního prvku se provedly ohybové zkoušky železobetonového nosníku bez smykové výztuže ve dvou variantách.

První typ zkoušených nosníků byl o rozměrech 700x150x150 mm s rozpětím 600 mm, druhý typ byl o rozměrech 1150x190x150 mm s rozpětím 900 mm. První nosník dané série byl vyztužen u spodního povrchu 2 pruty žebírkové betonářské oceli B500 o průměru 6 mm, druhý nosník v sérii pak obsahoval výztuž o průměru 8 mm. Krytí výztuže ve všech variantách bylo 20 mm.

Souhrnné vyhodnocení lze vidět na grafu 15:



Graf 15: Celková únosnost ŽB nosníků bez smykové výztuže

Z grafu je patrný vliv velikosti vyztužení průřezu, kdy v obou případech byla zaznamenána vyšší únosnost nosníku s výztuží o průměru 8 mm.

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Výsledné únosnosti železobetonových nosníků bez smykové výztuže jsou v dobré shodě s provedeným experimentálním programem. [21]

V případě nosníků s výztuží 6 mm bylo typické, že mechanismus kolapsu byl způsoben vznikem tahové a následně smykové trhliny. Uvedené lze vidět na obrázcích č.15 a 16.



Obrázek 15: Nosník délky 700 mm a průřezu 150x150 mm, výztuž 2x6 mm, rozpětí 600 mm, porušení tahem + smykem, zdroj: vlastní



Obrázek 16: Nosník délky 1150 mm a průřezu 190x100 mm, výztuž 2x6 mm, rozpětí 900 mm, porušení tahem + smykem, zdroj: vlastní

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

V případě nosníků s výztuží 8 mm pak bylo typické, že mechanismus kolapsu byl způsoben vznikem smykové trhliny. Zmíněné smykové trhliny jsou dobře viditelné na obrázcích 17 a 18.



Obrázek 17: Nosník délky 900 mm a průřezu 150x150 mm, výztuž 2x8 mm, rozpětí 600 mm, porušení smykem, zdroj vlastní



Obrázek 18: Nosník délky 1150 mm a průřezu 190x100 mm, výztuž 2x8 mm, rozpětí 900 mm, porušení smykem, zdroj vlastní

U nosníku délky 1150 mm a průměrem výztuže 8 mm (obrázek 18) je pak patrné, že došlo k vytržení části betonového segmentu a došlo tedy k náhlému kolapsu s vytržením výztuže.

6 Závěr

Bakalářská práce se zabývá problematikou mechanických vlastností betonu, který byl následně využit i v rámci experimentálních zkoušek konstrukčních prvků železobetonových nosníků bez smykové výztuže. Zjišťované mechanické vlastnosti byly především pevnost betonu v tlaku, pevnost v příčném tahu a statický modul pružnosti. Experimentální program byl dále doplněn specializovanými zkouškami jako odolnost proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám, hloubka průsaku tlakovou vodou, stanovení objemových nebo dynamický modul pružnosti.

Pevnost v betonu v tlaku byla stanovena na 5 variantách, které se lišily tvarem zkušebního tělesa, přičemž se výsledné pevnosti v závislosti na tvaru lišily až o 15,7 %. Pro typický tvar krychle o délce hrany 150 mm a válce o průměru 150 mm platilo, že pevnost krychlená pevnost nabývala vyšších hodnot. Podrobným statistickým srovnáním pevnosti v tlaku s pevností v příčném tahu, lze konstatovat, že pevnost v příčném tahu vykazovala obvykle větší rozptyl výsledků.

Pevnost betonu v příčném tahu byla stanovena pro 2 rozměry zkušebních krychlí, přičemž výsledné hodnoty byly velice podobné a průměrně se lišili jen o 4 %.

V rámci časového vývoje se následně provedly i zkoušky nárustu pevností v tlaku a příčném tahu během 28 dní. Nejvýraznější nárůst pevnosti byl v prvních 7 dnech, po 14 dni od betonáže pevnosti rostly již ztelně pomaleji. Uvedené platí pro pevnost v tlaku i příčném tahu. Průběh u obou zkoušek byl také velice podobný.

Zjištěný statický modul pružnosti 30,8 GPa byl stanoven menší, než předpokládá norma ČSN EN 1992-2, která uvádí výsledný modul pružnosti 32 GPa. Změřený dynamický modul pružnosti vyšel také menší, než se očekávalo. Měření dynamického modulu pružnosti proběhlo na dvou velikostních variantách válců, přičemž výsledné hodnoty byly také velmi podobné a lišili se průměrně o 6 %.

Fakt, že byla testována jemnozrnná betonová směs, bylo možno využít pro výrobu malých betonových trámčů 160x40x40 mm, zkoušených na pevnost v tahu ohybem. Pevnost v tahu ohybem se však výrazně liší od pevnosti v příčném tahu.

Specializované zkoušky ověřili velmi dobré vlastnosti ve vodotěsnosti, které splňovali nejpřísnější kritéria. Dobrou odolnost betonu prokázal také při zkoušce odolnosti proti mrazu a

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků chemickým rozmrazovacím látkám. Obě zkoušky však vyžadují velmi pečlivou výrobu, přípravu vzorků a měření, které jsme s našimi malými zkušenostmi nebyli schopni dosáhnout.

K dalším specializovaným zkouškám patřilo také srovnávací měření objemových změn ve žlabech, které prokázalo významný vliv způsobu ošetřování betonu. Rozdíl v rámci měření po 28 dnech prokázal, že smrštění mezi zakrytým a nezakrytým vzorkem byl několika násobně menší ve prospěch zakrytých vzorků.

Na laboratorní zkoušky navázaly experimenty konstrukčních prvků, při kterých bylo zjištěno, že celková únosnost železobetonových nosníků bez smykové výztuže je také výrazně ovlivněna stupněm vyztužení. U provedených experimentů došlo v případě nižšího stupně vyztužení k mechanismu porušení v tahu a smyku, v druhé variantě došlo k porušení nosníku pouze smykem. Zkoušky konstrukčních prvků jsou provedeny v dobré shodě s již provedenými experimentálními programy.

Mezi možnostmi, jak zvýšit užité mechanické vlastnosti betonu, zejména pak v tahu je možné využitím drátků, které mohou výrazně ovlivnit pevnost betonu v tahu a tím následně i únosnost celého nosníku.

Pro podrobnější popis betonu je možné využít lomovou mechaniku, která následně umožňuje podrobný popis rozvoje vzniku trhlin a poškození betonu.

Seznam použitých zdrojů a norem

- [1] *Příručka technologa BETON - suroviny, výroba, vlastnosti* [online]. 2013 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>
- [2] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [3] ČSN EN 206+1. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [4] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [5] ČSN EN 197-1. *Cement: Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2nd edition. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [6] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu: Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [7] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [8] JIRÁSEK, Jakub a Martin VARO. *Nerostné suroviny a jejich využití* [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR, 2008 [cit. 2021-4-29]. ISBN ISBN 978-80-248-1378-3. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/index.html>
- [9] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [10] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [11] SUCHARDA, Oldřich, Pavlína MATEČKOVÁ a Libor ŽÍDEK. *Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu u drátkobetonu. Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo, 2018 [cit. 2021-4-29].

Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18133-zkouseni-a-stanoveni-pevnosti-v-tahu-u-dratkobetonu>

[12] ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických látek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1984.

[13] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

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

[15] CIKRLE, Petr a Dalibor KOCÁB. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. *Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo, 2014 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>

[16] ČSN 73 1320. *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1987.

[17] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Tomáš VYMAZAL, Petr DANĚK, Petr MISÁK a Ondřej POSPÍCHAL. *Standartní operační postup smršťování a nabývání betonu* [online]. Brno [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: http://www.szk.fce.vutbr.cz/metodiky/metodika%20smr%C5%A1t%C4%9Bn%C3%AD_01-09_1.pdf. Učební materiál. Fakulta Stavební, Vysoké učení technické v Brně.

[18] Baumit ProofBeton. *Baumit* [online]. Brandýs nad Labem: BAUMIT, spol. s r.o. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://baumit.cz/produkty/betonove-smesi/baumit-proofbeton>

[19] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

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

[21] SUCHARDA, Oldřich. *Identification of fracture mechanic properties of concrete and analysis of shear capacity of reinforced concrete beams without transverse reinforcement*. 2020. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13122788

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma zkoušky pevnosti v prostém tlaku [4]	16
Obrázek 2: Schéma zkoušky pevnosti v příčném tahu [9]	17
Obrázek 3: Schéma tříbodové zkoušky tahu ohybem [10].....	18
Obrázek 4: Schéma čtyřbodové zkoušky tahu ohybem [10].....	20
Obrázek 5: Přístroj na zkoušku průsaku tlakovou vodou, zdroj: vlastní.....	22
Obrázek 6: Přístroj pro měření ultrazvukovou metodou, zdroj: vlastní.....	23
Obrázek 7: Zkušební žlab značky Schleibinger v místě připojení sondy, zdroj: vlastní	25
Obrázek 8: Zkušební vzorky krychle 150x150x150 mm a válec 300x150 během zkoušky v tlaku, zdroj: vlastní.....	31
Obrázek 9: Zkušební krychle 150x150x150 mm během zkoušky v příčném tahu, zdroj vlastní	35
Obrázek 10: Zkouška v tlaku za ohybu trámce 160x40x40 mm, zdroj: vlastní.....	38
Obrázek 11: Maximální hloubka průsaku, zdroj: vlastní	39
Obrázek 12: Odpad vzniklý po 100 odolnosti proti CHRL, zdroj: vlastní.....	40
Obrázek 13: Probíhající zkouška objemových změn, zdroj: vlastní	43
Obrázek 14: Měření ultrazvukovou impulzivní metodou, zdroj: vlastní	46
Obrázek 15: Nosník délky 700 mm a průřezu 150x150 mm, výztuž 2x6 mm, rozpětí 600 mm, porušení tahem + smykem, zdroj: vlastní.....	49
Obrázek 16: Nosník délky 1150 mm a průřezu 190x100 mm, výztuž 2x6 mm, rozpětí 900 mm, porušení tahem + smykem, zdroj: vlastní	49
Obrázek 17: Nosník délky 900 mm a průřezu 150x150 mm, výztuž 2x8 mm, rozpětí 600 mm, porušení smykem, zdroj vlastní.....	50
Obrázek 18: Nosník délky 1150 mm a průřezu 190x100 mm, výztuž 2x8 mm, rozpětí 900 mm, porušení smykem, zdroj vlastní	50

Seznam grafů

Graf 1: Stanovení objemové hmotnosti.....	28
Graf 2: Pevnosti v tlaku po 28 dnech v závislosti na variantě vzorku	30
Graf 3: Vývoj pevnosti v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dní	33
Graf 4: Pevnost v tlaku po 72 hodinách v závislosti na ošetřování.....	33
Graf 5: Pevnosti v příčném tahu po 28 dnech v závislosti na variantě vzorku	35
Graf 6: Vývoj pevnosti v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dní	37
Graf 7: Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou.....	39
Graf 8: Příbytek odpadu po 50 cyklech.....	41
Graf 9: Průběh CHRL po 200 cyklů.....	41
Graf 10: Objemové změny betonu v čase	43
Graf 11: Koncové objemové změny betonu.....	44
Graf 12: Teplota během měření	44
Graf 13: Typický průběh zatížení v závislosti na čase během zkoušky statického modulu pružnosti	45
Graf 14: Typický průběh deformace v závislosti na čase během zkoušky statického modulu pružnosti	45
Graf 15: Celková únosnost ŽB nosníků bez smykové výztuže.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: Pevnostní třídy obyčejných betonů [3]	5
Tabulka 2: Pevnostní třídy lehkých betonů [3]	5
Tabulka 3: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky sednutím kužele [3].....	6
Tabulka 4: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky rozlitím [3]..	6
Tabulka 5: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě Vebe [3]	6
Tabulka 6: Klasifikace čerstvého betonu podle konzistence na základě zhutnitelnosti [3]	6
Tabulka 7: Klasifikace betonu podle stupně vlivu prostředí [3]	7
Tabulka 8: Příklady nejznámějších hornin pro hutná kameniva do betonu [1]	14
Tabulka 9: Rozdělení kameniva podle velikost zrna [8].....	15
Tabulka 10: Stanovení objemové hmotnosti	27
Tabulka 11: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm	29
Tabulka 12: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 100x100x100 mm	29
Tabulka 13: Pevnost v tlaku na zkušebních válcích 200x100 mm	29
Tabulka 14: Pevnost v tlaku na zkušebních válcích 300x150 mm	29
Tabulka 15: Pevnost v tlaku na zkušebních krychlích 40x40 mm.....	30
Tabulka 16: Směrodatné odchylky a variační koeficienty různých variant vzorků pevností v tlaku.....	30
Tabulka 17: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 72 hodinách.....	31
Tabulka 18: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 7 dnech.....	32
Tabulka 19: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 14 dnech.....	32
Tabulka 20: Pevnost v tlaku zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dnech.....	32
Tabulka 21: Směrodatné odchylky a variační koeficienty vzorků zkoušení pevnosti v tlaku v závislosti na čase	32
Tabulka 22: Pevnost v příčném tahu na krychlích 150x150x150 mm.....	34
Tabulka 23: Pevnost v příčném tahu na krychlích 100x100x100 mm.....	34
Tabulka 24: Směrodatné odchylky a variační koeficienty různých variant vzorků pevností v příčném tahu	34
Tabulka 25: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 72 hodinách.	36
Tabulka 26: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 7 dnech	36
Tabulka 27: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 14 dnech	36
Tabulka 28: Pevnost v příčném tahu zkušebních krychlí 150x150x150 mm po 28 dnech	36

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti betonu a experimentální zkoušky železobetonových nosníků

Tabulka 29: Směrodatné odchytky a variační koeficienty vzorků zkoušení pevnosti v příčném tahu v závislosti na čase	36
Tabulka 30: Pevnost v tahu za ohybu zkušebních trámců 160x40x40 mm po 28 dnech.....	37
Tabulka 31: Směrodatné odchytky a variační koeficienty vzorků zkoušení pevnosti v tahu za ohybu.....	37
Tabulka 32: Množství odpadu měřených cyklů	40
Tabulka 33: Průměr, směrodatná odchytky a variační koeficient odpadu po měřených cyklech	40
Tabulka 34: Výsledné hodnoty zkoušky statického modulu pružnosti.....	45
Tabulka 35: Výsledné hodnoty výpočtu dynamického modulu pružnost ultrazvukovou impulzivní metodou.....	46
Tabulka 36: Směrodatná odchytky a variační koeficient dynamického modulu pružnosti.....	47
Tabulka 37: Koeficienty zmenšení mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti [20].	47
Tabulka 38: Vypočtený koeficient zmenšení	47