

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA TECHNOLOGIE STAVEB**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nedestruktivní metody zkoušení betonu v konstrukcích

Jakub Kortus

2020

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne:

.....

Jakub Kortus

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za pedagogickou a odbornou pomoc a jeho cenné rady při zpracování mé bakalářské práce a při provádění zkoušek. Neméně děkuji i své rodině a přátelům za podporu při zpracování této práce.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kortus	Jméno: Jakub	Osobní číslo: 468243
Zadávací katedra: Katedra technologie staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Nedestruktivní metody zkoušení betonu v konstrukcích	
Název bakalářské práce anglicky: Non-destructive methods of concrete testing in structures	
Pokyny pro vypracování: 1) Rešerše metod k nedestruktivnímu zkoušení betonu v konstrukcích: popis, jejich princip, měření a vyhodnocení. 2) Vztah mezi výsledky nedestruktivních metod (nepřímé metody) a pevností betonu v tlaku, stanovené pomocí destruktivních metod (přímé metody). 3) Návrh experimentu zkušebního postupu pro určení korelačních vztahů mezi nedestruktivními a destruktivními zkouškami pevnosti betonu. 4) Provedení tvrdoměrných zkoušek a stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu na betonovém prefabrikátu. 5) Určení pevnosti betonu v tlaku na kontrolních zkušebních tělesech. 6) Vyhodnocení a zpracování výsledků zkoušek. Vytvoření korelačního vztahu mezi nedestruktivními metodami a pevností betonu v tlaku. Seznam doporučené literatury: 1) ČSN EN 12390-3, 2) ČSN EN 13791, 3) ČSN EN 12504-2, 4) ČSN EN 12504-4, 5) ČSN EN 12390-3, 6) ČSN EN 13369	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 19.2.2020	Termín odevzdání bakalářské práce: 17. 5. 2020 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Anotace

V této bakalářské práci se autor zaměřil na nedestruktivní zkoušky betonu v konstrukcích, především na zkoušky tvrdoměrem a rychlost šíření ultrazvukového impulsu v betonu různého stáří a jejich využití při stanovení pevnosti betonu v tlaku. V teoretické části jsou popsány vlastnosti betonu, zvláště pevnost v tlaku. Dále jsou zde specifikovány principy nedestruktivních zkoušek, jejich měření a vyhodnocení, typy přístrojů používaných při těchto zkouškách a kalibrační vztahy mezi nedestruktivními metodami a pevností v tlaku. Praktická část se zabývá měřením zkušebních těles nedestruktivními metodami, zjištěním pevnosti betonu v tlaku, porovnáním s kalibračními vztahy, které jsou součástí přístrojů či norem, vytvoření kalibračních vztahů pro různé betony daného stáří a využití těchto metod pro odbedňování betonu.

Klíčová slova

Nedestruktivní zkoušky betonu, pevnost betonu v tlaku, tvrdoměrné zkoušky, odrazový tvrdoměr, Schmidtovo kladívko, ultrazvuk, rychlost šíření ultrazvukového impulsu

Annotation

In this bachelor's thesis, the author focuses on non-destructive tests of concrete in structures, especially on hardness tests and the velocity of ultrasonic impulses in the concrete of various ages and their use in determining the compressive strength of concrete. The theoretical part describes the properties of concrete, mainly compressive strength. Furthermore, the principles of non-destructive tests, their measurement, and evaluation, the types of instruments used in these tests, and the calibration curves between non-destructive methods and compressive strength are specified. The practical part deals with the measurement of test specimens by non-destructive methods, determining the compressive strength of concrete, compared with calibration curves that are part of instruments or standards, the creation of calibration relationships for various concretes of a given age and the use of these methods for concrete stripping.

Keywords

Non-destructive concrete tests, stress strength of concrete, hardness testing, rebound test hammer, Schmidt rebound hammer, ultrasound, ultrasonic pulse velocity

Obsah

ÚVOD.....	10
Cíle.....	11
1. BETON.....	12
1.1. Složky a vlastnosti.....	12
1.2. Pevnost v tlaku.....	12
1.3. Zkouška pevnosti.....	13
1.4. Modul pružnosti betonu.....	14
1.4.1. Statický modul pružnosti.....	14
1.4.2. Dynamický modul pružnosti.....	14
2. ZKOUŠKY BETONU V KONSTRUKCI.....	15
2.1. Nedestruktivní zkoušení betonu v konstrukci.....	15
2.1.1. Tvrdoměrné metody.....	16
2.1.2. Elektrodynamické metody.....	19
2.1.3. Normalizované metody na pevnost betonu v tlaku.....	20
2.2. Destruktivní zkoušení betonu v konstrukci.....	20
2.2.1. Jádrové vývrty.....	20
2.2.2. Odtrhové zkoušky.....	21
3. STANOVENÍ TVRDOSTI ODRAZOVÝM TVRDOMĚREM.....	23
3.1. Historie tvrdoměrného testování.....	23
3.2. Zkušební zařízení.....	23
3.2.1. Schmidtův odrazový tvrdoměr.....	23
3.2.2. Kalibrační kovadlina.....	26
3.2.3. Brusný kámen.....	26
3.3. Princip zkoušky dle ČSN EN 12504-2.....	27
3.3.1. Zkušební místo.....	27
3.3.2. Postup zkoušky.....	27
3.3.3. Výsledek zkoušky.....	28
3.4. Princip zkoušky dle ČSN 73 1373.....	28
3.4.1. Zkušební místo.....	28
3.4.2. Zkušební tělesa.....	29
3.4.3. Postup zkoušky.....	29
3.4.4. Výsledek zkoušky.....	29
3.4.5. Způsob stanovení pevnosti betonu v tlaku.....	29
4. ZKOUŠKA MĚŘENÍ RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÉHO IMPULZU.....	31
4.1. Historie ultrazvukového testování.....	31
4.2. Teorie šíření impulzu betonem.....	31
4.3. Zkušební ultrazvukové zařízení.....	32
4.3.1. Stanovení doby průchodu impulzu.....	32

4.3.2.	Metoda impulz-echo.....	34
4.4.	Princip zkoušky dle ČSN EN 12504-4	36
4.4.1.	Faktory ovlivňující zkoušku	36
4.4.2.	Uspořádání sond.....	37
4.4.3.	Osazení sond na beton	37
4.4.4.	Stanovení měřicí základny.....	38
4.4.5.	Nepřímé prozvučení	38
4.4.6.	Výsledek zkoušky.....	38
4.4.7.	Vztah mezi rychlosti šíření impulzu a pevností	39
4.5.	Princip zkoušky dle ČSN 73 1371	39
4.5.1.	Stanovené rychlosti šíření impulzu.....	39
4.5.2.	Uspořádání sond.....	40
4.5.3.	Velikost základny.....	40
4.5.4.	Vliv výztuže	40
4.5.5.	Výsledek zkoušky.....	40
5.	KALIBRAČNÍ VZTAHY	42
5.1.	Kalibrační vztahy dle ČSN EN 13791	42
5.1.1.	Posuzování pevnosti přímými metodami.....	42
5.1.2.	Posuzování pevnosti nepřímými metodami.....	43
5.2.	Kalibrační vztahy dle ČSN 73 1370	46
5.2.1.	Obecné informace	46
5.2.2.	Obecný kalibrační vztah	47
5.2.3.	Směrný kalibrační vztah	47
5.2.4.	Úzký určující kalibrační vztah	47
5.2.5.	Široký určující kalibrační vztah.....	48
5.3.	Ukázka kalibračních vztahů pro odrazový tvrdoměr	48
6.	PRAKTICKÉ PŘÍKLADY VYUŽITÍ METOD	49
6.1.	Využití odrazového tvrdoměru v praxi.....	49
6.2.	Využití Ultrazvukové metody v praxi.....	49
	HYPOTÉZA	50
7.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	51
7.1.	Beton	51
7.1.1.	Složení zkoušeného betonu.....	51
7.1.2.	Počet těles.....	52
7.1.3.	Testování zkušebních těles	52
7.1.4.	Rozměry a pevnosti jednotlivých těles.....	52
7.2.	Zkouška tvrdosti odrazovým tvrdoměrem.....	54
7.2.1.	Postup zkoušení.....	55
7.2.2.	Zpracování naměřených hodnot.....	56
7.2.3.	Kalibrační vztahy.....	57

7.3.	Zkouška měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu	57
7.3.1.	Postup zkoušení	57
7.3.2.	Zpracování naměřených hodnot.....	59
7.3.3.	Kalibrační vztahy.....	60
8.	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	61
8.1.	Výsledky zkoušek	61
8.1.1.	Odrazový tvrdoměr	61
8.1.2.	Ultrazvuk.....	64
8.2.	1. den stáří betonu	66
8.2.1.	Odrazový tvrdoměr	66
8.2.2.	Ultrazvuk.....	68
8.3.	2. den stáří betonu	70
8.3.1.	Odrazový tvrdoměr	70
8.3.2.	Ultrazvuk.....	73
8.4.	4. den stáří betonu	75
8.4.1.	Odrazový tvrdoměr	75
8.4.2.	Ultrazvuk.....	76
8.5.	7. den stáří betonu	77
8.5.1.	Odrazový tvrdoměr	77
8.5.2.	Ultrazvuk.....	78
8.6.	28. den stáří betonu	79
8.6.1.	Odrazový tvrdoměr	79
8.6.2.	Ultrazvuk.....	81
8.7.	60. den stáří betonu	83
8.7.1.	Odrazový tvrdoměr	83
8.7.2.	Ultrazvuk.....	86
8.8.	Nárůst hodnot posunu základní křivky Δf.....	88
8.8.1.	Odrazový tvrdoměr	88
8.8.2.	Ultrazvuk.....	89
8.9.	Nárůst hodnot nedestruktivních metod	90
8.9.1.	Odrazový tvrdoměr	90
8.9.2.	Ultrazvuk.....	91
ZÁVĚR.....		92
ZDROJE		94
SEZNAM OBRÁZKŮ		97
SEZNAM TABULEK.....		101

Úvod

V současné době je beton nejpoužívanější stavební materiál na světě, lze ho nalézt téměř v každé stavbě.

V minulosti se využíval méně pevný beton. Beton měl horší složení, obsahoval více nehomogenit, dále nebyly technologické postupy na zdokonalení tohoto stavebního materiálu. Vyráběl se z nekvalitního cementu, což vedlo k menší pevnosti v tlaku a celkovému zhoršení vlastností.

Koncem devatenáctého století rostla snaha o zdokonalení betonu. Důvodem ke zdokonalování byl především zvýšený tlak na zvětšování staveb a zeštíhlení konstrukcí. To vedlo ke zvyšování pevnosti v tlaku, ale i v tahu pomocí železobetonu a tím i celkovému zkvalitnění materiálu.

Současný beton je převážně homogenní a existují technologické postupy, jak omezit vnitřní vady. K jeho výrobě se používá výhradně portlandský cement, na rozdíl od dob minulých, kdy se na kvalitu cementu příliš nehledělo.

Postupné zvyšování kvality betonu vede k vyšší pevnosti (nejvyšší pevnost deklarovaná současnou normou je C100/115, nenormové betony běžně i vyšší) a zvyšování pevnosti vyžaduje metody na její hodnocení. V důsledku toho jsou normou stanoveny čtyři zkoušky betonu v konstrukci, a to jádrové vývrty, odtrhové zkoušky, tvrdoměrné zkoušky odrazovým tvrdoměrem a rychlost šíření ultrazvukového impulsu.

V dnešní době se na zkoušení pevnosti dle normy mohou používat jen jádrové vývrty a ostatní zkoušky se dají použít jen v kalibračním vztahu. Velkou výhodou jádrových vývrtů je jejich přesnost. U zkoušek nedestruktivních se stanovená přesnost může lišit až o dvacet procent od pevnosti skutečné. I přesto mají nedestruktivní zkoušky mnoho výhod. Patří mezi ně například jejich jednoduchost, rychlost provedení a použitelnost na mnoha místech.

Je důležité, aby hodnoty získané měřeními nebyly posuzovány bezmyšlenkovitě na základě kalibračních vztahů dodaných výrobcem, neboť tyto vztahy udávají pouze orientační hodnotu pevnosti pro široké spektrum tříd betonů.

Můj záměr je touto prací ukázat postupný nárůst naměřených nedestruktivních hodnot v průběhu stáří betonu a tím ukázat potenciál využití

nedestruktivních metod např. zjištění doby odbednění a dále poukázat na odchylky naměřených hodnot v porovnání s kalibračními křivkami.

Cíle

- Popis a testování nejvýznamnějších nedestruktivních metod zkoušení betonu v konstrukcích
- Popis destruktivních metod zkoušení betonu v konstrukcích
- Experimentální zkoušení nedestruktivního měření v průběhu stárnutí betonu a vytvoření kalibračních křivek závislosti nedestruktivních metod na pevnosti pro jednotlivé betony i jednotlivé stáří betonu
- Posouzení postupného narůstání hodnot pevností v tlaku a nedestruktivního zkoušení v průběhu stáří betonu
- Využití metod z hlediska odbedňování betonu

1. Beton

1.1. Složky a vlastnosti

Beton je tvořen z pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí. Nejčastější pojivo je cement, nejpoužívanějším plnivem je směs hrubého a drobného kameniva v určitém poměru. Voda reaguje s pojivem (cementem), způsobuje hydrataci a tím i tuhnutí a tvrdnutí. Množství je stanoveno vodním součinitelem w , který vyjadřuje hmotnost vody v poměru k hmotnosti cementu.

Mezi jeho základní vlastnosti patří pevnost v tlaku, pevnost v tahu, objemová hmotnost, pružnost a objemová stálost.

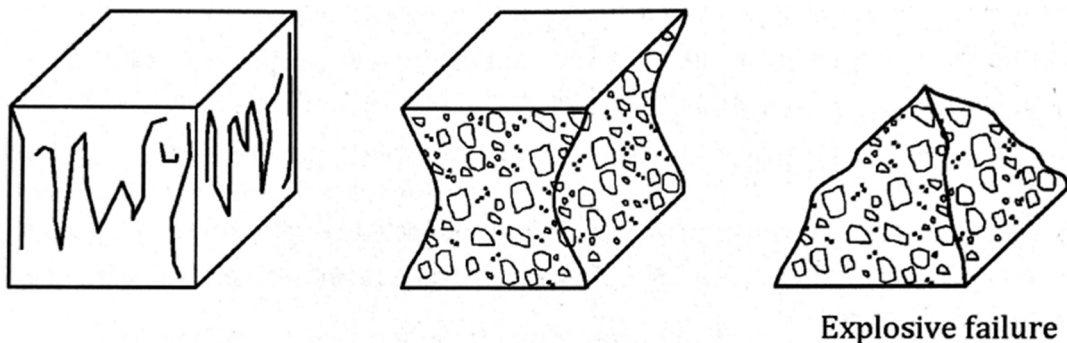
1.2. Pevnost v tlaku

Jde o nejdůležitější vlastnost betonu. Vyjadřuje maximální dosažené napětí v tlaku při porušení. Je ovlivňována celou řadou faktorů, např. vodním součinitelem, velikostí a tvarem tělesa, cementem, provzdušněním (zhutněním) a stářím. Určuje se pomocí destruktivní zkoušky na normovaných zkušebních tělesech.

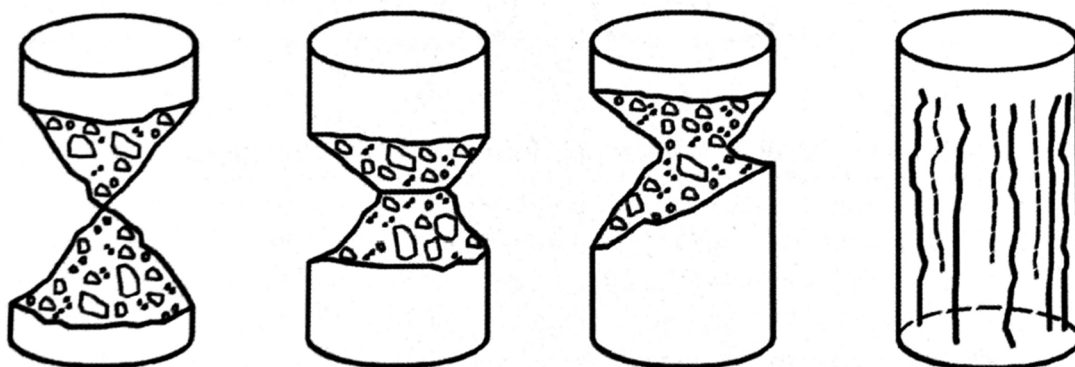
Pro klasifikaci pevnostní třídy betonu v tlaku (viz tabulka 1 z ČSN EN 206+A1) se použije charakteristická pevnost betonu v tlaku ($f_{ck,cyl}$) zjištěná na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm ve stáří 28 dnů nebo charakteristická pevnost v tlaku ($f_{ck,cube}$) zjištěná na krychlích o hraně 150 mm ve stáří 28 dnů; uvedené rozměry válce a krychle jsou základní rozměry zkušebního tělesa.

Pokud se pevnost betonu v tlaku zjišťuje na tělese jiného než základního rozměru/tvaru, je vhodné zjištěnou pevnost převést na pevnost betonu základního tělesa násobením převodními součiniteli pro rozměr/tvar k . [2]

Obrázek 1 a obrázek 2 Zobrazují vyhovující způsoby porušení.



Obrázek 1: Vyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí [2]



Obrázek 2: Vyhovující způsoby porušení zkušebních válců [2]

1.3. Zkouška pevnosti

Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu, který vyhovuje EN 12390-4. Maximální zatížení při rozdrčení tělesa se zaznamenává a vypočítá se pevnost betonu v tlaku. [2]

Před začátkem zkoušky se musí těleso osušit, očistit a změřit, zda vyhovuje daným odchylkám dle normy. Pokud těleso nevyhovuje, vyřadí se, upraví nebo zkouší jiným způsobem. Vyhovující těleso se vloží do lisu, kde se následně zatěžuje až do porušení. Následně se zkontroluje, zda jde o porušení vyhovující či nevyhovující viz obrázek 1 a obrázek 2. O zkoušce se provede zápis do protokolu a vyhodnotí se, do jaké třídy beton spadá nebo zda zadaný beton shoduje s pevnostní třídou podle návrhu. [2]

Tabulka 1: Pevnostní třídy obyčejného a těžkého betonu a minimální charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci [5]

Pevnostní třída betonu podle EN 206-1	Poměr charakteristické pevnosti betonu v konstrukci k charakteristické pevnosti betonu normových těles	Minimální charakteristická pevnost betonu v konstrukci N/mm ²	
		$f_{ck, is, cyl}$	$f_{ck, is, cube}$
C 8/10	0,85	7	9
C 12/15	0,85	10	13
C 16/20	0,85	14	17
C 20/25	0,85	17	21
C 25/30	0,85	21	26
C 30/37	0,85	26	31
C 35/45	0,85	30	38
C 40/50	0,85	34	43
C 45/55	0,85	38	47
C 50/60	0,85	43	51
C 55/67	0,85	47	57
C 60/75	0,85	51	64
C 70/85	0,85	60	72
C 80/95	0,85	68	81
C 90/105	0,85	77	89
C 100/115	0,85	85	98

POZNAMKA 1 Pevnost betonu v tlaku v konstrukci může být menší než je stanovena na zkušebních tělesech odebraných ze stejné záměsi betonu.
 POZNAMKA 2 Poměr 0,85 je část γ_c v EN 1992-1-1:2004.

1.4. Modul pružnosti betonu

Modul pružnosti E vyjadřuje závislost mezi přetvořením ε a namáháním (napětím σ). Na betonu s vyšším modulem pružnosti při stejném zatížení bude menší deformace.

Je základní vlastnost používaná pro výpočet deformací. Úzce souvisí se složením nikoliv s pevností. Mladý beton má nižší modul pružnosti. [21]

1.4.1. Statický modul pružnosti

Stanovení probíhá na zkušebním tělese tvaru válce (\varnothing 150 mm, délka 300 mm) nebo častěji tvaru trámce (100 x 100 x 400 mm). Těleso se podrobí zatěžovací zkoušce v tlaku nebo zatěžovací zkoušce v tahu za ohybu.

1.4.2. Dynamický modul pružnosti

Stanovuje se pomocí ultrazvukové impulzní metody a rezonanční metody. Přepočítává se na statický modul pomocí koeficientu v normě. [22]

2. Zkoušky betonu v konstrukci

Takovéto zkoušky se používají, pokud je nutné zjistit určité vlastnosti, především pevnost již postavené konstrukce. Zjišťuje se, zda beton vyhovuje návrhové pevnosti dle projektové dokumentace či statického výpočtu.

Zkoušky se rozdělují do následujících kategorií:

- Nedestruktivní zkoušení betonu v konstrukci,
- Destruktivní zkoušení betonu v konstrukci

2.1. Nedestruktivní zkoušení betonu v konstrukci

Zkoušení betonu na zkušebních tělesech, dílcích nebo konstrukcích, při kterém se beton vůbec neporuší nebo poruší jen tak málo, že tím statická funkce tělesa, dílce nebo konstrukce není dotčena. [1]

Jsou pouze informativní, nemusí být přijímány jako jednoznačné a průkazné s ohledem na nejistotu vztahu mezi výsledkem testu a pevností. Jejich velkou výhodou je rychlost a možnost záběru velkých konstrukčních celků a zjištění homogenity. [6]

Mezi tyto zkoušky se řadí:

- **Tvrdoměrné metody,**
- **Elektrodynamické metody,**
- Elektromagnetické metody,
- Elektrické metody,
- Radiační metody,
- Tenzometrické metody,
- Trvanlivostní zkoušky. [7]

Těmito zkouškami lze zjistit vlhkost, pevnost, moduly pružnosti, kvalita, vnitřní nehomogenita, rozvoj vnitřních trhlin, profil a hloubka výztuže, objemová hmotnost, změny délek a vlivy okolního prostředí působící na konstrukci. [7]

Nadále se budu zabývat metodami, které mají souvislosti s měřením pevnosti betonu (zvýrazněné tučně).

2.1.1. Tvrdoměrné metody

Tvrdost je určena odporem materiálu proti plastické deformaci. Její hodnota nelze jasně definovat jako fyzikální veličina. Neexistuje vzájemný vztah mezi metodami, pouze přibližné porovnávací vztahy. [8]

Tyto metody jsou založeny na měření tvrdosti povrchu materiálu. U vybraných se stanovuje kalibrační vztah mezi tvrdostí materiálu a jeho pevností. U některých tvrdoměrných metod se zkoušené místo upraví sbroušením, příp. vrypem nebo vtiskem. [7]

Také jsou někdy nazývány metodami mechanickými.

Tvrdost materiálů zjišťujeme metodami:

- vrypovými,
- vtiskovými,
- vnikacími,
- **odrazovými**,
- a dalšími. [8]

2.1.1.1. Vrypové metody

Jsou to porovnávací metody k určování tvrdosti vrypem jednoho materiálu do druhého. Tak vznikla stupnice tvrdosti podle Mohse:

1. mastek, 2. sůl kamenná (sádrovec), 3. vápenec, 4. kazivec, 5. apatit, 6. živec, 7. křemen, 8. topas, 9. korund, 10. diamant. [8]

2.1.1.2. Vtiskové metody

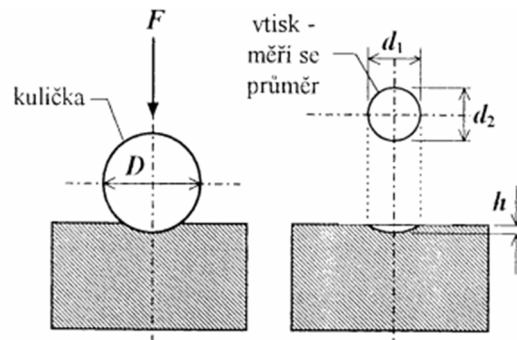
Nejčastěji se jimi určuje velikost vtisku vytvořeného ve zkoušeném materiálu vtlačení předepsaného tělíska určenou silou zkušebního zařízení.

Nejběžnější vtiskové metody:

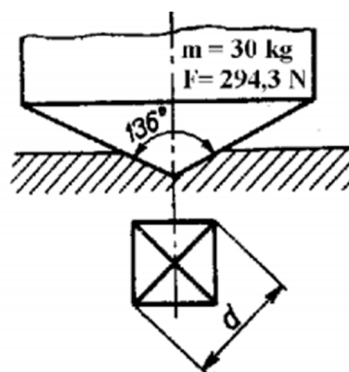
- tvrdost podle Brinella (HB),
 - Používá se k měření tvrdosti kovů. Kulička z kalené oceli či z tvrdokovu o průměru D se zatlačí do zkoušeného materiálu silou F , změří se průměr zanechaného vtisku.
- tvrdost podle Janky (HJ),
 - Používá se k měření tvrdosti dřeva. Ocelová kulička o daném průměru v kovovém válečku se zatlačuje se do zkoušeného

materiálu, dokud váleček nedotkne povrchu. Změří se vyvozená síla F .

- tvrdost podle Vickerse (HV),
 - Používá se k měření tvrdosti kovů. Diamantový čtyřboký jehlan se zatlačuje do materiálu silou F , změří se úhlopříčky a vypočte se jejich průměr.
- tvrdost podle Rockwella (HR),
 - Používá se k měření tvrdosti kovů. Ocelová kulička nebo diamantová kužel se vtlačí do materiálu předepsaným zatížením předběžným F_1 a přídavným F_2 . Tvrdost se objeví na stupnici přístroje.
- tvrdost měřená pružinovým tvrdoměrem dle Baumanna,
 - Používá se k měření tvrdosti betonu a zděných konstrukcí. Vyvolává energii k vytvoření vtisku kuličky pomocí pružiny s definovanou tuhostí.
- tvrdost kladívkem Poldi,
 - Porovnáváme průměr vtisku po úderu kladiva na zkoušeném materiálu a na zkušební tyčce o známé tvrdosti.
- tvrdost dle Waitzmanna. [8, 9]



Obrázek 3: Ukázka zkoušky tvrdosti podle Brinella [8]



Obrázek 4: Ukázka zkoušky tvrdosti podle Vickerse [9]

2.1.1.3. Vnikací metody

Tyto metody jsou založeny na vniknutí tvrdého tělesa do měkkého materiálu, např. betonu, malty, dřeva opakovanými rázy. Měří se buď hloubka vniku špičáku zaraženého předepsaným počtem úderů, nebo naopak počet úderů potřebný na vnik špičáku do předepsané hloubky. [8] Někdy se tyto metody definují jako špičákové metody.

Používané metody:

- špičáková metoda Ing. J. Maška,
- špičáková metoda Prof. Cigánka,
- špičáková metoda Baumannovým kladívkem,
- elektromagnetický špičák. [8]

2.1.1.4. Odrazové metody

Jsou založeny na pružném odrazu standardního tělesa padajícího z určené výšky nebo vrženého jistou energií od povrchu zkoušeného materiálu.

Používané metody:

- měření tvrdosti kovů dle Shora,
- měření tvrdosti betonů, malt a cihel Schmidtovými sklerometry (tvrdoměry). [8]

Odrazová metoda Schmidtovými tvrdoměry bude probrána v 3. kapitole.

2.1.1.5. Tvrdoměrné metody používané ke zkoušení pevnosti betonu v tlaku

Používají se jen takové tvrdoměrné metody, které podávají objektivní informace o pevnosti betonu. Zpravidla jsou to metody, založené na použití těchto přístrojů:

- Schmidtových tvrdoměrů N, L, M, případně přístroje stejného principu jiných výrobců,
- špičákových tvrdoměrů.

Jiné metody lze použít pouze tehdy, pokud byly prověřeny a schváleny odborným ústavem pověřeným prováděním nedestruktivních zkoušek. [10]

2.1.2. Elektrodynamické metody

Jsou založeny na snímání a vyhodnocování účinků mechanického vlnění vyvolaného ve zkoušeném materiálu mechanickým podnětem.

K tomuto typu metod se řadí:

- **Ultrazvuková impulzová metoda** – stanovení kvality betonu a vnitřních nehomogenit,
- rezonanční metoda – stanovení dynamických modulů pružnosti,
- metoda akustické emise – určení rozvoje vnitřních trhlin v materiálu,
- impakt – echo metoda – stanovení vnitřních nehomogenit v materiálu. [7]

2.1.2.1. Ultrazvuková impulzová metoda

Tato metoda bude samostatně a do hloubky probrána v 4. kapitole.

2.1.2.2. Rezonanční metoda

Princip je v rozkmitání prvku pomocí harmonických kmitů. Měněním budící frekvence se zjistí největší amplituda, při které těleso rezonuje. Měří se rezonanční frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání.

Touto metodou se zjišťují dynamické charakteristiky materiálu. Jsou to modul pružnosti v tahu/tlaku, modul pružnosti ve smyku a tím i dynamické hodnoty Poissonova čísla. [8]

2.1.2.3. Metoda akustické emise

Tato metoda je založena na tom, že v prostředí zatěžovaného prvku vznikají mikroporušení, které vyvolávají mechanické impulzy dilatačních vln, které se prostředím šíří jako UZ signály a jsou snímány snímači. Nevýhodou je, že zde vznikají akustické „šumy“, které je nutno vyloučit (odfiltrovat).

Přednosti této zkoušky spočívají v tom, že pomocí ní lze stanovit dosavadní historii zatížení, tedy jde odhadnout rezervu únosnosti prvku před jeho destrukcí z průběhu intenzity rozvoje vnitřních trhlin. [7,8]

2.1.2.4. Impakt – echo metoda

Úder kladívka nebo pád kuličky vyvodí ve zkoušeném materiálu mechanické vlnění, které se snímá snímači a vyhodnocují se z něj dynamické charakteristiky materiálu. [7]

2.1.3. Normalizované metody na pevnost betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku se zkouší:

- tvrdoměrnými metodami podle 2.1.1.5
- ultrazvukovou impulzovou metodou
- kombinace ultrazvukové impulzové metody a Schmidtova tvrdoměru N. [1]

2.2. Destruktivní zkoušení betonu v konstrukci

Někdy se nazývají semidestruktivní zkoušky, protože dojde k částečnému poškození zkoušené konstrukce, například vrtáním, odtrhy apod. Volíme ta kontrolní místa, kde v žádném případě (např. odběrem jádrových vývrtů) nesmíme nepříznivě ovlivnit únosnost nebo stabilitu konstrukce.

Mezi metody patří:

- **jádrové vývrty,**
- odtrhové zkoušky (**stanovení síly na vytržení**),
- brusné nebo vrtné metody stanovení pevnosti betonu,
- vstřelovací metody pro určení pevnosti betonu z hloubky vstřeleného hřebu. [7]

Zkouška na stanovení síly na vytržení je normově popsána v metodách nedestruktivních, ale dle mého uvážení, bych tuto zkoušku zařadil do destruktivních metod, protože poškozuje betonovou konstrukci více než by se dalo očekávat u nedestruktivní zkoušky.

2.2.1. Jádrové vývrty

Vývrty se z konstrukce získávají jádrovým vrtákem. Nejčastěji jde o vrtací korunku s tvrdokovovými či v dnešní době převládajícími diamantovými břity. Průměr může být od 12 mm do 500 mm. Při vrtání jsou korunky většinou chlazeny vodou. [7,13]

2.2.1.1. Odběr vzorků

Místo vývrtu se vybere tak, aby byly vzaty v úvahu všechny konstrukční důsledky vyplývající z odběru vývrtu např. oslabení profilu prvku, či přerušení výztuže. Přednostně vybíráme taková místa, která nejsou v blízkosti spár nebo hran dílce a ta, která jsou málo vyztužená nebo bez výztuže.

Vrtání probíhá kolmo k povrchu konstrukce. Má být vybráno takové místo, kde se vrt nepovede skrz výztuž. Pro pevnost v tlaku se nejčastěji používají průměry 50 až 150 mm. Vývrt se provede podle účelu zkoušky do požadované hloubky a vývrt se vylomí. Ihned po odběru prvku se musí nesmazatelně označit. Při rozhodování o délce se musí vzít v úvahu průměr vývrtu, způsob úpravy konců, zda má být srovnání s krychelnou nebo válcovou pevností. [7,13]

2.2.1.2. Zkoušení vzorků

Před samotným zkoušením pevnosti se vzorek musí vyšetřit a upravit. Vyšetření spočívá ve vizuální kontrole a změření průměru a délky vývrtu, průměru a polohy výztuže.

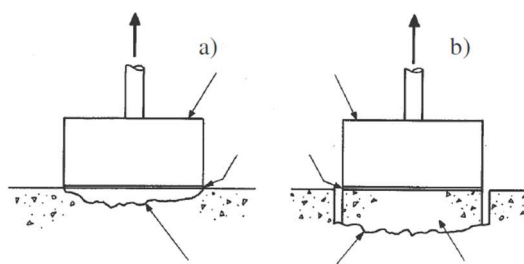
Úprava je založená na zkrácení délky, tak aby byla v poměru k průměru, a ukončení prvku např. zbroušením. Kontroluje se rovnoběžnost tlačných ploch.

Zkouška pevnosti probíhá stejně jako pro zkušební tělesa podle ČSN EN 12390-3 ve zkušebním lisu. Podle zvolené úpravy se zjistí buď krychelná, nebo válcová pevnost v tlaku. Zkoumá se i vhodnost porušení. [7,13]

2.2.2. Odtrhové zkoušky

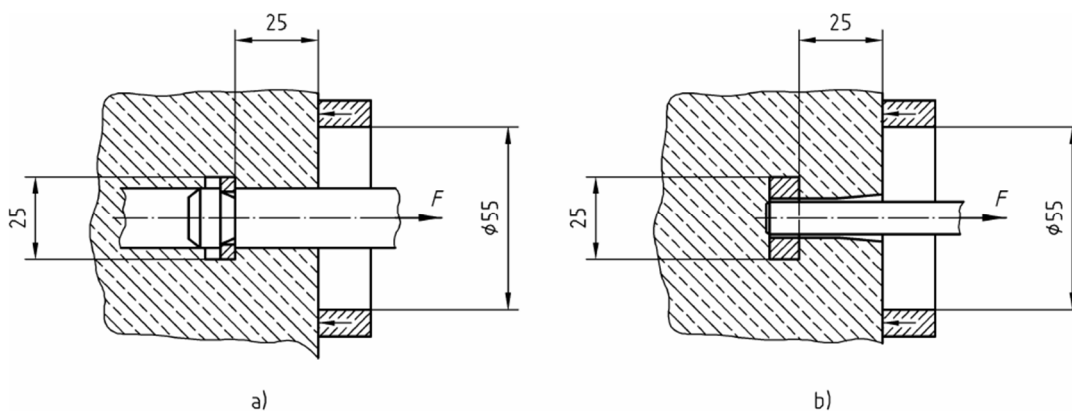
Slouží ke stanovení přídržnosti povrchových vrstev na nosném podkladu např. omítky, nebo pro nás důležitější, zjištění tahové pevnosti povrchových, ale i podpovrchových vrstev či značných hloubek od povrchu betonu. Povrchové vrstvy se rozumí tloušťka cca. 30 – 50 mm.

Na povrch se nalepí terč průměru 50 mm. Výška terče bývá 30 mm. Pokud se jedná o zkoušky podpovrchovou, beton se navrtá jádrovým vrtákem stejného průměru jako terč do určené hloubky. Poté se taktéž nalepí terč. Po zatvrdnutí lepidla se provede odtrhová zkouška v osovém tahu. [7]



Obrázek 5: Ukázka odtrhových zkoušek: a) povrchová, b) podpovrchová [7]

Dále mezi ně řadíme i **zkoušky na stanovení síly na vytržení** neboli **zkoušky vytrhávací**. Při první z nich se vytrhává zabetonovaná kotva předepsaných rozměrů, která je vložena do bednění před betonáží. Druhá pojednává o hmoždince či kotvě, která se vloží již do ztvrdlého betonu, utáhne se a poté vytrhne. Slouží k tomu vytrhávací zařízení, které se osadí na konec kotvy, vyčnívající z betonu. Tahovou silou se plynule vytahuje, až do porušení betonu. Napětí se přenáší do povrchu betonu pomocí opěrné podložky. Tyto zkoušky lze použít pro pevnost betonu. Způsoby a výpočet pevnosti jsou normově popsány v ČSN EN 12504-3. [7,14]



Obrázek 6: Ukázka vytrhávacích kotev: a) dodatečně osazená kotva, b) zabetonovaná kotva [14]

Poslední, kterou můžeme řadit mezi tyto zkoušky, je **vylamovací metoda**. Tkví ve vyvrtání vývrtu průměru 55 mm a do hloubky 70 mm. Vloží se hydraulická baňka, která vyvine sílu k vylomení, jenž se zaznamená a vypočte se pevnost. Vylomený válec se může použít na stanovení pevnosti v tlaku, tím se zjistí kalibrační vztah. [7]

3. Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem

Dnes nejvíce používaná nedestruktivní metoda zkoušení betonu v konstrukci. Jeden z mnoha faktorů spojujícím se s kvalitou betonu je jeho tvrdost. [15] [8]

3.1. Historie tvrdoměrného testování

První testování povrchové tvrdosti betonu bylo zaznamenáno v 30. letech 20. století. Zkoušky byly založeny na nárazu konkrétní hmoty, vystřelené standardním množstvím energie do povrchu betonu. První z těchto metod se věnovaly měření velikosti porušení povrchu pomocí ocelové kuličky zavěšené na kyvadle nebo vymrštěné pružinovým kladivem či vystřelené pistolí. Tyto metody bylo těžké dát do teoretického vztahu s pevností betonu.

Švýcarský inženýr Ernest Schmidt v pozdních 40. letech 20. století vynalezl odrazový tvrdoměr, pojmenován Schmidtovo kladívko. První typ tohoto tvrdoměru uvedla na trh roku 1954 firma Proceq s pojmenováním Original Schmidt, který se vyrábí dodnes. Moderní odrazové tvrdoměry jsou stále založeny na stejném principu. [15, 17]

3.2. Zkušební zařízení

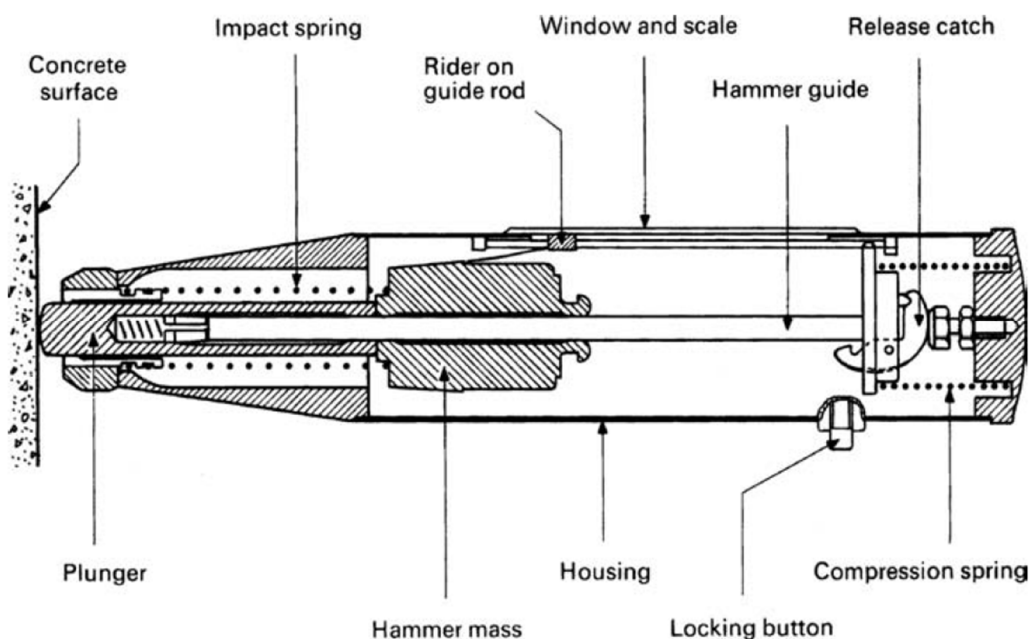
3.2.1. Schmidtův odrazový tvrdoměr

Základní mechanismus přístroje spočívá v beranu, který je ovládán pružinou, dále razníku napojeného na ocelovou tyč, na které je nasunut beran. Ten se natahuje pomocí zasouvání razníku. Jakmile je beran plně natáhnut, je automaticky vymrštěn proti razníku, který je v kontaktu s povrchem betonu. Při odrazu zpět, beran s sebou vezme ukazatel, který zobrazuje hodnotu odrazu na stupnici. Ukazatel lze podržet na místě pomocí zamykacího tlačítka z boku přístroje. Novější typy mohou mít i digitální displej místo stupnice.

Test lze provádět jak v horizontální, tak i ve vertikální poloze buď směrem dolů, nebo nahoru. Velikost odrazu je závislá na tomto faktoru. [3, 8, 10, 15]

Schmidty pružinové tvrdoměry se dělí podle energie vyvinuté při zkušebním rázu:

- Typu N, s energií 2,25 J,
- Typu L, s energií 0,75 J,
- Typu M, s energií 30,0 J (v praxi se již nepoužívá). [10]



Obrázek 7: Základní části odrazového tvrdoměru typu N [15]

První tvrdoměr s mechanickou stupnicí, který je popsán v 3.2.1. se nazývá **Original Schmidt**. Je rozdělen na typy N a L, které se používají pro betony pevnosti od 10 do 70 MPa. Typ L se používá pro křehké objekty a pro konstrukce tenčí než 100 mm. Original Schmidt Typ N a L viz obrázek 8.

Tyto tvrdoměry se dají poříditi i se záznamovým sloupcovým diagramem, který zapisuje hodnoty odrazů na registrační papír. Tvrdoměry jsou označeny písmenem R za svým typem, např. NR, či LR. Mají stejnou energii rázu. [16]



Obrázek 8: Zobrazení odrazového tvrdoměru Original Schmidt při použití [16]

Novější nástupce původního tvrdoměru se nazývá **Digi-Schmidt** označený ND, či LD. Tento tvrdoměr disponuje externím digitálním displejem, úložištěm, korekcí vůči orientaci tvrdoměru, korekcí karbonatace betonu a přednastavenou kalibrační křivkou, ze kterých si může uživatel vybírat. Všechny data a parametry zaznamenávají lze stáhnout do PC. [16]

Jeden z nejnovějších a nejpokročilejších odrazových tvrdoměrů je **SilverSchmidt**. Detekce koeficientu vrácené energie „Q“ na základě měření rychlostí dopadu a odrazu. Koeficient není tolik ovlivněn vnitřním třením a nevyžaduje korekci směru. Je určen pro pevnosti v rozmezí 10 až 100 MPa. S hříbovým nástavcem je pro pevnosti 5 až 30 MPa viz obrázek 11. Všechna data se zaznamenávají a lze je z přístroje stáhnout do PC a zpracovávat ve speciálním programu. Novější typ tohoto zařízení lze propojit s mobilní aplikací, kde je okamžitý náhled právě probíhající či uložené zkoušky a její vyhodnocení. Také se dělí na typ L nebo N. [16, 18]






Obrázek 9: Odrazový tvrdoměr SilverSchmidt s hříbovým nástavcem [16]

Mezi novinky také patří kyvadlový odrazový tvrdoměr nazýván **Schmidt OS-120 PT**. Pracuje na jiném principu než klasický pružinový odrazový tvrdoměr. Má půlkruhovou stupnici a velkou plochu razníku, proto je navržen pro měkké materiály, jako je lehký beton, sádrové desky nebo čerstvý beton. Někdy je používán pro odhad správné doby odbedňování. **Schmidt OS-120 PM** se speciálně navrženým razníkem je určen pro použití na maltové spáry. [16]



Obrázek 10: Odrazový tvrdoměr Schmidt OS-120PT [16]

Concrete Compressive Strength Range						
1 - 5 MPa 145 - 725 psi	5 - 10 MPa 725 - 1,450 psi	10 - 30 MPa 1,450 - 4,351 psi	30 - 70 MPa 4,351 - 10,153 psi	70 - 100 MPa 10,153 - 14,504 psi	> 100 MPa > 14,504 psi	
Fresh Concrete Very Low Strength Concrete		Normal Concrete		High Strength Concrete	Ultra High Performance Concrete	
SilverSchmidt 			SilverSchmidt ST/PC Type N		Only with user defined custom curves	
			SilverSchmidt ST/PC Type L			
		SilverSchmidt PC Type L with Mushroom Plunger				
		Only with user defined custom curves				
Original Schmidt 			Original Schmidt Type N/ND/NR			
			Original Schmidt Type L/LD/LR			
Schmidt OS-120 	Schmidt OS-120PT	Only with user defined custom curves				

Type N	Standard impact energy. Minimum thickness of test object: 100 mm (3.9") and should be firmly fixed in the structure.
Type L	Low impact energy. Suitable for brittle objects or structures less than 100 mm (3.9") thick.

Obrázek 11: Ukázka rozsahu použití jednotlivých Schmidtových odrazových tvrdoměrů [16]

3.2.2. Kalibrační kovadlina

Ocelová kovadlina pro ověřování tvrdoměru, která má tvrdost nejméně 52 HRC a hmotnost (16 ± 1) kg a průměr přibližně 150 mm. [3]



Obrázek 12: Kalibrační kovadlina [19]

3.2.3. Brusný kámen

Středně zrnitý karborundový kámen nebo ekvivalentní materiál. [3]

Obvykle se tento kámen nachází v balení s tvrdoměrem.



Obrázek 13: SilverSchmidt s brusným kamenem [19]

3.3. Princip zkoušky dle ČSN EN 12504-2

3.3.1. Zkušební místo

Betonové prvky, na kterých je prováděna zkouška odrazovým tvrdoměrem, musí mít tloušťku nejméně 100 mm a musí být spojeny s konstrukcí. Menší tělesa při zkoušce musí být pevně podepřena. Nesmí se zkoušet místa se stěrkovými hnízdy, s odlupováním, s hrubou texturou povrchu nebo místa vysoce porézní.

Zkušební plocha musí být přibližně 300x300 mm

Musí se vzít v úvahu tyto okolnosti:

- pevnost betonu,
- druh povrchu,
- druh betonu,
- vlhkost povrchu,
- karbonatace,
- posun betonu při zkoušce,
- směr zkoušky,
- jiné okolnosti.

Každá z těchto okolností může ovlivnit získané hodnoty odrazů.

Brusným kamenem obrousit povrchy (hrubé, měkké a s uvolněnou maltou) tak, až jsou hladké bez uvolněného materiálu. Hladké povrchy se před zkoušením nemusí brousit. Případná voda na povrchu se musí odstranit. [3]

3.3.2. Postup zkoušky

3.3.2.1. Předběžná příprava

Před zkoušením povrchu se tvrdoměr ověří na kalibrační kovadlině. Povrch kovadliny a razník tvrdoměru se očistí. Provede se nejméně 5 úderů na kovadlině a zaznamenává se až následujících 5 úderů. Pokud čtení z posledních 5 úderů je rozdílné o více jak 3 od hodnoty dané výrobcem, tvrdoměr se musí vyčistit a zkouška opakovat. Rozsah teplot je od 0 °C do 50 °C. [3]

3.3.2.2. Zkušební postup

Tvrdoměr se přiloží ke konstrukci tak, aby razník svíral 90° od daného povrchu. Plynule se zvětšuje tlak na razník, dokud beran nevyvodí úder. Po

každém úderu se zaznamená velikost odrazu beranu nebo vynaložená energie nebo rychlost před a po nárazu beranu. Na každé ploše se musí provést min. 9 platných měření. Zaznamená se poloha a směr působení razníku. Musí se zajistit, aby místa zkoušení byla od sebe vzdálena min. 25 mm a nejméně 25 mm od hrany konstrukce. Pokud je povrch po nárazu porušen nebo poškozen, toto zkoušení se vyřadí. [3]

3.3.2.3. Referenční kontrola

Po zkoušce se tvrdoměr odzkouší na kalibrační kovadlině. Výsledky z pěti úderů se zapíší a zkontroluje se, jestli se liší od hodnot dané výrobcem. Jestliže jsou čtení rozdílná o více jak 3 hodnoty, tvrdoměr se musí vyčistit nebo seřadit a zkouška se musí opakovat. [3]

3.3.3. Výsledek zkoušky

Výsledkem je průměr ze všech měření, při jejichž případné úpravě se bere v úvahu směr působení dle výrobce, a vyjádří se jako celé číslo.

Jestliže více než 20% všech čtení se liší od střední hodnoty o více jak 30%, pak se celá série měření zamítá. [3]

3.4. Princip zkoušky dle ČSN 73 1373

Princip zkoušky je podobný předchozí normě, ale má mírné odchylky. Zkušební zařízení je rozšířeno o špičákový tvrdoměr (má kuželovou špici místo razníku) a norma uvádí ověřování zařízení min 1x za rok či po 2000 odrazech. [10]

3.4.1. Zkušební místo

Vybraná a upravená místa, která jsou zvolena tak, aby reprezentovala zkoušenou plochu betonu. Beton by měl být stejnoměrný, bez štěrkových míst, přirozeně vlhký, suchý nebo vlhký, pokud možno mimo výztuž. Každé místo se upraví způsobem předepsaným pro použitou metodu, včetně odstranění povrchové karbonatice. Potřebná plocha se liší podle použité metody. Pro typy L a N je to min. 0,02 m² vzdálené od hrany min. 30 mm. Pro typ M je min. 0,04 m² vzdálené od hrany min. 60 mm. [10]

3.4.2. Zkušební tělesa

Pro upřesnění obecného nebo směrného vztahu součinitelem α je zapotřebí minimálně 9 krychlí nebo válců, zhotovených ze stejných složek, stejně hutněných a ošetřených jako vyšetřovaný beton. Nebo jsou zapotřebí zkušební tělesa vyňatá z konstrukce a to 3 tělesa pro objem betonu do 10 m^3 , 6 těles pro objem betonu do 50 m^3 , 9 těles pro objem betonu větší 50 m^3 . [10]

3.4.2.1. Krychle

Zkouška se provádí na dvou protilehlých stranách. Krychle se na každé ploše se zkoušejí tak, že se na celé ploše provede nejméně 9 platných měření. Vzdálenost od hran musí odpovídat použité metodě. [10]

3.4.2.2. Válce

Zkouší se 5 platnými měřeními na každé úložné ploše. Vzdálenost od hran musí odpovídat použité metodě. [10]

3.4.3. Postup zkoušky

Předběžná příprava i referenční kontrola dle ČSN EN 12504-2. [10]

3.4.3.1. Zkušební postup

Rozdíl je pouze v platných měřeních. Pokud se nejedná o zkušební vzorky, provede se nejméně 7 platných měření. [10]

3.4.4. Výsledek zkoušky

Ke každé hodnotě měření se odečte hodnota pevnosti. Průměr všech pevností se nesmí lišit o více jak $\pm 20 \%$. Pokud pevnost vybočuje z průměru, vyloučí se a ze zbývajících 7 platných měření se vypočte nový průměr. [10]

3.4.5. Způsob stanovení pevnosti betonu v tlaku

Pevnost betonu s nezaručenou přesností, se vyhodnotí z ukazatele tvrdoměrného zkoušení pomocí obecného nebo směrného vztahu.

Vztahy pro výpočet pevnosti v tlaku dle normy:

Směr vodorovný:	A: $f_{be} = 1,75\alpha - 29,0$;	B: $f_{be} = 1,786\alpha - 30,44$
Směr svisle dolů:	A: $f_{be} = 1,562\alpha - 17,813$;	B: $f_{be} = 1,667\alpha - 21,667$
Směr svisle nahoru:	A: $f_{be} = 1,857\alpha - 40,708$;	B: $f_{be} = 1,923\alpha - 43,661$

Přímka A je pro odrazy v rozmezí 25-40, přímka B je pro odrazy 41-54, α je velikost odrazu. [10]

Upřesněná pevnost betonu se stanoví podle způsobu upřesnění pomocí určujícího kalibračního vztahu úzkého nebo širokého. Nebo lze vyhodnotit z obecného nebo směrného kalibračního vztahu (f_{be}) a vynásobit tuto hodnotu součinitelem α .

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{bi}}{\sum_{i=1}^n f_{bei}}$$

f_{bi}	pevnost betonu v tlaku na i -tém zkušebním vzorku [MPa]
f_{bei}	pevnost v tlaku s nezaručenou přesností, stanovená na témže vzorku [MPa]
n	počet zkušebních vzorků

$$f_b = \alpha * f_{be}$$

f_b	pevnost betonu v tlaku [MPa]
f_{be}	pevnost v tlaku s nezaručenou přesností, stanovená na témže vzorku [MPa] [10]

3.4.5.1. Platnost obecných kalibračních vztahů

Obecné kalibrační vztahy platí na obyčejný hutný beton, složený z běžného hutného kameniva a z portlandského cementu, který je vlhký či přirozeně vlhký a o stáří 14 až 56 dnů.

Beton musí být starší více jak 56 dnů, odvozená pevnost se vynásobí součinitelem α_t (57-180 dnů $\alpha_t = 0,95$, 181-360 dnů $\alpha_t = 0,93$, nad 360 dnů $\alpha_t = 0,90$)

Je-li beton jiný než vlhký nebo přirozeně vlhký, odvozená pevnost se vynásobí součinitelem α_w . (suchý $\alpha_w = 0,85$, nasycený vodou $\alpha_w = 1,05$) [10]

4. Zkouška měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

Ultrazvuková impulzová metoda vytváří mechanické vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz. Rychlost při průchodu je závislá jednak na fyzikálně mechanických vlastnostech betonu, jednak na přítomnosti poruch v konstrukci, jako jsou vzduchové bubliny nebo kaverny.

Největší výhodou je, že se jedná o čistě nedestruktivní metodu se snadným prováděním, k nevýhodám patří obtížná interpretace výsledků ve složitějších případech a citlivost ultrazvuku na řadu vnějších vlivů. [7]

4.1. Historie ultrazvukového testování

První zmínky o měření rychlosti mechanického vlnění skrz beton, se objevily v USA polovině 40. let 20. století. Přišlo se na to, že rychlost primárně závisí na elastických vlastnostech materiálu a skoro vůbec nezávisí na geometrii prvku. Potenciální hodnota tohoto přístupu byla zřejmá, ale problémy s měřením byly významné. Pár let na to došlo ve Francii k vývoji zařízení, které produkovalo opakující se mechanické pulzy. Přibližně ve stejný čas se Kanada a Velká Británie ujala práce, která používala elektroakustické sondy. Bylo zjištěno, že tyto sondy nabízejí lepší kontrolu nad typem a frekvencí produkovaného pulzu. Tato forma testování vypsala do dnešní ultrazvukové metody, jež využívá rozsah frekvencí pulzů od 20 kHz do 150 kHz. V oblasti kovů jsou používány značně vyšší frekvence, ty ale nejdou snadno aplikovat na beton kvůli vysokému rozptylu, ke kterému dochází na rozhraní matrice a kameniva a na mikrotrhlinách. Tudíž dnešní zkoušení betonu závisí na měření rychlosti pulzu. Metoda byla přijata celosvětově a jsou již vyráběny jak lehká robustní zařízení na staveniště, tak i zařízení do laboratoře. [15]

4.2. Teorie šíření impulsu betonem

Existují 3 typy vlnění. Povrchové vlnění (R-wave) má eliptické přemístění částic a je nejpomalejší. Druhé je smykové nebo příčné (S-wave), s posunem částic kolmo ke směru vlny. Je rychlejší než předchozí. Poslední je podélné vlnění neboli tlakové vlnění (P-wave) s přemístěním částic ve směru vlny. Toto

vlnění je nejdůležitější, protože poskytuje více užitečných informací a je nejrychlejší. Elektro-akustické sondy produkují převážně tento typ vlnění, ostatní vlnění způsobují drobné rušení, kvůli jejich menší rychlosti. [15]

Ze stanovené rychlosti šíření vlnění se určí fyzikálně mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi rychlosti šíření vlnění a sledovanými vlastnostmi, jako jsou: dynamický modul pružnosti, pevnost betonu, degradace betonu (na povrchu) a rychlost šíření vlnění. [11]

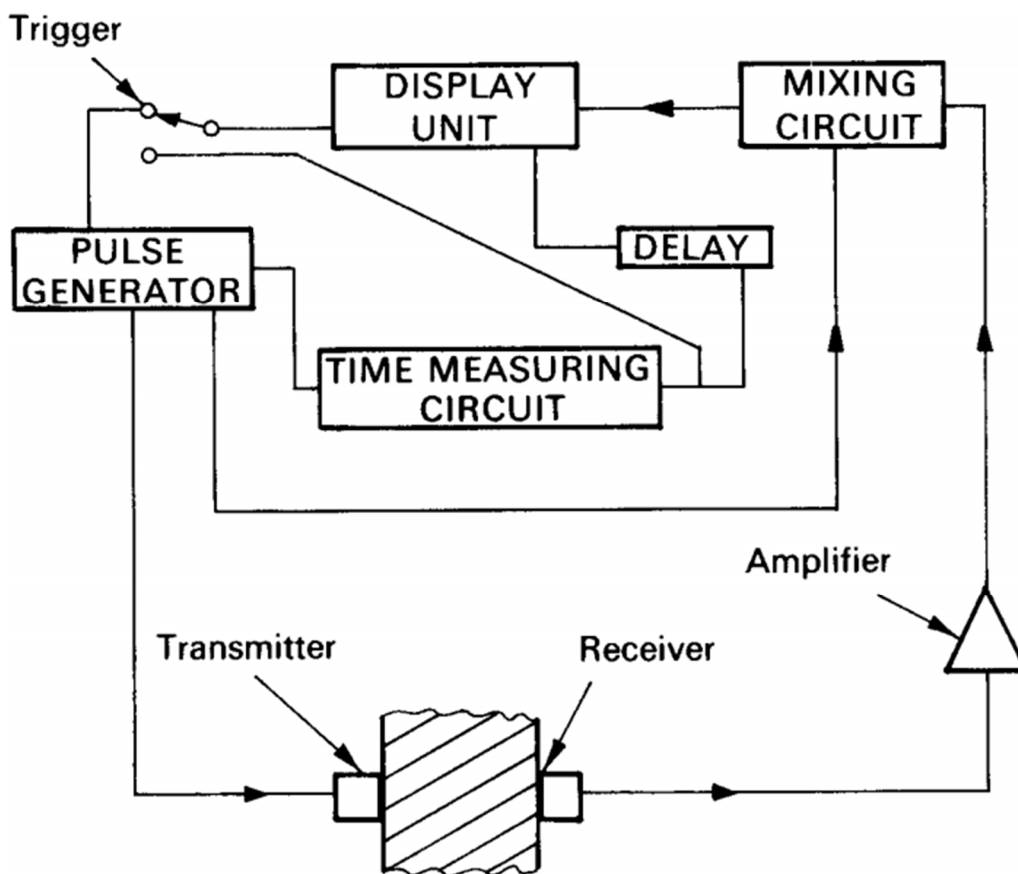
4.3. Zkušební ultrazvukové zařízení

4.3.1. Stanovení doby průchodu impulsu

4.3.1.1. Hlavní jednotka

Zařízení se skládá z elektrického generátoru, který produkuje impulzy. Dále se zde nachází zesilovač a elektrický měřič rychlosti, který měří časový interval mezi vyvolaným náběžným čelem impulsu budiče a přijímaným snímačem. [4, 8, 15]

Základní schéma elektrického obvodu zařízení viz obrázek 14.



Obrázek 14: Základní schéma zařízení [15]

Pro měření času lze použít 2 druhy přístrojů:

- osciloskop, na kterém se zobrazí čelo impulsu ve vhodném časovém měřítku,
- měřič doby s přímým čtením na číslicovém ukazateli. [4]

Zařízení musí vyhovovat následujícím požadavkům:

- musí umožňovat měření doby průchodu na kalibrační mřížce s odchylkou max. $\pm 0,1 \mu\text{s}$ s přesností na 2 %,
- elektrický budící impuls používaný v budiči, nesmí mít nárůst času větší než je $\frac{1}{4}$ jeho přirozené fáze, proto aby byl zajištěn ostrý náběh impulsu,
- frekvence opakování musí být nízká, aby obdržený signál nebyl ovlivněn odrazem,
- přístroj musí být používán dle návodu. [4]



Obrázek 15: Zařízení pro stanovení doby průchodu impulsu s číslicovým ukazatelem [20]

4.3.1.2. Sondy

Sondy se skládají z budiče (přenáší mechanické impulzy do betonu), snímače (mění přicházející mechanické vlnění na elektrický obraz). Pracovní kmitočet sond je v běžném pracovním rozsahu od 20 kHz do 150 kHz. Někdy se mohou použít nižší a vyšší kmitočty. Vlny s vyšším kmitočtem (60 až 200 kHz) mají dobře znatelný náběh, ale když prostupují betonem, jsou oslabovány rychleji, než normální vlny. Proto se používají na krátké měřicí základny do 50 mm. Vlny s nižším kmitočtem (10 až 40 kHz) se používají na dlouhé měřicí základny až do 15 m. [4, 15]



Obrázek 16: Sondy, vlevo 150 kHz sondy, vpravo 54 kHz sondy, vzadu vlevo exponenciální 54 kHz sondy [20]

4.3.2. Metoda impulz-echo

Také se nazývá jako odrazová impulzová metoda. Zařízení pracuje s odrazem impulzu od protější stěny, od dutin či objektů v betonu. Rozsah frekvencí je od 20 až do 500 kHz.

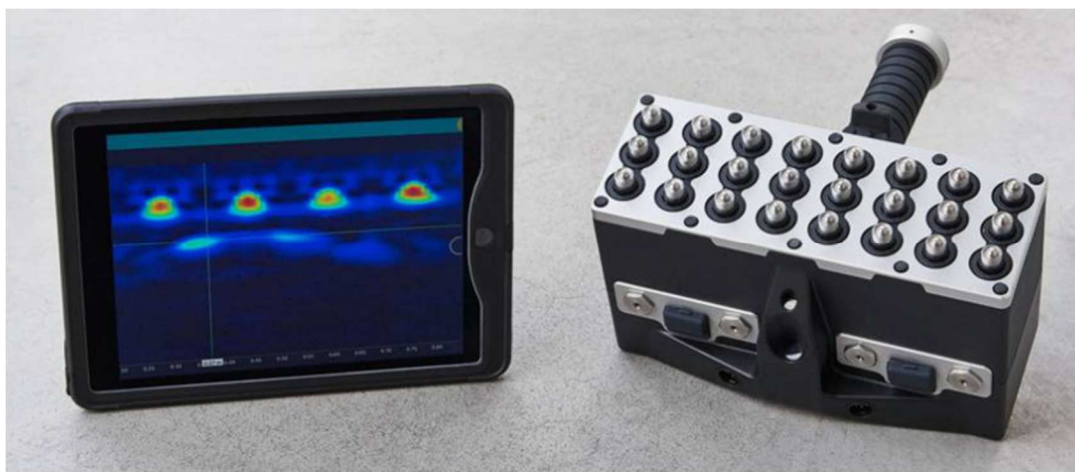
Dá se používat tam, kde je přístup pouze z jedné strany. Aplikace zařízení je hlavně v defektoskopii, takže k nalezení a umístění dutin, trubek, trhlin a voštin, také v měření tloušťky betonového prvku. Dále k detekci objektů v betonu, jako jsou např. trubky, nebo „husí krky“. Tato metoda se nehodí na určení pevnosti betonu. [20]

4.3.2.1. Hlavní jednotka

Jednotka tohoto zařízení je obdobná jako u metody stanovení rychlosti impulzu. Rozdíl je v tom, že impulz se musí odrazit od protější strany, či

objektu, tím pádem to zabere dvakrát více času než je u přímého prozvučování u předchozí metody. Tudiž jednotka pracuje s odrazovým časem.

Dále je rozdíl v tom, kolik musí ovládat sond. A také zvládat měnění jejich funkce. [20]

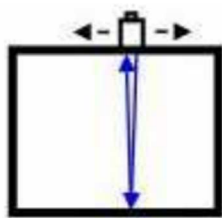


Obrázek 17: Zařízení pro impulz-echo metodu, vlevo hlavní jednotka, vpravo 24 sond [20]

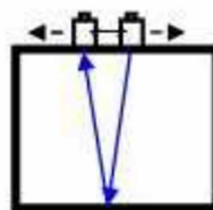
4.3.2.2. Sondy

Tento aparát může mít jednu sondu nebo i několik sond, které fungují jako budič a po odeslání impulzu, se ihned přepnou na snímání, tj. pracují jako snímač. Může mít i dvě sondy, které pracují jako budič a snímač.

Dříve se používaly vysoké kmitočty pro sondy (1 až 6 MHz), které se nehodily pro materiály s vysokým útlumem s častými heterogenními vadami, jako je např. beton. Dnes již sondy používají nižší frekvence, takže se využívají na beton. Některé ani nepotřebují médium na akustické spojení. [8, 20]

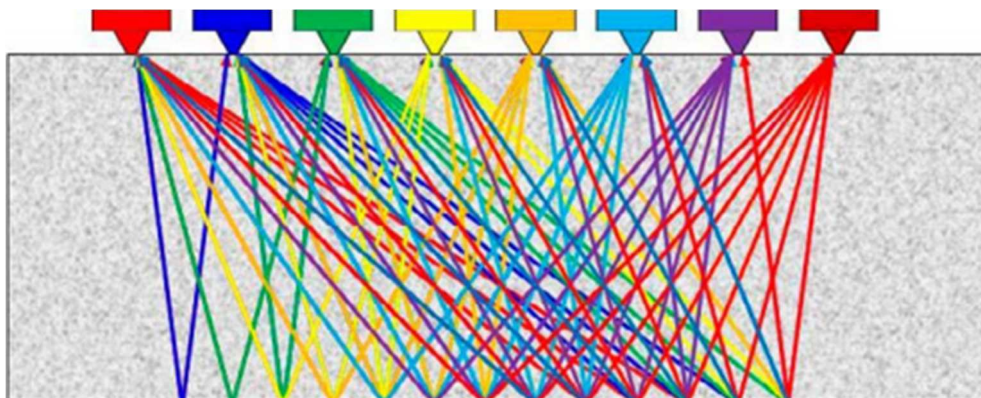


a) s jednou sondou



b) se dvěma sondami

Obrázek 18: Princip impulz-echo metody a) jedna sonda s měněním funkce budiče a snímače b) s dvěma sondami pracujícími odděleně [7]



Obrázek 19: Ukázka 8 sond s měněním funkce budiče a snímače [20]

4.4. Princip zkoušky dle ČSN EN 12504-4

4.4.1. Faktory ovlivňující zkoušku

K zajištění reprodukovatelného měření rychlosti šíření impulzu je nutno vzít v úvahu všechny činitele, které mohou ovlivnit měření. [4]

4.4.1.1. Vlhkost

Ovlivnění dvěma účinky chemický a mechanický. Jsou důležité ve vztahu k pevnosti betonu. Největší vliv má ošetřování, které ovlivňuje hydrataci. Další je volná voda v pórech. [4]

4.4.1.2. Teplota

Teploty mezi 10 až 30 °C nemají podstatný vliv na měření. [4]

4.4.1.3. Měřicí základna

Doporučuje se, aby nejmenší základna byla 100 mm (zrno kameniva max. 20 mm) nebo 150 mm (zrno kameniva max. 40 mm). Při větší měřicí základně přístroje vykazují obvykle menší rychlost, kvůli špatnému rozpoznání náběžného čela impulzu. Odchylka bývá v rámci tolerance. [4]

4.4.1.4. Tvar a velikost tělesa

Rychlost šíření impulzu je nezávislá na velikosti, pokud jejich boční rozměr není menší než určitá hodnota. Pod touto hodnotou může být rychlost šíření podstatně menší. Rozsah tohoto zmenšení závisí hlavně na poměru délky vlny k nejmenší boční vzdálenosti. [4]

4.4.1.5. Vliv ocelové výztuže

Je-li to možné, snažíme se vyhnout měření blízko výztuže, která je rovnoběžně se směrem šíření impulzu. [4]

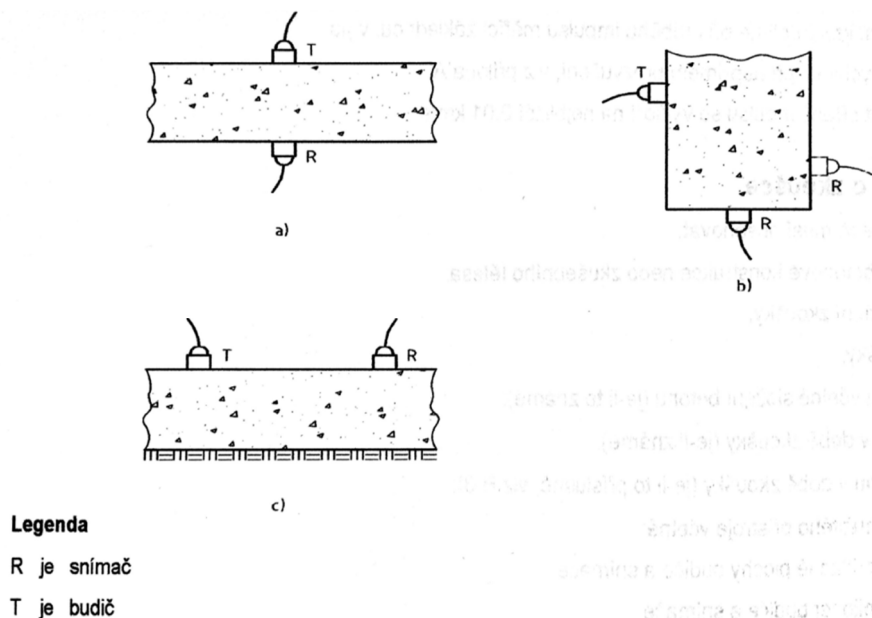
4.4.1.6. Trhliny a dutiny

Pokud je dutina mezi budičem a snímačem a je delší než šířka budiče a délka používané vlny vytváří překážku vlnění a tím i delší doba průchodu. Většinou tento rozměr je 100 mm v průměru a větší. Menší nemají vliv na dobu prostupu. Toto lze využít pro detekci dutin.

Jestliže trhliny jsou udržovány blízko sebe pomocí tlaku, vlnění může procházet přes trhlinu např. u sloupu. [4]

4.4.2. Uspořádání sond

Maximální energie je kolmá na plochu budiče. Lze zjistit i impulzy, které prostupují betonem v jiných směrech. Z toho vyplývá, že sondy lze přiložit buď na protilehlé strany (přímé prozvučení), nebo na přilehlých stranách (polopřímé prozvučení), nebo na stejné straně (nepřímé prozvučení). [4]



Obrázek 20: Varianty uspořádání sond: a) přímé prozvučení; b) polopřímé prozvučení; c) nepřímé prozvučení [4]

4.4.3. Osazení sond na beton

Pro měření musí být dostatečné akustické spojení mezi betonem a sondami. Většina povrchů betonů je dostatečně hladká, aby bylo zajištěno

dobré akustické spojení pomocí různých médií, jako je žlutá vazelína, mazací tuk, mazlavé mýdlo a pasta s kaolinitickým glycerinem a následné přitlačení sond k povrchu. Opakované měření doby průchodu je nutno provádět dokud se nezjistí minimální hodnota, která ukazuje, že tloušťka média je nejmenší. Hrubý povrch se musí upravit uhlazením a obroušením nebo lze použít rychle tvrdnoucí epoxidovou pryskyřici, jako akustické médium. [4]

4.4.4. Stanovení měřící základny

U přímého prozvučení je měřící základna nejkratší vzdálenost mezi sondami. Musí být stanovena s přesností $\pm 1 \%$ a musí být zapsána.

U polopřímého prozvučení bylo shledáno, že dostatečná přesnost měřící základny se zjistí změřením délky středů sond.

U nepřímého prozvučení se nezjišťuje délka, kvůli nejistotě s určením měřící základny, ale provede se řada měření s různými vzdálenostmi sond. [4]

4.4.5. Nepřímé prozvučení

Budič se osadí na stálé místo na povrchu a snímač se osadí v různých vzdálenostech se stálým přírůstkem podél zvolené přímky. Zjištěná doba se vynesou do grafu, kde je zobrazen vztah doby průchodu a vzdáleností mezi sondami. Stanoví se sklon přímky proložené těmito body (průměrná tangenta) a zaznamená se jako průměrná rychlost šíření impulzu podél zvolené přímky. Pokud jsou body nespojité, znamená to, že na povrchu jsou trhlinky nebo je povrchová vrstva nekvalitní a zkouška je nevěrohodná. [4]

4.4.6. Výsledek zkoušky

Pro přímé a polopřímé prozvučení vypočteme rychlost šíření impulzu:

$$V = \frac{L}{T}$$

V rychlost impulzu [km/s]

L délka měřící základny [mm]

T čas, který uplyne při průběhu impulzu měřící základnou [μ s] [4]

4.4.7. Vztah mezi rychlostí šíření impulzu a pevností

Důležité vlastnosti, které ovlivňují rychlost šíření, jsou modul pružnosti a hutnost. Největší význam na tyto vlastnosti má kamenivo a cementová kaše (její vodní součinitel a zralost). Pevnost je více závislá na vodním součiniteli. Tudíž vztahy mezi rychlostí šíření impulzu a pevnosti betonu jsou nepřímé. [4]

4.4.7.1. Použití zkušebních těles

Použijí se nejméně 3 zkušební tělesa každé záměsi. Provedou se min. 3 měření mezi jejich spodní a horní plochou. Rozdíly měření na jednom tělese musí být $\pm 1 \%$, jinak se těleso odmítne. Následuje zkouška pevnosti tělesa. Střední hodnota rychlosti šíření impulzu a střední hodnota pevnost na tělesech dávají údaje pro tvorbu regresní křivky, která lze použít pouze pro stejně vytvořená tělesa. [4]

4.4.7.2. Použití vývrtů

Odebírají se z různých míst o různé kvalitě, tím udávají rozsah pevnosti. Rychlost šíření impulzu se stanoví v místech vývrtů. Vývrty se musí vyvrtat a vyzkoušet dle normy a jsou použity pro stanovení korelační křivky. [4]

4.4.7.3. Prefabrikované výrobky

Měří se v místech, kde se očekává, že by beton nevyhověl při zatěžování. Když se požaduje, aby prvky vyhověly požadavkům pevnosti, může se stanovit vztah mezi zjištěnými rychlostmi šíření impulzu a pevnostmi. [4]

4.5. Princip zkoušky dle ČSN 73 1371

4.5.1. Stanovené rychlosti šíření impulzu

Musí se vzít v úvahu faktory ovlivňující zkoušku jako v normě ČSN EN 12504-4 popsané v podkapitole 4.4.1.

Je nutno uvažovat délku vlny λ s ohledem na rozměr prostředí, které je odvislé od minimálního příčného rozměru vzorku.

Měření je prováděno v trojrozměrném prostředí, pokud je v jiném, musí se přepočítat na toto prostředí, pomocí součinitelů, jsou odvislé od dynamického Poissonova čísla zkoušeného materiálu. [11]

4.5.2. Uspořádání sond

Stejně jako v ČSN EN 1250-4 popsané v podkapitole 4.4.2. [11]

4.5.3. Velikost základny

Stanoví se dle ČSN EN 1250-4. Vhodná velikost základny závisí na druhu přístroje a na kmitočtu sond. Optimální velikost u většiny přístrojů je pro hutný beton 20 až 60 cm. [11]

4.5.4. Vliv výztuže

Doporučuje se vyhnout ocelové výztuži rovnoběžně se směrem šíření impulzu. Pokud je prut šikmo nebo kolmo na směr, změna se projeví, pokud je součet průměrů výztuže k délce základny větší jak 0,1. [11]

4.5.5. Výsledek zkoušky

4.5.5.1. Rychlost šíření impulzů podélných vln v betonu

$$v_L = \frac{L}{T}$$

v_L rychlost impulzu [km/s]

L délka měřicí základny [mm]

T čas včetně t_{kor} , který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou [μs] tj. $T = T_i \pm t_{kor}$

t_{kor} korekce, složena z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulzů, která se případně zjistí při kalibraci přístroje

Při nepřímém prozvučování je tato hodnota pouze informativní. [11]

4.5.5.2. Dynamický modul pružnosti v tlaku

Určí se z následujícího vztahu:

$$E_{cu} = \rho * v_L^2 * \frac{1}{k^2}$$

ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³]

v_L rychlost impulzu [km/s]

E_{cu} dynamický modul pružnosti v tlaku/tahu [MPa]

k součinitel rozměrnosti [11]

Součinitel k pro trojrozměrné prostředí

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

ν_{cu} Poissinovo číslo [11]

4.5.5.3. Pevnost betonu v tlaku

Je možno ji stanovit z vyhodnocené impulzové rychlosti vlnění při užití kalibračního vztahu, odvozeného pro zkoušený beton.

Pevnost betonu s nezaručenou přesností se vyhodnotí pomocí obecného nebo směrného kalibračního vztahu.

Upřesněná pevnost betonu se vyhodnotí pomocí určujícího kalibračního vztahu úzkého nebo širokého. Nebo lze vyhodnotit z obecného nebo směrného kalibračního vztahu upřesněného součinitelem α . [11]

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{bi}}{\sum_{i=1}^n f_{bei}}$$

f_{bi} pevnost betonu v tlaku na i -tém zkušebním vzorku [MPa]

f_{bei} pevnost v tlaku s nezaručenou přesností, stanovená na vzorku [MPa]

n počet zkušebních vzorků [11]

Jako směrný kalibrační vztah lze použít:

$$f_{be} = 9,9 * v_{L3}^2 - 56 * v_{L3} + 87,8$$

f_{be} pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností [MPa]

v_{L3} rychlost impulzu v trojrozměrném prostředí [km/s] [11]

Pro upřesnění obecného nebo směrného vztahu součinitelem α je zapotřebí minimálně 9 krychlí nebo válců, zhotovených ze stejných složek, stejně hutnět a ošetřen jako vyšetřovaný beton. Nebo jsou zapotřebí zkušební tělesa vyjmutá z konstrukce. 3 tělesa na objem betonu do 10 m³, 6 těles na objem betonu do 50 m³, 9 těles na objem betonu větší 50 m³. [11]

5. Kalibrační vztahy

Jedná se o závislost mezi ukazateli nedestruktivního měření, popř. z nich vypočtených hodnot sledované vlastnosti a ukazateli vlastnosti betonu, zjištěnými obvykle destruktivně na potřebném počtu zkušebních vzorků. Podle potřeby je vyjádřena do kalibrační křivky. [12]

Některí výrobci vytváří sami tyto kalibrační vztahy či kalibrační křivky a nahrávají je do svých zařízení. Uživatel si může vybrat přednastavený vztah v přístroji. Ten mu následně vypočte z provedeného testu vlastnost betonu, především pevnost v tlaku. Ale i tak je nadále lepší si vytvořit svůj kalibrační vztah na danou konstrukci nebo na daný prvkem či třídu betonu, protože takový vztah bude mít větší přesnost.

5.1. Kalibrační vztahy dle ČSN EN 13791

Referenční metoda posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukci je zkouška vývrtů. Dále lze zjistit pevnosti betonu nepřímo jinými zkouškami např. Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem, nebo Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Pokud se používají nepřímé metody, musí se vzít v úvahu nejistota vyplývající ze vztahu mezi použitým způsobem a zkouškou vývrtů. [5]

5.1.1. Posuzování pevnosti přímými metodami

5.1.1.1. Zkušební tělesa

Těleso odebrané z vytvořené konstrukce je ve většině případů vývrt. Musí být vyjmut, vyšetřen a připraven podle ČSN EN 12504-1 a odzkoušen. V případech, kde je to možné, vývrt nechat 3 dny před zkoušením v laboratorním prostředí.

Pevnost betonu v tlaku v konstrukci stanovena:

- zkoušením vývrtu průměru 100 mm stejné délky se získá hodnota pevnosti rovna hodnotě při zkoušce krychle o hraně 150 mm, vyrobené a ošetřované stejně,
- zkoušením vývrtu průměru 100 mm až 150 mm a s poměrem délky k průměru 2,0 se získá hodnota pevnosti rovna hodnotě pevnosti při

zkoušce válce o průměru 150 mm a délky 300 mm, vyrobeného a ošetřovaného stejně,

- převedením výsledků zkoušek z vývrtu o průměru od 50 mm do 150 mm a jiných poměrech délek k průměru musí být založeno na vhodně stanovených převodních součinitelích. [5]

5.1.1.2. Počet těles

Počet vývrtů se určí podle objemu dotčeného betonu a dle účelu zkoušek vývrtů. Každé zkušební místo tvoří jeden vývrt z konstrukce. Pro posouzení pevnosti v tlaku ze statistických a bezpečnostních hledisek se má odebrat co nejvíce vývrtů, ale stačí, aby byla provedena zkouška na nejméně 3 vývrtech. Pro odběr se musí vzít v úvahu každá konstrukční část. [5]

5.1.1.3. Posouzení

Charakteristická pevnost v tlaku se posuzuje postupem A, při kterém je k dispozici nejméně 15 vývrtů nebo postupem B, který pracuje se 3 až 14 vývrty. [5]

5.1.2. Posuzování pevnosti nepřímými metodami

5.1.2.1. Metody

Nepřímé zkoušky umožňují alternativy pro zkoušky vývrtů pro posouzení pevnosti betonu v tlaku v konstrukci nebo mohou doplňovat údaje získané z omezeného počtu vývrtů. Nepřímé metody se mohou použít po kalibraci se zkouškami vývrtu v následujících případech:

- samostatně,
- v kombinaci s nepřímými metodami,
- v kombinaci s nepřímými metodami a přímou metodou (vývrty).

Pokud se používá nepřímá metoda, zjišťuje se jiná vlastnost, než je pevnost. Proto se musí používat vztah mezi výsledkem nepřímých zkoušek a pevností v tlaku vývrtu. Jsou dvě alternativní metody pro posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukci. [5]

5.1.2.2. Alternativa 1 – Přímá korelace s vývrty

První alternativa se užívá pro nepřímé zkoušky při posuzování pevnosti v tlaku, když je stanoven konkrétní vztah mezi pevností betonu a výsledky

zkoušek vývrtů. Ke stanovení vztahu je potřeba minimálně 18 dvojic výsledků ze stejného místa, to je 18 výsledků nepřímou metodou a 18 výsledků zkoušek vývrtů.

Vztah se sestaví následovně. Nejlepší přímka nebo křivka se stanoví z regresních analýz údajů dvojic ze zkoušení. Vypočte se standardní chyba odhadu a stanoví se meze pro nejvhodnější čáru nebo křivku a pro jednotlivá měření. Vztah, který se používá pro odhad pevnosti, udává takovou úroveň, kde 90% hodnot pevností se předpokládá vyšších než odhadnutá hodnota.

Podmínky posuzování charakteristické pevnosti:

- posouzení každé zkušební oblasti nejméně na 15 zkušebních místech,
- směrodatná odchylka vypočtena z výsledků zkoušek nebo hodnota $3,0 \text{ N/mm}^2$, bere se hodnota vyšší.

Charakteristická pevnost betonu v tlaku ve zkušební oblasti je nižší hodnota z následujících dvou vztahů:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1,48 * s$$

$$f_{ck,is} = f_{is,nejmenší} + 4$$

$f_{ck,is}$	charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci [MPa]
$f_{m(n),is}$	aritmetický průměr z n výsledků zkoušek pevnosti betonu v tlaku v konstrukci [MPa]
$f_{is,nejmenší}$	nejnižší výsledek zkoušky betonu v tlaku v konstrukci [MPa]
s	směrodatná odchylka výsledků zkoušek [-] [5]

5.1.2.3. Alternativa 2 – Kalibrace s vývrtvy pro vymezený rozsah pevnosti použitím stanoveného vztahu

Druhá alternativa využívá základní křivku nepřímých metod a jejího posunu k příslušné úrovni zjištěné ze zkoušek vývrtů. Zkušební oblast obsahuje nejméně 9 dvojic zkušebních výsledků, takže 9 zkušebních míst.

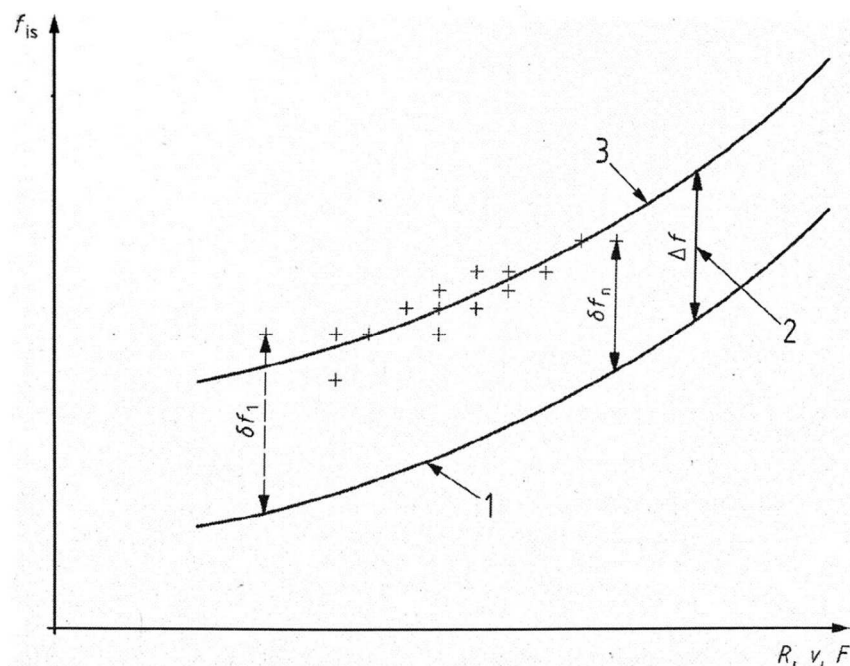
Nejdříve místa ozkoušíme nepřímými metodami a zjistíme výsledek. Následně se odeberou a odzkouší vývrtvy. Poté sestavíme graf příslušné pevnosti v tlaku vývrtů proti základní křivce nepřímé zkoušky. Pro každé zkušební místo stanovíme rozdíl δf mezi zjištěnou hodnotou na vývrtu a hodnotou uvedenou na základní křivce. Vypočteme střední hodnotu $\delta f_{m(n)}$ pro

n počet výsledků a vypočte se směrodatná odchylka s . Vypočte se posun základní křivky Δf a základní křivka se posune o tuto hodnotu, aby se získal vztah mezi nepřímou zkouškou a pevností v tlaku pro konkrétní beton f_{is} . Stanovený vztah platí v rozsahu ± 2 hodnoty tvrdosti ($\pm 0,05$ km/s při ultrazvukové zkoušce) mimo rozsah, který byl použit k získání posunu. [5]

Použité vzorce:

$$\delta f = f_{is} - f_{R,v \text{ nebo } F}$$

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 * s$$



Obrázek 21: Zásada pro zjištění vztahu mezi pevností betonu v tlaku v konstrukci a údajů z nepřímé zkušební metody [5]

- | | |
|--------------------|---|
| 1 | základní křivka |
| 2 | Δf , posun základní křivky |
| 3 | vztah mezi nepřímou metodou a pevností v tlaku pro konkrétní beton |
| $\delta f_{1...n}$ | rozdíl mezi jednotlivými pevnostmi vývrtní a pevnosti podle základní křivky |
| R | tvrdost betonu - ČSN EN 12504-2 |
| F | síla na vytržení - ČSN EN 12504-3 |
| v | rychlost šíření ultrazvukového impulzu - ČSN EN 12504-4 |
| k_1 | součinitel závislý na počtu dvojic dle tabulky 2 [5] |

Tabulka 2: Součinitel k_1 závislý na počtu zkušebních dvojic [5]

Počet výsledků zkušebních dvojic n	Součinitel k_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

K posouzení charakteristické pevnosti betonu v tlaku se použijí postupy uvedené u Alternativy 1. Posouzení založené na zkušebních vývrtech, za použití základních křivek uvedených v ČSN EN 13791, dává ekvivalentní pevnost betonu v tlaku jako pevnost krychelnou $f_{ck,cube}$ či pevnost válcovou $f_{ck,cyl}$ podle použitého vývrtu. Po výpočtu se beton zařadí do pevnostních tříd dle Tabulka 1 uvedené v ČSN EN 206+A1. Takovýto vztah se použije pouze pro odhad pevnosti betonu v tlaku pro konkrétní beton za platných podmínek. [5]

5.2. Kalibrační vztahy dle ČSN 73 1370

5.2.1. Obecné informace

5.2.1.1. Zkušební vzorky

Zkušební vzorky pro stanovení kalibračních vztahů mají velikost základních zkušebních vzorků dle ČSN EN 12390-1, ČSN EN 12504-1, popř. velikost určenou normou pro danou metodu nedestruktivního zkoušení. [12]

5.2.1.2. Podmínky pro zkoušení

Zkouší se beton zkušebních vzorků, dílců a konstrukcí. Zkušební vzorky se zhotoví, ošetří, popř. vyjmou z konstrukce a dle potřeby se zkoušejí na požadované vlastnosti nedestruktivními zkouškami. [12]

5.2.1.3. Vyhodnocení zkoušek

Hodnota vlastnosti betonu z ukazatele nedestruktivního měření se stanoví buď přímo, nebo pomocí kalibračního vztahu, popř. upřesněním hodnoty určené z obecného, popř. směrného kalibračního vztahu. [12]

5.2.1.4. Měřený bod kalibračního vztahu

Dvojice (β_e, V_n) údajů pro vyhodnocování kalibračního vztahu se skládá ze souřadnic ukazatele nedestruktivního měření (β_e) a ukazatele vlastnosti (V_n) získaných na jednom zkušebním tělese.

5.2.1.5. Sdružený bod kalibračního vztahu

Dvojice (β_{em}, V_{nm}) údajů pro vyhodnocování kalibračního vztahu se skládá ze souřadnic průměrů ukazatelů vlastnosti (V_{nm}) získaných na požadovaném počtu zkušebních vzorků záměrně vyrobených pro sledovanou vlastnost betonu.

5.2.2. Obecný kalibrační vztah

Provádí se, pokud není stanoven výrobcem přístroje. Vyhodnotí se z nejméně 300 provedených zkoušek na zkušebních vzorcích z betonů různého složení a s použitím rozličných technologií. To zajistí, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v celém oboru.

Rozsah vztahu je třeba zvolit takový, aby dovoval stanovení hodnot vlastnosti všech velikostí, které se mohou při zkoušení nastat. [12]

5.2.3. Směrný kalibrační vztah

Provádí se, pokud není stanoven výrobcem přístroje. Vyhodnotí se z nejméně 100 provedených zkoušek na zkušebních vzorcích, které byly vyrobeny ze zvolených druhů betonu různého složení a s použitím zvolené technologie. To zajistí, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v celém oboru.

Rozsah vztahu je třeba zvolit takový, aby dovoval stanovení hodnot vlastnosti všech velikostí, které se mohou při zkoušení nastat. [12]

5.2.4. Úzký určující kalibrační vztah

Platí pro beton dané třídy. Vyhodnocení ze zkoušek provedených na takovém počtu vzorků, které umožní stanovení 3 nebo 4 sdružených bodů nebo k nim příslušejícího počtu měřených bodů stejnoměrně rozložených v oboru vlastnosti.

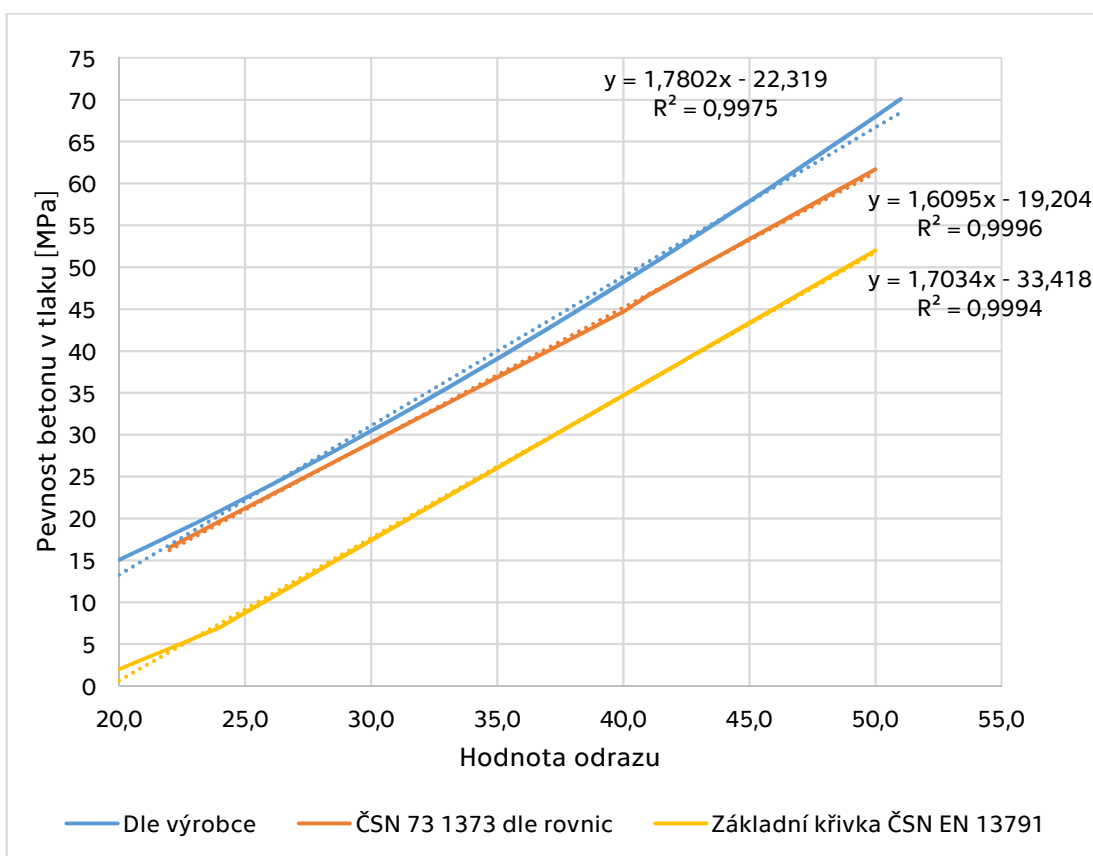
Pro každý sdružený bod je potřeba otestovat nejméně 6 zkušebních vzorků, pokud předpis pro nedestruktivní metodu nepředepisuje jinak. [12]

5.2.5. Široký určující kalibrační vztah

Platí pro beton daného rozsahu tříd. Odvozený z vyhodnocených zkoušek, které umožňují stanovení 5 až 6 sdružených bodů nebo k nim příslušejícího počtu měřených bodů stejnoměrně rozložených v oboru vlastnosti.

Pro každý sdružený bod je potřeba otestovat nejméně 6 zkušebních vzorků, pokud předpis pro nedestruktivní metodu nepředepisuje jinak. [12]

5.3. Ukázka kalibračních vztahů pro odrazový tvrdoměr



Obrázek 22: Kalibrační křivky pro odrazový tvrdoměr orientovaný svisle dolů

6. Praktické příklady využití metod

6.1. Využití odrazového tvrdoměru v praxi

Dle ČSN EN 12504-2 tvrdost získaná touto zkouškou se používá pro posouzení stejnoměrnosti uloženého betonu, k ohraničení míst s nižší jakostí nebo narušeného betonu. Tato zkušební metoda není zamýšlena jako alternativní ke stanovení pevnosti betonu, ale může být použita při vhodném korelačním vztahu pro odhad pevnosti. [3]

V dnešní době je jedním ze zásadních a hlavních použití odrazového tvrdoměru odhad pevnosti již postavené betonové konstrukce bez jejího znehodnocení či rozbití. Pro odhad jsou většinou používány kalibrační vztahy dodávány s výrobkem od výrobce. Dále se tento přístroj používá pro zjištění doby odbednění. Tzn., že konstrukce z daného betonu se odbední a je schopna držet daný tvar.

6.2. Využití Ultrazvukové metody v praxi

Metoda rychlosti šíření ultrazvukového impulzu se používá především pro stanovení pevnosti stejně jako metoda odrazového tvrdoměru. Další velká využití jsou při stanovení dynamického modulu pružnosti daného materiálu a určování hloubky trhliny na povrchu betonu.

Metoda impulz-echo se používá pro stanovení tloušťky zkoušeného prvku a k lokalizaci či detekci trhlín, dutin, kaveren nebo trubek v konstrukci.

Obě metody mohou být využity pro zjištění homogenity betonu.

Hypotéza

Předtím než se zhodnotí samotné zkoušení či výsledky je nutné uvést předpoklad, jak bude testování probíhat a jaké očekáváme výsledky.

Testování malého počtu těles nebude ukazovat objektivní výsledky, pouze poukazovat na to, jak přesné jsou kalibrační vztahy s ohledem na stáří betonu, popř. zda ukazují dobré výsledky pro určení doby odbednění.

Zkoušení odrazovým tvrdoměrem by mělo vykazovat v prvních dnech stáří betonu nižší hodnoty odrazu. R. Latif Al-Mufti a A. N. Fried zjistili, že čím je beton starší, tím je větší hodnota odrazu a zkoušení tvrdoměrem by tuto hypotézu mělo potvrdit. Nižší hodnota odrazu je způsobena nižší pevností, ale hlavně měkčím povrchem. Tvrdoměr bude zanechávat více viditelné stopy po odrazu, než jaké by zanechal při větším stáří betonu. Proběhnou dvě série měření na každém tělese. Těleso leží na zemi a tvrdoměr působí svisle dolů. Tento způsob měření reprezentuje staveništní poměry, při kterých by se těleso zkoušelo. Následuje zkoušení, kdy je těleso zatíženo v lisu zemi a tvrdoměr působí vodorovně. [23]

Ultrazvukové testování bude ukazovat také nižší hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v raných fázích stárnutí betonu. To také potvrdila studie R. Latif Al-Muftiho a A. N. Frieda, která ukazuje nárůst rychlostí impulzu s postupným stárnutím betonu. Dále se zjistí dynamický modul pružnosti s obecným Poissonovým koeficientem pro beton a jeho postupný růst s ohledem na stáří. Následně bude porovnán se statickým modulem pružnosti. [23]

Očekávané výsledky jsou tedy následující:

- Mladší vzorky budou vykazovat menší hodnoty odrazů a menší rychlosti šíření ultrazvukového impulzu.
- Se stárnutím vzorku budou ukazatelé nedestruktivních metod postupně růst.
- Testování na zemi bude mít menší hodnoty odrazů, než pokud bude těleso upnuto v lisu.

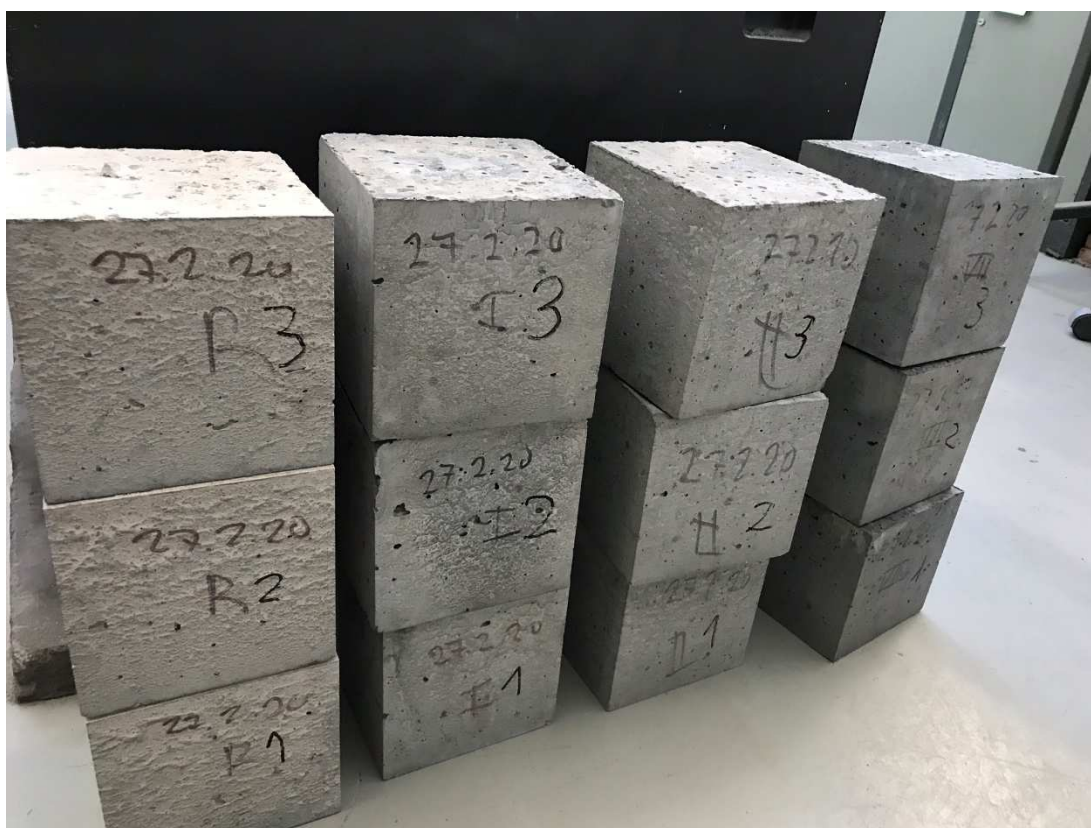
7. Praktická část

Praktická část bakalářské práce, je zaměřena na nedestruktivní zkoušení pomocí odrazového tvrdoměru a ultrazvuku na betonových krychlich o hraně 150 mm a následné sledování vývoje pevnosti. Zkoušení probíhalo na betonu starém 28 a 60 dní na každé ze všech šesti směsí. Dvě vybrané směsi byly dále testovány 1., 2., 4. a 7. den stáří. Zkoušky byly prováděny v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT.

7.1. Beton

7.1.1. Složení zkoušeného betonu

V první sadě bylo vyrobeno 5 různých směsí pro testování na pevnost ve stáří 28 dnů a 60 dnů. V druhé sadě byly zpracovány 2 směsi (Referenční a EMĚ KS VII) pro testování na pevnost ve stáří 1, 2, 4, 7 dnů. Směsi se liší pouze přidaným popílkem o různé hrubosti mletí.



Obrázek 23: Zkoušená tělesa různých směsí

Tabulka 3: Receptury betonových směsí

Složky betonu v kg/m ³ betonu	Referenční C30/37	Referenční 2 C30/37	EMĚ KS I C30/37	EMĚ KS II C30/37	EMĚ KS VII C30/37	Beton s mikro-silikou	
Cement CEM I 42,5 R	340	340	310	310	310	310	
Popílek/mikrosilika (dle receptury)	0	0	62	62	62	62	
Voda	Přidaná	136	136	124	124	124	142
	Navíc	0	0	18	18	18	0
	Celkem	136	136	142	142	142	142
Superplastifikátor Glenium ACE 40	0,68	0,68	0,62	0,62	0,62	0,69	
Kamenivo	1914	1914	1895	1895	1895	1894	
Frakce 0-4	804	804	796	796	796	796	
Frakce 4-8	345	345	341	341	341	341	
Frakce 8-16	766	766	758	758	758	757	
Provzdušnění	1,3 %	1,3 %	1,3 %	1,3 %	1,1 %	5,2 %	
Σ	2391	2391	2409	2409	2409	2409	

7.1.2. Počet těles

Ze všech šesti směsí v první sadě byla připravena 3 tělesa ke každému testování (28, 60 den), tyto byly zamíchány 27. 2. a 5. 3. 2020. V druhé sadě byla zhotovena 3 tělesa dvou směsí pro každé testování (1, 2, 4, 7 den), směs byla zamíchána 27. 4. 2020.

7.1.3. Testování zkušebních těles

Tělesa byla před rozdrčením změřena, zvážena a otestována odrazovým tvrdoměrem a ultrazvukem. Poté byla tělesa rozmačkána a zaznamenala se síla při porušení pro výpočet pevnosti a následné kalibrační vztahy.

7.1.4. Rozměry a pevnosti jednotlivých těles

Pevnosti betonů vycházely o dost vyšší, než návrhová hodnota C30/37. Takže dané betony se dají klasifikovat jako betony vyšších pevností, protože hodnoty pevnosti ve 28 dnu vycházely nad hranici C50/60.

Tabulka 4: Rozměry a pevnosti těles

Směs betonu	Těleso	Stáří	Výška	Šířka 1	Šířka 2	Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla	Pevnost v tlaku $f_{ck,cube}$	
		[dny]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	
Referenční beton	1	28	149,9	149,9	149,9	8,240	2446,4	1560	69,43	
	2		147,8	149,8	149,8	8,155	2458,8	1600	72,27	
	3		149,8	150,0	150,0	8,180	2426,9	1570	69,87	
	1	60	148,5	150,7	150,6	8,175	2425,3	1715	76,64	
	2		149,5	150,0	150,0	8,155	2424,4	1690	75,36	
	3		150,0	150,1	149,9	8,155	2416,3	1570	69,73	
Referenční beton 2	1	1	150,9	149,9	149,9	8,140	2400,7	830	36,69	
	2		150,3	150,0	149,9	8,135	2407,2	790	35,04	
	3		150,4	150,3	150,3	8,195	2412,0	790	34,95	
	1	2	153,9	150,5	153,0	8,300	2342,1	1090	47,06	
	2		149,6	153,0	153,0	8,066	2303,3	1120	48,93	
	3		156,0	149,4	149,5	7,963	2285,4	1110	47,63	
	1	4	150,2	149,4	149,3	8,060	2405,8	1310	58,38	
	2		149,2	149,8	149,5	8,065	2413,7	1325	59,28	
	3		151,2	150,1	149,6	8,240	2427,0	1360	59,92	
	1	7	150,0	149,7	149,5	8,055	2399,4	1450	64,57	
	2		150,0	149,7	149,7	8,080	2403,7	1550	69,03	
	3		151,7	150,2	150,0	8,210	2402,1	1490	65,39	
	1	28	149,7	149,2	149,3	8,010	2402,1	1610	72,08	
	2		150,9	149,1	149,3	8,090	2408,4	1570	69,78	
	3		151,3	150,3	150,4	8,170	2388,8	1460	64,20	
	1	60	151,7	149,3	149,7	8,040	2371,3	1590	70,20	
	2		148,0	150,0	149,9	8,000	2404,0	1700	76,58	
	3		147,5	149,5	149,7	7,860	2381,0	1640	74,37	
	EMĚ KS I	1	28	149,9	150,6	150,5	8,215	2417,9	1560	69,10
		2		149,6	150,1	150,2	8,150	2416,4	1600	71,25
		3		150,2	149,9	149,8	8,160	2419,4	1650	73,28
		1	60	149,3	149,9	149,8	8,040	2398,2	1740	77,75
		2		150,9	150,5	150,1	8,195	2404,0	1750	77,06
		3		149,8	150,5	150,5	8,160	2404,9	1765	78,29
EMĚ KS II	1	28	150,9	150,6	150,5	8,200	2397,5	1400	61,60	
	2		149,6	149,6	149,5	8,055	2407,5	1600	71,49	
	3		150,7	150,1	150,4	8,240	2422,1	1420	62,78	
	1	60	148,2	149,5	149,5	7,905	2386,6	1650	74,47	
	2		148,5	150,8	150,5	8,135	2413,8	1460	65,20	

	3		150,6	150,5	150,4	8,180	2399,6	1480	65,30
EMĚ KS VII	1	1	150,5	150,7	150,8	8,180	2391,7	615	27,12
	2		148,6	149,8	150,1	8,070	2415,3	605	27,18
	3		149,8	150,0	150,2	8,145	2413,3	625	27,81
	1	2	149,7	151,0	153,0	8,050	2327,6	910	40,26
	2		149,0	149,4	150,0	8,020	2401,9	910	40,88
	3		146,2	149,7	150,6	7,895	2395,3	880	40,21
	1	4	147,8	149,3	149,6	7,960	2411,3	1095	49,62
	2		149,6	149,7	149,7	8,095	2414,6	1130	50,46
	3		150,1	150,2	150,2	8,190	2418,6	1050	46,57
	1	7	152,0	150,4	150,3	8,220	2392,3	1200	52,49
	2		149,6	149,7	149,7	8,080	2410,1	1340	59,83
	3		148,0	150,1	149,9	7,965	2391,9	1260	56,72
	1	28	148,5	149,3	149,4	8,025	2422,7	1820	82,09
	2		149,6	149,2	149,4	8,115	2433,5	1830	81,99
	3		151,2	149,3	149,4	8,090	2398,8	1830	81,07
	1	60	148,4	149,3	148,9	7,990	2421,9	1840	83,05
	2		150,2	149,5	149,9	8,000	2376,7	1955	87,06
	3		147,7	149,6	149,6	8,095	2448,9	1860	84,18
Beton s mikrosilikou	1	28	150,6	149,5	149,4	7,755	2305,5	1220	54,19
	2		148,6	149,5	149,6	7,650	2301,8	1540	69,32
	3		152,3	150,2	150,6	7,465	2166,9	1460	63,82
	1	60	151,3	149,5	149,5	7,640	2259,3	1585	70,07
	2		150,5	149,9	149,0	7,625	2268,4	1550	68,71
	3		150,3	149,8	149,7	7,620	2260,8	1585	70,40

7.2. Zkouška tvrdosti odrazovým tvrdoměrem

Zkouška byla prováděna přístrojem Original Schmidt typ N.



Obrázek 24: Použitý odrazový tvrdoměr Original Schmidt N

7.2.1. Postup zkoušení

Měření bylo prováděno v souladu s ČSN EN 12504-2.

Před měřením proběhla předběžná příprava, kdy se odrazový tvrdoměr ozkoušel na referenční kovadlině. Poté se provedly zkoušky na tělesech. Všechny hodnoty byly zapsány do protokolu. Jednotlivé odrazy se prováděly min. 25 mm od sebe a 25 mm od okraje. Pokud bylo místo vtisku poškozené nebo se hodnota odrazu velmi lišila od ostatních, měření se vyloučilo a bylo nahrazeno jiným, tak aby bylo minimálně 9 hodnot. Po ozkoušení byla provedena referenční kontrola. Hodnoty odrazu byly v mezích dle výrobce.

Zkoušky těles probíhaly dvěma způsoby. Na tělese v poloze „Volně“ položeném na podlaze byly odrazy prováděny svisle dolů na dvou protilehlých plochách, reprezentujících staveništní podmínky a na tělese v poloze „V lisu“, které bylo upnuto v lisu a zatíženo na 10 % své pevnosti dle normy ČSN 73 1373, byly odrazy prováděny vodorovně na dvou protilehlých plochách v počtu minimálně 9 odrazů v celé ploše. Tento postup nebyl proveden na tělesech stáří 28 dnů. [3, 10]



Obrázek 25: Poloha „Volně“



Obrázek 26: Poloha "V lisu"

7.2.2. Zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty budou zpracovány dle postupu ČSN EN 12504-2 a ČSN 73 1373, které jsou uvedené v kapitole 3.3 resp. 3.4.

7.2.2.1. Zpracování dle ČSN EN

Stanovila se střední hodnota všech hodnot odrazů a odchylka 30 %. Hodnoty, které přesáhly odchylku, byly vyloučeny. Pokud se vyloučilo více jak 20 % hodnot, měření bylo vyřazeno. Poté se stanovila betonu pevnost.

Byl vytvořen kalibrační vztah podle alternativy 2 popsané v ČSN EN 13791 pro beton každého stáří. Testována byla pouze 3 tělesa jedné třídy betonu. Norma požaduje minimálně 9 těles pro každou křivku. Toto kritérium bylo zanedbáno, protože se testovala již vyrobená tělesa, u kterých nebyl ovlivněn počet. Díky tomu jsou křivky nevěrohodné, tudíž tyto křivky jsou pouze pro názornou ukázkou, jak by mohly vypadat kalibrační vztahy pro daný beton. [3, 5]

7.2.2.2. Zpracování dle ČSN

Bylo zkontrolováno, zda bylo provedeno minimálně 9 platných měření na tělese. Všechny hodnoty odrazů byly převedeny na pevnost dle patřičné

kalibrační křivky. Stanovila se střední hodnota pevností a odchylka 20 %. Pevnosti, které přesáhly odchylku, byly vyloučeny. Bylo zapotřebí minimálně 7 platných hodnot, jinak by bylo celé měření zamítnuto. Dále byl vypočten součinitel α a stanovena upřesněná hodnota pevnosti f_b . [10]

7.2.3. Kalibrační vztahy

Kalibrační křivky, které se používaly pro odhad pevností, jsou:

- Kalibrační křivky vytvořené výrobcem
- Kalibrační křivky uvedené v ČSN 73 1373
- Základní kalibrační křivky uvedené v ČSN EN 13791

Křivky ČSN a od výrobce byly použity pro porovnání s výsledky zkoušek a posouzení zda ukazují relativně správné hodnoty pevnosti jak v rané fázi vývoje betonu, tak i při větším stáří. Všechny materiály a kalibrační vztahy mají lineární regresi v grafu zobrazenou přerušovanou čarou s uvedenou rovnicí.

7.3. Zkouška měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

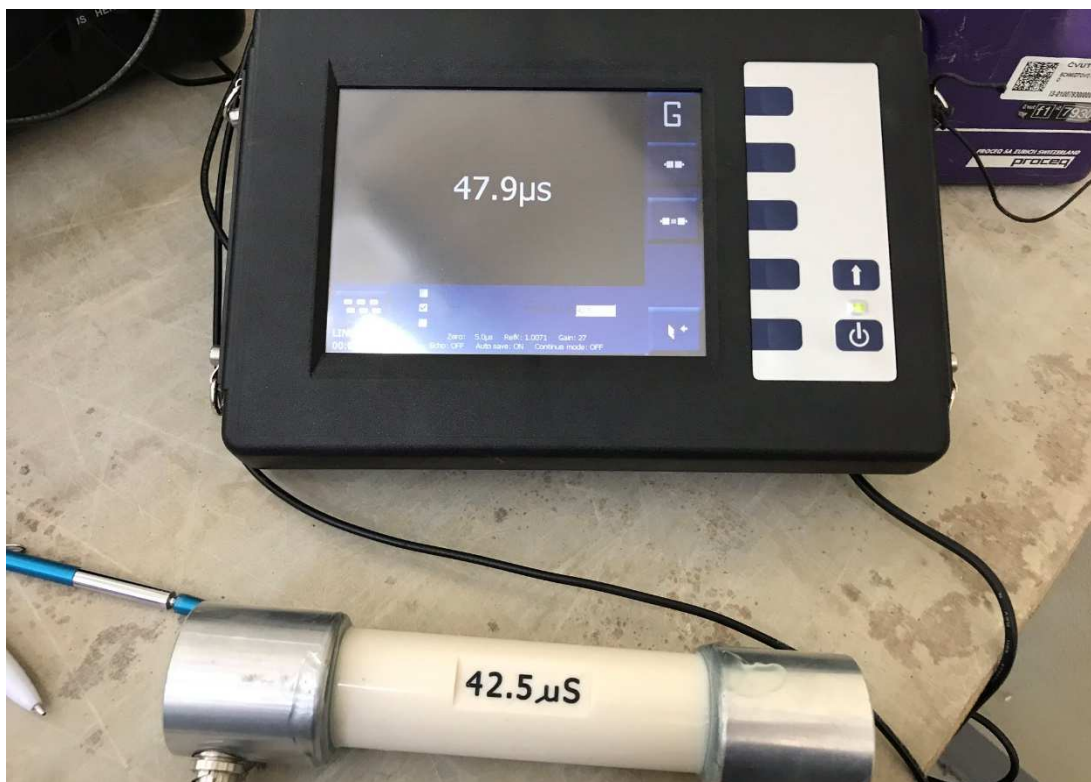
Zkouška byla prováděna přístrojem Matest C372N, HIGH PERFORMANCE ULTRASONIC TESTER.

7.3.1. Postup zkoušení

Měření bylo prováděno v souladu s ČSN EN 12504-4 a s ČSN 73 1371.

Přístroj vyhovoval požadavkům normy ČSN EN. Přístroj měl, jak osciloskop kde se ukazovalo čelo impulsu, tak i měřič doby s přímým čtením.

Nejprve se na přístroji provedla kalibrace pomocí přiloženého válce se zadaným časem prozvučení. Ukázka je na obrázku 27. Tímto se v přístroji nastavila korelace času, se kterou následně pracuje celé měření.



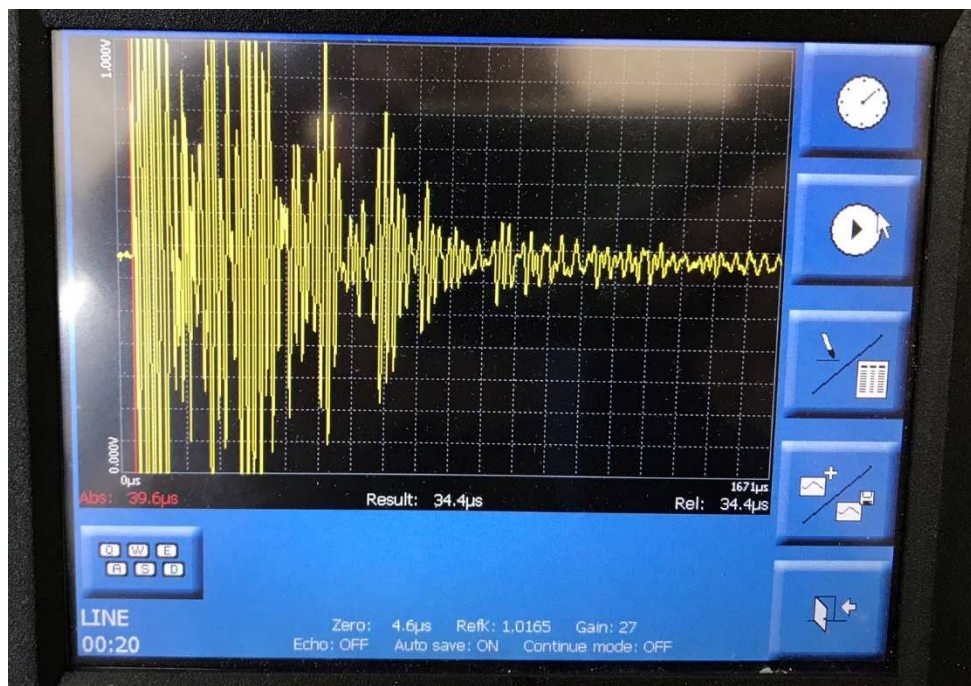
Obrázek 27: Použitý ultrazvukový přístroj Matest C372N při kalibraci

Sondy s kmitočtem 54 kHz byly umístěny na protilehlé strany tělesa tak, aby došlo k přímému prozvučení. Sondy se osadily na povrch betonu pomocí indiferentního gelu jako akustického média. Bylo vybráno takové místo, aby v ploše sondy bylo co nejméně kaveren a dutin na obou stranách. Sondy se poté přitlačily k povrchu pro lepší akustický přenos.



Obrázek 28: Osazení sondy na povrch betonu

Následně se stanovila délka měřící základny pomocí posuvného měřítka na desetiny milimetru. Změřila se doba průchodu impulzu. Náběžné čelo je dobře patrné na display přístroje, kde je označené červenou čarou. Dole uprostřed je ukázán výsledek měření času.



Obrázek 29: Display přístroje zobrazující osciloskop

7.3.2. Zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty budou zpracovány dle postupu ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1371, které jsou uvedené v kapitole 4.4 resp. 4.5.

Stanovila se střední hodnota všech měření časů a vypočetla se rychlost šíření rychlosti impulzu.

Vytvoření kalibračního vztahu podle alternativy 2 popsané v ČSN EN 13791 pro beton každého stáří. Testována byla pouze 3 tělesa jedné třídy betonu. Norma požaduje minimálně 9 těles pro každou křivku. Toto kritérium bylo zanedbáno, protože se testovala již vyrobená tělesa, u kterých nemohl být ovlivněn jejich počet. Díky tomu jsou křivky nevěrohodné, tudíž jsou pouze pro názornou ukázkou, jak by mohly vypadat kalibrační vztahy pro daný beton.

Dle ČSN 73 1371 se stanovil dynamický modul pružnosti (Poissonovo číslo bylo stanoveno $v_{cu} = 0,15$ tím součinitel $k_3 = 1,028$) a podle zmenšovacího koeficientu byl přepočten (pro C30/37 je stanoven 0,83) na statický modul

pružnosti. Dále byl vypočten součinitel α a stanovena upřesněná hodnota pevnosti f_b . [3, 5, 10]

7.3.3. Kalibrační vztahy

Kalibrační křivky, které se používaly pro odhad pevností, jsou:

- Kalibrační křivky uvedené v ČSN 73 1371
- Základní kalibrační křivky uvedené v ČSN EN 13791

Dále křivka ČSN byla použita pro porovnání s výsledky zkoušek a posouzení zda ukazuje relativně správné hodnoty pevnosti jak v rané fázi vývoje betonu, tak i při větším stáří. Všechny materiály a kalibrační vztahy mají lineární regresi v grafu zobrazenou přerušovanou čarou s uvedenou rovnicí.

8. Výsledky a diskuze

Každý den proběhly testy jak odrazovým tvrdoměrem, tak ultrazvukem.

Regresní závislosti jsou pouze pro znázornění, jak se jednotlivé měření liší od obecných kalibračních vztahů.

8.1. Výsledky zkoušek

8.1.1. Odrazový tvrdoměr

Hodnoty byly zpracovány dle postupu zpracovaného v kapitolách 3.3, 3.4, 5.1.

Tabulka 5: Výsledky odrazový tvrdoměr

Směs betonu	Těleso	Stáří [dny]	Poloha	ČSN EN			ČSN (křivka - výrobce)			ČSN (křivka - norma)		
				Ø hodnota odrazu	Pevnost dle výrobce f _{be}	Δf	f _{be} [MPa]	α	f _b [MPa]	f _{be} [MPa]	α	f _b [MPa]
Referenční beton	1	28	„Volně“ svisle dolů	30,0	30,5	48,0	30,9	2,3	71	29,4	2,4	71
	2			30,0	30,5		29,7		68	28,4		68
	3			32,0	33,8		31,8		73	30,2		73
	1	60	„Volně“ svisle dolů	31,0	32,1	47,8	31,7	2,3	74	30,2	2,5	74
	2			31,0	32,1		31,6		74	30,0		74
	3			32,0	33,8		31,2		73	29,7		73
	1		„V lisu“ vodorovně	41,0	44,6	33,0	43,1	1,6	70	41,4	1,7	71
	2			43,0	48,3		50,7		83	48,5		83
	3			40,0	42,7		41,8		68	40,1		68
Referenční beton 2	1	1	„Volně“ svisle dolů	18,0	Nevyhovuje		Nevyhovuje					
	2			18,0	Nevyhovuje		Nevyhovuje					
	3			18,0	Nevyhovuje		Nevyhovuje					
	1		„V lisu“ vodorovně	28,0	19,8	20,3	21,3	1,6	35	19,2	1,8	34
	2			28,0	22,0		22,5		36	21,0		37
	3			28,0	22,0		22,0		36	20,0		35
	1	2	„Volně“ svisle dolů	22,0	17,9	42,1	16,5	2,7	45	15,0	3,0	45
	2			22,0	17,9		18,7		51	18,3		55
	3			22,0	17,9		17,5		48	14,2		43
	1		„V lisu“ vodorovně	31,0	23,3	26,6	26,6	1,7	46	25,4	1,8	46
	2			32,0	28,6		28,2		49	26,7		48
	3			32,0	28,6		28,7		49	27,2		49
	1	4		25,0	22,4	49,2	21,9	2,9	63	20,7	3,0	62

Referenční beton 2	2	„Volně“ svisle dolů	23,0	19,4	31,4	19,4	1,8	56	19,3	1,9	58		
	3		24,0	20,9		20,2		58	19,0		57		
	1		35,0	26,9		33,8		60	32,3		60		
	2	„V lisu“ vodorovně	35,0	33,7	33,8	1,8	34,3	1,8	61	1,9	61		
	3		34,0	32,0			31,7		56		30,2	56	
	1		„Volně“ svisle dolů	28,0			27,2		49,9		2,7	26,0	2,9
	2	27,0		25,6	23,9	65	22,6	65					
	3	25,0		22,4	23,4	64	22,2	64					
	1	„V lisu“ vodorovně	37,0	30,6	33,8	1,8	34,9	1,8	61	1,8	61		
	2		39,0	40,9			41,2		72		39,6	73	
	3		38,0	39,1			37,1		65		35,6	65	
	1	28	„Volně“ svisle dolů	30,0	30,5	35,8	2,0	30,7	2,1	62	2,1	62	
	2			32,0	33,8			33,2		67		31,6	67
	3			35,0	39,1			38,7		78		36,5	77
	1	60	„Volně“ svisle dolů	32,0	33,8	47,8	2,4	33,2	2,5	78	2,5	78	
	2			30,0	30,5			30,2		71		28,8	71
	3			31,0	32,1			30,6		72		29,2	72
	1	„V lisu“ vodorovně	39,0	40,9	36,4	1,7	41,5	1,8	72	1,8	72		
2	40,0		42,7	42,8			75		41,0		75		
3	40,0		42,7	42,6			74		40,9		74		
EMĚ KS I	1	28	„Volně“ svisle dolů	26,0	24,0	55,7	2,8	25,6	3,0	72	24,4	72	
	2			28,0	27,2			25,4		72	24,1	72	
	3			26,0	24,0			24,7		70	23,5	70	
	1	60	„Volně“ svisle dolů	31,0	32,1	53,9	2,3	31,0	2,4	71	30,2	72	
	2			33,0	35,6			36,4		84	34,4	82	
	3			32,0	33,8			34,0		78	32,9	79	
	1	„V lisu“ vodorovně	38,0	39,1	41,2	1,9	39,4	2,0	74	2,0	37,8	74	
	2		40,0	42,7			42,3		79		40,6	79	
	3		40,0	42,7			42,6		80		40,9	80	
EMĚ KS II	1	28	„Volně“ svisle dolů	28,0	27,2	40,6	2,3	26,5	2,5	62	25,2	62	
	2			27,0	25,6			25,2		59	24,0	59	
	3			30,0	30,5			31,7		75	30,2	74	
	1	60	„Volně“ svisle dolů	31,0	32,1	39,4	2,1	32,5	2,2	67	30,9	67	
	2			32,0	33,8			35,3		73	33,4	72	
	3			32,0	33,8			31,9		66	30,3	66	
	1	„V lisu“ vodorovně	41,0	44,6	27,1	1,6	44,0	1,7	71	1,7	42,2	71	
	2		40,0	42,7			41,8		68		40,1	67	
	3		40,0	42,7			41,1		66		40,2	67	
EMĚ KS VII	1	1	„Volně“ svisle dolů	16,0	Nevyhovuje		Nevyhovuje						
	2			17,0	Nevyhovuje		Nevyhovuje						
	3			18,0	Nevyhovuje		Nevyhovuje						

EMĚ KS VII	1	„V lisu“ vodorovně	27,0	20,2	12,9	20,3	1,3	27	17,0	1,5	25	
	2		28,0	22,0		23,0		31	21,1		31	
	3		27,0	20,4		18,6		25	16,9		25	
	1	„Volně“ svisle dolů	22,0	17,9	32,9	17,4	2,2	37	16,0	2,3	37	
	2		23,0	19,4		18,3		39	16,9		39	
	3		24,0	20,9		20,7		44	19,4		45	
	1	„V lisu“ vodorovně	33,0	24,7	15,6	30,7	1,3	40	29,2	1,4	40	
	2		33,0	30,3		30,3		40	28,8		40	
	3		34,0	32,0		31,4		41	29,9		41	
	1	„Volně“ svisle dolů	26,0	24,0	37,5	25,2	2,1	52	23,9	2,2	52	
	2		26,0	24,0		23,4		48	22,1		48	
	3		25,0	22,4		22,4		46	21,2		46	
	1	„V lisu“ vodorovně	34,0	28,4	19,9	31,1	1,5	46	29,6	1,6	46	
	2		35,0	33,7		33,3		50	31,8		50	
	3		35,0	33,7		33,7		50	32,3		50	
	1	„Volně“ svisle dolů	25,0	22,4	43,2	22,2	2,3	51	21,0	2,4	51	
	2		27,0	25,6		26,6		61	25,4		61	
	3		26,0	24,0		24,7		57	23,4		57	
	1	„V lisu“ vodorovně	36,0	32,1	23,6	36,2	1,5	56	34,7	1,6	56	
	2		37,0	37,3		36,5		57	35,0		57	
	3		37,0	37,3		36,5		57	35,0		57	
1	28	„Volně“ svisle dolů	31,0	32,1	61,8	32,1	2,5	82	30,6	2,7	82	
2			31,0	32,1		32,7		83	31,1		83	
3			31,0	32,1		31,8		81	30,3		81	
1	60	„Volně“ svisle dolů	34,0	37,3	57,8	36,1	2,4	87	34,2	2,5	87	
2			34,0	37,3		36,4		88	34,4		88	
3			31,0	32,1		32,9		79	31,3		80	
1	60	„V lisu“ vodorovně	42,0	46,4	43,8	46,6	1,9	88	44,7	2,0	87	
2			41,0	44,6		44,8		84	42,9		84	
3			41,0	44,6		44,1		83	42,4		83	
Beton s mikrosilikou	1	28	„Volně“ svisle dolů	28,0	27,2	38,6	27,6	2,3	65	26,3	2,5	65
	2			29,0	28,8		29,2		68	27,9		69
	3			26,0	24,0		23,2		54	22,0		54
	1	60	„Volně“ svisle dolů	24,0	20,9	59,6	20,5	3,3	68	19,2	3,6	68
	2			25,0	22,4		21,3		71	20,1		71
	3			24,0	20,9		20,8		69	19,5		69
	1	60	„V lisu“ vodorovně	37,0	37,3	39,9	37,4	1,9	71	35,9	2,0	71
	2			36,0	35,5		36,1		69	34,6		69
	3			36,0	35,5		36,1		69	34,6		69

8.1.2. Ultrazvuk

Hodnoty byly zpracovány dle postupu uvedeného 4.4, 4.5 a 5.1.

Tabulka 6: Výsledky ultrazvuk

4.4 Výsledek zkoušky	Těleso	Stáří	Průměrný čas	Rychlost šíření impulsu	ČSN EN		ČSN					
					f_R	Δf	Dynamický modul pružnosti E_{cu}	Vypočtený statický modul pružnosti	Skutečný modul pružnosti	f_{be}	α	f_b
Referenční beton	1	28	Měření prováděno na přístroji	4934	56,4	3,7	56,40	46,81	38,70	52,5	1,3	69,0
	2			5017	67,6		58,61	48,65	40,60	56,0		73,6
	3			4934	56,4		55,95	46,44	52,5	69,0		
	1	60	31,63	4766	39,0	24,4	52,17	43,30	45,8	1,6	71,9	
	2		31,10	4821	44,1		53,36	44,29	47,9		75,3	
	3		31,17	4809	43,0		52,92	43,93	47,4		74,5	
Referenční beton 2	1	1	33,87	4417	12,1	23,7	44,36	33,6	1,1	37,2		
	2		34,77	4319	7,2		42,53	30,6		33,9		
	3		34,37	4370	9,5		43,63	32,1		35,6		
	1	2	32,70	4601	24,0	19,1	46,95	39,7	1,2	48,2		
	2		33,10	4548	20,3		45,13	37,9		46,0		
	3		32,23	4627	26,4		46,34	40,6		49,4		
	1	4	31,93	4688	31,5	16,3	50,07	42,8	1,3	57,7		
	2		32,10	4660	28,9		49,65	41,8		56,3		
	3		31,20	4803	42,0		53,01	47,2		63,6		
	1	7	31,47	4781	40,0	20,5	51,95	43,12	1,5	67,6		
	2		31,67	4720	34,2		50,72	42,10		44,0	64,2	
	3		31,47	4776	40,0		51,89	43,07		46,2	67,3	
	1	28	Měření prováděno na přístroji	4747	37,0	22,3	51,26	42,55	40,90	45,1	1,5	67,5
	2			4777	40,0		52,05	43,20	46,2	69,3		
	3			4777	40,0		51,63	42,85	46,2	69,3		
	1	60	31,73	4711	33,3	36,0	49,85	41,38	1,6	43,7	71,8	
	2		31,40	4779	40,0		51,99	43,15		46,3	76,0	
	3		31,53	4736	36,1		50,58	41,98		44,6	73,3	
EMĚ KS I	1	28	Měření prováděno na přístroji	4886	51,7	7,8	54,67	45,37	39,10	50,5	1,4	68,5
	2			4983	62,5		56,82	47,16	38,70	54,6		74,0
	3			4934	56,4		55,78	46,30	52,5	71,2		

EMĚ KS I	1	60	31,43	4759	38,0	35,8	51,44	42,69		45,5	1,7	77,0
	2		31,57	4752	37,0		51,41	42,67		45,2		76,5
	3		31,33	4798	42,0		52,44	43,53		47,0		79,6
EMĚ KS II	1	28	Měření prováděno na přístroji	4934	56,4	1,5	55,28	45,88	38,70	52,5	1,2	65,3
	2			4934	56,4		55,51	46,07	39,70	52,5		65,3
	3			4934	56,4		55,84	46,35		52,5		65,3
EMĚ KS II	1	60	31,73	4725	34,2	27,3	50,45	41,88		44,2	1,6	68,7
	2		31,97	4700	32,4		50,50	41,92		43,3		67,3
	3		31,80	4730	35,1		50,83	42,19		44,4		69,0
EMĚ KS VII	1	1	34,43	4370	9,5	16,8	43,26			32,2	0,9	27,9
	2		34,77	4307	6,8		42,43			30,3		26,2
	3		34,23	4374	9,5		43,72			32,3		28,0
	1	2	34,70	4323	7,2	17,5	41,20			30,7	1,2	35,6
	2		32,97	4535	18,9		46,78			37,4		43,4
	3		33,23	4507	17,5		46,07			36,5		42,3
	1	4	32,57	4585	23,2	22,4	48,01			39,2	1,2	48,2
	2		32,40	4626	26,4		48,93			40,6		50,0
	3		32,73	4590	23,2		48,26			39,3		48,4
	1	7	32,70	4603	24,0	26,1	48,01	39,85		39,8	1,4	54,6
	2		31,87	4701	32,4		50,44	41,86		43,3		59,5
	3		32,50	4609	24,8		48,13	39,94		40,0		54,9
	1	28	Měření prováděno na přístroji	4983	62,5	5,2	56,97	47,29	41,60	54,6	1,5	80,2
	2			4967	61,2		56,86	47,19	40,40	53,9		79,2
	3			5068	74,2		58,35	48,43		58,3		85,7
1	60	30,70	4855	48,4	29,8	54,07	44,87		49,3	1,8	86,3	
2		31,30	4778	40,0		51,39	42,66		46,3		81,0	
3		30,77	4864	48,4		54,87	45,54		49,6		86,9	
Beton s mikrosilikou	1	28	Měření prováděno na přístroji	4702	32,4	20,0	48,27	40,07	36,80	43,4	1,5	63,0
	2			4702	32,4		48,20	40,00	34,90	43,4		63,0
	3			4673	29,7		44,81	37,19		42,3		61,4
Beton s mikrosilikou	1	60	32,57	4596	24,0	45,2	45,21	37,52		39,6	1,9	73,3
	2		33,23	4510	17,5		43,70	36,27		36,6		67,8
	3		33,17	4514	17,5		43,62	36,20		36,7		68,1

8.2. 1. den stáří betonu

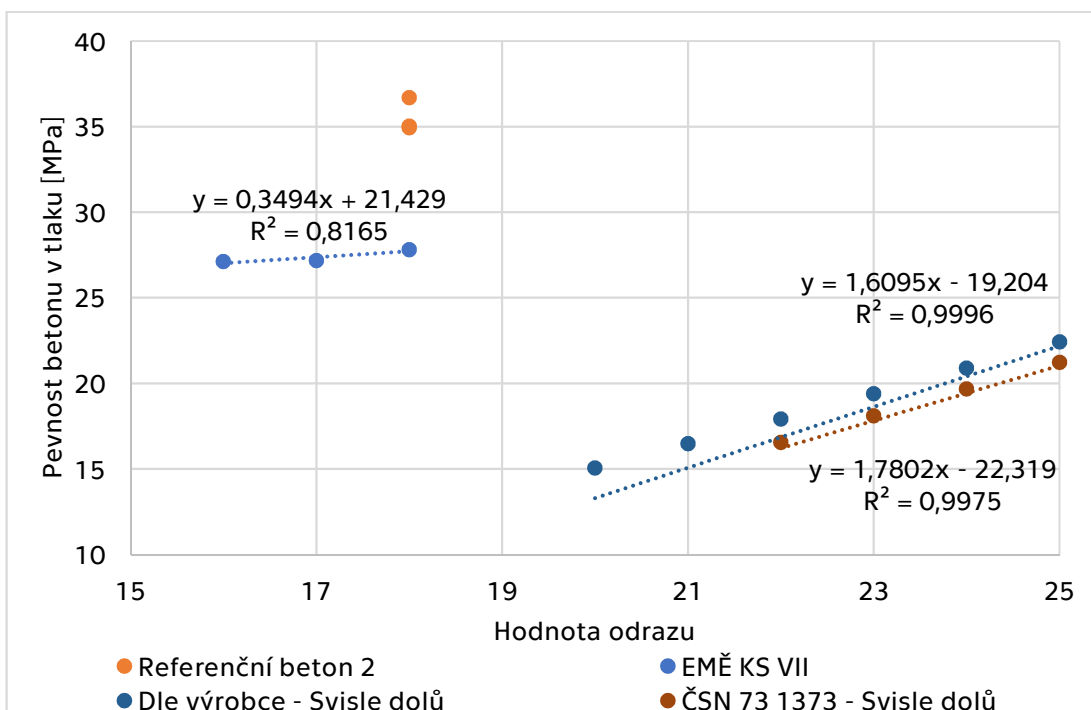
Zkoušky proběhly 28. 4. 2020.

8.2.1. Odrazový tvrdoměr

Testování bylo ve dvou zmíněných polohách. V poloze „Na zemi“ tato zkouška nevyšla, protože hodnota odrazů byla pod mezí kalibračních křivek.

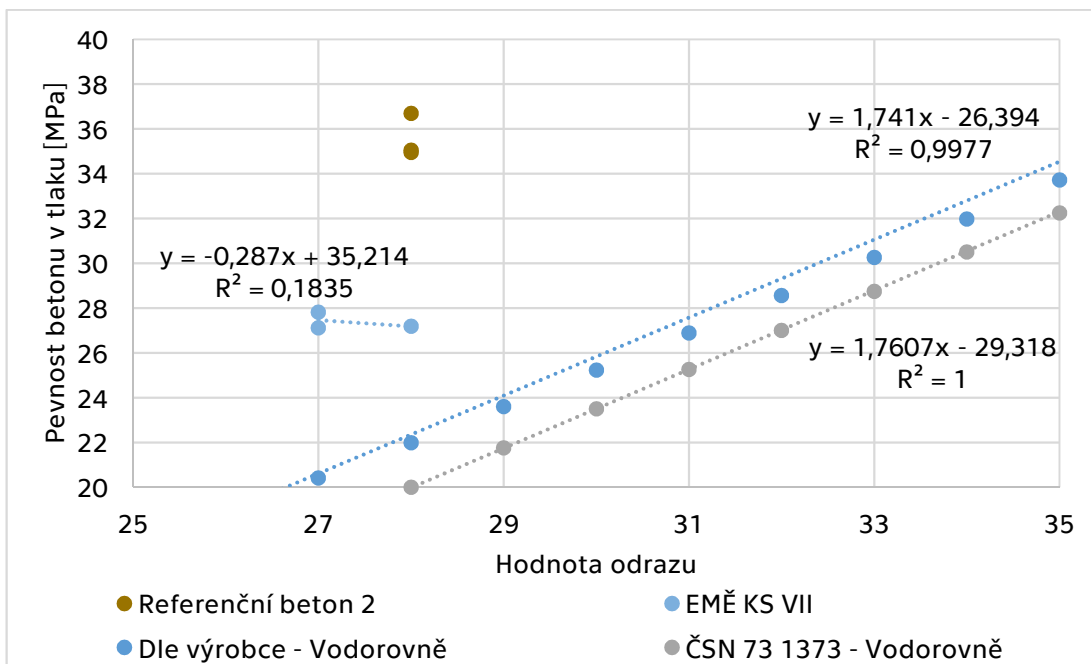
8.2.1.1. Zhodnocení pevnosti

U polohy „V lisu“ se zaznamenaly odrazy v průměru o 10 jednotek větší než v přechodí poloze.



Obrázek 30: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 1. den

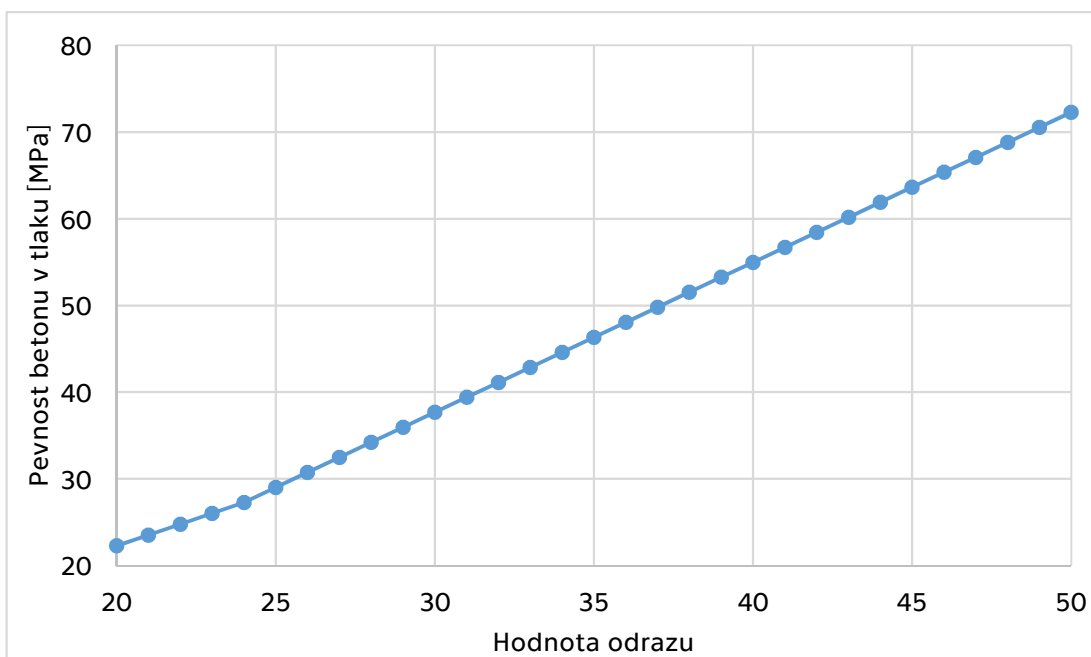
Na grafu je vidět, že hodnoty odrazů leží mimo rozsah křivek, tudíž nelze odvodit hodnoty pevností pro tento typ polohy betonu daného stáří.



Obrázek 31: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 1. den

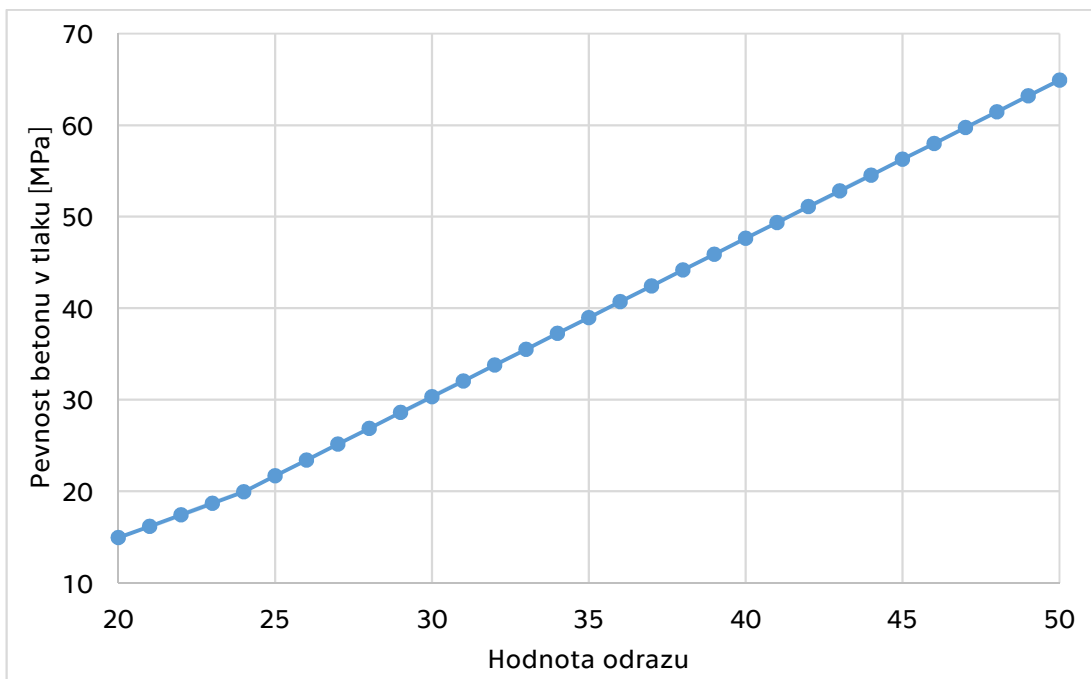
Z následujícího grafu je vidět, že odrazy provedené na betonu EMĚ KS VII byly blíže kalibračním křivkám. Referenční beton 2 zaznamenal velmi podobné hodnoty odrazu jako směs s popínkem, ale rozdílné pevnosti v tlaku.

8.2.1.2. Kalibrační vztahy



Obrázek 32: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, Referenční beton 2, 1. den, poloha „V lisu“

Rozsah použití: hodnota odrazu 26 až 30.

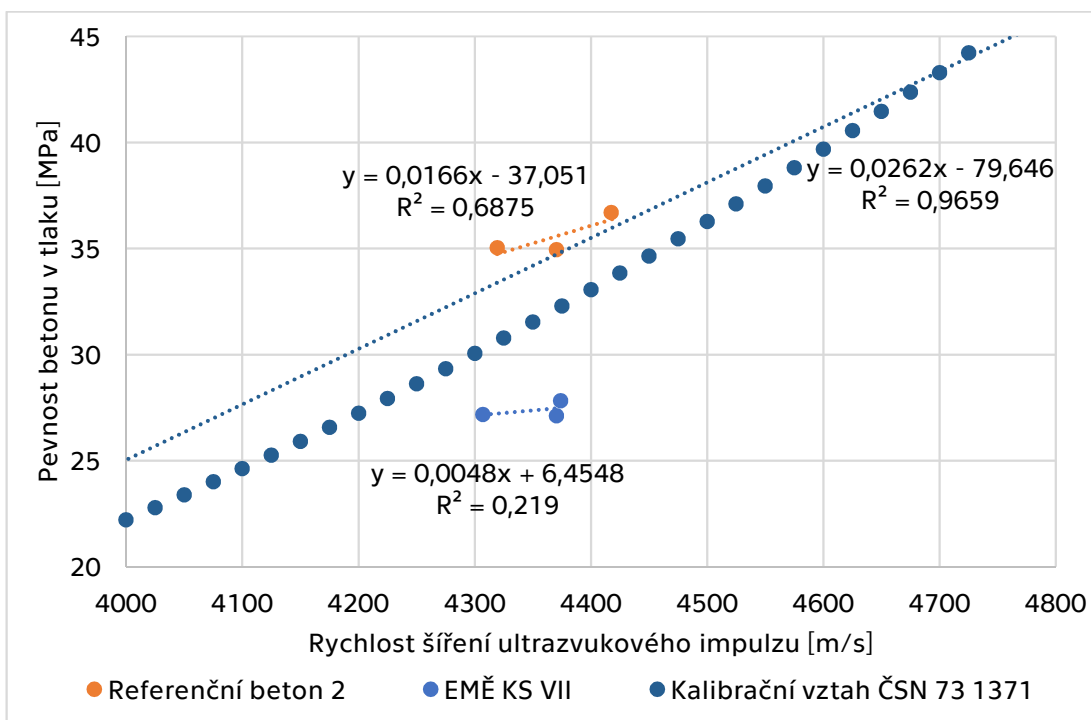


Obrázek 33: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, EMĚ KS VII, 1. den, poloha „V lisu“

Rozsah použití: hodnota odrazu 25 až 30.

8.2.2. Ultrazvuk

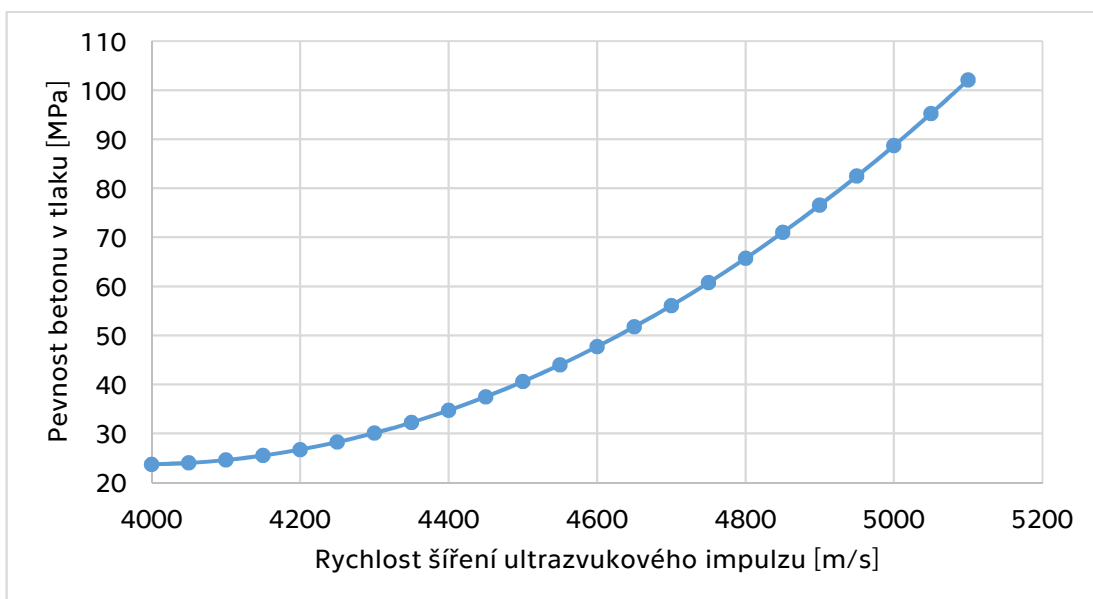
8.2.2.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 34: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, 1. den

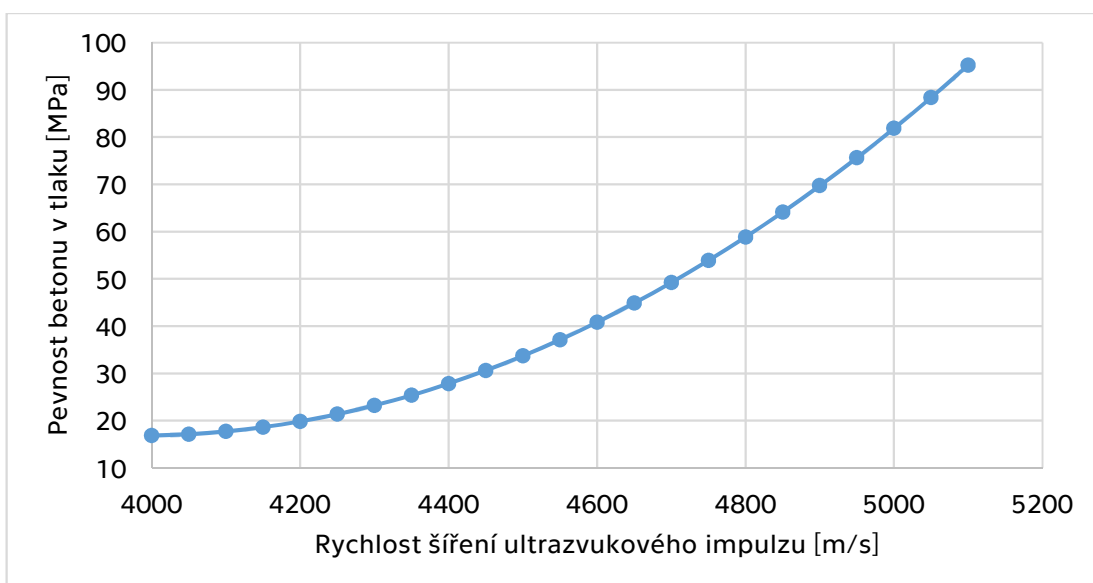
Z následujícího grafu je znatelné, že při nižších pevnostech, které má mladý beton, je ultrazvuková metoda poměrně přesná. Referenční beton 2 vykazuje relativně přesné hodnoty dle kalibrační křivky. Beton EMĚ KS VII je zřejmě nadhodnocen metodou, což se stalo pouze jedenkrát, jinak metoda ukazovala menší hodnoty než zkoušení pevnosti v tlaku. Regresní závislosti směsí betonu mají obdobné orientace jako směr směrnice kalibrační křivky.

8.2.2.2. Kalibrační vztahy



Obrázek 35: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, Referenční beton 2, 1. den

Rozsah použití: 4,27 až 4,47 km/s.



Obrázek 36: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, EMĚ KS VII, 1. den

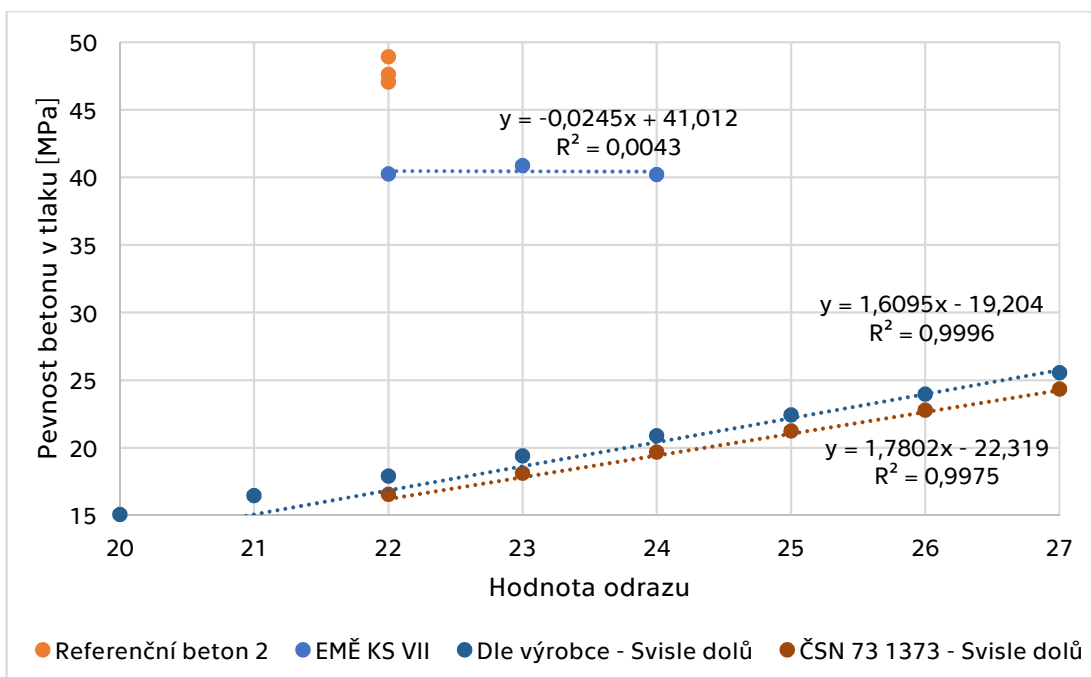
Rozsah použití: 4,26 až 4,42 km/s.

8.3. 2. den stáří betonu

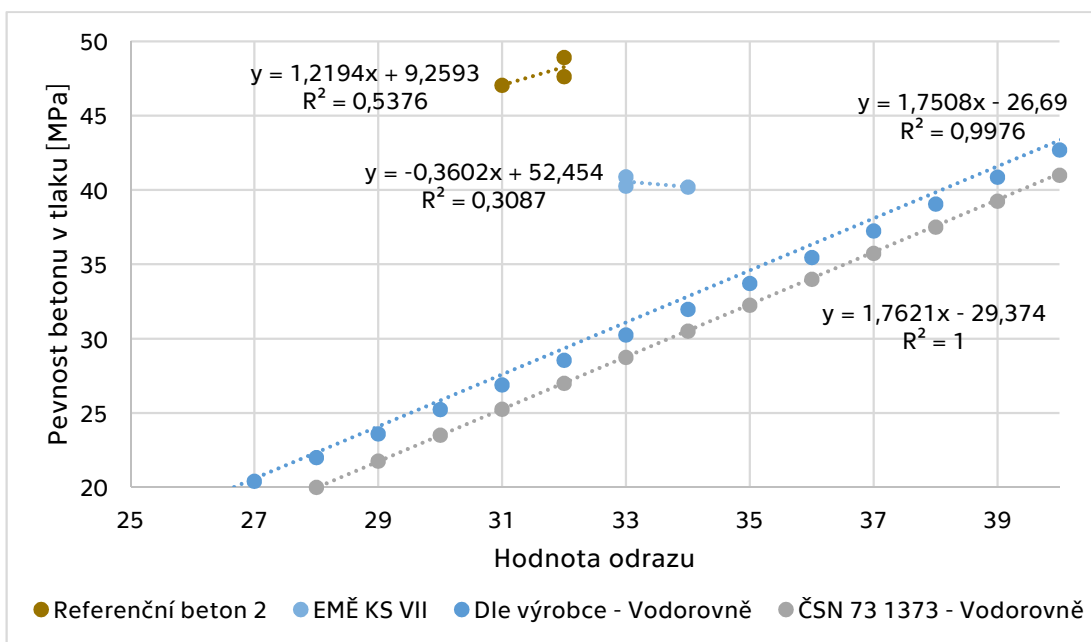
Zkoušky proběhly 29. 4. 2020

8.3.1. Odrazový tvrdoměr

8.3.1.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 37: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 2. den

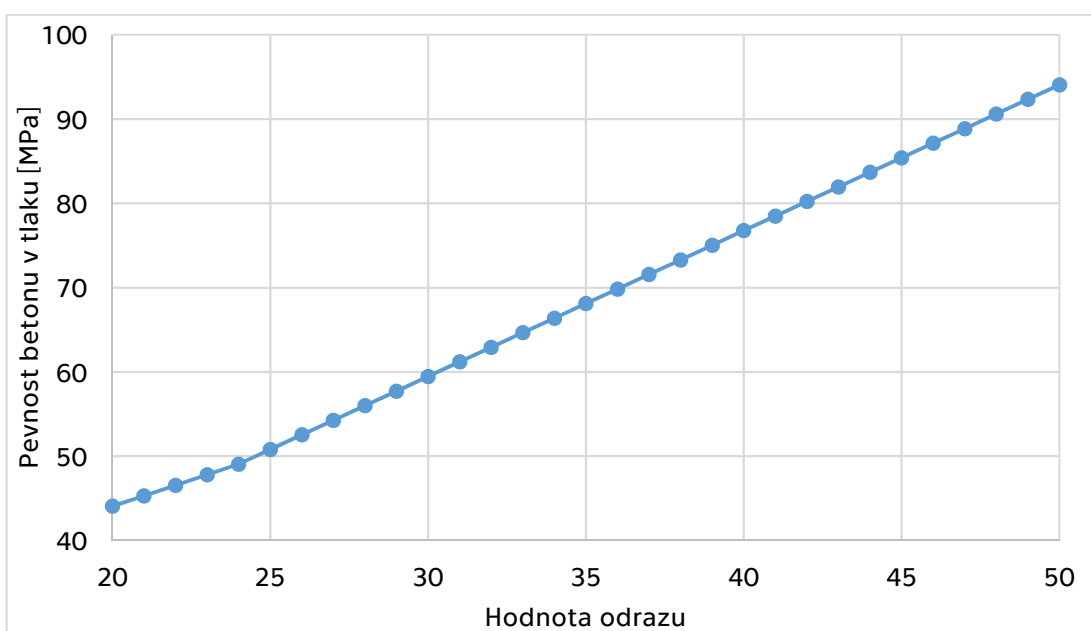


Obrázek 38: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 2. den

Této zkoušce vyhovovala poloha „Volně“. Z testování je patrné, že hodnoty odrazů vycházely stejně i při různých pevnostech směsí betonu.

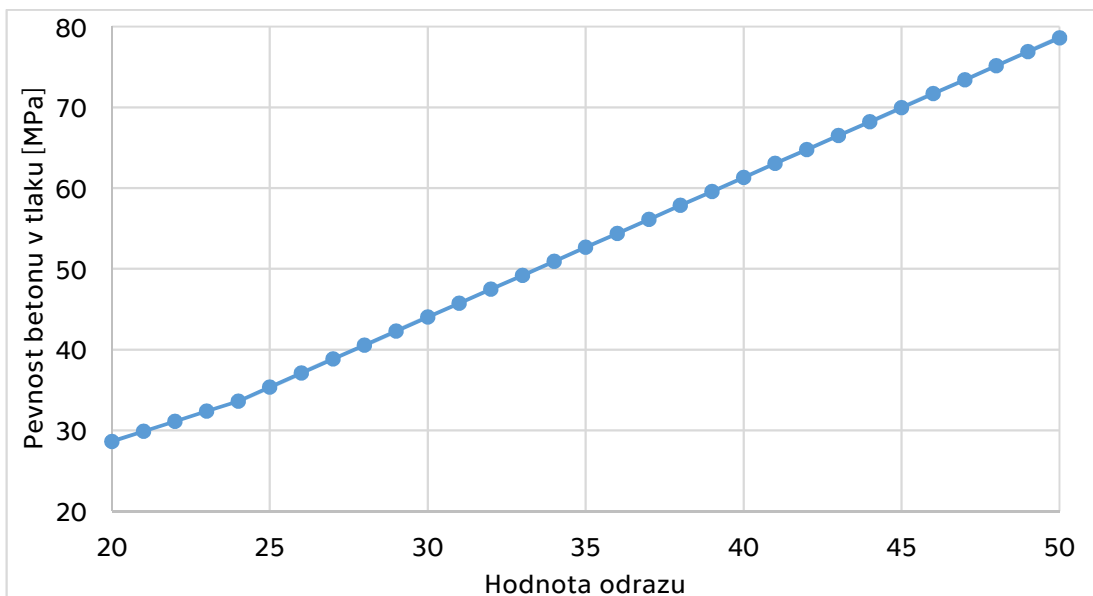
Poloha „V lisu“ vykazuje pro Referenční beton 2 menší odrazy ale vyšší pevnosti, naopak pro beton EMĚ KS VII větší odrazy ale menší pevnosti. Proto toto testování nebylo přesné, avšak tato metoda vychází přesněji než poloha „Volně“. Na vině může být tvrdší povrch EMĚ KS VII než má Referenční beton 2. Jak je patrné z grafu, pro beton EMĚ KS VII jsou tyto kalibrační vztahy přesnější než pro Referenční beton 2.

8.3.1.2. Kalibrační vztahy



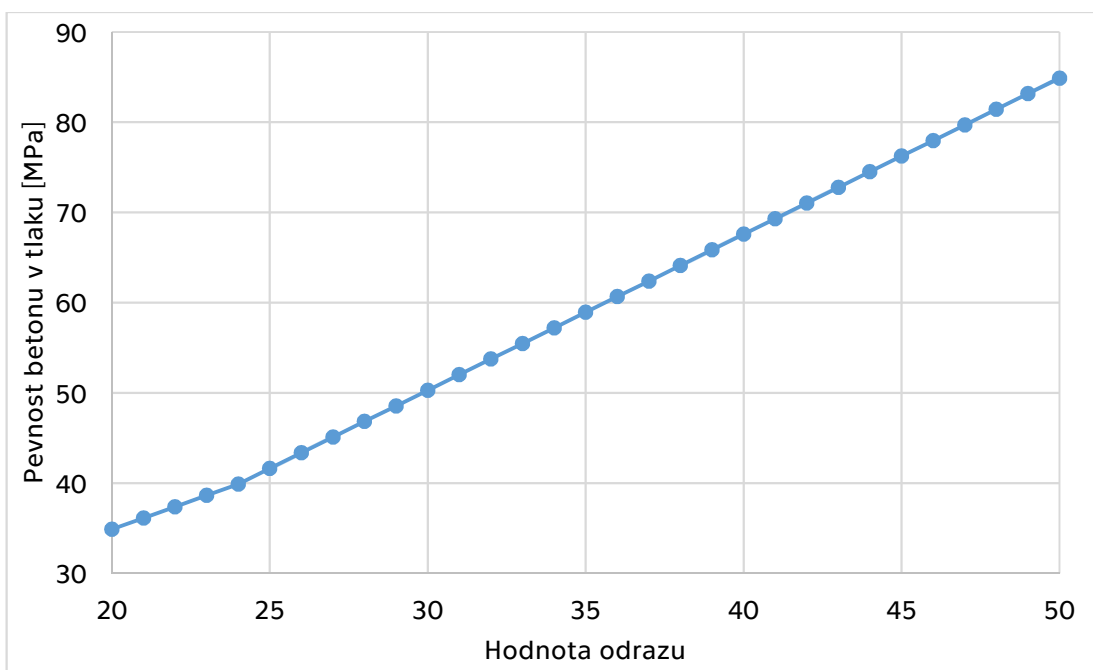
Obrázek 39: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr svíse dolů, Referenční beton 2, 2. den, poloha „Volně“

Rozsah použití: hodnota odrazu 20 až 24.



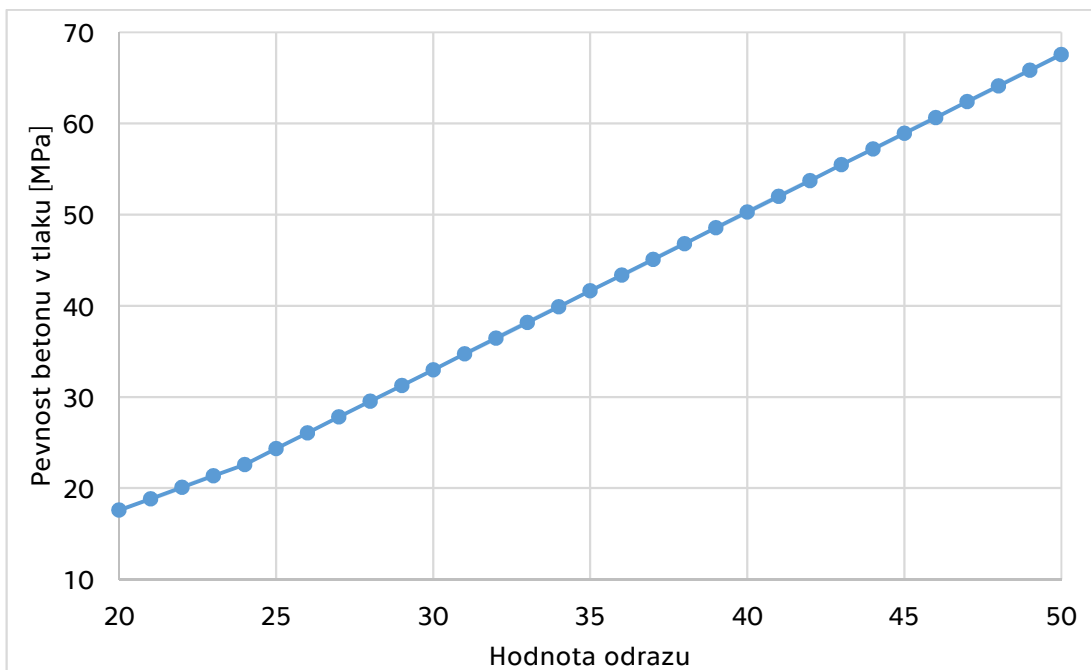
Obrázek 40: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, Referenční beton 2, 2. den, poloha „V lisu“

Rozsah použití: hodnota odrazu 29 až 34.



Obrázek 41: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr svisle dolů, EMČ KS VII, 2. den, poloha „Volně“

Rozsah použití: hodnota odrazu 20 až 26.

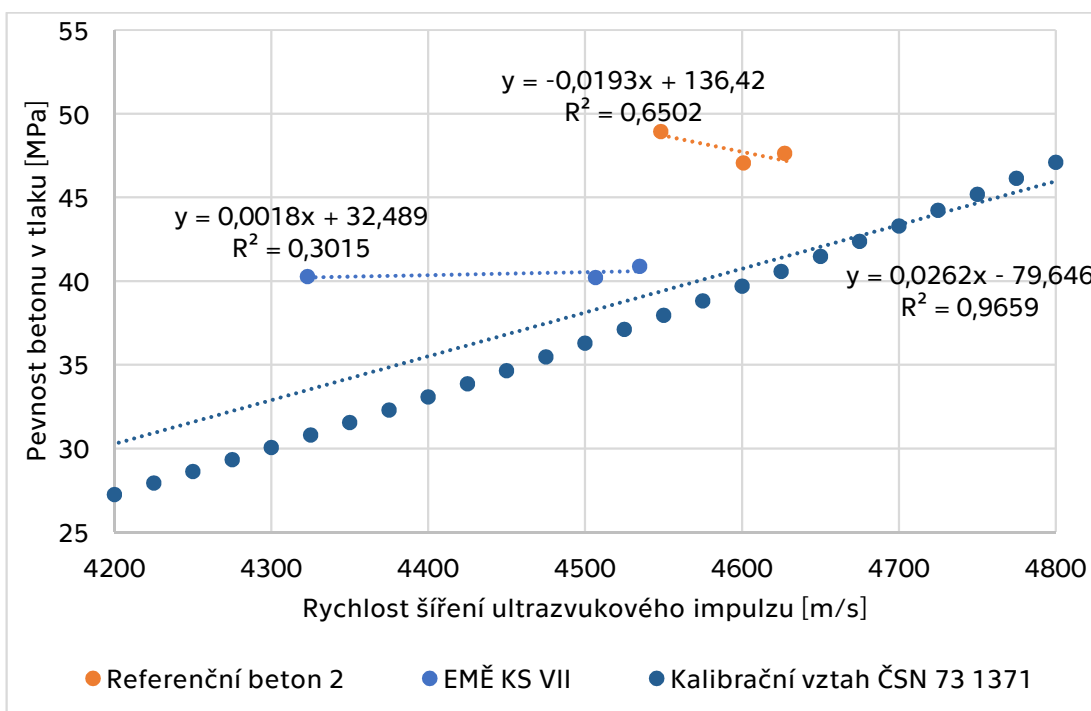


Obrázek 42: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, EMĚ KS VII, 2. den, poloha „V lisu“

Rozsah použití: hodnota odrazu 31 až 36.

8.3.2. Ultrazvuk

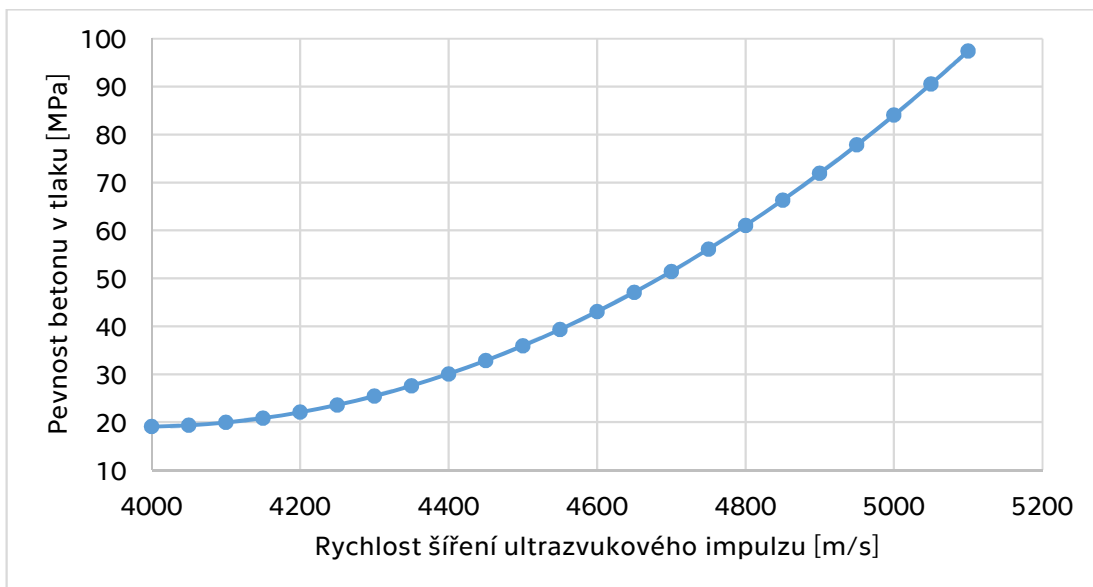
8.3.2.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 43: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, 2. den

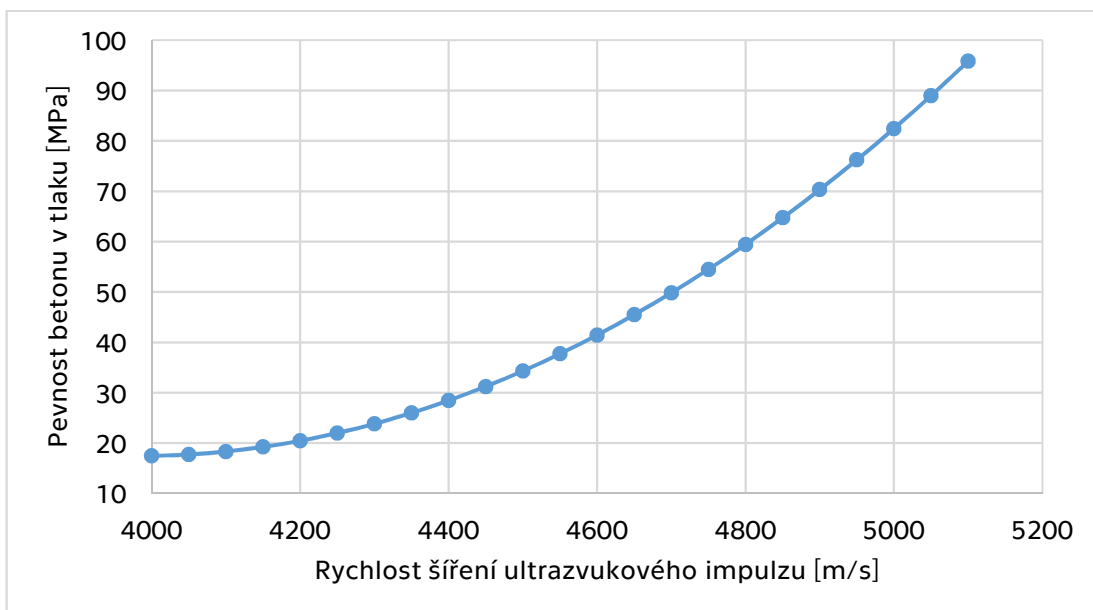
I druhý den stáří jsou hodnoty obou zkoušených betonů stále velmi blízké hodnotám kalibrační křivky. Beton EMĚ KS VII byl metodou podhodnocen, ale výsledky byly relativně přesné. U Referenčního betonu 2 byly zaznamenány vyšší rychlosti ultrazvukového impulzu než u betonu EMĚ KS VII, což předpokládá teorie metody.

8.3.2.2. Kalibrační vztahy



Obrázek 44: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, Referenční beton 2, 2. den

Rozsah použití: 4,5 až 4,68 km/s.



Obrázek 45: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, EMĚ KS VII, 2. den

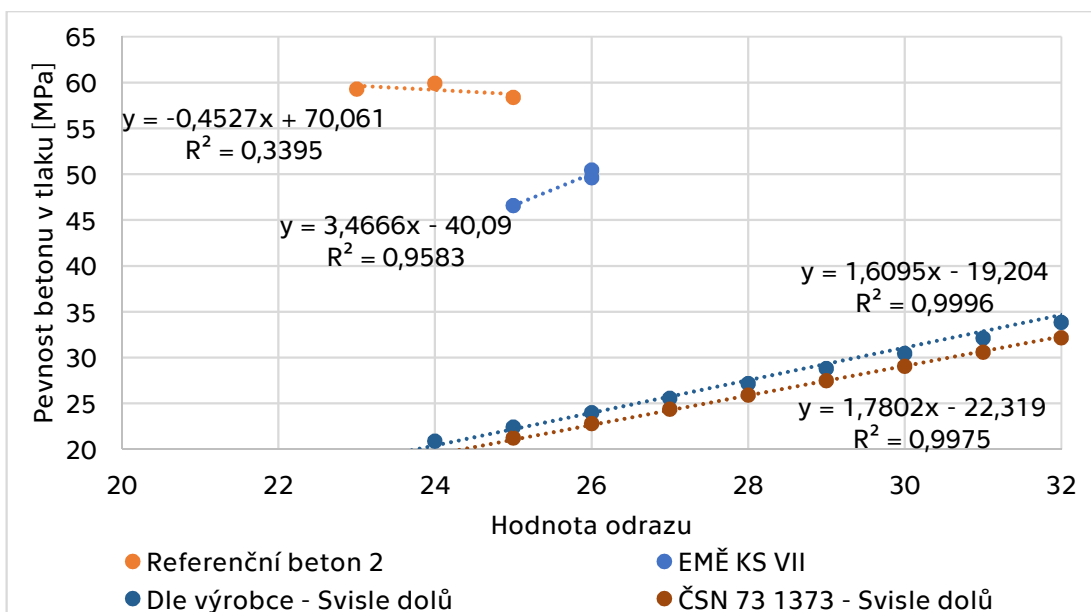
Rozsah použití: 4,27 až 4,58 km/s.

8.4. 4. den stáří betonu

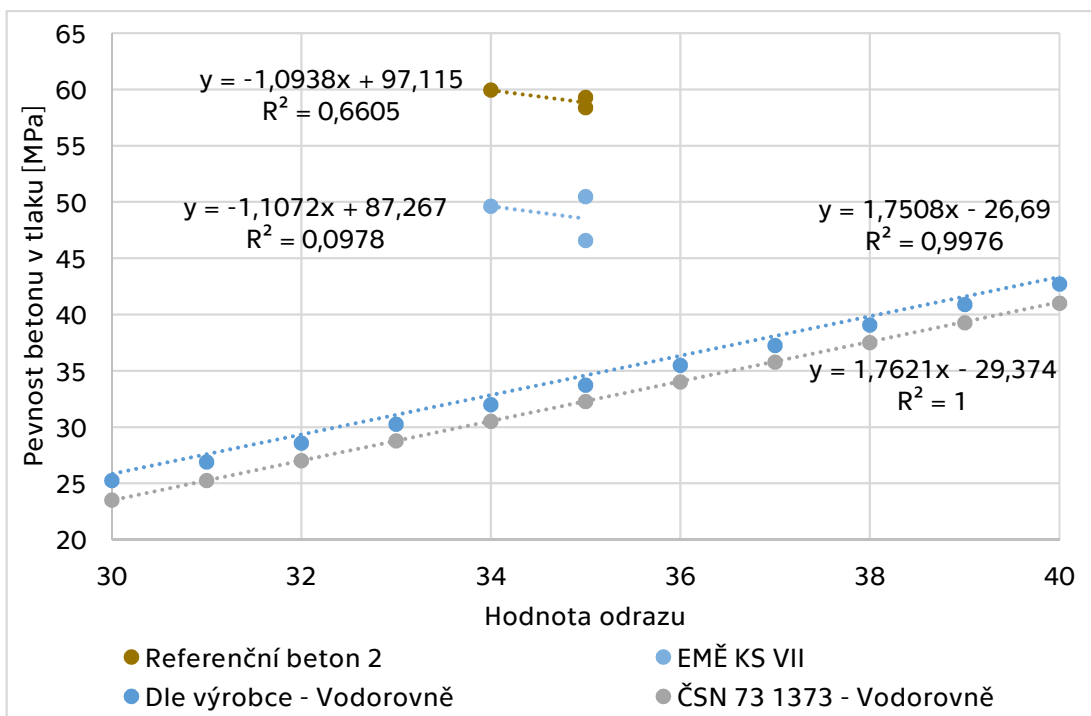
Zkoušky proběhly 1. 5. 2020.

8.4.1. Odrazový tvrdoměr

8.4.1.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 46: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 4. den



Obrázek 47: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 4. den

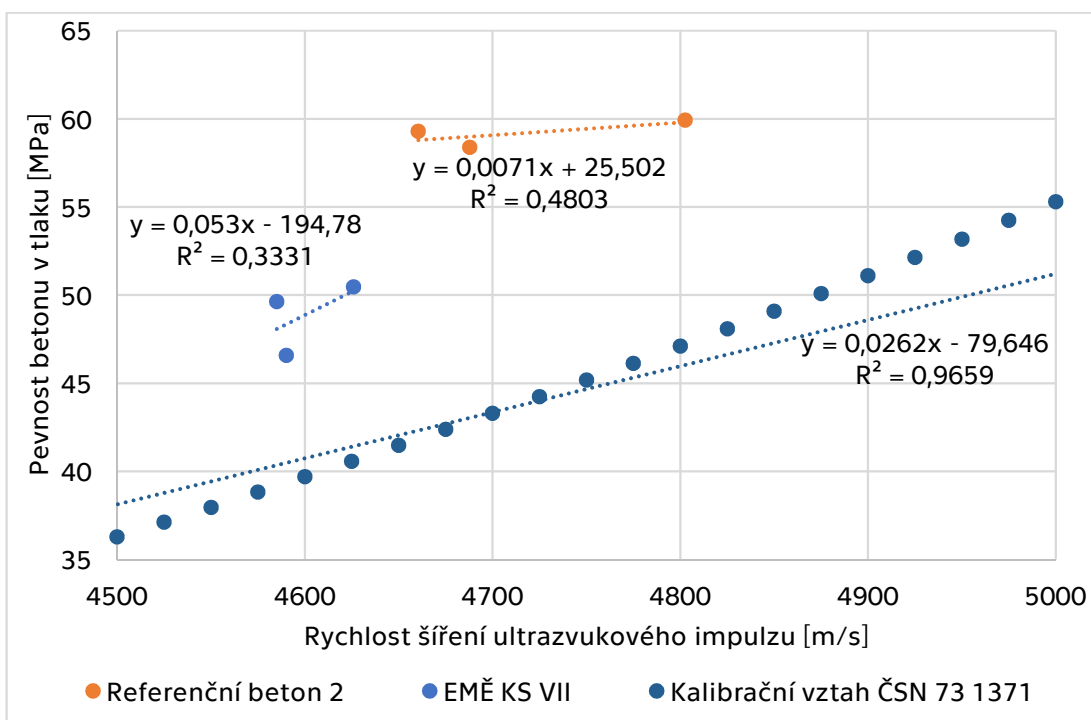
U obou grafů se ukazuje trend postupného oddalování hodnot od kalibrační křivky s narůstajícími pevnostmi. Jako u předchozího dne je u polohy „Volně“ patrná vyšší hodnota odrazu a nižší pevnost.

8.4.1.2. Kalibrační vztahy

Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.4.2. Ultrazvuk

8.4.2.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 48: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 4. den

Opět je zde patrný trend postupného oddalování hodnot od kalibrační křivky jako u zkoušení odrazovým tvrdoměrem. Stále je beton EMĚ KS VII hodnocen přesněji než Referenční beton 2. I zde se potvrzuje teorie metody.

8.4.2.2. Kalibrační vztahy

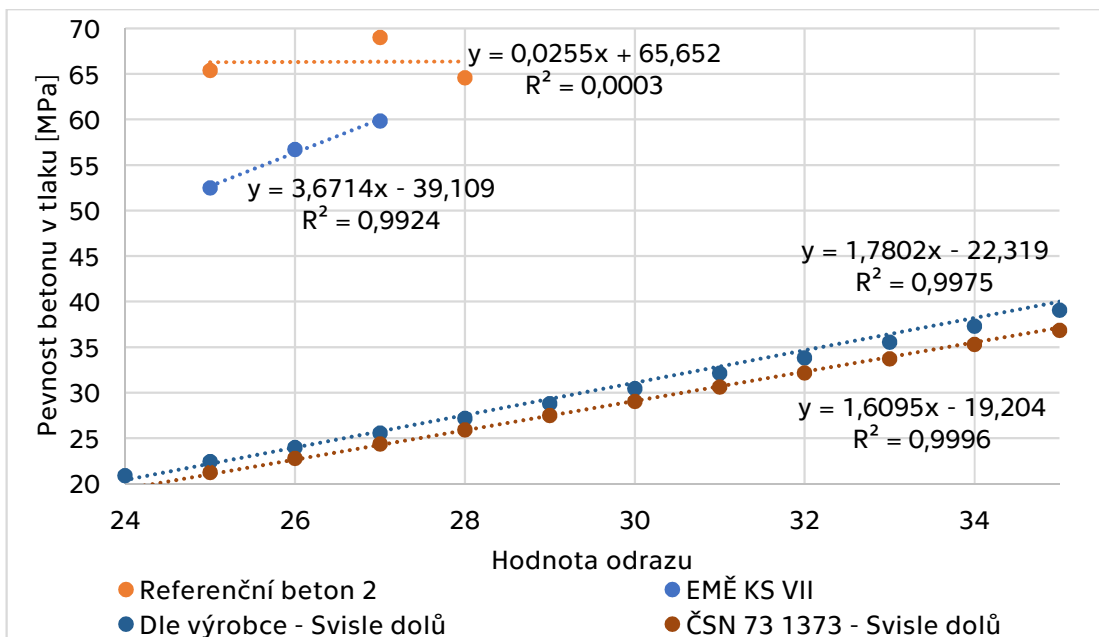
Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.5. 7. den stáří betonu

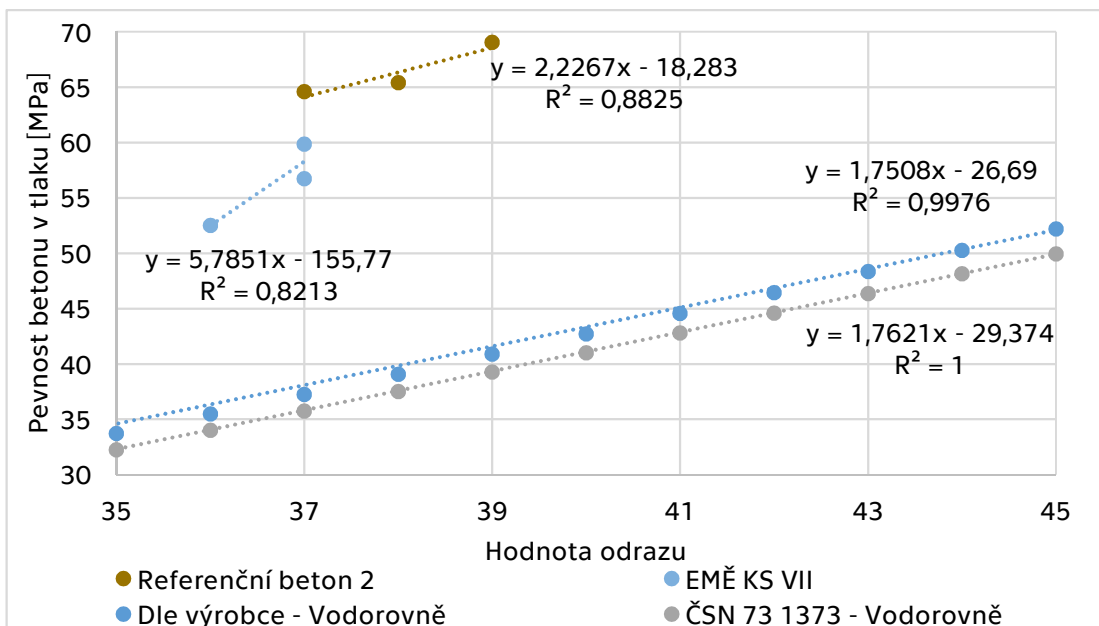
Zkoušky proběhly 4. 5. 2020

8.5.1. Odrazový tvrdoměr

8.5.1.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 49: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 7. den



Obrázek 50: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 7. den

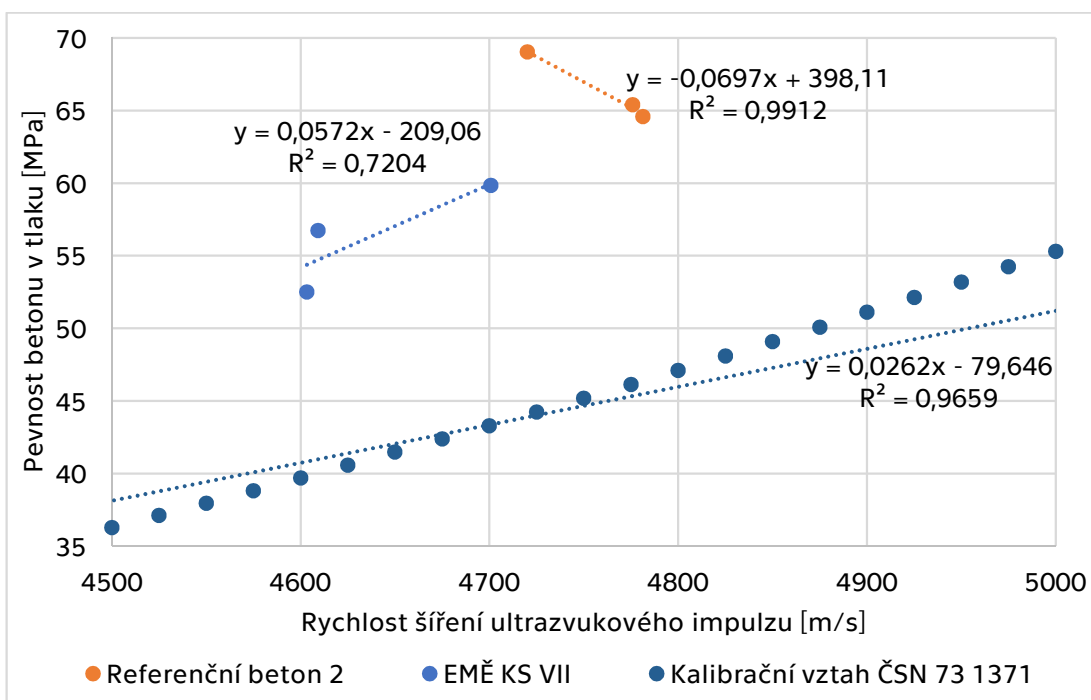
U obou grafů se potvrzuje trend oddalování hodnot od křivky, avšak není patrný tak velký rozdíl, jako v prvních dnech stáří. Graf „Volně“ znovu zachycuje nepřesnost metody, kdy podobné odrazy mají jiné pevnosti.

8.5.1.2. Kalibrační vztahy

Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.5.2. Ultrazvuk

8.5.2.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 51: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, 7. den

Trend postupného oddalování pokračuje i zde. Beton EMĚ KS VII je opět hodnocen přesněji. Teorie metody dodržuje 5 ze 6 těles.

8.5.2.2. Kalibrační vztahy

Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

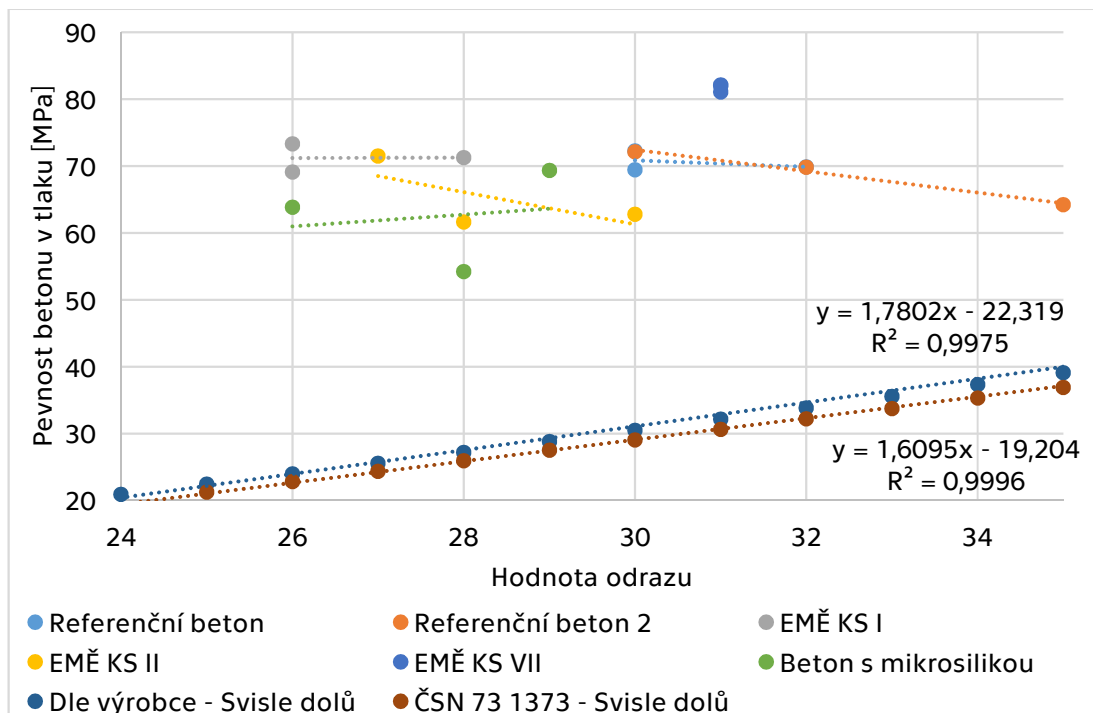
8.6. 28. den stáří betonu

Zkoušky proběhly 26. 3. a 2. 4. 2020 na všech směsích betonu.

8.6.1. Odrazový tvrdoměr

Testování proběhlo pouze v poloze „Volně“.

8.6.1.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 52: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 28. den

Lineární regrese

Referenční beton: $y = -0,4875x + 85,471$; $R^2 = 0,1358$

Referenční beton 2: $y = -1,5984x + 120,37$; $R^2 = 0,9856$

EMĚ KS I: $y = 0,0299x + 70,415$; $R^2 = 0,0003$

EMĚ KS II: $y = -2,4066x + 133,48$; $R^2 = 0,4631$

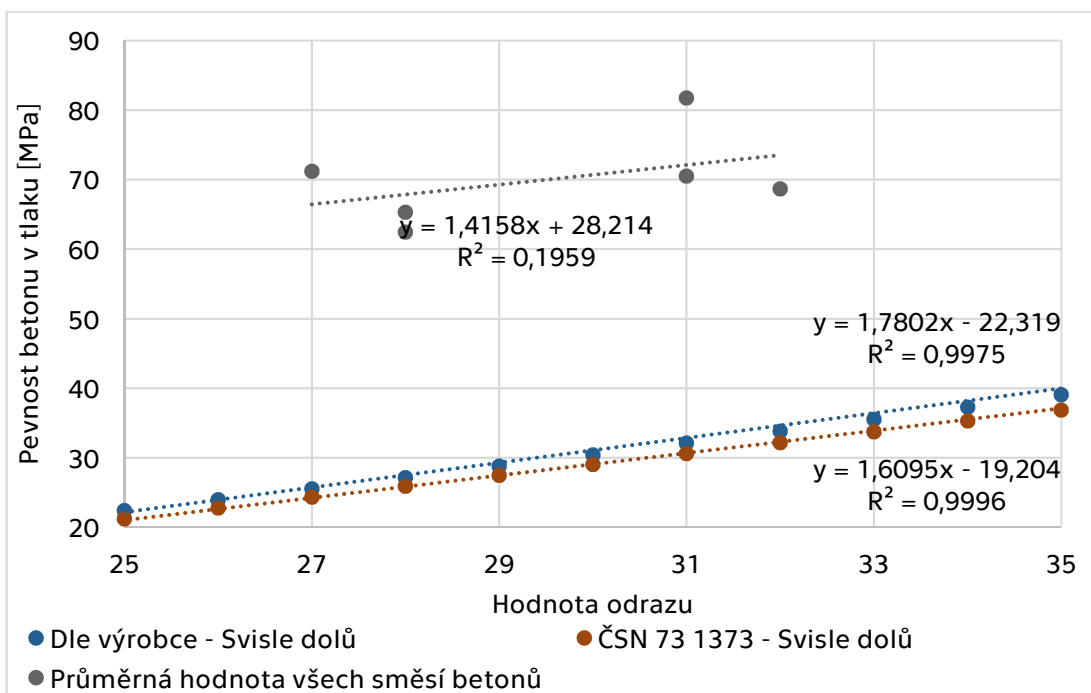
EMĚ KS VII:

Beton s mikrosilikou: $y = 0,8821x + 38,04$; $R^2 = 0,0309$

Trend postupného oddalování od kalibrační křivky stále pokračuje i ve 28. dnu stáří, ale pouze pro beton EMĚ KS VII, Referenční beton 2 je zde hodnocen přesněji než v 7. dnu.

Hodnoty regresních součinitelů jsou v některých případech velmi malé, protože se zaznamenaly stejné odrazy na tvrdoměru, ale jiná pevnost v tlaku. To je případ EMĚ KS I, anebo hodnoty byly velmi rozptýleny, například beton s mikrosilikou. Z tohoto důvodu jsou hodnoty zprůměrovány a vloženy do grafu posouzení průměrné pevnosti.

8.6.1.2. Posouzení průměrné pevnosti jednotlivých směsí betonu



Obrázek 53: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze "Volně" u průměrných hodnot všech směsí betonů, odrazový tvrdoměr, 28. den

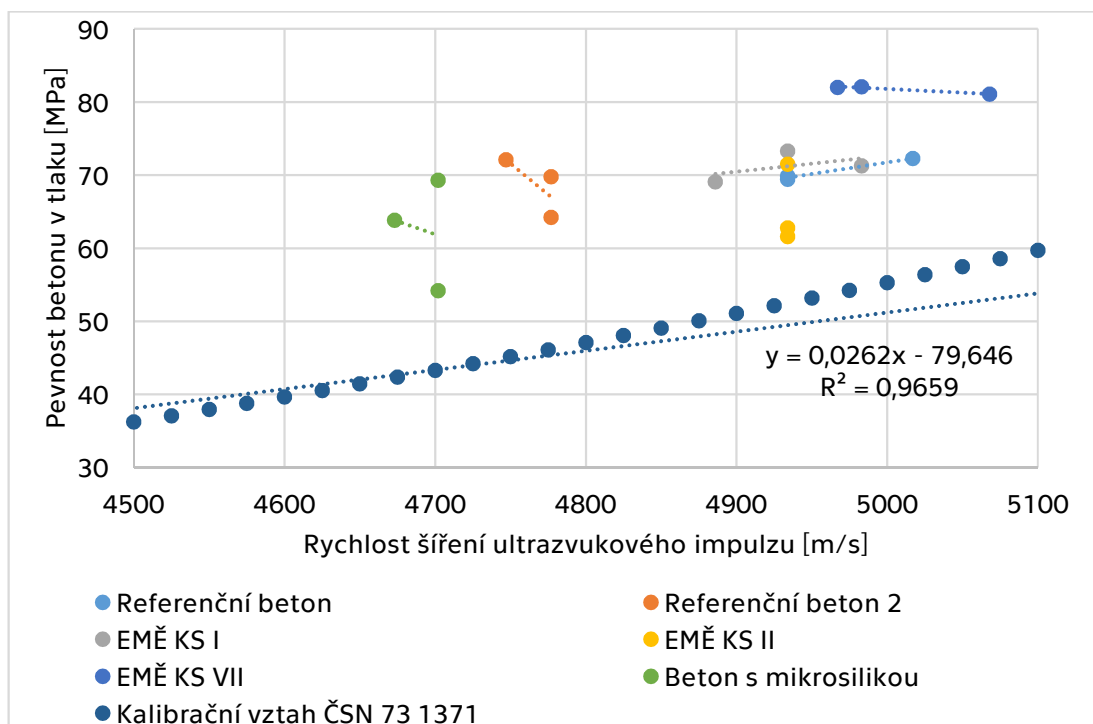
Následující graf zobrazuje průměrné hodnoty pevnosti a odrazu směsí betonu ze tří po sobě jdoucích měření v porovnání s kalibračními křivkami. Graf zobrazuje, že směrnice kalibračních křivek a průměrných hodnot betonů se směrově příliš neliší, ale hodnoty pevností se liší.

8.6.1.3. Kalibrační vztahy

Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.6.2. Ultrazvuk

8.6.2.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 54: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 28. den

Lineární regrese

Referenční beton: $y=0,0315x-85,954$; $R^2=0,9788$

Referenční beton 2: $y=-0,1697x+877,77$; $R^2=0,5264$

EMĚ KS I: $y=0,0219x-37,095$; $R^2=0,2592$

EMĚ KS II:

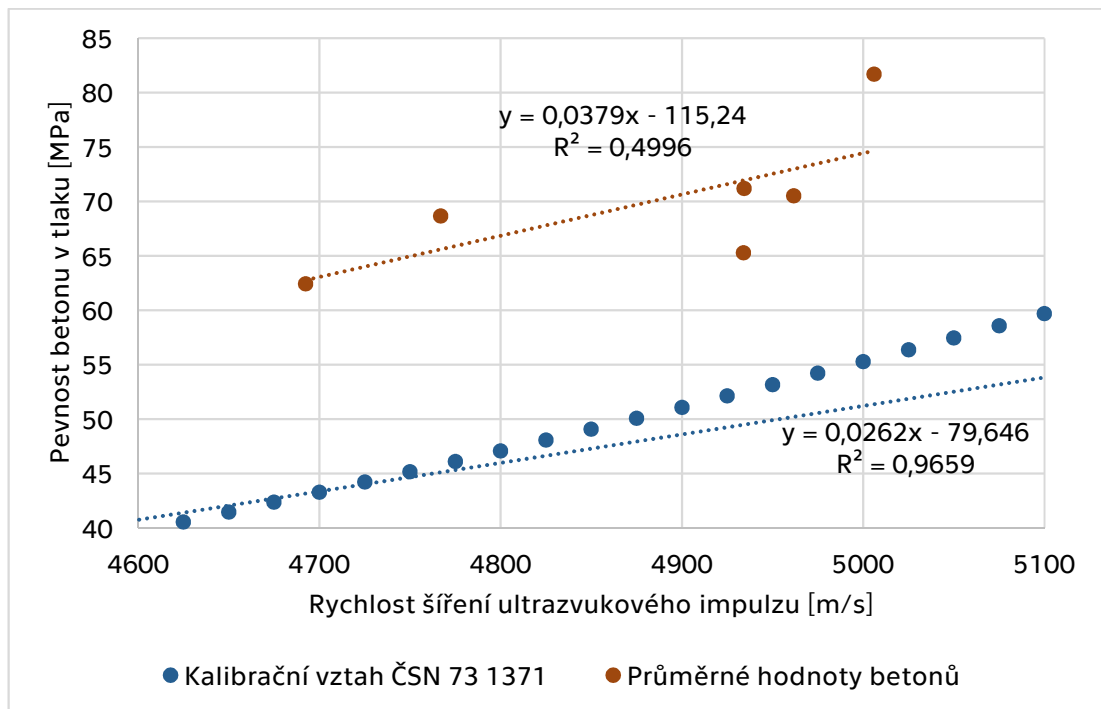
EMĚ KS VII: $y=-0,0101x+132,23$; $R^2=0,9446$

Beton s mikrosilikou: $y=-0,0714x+397,42$; $R^2=0,0243$

Trendu postupného oddalování od kalibrační křivky vyhovuje i toto zkoušení, tudíž se trend potvrzuje. Beton s mikrosilikou má nejhorší výsledky nejspíše kvůli velkému provzdušnění. Kromě referenčního betonu jsou hodnoty poměrně stejné, avšak beton EMĚ KS VII má největší rychlost i pevnost a alespoň částečně potvrzuje teorii metody.

Hodnoty regresních součinitelů jsou v některých případech velmi malé, protože se zaznamenaly stejné rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, ale jiná pevnost v tlaku. Toto se stalo u případu Beton s mikrosilikou. Z tohoto důvodu jsou hodnoty zprůměrovány a vloženy do grafu posouzení průměrné pevnosti.

8.6.2.2. Posouzení průměrné pevnosti jednotlivých směsí betonu



Obrázek 55: Graf závislost pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu u průměrných hodnot všech směsí betonů, 28. den

Směrnice je přibližně podobná směrnici u odrazového tvrdoměru. Opět jsou posunuty pevnosti, ale jsou blíže ke křivce, než je tomu u odrazového tvrdoměru.

8.6.2.3. Kalibrační vztahy

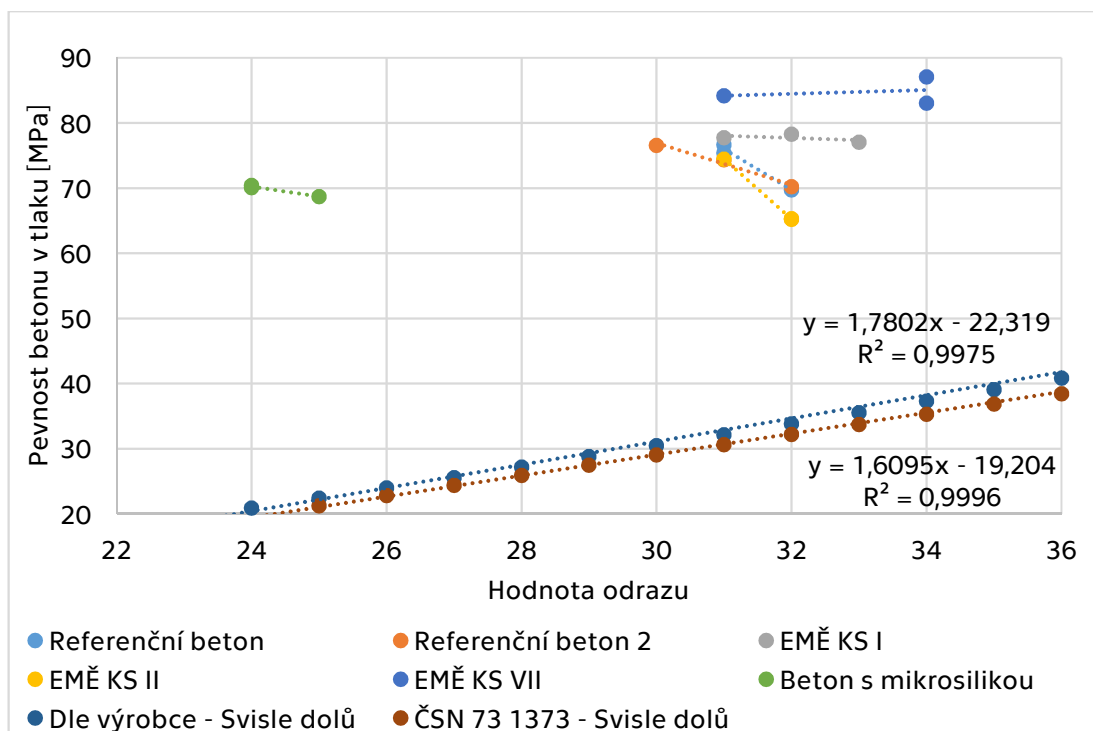
Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.7. 60. den stáří betonu

Zkoušky proběhly 27. 4. a 4. 5. 2020

8.7.1. Odrazový tvrdoměr

8.7.1.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 56: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 60. den

Lineární regrese

Referenční beton: $y = -6,2697x + 270,36$; $R^2 = 0,9698$

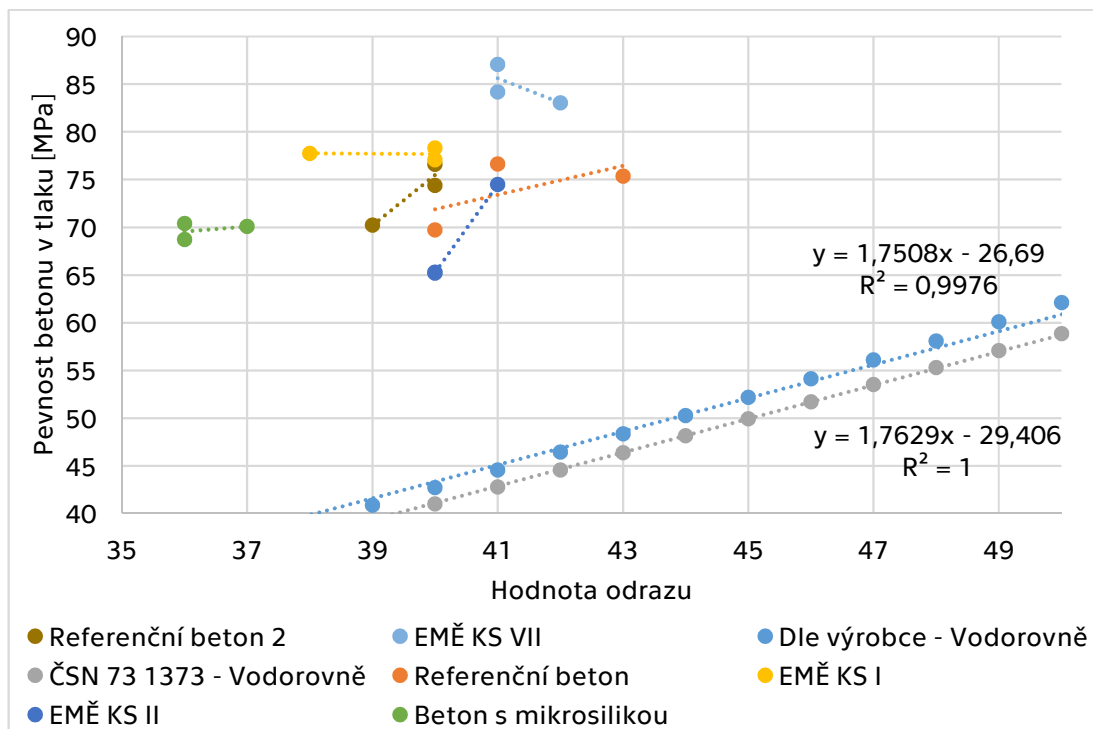
Referenční beton 2: $y = -3,1871x + 172,52$; $R^2 = 0,9693$

EMČ KS I: $y = -0,3454x + 88,749$; $R^2 = 0,3132$

EMČ KS II: $y = -9,2249x + 360,44$; $R^2 = 0,9999$

EMČ KS VII: $y = 0,2923x + 75,118$; $R^2 = 0,0597$

Beton s mikrosilikou: $y = -1,5294x + 106,94$; $R^2 = 0,9673$



Obrázek 57: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 60. den

Lineární regrese

Referenční beton: $y = 1,5176x + 11,182$; $R^2 = 0,3978$

Referenční beton 2: $y = 5,272x - 135,41$; $R^2 = 0,8841$

EMĚ KS I: $y = -0,0376x + 79,175$; $R^2 = 0,0049$

EMĚ KS II: $y = 9,2249x - 303,75$; $R^2 = 0,9999$

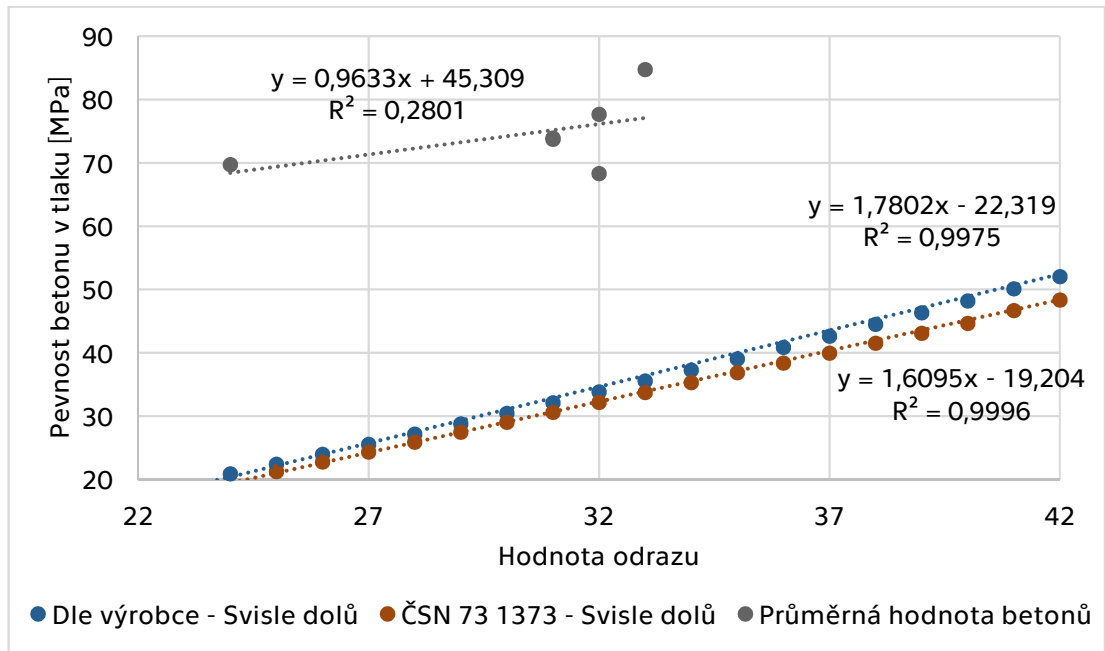
EMĚ KS VII: $y = -2,5739x + 191,15$; $R^2 = 0,5149$

Beton s mikrosilikou: $y = 0,521x + 50,798$; $R^2 = 0,1122$

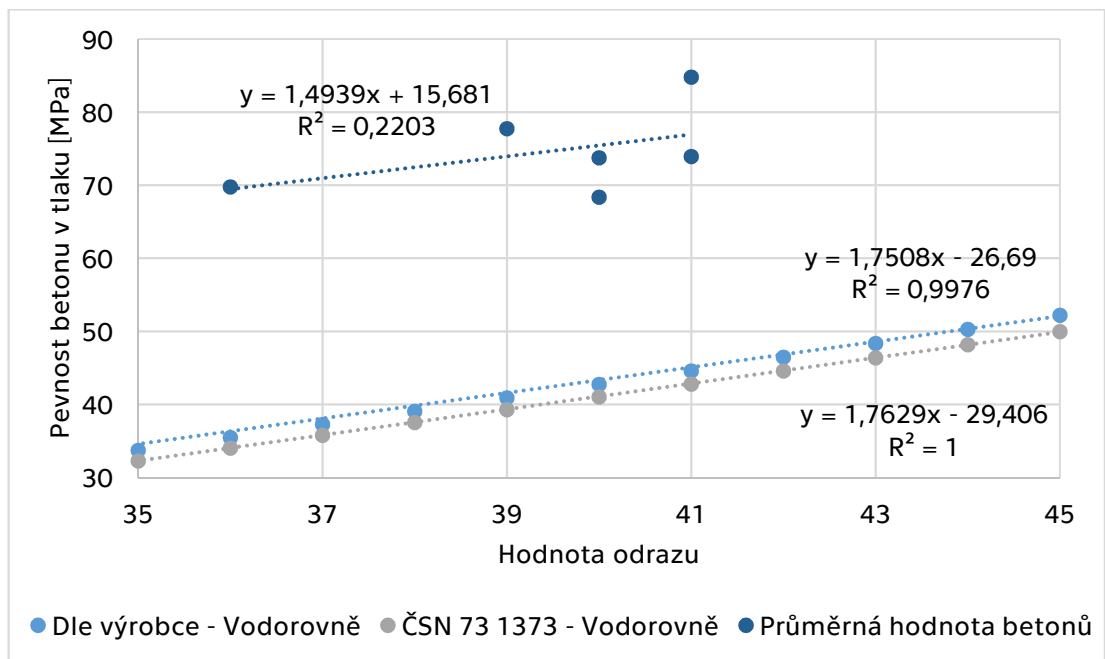
Trend je potvrzen v 60. dnu pro tyto betony, kdy se v každém dnu hodnoty oddalovaly od kalibračních křivek. Strmější oddalování bylo zachyceno v prvních dnech stáří. U obou poloh je patrné, že beton s mikrosilikou zaznamenal nejmenší odrazy, což může být způsobeno pórovitým povrchem.

Opět se ukazuje, že některé hodnoty regresních součinitelů jsou velmi malé, protože se zaznamenaly stejné odrazy na tvrdoměru, ale jiná pevnost v tlaku. Toto se objevu například u EMĚ KS VII, nebo beton s mikrosilikou. Z tohoto důvodu jsou hodnoty zprůměrovány a vloženy do grafu posouzení průměrné pevnosti.

8.7.1.2. Posouzení průměrné pevnosti jednotlivých směsí betonu



Obrázek 58: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze "Volně" u průměrných hodnot všech směsí betonu, odrazový tvrdoměr, 60. den



Obrázek 59: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze "V lisu" u průměrných hodnot všech směsí betonu, odrazový tvrdoměr, 60. den

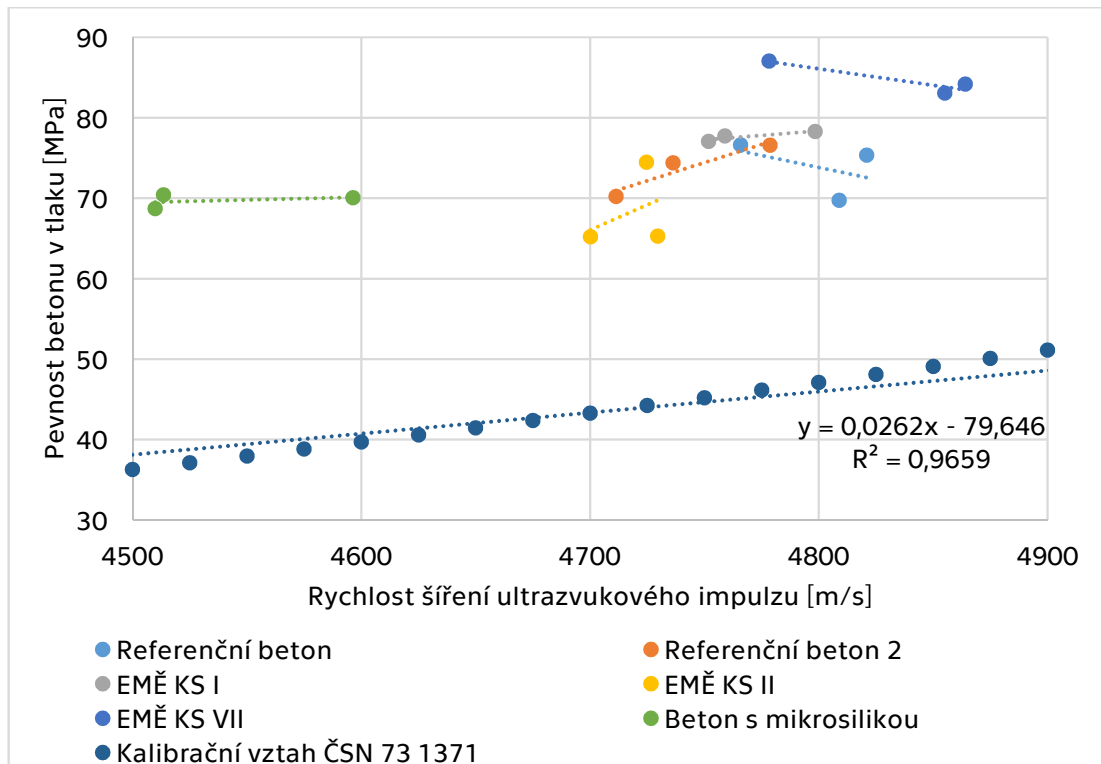
Jsou zobrazeny průměrné hodnoty všech betonů a vychází, že poloha „V lisu“ má přesnější směrnici s kalibračními křivkami a upevněné těleso dává přesnější výsledky s ohledem na pevnosti.

8.7.1.3. Kalibrační vztahy

Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.7.2. Ultrazvuk

8.7.2.1. Zhodnocení pevnosti



Obrázek 60: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, 60. den

Lineární regrese

Referenční beton: $y = -0,0598x + 361,1$; $R^2 = 0,2223$

Referenční beton 2: $y = 0,0902x - 354,13$; $R^2 = 0,8973$

EMĚ KS I: $y = 0,0221x - 27,9$; $R^2 = 0,8095$

EMĚ KS II: $y = 0,1248x - 520,63$; $R^2 = 0,1359$

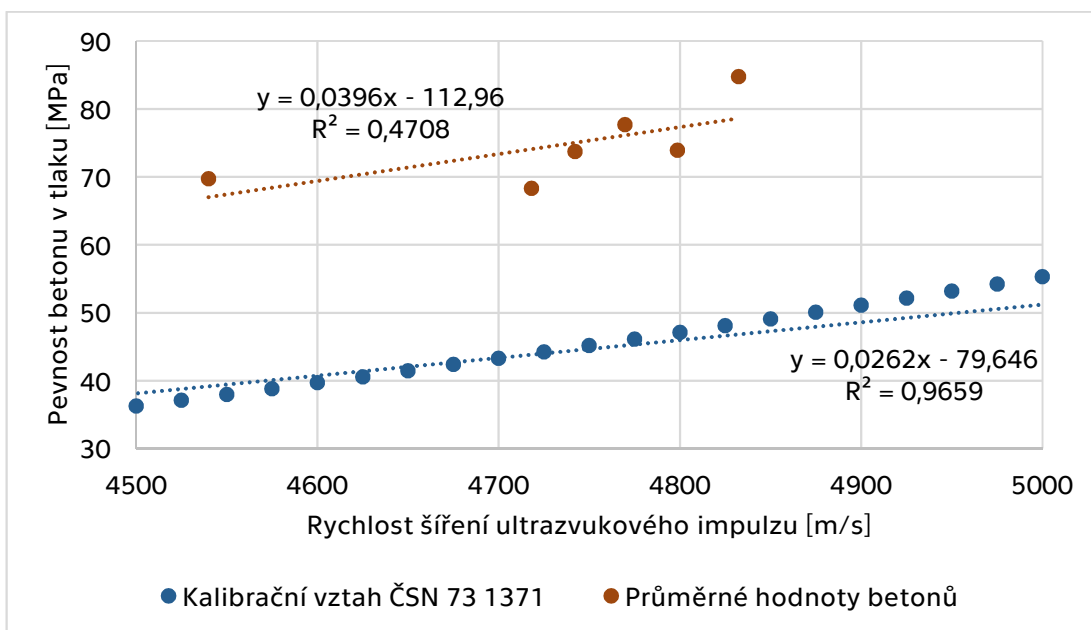
EMĚ KS VII: $y = -0,0409x + 282,57$; $R^2 = 0,8678$

Beton s mikrosilikou: $y = 0,0068x + 38,909$; $R^2 = 0,1368$

Opět se potvrzuje trend zachycený již u odrazového tvrdoměru. Hodnoty oddalování jsou strmější v prvních dnech stáří betonu. Beton s mikrosilikou má opět nejnižší rychlost, jako tomu bylo u předchozího testování. Pravděpodobně to zapříčinil vyšší obsah vzduchu v betonové směsi.

I zde jsou všechny hodnoty zprůměrovány a vloženy do následujícího grafu. Průměrování bylo zapotřebí kvůli nízkým hodnotám regresních součinitelů. Je to kvůli velmi podobné rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, ale jiné pevnosti v tlaku. Toto se stalo u případu EMĚ KS II nebo u Referenčního betonu.

8.7.2.2. Posouzení průměrné pevnosti jednotlivých směsí betonu



Obrázek 61: Graf závislost pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu u průměrných hodnot všech směsí betonů, 60. den

Zde je směrnice skoro stejná jako ve 28. dnu, ale pevnosti jsou stále posunuty nad kalibrační křivku. Vzdálenosti pevností od kalibrační křivky jsou velmi podobné jako při zkoušení odrazovým tvrdoměrem.

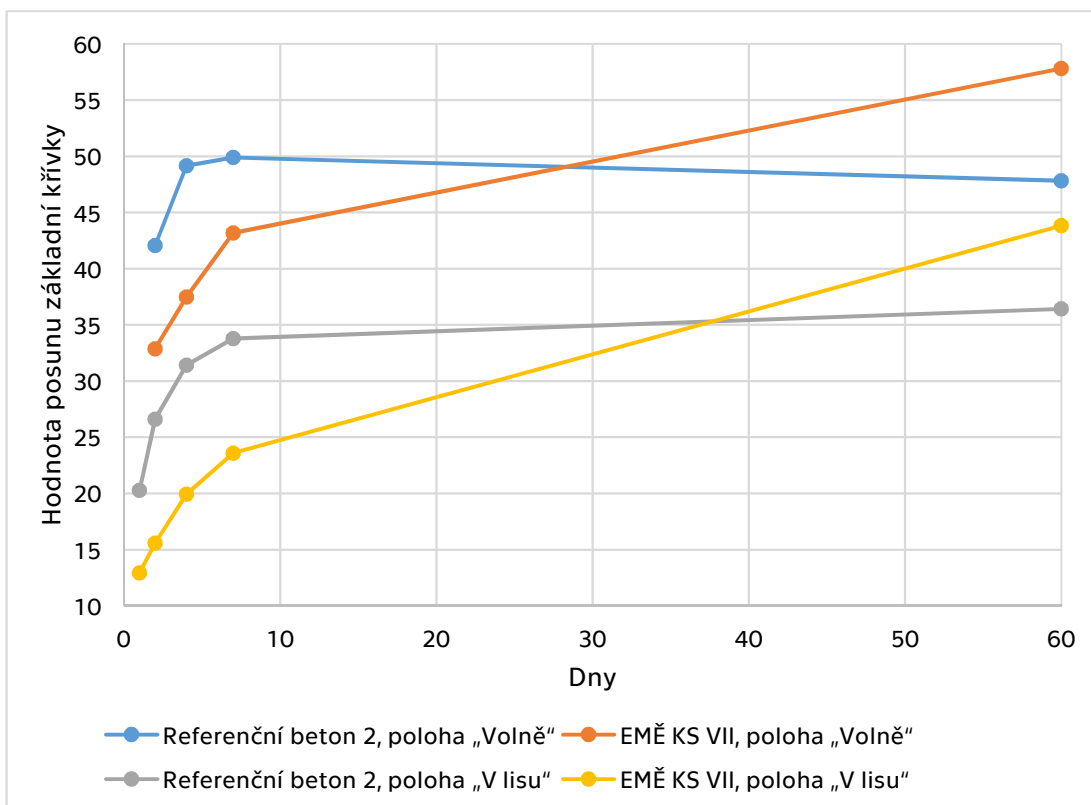
8.7.2.3. Kalibrační vztahy

Následující vztahy jsou vytvořeny podle kapitoly 5.1 a jsou obdobné jako v kapitolách 8.2 a 8.3.

8.8. Nárůst hodnot posunu základní křivky Δf

Následující grafy vykreslují hodnotu posunutí základní křivky Δf dle ČSN EN 13791 v jednotlivých dnech stáří betonu. Grafy byly sestaveny z hodnot uvedených v tabulce 5 a tabulce 6.

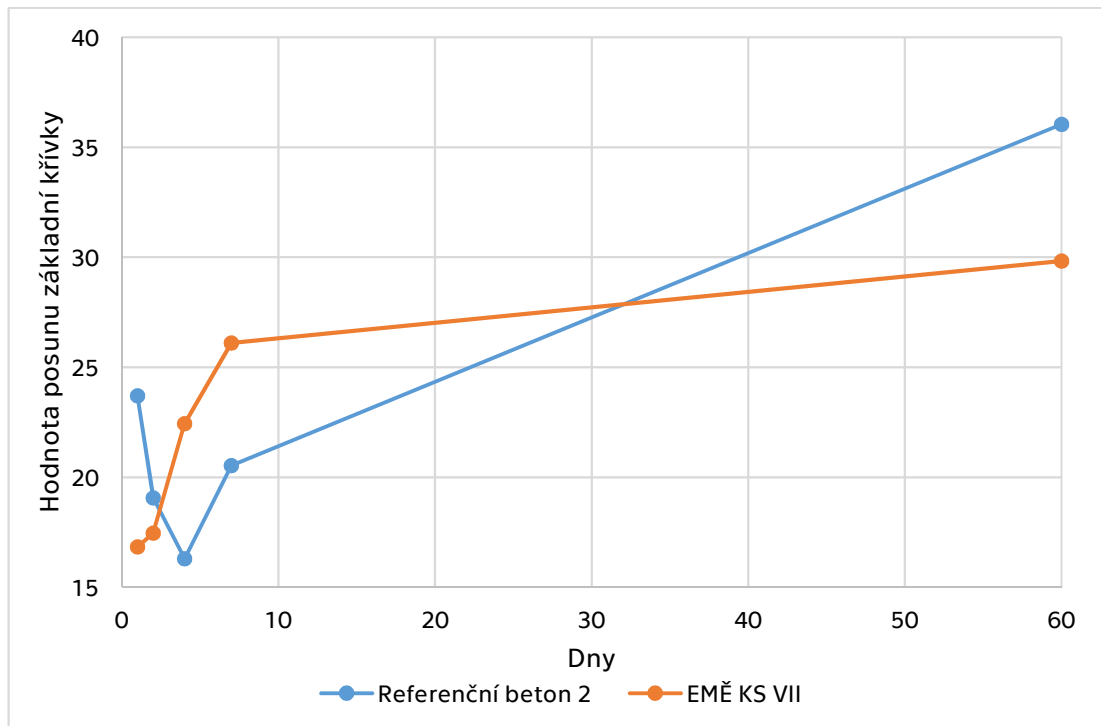
8.8.1. Odrazový tvrdoměr



Obrázek 62: Postupný nárůst hodnot posunů základní křivky Δf v závislosti na stáří betonu

První dny se hodnoty rychleji oddalovaly od křivky. 60. den má beton EMĚ KS VII větší hodnotu posunu, a tím i větší vzdálenost od kalibrační křivky než Referenční beton 2. EMĚ KS VII je více vzdálen od křivky díky větší pevnosti a poměrně podobným hodnotám odrazů.

8.8.2. Ultrazvuk



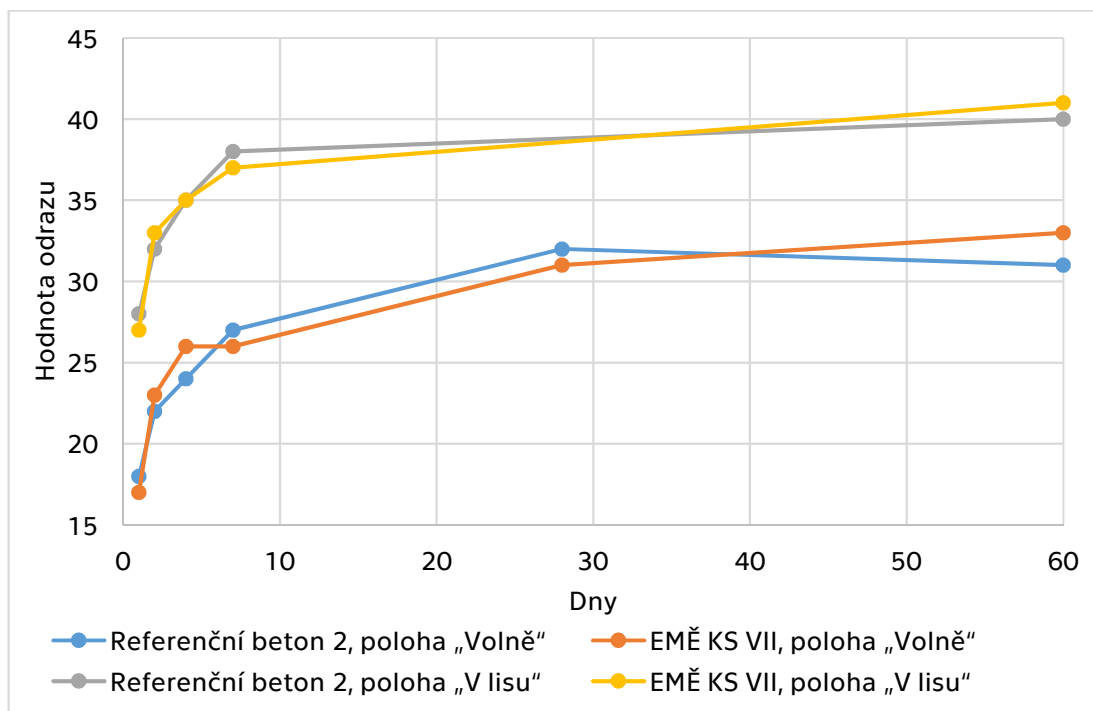
Obrázek 63: Postupný nárůst hodnot posunů základní křivky Δf v závislosti na stáří betonu

Graf pro Referenční beton 2 je zpočátku velmi netypický. Beton EMĚ KS VII v 60. dnu je nedůvěryhodný, protože rychlost přesáhla mez křivky stanovenou na 4,8 km/s. Ultrazvuk dosahuje průměrně menší hodnoty posunu křivky než odrazový tvrdoměr.

8.9. Nárůst hodnot nedestruktivních metod

Následující grafy zobrazují nárůst hodnot v průběhu stáří betonu. Výsledky kopírují vývoj pevností betonů.

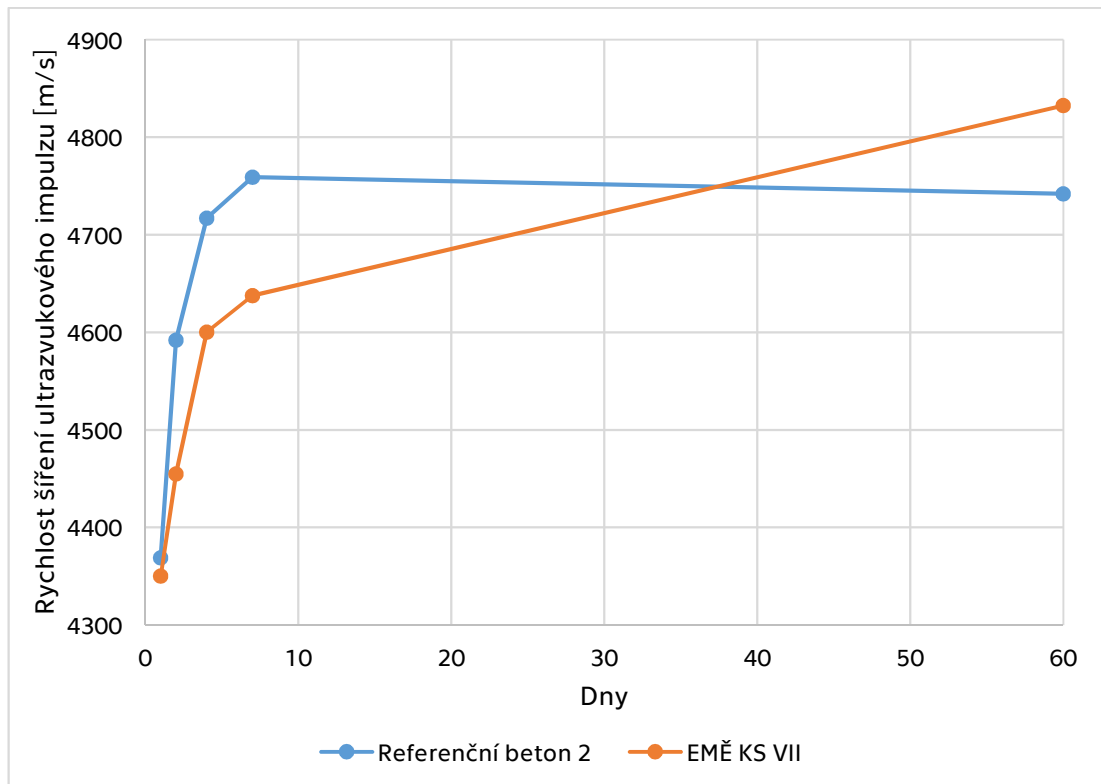
8.9.1. Odrazový tvrdoměr



Obrázek 64: Nárůst hodnot odrazů v závislosti na stáří betonu

Na příkladu betonu EMĚ KS VII lze demonstrovat vztah mezi pevností a hodnotou odrazu. V prvních dnech stáří byla pevnost betonu EMĚ KS VII menší než u Referenčního betonu 2, tudíž byla menší i hodnota odrazu. Následně došlo k nárůstu pevnosti nad hodnoty referenčního betonu, a proto i zvýšení hodnoty odrazu.

8.9.2. Ultrazvuk



Obrázek 65: Nárůst rychlostí šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na stáří betonu

Graf kopíruje hodnotu pevností i tím, že pevnost EMĚ KS VII je větší v 60. dnu než Referenčního betonu 2. Mezi 7. a 60. dnem se hodnoty u Referenčního betonu 2 nezvedaly, protože i pevnost oproti prvním dnům příliš nestoupala.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s nedestruktivními metodami a jejich přístroji. V praktické části byl odzkoušen vytvořený experiment, na ukázkou byly vytvořeny kalibrační vztahy a posouzeny narůstající hodnoty nedestruktivního zkoušení na stárnoucím betonu. Zde v závěru je popsáno využití metod z hlediska odbedňování betonu. Jak vyplývá z praktické části, cíle bakalářské práce byly splněny.

Z přiložených grafů lze odvodit, že s rostoucím stářím betonu se měřené hodnoty více a více oddalují hodnotám uváděným kalibračními křivkami. Proto se použití nedestruktivních metod pro tyto betony jeví výhodné hlavně v raných fázích měření, neboť získané hodnoty jsou jen velmi málo odlišné od skutečné pevnosti. Měření ultrazvukem vykazovalo přesnější výsledky oproti měření odrazovým tvrdoměrem v průběhu všech testů, proto je lepší využít ultrazvukovou metodu.

Základní křivka pro ultrazvuk zobrazuje závislost pouze do rychlosti šíření ultrazvukového impulsu 4,8 km/s, která je však při zkoušení betonů vyšších tříd překročena. Z toho důvodu nelze přesně odvodit kalibrační závislost pro tuto metodu. V důsledku toho jsou hodnoty zjištěné ultrazvukem přesné pouze pro mladý či méně pevný beton, a proto bych tuto metodu volil v případě odbedňování, kdy jsou pevnosti malé, a metoda je přesnější.

Kalibrační vztahy od dodavatele, nebo uvedené v normě, se zdají být nevyhovující, protože testováním těles na zemi bez upevnění nejsou dosaženy přesné výsledky. Kalibračním vztahům od výrobce se nejvíce přiblížily betony mladé a málo pevné. Avšak užitím těchto vztahů ve stavebním procesu může dojít k podhodnocení konstrukce. Přesnějších výsledků lze dosáhnout vytvořením speciálního kalibračního vztahu, který jsem tvořil v praktické části mé práce.

Kalibrační vztahy od výrobce či v normách ČSN 73 1371 a ČSN 73 1373 by bylo vhodné přepracovat a vytvořit zvlášť závislostní vztahy pro obyčejný beton a betony vyšších pevností, a také závislostní vztahy pro betony nízkého stáří, zvlášť pak pro betony mladší sedmi dní do pevnosti 35 - 40 MPa. Stejně tak použití kalibračních vztahů určených betonům vyšších tříd pevností na betony mladší je zrádné. Nepřesnost lze demonstrovat na příkladu tabulek

přiložených k odrazovému tvrdoměru, které se v průběhu testování ukázaly nevhodné pro všechny typy zkoušených betonů. ČSN 73 1373 uvádí kalibrační křivku pro betony od 14. dne stáří, avšak mnou naměřené hodnoty byly přesnější během prvních čtrnácti dnů zkoušení při použití této kalibrační křivky. Důvodem je pravděpodobně použití betonů vyšších pevností.

Potenciál metod spočívá v jednoduchosti provedení a nedestruktivním přístupu. Obě dvě metody mohou v praxi zajistit pohodlnější zjištění hodnoty pevnosti vhodné k odbednění. Pro co nejpřesnější zjištění pevnosti betonu, by bylo nejlepší konstruovat závislostní vztahy jednotlivě pro daný beton různého stáří a s ohledem na rychlost šíření ultrazvukového impulzu.

Zdroje

- [1] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 24 s.
- [2] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 20 s.
- [3] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s.
- [4] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 16 s.
- [5] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 28 s.
- [6] KOLÍSKO, Jiří. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích* [online]. 2015, 28 s. Dostupné z: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1525>
- [7] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLÉ a Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí* [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2005, 125 s. Dostupné z: http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BI52-Diagnostika%20stavebnich%20konstrukci/diagnostika_stavebnich_konstruc_-_diagnostika_stavebnich_konstrukci.pdf
- [8] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M02 Stavební zkušebnictví* [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2004, 48 s. Dostupné z: [94](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BI02-</div><div data-bbox=)

[Zkusenictvi%20a%20technologie/Zkusebnictvi%20a%20technologie%20M02-Stavebni%20zkusebnictvi.pdf](#)

- [9] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Plzeň: Fakulta strojní Západočeské univerzity, Oddělení povrchového inženýrství, 2005, 12 s. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [10] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s.
- [11] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 12 s.
- [12] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 12 s.
- [13] ČSN EN 12504-1. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 16 s.
- [14] ČSN EN 12504-3. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 3: Stanovení síly na vytržení*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 12 s.
- [15] BUNGEY, John H., Stephen G. MILLARD and Michael G. GRANTHAM. *Testing of Concrete in Structures, 4th Edition* [online]. Milton Park: Taylor & Francis, 2006, 353 s. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=KUJZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=concrete+testing+in+structures&ots=O6EjaqT9A9&sig=54Sj94u1rnE_u-BdsSRTwkd57Y0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true
- [16] *Schmidt® rebound hammers for concrete strength and rock testing* [online]. Proceq SA, Switzerland 2020, [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/schmidt-hammers/>

- [17] *Proceq History – 65-years of integrity, innovation and technology* [online]. Proceq SA, Switzerland 2019 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/company/history/>
- [18] CIKRLE, Petr, Tomáš VYMAZAL. *Nedestruktivní metody zkoušení železobetonových konstrukcí* [online]. Praha: Beton University, 2014, 17 s. Dostupné z: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1671>
- [19] SilvetSchmidt Concrete Test Hammer, Globalgilson.com [online]. Dostupné z: <https://www.globalgilson.com/silver-schmidt-concrete-test-hammer-st-type-n>
- [20] *Pundit@ ultrasonic pulse velocity and pulse echo tomography* [online]. Proceq SA, Switzerland 2020, [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/pundit-ultrasonic-pulse-velocity-and-pulse-echo-testing/>
- [21] *Modul pružnosti* [online]. eBeton 2020, [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>
- [22] ŠEVČÍK, Patrik a Iveta NAJDENÁ. *MODUL PRUŽNOSTI BETÓNU*. Stavebnícka ročenka [online]. Bratislava, 2010, 4 s. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://www.tsus.sk/o_tsus/publikacie/sevcik_najdena_stavebnicka_rocenka_def.pdf
- [23] LATIF AL-MUFTI, R. a A.N. FRIED. *The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials* [online]. 2012, 8 s. [cit. 2020-04-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.058>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812005284?via%3Dihub>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí [2]	13
Obrázek 2: Vyhovující způsoby porušení zkušebních válců [2]	13
Obrázek 3: Ukázka zkoušky tvrdosti podle Brinella [8]	17
Obrázek 4: Ukázka zkoušky tvrdosti podle Vickerse [9].....	17
Obrázek 5: Ukázka odtrhových zkoušek [7]	22
Obrázek 6: Ukázka vytrhávacích kotev [14]	22
Obrázek 7: Základní části odrazového tvrdoměru typu N [15]	24
Obrázek 8: Zobrazení odrazového tvrdoměru Original Schmidt při použití [16]	24
Obrázek 9: Odrazový tvrdoměr SilverSchmidt s hřibovitým nástavcem [16].....	25
Obrázek 10: Odrazový tvrdoměr Schmidt OS-120PT [16].....	25
Obrázek 11: Ukázka rozsahu použití jednotlivých Schmidtových odrazových tvrdoměrů [16]	26
Obrázek 12: Kalibrační kovadlina [19]	26
Obrázek 13: SilverSchmidt s brusným kamenem [19].....	26
Obrázek 14: Základní schéma zařízení [15].....	32
Obrázek 15: Zařízení pro stanovení doby průchodu impulzu s číslicovým ukazatelem [20]	33
Obrázek 16: Sondy, vlevo 150 kHz sondy, vpravo 54 kHz sondy, vzadu vlevo exponenciální 54 kHz sondy [20].....	34
Obrázek 17: Zařízení pro impulz-echo metodu [20].....	35
Obrázek 18: Princip impulz-echo metody [7].....	35
Obrázek 19: Ukázka 8 sond s měněním funkce budiče a snímače [20]	36
Obrázek 20: Varianty uspořádání sond [4]	37
Obrázek 21: Zásada pro zjištění vztahu mezi pevností betonu v tlaku v konstrukci a údajů z nepřímé zkušební metody [5].....	45
Obrázek 22: Kalibrační křivky pro odrazový tvrdoměr orientovaný svisle dolů	48
Obrázek 23: Zkoušená tělesa různých směsí	51
Obrázek 24: Použitý odrazový tvrdoměr Original Schmidt N	54
Obrázek 25: Poloha „Volně“	55
Obrázek 26: Poloha "V lisu"	56

Obrázek 27: Použitý ultrazvukový přístroj Matest C372N při kalibraci	58
Obrázek 28: Osazení sondy na povrch betonu	58
Obrázek 29: Display přístroje zobrazující osciloskop	59
Obrázek 30: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 1. den	66
Obrázek 31: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 1. den	67
Obrázek 32: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, Referenční beton 2, 1. den, poloha „V lisu“	67
Obrázek 33: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, EMĚ KS VII, 1. den, poloha „V lisu“	68
Obrázek 34: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 1. den	68
Obrázek 35: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, Referenční beton 2, 1. den	69
Obrázek 36: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, EMĚ KS VII, 1. den	69
Obrázek 37: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 2. den	70
Obrázek 38: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 2. den	70
Obrázek 39: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr svisle dolů, Referenční beton 2, 2. den, poloha „Volně“	71
Obrázek 40: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, Referenční beton 2, 2. den, poloha „V lisu“	72
Obrázek 41: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr svisle dolů, EMĚ KS VII, 2. den, poloha „Volně“	72
Obrázek 42: Kalibrační křivka pro odrazový tvrdoměr vodorovně, EMĚ KS VII, 2. den, poloha „V lisu“	73
Obrázek 43: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 2. den	73
Obrázek 44: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, Referenční beton 2, 2. den	74
Obrázek 45: Kalibrační křivka pro ultrazvuk, EMĚ KS VII, 2. den	74
Obrázek 46: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 4. den	75
Obrázek 47: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 4. den	75

Obrázek 48: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 4. den.....	76
Obrázek 49: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 7. den	77
Obrázek 50: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 7. den.....	77
Obrázek 51: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 7. den.....	78
Obrázek 52: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 28. den.....	79
Obrázek 53: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze "Volně" u průměrných hodnot všech směsí betonů, odrazový tvrdoměr, 28. den	80
Obrázek 54: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 28. den	81
Obrázek 55: Graf závislost pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu u průměrných hodnot všech směsí betonů, 28. den.....	82
Obrázek 56: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „Volně“, odrazový tvrdoměr, 60. den.....	83
Obrázek 57: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze „V lisu“, odrazový tvrdoměr, 60. den.....	84
Obrázek 58: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze "Volně" u průměrných hodnot všech směsí betonů, odrazový tvrdoměr, 60. den	85
Obrázek 59: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na hodnotě odrazu pro tělesa v poloze "V lisu" u průměrných hodnot všech směsí betonů, odrazový tvrdoměr, 60. den	85
Obrázek 60: Graf závislosti pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, 60. den	86
Obrázek 61: Graf závislost pevnosti betonu v tlaku na rychlosti šíření ultrazvukového impulzu u průměrných hodnot všech směsí betonů, 60. den.....	87
Obrázek 62: Postupný nárůst hodnot posunů základní křivky Δf v závislosti na stáří betonu	88

Obrázek 63: Postupný nárůst hodnot posunů základní křivky Δf v závislosti na stáří betonu	89
Obrázek 64: Nárůst hodnot odrazů v závislosti na stáří betonu	90
Obrázek 65: Nárůst rychlostí šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na stáří betonu	91

Seznam Tabulek

Tabulka 1: Pevnostní třídy obyčejného a těžkého betonu a minimální charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci [5]	14
Tabulka 2: Součinitel k_1 závislý na počtu zkušebních dvojic [5]	46
Tabulka 3: Receptury betonových směsí.....	52
Tabulka 4: Rozměry a pevnosti těles	53
Tabulka 5: Výsledky odrazový tvrdoměr.....	61
Tabulka 6: Výsledky ultrazvuk.....	64