VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VYUŽITÍ ULTRAZVUKU PRO ZKOUŠENÍ BETONU V MOSTNÍCH KONSTRUKCÍCH
USE OF ULTRASOUND TESTING OF CONCRETE IN BRIDGE STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Sabina Hüblová
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Sabina Hüblová
Název	Využití ultrazvuku pro zkoušení betonu v mostních konstrukcích
Vedoucí práce	Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ fakulta stavební DĚKAN - 19 -

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Bažant, Z., Klusáček, L. Statika při rekonstrukcích objektů. Skriptum VUT v Brně FAST, CERM Brno, 2002
Cikrle, P. a kol. NDT zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu CŽV. VUT v Brně, 2010.
Holický, M. a kol. Příručka pro hodnocení existujících konstrukcí. 1. vydání Praha: ČVUT, 2007.
SEIDLEROVÁ, Irena a Jiří DOHNÁLEK. Dějiny betonového stavitelství. 1. vyd. Praha: ČKAIT, 199
Normy ČSN ISO 13822, ČSN 730038, ČSN 732011, ČSN 731371 a další.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část:
Zásady pro průzkum mostních konstrukcí.
Stručný přehled diagnostických metod pro zkoušení fyzikálně mechanických vlastností betonu v konstrukci.
Podrobný rozbor metody ultrazvukové - princip, způsoby měření, kalibrační vztahy, využitelnost pro stanovení různých vlastností - rovnoměrnosti, modulu pružnosti, pevnosti v tlaku.
Praktická část:
Laboratorní zkoušky na vývrtech ze 6 různých druhů betonu - rychlost šíření UZ vlnění, pevno v tlaku, modul pružnosti betonu (dynamický).
Tabelární a grafické zpracování výsledků měření, vytvoření kalibračního vztahu pro pevnost v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového vlnění.
Aplikace ultrazvukové metody na reálné železobetonové konstrukci, vyhodnocení a porovnán výsledků zkoušek.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňová a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VU (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).

Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

V rámci bakalářské práce jsou rozebrány druhy diagnostických metod, podrobněji metoda ultrazvuková – její principy a možnosti využití na stávajících betonových konstrukcích. Dále jsou zpracovány výsledky měření na zkušebních vzorcích pomocí ultrazvuku, které jsou porovnány s výsledky zkoušek pevnosti v tlaku. V práci jsou také zmíněny kalibrační vztahy popsané v českých technických normách.

Klíčová slova

Rychlost šíření ultrazvuku, Doba průchodu, Rovnoměrnost betonu, Pevnost v tlaku, kalibrační vztahy, nedestruktivní zkoušení, ultrazvuková impulsová metoda.

Abstract

There are analyze kinds of diagnostic methods in terms of bachelor’s thesis. It is written about principles of ultrasonic pulse method and its options of usage on the current concrete structure. There are processed results of measurement on the testing samples which will be compared with results of stress strength. There is also spoken about calibration relationships in the bachelor’s thesis. Calibration relationships are described in Czech technical norms.

Keywords

Ultrasonic pulse velocity, transit time, uniformity of concrete, stress strength, calibration relationships, non-destructive testing, ultrasonic pulse method.

Bibliografická citace VŠKP

Sabina Hüblová. *Využití ultrazvuku pro zkoušení betonu v mostních konstrukcích*. Brno, 2017. 64 s., 23 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

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

V Brně dne 25. 5. 2017

Sabina Hüblová

autor práce

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Petru Cikrlovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích a pomoc při vypracování bakalářské práce.

Také bych chtěla poděkovat Ing. Janu Kryštofovi z firmy Mostní Vývoj s.r.o. za materiály a podklady, které mi poskytl k vypracování této bakalářské práce.

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP

Prohlášení

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2017

Sabina Hüblová

autor práce

OBSAH

1. **ÚVOD** 11

2. **CÍLE PRÁCE** 13

3. **TEORETICKÁ ČÁST** 14

3.1. ZÁSADY PRO PRŮZKUM MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ 14

3.2. DIAGNOSTICKÉ METODY 16

3.2.1. Nedestruktivní metody 16

3.2.2. Destruktivní metody 17

3.3. ULTRAZVUKOVÁ METODA 18

3.3.1. Obecná charakteristika 18

3.3.2. Ultrazvuková metoda v platných normách 19

3.3.3. Podstata měření impulsové metody 19

3.3.4. Výhody a nevýhody ultrazvukové metody a její využití ve stavebnictví 22

3.3.5. Vztah mezi rychlostí šíření UZ impulzů a materiálovými charakteristikami betonu 23

3.3.6. Kalibračnívztahy 28

4. **EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST** 31

4.1. LABORATORNÍ ČÁST 31

4.1.1 Přehled jádrových vývrtů sad *1,2,5,6,7* a *8* 31

4.1.2. Základní charakteristiky jednotlivých sad 36

4.1.3. Výsledky UZ měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti 37

4.1.4. Zhodnocení laboratorních zkoušek 40

4.1.5. Porovnání s předchozími výzkumy a vztahem uvedeným v časopisu betonu tks 3/2013 44

4.1.6. Závěr 44

4.2. APLIKACE ULTRAZVUKOVÉ METODY NA VYBRANÉ MOSTNÍ KONSTRUKCI 45

4.2.1. Základní informace o mostu 45

4.2.2. Aplikace ultrazvukové metody a zhodnocení výsledků 46

5. **ZÁVĚR** 55

6. **SEZNAMY** 55

6.1. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 56

6.2. SEZNAM TABULEK 61

6.3. SEZNAM GRAFŮ 62

6.4. SEZNAM OBRÁZKŮ 63

6.5. SEZNAM PŘÍLOH 64

7. **PŘÍLOHY** 65

1. ÚVOD

Beton je jedním ze základních stavebních materiálů, který je znám a lidmi využíván již po tisíciletí. Je složen ze směsi drobného a hrubého kameniva, cementu, vody a případných příměsí a přísad, které zlepšují jeho vlastnosti. Aby bylo dosaženo požadované kvality betonu, musí být přesně dodržena jeho receptura. Technologové neustále pracují na jejím vylepšování a zkoumají a testují nové složky a způsoby jejich využití [1], [2].

V průběhu let se požadavky na kvalitu a trvanlivost stavebních materiálů docela změnily. Pro ověření vlastností betonu se využívají destruktivní a nedestruktivní zkoušky. Tyto metody se používají k hodnocení existujících stavebních konstrukcí a k prověření jejich aktuálního stavu. Problematice hodnocení existujících stavebních konstrukcí se věnuje ČSN 73 0038 [3].

Při hodnocení starších mostních betonových konstrukcí je nezbytné si ověřit jejich spolehlivost na základě prohlídek a zkoušek. Jako klíčové pro hodnocení konstrukce je stanovit účel hodnocení v závislosti na její budoucí funkční způsobilosti. Musí být zaručena odpovídající bezpečnost pro uživatele, speciální funkčnost pro speciální konstrukce, a měly by být splněny požadavky objednatelů na speciální funkční vlastnosti, které se týkají ochrany vlastnictví. V rámci dodržení kvality je nutné, aby diagnostiku existujících konstrukcí prováděla fyzická nebo právnická osoba, která má pro tuto činnost a pro provádění těchto prací akreditaci [4].

Na základě normy ČSN ISO 13822 [5] nejsou požadavky pro hodnocení existujících konstrukcí tak přísné v porovnání s hodnocením konstrukcí nových, ale musí být splněny určité podmínky. Například některé konstrukce, které byly vyrobeny před 1. světovou válkou, nesplňují z velké části požadavky na beton pro nosné konstrukce [6]. Jedná se o první aplikaci železobetonu v mostním stavitelství. Tyto mosty jsou specifické tím, že k nim neexistuje žádná nebo jen strohá výkresová dokumentace a normy, na základě kterých by se tyto konstrukce dalo vypočíst. O mnoha mostech nejsou známy materiálové vlastnosti, stejně jako stav a postup jejich degradace [7]. Životnost mostních konstrukcí byla plánovaná cca na 100 let, avšak bývá

často překonávána v závislosti na typu konstrukce i použitých materiálů. Dnes je stav mostů v ČR poměrně nepříznivý, což znamená znehodnocení silniční sítě a často i ohrožení bezpečnosti silničního provozu. Mnoho z těchto mostů je ve stavu podmíněně uspokojivém nebo špatném, a proto velké množství z nich vyžaduje určitá opatření [8].

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s ultrazvukovou metodou, která se používá pro hodnocení stávajících mostních betonových konstrukcí, a také stanovení její využitelnosti ve stavební praxi.

Teoretická část bakalářské práce je věnována zásadám pro hodnocení mostních konstrukcí a jsou zde popsány používané diagnostické metody, s důrazem na zkoušky nedestruktivní. Podrobněji je rozebrána metoda ultrazvuková, pomocí které je možné stanovit pevnost betonu v tlaku a dynamický modul pružnosti. Popsány jsou i starší kalibrační vztahy – závislosti mezi nedestruktivními zkouškami a pevností v tlaku.

Experimentální část je zaměřena na aplikaci ultrazvukové metody ve stavební praxi. Nejprve je aplikována UZ metoda v laboratoři na předem určených zkušebních vzorcích odebraných ze starých mostních betonových konstrukcí s různým kamenivem, tmelem a s různou pevností. Pomocí prozvučování lze zjistit poruchy, vady a různorodost kameniva v betonu. Dílčím cílem praktické části je vytvoření závislosti mezi pevností v tlaku a šířením ultrazvukových impulsů, ze kterých je proveden odhad kvality a pevnosti jednotlivých druhů betonů.

V závěru je popsáno, jak je možné využít a aplikovat ultrazvuk na vybraných konstrukcích v in situ, konkrétně na mostu Jihlavská přes Bítešskou v Brně.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3. 1. ZÁSADY PRO PRŮZKUM MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ

Aby mohl být ověřen stávající stav mostní konstrukce, je nutné zrealizovat diagnostický průzkum, pomocí kterého je možno rozhodnout o případné opravě této konstrukce. Vyhodnocení stávajícího stavu vyžaduje tyto informace:

- záznam o typu konstrukce, prostředí a provozu
- záznam z dokumentace mostu
- informace z prohlídek
- údaje z prováděných měření a zkoušek
- možnosti oprav, které mohou následovat [2]

Do hodnocení stavu konstrukce jsou zahrnuty činnosti jako např.:

a) Postup hodnocení konstrukce, kdy je nutno obstarat podklady a informace o daných stavbách a jejich historii. Je nezbytné provést prohlídku a rozpis požadovaných prací, které slouží jako podklad pro budoucí smlouvu.
b) Vyhodnocení provedených prohlídek, a pokud je to nutné, mohou být provedeny další mimořádné prohlídky.
c) Diagnostický průzkum
d) Zkoušky a měření
e) Statické výpočty a určení zatížitelnosti mostu
f) Návrh opatření
g) Technická zpráva a stanovení příčin degradace konstrukce [2], [9]

Technická zpráva by měla obsahovat údaje jako:

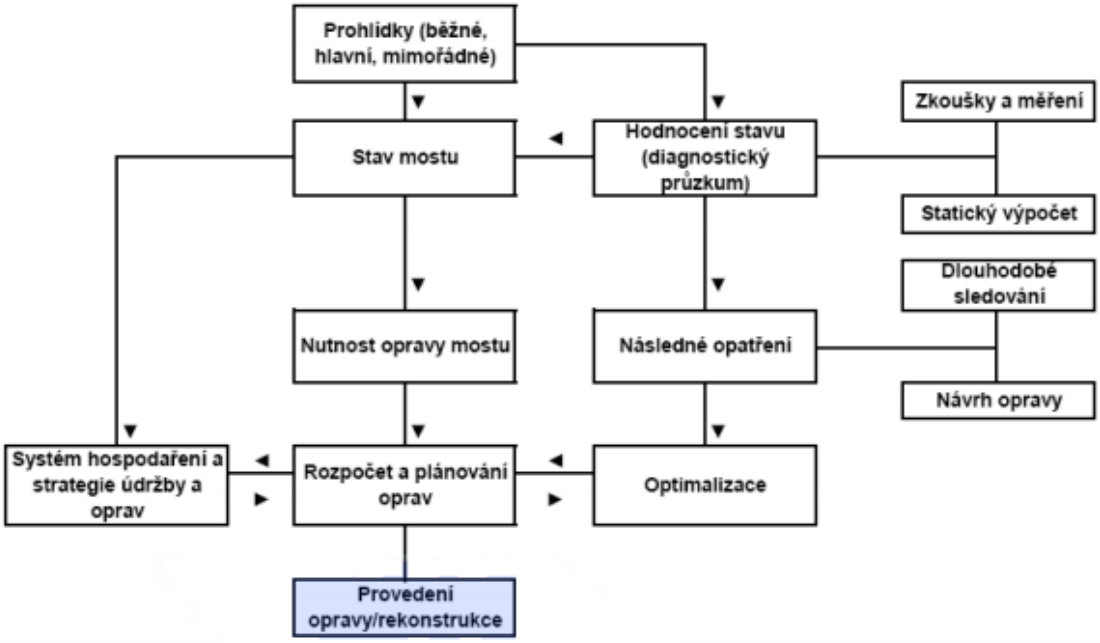
a) Typ a množství poruch, včetně určení jejich příčin a případné možnosti jejich dalšího vzniku.
b) ohodnocení aktuálního stavu
c) navržení potřebných opatření
d) výsledky statického výpočtu a zatížitelnosti konstrukce
e) fotodokumentaci [2], [9]

V rámci diagnostického průzkumu mostů se provádí kromě vizuálních prohlídek např. tyto metody:

- chemické metody
- mechanické a fyzikální metody k určování fyzikálních vlastností betonů a ocelí
- fyzikálně-chemické metody k určování stupně korozního narušení
- metody geodetické
- geotechnický průzkum a s ním spjaté metody
- dynamometrické metody – zatěžovací zkoušky konstrukce [2]

Tyto metody obsahují zkoušky jako např.:

- zjištění polohy betonářské výztuže
- kontrolu způsobu vyztužení se zaměřením na krytí výztuže
- tvrdoměrné stanovení pevnosti betonu Schmidtovým kladívkem
- ultrazvukové zkoušky ultrazvukovým impulsovým přístrojem
- zkoušky povrchové pevnosti betonu v tahu (zkoušky přídržnosti) a další [7]



Obr. 1 - Schéma postupu prací při hodnocení stavu konstrukce [9].

Podle významnosti konstrukce a jejího stavu je stanoven rozsah plánovaných činností. Diagnostika konstrukce se provádí za těchto podmínek:

1) Požaduje-li to správce objektu (v případě znehodnocení a poruch konstrukce; v případě zvětšení projektovaného zatížení nebo rekonstrukce).
2) V rámci pravidelného působení správce objektu (v nutnosti o zajištění bezpečného provozu) [9].

3.2. DIAGNOSTICKÉ METODY

Při diagnostice stavebních konstrukcí je nutno posoudit a zvážit, v jaké míře je konstrukce poškozena a jakým způsobem a k jakým účelům je využívána. Na základě těchto informací je nutné zvolit vhodné diagnostické metody, které povedou k optimálnímu hodnocení konstrukce.

Zkušební metody se dělí zejména podle stupně poškození dané konstrukce:

- Nedestruktivní
- Semidestruktivní
- Destruktivní

Na tyto metody jsou při diagnostikování existujících konstrukcí kladeny určité požadavky jako přesnost, rychlost, přijatelná cena a také by měly co nejméně poškodit danou konstrukci [2], [10], [11].

3.2.1. NEDESTRUKTIVNÍ METODY

Mezi nedestruktivní diagnostické metody patří ty, které nepoškozují povrch zkoušené konstrukce. Lze díky nim stanovit například přítomnost trhlin, tloušťku materiálu nebo odhalit odchylky ve struktuře, jakosti povrchu, a také další fyzikální nesouvislosti. Nesmí být narušena použitelnost a schopnost konstrukce plnit předpokládanou funkci. Pomocí těchto zkoušek lze získat velký počet informací o jakosti materiálu. Pokud bychom chtěli sledovat vlastnosti materiálů zabudovaných v konstrukci nebo při laboratorních zkouškách, jsou nedestruktivní metody uzákoněny v platných českých technických normách. Pro tyto zkoušky lze vytvořit kalibrační vztahy pomocí matematické statistiky [2], [12], [13].

Normalizované zkušební metody pro nedestruktivní zkoušení:

- Tvrdoměrné metody zkoušení podle ČSN 73 1373 [14], ČSN EN12504-2 [11]
- Vrypové
- Odrazové
- Vtiskové
- Ultrazvuková impulsová metoda, zkoušení betonu podle ČSN 73 1371 [15], ČSN EN 12504-4 [16]
- Rezonanční metoda, zkoušení betonu podle ČSN 73 1372 [17]
- Radiometrická metoda podle ČSN 73 1375 [18]
- Radiografická metoda podle ČSN 73 1376 [19]
- Magnetické indikátory výztuže
- Zkoušky přídržnosti
- Stanovení síly na vytržení

Mezi další metody mohou být zařazeny např.: metoda fázových rychlostí, vibrační metoda, metoda mechanické impedance. Ty lze použít pouze v případě, kdy jsou zpracovány těsné korelační vztahy mezi sledovanou vlastností a ukazatelem nedestruktivní zkoušky [20].

3.2.2. DESTRUKTIVNÍ METODY

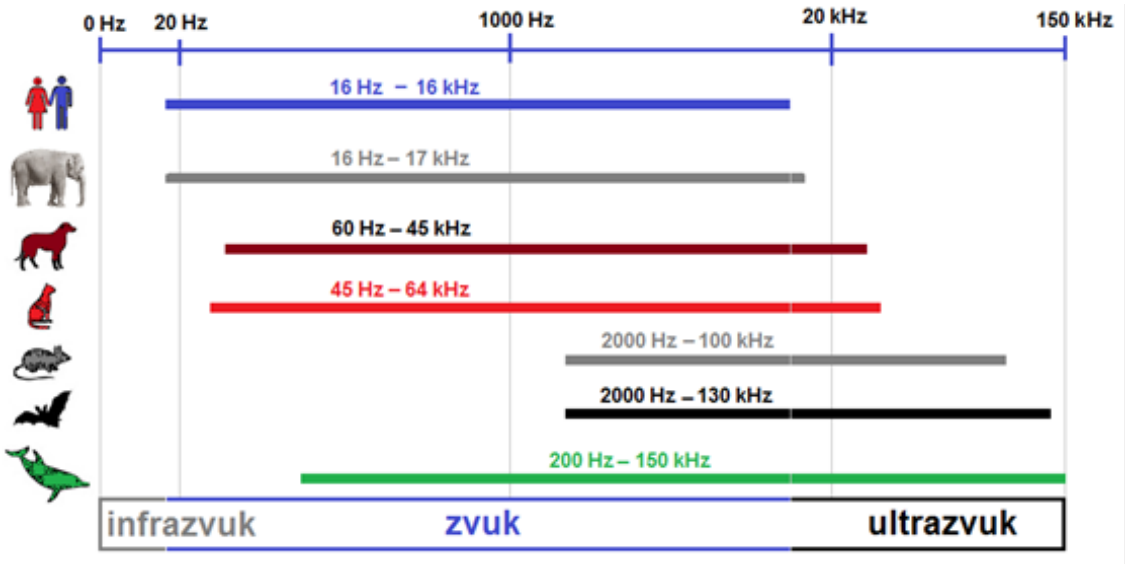
Destruktivní zkušební metody jsou takové, které viditelně poškozují zkoumanou konstrukci. Při těchto metodách dochází na vzorcích k jejich porušení nebo úplnému zničení. Je nutné zvážit, ze kterého místa konstrukce je vzorek odebrán. Měření může být prováděno v laboratořích i v in situ – např. jádrové vývrty, kde jsou zjišťovány přímé vlastnosti materiálu. Při odběru vzorků by nemělo dojít k poškození konstrukce a její stability. Destruktivní metody jsou použity v případě, že pomocí nedestruktivních zkoušek nebyly stanoveny přesné výsledky vyšetřovaných charakteristik. Výhodou této metody je, že může být nahlédnuto do struktury materiálu, ze kterého byla konstrukce postavena. Při vyhodnocování výsledků se zkoušené vlastnosti upravují pomocí korelačních vztahů, které je nutno stanovit způsobem uvedeným u nedestruktivních metod [2], [21].

3.3. ULTRAZVUKOVÁ METODA

3.3.1. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA

Jednou z alternativ nedestruktivního zkoušení betonu je právě metoda ultrazvuková. V praxi se používá několik druhů těchto metod. Nejpoužívanější je metoda impulzová, která umožňuje stanovit rovnoměrnost betonu v konstrukci, modul pružnosti, porušení vnitřní struktury i pevnost v tlaku. Dá se díky ní také stanovit přítomnost trhlin a větších dutin v betonu, vše čistě nedestruktivním způsobem. Měření se může provádět jednak v laboratoři na předem odebraných vzorcích, ale také na samotné konstrukci [15], [22], [23].

Z hlediska frekvencí rozlišujeme infrazvuk, zvuk, ultrazvuk a hyperzvuk. Infrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí menší než 16 Hz. Mezi 16 Hz až 16 kHz se pohybuje hranice zvuku. Ultrazvuk je označován jako mechanické vlnění v rozmezí 20 až 100 MHz a vlnění nad tuto hranici je považováno za hyperzvuk [24].



Obr. 2 - Zvuk z pohledu slyšitelnosti [24]

Pro stavební účely je využíváno ultrazvukové vlnění s frekvencí v rozmezí od 20 kHz do 150 kHz (výjimečně až do 500 kHz). Metoda je využívána převážně tam, kde je nutné zjistit jakost stavebního materiálu nebo jeho fyzikálně mechanické charakteristiky [25].

3.3.2. ULTRAZVUKOVÁ METODA V PLATNÝCH NORMÁCH

Uvedenou metodu je možné nalézt v normách ČSN 73 1380 „Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – porušení vnitřní struktury“ [26] nebo ČSN EN 12371 „Zkušební metody přírodního kamene – stanovení mrazuvzdornosti“ [27]. Avšak využívanějšími a známějšími jsou normy pro nedestruktivní zkoušení betonu:

- ČSN 73 1371 „Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu“ [15].
- ČSN EN 12504-4 „Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu“ [16].

V normě ČSN EN 12504-4 „Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu“ [16] jsou uvedeny zkušební postupy, zejména i postup pro zpracování výsledků měření - norma podotýká, které faktory je při měření nutno zohlednit. Dále jsou v normě stanoveny požadavky na zkušební zařízení, které lze použít [23].

3.3.3. PODSTATA MĚŘENÍ IMPULSOVÉ METODY

Podstatou UZ metody je vysílání opakovaných ultrazvukových impulsů do materiálu budičem a následné sledování impulsů prošlých vyšetřovaným materiálem. Použita může být jedna nebo dvě ultrazvukové sondy. Je sledována doba průchodu impulsů ultrazvukového vlnění. Je-li známa dráha a doba průchodu ultrazvukových impulsů, je možné dopočítat rychlost šíření těchto impulzů dle ČSN 73 1371 [15]:

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

Kde: v_L je rychlost impulzu [m/s nebo km/s],

L je délka měřící základny [mm],

t je čas včetně t_{kor}, za který impuls projde měřící základnou [μs],

Tedy: $t = t_L \pm t_{kor}$

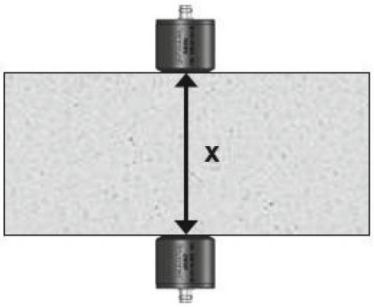
Tato korekce se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulsů ultrazvukových vln: $t_{kor} = t_e - E$

Kde t_e je doba průchodu ultrazvuku etalonem v µs a E je časová charakteristika etalonu v µs [15], [16], [23], [28].

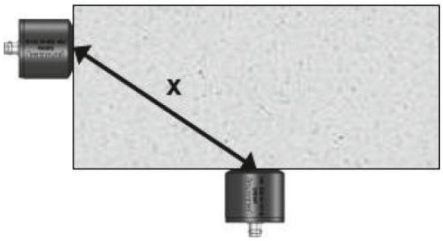
Střední hodnotu ultrazvukových impulzů lze určit ze tří vypočtených rychlostí [23].

Měření může být provedeno třemi způsoby podle polohy umístěných sond:

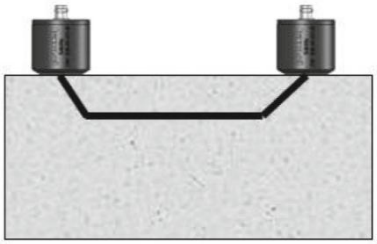
- Přímé prozvučování



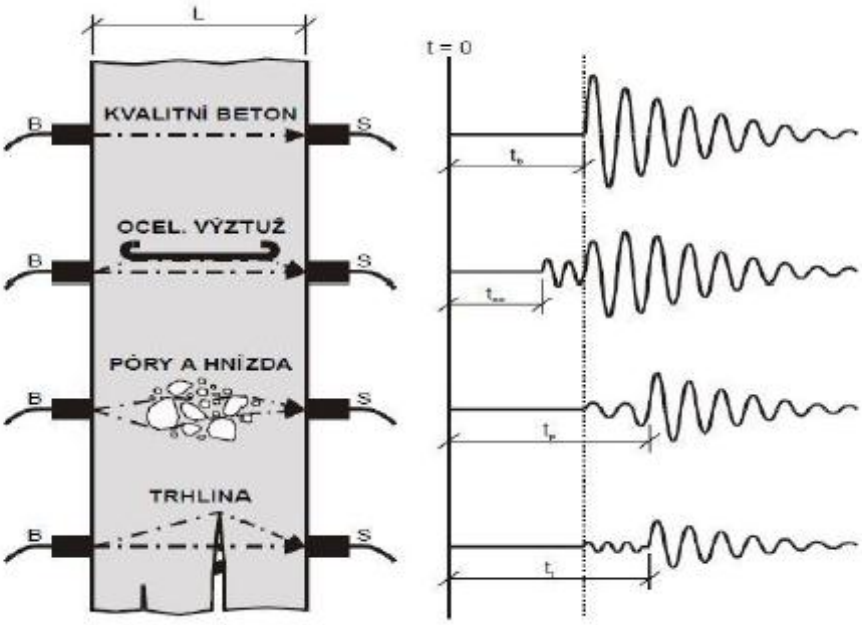
- Polopřímé prozvučování



- Nepřímé prozvučování



Obr. 3, 4, 5 – Možnosti umístění sond a způsoby prozvučování [16], [29]



Obr. 6 - Vliv kvality betonu na rychlost šíření a tvar impulzu UZ vlnění [25]

Kvalita betonu podle rychlosti šíření ultrazvuku:

Tab. 1 - Kvalita tradičního betonu podle rychlosti šíření ultrazvuku [23]

Všeobecné hodnocení	**Rychlost šíření ultrazvuku [m/s]**
Výborný	nad 4500
Dobrý	3700 - 4500
Diskutabilní	3000 - 3700
Špatný	2100 - 3000
Mizerný	nižší než 2100

Výsledky měření mohou být ovlivněny několika faktory, jako např.: rozměry zkušebního vzorku, vlhkost materiálu, vlastní frekvence budiče, prostředky akustické vazby, vady ve struktuře nebo komponenty materiálu [15], [16], [23].

3.3.4. VÝHODY A NEVÝHODY ULTRAZVUKOVÉ METODY A JEJÍ VYUŽITÍ VE STAVEBNICTVÍ

Jednou z mnoha výhod ultrazvukové metody je, že se šíří relativně silnými vrstvami materiálu a při jejím použití nedochází k porušení materiálu, únosnosti dané konstrukce nebo použitelnosti stavebního prvku. Výhodou je možnost opakovaného měření na stejném vzorku nebo konstrukci. Jednoduchá je i aplikace měřícího zařízení v laboratoři nebo v in situ. Ačkoli je poměrně vysoká cena zkušebního zařízení, i tak je v porovnání s destruktivními metodami méně nákladná. Jako nevýhodu ultrazvukové metody lze uvést např. limitované použití při zkouškách na konstrukci při přímém prozvučování [13], [23].

Ultrazvuková impulzová metoda má rozsáhlé možnosti využití při diagnostice betonových konstrukcí a při kontrole kvality betonu, avšak v dnešní době není ve stavebnictví zcela využívána. Ve strojírenství se využívá metody spojitého vysílání vlnění. Využívá se například pro kontrolu homogenity, čištění vzduchu nebo pro měření tloušťky materiálu. Ve stavebnictví lze ultrazvukem kromě betonu zkoušet i jiné stavební materiály, jako např. cihlářskou keramiku nebo kámen. Uplatnění nachází také v diagnostice dřevěných konstrukcí. Pro zkoušení kovových konstrukcí se používají tzv. stopařské ultrazvuky se sondami o vyšší pracovní frekvenci [19], [30].

3.3.5. VZTAH MEZI RYCHLOSTÍ ŠÍŘENÍ UZ IMPULZŮ A MATERIÁLOVÝMI CHARAKTERISTIKAMI BETONU

- **Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulsovou metodou**

Výpočtem při znalosti rychlosti šíření impulsu a objemové hmotnosti betonu je možné stanovit dynamický modul pružnosti betonu. Jestliže existuje kalibrační vztah, lze z rychlosti šíření impulsu stanovit i pevnost betonu v tlaku [15], [16], [17].

V normách ČSN 73 1371 [15], ČSN EN 12504-4 [16] a ČSN 73 1372 [17] jsou popsané metody využívané ke stanovení dynamických modulů pružnosti. Jedná se o metodu ultrazvukovou a rezonanční.

Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu E_{cu}, v MPa může být vypočtena z naměřené rychlosti šíření ultrazvukových impulsů dle ČSN 73 1371 [15] jako:

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

Kde je: ρ je objemová hmotnost [kg/m^3],

v_L je rychlost impulzu [km/s]

k je součinitel rozměrnosti prostředí [bez rozměru] [31].

Přepočtem se získá statický modul pružnosti E_c v MPa.

Modul pružnosti betonu je ovlivněn řadou činitelů, např. složením, zejména druhem hrubého kameniva, ošetřováním, provzdušněním apod. Hodnoty statického modulu pružnosti jsou obvykle zjišťovány na předem vyrobených zkušebních tělesech ve tvaru hranolu nebo válce [12], [23], [25], [31], [32].

- **Stanovení pevnosti betonu v tlaku**

Je poměrně složité stanovit u betonu přesnou hodnotu pevnosti v tlaku pomocí rychlosti šíření ultrazvukového impulzu. Složení betonu výrazně ovlivňuje rychlost šíření vlnění v materiálu, která má úzkou vazbu na modul pružnosti a hutnost daného betonu. Jedná se o jakýsi odhad pevnosti [22], [23].

V první řadě závisí hutnost i modul pružnosti materiálu na vlastnostech kameniva - křivka zrnitosti, druh kameniva, fyzikální vlastnosti. Druhotně na ně mají vliv i vlastnosti tmelu - vodní součinitel a stáří betonu. Pevnost betonu naopak více ovlivňuje vodní součinitel. Pokud složení betonu není známo, není odhad pevnosti betonu zcela věrohodný. Čím větší je pevnost betonu, tím větší změně pevnosti v tlaku odpovídá menší změna rychlosti [22], [23].

Pevnost tlaku vypočítáme ze vztahu [28], [40]:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Kde je : f_c je pevnost v tlaku [MPa],

F je maximální mezní síla při porušení [N],

A_c je průřezová plocha zkoušeného tělesa [mm^2].

Zkušební tělesa jsou např.: krychle o rozměru 150x150x150mm, 200x200x200mm; válec Ø 150, výšky 300mm. Není-li průměr válcových vývrtů roven 150 mm, norma ČSN EN 12390-3 [4] udává přepočet pevnosti válcové na pevnost krychelnou:

$$f_{c,cyl} = \kappa_{c,cy} \cdot \kappa_{cy,d} \cdot \frac{F}{A_c}$$

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

$\kappa_{c,cy}$ opravný součinitel pro štíhlost válce λ, kdy $\lambda \neq 2{,}0$.

Ten lze vypočíst jako:

$$\kappa_{c,cy} = 0{,}80 + \sqrt{\frac{\lambda - 0{,}933}{26{,}667}}$$

$\kappa_{cy,d}$ opravný součinitel pro průměr válce d ≠ 150 mm. Pro průměr d = 100 mm se uvažuje hodnota 0,95 a pro průměr d = 50 mm je uvažována hodnota 0,91.

Tab. 2 - Hodnoty součinitele $\kappa_{c,cy}$ [4]

λ	$\kappa_{c,cy}$	λ	$\kappa_{c,cy}$
1,000 -1,013	0,85	1,350 -1,418	0,93
1,014 -1,045	0,86	1,419 -1,493	0,94
1,046 -1,083	0,87	1,494 -1,573	0,95
1,084 -1,125	0,88	1,574 -1,659	0,96
1,126 -1,173	0,89	1,660 -1,750	0,97
1,174 -1,226	0,90	1,751 -1,846	0,98
1,227 -1,285	0,91	1,847 -1,947	0,99
1,286 -1,349	0,92	1,948 a více	1,00

V případě, že je štíhlost válce = 1,0 a průměr válce 150 mm nebo 100mm, pak se výsledek nemusí přepočítávat a je považován za shodný s krychelnou pevností.

Pevnost betonu v tlaku na krychlích $f_{c,cube}$ lze vypočíst ze vztahu:

$$f_{c,cube} = \kappa_{cy,cu} \cdot f_{c,cyl}$$

Kde je: $\kappa_{cy,cu}$ součinitel pro přepočet válcové pevnosti na krychelnou pevnost:

Tab. 3 - Hodnoty součinitelů štíhlosti $\kappa_{cy,cu}$ používané pro převod válcové pevnosti v tlaku na pevnost krychelnou [4]

$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$
8	1,252	45	1,23
12	1,252	50	1,223
16	1,252	55	1,215
20	1,251	60	1,206
25	1,249	70	1,195
30	1,246	80	1,184
35	1,242	90	1,172
40	1,236	100	1,159

Pevnost betonu v tlaku z šíření ultrazvukového vlnění je možné stanovit jinými metodami. Nejčastější je kombinace ultrazvuku s jinými tvrdoměrnými metodami [15], [23].

- **Stanovení rovnoměrnosti betonu pomocí ultrazvukové impulzové metody**

Rovnoměrnost betonu dané konstrukce je definována dle ČSN 73 2011 [33] jako charakteristika betonu, při které se hodnotí rozptyl vlastností betonu. Beton, který nesplňuje kritéria rovnoměrnosti, je označován jako nerovnoměrný. Rovnoměrnost betonu pomocí ultrazvuku lze stanovit v případě, je-li konstrukce přístupná z obou stran. Zkouší se na protilehlých stranách na povrchu dané konstrukce, na níž jsou pravidelně rozdělena zkušební místa. Počet zkušebních míst je uveden v normě ČSN 73 2011 [33]. Rovnoměrnost je vyhodnocována pomocí statistických ukazatelů (variační součinitel, rozdíl znaků dvou měřených míst), které jsou vypočteny z rychlostí šíření impulsových podélných ultrazvukových vln v_L. Do výkresu jsou vyneseny čáry stejné rychlosti, tzv. izovely. Z průběhu těchto čar je možné posoudit, zda je beton rovnoměrný. Zkoušení nelze provádět na konstrukci, která je viditelně porušena, z důvodu narušení sledované vlastnost betonu.

Rovnoměrnost je stanovena pomocí variačního koeficientu impulzové rychlosti šíření ultrazvukového vlnění V_x:

$$V_x = \frac{s_x}{v_L} \cdot 100 \qquad [\%]$$

Kde: s_x směrodatná odchylka rychlosti šíření impulzu UZ vlnění [m/s]

v_L je aritmetický průměr rychlosti šíření impulzu UZ vlnění [m/s] [34].

Část nebo oblast betonu je rovnoměrná tehdy, pokud variační součinitel hodnoceného souboru znaků „v“ a rozdíl „Δ“ znaků stanovených na zkušebních místech vedle sebe a nad sebou ležících není větší než hodnoty uvedené v tabulce č. 4., také uvedené v normě ČSN 73 2011 [33], [30].

Tab. 4 - Maximální hodnoty variačního součinitele V_x a rozdílů sousedních míst „Δ“[33].

Zkoušená vlastnost betonu	Statistické hodnocení	Pevnostní třída betonu			
		C 12/15	C 16/20	C 25/30	C 30/37 - C 50/60
Pevnost v tlaku	Vx %	16	16	14	12
	Δ %	30	30	30	30
Pevnost v tahu	Vx %	22	22	18	16
	Δ %	40	40	40	40
Rychlost šíření impulzů podélných UZ vln	Vx %	4	4	3,5	3
	Δ %	7,5	7,5	7,5	7,5
Objemová hmotnost	Vx %	2,5	2,5	2,5	2,5
	Δ %	4	4	4	4

3.3.6. KALIBRAČNÍ VZTAHY

Pomocí metod matematické statistiky nebo i jiným odpovídajícím způsobem mohou být stanoveny kalibrační vztahy z měřených bodů. Jedná se o závislost mezi ukazateli nedestruktivního měření, popř. z nich vypočtených hodnot sledované vlastnosti betonu. Za známou metodou matematické statistiky je považována tzv. regresní analýza. Rozsah kalibračního vztahu musí být takový, aby umožňoval stanovení hodnot sledované vlastnosti všech velikostí, které při zkoušení mohou přicházet v úvahu [23].

- **Druhy kalibračních vztahů a výpočet pevnosti impulsové metody podle ČSN 73 1371**

Norma ČSN 73 1371 [15] uvádí několik možností, kterými lze získat upřesněnou pevnost v tlaku vyhodnocením z kalibračních vztahů:

1. Z úzkého nebo širokého určujícího kalibračního vztahu.

Určující kalibrační vztahy jsou vytvořeny pro beton, jehož složení známe.

a) Úzký určující kalibrační vztah lze stanovit v rozsahu jedné třídy betonu a lze jej vyhodnotit třemi nebo čtyřmi sdruženými body nebo k nim příslušejícího počtu měřených bodů stejnoměrně rozložených v oboru měřené vlastnosti [12], [23].

b) Široký určující kalibrační vztah se pro beton daného rozsahu tříd odvodí z vyhodnocených zkoušek, které umožňují stanovení pěti až šesti sdružených bodů nebo k nim příslušejícího počtu měřených bodů stejnoměrně rozložených v oboru měřené vlastnosti. Stanovuje se v rozsahu dvou nebo více tříd betonu [12], [23].

2. Ze směrného kalibračního vztahu (nejméně na 100 zkušebních vzorcích, lze upřesnit pomocí součinitele α).

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

Kde je: f_{be} - pevnost betonu [MPa]

v_{L3} – rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí [km/s] [23].

Tento vztah je nutné brát s rezervou, jelikož byl vytvořen pro betony vyráběné před více než třiceti lety. Tento vztah byl vytvořen pro tradiční betony zkoušené ve stáří přibližně 14 až 56 dnů. Pro dnešní moderní betony jsou hodnoty pevnosti v tlaku výrazně vyšší [2], [23].

3. Z obecného kalibračního vztahu

Lze jej odvodit z vyhodnocených zkoušek, avšak je potřeba mít k dispozici alespoň 300 zkušebních těles z betonů různého složení. Toto provedení je nutné v případě, že obecný kalibrační vztah není stanoven výrobcem zkušebního přístroje. Jsou použity technologie tak, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v pravidelných intervalech v celém svém oboru [12], [15], [23].

Obecný kalibrační vztah pro tradiční beton vytvořený z přibližně 720 výsledků zkoušek existujících konstrukcí [23]:

$$f_{is,cube(v)} = 0{,}778e^{0{,}953v} \quad \text{pro } 1{,}9 \leq \text{v} \leq 4{,}6$$

Kde $f_{is,cube(v)}$ je odhad krychelné pevnosti v tlaku betonu in situ [MPa].

- **Odhad pevnosti betonu z impulsové rychlosti podle ČSN EN 13791**

Postup pro získání charakteristické pevnosti v tlaku betonu v konstrukci pomocí nepřímých metod je uveden v normě ČSN EN 13791 [35]. Je nutné provádět zkoušky v tlaku současně na vývrtech, aby bylo možné výsledky upřesnit. Mezi nepřímé metody patří ultrazvuk, zkoušky odrazovými tvrdoměry a stanovení síly na vytržení

Norma [35] popisuje dvě alternativy postupu. První možností je přímá korelace s vývrty. Je potřeba alespoň 18 výsledků zkoušek vývrtů. Pomocí regresní analýzy dvojic výsledků zkoušek je možné získat kalibrační křivku. V případě, že je omezený počet vývrtů, je nutné využít druhé alternativy, kde je potřeba alespoň 9 výsledků zkoušek vývrtů. Základním principem je využití normové „základní křivky“. Ze skutečných pevností na vývrtech a pevností vypočtených podle základní křivky se vypočte její posun.

Základní křivka pro zkoušku rychlosti šíření ultrazvukového impulzu je:

$$f_{v=} 62{,}5v^2 - 497{,}5\text{v} + 990 \text{ pro } 4 \leq \text{v} \leq 4{,}8$$

Kde je: f_v – odhad pevnosti v tlaku betonu [MPa]

v – rychlost šíření ultrazvuku [km/s] [23].

Posun základní křivky musí být zhotoven pro každou další konstrukci, díky níž lze stanovit nový vztah pro odhad pevnosti v tlaku. Je poměrně nemožné jeho využití pro betony horší kvality, jelikož vztah je platný pouze v rozsahu od 4 do 4,8 km/s. Proto je nutné vytvořit vztah pomocí regresivní analýzy alespoň na 18 vývrtech [12], [23], [35].

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V první experimentální části bakalářské práce je cílem zhotovit laboratorní zkoušky na vývrtech z 6 různých druhů betonů. Výsledky měření je potřeba graficky i tabelárně zpracovat a vyhodnotit. Záměrem je i vytvoření závislosti mezi šířením ultrazvukových impulzů a pevností v tlaku z těchto měření. Hodnoty získané ze sad 1, 2, 5, 6, 7 a 8 je potřeba dosadit do stávajícího kalibračního vztahu, získaného na Ústavu stavebního zkušebnictví v Brně.

Ve druhé experimentální části je cílem práce provést měření na vybrané mostní konstrukci v Brně, výsledky dosadit do vypočteného kalibračního vztahu a porovnat je s výsledky provedenými firmou Mostní vývoj, s.r.o..

4.1. LABORATORNÍ ČÁST

V laboratorní části bylo zkoušeno 6 sad zkušebních vzorků – válcové vývrty, které byly odebrány ze starších betonových konstrukcí s různorodým kamenivem, tmelem o různých pevnostech. Zkoušeny byly sady 1, 2, 5, 6, 7 a 8. U vzorků byla nejprve změřena jejich délka L [mm], průměr Ø [mm] a hmotnost [g].

4.1.1. PŘEHLED JÁDROVÝCH VÝVRTŮ SAD *1,2,5,6,7* A *8*

Vývrty jednotlivých sad byly odebrány ve štíhlostních poměrech 1:1 a 1:2. Jejich délka byla okolo 75 mm a 150 mm s průměrem asi 75 mm. Kamenivo bylo drcené nebo těžené s různými frakcemi. Podrobnější vlastnosti kameniva jednotlivých sad jsou pro názornost popsány v tabulkách – viz. Seznam příloh. Jako příklad byla vybrána sada č. 2.

SADA Č. 2:

Fotodokumentace zkušebních vývrtů sady č. 2:

Obr. 7 - Vývrt 2.1 o Ø cca 75 mm

Obr. 8 – Vývrt 2.2 o Ø cca 75 mm

Obr. 9 - Vývrt 2.3 o Ø cca 75 mm

Obr. 10 – Vývrt 2.4 o Ø cca 75 mm

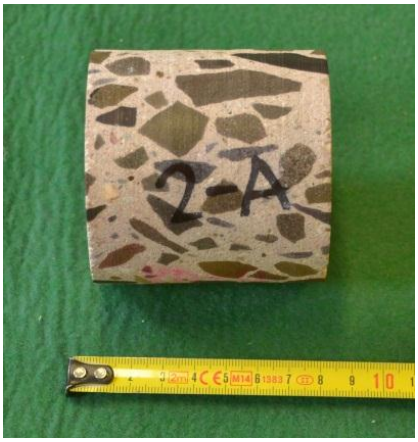
Obr. 11 - Vývrt 2.5 o Ø cca 75 mm

Obr. 12 – Vývrt 2.6 o Ø cca 75 m

Obr. 13 - Vývrt 2.7 o Ø cca 75 mm

Obr. 14 – Vývrt 2.8 o Ø cca 75 mm

Obr. 15 - Vývrt 2.9 o Ø cca 75 mm



Obr. 16 – Vývrt 2.A o Ø cca 75mm

Tab. 5 - Popis kameniva sady 2

Sada č. 2		Poznámky
1. Kamenivo:		
Druh:	drcené	
Rozmístění:	rovnoměrné	
Množství hrubého kameniva:	tvoří téměř kostru	
Odhad frakce:	16 -32	
Maximální velikost zrna:	běžně do 25 mm	
2.Pórovitost:		
Velikost pórů [mm]:	3 mm	
Množství pórů:	málo	
Povrch:	hladký	
Velikost dutin [mm]:	běžně do 1 mm	
Množství dutin:	málo	

Sada č. 2:

Sada č. 2 obsahovala beton velice podobný sadě č. 1. Kvalita betonu byla na první pohled velmi dobrá. Povrch těles byl hladký až sklovitý, takže vše naznačovalo tomu, že beton bude lepší kvality. Kamenivo bylo rovnoměrně rozmístěno. Hrubé kamenivo tvořilo téměř kostru. Odhad frakce byl 16 – 32 a chyběla frakce 4 - 16. Tmel byl šedé barvy s minimálním množstvím pórů. Maximální velikost zrn byla asi 35 mm, ačkoli některá zrna obsahovala nepříznivý tvarový index.

Sada č. 1:

Kvalita betonu sady č. 1 byla na první pohled dobrá. Beton obsahoval kamenivo drcené. Povrch těles byl relativně hladký. Odhad frakce byl 16 – 32 a chyběla frakce 4 – 16. Tmel byl hnědošedé barvy - téměř bez pórů. Kamenivo bylo rozmístěno rovnoměrně a obsah hrubého kameniva byl průměrný, tedy netvořil kostru. Největší zrna ve vzorcích se pohybovala okolo 55 mm. Po rozdrcení vzorku se ukázalo, že se uvnitř nachází zrno o velikosti asi 60 mm. Fotodokumentace těles je uvedena v příloze č. 1, podrobnější vlastnosti kameniva sady č. 1 jsou uvedeny v příloze č. 6.

Sada č. 5:

Beton sady č. 5 byl na první pohled horší kvality. Byl vyroben z těženého kameniva, které bylo rozmístěno nerovnoměrně. Povrch těles byl hodně drsný. Tělesa obsahovala na první pohled horší tmel béžové barvy. Tmel byl hodně pórovitý - póry měly velikost do 2 mm. Obsah hrubého kameniva byl velice malý. Běžně se u sady vyskytovala zrna o velikosti 40 mm a maximální velikost zrna byla po rozdrcení vzorku asi 50 mm. Odhad frakce byl 0 - 32. V příloze č. 6 jsou uvedeny podrobnější popisy kameniva, fotodokumentace zkušebních těles je uvedena v příloze č. 2.

Sada č. 6:

Kvalita betonu sady č. 6 byla na první pohled velice špatná. Beton byl vyroben z drceného kameniva. Tmel byl hnědošedé barvy a vyštipoval se. Kamenivo bylo rozmístěno částečně nerovnoměrně. Obsah hrubého kameniva byl průměrný. Beton obsahoval velké množství pórů, o velikosti běžně do 2 mm. Ojediněle se vyskytovaly i dutiny o velikosti 10 mm. Povrch těles byl velmi drsný. Odhad frakce této sady je 0 – 32 s běžně se vyskytujícími zrny o velikosti 35 mm. Fotodokumentace sady č. 6 je uvedena v příloze č. 3 a podrobný popis kameniva je uveden v příloze č. 6.

Sada č. 7:

Beton sady č. 7 byl na první pohled v podstatě dobré kvality. Byl vyroben z těženého kameniva, které bylo rovnoměrně rozmístěno. Beton obsahoval průměrní podíl hrubého kameniva. Povrch těles byl na první pohled drsný s tmelem hnědošedé barvy. Tmel obsahoval menší množství pórů - běžně okolo 2 mm, ojediněle okolo 5 mm. Odhad frakce byl 0 – 32. Po rozdrcení vzorku se ukázalo, že se uvnitř nachází zrno o velikosti asi 60 mm. Fotodokumentace těles je uvedena v příloze č. 4 a podrobnější vlastnosti kameniva jsou uvedeny v příloze č. 6.

Sada č. 8:

Beton sady č. 8 měl nedostatek jemných částic a byl spíše horší kvality. Obsahoval těžené kamenivo, které bylo nerovnoměrně rozmístěno. I obsah hrubého kameniva byl velice malý. Povrch těles byl spíše drsný. Tmel byl hnědošedé barvy s velkým množstvím pórů běžně o velkosti 2 mm, které svědčily o nedostatku jemných částic ve struktuře. To může být způsobeno zrnitostí použitého drobného kameniva a menším množstvím použitého cementu. Odhad frakce byl 0 – 32. Některé vzorky obsahovaly velká zrna o velikostí zrna 40 až 50 mm, ovšem nerovnoměrně rozmístěná. V příloze č. 6 je uveden podrobnější popis kameniva sady č. 8, fotodokumentace všech zkušebních těles je uvedena v příloze č. 5.

4.1.2. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY JEDNOTLIVÝCH SAD

Pro každou sadu jsou vytvořeny tabulky, které obsahují základní charakteristiky zkušebních vzorků.

Hmotnost těles byla zvážena na digitální váze a jejich rozměry byly naměřeny pomocí digitálního měřítka. Z rozměrů byla vypočtena objemová hmotnost zkušebních těles, která byla měřena v přirozeně vlhkém stavu. Ultrazvukové měření bylo provedeno pomocí přístroje TICO od firmy Proceq se sondami o frekvencí 54 kHz. Přístroj byl nakalibrován pomocí etalonu a jako akustický vazebný prostředek sloužila plastelína. Na vzorcích byly naměřeny doby průchodu materiálem. Nakonec byly tělesa pečlivě zabroušeny a rozdrceny v lisu VPM 40 (rozsah 40 tun). Základní charakteristiky jednotlivých sad jsou pro názornost popsány v tabulkách v příloze č. 7. Jako příklad byla vybrána sada č. 2.

Sada č. 2:

Tab. 6 - Základní charakteristiky sady č. 2

Označení tělesa	**Průměr** d [mm]	**Výška** h [mm]	**Hmotnost** m [g]	**Objem. hmotnost** ρ[kg/m³]
2.1	74,8	149,2	1408,1	2147
2.1	74,8	149,3	1424,3	2171
2.3	74,8	149,1	1444,6	2209
2.4	74,9	148,8	1434,7	2189
2.5	74,8	149,4	1425,1	2173
2.6	74,9	149,1	1425,4	2170
2.7	75,0	149,2	1426,7	2167
2.8	74,8	149,4	1417,5	2161
2.9	74,8	149,3	1414,5	2159
2.A	74,8	73,7	709,9	2195

4.1.3. VÝSLEDKY ULTRAZVUKOVÝCH MĚŘENÍ, MĚŘENÍ PEVNOSTI V TLAKU A DYNAMICKÝCH MODULŮ PRUŽNOSTI

Pro všechny sady z 6 různých druhů betonů jsou vypočteny rychlosti ultrazvukového měření, pevnosti v tlaku a hodnoty dynamických modulů pružnosti jednotlivých zkušebních těles.

Výsledná rychlost $\boldsymbol{v}$ UZ vlnění je vypočtena jako průměr ze tří UZ měření každého tělesa. Z rozměrů těles byla vypočtena plocha $\boldsymbol{A}$ každého vzorku, následně byla dopočtena válcová pevnost v tlaku $\boldsymbol{f_{c,cyl}}$, jako poměr mezní síly $\boldsymbol{F}$ a plochy $\boldsymbol{A}$. Dle příslušného vztahu z normy ČSN EN 12390-3, Z1 [4] byl interpolací zjištěn koeficient štíhlosti $\boldsymbol{\kappa_{c,cy}}$. Průměr těles byl cca 75 mm, tedy hodnota koeficientu průměru byla interpolována na hodnotu 0,93. Válcové pevnosti v tlaku byly následně vynásobeny opravným koeficientem $\boldsymbol{\kappa_{cy,cu}}$ a tak převedeny na pevnosti krychelné $\boldsymbol{f_{c,cube}}$ dle příslušného vztahu z normy ČSN EN 12390-3, Z1 [4]. Výsledky UZ měření, pevnosti v tlaku a dynamických modulů jednotlivých sad jsou pro názornost popsány v tabulkách - viz. seznam příloh. Jako příklad byla vybrána sada č. 2.

Sada č. 2:

Tab. 7 - Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 2

Označení tělesa	Rychlost šíření UZ vlnění				Mezní síla
	v [m/s]				F [kN]
	"Rychlost v1"	"Rychlost v2"	"Rychlost v3"	Výsledná rychlost **v**	
2.1	3630	3702	3527	3620	98,5
2.1	3487	3487	3479	3484	104,6
2.3	3474	3467	3459	3467	102,5
2.4	3712	3630	3535	3626	108,8
2.5	3387	3326	3465	3393	103,8
2.6	3307	3382	3314	3334	99,2
2.7	3314	3390	3369	3357	109,5
2.8	3350	3335	3372	3352	106,8
2.9	3169	3231	3190	3197	114,3
2.A	4027	3305	3667	3666	134,0
Průměr				**3450**	

Tab. 8 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 2

Označení tělesa	Pevnost betonu v tlaku fc [MPa]	Dynamický modul pružnosti E [N/mm²]			
		Edyn 1	Edyn 2	Edyn 3	Výsledný **Edyn**
2.1	22,4	25458	24034	24034	24508
2.1	23,8	23760	23650	23650	23686
2.3	23,4	23996	23773	23773	23847
2.4	24,7	27137	24620	24620	25459
2.5	23,6	22432	23485	23485	23134
2.6	22,5	21354	21449	21449	21417
2.7	24,8	21424	22106	22106	21878
2.8	24,3	21820	22116	22116	22018
2.9	26,0	19519	19770	19770	19687
2.A	30,5	32040	26559	26559	28386

Tab. 9 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č. 2

Označení tělesa	Maximální mezní síla	Štíhlost	Koeficient štíhlosti	Koeficient průměru	Válcová pevnost v tlaku [MPa]	Koeficient krychelný	Krychelná pevnost v tlaku
	F[kN]	λ	$\kappa_{c,cy}$	$\kappa_{cy,d}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cube}$ [MPa]
2.1	98,5	1,994	1,00	0,93	20,8	1,250	26,0
2.2	104,6	1,995	1,00	0,93	22,1	1,249	27,7
2.3	102,5	1,994	1,00	0,93	21,8	1,249	27,2
2.4	108,8	1,988	1,00	0,93	23,0	1,249	28,7
2.5	103,8	1,997	1,00	0,93	22,0	1,249	27,4
2.6	99,2	1,991	1,00	0,93	20,9	1,250	26,2
2.7	109,5	1,989	1,00	0,93	23,1	1,249	28,8
2.8	106,8	1,998	1,00	0,93	22,6	1,249	28,2
2.9	114,3	1,997	1,00	0,93	24,2	1,247	30,2
2.A	134,0	0,986	0,85	0,93	24,1	1,246	30,0
Průměr							**28,0**

Průměrná rychlost šíření ultrazvukových impulzů byla u sady č. 2 asi 3450 m/s, což lze podle zatřízení v tabulce č. 1(*Tab. 1: Kvalita tradičního betonu podle rychlosti šíření ultrazvuku)* ohodnotit jako beton diskutabilní. Průměrná krychelná pevnost v tlaku této sady je asi 28 MPa.

Sada č. 1:

U sady č. 1 byla naměřená průměrná rychlost ultrazvukových impulzů okolo 4017 m/s. Podle tabulky č. 1 se jedná o dobrý beton. Byla vypočtena také průměrná krychelná pevnost betonu v tlaku, která má hodnotu asi 43,6 MPa. Všechny výsledky UZ měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 1 jsou uvedeny v příloze č. 8.

Sada č. 5:

V sadě č. 5 byla vypočtena průměrná rychlost ultrazvukových impulzů asi 3043 m/s. Podle tabulky č. 1 lze tento beton zatřídit jako diskutabilní, téměř až špatný. Průměrná krychelná pevnost v tlaku této sady je velice nízká, a to asi 12,7 MPa. Výsledky UZ měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 5 jsou uvedeny v příloze č. 9.

Sada č. 6:

Průměrná hodnota rychlosti šíření ultrazvukových impulzů sady č. 6 podle tabulky č. 1 je asi 3764 m/s, což lze ohodnotit jako beton dobrý až diskutabilní. Průměrná krychelná pevnost betonu v tlaku byla cca 23,5 MPa. Výsledky UZ měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 6 jsou uvedeny v příloze č. 10.

Sada č. 7:

U sady č. 7 byla naměřena průměrná rychlost ultrazvukových impulzů asi 3861 m/s. Podle tabulky č. 1 byla ohodnocena jako dobrý beton. Průměrná krychelná pevnost této sady byla asi 31,5 MPa. Výsledky UZ měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 7 jsou uvedeny v příloze č. 11.

Sada č. 8:

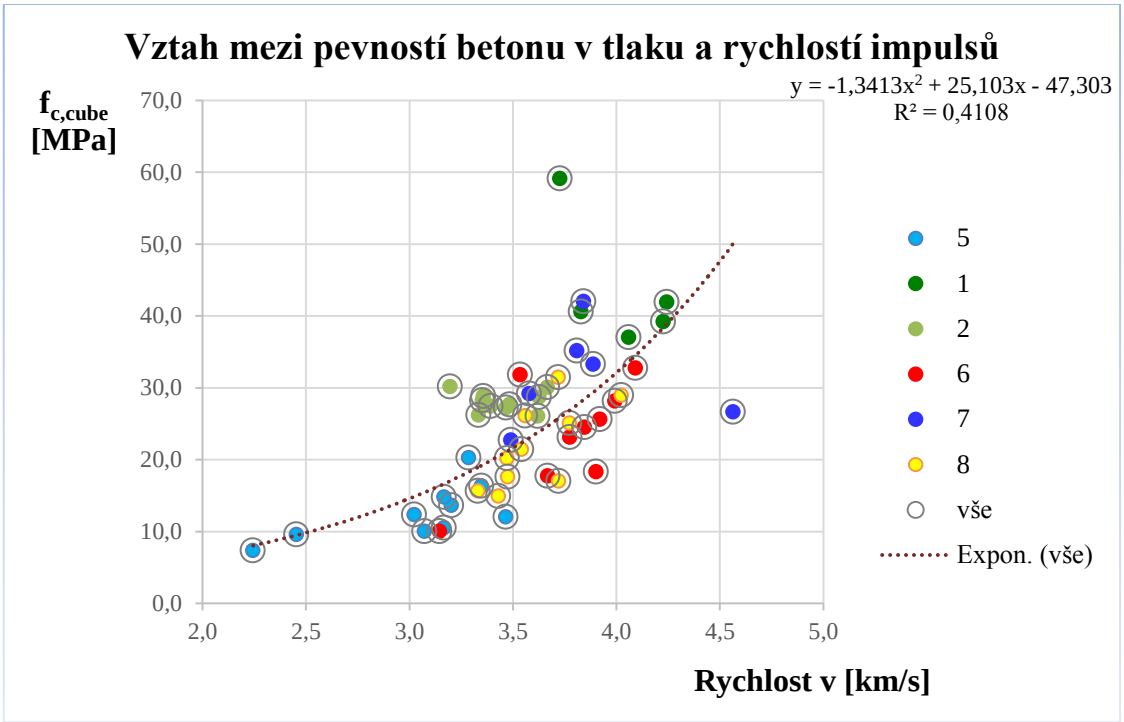
Beton sady č. 8 byl podle tabulky č. 1zatříděn jako diskutabilní. Průměrná rychlost ultrazvukových impulzů byla asi 3604 m/s. Průměrná pevnost v tlaku této sady byla asi 21,8 MPa. Výsledky UZ měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 8 jsou uvedeny v příloze č. 12.

4.1.4. ZHODNOCENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

Po vizuálním zhodnocení všech 6 druhů betonů a jejich porovnání lze říci, že sady 5,6 a 8 byly horší kvality. Jejich tmel byl pórovitý, obsahoval malé množství částic a vyštipoval se. Ve vzorcích bylo také obsaženo malé množství hrubého kameniva. Obzvlášť špatné kvality byl beton sady č. 6. Jednotlivé hodnoty pevností v tlaku a rychlostí šíření ultrazvukových impulzů byly rozptýlené a různorodé. Hodnocení kvality těchto betonů podle tabulky č. 1 bylo většinou v rozmezí 3000 – 3700 m/s, lze tedy tyto betony zařadit jako betony diskutabilní. Sada č. 5 byla na spodní hranici, kdy by byl beton zatříděn jako špatný.

Kvalita betonu sad 1, 2 a 7 byla velmi dobrá. Jejich povrch byl hladký až sklovitý. Kamenivo bylo rozmístěno rovnoměrně a bylo obsaženo větší množství hrubého kameniva než u sad 5, 6 a 8. Tmel těles byl málo pórovitý a bez dutin. Kvalita betonu podle rychlosti šíření ultrazvuku podle tabulky č. 1 se pohybovala v rozmezí 3700 – 4500 m/s. Betony sad 1 a 7 lze tedy zatřídit jako dobré, pouze beton sady č. 2 jako diskutabilní.

Ze všech sad tedy dohromady 50 výsledků byla vytvořena závislost mezi pevností v tlaku a rychlostí šíření ultrazvukových vlnění. Jednotlivé sady jsou barevně rozlišeny a proloženy křivkou.



Graf č. 1 – Vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z existujících konstrukcí.

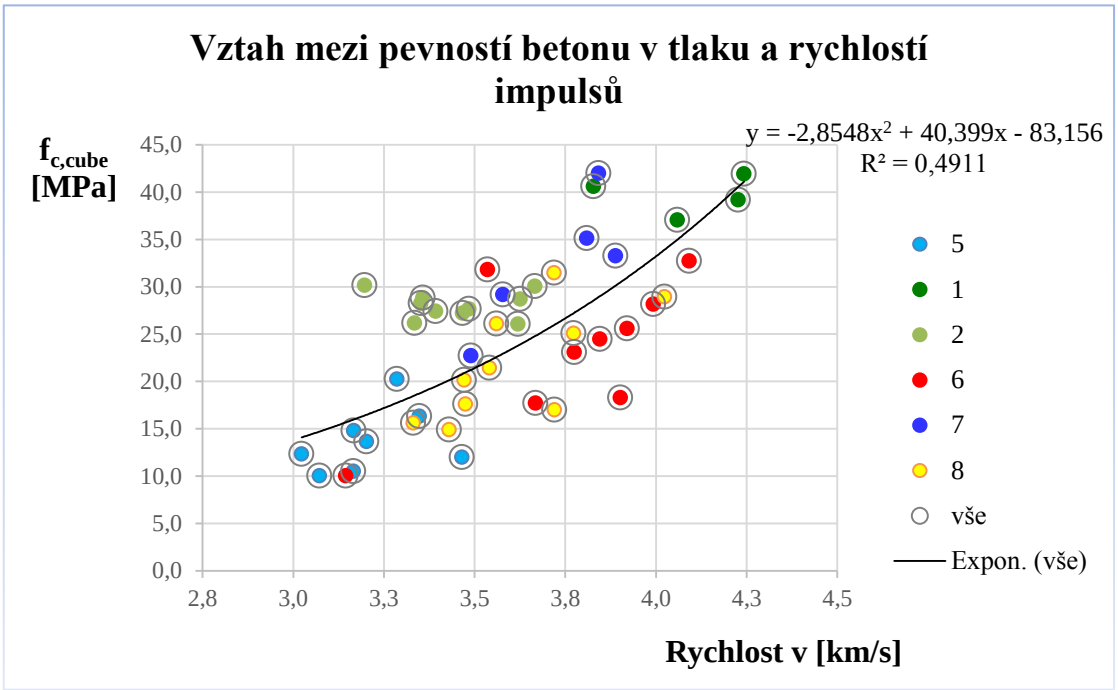
Pro upřesnění kalibračního vztahu bylo nutné vyřadit tyto vzorky:

Sada č. 1: Vyřazen vzorek 1. A, kdy se po jeho rozdrcení ukázalo, že obsahuje zrno o velkosti cca 60 mm, což mělo pravděpodobně vliv na jeho výsledek zkoušky pevnosti v tlaku, kdy byla naměřena síla F = 270 kN. Také štíhlostní poměr 1:1 mohl způsobit nadhodnocení výsledků.

Sada č. 5: Vyřazeny vzorky 5.2 a 5.4, které po jejich rozdrcení osahovaly velká zrna a při této zkoušce pevnosti v tlaku došlo k usmýknutí.

Sada č. 7: Vyřazen vzorek 7. C. Po rozdrcení vzorku se ukázalo, že se uvnitř nachází zrno o velikosti asi 60 mm. Podle charakteru porušení bylo zřejmé, že toto zrno mělo vliv na výslednou pevnost v tlaku. Výslednou pevnost mohl ovlivnit i štíhlostní poměr vzorku 1:1.

Kalibrační vztah byl upřesněn a upraven o vyřazené hodnoty:

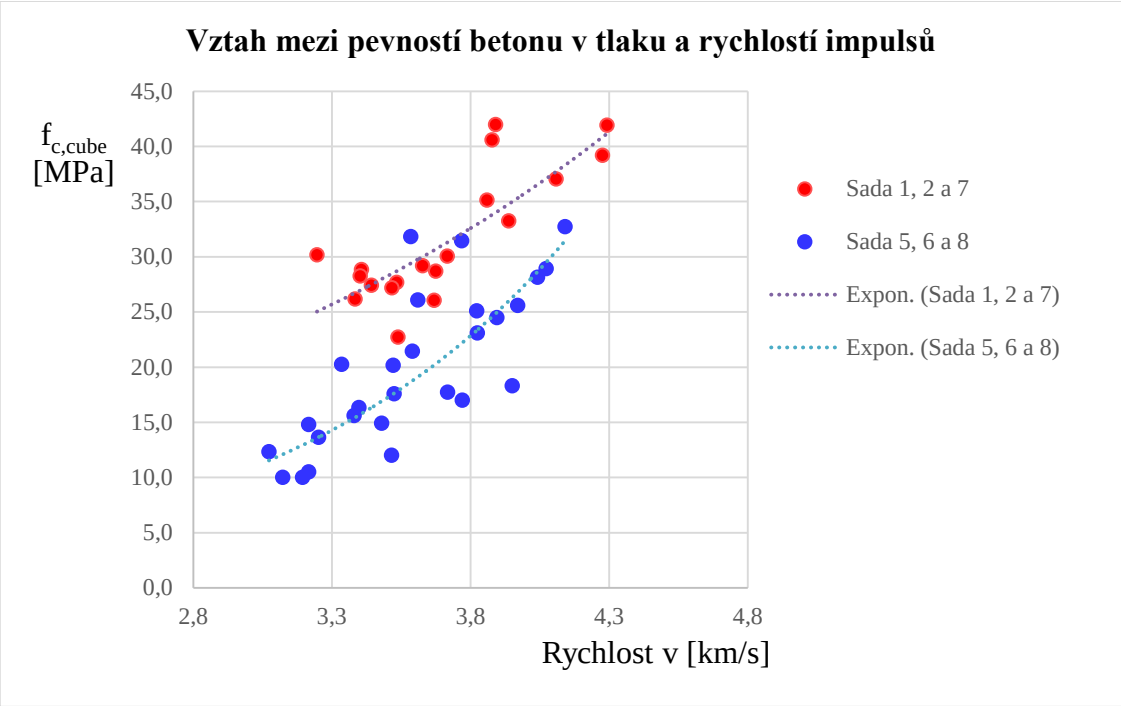


Graf č. 2 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z existujících konstrukcí.

4.1.5. POROVNÁNÍ S PŘEDCHOZÍMI VÝZKUMY A VZTAHEM UVEDENÝM V ČASOPISU BETONU TKS 3/2013

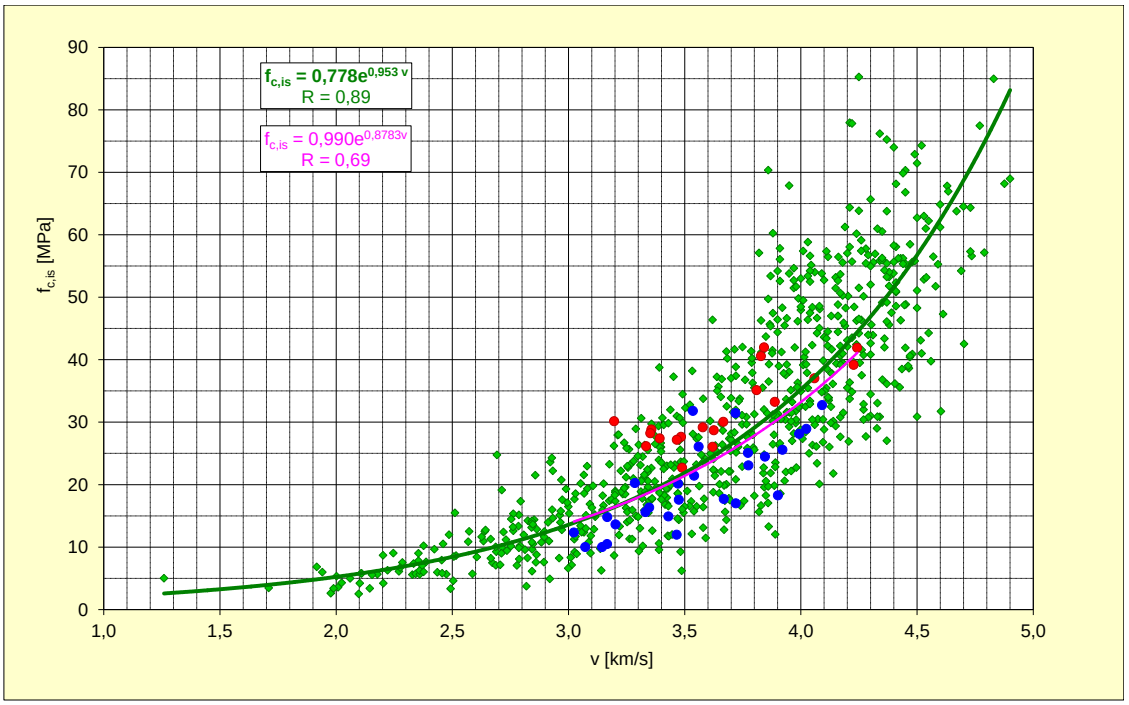
Z kalibračních vztahů je zřejmé, že existuje závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukových impulzů a pevností v tlaku, což znázorňuje součinitel korelace R = 0,690. Velký rozptyl těchto výsledků je dán odlišnostmi betonů jednotlivých sad. Každá ze sad má jiný druh kameniva, velikost zrn a obsah hrubého kameniva. Vypočtený kalibrační vztah je jakýmsi orientačním odhadem pevnosti.

Sady 1, 2 a 7 obsahovaly kvalitnější betony než sady 5, 6 a 8. U sad 1, 2 a 7 vycházela pevnost v tlaku vyšší a u sad 5, 6 a 8 naopak nižší, vzhledem ke stejné rychlosti UZ vlnění. V následujícím grafu jsou vytvořeny dvě skupiny bodů. Červeně jsou označeny zkušební vzorky sad 1, 2 a 7 a modrou barvou jsou znázorněny vzorky sad 5, 6 a 8. Jednotlivé skupiny bodů jsou proloženy křivkami.



Graf č. 3 - Upřesněný vztah závislosti pro 2 skupiny bodů jednotlivých sad.

Ovšem pro účely dalšího porovnání s literaturou byly vzaty všechny vzorky dohromady, a byla pro ně vytvořena společná křivka závislosti, jejíž rovnice je $f_{c,is} = 0{,}990e^{0{,}8783v}$ se součinitelem korelace R = 0,69. Tyto hodnoty byly dále porovnány s již hotovým směrným vztahem, který byl publikován v časopisu Beton TKS 3/2013 [23]. Tento kalibrační vztah byl vytvořen z více než 700 zkoušek provedených na jádrových vývrtech z různých mostů a konstrukcí převážně z 60. až 90. let 20. století. Jedná se o kalibrační vztah s rovnicí $f_{is,cube(v)} = 0{,}778e^{0{,}953(v)}$ a součinitelem korelace R = 0,89 v kapitole „*Obecný kalibrační vztah pro tradiční beton z existujících konstrukcí.*“ [23]. Do tohoto kalibračního vztahu bylo vloženo všech 46 hodnot z laboratorního měření:



Graf č. 4 – Porovnání výsledků získaných z existujících konstrukcí [36] doplněný o hodnoty z laboratorního měření.

4.1.6. ZÁVĚR

Výsledky z laboratorních zkoušek naznačují, že tělesa zhotovená v poměru 1:1 nadhodnocovala výsledky pevností v tlaku. Jejich pevnosti pak vycházely vyšší. Ke zkreslení výsledků dochází také u těles obsahujících velká zrna. U těles s poměrem 1:2 dochází naopak k jejich podhodnocení a jejich zkoušení je spolehlivější variantou. Bylo předpokládáno, že pevnost v tlaku nejvíce ovlivňuje vlhkost a druh kameniva - jeho velikost a složení kostry. Tato práce však naznačila, že kromě těchto faktorů pevnost v tlaku nejvíce ovlivňoval i špatný tmel - jeho kvalita a pórovitost. Po vložení všech 46 hodnot do kalibračního vztahu získaného z časopisu Beton TKS 3/2013 [23] je vidět, že tyto hodnoty velice dobře korespondují s předchozími experimenty. Skupina vzorků s kvalitnějším betonem leží nad jimi proloženou křivkou a skupina s horšími betony leží pod ní. Pokud jsou brány jako jeden celek, tak jejich křivka prakticky kopíruje směrnou křivku z Betonu TKS [23]. Ve spodní části kolem rychlosti 3 km/s jsou křivky prakticky identické a v horní části kolem 4,2 km/s je odhad pevnosti nižší přibližně o 2,5 - 3 MPa. I když byl experiment proveden pouze na 46 vzorcích, jde vidět, že velice dobře doplňují kalibrační vztah uvedený v Betonu TKS [23].

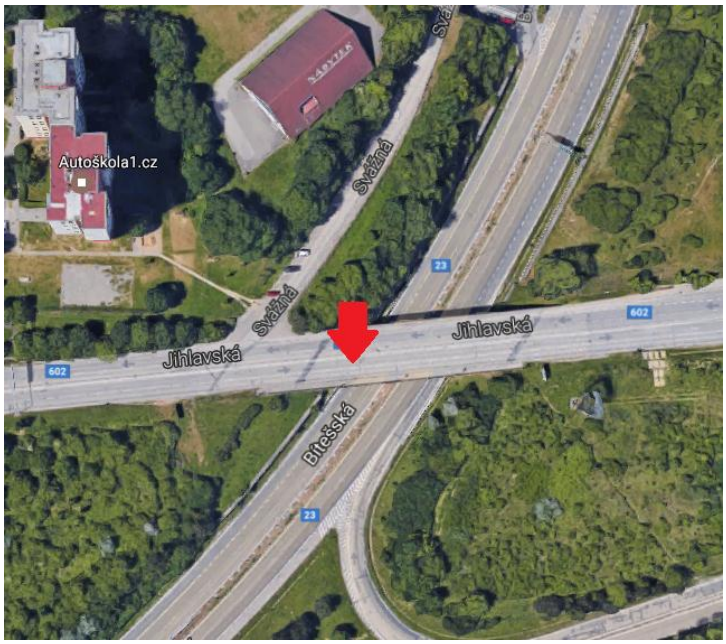
4.2. APLIKACE ULTRAZVUKOVÉ METODY NA VYBRANÉ MOSTNÍ KONSTRUKCI

4.2.1. ZÁKLADNÍ INFORMACE O MOSTU

Diagnostikovaný šikmý most o čtyřech polích se nachází na ulici Jihlavské v Brně. Jedná se o stavbu s monolitickou spodní stavbou, místy částečně ze železobetonu. Délka mostu je 79,45 metrů a celková šířka 20,3 metrů [37]:

Silniční most ev.č. 602-001 přes silnici I/23, ulici Bítešskou („západní přivaděč“) na silnici II/602 ulici Jihlavské v Brně.

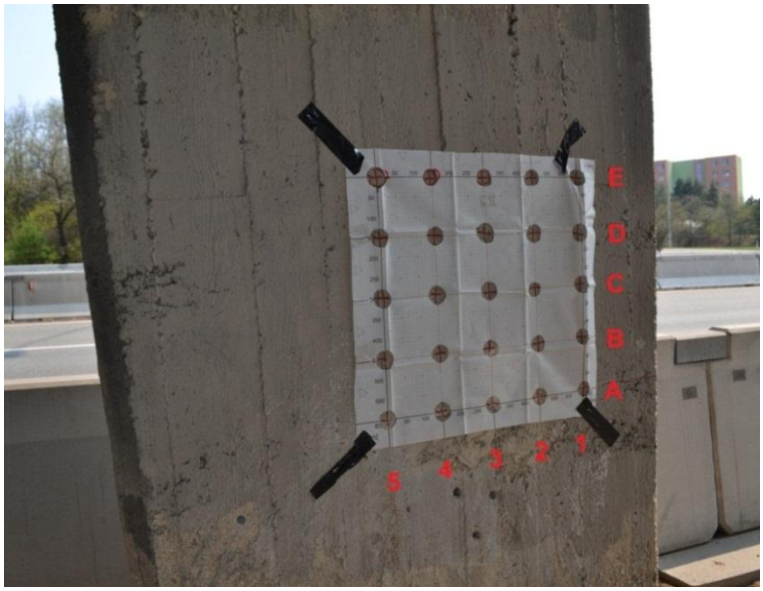
Číslo komunikace:	II/602
Staničení:	Liniové (provozní): 2,877 (dle SDO)
	Na úseku č. 2434A01209 2434A01204: 0,137 (dle SDO)
Evidenční číslo mostu:	602-001
Rok postavení objektu:	1973 (dle SDO)
Kraj/okres:	Jihomoravský/Brno-město
Kat. území:	Starý Lískovec



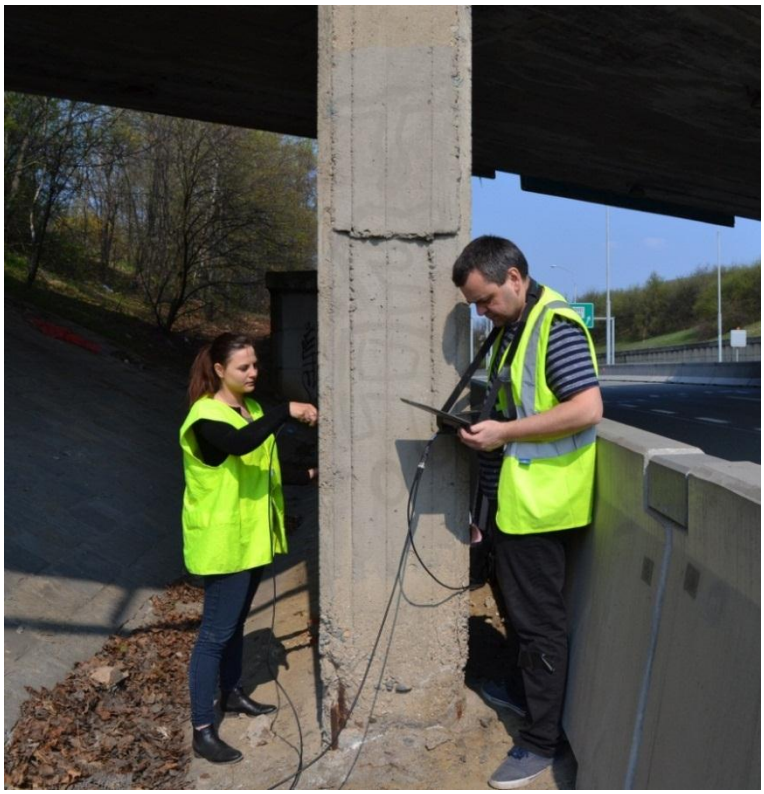
Obr. 17 - Letecký snímek polohy zkoumaného mostu s ev. č. 602-001 na ulici Jihlavské v Brně. Převádí silnici II/602 přes silnici I/23, ulici Bítešskou [38].

4.2.2. APLIKACE ULTRAZVUKOVÉ METODY A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Ultrazvukové měření bylo provedeno na 1. sloupu 4. podpěry s hloubkou cca 500 mm. Na obou stranách byl naznačen čtvercový rastr se zkušebními místy vzdálenými po 150 mm. Konstrukce byla proměřena přímo. Oblast byla vymezena přímo po 5 řadách a 5 sloupcích - svisle A-E, vodorovně 1-5, celkem tedy na 25 zkušebních místech.



Obr. 18 - Vyznačený čtvercový rast na 1. sloupu 4. podpěry.

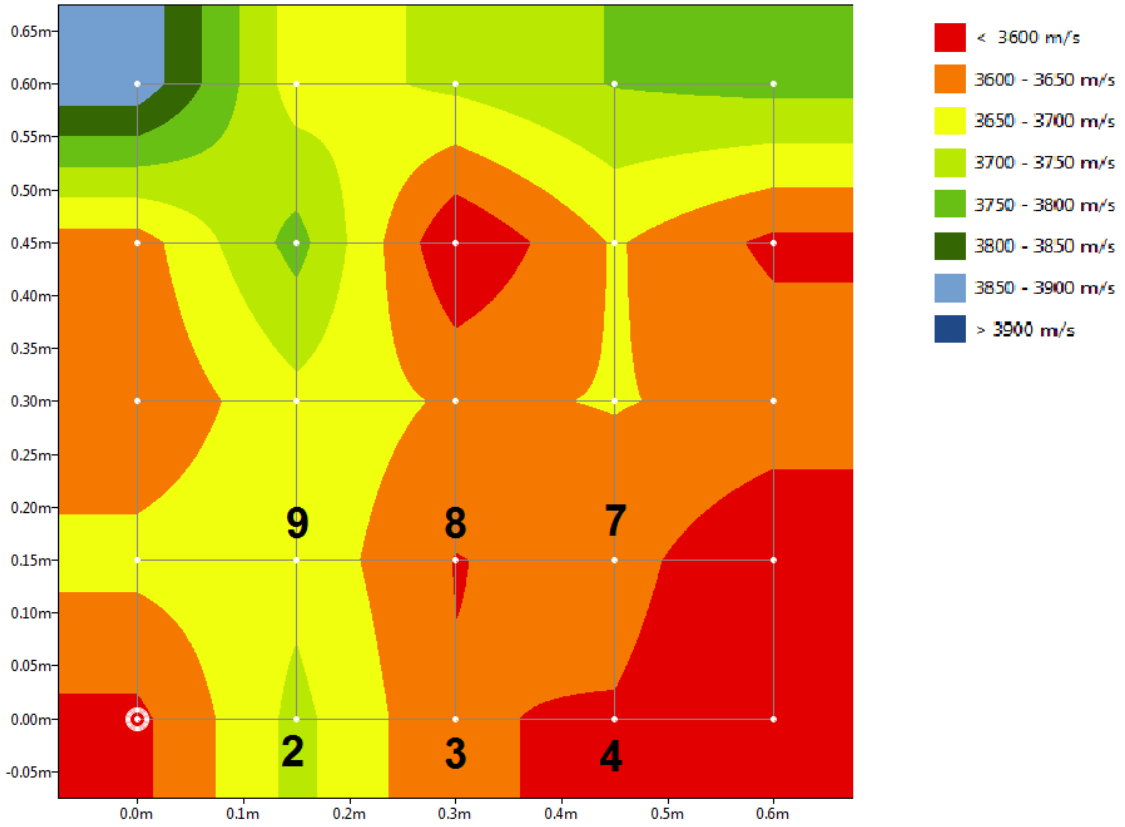


Obr. 19 - Zkoušený 1. sloup 4. Podpěry

K měření byl použit přístroj Pundit PL-200PE od firmy Proceq, sondy 54 kHz a akustickou vazbu zajistila plastelína.

Obr. 20 - Přístroj Pundit PL-200PE od firmy Proceq.

V rámci experimentální části byla zjištěna rovnoměrnost betonu železobetonového 1. sloupu 4. podpěry. Po kalibraci přístroje byly ručně zadány některé údaje, jako např. délka měřící základny. Pomocí přístroje byl z naměřených hodnot rychlosti šíření impulsů ultrazvukového vlnění získán následující rastr, pomocí kterého lze určit rovnoměrnost betonu v jednotlivých místech sloupu. Tmavé části grafu ukazují místa s vyšší rychlostí šíření ultrazvukových impulzů a označují tak části, kde je na sloupu kvalitnější beton. Nejhorší beton se nachází v pravém a levém dolním rohu a uprostřed horní poloviny rastru.

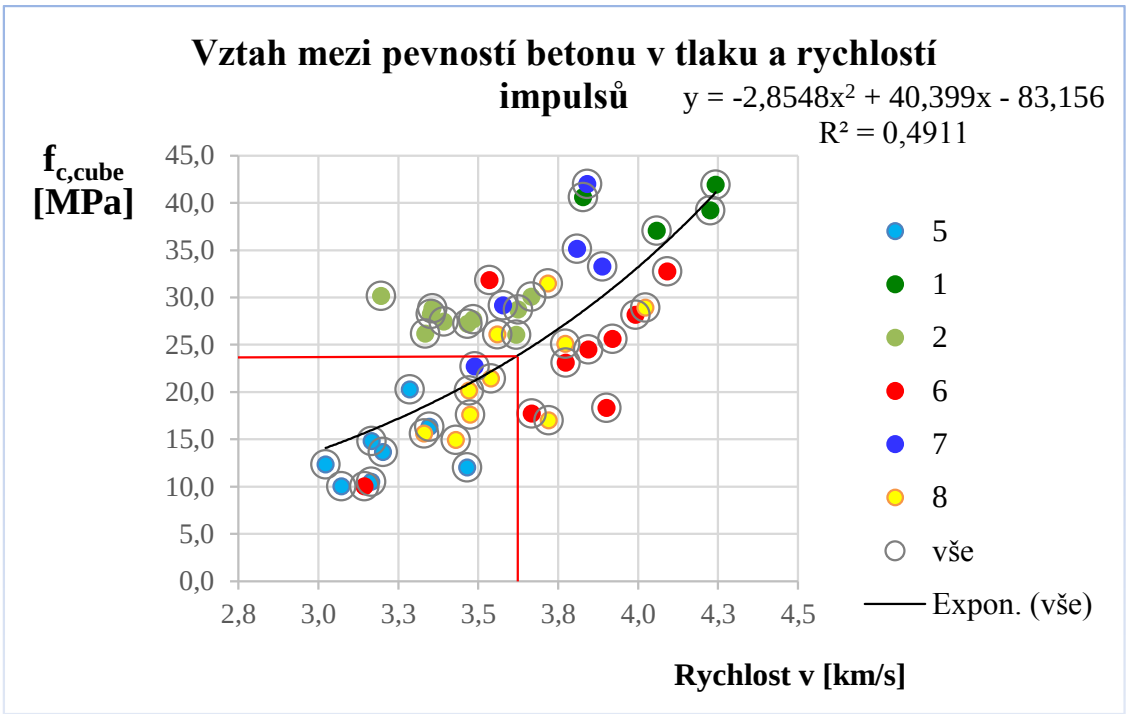


Graf č. 5 - Graf izovel; Rychlost šíření UZ vlnění sloupem

Z 6 bodů naměřených v okolí jádrového vývrtu (provedeným firmou Mostní vývoj), byla vypočtena průměrná rychlost ultrazvukových impulsů ***v,*** která byla asi 3637 m/s. Tato rychlost byla dosazena do upraveného kalibračního vztahu získaného z laboratorního měření, pomocí něhož jsme získali odhadem hodnotu krychelné pevnosti v tlaku.

Tab. 10 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 2, 3, 4,7, 8 a 9 rastru

Rychlost šíření UZ impulsů [m/s]						
v1	v2	v3	v4	v5	v6	**v**
3715	3604	3596	3622	3598	3685	**3637**



Graf č. 6 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z 1. sloupu 4. podpěry.

Krychelná pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ byla odečtena z upraveného kalibračního vztahu a je přibližně 23,7 MPa. Krychelná pevnost v tlaku $f_{c,is}$, získaná z diagnostického průzkumu firmy Mostní vývoj z destruktivních zkoušek, je v místě vývrtu 30,1 MPa.

Poměrem pevnosti v tlaku $f_{c,is}$ k pevnosti v tlaku $f_{c,cube}$ dostaneme součinitel upřesnění α [39] :

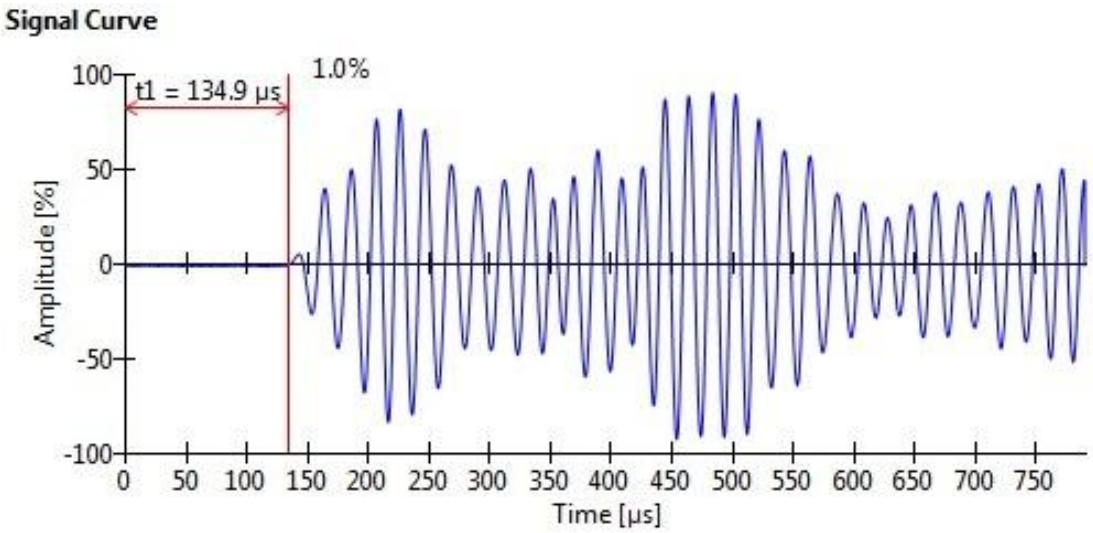
$$\alpha = \frac{fc,is}{fc,cube} = \frac{30,1}{23,7} = 1,270$$

Pro doplnění bylo také provedeno ultrazvukové měření na 3. sloupu 4. podpěry a na 2. a 3. sloupu 2. podpěry. Ze všech hodnot naměřených v blízkosti jednotlivých vývrtů byly také vypočteny průměrné rychlosti ultrazvukových impulzů *v*.

Pro 3. sloup 4. podpěry byla naměřena ze všech hodnot v místě vývrtu průměrná rychlost asi 3849 m/s.

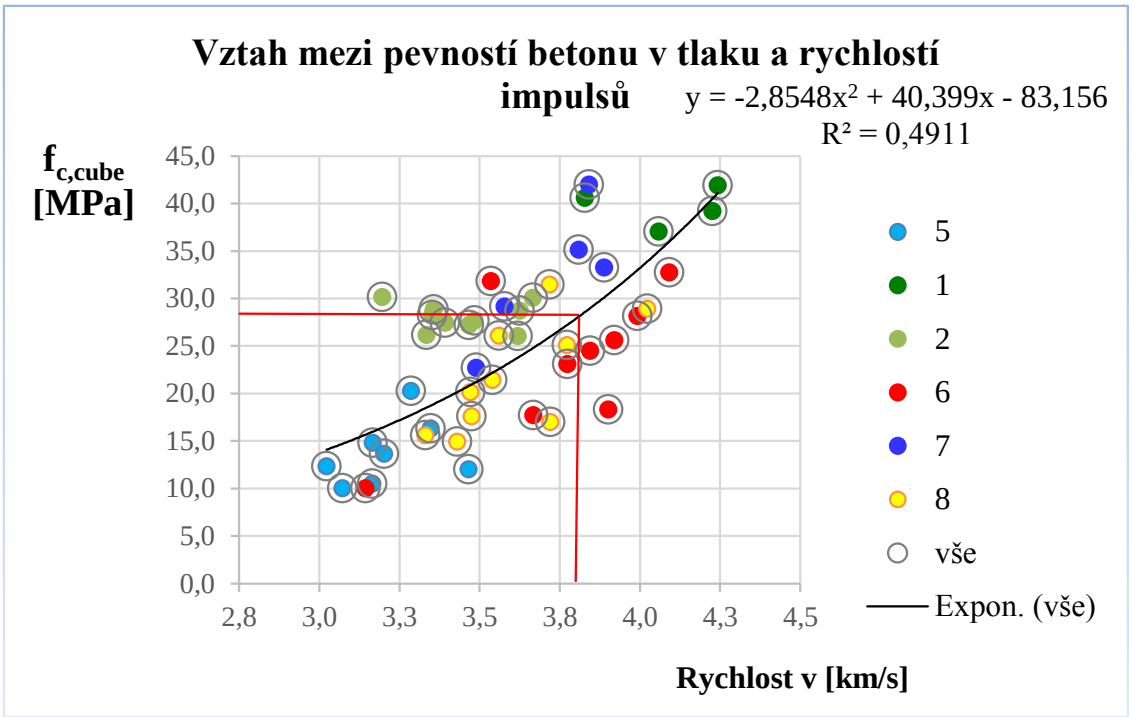
Tab. 11 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 3. sloupu 4. podpěry

Rychlost šíření UZ impulsů [m/s]					
2.1					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3813	3762	3765	3771	3782	3816
2.2					
v1	v2	v3	v4		
3961	3964	3862	3918		
2.3					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3836	3836	3856	3833	3842	3807
2.4					
v1	v2	v3	v4		
3871	3862	3900	3924		
Průměrná rychlost v [m/s]:			**3849**		



Obr. 21 - Křivka tvaru signálu ultrazvukového impulzu 3. sloupu 4. podpěry

Pro tuto hodnotu rychlosti šíření ultrazvukového vlnění u 3. sloupu 4. podpěry nebyla naměřena firmou Mostní vývoj hodnota krychelné pevnosti v tlaku $f_{c,is}$, a tak nemohl být vypočten upřesňující součinitel α. Byl tedy proveden pouze odhad krychelné pevnosti v tlaku $f_{c,cube}$ z kalibračního vztahu. Hodnota $f_{c,cube}$ je asi 28,0 MPa.

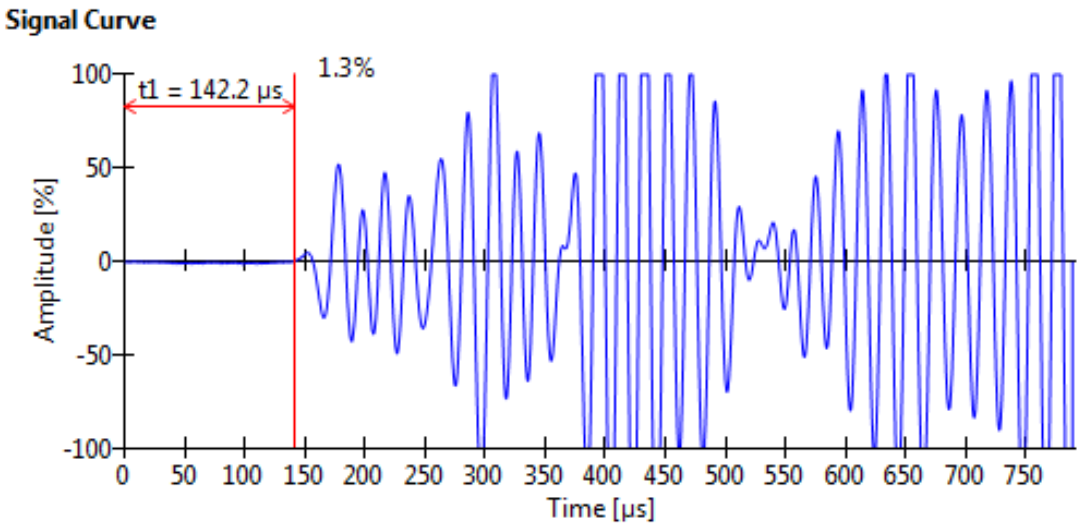


Graf č. 7 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z 3. sloupu 4. podpěry.

Na 2. sloupu 2. podpěry byla naměřena rychlost 3514 m/s.

Tab. 12 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 2. sloupu 2. podpěry

Rychlost šíření UZ impulsů [m/s]					
4.1					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3499	3484	3519	3514	3499	3501
4.2					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3492	3504	3516	3534	3559	3541
Průměrná rychlost v [m/s]:			**3514**		



Obr. 22 - Křivka tvaru signálu ultrazvukového impulzu 2. sloupu 2. podpěry

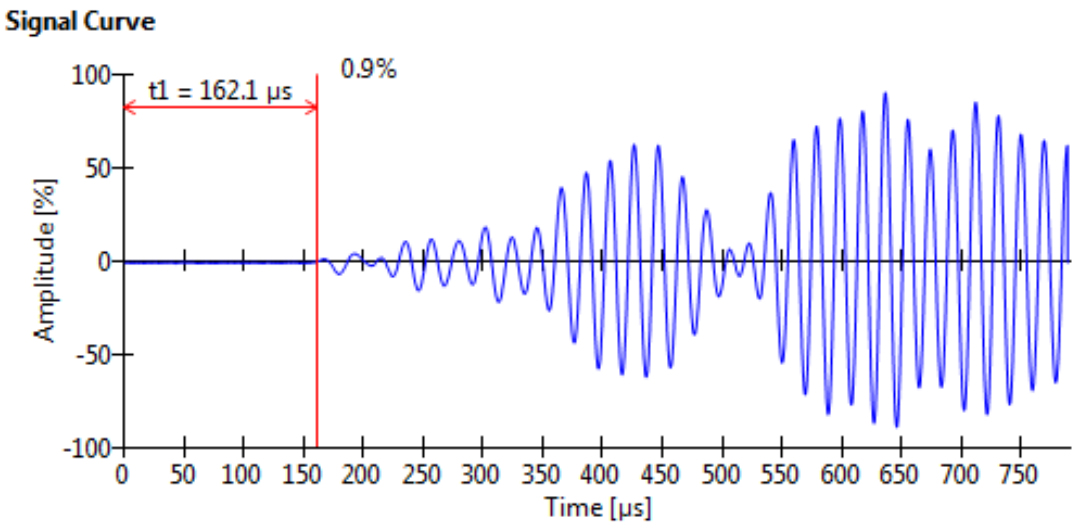
Krychelná pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ 2. sloupu 2. podpěry byla po odečtení asi 21,8 MPa. Krychelná pevnost v tlaku $f_{c,is}$ je 21,1 MPa.

Součinitel upřesnění α [39] je: $\alpha = \frac{21,1}{21,8} = 0,968$

Průměrná rychlost na 3. sloupu 2. podpěry byla cca 3250 m/s.

Tab. 13 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 3. sloupu 2. podpěry

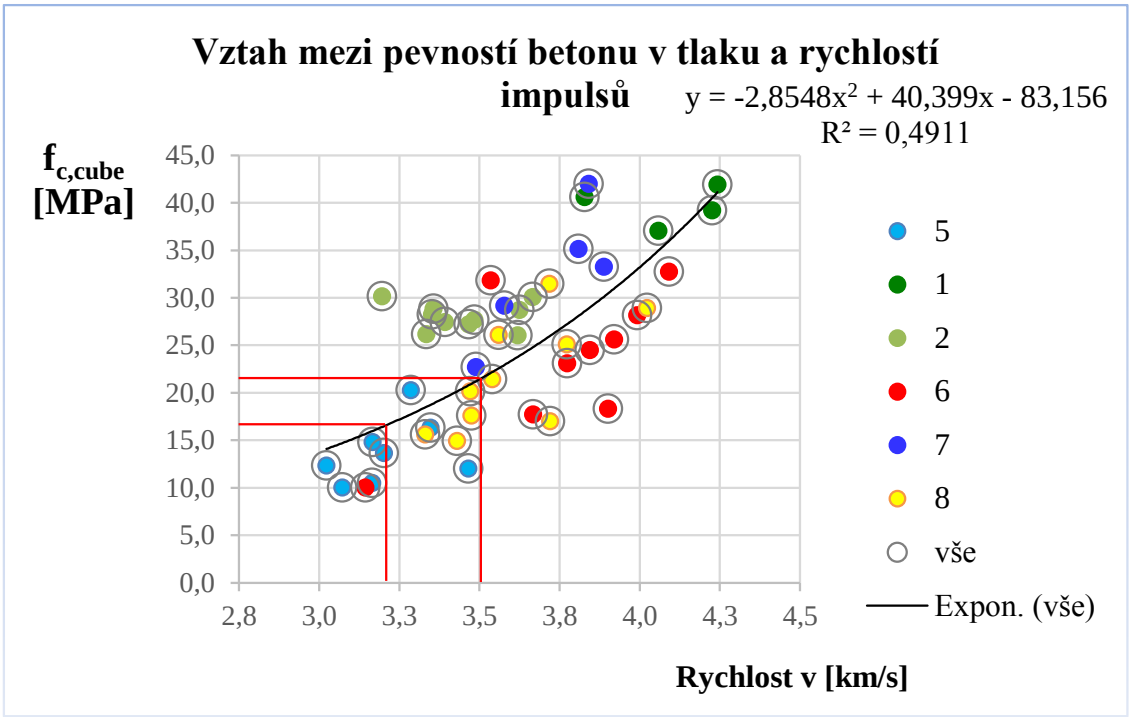
Rychlost šíření UZ impulsů [m/s]					
3.1					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3102	3085	3155	3153	3143	3131
3.2					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3360	3413	3436	3404	3388	3401
3.3					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3207	3175	3218	3199	3145	3181
3.4					
v1	v2	v3	v4	v5	v6
3238	3303	3289	3281	3296	3296
Průměrná rychlost v [m/s]:			**3250**		



Obr. 23 - Křivka tvaru signálu ultrazvukového impulzu 3. sloupu 2. podpěry

Krychelná pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ 2. sloupu 3. podpěry byla po odečtení asi 17,1 MPa. Krychelná pevnost v tlaku $f_{c,is}$ je 20,7 MPa.

Součinitel upřesnění α [39] je: $\alpha = \frac{20,7}{17,1} = 1,211$



Graf č. 8 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z 2. a 3. sloupu 2. podpěry.

5. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo ověřit možnosti použití ultrazvukové metody pro stanovení pevnosti v tlaku betonu na mostních konstrukcích.

Dnes je v České republice UZ metoda poněkud zanedbávaná a opomíjená, i přesto, že je normově podložena. Výhodou této metody na rozdíl např. od zkoušek tvrdoměrných je zkoušení vlastností betonu v celé své tloušťce konstrukce. Zkoušky tak nejsou ovlivněny vlastnostmi povrchu. Zejména u starých konstrukcí se zkarbonatovaným povrchem dává UZ metoda lepší výsledky než metody tvrdoměrné.

Kromě pevnosti v tlaku získáváme z ultrazvukových měření i informace o modulu pružnosti nebo rovnoměrnosti betonu. UZ metoda se tak může stát vynikajícím nástrojem pro diagnostiku starých konstrukcí. Jejímu novému rozšíření by měla pomoci větší dostupnost přístrojů s paměťovým osciloskopem a s počítačovým zpracováním dat. Zejména nový přístroj Pundit PL-200PE umožňuje v reálném čase vizualizovat kvalitu betonu v konstrukci a poskytnout tak lepší rozhodování např. o odběru vzorků a vůbec posouzení celé konstrukce.

V rámci teoretické části byla řešena rešerše literatury - ultrazvuková metoda, pevnost v tlaku, kalibrační vztahy, rovnoměrnost betonu a další. V rámci praktické části byla na jádrových vývrtech odebraných z 6 různých druhů betonů stanovena rychlost šíření ultrazvukového vlnění a následně i pevnost v tlaku. Z těchto hodnot byly sestaveny křivky závislosti, které byly porovnány s výsledky předchozího výzkumu a se vztahem publikovaným v Betonu TKS 3/2013, přičemž mezi výsledky této práce a výsledky předchozích výzkumů panuje poměrně přesná shoda. I tak byly zjištěny odchylky v rámci jednotlivých typů betonů, které se lišily svojí strukturou, skladbou kameniva a pórovitostí tmelu. Tato laboratorní měření potvrdila, že existují faktory, které ovlivňují pevnost betonu ve vztahu k rychlosti šíření ultrazvuku. Jedná se zejména o kamenivo a tmel. V budoucnu by stálo za průzkum lepší vyprecizování vlivů, jako je např. pórovitost tmelu. Bylo by potřeba provádět kromě standartních pevnostních zkoušek i jiné zkoušky – např. porovnání objemové hmotnosti, nasákavosti a zdánlivé pórovitosti. Podrobnější výzkum těchto faktorů bohužel bakalářská práce nemohla postihnout, a tak v ní byl pouze naznačen a zmíněn.

6. SEZNAMY

6.1. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Českomoravský beton HeidelbergCementGroup; skupina Transport beton; [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
http://www.transportbeton.cz/kvalita-a-technologie/jak-vyrabime-beton.html

[2] ASB – portal.cz; odborný stavební portál; [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/rekonstrukce-staveb/diagnostika-betonovych-konstrukci

[3] ČSN 73 0038/86 Navrhování a posuzování stavebních konstrukcí při přestavbách.

[4] ČSN EN 12390-3 ZMĚNA Z1 - Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles; Praha: Český normalizační institut, 2011

[5] ČSN ISO 13822 – 73 0038 Hodnocení existujících konstrukcí

[6] CIKRLE, P.; ANTON, O.; DANĚK, P.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; MISÁK, P., NDT Zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu CŽV., ISBN 978-80-214-4198-9, VUT v Brně FAST, Brno, 2010.

[7] PAULÍK P., BAČUVLÍK M., ŠEVČÍK P., JANOTKA I., O. „Výsledky materiálových vlastností siedmych viac ako 100 rokov starých železobetónových mostov“, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS, s.r.o., Praha, 2016

[8] Stavba. Tzb - info, stavebnictví, úspora energií, technická zařízení budov; Betonové konstrukce památek a hodnocení na základě NDT metod [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/14612-betonove-konstrukce-pamatek-a-hodnoceni-na-zaklade-uziti-ndt-metod

[9] TP 72 Diagnostický průzkum mostů PK; Ministerstvo dopravy; Pontex spol. s r.o. Bezová 1658 147 14 Praha 4 Braník

[10] Diagnostika betonových a železobetonových konstrukcí, Libor Žídek; [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
https://www.fast.vsb.cz/export/sites/fast/206/cs/resene-projekty/frvs-2009-2529/6_diagnostika_betonovych_a_zelezobetonovych_konstrukci.pdf

[11] ČSN EN 12504-2 (73 1303) Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem

[12] ČSN 73 1370 (731370) Nedestruktivní zkoušení betonu. Společná ustanovení

[13] VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ; Edice habilitační a inaugurační spisy, sv. 186 ISSN 1213 – 418X; Jiří Brožovský – Nedestruktivní zkušební metody - Nástroj pro hodnocení pevností stavebních materiálů a výrobků.
Dostupné z:
http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3056-7.pdf

[14] ČSN 73 1373 Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu

[15] ČSN 73 1371. Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: ČNI, 2011.

[16] ČSN EN12504-4 (73 1303) Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

[17] ČSN 73 1372 Rezonančná metóda skúšania betónu

[18] ČSN 73 1375 Radiometrické zkoušení objemové hmotnosti a vlhkosti

[19] ČSN 73 1376 Radiografie betonových konstrukcí a dílců

[20] ČSN 73 1370. Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení

[21] Beton university; Nedestruktivní metody zkoušení železobetonových konstrukcí; Moderní trendy v betonu III. – Provádění betonových konstrukcí; Praha, 13. 3. 2014
Dostupné z:
http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1671

[22] HOBST, L.; ADÁMEK, J.; CIKRLE, P.; SCHMID, P. Diagnostika stavebních konstrukcí - Průvodce předmětem. Brno: FAST VUT v Brně, 2005.

[23] CIKRLE, P.; KOCÁB, D.; POSPÍCHAL, O., Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS, s.r.o., Praha, 2013

[24] ELUC, Elektronická učebnice; [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1673

[25] ANTON, O. Základy zkušebnictví. Učební texty Vysokých škol. Brno: CERM s.r.o Brno, 2002. ISBN: 80-214-2079- 0.

[26] ČSN 73 1380 (731380) Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury

[27] ČSN EN 12371. Zkušební metody přírodního kamene – stanovení mrazuvzdornosti

[28] Zkušebnictví a technologie – cvičebnice; Kolektiv autorů; Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno.

[29] Pundit PL – 200, Operating Instructions; Subject to change. Copyright c 2013 by Proceq SA, Schwerzenbach. All rights reserved. 820 327 01E ver 10 2013

[30] Stavba. Tzb-info, stavebnictví, úspora energií, technická zařízení budov; Ověření rovnoměrnosti betonu použitého pro stanovení vlivu délky ošetřování na kvalitu betonu [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/9834-overeni-rovnomernosti-betonu-pouziteho-pro-stanoveni-vlivu-delky-osetrovani-na-kvalitu-betonu

[31] Stavba. Tzb-info, stavebnictví, úspora energií, technická zařízení budov; Dynamické a statické moduly pružnosti betonu, [online]. [cit. 2017-05-20].
Dostupné z:
http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu

[32] SCHMID,P. a kol.: Základy zkušebnictví, skripta, VUT v Brně, CERM s.r.o. Brno 2001.

[33] ČSN 73 2011. Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí, Praha: Český normalizační institut, 2012

[34] Ústav SZK, Rovnoměrnost betonu konstrukce, In: *szk.fce.vutbr.cz*, [online]. [cit.2017-05-20].

Dostupné z:
http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/BI03/M_C1_2016_N%C3%A1vod.pdf

[35] ČSN EN 13791. Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích. Praha: ČNI, 2007.

[36] Ústav SZK, Výsledky měření na jádrových vývrtech z existujících konstrukcí z databáze, CIKRLE P.

[37] Firma Mostní vývoj, s.r.o., DIAGNOSTIKA, B. Martinů 137, 602 00 Brno-2, Ing. Jan Kryštof; Základní diagnostický průzkum; archivní číslo KR 772/2009

[38] Mapy, In: *google.cz/map*[online].[cit. 2017-05-20]. Dostupné z:
https://www.google.cz/maps/

[39] Ústav SZK, Pevnost v tlaku betonu na vývrtech, In: *szk.fce.vutbr.cz*, [online]. [cit.2017-05-20].

Dostupné z:
http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/BI03/M_C2_2016_N%C3%A1vod.pdf

[40] Ústav SZK, Pevnost v tlaku betonu na vývrtech, In: *szk.fce.vutbr.cz*, [online]. [cit.2017-05-20].
Dostupné z:
http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/BI52/2016/ESF_C2_N%C3%A1vod_v%C3%BDvrt.pdf

6.2. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Kvalita tradičního betonu podle rychlosti šíření ultrazvuku……....21

Tab. 2 - Hodnoty součinitele $\kappa_{c,cy}$…….. 25

Tab. 3 - Hodnoty součinitelů štíhlosti $\kappa_{cy,cu}$ používané pro převod válcové pevnosti v tlaku na pevnost krychelnou……...26

Tab. 4 - Maximální hodnoty variačního součinitele V_x a rozdílů sousedních míst „Δ“…….27

Tab. 5 - Popis kameniva sady 2…….33

Tab. 6 - Základní charakteristiky sady č. 2……..36

Tab. 7 - Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 2……37

Tab. 8 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 2……38

Tab. 9 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č . 2……..38

Tab. 10 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 2,3,4,7,8 a 9 rastru…….48

Tab. 11 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 3. sloupu 4. Podpěry…….50

Tab. 12 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 2. sloupu 2. Podpěry…….52

Tab. 13 - Výsledky UZ rychlostí v bodech 3. sloupu 2. Podpěry…….52

6.3. SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 - Kalibrační vztah mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z existujících konstrukcí……..41

Graf č. 2 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z existujících konstrukcí……42

Graf č. 3 - Upřesněný vztah závislosti pro 2 skupiny bodů jednotlivých sad……43

Graf č. 4 – Porovnání výsledků získaných z existujících konstrukcí doplněný o hodnoty z laboratorního měření……44

Graf č. 5 - Graf izovel, Rychlost šíření UZ vlnění sloupem..……48

Graf č. 6 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z 1. sloupu 4. podpěry……..49

Graf č. 7 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z 3. sloupu 4. podpěry……51

Graf č. 8 - Upřesněný vztah závislosti mezi pevností betonu v tlaku a rychlostí impulsů získaný na vývrtech z 2. a 3. sloupu 2. podpěry…….54

6.4. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Schéma postupu prací při hodnocení stavu konstrukce…….15

Obr. 2 - Zvuk z pohledu slyšitelnosti……..18

Obr. 3, 4, 5 – Možnosti umístění sond a způsoby prozvučování…….20

Obr. 6 - Vliv kvality betonu na rychlost šíření a tvar impulzu UZ vlnění…….....21

Obr. 7 - Vývrt 2.1 o Ø cca 75 mm……..32

Obr. 8 - Vývrt 2.2 o Ø cca 75 mm……..32

Obr. 9 - Vývrt 2.3 o Ø cca 75 mm……..32

Obr. 10 - Vývrt 2.4 o Ø cca 75 mm……32

Obr. 11 - Vývrt 2.5 o Ø cca 75 mm……32

Obr. 12 - Vývrt 2.6 o Ø cca 75 mm……32

Obr. 13 - Vývrt 2.7 o Ø cca 75 mm……33

Obr. 14 - Vývrt 2.8 o Ø cca 75 mm……33

Obr. 15 - Vývrt 2.9 o Ø cca 75 mm……33

Obr. 16 - Vývrt 2. A o Ø cca 75 mm……..33

Obr. 17 - Letecký snímek polohy zkoumaného mostu s ev. č. 602-001 na ulici Jihlavské v Brně. Převádí silnici II/602 přes silnici I/23, ulici Bítešskou……...45

Obr. 18 - Vyznačený čtvercový rast na 1. sloupu 4. podpěry…….....46

Obr. 19 - Zkoušený 1. sloup 4. podpěry……46

Obr. 20 - Přístroj Pundit PL-200PE od firmy Proceq……47

Obr. 21 - Křivka tvaru signálu ultrazvukového impulzu 3. sloupu 4. podpěry……..50

Obr. 22 - Křivka tvaru signálu ultrazvukového impulzu 2. sloupu 2. podpěry……..52

Obr. 23 - Křivka tvaru signálu ultrazvukového impulzu 3. sloupu 2. podpěry……..53

6.5. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 1…….....64
Příloha č. 2 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 5…….....65
Příloha č. 3 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 6…….....67
Příloha č. 4 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 7…….....69
Příloha č. 5 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 8…….....71
Příloha č. 6 – Popisy kameniva sad 1, 5, 6, 7 a 8…….....74
Příloha č. 7 – Základní charakteristiky sad 1, 5, 6, 7, 8…….....77
Příloha č. 8 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 1…….....64
Příloha č. 9 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 5…….....79
Příloha č. 10 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 6…….....81
Příloha č. 11 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 7…….....83
Příloha č. 12 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 8…….....85

7. PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 1

Obr.24 - Vývrt 1.1 o Ø cca 75 mm

Obr. 25 – Vývrt 1.2 o Ø cca 75 mm

Obr. 26 - Vývrt 1.3 o Ø cca 75 mm

Obr. 27 a 28 – Vývrty 1.B a 1.A o Ø cca 75 mm

Příloha č. 2 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 5

Obr. 29 - Vývrt 5.1 o Ø cca 72 mm

Obr. 30 – Vývrt 5.2 o Ø cca 72 mm

Obr. 31 - Vývrt 5.3 o Ø cca 72 mm

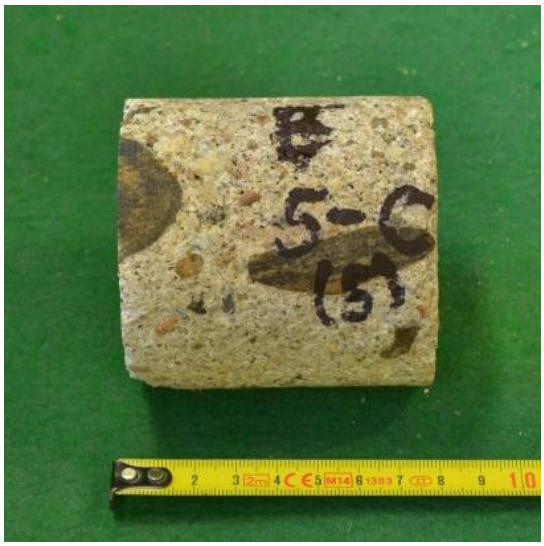
Obr. 32 – Vývrt 5.4 o Ø cca 72 mm

Obr. 33 - Vývrt 5.5 o Ø cca 72 mm

Obr. 34 – Vývrt 5.6 o Ø cca 72 mm

Obr. 35 - Vývrt 5.A o Ø cca 72 mm

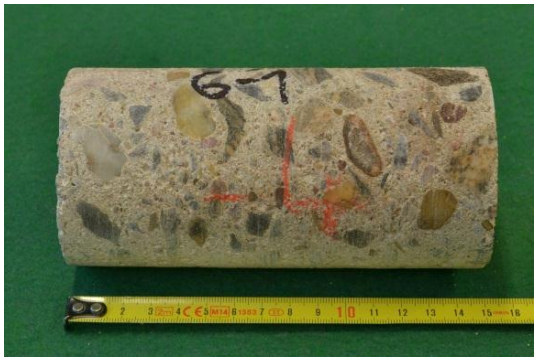
Obr. 36 – Vývrt 5.B o Ø cca 72 mm

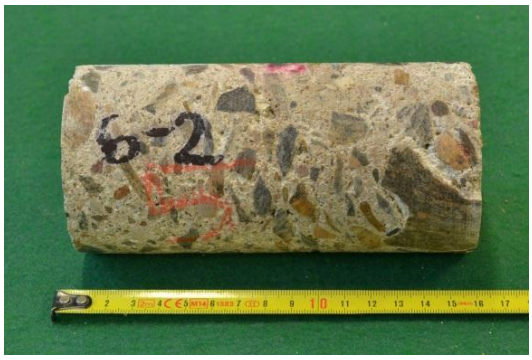


Obr. 37 - Vývrt 5.C o Ø cca 72 mm

Obr. 38 – Vývrt 5.D o Ø cca 72 mm

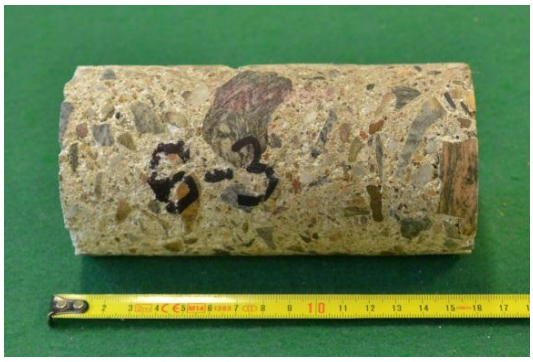
Příloha č. 3 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 6





Obr. 39 - Vývrt 6.1 o Ø cca 74 mm

Obr. 40 – Vývrt 6.2 o Ø cca 74 mm



Obr. 41 - Vývrt 6.3 o Ø cca 74 mm

Obr. 42 – Vývrt 6.4 o Ø cca 74 mm

Obr. 43 - Vývrt 6.5 o Ø cca 74 mm

Obr. 44 – Vývrt 6.A o Ø cca 74 mm

Obr. 45, 46, 47 – Vývrty 6.B, 6.C a 6.D o Ø cca 74 mm

Příloha č. 4 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 7

Obr. 48- Vývrt 7.1 o Ø cca 75 mm

Obr. 49 – Vývrt 7.2 o Ø cca 75 mm

Obr. 50 - Vývrt 7. 3 o Ø cca 75 mm

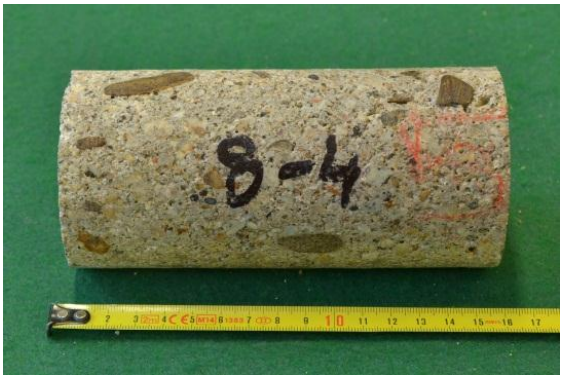
Obr. 51, 52 – Vývrty 7. A a 7. B o Ø cca 75 mm

Příloha č. 5 – Fotodokumentace vývrtů sady č. 8

Obr. 53 - Vývrt 8.1 o Ø cca 73 mm

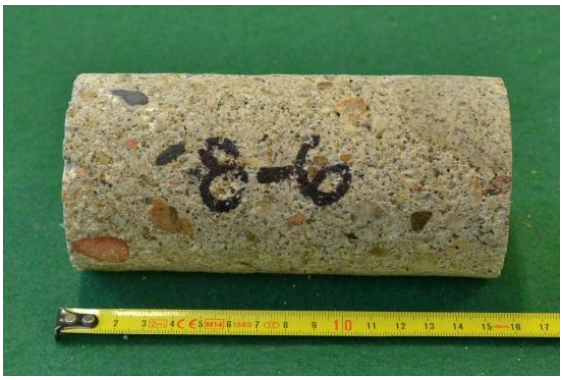
Obr. 54 – Vývrt 8.2 o Ø cca 73 mm

Obr. 55 - Vývrt 8.3 o Ø cca 73 mm



Obr. 56 – Vývrt 8.4 o Ø cca 73 mm

Obr. 57 - Vývrt 8.5 o Ø cca 73 mm



Obr. 58 – Vývrt 8.6 o Ø cca 73 mm

Obr. 59 – Vývrt 8.7 o Ø cca 73 mm

Obr. 60, 61, 62 – Vývrty 8. A, 8. B a 8. C o Ø cca 73 mm

Příloha č. 6 – Popisy kameniva sad 1, 5, 6, 7 a 8

Tab. 13 - Popis kameniva sady 1

Sada č. 1		Poznámky
1. Kamenivo:		
Druh:	drcené	
Rozmístění:	rovnoměrné	
Množství hrubého kameniva:	průměrně	
Odhad frakce:	(8)10 - 32	chybí frakce 4 - 16
Maximální velikost zrna:	0 - 55 mm	(1.1; 1.2 a 1. A - velká zrna)
2. Pórovitost:		
Velikost pórů [mm]:	2 mm	
Množství pórů:	málo	
Povrch:	hladký	
Velikost dutin [mm]:	/	
Množství dutin:	málo	

Tab. 14 - Popis kameniva sady 5

Sada č. 5		Poznámky
1. Kamenivo:		
Druh:	těžené	
Rozmístění:	nerovnoměrné	
Množství hrubého kameniva:	málo	
Odhad frakce:	0 - 32	
Maximální velikost zrna:	běžně do 40 mm (50 mm)	
2.Pórovitost:		
Velikost pórů [mm]:	běžně do 2 mm	
Množství pórů:	hodně	
Povrch:	drsný	
Velikost dutin [mm]:	ojediněle do 10 mm	
Množství dutin:	vyšší	

Tab. 15 - Popis kameniva sady 6

Sada č. 6		Poznámky
1. Kamenivo:		
Druh:	drcené	
Rozmístění:	částečně nerovnoměrné	
Množství hrubého kameniva:	průměrně	
Odhad frakce:	0 - 22(32)	
Maximální velikost zrna:	běžně do 35 mm	
2.Pórovitost:		
Velikost pórů [mm]:	běžně do 2 mm	beton se vyštipuje, vypadá, že je horší kvality (6.2, 6.3, 6.5, 6.B, 6.D)
Množství pórů:	vyšší (6.3, 6.2)	
Povrch:	drsný	
Velikost dutin [mm]:	ojediněle do 10 mm	
Množství dutin:	vyšší	

Tab. 16 - Popis kameniva sady 7

Sada č. 7		Poznámky
1. Kamenivo:		
Druh:	těžené	ve vzorcích 7.3 zrno 60 mm; ve vzorcích 7A, 7C zrna 40 mm
Rozmístění:	nerovnoměrné	
Množství hrubého kameniva:	průměrně	
Odhad frakce:	0 - 32	
Maximální velikost zrna:	40(60) mm	
2.Pórovitost:		
Velikost pórů [mm]:	do 3 mm	
Množství pórů:	ojediněle do 5 mm; jinak do 2 mm	beton bude spíše nižší kvality, ale nevypadá úplně špatně
Povrch:	drsný	
Velikost dutin [mm]:	běžně do 2 mm	
Množství dutin:	málo	

Tab. 17 - Popis kameniva sady 8

Sada č. 8		Poznámky
1. Kamenivo:		
Druh:	těžené	ve vzorku 8.6 zrno 60 mm
Rozmístění:	nerovnoměrné	
Množství hrubého kameniva:	málo	
Odhad frakce:	0 - 32	
Maximální velikost zrna:	běžně do 35 mm (60 mm)	
2.Pórovitost:		
Velikost pórů [mm]:	běžně do 2 mm	
Množství pórů:	hodně	
Povrch:	hladší než u sady 7	spíše nedostatek jemných částic
Velikost dutin [mm]:	vyšší	
Množství dutin:	Ojediněle do 8 mm	

Příloha č. 7 – Základní charakteristiky sad 1, 5, 6, 7, 8

Tab. 18 - Základní charakteristiky sady č. 1

Označení tělesa	Průměr d [mm]	Výška h [mm]	Hmotnost m [g]	Objem. hmotnost ρ[kg/m³]
1.1	74,6	136,9	1521,2	2369
1.2	74,5	148,9	1417,6	2346
1.3	74,5	149,0	1457,3	2242
1.A	74,4	73,2	739,9	2325
1.B	73,9	74,8	748,8	2338

Tab. 19 - Základní charakteristiky sady č. 5

Označení tělesa	Průměr d [mm]	Výška h [mm]	Hmotnost m [g]	Objem. hmotnost ρ[kg/m³]
5.1	72,3	152,2	1347,6	2157
5.2	72,3	153,1	1401,2	2229
5.3	72,1	153,4	1332,3	2127
5.4	72,2	152,8	1288,5	2060
5.5	72,3	152,6	1339,9	2139
5.6	72,3	152,7	1329,2	2120
6.A	72,4	76,0	689,1	2202
5.B	72,2	76,6	650,6	2074
5.C	72,3	75,4	641,9	2074
5.D	72,4	75,2	650,9	2102

Tab. 20 - Základní charakteristiky sady č. 6

Označení tělesa	**Průměr** d [mm]	**Výška** h [mm]	**Hmotnost** m [g]	**Objem. hmotnost** ρ[kg/m³]
6.1	73,4	152,0	1464,7	2276
6.2	73,9	153,9	1461,2	2216
6.3	74,2	152,1	1378,5	2079
6.4	73,8	153,5	1493,4	2278
6.5	74,3	154,2	1429,2	2137
6.A	73,9	75,1	706,7	2193
6.B	74,3	76,1	707,4	2143
6.C	73,6	75,8	724,2	2243
6.D	74,2	76,3	752,3	2284

Tab. 21 - Základní charakteristiky sady č. 7

Označení tělesa	**Průměr** d [mm]	**Výška** h [mm]	**Hmotnost** m [g]	**Objem. hmotnost** ρ[kg/m³]
7.1	74,2	153,6	1444,8	2196
7.2	74,4	152,3	1508,9	2283
7.3	74,6	153,7	1467,0	2186
7.A	74,2	74,7	735,6	2278
7.B	74,5	75,3	751,2	2289
7.C	75,0	75,4	737,2	2215

Tab. 22 - Základní charakteristiky sady č. 8

Označení tělesa	**Průměr** d [mm]	**Výška** h [mm]	**Hmotnost** m [g]	**Objem. hmotnost** ρ[kg/m³]
8.1	72,5	151,8	1306,5	2084
8.2	72,5	152,0	1233,5	1954
8.3	73,0	153,0	1302,3	2036
8.4	72,4	154,2	1400,1	2205
8.5	72,3	153,3	1367,5	2170
8.6	72,4	152,9	1320,9	2098
8.7	72,3	154,2	1313,8	2073
8. A	72,4	74,5	637,4	2083
8.B	72,3	75,3	651,3	2105
8.C	72,4	75,0	667,5	2164

Příloha č. 8 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 1

Tab. 23 - Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 1

Označení tělesa	Rychlost šíření UZ vlnění				Mezní síla
	v [m/s]				F [kN]
	"Rychlost v1"	"Rychlost v2"	"Rychlost v3"	Výsledná rychlost **v**	
1.1	4239	4149	4292	4227	151,3
1.2	4255	4231	4243	4243	158,0
1.3	4092	4026	4059	4059	139,8
1.A	3830	3640	3713	3727	270,0
1.B	3815	3795	3795	3828	178,0
Průměr				**4017**	

Tab. 24 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 1

Označení tělesa	Pevnost betonu v tlaku fc [MPa]	Dynamický modul pružnosti E [N/mm²]			
		Edyn 1	Edyn 2	Edyn 3	Výsledný **Edyn**
1.1	34,6	38317	36708	39283	38103
1.2	36,3	38231	37798	38013	38014
1.3	32,0	33788	32701	33238	33242
1.A	62,1	30697	27719	28856	29091
1.B	41,6	30622	31581	30312	30838

Tab. 25 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č. 1

Označení tělesa	Maximální mezní síla	Štíhlost	Koeficient štíhlosti	Koeficient průměru	Válcová pevnost v tlaku [MPa]	Koeficient krychelný	Krychelná pevnost v tlaku
	F[kN]	λ	$\kappa_{c,cy}$	$\kappa_{cy,\,d}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cube}$ [MPa]
1.1	151,3	1,836	0,98	0,93	31,5	1,242	39,2
1.2	158,0	2,000	1,00	0,93	33,8	1,241	41,9
1.3	139,8	1,998	1,00	0,93	29,8	1,244	37,0
1.A	270,0	0,983	0,85	0,93	49,1	1,204	59,1
1.B	178,0	1,012	0,85	0,93	32,9	1,234	40,6
Průměr							**43,6**

Příloha č. 9 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 5

Tab. 26 - Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 5

Označení tělesa	Rychlost šíření UZ vlnění v [m/s]				Mezní síla F [kN]
	"Rychlost v1"	"Rychlost v2"	"Rychlost v3"	Výsledná rychlost **v**	
5.1	3177	3238	3191	3202	48,0
5.2	2477	2450	2434	2454	33,8
5.3	3455	3486	3455	3465	42,2
5.4	2029	2164	2538	2244	25,8
5.5	3077	3052	3089	3073	35,3
5.6	3181	3188	3129	3166	37,0
6.A	3234	3348	3276	3286	82,5
5.B	3219	3076	3205	3167	59,9
5.C	3142	3016	2911	3023	50,3
5.D	3403	3298	3342	3348	67,1
Průměr				**3043**	

Tab. 27 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 5

Označení tělesa	Pevnost betonu v tlaku fc [MPa]	Dynamický modul pružnosti E [N/mm²]			
		Edyn 1	Edyn 2	Edyn 3	Výsledný **Edyn**
5.1	11,7	19597	20354	19761	19904
5.2	8,2	12313	12039	11887	12080
5.3	10,3	22852	23269	22852	22991
5.4	6,3	7633	8683	11942	9419
5.5	8,6	18219	17929	18367	18172
5.6	9,0	19311	19392	18683	19128
6.A	20,0	20731	22218	21271	21407
5.B	14,6	19339	17668	19178	18729
5.C	12,3	18420	16976	15817	17071
5.D	16,3	21907	20583	21135	21208

Tab. 28 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č. 5

Označení tělesa	Maximální mezní síla	Štíhlost	Koeficient štíhlosti	Koeficient průměru	Válcová pevnost v tlaku [MPa]	Koeficient krychelný	Krychelná pevnost v tlaku
	F[kN]	λ	$\kappa_{c,cy}$	$\kappa_{cy,d}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cube}$ [MPa]
5.1	48,0	2,105	1,00	0,93	10,9	1,252	13,6
5.2	33,8	2,118	1,00	0,93	7,6	1,252	9,6
5.3	42,2	2,128	1,00	0,93	9,6	1,252	12,0
5.4	25,8	2,116	1,00	0,93	5,9	1,252	7,3
5.5	35,3	2,111	1,00	0,93	8,0	1,252	10,0
5.6	37,0	2,112	1,00	0,93	8,4	1,252	10,5
6.A	82,5	1,050	0,87	0,93	16,2	1,251	20,2
5.B	59,9	1,061	0,87	0,93	11,8	1,252	14,8
5.C	50,3	1,043	0,86	0,93	9,8	1,252	12,3
5.D	67,1	1,039	0,86	0,93	13,0	1,252	16,3
Průměr							**12,7**

Příloha č. 10 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 6

Tab. 29 - Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 6

Označení tělesa	Rychlost šíření UZ vlnění v [m/s]				Mezní síla F [kN]
	"Rychlost v1"	"Rychlost v2"	"Rychlost v3"	Výsledná rychlost **v**	
6.1	3999	3906	3857	3921	93,3
6.2	3639	3630	3736	3668	65,1
6.3	3171	3100	3164	3145	37,3
6.4	3945	3885	3875	3902	67,2
6.5	3506	3579	3522	3535	118,6
6.A	3912	3774	3851	3846	105,0
6.B	3750	3768	3806	3775	100,0
6.C	4143	4098	4033	4092	140,1
6.D	3972	4014	3993	3993	121,8
Průměr				**3764**	

Tab. 30 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 6

Označení tělesa	Pevnost betonu v tlaku fc [MPa]	Dynamický modul pružnosti E [N/mm²]			
		Edyn 1	Edyn 2	Edyn 3	Výsledný **Edyn**
6.1	22,0	32758	31260	30472	31497
6.2	15,2	26403	26278	27831	26837
6.3	8,6	18809	17982	18731	18507
6.4	15,7	31906	30944	30788	31212
6.5	27,4	23634	24631	23850	24039
6.A	24,5	30191	28104	29269	29188
6.B	23,1	27114	27384	27934	27477
6.C	32,9	34654	33908	32835	33799
6.D	28,2	32434	33121	32775	32777

Tab. 31 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č. 6

Označení tělesa	Maximální mezní síla	Štíhlost	Koeficient štíhlosti	Koeficient průměru	Válcová pevnost v tlaku [MPa]	Koeficient krychelný	Krychelná pevnost v tlaku
	F[kN]	λ	$\kappa_{c,cy}$	$\kappa_{cy,d}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cube}$
6.1	93,3	2,069	1,00	0,93	20,5	1,250	25,6
6.2	65,1	2,084	1,00	0,93	14,1	1,252	17,7
6.3	37,3	2,050	1,00	0,93	8,0	1,252	10,0
6.4	67,2	2,081	1,00	0,93	14,6	1,252	18,3
6.5	118,6	2,076	1,00	0,93	25,5	1,248	31,8
6.A	105,0	1,016	0,86	0,93	19,6	1,249	24,5
6.B	100,0	1,024	0,86	0,93	18,5	1,249	23,1
6.C	140,1	1,030	0,86	0,93	26,3	1,243	32,7
6.D	121,8	1,028	0,86	0,93	22,6	1,247	28,1
Průměr							**23,5**

Příloha č. 11 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 7

Tab. 32 - Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 7

Označení tělesa	Rychlost šíření UZ vlnění				Mezní síla
	v [m/s]				F [kN]
	"Rychlost v1"	"Rychlost v2"	"Rychlost v3"	Výsledná rychlost **v**	
7.1	3500	3492	3476	3489	84,2
7.2	3806	3816	3806	3809	131,4
7.3	3575	3575	3584	3578	109,7
7.A	3809	3848	3868	3841	186,3
7.B	3922	3862	3881	3888	147,5
7.C	4627	4463	4599	4563	119,0
Průměr				**3861**	

Tab. 33 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 7

Označení tělesa	Pevnost betonu v tlaku fc [MPa]	Dynamický modul pružnosti E [N/mm²]			
		Edyn 1	Edyn 2	Edyn 3	Výsledný **Edyn**
7.1	19,5	24208	24098	23878	24061
7.2	30,3	29764	29914	29764	29814
7.3	25,1	25140	25140	25258	25180
7.A	43,1	29735	30351	30667	30251
7.B	33,8	31680	30713	31030	31141
7.C	27,0	42674	39698	42155	41509

Tab. 34 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č. 7

Označení tělesa	Maximální mezní síla	Štíhlost	Koeficient štíhlosti	Koeficient průměru	Válcová pevnost v tlaku [MPa]	Koeficient krychelný	Krychelná pevnost v tlaku
	F[kN]	λ	$\kappa_{c,cy}$	$\kappa_{cy,d}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cube}$ [MPa]
7.1	84,2	2,071	1,00	0,93	18,1	1,251	22,7
7.2	131,4	2,048	1,00	0,93	28,2	1,246	35,1
7.3	109,7	2,062	1,00	0,93	23,3	1,249	29,2
7.A	186,3	1,006	0,85	0,93	34,1	1,232	42,0
7.B	147,5	1,011	0,85	0,93	26,7	1,244	33,2
7.C	119,0	1,006	0,85	0,93	21,3	1,248	26,6
Průměr							**31,5**

Příloha č. 12 – Výsledky ultrazvukových měření, měření pevnosti v tlaku a dynamických modulů pružnosti sady č. 8

Tab. 35- Výsledky měření rychlosti šíření UZ vlnění a mezní síly sady č. 8

Označení tělesa	Rychlost šíření UZ vlnění v [m/s]				Mezní síla F [kN]
	"Rychlost v1"	"Rychlost v2"	"Rychlost v3"	Výsledná rychlost **v**	
8.1	3489	3571	3562	3541	76,0
8.2	3319	3348	3326	3331	55,1
8.3	3478	3478	3470	3475	63,0
8.4	4112	3913	4047	4024	102,5
8.5	3461	3477	3477	3471	71,3
8.6	3711	3730	3720	3720	60,0
8.7	3420	3420	3450	3430	52,6
8.A	3779	3780	3760	3773	103,3
8.B	3439	3621	3621	3560	107,3
8.C	3749	3622	3786	3719	130,0
Průměr				**3604**	

Tab. 36 - Výsledky měření pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti sady č. 8

Označení tělesa	Pevnost betonu v tlaku fc [MPa]	Dynamický modul pružnosti E [N/mm²]			
		Edyn 1	Edyn 2	Edyn 3	Výsledný **Edyn**
8.1	18,4	22831	23918	23806	23517
8.2	13,4	19371	19712	19456	19513
8.3	15,1	22156	22156	22056	22123
8.4	24,9	33539	30382	32491	32137
8.5	17,3	23393	23605	23605	23535
8.6	14,6	26013	26267	26139	26140
8.7	12,8	21815	21815	22207	21945
8.A	25,1	26768	26768	26499	26678
8.B	26,1	22399	24831	24831	24021
8.C	31,6	27371	25551	27926	26949

Tab. 37 - Výsledky přepočtu válcové pevnosti v tlaku na krychelnou pevnost sady č. 8

Označení tělesa	Maximální mezní síla	Štíhlost	Koeficient štíhlosti	Koeficient průměru	Válcová pevnost v tlaku [MPa]	Koeficient krychelný	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
	F[kN]	λ	$\kappa_{c,cy}$	$\kappa_{cy,\,d}$	$f_{c,cyl}$ [MPa]	$\kappa_{cy,cu}$	$f_{c,cube}$
8.1	76,0	2,093	1,00	0,93	17,1	1,252	21,4
8.2	55,1	2,098	1,00	0,93	12,5	1,252	15,6
8.3	63,0	2,097	1,00	0,93	14,0	1,252	17,6
8.4	102,5	2,129	1,00	0,93	23,2	1,249	28,9
8.5	71,3	2,119	1,00	0,93	16,1	1,252	20,1
8.6	60,0	2,112	1,00	0,93	13,6	1,252	17,0
8.7	52,6	2,132	1,00	0,93	11,9	1,252	14,9
8.A	103,3	1,029	0,86	0,93	20,1	1,249	25,1
8.B	107,3	1,041	0,86	0,93	20,9	1,249	26,1
8.C	130,0	1,036	0,86	0,93	25,3	1,244	31,4
Průměr							**21,8**