



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VYUŽITÍ DYNAMICKÝCH NEDESTRUKTIVNÍCH
METOD PRO ZJIŠŤOVÁNÍ PEVNOSTÍ CEMENTŮ
Z CEMENTÁRNY HRANICE**

THE USE OF DYNAMIC NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR DETERMINING THE STRENGTH
OF CEMENT FROM CEMENT PLANT HRANICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lenka Procházková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BROŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lenka Procházková
Název	Využití dynamických nedestruktivních metod pro zjišťování pevností cementů z cementárny Hranice
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- J. Obraz : Zkoušení materiálů ultrazvukem, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989
G. Martinček: Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií, Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1962
Brožovský, J : Nedeštruktivní zkušební metody - nástroj pro hodnocení pevností stavebních materiálů a výrobků. Habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně
A. Pavlík, J. Doležel : Nedeštruktivní vyšetřování betonových konstrukcí, SNTL, 1977
J. Janko: Statistické tabulky, NČSAV, Praha, 1958
Anton, O. a kol. Základy zkušebnictví. Návodů do cvičení. Vysoké učení technické v Brně, 2002 Články v odborných časopisech a z konferencí zahraniční a tuzemské. Příslušné technické normy

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Nedeštruktivní metody zkoušení jsou využívány pro hodnocení parametrů stavebních materiálů, především pro zjišťování pevností betonu nebo jako podpůrné metody při sledování jejich změn při zkouškách trvanlivosti. Jednou z možných oblastí je využití ultrazvukové impulsové a rezonanční metody pro hodnocení pevností cementů. Cílem práce je vytvoření předpokladů pro hodnocení pevnosti v tlaku a tahu cementů z parametrů měření ultrazvukovou impulsovou metodou. Na omezeném počtu zkušebních vzorků provést měření pro ověření využitelnosti rezonanční metody pro hodnocení pevnosti v tlaku a tahu cementů. Zkoušeny budou portlandské a směsné portlandské cementy z cementárny Hranice Práce bude sestávat z teoretické a experimentální části. Pro naplnění zadání diplomové práce je třeba: V teoretické části: Uvést popis ultrazvukové impulsové a rezonanční metody. Uvést základní popis výroby, složení a základních parametrů cementů na bázi portlandského slínku. V odborných publikacích a pracích vyhledat existující kalibrační vztahy mezi pevnostmi cementu a parametry z nedeštruktivní metody zkoušení. V experimentální části: Provést výběr min. dvou druhů cementů z cementárny Hranice na bázi portlandského slínku z různého období výroby. Výroba zkušebních těles (pro každé stáří 1 sada sestávající ze 3 zkušebních těles) a provedení měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou a zkoušek pevností v tlaku a tahu za ohybu ve stáří cementu 1, 2, 3, 7 a 28 dní. Vyhodnocení výsledků zkoušek. Zpracování kalibračních vztahů mezi parametrem z nedeštruktivního zkoušení a pevností v tlaku resp. pevností v tahu za ohybu. Zhodnocení využitelnosti zpracovaných kalibračních vztahů. Porovnání se vztahy z literatury. Rozsah práce cca 60 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Nedestruktivní metody jsou ve stavebnictví využívány pro hodnocení parametrů stavebních materiálů, především pro zjišťování pevnostních charakteristik a určování změn při zkouškách trvanlivosti. Mezi nejpoužívanější nedestruktivní metody patří ultrazvuková impulsová metoda. Méně využívanou nedestruktivní metodou je metoda rezonanční. Cílem této práce je zpracování kalibračních vztahů mezi parametry z nedestruktivního zkoušení a pevností v tlaku, resp. pevností v tahu za ohybu a posouzení jejich využitelnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nedestruktivní metody, ultrazvuková impulsová metoda, rezonanční metoda, kalibrační vztahy, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, cement.

ABSTRACT

Nondestructive testing methods are employed as a tool for evaluation of parameters of building materials, especially to ascertain strength properties and to determine alteration occurred during durability tests. An ultrasonic pulse velocity method is one of the most used nondestructive methods. A resonance method is employed among the nondestructive methods less. The aim of this work is to establish the calibration relationships between parameters of nondestructive testing and compressive strength value and flexural tensile strength value, respectively. Moreover, applicability of the calibration relationships is also discussed.

KEYWORDS

Nondestructive testing, ultrasonic pulse velocity method, resonance method, calibration relationships, compressive strength, flexural tensile strength, cement.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lenka Procházková *Využití dynamických nedestruktivních metod pro zjišťování pevností cementů z cementárny Hranice*. Brno, 2017. 122 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 01. 2017

Bc. Lenka Procházková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě bych ráda poděkovala především panu doc. Ing. Jiřímu Brožovskému, CSc. za cenné rady, odborné vedení a čas, který mi věnoval při zpracování této diplomové práce. Zároveň bych ráda poděkovala celé své rodině a přátelům za podporu při mém studiu a psaní této práce.

OBSAH

ÚVOD	11
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1 CEMENT	12
1.1 ROZDĚLENÍ CEMENTŮ	12
1.1.1 GRANULOVANÁ VYSOKOPECNÍ STRUSKA (S)	15
1.1.2 KŘEMIČITÝ ÚLET (D)	15
1.1.3 PUCOLÁN (P, Q)	15
1.1.4 POPÍLEK (V, W)	16
1.1.5 KALCINOVANÁ BŘIDLICE (D)	16
1.1.6 VÁPENEC (L, LL)	17
1.1.7 DALŠÍ SLOŽKY	17
1.2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY	17
1.2.1 POŽADAVKY NA FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	17
1.2.2 POŽADAVKY NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI	18
1.3 SUROVINY NA VÝROBU SLÍNKU	19
1.3.1 ZÁKLADNÍ SUROVINY	19
1.3.2 KORIGUJÍCÍ SUROVINY	20
1.3.3 ZUŠLECHŤUJÍCÍ SUROVINY	21
1.4 TECHNOLOGIE VÝROBY CEMENTU	21
1.4.1 PŘÍPRAVA SUROVINOVÉ SMĚSI (VSTUPNÍCH SUROVIN)	22
1.4.1.1 TĚŽBA	22
1.4.1.2 DRCENÍ	23
1.4.1.3 MLETÍ	23
1.4.2 VÝPAL SLÍNKU	23
1.4.3 DRCENÍ A MLETÍ SLÍNKU	25
1.5 SLÍNKOVÉ MINERÁLY A JEJICH REAKCE	25
1.5.1 ALIT	26
1.5.1 BELIT	27
1.5.1 C ₃ A – TRIKALCIUMALUMINÁT	28
1.5.1 C ₄ AF – TETRAKALCIUMALUMINÁTFERIT, BROWNMILLERIT, CELIT	29
2 DYNAMICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ METODY	31
2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ A PODSTATA	31
2.2 ULTRAZVUKOVÁ IMPULSOVÁ METODA	32
2.2.1 PRINCIP	32
2.2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ	33
2.2.2.1 VLHKOST	33

2.2.2.2 TEPLOTA BETONU	34
2.2.2.3 MĚŘÍCÍ ZÁKLADNA	34
2.2.2.4 TVAR A VELIKOST TĚLESA	35
2.2.2.5 VLIV VÝZTUŽNÝCH OCELÍ	36
2.2.2.6 TRHLINY A DUTINY	36
2.2.2.7 POVRCH BETONU	37
2.2.2.8 STÁŘÍ BETONU	37
2.2.2.9 SLOŽENÍ BETONU	37
2.2.2.10 ZPŮSOB PROZVUČENÍ KONSTRUKCE	38
2.2.3 VÝSTUPY Z MĚŘENÍ	39
2.3 REZONANČNÍ METODA	40
2.3.1 PRINCIP	40
2.3.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ	42
2.3.2.1 ZVÝŠENÁ TEPLOTA	42
2.3.2.2 DRUH KAMENIVA	42
2.3.2.3 MNOŽSTVÍ A DRUH CEMENTU	42
2.3.2.4 STÁŘÍ BETONU	42
2.3.2.5 VNITŘNÍ STRUKTURA	42
2.3.3 VÝSTUPY Z MĚŘENÍ	42
2.4 ZÁVISLOSTI MEZI RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÉHO IMPULSU A PEVNOSTMI CEMENTŮ UVEDENÉ V ODBORNÝCH PUBLIKACÍCH	45
3 CÍLE PRÁCE	50
II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	51
4 METODIKA ZKOUŠEK	51
4.1 ULTRAZVUKOVÁ IMPULSOVÁ METODA (ČSN EN 12504-4 A ČSN 731371)	52
4.2 REZONANČNÍ METODA (ČSN 731372)	52
4.3 STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU A TLAKU A OBJEMOVÉ HMOTNOSTI (ČSN EN 196-1; ČSN EN 12190)	53
4.3.1 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU	53
4.3.2 PEVNOST V TLAKU	54
4.3.3 OBJEMOVÁ HMOTNOST P	54
4.4 KALIBRAČNÍ VZTAHY – ZPRACOVÁNÍ A HODNOCENÍ POUŽITELNOSTI	54
5 VÝSLEDKY ZKOUŠEK	56
5.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVOU IMPULSOVOU METODOU	56
5.2 VÝSLEDKY REZONANČNÍ METODOU	82
6 KALIBRAČNÍ VZTAHY	103
6.1 KALIBRAČNÍ VZTAHY PRO PREDIKCI PEVNOSTÍ Z CEMENTŮ Z CEMENTÁRNY HRANICE	103

6.2. POROVNÁNÍ KALIBRAČNÍCH VZTAHŮ PRO CEMENTY Z CEMENTÁRNÝ HRANICE SE VZTAHY PRO CEMENTY Z RŮZNÝCH CEMENTÁREN PŘEVZATÝCH Z ODBORNÝCH PUBLIKACÍ	105
7 DISKUZE	108
ZÁVĚR	112
POUŽITÁ LITERATURA	114
SEZNAM OBRÁZKŮ	117
SEZNAM GRAFŮ	118
SEZNAM TABULEK	120
SEZNAM ZNAČEK A ZKRATEK	121

ÚVOD

Nedestruktivní metody zkoušení umožňují sledovat vlastnosti materiálů bez jejich porušení. Dynamické metody patří mezi nedestruktivní metody zkoušení, jedná se především o ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodu. Tyto metody jsou využívány při sledování parametrů různých stavebních materiálů.

V oblasti stavebních materiálů se ultrazvuková impulsová metoda využívá především pro zkoušení betonu, a to ke zjišťování pevnosti v tlaku, dynamického modulu pružnosti, hodnocení jeho stejnoměrnosti, zjišťování defektů či hloubky trhlin. Také je využívána jako podpůrná metoda při zkoušce mrazuvzdornosti betonu, zjišťování jeho odolnosti proti agresivním médiím či působení jiných degradačních procesů. Postupy zkoušení jsou kodifikovány v českých technických normách ČSN 73 1371, ČSN EN 12504-4, ČSN 73 1380 a ČSN 731322. Je využívána i pro jiné stavební materiály např. cihly, dřevo, správkové hmoty a cementy. U těchto stavebních materiálů slouží ultrazvuková impulsová metoda pro zjišťování vybraných mechanických charakteristik (např. pevnosti) a pro hodnocení míry degradace např. v důsledku poškození dřevokaznými škůdci (dřevo) nebo v důsledku působení vysokých teplot (správkové hmoty), v tomto případě nejsou postupy měření a vyhodnocení zkoušek uvedeny v technických normách. Výhodou ultrazvukové impulsové metody je jednoduchost měření a možnost měření nejen na vzorcích materiálu, ale i přímo v konstrukci.

Rezonanční metoda má při zkoušení materiálů v technické praxi menší uplatnění; měření touto metodou se provádí na zkušebních vzorcích přesně definovaného tvaru, vyžaduje podstatně vyšší teoretickou přípravu pro měření a vyhodnocení výsledků měření než ultrazvuková impulsová metoda. Je využívána především pro zjišťování pružnostních charakteristik materiálů (dynamické moduly pružnosti, dynamické Poissonovo číslo), ale také při zkouškách trvanlivosti stavebních materiálů. Pro zkoušení betonu jsou postupy a vyhodnocení měření rezonanční metodou kodifikovány v ČSN 73 1373. Rezonanční metoda je využívána i při zkoušení mrazuvzdornosti stavebních materiálů, konkrétně pro betony (ČSN 73 1380) a stavební kámen (ČSN EN 14146).

Pro zjišťování pevnostních charakteristik stavebních materiálů je nezbytná existence kalibračního vztahu mezi pevností a parametrem z nedestruktivního zkoušení.

Cílem diplomové práce je vytvoření kalibračních vztahů mezi parametrem z nedestruktivního zkoušení a pevností v tlaku resp. pevností v tahu za ohybu pro cementy z cementárny Hranice. Zhodnocení využitelnosti ultrazvukové impulsové a rezonanční metody z hlediska zjišťování pevností cementů a porovnání kalibračních vztahů zpracovaných pro cementy z cementárny Hranice s kalibračními vztahy zpracovanými pro cementy z jiných tuzemských cementáren.

I. Teoretická část

1 CEMENT

Cementy jsou v současnosti nejpoužívanějším pojivem ve stavebnictví. Hlavní složkou jsou hydraulické minerály takového druhu a množství, jakých je třeba k přípravě kvalitního konstrukčního nebo jiného zvláštního betonu.

Podle ČSN EN 197-1 je portlandský cement hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Cementy se dělí na cementy pro obecné použití, cementy s velmi nízkým hydratačním teplem a další druhy cementů - síranovzdorné, struskosíranové, hlinitanové a cementy pro zdění. [13]

Silikátový (křemičitanový) cement se vyrábí vysokoteplotním výpalem v podstatě ze stejných surovin jako silně hydraulické vápno. Základní rozdíl mezi výrobou hydraulického vápna a výrobou cementu spočívá v překročení slinovací teploty 1450 °C. Při překročení této teploty dochází k hlubším chemickým změnám a v jejich důsledku vzniká trikalciumpsilikát (alit), který je v cementu nejvýznamnějším hydraulicky aktivním minerálem. Kromě vápencových slínů lze k výrobě silikátového cementu využít vápenec doplněný minerální surovinou obohacující vápencovou složku o hydraulické oxidy. Obsah uhličitanu vápenatého má činit cca 77% z hmotnosti celé minerální násady. Silikátový cement je zdaleka nejběžnějším typem cementu pro všeobecné použití, a proto se běžně slovo „silikátový“ vynechává. [11]

K výrobě cementu se v současné době používají výhradně kontinuální rotační pece, i když původně probíhala výroba cementu i v pecích šachtových. Za počátek moderního cementářství je považován patent Johna Aspdina z roku 1824. Aspdin chápal cement především jako pojivo pro výrobu umělých kamenných prvků nahrazujících kvalitní stavební kámen z Portlandu. Odtud název portlandský cement. Jedná se o cement, který je jednosložkový, tedy mletý slínek bez dalších hydraulických příměsí. [2, 11]

1.1 Rozdělení cementů

V praxi se často část slínku nahrazuje jinou hydraulicky aktivní látkou, aniž by cement ztratil svoji pojivovou schopnost. Takové nahrazení je žádoucí jak z ekologického, tak z ekonomického hlediska.

Cementy pro obecné použití se podle ČSN EN 197-1 se rozdělují na pět základních druhů:

- CEM portlandský cement,

- CEM II portlandský cement směsný,
- CEM III vysokopecní cement,
- CEM IV pucolánový cement,
- CEM V směsný cement.

Za římskou číslicí se uvádí hodnota normalizované pevnostní třídy. Pevnostní třída cementu vyjadřuje pevnost v tlaku v MPa cementových trámečků po 28 dnech připravených a odzkoušených podle normy ČSN EN 196-1. Nejnižší normalizovanou třídou je 32,5, následuje třída 42, 5 a 52, 5. Za označením třídy pevnosti může následovat označení R, což znamená, že cement je rychlovazný, vykazuje tedy vysokou počáteční pevnost.

Podle ČSN EN 196-3 cementy třídy pevnosti 32,5 a 42,5 mají nejdříve tuhnout za hodinu po smíchání s vodou, u cementu 52,5 je přípustné tuhnutí už po 45 minutách od zamíchání s vodou. Počátek tvrdnutí je u všech cementu do 12h.

Norma ČSN EN 197-1 definuje 27 výrobků skupiny cementů pro obecné použití a specifikuje složky, které se používají k náhradě slínku, viz tab. 1.

Tabulka 1: 27 výrobků skupiny cementů pro obecné použití (Dle normy ČSN EN 197-1 ed. 2)

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro obecné použití)		Složení (poměr složek podle % hmotností)										
			Hlavní složky										Doplňující složky
			Slínek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolán		Popílek		Kalcinovaná břídlíce	Vápenec		
						Přírodní	Přírodní kalcinované	Křemičitý	Vápenatý				
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	-	6-10		-	-		-	-	-	0-5

Tabulka 1: Pokračování

CEM II	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břídlíci	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portlandský směsný cement	CEM II/A-M	80-88	-	12-20								0-5
		CEM II/B-M	65-79	-	21-35								0-5
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pucolánový cement	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5
CEM V	Směsný cement	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-39	31-49	-	30-50			-	-	-	-	0-5

Základní složkou cementu pro obecné použití je portlandský slínek. V závislosti na druhu směsného cementu se přidávají ke slínku další látky. Jsou to látky s latentně hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi, a to:

1.1.1 Granulovaná vysokopecní struska (S)

Granulovaná vysokopecní struska je latentně hydraulická látka, jejíž hydraulické vlastnosti jsou vyvolány vhodnou aktivací při hydrataci. Vzniká rychlým ochlazením vhodně složené struskové taveniny vznikající při tavení železné rudy ve vysoké peci. Struska musí být nejméně ze dvou třetin hmotnosti sklovitá a při vhodné aktivaci musí vykazovat hydraulické vlastnosti. Musí se sestávat nejméně ze dvou třetin z CaO , MgO a SiO_2 . Zbytek obsahuje Al_2O_3 a malé množství jiných sloučenin. Hmotnostní poměr $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ musí být větší než 1. Portlandský struskový cement má zvýšenou odolnost vůči agresivnímu prostředí, hydratuje pomaleji, takže je použitelný pro masivní základové konstrukce a betonáž v létě. První dny po betonáži musí být beton kvůli zvýšenému sklonu ke smršťování udržován ve vlhku. [13, 16]

1.1.2 Křemičitý úlet (D)

Křemičitý úlet je tvořen velmi jemnými kulovitými částicemi s vysokým obsahem amorfního oxidu křemičitého. Křemičitý úlet, který se používá na výrobu portlandského cementu s křemičitým úletem, musí mít obsah amorfního $\text{SiO}_2 \geq 85 \%$ hmotnostních, ztrátu žíháním $\leq 4 \%$ hmotnostních a měrných povrch stanovený metodou BET $> 15 \text{ m}^2/\text{g}$. Křemičitý úlet vzniká jako odpadní produkt při redukci křemene vysoké čistoty v elektrických obloukových pecích při výrobě křemičitých a ferrokřemičitých slitin. Obsah elementárního křemíku Si nesmí být vyšší než $0,4 \%$ hmotnosti. Portlandský cement s křemičitým úletem má zvýšenou pevnost v tahu a používá se pro konstrukce, které jsou kromě tlaku namáhány právě tahem. [11, 13, 16]

1.1.3 Pucolán (P, Q)

Pucolány jsou látky křemičité nebo křemičito-hlinité, případně kombinace obou. Pucolány po smíchání s vodou samy o sobě netuhnou, netvrdnou samy o sobě ani s přidavkem budiče. Když jsou však pomleté, při normální teplotě reagují s vodou obsahující rozpuštěný hydroxid vápenatý, přičemž vznikají sloučeniny křemičitanů vápenatých a hlinitanů vápenatých, které zajišťují pevnost. Tyto sloučeniny jsou podobné těm, které vznikají při tvrdnutí cementu. Pucolány obsahují převážně aktivní SiO_2 a Al_2O_3 a malé množství Fe_2O_3 a jiných oxidů. Reakce je velmi pomalá oproti reakci portlandského cementu. Portlandský pucolánový cement se vyrábí ve spodní pevnostní třídě. Přítomnost pucolánu

zvyšuje odolnost proti uhličitánovým vodám, odpadním vodám a usnadňuje přípravu vodotěsných betonů.

Přírodní pucolán (P) je obvykle látka vulkanického původu nebo sedimentárního původu vhodného chemického a mineralogického složení.

Přírodní kalcinované pucolány (Q) jsou látky vulkanického původu, hlíny, břidlice nebo sedimentární horniny vhodného chemického mineralogického složení. [11, 13, 16]

1.1.4 Popílek (V, W)

Popílek se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů topenišť otápěných prachovým uhlím. Pokud se popílek získává jiným způsobem, nesmí být takový popílek použit v cementářství. Portlandský popílkový cement se vyznačuje dobrou zpracovatelností a vodotěsností, je možné ho použít např. na stavbu přehrad.

Křemičitý popílek (V) je jemný prášek tvořený kulovými sklovitými částicemi s pucolánovými vlastnostmi, sestává zejména z aktivního oxidu křemičitého (minimálně 25 %) a oxidu hlinitého. Ve zbytku pak z oxidu železitého a jiných oxidů.

Vápenatý popílek (W) je jemně mletý prášek s hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi nebo s oběma. Sestává zejména z aktivního oxidu vápenatého, aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého. Ve zbytku je pak obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Obsah aktivního oxidu vápenatého CaO musí být minimálně 10 %. Vápenatý popílek obsahující aktivní oxid vápenatý mezi 10,0 % a 15,0 % hmotnosti musí obsahovat nejméně 25,0 % hmotnosti aktivního oxidu křemičitého. Takový jemně mletý vápenatý popílek musí mít po 28 dnech hydratace nejméně 10 MPa pevnosti v tlaku. Rozpínání vápenatého popílku musí být menší než 10 mm. [11, 13, 16]

1.1.5 Kalcinovaná břidlice (D)

Kalcinovaná břidlice, zvláště kalcinovaná olejnatá břidlice, se vyrábí ve speciální peci při teplotě cca 800 °C. Podle složení přírodního materiálu a výrobního postupu obsahuje kalcinovaná břidlice slínkové fáze, zvláště dikalciumsilikát a monokalciumaluminát. Vedle toho obsahuje malá množství volného oxidu vápenatého a síranu vápenatého a značný podíl pucolánově reagujících oxidů, zvláště oxidu křemičitého. Kalcinovaná břidlice má v jemně semletém stavu výrazně hydraulické vlastnosti jako cement portlandský a navíc pucolánové vlastnosti. Jemně mletá kalcinovaná břidlice musí mít po 28 dnech nejméně 25 MPa pevnosti v tlaku, rozpínání menší než 10 mm. Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí se používá na injektážní hmoty. [11, 13, 16]

1.1.6 Vápenec (L, LL)

Vápenec musí splňovat požadavky na minimální obsah uhlíčitanu vápenatého o hodnotě 75 % hmotnostních, dále maximální obsah jílovitého podílu stanovený metodou adsorpce metylenové modři musí být menší než 1,2 g/100 g a celkový obsah organického uhlíku musí splňovat podmínku (TOC) < 0,20 % hmotnostních (druh LL) a < 0,50 % hmotnostních (druh L). Portlandský cement s vápencem odolává plísním a je vhodný do míst, která nejsou mechanicky namáhána, používá se v potravinářském průmyslu a ve zdravotnictví. [11, 13, 16]

1.1.7 Další složky

Doplňkové složky, které se přidávají k slínku, jsou přírodní anorganické látky. Tyto látky pocházejí z procesu výroby slínku nebo výše zmíněné složky, pokud nejsou v cementu použity jako složky hlavní. Doplnkové složky mohou mít inertní, hydraulické, latentně hydraulické nebo pucolánové vlastnosti. Přídavek těchto složek v cementu nesmí nijak ovlivnit kvalitu cementu nebo zpracovatelnost cementu. [13, 16]

1.2 Základní požadavky na fyzikálně-mechanické charakteristiky

1.2.1 Požadavky na fyzikální vlastnosti

- Počátek tuhnutí

Tuhnutí je chemický a fyzikální pochod, při němž kašovitá směs cementu a vody tuhne v pevnou hmotu. Počátek tuhnutí je stanoven pro každý druh cementu normou viz tab. 2. Zkouška tuhnutí se zjišťuje pomocí Vicatovy jehly. Tvrdnutí je chemický a fyzikální pochod, při němž se tuhá směs přeměňuje v tvrdou hmotu. Rychlost tvrdnutí je dána chemickým složením a jemností cementu. Největší přírůstek pevnosti nastává do 28 dnů.

- Objemová stálost

Objemová stálost se stanovuje dle EN 196-3 pomocí Le Chatelierovy objímky a její roztažení musí být menší než 10mm.

- Hydratační teplo

Hydratace je exotermický proces – množství tepla vyvinuté jednotkou hmotnosti se nazývá hydratační teplo. Hydratační teplo cementů pro obecné použití s nízkým hydratačním teplem nesmí být větší než charakteristická hodnota 270 J/g při stanovení podle ČSN EN 196-8 po 7 dnech nebo při stanovení podle ČSN EN 196-9 po 41 hodinách. Cementy pro obecné použití s nízkým teplem se musí označit „HL“.

Vývin hydratačního tepla závisí na mineralogickém složení cementu, jemnosti mletí a na množství volného vápna a alkálií. Z celkového hydratačního tepla se vyvine za první 3 dny asi 50 %, za 7 dnů tvrdnutí 65 až 80 % a za 6 měsíců 85 až 90 %. [14]

1.2.2 Požadavky na mechanické vlastnosti

- Normalizovaná pevnost

Normalizovaná pevnost cementu je pevnost v tlaku stanovená podle ČSN EN 196-1 po 28 dnech, která musí odpovídat tab. 2. Rozeznávají se tři třídy normalizované pevnosti: třída 32,5, třída 42,5 a třída 52,5.

Tabulka č. 2 - Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti uvedené jako charakteristické hodnoty [14]

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku MPa			Počátek tuhnutí [MIN]	Objemová stálost [mm]	
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost			
	2 dny	7 dnů	28 dnů			
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L ^a	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L ^a	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				
^a Třída pevnosti určená pouze pro cement CEM III						

- Počáteční pevnost

Počáteční pevností se rozumí pevnost v tlaku stanovená podle ČSN EN 196-1, a to buď po 2 dnech, nebo po 7 dnech, která musí vyhovět požadavkům v tab. 2.

Norma určuje tři třídy počáteční pevnosti pro každou třídu normalizované pevnosti:

- třída s normální počáteční pevností značenou písmenem N,

- třída s vysokou počáteční pevností značená písmenem R,
- třída s nízkou počáteční pevností značená písmenem L.

Třída L se používá pouze pro cementy CEM III. Jsou to jmenovité vysokopecní cementy s nízkou počáteční pevností.

Zkouší se pevnost v ohybu lámáním trámečků o rozměrech 40x40x160 mm. Zkoušení pevnosti v tlaku se provádí na zlomcích trámečků. Podle těchto výsledků se cement zařazuje do jakostních tříd. [14]

1.3 Suroviny na výrobu slínku

Suroviny vhodné na výrobu slínku musí mít optimální mineralogické a chemické složení a odpovídající fyzikálně chemické vlastnosti. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří rozpojitelnost a melitelnost. Nezanedbatelný je také vliv vlhkosti a homogenity. Suroviny pro výrobu slínku lze rozdělit do základních skupin, jsou to suroviny základní, které tvoří převážnou část směsi, a na suroviny korigující a zušlechťující. [2]

1.3.1 Základní suroviny

Vápenec je základní surovinou pro přípravu surovinové směsi pro výpal portlandského slínku. Aby měla cementářská surovina předepsané chemické složení, musí být vápenec doplněn takzvanými sialitickými surovinami. Sialitické suroviny jsou zdrojem oxidu křemičitého, železitého a hlinitého v takovém množství, aby slinuly a vytvořily s oxidem vápenatým sloučeniny, které jsou nositelkami hydraulických vlastností slínku. Sialitickými složkami jsou většinou jíly, hlíny, různé druhy břidlic, případně strusky nebo popílký. Vzhledem k mineralogickému složení je dávana přednost jílovým minerálům. Proto montmorilonitické, illitické a kaolinitické jíly představují velmi dobré materiály pro výrobu slínku. [2, 5]

Nejlepší vápenec pro výrobu cementu má takové složení, které nevyžaduje žádnou další úpravu přidávkou další příměsi. Jsou to hlavně vápencové slíny obsahující dobře promíchané vápencové složky s jemnými hydraulickými podíly. Tato surovina je měkká, snadno těžitelná a dobře a nízko palitelná. Pro výrobu slínku je také obecně dávana přednost jemně krystalickým vápencům obsahujícím jisté množství silikátových minerálů, protože jsou reaktivnější než vápenec s velkými krystaly. Většina vápenců v českých zemích používaných k výrobě slínku není nejvhodnější a obsahuje určitá množství jiných sedimentů, jako je písek a jíly. [2, 5, 15]

Hořík se ve vápenci obvykle vyskytuje ve formě dolomitu. Obsah MgO v surovinové směsi je normami striktně omezován. Vysoká koncentrace hoříku ve formě periklasu může způsobit objemovou nestálost a roztažnost malt a betonů. U nás se dolomitizace výrazněji

projevila ve vápencích v oblasti Krkonoš a dále v jižních Čechách – oblast Velkých Hydčic. Významnou roli při hodnocení vápenců jako složky surovinové směsi z hlediska technologie zpracování a kvality cementu hrají sírany, sulfidy, draslík, sodík, chloridy a organické látky. [2, 5]

Síra se v surovinách může vyskytovat ve formě síranů nebo sulfidů. Obvykle jsou to sádrovce nebo anhydrit. Sulfid je obsažen v sedimentárních horninách jako FeS_2 , mineralogicky ve formě pyritu, vzácněji markasitu. Oxidace sulfidů železa se urychluje při teplotách $420^\circ - 450^\circ\text{C}$ a dochází k uvolňování SO_2 , který se tak objevuje v emisích. Z toho důvodu je důležité znát obsah sulfidů ve výchozích surovinách. Z technologických důvodů bývá obvykle obsah síranů v surovinové směsi limitován v rozmezí max. 0,7 až 0,9 %. [2, 5]

Alkálie se do suroviny dostávají prostřednictvím vápence i sialitické složky, malá část pochází z aditiv a popela z uhlí. Nejčastějším zdrojem alkálií jsou jílové minerály, které ve své krystalické struktuře obsahují draslík a částečně i sodík. Obecně jsou vysoké koncentrace sodíku škodlivější ve vztahu ke kvalitě cementu než zvýšené koncentrace draslíku. Kromě toho, že alkálie negativně působí na kvalitu cementu, mohou při vysokých koncentracích vznikat také provozní problémy spojené ze zalepováním výměníku. Dochází k cirkulaci těkavých alkálií, síranů a chloridů mezi výměníkem a pecí. To může vést k úplnému zanesení cyklonů výměníku a kouřovodů. To má vliv na tepelnou spotřebu a výkon pece. Celkový obsah alkálií v surovinové směsi bývá obvykle požadován v rozmezí 1,0 – 1,2 %. [2, 5]

Chloridy jsou v surovinách přítomny jako NaCl , který je obsažen ve formě roztoku v pórech mladých sedimentů, podobně jako halit. Chloridy jsou těkavé, což vede k vážným problémům s výměníkem, dojde-li k jejich kondenzaci v teplotní oblasti okolo 800°C . Z toho důvodu činí kritická koncentrace chloridů v surovinové směsi 0,01 až 0,015 %. [2, 5]

Organické látky bývají v surovinách také často přítomny. Vápenec jich obvykle obsahuje 0,15 až 0,25 %. Jílové složky jich mohou obsahovat 0,8 % i více. Organické látky jsou tvořeny zbytky rostlinných nebo živočišných organismů. V surovinové směsi lze tolerovat jejich obsah do 0,5%. V případě vyšších koncentrací je nutno znát povahu přítomné organické látky. [2, 5, 15]

1.3.2 Korigující suroviny

Jde zpravidla o zvýšení obsahu oxidů vápenatého, železitého, hlinitého a křemičitého. Nedostatečné množství oxidu vápenatého se upravuje přidavkem vysokoprocentního vápence. Časté je zvýšení oxidu železitého, které se řeší přidavkem železitých rud nebo kyzových výpražků. Zvýšení obsah oxidu hlinitého se řeší pomocí bauxitu. Někdy se musí

těž zvyšovat obsah oxidu křemičitého. V takovém případě se do surovinové směsi přidává buď křemelina, Si-látky nebo jemný křemičitý písek. [15]

1.3.3 Zušlechťující suroviny

Někdy se pro zlepšení slinovatelnosti a zvýšení aktivity slínku používají ještě malá množství látek, které působí buď jako intenzifikátory nebo mineralizátory nebo jako legující přísady. Účinnost některých látek se navzájem překrývá, takže je někdy obtížné zařazení do konkrétní skupiny.

Intenzifikátory výpalu jsou látky, které již při malém přídávku snižují viskozitu kapalné fáze vznikající ve slínku. Při optimálním přídávku snižují teplotu výpalu asi o 100 °C. Používají se např. fluoridy, především kazivec.

Mineralizátory jsou látky, které již při malém přídávku upřednostňují tvorbu jednoho minerálu před druhým, např. C_3S proti C_2S . Tuto schopnost mají především fluorosilikáty, konkrétně Na_2SiF_6 , $CaSiF_6$, a Mg_2SiF_6 .

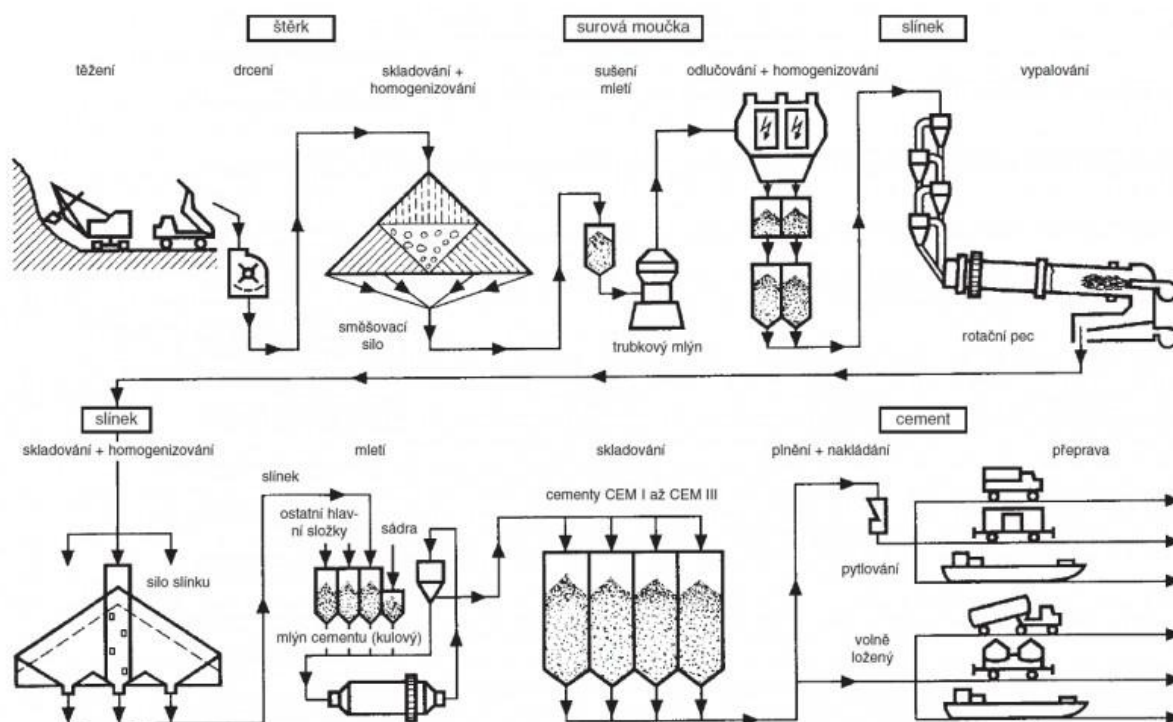
Legující přísady zlepšují hydraulické vlastnosti slínků a usnadňují melitelnost. Používají se např. fosforečnany a CaF_2 . [2]

1.4 Technologie výroby cementu

Výroba slínku je možná třemi způsoby, a to suchým, polosuchým nebo mokrým způsobem. Způsoby výroby se od sebe liší způsobem mísení, mletí a homogenizace surovinové směsi a její podoby při výpalu na slínek. V současné době se v České republice vyrábí cement pouze suchým způsobem. [2]

Suchý způsob výroby vyžaduje, aby byla směs před samotným výpalem vysušena. Natěžená a podrcená surovina putuje do homogenizačního sila a poté do mlýna, kde je pomleta a následně přemístěna společně s korekčními látkami do sila, kde probíhá homogenizace. Surovinová moučka je zde čeřena, aby se zabránilo sedání. Po odležení putuje moučka přes výměníky tepla do rotační pece, kde dochází k vlastnímu slnutí. Vypálený slínek prochází přes chladič do slínkového sila a poté jsou k němu přimíchány další složky a sádrovec poté následuje mletí v kulovém mlýně. Hotový cement se skladuje v silech a je dále expedován volně ložený nebo balený.

Mezi bezesporu největší výhody suchého způsobu patří vysoká výkonnost výroby, vysoká tepelná účinnost vypalovacího procesu a úspora energie oproti mokrému způsobu. Nevýhodou je ovšem nižší stupeň homogenizace než u mokrého způsobu.



Obrázek 1: Schéma výroby cementu [17]

Slínek se po částečném vychladnutí drtí a poté se skladuje ve slínkovém silu. Následně se odležený slínek mele společně s 2 až 6 % sádrovce. Sádrovec slouží v cementu jako regulátor tuhnutí. Kromě sádrovce se mohou přidávat i další přísady, tzv. vedlejší přísady, a to v množství nepřesahující 1%, jakými jsou intenzifikátor mletí nebo hydrofobní přísady. Výsledkem konečného mletí je prášek o měrném povrchu 225 až 400 m².kg⁻¹ který putuje do cementového sila a odtud je expedován k zákazníkovi pomocí přepravních aut či vagonů nebo na balicí a paletizační linku. [2, 15]

1.4.1 Příprava surovinové směsi (vstupních surovin)

1.4.1.1 Těžba

Vápenaté suroviny se těží povrchoвым způsobem v lomech. Vápenec se odděluje clonovými odstřely, následně je odebírán zpravidla kolovými nakladači a dopravován auty nebo pásovými dopravníky na drtírnu.

Křemičité složky surovinové směsi jíly a hlíny se těží povrchově např. v hliništích. Za ideální cementářskou surovinou lze považovat slínovec, který obsahuje uhličitán vápenatý s příměsí jílových minerálů. Pro zajištění optimální směsi pro výrobu surovinové moučky je

nutné provádět pravidelné kontrolní analýzy chemického složení. Aby byly přepravní náklady co nejnižší, probíhá těžba zpravidla v blízkosti cementárny. [14, 18]

1.4.1.2 Drcení

Drcení surovin pro výrobu probíhá dvoustupňově. Primárním drtičem bývá téměř výlučně drtič čelistový. U čelistových drtičů je materiál drcen tlakem, zčásti též lámáním nebo roztíráním v prostoru mezi pevnou a pohyblivou čelistí drtiče. Šířka výpustné štěrbiny se může v určitém rozsahu měnit, což umožňuje získávat produkt požadované zrnitosti. Jejich výhodou je jednoduchost, dlouhá životnost a malé opotřebení částí drtiče. Sekundárních drtičů je celá řada např. kuželový, kladivový, odrazový, nejpoužívanější jsou drtiče kladivoodrazové. V kuželových drtičích je materiál zdobňován mezi otáčejícím se drtícím kuželem a nepohyblivým drtícím pláštěm. Kladivové a odrazové drtiče drtí materiál prudkými údery kladiv nebo drtících lišt a nárazy rychle se pohybujících zrn na nepohyblivé pancéřové desky.

Podrcená surovina se pásovými dopravníky dostává do zásobníků nebo na předhomogenizační skládky, které slouží především pro vyrovnání chemismu vápence. [2, 18]

1.4.1.3 Mletí

Mletí patří k nejdůležitějším fázím přípravy vstupních surovin před výpalem a zároveň patří k technologicky i energeticky nejnáročnějším procesům. V dnešní době jsou nejčastějšími zařízeními pro mletí kulové (trubnaté) mlýny. Kulové mlýny jsou v podstatě duté bubny nebo válce, které se otáčejí kolem své vodorovné osy a uvnitř jsou mlecí tělesa. Při otáčení mlýna jsou mlecí koule působením odstředivé síly vynášeny vzhůru, materiál je padajícími a převalujícími se koulemi rozemílán. Surovinová směs se v mlýnu i suší, přičemž se využívají hlavně výstupní plyny z pece a odpadní vzduch z chladiče. Ze mlýna je surovina pneumaticky dopravena do vzduchového třídíče, odkud jsou hrubší částice zpět vráceny do mlýna na domletí. Namletá surovina se uskládá v homogenizačních sílech. Do sila se přivádí tlakový vzduch, který zajišťuje čření a homogenizaci. [2]

1.4.2 Výpal slínku

Nejdůležitějším procesem výroby cementu je výpal slínku. Surovinová moučka prochází cyklonovým výměníkem, kde dochází k předehřátí suroviny na teplotu cca 800°C, s jakou vstupuje do rotační pece. Cyklonové výměníky jsou předsazeny před rotační pec a zlepšují tepelnou bilanci pece.

Mezi nepoužívanější typy výměníků u suchého způsobu výroby patří typ Humboldt, Dopol, Přerovský dvoustupňový a Přerovský pětistupňový výměník, který se používá v cementárně v Hranicích. [2,15, 18]

Dříve se používaly především pece šachtové, které měly malý výkon, obtížné řízení výpalu, poskytovaly slínek horší kvality a byly použitelné pouze pro výpal sbalků. Dnes se používají rotační pece pro svůj vysoký výkon, kvalitní výpal slínku a použitelnost pro mokry i suchý způsob výroby cementu. [2, 18]

Jako palivo v cementářských pecích se využívá práškové uhlí, koksová krupice a alternativní paliva, jako např. pneumatiky nebo masokostní moučka. Výjimečně se dnes používá drahý zemní plyn či mazut, který má vysokou viskozitu a je tudíž nutný jeho ohřev na 140 °C před vstupem do hořáku. [2, 8, 15]

Rotační pece jsou ocelové válce vyložené žáruvzdornou vyzdívkou, která musí odolávat vysokým teplotám, náhlým teplotním změnám, mechanickému a chemickému namáhání a musí být objemově stálá. Délka pecí je při suchém způsobu výroby 60 až 100 m, průměr pecí je 3–6 m, sklon pecí je 3–4° a otáčí se kolem osy s frekvencí 0,9 až 1,1 otáčky/min. Surovina se pohybuje rychlostí 35–45 cm/h. Výkony rotačních pecí se pohybují v rozmezí asi 300–600 kt/rok. [2, 18]

Při průchodu rotační pecí prochází slínek těmito stádii výpalu:

- **Předehřev (do 750 °C)** – nejprve dochází k uvolnění hydrátové vody a následně hydroxylové vody, při teplotě 573 °C nastává přeměna β -křemene na α -křemen a okolo teploty 600 °C dochází k pozvolnému rozkladu uhličitanu vápenatého na oxid vápenatý a oxid uhličitý, ke konci stádia začínají vznikat první podíly nízkovápenatých slínkových minerálů CA a C_2F , které vznikají substitučně,
- **Kalcinační (750–1250 °C)** – základním procesem je rozklad uhličitanu vápenatého, na začátku tohoto stádia probíhá intenzivní tvorba CA a C_2F , a to nejprve substitučně, poté přechází do reakce adiční, ke konci stádia vznikají výševápenaté slínkové minerály C_3A , C_AAF a C_2S ,
- **Exotermické (1250–1350 °C)** – dochází k intenzivní tvorbě C_3A , C_AAF a C_2S , jde o reakce v pevné fázi, nikoli v tavenině, ale jsou to krystalizační reakce, které jsou doprovázeny vývinem tepla,
- **Taveninové slinování (1350–1450 °C)** – slínkové minerály přecházejí do taveniny v pořadí C_3A , C_AAF , CaO , C_2S zůstává v tuhém stavu, postupným nárůstem teploty se začíná část C_2S rozpouštět, reaguje s volným CaO za vzniku C_3S , který je v tavenině nerozpustný, a proto se z ní vylučuje ve formě krystalů,

- **Chladicí** – intenzivní a rychlé zchlazení je nezbytné pro získání kvalitního slínku, při rychlém chlazení zůstává zachován C_3S , je zabráněno jeho rozpadu na C_2S a volné CaO , při pomalém chlazení dochází k nežádoucí modifikační přeměně β - C_2S na γ - C_2S , který má zanedbatelné hydraulické vlastnosti. [2, 8, 14, 18]

Rozlišujeme tři typy chladičů, a to bubnové, planetové a roštové. Dnes se používají výlučně chladiče roštové, které mají různé technologické systémy, kupříkladu systémy Recupol, Fuller či Kawasaki Heavy Industries. [2]

1.4.3 Drcení a mletí slínku

U systému Fuller je drtič přímo součástí chladiče, u jiných typů chladičů vypadáva zchlazený slínek do kladivového či kladivoodrazového drtiče. Slínek podrcený na částice velikosti 80 až 100 mm, je transportován do zásobních slínkových sil a odtud se odebírá k mletí.

Jemnost mletí je zásadní výrobní operací vzhledem k použití cementu. Jemně mleté cementy rychle hydratují, mají větší počáteční a konečné pevnosti, vyvíjejí větší hydratační teplo a při zpracování jsou plastičtější. Mletí slínku se realizuje podobně jako mletí surovinové směsi v kulových mlýnech. Společně se slínkem se mele i sádrovec, který slouží jako regulátor tuhnutí. Při výrobě směsných cementů se dále přidávají látky latentně hydraulické, pucolánové či inertní. Pro zlepšení mlecího procesu se do mlýna přidává intenzifikátor mletí, např. trietanolamin. Cement z mlýnice putuje pneumatickými dopravníky do zásobních sil a odtud je expedován jako volně ložený nebo pytlovaný. [2, 8, 12, 15]

1.5 Slínkové minerály a jejich reakce

O finálních vlastnostech slínku, resp. cementu rozhoduje celá řada faktorů. Nejdůležitějšími jsou chemicko-mineralogické složení vstupních surovin, způsob jejich zpracování před výpalem, vlastní režim výpalu včetně způsobu chlazení, druh a dávkování regulátoru tuhnutí, u směsných cementů též druh a množství příměsí. Všechny zmíněné faktory dále ovlivňují fázové složení cementu, jakož i modifikaci a morfologii vzniklých krystalů a stabilitu jejich struktury.

Portlandský slínek je tvořen vápenatými křemičitany, hlinítky, železitany a hlinitoželezitany. Jedná se o sloučeniny podobné přírodním horninotvorným minerálům. S ohledem na tuto skutečnost se sloučeniny tvořící slínek nazývají slínkovými minerály. Dosud bylo identifikováno v portlandském slínku více než 25 minerálů, rozhodující vliv na vlastnosti cementu mají čtyři hlavní: C_3S (alit), C_2S (belit), C_3A a C_4AF (brownmillerit), které tvoří přes 90% z celkové hmotnosti slínku. Kapalná fáze (tavenina) umožňuje v ní difundujícímu CaO reakci s C_2S za vzniku C_3S . Při pozorování nábrusu pod mikroskopem se

dají jednotlivé minerály rozlišit. C_3S je tvořen velkými bílými hexagonálně ohraničenými krystaly, C_2S tvoří nažloutlé až hnědozelené menší zaoblené krystaly. Mezery mezi krystaly vyplňuje světlá spojovací hmota (při pozorování pod mikroskopem) z C_4AF a tmavá spojovací hmota světlé barvy z C_3A . Výroba cementu je charakteristická vysokými teplotami a přítomností kyslíku, a proto se všechny prvky vyskytují v podobě oxidů. [2, 11]

Tabulka č. 3: Přehled hlavních složek v cementářském slínku [11]

Název	Vzorec	Slovní označení	Obsah (%)	Hydratační teplo (kJ/kg)	Hydratace
Trikalciumsilikát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)	Alit	35-75	500	Rychlá
Dikalciumsilikát	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)	Belit	5-40	250	Střední
Tetrakalciumaluminátferit	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)	Brownmillerit (celit)	9-14	420	Rychlá
Trikalciumaluminát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	Amorfní fáze	3-15	910	Velmi rychlá
Oxid vápenatý	CaO	Volné vápno	< 4	1160	Pomalá
Oxid hořečnatý	MgO	Periklas	< 6	-	Pomalá

Každá z těchto složek ovlivňuje výsledné vlastnosti cementu tím, že do něj vnáší svoje charakteristické vlastnosti.

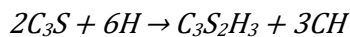
1.5.1 Alit

Trikalciumsilikát (alit) je nejdůležitější slínkový minerál. Vyznačuje se vysokou reaktivitou, díky které má vysoké pevnosti jak počáteční tak konečné, vysokou hydratační rychlost a vývin hydratačního tepla $500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Existenční oblast alitu je 1250 až 1900 °C, mimo tuto oblast se rozkládá na dikalciumsilikát, C_2S a volný oxid vápenatý, CaO . Ve slínku se nachází v nestabilním podchlazeném stavu, to znamená, že chlazení musí probíhat dostatečně rychle, aby zůstal zachován. Obsah alitu ve slínku se udává okolo 65%. Je známo sedm polymorfních modifikací, ale ve slínku se nachází pouze dvě (monoklinické). Může se v něm nacházet i menší množství C_3A , MgO , FeO , MnO , Fe_2O_3 a P_2O_5 . Alit podporuje tvorbu výkvětů a snižuje odolnost vůči agresivnímu prostředí. Ve srovnání s druhým nejdůležitějším slínkovým minerálem belitem vykazuje alit menší tvrdost, tudíž se oba minerály melou selektivně, z toho alit snadněji. [2, 4, 12, 15]

Hydratace je popisována rovnicí:



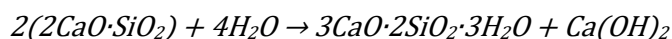
Zkráceně:



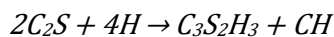
1.5.1 Belit

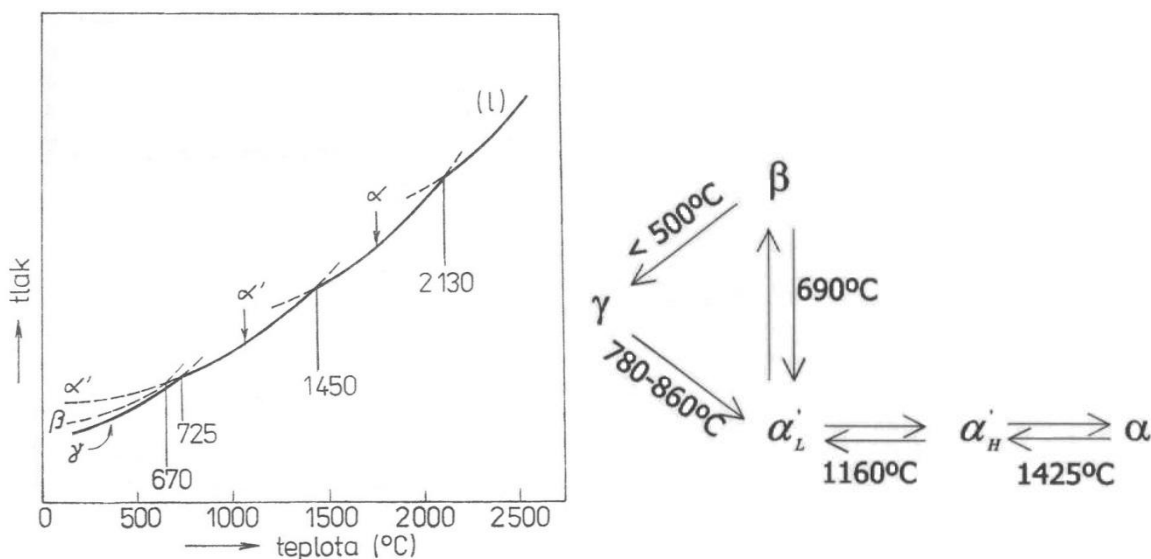
Dikalciumaluminát (belit) je druhým nejdůležitějším slínkovým minerálem. Obsah belitu ve slínku se běžně pohybuje okolo 20 %. Dříve byl jeho obsah vyšší z důvodů špatného chlazení (až 60 %). Ve srovnání s alitem se belit vyznačuje podstatně nižší počáteční hydratační rychlostí, a tím i nižší počáteční pevností. Postupně se však jeho hydratační rychlost zvyšuje, a tím se zrychluje i nabývání pevností. Po 90-denní hydrataci se pak pevnostně již téměř vyrovná alitu. Při hydrataci belitu dochází ve srovnání s jinými slínkovými minerály k nižšímu vývinu hydratačního tepla, čehož se využívá při betonáži masivních konstrukcí, kde by bylo uvolnění velkého množství tepla nežádoucí, protože by mohlo způsobit vznik trhlin. Belit je znám ve čtyřech modifikacích: α , α' , β a γ . Modifikace α' je metastabilní. Pro portlandský slínek je důležitý β - C_2S . Při pomalém chlazení za teploty 675°C dochází k přeměně β - C_2S na γ - C_2S , které je doprovázeno zvětšením objemu o 10 %, což způsobí rozpad slínku. Modifikace γ postrádá hydraulické schopnosti. Nechtěným modifikačním přeměním C_2S lze zabránit rychlým zchlazením slínku podobně jako u C_3S . [2, 4, 12, 15]

Rovnice hydratace:



Zkráceně:



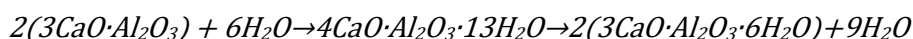


Obrázek 2: Grafy modifikačních přeměn belitu v závislosti na teplotě [4]

1.5.1 C₃A – trikalciumaluminát

Obsah C₃A v běžném portlandském slínku se pohybuje kolem 8 %, ve slíncích bílého cementu je zvýšen nad hodnotu 15 %, kdy nahrazuje C₄AF. Ze všech slínkových minerálů má nejvyšší vývin hydratačního tepla, a to 860 kJ/kg, což zvyšuje riziko vzniku trhlin u masivních konstrukcí. Velmi rychle tuhne a má vysoký nárůst počátečních pevností. Z tohoto důvodu se jako regulátor tuhnutí přidává sádrovec v množství 5–6 %. Ten zapříčiní tvorbu primárního ettringitu (C₃A·3CaSO₄·32H₂O) na povrchu zrn trikalciumaluminátu, čímž omezí transport vody k povrchu zrna a zpomalí tím hydrataci. Konečné pevnosti ovšem nejsou nijak vysoké. C₃A je spolu s alkáliemi CaO a MgO označován jako tmavá mezerní hmota. Tento slínkový minerál zhoršuje melitelnost slínku a bývá označován za přímou příčinu snížení odolnosti vůči agresivnímu prostředí. V přítomnosti vody a vápenatých a síranových iontů dochází ke vzniku sekundárních AFt fází, což vede k destrukci cementového tmelu. Pokud je chlazen intenzivně, zůstává zachován v amorní podobě a stává se součástí tzv. skelné fáze. [2, 4, 8, 12, 15]

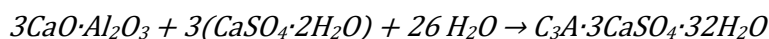
Rovnice hydratace bez přítomnosti sádrovce (CaSO₄·2H₂O):



Zkráceně:



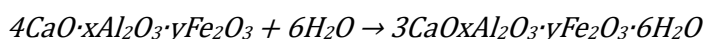
Hydratace za přítomnosti sádrovce:



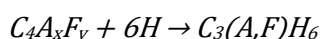
1.5.1 C₄AF – tetrakalciumaluminátferit, brownmillerit, celit

Tetrakalciumaluminátferit (celit neboli brown-millerit) má nejvyšší chemickou odolnost ze slínekových minerálů a vykazuje nejpomalejší růst pevností a dosahuje také nejnižších konečných pevností. Jedná se o tuhý roztok CaO spolu s C₁₂A₇ a CF₂ průměrného složení C₄AF, dříve udáváno jako C₆A_xF_y. Nachází se ve slínku v množství zhruba 10 %. Celit zbarvuje slínek do šedozelené barvy, v bílém cementu se proto jeho obsah blíží nule. Celit spolu s C₃A vytváří světlou mezerní hmotu mezi krystaly alitu a belitu. [2, 4, 8, 12, 15]

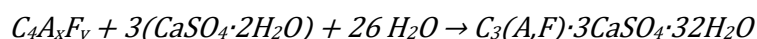
Rovnice hydratace bez přítomnosti sádrovce (CaSO₄·2H₂O):



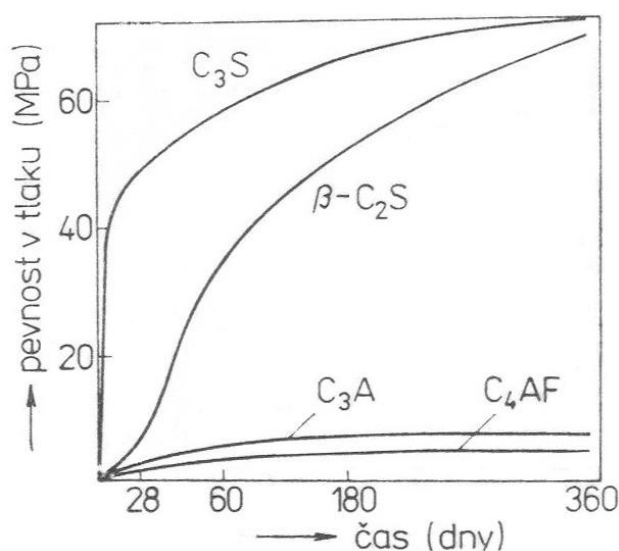
Zkráceně:



Hydratace za přítomnosti sádrovce:



Reaktivita slínekových minerálů je ovlivněna mnoha faktory, zejména strukturou a jejich defekty, polymorfní modifikací, množstvím a složením pevných roztoků apod. Minerály lze seřadit podle reaktivity sestupně takto: C₃A, C₃S, C₄AF, β-C₂S. [12]



Obrázek 3: Graf nárůstu pevnosti jednotlivých slínekových minerálů [4]

Ve slínku se mimo výše uvedených minerálů vyskytuje malý podíl skelné fáze, což je nevykrystalizovaný zbytek slínekové taveniny, a vedlejší složky uváděné většinou ve formě

oxidů. Mezi nejdůležitější z nich náleží volný oxid vápenatý, CaO , oxid hořečnatý, MgO , alkálie, Na_2O a K_2O , oxid fosforečný, P_2O_5 , oxid titaničitý, TiO_2 , aj.

Malé množství oxidu vápenatého je v cementovém slínku přítomno v nevázané formě jako volné vápno. S ohledem na teplotu výpalu cementového slínku se jedná o mrtvě pálené vápno, které reaguje s vodou jen neochotně. K jeho dohašení proto dochází až po dlouhé době a objemový nárůst uvnitř vytvrzeného cementu vyvolaný tvorbou Ca(OH)_2 vede ke tvorbě trhlin. Příпустné množství volného vápna je tedy omezeno na 4 %.

Ze stejného důvodu je nežádoucí i přítomnost hořčíku, který se v cementovém slínku nejčastěji vyskytuje ve formě oxidu hořečnatého jako periklas. Oxid hořečnatý rovněž hydratuje s vodou jen neochotně a jeho hydratace může vyvolat vznik trhlin. Množství MgO je limitováno na hodnotu 6%. [2, 11]

Alkálie mohou být ve slínku přítomny jako alkalické sírany či alkalické chloridy. Chloridový anion se dostává do slínku převážně z alternativních paliv, síranový anion pak obvykle ze surovinové směsi, ke které se přidává sádrovec. Nadměrné množství alkálií může negativně ovlivňovat jak kvalitu slínku, tak i samotný proces výpalu. Z hlediska kvality slínku mohou alkálie společně s amorfním kamenivem způsobit alkálievé rozpínání, případně tvorbu výkvětů. Při výpalu vyvolávají zejména alkalické chloridy tvorbu pecních nálepků. Z tohoto důvodu bývají v dnešní době prakticky všechny pecní systémy vybaveny tzv. bypassem. Tímto je část spalin odváděna mimo pecní výměník do filtrů, kde jsou odfiltrovány alkálie na částechkách odprašků a vyčištěný vzduch se vrací zpět do výměníku. [2, 12, 15]

Oxid fosforečný, P_2O_5 , je-li v surovinové směsi zastoupen v množství do cca 1 %, působí při výpalu pozitivně jako intenzifikační a mineralizační přísada. V případě, že jeho množství převyšuje 1 %, může negativně ovlivňovat kvalitu slínku snížením rychlosti hydratačního procesu. [2]

2 DYNAMICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ METODY

2.1 Základní rozdělení a podstata

Při testování betonových konstrukcí je žádoucí provádět testování takovým způsobem, aby nebyla konstrukce zbytečně poškozena samotným testováním a nebyla tak ovlivněna její funkčnost. K tomuto účelu jsou k dispozici nedestruktivní metody zkoušení, které nepoškozují samotný beton nebo jen v malé míře. Rozsah zkoušek, které se mohou provádět jako nedestruktivní či částečně destruktivní, je velký, např. zjišťování hustoty, modulu pružnosti a pevnosti, ale také tvrdosti povrchu, pevnosti výztuže a její velikosti a vzdálenosti od povrchu. V některých případech je možné kontrolovat kvalitu zpracování a strukturní integritu a detekovat dutiny a popraskání.

Nedestruktivní metody mohou být použity jak u nových, tak u stávajících konstrukcí. U nových staveb se využívají především na vyloučení pochybností o kvalitě materiálu a konstrukce. U stávajících konstrukcí se často posuzuje strukturní integrita. V případě, že se konstrukce posuzuje jen pomocí destruktivních zkoušek, jakými jsou jádrové vývrty, bývají náklady na testování vysoké a testován může být jen poměrně malý počet vzorků, a tak mohou být výsledky zavádějící. Nedestruktivní testování může být v těchto situacích použito jako předběžná studie, po které následuje testování pomocí jádrových vývrťů. [20]

Elektrodynamické metody jsou založeny na snímání a vyhodnocování účinků mechanického vlnění vyvolaného ve zkoušeném materiálu mechanickým podnětem. K tomuto typu metod řadíme:

- ultrazvukovou metodu – stanovení kvality materiálu a vnitřních nehomogenit,
- rezonanční metodu – stanovení dynamických modulů pružnosti,
- metodu fázových rychlostí – dynamické charakteristiky vozovek a podloží,
- metodu tlumeného rázu – tuhost a únosnost vrstev vozovek a podloží,
- metodu mechanické impedance – určení modulů pružnosti u vazkopružných materiálů (asfaltobetonové vozovky),
- metodu akustická emise – určení rozvoje vnitřních trhlin v materiálu,
- impakt-echo metodu – stanovení vnitřních nehomogenit v materiálu. [19]

Nedoceňovanou oblastí použití nedestruktivních metod zkoušení je jejich využití jako nástroje při hodnocení stavebních materiálů a výrobků v rámci mezioperační kontroly prováděné výrobcem. Vzhledem k tomu, že výrobci obvykle nedisponují svými zkušebnami, mezioperační kontrola se omezuje pouze na sledování vzhledu, rozměru výrobků a event. hmotnosti. Pevnostní charakteristiky jsou zjišťovány v omezeném rozsahu – při kontrolních

zkouškách v externích zkušebnách. Jednou z možností zjišťování pevností produktů jsou nedestruktivní metody zkoušení, které umožňují rychlé zjištění parametru z nedestruktivního zkoušení, přičemž pořizovací náklady těchto zařízení jsou mnohonásobně nižší než u zařízení pro destruktivní zkoušky. Zásadním důvodem nevyužívání nedestruktivních metod zkoušení je absence potřebných kalibračních vztahů s dostatečnou těsností mezi sledovanou charakteristikou (zpravidla pevností) a parametrem z nedestruktivního zkoušení. [21]

2.2 Ultrazvuková impulsová metoda

Ultrazvuková impulsová metoda je jednou z metod pro zkoušení vlastností stavebních materiálů a rovněž vlastností a poruch dílců nebo celých konstrukcí. Jedná se o mechanické vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz, jehož rychlost při průchodu stavebním materiálem je závislá jednak na fyzikálně mechanických vlastnostech materiálu a jednak na přítomnosti poruch v konstrukci. Její největší výhodou je skutečnost, že se jedná o čistě nedestruktivní metodu se snadným prováděním, další velkou výhodou je, že zkušební tělesa nepotřebují speciální přesný geometrický tvar. K nevýhodám patří obtížná interpretace výsledků ve složitějších případech a citlivost ultrazvuku na řadu vnějších vlivů. [19, 23]

Postup měření ultrazvukovou impulsovou metodou je stanoven v normě ČSN EN 12504-4. Tato norma uvádí pouze postupy na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Postup stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu je uveden v normě ČSN 73 1371.

2.2.1 Princip

Principem ultrazvukové impulsové metody je vysílání svazku ultrazvukového vlnění a měření doby potřebné k průchodu vln v betonu z jednoho bodu do druhého. Když se změří vzdálenost těchto dvou bodů, kterou prošlo impulsové vlnění a na které se měřil čas potřebný k průchodu rozruchu danou vzdáleností, můžeme vypočítat rychlost šíření pružného vlnění v ve zkušebním materiálu podle vztahu:

$$v = \frac{L}{T} \quad (1)$$

kde: L je délka dráhy,

T je doba průchodu ultrazvukového impulsu.

Vlny napětí se šíří podélně, příčně nebo povrchově. Převážně se měří rychlost podélného vlnění a jen ve výjimečných případech rychlost příčného vlnění. Pro hodnocení

vlastností betonu se používá buď rychlost šíření podélného vlnění v_L , nebo z toho vypočítaný dynamický modul pružnosti E_{du} , nebo pevnost betonu stanovená na základě kalibrace. [22]

Rychlost šíření pružných vln v tuhých tělesech závisí na pružných charakteristikách materiálu tělesa, tedy na modulu pružnosti, Poissonově čísle, dále na objemové hmotnosti materiálu. Díky této skutečnosti se impulsová dynamická metoda využívá v podobných případech jako rezonanční metoda na zkoušky a kontrolu stavebních materiálů, zejména betonu. [23]

Při diagnostice stavebních konstrukcí a materiálů jsou běžně používány sondy, jejichž pracovní kmitočet je v rozsahu 20 kHz až 150 kHz. Při použití vyšších frekvencí se zvyšuje rozlišovací schopnost a přesnost ultrazvukového měření, ale ultrazvukové kmitočty jsou během průchodu konstrukcí mnohem výrazněji zeslabovány. [19]

V zásadě existují dva hlavní způsoby vyšetřování vlastností konstrukce či materiálu pomocí ultrazvuku. Prvním z nich je stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu zkoumaným prostředím. Tento způsob vypovídá jak o fyzikálně-mechanických vlastnostech materiálu, tak o případných defektech. Druhým způsobem je metoda odrazová, kde se snažíme zachytit odraz ultrazvukového signálu od nehomogenity, defektu či cizího tělesa v konstrukci. [19]

2.2.2 Faktory ovlivňující výsledky měření

Mezi faktory ovlivňující měření rychlosti šíření impulsu, které jsou uvedeny v ČSN EN 12504-4, patří:

- vlhkost,
- teplota betonu,
- měřicí základna,
- tvar a velikost tělesa,
- vliv výztužných ocelí,
- trhliny a dutiny.

2.2.2.1 Vlhkost

Vlhkost ovlivňuje rychlost šíření ultrazvukového impulsu hned dvěma způsoby, a to chemicky a mechanicky. Různé podmínky ošetřování materiálu mají vliv na průběh hydratace slínkových minerálů. Vlivem jejich postupné hydratace dochází ke zvýšení rychlosti ultrazvukových impulsů v závislosti na čase.

Další vliv pak může mít voda obsažená v pórech materiálu. Toto se musí brát v potaz, když se stanovují kalibrační vztahy z těles uložených v laboratorních podmínkách, které se poté porovnávají se vzorky odebranými přímo z konstrukce, i když se jedná o stejný materiál.

Voda obsažená v pórech a kapilárách v podstatě snižuje pórovitost betonu a zvyšuje tak hutnost betonu. Působí tedy pozitivně na šíření ultrazvukového impulsu a zvyšuje tak jeho rychlost.

Na základě výzkumů byl prokázán vztah mezi vlhkostí betonu a rychlostí šíření ultrazvukového impulsu betonem. Vztah je vyjádřen rovnicí ve tvaru:

$$\Delta v_L = 120 \cdot \Delta w_b \quad (2)$$

kde: Δv_L je rozdíl rychlostí šíření podélného ultrazvukového vlnění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Δw_b je hmotnostní vlhkost betonu (%)

Znamená to tedy, že 1 % hmotnostní vlhkosti betonu zvyšuje (popř. snižuje) rychlost ultrazvukových impulsů o $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tento fakt může významně ovlivnit výsledky měření pevností betonů, kde tak může docházet k velkým odchylkám.

Pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků je nezbytné zajistit při měření stejnou vlhkost všech zkoušených těles. [22, 28, 29]

2.2.2.2 Teplota betonu

Bylo zjištěno, že pokud se teplota betonu pohybuje v rozmezí teplot od 10°C do 30°C , nemá teplota vliv na rychlost šíření ultrazvukových impulsů. V případě, že se teplota pohybuje mimo toto rozmezí, měly by se provést opravy měření. [28]

2.2.2.3 Měřicí základna

Aby nestejněměrný beton neovlivnil příliš výsledky měření, je nutné použít dostatečně dlouhou měřicí základnu. Norma ČSN EN 12504-4 doporučuje minimální délku měřicí základny 100 mm při použití velikosti kameniva 20 mm. I přesto, že délka měřicí základny neovlivňuje rychlost šíření ultrazvukového impulsu, při užití velkých měřících základen dochází k poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Pro krátké měřicí základny (do 50 mm) je vhodné používat sondy s vysokým kmitočtem od 60 kHz až do 200 kHz. Pro dlouhé měřicí základny (řádově v metrech, až do 15 m) je vhodné používat sondy s nízkým pracovním kmitočtem od 10 kHz do 40 kHz. [28]

2.2.2.4 Tvar a velikost tělesa

Rychlost šíření krátkých impulsů z vibrace je nezávislá na velikosti a tvaru těles, kterými se šíří, pokud jejich boční rozměr není menší než užžitná minimální hodnota. Pod touto hodnotou může být rychlost šíření impulsů podstatně menší. Rozsah tohoto zmenšení závisí hlavně na poměru délky vlny impulsů z vibrace k nejmenší boční vzdálenosti tělesa. Zmenšení je nepatrné, jestliže je poměr menší než jedna. Tabulkové hodnoty pak uvádějí nejmenší přípustné boční rozměry tělesa.

Jestliže nejmenší boční rozměr je menší než je délka vlny nebo jestliže se používá nepřímé prozvučování, změní se způsob šíření, a proto zjištěná rychlost šíření bude různá. To je zvláště důležité v případech, kdy jsou porovnávány betonové prvky podstatně různých velikostí. [24]

Veličina vyjadřující rychlost šíření ultrazvukového impulsu je vztažena na obecný stav prostředí, tedy na trojrozměrné prostředí. Rozměrnost určuje závislost mezi rozměry zkušebního tělesa nebo konstrukce a vlnovou délkou ultrazvukových impulsů vyvolávaných budičem. [24, 29]

Prakticky se prostředí hodnotí jako:

- *Jednorozměrné* - u prutů, válců, trámů a nosníků, kde minimální rozměr příčného řezu je menší nebo roven $0,2 \lambda$
- *Dvořozměrné* - u desek, kde tloušťka desky je menší nebo rovna $0,2 \lambda$
- *Trojrozměrné* - u krychlí, kvádrů, válců, nosníků, kde rozměry příčného řezu kolmého na směr prozvučování je větší než 2λ nebo u desek, prozvučovaných z čelních ploch, kde je tloušťka větší než $0,9 \lambda$

kde: λ je délka podélné vlny v měřeném betonu, která se určí jako $\lambda_L = v_L/f_u$

v_L rychlost šíření ultrazvukových impulsů

f_u vlastní frekvence ultrazvukového budiče [22]

Rychlost šíření ultrazvukových impulsů v jednorozměrném prostředí lze převést na hodnotu v trojrozměrném prostředí pomocí vztahu:

$$v_{L3} = v_{L1} \cdot k_3 \quad (3)$$

$$v_{L3} = v_{L1} \cdot \sqrt{\frac{1 - v_d}{(1 + v_d) \cdot (1 - 2v_d)}} \quad (4)$$

Rychlost šíření ultrazvukových impulsů v dvojrozměrném prostředí lze převést na hodnotu v trojrozměrném prostředí pomocí vztahu:

$$v_{L3} = v_{L2} \cdot k_2 \quad (5)$$

$$v_{L3} = v_{L2} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - v_d^2}} \quad (6)$$

kde: v_d dynamický Poissonův koeficient dle zkoušeného materiálu

2.2.2.5 Vliv výztužných ocelí

Je nutné se vyhnout měření v blízkosti ocelové výztuže rovnoběžné se směrem šíření impulsu prozvučení.

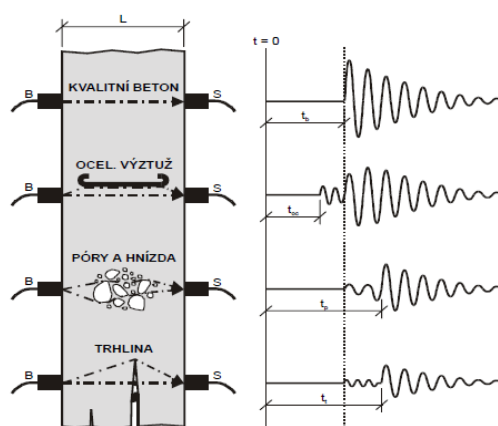
Ultrazvukové vlnění se šíří v betonu rychlostí $2,5\text{--}5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, zatímco v oceli je to $5\text{--}6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Při měření podél výztuže dojde tedy ke snížení doby průchodu impulsu. Do určité míry se projevuje i výztuž kolmá na směr šíření vlnění, je-li poměr součtu průměrů prutů výztuže k délce měřicí základny větší nebo roven 0,1. [22, 24]

Z experimentů vyplývá, že výztuž profilu $< 10 \text{ mm}$ nemá prakticky vliv na rychlost šíření ultrazvuku, výztuž větších profilů může podstatněji ovlivnit výsledky měření, jen pokud se měření provádí v bezprostřední blízkosti a přímo ve směru výztuže. [23]

2.2.2.6 Trhliny a dutiny

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

Nachází-li se v povrchové vrstvě betonu trhliny, je možné určit jejich hloubku pomocí nepřímého prozvučování. Předpokladem je, že signál je odchýlen nejkratší cestou po obvodu trhliny. Podobně je tomu i v případě, že se ve struktuře betonu nachází dutina, v takovém případě se prodlouží doba průchodu ultrazvukové vlny, protože je její dráha následkem obcházení dutiny podstatně delší. Toto platí pro dutiny, které mají polohu kolmou na směr prozvučování a jejichž délka je větší než vlnová délka vysílaného vlnění. Dutiny menších rozměrů se na průchodu vlny neprojevují. [22, 24]



Obrázek 4: Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar impulsu [33]

Kromě výše uvedených faktorů mohou ovlivnit výsledky měření i jiné příčiny, viz následující kapitoly.

2.2.2.7 Povrch betonu

Důležitá je úprava povrchu při zkoušení betonu, povrchová vrstva musí být dostatečně hladká a musí se zajistit dobré akustické spojení použitím různých médií přitlačení budiče a snímače k povrchu betonu. U nerovného a velmi hrubého povrchu se musí nejprve povrch upravit hlazením a obroušením nebo použít vazebný prostředek, např. tenkou vrstvu plastelíny, vazelíny nebo mazlavého mýdla. [24]

2.2.2.8 Stáří betonu

Rychlost šíření ultrazvuku je ovlivněna i stářím betonu tj. stupněm hydratace cementu. Postupující hydratace cementu nezvyšuje přírůstek rychlosti ultrazvuku lineárně, tedy úměrně přírůstku pevnosti. Přírůstek rychlosti ultrazvuku u mladého tvrdnoucího betonu je rychlejší než u betonu starého, který sice svoji pevnost ještě navyšuje, ale již nikoli rychlost ultrazvuku. [22]

2.2.2.9 Složení betonu

Vliv kameniva na rychlost šíření ultrazvuku betonem může být posuzován z pohledu množství kameniva, zrnitosti kameniva či druhu horniny. Například rychlost ultrazvuku u žuly je $4\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, zatímco u pískovce je rychlost $3\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Větší zrna a větší množství hrubého kameniva zvyšuje rychlosti UZ. Množství cementu a vodní součinitel se výrazně podílí na rychlosti šíření ultrazvuku, a to svým vlivem na hutnost betonu. Vliv přísady na rychlost UZ lze posuzovat zpravidla pouze v závislosti na hutnosti betonu. Jestliže má přísada za následek zvýšení hutnosti betonu, jako je tomu u plastifikační přísady, potom je

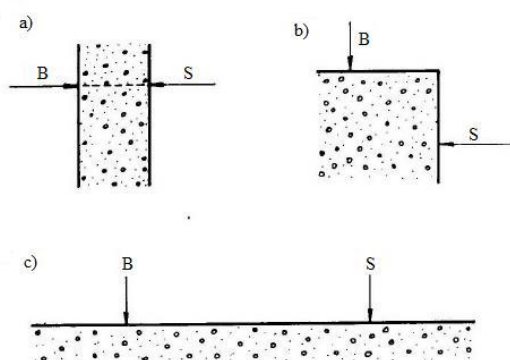
rychlost UZ větší oproti betonu bez přísady. Opačný vliv má použití provzdušňovací přísady, která prokazatelně hutnost betonu snižuje. [22]

Tabulka č. 4: Rychlost šíření UZ v různých materiálech [22]

Materiál	Rychlost šíření ultrazvukového impulsu [km/s]
Kamenivo	2,8–7,0
Voda	1,5
Vzduch	0,33
Ztvrdlý cement	3,0–4,5
Ocel	5,0–6,0

2.2.2.10 Způsob prozvučení konstrukce

Při zkoumání rychlosti šíření ultrazvukového impulsu je možné přiložit sondy na protilehlé straně konstrukce, v tom případě hovoříme o přímém prozvučování, viz Obrázek 5(a). V případě přiložení na dvou přilehlých stranách se jedná o polopřímé prozvučování (b). O polopřímé prozvučování se jedná taktéž v případě umístění sond na protilehlých stranách, avšak ne přímo proti sobě. Přiložení na stejné straně se nazývá prozvučování nepřímé (c). [19]



Obrázek 5: Způsoby prozvučování konstrukce [24]

Vzhledem k velké citlivosti nepřímého prozvučování na řadu vnějších vlivů je vhodné jej používat pouze v případech, kdy není možné provádět přímé ani polopřímé měření, nebo v případech, kdy je nutná důkladná kontrola kvality povrchu. [19]

2.2.3 Výstupy z měření

Výstupem z měření ultrazvukovou impulsovou metodou je doba průchodu ultrazvukového impulsu z jednoho bodu do druhého s přesností na 0,1 μs pro kratší základny a s přesností na 1 μs pro delší základny. Ze vzdálenosti mezi budičem a snímačem a z doby průchodu ultrazvukového impulsu se dle ČSN 73 1371 vypočítá rychlost šíření ultrazvukového impulsu v_L materiálem podle vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (7)$$

- kde: v_L je rychlost šíření impulsu [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$],
 L je délka měřicí základny [mm],
 T čas průchodu včetně t_{kor} , tzn. $T = T_L + t_{\text{kor}}$ [μs],
 t_{kor} je korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulsů UZ vln, který se zjistí kalibrací přístroje [μs].

Přesnost měření rychlosti šíření ultrazvuku se ověřuje pomocí etalonu, u kterého je známá přesná rychlost šíření ultrazvukové vlny. Rozdíl mezi naměřeným časem průchodu etalonem a deklarovaným časem průchodu etalonem je tzv. mrtvý čas, který je nutné při měření odečítat od naměřeného času.

Pomocí rychlosti šíření ultrazvukového impulsu se vypočítá dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu E_{cu} ze vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (8)$$

- kde: E_{cu} je dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
 ρ je objemová hmotnost betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 v_L je rychlost šíření ultrazvukového impulsu [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$],
 k je součinitel rozměrnosti prostředí [-].

Pokud se stanovují rychlosti impulsu v prostředích různé rozměrnosti, použijí se součinitele k pro přepočet stanovené rychlosti v dvojrozměrném a jednorozměrném prostředí. [27]

$$\text{trojrozměrné prostředí:} \quad k_3 = \sqrt{\frac{1-v_d}{(1+v_d)(1-2v_d)}} \quad (9)$$

$$\text{dvojměrné prostředí:} \quad k_2 = \sqrt{\frac{1}{1-v_d^2}} \quad (10)$$

$$\text{jednorozměrné prostředí:} \quad k_1 = 1$$

kde: v_d dynamický Poissonův koeficient [-].

2.3 Rezonanční metoda

Rezonanční dynamická metoda se zkouší podle normy ČSN 73 1372. Mezi výhody této metody patří nedestruktivnost, přesnost metody, rychlost měření a přesnost měřicího zařízení.

Tato metoda je vhodná pro zkoušení prvků, které nejsou zabudované v konstrukci a jsou stejnorodé. Pokud jsou zkušební tělesa bez trhlin a vnitřních vad, pak jsou výsledky zkoušky přesné a odpovídají teoretickým vztahům. [31]

2.3.1 Princip

Princip rezonanční metody spočívá ve vybuzení vlastních rezonančních kmitočtů ve zkušebním vzorku – podélných, příčných nebo krouživých. Výstupem jsou první vlastní kmitočty kmitání a z nich vypočítaný dynamický modul pružnosti event. Poissonův součinitel. [21]

Rozlišují se dvě metody měření: spojitá metoda (původní) a impulsová metoda (nová). U původní metody se měření provádí pomocí rezonančního přístroje opatřeného budičem a snímačem. Po přiložení sond se tedy těleso uvede do požadovaného kmitání plynulou změnou frekvence budiče. Snímač pak snímá amplitudu kmitání, která se sleduje na indikačním zařízení. Sleduje se hodnota maximální amplitudy vlastního kmitočtu kmitajícího vzorku. K maximální amplitudě dojde, když je frekvence budící rovna frekvenci snímané. Frekvence budiče je pak totožná s frekvencí vzorku a dochází k rezonanci. Tento přístroj do materiálu vysílá mechanické kmitání, jehož kmitočet se pohybuje od 30 Hz do 30 kHz a lze ho plynule měnit.

Impulsová metoda využívá zařízení, které se skládá z tzv. Fourierova analyzátoru, což je v podstatě software v libovolném počítači, impulsního kladívka a snímače zrychlení. Postup měření spočívá v umístění zkušebního tělesa na takový podklad, který nebude omezovat kmitání tělesa a jeho první vlastní kmitočet bude mimo kmitočet zkoušeného tělesa. Takovým podkladem může být měkká pružná podložka, např. molitan. Poté se

snímač přilepí na povrch tělesa do jedné z poloh pro zjišťování prvního vlastního kmitočtu, a to pomocí vazebného materiálu zajišťujícího dobrý akustický kontakt. Na závěr se pomocí kladívka klepne do určitého bodu, díky čemuž se těleso rozkmitá na svých rezonančních frekvencích. Zkouška se opakuje nejméně třikrát za účelem získání průměrné hodnoty. Jako zkušební tělesa se používají nejčastěji hranoly nebo válce, které mají délku rovnající se nejméně dvojnásobku rozměru delší strany základny u hranolů a průměru u válců. [23, 30, 32].

Zkušební tělesa, uložená jako prostý nosník s převislými konci, můžeme vhodným budícím zařízením s plynule měnitelnou frekvencí rozkmitat třemi základními druhy jejich prvních vlastních (rezonančních) kmitočtů a to kmitáním:

- *Podélným f_L*

Kmitání podélné neboli longitudinální či dilatační nastává tehdy, je-li nosník podepřen (nebo vetknut) uprostřed své délky a obě jeho čela kmitají v protifázi ve směru délky vzorku,

- *Kroutivým f_t*

Kroutivé kmitání neboli torzní či smykové nastává s obdobným uložením vzorku, ale s torzním kmitáním čel vyvozeným kroutivým momentem, tj. kolmo na osu vzorku.

U obou případů je při základní frekvenci uzlová rovina dána středním průřezem vzorku v místě uložení, zatímco kmitny tvoří čela vzorku. Vlnová délka stojatého vlnění, které takto vzniká, je určena dvojnásobnou délkou vzorku L , tedy $\lambda_L \equiv \lambda_t = 2L$. Lze tedy určit rychlost šíření vlny v jednorozměrném prostředí (délka je více než 3krát větší než příčný rozměr) ze vztahu:

$$v_{L1} = f_L \lambda_L = 2Lf_L \quad [m.s^{-1}] \quad (11)$$

$$\text{resp.} \quad v_t = f_t \lambda_t = 2Lf_t \quad [m.s^{-1}] \quad (12)$$

- *Příčným f_r*

Příčné kmitání neboli ohybové či flexibilní nastává, je-li prutový prvek podepřen v místě uzlů jako prostý nosník s převislými konci. [31]

2.3.2 Faktory ovlivňující výsledky měření

2.3.2.1 Zvýšená teplota

Již po jednodenním působení teploty okolo 80 °C klesá hodnota dynamického modulu pružnosti o cca 16 % a při dalším zvyšování teploty tento proces pokračuje. Vlivem nestejnomořného koeficientu tepelné roztažnosti složek betonu vzniká velké napětí a v jeho důsledku trhliny, které způsobují rapidní snížení hodnoty dynamického modulu pružnosti. [23]

2.3.2.2 Druh kameniva

Druh kameniva podstatně ovlivňuje hodnotu dynamického modulu pružnosti, zatímco hodnoty pevnosti jsou závislé jen na kvalitě cementového kamene a na jeho přilnavosti k povrchu kameniva. [23]

2.3.2.3 Množství a druh cementu

Modul pružnosti cementového kamene je podstatně menší než modul pružnosti běžného kameniva, proto stoupající množství cementu v betonové směsi způsobuje zmenšení modulu pružnosti, zatímco na pevnost má opačný vliv. Druh cementu může také ovlivňovat všeobecnou závislost pevnosti a dynamického modulu pružnosti betonu odlišným charakterem hydratačního procesu pro různé cementy. [23]

2.3.2.4 Stáří betonu

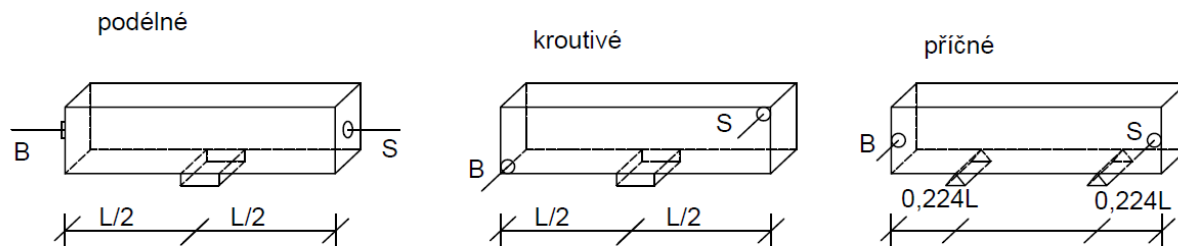
Hodnota dynamického modulu pružnosti a pevnosti betonu se stářím betonu roste. Hodnoty ovšem rostou kvantitativně odlišně. V prvních dnech hydratace betonu prudce stoupá hodnota dynamického modulu pružnosti, v následujících dnech je nárůst dynamického modulu pružnosti pozvolný. [23]

2.3.2.5 Vnitřní struktura

Hodnota dynamického modulu pružnosti závisí na vnitřní struktuře materiálu. V případě, že je vnitřní struktura materiálu narušena mrazem, případně agresivními látkami, hodnota dynamického modulu pružnosti klesá. Se snižujícím se dynamickým modulem souvisí i pokles pevnosti. Z hodnot naměřených rezonanční metodou lze usuzovat na změny struktury materiálu v důsledku působení mrazu, agresivních látek či jiných faktorů.

2.3.3 Výstupy z měření

Rezanční metodou je možné zjišťovat dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku, dynamický modul pružnosti ve smyku, Poissonův koeficient betonu a další vlastnosti betonu, jako je degradace betonu, změny pevnosti s časem, trhliny ve zkušebních tělesech a jiné.



Obrázek 6: Způsob podepření hranolů a umístění budiče (B) a snímače (S) při měření prvního vlastního kmitočtu podélného f_L , kroutivého f_t a příčného kmitání f_f [33]

Dynamický modul pružnosti v tahu – tlaku E_{cr} se zjišťuje z podélné (E_{crL}) a příčné (E_{crf}) prvního vlastního kmitání. Z kroutivé prvního vlastního kmitání se počítá dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} . Způsob podepření hranolů při měření prvního vlastního kmitočtu podélného, kroutivého a příčného kmitání je znázorněn na Obr. 6. [33]

Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu E_{crL} zjištěný z podélného vlastního kmitání je dán vztahem:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (13)$$

Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu E_{crf} zjištěný z příčného vlastního kmitání se vypočte ze vztahu:

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (14)$$

Dynamický modul pružnosti betonu ve smyku G_{cr} zjištěný z kroutivého vlastního kmitání se vypočítá ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (15)$$

kde: E_{crL}, E_{crf} jsou dynamické moduly pružnosti v tahu a tlaku [MPa],

G_{cr} je dynamické moduly pružnosti ve smyku [MPa],

f_L, f_t jsou naměřené první vlastní kmitočty podélného a příčného kmitání [kHz],

L je délka vzorku [m],

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

- k je součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku [-],
- c_1 je korekční součinitel zahrnující vliv smyku a setrvačnosti [-], (závisí na poměru poloměru setrvačnosti k délce tělesa i/La a také na Poissonově koeficientu),
- i je poloměr setrvačnosti příčného řezu vzorku k ose kolmé narovinu kmitání [m] (pro hranoly $i = a/\sqrt{12}$, pro válce $i = d/4$).

Koeficient k , který se dosadí do vztahu (15), má tyto hodnoty:

- pro válec $k = 1$,
- pro hranoly s čtvercovou základnou $k = 1,183$,
- pro hranoly s obdélníkovým průřezem vypočítáme hodnotu k ze vztahu:

$$k = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \cdot \left(\frac{b}{h}\right) - 2,52 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^6} \quad (16)$$

- kde:
- b délka kratší strany průřezu tělesa,
 - h délka delší strany průřezu tělesa.

Z těchto modulů je možné vypočítat dynamický Poissonův koeficient ν_{cr} ze vztahu:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (17)$$

nebo lze Poissonův koeficient vypočítat z naměřených hodnot vlastních kmitočtů tělesa dle vztahu:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (18)$$

Poissonův koeficient ν_{cr} nabývá hodnot v intervalu (0; 0,5)

Správnost naměřených hodnot prvních vlastních kmitočtů kmitání zkušebních vzorků je nutné ověřit, a to těmito způsoby:

- kontrolou umístění uzlových bodů při kmitání,
- pomocí teoretických poměrů prvních vlastních kmitočtů podélného, příčného a krouživého kmitání daného vzorku,

- zjištěním vyšších vlastních kmitočtů kmitání, které jsou při podélném a kroutivém kmitání celým násobkem jejich prvního vlastního kmitočtu.

Poměr prvních vlastních frekvencí podélného, kroutivého a příčného kmitání pro některé tvary hranolových vzorků viz tab. 5. [23]

Tabulka č. 5: Poměr vlastních kmitočtů podélného, příčného a kroutivého kmitání hranolů [23]

Hranoly [mm]	Poměr frekvencí $f_L : f_r : f_t$
40x40x160	1 : 0,59 : 0,43
100x100x500	1 : 0,59 : 0,36
150x150x700	1 : 0,59 : 0,38
200x200x600	1 : 0,59 : 0,52

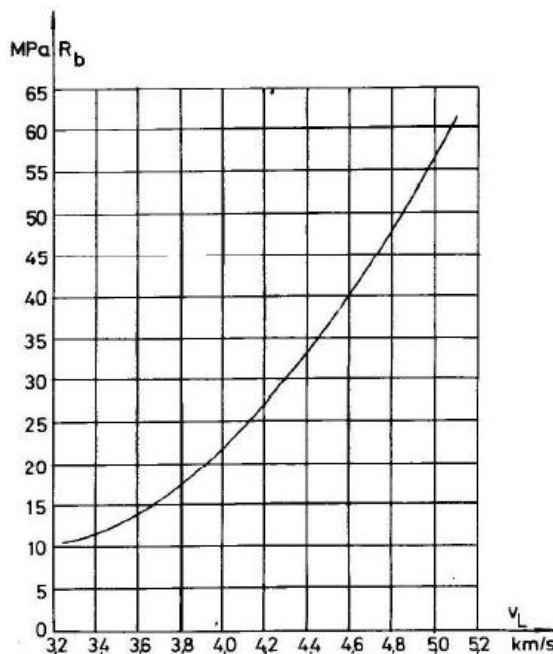
2.4 Závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevnostmi cementů uvedené v odborných publikacích

Kalibračním vztahům se kromě odborné literatury věnují i normy ČSN 73 1371 a ČSN EN 13791. Použití kalibračního vztahu uvedeného v normě ČSN EN 1379 je omezeno na rychlost šíření ultrazvukového impulsu v rozpětí 4,0 až 4,8 km/s. Tento interval však neodpovídá realitě, protože u betonů nižších pevností jsou hodnoty rychlosti menší než 4 km/s. Navíc je nutno umocnit první člen na druhou, aby tak odpovídal grafickému znázornění základní křivky. [36, 37]

Pro konkrétní typ betonu je vždy nutné stanovit závislost mezi pevností a rychlostí šíření ultrazvukového impulsu. Existuje velké množství vztahů a rozdíl mezi nimi je značný. Podle Martinčka nelze stanovit obecný empirický kalibrační vztah, který by byl dostatečně přesný a platný pro všechny typy betonů. Pro betony známého a kontrolovaného složení je podle něj možné určit vztah mezi pevností a rychlostí s přesností ± 5 až ± 10 %. Pro betony neznámého složení, kde je možnost získat koeficient s pomocí destruktivních zkoušek, je přesnost ± 10 až ± 20 %. A konečně pro betony neznámého složení je průměrná odchylka ± 20 až ± 30 %. [23]

Na určení závislosti mezi pevností betonu a rychlostí šíření UZ impulsů se nahlíží kriticky už jen z toho důvodu, že rychlost je dána především elastickými vlastnostmi kameniva a pojiva, zatímco pevnost je dána nejslabším místem struktury betonu. Obecným problémem vztahů udávaných v literatuře je nízký koeficient korelace, což je dáno nezohledňováním faktorů, které mají vliv na pevnost, jako jsou: kamenivo a jeho množství,

cement (druh, poměr tmele ke kamenivu), w , vlhkost, stáří. Přitom stáří je velmi důležité, neboť ve stáří jednoho dne je např. rychlost šíření ultrazvukových impulsů v betonu 3,8 km/s a po třech letech 5,2 km/s. To odpovídá nárůstu cca 40 %, zatímco nárůst pevnosti může být až o 500 %. [36, 38]



Obrázek 7: Znáznornění přibližného vztahu mezi pevností v tlaku obyčejného betonu a rychlostí šíření ultrazvukového impulsu [24]

Stanovení pevnosti betonu obecně, a tedy ani pevnosti betonu v tlaku, z naměřené rychlosti UZ impulsů není jednoduchá záležitost. Rychlost šíření vln napětí v hmotě samo o sobě není parametrem pevnostních vlastností, nýbrž ukazatelem hmotnosti, hutnosti, homogenity a izotropnosti a pružnosti hmoty. Jelikož je hutnost a pružnost při daných konstantách v korelační závislosti s její pevností, lze z naměřené rychlosti UZ porovnávacím způsobem odvodit ukazatel pevnosti. Je dobré si uvědomit, že citlivost měření rychlosti šíření ultrazvukových impulsů obecně není stejná jako citlivost měření pevnosti, takže rozptyly stanovených hodnot pevností na základě měření rychlosti šíření UZ impulsů jsou jiné než rozptyly hodnot pevností stanovené na zkušebních tělesech destruktivně. [22]

Proto se také nedoporučuje, aby pevnostní charakteristiky betonové konstrukce byly stanoveny pouze na základě měření rychlosti šíření ultrazvukových impulsů (upřesněným způsobem), nýbrž se považuje za správné, aby alespoň určité množství zkušebních míst bylo co do pevnosti kontrolováno jinou metodou, např. tvrdoměnou. [22]

V článku Brožovského a Zacha [39] jsou uvedeny kalibrační vztahy pro cementy CEM I 52,5 N a CEM II/B-S 32,5 R z cementárny Mokrá:

CEM I 52,5 N

- **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0881e^{1,0428V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,934$$

- **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0534e^{1,5599V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,988$$

- **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0028E_{cu}^{2,1302} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,942$$

- **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0003E_{cu}^{3,1756} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,984$$

CEM II/B-S 32,5 R

- **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0264e^{1,2993V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,988$$

- **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0367e^{1,5828V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,980$$

- **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0005E_{cu}^{2,5628} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,986$$

- **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0003E_{cu}^{3,103} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,985$$

CEM I 52,5 N + CEM II/B-S 32,5 R

- **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0045V^{5,0873} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,934$$

- **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0311e^{1,6634V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,959$$

- **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0007E_{cu}^{2,4715} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,963$$

- **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0002E_{cu}^{3,3047} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,984$$

Kalibračním vztahům pro cementy z cementárny Radotín se ve své diplomové práci věnoval Průša [40], a to konkrétně cementem CEM I 42,5 R a CEM II/B-S 32,5 R. Kalibrační vztahy pro určení pevností cementů CEM I 42,5 R a CEM II/B-S 32,5 R z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a z dynamického modulu pružnosti:

CEM I 42,5 R

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,078e^{1,0379V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,976$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0976e^{1,3581V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,980$$

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,6378e^{0,0565E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,983$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 1,5436e^{0,0737E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,984$$

CEM II B-S 32,5 R

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0286e^{1,2658V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,984$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0613e^{1,4268V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,981$$

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,3589e^{0,07E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,987$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 1,0537e^{0,0792E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,987$$

CEM I 42,5 R + CEM II B-S 32,5 R

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,0452e^{1,1609V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,977$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,0692e^{1,4197V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,973$$

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,468e^{0,0636 E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,982$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 1,2004e^{0,0779E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,979$$

Dvorský [41] ve své diplomové práci zabýval kalibračními vztahy pro cementy z cementárny Čížkovice, a to konkrétně cementem CEM II/A-M 42,5 R a CEM I 52,5 R. Kalibrační vztahy pro určení pevností cementů CEM II/A-M 42,5 a CEM I 52,5 R z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a z dynamického modulu pružnosti:

CEM I 52,5 R

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,019V^{4,053} \quad [MPa] \quad r = 0,921 \quad V \in \{4,212; 4,646\}$$

– **Pevnost vtlaku**

$$R_c = 0,049e^{1,531V} \quad [MPa] \quad r = 0,966 \quad V \in \{4,212; 4,646\}$$

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,006E_{cu}^{1,901} \quad [MPa] \quad r = 0,900 \quad E_{cu} \in \{39,4; 49,1\}$$

– **Pevnost vtlaku**

$$R_c = 1,762e^{0,072E_{cu}} \quad [MPa] \quad r = 0,950 \quad E_{cu} \in \{39,4; 49,1\}$$

CEM III/A-M 42,5 R

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 15,56V^2 - 126,1V + 261,3 \quad [MPa] \quad r = 0,950 \quad V \in \{4,048; 4,635\}$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 110,8V^2 - 899,9V + 1849 \quad [MPa] \quad r = 0,974 \quad V \in \{4,048; 4,635\}$$

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,034E_{cu}^2 - 2,494E_{cu} + 50,54 \quad [MPa] \quad r = 0,936 \quad E_{cu} \in \{36,8; 48,5\}$$

– **Pevnost v tlaku**

$$R_c = 0,263E_{cu}^2 - 19,26E_{cu} + 375,0 \quad [MPa] \quad r = 0,992 \quad E_{cu} \in \{36,8; 48,5\}$$

CEM III/A-M 42,5 R a CEM I 52,5 R

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,064e^{1,093V} \quad [MPa] \quad r = 0,933 \quad V \in \{4,048; 4,646\}$$

– **Pevnost vtlaku**

$$R_c = 0,021e^{1,707V} \quad [MPa] \quad r = 0,959 \quad V \in \{4,048; 4,646\}$$

– **Pevnost v tahu za ohybu**

$$R_f = 0,732e^{0,054E_{cu}} \quad [MPa] \quad r = 0,915 \quad E_{cu} \in \{36,8; 49,1\}$$

– **Pevnost vtlaku**

$$R_c = 0,950e^{0,085E_{cu}} \quad [MPa] \quad r = 0,946 \quad E_{cu} \in \{36,8; 49,1\}$$

3 CÍLE PRÁCE

Nedestruktivní metody zkoušení jsou využívány pro hodnocení parametrů stavebních materiálů, především pro zjišťování pevnosti betonu nebo jako podpůrné metody při sledování jejich změn při zkouškách trvanlivosti. Jednou z možných oblastí je využití ultrazvukové impulsové a rezonanční metody pro hodnocení pevností cementů.

Cílem práce je vytvoření předpokladů pro hodnocení pevnosti v tlaku a tahu cementů z cementárny Hranice z parametrů měření ultrazvukovou impulsovou metodou. Na omezeném počtu zkušebních vzorků provést měření k ověření využitelnosti rezonanční metody pro hodnocení pevnosti v tlaku a tahu cementů. Zkoušeny byly portlandské a směsné portlandské cementy z cementárny Hranice. Pro naplnění zadání diplomové práce bylo třeba:

- Zpracovat popis výroby, složení a základních parametrů cementů na bázi portlandského slínku.
- Popsat ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodu.
- Provést rešerši odborné literatury s cílem nalézt existující kalibrační vztahy mezi pevnostmi cementu a parametry z nedestruktivní metody zkoušení.
- Vybrat cementy z cementárny Hranice pro experimentální práce.
- Vyrobit zkušební tělesa a provést nedestruktivní měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou a destruktivní zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu; stáří vzorků v době zkoušení 1, 2, 3, 7 a 28 dní
- Vyhodnocení výsledků zkoušek a zpracování kalibračních vztahů mezi parametrem z nedestruktivního zkoušení a pevností v tlaku, resp. pevností v tahu za ohybu.
- Zhodnocení využitelnosti zpracovaných kalibračních vztahů a porovnání se vztahy z literatury.

II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4 METODIKA ZKOUŠEK

Zkušební tělesa tvaru trámečků o rozměrech 40x40x160 mm byla připravena v souladu s normou ČSN EN 196-1 ze záměsi obsahující jeden hmotnostní díl cementu, tři hmotnostní díly normalizovaného písku CEN a půl dílu vody (vodní součinitel, tj. hmotnostní poměr voda/cement, byl 0,5). Malta byla připravena mechanickým mícháním a zhutněna ve formě na střešacím stolku. Zkušební tělesa byla uložena 24 hodin ve vlhkém prostředí a poté vyjmuta z forem a uložena ve vodní lázni.

Na tělesech byla provedena zkouška ultrazvukovou impulsovou metodou a na výběru vzorku zkouška rezonanční metodou, dále byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku ve stáří 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28 a 96 dnů.

Jak ukazuje tab. 6, zkoušky byly prováděny na třech druzích cementu – CEM I, CEM II A-LL, CEM III/A. Všechny tyto cementy pocházely z cementárny Hranice na Moravě a byly odebrány v různých dnech. Pro jednotlivé šarže vzorků a jejich stáří byla zvlášť vyrobena jedna sada tří zkušebních těles.

Tabulka č. 6: Přehled použitých cementů

Vzorek	Druh cementu	Pevnostní třída	Datum odběru	Silo
Šarže 1	CEM I	52,5 R	02.06.2015	10
	CEM I	52,5 R	05.06.2015	11
	CEM I	52,5 R	09.06.2015	12
	CEM I	52,5 R	12.06.2015	11
Šarže 2	CEM II/A-LL	42,5 R	02.06.2015	62
	CEM II/A-LL	42,5 R	05.06.2015	24
	CEM II/A-LL	42,5 R	08.06.2015	25
Šarže 3	CEM III/A	42,5 N	02.06.2015	52
	CEM III/A	42,5 N	03.06.2015	53
	CEM III/A	42,5 N	09.06.2015	53

4.1 Ultrazvuková impulsová metoda (ČSN EN 12504-4 a ČSN 731371)

Měření ultrazvukovou impulsovou metodou bylo provedeno v souladu s normou ČSN 73 1371. Pro měření byl použit přístroj TICO s frekvencí sond 82 kHz. Měření bylo prováděno přímým prozvučováním, viz obr. 8. Při měření bylo nutné zajistit dobrou akustickou vazbu mezi povrchem zkušebního tělesa a příložitými plochami sond indiferentním gelem. Postup a vyhodnocení měření je uvedeno v kapitole 2.2.



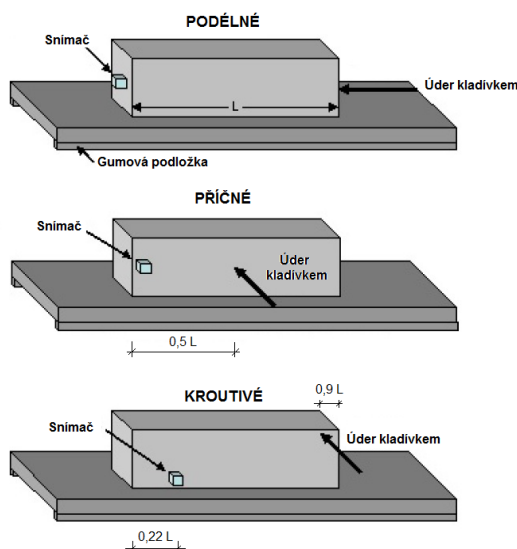
Obrázek 8: Měření ultrazvukovou impulsovou metodou

Z výsledků měření ultrazvukovou impulsovou metodou byly vypočteny tyto veličiny:

- rychlost šíření ultrazvukového impulsu v_L (viz kap. 2.2.3),
- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu E_{cu} (viz kap. 2.2.3).

4.2 Rezonanční metoda (ČSN 731372)

Pro měření rezonančních kmitočtů byla využita rezonanční kladívková metoda. Na měření byl použit přístroj RT-1 Resonant Frequency Test. Na zkušebních tělesech byla vyznačena místa pro úder kladívkem a místa pro osazení akcelerometru, viz obr. 9. Po osazení snímače byl proveden úder kladívkem a na displeji přístroje byla odečtena hodnota prvního vlastního kmitočtu. Měření každého vlastního kmitočtu bylo provedeno dvakrát. Postup a vyhodnocení výsledků je uveden v kapitole 2.3.



Obrázek 9: Měření rezonanční kladívkovou metodou [39]

Z výsledků měření kladívkovou rezonanční metodou byly vypočteny tyto veličiny:

- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání E_{crL} (viz kap. 2.3.3),
- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání E_{crf} (viz kap. 2.3.3),
- dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} (viz kap. 2.3.3),
- dynamický Poissonův koeficient ν_{cr} (viz kap. 2.3.3).

4.3 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku a objemové hmotnosti (ČSN EN 196-1; ČSN EN 12190)

4.3.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 196-1. Při této zkoušce je zkušební těleso, v tomto případě trámeček 40×40×160 mm, podepřeno ve dvou místech a zatěžováno uprostřed jedním břemenem až do porušení. Pevnost v tahu za ohybu R_f [MPa] se vypočítá dle vzorce:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}$$

kde: F_f je zatěžovací síla při zlomení zkušebního tělesa [N],

l je vzdálenost mezi podporami [mm],

b je strana čtvercového průřezu zkušebního tělesa [mm]

4.3.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 196-1. Zkouška se provádí na polovinách trámečků, které vznikly při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku R_c [MPa] se vypočítá dle vzorce:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

kde: F_c je nejvyšší zatěžovací síla při porušení zkušebního tělesa [N],

1600 je plocha destiček (40×40 mm) [mm²].

4.3.3 Objemová hmotnost ρ

Objemová hmotnost zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 12190. Objemová hmotnost byla stanovena průměrem hodnot vzniklých měření a vážením třech zkušebních těles podle vztahu:

$$\rho = \frac{W}{V}$$

kde: W je hmotnost hranolu [kg],

V je objem hranolu [m³].

4.4 Kalibrační vztahy – zpracování a hodnocení použitelnosti

Kalibrační vztahy se stanoví z naměřených bodů metodami matematické statistiky. V daném případě je využívána metoda nejmenších čtverců. Kalibrační vztahy mohou být vyjádřeny regresní křivkou nebo přímkou. Při kategorizaci a definici kalibračních vztahů se vycházelo z ČSN 73 1370, která rozeznává tyto typy kalibračních vztahů:

- obecný kalibrační vztah* – odvodí se ze zkoušek provedených minimálně na 300 zkušebních vzorcích různého původu a technologie zpracování tak, aby sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozloženy v pravidelných intervalech v celém oboru sledované vlastnosti,
- směrný kalibrační vztah* – odvodí se ze zkoušek provedených minimálně na 100 zkušebních vzorcích, které byly provedeny na vybraných vzorcích a vybranými technologiemi,
- určující kalibrační vztah* – odvodí se ze zkoušek provedených minimálně na 12 zkušebních vzorcích pro sledovanou pevnostní třídu, resp. značku při dané technologii výroby a použitých surovinách.

Využitelnost kalibračních vztahů je hodnocena pro přímkové závislosti koeficientem korelace, který z hlediska praktické využitelnosti musí být nejméně 0,85, lépe však 0,90 a pro

závislosti vyjádřené regresní křivkou reziduální směrodatnou odchylkou, které nesmí být větší než 0,12 a uvnitř svého rozsahu nenabývá extrémní hodnoty. [21, 42]

Reziduální směrodatná odchylka S pro n měřeným bodů kalibračního vztahu se vypočte ze vztahu:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_m)^2}{n - k}}$$

$$D_i = \left| \frac{R_{bi} - R_{bdi}}{R_{bdi}} \right|$$

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

- kde: n je počet měřených bodů kalibračního vztahu,
 k počet parametrů volené funkce kalibračního vztahu,
 R_{bi} pevnost betonu v tlaku pro i -tý měřený bod kalibračního vztahu zjištěná destruktivní zkouškou,
 R_{bdi} pevnost betonu v tlaku vypočtená z ukazatele nedestruktivního měření z kalibračního vztahu pro i -tý měřený bod. [42]

5 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Graficky jsou výsledky zkoušek znázorněny v grafu 7 až 16 pro měření ultrazvukovou impulsovou metodou a v grafu 17 až 26 pro rezonanční metodu.

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Tabulka č. 7: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 1

Tabulka č. 8: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 2

Tabulka č. 9: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 3

Tabulka č. 10: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 4

Tabulka č. 11: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1

Tabulka č. 12: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2

Tabulka č. 13: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3

Tabulka č. 14: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 1

Tabulka č. 15: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 2

Tabulka č. 16: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 3

Tabulka č. 17: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 1

Tabulka č. 18: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 2

Tabulka č. 19: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 3

Tabulka č. 20: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 4

Tabulka č. 21: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1

Tabulka č. 22: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2

Tabulka č. 23: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3

Tabulka č. 24: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 1

Tabulka č. 25: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 2

Tabulka č. 26: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 3

5.1 Výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou

Legenda k tabulkám:

ρ – objemová hmotnost zkoušeného tělesa [kg/m^3]

R_f – pevnost v tahu za ohybu [MPa]

R_{C1} – pevnost v tlaku 1/2 trámečku [MPa]

R_{C2} – pevnost v tlaku druhé 1/2 trámečku [MPa]

R_c – průměrná pevnost v tlaku polovin trámečků [MPa]

v_L – rychlost šíření ultrazvukového impulsu [km/s]

E_{cu} – dynamický modul pružnosti [MPa]

Tabulka č. 7: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 1

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2238	4,1	31,9	31,3	31,6	4,074	37132
2	2235	4,1	31,9	31,9	31,9	4,089	37367
3	2226	4,1	31,3	31,3	31,3	4,097	37357
<i>průměr</i>	2233	4,1	31,7	31,5	31,6	4,087	37285
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2249	4,3	37,8	36,9	37,3	4,280	41190
2	2233	4,3	39,4	39,7	39,5	4,280	40900
3	2243	4,3	39,4	37,5	38,4	4,286	41197
<i>průměr</i>	2242	4,3	38,9	38,0	38,4	4,282	41096
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2234	4,3	41,3	40,6	40,9	4,328	41845
2	2224	4,3	41,6	39,1	40,3	4,339	41872
3	2243	4,4	42,5	43,1	42,8	4,350	42442
<i>průměr</i>	2234	4,3	41,8	40,9	41,4	4,339	42053
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2238	4,5	46,3	43,8	45,0	4,455	44404
2	2232	4,5	45,6	45,0	45,3	4,475	44680
3	2231	4,4	45,0	44,4	44,7	4,433	43845
<i>průměr</i>	2234	4,5	45,6	44,4	45,0	4,454	44310

Tabulka č. 7: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2201	4,5	47,5	45,0	46,3	4,464	43862
2	2243	4,5	47,5	50,6	49,1	4,457	44550
3	2265	4,5	49,4	50,0	49,7	4,453	44916
<i>průměr</i>	2236	4,5	48,1	48,5	48,4	4,458	44443
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2239	4,5	53,8	49,7	51,7	4,518	45701
2	2234	4,5	50,9	51,9	51,4	4,527	45766
3	2237	4,5	48,8	50,6	49,7	4,514	45571
<i>průměr</i>	2237	4,5	51,2	50,7	50,9	4,520	45679
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2252	4,5	55,0	56,9	55,9	4,539	46409
2	2250	4,6	56,9	53,6	55,3	4,550	46594
3	2205	4,5	58,8	57,4	58,1	4,537	45391
<i>průměr</i>	2236	4,5	56,9	56,0	56,4	4,542	46131
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2258	4,6	61,9	64,4	63,1	4,595	47684
2	2257	4,6	63,8	58,8	61,3	4,602	47800
3	2251	4,6	53,8	60,6	57,2	4,614	47931
<i>průměr</i>	2255	4,6	59,8	61,3	60,5	4,604	47805

Tabulka č. 8: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 2

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2208	4,0	28,8	28,1	28,4	4,037	35990
2	2207	4,1	28,8	29,4	29,1	4,065	36458
3	2217	4,0	29,4	28,8	29,1	4,012	35672
<i>průměr</i>	2211	4,0	29,0	28,8	28,9	4,038	36040
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2263	4,2	38,1	37,5	37,8	4,230	40486
2	2281	4,2	37,2	37,2	37,2	4,220	40619
3	2234	4,2	36,6	37,2	36,9	4,216	39720
<i>průměr</i>	2259	4,2	37,3	37,3	37,3	4,222	40275
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2215	4,3	40,0	40,0	40,0	4,322	41386
2	2213	4,3	39,4	37,8	38,6	4,320	41308
3	2209	4,3	38,1	36,3	37,2	4,315	41137
<i>průměr</i>	2212	4,3	39,2	38,0	38,6	4,319	41277
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2233	4,4	45,6	44,4	45,0	4,431	43843
2	2236	4,4	45,0	46,9	45,9	4,400	43292
3	2224	4,4	46,3	48,8	47,5	4,420	43457
<i>průměr</i>	2231	4,4	45,6	46,7	46,1	4,417	43531
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2223	4,4	50,6	50,9	50,8	4,436	43732
2	2231	4,5	51,9	50,0	50,9	4,454	44249
3	2236	4,4	50,3	47,5	48,9	4,434	43959
<i>průměr</i>	2230	4,4	50,9	49,5	50,2	4,441	43980

Tabulka č. 8: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2217	4,5	50,9	48,1	49,5	4,512	45122
2	2213	4,5	50,0	50,6	50,3	4,507	44940
3	2201	4,5	50,0	51,9	50,9	4,525	45059
<i>průměr</i>	2210	4,5	50,3	50,2	50,3	4,515	45040
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2275	4,5	58,1	57,5	57,8	4,546	47002
2	2226	4,5	57,8	57,2	57,5	4,538	45848
3	2239	4,5	57,5	56,9	57,2	4,488	45096
<i>průměr</i>	2247	4,5	57,8	57,2	57,5	4,524	45982
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2262	4,6	59,4	57,5	58,4	4,554	46913
2	2272	4,6	56,3	55,6	55,9	4,590	47871
3	2258	4,6	57,5	62,5	60,0	4,586	47498
<i>průměr</i>	2264	4,6	57,7	58,5	58,1	4,577	47427

Tabulka č. 9: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 3

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2225	4,0	31,9	32,5	32,2	4,043	36375
2	2244	4,0	32,5	32,5	32,5	4,021	36283
3	2238	4,0	33,1	32,5	32,8	4,031	36380
<i>průměr</i>	2236	4,0	32,5	32,5	32,5	4,032	36346

Tabulka č. 9: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2255	4,3	36,9	37,8	37,3	4,257	40859
2	2251	4,3	39,1	40,0	39,5	4,294	41500
3	2239	4,3	38,1	39,4	38,8	4,261	40655
<i>průměr</i>	2248	4,3	38,0	39,1	38,5	4,271	41005
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2231	4,3	40,0	41,9	40,9	4,339	42011
2	2204	4,3	40,6	40,6	40,6	4,329	41294
3	2203	4,3	42,8	41,3	42,0	4,345	41603
<i>průměr</i>	2213	4,3	41,1	41,3	41,2	4,338	41636
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2225	4,5	49,4	49,4	49,4	4,453	44106
2	2220	4,4	49,4	49,4	49,4	4,441	43787
3	2232	4,4	49,4	50,6	50,0	4,434	43884
<i>průměr</i>	2226	4,4	49,4	49,8	49,6	4,443	43926
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2220	4,5	50,6	51,3	50,9	4,460	44153
2	2206	4,5	50,6	50,6	50,6	4,463	43946
3	2221	4,5	50,6	55,3	53,0	4,458	44151
<i>průměr</i>	2216	4,5	50,6	52,4	51,5	4,460	44083
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2227	4,5	51,9	49,4	50,6	4,506	45205
2	2217	4,5	49,4	48,1	48,8	4,474	44376
3	2229	4,5	50,0	50,9	50,5	4,496	45054
<i>průměr</i>	2224	4,5	50,4	49,5	50,0	4,492	44878

Tabulka č. 9: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2258	4,4	51,9	56,6	54,2	4,433	44377
2	2233	4,6	54,4	56,9	55,6	4,553	46292
3	2252	4,5	55,9	55,3	55,6	4,528	46186
<i>průměr</i>	2248	4,5	54,1	56,3	55,1	4,505	45618
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2273	4,6	64,4	61,9	63,1	4,569	47454
2	2269	4,6	56,9	56,9	56,9	4,566	47298
3	2269	4,6	50,0	60,0	55,0	4,572	47444
<i>průměr</i>	2270	4,6	57,1	59,6	58,3	4,569	47399

Tabulka č. 10: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 4

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 4							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2224	4,0	28,8	28,8	28,8	4,003	35633
2	2218	4,0	28,8	29,4	29,1	4,009	35655
3	2202	4,0	29,4	28,8	29,1	4,004	35288
<i>průměr</i>	2215	4,0	29,0	29,0	29,0	4,005	35525

Tabulka č. 10: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 4							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2234	4,2	35,9	35,0	35,5	4,218	39748
2	2238	4,2	35,6	35,0	35,3	4,230	40044
3	2252	4,2	35,6	35,0	35,3	4,222	40145
<i>průměr</i>	2241	4,2	35,7	35,0	35,4	4,224	39979
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2218	4,3	39,7	39,4	39,5	4,306	41124
2	2210	4,3	40,9	39,7	40,3	4,309	41040
3	2208	4,3	40,3	38,1	39,2	4,312	41049
<i>průměr</i>	2212	4,3	40,3	39,1	39,7	4,309	41071
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2238	4,4	47,5	48,8	48,1	4,428	43894
2	2252	4,4	45,0	47,5	46,3	4,431	44224
3	2246	4,4	46,3	47,5	46,9	4,423	43938
<i>průměr</i>	2245	4,4	46,3	47,9	47,1	4,427	44019
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2232	4,4	47,5	48,1	47,8	4,447	44142
2	2231	4,4	46,9	46,9	46,9	4,449	44154
3	2226	4,4	49,4	48,1	48,8	4,446	43993
<i>průměr</i>	2230	4,4	47,9	47,7	47,8	4,447	44096
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2243	4,5	50,6	50,0	50,3	4,510	45616
2	2225	4,5	50,3	52,5	51,4	4,466	44368
3	2225	4,5	51,6	50,6	51,1	4,478	44605
<i>průměr</i>	2231	4,5	50,8	51,0	50,9	4,484	44863

Tabulka č. 10: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM I 52,5 R – šarže 4							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2225	4,5	53,4	51,9	52,7	4,511	45276
2	2232	4,5	55,0	53,2	54,1	4,528	45771
3	2235	4,5	53,1	53,3	53,2	4,515	45572
<i>průměr</i>	2231	4,5	53,9	52,8	53,3	4,518	45540
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2265	4,6	55,0	62,5	58,8	4,601	47950
2	2284	4,6	63,8	48,8	56,3	4,602	48365
3	2269	4,6	61,3	56,9	59,1	4,605	48113
<i>průměr</i>	2273	4,6	60,0	56,1	58,1	4,603	48143

Tabulka č. 11: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2224	3,9	21,9	21,3	21,6	3,864	33195
2	2228	3,8	21,3	21,3	21,3	3,810	32347
3	2240	3,9	21,3	21,3	21,3	3,863	33433
<i>průměr</i>	2231	3,9	21,5	21,3	21,4	3,846	32992

Tabulka č. 11: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2276	4,2	27,5	30,3	28,9	4,152	39239
2	2275	4,1	29,7	28,4	29,1	4,150	39188
3	2275	4,2	29,7	30,6	30,2	4,150	39195
<i>průměr</i>	2275	4,2	29,0	29,8	29,4	4,151	39207
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2238	4,2	31,9	31,3	31,6	4,240	40229
2	2238	4,3	35,0	32,5	33,8	4,287	41142
3	2214	4,2	32,2	32,5	32,3	4,244	39879
<i>průměr</i>	2230	4,2	33,0	32,1	32,6	4,257	40417
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2264	4,4	41,9	43,8	42,8	4,404	43905
2	2271	4,4	43,1	42,5	42,8	4,377	43504
3	2270	4,4	43,8	41,9	42,8	4,385	43632
<i>průměr</i>	2268	4,4	42,9	42,7	42,8	4,389	43680
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2266	4,4	41,6	43,4	42,5	4,400	43858
2	2255	4,4	41,3	41,6	41,4	4,384	43322
3	2293	4,4	41,9	43,8	42,8	4,398	44337
<i>průměr</i>	2271	4,4	41,6	42,9	42,2	4,394	43839
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2212	4,4	41,9	42,5	42,2	4,438	43554
2	2237	4,4	41,9	41,9	41,9	4,418	43667
3	2243	4,4	41,6	43,1	42,3	4,440	44223
<i>průměr</i>	2231	4,4	41,8	42,5	42,1	4,432	43815

Tabulka č. 11: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2244	4,5	45,6	43,8	44,7	4,464	44705
2	2215	4,5	47,8	44,4	46,1	4,480	44468
3	2252	4,5	45,3	45,6	45,5	4,472	45027
<i>průměr</i>	2237	4,5	46,2	44,6	45,4	4,472	44733
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2260	4,5	51,9	49,4	50,6	4,528	46346
2	2294	4,5	50,6	50,0	50,3	4,519	46837
3	2278	4,5	48,8	45,6	47,2	4,549	47146
<i>průměr</i>	2277	4,5	50,4	48,3	49,4	4,532	46776

Tabulka č. 12: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2212	3,9	21,9	21,3	21,6	3,867	33076
2	2205	3,9	22,5	20,6	21,6	3,880	33197
3	2214	3,9	23,1	21,9	22,5	3,888	33464
<i>průměr</i>	2210	3,9	22,5	21,3	21,9	3,878	33246

Tabulka č. 12: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2255	4,1	30,3	26,6	28,4	4,140	38642
2	2247	4,1	30,3	28,1	29,2	4,137	38446
3	2263	4,1	28,8	30,3	29,5	4,137	38736
<i>průměr</i>	2255	4,1	29,8	28,3	29,0	4,138	38608
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2216	4,2	31,3	31,3	31,3	4,214	39358
2	2199	4,2	32,8	29,4	31,1	4,231	39365
3	2233	4,2	33,4	32,5	33,0	4,243	40204
<i>průměr</i>	2216	4,2	32,5	31,1	31,8	4,229	39642
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2242	4,4	41,3	33,1	37,2	4,404	43483
2	2235	4,4	39,4	39,4	39,4	4,390	43077
3	2239	4,4	40,6	41,3	40,9	4,399	43319
<i>průměr</i>	2239	4,4	40,4	37,9	39,2	4,398	43293
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2232	4,4	45,3	45,0	45,2	4,430	43812
2	2241	4,4	45,0	45,6	45,3	4,444	44266
3	2222	4,4	45,0	47,8	46,4	4,443	43854
<i>průměr</i>	2232	4,4	45,1	46,1	45,6	4,439	43977
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2229	4,5	43,8	45,0	44,4	4,462	44374
2	2233	4,5	45,0	45,6	45,3	4,458	44390
3	2277	4,5	46,3	46,9	46,6	4,480	45708
<i>průměr</i>	2246	4,5	45,0	45,8	45,4	4,467	44824

Tabulka č. 12: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2254	4,5	50,0	48,8	49,4	4,523	46099
2	2206	4,5	51,9	49,4	50,6	4,527	45206
3	2229	4,5	48,1	47,5	47,8	4,492	44983
<i>průměr</i>	2230	4,5	50,0	48,5	49,3	4,514	45429
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2270	4,5	46,3	51,9	49,1	4,528	46543
2	2273	4,5	48,1	53,1	50,6	4,537	46783
3	2289	4,5	53,1	49,4	51,3	4,547	47314
<i>průměr</i>	2277	4,5	49,2	51,5	50,3	4,537	46880

Tabulka č. 13: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2244	3,8	20,6	20,0	20,3	3,850	33259
2	2247	3,8	20,6	20,6	20,6	3,835	33053
3	2257	3,8	20,0	21,3	20,6	3,847	33402
<i>průměr</i>	2249	3,8	20,4	20,6	20,5	3,844	33238

Tabulka č. 13: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2246	4,1	30,0	29,7	29,8	4,126	38229
2	2227	4,1	27,8	29,1	28,4	4,105	37537
3	2223	4,1	28,4	27,8	28,1	4,105	37469
<i>průměr</i>	2232	4,1	28,7	28,9	28,8	4,112	37745
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2248	4,2	33,8	31,3	32,5	4,207	39798
2	2241	4,2	33,1	31,6	32,3	4,216	39838
3	2242	4,2	34,1	32,8	33,4	4,212	39768
<i>průměr</i>	2244	4,2	33,7	31,9	32,7	4,212	39801
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2254	4,4	40,0	40,6	40,3	4,381	43273
2	2254	4,4	38,8	40,6	39,7	4,370	43046
3	2248	4,4	36,3	40,0	38,1	4,381	43147
<i>průměr</i>	2252	4,4	38,3	40,4	39,4	4,377	43155
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2295	4,4	43,8	44,1	43,9	4,405	44545
2	2284	4,4	45,3	45,0	45,2	4,424	44707
3	2257	4,4	43,4	44,7	44,1	4,407	43827
<i>průměr</i>	2279	4,4	44,2	44,6	44,4	4,412	44360
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2220	4,4	45,3	43,8	44,5	4,442	43816
2	2238	4,4	44,4	42,5	43,4	4,416	43653
3	2242	4,4	43,8	43,8	43,8	4,435	44102
<i>průměr</i>	2233	4,4	44,5	43,4	43,9	4,431	43857

Tabulka č. 13: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2258	4,5	48,3	47,8	48,0	4,468	45072
2	2265	4,5	47,6	44,9	46,3	4,463	45108
3	2263	4,5	48,2	49,4	48,8	4,475	45313
<i>průměr</i>	2262	4,5	48,0	47,4	47,7	4,469	45164
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2275	4,5	50,0	48,1	49,1	4,504	46151
2	2275	4,5	46,9	51,3	49,1	4,493	45916
3	2274	4,5	48,8	50,6	49,7	4,513	46321
<i>průměr</i>	2275	4,5	48,6	50,0	49,3	4,503	46129

Tabulka č. 14: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 1

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 1							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2232	3,6	13,1	13,1	13,1	3,564	28356
2	2225	3,6	13,8	13,8	13,8	3,553	28085
3	2233	3,6	13,1	13,1	13,1	3,580	28611
<i>průměr</i>	2230	3,6	13,3	13,3	13,3	3,566	28351

Tabulka č. 14: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 1							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2229	4,0	21,6	20,6	21,1	3,980	35303
2	2249	4,0	21,9	20,6	21,3	3,978	35592
3	2231	4,0	22,2	22,5	22,3	3,983	35382
<i>průměr</i>	2236	4,0	21,9	21,2	21,6	3,980	35426
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2225	4,0	24,4	22,2	23,3	4,035	36209
2	2222	4,1	24,4	25,0	24,7	4,056	36568
3	2236	4,1	25,0	25,0	25,0	4,052	36725
<i>průměr</i>	2228	4,1	24,6	24,1	24,3	4,048	36501
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2265	4,3	34,4	33,1	33,8	4,272	41326
2	2262	4,3	34,4	34,4	34,4	4,258	41006
3	2246	4,2	33,8	31,9	32,8	4,249	40551
<i>průměr</i>	2258	4,3	34,2	33,1	33,7	4,260	40961
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2214	4,4	46,9	45,0	45,9	4,387	42609
2	2215	4,4	45,6	45,9	45,8	4,385	42605
3	2279	4,4	44,4	46,9	45,6	4,414	44390
<i>průměr</i>	2236	4,4	45,6	45,9	45,8	4,395	43201
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2247	4,5	44,7	43,1	43,9	4,458	44651
2	2253	4,5	49,4	48,4	48,9	4,486	45344
3	2220	4,5	47,2	49,4	48,3	4,491	44775
<i>průměr</i>	2240	4,5	47,1	47,0	47,0	4,478	44923

Tabulka č. 14: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 1							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2247	4,5	49,8	56,4	53,1	4,514	45780
2	2235	4,5	55,9	55,6	55,8	4,519	45653
3	2211	4,5	54,4	55,0	54,7	4,511	44976
<i>průměr</i>	2240	4,5	47,1	47,0	47,0	4,478	45470
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2288	4,6	59,4	60,6	60,0	4,554	47449
2	2252	4,5	57,5	61,3	59,4	4,537	46356
3	2284	4,5	60,0	55,6	57,8	4,547	47219
<i>průměr</i>	2231	4,5	53,4	55,7	54,5	4,515	47008

Tabulka č. 15: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 2

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 2							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2219	3,6	13,1	13,1	13,1	3,582	28470
2	2210	3,6	13,1	12,5	12,8	3,562	28041
3	2214	3,6	12,5	12,5	12,5	3,578	28340
<i>průměr</i>	2275	4,5	59,0	59,2	59,1	4,546	28284

Tabulka č. 15: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 2							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2241	4,0	20,0	20,3	20,2	3,965	35237
2	2262	4,0	20,6	21,6	21,1	3,978	35795
3	2239	4,0	21,3	22,8	22,0	3,986	35572
<i>průměr</i>	2214	3,6	12,9	12,7	12,8	3,574	35535
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2219	4,0	25,6	24,7	25,2	4,017	35797
2	2242	4,0	24,4	25,0	24,7	3,989	35682
3	2218	4,0	24,4	24,4	24,4	4,005	35586
<i>průměr</i>	2247	4,0	20,6	21,6	21,1	3,976	35688
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2261	4,3	33,1	33,1	33,1	4,258	40996
2	2255	4,3	33,1	33,8	33,4	4,257	40855
3	2243	4,3	32,5	33,8	33,1	4,257	40655
<i>průměr</i>	2226	4,0	24,8	24,7	24,8	4,004	40835
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2227	4,4	46,9	44,7	45,8	4,406	43224
2	2233	4,4	45,6	46,3	45,9	4,400	43217
3	2235	4,4	47,8	49,4	48,6	4,394	43156
<i>průměr</i>	2253	4,3	32,9	33,6	33,2	4,257	43199
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2218	4,4	48,4	46,9	47,7	4,442	43762
2	2220	4,4	46,3	44,4	45,3	4,438	43721
3	2209	4,4	46,3	45,3	45,8	4,430	43346
<i>průměr</i>	2216	4,4	47,0	45,5	46,3	4,437	43610

Tabulka č. 15: Pokračování

Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 2							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2328	4,5	55,6	55,0	55,3	4,472	46558
2	2246	4,5	54,7	56,3	55,5	4,497	45426
3	2244	4,5	55,6	57,2	56,4	4,495	45342
<i>průměr</i>	2273	4,5	55,3	56,2	55,7	4,488	45775
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2261	4,6	59,4	46,9	53,1	4,560	47016
2	2272	4,6	51,3	63,8	57,5	4,557	47180
3	2256	4,6	61,9	56,3	59,1	4,563	46975
<i>průměr</i>	2263	4,6	57,5	55,7	56,6	4,560	47057

Tabulka č. 16: Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 3

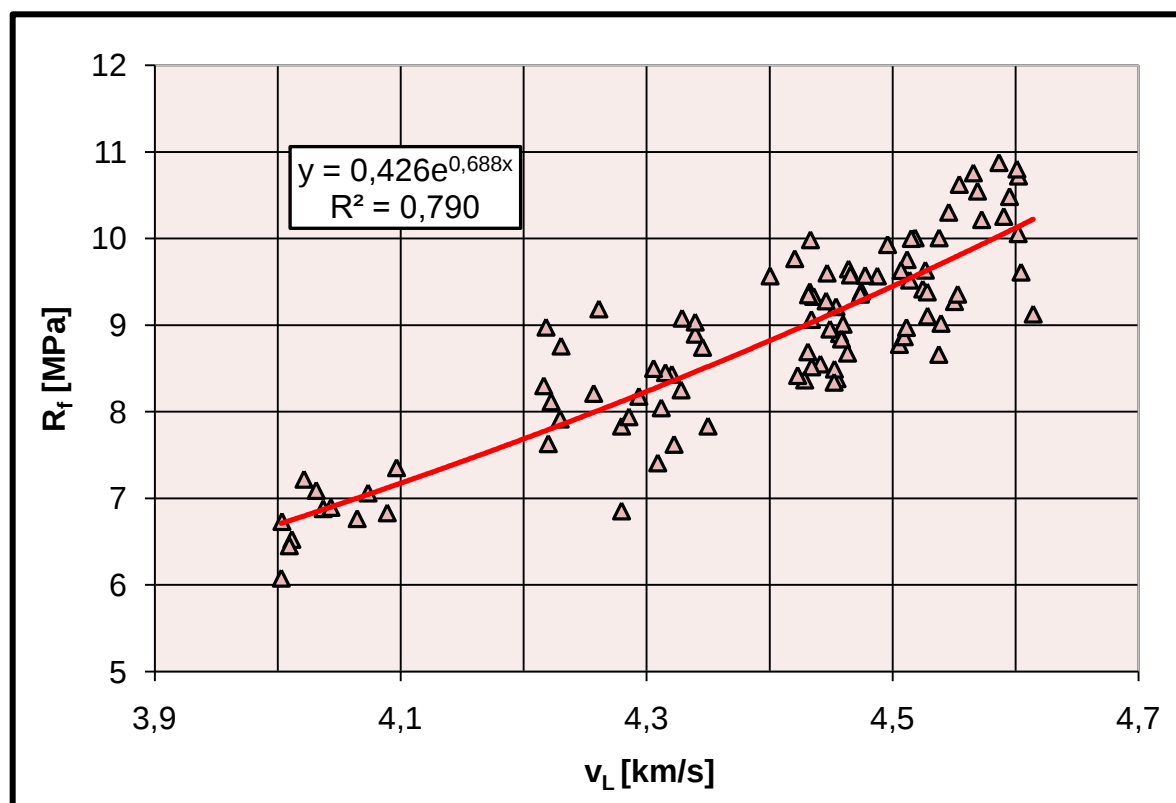
Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 3							
Stáří vzorků – 1 den							
1	2226	3,6	14,4	15,0	14,7	3,611	29029
2	2221	3,7	13,8	14,4	14,1	3,660	29749
3	2211	3,6	13,8	14,4	14,1	3,617	28916
<i>průměr</i>	2219	3,6	14,0	14,6	14,3	3,629	29231

Tabulka č. 16: Pokračování

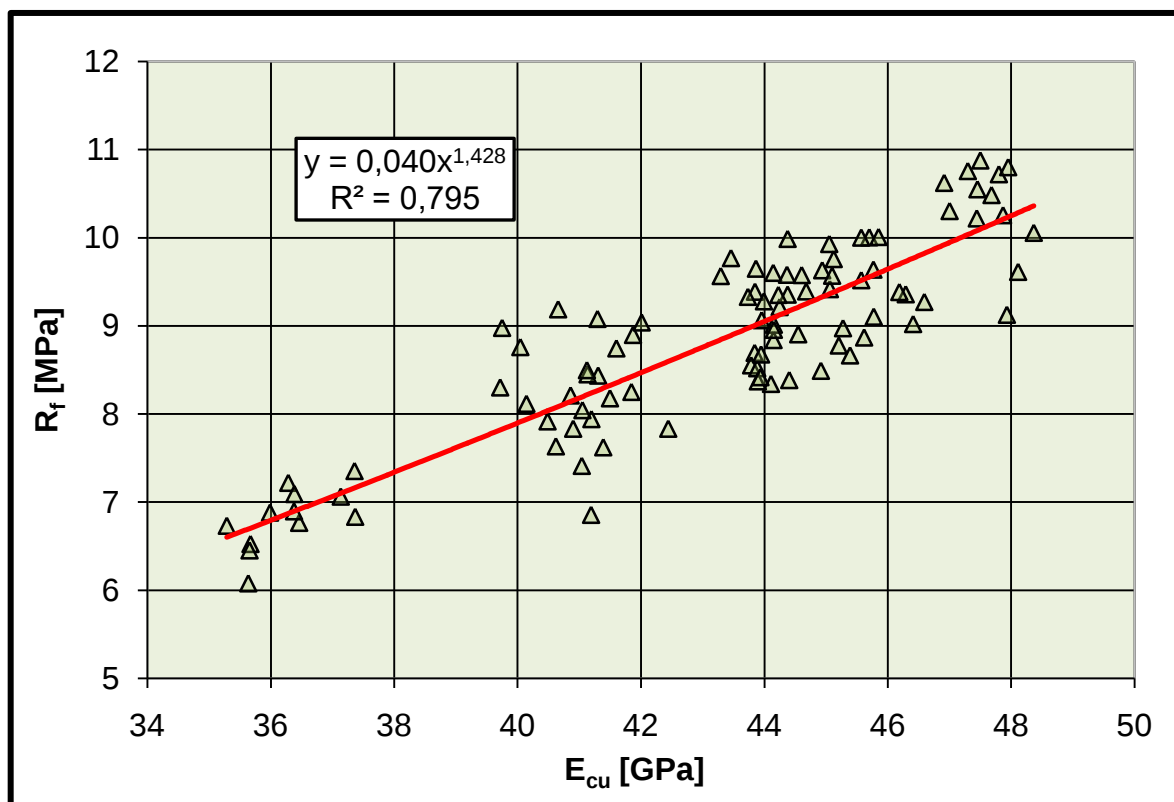
Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 3							
Stáří vzorků – 2 dny							
1	2216	4,0	22,8	24,1	23,4	4,046	36279
2	2257	4,1	23,1	25,0	24,1	4,081	37594
3	2250	4,0	22,2	22,8	22,5	4,039	36697
<i>průměr</i>	2241	4,0	22,7	24,0	23,3	4,055	36857
Stáří vzorků – 3 dny							
1	2249	4,0	24,4	23,8	24,1	4,031	36550
2	2211	4,0	24,7	25,0	24,8	4,049	36253
3	2214	4,1	25,0	24,7	24,8	4,064	36560
<i>průměr</i>	2225	4,0	24,7	24,5	24,6	4,048	36454
Stáří vzorků – 7 dní							
1	2241	4,2	33,1	32,5	32,8	4,246	40414
2	2242	4,2	31,9	32,5	32,2	4,241	40329
3	2252	4,2	33,8	32,5	33,1	4,239	40474
<i>průměr</i>	2245	4,2	32,9	32,5	32,7	4,242	40406
Stáří vzorků – 14 dní							
1	2217	4,4	46,6	43,1	44,8	4,400	42919
2	2200	4,4	45,3	47,2	46,3	4,381	42221
3	2215	4,4	44,7	45,0	44,8	4,376	42424
<i>průměr</i>	2211	4,4	45,5	45,1	45,3	4,386	42521
Stáří vzorků – 21 dní							
1	2202	4,4	45,3	45,6	45,5	4,423	43063
2	2223	4,4	46,9	46,3	46,6	4,443	43879
3	2200	4,4	45,9	46,9	46,4	4,397	42532
<i>průměr</i>	2208	4,4	46,0	46,3	46,2	4,421	43158

Tabulka č. 16: Pokračování

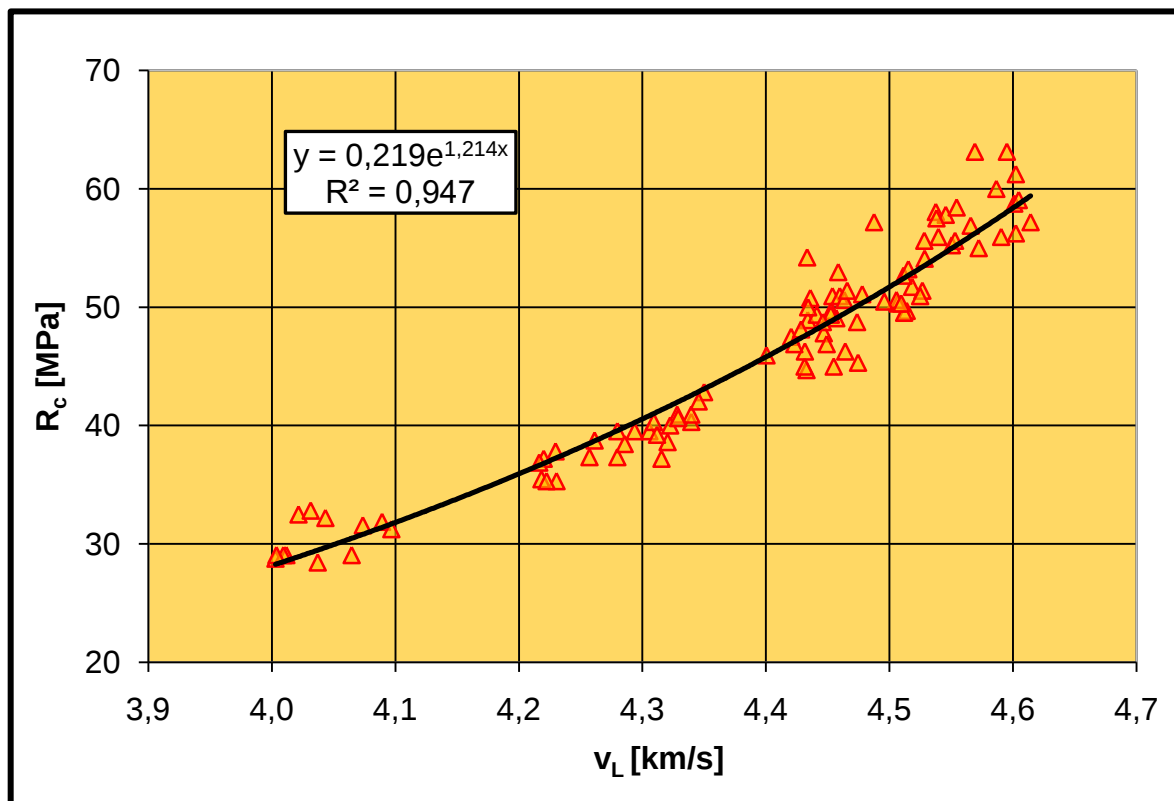
Označení vzorku	ρ [kg/m ³]	R_f [MPa]	R_{c1} [MPa]	R_{c2} [MPa]	R_c [MPa]	v_L [km/s]	E_{cu} [MPa]
CEM III/A 42,5 N – šarže 3							
Stáří vzorků – 28 dní							
1	2244	4,5	56,3	55,0	55,6	4,493	45301
2	2247	4,5	54,7	53,1	53,9	4,498	45473
3	2234	4,5	53,8	53,9	53,8	4,487	44989
<i>průměr</i>	2242	4,5	54,9	54,0	54,4	4,493	45254
Stáří vzorků – 90 dní							
1	2262	4,6	58,1	63,1	60,6	4,586	47570
2	2255	4,5	58,1	60,0	59,1	4,537	46422
3	2248	4,6	57,5	66,3	61,9	4,597	47508
<i>průměr</i>	2255	4,6	57,9	63,1	60,5	4,573	47167



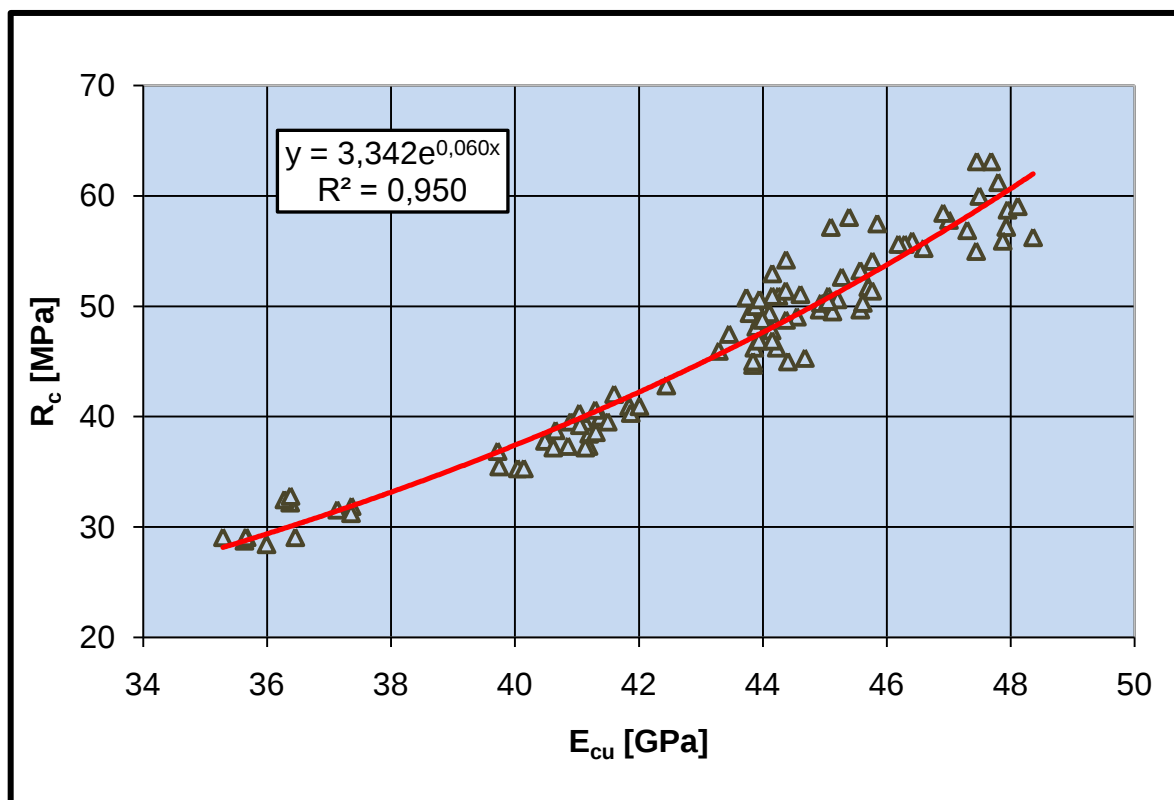
Graf 1: Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R



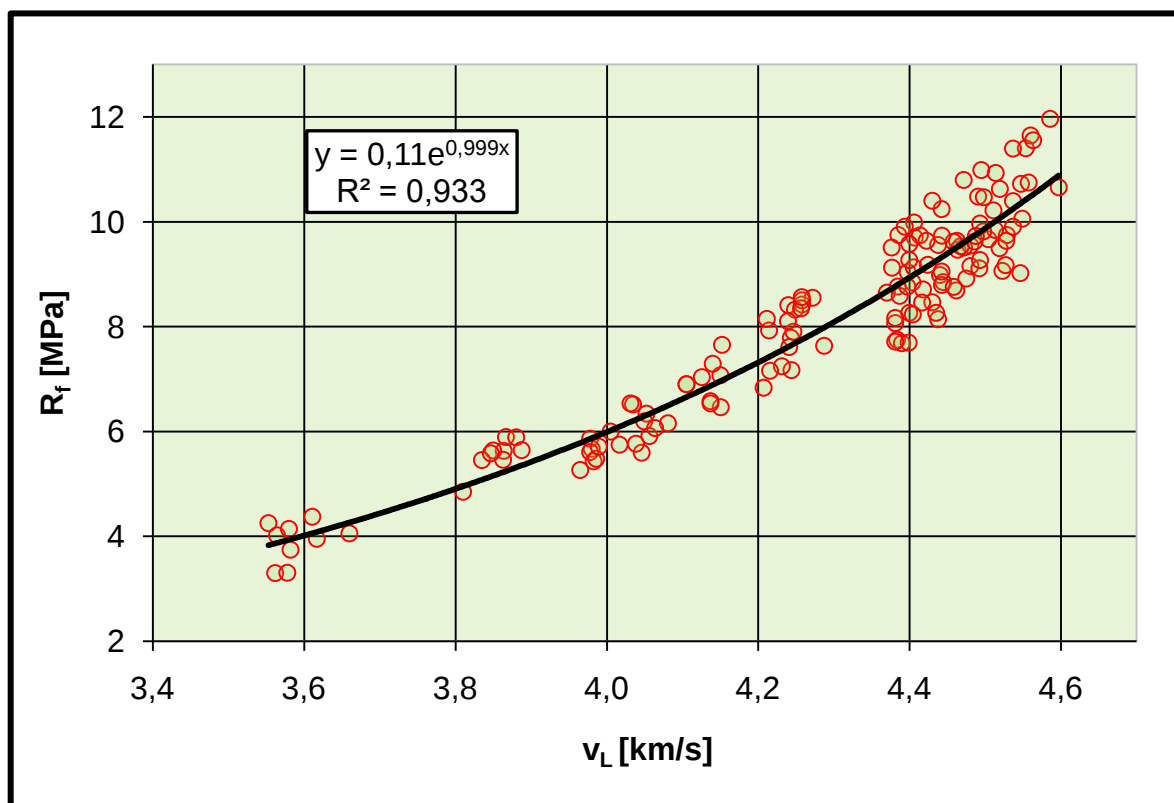
Graf 2: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R



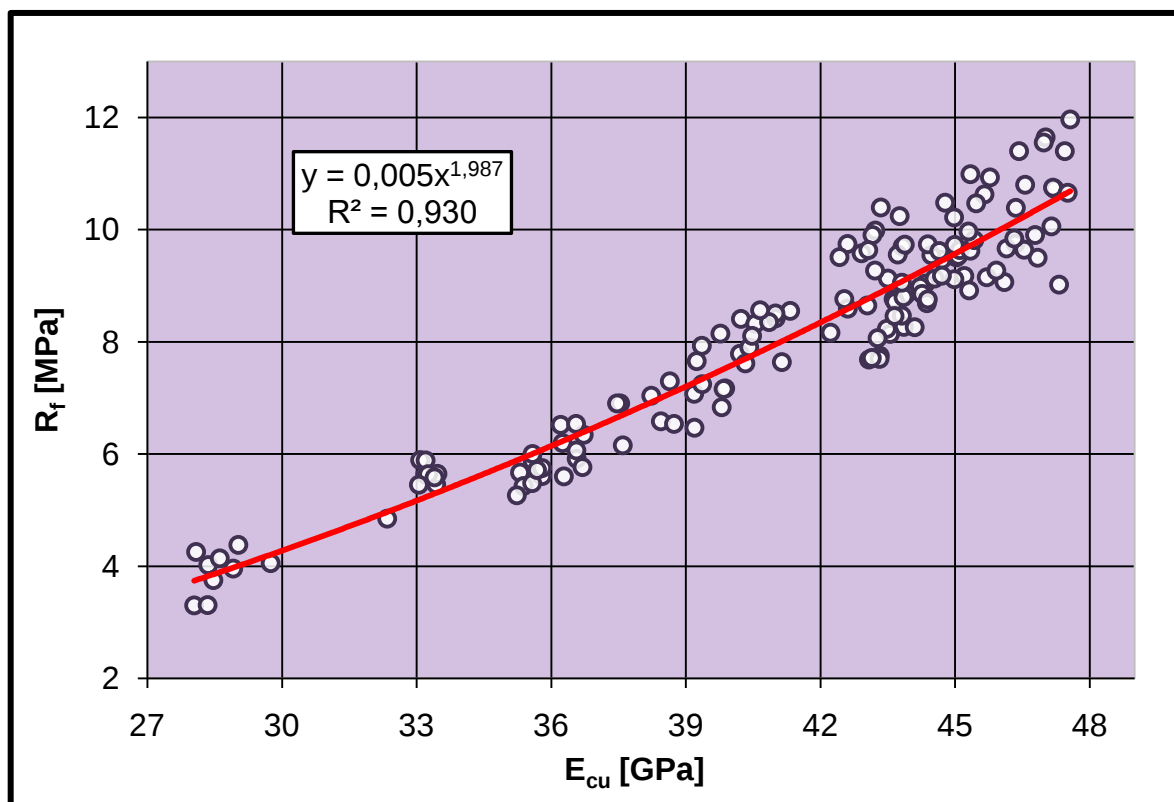
Graf 3: Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R



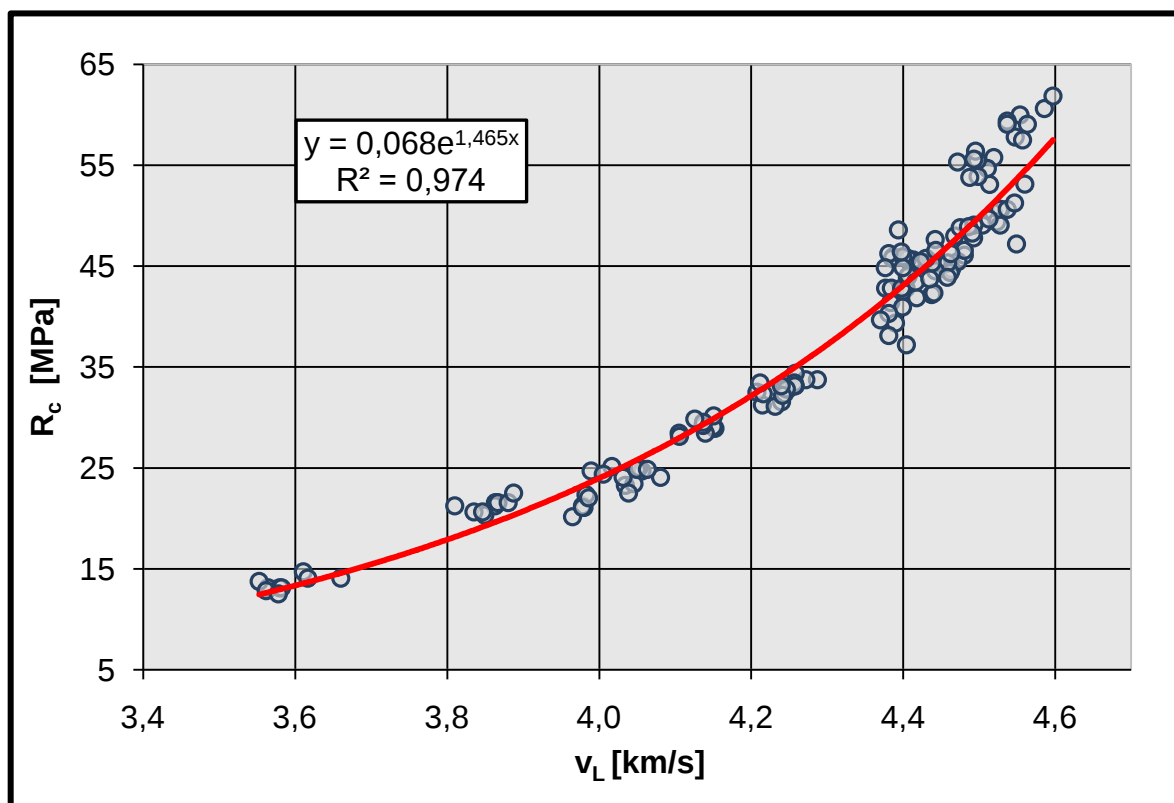
Graf 4: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R



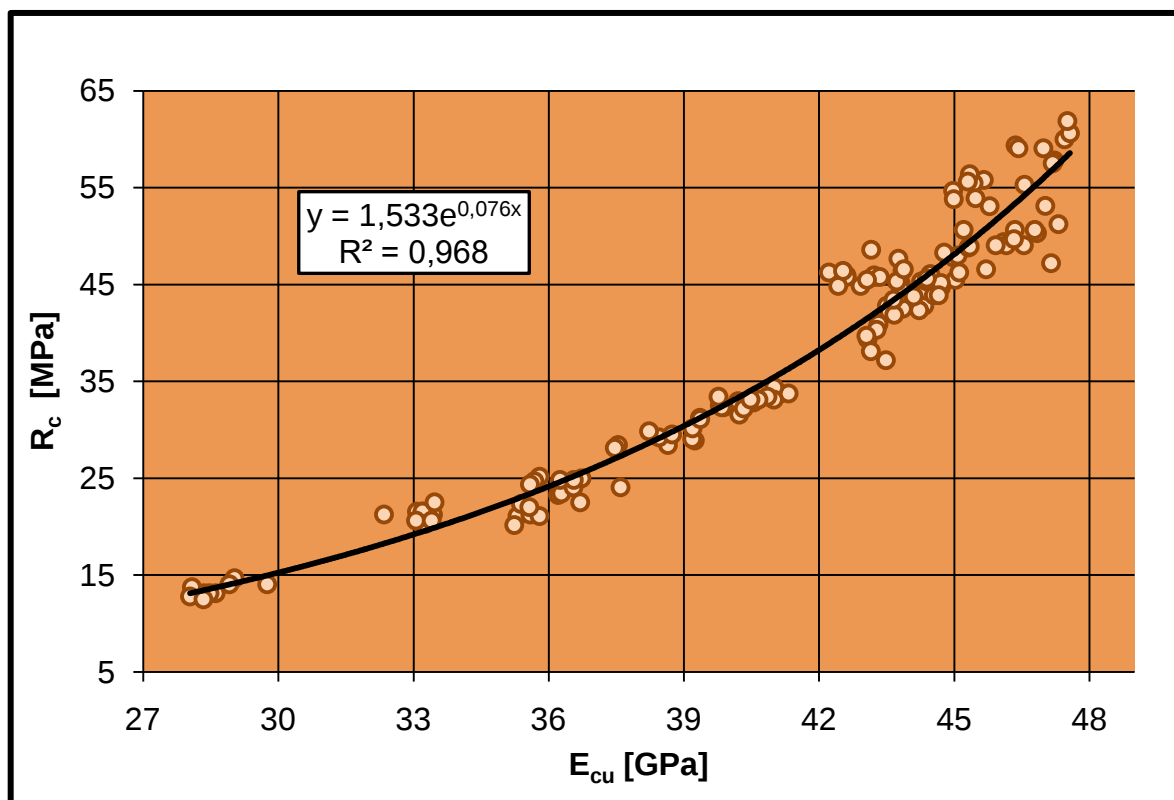
Graf 5: Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



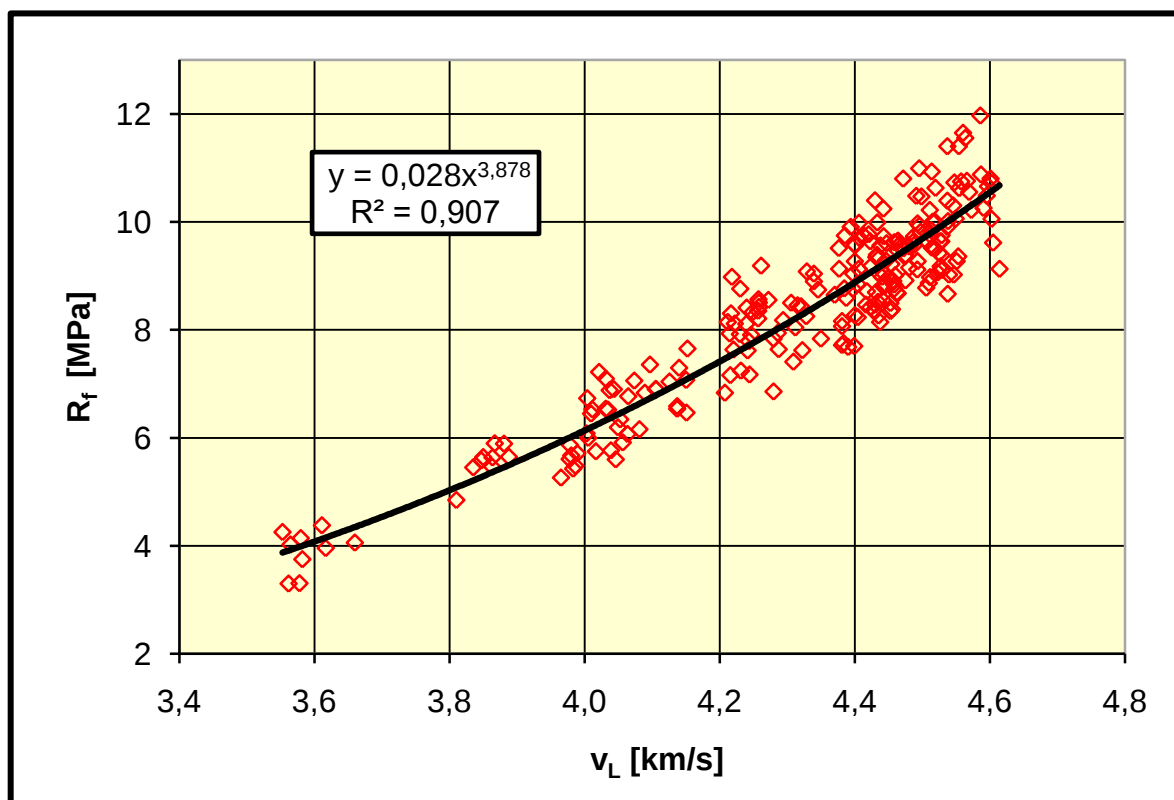
Graf 6: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



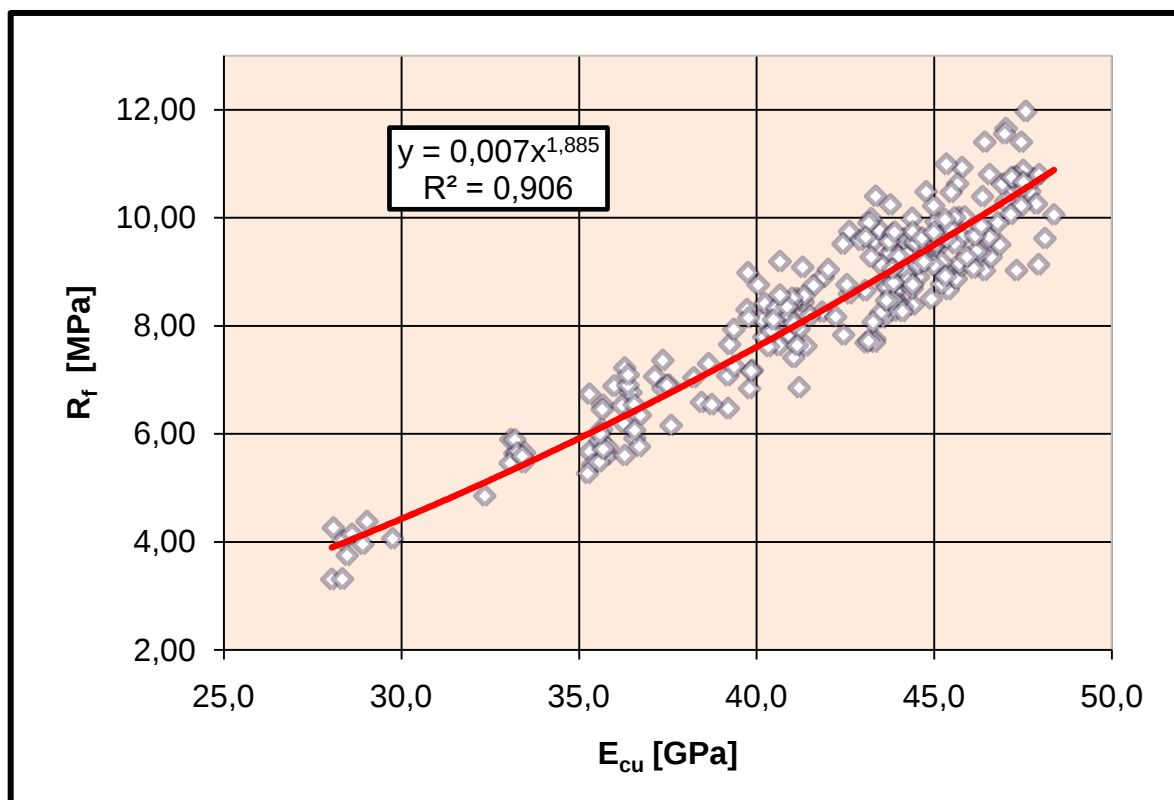
Graf 7: Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



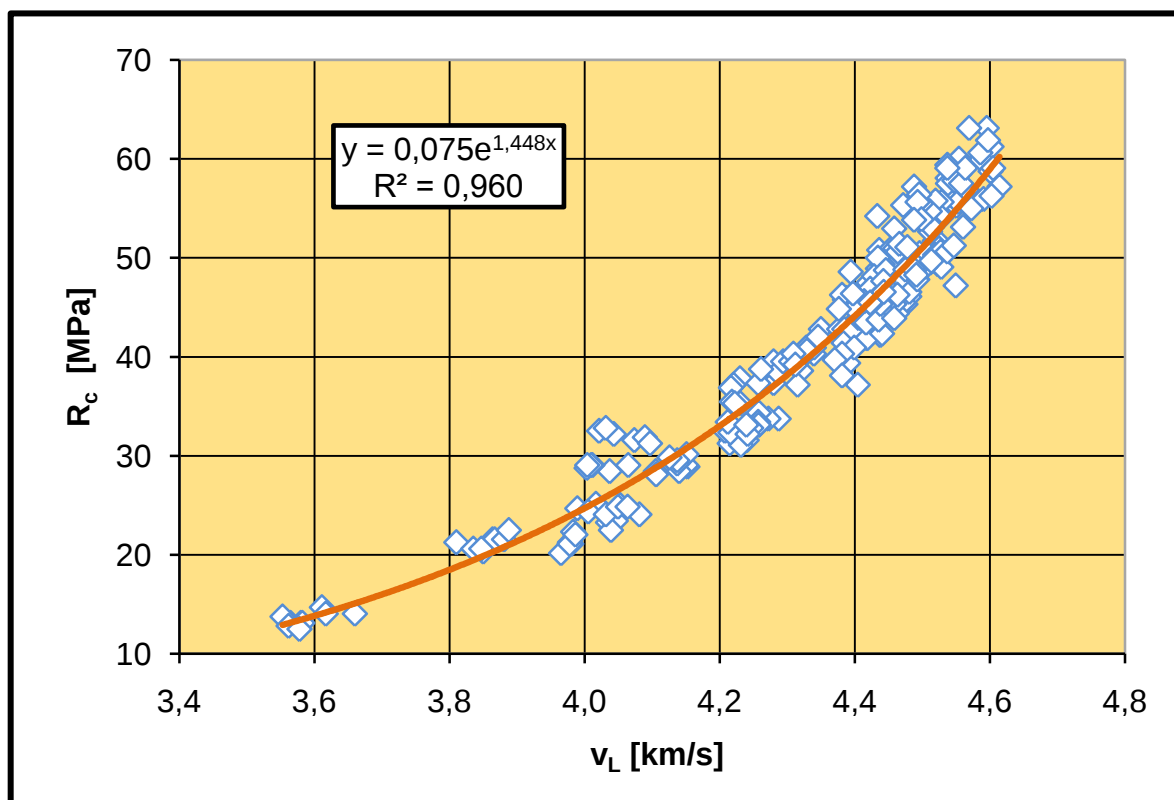
Graf 8: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



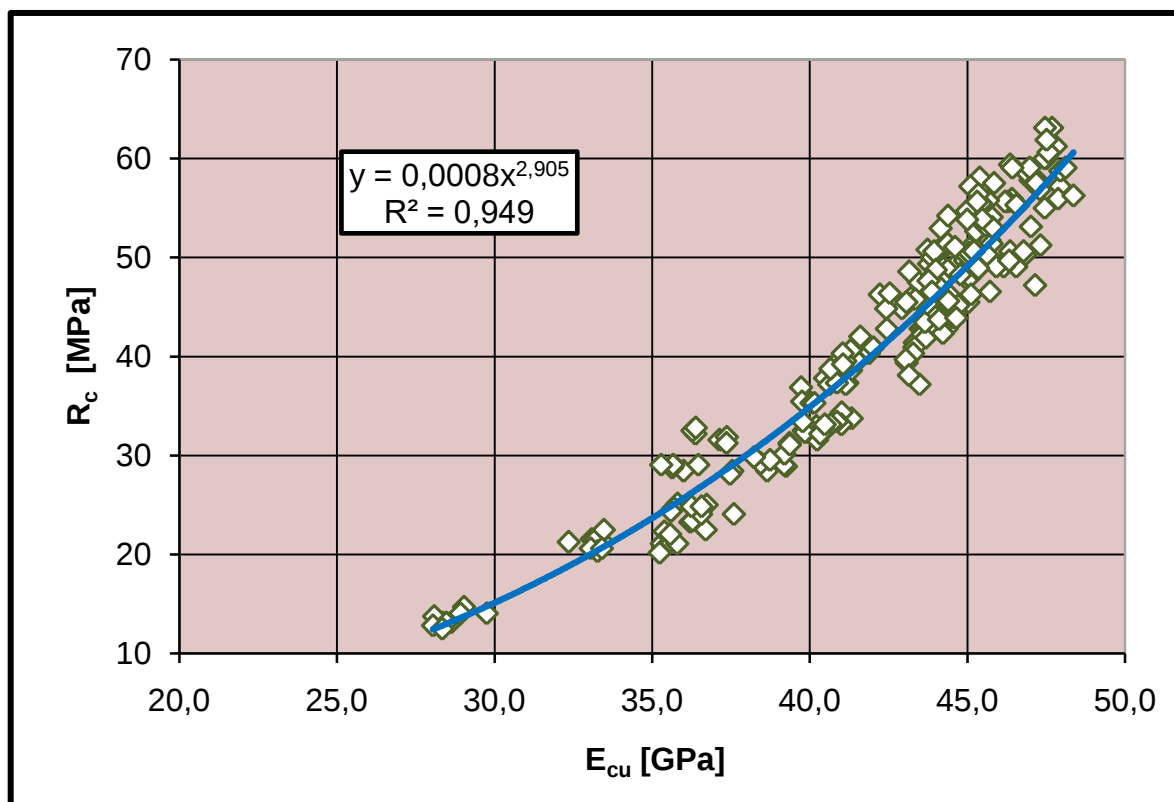
Graf 9: Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



Graf 10: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



Graf 11: Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



Graf 12: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností
v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N

5.2 Výsledky rezonanční metodou

Legenda k tabulkám:

f_L – první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného tělesa [kHz]

f_f – první vlastní kmitočet příčného kmitání zkoušeného tělesa [kHz]

f_t – první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkoušeného tělesa [kHz]

E_{rL} – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu při podélném kmitání vzorku [MPa]

E_{rf} – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu při příčném kmitání vzorku [MPa]

G_r – dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa]

ν_r – Poissonův koeficient [-]

Tabulka č. 17: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 1

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM I 52,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 1 den							
1	12,137	5,141	7,208	33677	32475	14041	0,20
Stáří vzorků – 2 dny							
1	12,561	5,512	7,473	36426	37702	15293	0,19
Stáří vzorků – 3 dny							
1	12,985	5,724	7,738	38636	40119	16323	0,18
Stáří vzorků – 7 dní							
1	13,303	5,671	7,897	40661	39408	17003	0,20
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,303	5,618	7,843	40688	38965	16747	0,21
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,409	5,671	7,897	42047	40911	17323	0,21
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,674	5,724	8,003	43743	41814	17705	0,24

Tabulka č. 18: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 2

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM I 52,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 1 den							
1	11,872	5,035	7,049	32033	31118	13396	0,20
Stáří vzorků – 2 dny							
1	12,576	5,300	7,367	36596	35207	14842	0,23
Stáří vzorků – 3 dny							
1	12,720	5,406	7,526	36933	36221	15362	0,20

Tabulka č. 18: Pokračování

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM I 52,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 7 dní							
1	13,303	5,671	7,791	40671	40105	16578	0,23
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,250	5,512	7,791	40171	37508	16466	0,22
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,462	5,671	7,950	42156	40790	17442	0,21
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,621	5,671	8,056	44125	41771	18258	0,21

Tabulka č. 19: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 3

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM I 52,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 1 den							
1	11,978	5,035	7,102	32957	31643	13720	0,20
Stáří vzorků – 2 dny							
1	12,402	5,194	7,261	36108	35030	14663	0,23
Stáří vzorků – 3 dny							
1	12,905	5,671	7,685	38175	39604	16111	0,18
Stáří vzorků – 7 dní							
1	13,197	5,777	7,897	39895	41048	16940	0,18
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,250	5,565	7,844	40632	38882	16904	0,20
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,515	5,936	7,897	42015	43970	17070	0,23

Tabulka č. 19: Pokračování

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM I 52,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 28 dní							
<i>1</i>	13,727	5,724	8,003	43819	41317	17670	0,24

Tabulka č. 20: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 4

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM I 52,5 R – šarže 4							
Stáří vzorků – 1 den							
<i>1</i>	11,872	4,982	6,966	32250	30869	13176	0,22
Stáří vzorků – 2 dny							
<i>1</i>	12,614	5,300	7,314	36466	35090	14539	0,25
Stáří vzorků – 3 dny							
<i>1</i>	12,773	5,406	7,473	37205	36278	15084	0,23
Stáří vzorků – 7 dní							
<i>1</i>	13,356	5,724	7,844	41043	40361	16794	0,22
Stáří vzorků – 14 dní							
<i>1</i>	13,409	5,459	7,844	41373	37175	16765	0,23
Stáří vzorků – 21 dní							
<i>1</i>	13,621	5,724	7,950	43065	41643	17451	0,23
Stáří vzorků – 28 dní							
<i>1</i>	13,462	5,883	7,950	41829	43098	17357	0,20

Tabulka č. 21: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1							
Stáří vzorků – 1 den							
1	11,342	4,929	6,731	29417	29908	12274	0,20
Stáří vzorků – 2 dny							
1	12,296	5,194	7,155	35235	34231	14123	0,25
Stáří vzorků – 3 dny							
1	12,561	5,406	7,367	36340	36482	14869	0,22
Stáří vzorků – 7 dní							
1	13,038	5,565	7,685	39990	39819	16486	0,21
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,197	5,565	7,791	40482	38889	16701	0,21
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,356	5,565	7,791	40650	37843	16408	0,24
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,609	5,618	7,950	43399	39663	17471	0,24

Tabulka č. 22: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 1 den							
1	11,395	4,876	6,731	29539	29299	12218	0,21
Stáří vzorků – 2 dny							
1	12,296	5,035	7,155	35060	32267	14031	0,25

Tabulka č. 22: Pokračování

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2							
Stáří vzorků – 3 dny							
1	12,508	5,406	7,314	35566	36013	14418	0,23
Stáří vzorků – 7 dní							
1	13,197	5,777	7,844	39403	39922	16519	0,19
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,303	5,612	7,791	40566	39038	16495	0,23
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,356	5,777	7,897	40959	41292	17001	0,20
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,568	5,724	8,003	42780	41145	17700	0,21

Tabulka č. 23: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 1 den							
1	11,342	4,823	6,731	29759	29028	12416	0,20
Stáří vzorků – 2 dny							
1	12,243	5,035	7,155	34747	31766	14053	0,24
Stáří vzorků – 3 dny							
1	12,508	5,353	7,314	36153	36147	14701	0,23
Stáří vzorků – 7 dní							
1	13,038	5,618	7,685	39415	39318	16259	0,21

Tabulka č. 23: Pokračování

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3							
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,356	5,512	7,791	42113	38551	16948	0,24
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,462	5,671	7,844	41469	39603	16727	0,24
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,515	5,724	7,950	42519	41480	17439	0,22

Tabulka č. 24: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 1

Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM III/A 42,5 N – šarže 1							
Stáří vzorků – 1 den							
1	10,282	4,346	6,042	24534	23911	10041	0,22
Stáří vzorků – 2 dny							
1	11,077	4,823	6,678	27862	28069	12023	0,16
Stáří vzorků – 3 dny							
1	11,766	4,982	6,943	32081	31529	13307	0,21
Stáří vzorků – 7 dní							
1	12,614	5,300	7,420	36987	35377	15168	0,22
Stáří vzorků – 14 dní							
1	12,561	5,353	7,473	36483	36006	15334	0,19
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,462	5,883	7,897	41560	42464	16951	0,23
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,462	5,883	8,003	41744	43250	17506	0,19

Tabulka č. 25: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 2

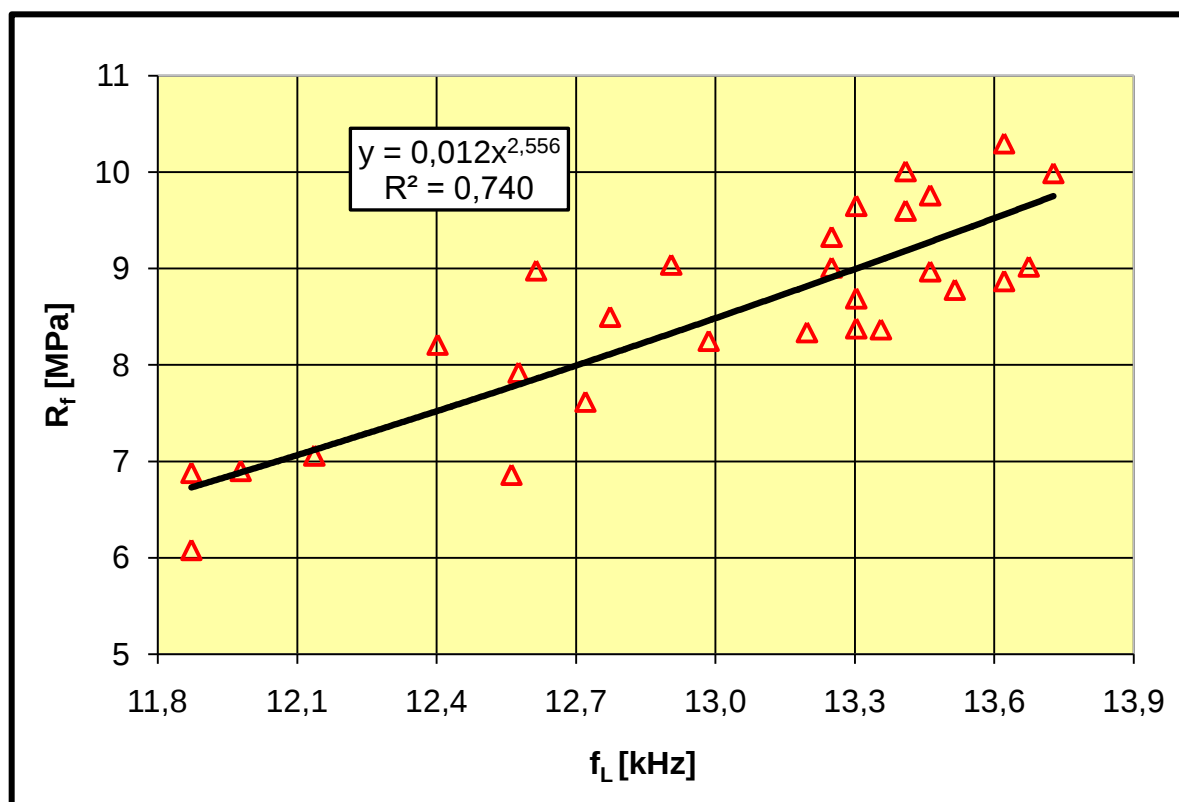
Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM III/A 42,5 N – šarže 2							
Stáří vzorků – 1 den							
1	10,388	4,452	6,201	24518	24123	10370	0,18
Stáří vzorků – 2 dny							
1	11,607	4,982	6,890	31095	29285	12898	0,21
Stáří vzorků – 3 dny							
1	11,766	5,035	6,943	32247	32897	13373	0,21
Stáří vzorků – 7 dní							
1	12,773	5,459	7,526	37824	37154	15579	0,21
Stáří vzorků – 14 dní							
1	13,250	5,671	7,844	40365	40008	16798	0,20
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,356	5,777	7,844	40769	41218	16673	0,22
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,515	5,883	8,003	43840	44856	18179	0,21

Tabulka č. 26: Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 3

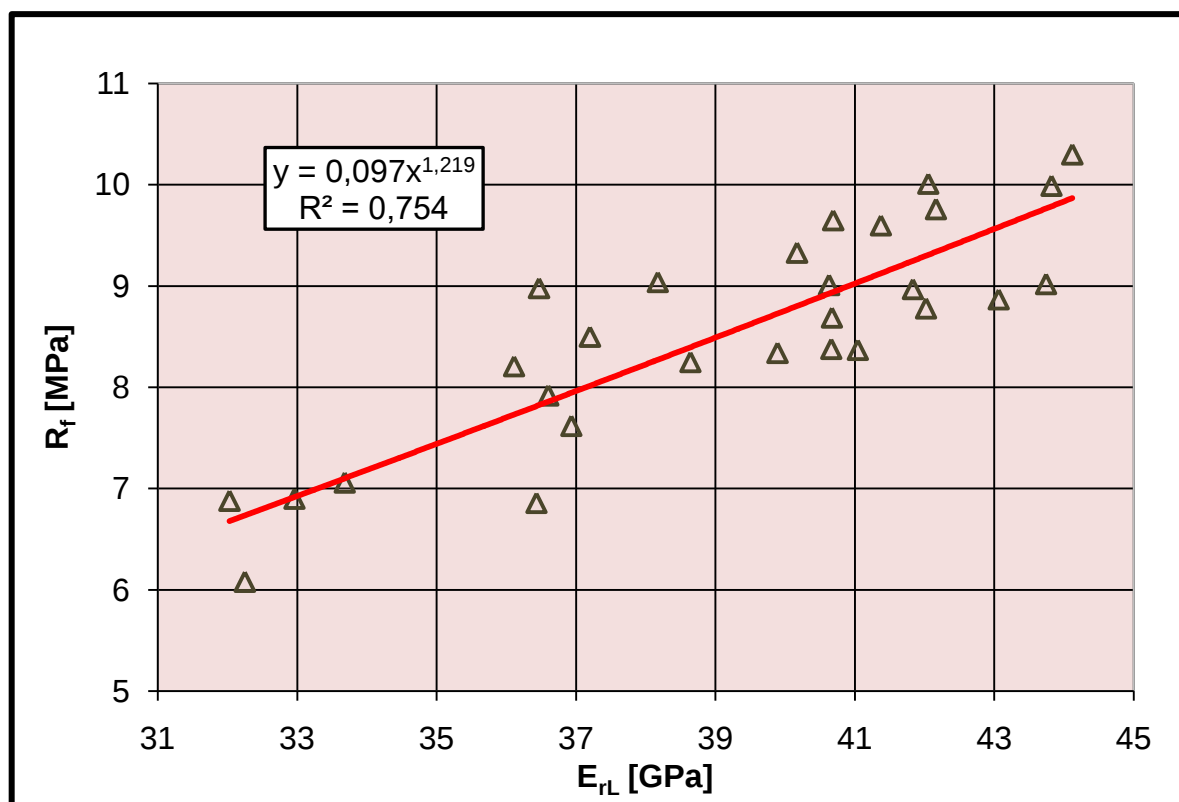
Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
CEM III/A 42,5 N – šarže 3							
Stáří vzorků – 1 den							
1	10,600	4,505	6,307	26030	25610	10929	0,19
Stáří vzorků – 2 dny							
1	11,713	4,876	6,890	31801	29935	13074	0,22

Tabulka č. 26: Pokračování

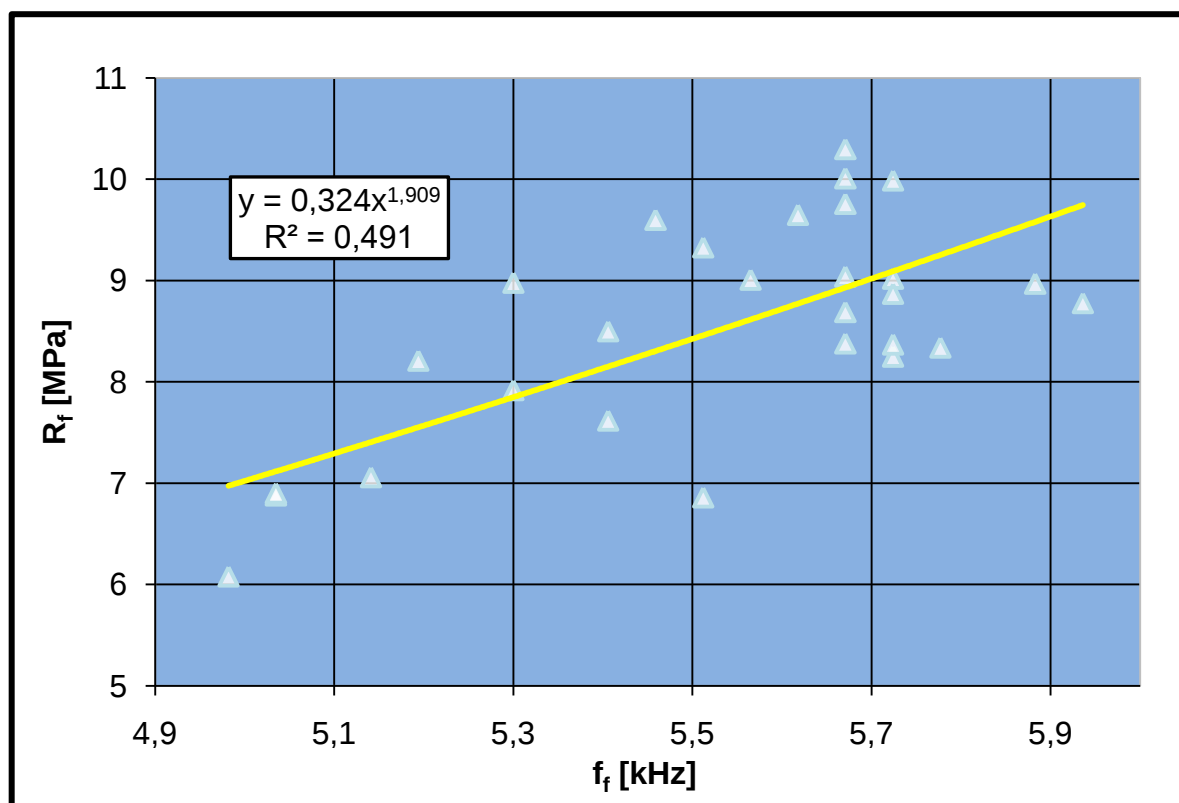
Označení vzorku	f_L [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{rL} [MPa]	E_{rf} [MPa]	G_r [MPa]	ν_r [-]
Stáří vzorků – 3 dny							
1	11,819	5,035	6,943	32512	32212	13359	0,22
Stáří vzorků – 7 dní							
1	12,667	5,459	7,473	36931	36778	15274	0,21
Stáří vzorků – 14 dní							
1	12,773	5,512	7,632	37246	37247	15799	0,18
Stáří vzorků – 21 dní							
1	13,197	5,565	7,738	39749	38062	16224	0,22
Stáří vzorků – 28 dní							
1	13,515	5,883	8,003	42262	43191	17544	0,20



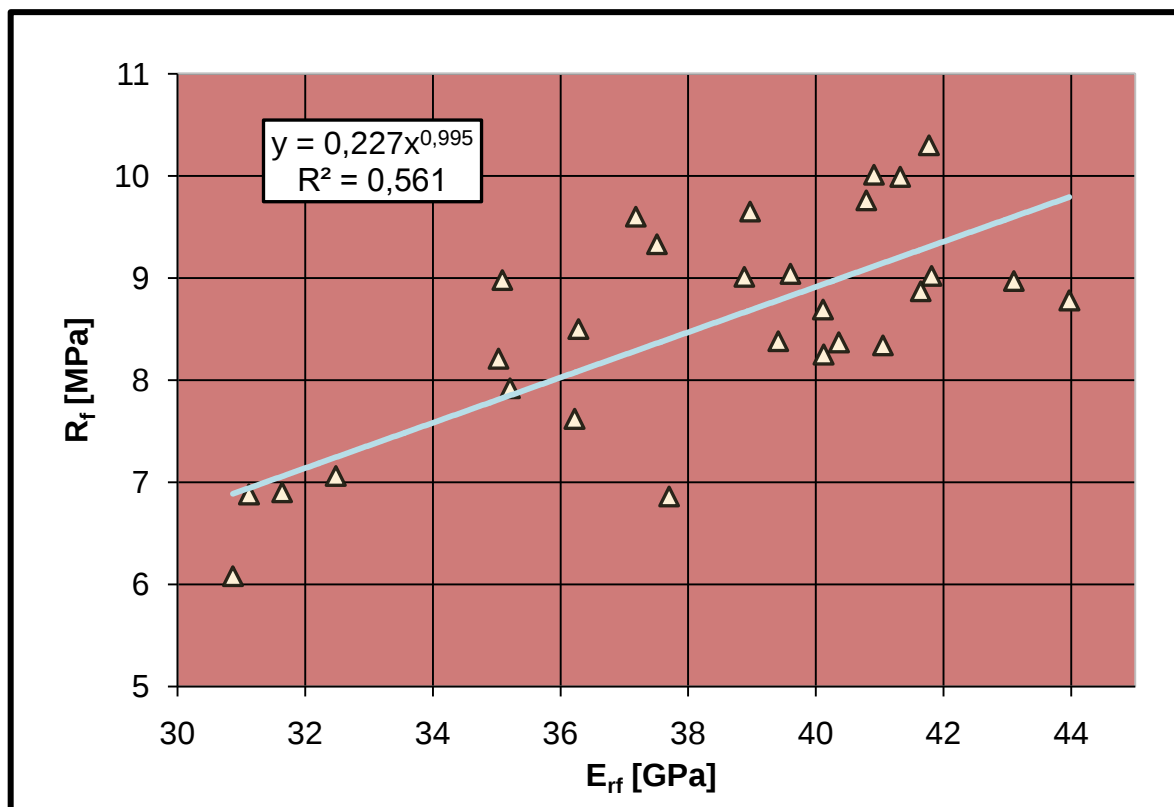
Graf 13: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu – CEM I 52,5 R



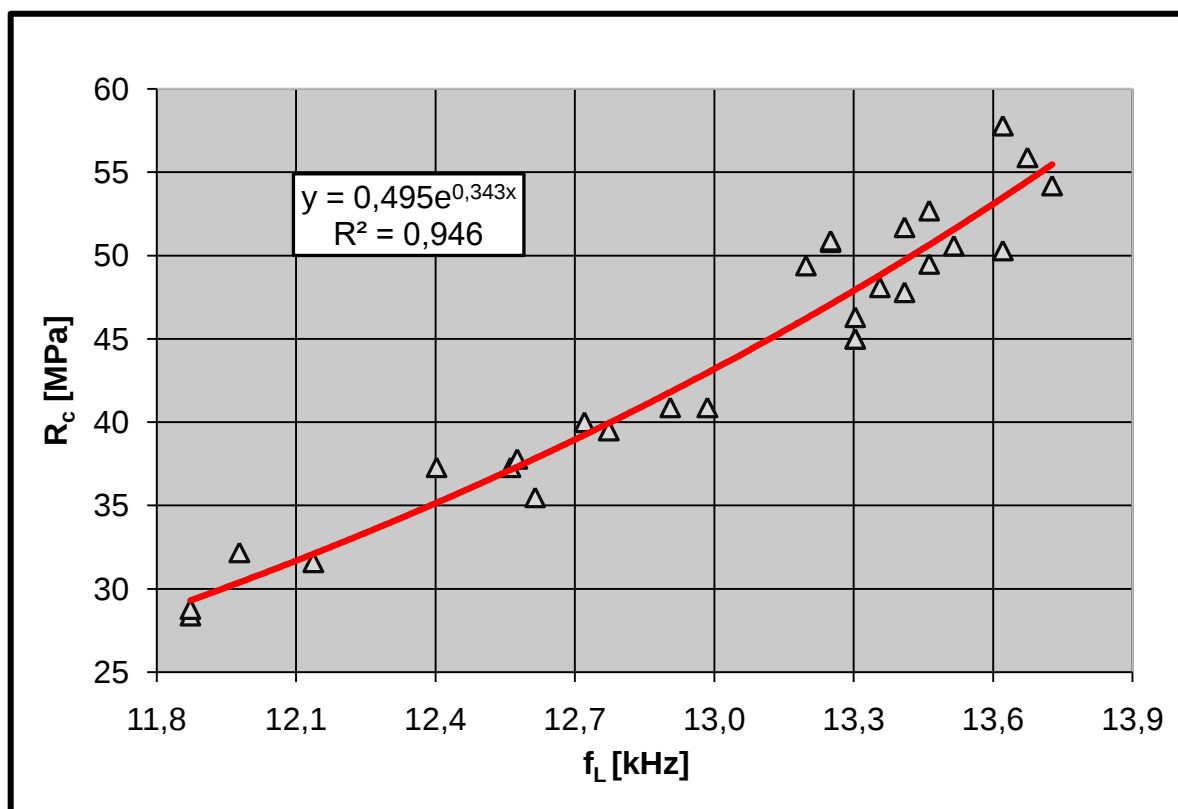
Graf 14: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevnosti v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R



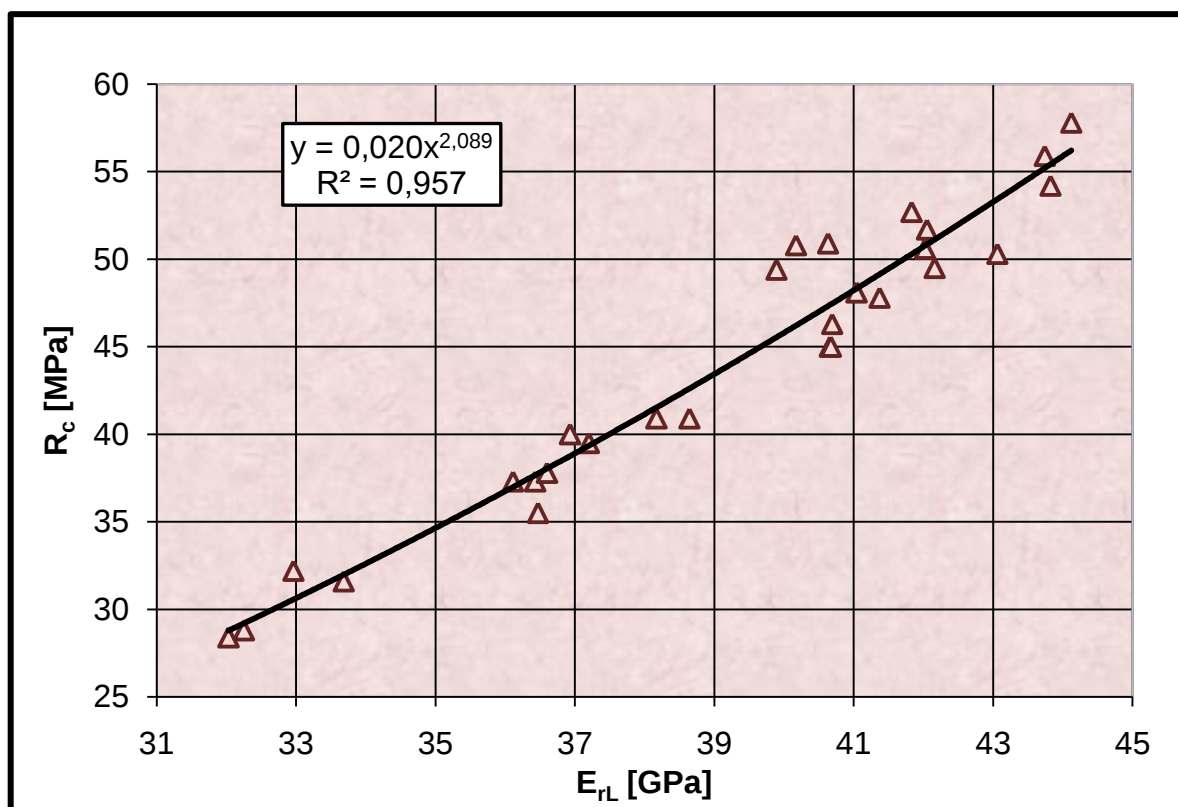
Graf 15: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R



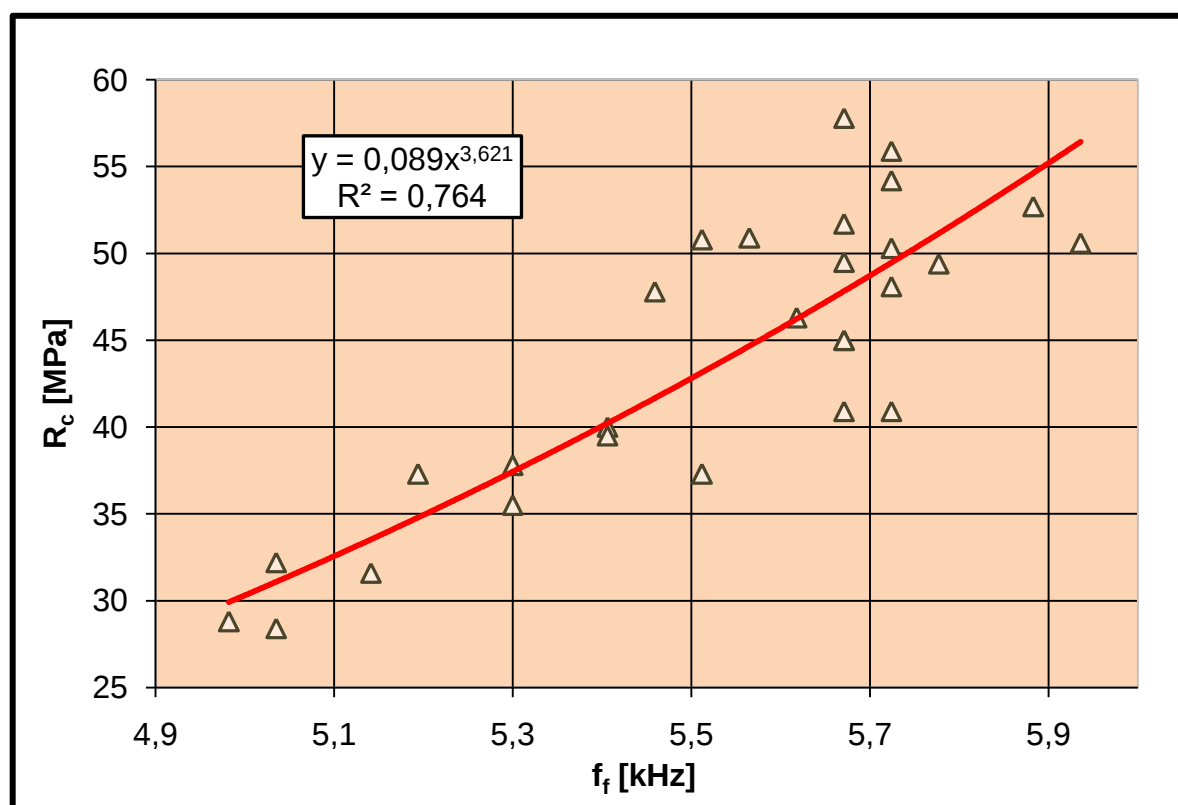
Graf 16: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R



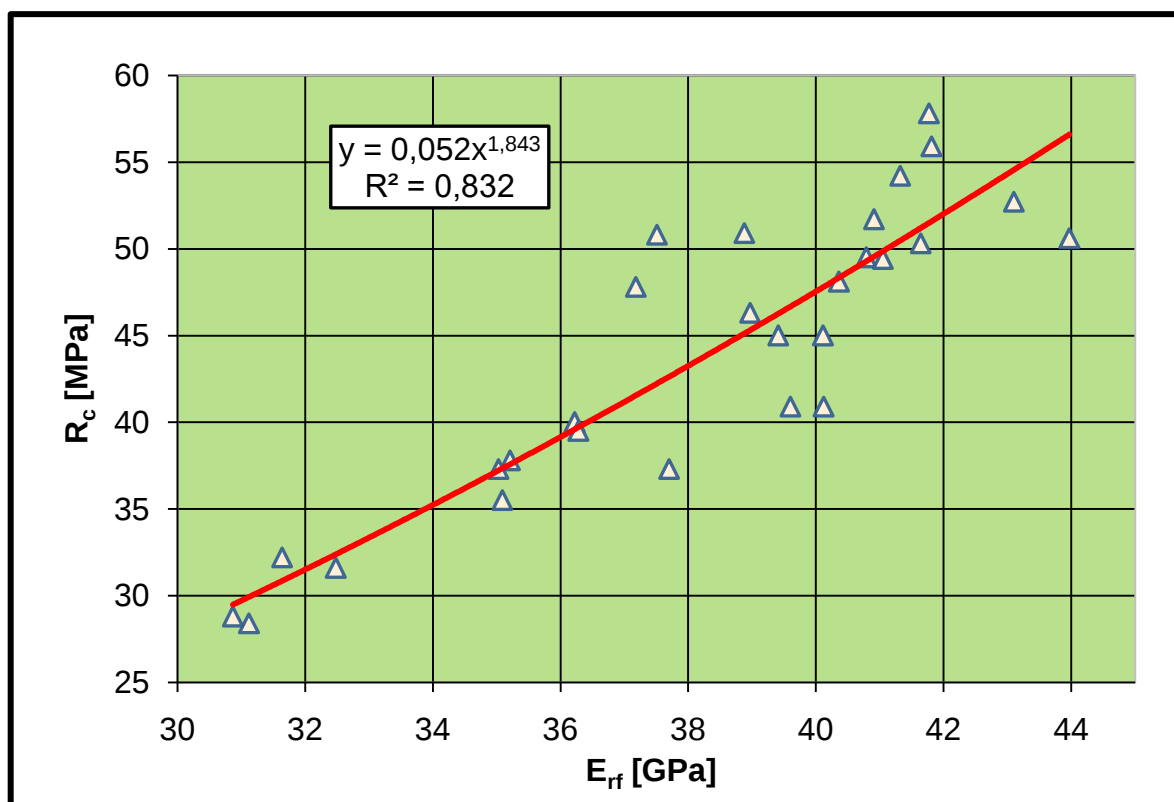
Graf 17: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R



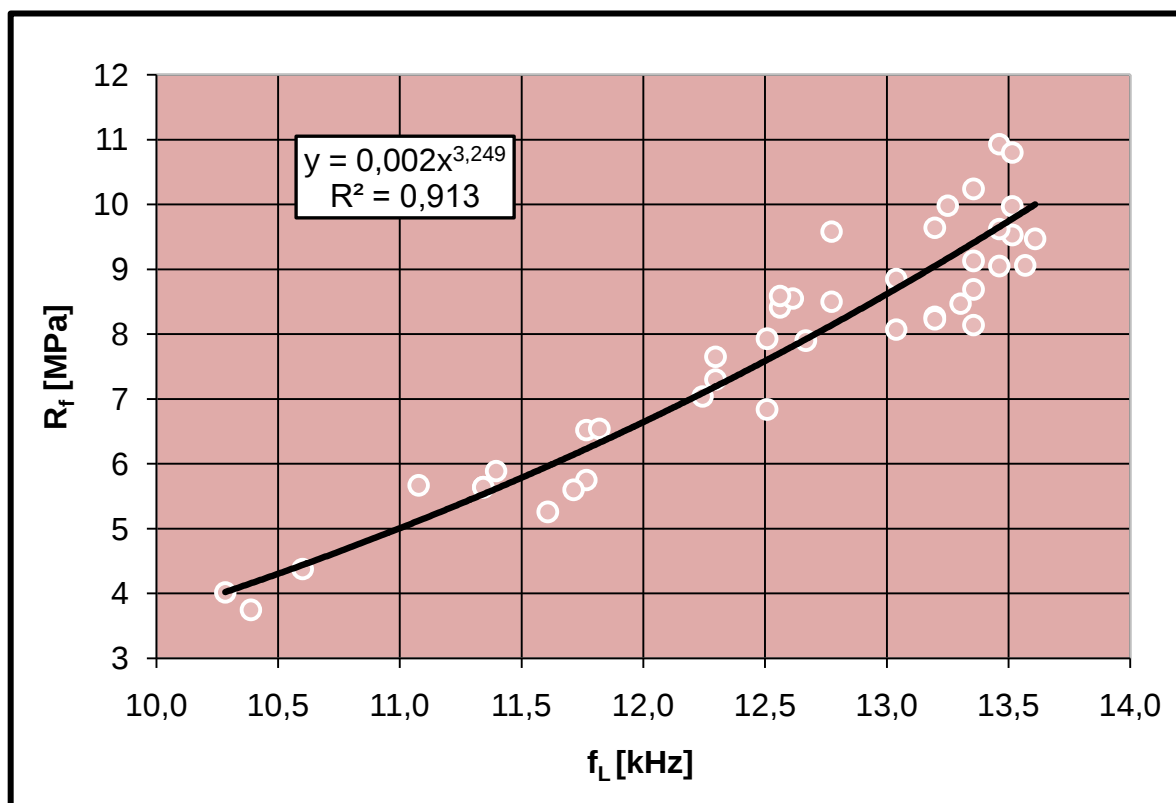
Graf 18: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tlaku – CEM I 52,5 R



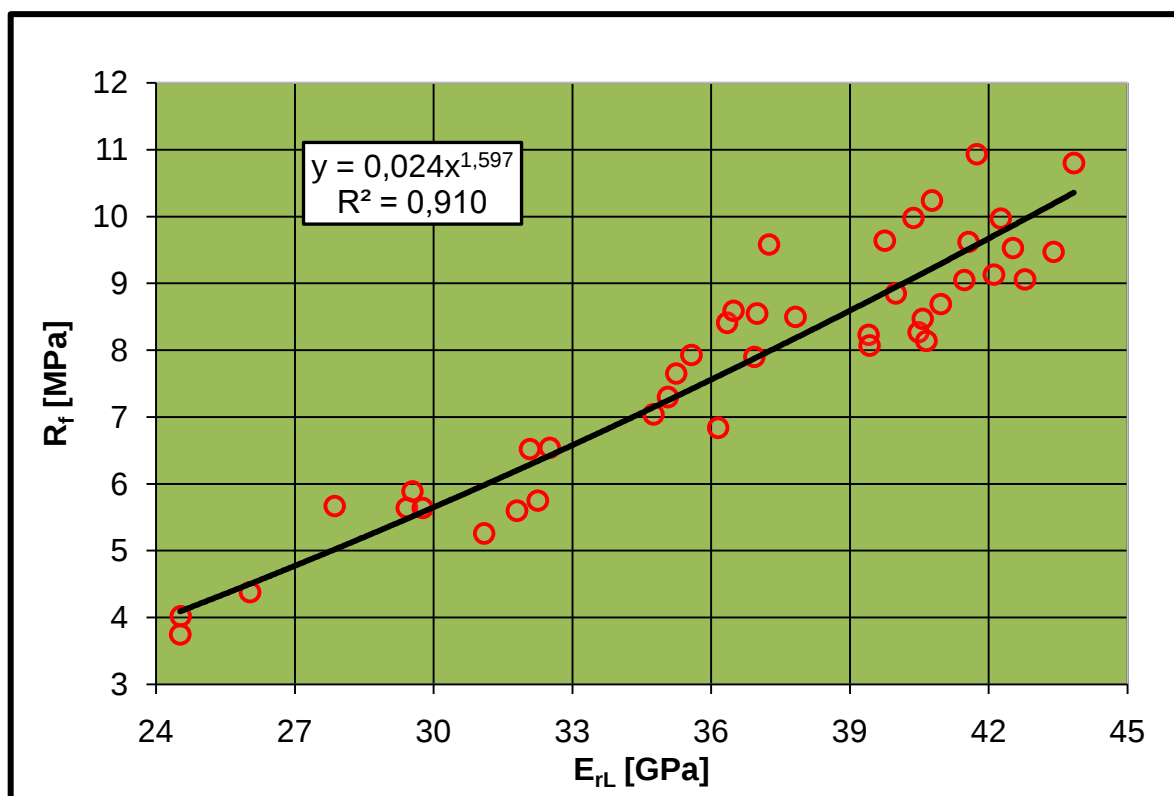
Graf 19: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R



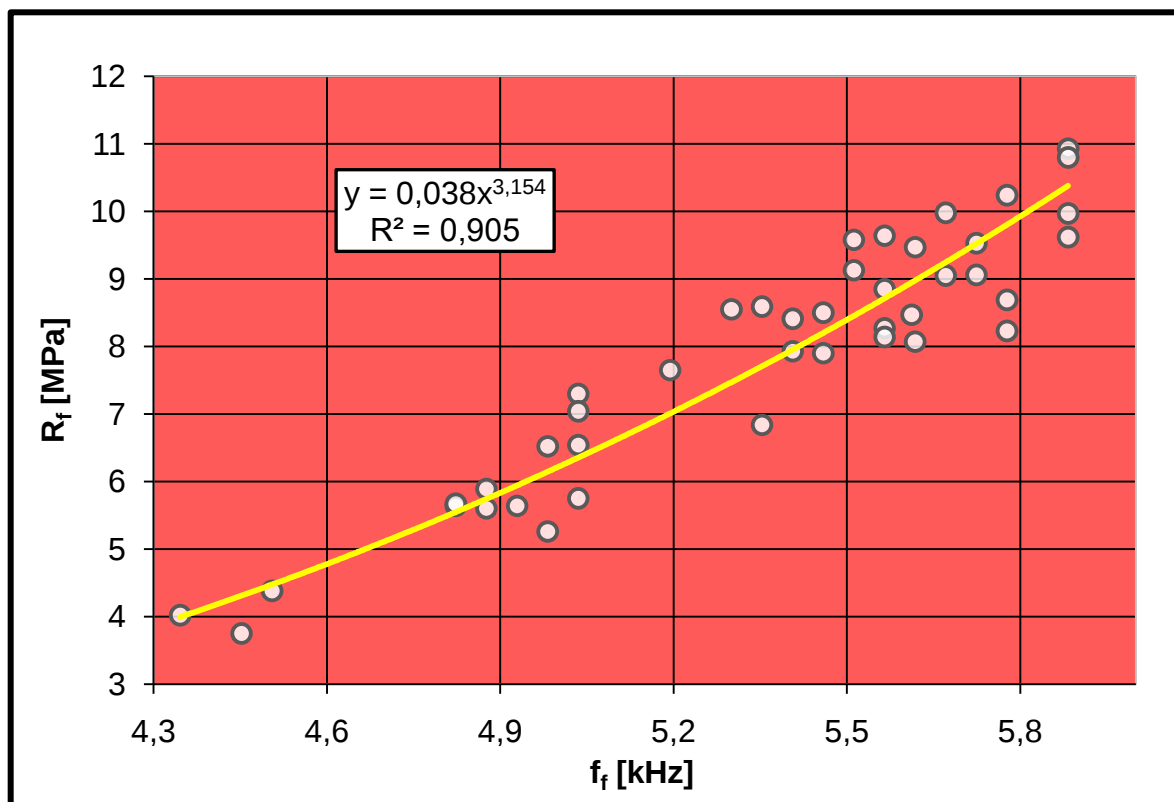
Graf 20: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R



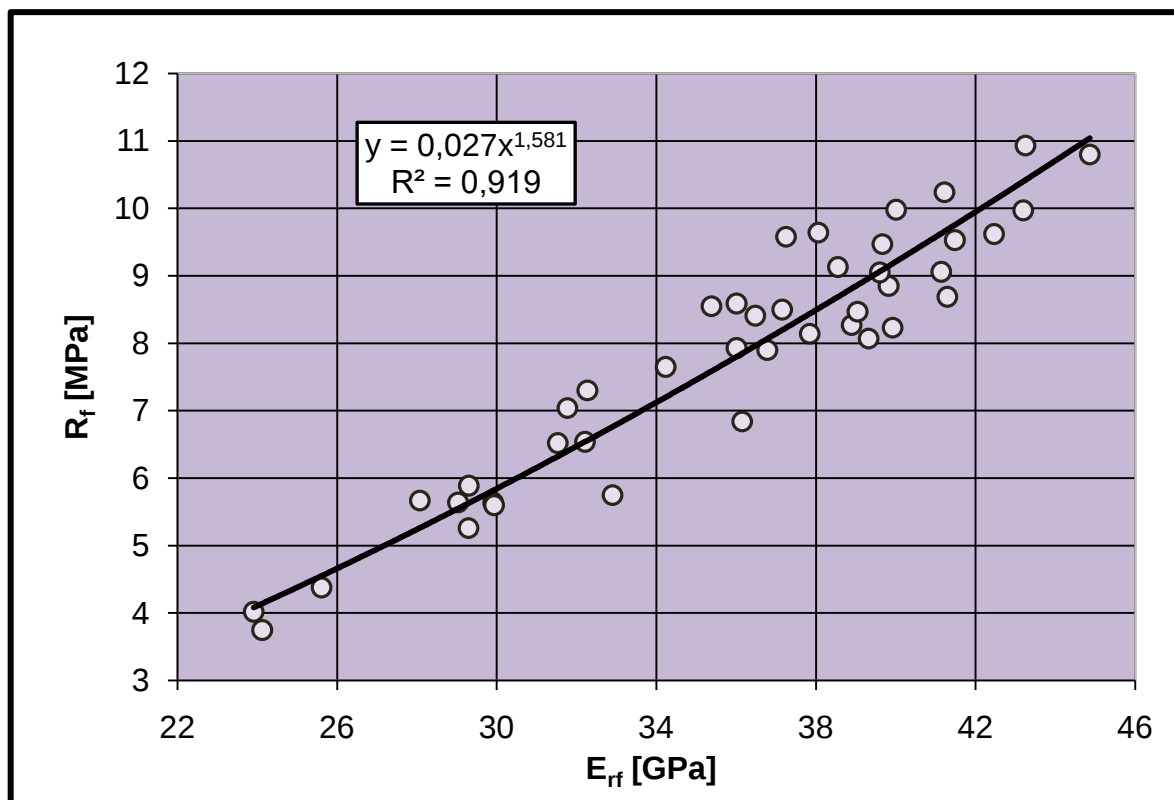
Graf 21: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



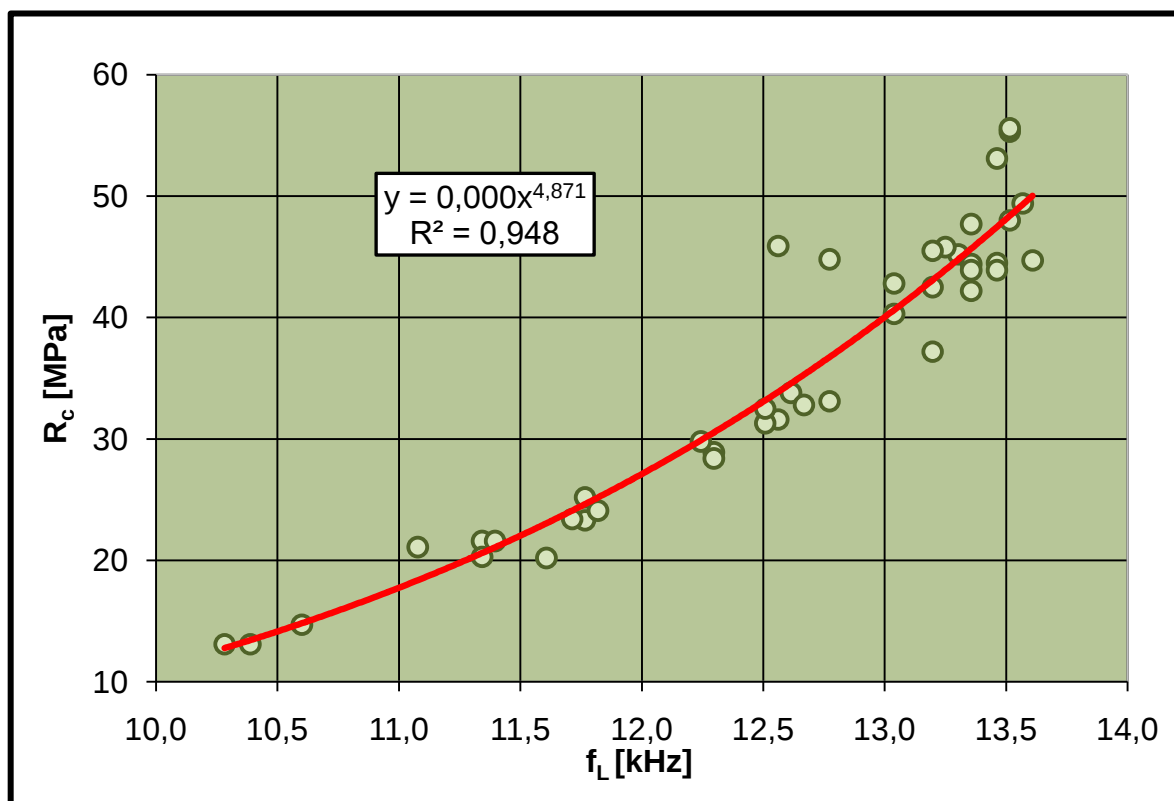
Graf 22: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevnosti v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



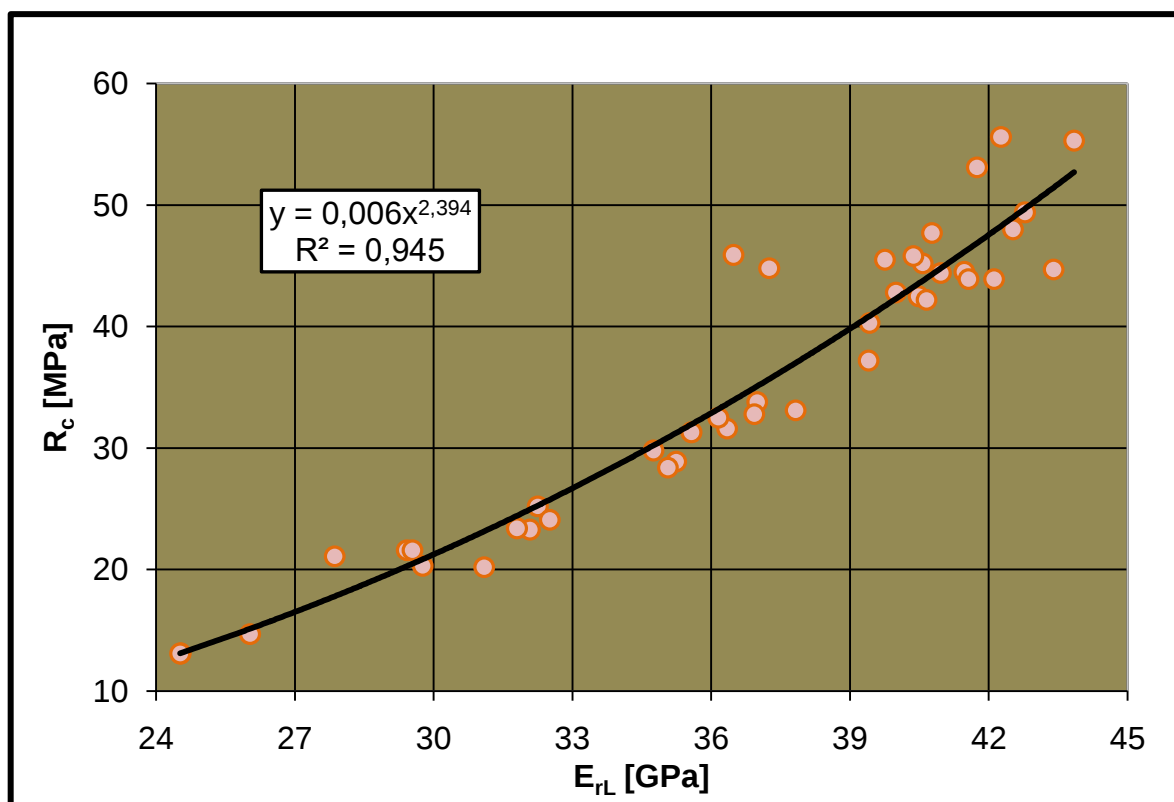
Graf 23: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



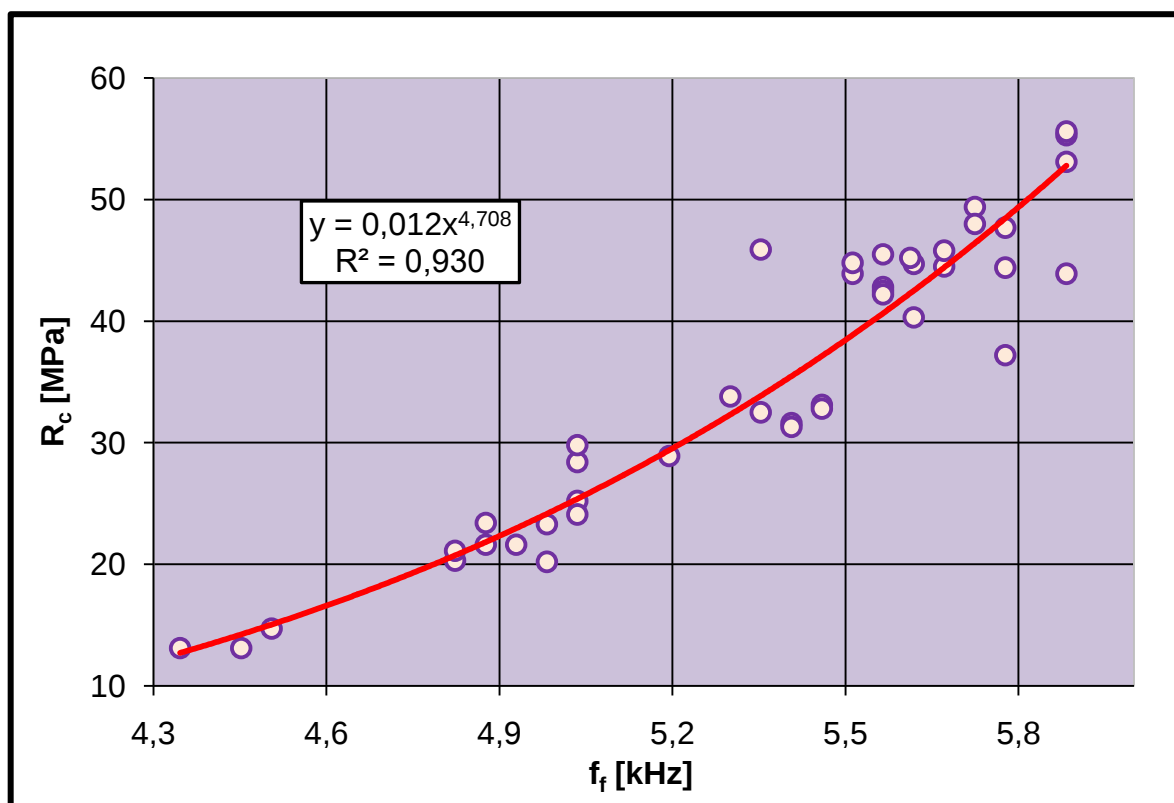
Graf 24: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulu pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



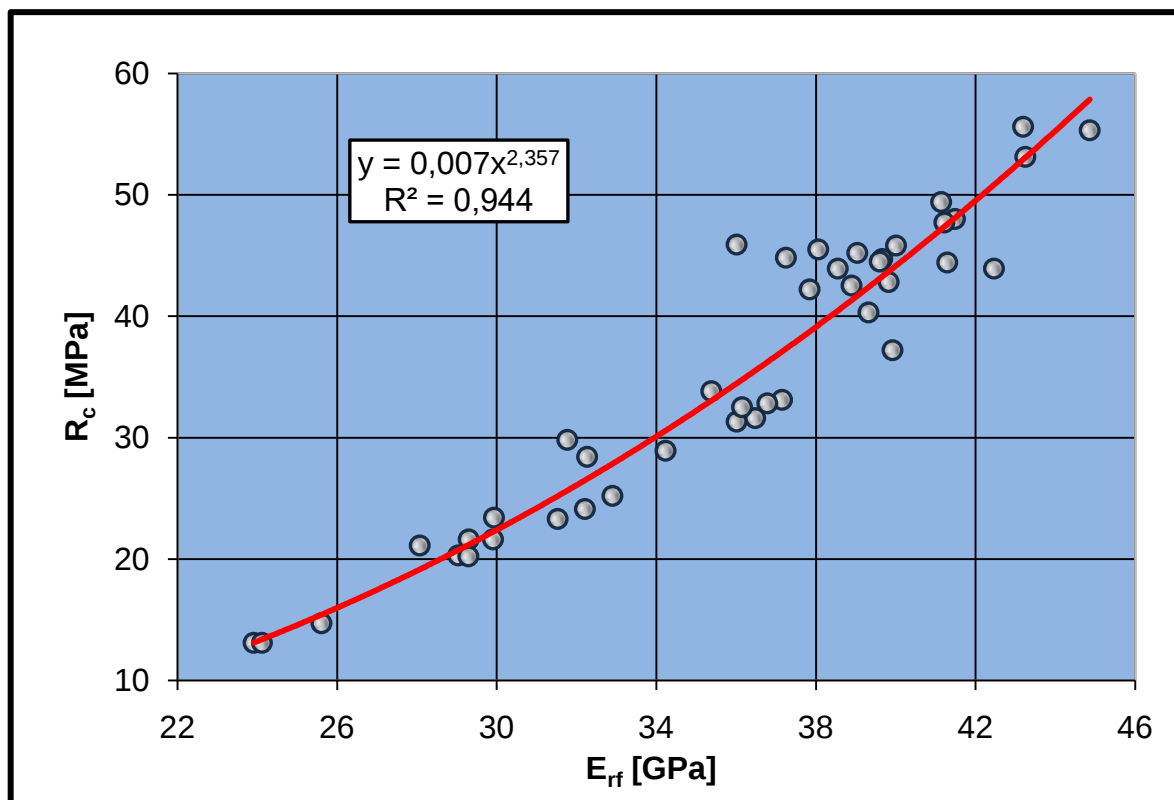
Graf 25: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



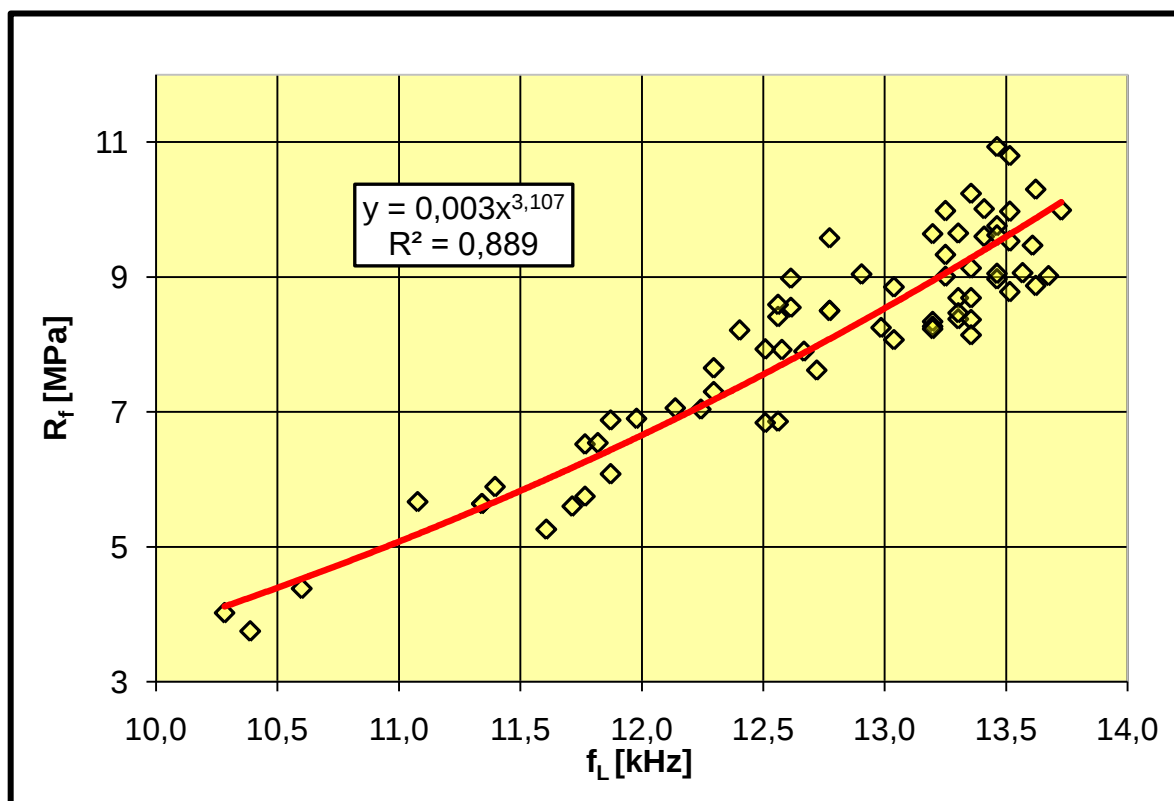
Graf 26: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



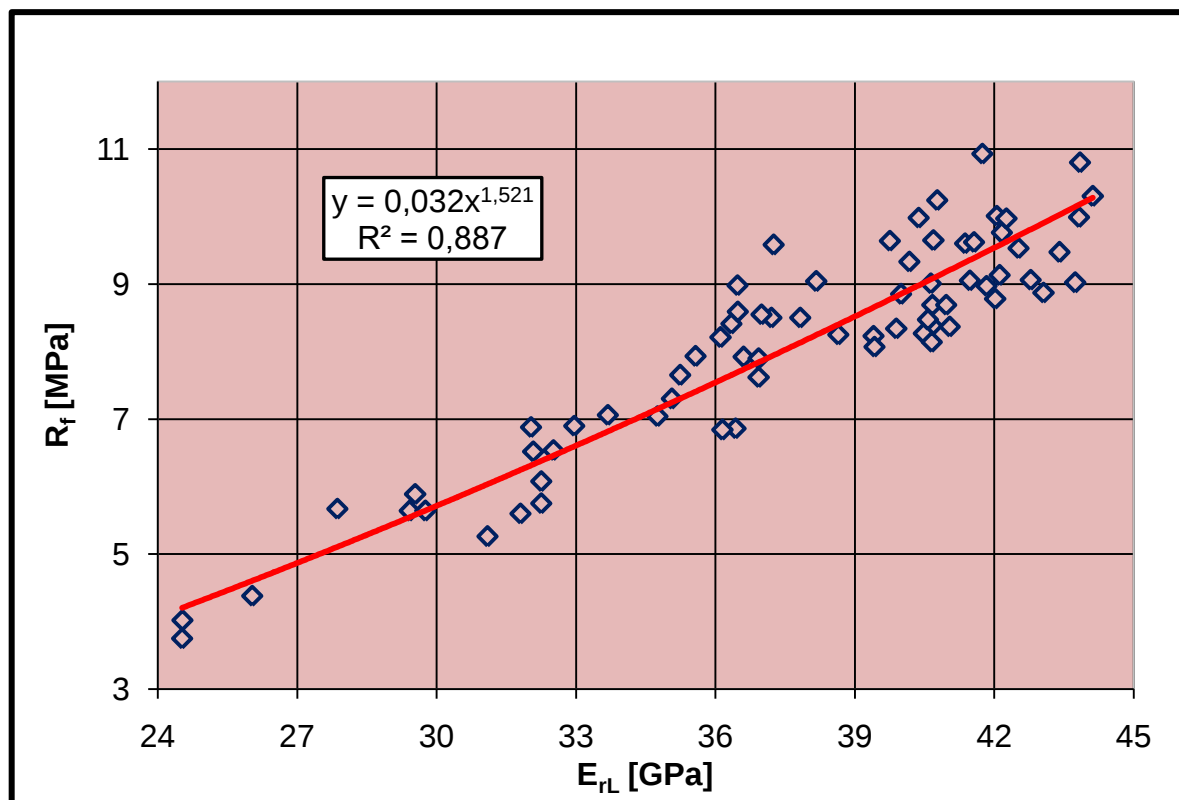
Graf 27: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



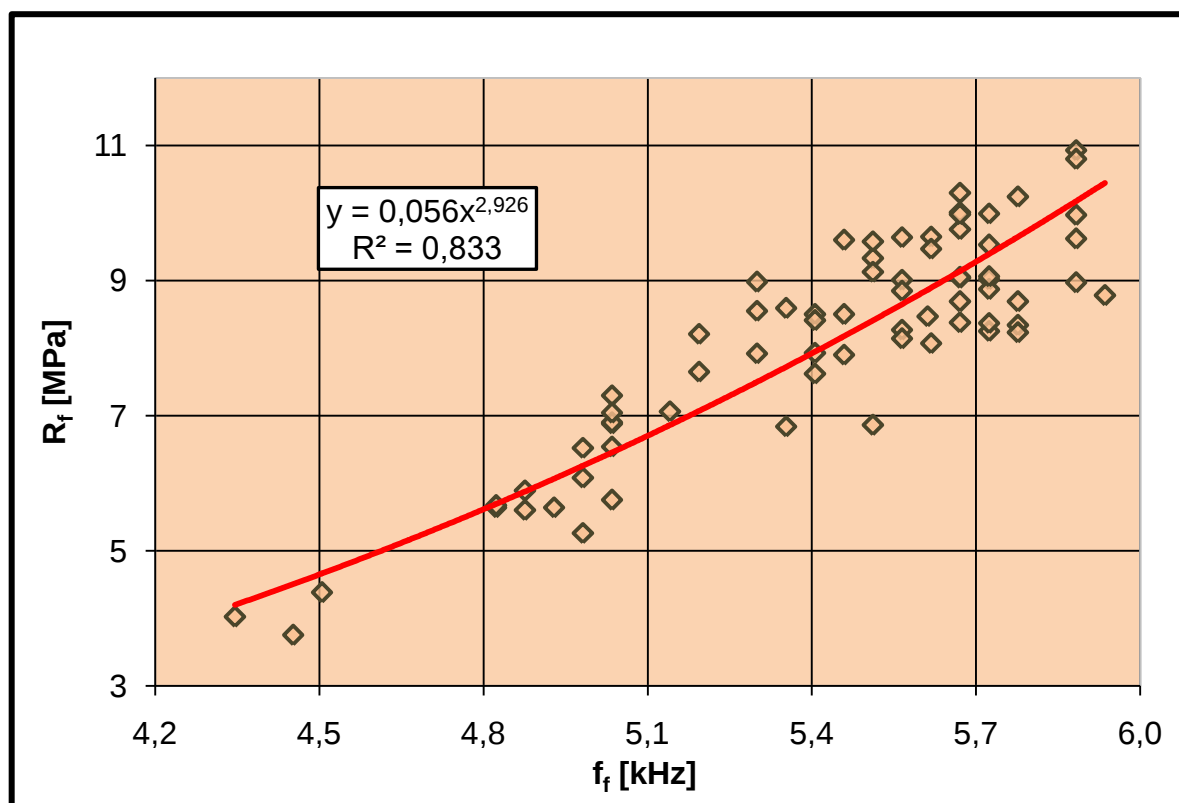
Graf 28: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



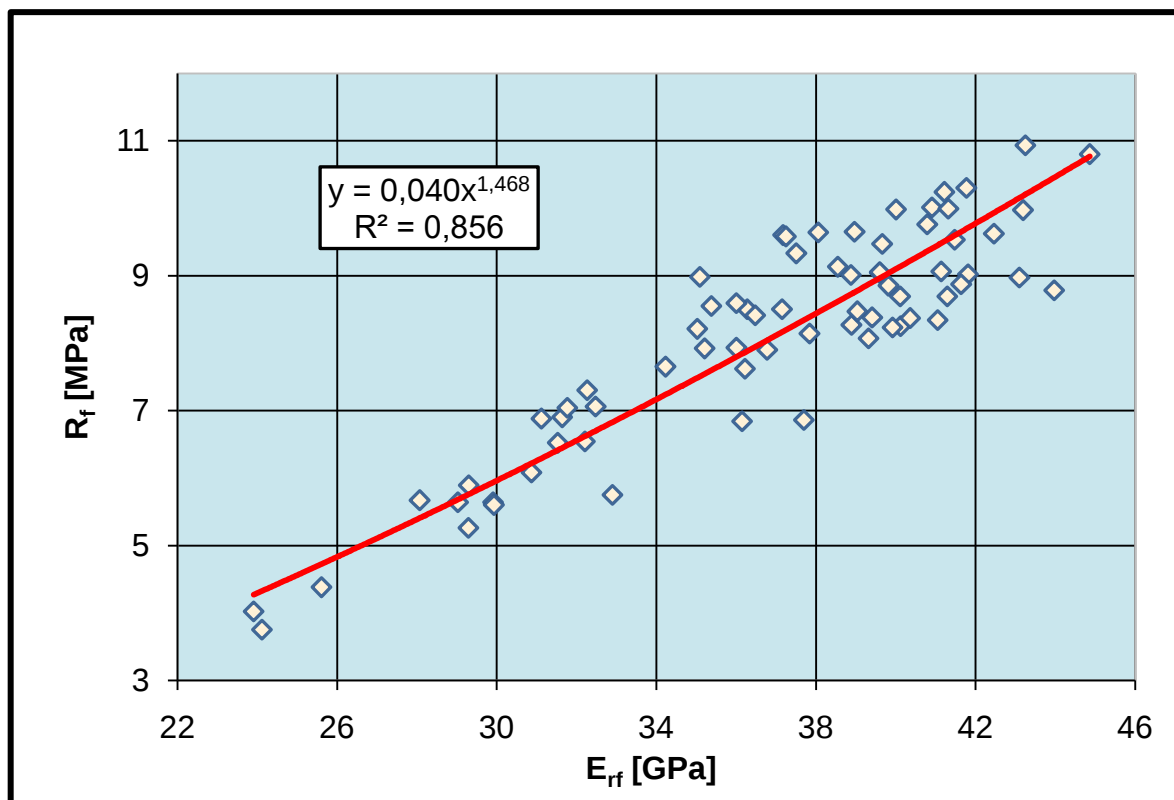
Graf 29: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



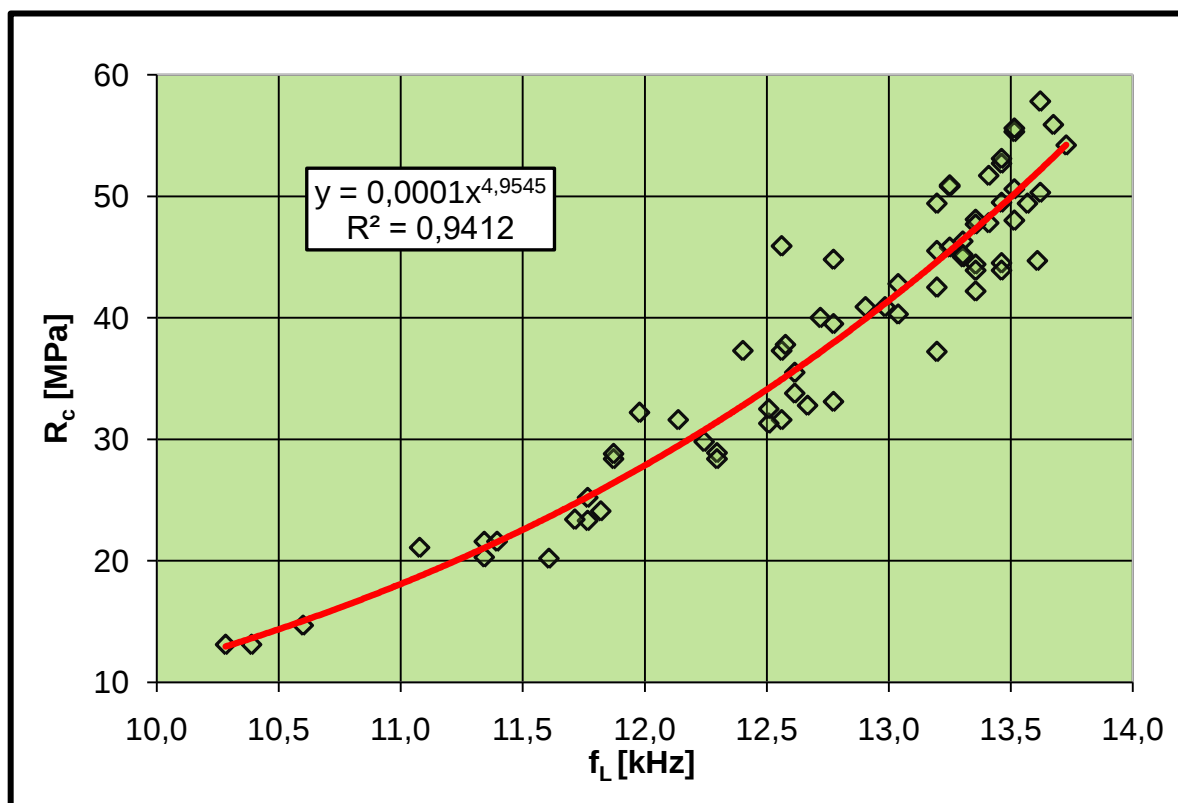
Graf 30: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevnosti v tahu za ohybu
- CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



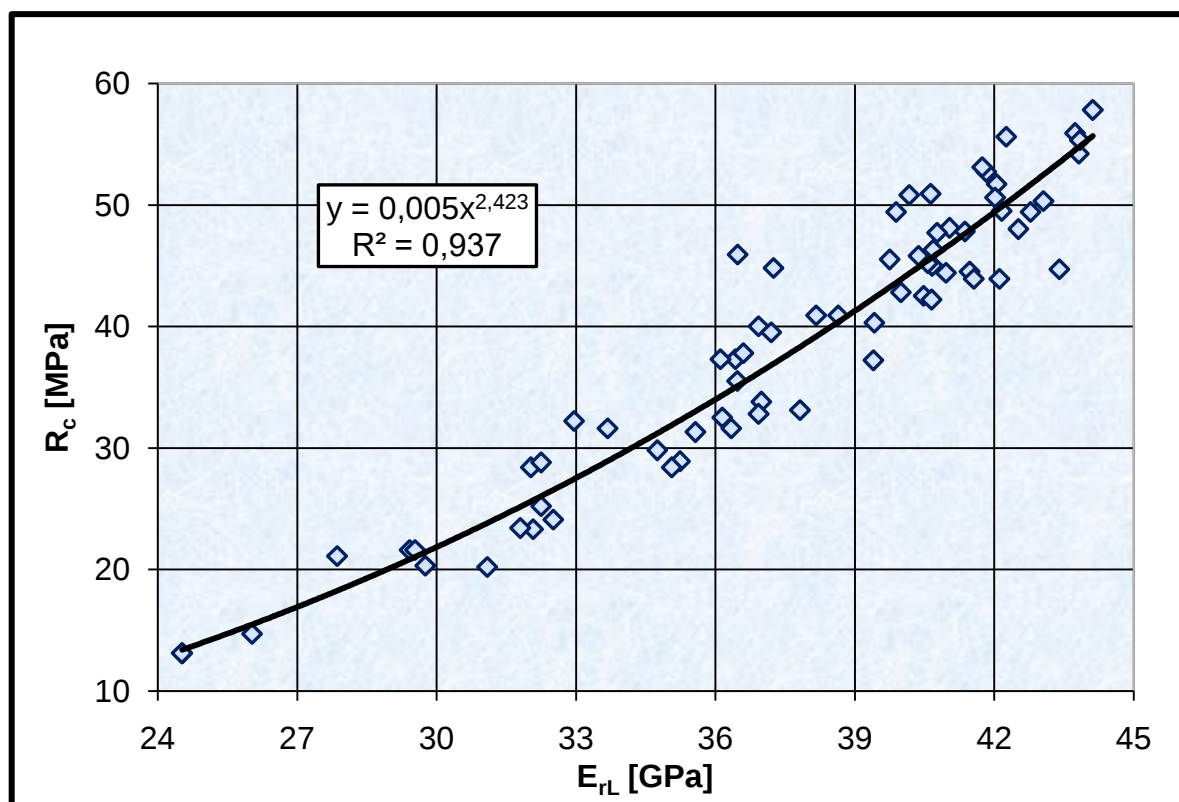
Graf 31: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



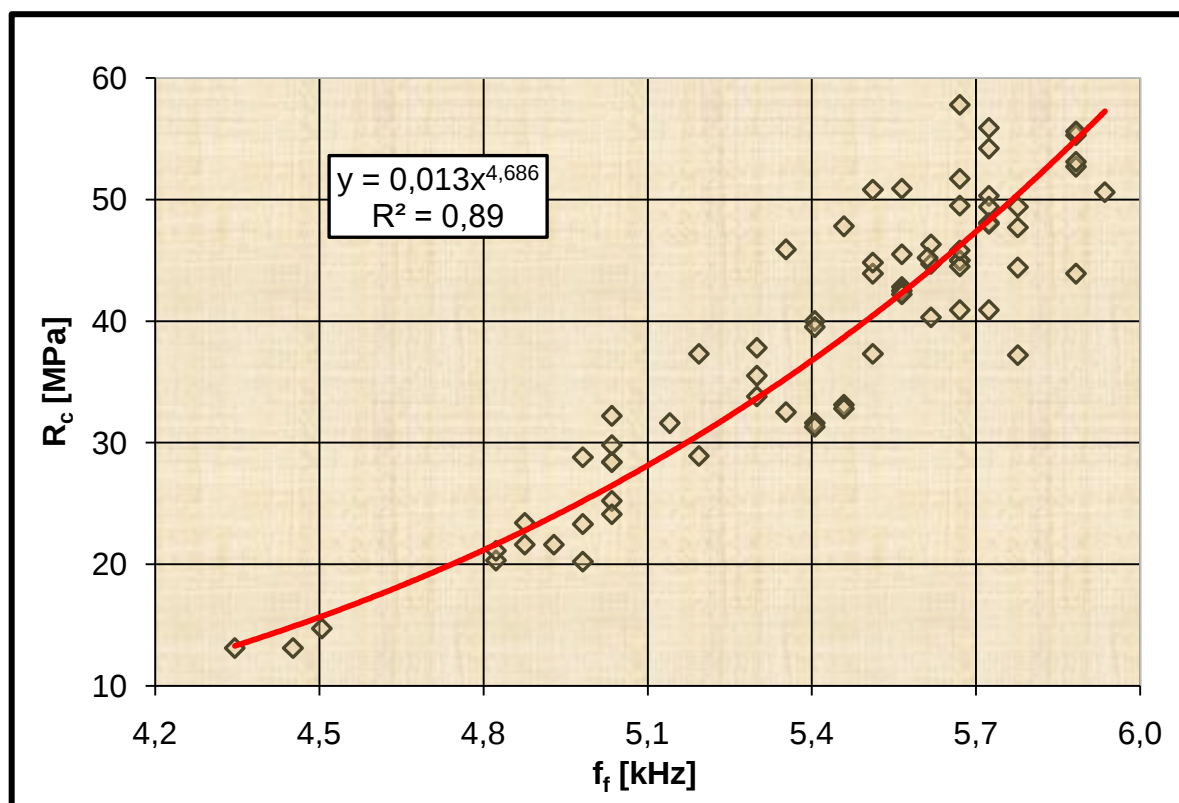
Graf 32: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulu pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



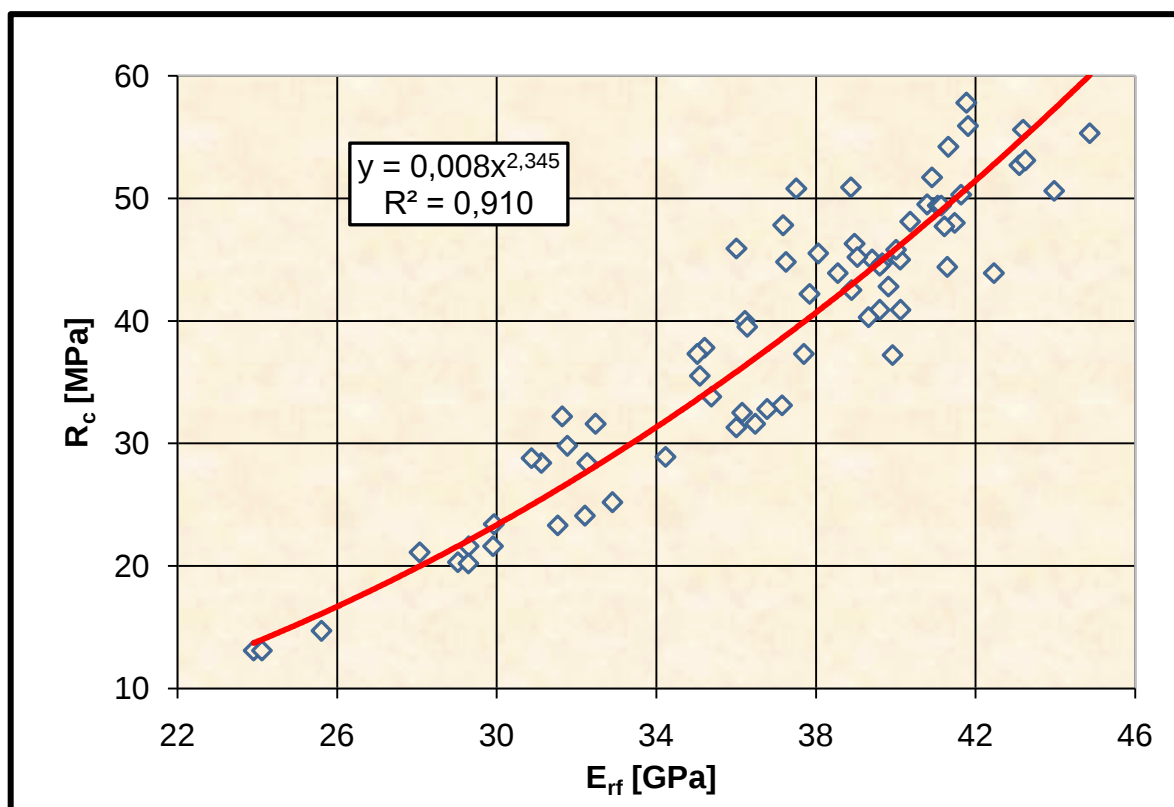
Graf 33: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



Graf 34: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



Graf 35: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N



Graf 36: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N

6 KALIBRAČNÍ VZTAHY

6.1 Kalibrační vztahy pro predikci pevností z cementů z cementárny Hranice

Při tvorbě kalibračních vztahů se využívají vybrané metody matematické statistiky. Matematický tvar závislosti mezi veličinami bývá nejčastěji určován regresní analýzou pomocí metody nejmenších čtverců. Zjištěné křivky jsou většinou mocninného a exponenciálního charakteru. Míra korelace závislostí je hodnocena pomocí koeficientu korelace, jež určuje míru intenzity závislosti mezi danými veličinami [47]. Vhodnost stanoveného kalibračního vztahu lze také posuzovat pomocí reziduální směrodatné odchylky [ČSN 73 1370 - neplatná].

V této kapitole jsou uvedeny kalibrační vztahy cementů z cementárny Hranice, konkrétně portlandského cementu CEM I 52,5 R, portlandského cementu s vápencem CEM II/A-LL 42,5 R a vysokopecního cementu CEM III/A 42,5 N.

CEM I 52,5 R

Kalibrační vztahy pro určení pevností cementu z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a z dynamického modulu pružnosti:

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = 0,426e^{0,688V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,889 \quad S = 0,035 \quad (19)$$

$$R_f = 0,040E_{cu}^{1,428} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,892 \quad S = 0,035 \quad (20)$$

Pevnost v tlaku

$$R_c = 0,219e^{1,214V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,973 \quad S = 0,031 \quad (21)$$

$$R_c = 3,342e^{0,060E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,975 \quad S = 0,033 \quad (22)$$

Kalibrační vztahy pro určení pevností cementu z prvního vlastního kmitočtu podélného a příčného kmitání a z dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu při podélném a příčném kmitání vzorku:

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = 0,012f_L^{2,556} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,860 \quad S = 0,035 \quad (23)$$

$$R_f = 0,097E_{rL}^{1,219} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,869 \quad S = 0,036 \quad (24)$$

$$R_f = 0,324f_f^{1,909} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,701 \quad S = 0,051 \quad (25)$$

$$R_f = 0,227E_{rf}^{0,995} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,749 \quad S = 0,047 \quad (26)$$

Pevnost v tlaku

$$R_c = 0,495e^{0,343f_L} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,970 \quad S = 0,029 \quad (27)$$

$$R_c = 0,020E_{rL}^{2,089} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,978 \quad S = 0,037 \quad (28)$$

$$R_c = 0,089f_f^{3,621} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,874 \quad S = 0,061 \quad (29)$$

$$R_c = 0,052E_{rf}^{1,843} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,912 \quad S = 0,057 \quad (30)$$

CEM III/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N

Kalibrační vztahy pro určení pevností cementů z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a z dynamického modulu pružnosti:

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = 0,11e^{0,999V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,966 \quad S = 0,038 \quad (31)$$

$$R_f = 0,005E_{cu}^{1,987} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,965 \quad S = 0,040 \quad (32)$$

Pevnost v tlaku

$$R_c = 0,068e^{1,465V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,987 \quad S = 0,039 \quad (33)$$

$$R_c = 1,533e^{0,076E_{cu}} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,984 \quad S = 0,051 \quad (34)$$

Kalibrační vztahy pro určení pevností cementu z prvního vlastního kmitočtu podélného a příčného kmitání a z dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu při podélném a příčném kmitání vzorku:

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = 0,002f_L^{3,249} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,956 \quad S = 0,048 \quad (35)$$

$$R_f = 0,024E_{rL}^{1,597} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,954 \quad S = 0,051 \quad (36)$$

$$R_f = 0,038f_f^{3,154} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,951 \quad S = 0,048 \quad (37)$$

$$R_f = 0,027E_{rf}^{1,581} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,959 \quad S = 0,042 \quad (38)$$

Pevnost v tlaku

$$R_c = 0,0002f_L^{4,871} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,974 \quad S = 0,060 \quad (39)$$

$$R_c = 0,006E_{rL}^{2,394} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,972 \quad S = 0,068 \quad (40)$$

$$R_c = 0,012f_f^{4,708} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,965 \quad S = 0,063 \quad (41)$$

$$R_c = 0,007E_{rf}^{2,357} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,972 \quad S = 0,059 \quad (42)$$

CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N

Kalibrační vztahy pro určení pevností cementů z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a z dynamického modulu pružnosti:

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = 0,028V^{3,878} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,953 \quad S = 0,044 \quad (43)$$

$$R_f = 0,007E_{cu}^{1,885} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,952 \quad S = 0,045 \quad (44)$$

Pevnost v tlaku

$$R_c = 0,075e^{1,445V} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,980 \quad S = 0,050 \quad (45)$$

$$R_c = 0,0008E_{cu}^{2,905} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,974 \quad S = 0,046 \quad (46)$$

Kalibrační vztahy pro určení pevností cementu z prvního vlastního kmitočtu podélného a příčného kmitání a z dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu při podélném a příčném kmitání vzorku:

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = 0,003f_L^{3,107} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,943 \quad S = 0,042 \quad (47)$$

$$R_f = 0,032E_{rL}^{1,521} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,942 \quad S = 0,045 \quad (48)$$

$$R_f = 0,056f_f^{2,926} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,913 \quad S = 0,053 \quad (49)$$

$$R_f = 0,040E_{rf}^{1,468} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,925 \quad S = 0,049 \quad (50)$$

Pevnost v tlaku

$$R_c = 0,0001f_L^{4,954} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,970 \quad S = 0,051 \quad (51)$$

$$R_c = 0,005E_{rL}^{2,423} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,968 \quad S = 0,055 \quad (52)$$

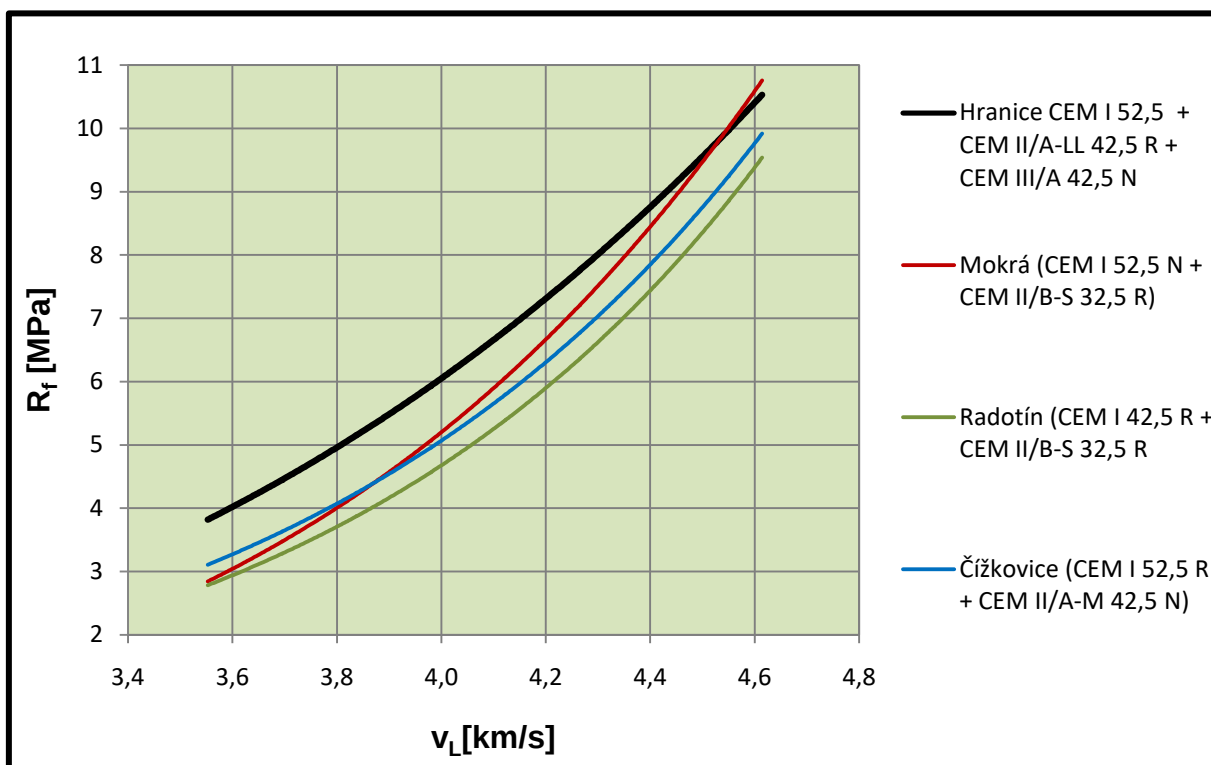
$$R_c = 0,013f_f^{4,686} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,943 \quad S = 0,076 \quad (53)$$

$$R_c = 0,008E_{rL}^{2,345} \quad [\text{MPa}] \quad r = 0,954 \quad S = 0,066 \quad (54)$$

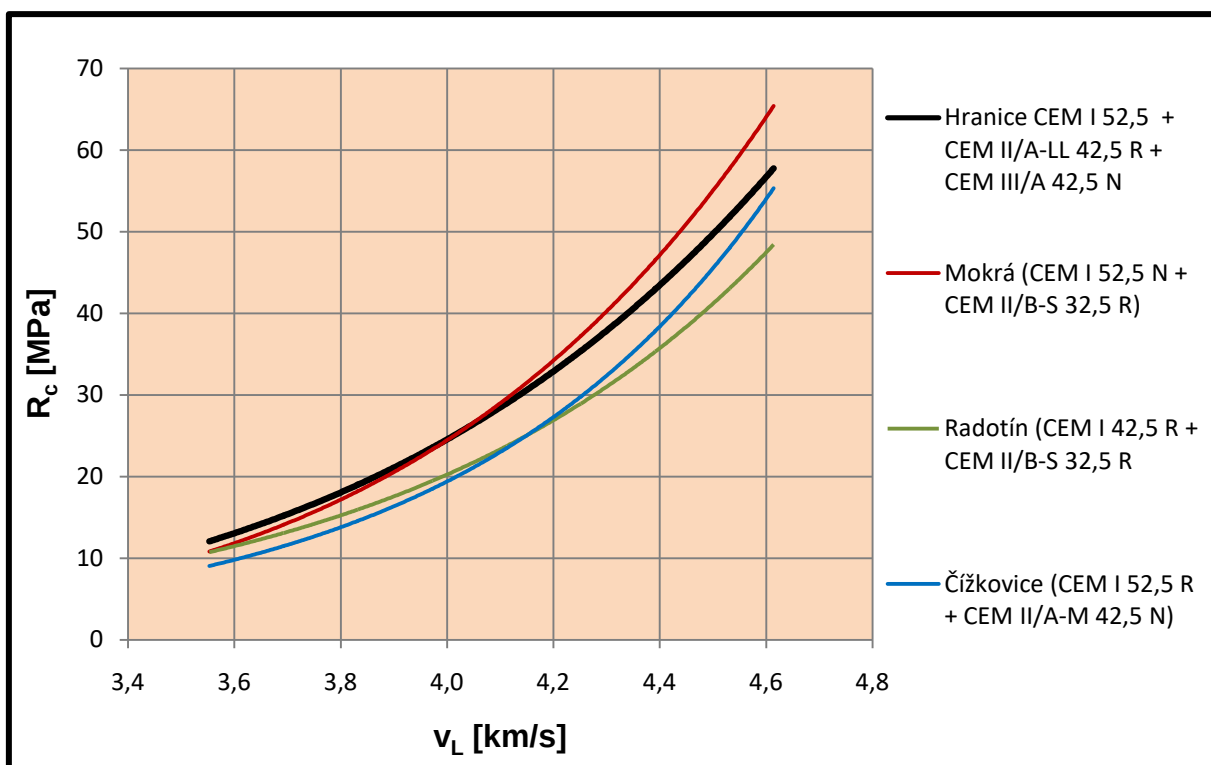
6.2. Porovnání kalibračních vztahů pro cementy z cementárny Hranice se vztahy pro cementy z různých cementáren převzatých z odborných publikací

Byly porovnány souhrnné kalibrační vztahy pro cementy z cementárny Hranice (CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 42,5 R + CEM III/A 42,5 N), cementárny Mokrá (CEM I 52,5 N + CEM II/B-S 32,5 R), cementárny Radotín (CEM I 42,5 a CEM II/B-S 32,5 R) a cementárny Čížkovice (CEM I 52,5 R a CEM II/A-M 42,5 N).

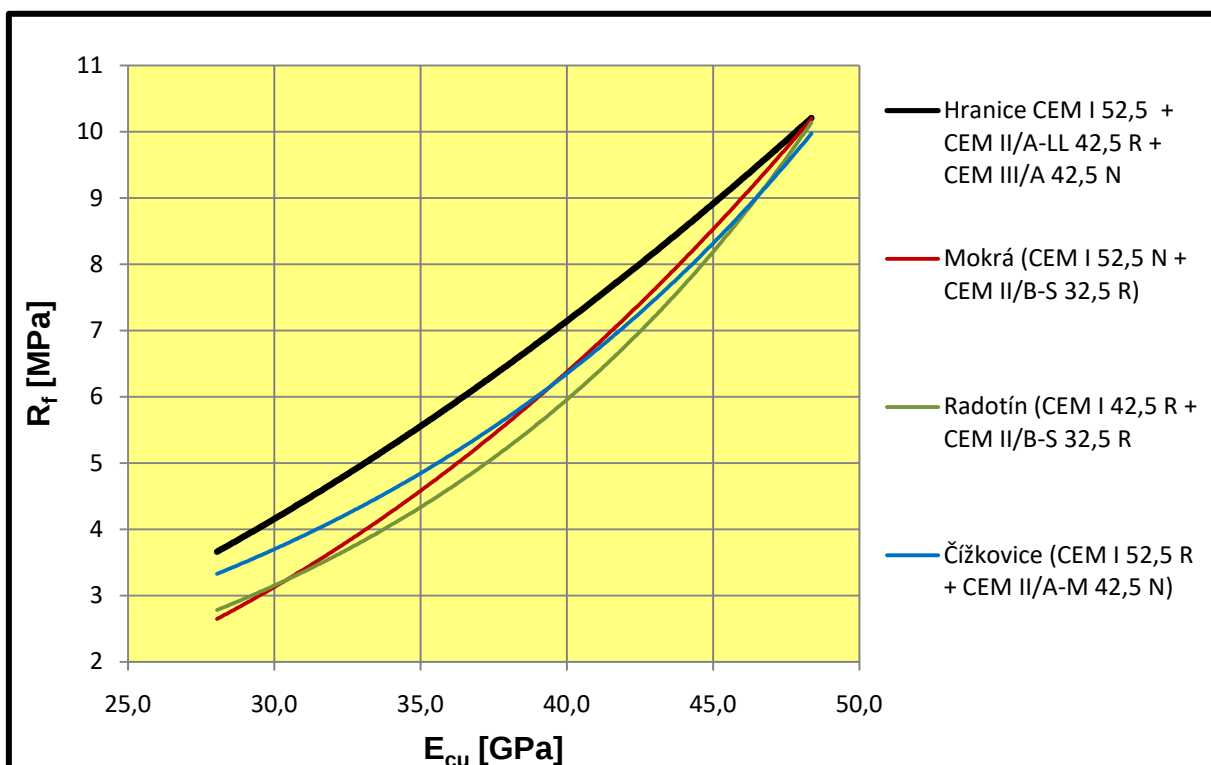
Porovnání kalibračních vztahů vyjadřujících závislost mezi parametrem nedestruktivního měření a pevností cementu je znázorněno v grafech 37 – 40.



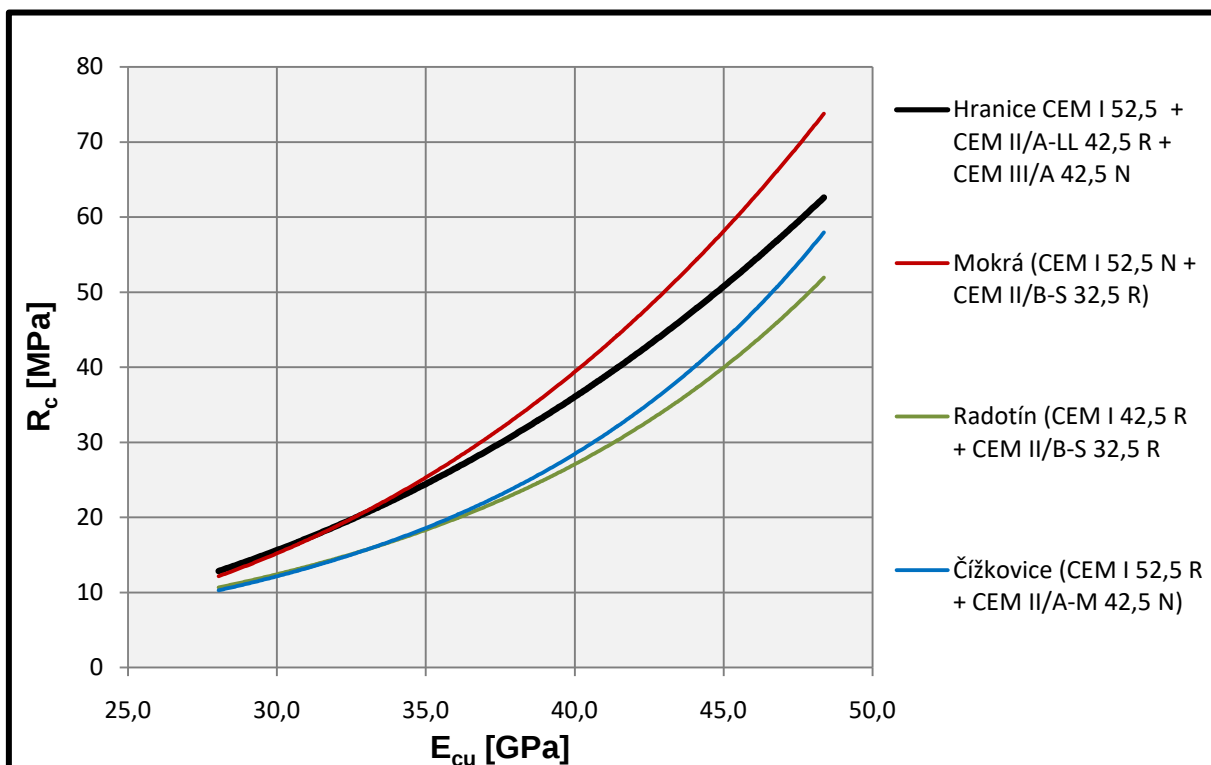
Graf 37: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tahu za ohybu z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice



Graf 38: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice



Graf 39: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tahu za ohybu z dynamického modulu pružnosti pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice



Graf 40: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tlaku z dynamického modulu pružnosti pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice

7 DISKUZE

V rámci diplomové práce byly prováděny nedestruktivní zkoušky na cementech z cementárny Hranice, konkrétně byl zkoušen portlandský cement CEM I 52,5 R, portlandský cement směsný (s vápencem) CEM II/A-LL 42,5 R a vysokopecní cement CEM III/A 42,5 N.

Při měření ultrazvukovou impulsovou metodou byly využívány sondy s vlastní frekvencí 82 kHz (i když není splněna podmínka na rozměrnost prostředí ve smyslu ustanovení ČSN 73 1371) z důvodu kompatibility s výsledky měření prováděných na cementech z jiných výrobních závodů.

Zhodnocení a analýza dosažených výsledků:

- pro predikci pevností cementů byly zpracovány kalibrační vztahy z měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou. Souhrnně jsou uvedeny tyto kalibrační vztahy v kapitole 6.1.,
- praktická využitelnost kalibračních vztahů byla hodnocena jednak s využitím koeficientu korelace, jednak pomocí reziduální směrodatné odchylky. Kalibrační vztahy jsou prakticky využitelné, jestliže koeficient korelace $r \geq 0,85$, resp. reziduální směrodatná odchylka $S \leq 0,12$. Využitelnost zpracovaných kalibračních vztahů pro použité cementy byla hodnocena dle obou kritérií, protože zejména v případě pevností v tahu za ohybu cementu CEM I 52,5 R tyto hodnoty byly odlišné,
- pro ultrazvukovou impulsovou metodu byly zpracovány kalibrační vztahy mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu, resp. dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku, resp. pevností v tahu za ohybu.

Cement CEM I 52,5 R: kalibrační vztahy (19–22) mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu i dynamickým modulem pružnosti v tlaku a tahu a pevností v tahu za ohybu mají koeficienty korelace nižší hodnotu než vztah pro pevnost v tlaku (0,89 vs. 0,97), ale hodnoty reziduální směrodatné odchylky jsou velice blízké (0,035 vs. 0,033) a jsou podstatně nižší než je požadované kritérium pro praktické využití kalibračních vztahů, které je 0,12.

CEM II/A-LL 42,5 R a CEM III/A 42,5 N: kalibrační vztahy (31–34) pro stanovení pevností cementu z parametrů měření ultrazvukovou impulsovou metodou se vyznačují vysokou těsností korelace a hodnoty korelačního koeficientu i reziduální směrodatné odchylky a jsou ve většině případů ve vzájemné korelaci. Korelační koeficient pro pevnost v tahu za ohybu je 0,96 a pro pevnost v tlaku je $r = 0,98$. Reziduální směrodatná odchylka se pohybuje v rozmezí 0,38 až 0,51.

Souhrnné kalibrační vztahy pro *CEM I 52,5 R*, *CEM II/A-LL 42,5 R* a *CEM III/A 42,5 N*: tyto kalibrační vztahy (43–46) se vyznačují vysokou těsností korelace. Korelační koeficient pro pevnost v tahu za ohybu je 0,95 a pro pevnost v tlaku je $r = 0,97–0,98$. Reziduální směrodatná odchylka se pohybuje v rozmezí 0,43 až 0,46.

- Pro rezonanční metodu byly zpracovány kalibrační vztahy mezi parametrem z měření rezonanční metodou (první vlastní kmitočet podélného kmitání, první vlastní kmitočet příčného kmitání, dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání, dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání) a pevností v tlaku resp. pevností v tahu za ohybu.

Cement CEM I 52,5 R: kalibrační vztahy (23–30) mezi parametrem z měření rezonanční metodou (první vlastní kmitočet podélného kmitání, první vlastní kmitočet příčného kmitání, dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání, dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání) mají koeficienty korelace nižší než vztahy pro pevnost v tlaku (0,70–0,87 vs. 0,87–0,98), ale hodnoty reziduální směrodatné odchylky jsou podstatě příznivější (0,036–0,051 vs. 0,029–0,060) a jsou podstatně nižší než je požadované kritérium pro praktické využití kalibračních vztahů, které je 0,12. Vyšší těsnost vykazují kalibrační vztahy mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu, resp. pevností v tlaku ve srovnání s kalibračními vztahy mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu, resp. pevností v tlaku.

CEM II/A-LL 42,5 R a *CEM III/A 42,5 N*: kalibrační vztahy (35–42) pro stanovení pevností cementu z parametrů měření rezonanční metodou se vyznačují vysokou těsností korelace a hodnoty korelačního koeficientu i reziduální směrodatné odchylky jsou ve vzájemné korelaci. Korelační koeficienty se pohybují v rozmezí (0,95–0,96) pro pevnost v tahu za ohybu a pro pevnost v tlaku je $r = 0,98$. Reziduální směrodatná odchylka se pohybuje v rozmezí 0,38 až 0,51.

Souhrnné kalibrační vztahy pro *CEM I 52,5 R*, *CEM II/A-LL 42,5 R* a *CEM III/A 42,5 N*: tyto kalibrační vztahy (47–54) se vyznačují vysokou těsností korelace. Korelační koeficient pro pevnost v tahu za ohybu je 0,91 až 0,94 a pro pevnost v tlaku je $r = 0,94$ až 0,97. Reziduální směrodatná odchylka se pohybuje v rozmezí 0,42 až 0,76. I v tomto případě je vyšší těsnost korelace pro kalibrační

vztahy mezi prvním vlastní kmitočtem podélného kmitání a dynamického modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a příslušnou pevností.

- Celkově lze zpracované kalibrační vztahy hodnotit jako prakticky využitelné, protože reziduální směrodatná odchylka S byla ve všech případech menší než její požadovaná hodnota $S \leq 0,12$ a pohybovala se v rozmezí 0,030 až 0,076. Zpravidla vyšší hodnota reziduální směrodatné odchylky byla pro kalibrační vztahy z měření rezonanční metodou. Jak je z uvedených výsledků zřejmé, hodnocení praktické využitelnosti kalibračních vztahů pouze na základě koeficientu korelace není vždy vhodné.

Kalibrační vztahy pro predikci pevnosti v tlaku se vyznačují vyšší těsností korelace než vztahy pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Toto lze vysvětlit vyšší variabilitou pevností v tahu za ohybu.

V případě použití rezonanční metody se doporučuje preferovat vztahy pro predikci pevností založené na měření prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání.

- Z analýzy výsledků a poznatků měření ultrazvukovou impulsovou metodou a rezonanční metodou vyplývá:
 - Obě dvě metody jsou využitelné pro nedestruktivní zjišťování pevností cementů.
 - Z praktického hlediska je vhodnější využití ultrazvukové impulsové metody, protože tato je méně náročná teoretickou přípravou obsluhy, na vlastní měření i vyhodnocení výsledků měření.
 - Při dodržení definovaných podmínek měření, stejné frekvence sond, stejného vlhkostního stavu vzorků (nasycené vodou), je bez problémů pro predikci pevností cementu využitelná ultrazvuková metoda.
 - Při měření ultrazvukovou impulsovou metodou jsou pro predikci pevnosti využitelné oba parametry z měření, tj. rychlost šíření ultrazvukového impulsu i dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu. Kalibrační vztahy se vyznačují v podstatě stejnou těsností korelace.
- Porovnání kalibračních vztahů pro cementy z cementárny Hranice se vztahy pro cementy z cementárny Mokrá, Radotín a Čížkovice:
 - K dispozici byly kalibrační vztahy zpracované z výsledků měření ultrazvukovou impulsovou metodou. Porovnávány byly souhrnné kalibrační vztahy, které byly zpracovány pro portlandský cement CEM I

pevnostní třídy 52,5 a 42,5 a směsné portlandské cementy pevnostní třídy 32,5 a 42,5; porovnání je znázorněno v grafech 37–40.

- Z porovnání je zřejmé, že kalibrační vztahy pro cementy z jednotlivých cementáren mají různý průběh, tzn. stejné hodnotě parametru z nedestruktivního zkoušení (rychlost šíření ultrazvukového impulsu, dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu) ve většině případů odpovídá jiná hodnota pevnosti.
- Z uvedeného vyplývá, že kalibrační vztahy zpracované pro konkrétní výrobu cementu nelze využívat pro cementy jiného výrobce. V případě, že by měly být využívány u jiného výrobce, je nezbytné provést upřesnění postupem dle ČSN 73 1370.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá využitím dynamických nedestruktivních metod, konkrétně ultrazvukové impulsové metody a rezonanční metody pro zjišťování pevnostních charakteristik cementů.

V teoretické části je jednak popsána výroba a požadavky na vlastnosti cementů pro obecné použití, jednak jsou podrobně popsány ultrazvuková impulsová a rezonanční metoda, včetně faktorů ovlivňující výsledky měření a vyhodnocení výsledků měření.

V experimentální části byla prováděna měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou na zkušebních tělesech vyrobených ze třech druhů cementů, konkrétně z portlandského cementu CEM I 52,5 R, portlandském cementu směsného (s vápencem) CEM II/A-LL 42,5 R a z vysokopecního cementu CEM III/A 42,5 N z cementárny Hranice a destruktivně byly zjišťovány pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu v různém stádiu hydratace malt vyrobených ze zkoušených cementů (podle normového postupu).

Cílem práce bylo zhodnotit využitelnost uvedených dynamických nedestruktivních metod pro predikci pevností cementů. Z důvodu jednoduššího provádění a vyhodnocení měření byla za základní metodu zvolena ultrazvuková impulsová metoda; měření rezonanční metodou bylo prováděno na omezeném počtu vzorků, ale pro všechna stáří vzorků.

Z měření ultrazvukovou impulsovou metodou byla stanovena rychlost šíření ultrazvukového impulsu a dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu. Výstupem měření rezonanční metodou byly první vlastní kmitočet podélného kmitání, první vlastní kmitočet příčného kmitání, dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání.

Z parametrů měření nedestruktivními dynamickými metodami (rychlost šíření ultrazvukového impulsu, první vlastní kmitočet kmitání, dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu) a destruktivních zkoušek pevností v tlaku a tahu za ohybu byly zpracovány kalibrační vztahy pro predikci pevností cementů.

Zpracované kalibrační vztahy se vyznačují vysokou těsností korelace a jsou prakticky využitelné; vyšší korelace je dosaženo u pevnosti v tlaku.

Z analýzy a zhodnocení poznatků z měření ultrazvukovou a rezonanční metodou vyplynulo, že obě metody jsou využitelné pro nedestruktivní zjišťování pevností cementů, avšak z praktického hlediska je vhodnější využití ultrazvukové impulsové metody, protože je méně náročná na teoretickou přípravu obsluhy, na vlastní provedení měření i na vyhodnocení výsledků měření.

Z porovnání kalibračních vztahů pro predikci pevností, které byly zpracovány pro cementy z cementárny Hranice a cementy z jiných výroben (Mokrá, Radotín a Čížkovice) vyplynulo, že tyto vztahy mají různý průběh, tzn. stejné hodnotě parametru z nedestruktivního zkoušení (rychlost šíření ultrazvukového impulsu, dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu) ve většině případů odpovídá jiná hodnota pevnosti. Proto kalibrační vztahy zpracované pro konkrétní výrobu cementu nelze využívat pro cementy jiného výrobce. Pokud by měly být vztahy přesto použity pro predikci pevností cementů z jiné cementárny, je třeba provést upřesnění pevností postupem dle ČSN 73 1370.

Nezbytnou podmínkou využití dynamických nedestruktivních metod pro zkoušení cementů je dodržení konstantních podmínek při měření, toto se týká především vlhkostního stavu vzorků a stejné vlastní frekvence sond při měření ultrazvukovou impulsovou metodou (je nutné použít sondy stejné frekvence jako při zpracování kalibračních vztahů).

Předložená diplomová práce splnila v celém rozsahu stanovené cíle a požadavky zadání. Uvedené kalibrační vztahy a poznatky o měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou jsou prakticky využitelné při zjišťování pevností cementů uvedenými metodami.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FRIDRICHOVÁ, M. *Přednášky Maltoviny I.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2011.
- [2] FRIDRICHOVÁ, M. *Přednášky Maltoviny II.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2013.
- [3] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton.* 1. české vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [4] BARTA, Rudolf. *Chemie a technologie cementu.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961, 1107 s.
- [5] TĚHNÍK, Vladimír, Radovan, NEČAS a Dana KUBÁTOVÁ. *Vápenec jako základní kámen maltovin.* In: NEČAS, Radovan, Martin BOHÁČ, Theodor STANĚK a Vladimír TĚHNÍK. *Vápenický seminář 2007.* Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s., 2007, s. 61-86. ISBN 978-80-254-0992-3.
- [6] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton.* 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [7] ADÁMEK, Jiří, Bohumil NOVOTNÝ a Jan KOUKAL. *Stavební látky.* 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1997, 205 s. ISBN 80-214-0631-3
- [8] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů.* 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981, 516 s.
- [9] HUDOBA, Igor. *Vysokohodnotný betón: materiály, vlastnosti, výroba, využitie.* 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008, 157 s., [6] s. příl. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-2836-2.
- [10] KURDOWSKI, Wiesław. *Cement and concrete chemistry.* Dordrecht: Springer, 2014, xii, 700 s. ISBN 978-94-007-7944-0.
- [11] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty.* 3. vydání. Praha, 2013, 950 s. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné také z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodasl/sh/SH3v1.pdf>
- [12] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I.* 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 198 s. ISBN 80-214-0509-0.
- [13] ČSN EN 197-1 ed. 2. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.* Český normalizační institut. 2012. 36 s.
- [14] ČSN EN 196-1 *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.* Český normalizační institut. 2016. 32 s.
- [15] VAVŘÍN, František. *Maltoviny.* Praha 1. vyd.: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980, 250 s
- [16] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu.* Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-807-6032-2.
- [17] Výroba cementu. *EBETON* [online]. Praha: CZ SVB [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/vyroba-cementu>
- [18] JIRÁSEK, J., Vavro, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití.* Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3.
- [19] HOBST, Leonard. *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky.* Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 124 s.

- [20] SESHU, Rama a Murthy DAKSHINA. Non Destructive Testing of Bridge Pier. *The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*. Warangal: Elsevier Ltd, 2013, 564-572. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [21] BROŽOVSKÝ, Jiří. *Nedestruktivní zkušební metody - nástroj pro hodnocení pevnosti stavebních materiálů a výrobků: Nondestructive testing methods - testing tool of building material/product strengt : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTUM, 2005, 31 s. ISBN 80-214-3056-7. 1213-418X.
- [22] PAVLÍK, A a DOLEŽEL, J. *Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1977, 273 s.
- [23] MARTINČEK, Gustáv. *Nedestruktivne dynamické metódy skúšenia stavebných materiálov a konštrukcií*. Bratislava: Slovenská akadémia vied, 1962, 242 s.
- [24] GALAN, Andrej. *Kombinované ultrazvukové metódy skúšania betónu: vysokoškolská príručka pre stavebné fakulty vysokých škôl*. Bratislava: Veda, 1984, 149 s.
- [25] GALAN, Andrej. *Combined ultrasound methods of concrete testing*. Amsterdam: Elsevier, 1990. Developments in Civil Engineering. ISBN 80-224-0084-X.
- [26] MALHOTRA, V.M. a N.J. CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC, 2003. ISBN 08-493-1485-2.
- [27] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 12 s.
- [28] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 16 s.
- [29] DVORSKÝ, Petr. *Využití ultrazvukové impulsové metody-nástroj pro stanovení pevností cementů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební.
- [30] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 16 s.
- [31] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: STUDIJNÍ OPORY*. CERM, 2004.
- [32] CIKRLE, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. 2011. *Beton*. Praha: Česká betonářská společnost, (3/2011).
- [33] ANTON, Ondřej a kolektiv. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M04*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006, 63 s.
- [34] Allen R.T.L., Edwards S.C.: *Repair of concrete structures*, Blackie Academic & Professional, Glasgow and London, 1987, 238 s.
- [35] BJEGOVIĆ, Dubravka, Marijan SKAZLIĆ a M. JAMBREŠIĆ. Crack repair assessment by ultrasonic method. In: *Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*. September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia, pp. 81-89 s.
- [36] PROCHÁZKA, David. *Vytvoření předpokladů pro hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení*. Brno, 2013. Disertace. Vysoké učení technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [37] BROŽOVSKÝ, J. *K problematice určování pevnosti betonu v konstrukci z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu podle ČSN EN 13791*. Beton TKS. Praha: BETON TKS, s. r. o., 2012, č. 1, str. 80 – 83. ISSN 1213-3116.

- [38] TRTNIK, G. – KAVČIČ, F. – TURK, G. *Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks*. Ultrasonics [online]. Elsevier Ltd., 2008. Volume 49, pp. 53 – 60. [vid. 4. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X08000851>.
- [39] BROZOVSKY, Jiri, and Jiri ZACH. "Ultrasonic pulse method-the cement strength evaluation tool." *Construction Waste Recycling and Civil Engineering Sustainable Development--Proceedings of the 2~(nd) International Conference on Waste Engineering and Management*. 2010.
- [40] PRŮŠA, M. *Predikce pevností cementů z rychlosti šíření ultrazvukových impulsů*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [41] DVORSKÝ P. *Využití ultrazvukové impulsové metody - nástroj pro stanovení pevností cementů*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [42] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu. Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 12 str.
- [43] ČSN 73 1380. *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 32 s.
- [44] ČSN 73 1322: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*, 1969. 8 s.
- [45] ČSN EN 14146. *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence)*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 16 s.
- [46] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem: celost. vysokošk. příručka pro strojní fakulty vys. škol*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-030-0097-1.
- [47] JANKO, J. *Statistické tabulky*, NČSAV, Praha, 1958
- [48] Anton, O. a kol. *Základy zkušebnictví. Návod do cvičení*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2002

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1:	Schéma výroby cementu [17].....	22
Obrázek 2:	Grafy modifikačních přeměn belitu v závislosti na teplotě [4]	27
Obrázek 3:	Graf nárůstu pevnosti jednotlivých slínkových minerálů [4]	29
Obrázek 4:	Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar impulsu [33]	37
Obrázek 5:	Způsoby prozvučování konstrukce [24].....	38
Obrázek 6:	Způsob podepření hranolů a umístění budiče (B) a snímače (S) přiměření prvního vlastního kmitočtu podélného f_L , kroutivého f_t a příčného kmitání f_t [33].....	43
Obrázek 7:	Znázornění přibližného vztahu mezi pevností v tlaku obvyčejného betonu a rychlostí šíření ultrazvukového impulsu [24].....	46
Obrázek 8:	Měření ultrazvukovou impulsovou metodou	52
Obrázek 9:	Měření rezonanční kladívkovou metodou [39]	53

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1:	Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R.....	76
Graf 2:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R	77
Graf 3:	Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R	77
Graf 4:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R.....	78
Graf 5:	Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	78
Graf 6:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N.....	79
Graf 7:	Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N.....	79
Graf 8:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N.....	80
Graf 9:	Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	80
Graf 10:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N.....	81
Graf 11:	Výsledky zkoušek a závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N.....	81
Graf 12:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	82
Graf 13:	Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R.....	90
Graf 14:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevnosti v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R.....	91
Graf 15:	Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem <i>příčného kmitání</i> a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R.....	91
Graf 16:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu <i>příčného kmitání</i> a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R.....	92
Graf 17:	Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R.....	92
Graf 18:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R93	
Graf 19:	Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem <i>příčného kmitání</i> a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R.....	93
Graf 20:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu <i>příčného kmitání</i> a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R 94	
Graf 21:	Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	94
Graf 22:	Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevnosti v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	95

Graf 23: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu – CEM II/A LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	95
Graf 24: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	96
Graf 25: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N.....	96
Graf 26: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	97
Graf 27: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	97
Graf 28: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	98
Graf 29: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	98
Graf 30: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevnosti v tahu za ohybu – CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	99
Graf 31: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	99
Graf 32: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tahu za ohybu – CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	100
Graf 33: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	100
Graf 34: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A LL 52,5 R+ CEM III/A 42,5 N	101
Graf 35: Výsledky zkoušek a závislost mezi prvním vlastním kmitočtem příčného kmitání a pevností v tlaku - CEM I 52,5 R + CEM II/A-LL 52,5 R + CEM III/A 42,5 N	101
Graf 36: Výsledky zkoušek a závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku nebo v tahu zjištěného z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání a pevností v tlaku – CEM I 52,5 R + CEM II/A LL 52,5 R+CEM III/A 42,5 N	102
Graf 37: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tahu za ohybu z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice.	106
Graf 38: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice	106
Graf 39: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tahu za ohybu z dynamického modulu pružnosti pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice	107
Graf 40: Porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tlaku z dynamického modulu pružnosti pro cementy z cementárny Hranice, Mokrá, Radotín a Čížkovice.....	107

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1:	27 výrobků skupiny cementů pro obecné použití (Dle normy ČSN EN 197 -1 ed. 2)	13
Tabulka 2:	Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti uvedené jako charakteristické hodnoty[14]	18
Tabulka 3:	Přehled hlavních složek v cementářském slínku [11]	26
Tabulka 4:	Rychlost šíření UZ v různých materiálech [22]	38
Tabulka 5:	Poměr vlastních kmitočtů podélného, příčného a kroutivého kmitání hranolů [23]	45
Tabulka 6:	Přehled použitých cementů	51
Tabulka 7:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 1	57
Tabulka 8:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 2	59
Tabulka 9:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 3	60
Tabulka 10:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM I 52,5 R – šarže 4	62
Tabulka 11:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1	64
Tabulka 12:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2	66
Tabulka 13:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3	68
Tabulka 14:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 1	70
Tabulka 15:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 2	72
Tabulka 16:	Výsledky zkoušek ultrazvukovou impulsovou metodou CEM III/A 42,5 N – šarže 3	74
Tabulka 17:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 1	83
Tabulka 18:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 2	83
Tabulka 19:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 3	84
Tabulka 20:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM I 52,5 R – šarže 4	85
Tabulka 21:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 1	86
Tabulka 22:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 2	86
Tabulka 23:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM II/A-LL 42,5 R – šarže 3	87
Tabulka 24:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 1	88
Tabulka 25:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 2	89
Tabulka 26:	Výsledky zkoušek rezonanční metodou CEM III/ 42,5 N – šarže 3	89

SEZNAM ZNAČEK A ZKRATEK

α	součinitel stanovený pro upřesnění obecného, popř. směrného kalibračního vztahu v úzkém rozsahu sledované vlastnosti ze zkoušek (v ČSN 73 1370, ČSN 73 1373)
A	průřezová plocha
c	korekční součinitel rezonanční metody
$C\ x/y$	pevnostní třída obyčejného a těžkého betonu v tlaku; první číslice udává $f_{ck,cyl}$, druhá pak $f_{ck,cube}$
ČSN	České technické normy
E	modul pružnosti
E_{cu}	statický modul pružnosti v tlaku
E_{ce}	očekávaná hodnota statického modulu pružnosti v tlaku stanovená na základě existence příslušného přepočetniho vztahu
E_{cr}	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu určený rezonanční metodou
E_{crf}	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu určený rezonanční metodou z podélného kmitání
E_{crL}	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu určený rezonanční metodou z příčného kmitání
E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu zjištěný ultrazvukem (ČSN 73 1371:2011)
EN	Evropské normy
φ	relativní vlhkost vzduchu
f	frekvence, kmitočet
f_c	pevnost betonu v tlaku
f_{cf}	pevnost betonu v tahu ohybem
f_f	první vlastní kmitočet příčného kmitání zkoušeného vzorku
f_L	první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného vzorku
f_t	první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkoušeného vzorku
G_{dyn}	dynamický modul pružnosti ve smyku
G_r	dynamický modul pružnosti ve smyku určený rezonanční metodou
κ	součinitel závislý na tvaru průřezu v rezonanční metodě
k	součinitel rozměrnosti prostředí; součinitel pro G_r
<i>koef.</i>	koeficient
λ	štíhlostní poměr; vlnová délka
Λ	útlum vlnění
L	délka tělesa či měřicí základny
λ_L	délka vlny impulsu podélného ultrazvukového vlnění
ν	Poissonův součinitel, Poissonovo číslo, Poissonův koeficient
ν_r	Poissonův součinitel určený z rezonanční metody
<i>např.</i>	například
NDT	non destructive testing (non-destructive testing) – nedestruktivní zkoušení
<i>obr.</i>	obrázek
<i>ozn.</i>	označení

<i>p.</i>	strana (z angl. „page“, případně ve špan. a port. „página“)
<i>pp.</i>	počet stran (z angl. „pages“, případně ve špan. a port. „páginas“)
<i>příl.</i>	příloha
<i>příp.</i>	případně
ρ	objemová hmotnost
<i>r</i>	korelační koeficient, koeficient korelace
<i>r.</i>	rok
<i>resp.</i>	respektive
<i>str.</i>	strana, stran (počet)
<i>t</i>	stáří betonu ve dnech; čas; teplota; tloušťka
<i>T</i>	čas
<i>tj.</i>	to je, to jest
t_{kor}	mrtvý nebo též ztrátový čas
t_{ME}	je doba průchodu etalonem
<i>tab.</i>	tabulka
<i>UZ</i>	ultrazvuk
<i>V</i>	výsledek zkoušky rychlosti šíření ultrazvukového impulsu
<i>V</i>	rychlost šíření ultrazvukového impulsu dle ČSN EN 12504-4
v_L	rychlost šíření čela impulsu podélných ultrazvukových vln (ČSN 73 2011); impulsová rychlost (ČSN 73 1371)
<i>vyd.</i>	vydání