



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**POSOUZENÍ PEVNOSTI BETONU KONSTRUKCE
KOMBINACÍ DESTRUKTIVNÍCH
A NEDESTRUKTIVNÍCH METOD**

ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF CONCRETE STRUCTURES BY A COMBINATION
OF NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Masařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

BRNO 2021



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	Dominik Masařík
Název	Posouzení pevnosti betonu konstrukce kombinací destruktivních a nedestruktivních metod
Vedoucí práce	doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Balayssac, Jean-Paul and Garnier, Vincent Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures [ISBN: 9781785482298]

Cikrle, P. a kol. Diagnostické metody ve stavebnictví, modul M01. Studijní opora, VUT v Brně FAST, 2011.

Cikrle, P. a kol. NDT zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV. VUT v Brně, 2010.

ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích. Praha: ÚNMZ, 2020.

Další platné normy ČSN, EN.

Podklady a software od firmy Proceq SA.

Zásady pro vypracování

Teoretická část:

Princip použitých metod: jádrové vývrty, ultrazvuková impulzní metoda, odrazové tvrdoměry. Přístrojové vybavení, výhody a nevýhody jednotlivých metod.

Rozbor postupů kombinujících NDT zkoušky s jádrovými vývrty podle ČSN EN 13791 a dalších norem.

Praktická část:

Provedení tvrdoměrných a ultrazvukových měření v kombinaci s destruktivními zkouškami buď na konstrukci, anebo na vzorcích betonu v množství odpovídajícím ČSN EN 13791.

Vyhodnocení výsledků kombinovaných nedestruktivních a destruktivních zkoušek pro dva odlišné postupy:

1) Zhodnocení charakteristické pevnosti v tlaku betonu neznámé konstrukce.

2) Posouzení pevnostní třídy betonu v případě pochybností o jeho kvalitě.

Tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek. Vyhodnocení rozdílů u jednotlivých postupů.

Struktura bakalářské práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kombinací destruktivních a nedestruktivních metod, včetně popisu nejmodernějších přístrojů odrazových tvrdoměrů. Dále je provedena rešerše nové normy ČSN EN 13971. V praktické části se práce zabývá měřeními na betonových tělesech pomocí nejnovějšího odrazového tvrdoměru SilverSchmidt, ultrazvukovou impulzovou metodou a zkoušek pevnosti betonu v tlaku na jednotlivých tělesech. Podle postupů uvedené v normě ČSN EN 13791 byly stanoveny pevnosti v tlaku in situ.

KLÍČOVÁ SLOVA

Destruktivní metody, nedestruktivní metody, odrazové tvrdoměry, ultrazvuková impulzová metoda, pevnost v tlaku in situ, regrese, jádrový vývrt.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is about a combination of destructive and non-destructive methods, including a description of the most modern devices of reflection hardness testers. Further on, an analysis of the new norm ČSN EN 13791 is performed. The practical part of the thesis is about measuring on concrete bodies using the latest rebound hardness tester SilverSchmidt, ultrasonic pulse method and tests of compressive strength of concrete on individual bodies. The evaluation took place on the base of established linear and quadratic regressions on the test specimens. In situ compressive strength was determined according to the procedures specified in the ČSN EN 13791 standard.

KEYWORDS

Destructive methods, non-destructive methods, rebound hardness test, ultrasonic pulse velocity, in situ compressive strength, regression, drilled core

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Dominik Masařík *Posouzení pevnosti betonu konstrukce kombinací destruktivních a nedestruktivních metod*. Brno, 2021. 75 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Posouzení pevnosti betonu konstrukce kombinací destruktivních a nedestruktivních metod zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16.11.2020

Dominik Masařík

Autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Cikrlovi, Ph.D. za jeho trpělivost a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a kamarádům.

Obsah

1	ÚVOD	10
1.1	CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	11
2	ZKOUŠENÍ BETONU V KONSTRUKCI	12
2.1	VLASTNOSTI BETONU A PŘEHLED METOD	12
2.2	PŘEHLED NOREM PRO ZKOUŠENÍ BETONU V KONSTRUKCI	13
2.3	METODY JÁDROVÝCH VÝVRTŮ	14
2.4	METODA ODRAZOVÝCH TVRDOMĚŘŮ	17
2.4.1	Original Schmidt	17
2.4.2	Schmidt OS-120 PT	19
2.4.3	Silver Schmidt	19
2.4.4	Schmidt Live a Silver Schmidt Live	21
2.4.5	Stanovení pevnosti v tlaku z tvrdoměrných zkoušek	22
2.5	ULTRAZVUKOVÁ IMPULZIVNÍ METODA	22
2.5.1	Způsoby prozvučování	24
2.5.2	Pundit PL-200	24
2.5.3	Stanovení pevnosti betonu	26
2.5.4	Stanovení vlastností betonu	27
2.6	REZONANČNÍ METODA	28
3	NOVÉ POSTUPY PRO ZKOUŠENÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ ČSN EN 13791	30
3.1	PŘEDMĚT NORMY	30
3.2	STARÉ KONSTRUKCE	30
3.2.1	Stanovení pevnosti dle jádrových vývrtů	30
3.2.2	Kombinace nepřímých metod a jádrových vývrtů	31
3.2.3	Použití nepřímých metod s nejméně 3 jádrovými vývrty	34
3.3	NOVÉ KONSTRUKCE V PŘÍPADĚ POCHYBNOSTÍ	34
3.3.1	Na základě jádrových vývrtů	34
3.3.2	Kombinace nepřímých metod a jádrových vývrtů	35
3.4	ZHODNOCENÍ POSTUPŮ Z NORMY ČSN EN 13791	37
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
4.1	VÝROBA TĚLES A MĚŘENÍ	38
4.2	TVRDOMĚRNÉ ZKOUŠENÍ BETONU	39
4.2.1	Měření sloupů a těles	39
4.3	ULTRAZVUKOVÉ MĚŘENÍ	45
4.3.1	Stanovení dynamického modulu	45
4.3.2	Měření rychlost impulzu na betonových sloupech	46
4.3.3	Vyhodnocení nedestruktivních metod	48
4.4	ZKOUŠKY JÁDROVÝCH VÝVRTŮ	49
4.4.1	Odběr jádrových vývrtů	49
4.4.2	Ultrazvuková a rezonanční metoda na jádrových vývrtech	50

4.4.3	Stanovení pevnosti v tlaku na tělesech.....	55
4.5	VYHODNOCENÍ PODLE NORMY ČSN EN 13791.....	59
4.5.1	Stanovení pevnosti na základě jádrových vývrtů.....	59
4.5.2	Kombinace nepřímých metod a jádrových vývrtů.....	61
4.5.3	Odhad nejslabších míst pomocí nepřímých zkoušek.....	66
5	ZÁVĚR.....	68
6	BIBLIOGRAFIE	70
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK	75

1 Úvod

Díky intenzivnímu rozvoji stavebnictví od 20. století se všude kolem nás nachází velké množství stavebních objektů postavených z betonu. Mnoho těchto nových i starých konstrukcí slouží bezproblémově a není potřeba je zkoumat. Ovšem existuje celá řada těchto konstrukcí, u nichž je zapotřebí zjistit jejich současný stav. Z hlediska bezpečnosti konstrukce jde především o stanovení vlastností betonu a určení množství výztuže včetně její polohy.

Zkoušení betonových konstrukcí se provádí např. v okamžiku vzniku poruchy, na požadavek vlastníka nebo určeného úřadu, při změně účelu užívání objektu, pokud v okolí probíhá stavební činnost např. stavba tunelu nebo po působení zemětřesení. U nových konstrukcí jsou většinou k dispozici zkušební tělesa, protokoly o zkouškách a kontrolní zkušební plány. I zde může být kvalita betonu přímo v konstrukci rozdílná oproti počátečnímu návrhu v důsledku zrání betonu, hutnění nebo nedodání betonové směsi v předepsané kvalitě. Zejména kvůli těmto náležitostem je potřeba zjišťovat vlastnosti betonu přímo v konstrukci.

Pro zjištění vlastností betonu zatvrdlém v konstrukci se používají dva druhy metod. Jsou to metody přímé (destruktivní) nebo nepřímé (nedestruktivní). K přímým metodám patří vždy odběr vzorku ze zkoumané konstrukce. Nejeфекtivnější metoda je odběr vzorku formou jádrových vývrtů. Nepřímé metody jsou normalizovány pouze dvě. Jedná se o metodu odrazových tvrdoměrů většinou typu Schmidt anebo ultrazvukovou průchodovou metodu se dvěma sondami. Podstatou těchto zkoušek je stanovení regresních vztahů mezi přímými a nepřímými metodami.

Dosavadní normy pro zkoušení betonových konstrukcí nebyly přesné. V minulosti se používal systém dvojího testování. Zkoušení probíhalo podle normy ČSN z 80. let např. 73 2011. Jedná se o nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí, které se hodně zaměřovaly na nepřímé metody a upřesňovaly se pomocí malého počtu jádrových vývrtů. Po roce 2000 přichází Evropské normy, které více upřednostňovaly metody přímé a metody nepřímé zanedbávaly,

Situace se začíná měnit v roce 2020, kdy vychází nová norma ČSN EN 13 791 [1], která je aktuálně pouze v anglickém jazyce. Tato norma výrazným způsobem mění přístup k vyhodnocení vlastností betonových konstrukcí. V první řadě od sebe odděluje dva základní případy, kdy jeden z nich souvisí s vyhodnocením neznámé pevnostní třídy staré konstrukce. Druhý případ je cílený na nové konstrukce, u nichž došlo k závažným pochybnostem o kvalitě betonu. Dále jsou uvedeny definice velikosti zkušebních oblastí a počet zkušebních míst tak, aby lépe statisticky

vyhovovaly. Stále je základem zkoušení na jádrových vývrtech, ale v případě větších konstrukcí získávají větší význam zkoušky nepřímé, jejichž pomocí lze zlepšit statistické množství výsledků zkoušek. Uplatní se zde zkoušky tvrdoměrné, ale vzrůstá význam metody ultrazvukové právě proto, že je čistě nedestruktivní a můžeme udělat velký počet zkušebních míst. Výhodou je, že se u starších konstrukcí nemusí povrch brousit až na strukturu betonu, jak je to u metod odrazových tvrdoměrů [2].

1.1 Cíl bakalářské práce

Cílem bakalářské práce je seznámení se s novými postupy dle normy ČSN EN 13 791 a uvést je do stavební praxe na příkladu, kde bude provedeno vyhodnocení podle různých kritérií, jak pomocí jádrových vývrtů, tak pomocí kombinace jádrových vývrtů v korelaci se zkouškami nepřímými. Na základě nepřímých zkoušek se odeberou vzorky na místě, kde se kvalita betonu jeví jako nejhorší a následně se beton zatřídí podle těchto nejslabších míst. Jedná se o různé postupy, které by měly vést ke stejnému cíli, a to stanovení pevnosti betonu v tlaku konstrukci.

2 Zkoušení betonu v konstrukci

2.1 Vlastnosti betonu a přehled metod

Nejčastější vlastnost, která je na betonové konstrukci zjišťována, je pevnost v tlaku. Dále můžeme zjišťovat i jiné vlastnosti jako je např. modul pružnosti (statický nebo dynamický), pevnost v tahu, pevnost v tahu povrchových vrstev včetně přídržnosti, vlastnosti povrchu, objemovou hmotnost, nasákavost, karbonataci betonu apod.

Pro zkoušení betonu zatvrdlého v konstrukci se používají dva typy metod:

- **Destruktivní metody (invazivní)**
 - jádrové vývrty,
 - odtrhové zkoušky,
 - brusné nebo vrtné metody,
 - vstřelovací metody (určování pevnosti betonu z hloubky vstřeleného hřebu)
- **Nedestruktivní metody (neinvazivní)**

Destruktivní metody zanechávají výraznou stopu na konstrukci, dokonce ji mohou i poškodit. Jedná se zejména o metodu odběru vzorku pomocí jádrového vrtání. Naopak metody nedestruktivní, do které patří například tvrdoměrná nebo ultrazvuková metoda nezanechávají žádnou stopu anebo takovou, která nemá vliv na statiku konstrukce (obroušení povrchu při tvrdoměrném zkoušení) [3] [4].

Nedestruktivní metody mají mnoholetou tradici ve strojírenství. Tyto dřívější poznatky zapříčinily široký vliv ve stavebním zkušebnictví. Vývoji metody pomohla i Švýcarská firma Proceq, která v roce 1955 vyvinula přístroj Original Schmidt pro testování pevnosti v tlaku betonu. Následně v roce 1973 uvedla přístroj Profometr, který umí lokalizovat výztuž. Firma má obrovský růst a také udává směr stavebnímu zkušebnictví [5].

Při posouzení stavební konstrukce nedestruktivní metodou nedochází k poškození anebo tak malému, že je zanedbatelné. Novodobě se také označují jako nepřímé metody (NDT). Pomocí NDT můžeme zjistit několik důležitých informací, jako jsou např. trhliny v materiálu, tloušťky materiálu a další fyzikální vlastnosti. Hlavními důvody, proč si získaly takovou oblibu je snadná ovladatelnost, variabilita a větší hospodárnost oproti destruktivním metodám.

V současnosti jsou nedestruktivní metody nedílnou součástí ve stavebnictví. Možná se ještě setkáte s lidmi, kteří vám budou tvrdit, že tyto metody jsou nepřesné a nevyplátí se je používat. Je pravdou, že v dřívějších letech nebyla technologie tak

rozvinutá jako dnes, takže obavy byly na místě. Avšak technologie také nemůže vše zachránit, takže vždy bude mít na přesnost měření vliv lidský faktor [3].

2.2 Přehled norem pro zkoušení betonu v konstrukci

Pro navrhování nových železobetonových konstrukcí existuje celá řada norem. Nejdůležitější normou je ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 2 [6]. Tyto normy, ale neřeší problematiku betonových konstrukcí, které jsou už v konstrukci.

Případy mohou být různého typu. Může se jednat o zkoušení libovolně staré konstrukce, u které je potřeba zjistit o jakou pevnostní třídu se jedná, protože není známá a je potřeba pro statický přepočít. Dále můžeme zkoušet novou konstrukci, ve které beton přímo zatvrdl a vznikly pochybnosti o kvalitě betonu v důsledku kontrolních zkoušek. U starých konstrukcí ve většině případů nemáme k dispozici zkušební tělesa a pokud jsou k dispozici, nemusí odpovídat vlastnostem betonu, který je již v konstrukci. V důsledku těchto případů používáme diagnostické metody.

Tuto problematiku řeší Technické normy. U nás v současnosti existuje dvojí, v podstatě až trojí, systém norem pro zkoušení betonu v konstrukci. Základní normou, ze které se vychází je norma ČSN EN 13791: *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*, 2020 [1]. Na tuto normu jsou navázány zkušební postupy ČSN EN 12504-1 až 12504-4.:

ČSN EN 1992-1-1 (731201): *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby* [6].

ČSN EN 206 +A1 (732403): *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda* [7].

ČSN EN 12504-1 (73 1303): *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*, 2021 [8].

ČSN EN 12504-2 (73 1303): *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*, 2013 [9].

ČSN EN 12504-3 (73 1303): *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 3: Stanovení síly na vytržení*, 2005 [10].

ČSN EN 12504-4 (73 1303): *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*, 2005 [11].

ČSN 73 2011 (73 2011): *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*, 2012 [12].

Kromě těchto norem existuje systém ČSN ISO 13822 (73 0038): *Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí*, 2015 [13]. Doplnková norma ČSN 73 0038 (730038): *Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – doplňující ustanovení*, 2019 [14].

2.3 Metody jádrových vývrtů

Jádrové vývrty jsou nejběžnější destruktivní metodou. Vzorky získáváme z konstrukce pomocí jádrového vrtáku viz Obrázek 1. Většinou jde o vrtací korunku s dělenými diamantovými segmenty. Při odběru jádrového vývrtu musí být vrták chlazen obvykle vodou, která chrání vrták před zahřátím a pomáhá odplavovat odvrtný materiál. Odebrané vzorky musí být upraveny zabroušením a koncováním. Touto problematikou se zabývá norma ČSN EN 12504-1 [8].



Obrázek 1: Jádrová souprava

Podle normy ČSN EN 13791 se jádrové vývrty upravují na poměr délky a průměru 2:1 nebo 1:1. Průměr válcových vývrtů závisí na několika faktorech. Pokud vycházíme ze základních normovaných zkušebních těles, tak zkušební válec má mít rozměry \varnothing 150 mm a výšku 300 mm. Tento rozměr je však vhodný pouze pro tělesa odlévané do formy.

Odebrání jádrového vývrtu \varnothing 150 mm z konstrukce může výrazně oslabit konstrukci a hrozí poškození výztuže. Z tohoto důvodu volíme průměr jader většinou menší.

Velikost průměru odvrtných jader závisí na těchto faktorech:

- struktura betonu (průměr vývrtu musí být třikrát větší, než je maximální velikost zrna kameniva),
- rozmístění výztuže (při odběru se musí počítat i s prořezem, jelikož tloušťka diamantového segmentu bývá $\pm 3,5$ mm, takže velikost je přibližně o 7 mm větší).

Dle nového vydání normy ČSN EN 13791 je relevantním jádrem vývrt $\geq \varnothing 75$ mm. Norma povoluje jádrové vývrty $\varnothing 50$ mm, za těchto podmínek:

- musí se zvýšit počet zkušebních těles viz Tabulka 1
- velikost zrna je ≤ 16 mm.

Požadavky na počet vývrtů o různém průměru jsou uvedeny v Tabulka 1. Kromě počtu zkušebních těles je zde uvedena i rozměrová tolerance při výrobě. Například pro vývrt o $\varnothing 50$ mm je tato tolerance ± 5 mm. V případě vývrtu menšího, jak $\varnothing 50$ mm se jedná o mikrovývrt, ale to není předmětem normy ČSN EN 13791.

Tabulka 1: Požadavky na vývrty pro dosažení výsledku zkoušky na jednom zkušebním místě.

Podmínka	Průměr jádra	Průměr jádra	
	50 mm	≥ 75 mm	
Poměr délky a průměru	Nominální 1:1 Povolený rozsah: 0,90:1 do 1,10:1,0	Nominální 2:1 Povolený rozsah: 1,95:1 do 2,05:1,0	Nominální 1:1 Povolený rozsah: 0,90:1 do 1,10:1,0
Minimální počet hodnot pevnosti v tlaku jádra pro dosažení výsledku zkoušky na zkušebním místě	3	1	1
Pevnost v tlaku in situ v místě zkoušky ($f_{c, is}$)	CLF ^c (průměr hodnot ($f_{c, 1:1 \text{ core}}$))	průměr hodnot ($f_{c, 2:1 \text{ core}}$)	CLF ^c (průměr hodnot ($f_{c, 1:1 \text{ core}}$))

Pro stanovení pevnosti in situ se jádrový vývrt převede na ekvivalentní hodnotu 2:1 pomocí faktoru délky jádra (core length factor CLF). U normálních a těžkých betonů je při přepočtu z jádra o poměru 1:1 na 2:1 hodnota součinitele CLF rovna 0,82. Tato hodnota nevychází z velkého souboru zkoušek, ale je teoreticky určena ze značení pevnostních tříd podle normy ČSN EN 206, kde pro pevnost betonu C8/10 je hodnota CLF určena $\frac{8}{10}$ tedy 0,8 a pro třídu betonu C100/115 $\frac{100}{115}$ tedy 0,87. Hodnota 0,82 byla získána z průměru všech poměrů pevnostních tříd v normě ČSN EN 206 [7] [1].

Kromě požadavků na průměr a délku jádra obsahuje norma ČSN EN 13791 ještě další požadavky na jádrové vývrty:

- vývrty se nesmí odebírat v blízkosti hran a okrajů prvků, kde beton může mít jiné vlastnosti,
- z míst extrémně vyztužených, kde hrozí poškození výztuže,
- v případě je-li vývrt odvrtný s výztuží, tato výztuž nesmí být při stanovení pevnosti v tlaku v ose nebo v její blízkosti při zatěžování (tedy rovnoběžně se směrem zatěžování),
- pokud se výztuž nachází kolmo ke směru zatěžování, můžou se testovat, ale je zapotřebí dbát na to, aby odvrtná výztuž nebyla příliš velká vzhledem k průměru jádrového vývrtu [1].

Při zkoušení jádrových vývrtů je zapotřebí dbát na správné zakončování těchto vývrtů. Používá se broušení, případně frézování a kontroluje se rovinnost ploch a rovnoběžnost stěn podle normy ČSN EN 12390-1 [15]. U zkoušení menších průměrů vývrtu je důležité sledovat způsob porušení při tlakové zkoušce, jestli ve struktuře nebylo skryté zrno kameniva velké velikosti, které by mohlo ovlivňovat výsledek zkoušky. V normě ČSN EN 12504-1 [8] jsou v obrázkové příloze uvedeny správné a nesprávné porušení válcových těles. V případě, že dojde k nesprávnému porušení materiálu např. rozštípnutí vývrtu vlivem konkávní tlačné plochy, musí být výsledek z měření vyřazen.

2.4 Metoda odrazových tvrdoměrů

V minulosti se používala řada tvrdoměrných metod. Zejména se jednalo o použití vrypových, vtiskových případně vnikajících tvrdoměrů. V současnosti se prakticky používá jen metoda odrazových tvrdoměrů typu Schmidt Obrázek 2. Tento typ tvrdoměru patentovala švýcarská firma Proceq podle návrhu Ersta Schmidta v polovině 20. století. V rámci vývoje došlo k inovaci metody např. výrobou digitálního integrovaného kladívka typu SilverSchmidt [5].

Přehled použití Schmidtových tvrdoměrů na betonu

		Rozsah tlakové síly betonu					
		1 - 5 MPa 145 - 725 psi	5 - 10 MPa 725 - 1'450 psi	10 - 30 MPa 1'450 - 4'351 psi	30 - 70 MPa 4'351 - 10'153 psi	70 - 100 MPa 10'153 - 14'504 psi	>100 MPa >14'504 psi
		Čerstvý beton Beton s velmi nízkou pevností		Standartní pevnost betonu		Vysokopevnostní beton	Vysokohodnotný beton
		SilverSchmidt Live Typ N					Uživatelem definované vlastní křivky
		SilverSchmidt Live Typ L					
		SilverSchmidt Live Typ L s hřibovou hlavici (uživatelem definovanými vlastními křivky)					
 				SilverSchmidt Live Typ N OriginalSchmidt Typ N			
				SilverSchmidt Live Typ L OriginalSchmidt Typ N			
		Schmidt OS-120PT					
		Křivky definované v manuálu pro tento rozsah	Uživatelem definované vlastní křivky				



ScreeningEagle.com | proceq.com

Obrázek 2: Přehled aktuálních tvrdoměrů [16]

2.4.1 Original Schmidt

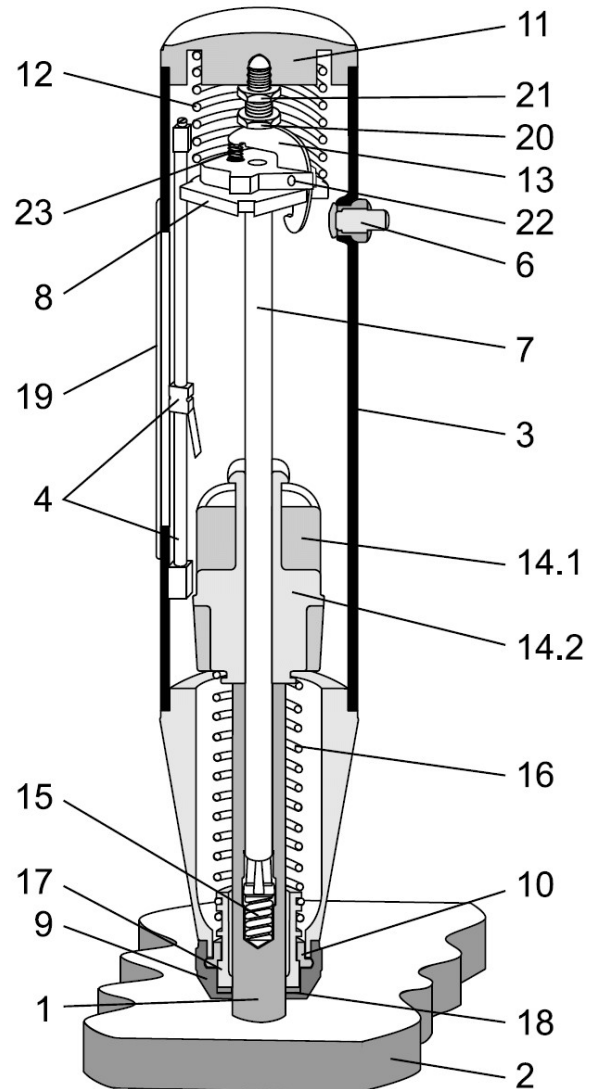
Na trhu je několik typů tvrdoměru Original Schmidt, které se liší velikostí vyvozené energie:

- typ N–s energií 2,25 [J],
- typ L–s energií 0,75 [J],
- typ M–s energií 30,00 [J].

Schmidt typu N je klasické kladívko pro zkoušení betonu. Schmidt typu L má třetinovou vstupní energii a používá se na tenkostěnné konstrukce. Pro masivní konstrukce se používá Schmidt typu M.

Zařízení fungují na mechanickém typu. Na zkoušený povrch se kolmo přiloží beran, který se postupně stlačuje dovnitř, až je vyvolán ráz. V tvrdoměru je proti beranu pružina, která působí na nárazové závaží. Ve chvíli rázu se závaží odmrští a vrátí zpět. Míra úseku je zobrazena na stupnici [17] [3].

1. Dopadový razník
2. Zkoušený povrch
3. Tělo přístroje
4. Jezdec s vodící tyčí
5. -
6. Spouštěcí tlačítko
7. Vodící tyč kladiva
8. Vodící disk
9. Víčko
10. Dvoudílný prstenec
11. Zadní kryt
12. Tlačená pružina
13. Západka
14. Závaží kladiva
15. Udržující pružina
16. Razová pružina
17. Vodící pouzdro
18. Plstěna podložka
19. Ciferník z plexiskla
20. Napínací šroub
21. Pojistná matka
22. Kolík
23. Pružina západky

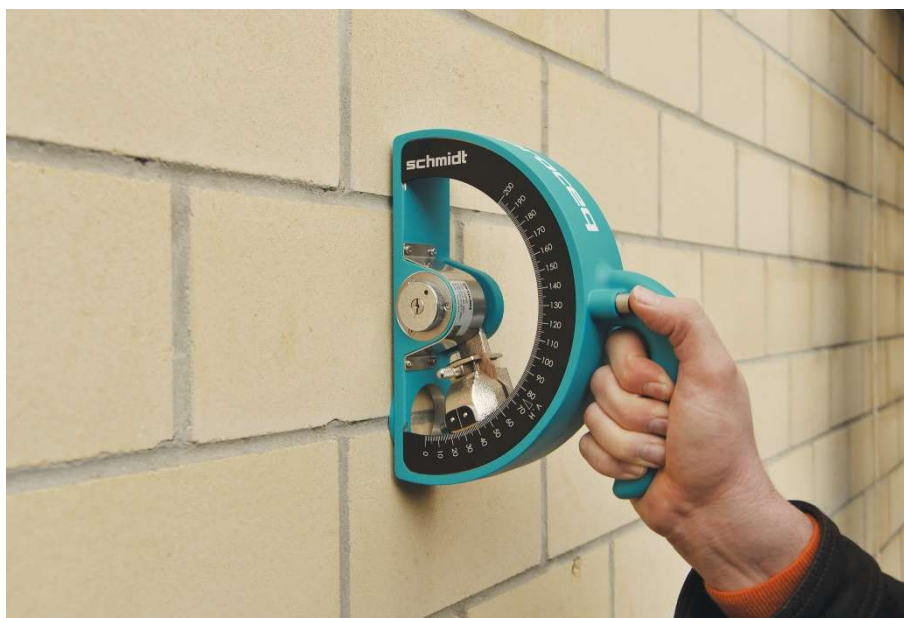


Obrázek 3: Schéma přístroje Original Schmidt [18]

2.4.2 Schmidt OS-120 PT

Tento tvrdoměr byl dříve označován jako P a PT. Typ PT se používal pro málo únosné materiály 0,5–5 MPa (případně do 10 MPa), zatímco typ P se používal pro materiály v rozsahu pevnosti 5–25 MPa. V České republice nebyly tyto přístroje nikdy normalizovány ani příliš rozšířeny. Největší slabinou zařízení byla pertinaxová brzda, která po čase požívání způsobovala potíže s aretací dosažené hodnoty.

Zařízení Schmidt OS-120 P viz Obrázek 4 umístíme na rovný očištěný povrch a zkontrolujeme, zda je kladivo ve správné poloze. Při zkoušce vyvíjíme mírný tlak a stiskem tlačítka spustíme kladívko, které narazí na zkoušený objekt. Následně se hodnota odečte ze stupnice, která je na straně oblouku. Pro výpočet potřebujeme 9 hodnot. Výsledné hodnoty odskoku vyhodnotíme pomocí křivek [19].



Obrázek 4: Schmidt OS-120 P [20]

2.4.3 Silver Schmidt

Zařízení Silver Schmidt viz Obrázek 5 přišlo na trh v roce 2007. Vyrábí se v několika modifikacích, které lze rozdělit do dvou skupin.

Z hlediska vyhodnocení:

- Typ ST – standartní verze, která má omezenou paměť na 20 měření.
- Typ PC – neomezená verze která přímo umožňuje vyhodnocení pevnosti podle uživatelem definovaných křivek.

Podle energie:

- Typ N/L – Odlišují se pouze velikostí dopadové energie. (N – normal, L-light).

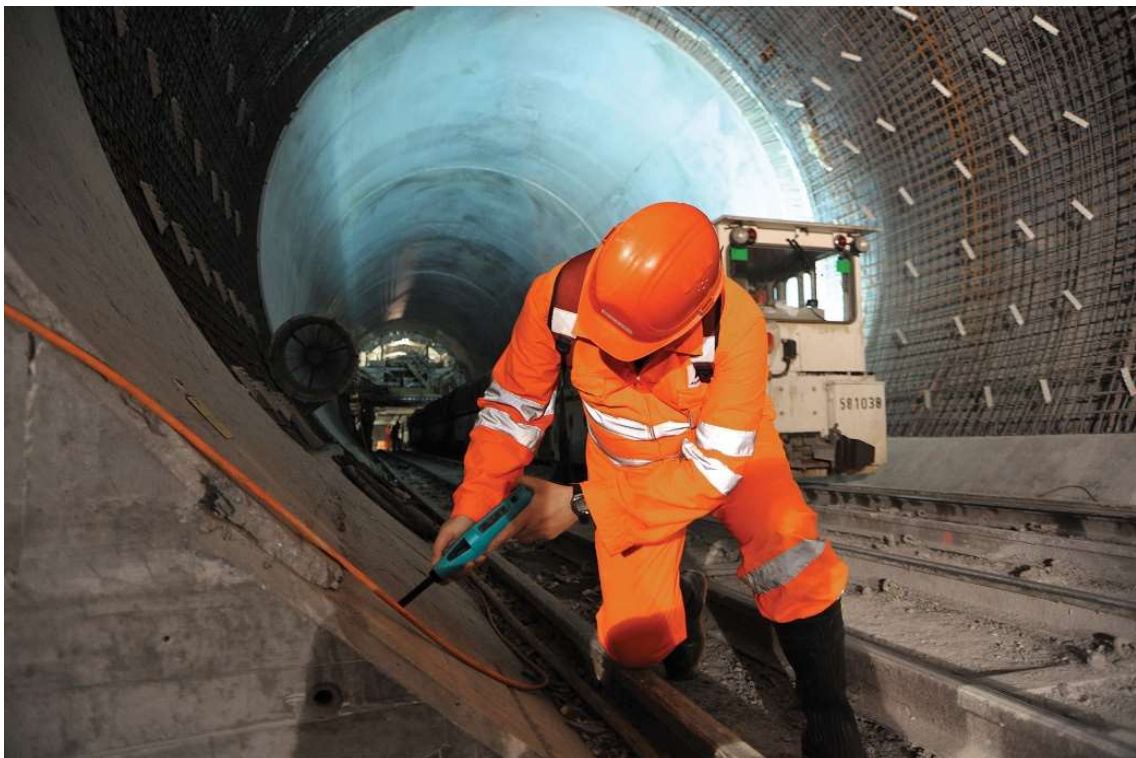
Silver Schmidt se vyznačuje svým výkonem, intuitivním ovládním, robustní konstrukcí a intuitivním ovládním oproti svým předchůdcům. Velikost odrazu měří optická čidla uvnitř přístroje. Umožňuje přímý převod na pevnost v tlaku pomocí definovaných křivek. Všechny naměřená data se automaticky ukládají. Funguje na vztahu:

$$Q = 100 \cdot \frac{\text{energie obnovená}}{\text{energie vstupní}} \quad (1)$$

Dalšími výhodami jsou:

- hodnota odskoku je nezávislá na směru nárazu,
- hodnota odskoku není ovlivněna vnitřním třením,
- díky kvalitní konstrukci vysoká odolnost proti vniknutí nečistot,
- čitelný displej,
- automatické vyhodnocení podle statistických kritérií,
- automatický převod na požadované jednotky [MPa], [N/mm²], [kg/cm²].

Rozsah měřených hodnot je u standartního Silver Schmidtu typu N nebo L v rozsahu 10-100 MPa. Pokud je zapotřebí zkoušet betony nižších pevností například beton nevyzrálý tzv. odbedňovací, pak lze použít Silver Schmidt L s hříbovým nástavcem, který je určen pro pevnosti 5–30 MPa. Používá se k určení velikosti počáteční pevnosti jako určení, kdy se může konstrukce odbednit [17] [21].



Obrázek 5: Silver Schmidt [22]

2.4.4 Schmidt Live a Silver Schmidt Live

V roce 2017 představila firma svůj nový přístroj s názvem Schmidt Live (také nese označení Silver Schmidt OS 8000 viz Obrázek 6 anebo Silver Schmidt OS 8200). Nová řada Live se liší od ostatních řad tím, že komunikuje přes platformu. Vychází z přístroje Original Schmidtu nebo Silver Schmidtu, pouze velikost odskoku měří pomocí optických čidel, jak je tomu u Silver Schmidtu.

K přístroji byla vyvinuta speciální aplikace, která podporuje operační systém iOS a také Android. Aplikace není zpoplatněna, takže stačí pouze nainstalovat do mobilního zařízení a spárovat s přístrojem pomocí Bluetooth. K vyhodnocení výsledků stačí pouze telefon, na kterém se vše pohodlně ukazuje. Tato vylepšení mají velký vliv na vyhodnocení. Dříve vyhodnocení zabralo kolem 90 minut, zatímco teď nám stačí pouze 16 minut, na čemž má taktéž podíl bezdrátová tiskárna spárovaná s přístrojem. Aplikace nabízí spoustu možností i nahrávání křivek, podle kterých je možné vyhodnocovat. Napájení přístroje je přes lithiové baterie AAA, tím pádem si ho můžeme vzít kamkoliv. V roce 2019 byl vydán Silver Schmid OS 8200, který má pár aktualizací [23].



Obrázek 6: *Schmidt Live OS 8000 (archiv P.Cikrle)*

2.4.5 Stanovení pevnosti v tlaku z tvrdoměrných zkoušek

Vyhodnocením se zabývá norma ČSN 73 1373 [24]. Podle této normy můžeme zjistit pevnost betonu buď:

- nezaručenou pevností betonu (při použití obecného nebo směrného regresního vztahu bez upřesnění na tělese),
- s upřesněnou pevností betonu,
 - při použití obecného nebo směrného regresního vztahu upřesněného pomocí zkoušek na tělese součinitelem α ,
 - podle vlastního určujícího regresního vztahu.

Pro upřesnění obecného nebo směrného regresního vztahu součinitelem α je zapotřebí:

- nejméně 9 krychlí nebo válců,
- množství jádrových vývrtů podle objemu zkoušené konstrukce,
 - tři tělesa pro objem $<10 \text{ m}^3$,
 - šest těles pro objem $<50 \text{ m}^3$,
 - devět těles pro objem $\geq 50 \text{ m}^3$ [4] [17].

Součinitel pro upřesnění α se stanoví:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,is}}{\sum_{i=1}^n f_{be}} \quad (2)$$

Kde

$f_{c,is}$ pevnost v tlaku stanovená tlakovou zkouškou

f_{be} pevnost v tlaku s nezaručenou přesností, stanovená na stejném vzorku nedestruktivně

Upřesněná hodnota pevnosti v tlaku f_b se stanoví:

$$f_b = \alpha \cdot f_{be} \quad (3)$$

2.5 Ultrazvuková impulzivní metoda

První zmínky o ultrazvukových vlnách uvedl italský vědec Lazzaro Spallanzani v roce 1794, který popisuje schopnosti létání netopýrů v kostelní věži za tmy, aniž by narazili na překážku. Největším zvratem byl rok 1929, kdy se ruský vědec Sokolov stal zakladatelem ultrazvukové defektoskopie, kdy zavedl metodu průchodovou a později impulzovou. [4]

Impulzová průchodová metoda je ultrazvuková metoda využívající ultrazvukové vlny o frekvenci vyšší než 20 kHz a pracuje na principu vysílání těchto vln od budiče k snímači na straně druhé. Využívá dvojici sond, kdy jedná vysílá signály (budič) a druhá vlnění přijímá (snímač).

Těmito metodami se zabývá norma ČSN 73 1371 [25] a novější norma EN 12504-4 [11]. Tato norma měla nahradit ČSN 73 1371, ale nakonec platí obě. Jsou založeny na stále se opakujících svazcích elektrických impulzů, které vznikají v budiči.

Ve stavební praxi se používá ultrazvukové vlnění s frekvencí od 20 kHz do 150kHz. Pro jemnozrnné materiály maximálně do 500 kHz. Nejpoužívanější metodou je ultrazvuková impulzní metoda průchodová. Je založena na opakovaném vysílání impulzů do zkoušené konstrukce pomocí budiče a následném příjmu impulzů do snímače. Pomocí těchto sond zjistíme rychlost šíření impulzů v materiálu.

Ultrazvuková impulzová metoda je velice výhodná při zkoušení a diagnostice betonu a betonových konstrukcí. Pomocí ultrazvukové metody můžeme zjišťovat vlastnosti:

- rovnoměrnost betonu,
- dynamické fyzikální vlastnosti (dynamický modul pružnosti),
- pevnost v tlaku,
- přítomnost poruch (trhliny anebo dutiny) [3] [21].

Rychlost je udávána [m/s] a založena na délce vzorku a době průchodu. Rychlost impulzu v_l se stanoví:

$$v_l = \frac{L}{T} \quad (4)$$

Kde

- | | |
|-----------|---|
| v_l | rychlost impulzu [km/s], |
| L | délka měřící základny [mm], |
| T | čas včetně t_{kor} , který uplyne při měření impulzu měřící základnou [μ s],
tj $T = T_i \pm t_{kor}$ |
| t_{kor} | korekce, která se skládá včetně mrtvého času, který se zjistí případnou kalibrací |

Útlum je definovaný jako ztráta amplitudy mezi dvěma po sobě následujícími ozvěnami [26].

$$\alpha_{US} = \frac{20}{\Delta L} \cdot \log \left(\frac{A1}{A2} \right) \quad (5)$$

Kde

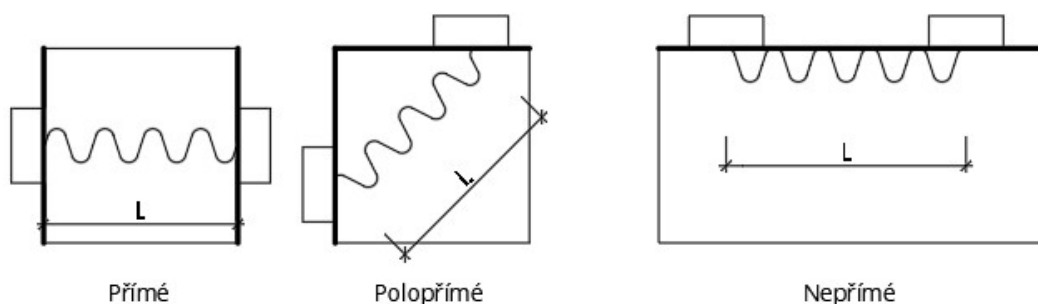
- α_{US} doba útlumu [dB],
 ΔL rozdíl vzdálenosti od A1-A2,
 A1-A2 ozvěny.

2.5.1 Způsoby prozvučování

Způsob prozvučení stavebního materiálu, dílce či konstrukce (sloupy, trámy, průvlaky) závisí na přístupnosti a umístění sond na zkoušeném místě. Nejčastějším typem prozvučování je přímé (protilehlé), jelikož dochází k nejmenšímu útlumu. Protilehlé šikmé (polopřímé) a povrchové (nepřímé) používáme jen v případě, když není možnost přímého.

Typy prozvučení materiálu:

- Protilehlé (přímé) – také pod názvem normální, ultrazvukové sondy leží na protilehlých stěnách a jsou osazeny na stejné normále k oběma povrchům.
- Protilehlé šikmé (polopřímé) – sondy na dvou protilehlých stěnách, ale jedná sonda je mimo normálu.
- Povrchové (nepřímé) – sondy se přikládají na stejnou plochu [21].



Obrázek 7: Typy prozvučení

2.5.2 Pundit PL-200

Nejpoužívanějším přístrojem pro ultrazvukovou metodou se stal přístroj PUNDIT® PL-200 od švýcarské firmy viz Obrázek 8. Je speciálně navržen pro nejdřsnější podmínky, které mohou na stavbě nastat (prašné prostředí, déšť). Přístroj je vybaven výkonným dvoujádrovým procesorem a dotykovou obrazovkou. Obrazovka nabízí vysoké rozlišení a ostrý obraz kvůli čitelnosti na slunci. Díky baterii

a popruhu na krk, na který se může přístroj připnout, umožňuje snadnou manipulaci na staveništi. Výkonný procesor zajišťuje nejlepší možnou analýzu naměřených průběhů. Do zařízení lze uložit až 100 000 skenů [27].

Zařízení se skládá ze dvou sond, kdy jedna je budící a druhá je snímací. Ke kalibraci slouží speciální kalibrační váleček, který má stanovenou rychlost impulzů 25,4 μ s. Ve všech ultrazvukových testech je nezbytné použít vazební materiál mezi plochami sond a zkoušeným materiálem. Nejběžnějším vazebním materiálem mezi betonem nebo hladkými povrchy je například plastelína nebo silikonové mazivo. U drsnějších povrchů se používá vazelína. Způsoby prozvučování jsou tři a jsou uvedené v kapitole 2.4.1. Rozmezí frekvence je od 20-500 kHz. Pro kratší měřicí základny se používají vyšší frekvence, zatímco pro dlouhé se používají nižší. Na výběru frekvence je závislé více faktorů, jako například velikost zrna, nebo nehomogenita (dutiny). Pro hrubozrnné betony se používá nižší frekvence a pro jemnozrnné (malty) vyšší. [28] [29].



Obrázek 8: Přístroj Pundit PL 200

Další funkcí je plošné skenování, které umožňuje vizualizaci prvku ve 2D na základě měření rychlosti impulzu, času přenosu nebo vzdálenosti. Tato funkce se nejvíce využívá pro průvlaky a sloupy. Po měření se přímo vyobrazí na obrazovce ve formě barevného povrchového grafu. Barevný rozsah si lze nadefinovat nastavením maximální a minimální hodnoty [28].

2.5.3 Stanovení pevnosti betonu

Pomocí ultrazvukové impulzové metody můžeme stanovit i pevnost betonu f_{be} . Stanovení pevnosti je trochu složitější, neboť ultrazvuk lépe koleruje s modulem pružnosti E_{bu} než s pevností v tlaku. Pokud je pevnost v tlaku úměrná modulu pružnosti E_{bu} , pak je určení pevnosti přesnější. Obecný vztah pro pevnost betonu v závislosti na šíření ultrazvukového impulzu v_L :

- >4500 [m/s] výborný beton,
- 3500-4500 [m/s] dobrý beton,
- 3000-3500 [m/s] diskutabilní beton,
- <3000 [m/s] mizerný beton.

Stanovením pevnosti v tlaku se zabývá norma ČSN 73 1371 [25], kde je uvedený směrný vztah pro pevnost v tlaku betonu f_{be} :

$$f_{be} = 9,9 \cdot v_{L3}^2 - 56 \cdot v_{L3} + 87,8 \quad (6)$$

Kde

v_{L3} impulzová rychlost ultrazvukových vln v trojrozměrném prostředí [km·s⁻¹],

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

Vztah (6) je stanovený pro určitý druh betonu v 80. letech 20. století, což na dnešní typy moderních betonů nelze použít. Podle normy ČSN EN 13 791 [1] si můžeme vytvořit vlastní regresní vztah, pokud máme minimálně 8 dvojic hodnot [f_c, v_L].

2.5.4 Stanovení vlastností betonu

Na rychlost proudění ultrazvukového impulsu v materiálu má vliv modul pružnosti a hutnost betonu. Dynamický modul pružnosti se stanoví E_{bu} :

$$E_{cu} = \rho \cdot v_l^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (7)$$

Kde

- E_{cu} dynamický modul pružnosti [MPa],
- ρ objemová hmotnost materiálu [$\text{km} \cdot \text{m}^{-3}$],
- v_l^2 rychlost šíření ultrazvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- k koeficient rozměrnosti prostředí. Závisí na rozměrech tělesa vzhledem k vlnové délce,
- ν_{cu} je Poissonův součinitel, pro beton se udává 0.2, ale závisí na druhu a vyzrálosti $K_3=1,0541$.

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - \nu_{cu}}{(1 + \nu_{cu}) \cdot (1 - c\nu_{cu})}} \quad (8)$$

Pro přepočítání na statický modul pružnosti E_c :

$$E_c = \kappa_u \cdot E_{bu} \quad (9)$$

Kde

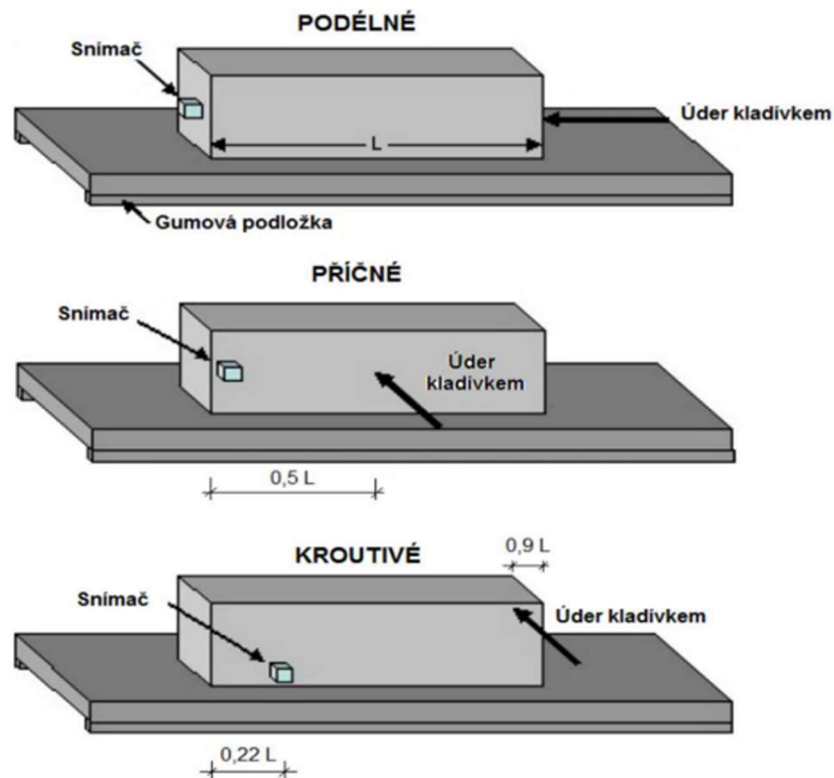
- E_c statický modul pružnosti [MPa],
- E_{bu} dynamický modul pružnosti [MPa],
- κ_u zmenšovací součinitel.

Další vliv na charakteristiku betonu mají vlastnosti kameniva a vlastnosti tmelu (vodní součinitel, staří betonu). Vztahy mezi šířením impulsu a pevností betonu se mohou lišit dle složení betonu. U betonů s neznámou pevností v tlaku, je stanovení pevnosti betonu na základě rychlosti šíření impulsu nevěrohodné. Z tohoto důvodu se kombinují odrazové metody s impulzy a používají se regresní vztahy. Se zvětšující pevností je tento vztah méně přesnější. Na jádrových vývrtech se musí vybrat vzorky s největší a nejmenší průměrnou rychlostí, aby se zajistil rozsah hodnot pro regresní křivku [4].

2.6 Rezonanční metoda

Touto metodou se zabývá norma ČSN EN 73 1372 [24] a slouží k vyhodnocení dynamických materiálových charakteristik. Principem této metody je vnášení spojitého mechanického kmitání. Každý objekt z tuhého materiálu se po vnesení mechanického impulzu rozkmitá. Využívá se hlavně ve vzorcích pravidelného tvaru (krychle, kvádru, jádrových vývrtech). Rozlišujeme tři typy kmitání viz Obrázek 9:

- Podélné f_L (longitudinální, dilatační) - nosník je vetknut uprostřed své délky a obě jeho čela kmitají v protifázi ve směru vzorku.
- Kroutivé f_t (torzní, smykové) - nosník uložen obdobně, akorát s torzním kmitáním vyvolané kroutivým momentem.
- Příčné f_f (ohybové, flexibilní) - vzniká tehdy, kdy prutový prvek je podepřen v místě uzlů jako prostý nosník s převislými konci.



Obrázek 9: Typy kmitání [31]

V podstatě se jedná o impulzivní metodu, která efektivněji stanovuje dynamické hodnoty. Používá se zařízení, které se skládá ze tří částí (Fourierův analyzátor, impulzivní kladívko a snímač zrychlení). Díky naměřeným frekvencím pak můžeme určit pružnosti materiálu [21] [3]:

- modulu pružnosti v tahu/tlaku, který se stanovuje dvěma způsoby, podélného kmitání E_{brL} a příčného E_{brf} :

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot L} \quad (10)$$

$$E_{brL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (11)$$

$$E_{brf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (12)$$

Následně se vypočte odchylka ΔE_{br} [%], která může vyjít kladně i záporně a neměla by se lišit víc jak o 10 %. V případě, že se liší, tak jedná se o nehomogenní vzorek.

$$\Delta E_{br} = \frac{E_{brf} - E_{brL}}{E_{brL}} \cdot 100 \quad (13)$$

Kde

- ρ objemová hmotnost tělesa [kg/m^3],
 - a, b rozměry vzorku [m],
 - f_L, f_f naměřené frekvence podélného a příčného kmitání [kHz],
 - L délka vzorku [m],
 - i poloměr setrvačnosti průřezu [m], kdy $i = \frac{d}{4}$ pro kruhový průřez,
 - c_1 korelační součinitel, zahrnující vliv smyku a setrvačnosti, jehož hodnoty jsou uvedeny v tabulce,
 - k součinitel, závislý na tvaru průřezu vzorku, pro kruh $k = 1,0$.
- Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{br} :

$$G_{br} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (14)$$

- Dynamický Poissonův poměr ν_{br} :

$$\nu_{br} = \frac{E_{brL}}{2 \cdot G_{br}} - 1 \quad (15)$$

Poissonův poměr nabývá hodnot v intervalu $\langle 0,00;0,50 \rangle$. Výsledná hodnota ν_{br} se zaokrouhlí na dvě desetinná místa.

3 Nové postupy pro zkoušení betonových konstrukcí ČSN EN 13791

3.1 Předmět normy

Norma ČSN EN 13791 [1] je velice obsáhlá. Platí pro betonové konstrukce, které jsou zhotoveny z lehkých, normálních a těžkých betonů. Popisuje vztahy nepřímých zkoušek (ultrazvuková impulzová metoda a odrazové tvrdoměry) a pevností v tlaku. Rozděluje zkoušení betonových konstrukcí na dvě oblasti:

- Stav pevnosti betonu neznámého stáří.
- Ověření pevnosti betonu nové konstrukce v případně pochybností.

Obě aplikace mají spoustu společných kroků, ale liší se vyhodnocením. Důvodem tohoto rozdílu je, že při odhadu pevnosti v in situ neexistuje žádný předpoklad a jaká je nejistota spojená s počtem údajů zohledněna při odhadu hodnoty. Pevnost v in situ je hodnota založená na testování hotové konstrukce či prvku, jak je uvedeno v normě EN 1992-1-1:2004.

3.2 Staré konstrukce

3.2.1 Stanovení pevnosti dle jádrových vývrtů

Ke stanovení pevnosti v tlaku in situ ($f_{ck, is}$) musí být všechny naměřené hodnoty zkontrolovány, zda jsou platné. Všechny platné výsledky jsou použity k odhadu pevnosti v tlaku in situ ($f_{c, m(m) is}$) a směrodatné odchytky testované oblasti. Pro malé testovací oblasti je stanovení pevnosti v tlaku in situ na průměru vývrtu a počtu:

- osm platných výsledků pevnosti tlaku v in situ, kde průměr vývrtu je ≥ 75 mm, kde poměry těles jsou uvedeny Tabulka 1,
- dvanáct platných výsledků pevnosti tlaku v in situ, kde průměr vývrtu je 50 mm a velikost zrna ≤ 16 mm.

Použitím vzorce (16), kde směrodatná odchytky s je hodnota vypočtená z výsledků zkoušek a je do ní zahrnutý variační součinitel, který musí být minimálně 8 %. Charakteristická pevnost v tlaku in situ ($f_{ck, is}$) se odhaduje ze vzorců, kde tato pevnost vyjde menší:

$$f_{ck, is} = f_{c, m(n) is} - k_n \cdot s \quad (16)$$

$$f_{ck, is} = f_{c, is, lowest} + M \quad (17)$$

Kde

- s směrodatná odchylka,
 k_n součinitel, který je z *Tabulka 2*,
 M hodnota M závisí na hodnotě $f_{c, is, lowest}$ a je z *Tabulka 3*.

Tabulka 2: k_n hodnoty pro vzorec (16)

n	8	10	12	16	20	30	∞
k_n	2,00	1,92	1,87	1,81	1,76	1,73	1,64

Tabulka 3: Hodnota rozmezí M pro vzorec (17)

Hodnota $f_{c, is, lowest}$ [MPa]	Rozmezí [MPa]
≥ 20	4
$\geq 16 < 20$	3
$\geq 12 < 16$	2
< 12	1

Pro malou testovací oblast, která má celkový objem do 10 m³, je potřeba odebrat alespoň 3 jádra, které mají průměr ≥ 75 mm a u jednoho jádra stanovit pevnost v tlaku in situ ($f_{c, is}$). Pokud jádrové vývrty představují beton, který zůstane v konstrukci, použije se nejmenší hodnota z těchto tří nebo více vývrtů (za předpokladu, že rozptyl výsledků zkoušky nebude větší než 15% střední hodnoty) a stanoví se pevnost v tlaku in situ. Pokud je rozptyl výsledků větší jak 15 % znamená to, že o konstrukci nemáme dostatek informací a je potřeba získat více vzorků k vyhodnocení [1].

3.2.2 Kombinace nepřímých metod a jádrových vývrtů

Při kombinaci nepřímých metod (odrazové tvrdoměry, ultrazvuková pulzní metoda) a jádrových vývrtů, by v ideálním případě měly být provedeny nepřímé metody a následně jádrové vývrty. Data získané z tohoto průzkumu se dále používají při volbě pozic jádrového vrtání. Mělo by být získáno alespoň 10 párů výsledků. Jádrové vývrty musí pokrýt celý rozsah nepřímých zkušebních hodnot, včetně

extrémů, pokud je to konstrukčně bezpečné. Z výsledků jádrových vývrtů se stanoví pevnost v tlaku in situ ($f_{c,is}$), které se pak následně v grafu zobrazí na ose Y a výsledky nepřímých metod se vynesou na osu X. Následně se zvolí nejvhodnější lineární regrese a zhodnotí se, zda je pro hodnocený beton přiměřená (typ, staří). Pokud je to možné, mělo by se získat dostatečné množství údajů, aby se stanovila konkrétní korelace mezi nepřímou zkouškou a pevností v tlaku in situ ($f_{c,is}$).

Pomocí zavedené rovnice lineární regrese jsou všechny platné hodnoty nepřímého testu převedeny na hodnoty ekvivalentní regresní rovnice ($f_{c,is,reg}$) a to i na testovacích místech, kde byly provedeny jádrové vývrty. Při určení hodnot z regresní rovnice nesmí být extrapolována o více než 4 MPa na obou koncích prokázaného vztahu. Kdy odhad charakteristické pevnosti v tlaku pro testovanou oblast se stanoví ze vztahu:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,is,reg})}{m} \quad (18)$$

Následně se stanoví celková směrodatná odchylka pevnosti v tlaku in situ v testované oblasti ze vztahu:

$$s = \sqrt{s_c^2 + s_e^2} \quad (19)$$

Efektivní počet stupňů volnosti spojených s celkovou směrodatnou odchylkou je vypočítán ze vztahu:

$$n_{eff} = \frac{[s_c^2 + s_e^2]^2}{\frac{s_c^4}{n-2} + \frac{s_e^4}{m-1}} \quad (20)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \cdot (f_{c,is} - f_{c,m(m)is})^2}{m-1}} \quad (21)$$

$$s_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \cdot (f_{c,is} - f_{c,is,reg})^2}{n-2}} \quad (22)$$

Kde

$f_{c, is, reg}$ hodnota nepřímého testu převedená na ekvivalentní pevnost v tlaku in situ pomocí regresní rovnice,

$f_{c, is}$ pevnost v tlaku jádra na zkušebním místě v konstrukčního prvku,

s odhad celkové standardní odchylky pevnosti v tlaku in situ,

s_c zbytková směrodatná odchylka,

s_e směrodatná odchylka všech odhadovaných hodnot pevnosti,

n počet párů výsledků testů použitých pro stanovení korelační křivky,

m počet stanovených pevností.

Vzorce (20) a (22) jsou platné pouze tam, kde má korelace dva parametry. Pokud tomu tak není, je výraz $(n - 2)$ nahrazen $(n - p)$, kde p je počet parametrů ve vzorci. Hodnota s_c je vypočtená hodnota nebo 2 MPa, podle toho, která je z hodnot větší.

Odhad pevnosti v tlaku in situ na konkrétním místě. Není bezpečné použít průměrný vztah, protože existuje pouze 50% pravděpodobnost, že je skutečná pevnost menší než odhadovaná pevnost. Stanoví se jako hodnota výsledku nepřímého testu převeden na dolní mezní křivce predikčního intervalu pro úroveň významnosti 5 % (jednostranný test). Pro posouzení konstrukce se stanoví pevnost v tlaku in situ v konkrétním místě ($f_{c, is, est}$):

$$f_{c, is, est} = f_{c, is, reg} - t_{(0,05, n-2)} \cdot s_c \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i, cor} - \bar{x})^2}} \quad (23)$$

Kde

$f_{c, is, est}$ odhadovaná pevnost v tlaku in situ na konkrétním místě zkoušky,

$t_{(0,05, n-2)}$ hodnota alfa pro jednostranný test s $(n - 2)$ stupni volnosti

x_0 nepřímá zkušební hodnota v místě zkoušky „0“,

$x_{i, cor}$ nepřímá zkušební hodnota v místě zkoušky „i“, která se používá při korelaci,

\bar{x} průměr m nepřímých zkušebních hodnot použitých pro korelaci.

Tento vzorec je planý pro lineární korelaci. Jádrový vývrt o \emptyset 50 mm není dostatečný pro stanovení pevnosti v tlaku in situ na konkrétním místě.

3.2.3 Použití nepřímých metod s nejméně 3 jádrovými vývrty

Tuto metodu lze aplikovat pro zkušební oblasti do 30 m³ betonu pro stanovení pevnosti v tlaku in situ použitím nepřímých metod bez kalibrace, kde nejsou problémy s pevností v tlaku dodaného betonu.

Nejprve se musí provést průzkum testovací oblasti, díky které se zjistí variabilita a místo z nejnižší pevnosti v tlaku. Průzkum se provádí pomocí odrazového tvrdoměru nebo ultrazvuku. Následně se vyberou tři vývrty o \varnothing 75 mm z oblasti s nejnižším výsledkem nepřímé zkoušky a vypočteme pevnost v tlaku ($f_{c, is}$). Pokud jádrové vývrty představují beton, který zůstane v konstrukci, vybere se nejmenší hodnota z těchto tří nebo více vývrtů (za předpokladu, že rozptyl výsledků zkoušky nebude větší než 15 % střední hodnoty) a stanoví se pevnost v tlaku in situ.

Pokud je rozptyl větší jak 15 % střední hodnoty, tak je to důvod pro vyřazení vzorku a tlaková síla se stanoví ze zbylých platných hodnot.

3.3 Nové konstrukce v případě pochybností

Pochybnosti o dosažení stanovené pevnosti betonu v tlaku mohou vzniknout z různých příčin. Pochybnosti o kvalitě in situ mohou vzniknout z pochybností o kvalitě konkrétního místa, problémy při provádění prací nebo po nějaké výjimečné události. Termín pochybnost zahrnuje:

- nedostatečná pevnost v tlaku vzorků odebraných pro zkoušku totožnosti,
- nedostatečná pevnost v tlaku vzorků odebraných pro kontrolu výroby, která vede k nesouladu,
- problémy během provádění.

3.3.1 Na základě jádrových vývrtů

Každá zkušební oblast se rozdělí na objemy přibližně 30 m³. Pokud je menší jak 30 m³, lze s ním zacházet jako s jedním objem za předpokladu, že beton byl dodán v jeden den a neexistovaly žádné informace o tom, že by se jednotlivě mohly lišit. Minimální počet testovacích míst je uveden v Tabulka 4. Jádrové vývrty se odebírají v každém zkušebním místě pro získání výsledků pro každé zkušební místo. Pokud jsou splněna obě kritéria uvedená v Tabulka 4, může být přijata shoda pevnosti v tlaku pro zkušební oblast k dalšímu šetření.

Tabulka 4: Kritéria pro posouzení na základě jádrových vývrtů

Přibližný počet testovacích oblastí do objemu 30 m ³	Minimální počet testovacích lokací pro každý objem	Průměr výsledku z jádrových vývrtů v testované oblasti	Nejnižší výsledek
1	3	-	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} - M)$
2 až 4	2	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} + 1)$	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} - M)$
5 až 6	2	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} + 2)$	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} - M)$

3.3.2 Kombinace nepřímých metod a jádrových vývrtů

Beton se rozdělí na zkoušenou oblast, která nepřesahuje 180 m³. Pokud není překročena hloubka karbonatace betonu do 5 mm lze použít metodu odrazových tvrdoměrů. Vybranou nepřímou metodou se zkouší počet míst, který je uveden v Tabulka 5. Na každém místě se provede zkouška odrazových tvrdoměrů EN 12504-2 [9] nebo pomocí ultrazvukové impulzivní metody podle EN 12504-4 [11].

Tabulka 5: Minimální počet testovacích míst pro nepřímé metody

Přibližný počet testovacích oblastí do objemu 30 m ³	Minimální počet testovacích míst pro nepřímé metody
1	9
2 až 4	12
5 až 6	20

Pokud jsou splněna obě kritéria uvedená v Tabulka 6, tak lze pro zkoumanou oblast zkoušky přijmout shodu s pevností v tlaku.

Tabulka 6: Umístění pro vybrané vývrty a kritéria pro posouzení

Přibližný počet testovacích oblastí do objemu 30 m ³	Minimální počet testovacích lokací pro jádrové vývrty	Průměr výsledků jádrových vývrtů v místě nejbliže k mediánovému číslu odrazů nebo průměr UPV pro danou oblast	Nejnižší výsledek
1	Jeden jádrový vývrt v každé ze dvou nejnižších hodnot nepřímých metod pro danou oblast	-	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} - M)$
2 až 4	Jeden vývrt při nejnižší hodnotě z nepřímých metod pro testovanou oblast a jeden vývrt na každém ze 2 testovacích míst	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} + 1)$	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} - M)$
5 až 6	nejblíže ke střední hodnotě odrazových tvrdoměrů nebo střední hodnotě UPV v dané oblasti	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} + 2)$	$\geq 0,85 \cdot (f_{ck,spec} - M)$

Screeningovou zkoušku lze použít k odhadu rovnoměrnosti betonu. Určit variabilitu, identifikovat místa s nejnižší pevností a zda bylo dosaženo stanovené třídy pevnosti betonu.

3.4 Zhodnocení postupů z normy ČSN EN 13791

Norma ČSN EN 13791 [1] se zabývá stanovení pevnost v tlaku betonu pomocí destruktivních (jádrové vývrty) a nedestruktivních metod (odrazové tvrdoměry, ultrazvukové rychlosti).

Rozděluje betonové konstrukce na dvě oblasti. Ověření pevnostní třídy betonu, který je již v konstrukci a ověření pevnostní třídy na základě pochybností. Oba postupy se od sebe liší, jak počtem požadovaných zkoušek, tak i kritérii. Definovány jsou také zkušební oblasti, zkušební místa a počet zkušebních testů. Zkušební oblast může obsahovat řadu podobných konstrukčních prvků nebo jeden konstrukční prvek. Zkušební místa závisí na objemu použitého betonu.

Úpravy se týkaly průměrů jádrových vývrtů, kdy relevantním jádrem je vzorek o rozměru $\varnothing 75$ mm. Může se zvolit i menší průměr $\varnothing 50$ mm, ale s tím také stoupá počet zkušebních jader. U jádrových vývrtů jsou rozlišovány štíhlostní poměry délky k průměru jádra $f_{c,1:1core}$ nebo $f_{c,2:1core}$, kdy nově můžeme stanovit pevnosti na vzorku se štíhlostním poměrem $f_{c,1:1core}$. Pro přepočítání z $f_{c,1:1core}$ na $f_{c,2:1cor}$ je uveden v normě korelační součinitel CLF (core length factor). Pro normální a těžké betony je $CLF = 0,82$. Tato hodnota 0,82 byla získána zprůměrováním všech poměrů pevnostních tříd v normě ČSN EN 206 [30].

Některé postupy se již už setkaly s vlnou kritiky. Norma zdůrazňuje význam testování odlehlých hodnot a pokud hodnota má velkou odchylkou může významně snížit odhad charakteristické hodnoty až o 4 MPa. Následně je popsáno že vztah (17), který je založený na nejnižší hodnotě se v naprosté většině aplikací neuplatní a není statisticky podložený [31].

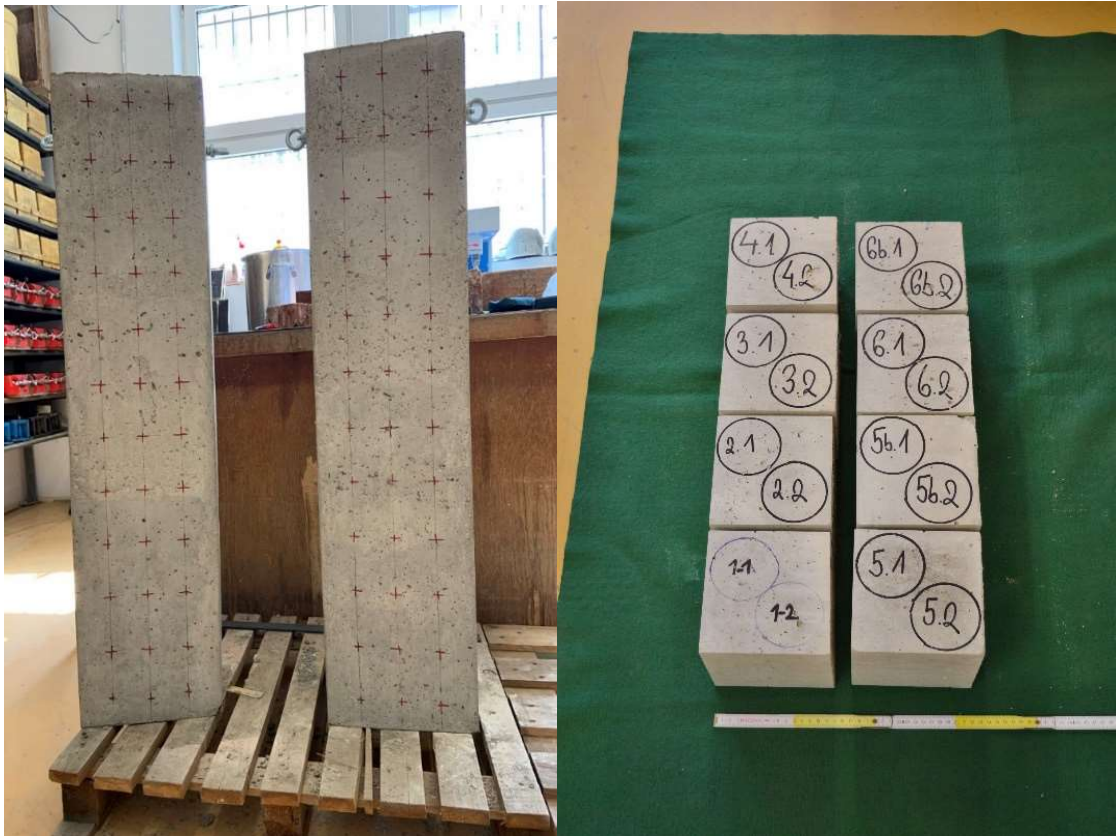
4 Experimentální část

4.1 Výroba těles a měření

Cílem experimentální části bylo ověřit normové postupy dle ČSN EN 13791 pro různé případy kombinací destruktivní a nedestruktivních metod. Pro experiment byly použity tři sloupy, které představují náš model konstrukce viz Obrázek 10. Sloupy byly vyrobeny ze dvou druhů betonu a několika záměsí, které měly simulovat reálnou konstrukci předpokládaného stáří, neboť se jedná o betony spíše nižších pevnostních tříd. Výška sloupů je 1200 mm a půdorysné rozměry jsou 200 mm a 300 mm.

Při zkoušení těchto modelů konstrukce bylo postupováno naprosto podobným způsobem, kterým by se postupovalo u posudku velké konstrukce. Nejprve se provedly zkoušky nedestruktivní, poté byly odvrtané jádrové vývrty a provedeny zkoušky destruktivní. Z nedestruktivních zkoušek byly použity obě rozšířené metody tedy odrazové tvrdoměrné a ultrazvukové impulzové metody.

Jelikož na sloupech probíhaly nedestruktivní zkoušky, tak bylo ze stejných směsí betonu vyrobeno 8 krychlí ve formě o rozměrech 150x150x150 mm viz Obrázek 10. Následovalo změření základních rozměrových parametrů a provedení nedestruktivních zkoušek. Volba těchto rozměrů krychle měla svá opodstatnění, jelikož se po provedení NDT zkoušek tyto krychle rozdělily na dvě oblasti, ze kterých se odebraly jádrové vývrty o průměru 75 mm. Ze zbytků těles po jádrovém vrtání bylo dále zhotoveno 16 krychlí o rozměrech 50x50x50 mm a 16 kvádrů 50x50x100 mm. Tělesa byla záměrně vyráběna ze spodní a horní části krychle vzhledem k výrobě, tak aby byly zachyceny rozdíly v betonu. Měření pevnosti v tlaku in situ probíhalo v laboratoři na fakultě stavební v budově E. Vnitřní teplota se pohybovala kolem 21-22 °C.



Obrázek 10: Nasimulovaný model konstrukce a zkušební tělesa

4.2 Tvrdoměrné zkoušení betonu

4.2.1 Měření sloupů a těles

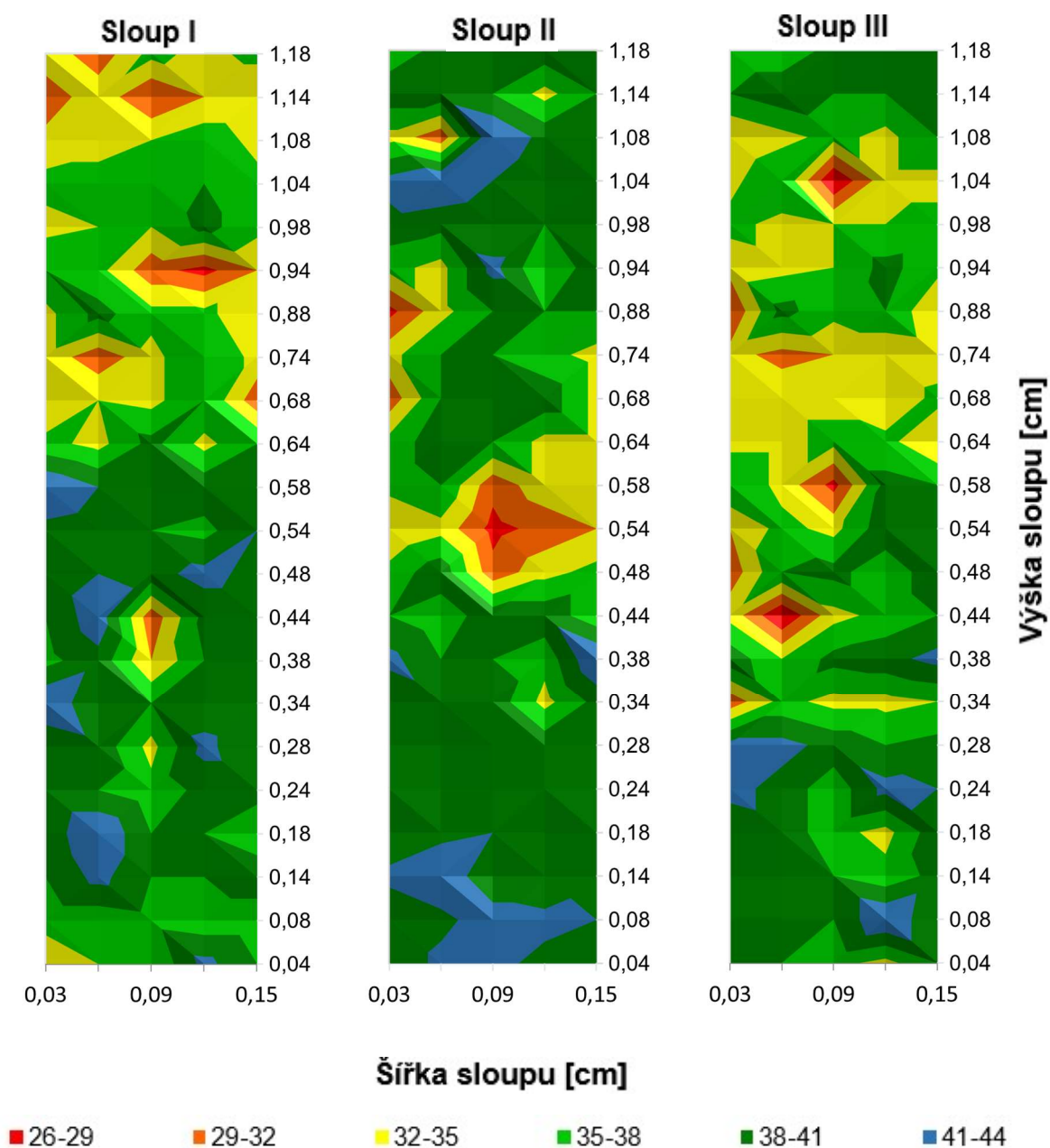
Na betonových sloupech byly zkoušeny hodnoty odrazu Q . Tyto hodnoty byly měřeny pomocí přístroje Original Schmidt. Měření probíhalo na všech sloupech a hodnoty odrazu Q byly zapisovány do protokolu. Každý sloup se rozdělil na 11 linií, kde na každé linii bylo stanoveno 10 hodnot odrazu. Linie představuje podélný pás, který byl od křížového bodu 50 mm dolů a 50 mm nahoru, tedy o celkové výšce 100 mm. V každé linii bylo stanoveno 5 hodnot ve spodní části a 5 hodnot v horní části. Celkově tedy bylo naměřeno 110 hodnot odrazů Q . Všechny hodnoty odrazu Q jsou uvedeny v Tabulka 7, kde lokace odrazu byla zidealizována.



Obrázek 11: Měření hodnoty odrazu odrazovým tvrdoměrem typu N (archiv P.Cikrle)

Tabulka 7: Hodnoty odrazu Q na sloupu I

Linie	y/x	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15
1	0,04	33	35	35	42	38
	0,08	36	36	37	36	36
2	0,14	38	42	38	38	40
	0,18	39	44	38	38	36
3	0,24	38	38	36	39	39
	0,28	38	40	34	42	38
4	0,34	44	38	38	39	38
	0,38	37	40	32	38	38
5	0,44	38	43	30	39	39
	0,48	39	41	40	42	40
6	0,54	40	39	38	37	41
	0,58	44	41	38	40	40
7	0,64	36	34	39	34	38
	0,68	32	35	34	38	30
8	0,74	34	30	34	38	34
	0,88	34	39	36	36	32
9	0,94	38	36	30	28	32
	0,98	34	35	35	39	36
10	1,04	36	36	36	38	36
	1,08	33	34	35	37	34
11	1,14	30	34	29	32	32
	1,18	34	30	36	34	36



Obrázek 12: Hodnoty odrazů Q na sloupech

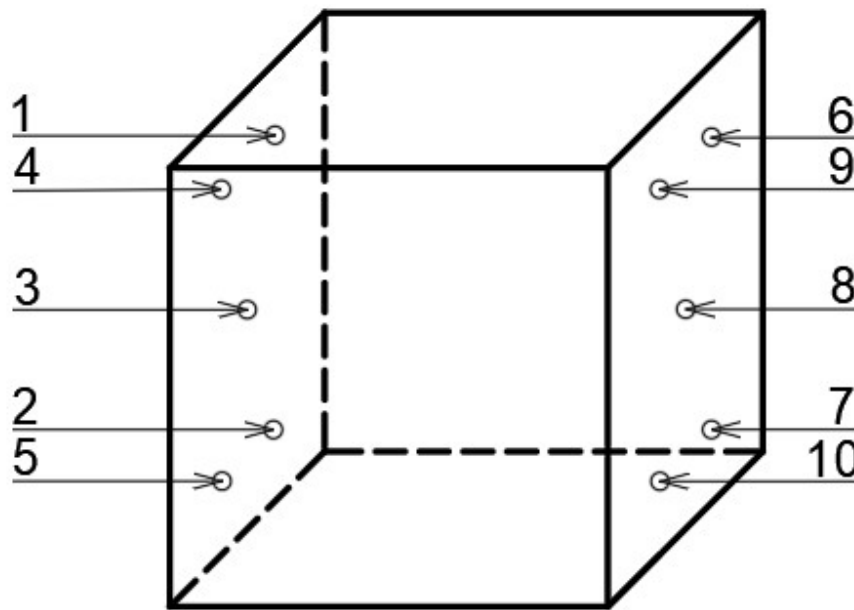
Na osmi krychlích 150x150x150 mm se stanovily hodnoty odrazů Q pomocí Schdmitových tvrdoměrů. Ke stanovení odrazů byl použit přístroj Original Schmidt a Schmidt z řady Live. Před započítím zkoušky byly přístroje zkalibrovány pomocí speciální kovadliny.

Každá krychle byla vložena do lisu a zatížena na 10 % pevnosti. Hodnoty odrazu Q se stanovily na dvou protilehlých stranách po pěti hodnotách viz Obrázek 13. Jednotlivé odrazy se prováděly minimálně 30 mm od kraje krychle. Všechny hodnoty byly uváděny do zápisového bloku. Hodnoty, které se významně lišily od

naměřených hodnot z důvodu, že v daném místě bylo zrno kameniva, byly vyřazeny a změřeny znovu.

Na tělesech byl proveden Grubbsův test na hladině významnosti $\alpha = 0,01$. Normalita se ověřila pomocí Shapiro—Wilksova test s hladinou významnosti 0,05.

Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tabulka 8. Kde p je vypočítána p -hodnota Shapiro—Wilkova testu a Q průměrná hodnota odrazu na zkušebním tělese. Červeně jsou vyznačeny p -hodnoty, které jsou nižší než 0,05 a tedy normalitu těchto těles zamítáme.



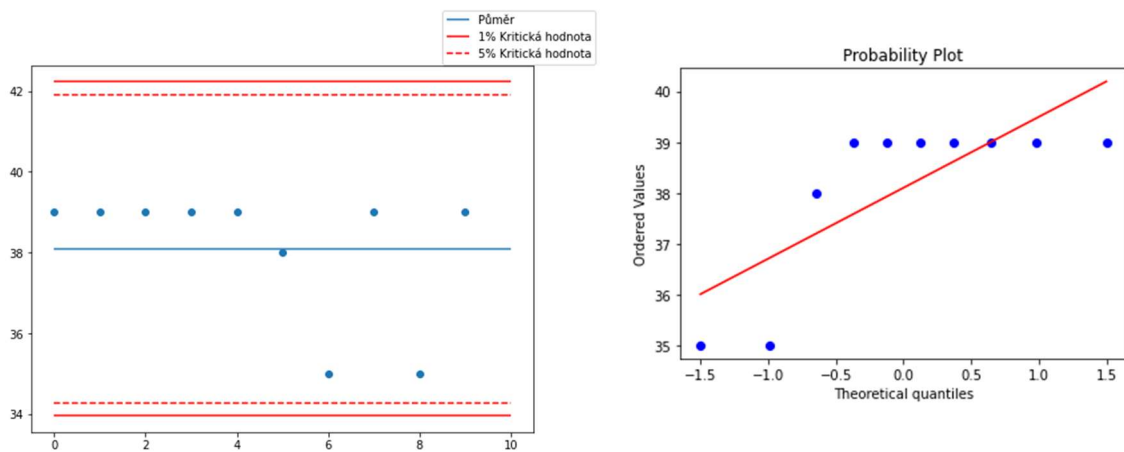
Obrázek 13: Postup měření hodnot odrazů Q na krychli 150x150x150 mm



Obrázek 14: Stanovení hodnot odrazu přístroje Schmidt typu N (archiv P.Cikrle)

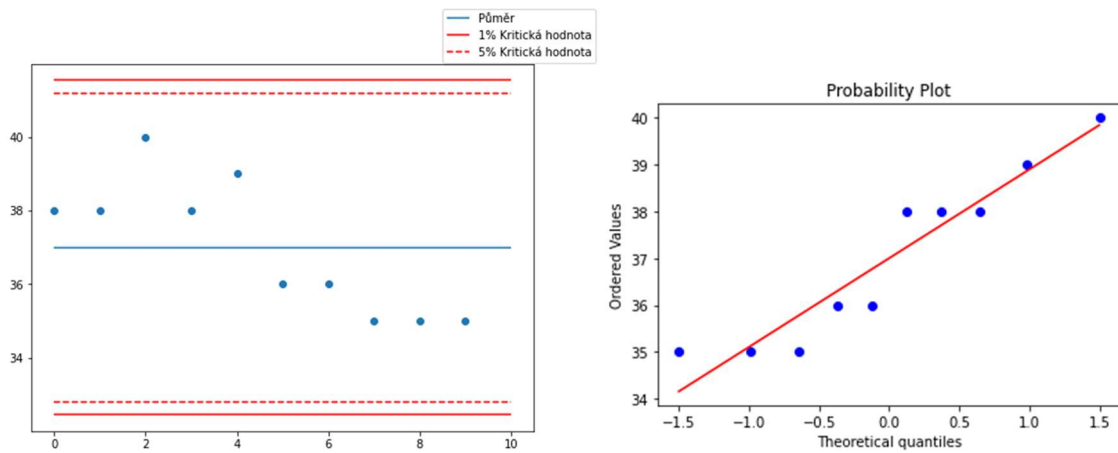
Tabulka 8: Hodnoty odrazů Q pro krychlích 150x150x150 mm

Ozn.	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	SK9	SK10	p	Q
1-1	39	39	39	39	39	38	35	39	35	39	0,001	38,1
1-2	38	38	40	38	39	36	36	35	35	35	0,150	37
2-1	36	40	43	38	38	41	38	39	40	40	0,770	39,3
2-2	36	36	36	34	40	36	38	37	40	39	0,270	37,2
3-1	36	37	38	39	38	36	33	38	36	35	0,460	36,6
3-2	35	37	40	34	38	35	35	37	43	38	0,250	37,2
4-1	34	35	34	32	35	35	39	36	33	37	0,800	35
4-2	36	34	35	35	36	32	34	37	36	34	0,490	34,9
5-1	34	29	31	32	33	32	36	33	38	37	0,820	33,5
5-2	30	29	29	29	31	35	30	36	28	32	0,067	30,9
5B-1	36	39	38	37	39	36	36	35	36	40	0,190	37,2
5B-2	36	37	38	36	36	34	38	38	34	34	0,053	36,1
6-1	36	36	37	37	37	38	36	36	38	36	0,008	36,7
6-2	37	38	38	39	39	34	36	38	34	34	0,043	36,7
6B-1	38	41	44	39	38	42	38	39	38	39	0,012	39,6
6B-2	36	38	35	41	35	38	40	39	40	39	0,294	38,1

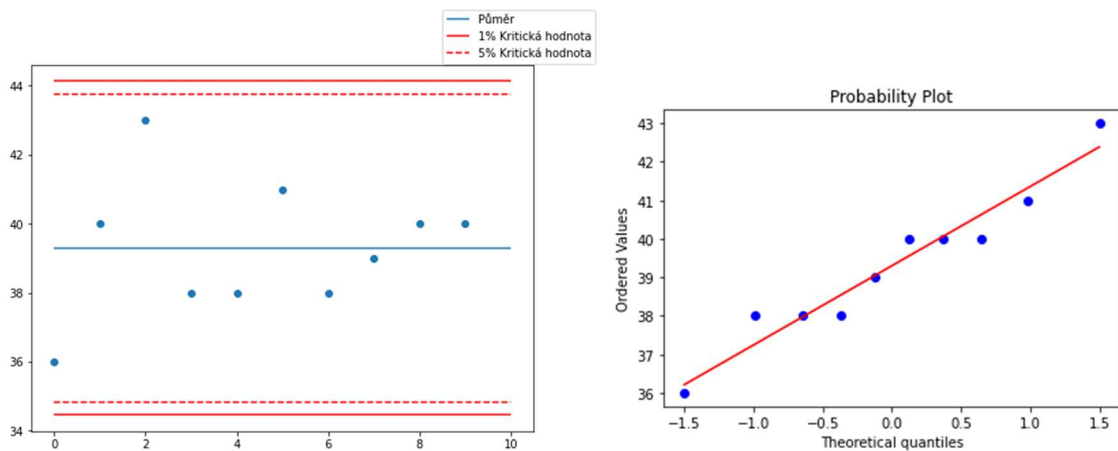


Obrázek 15: Grubbsův test a test normality - pro vzorek 1-1

Pokud nejsou data normálně rozdělena, nemůže se použít Grubbsův test. Pro krychli vyšla p-hodnota Shapiro—Wilksova testu nižší než 0,05 a to znamená, že normalitu zamítáme.



Obrázek 16: Grubbsův test a test normality – pro vzorek 1-2



Obrázek 17: Grubbsův test a test normality – pro vzorek 1-2

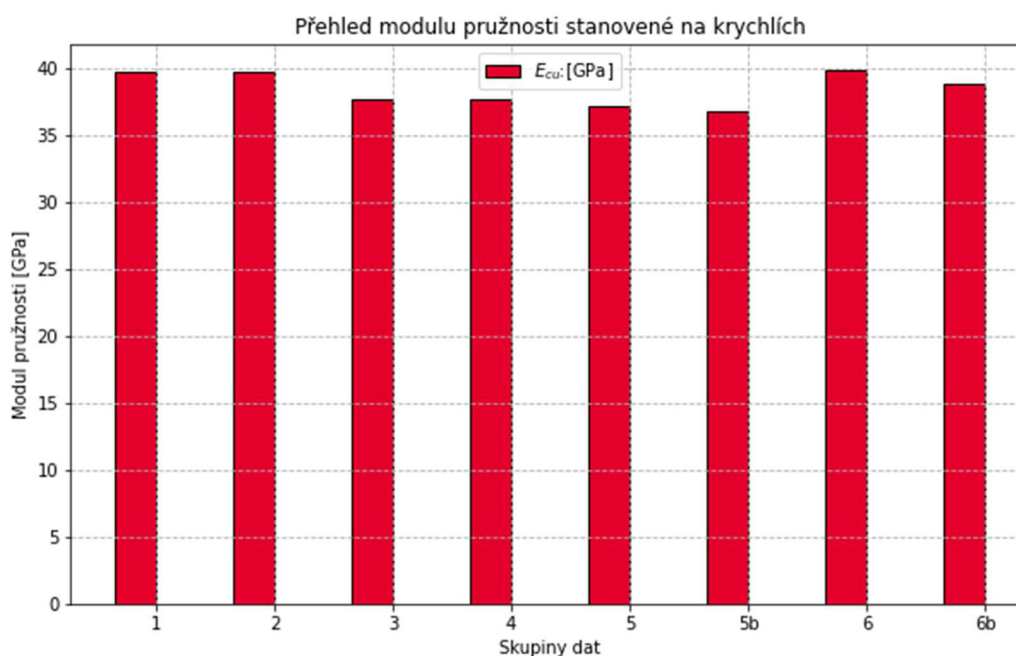
4.3 Ultrazvukové měření

4.3.1 Stanovení dynamického modulu

Dalším výstupem našeho měření bylo vypočítání vlastností betonu. Díky naměřeným hodnotám mohl být vypočítán modul pružnosti E_{cu} . Z rychlosti průchodu impulzu v_L se vypočítal modul pružnosti podle vztahu (7). Hodnota modulu pružnosti je ve stavebnictví důležitá zejména kvůli průhybům. Výsledky měření jsou v Tabulka 9. Závislost mezi rychlosti průchodu impulzu v_L a modulem pružnosti nemá smysl, jelikož je stanoven ve vztahu (7). Výpočty byly provedeny jen pro krychle 150x150x150 mm.

Tabulka 9: Výpočet modulu pružnosti pro krychli 150x150x150 mm

Krychle	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>V</i>	<i>m</i>	ρ	\bar{t}	v_L	E_{cu}
	[mm]			$[\cdot 10^{-6} \text{m}^3]$	[kg]	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	[μs]	[m/s]	[GPa]
1	150,2	147,3	150,0	3,3	7,6	2289,5	34,2	4391,8	39,7
2	150,1	146,4	149,9	3,3	7,6	2306,6	34,3	4372,3	39,7
3	149,8	149,3	149,9	3,4	7,6	2266,3	34,9	4292,3	37,6
4	149,3	150,3	149,8	3,4	7,6	2260,3	34,7	4302,6	37,7
5	150,1	150,3	150,0	3,4	7,6	2245,3	35,0	4284,9	37,1
5b	150,4	149,1	150,4	3,4	7,6	2252,8	35,3	4260,6	36,8
6	149,8	147,2	149,8	3,3	7,6	2300,2	34,2	4384,0	39,8
6b	150,0	149,5	150,2	3,4	7,6	2255,8	34,3	4369,4	38,8



Obrázek 18: Sloupcový graf pro modul pružnosti E_{cu} na krychlích

4.3.2 Měření rychlost impulsu na betonových sloupech

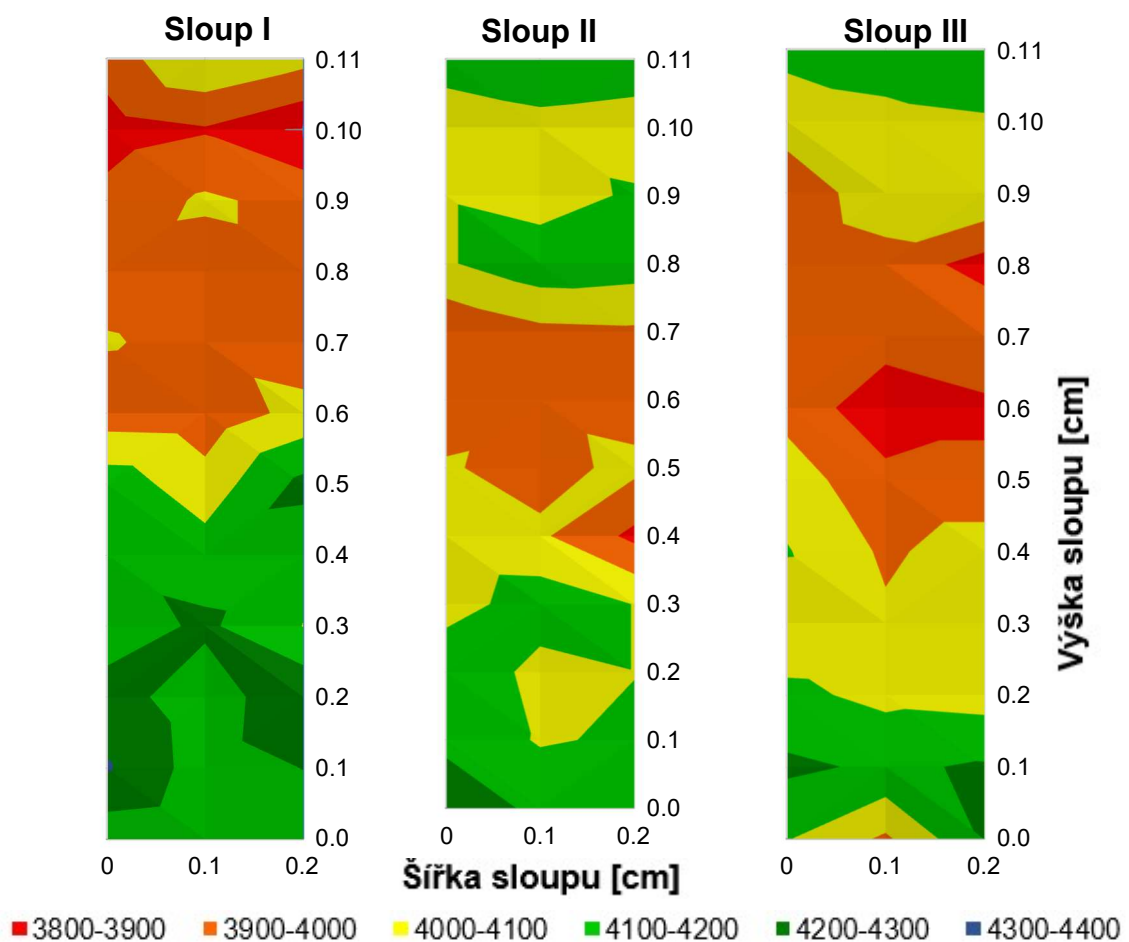
Součástí vyhodnocení bylo také změření rychlosti impulsu na třech betonových sloupcích. Všechny tři sloupy byly vyrobeny ze dvou záměsí betonu.

Před započítím měření se musel každý sloup změřit a vyznačit rastr míst prozvučení. Jednalo se o sloupy šířky 250 mm a výšky 1200 mm. Rastr se vyměřil pomocí pravítka a dřevěné latě. Skládal se ze tří sloupců ve vzdálenostech 70 mm, 80 mm a 70 mm. Po zaznačení sloupců se vyznačily linie po 100 mm. Celkový rastr se tedy skládal ze tří sloupců a jedenácti linií. Body prozvučení se v místě průsečíku linie a sloupce vyznačily pomocí lihového fixu křížovým bodem.

Po vyznačení bodů se začaly měřit jednotlivé rychlosti impulzu. K měření jsme používali opět zařízení Pundit PL-200. Prozvučení probíhalo od spodního pravého kraje sloupu.

Tabulka 10: Rychlost šíření ultrazvukového impulzu na sloupu I

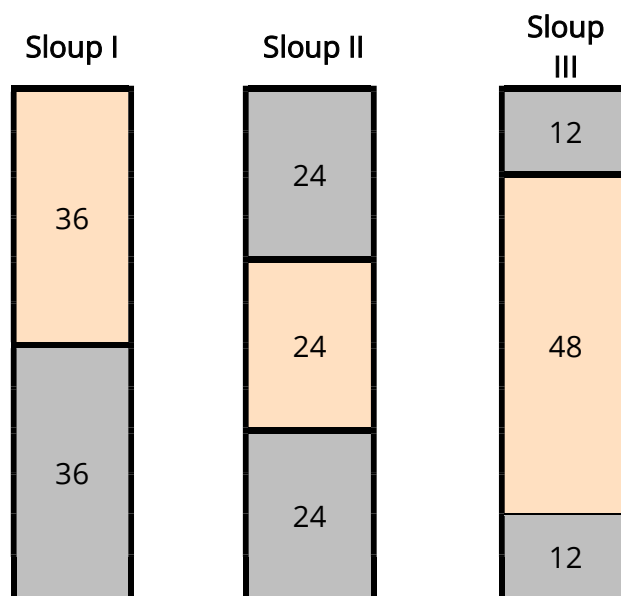
y/x [m]	0,0	0,1	0,2
0,0	4132	4107	4124
0,1	4310	4149	4202
0,2	4246	4141	4283
0,3	4141	4219	4098
0,4	4175	4149	4132
0,5	4158	4040	4228
0,6	3945	3937	4032
0,7	4008	3968	3937
0,8	3960	3945	3968
0,9	3929	4016	3968
0,10	3854	3891	3810
0,11	3945	4098	4032



Obrázek 19: Rychlost impulzu v_L na sloupech

4.3.3 Vyhodnocení nedestruktivních metod

Po provedení nedestruktivních zkoušek na sloupech byly dodány údaje o výrobě betonu. Sloupy byly vyrobeny ze dvou odlišných směsí viz Obrázek 20.



Obrázek 20: Výrobní schéma betonových sloupů s vyznačením objemu v litrech dvou rozdílných typů betonů

Krychle o rozměrech 150x150x150 mm byly odzkoušeny pomocí odrazových tvrdoměrů a ultrazvuků. Z naměřených výsledků byly vypočteny dynamické vlastnosti betonu. Hodnota doby průchodu t byla zprůměrována ze tří hodnot, které byly naměřeny. Následně se vypočítala rychlost šíření impulsu v_L podle vztahu (4) a z té dynamický modul pružnosti E_{cu} ze vztahu (7).

Na sloupu I si můžeme všimnout, že v dolní části byla rychlost impulsu v_L kolem 4200 m/s. Přibližně v polovině sloupu rychlost impulsu v_L klesá až na hodnotu 3800 m/s. Z toho vyplývá, že spodní dolní polovina je z lepšího betonu než ta horní polovina.

Sloup II byl zhotoven z betonu, u kterého se kvalita měnila zhruba ve třetinách. Horní a dolní třetina byla z lepší kvality betonu. Sloup III byl z větší části vyroben z horšího betonu.

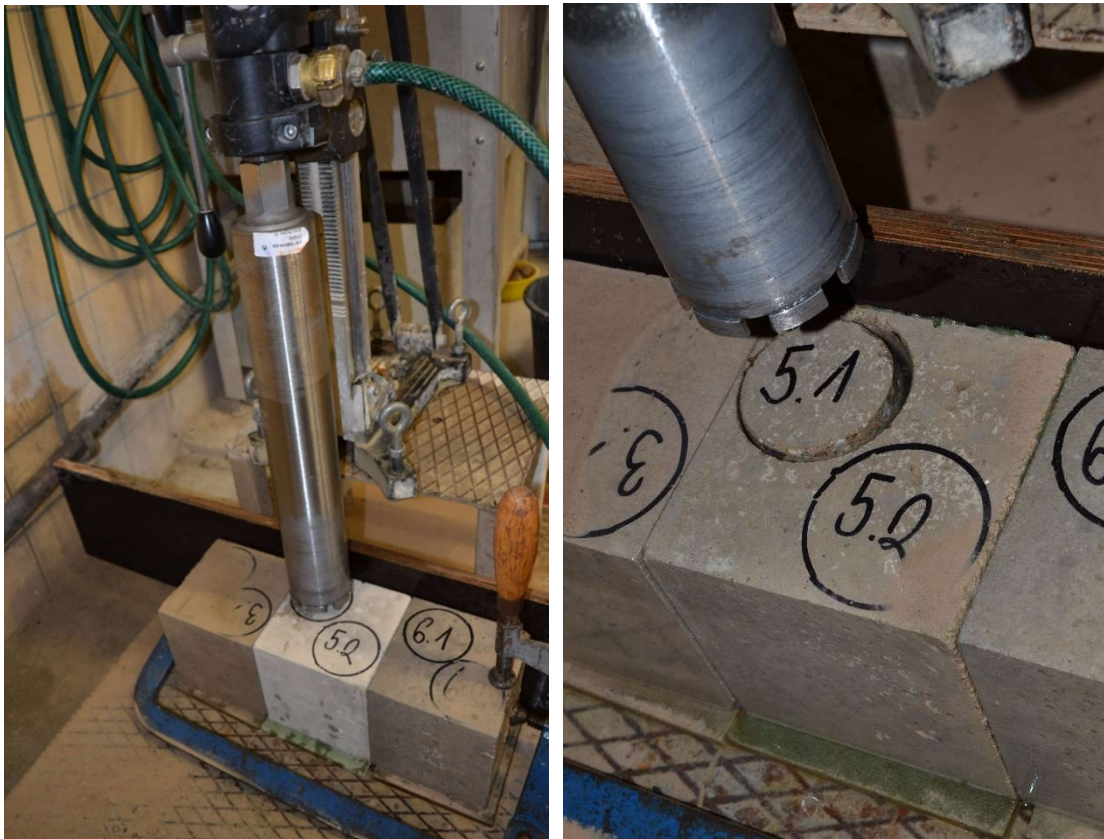
Porovnání s odrazovými tvrdoměry není tak názorné jako u impulzové metody. V Obrázek 12 na sloupu II se hodnota odrazu Q zhruba v polovina pohybovala kolem 26 až 37. Postupně hodnota odrazu Q se zvětšovala, jak k hornímu líci, tak k dolnímu líci.

Závěrem můžeme říct, že ultrazvuková impulzová metoda je velice výhodná pro zjištění rovnoměrnosti betonu a více názorná než měření pomocí odrazových tvrdoměrů.

4.4 Zkoušky jádrových vývrtů

4.4.1 Odběr jádrových vývrtů

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1 z 8 krychlí se odebraly jádrové vývrty o \varnothing 75 mm. Vývrty se provedly pomocí jádrové vrtačky a korunkou s diamantovými segmenty viz Obrázek 21. Před odběrem vzorků se musí jádrová vrtačka pevně upevnit a vyrovnat pomocí kruhové libely. V průběhu vrtání byla korunka chlazena vodou, aby nedošlo k poškození a omezení prašnosti. Vzorky musí být rovně vyvrtané, pokud by došlo k nerovnoměrnému vývrtu, může dojít ke zkreslení pevnosti v tlaku.

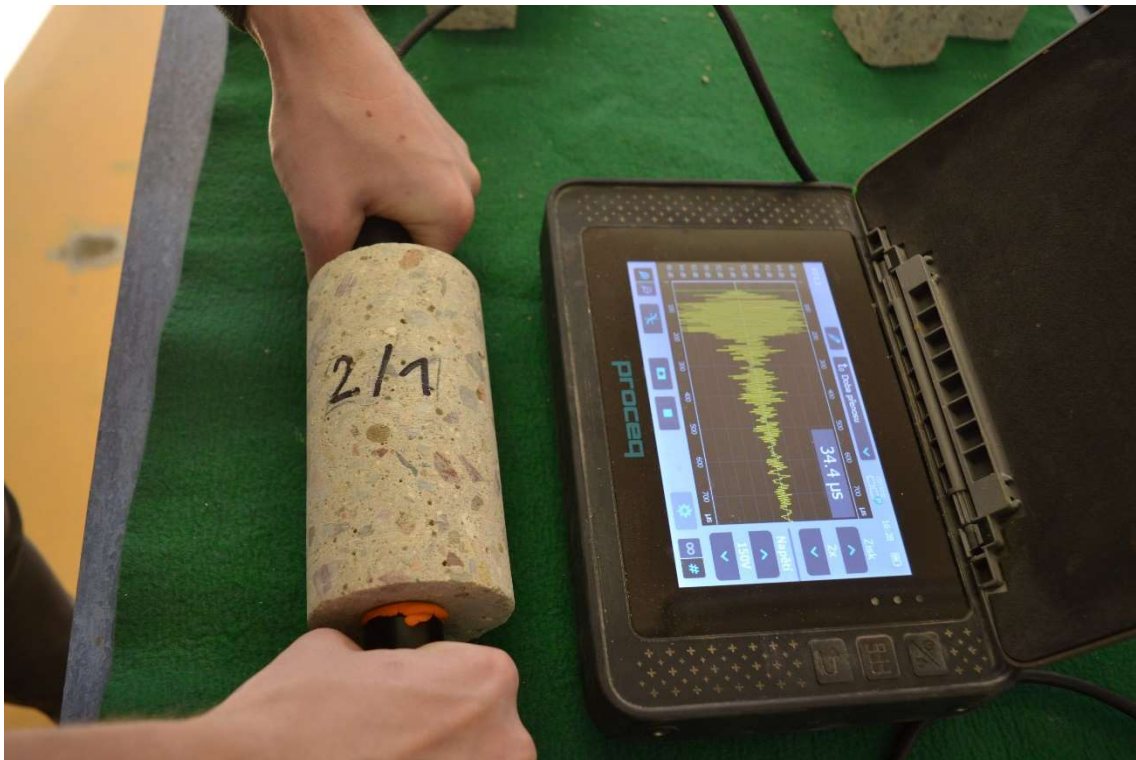


Obrázek 21: Jádrová vrtačka s tělesy (archiv P.Cikrle)

4.4.2 Ultrazvuková a rezonanční metoda na jádrových vývrtech

Další použitou nedestruktivní metodou byla ultrazvuková impulzivní metoda. Díky této metodě se změřila doba průchodu ultrazvukového impulsu na zkušebních tělesech. Následně se vypočítaly pevnosti, které se porovnal se skutečnou pevností. Pro vyhodnocení bylo nutné změřit dobu průchodu t a dopočítat rychlost impulsu v_L podle vztahu (4).

Ke stanovení doby průchodu byl použit přístroj Pundit PL-200 viz kapitola 2.5.2. Před každým započatým měřením byl přístroj zkalibrován pomocí speciálního válečku. Doba průchodu se měřila na 8 zkušebních krychlí 150x150x150 mm a 16 jádrových vývrtech \varnothing 75 mm. Prozvučení těles probíhalo přímo, ve třech místech. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná doba t a rychlost impulsu v_L . Ze změřených rychlostí impulsů pro jádrové vývrty byla vytvořena kvadratická regrese. Na vodorovné ose X jsou hodnoty rychlosti impulsu a na svislé ose Y pevnosti v tlaku pro dané zkušební těleso. Výsledkem je 16 naměřených hodnot $[v_L, f_{c,cyl}]$.

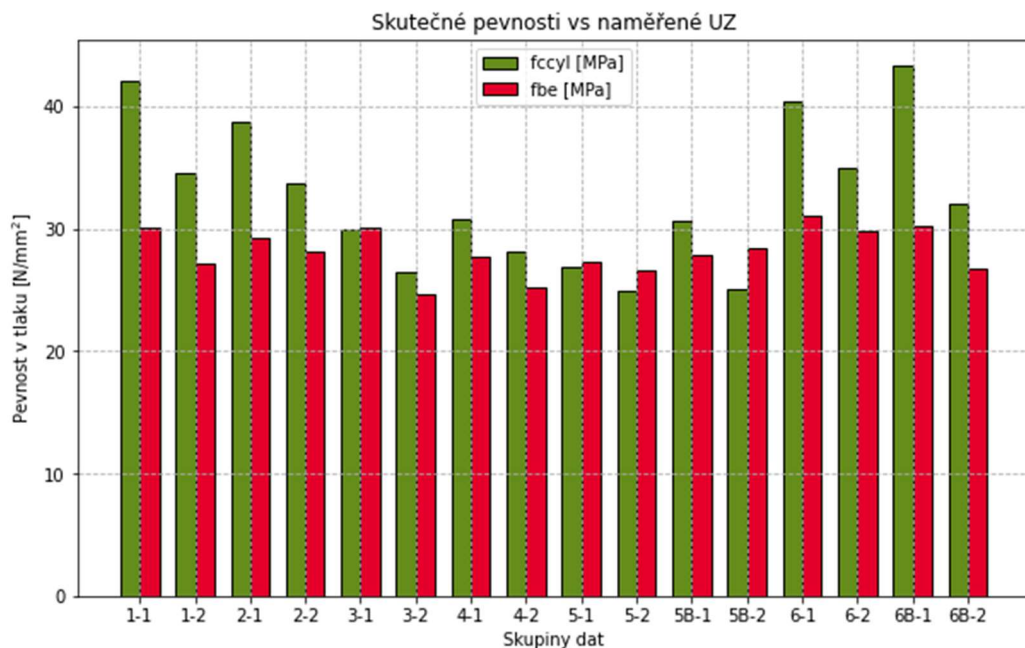


Obrázek 22: Měření doby průchodu impulsu na vývrtnu \varnothing 75 mm (archiv P.Cikrle)

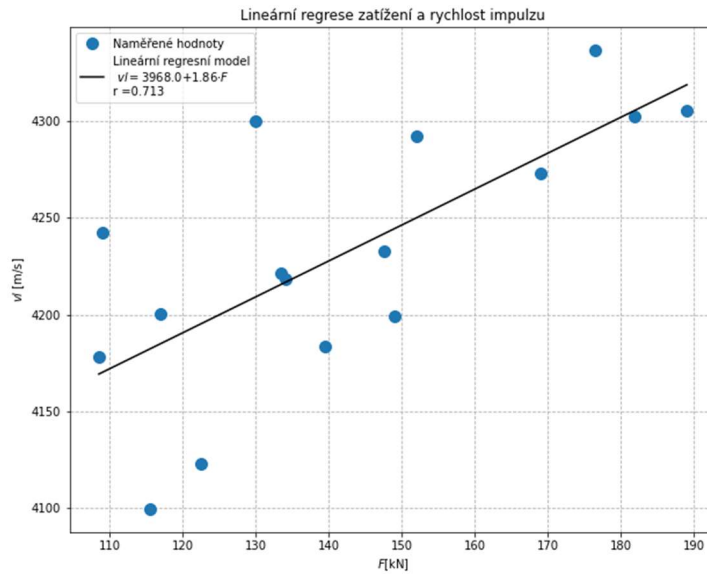
Tabulka 11: Naměřené hodnoty jádrových vývrtů Ø 75 mm

Válec	L	t_1	t_2	t_3	\bar{t}	v_L	f_{cyl}	f_{be}
	[mm]	[µs]				[m/s]	[MPa]	[MPa]
1-1	147,71	34,5	34,3	34,2	34,3	4302,2	42,1	30,1
1-2	145,57	35,2	34,0	34,8	34,7	4199,1	34,5	27,2
2-1	147,42	34,4	34,6	34,5	34,5	4273,0	38,8	29,3
2-2	147,02	34,8	34,8	34,6	34,7	4232,8	33,8	28,1
3-1	148,48	34,7	34,4	34,5	34,5	4299,6	29,9	30,0
3-2	147,58	36,2	35,8	36,0	36,0	4099,4	26,4	24,6
4-1	148,20	34,9	35,4	35,1	35,1	4218,2	30,8	27,7
4-2	145,95	34,9	35,5	35,8	35,4	4122,9	28,2	25,2
5-1	148,56	34,9	35,2	36,0	35,4	4200,6	26,9	27,3
5-2	147,35	34,9	35,5	35,4	35,3	4178,2	24,9	26,6
5B-1	147,89	35,0	34,8	35,3	35,0	4221,4	30,6	27,8
5B-2	146,93	34,9	34,7	34,3	34,6	4242,4	25,0	28,4
6-1	148,31	34,4	33,7	34,5	34,2	4336,5	40,5	31,1
6-2	148,07	35,0	34,4	34,1	34,5	4291,9	34,9	29,8
6B-1	148,68	34,1	34,3	35,2	34,5	4305,4	43,3	30,2
6B-2	147,81	35,9	34,8	35,3	35,3	4183,3	32,1	26,8

Pomocí sloupcového grafu byla porovnána skutečná pevnost v tlaku stanovená na jádrových vrtech $f_{c,cyl}$ mezi vypočítanou pevností podle hodnot ultrazvuku f_{be} viz Obrázek 23. Jen pro zajímavost byla vyzkoušena lineární regrese mezi maximální silou F , při které se zkoušené těleso poruší a rychlostí impulzu viz Obrázek 24.



Obrázek 23: Skutečné pevnosti vs. naměřené pevnosti UZ pro jádrové vývrtý Ø 75 mm



Obrázek 24: Lineární regrese mezi maximální stanovenou silou a rychlostí impulzu

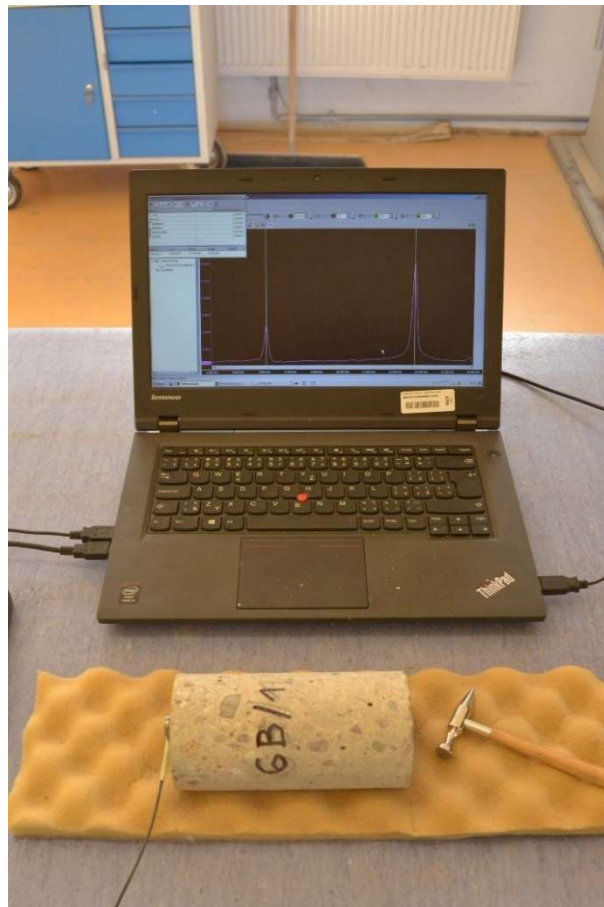
Rezonanční metoda sloužila jako doplňková nedestruktivní metoda. Byla použita pouze na jádrových vývrtech $\varnothing 75$ mm. Je to velice efektivní metoda pro stanovení dynamických hodnot. Měřicí zařízení se skládalo ze tří částí (Fourierův analyzátor, impulzivní kladívko a snímač zrychlení). Díky tomuto zařízení jsme mohli změřit tři typy kmitání podélné f_L , příčné f_f a kroutivé f_t . Každé kmitání se od sebe trochu liší. Principy měření kmitání jsou vysvětleny v kapitole 2.6. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 12.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty vlnění pomocí rezonanční metody

Označení	m	\varnothing	L	f_L	f_f	f_t
	[g]	[mm]	[mm]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1-1	1453,2	74,18	147,71	12987	7803	8407
1-2	1421,6	74,15	145,57	13096	7988	8323
2-1	1414,7	74,52	147,42	12786	7829	8198
2-2	1403,5	74,59	147,02	12693	1829	8164
3-1	1441,0	74,40	148,48	12668	7694	8130
3-2	1418,7	74,60	147,58	12330	7627	7896
4-1	1444,1	74,41	148,20	12794	7808	8214
4-2	1398,6	74,42	145,95	12945	7946	8332
5-1	1444,1	74,45	148,56	12500	7543	7954
5-2	1404,9	74,55	147,35	12266	7392	7787
5B-1	1432,4	74,50	147,89	12719	7585	8130
5B-2	1413,6	74,48	146,93	12601	7711	8122
6-1	1471,3	74,55	148,31	13062	7963	8432
6-2	1437,0	74,49	148,07	12660	7795	8172
6B-1	1454,0	74,56	148,68	12945	7812	8273
6B-2	1416,4	74,42	147,81	12635	7661	8080

Tabulka 13: Vypočítané dynamické hodnoty pro jádrové vývrty

Označení	ρ	E_{brt}	G_{br}	i	E_{crf}	V_{br}	c	ΔE_{br}
	[kg/m ³]	[GPa]	[GPa]	[-]	[GPa]	[-]	[-]	[%]
1-1	2277,6	33,5	14,0	0,0	81,0	0,2	5,3	1,4
1-2	2262,6	32,9	13,3	0,0	81,9	0,2	5,5	1,5
2-1	2201,4	31,3	12,9	0,0	78,8	0,2	5,4	1,5
2-2	2185,8	30,4	12,6	0,0	4,2	0,2	5,4	-0,9
3-1	2233,5	31,6	13,0	0,0	79,3	0,2	5,4	1,5
3-2	2200,5	29,1	12,0	0,0	74,9	0,2	5,4	1,6
4-1	2241,9	32,2	13,3	0,0	81,3	0,2	5,4	1,5
4-2	2204,1	31,5	13,0	0,0	77,9	0,2	5,4	1,5
5-1	2234,1	30,8	12,5	0,0	77,1	0,2	5,5	1,5
5-2	2185,4	28,6	11,5	0,0	70,4	0,2	5,5	1,5
5B-1	2223,0	31,5	12,9	0,0	75,7	0,2	5,4	1,4
5B-2	2209,4	30,3	12,6	0,0	74,9	0,2	5,4	1,5
6-1	2273,9	34,1	14,2	0,0	85,2	0,2	5,4	1,5
6-2	2228,0	31,3	13,0	0,0	79,6	0,2	5,4	1,5
6B-1	2240,9	33,2	13,6	0,0	82,6	0,2	5,4	1,5
6B-2	2204,1	30,8	12,6	0,0	76,6	0,2	5,4	1,5

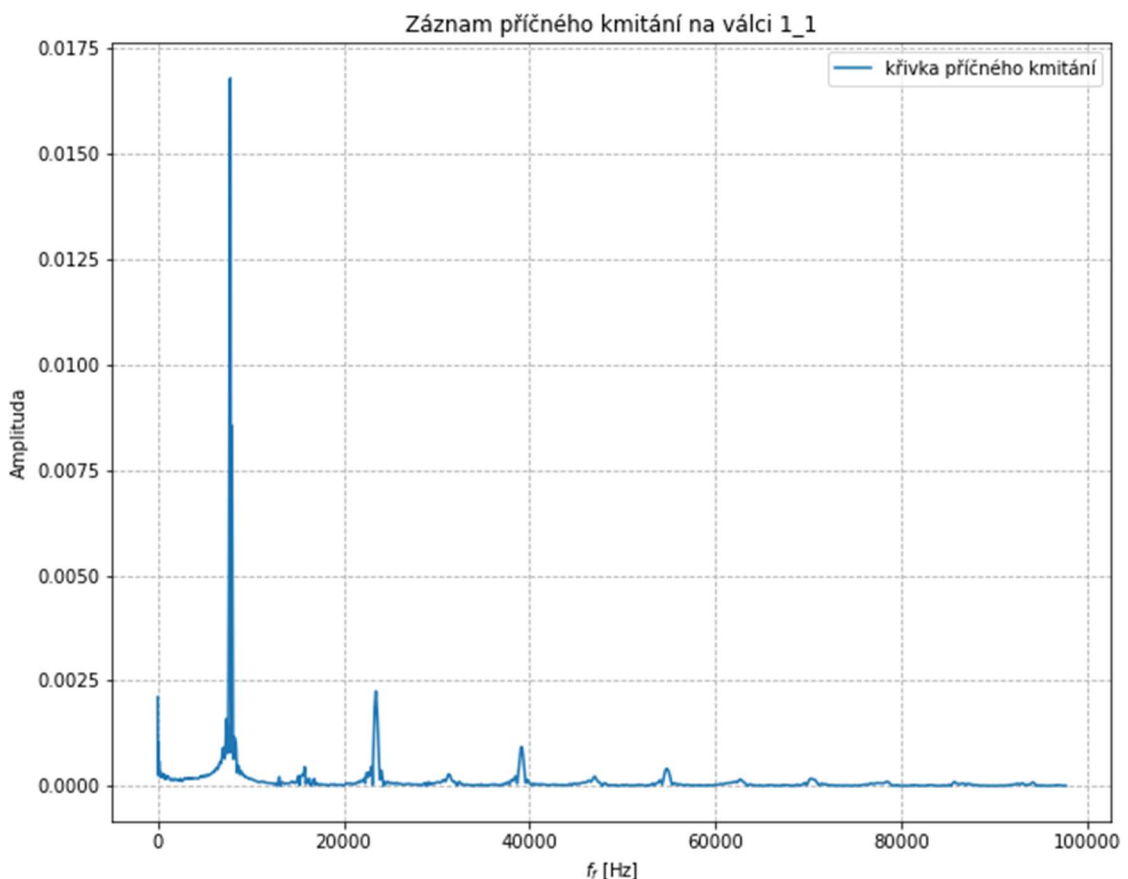


Obrázek 25: Měření podélného kmitání f_L na vzorku 6B/1 (archiv P.Cikrle)

Pro větší přehlednost byla zhotovena Tabulka 13, ve které jsou vypočítané hodnoty ze základních rozměrů vývrtů a kmitání z Tabulka 12. Z těchto hodnot byla vypočítána objemová hmotnost ρ ze vztahu (10). Následně se vypočítal modul pružnosti v tahu/tlaku, který se stanoví dvěma způsoby. Buď pomocí podélného kmitání E_{brl} ze vztahu (11) anebo příčného kmitání E_{crf} vztah (12).

Díky vypočítání podélného kmitání E_{brl} a příčného kmitání E_{crf} se vypočítala odchylka ΔE_{br} . Tato odchylka může vyjít kladně i záporně a neměla by se lišit o více jak 10 %. Pokud nastane případ, že se liší o více jak 10 %, tak zkoušená tělesa nejsou homogenní. V našem případě pro testované vzorky vyšla kolem 1,5 % a u vzorku 2-2 dosahovala záporné hodnoty - 0,86 %. Podle této skutečnosti můžeme tedy uvažovat, že všechny naše testovací vzorky jsou homogenní.

Jako jedno z mála se dá vypočítat, díky této metodě, Poissonovo číslo ν_{br} ze vztahu (15). Je to bezrozměrové číslo a nabývá hodnot $\langle 0;0,5 \rangle$. S tímto číslem úzce souvisí dynamický modul pružnosti ve smyku G_{br} (14). Poissonovo číslo pro beton se pohybuje kolem 0,2.



Obrázek 26: Křivka příčného kmitání f_f na válci 1_1

4.4.3 Stanovení pevnosti v tlaku na tělesech

Pevnosti v tlaku se stanovily pro 16 jádrových vývrtů \varnothing 75 mm, 16 krychlí o rozměrech 50x50x50 mm a 16 kvádrů 50x50x100 mm. Všechny tělesa byla zvážena a přeměřena. Před stanovením maximální síly, při které se vzorek poruší, musí být tlačné plochy obroušeny. Obroušení se provede pomocí jemnozrnného korundového prášku, který zajistí dokonale rovnou plochu. Pro stanovení maximální síly, při kterém se těleso poruší byl použit hydraulický lis viz Obrázek 27. Všechny hodnoty jsou zapsány v Tabulka 14. Červeně je vyznačen vzorek s nejnižší pevností v tlaku a zeleně s nejvyšší pevností.



Obrázek 27: Stanovení pevnosti v tlaku $f_{c,cyl}$

Tabulka 14: Stanovení maximální síly na jádrových vývrtech

Označení	m	\varnothing	L	F	A	$f_{c,cyl}$
	[g]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm ²]	[MPa]
1-1	1453,2	74,18	147,71	181,8	4319,6	42,1
1-2	1421,6	74,15	145,57	149,0	4316,1	34,5
2-1	1414,7	74,52	147,42	169,0	4359,3	38,8
2-2	1403,5	74,59	147,02	147,5	4367,5	33,8
3-1	1441,0	74,40	148,48	130,0	4345,3	29,9
3-2	1418,7	74,60	147,58	115,5	4368,7	26,4
4-1	1444,1	74,41	148,20	134,0	4346,4	30,8
4-2	1398,6	74,42	145,95	122,5	4347,6	28,2
5-1	1444,1	74,45	148,56	117,0	4351,1	26,9
5-2	1404,9	74,55	147,35	108,5	4362,8	24,9
5B-1	1432,4	74,50	147,89	133,5	4356,9	30,6
5B-2	1413,6	74,48	146,93	109,0	4354,6	25,0
6-1	1471,3	74,55	148,31	176,5	4362,8	40,5
6-2	1437,0	74,49	148,07	152,0	4355,8	34,9
6B-1	1454,0	74,56	148,68	189,0	4364,0	43,3
6B-2	1416,4	74,42	147,81	139,5	4347,6	32,1

Pro doplnění těchto zkoušek byly vyrobeny ze stejných směsí krychle o rozměrech 50x50x50 mm a kvádry 50x50x100 mm. Všechny tělesa byla změřena, zvážena a provedlo se také obroušení tlačných ploch, abychom zajistili, co nejlepší výsledky. Všechny výsledky jsou zapsané v Tabulka 15 a Tabulka 16, kde červeně jsou vyznačeny nejnižší pevnosti v tlaku a zeleně nejvyšší.



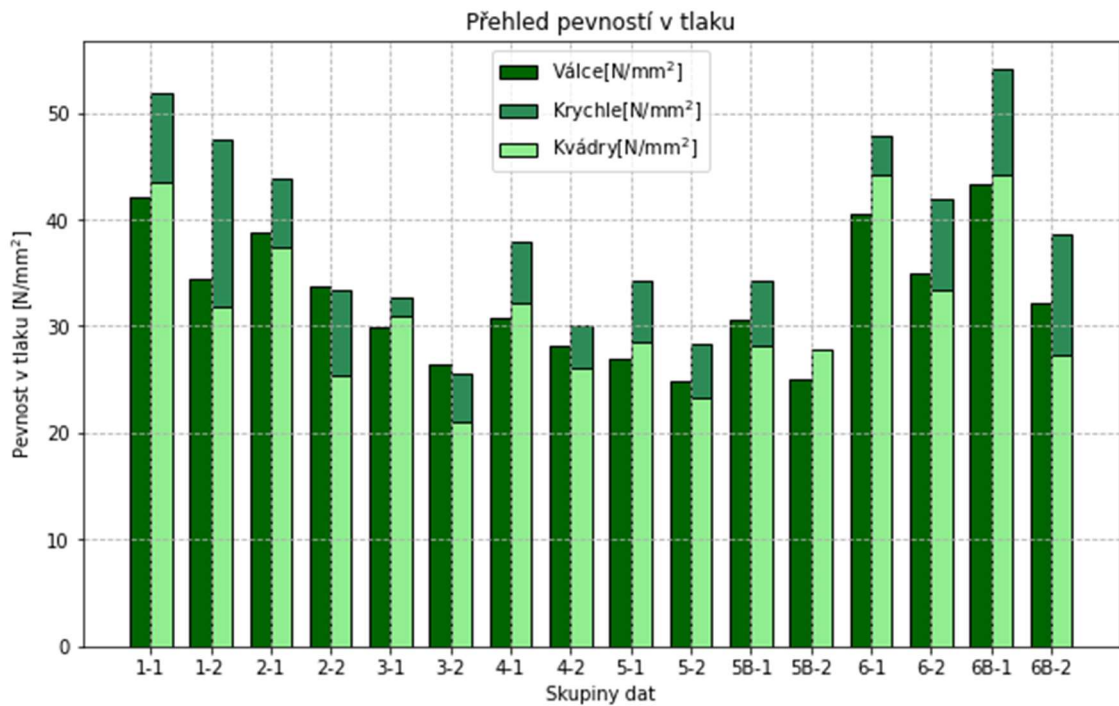
Obrázek 28: Porušení kvádru při stanovení maximální síly (archiv P.Cikrle)

Tabulka 15: Stanovení maximální síly na krychlích 50x50x50 mm

Označení	m	Zatěžovací plocha		v	F	$f_{c,cube}$
	[g]	a[mm]	b[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1-1	342,5	52,8	53,28	53,37	145,8	51,8
1-2	326,8	53,15	52,58	52,34	132,6	47,5
2-1	318,7	52,26	52,34	52,59	120,0	43,9
2-2	324,3	53,46	52,14	54,05	93,0	33,4
3-1	319,1	52,50	52,53	52,41	90,1	32,7
3-2	298,9	51,36	52,91	51,02	69,4	25,5
4-1	319,6	52,28	52,63	52,33	104,2	37,9
4-2	323,2	54,62	52,21	52,45	85,9	30,1
5-1	318,4	52,64	52,36	51,86	94,3	34,2
5-2	314,6	53,77	52,44	52,08	80,0	28,4
5B-1	318,1	52,30	52,02	51,80	93,1	34,2
5B-2	291,8	51,90	51,83	50,70	60,7	22,6
6-1	327,9	52,26	52,33	52,65	130,7	47,8
6-2	327,5	52,92	52,68	53,43	117,0	42,0
6B-1	320,1	52,05	52,08	52,80	146,6	54,1
6B-2	322,0	54,36	52,26	52,5	109,5	38,5

Tabulka 16: Stanovení maximální síly na kvádrech 50x50x100 mm

Označení	m	Zatěžovací plocha		v	F	$f_{c,kvádr}$
	[g]	a [mm]	b [mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1-1	594,3	52,36	52,74	94,39	120,2	43,5
1-2	600,4	54,13	52,36	95,26	90,2	31,8
2-1	576,9	52,67	52,32	95	103	37,4
2-2	595,6	53,66	54,51	95,47	74,3	25,4
3-1	584,6	52,16	52,07	95,15	83,9	30,9
3-2	575,2	52,85	51,57	96,35	57,3	21,0
4-1	581,1	52,57	52,22	94,74	88,2	32,1
4-2	570,7	52,92	52,12	95,38	71,8	26,0
5-1	579,2	52,17	52,43	95,36	78,1	28,6
5-2	558,6	52,16	51,63	95,22	62,7	23,3
5B-1	578,1	52,24	51,7	95,7	76,1	28,2
5B-2	551,2	50,46	51,99	95,84	73,2	27,9
6-1	598,6	52,79	52,28	94,92	121,7	44,1
6-2	584,5	52,73	52,69	94,84	92,7	33,4
6B-1	591,5	52,42	52,56	95,37	121,7	44,2
6B-2	576,8	53,23	51,79	95,5	75,2	27,3



Obrázek 29: Pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech

Pevnosti v tlaku byly vykresleny pomocí sloupcového grafu viz Obrázek 29. Největších pevností v tlaku byly stanoveny na krychlích. Současně platí, že pevnosti stanovené na kvádrech vychází zhruba o 20 % nižší.

4.5 Vyhodnocení podle normy ČSN EN 13791

4.5.1 Stanovení pevnosti na základě jádrových vývrtů

Vyhodnocení bude stanoveno pro 16 jádrových vývrtů, které jsou uvedeny v Tabulka 17 a jejich sdružených hodnot tedy 8 jádrových vývrtů viz Tabulka 18.

Tabulka 17: Stanovení pevnosti na jádrových vývrtech \varnothing 75 mm

Označení	m	\varnothing	L	F	A	$f_{c,cyl}$
	[g]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm ²]	[MPa]
1-1	1453,2	74,18	147,71	181,8	4319,6	42,1
1-2	1421,6	74,15	145,57	149,0	4316,1	34,5
2-1	1414,7	74,52	147,42	169,0	4359,3	38,8
2-2	1403,5	74,59	147,02	147,5	4367,5	33,8
3-1	1441,0	74,40	148,48	130,0	4345,3	29,9
3-2	1418,7	74,60	147,58	115,5	4368,7	26,4
4-1	1444,1	74,41	148,20	134,0	4346,4	30,8
4-2	1398,6	74,42	145,95	122,5	4347,6	28,2
5-1	1444,1	74,45	148,56	117,0	4351,1	26,9
5-2	1404,9	74,55	147,35	108,5	4362,8	24,9
5B-1	1432,4	74,50	147,89	133,5	4356,9	30,6
5B-2	1413,6	74,48	146,93	109,0	4354,6	25,0
6-1	1471,3	74,55	148,31	176,5	4362,8	40,5
6-2	1437,0	74,49	148,07	152,0	4355,8	34,9
6B-1	1454,0	74,56	148,68	189,0	4364,0	43,3
6B-2	1416,4	74,42	147,81	139,5	4347,6	32,1

Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ na 16 jádrových vývrtech \varnothing 75 mm:

$$f_{c,m(n)is} = \frac{\sum f_{c,cyl}}{m} = \frac{522,7}{16} = 32,7 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 32,7 - 1,81 \cdot 5,79 = 22,2 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 24,9 + 4 = 28,9 \text{ MPa}$$

Stanovená pevnost v tlaku in situ je menší hodnota z $f_{ck,is}$, tedy v našem případě **22,2 MPa**. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.

Tabulka 18: Stanovení pevnosti pro sdružené hodnoty na jádrových vývrtích Ø 75 mm

Označení	m	\emptyset	L	F	A	$f_{c,cyl}$
	[g]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm ²]	[MPa]
1	1437,4	74,2	146,6	165,4	4317,9	38,3
2	1409,1	74,6	147,2	158,3	4363,4	36,3
3	1429,9	74,5	148,0	122,8	4357,0	28,2
4	1421,4	74,4	147,1	128,3	4347,0	29,5
5	1424,5	74,5	148,0	112,8	4356,9	25,9
5B	1423,0	74,5	147,4	121,3	4355,8	27,8
6	1454,2	74,5	148,2	164,3	4359,3	37,7
6B	1435,2	74,5	148,2	164,3	4355,8	37,7

Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ z 8 výsledků pevností jádrových vývrtů, které jsou brány jako průměrná hodnota ze dvou vývrtů na jednu tělese:

$$f_{c,m(n)is} = \frac{\sum f_{c,cyl}}{m} = \frac{261,3}{8} = 32,7 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 32,7 - 2,0 \cdot 4,9 = \mathbf{24,7 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 25,9 + 4 = 29,9 \text{ MPa}$$

Stanovená pevnost v tlaku in situ je menší hodnota z $f_{ck,is}$, tedy v našem případě 24,7 MPa.

Z naměřených hodnot se stanoví $f_{c,cyl}$, která se stanoví $\frac{F}{A}$. Dále stanovíme $f_{c,m(n)is}$, což je průměrná hodnota všech $f_{c,cyl}$. Podle vztahů (16),(17) se vypočítá pevnost v tlaku in situ $f_{ck,is}$, kde se následně vybere nižší pevnost v tlaku $f_{c,is,lowest}$. Ve vztahu (16) je součinitel k_n , který je uveden v Tabulka 2. V našem případě máme 16 jádrových vývrtů, tím pádem se součinitel rovna 1,81. Dále se jen dosadí vypočtená směrodatná odchylka a vypočte $f_{ck,is}$. Ve vztahu (17) se vyskytuje nejmenší stanovená pevnost na válcích $f_{c,cyl}$, která je v Tabulka 17 vyznačená červenou barvou. Z této pevnosti se následně vybere hodnota M uvedená v Tabulka 3. Dle výsledků můžeme vidět, že menší hodnota pevnosti v tlaku v in situ vyšla podle vzorce (16) tedy 22,2 MPa. Pro sdružené hodnoty se pevnost v tlaku in situ $f_{ck,is}$ zvedla o 2,5 MPa.

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě 16 jádrových vývrtů $f_{ck,is} = \mathbf{22,2 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.

Charakteristická pevnost v tlaku in situ stanovená na 8 výsledcích pevností z jádrových vývrtů, které jsou brány jako průměrná hodnota ze dvou vývrtů na jednom tělese je $f_{ck,is} = \mathbf{24,7 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.

4.5.2 Kombinace nepřímých metod a jádrových vývrtů

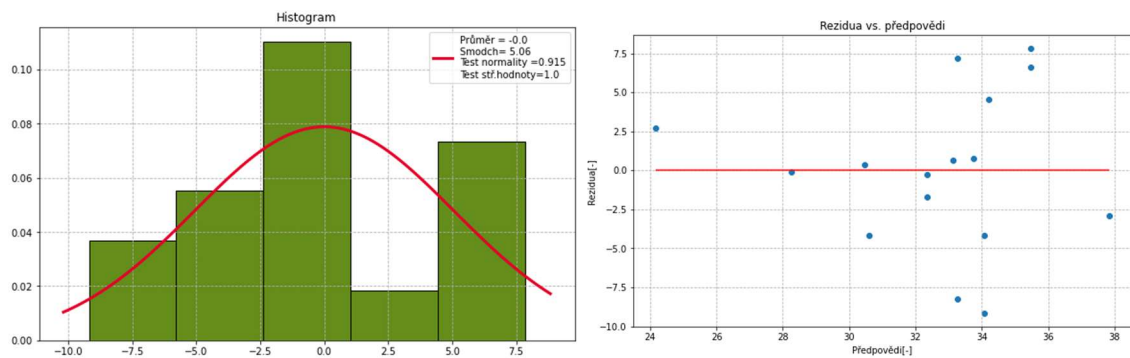
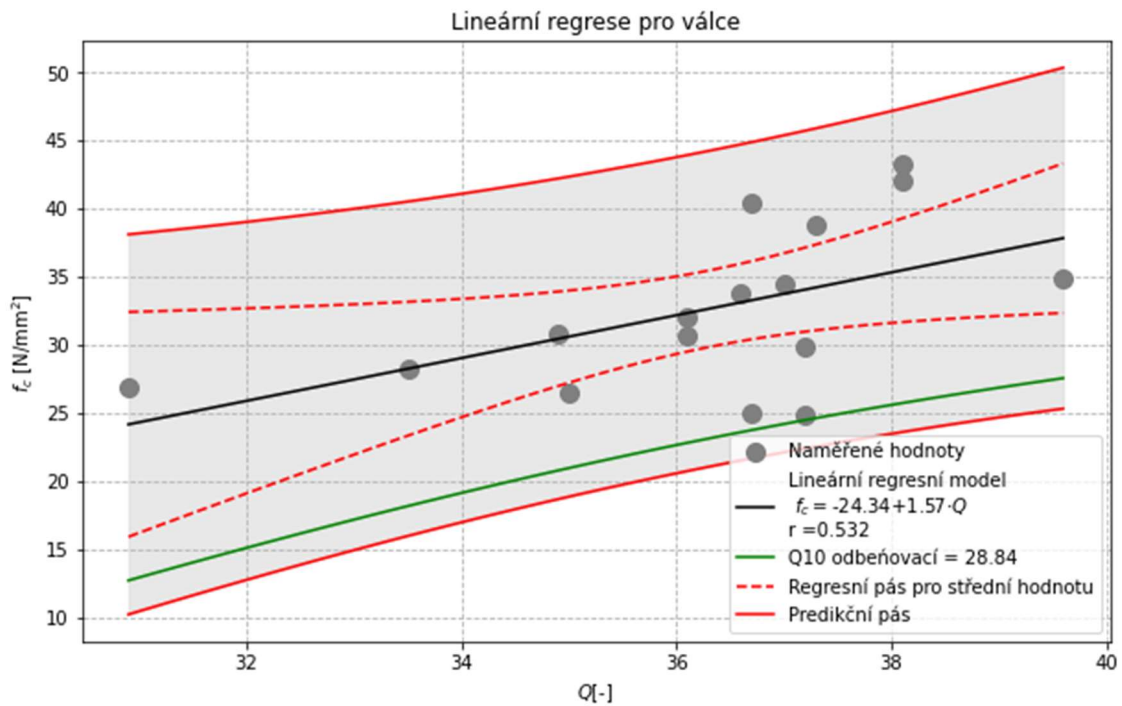
4.5.2.1 Odrazové tvrdoměry

Z naměřených hodnot odrazů Q a pevností v tlaku f_c byla tvorba regresní závislosti. Každé hodnotě odrazu Q byla přiřazena pevnost v tlaku f_c . Pevnost v tlaku byla zjištěna na válcových vývrtech, krychlích a kvádrech. Jednotlivé body byly vyneseny do bodového grafu. Vodorovná osa X byla přiřazena hodnotám odrazu Q a svislá osa Y pevnostním v tlaku [N/mm²].

Vynesené body jsou proloženy přímkou metody nejmenších čtverců. Kolem přímky je vytvořen regresní pás, ve kterém se nachází 95 % hodnot. Zelenou barvou je vyobrazena odbedňovací křivka s hodnotou spolehlivosti 95 %.

Tabulka 19: Hodnoty odrazu Q a pevnosti v tlaku pro válce \varnothing 75 mm

Ozn.	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	SK9	SK10	p	Q	$f_{c,cyl}$
1-1	39	39	39	39	39	38	35	39	35	39	0,0004	38,1	42,1
1-2	38	38	40	38	39	36	36	35	35	35	0,1500	37	34,5
2-1	36	40	43	38	38	41	38	39	40	40	0,7700	39,3	38,8
2-2	36	36	36	34	40	36	38	37	40	39	0,2700	37,2	33,8
3-1	36	37	38	39	38	36	33	38	36	35	0,4600	36,6	29,9
3-2	35	37	40	34	38	35	35	37	43	38	0,2500	37,2	26,4
4-1	34	35	34	32	35	35	39	36	33	37	0,8000	35	30,8
4-2	36	34	35	35	36	32	34	37	36	34	0,4900	34,9	28,2
5-1	34	29	31	32	33	32	36	33	38	37	0,8200	33,5	26,9
5-2	30	29	29	29	31	35	30	36	28	32	0,0670	30,9	24,9
5B-1	36	39	38	37	39	36	36	35	36	40	0,1900	37,2	30,6
5B-2	36	37	38	36	36	34	38	38	34	34	0,053	36,1	25,0
6-1	36	36	37	37	37	38	36	36	38	36	0,008	36,7	40,5
6-2	37	38	38	39	39	34	36	38	34	34	0,043	36,7	34,9
6B-1	38	41	44	39	38	42	38	39	38	39	0,012	39,6	43,3
6B-2	36	38	35	41	35	38	40	39	40	39	0,294	38,1	32,1



Obrázek 30: Lineární regrese a analýza pro válce Ø75 mm

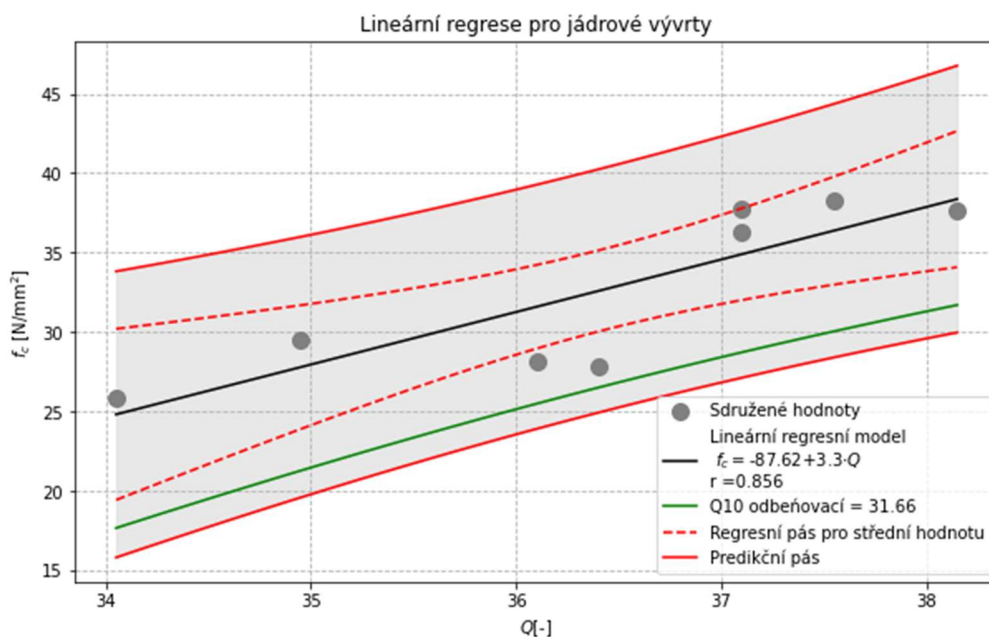
Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ na tělesech $f_{c,2:1core}$:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,isreg})}{m} = \frac{527,60}{16} = 33,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 33,0 - 1,81 \cdot 5,79 = \mathbf{22,5 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 24,87 + 4 = 28,9 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě regresní analýzy kombinace odrazových tvrdměřů a 16 jádrových vývrtů je $f_{ck,is} = \mathbf{22,5 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.



Obrázek 31: Lineární regrese pro sružené hodnoty na jádrových vývrtech

V Obrázek 31 je lineární regrese stanovena na sružených bodech. Z osmi byly krychle vždy odebrány dva vývrty a jejich hodnoty odrazu Q a pevnosti v tlaku $f_{c,cyl}$ se zprůměrovaly. Součinitel spolehlivosti vychází daleko příznivěji $r = 0,856$ oproti Obrázek 30, kde součinitel spolehlivosti vychází $r = 0,532$. Toto sružení zlepšilo tento součinitel okolo 30 %. Důsledkem je to, že není mezi naměřenými hodnotami není taková variabilita než na Obrázek 30.

Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ na tělesech $f_{c,2:1core}$:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,isreg})}{m} = \frac{262,81}{8} = 32,85 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 32,85 - 2,0 \cdot 4,93 = \mathbf{23,0 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 25,88 + 4 = 29,9 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě regresní analýzy kombinace odrazových tvrdměřů a 8 výsledků pevností z jádrových vývrťů, které jsou brány jako průměrná hodnota ze dvou vývrťů na jednom tělese je $f_{ck,is} = \mathbf{23,0 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.

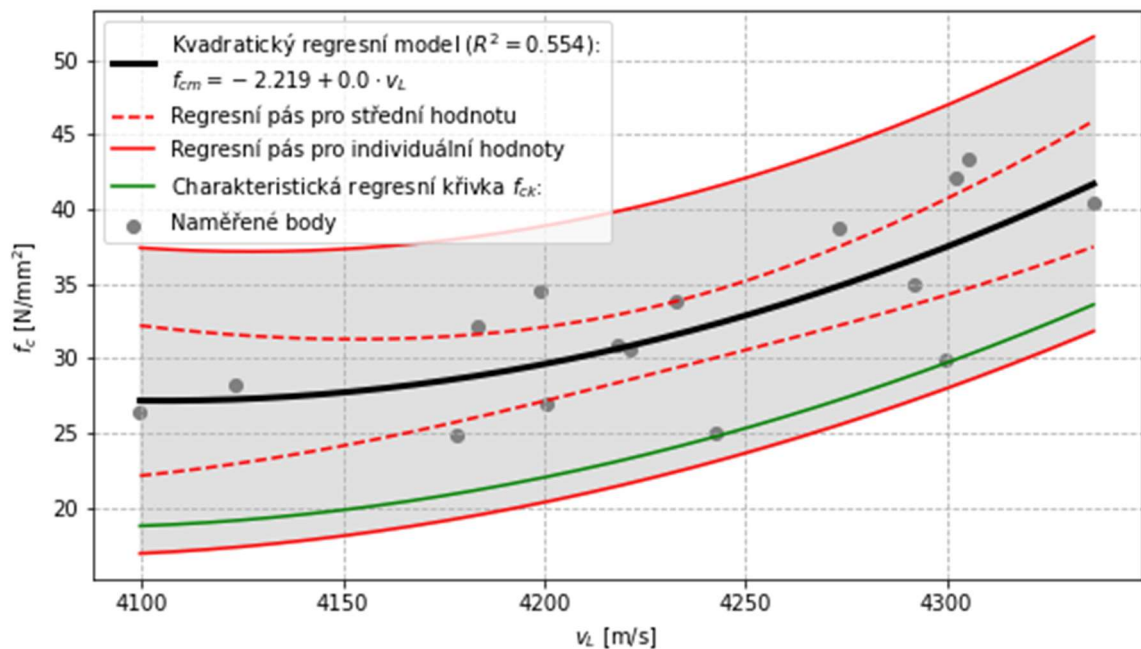
4.5.2.2 Ultrazvuková impulzová metoda

Z naměřených hodnot rychlosti impulzu v_L a pevností v tlaku f_c byla tvorba regresní závislosti. Každé rychlosti impulzu v_L byla přiřazena pevnost v tlaku f_c . Pevnost v tlaku byla zjištěna na válcových vývrtech, krychlích a kvádrech. Jednotlivé body byly vyneseny do bodového grafu. Vodorovná osa X byla přiřazena hodnotám rychlost impulzu v_L a svislá osa Y pevnostním v tlaku [N/mm²].

Stanovena regrese pro 16 jádrových vývrtů. Hodnoty jsou v Tabulka 11. Dále byla kvadratická regrese pro sdružené hodnoty jádrových vývrtů.

Tabulka 20: Sdružené hodnoty pro jádrové vývrtý

Označení	L	t_1	t_2	t_3	\bar{t}	v_L	$f_{c,cyl}$	f_{be}
	[mm]	[μs]				[m/s]	[MPa]	[MPa]
1	146,6	34,9	34,2	34,5	34,5	4250,7	38,3	28,7
2	147,2	34,6	34,7	34,6	34,6	4252,9	36,3	28,7
3	148,0	35,5	35,1	35,3	35,3	4199,5	28,2	27,3
4	147,1	34,9	35,5	35,5	35,3	4170,5	29,5	26,5
5	148,0	34,9	35,4	35,7	35,3	4189,4	25,9	26,9
5B	147,4	35,0	34,8	34,8	34,8	4231,9	27,8	28,1
6	148,2	34,7	34,1	34,3	34,4	4314,2	37,7	30,5
6B	148,2	35,0	34,6	35,3	34,9	4244,4	37,7	28,5



Obrázek 32: Kvadratická regrese $f_{c,cyl}$ na rychlosti průchodu ultrazvukového impulsu v_L pro jádrové vývrtý $\varnothing 75 \text{ mm}$

Regrese byla provedena polynomem 2 stupně. Kolem křivky je vytvořen regresní pás, ve kterém se nachází 95 % hodnot. Zelenou barvou je vyobrazena regresní křivka s hodnotou spolehlivosti 95 %. Součinitel determinace $R^2=0,554$.

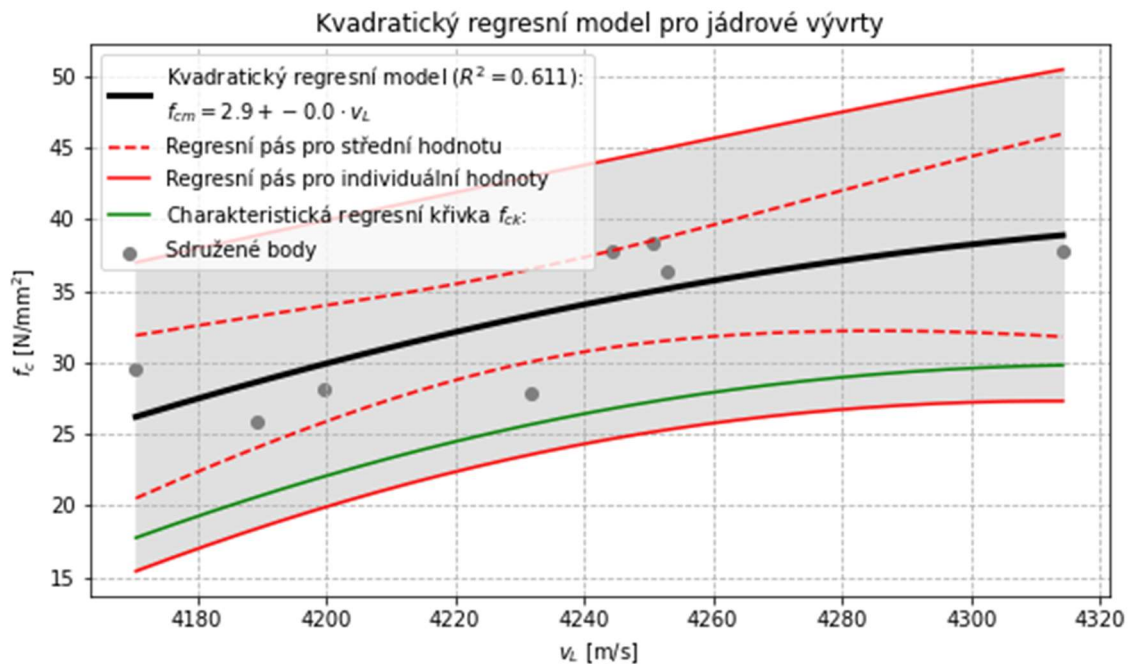
Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ na tělesech $f_{c,2:1core}$:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,isreg})}{m} = \frac{563,63}{16} = 35,2 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 35,2 - 1,81 \cdot 5,79 = \mathbf{24,7 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 24,9 + 4 = 28,9 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě regresní analýzy kombinace ultrazvuků a 16 jádrových vývrtů je $f_{ck,is} = \mathbf{24,7 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.



Obrázek 33: Kvadratická regrese $f_{c,cyl}$ na rychlosti průchodu ultrazvukového impulsu v_L pro sdružené hodnoty jádrových vývrtů $\varnothing 75 \text{ mm}$

Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ na tělesech $f_{c,2:1cor}$:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,isreg})}{m} = \frac{301,42}{8} = 37,7 \text{ MPa}$$

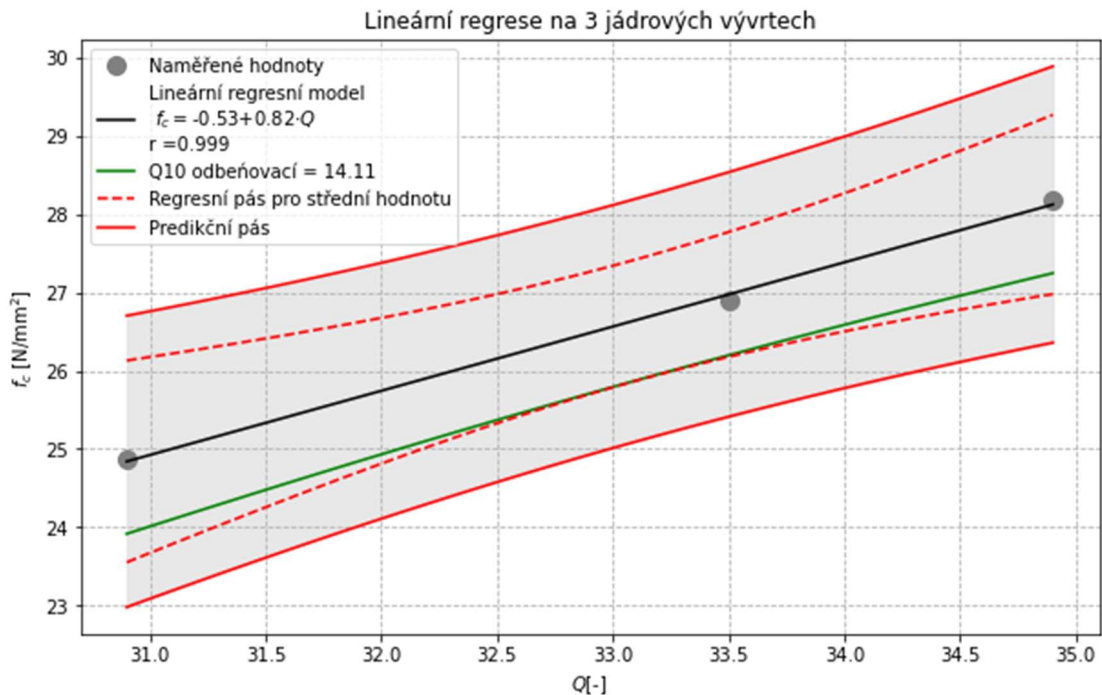
$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 37,7 - 2,0 \cdot 4,93 = \mathbf{27,8 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 25,88 + 4 = 29,9 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě regresní analýzy kombinace ultrazvuků a 8 výsledků pevností z jádrových vývrtů, které jsou brány jako průměrná hodnota ze dvou vývrtů na jednom tělese je $f_{ck,is} = \mathbf{27,8 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C25/30 dle ČSN EN 206.

4.5.3 Odhad nejslabších míst pomocí nepřímých zkoušek

Pro stanovení lineární regrese byly vybrány nejmenší hodnoty odrazu Q , které byly stanoveny pomocí odrazových tvrdoměrů. Hodnoty byly naměřeny na jádrových vývrtech $\varnothing 75$ mm. Nejmenších hodnot dosahovaly jádra 4-2,5-1,5-2 viz Tabulka 19. Součinitel spolehlivosti $r = 0,999$ viz Obrázek 34.



Obrázek 34: Lineární regrese pro tři jádrové vývrty s nejmenší hodnotou odrazu Q

Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ $f_{c,2:1core}$:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,isreg})}{m} = \frac{76,7}{3} = 25,6 \text{ MPa}$$

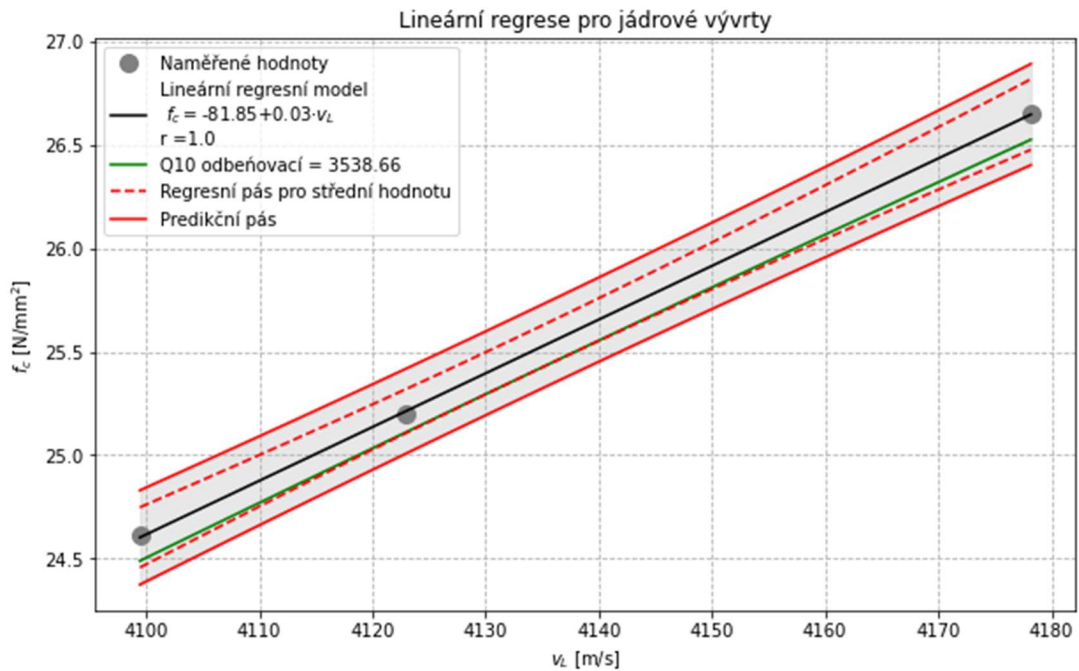
$$k_n = f_{c,m(m)is} \cdot 0,08 = 2,384 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 25,6 - 2,384 \cdot 1,35 = \mathbf{22,4 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 24,9 + 4 = 28,9 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě regresní analýzy kombinace odrazových tvrdoměrů a 3 výsledků pevností z jádrových vývrťů je $f_{ck,is} = \mathbf{22,4 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.

Na základě nejmenší rychlosti šíření impulzu v_L byly vybrány nejslabší místa. Jednalo se o místa 3-2,4-2,5-2. viz Tabulka 11. Mezi naměřenými hodnotami nebyla skoro žádná odchylka, proto vyšel součinitel determinace $r=1,00$ viz Obrázek 35.



Obrázek 35: Lineární regrese stanovená na rychlosti ultrazvuku

Výpočet charakteristické pevnosti v tlaku in situ $f_{c,2:1core}$:

$$f_{c,m(m)is} = \frac{\sum(f_{c,isreg})}{m} = \frac{76,1}{3} = 25,3 \text{ MPa}$$

$$k_n = f_{c,m(m)is} \cdot 0,08 = 2,384 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,m(n)is} - k_n \cdot s = 25,3 - 2,384 \cdot 1,35 = \mathbf{22,1 \text{ MPa}}$$

$$f_{ck,is} = f_{c,is,lowest} + M = 24,9 + 4 = 28,9 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v tlaku in situ na základě regresní analýzy kombinace ultrazvuků a 3 výsledků pevností z jádrových vývrtů je $f_{ck,is} = \mathbf{22,1 \text{ MPa}}$. Tato hodnota odpovídá pevnostní třídě C20/25 dle ČSN EN 206.

5 Závěr

Bakalářská práce se zabývá kombinací nedestruktivních a destruktivních metod k posouzení pevnosti betonových konstrukcí. Jako nedestruktivní zkoušky byly použity Schmidty tvrdoměry typu N, Schmidt Live OS 8000, ultrazvuková impulzová metoda pomocí přístroje Pundit PL-200 a rezonanční impulzní metoda. Pro destruktivní zkoušení byly odvrtny z krychle jádrové vývrty \varnothing 75 mm a dále vyřezány krychle 50x50x50 mm a kvádry 50x100x50 mm.

Teoretická část je rozdělena na dvě části. První kapitola se věnuje kombinaci destruktivních metod a nedestruktivních metod. Destruktivní metody jsou věnovány hlavně jádrovým vývrtům, ve kterých je popsán nový součinitel CLF (core length factor). Dále je provedena rešerše pro nedestruktivní metody včetně jejich přístrojů. Pro ultrazvukové přístroje je zmíněn jen přístroj Pundit PL-200, protože byl používán k měření v experimentální části.

Druhá část se věnuje normě ČSN EN 13791, která se zabývá posouzením pevnosti v tlaku v konstrukcích a betonových dílcích na základě jádrových vývrtů a nedestruktivních metod.

V praktické části byly vyrobeny tři sloupy ze dvou směsí betonu a 8 krychlí s rozměry 150x150x150, které odpovídaly směsím, z kterých byly vyrobeny sloupy. Tělesa byla vyrobena za účelem destruktivního zkoušení. Na těchto betonových sloupech byly měřeny hodnoty pomocí nedestruktivních metod a následně se porovnaly s údaji o výrobě betonu. Z porovnání vyšlo, že ultrazvukové metoda je velmi vhodná pro zjišťování rovnoměrnosti betonu, jelikož se s údaji o výrobě betonu téměř shodovala. Odrazové tvrdoměry odhalily sice nejslabší místa, ale vyhodnocení rovnoměrnosti betonu nebylo tak názorné jako u ultrazvuku.

Na betonových krychlích se provedly nedestruktivní zkoušky (odrazové tvrdoměry, ultrazvuková impulzová metoda). Z každé krychle se vždy odvrty 2 jádrové vývrty \varnothing 75 mm pomocí jádrové vrtačky. Po odvrtní jader byla použita rezonanční metoda, podle které byly vypočítány dynamické materiálové charakteristiky.

Podle třech postupů z ČSN EN 13791 byly porovnány charakteristické pevnosti v tlaku in situ a z porovnání vyplynulo následující:

- porovnání pouze na 16 jádrových vývrtech $f_{c, is} = 22,2 \text{ MPa}$, pevnostní třída betonu C20/25.
 - porovnání na základě regresních vztahů:
 - pomocí metody odrazových tvrdoměrů $f_{c, is} = 22,5 \text{ MPa}$, pevnostní třída betonu C20/25,
 - pomocí ultrazvukové impulzové metody $f_{c, is} = 24,7 \text{ MPa}$, pevnostní třída betonu C20/25.
 - pomocí odhadu nejslabších míst:
 - pomocí metody odrazových tvrdoměrů $f_{c, is} = 22,4 \text{ MPa}$, pevnostní třída betonu C20/25,
 - pomocí ultrazvukové impulzové metody $f_{c, is} = 22,1 \text{ MPa}$, pevnostní třída betonu C20/25.

Pevnost v tlaku in situ byla stanovena 5 různými způsoby. S výjimkou porovnání regresního vztahu z ultrazvukového měření, kdy charakteristická pevnost vyšla $f_{c, is} = 24,7 \text{ MPa}$, tak ve všech ostatních případech byl rozdíl zanedbatelný, neboť charakteristická pevnost vycházela od $f_{c, is} = 22,2 \text{ MPa}$ do $f_{c, is} = 22,5 \text{ MPa}$.

6 Bibliografie

- [1] ČSN EN 13791: *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 2020.
- [2] Zásadní změny v posuzování betonu v konstrukcích podle nového vydání ČSN EN 13791. *BetonTKS* [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2020-3-46st.pdf>
- [3] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Vyd. 2. opr. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2584-9.
- [4] *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí Nauka o materiálu IV*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 2008. ISBN 9788072045914.
- [5] Proceq. *Proceq* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/company/history/>
- [6] ČSN EN 1992-1-1 (731201): *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2019. ISBN 8596135077489.
- [7] ČSN EN 206 +A1 (732403): *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2018. ISBN 8596135044665.
- [8] ČSN EN 12504-1 (73 1303): *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 2021.
- [9] ČSN EN 12504-2 (73 1303): *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [10] ČSN EN 12504-3 (73 1303): *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 3: Stanovení síly na vytržení*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [11] ČSN EN 12504-4 (73 1303): *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [12] ČSN 73 2011 (73 2011): *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2012.

- [13] ČSN ISO 13822 (73 0038): *Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [14] ČSN 73 0038 (730038): *Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí - doplňující ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2019. ISBN 8596135088515.
- [15] ČSN EN 12390-1 (731302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Český normalizační institut, 2013. ISBN 8590963921013.
- [16] Concrete application hammer selection guide Presentation. *Proceq* [online]. [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/202004_Proceq_Concrete_application_hammer_selection_guide.pdf
- [17] Tvrdoměrné zkoušení betonu. *Časopis Beton* [online]. 2019, , 16-19 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/Beton_2_2019_final_nahled.pdf
- [18] OriginalSchmidt_Operating Instructions. *Proceq* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/OrginalSchmidt_Operating%20Instructions_Multilingual_high.pdf
- [19] Schmidt OS-120. *Proceq* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Schmidt%20OS-120_Operating%20Instructions_English_high.pdf
- [20] Schmidt OS-120 Application. *Proceq* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Schmidt%20OS-120%20Application%2001.jpg
- [21] CIKRLE, Petr, Ondřej ANTON, Petr DANĚK, Barbora KUCHARCZYKOVÁ a Petr MISÁK. *NDT Zkoušení ve stavebnictví: Příručka kurzu CŽV*. Verze 2010. Brno: Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební VUT, 2010. ISBN 9788021441989.
- [22] Silver Schmidt Picture. *Proceq* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/SilverSchmidt%20Application%2001.jpg
- [23] Silver Schmidt Live. *Proceq* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Tutorial%2002%20Hammer%20controls.pdf

- [24] ČSN 73 1372 (731372): *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [25] ČSN 73 1371 (731371): *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [26] BALAYSSAC, Jean-Paul a Vincent GARNIER. *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier, 2018. Structures durability in civil engineering set. ISBN 9781785482298.
- [27] Pundit Ultrasonic Pulse Velocity and Echo. *Humboldt* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.humboldtmfg.com/pundit-ultrasonic-pulse-velocity-echo.html>
- [28] PUNDIT® PL-200. *Proceq* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20PL-200_Operating%20Instructions_English_high.pdf
- [29] Pundit PL-200 / PL-200PE – Ultrasonic Testing. *PCTE* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.pcte.com.au/pundit-pl-200-pl-200pe-ultrasonic-testing>
- [30] CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB, Petr MISÁK a Sabina HÜBLOVÁ. Zásadní změny v posuzování betonu v konstrukcích podle nového vydání ČSN EN 13791. *Beton TKS*. 2020, **2020**(117), 46-50.
- [31] HOLICKÝ, Milan, Miroslav SÝKORA a Karel JUNG. Stanovení pevnosti betonu podle ČSN EN 13791. *BetonTKS*. 2020, **2020**(120), 50-53.
- [32] www.olympus-ims.com. *Olympus* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Jádrová souprava.....	14
Obrázek 2: Přehled aktuálních tvrdoměrů [16].....	17
Obrázek 3: Schéma přístroje Original Schmidt [18]	18
Obrázek 4: Schmidt OS-120 P [20].....	19
Obrázek 5: Silver Schmidt [22].....	20
Obrázek 6: Schmidt Live OS 8000 (archiv P.Cikrle).....	21
Obrázek 7: Typy prozvučení.....	24
Obrázek 8: Přístroj Pundit PL 200.....	25
Obrázek 9: Typy kmitání [31].....	28
Obrázek 10: Nasimulovaný model konstrukce a zkušební tělesa	39
Obrázek 11: Měření hodnoty odrazu odrazovým tvrdoměrem typu N (archiv P.Cikrle)	40
Obrázek 12: Hodnoty odrazů Q na sloupech	42
Obrázek 13: Postup měření hodnot odrazů Q na krychli 150x150x150 mm	43
Obrázek 14: Stanovení hodnot odrazu přístroje Schmidt typu N (archiv P.Cikrle)...	43
Obrázek 15: Grubbsův test a test normality – pro vzorek 1-1	44
Obrázek 16: Grubbsův test a test normality – pro vzorek 1-2	45
Obrázek 17: Grubbsův test a test normality – pro vzorek 1-2	45
Obrázek 18: Sloupcový graf pro modul pružnosti E_{cu} na krychlích	46
Obrázek 19: Rychlost impulzu vL na sloupech.....	47
Obrázek 20: Výrobní schéma betonových sloupů s vyznačením objemu v litrech dvou rozdílných typů betonů.....	48
Obrázek 21: Jádrová vrtačka s tělesy (archiv P.Cikrle).....	49
Obrázek 22: Měření doby průchodu impulzu na vývrtnu \varnothing 75 mm (archiv P.Cikrle).	50
Obrázek 23: Skutečné pevnosti vs. naměřené pevnosti UZ pro jádrové vývrty \varnothing 75 mm	51
Obrázek 24: Lineární regrese mezi maximální stanovenou silou a rychlostí impulzu	52
Obrázek 25: Měření podélného kmitání fL na vzorku 6B/1 (archiv P.Cikrle)	53

Obrázek 26: Křivka příčného kmitání ff na válci 1_1	54
Obrázek 27: Stanovení pevnosti v tlaku f_c, cyl	55
Obrázek 28: Porušení kvádru při stanovení maximální síly (archiv P.Cikrle).....	56
Obrázek 29: Pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech.....	58
Obrázek 30: Lineární regrese a analýza pro válce $\varnothing 75$ mm	62
Obrázek 31: Lineární regrese pro sdružené hodnoty na jádrových vývrtech	63
Obrázek 32: Kvadratická regrese f_c, cyl na rychlosti průchodu ultrazvukového impulzu vL pro jádrové vývrty $\varnothing 75$ mm	64
Obrázek 33: Kvadratická regrese f_c, cyl na rychlosti průchodu ultrazvukového impulzu vL pro sdružené hodnoty jádrových vývrťů $\varnothing 75$ mm	65
Obrázek 34: Lineární regrese pro tři jádrové vývrty s nejmenší hodnotou odrazu Q	66
Obrázek 35: Lineární regrese stanovená na rychlosti ultrazvuku	67

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Požadavky na vývrty pro dosažení výsledku zkoušky na jednom zkušebním místě.....	15
Tabulka 2: kn hodnoty pro vzorec (16).....	31
Tabulka 3: Hodnota rozmezí M pro vzorec (17).....	31
Tabulka 4: Kritéria pro posouzení na základě jádrových vývrtů.....	35
Tabulka 5: Minimální počet testovacích míst pro nepřímé metody.....	35
Tabulka 6: Umístění pro vybrané vývrty a kritéria pro posouzení.....	36
Tabulka 7: Hodnoty odrazu Q na sloupu I.....	41
Tabulka 8: Hodnoty odrazů Q pro krychlích 150x150x150 mm.....	44
Tabulka 9: Výpočet modulu pružnosti pro krychli 150x150x150 mm.....	46
Tabulka 10: Rychlost šíření ultrazvukového impulzu na sloupu I.....	47
Tabulka 11: Naměřené hodnoty jádrových vývrtů \varnothing 75 mm.....	51
Tabulka 12: Naměřené hodnoty vlnění pomocí rezonanční metody.....	52
Tabulka 13: Vypočítané dynamické hodnoty pro jádrové vývrty.....	53
Tabulka 14: Stanovení maximální síly na jádrových vývrtech.....	56
Tabulka 15: Stanovení maximální síly na krychlích 50x50x50 mm.....	57
Tabulka 16: Stanovení maximální síly na kvádrech 50x50x100 mm.....	57
Tabulka 17: Stanovení pevnosti na jádrových vývrtech \varnothing 75 mm.....	59
Tabulka 18: Stanovení pevnosti pro sdružené hodnoty na jádrových vývrtech \varnothing 75 mm.....	60
Tabulka 19: Hodnoty odrazu Q a pevnosti v tlaku pro válce \varnothing 75 mm.....	61
Tabulka 20: Sdružené hodnoty pro jádrové vývrty.....	64