

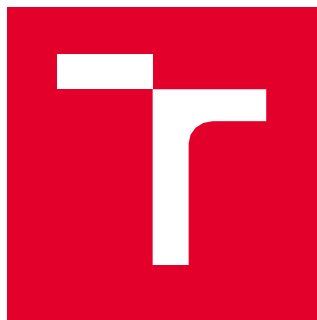
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Martin Horvát



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ BETONU V KONSTRUKCI

EVALUATION OF CONCRETE PROPERTIES IN THE STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN HORVÁT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav stavebního zkušebnictví
Student: **Martin Horvát**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: B0732A260005 Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení vlastností betonu v konstrukci

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití přímých a nepřímých diagnostických metod pro ověření pevnostní třídy betonu dodávaného do konstrukce ve výstavbě. Provedení řady zkoušek na reálné konstrukci (nebo modelu) i v laboratoři, vyhodnocení výsledků zkoušek.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Teoretická část:

Přehled zkušebních metod použitých v experimentální části práce.

Rozbor postupů pro stanovení charakteristické pevnosti v tlaku betonu v dané konstrukci. Experimentální část:

Výroba vzorků betonu nebo jejich odběr z konstrukce. Popis a dokumentace vzorků betonu.

Ultrazvukové a tvrdoměrné měření na konstrukci i vzorcích betonu.

Laboratorní zkoušky betonu, stanovení pevnosti v tlaku na vývrtech, stanovení objemové hmotnosti, rychlosti šíření UZ vlnění, dynamického modulu pružnosti, pevnosti v tlaku.

Tabelární a grafické vyhodnocení výsledků zkoušek, statistické hodnocení výsledků zkoušek. Posouzení pevnosti v tlaku betonu příslušnými postupy podle ČSN EN 13791.

Vzájemné porovnání jednotlivých postupů.

Seznam doporučené literatury a podklady:

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

Balayssac, J.P., Garnier, V. Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures. 1st Edition Amsterdam, ISTE Press - Elsevier, 2017.

Holický, M. Hodnocení existujících konstrukcí. 1. vydání Praha: ČVUT, 2018.

Normy ČSN EN 12504-1, ČSN EN 12504-4, ČSN 73 1371, ČSN EN 13791, ČSN ISO 13822, ČSN 730038, ČSN EN 206+A2 apod.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 24. 05. 2024

L.S.

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

vedúci ústavu

doc. Ing. Petr Cíkrle, Ph.D.

vedúci práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CS., MBA, dr. h. c.

děkan

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá úplne novou normou, nedeštruktívnym skúšaním pevnosti betónu, za pomoci ultrazvuku a odrazových tvrdomerov typu Original Schmidt a SilverSchmidt. Pomocou regresných vzťahov získaných z meraní so vzťahmi uvádzaných v literatúre.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Nedeštruktívne metódy, betón, pevnosť v tlaku, odrazové tvrdomery, Original Schmidt, SilverSchmidt, ultrazvuk, Pundit PL-200, regresná analýza

ABSTRACT

The work deals with a completely new standard, non-destructive testing of concrete strength using ultrasonic and rebound hammers such as the Original Schmidt and SilverSchmidt. Regression relationships obtained from measurements with relationships reported in the literature are utilized.

KEYWORDS

Non-destructive methods, concrete, compressive strength, rebound hammers, Original Schmidt, SilverSchmidt, ultrasonic, Pundit PL-200, regression analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORVÁT, Martin. *Hodnocení vlastností betonu v konstrukci*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Hodnocení vlastností betonu v konstrukci* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2024

Martin Horvát

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Vliv tuhosti podloží na průhyb základové desky zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2024

Martin Horvát

autor práce

POĎAKOVANIE

Veľmi by som sa chcel poďakovať môjmu vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Petrovi Cikrlovi Ph.D. za pomoc, ochotu, ústretový prístup a trpezlivosť pri jej spracovávaní. Taktiež by som rád poďakoval Ing. Petrovi Misákovi Ph.D. pri pomoci s tvorbou štatistických metód. Veľká vďaka patrí mojím spolužiakom Petrovi Krňovi , Andrejovi Ivaničovi a kamarátovi Ing. Patrikovi Podolákovi. Dôležitú úlohu pri mojom štúdiu zohrávala moja rodina a priateľka Bc. Sofia Dupkalová.

Obsah

1. Úvod a ciele práce	11
2. Teoretická časť	12
2.1 Diagnostika konštrukcií.....	12
2.1.1 Stanovenie skúšobných oblastí.....	12
2.2 Deštruktívne metódy	13
2.2.1 Jadrové vývrty	13
2.3 Nedeštruktívne metódy.....	14
2.3.1 Ultrazvuková metóda.....	15
2.3.2 Odrazové tvrdomery typu - Schmidt	19
2.3.2.1 Original Schmidt	20
2.3.2.2 Silver Schmidt	21
2.4 Pevnosť betónu.....	21
2.5 Štatistika	22
2.5.1 Lineárna regresia	22
2.5.2 Median.....	23
2.5.3 Homoscedasticita a heteroskedasticita	23
2.5.4 Intervaly spoľahlivosti.....	23
3. Praktická časť	24
3.1 Popis objektu	24
3.2 Skúška sadania kužela.....	25
3.3 Výroba skúšobných telies.....	25
3.4 Meranie telies	28
3.5 Spracovanie nameraných hodnôt.....	30
3.5.1 Stanovenie objemovej hmotnosti	30
3.5.2 Spracovanie dát Original Schmidtom typu N.....	30
3.5.3 Spracovanie dát SilverSchmidtom typu N.....	31
3.6 Regresní pás pre Original Schmidt.....	32
3.7 Regresní pás pre Silver Schmidt typu N.....	34
3.8 Meranie ultrazvukom	35
4. Vyhodnotenie výsledkov	40
5. Záver.....	45
6. Zoznam použitej literatúry	46
7. Zoznam použitých skratiek a veličín.....	48
9. Zoznam tabuliek	51

1. Úvod a ciele práce

V modernom stavebníctve sa kladie stále väčší dôraz na kvalitu a predovšetkým na spoľahlivosť konštrukcií. Jedným z hlavných aspektov kvality je pevnosť materiálov, použitých pri výstavbe. Medzi najčastejšie používaný stavebný materiál je betón, a to najmä vďaka jeho nepopierateľným pevnostným vlastnostiam. Dokonalá znalosť kvality pevnostných vlastností betónu je kľúčová pre zabezpečenie trvácnosti stavieb, trvanlivosti, odolnosti, schopnosti prevádzkovania a bezpečnosti v priebehu ich životného cyklu. Z tohto dôvodu sa dnes kladnú prísnejšie požiadavky pri navrhovaní konštrukcií, ktorými sa bližšie zaoberá norma ČSN EN 206 + A2 [29]. Táto norma sa zaoberá navrhovaním betónových konštrukcií, kde sú prísne požiadavky na stanovenie trvanlivosti a odolnosti jednotlivých tried betónu, podľa toho, akému agresívnemu prostrediu sú vystavené.

Hlavným cieľom bakalárskej práce je poskytnúť detailný prehľad o skúšobných metódach využívaných na posúdenie pevnosti betónu, a to na reálnej konštrukcii ako aj v laboratórnych podmienkach. V praxi existuje celý rad kontrolných postupov pre čerstvý betón, kedy sa odoberá betón pre výrobu skúšobných telies na ktorých sa skúšajú požadované vlastnosti, zvyčajne u betónu po 28 dňoch. Problém u tejto metodiky nastáva ak sa betón nachádza priamo v konštrukcii, teda nám stvrdol, a teda nie je možné odobrať čerstvý betón pre výrobu skúšobných telies. Touto problematikou sa zaoberá úplne nová norma ČSN EN 13 791 [22], so špeciálnym postupom pre novo betónované konštrukcie v prípade že vznikli pochybnosti o kvalite betónu. V práci venujeme pozornosť na porovnanie diagnostických postupov pomocou jednotlivých zariadení a postupov na definovanie charakteristickej pevnosti betónu v tlaku, s využitím priamych, tak aj nepriamych metód.

V prvej časti bude vykonaný prehľad jednotlivých skúšobných metód, ktoré boli používané v experimentálnej časti práce. V experimentálnej časti zahrnieme výrobu betónových vzoriek, priamo odobratých z konštrukcie počas betonáže, ich popis a dokumentáciu, následné tvrdomerne a ultrazvukové merania na konštrukcií, ako aj vzorkách. Patrí tu opis laboratórnych skúšok na betóne, vrátane objemovej hmotnosti, rýchlosti šírenia ultrazvukového vlnenia, stanovenie pevnosti v tlaku na vzorkách. Výsledné údaje jednotlivých skúšok budú následne štatisticky zhodnotené a vyhodnotené.

Záverom bude vykonané zhrnutie dosiahnutých výsledkov, vzájomné porovnanie jednotlivých postupov a ich použiteľnosť a dôležitosť v praxi.

2. Teoretická časť

2.1 Diagnostika konštrukcií

Hlavným cieľom hodnotenia konštrukcií je často overiť možnosti prestavby alebo predĺženie ich životnosti, dôsledná kontrola navzdory seizmickým účinkom, ako aj identifikácia porúch, spôsobených neobvyklým zaťažením. Diagnostika, ako súbor činností, ktorý získava informácie prostredníctvom dokumentácie a prehliadky, ďalej zahŕňa overovanie jednotlivých vlastností betónu a poukázanie na poruchy a chyby. Diagnostické skúšobné metódy môžeme rozdeliť do skupín:

- nedeštruktívne,
- semideštruktívne,
- deštruktívne.

V tejto bakalárskej práci sa zaoberáme betónom, čerstvo odliatým, ale už stvrdnutým v konštrukcii. Pre vyhodnotenie používame radu postupov, najmä z normy, odpovedajúcej danej problematike ČSN EN 13 791 [22], obsahujúcej dve metódy nedeštruktívneho charakteru (ultrazvuková metóda a metóda odrazových tvrdomerov) a jedna metóda deštruktívna (metóda jadrových vývrto). Skúšobná metóda by mala byť zvolená na základe klimatických podmienok, nákladov, prístupnosti k danej oblasti a bezpečnosti personálu.

Skúšky novobetónovaných konštrukcií sa robia z dôvodu kontrole kvality alebo v prípade pochybností. V našom príklade sme zvolili postup pre kontrolu kvality, pre ktorý sme vytvorili vlastný regresný vzťah, ten možno využiť aj v prípade, nastania pochybnosti. Na základe toho budeme mať vytvorený vlastný regresný vzťah a nemusí sa požívať ten, ktorý je v informatívnej prílohe normy. [1], [22].

2.1.1 Stanovenie skúšobných oblastí

Veľký dôraz sa kladie na nájdenie správnych skúšobných oblastí. Norma ČSN EN 13 791 [22] nám udáva dva úplne rozdielne postupy - pre existujúce konštrukcie (kde sa preukazuje plná hodnota charakteristickej pevnosti) a pre novobetónované konštrukcie (jedná sa o náš prípad, avšak nie z hľadiska pochybnosti, ale pre overenie kvality). Oblasti môžu zahŕňať niekoľko podobných prvkov alebo jeden veľký prvok. Pri betónoch bez bližšieho určenia pevnosti je nutné použiť technický úsudok, kedy skupina prvkov v meranej oblasti môže obsahovať rôzne typy betónov po vyhodnotení skúšok. V existujúcich konštrukciách nie vždy vieme či betón pochádzal z rôznych zdrojov a časov, či bol betón vyrobený priamo na mieste konštrukcie a či boli pridané rôzne zmesi pre jeho odolnosť voči prostrediu. Do rovnakých skupín/oblastí môžeme teda zahrnúť rôzne betóny, za predpokladu rovnakej receptúry a zložky, opačne, do skupín nezahrňujeme nám známe odlišné dávky betónu. Pokiaľ je objem betónu

privezeného na stavbu väčší ako 30 m³ počas jedného dňa a nemáme signály o odlišnosti, predpokladáme že sa nelíši.

Počet skúšobných miest závisí na objeme betónu. Maximálny počet objemu skúšobnej oblasti je do 180 m³. Ten sa následne delí na objemy po 30 m³ (vid. Tab. 1). V prípade posúdenia iba jadrovými vývrtmi, sú dané na jeden objem tri vývrty. Na každý narastajúci objem musia byť dva vývrty (tento počet zvyšujeme iba v prípade jedného objemu o 1 vývrt). Pre overenie kvality betónu je v norme popísaný screeningový test na základe tvrdomerov, avšak vzťah v norme je uvedený pre už existujúce konštrukcie a nie je dostatočne presný. V dôsledku toho sme urobili modifikáciu týchto dvoch metód. Preto sme sa rozhodli vytvoriť regresný model pre posúdenie kvality nových betónových konštrukcií, na základe výsledkov testov na skúšobných kockách (nie na jadrových vývrtoch) [22].

$$f_{c,m(m)is} = \Sigma(f_{c,is,reg})/m \quad (1)$$

kde:

m je počet odhadovaných hodnôt pevnosti.

Tab. 1: Minimálny počet skúšobných miest pre nepriame skúšky [22].

Oblasť približne 30 m ³	Minimálny počet miest pre skúšku
1	9
2-4	12
5-6	20

2.2 Deštruktívne metódy

Metódy tohto typu sú zvyčajne použité v prípadoch, kedy použitie nedeštruktívnych metód nesmeruje ku žiadanému cieľu alebo ak sú požiadavky na presnejšie špecifikovanie hľadaných charakteristík. Vo veľa prípadoch sa používa kombinácia nedeštruktívnych a deštruktívnych metód, keďže deštruktívne metódy zlepšujú kalibračné vlastnosti metód nedeštruktívnych. Pri prevádzaní odberu vhodných vzoriek nesmú výrazne ovplyvniť funkčnosť konštrukcie, taktiež je potrebné dodržať súlad s normami ISO. Oprava poškodených vzoriek sa vykonáva ihneď po odobratí. Pri vyhodnocovaní vlastností stavebných materiálov nie je dôležitý fyzikálny princíp použitej metódy ale presnosť, cena a rýchlosť. Deštruktívne metódy sú drahšie a relatívne poškodzujú konštrukciu [1].

2.2.1 Jadrové vývrty

Jadrovým vývrtom sa bližšie venuje norma ČSN EN 12504-1 [23]. Vývrty sa získavajú najčastejšie jadrovým vrtákom, ktorého moderné korunky sú zhotovené z diamantu, chladené vodou. Veľkosť vývrtu je v rozmedzí od 12 mm do 500 mm. Pred začatím prevádzania deštruktívnej metódy jadrovým vývrtom je nutné vziať do úvahy účely skúšania. Významná časť, je správny výber miesta,

kde bude jadrový vývrt odobratý. Najlepšie sa je vyhnúť špáram, hranám betónových dielov a v čo najmenej možnom mieste, bez obsahu výstuže. V prípade narazenia na výstuž v pozdĺžnom smere musí byť odobratý náhradný vývrt. Po odobratí vývrtu je nutné zmerať priemer (s presnosťou na 0,5% priemeru), dĺžku (s presnosťou na 5 mm) a výstuž (priemer a jej polohu). Doporučené pomery priemerov a dĺžok sú 2,0, v prípade porovnávania s valcovou pevnosťou, 1,0 v prípade porovnávania s kockovou pevnosťou. V norme sú uvedené aj dovoľené odchýlky skúšobných telies [23].



Obr. 1: Jadrový vrták, vývrt [24].

2.3 Nedeštruktívne metódy

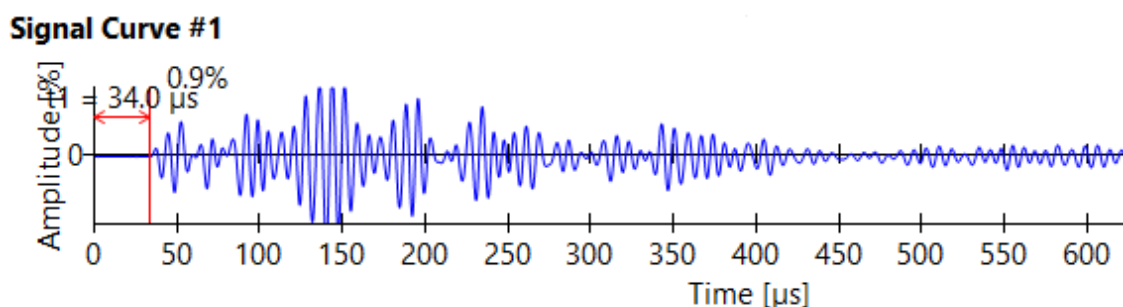
Nedeštruktívne metódy slúžia na určenie hlavných vlastností, bez rozsiahleho poškodenia stavebného materiálu alebo konštrukčného prvku. Veľkou výhodou týchto metód je možnosť opakovanania merania na rovnakom mieste a návazné sledovanie zmien v čase statického vyhodnotenia. Hlavnou nevýhodou týchto metód je, že sa meria charakteristika, ktorá je v určitej závislosti s požadovanou vlastnosťou. Dnešné technológie výrazne zjednodušujú vykonávanie testov, avšak ich interpretácia si žiada dôkladné inžinierske znalosti a pochopenie základov chemických a fyzikálnych princípov, aby sa predchádzalo nesprávnym výsledným hodnotám [1].

2.3.1 Ultrazvuková metóda

2.3.1.1 Základná charakteristika

Určenie kvality betónu pomocou ultrazvukovej metódy zahŕňa rôzne aplikácie, patrí sem meranie šírky trhlin, stanovenie dynamického modulu pružnosti a meranie hrúbky. Hlavným princípom v tejto metóde je meranie rýchlosti ultrazvukových vln, zvyčajne pri použití dvoch sond, kde jedna slúži ako zdroj a druhá ako detektor. Ultrazvuk sa šíri rýchlejšie v homogénnom materiály. Táto vlastnosť je ovplyvnená jeho elastickými vlastnosťami, typom použitého materiálu a štruktúrou. V prítomnosti vzduchových pórov, dutín alebo trhlin, má za následok pokles rýchlosti ultrazvuku. Ak testujeme železobetónovú konštrukciu, treba brať do úvahy prítomnosť betonárskej výstuže a teda by nemali byť vykonávané v jej blízkosti. Ďalším aspektom ovplyvňujúcim rýchlosť vln je vlhkosť.

Homogenitu betónu môžeme overiť na jadrových vývrtoch alebo vzorkách, ktoré boli odobraté priamo na konštrukcii. Dynamický modul pružnosti je potom stanovený z hustoty materiálu, geometrie prostredia a rýchlosti ultrazvuku. Základom pri meraní jadrových vývrtov je meranie v ich osi. Zvyčajne sa merania vykonávajú najprv na nepoškodených, následne na poškodených miestach skúšanej konštrukcie [2].



Obr. 2: Šírenie vlnenia.

2.3.1.2 Šírenie signálu

Počas merania doby prechodu signálu telesom používame sondy. Sondy sú vybavené akustickým prostriedkom. Medzi základné spôsoby šírenia signálu patria:

- priame (sondy sú umiestnené proti sebe),
- nepriame (zväčša povrchové meranie),
- polopriame (signál prechádza telesom šikmo).



Obr. 3: Postavenie sond a šírenie ultrazvuku [17].

Dôležitou časťou je použitie spojovacieho prostriedku tak, aby nevznikali medzi telesom a sondami vzduchové medzery. Tieto medzery by vznikali z dôvodu nedokonalosti povrchu telesa. Zvukové medzery by vysielaný signál odrážali a do sond/snímačov by sa dostala iba malá časť vlnenia, ktorá by narušila presnosť merania, a preto je nutné použitie spojovacieho materiálu. Ten spôsobí zvýšenie prechodu ultrazvukových vln. V čo najmenšej vrstve sa ako častý spojovací prostriedok používa plastelína, gél alebo sklársky tmel.



Obr. 4: Sondy so spojovacím materiálom (plastelína).

„Mŕtvy čas“ vzniká medzi plastelínou a telesom. Tento čas zistíme na kalibračnej vzorke, ktorá je z etanolu, kde presne poznáme čas priechodu. Moderné prístroje však tento čas odčítajú automaticky. Vo výsledku sa teda najlepšie merajú ultrazvukom ľahšie dostupné prvky konštrukcie, ako sú stĺpy alebo prievlaky a laboratórne vzorky [3], [4], [12]. Ako základný vzorec pre výpočet šírenia impulzu pri priamom prezvučovaní, určuje norma ČSN 73 1371 [5]:

$$v_L = \frac{L}{T - T_0} \quad (2)$$

kde:

v_L rýchlosť impulzu, v [m.s⁻¹]

L dĺžka vzorku alebo meranej konštrukcie daná, v [mm]

T čas, počas ktorého prejde impulz meracou základňou, vrátane t_0

t_0 korekcia, kde vstupuje hodnota „mŕtvy čas“ prístroju a rozdiel ultrazvukových vĺn, zistených pri kalibrácii [5].

Mŕtvy čas získame z definície normy ČSN 73 1371 [5]:

$$T_0 = T_e - E \quad (3)$$

kde:

T_0 mŕtvy čas, v [μ s]

T_e čas prechodu vlny cez etanol, v [μ s]

E časová charakteristika etalonu, v [μ s]

E_{cu} - dynamický modul pružnosti v ťahu a v tlaku [MPa] je popísaný v norme ČSN 73 1371 [5]
vzťahom:

$$E_{cu} = \rho \times v_L^2 \times \frac{1}{k^2} \quad (4)$$

kde:

ρ objemová hmotnosť betónu, v [kg×m⁻³]

v_L rýchlosť pozdĺžneho ultrazvukového vlnenia, v [km×s⁻¹]

k koeficient rozmernosti prostredia, 1,0541 [-]



Obr. 5: Etalónový valec určený na kalibráciu.

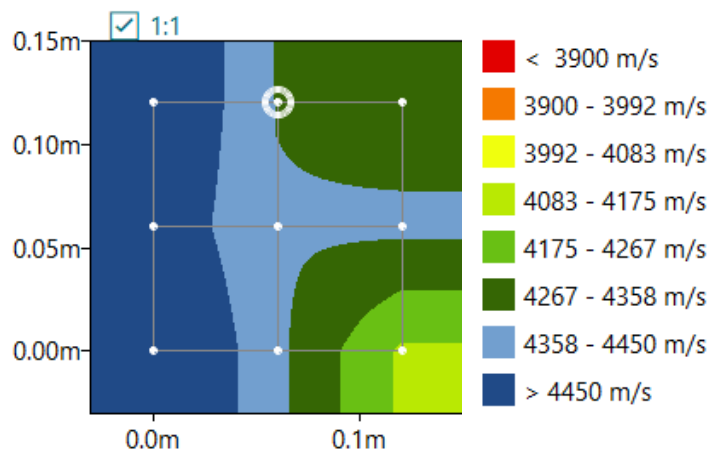
2.3.1.3 Pundit PL-200

Pundit PL-200 je prístroj novej generácie, ktorý používa nový dizajn a chránenú dotykovú jednotku, spolu so sondami už vyššie spomenutými. Jeho špecifikom je možnosť využitia v teréne a v náročných prostrediach, kde slúžia na rôzne aplikácie, s vylepšeným režimom merania. V porovnaní s ostatnými prístrojmi na trhu má absolútne najlepšie zobrazovacie rozhranie.

Pundit PL-200 využíva novú funkciu LineScan, ktorou priamo odhaduje pevnosti betónu (pomocou korelácie ultrazvukovej rýchlosti pulzu), povrchovú rýchlosť, rýchlosť pulzu (až 25Hz) a hĺbku trhlín. Novinkou je však plošný sken, ktorý kombinuje meranie vzdialenosti, rýchlosti pulzu a času prenosu. Výsledkom je jasne rozlíšiteľná farebná mapa. Veľkou výhodou je úložisko a výkonný dvojjadrový procesor [15], [16].







Obr. 6: Pundit PL-200 ultrazvukový prístroj [6].



Obr. 7: Plošný sken Pundit PL-200 [17].

2.3.2 Odrazové tvrdomery typu - Schmidt

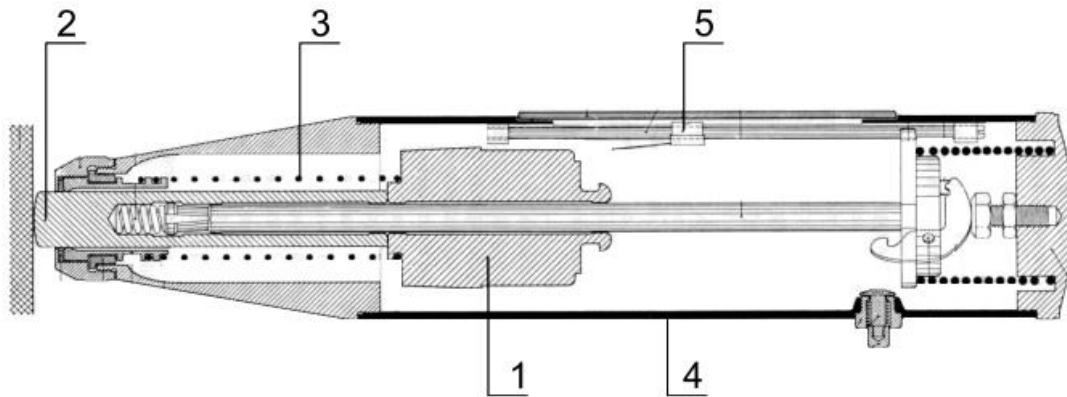
Tento typ prístroja na testovanie pevnosti betónu bol vynájdený v roku 1954 švajčiarom Ernstom Schmidtom. Svoje prvé uplatnenie našiel v prírodných vedách pri testovaní tvrdosti hornín. Najznámejší výrobca tohto prístroja je firma Proceq. Postupom času vznikali nové typy prístrojov, ktoré sa tiež modifikovali, a tým sa od seba odlišili. Táto metóda testovania patrí medzi celosvetovo najčastejšie používané nedeštruktívne metódy na skúšanie tvrdosti betónu [7], [8].

	Concrete compressive strength range					
	1 – 5 MPa 145 – 725 psi	5 – 10 MPa 725 – 1450 psi	10 – 30 MPa 1450 – 4351 psi	30 – 70 MPa 4351 – 10153 psi	70 – 100 MPa 10153 – 14504 psi	>100 MPa >14504 psi
	Fresh concrete Very low strength concrete		Normal concrete		High strength concrete	Ultra-high performance concrete
SilverSchmidt 			SilverSchmidt ST/PC Type N			
			SilverSchmidt ST/PC Type L			
		SilverSchmidt PC Type L with Mushroom plunger				
Original Schmidt 			Original Schmidt Type N/ND/NR			
			Original Schmidt Type L/LD/LR			
Original Schmidt Live 			Original Schmidt Live Type N			
			Original Schmidt Live Type L			
Schmidt OS-120 	Schmidt OS-120PT					
Type N	Standard impact energy. Minimum thickness of test object: 100 mm (3.9") and should be firmly fixed in the structure.					
Type L	Low impact energy. Suitable for brittle objects or structures less than 100 mm (3.9") thick.					
	Only with user-defined custom curves.					

Obr. 8: Typy prístrojov Schmidt [9].

2.3.2.1 Original Schmidt

Poznáme niekoľko druhov týchto tvrdomerov, typ N, L a skôr vyrábaný typ M. Delia sa podľa veľkosti energie vyvinutej pri náraze. Princíp fungovania je natahnutie pružiny tlakom, kedy je úderník priložený k telesu. Výsledná veľkosť odrazu je dĺžka dráhy, ktorá závisí od tvrdosti materiálu [12].



Obr. 9: Odrazový tvrdomer – 1) baran, 2) nárazník, 3) ťažná pružina, 4) puzdro, 5) stupnica [12].

Závislosť medzi výsledkami testu, získanými použitím Original Schmidt a pevnosťou v tlaku je definovaná n norme ČSN 73 1373 [18]:

$$A: f_{be} = 1,750 \times \alpha - 29,000 \quad (5)$$

$$B: f_{be} = 1,786 \times \alpha - 30,440 \quad (6)$$

kde:

α je veľkosť odrazu, A (25-40), B (41-54).



Obr. 10: Odrazový tvrdomer Original Schmidt OS8000 [14].

2.3.2.2 Silver Schmidt

Kladivko Silver Schmidt určené na používanie tvrdomerných skúšok je už moderná alternatíva kladivka Original Schmidt N. Tento prístroj disponuje displejom, z ktorého možno rovno odčítať hodnotu, ktorá je priamo prevedená na pevnosť v tlaku. Toto zariadenie na rozdiel od predošlého typu Original Schmidt, ktoré meralo hodnotu „R“, meria rovno koeficient odrazu „Q“:

$$Q = 100 \times \frac{\text{energia obnovená}}{\text{energia vstupná}} \quad (7)$$

Silver Schmidt využíva optické senzory na meranie rýchlosti úderu a následného odrazu pred a po údere. Na základe týchto údajov vypočíta množstvo údajov, ktoré je možné obnoviť. Hodnota „Q“ má menšiu závislosť na trení na vodiacej tyči, ako aj gravitácií a vzorkách. Možný rozsah skúšaných pevností je od 10 MPa do 100 MPa [12].



Obr. 11: Odrazový tvrdomer Silver Schmidt [13].

2.4 Pevnosť betónu

Základným parametrom betónu je pevnosť v tlaku, ktorá sa uvádza v norme ČSN EN 12390-3 [10], definovaná vzťahom:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (8)$$

kde:

f_c je pevnosť v tlaku v [MPa]

F je maximálne zaťaženie pri porušení v [N]

A_c je prierezová plocha telesa kde pôsobí tlak v [mm²]

Hodnota pevnosti v tlaku závisí na niekoľkých aspektoch, ako:

- teplota (v dôsledku nižšej teploty je nárast pevnosti pomalší, v prípade vyšších, rýchlejší),
- zloženie betónu (závisí na použitých prísadách).

Telesá podľa ktorých stanovujeme jednotlivé pevnosti v tlaku môžeme nájsť v norme ČSN EN 12390-1 [11]. V tejto norme je uvedená tiež dĺžka hrán kociek, ako aj valcov - 100-300 mm. Vo väčšine prípadov sa používa na skúšanie betónu kocka v rozmeroch 150x150x150mm. Uvádzaná je tiež možná tolerancia jednotlivých telies. Následne sú tieto telesá testované zaťažovacou skúškou v lise, podľa normy ČSN EN 12390-3 [10]. Po vytiahnutí telesa z uloženia je nutné vykonať skúšku maximálne do 10 hodín. Teleso má byť pred vložením do lisu navonok osušené a zbavené prípadných nečistôt. Taktiež sa medzi dosky lisu nesmú vkladať podložky. Po spustení procesu konštantného zaťažovania 0,6 +/- 0,2 MPa/s [N/mm²×s] sledujeme teleso až do porušenia, kedy zaznamenáme maximálnu dosiahnutú silu v [kN]. Napätie spočítame podľa vzťahu 8.

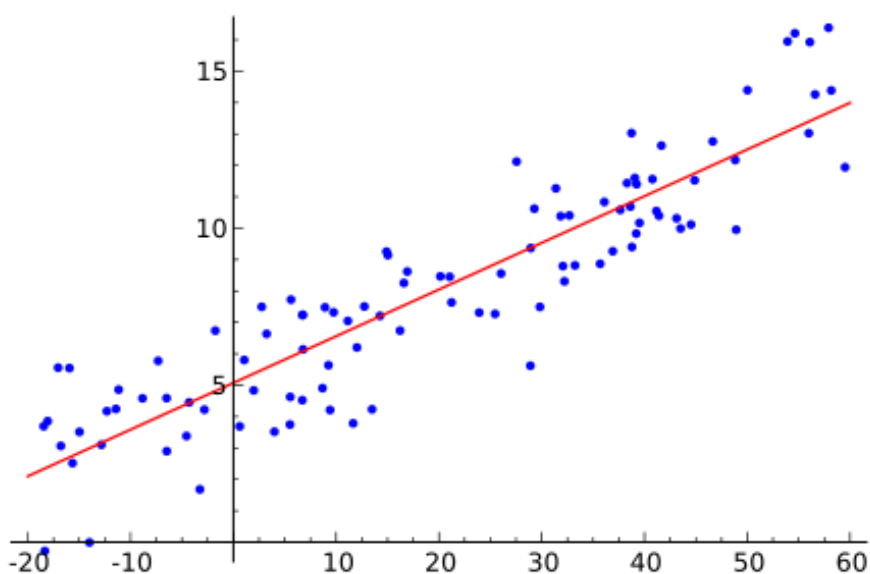
2.5 Štatistika

2.5.1 Lineárna regresia

Široko používaný typ analýzy vzájomnej závislosti minimálne dvoch fyzikálnych veličín. Pri určení dvoch premenných hodnôt (x, y) musíme zistiť, či sú hodnoty na sebe závislé. Hodnoty by sa mali pohybovať v blízkosti lineárnej priamky, ktorej základná rovnica je [19]:

$$Y = a + bX \quad (9)$$

Pre našu regresnú analýzu budem považovať za hodnoty x median z hodnôt Q, z každej kocky a za hodnoty y zmeranú pevnosť v tlaku f_c .



Obr. 12: Body regresnej analýzy preložené priamkou [21].

2.5.2 Median

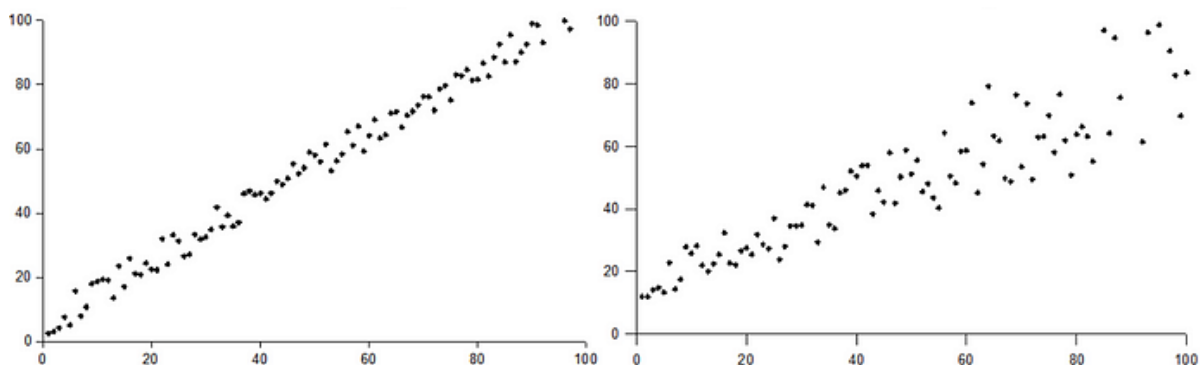
Median je stredná hodnota v skupine čísel, kde polovica čísel je väčších a polovica menších. Do našej regresnej analýzy budeme práve potrebovať hodnotu medianu a nie aritmetický priemer nameranej hodnoty Q a R odrazovými tvrdomermi. Pre párný a nepárny počet medianu je stanovený vzťah [20]:

$$Me(X) = \left\{ x_{\frac{N}{2}} + x_{\left(\frac{N}{2}\right)+1} \right\} / 2 \quad (10)$$

$$Me(X) = x_{(N+1)/2} \quad (11)$$

2.5.3 Homoscedasticita a heteroskedasticita

Homoscedasticita je charakteristika lineárneho regresného modelu, ktorej opakom je heteroskedasticita, kde patrí medzi žiaduce vlastnosti pre regresný model. Termín nám teda udáva fakt, že rozptyl náhodnej veličiny v čase je konštantný, u heteroskedasticity nie je konštantný [25].



Obr. 13: Homoscedasticita a heteroskedasticita [25].

2.5.4 Intervaly spoľahlivosti

Hodnota spoľahlivosti, uvádzaná ako $1-\alpha$, kedy najčastejšie nadobúda hodnotu 0,95. V tomto prípade rozprávame o 95 % intervale spoľahlivosti. Spoľahlivosť udáva pravdepodobnosť, že daný interval obsahuje skutočnú (neznámu) hodnotu parametru. 95 %-ný interval spoľahlivosti zahŕňa skutočnú hodnotu parametra, s pravdepodobnosťou 0,95.

3. Praktická časť

Praktická časť sa zaoberá vytvorením skúšobných telies, odobratých za čerstva, priamo zo stavby. Ide o 18 kociek rozdelených do 3 skupín A - s pridaním vody, B - kocky vyhotovené po zavädnutí betónu, C - kocky vytvorené prvotne. Po odformovaní boli telesá rozdelené - polovica uložená vonku (1-3) a polovica v laboratórnych podmienkach (4-6). Testovanie prebiehalo v dvoch etapách - po 14 dňoch a 28 dňoch, kedy sme skúšali telesá pomocou zariadení, spomenutých v kapitolách 2.4.1.3, 2.3.4 a 2.4.4. Namerané hodnoty sme ďalej štatistiky overovali a porovnávali.

3.1 Popis objektu

Miestom prevádzania našich skúšok je novostavba parkovacieho domu, nachádzajúceho sa na ulici Vevří, v meste Brno, Juhomoravský kraj. Generálny dodávateľ projektu je firma Strabag a.s.. Ide o viacpodlažný parkovací dom pre 623 osobných vozidiel, spojený s administratívnymi kancelárkami o rozmeroch približne 83,1 m x 42,9 m. Objekt je založený na 150 veľkopriemerových pilotách (900-1200 mm), z väčšej časti je odliaty z betónu C 30/37, kamenivo 8/16 a 11/22 pochádza z Rosic, jemná zložka 0/4 z Hrušovan [28].



Obr. 14: Pohľad na finalizáciu parkovacieho domu [27].

3.2 Skúška sadania kužela

Pred začatím výroby skúšobných telies sme taktiež spravili skúšku na sadanie kužela - meranie konzistencie čerstvého betónu. Na vopred navlhčenú podložku sa postaví forma v tvare kužela. Tá je plnená do 3 vrstiev a každá z nich hutnená 25 vpichmi, vždy do predchádzajúcej vrstvy. Po naplnení formy je prebytočný betón odstránený a kuželová forma sa zdvihne. Po dobu zhruba 150 sekúnd sme sledovali, ako kužel upadá a následne ho zmerali za pomoci meracieho náradia.



Obr. 15: Skúška sadania kužela (165 mm).

3.3 Výroba skúšobných telies

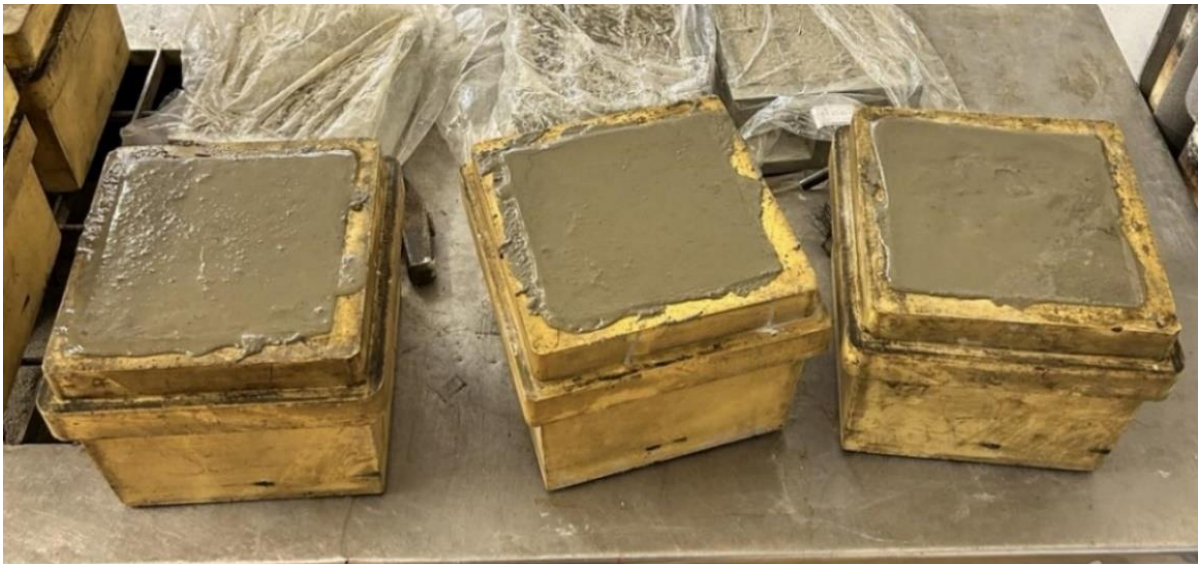
Pri príchode na stavbu sme zhruba odhadli objem, potrebný na výrobu 18 skúšobných telies. Po odobratí nami potrebného množstva a následnom prevezení betónu v prepravných nádobách do laboratória, sa prvotne previedla skúška sadania kužela, popísaná v kapitole 3.2. Následne sme začali plniť skúšobné telesá, o hrane 150x150x150 mm, odpovedajúce norme:

- počet skúšobných telies: 18,

- skúšobné telesá rozdelené do skupín A, B, C,
- každá skupina 6 skúšobných telies,
- A skupina, s prímiesou väčšieho množstva vody,
- B skupina, skúšobné telesá vyhotovené po zavädnutí betónu,
- C skupina, telesá vytvorené prvotne.

Počas plnenia foriem sa betón vibroval na vibračnom stole, z dôvodu odstránenia vzduchových bublín. Telesá boli zakryté polystyrénom a uložené na zem v laboratóriu. Po odformovaní bol betón rozdelený do skupín spomenutých vyššie, dôvodom bolo získanie širších hodnôt pre tvorbu regresného vzťahu. Následne bol stanovený časový harmonogram jednotlivých skúšok:

1. zmeranie výšky, šírky, dĺžky telies a ich odváženie,
2. rozdelenie telies podľa skupín - skupina telies A,B,C 1 až 3 bola vystavená vonkajším podmienkam, skupina telies A, B, C 4 až 6 bola uložená do laboratórnych podmienok,
3. po 14 dňoch skúšky Original Schmidtom typu N, Silver Schmidtom typu N a ultrazvukom vykonané na všetkých 18 skúšobných telesách + meranie pevnosti v tlaku za pomoci lisu,
4. po 28 dňoch skúšky Original Schmidtom typu N, Silver Schmidtom typu N a ultrazvukom vykonané na nami vybraných telesách + meranie pevnosti v tlaku za pomoci lisu,
5. jednotlivé merania boli zapisované do tabuľky pre ďalšie výpočty.



Obr. 16: Naplnené formy pripravené na zretie.



Obr. 17: Telesá uložené vo vonkajších podmienkach.



Obr. 18: Zrejúce telesá v laboratóriu.

3.4 Meranie telies

Kocky sme po odformovaní osušili, presahujúce časti orezali, zmerali ich skutočné rozmery (výška, šírka a dĺžka) a následne na váhe odvážili pre výpočet objemovej hmotnosti. Merania ultrazvukom sme vykonávali za pomoci prístroja Pundit PL-200. Pre náš prípad nám stačilo použiť sondy s menším dosahom, keďže hrana skúšobných telies je 150 mm. Pred každým platným meraním sme ultrazvukom premerali rýchlosť cez etalónový valec. Doba prechodu ultrazvuku bola stanovená podľa vzorca 2.



Obr. 19: Meranie UZ prístrojom Pundit-PL 200.

Po zmeraní ultrazvukom nasledovala skúška tvrdosti:

- na každé skúšané teleso (18 telies) bolo prevedených deväť platných meraní každým tvrdomerom,
- kladivkami merané protiľahlé strany,
- meranie tvrdomerom Original Schmidt typu N,
- meranie tvrdomerom Silver Schmidt typu N,
- kocky boli vložené do lisu a boli zaťažené 10 % predpokladanej pevnosti, čo pri menšej ploche znamená približne 60 kN.

Po rozdrvení telies za pomoci lisu sme zistili ich maximálnu hodnotu porušenia, F danú v N. Z plochy, na ktorú pôsobil lis, sme vypočítali plochu A_c v mm. Po dosadení hodnôt podľa vzorca 8 sme stanovili pevnosť v tlaku v MPa.



Obr. 20: Skúšobné teleso upnuté lisom, Silver Schmidt typu N.



Obr. 21: Meranie maximálneho porušenia lisom.

3.5 Spracovanie nameraných hodnôt

3.5.1 Stanovenie objemovej hmotnosti

Významnou hodnotou pre stanovenie dynamického modulu pružnosti je výpočet objemovej hmotnosti. Objemová hmotnosť bola stanovená na základe rozmerov telesa, odmeraných v počiatočných fázach merania a ich hmotnosti. Namerané hodnoty jednotlivých telies a výsledné objemové hmotnosti sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 2: Stanovenie objemovej hmotnosti.

	Šírka [mm]	Dĺžka [mm]	Výška [mm]	m [kg]	V_c [10^{-6} m^3]	D [kg/ m^3]
A1	149,9	152,1	149,9	7,764	3,417	2272
A2	150,3	151,1	150,4	7,701	3,408	2259
A3	149,8	150,1	149,8	7,804	3,390	2302
A4	150,0	151,1	149,9	7,772	3,397	2288
A5	150,6	150,4	150,4	7,827	3,406	2298
A6	149,8	149,0	149,8	7,777	3,343	2326
B1	150,1	150,1	150,1	7,830	3,381	2315
B2	149,7	150,7	149,8	7,833	3,379	2318
B3	149,6	151,7	149,7	7,908	3,397	2328
B4	150,1	150,6	149,9	7,852	3,385	2317
B5	150,3	148,8	150,2	7,885	3,359	2347
B6	150,0	151,1	149,9	7,962	3,397	2343
C1	149,8	150,6	150,1	7,784	3,386	2299
C2	149,9	149,6	149,9	7,714	3,361	2295
C3	149,7	148,8	149,8	7,650	3,336	2293
C4	149,7	149,3	149,8	7,804	3,348	2331
C5	149,8	149,2	149,9	7,760	3,350	2316
C6	150,1	152,3	150,1	7,992	3,431	2329

3.5.2 Spracovanie dát Original Schmidtom typu N

Každú skúšobnú kocku sme merali odobratím 9 R-hodnôt, pomocou odrazového tvrdomeru Original Schmidt typu N. V prípade veľmi odlišných hodnôt by sa jednotlivé hodnoty vyradili a ďalej by sa s nimi nepočítalo. Naše hodnoty sú relatívne presné. Tieto hodnoty sú uvedené v tabuľke 3, kde sa nachádzajú hodnoty merania odrazovým tvrdomerom, už skôr spomenutý median hodnôt a pevnosť f_c , stanovená z rozmerov a sily, pôsobiacej pri maximálnom porušení lisom. Tento výpočet je popísaný v kapitole 2.2 za použitia definície 8.

Tab. 3: Hodnoty namerané Original Schmidtom N.

	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	SK9	Me	f_c [MPa]
A1	33	37	32	33	37	36	32	34	34	34	37,2
A2	42	35	31	36	35	34	29	30	31	34	34,2
A3	33	34	31	32	33	37	33	31	34	33	34,9
A4	38	38	36	36	36	37	32	33	34	36	38,4
A5	36	39	37	37	37	37	40	46	36	37	40,3
A6	34	38	37	38	37	34	35	37	34	37	42,0
B1	37	38	35	40	32	36	36	36	40	36	44,9
B2	36	36	34	38	42	35	42	36	37	36	44,6
B3	45	36	35	42	40	36	38	33	34	36	44,3
B4	38	36	34	37	36	35	32	36	36	36	41,9
B5	34	36	36	44	38	37	37	37	36	37	47,6
B6	39	37	40	38	37	37	37	37	37	37	47,1
C1	33	36	31	35	34	36	35	36	34	35	38,5
C2	36	34	35	34	35	34	35	35	30	35	39,5
C3	42	32	33	36	34	35	33	34	34	34	39,6
C4	40	37	38	37	44	38	38	38	38	38	47,3
C5	36	37	36	35	38	39	38	36	36	36	48,8
C6	39	37	35	40	43	38	40	36	37	38	46,7

3.5.3 Spracovanie dát SilverSchmidtom typu N

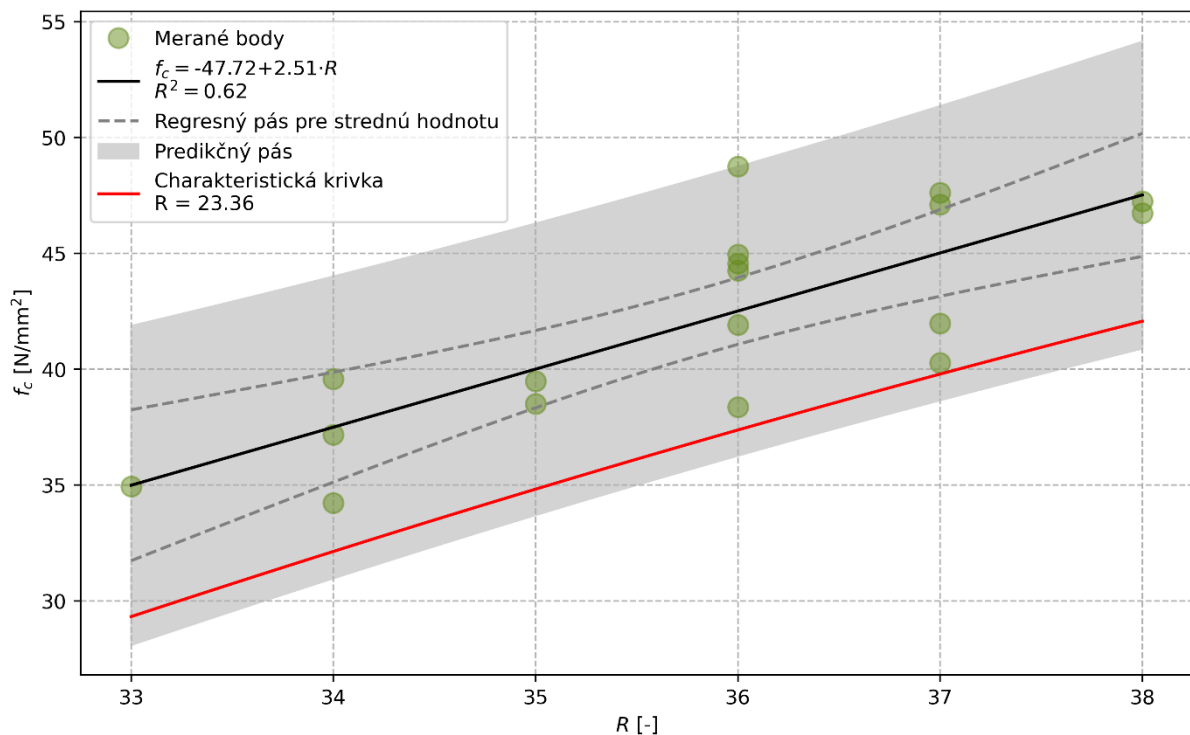
Postup získania dát pre SilverSchmidt je rovnaký ako u tvrdomery Original Schmidt.

Tab. 4: Hodnoty namerané Silver Schmidtom N.

	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	SK9	Me	f_c [MPa]
A1	41	47,5	43	42,5	41	42,5	42	43,5	38,5	42,5	37,2
A2	39	43,5	47,5	42,5	40,5	41,5	37,5	41	38	41	34,2
A3	39	39	36,5	39,5	44,5	40,5	40	41	39,5	39,5	34,9
A4	50,5	41	47	48,5	45,5	42,5	44,5	39,5	40,5	44,5	38,4
A5	46,5	44,5	51,5	47,5	43,5	43,5	44	44	42,5	44	40,3
A6	42	43	42	44,5	45	48	49	46	43,5	44,5	42,0
B1	44,5	44,5	44	49,5	46	47,5	42,5	43	45,5	44,5	44,9
B2	46	47	42,5	46	49,5	45,5	43	43	47,5	46	44,6
B3	45	44,5	44	46,5	46,5	43,5	38	41,5	50	44,5	44,3
B4	44	53	41	43	45	41,5	43,5	41,5	40,5	43	41,9
B5	45,5	50	43	50	49,5	48	42,5	44	44	45,5	47,6
B6	47,5	48	53	49,5	50,5	48,5	49,5	44	46,5	48,5	47,1
C1	51,5	41	47,5	42,5	43	42,5	42,5	38,5	37,5	42,5	38,5
C2	41	42,5	38,5	44,5	43	40,5	41,5	39,5	41	41	39,5
C3	42,5	46	38	41,5	41,5	40	42	39	44,5	41,5	39,6
C4	52,5	58	44,5	57	51,5	59	47	45,5	46	51,5	47,3
C5	52,5	60,5	49,5	49	55	55	46	43,5	41,5	49,5	48,8
C6	47	50,5	49,5	49	55	55	46	43,5	41,5	49	46,7

3.6 Regresní pás pre Original Schmidt.

Regresná krivka bola zhotovená z hodnôt R , z meraní odrazovým tvrdomerom Original Schmidt typu N a f_c , získané z pevnosti v tlaku skúšobných telies. Za pomoci použitia balíčka statsmodels v programovacom prostredí jupyter boli spracované nami namerané údaje. Ich výstupom je sada grafov. Na grafe obr. 23 môžeme vidieť že rozsah nameraných hodnôt je dosť malý, hlavne čo sa týka jeho R -hodnôt. Pre jeho detailnejšie zobrazenie by teda bolo nutné získať rozsiahlejšie údaje, keďže charakteristická krivka začína niekde na hodnote 23,36, ktorá na grafe chýba, avšak nejedná sa o zásadný problém.



Obr. 22: Regresní pás betónu pre tvrdomer typu Original Schmidt N.

Pre vytvorenie krabicového 3D grafu je potrebné overiť vstupné hodnoty R a v_L . Tento výpočet prevediem opäť v prostredí jupyter. Vstupné hodnoty musia byť menšie ako 0,05, aby sme mohli obe hodnoty zahrnúť do grafu. Na obrázku číslo 24 nižšie môžeme vidieť že obe hodnoty sú naozaj nižšie požadovanej hodnoty 0,05, a teda môžu byť zahrnuté pre graf. Avšak hodnota v_L sa veľmi blíži k hodnote 0,05, takže v prípade dosiahnutia rozdielnej hodnoty by tento test nemusel spĺňať podmienku.

- $R = 0,015 < 0,05$
- $v_L = 0,043 < 0,05$

OLS Regression Results

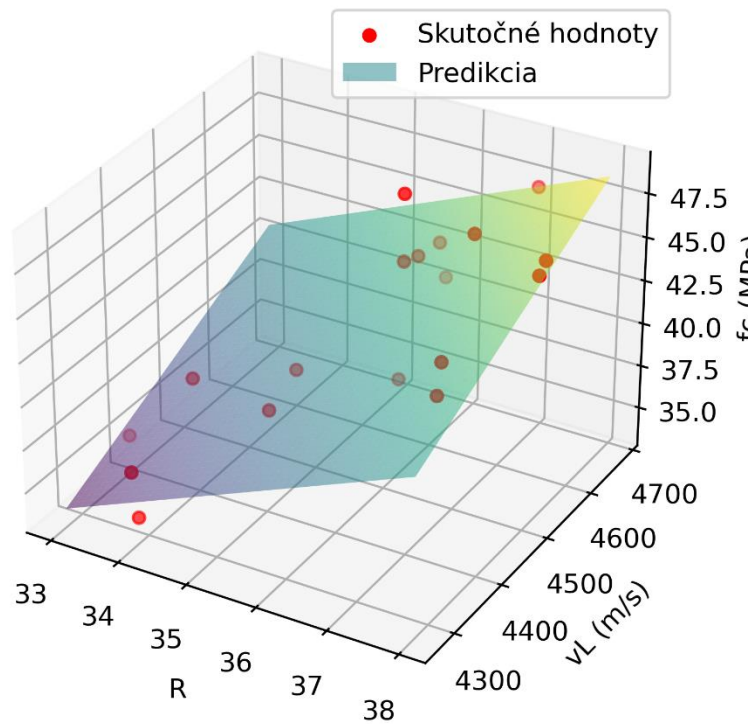
```

=====
Dep. Variable:          fc      R-squared:              0.716
Model:                 OLS     Adj. R-squared:         0.678
Method:                Least Squares   F-statistic:           18.90
Date:                  Fri, 24 May 2024   Prob (F-statistic):    7.95e-05
Time:                  16:26:57     Log-Likelihood:        -40.864
No. Observations:     18         AIC:                   87.73
Df Residuals:         15         BIC:                   90.40
Df Model:              2
Covariance Type:      nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-91.0461	25.077	-3.631	0.002	-144.496	-37.596
R	1.6215	0.592	2.738	0.015	0.359	2.884
vL	0.0167	0.008	2.213	0.043	0.001	0.033

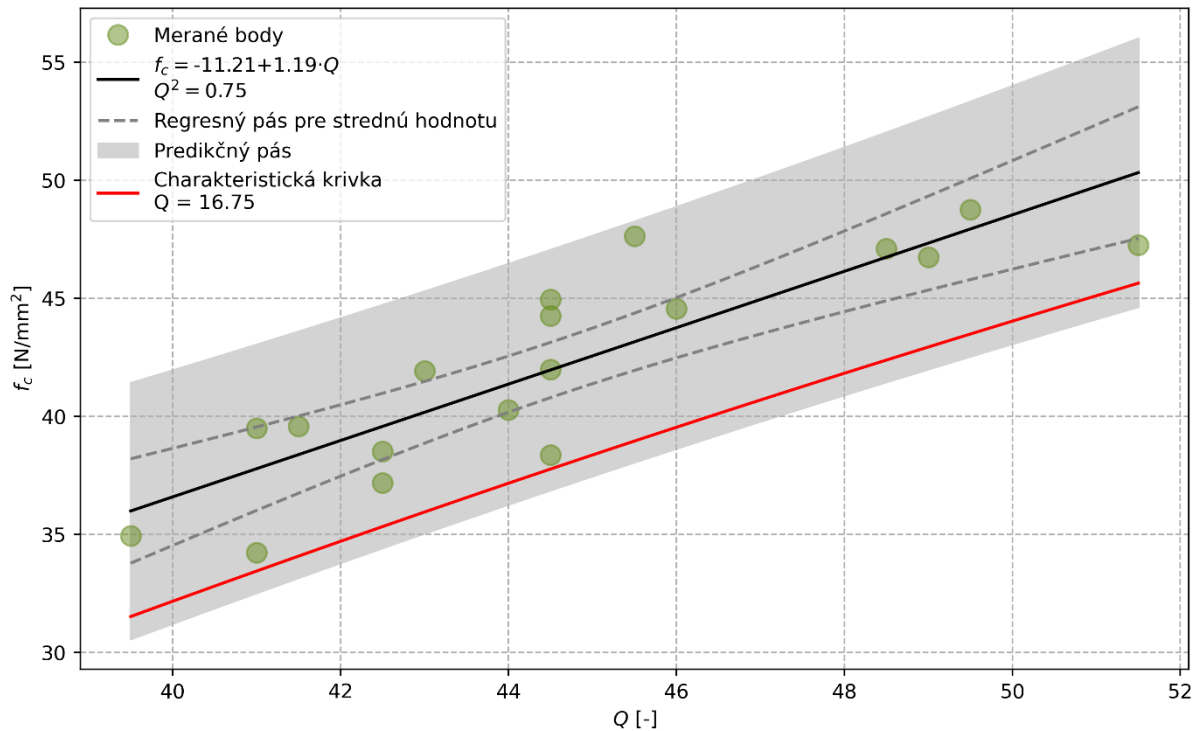
Obr. 23: Výstup z programu jupyter pre R.



Obr. 24: Krabicový graf pre tvrdomer typu Original Schmidt N.

3.7 Regresní pás pre Silver Schmidt typu N

Regresná krivka pre Silver Schmidt typu N bola tvorená rovnakým spôsobom, ako pre tvrdomer typu Original Schmidt N. Tu však môžeme vidieť, že rozptyl hodnôt Q je o niečo vyšší, ako pre predchádzajúci tvrdomer. Rovnako však platí, že pre charakteristickú krivku začína na hodnote 16,75, a teda ďaleko pred našou oblasťou. Platí tu to isté čo v prípade Original Schmidtu typu N, že pre jej zobrazenie by bolo potrebné získanie obsiahnejších údajov.



Obr. 25: Regresní pás betónu pre tvrdomer typu Silver Schmidt N.

Ďaleko lepšie nám pre tento typ tvrdomera vychádzajú hodnoty pre tvorbu krabicového grafu. Tie sú získané opäť v prostredí jupyter.

- $v_L = 0,010 < 0,05$,
- $Q = 0,00 < 0,05$.

OLS Regression Results

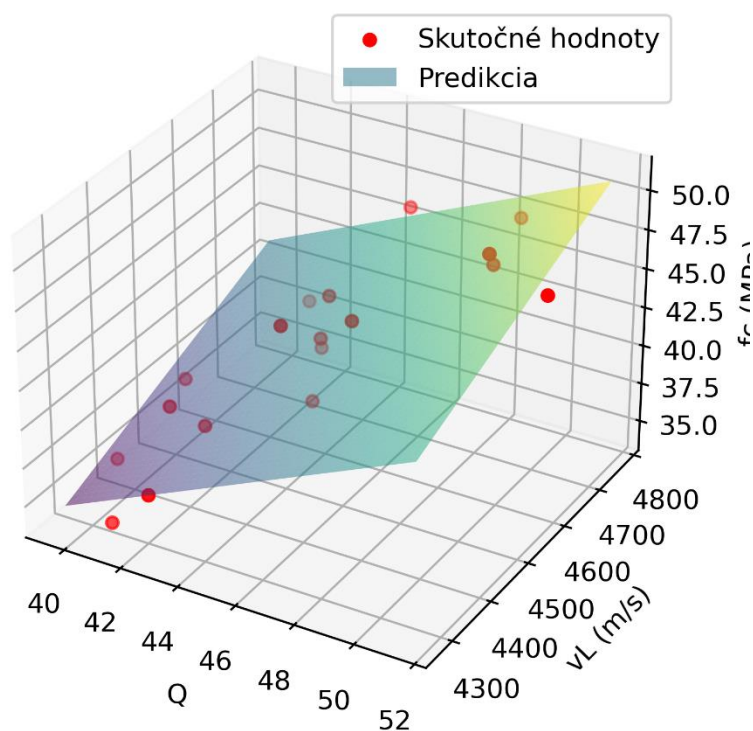
```

=====
Dep. Variable:          fc      R-squared:              0.840
Model:                 OLS     Adj. R-squared:         0.818
Method:                Least Squares   F-statistic:           39.30
Date:                  Fri, 24 May 2024   Prob (F-statistic):    1.09e-06
Time:                  17:13:58     Log-Likelihood:        -35.712
No. Observations:     18         AIC:                   77.42
Df Residuals:         15         BIC:                   80.09
Df Model:              2
Covariance Type:      nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-65.8376	19.720	-3.339	0.004	-107.870	-23.805
Q	0.8856	0.178	4.987	0.000	0.507	1.264
vL	0.0152	0.005	2.928	0.010	0.004	0.026

Obr. 26: Výstup z programu jupyter pre Q.



Obr. 27: Krabicový graf pre tvrdomer typu Silver Schmidt N.

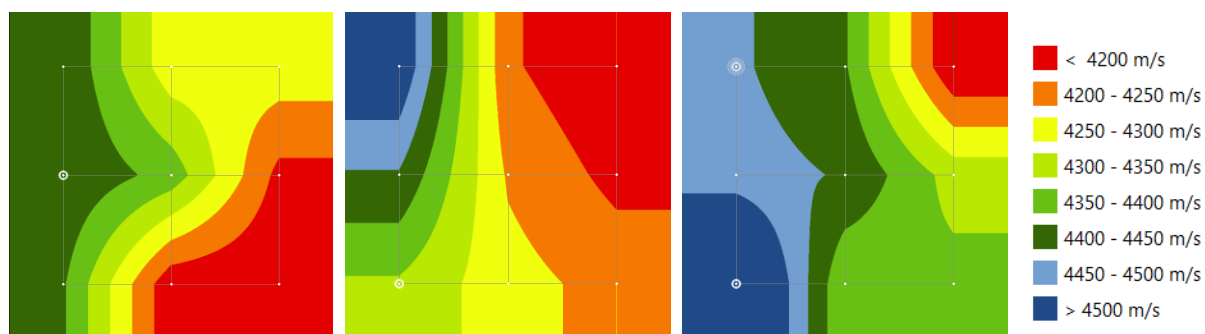
3.8 Meranie ultrazvukom

Každá skúšobná kocka bola pred skúškou zmeraná ultrazvukom na deviatich meracích základniach. Týmto spôsobom bola tiež meraná rovnomerná kvalita betónu v skúšobnom telese. Meranie bolo prevedené v sieti 3x3. Kocka bola meraná tak, ako bola skúšaná v tlaku, to zn. ľavá časť dno formy, pravá časť bola horná. Z merania ultrazvukových vĺn môžeme určiť podľa vzťahu 4 dynamický modul pružnosti E_{cu} . V tabuľke číslo 4 je uvedená objemová hmotnosť, rýchlosť ultrazvuku

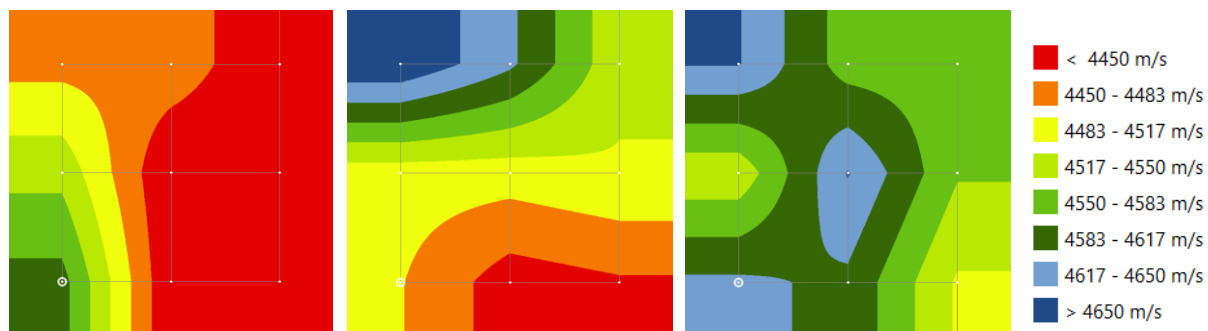
a dynamické moduly pružnosti (14 a 28 dní). Meranie skúšobných telies ultrazvukom prebehlo po 14 dňoch na všetkých 18 telesách, a po 28 dňoch na nami vybratých telesách, pre ďalšie merania.

Tab. 5: Tabuľka hodnôt s dynamickým modulom pružnosti.

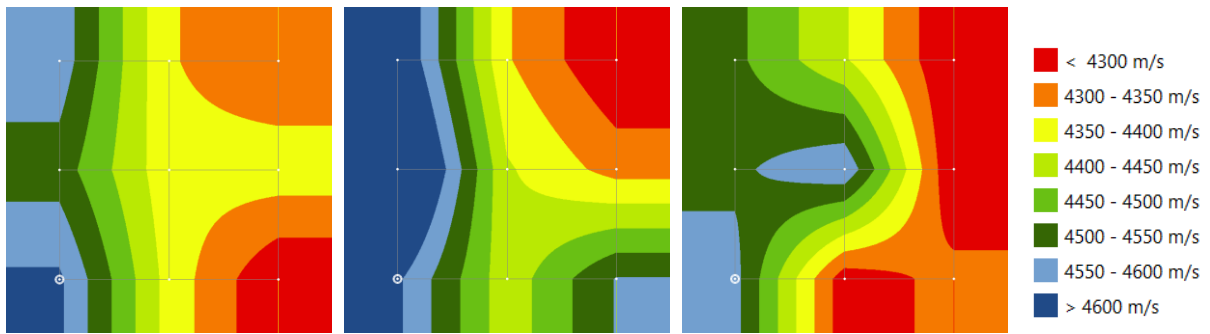
	ρ [kg/m ³]	v_L [m/s]	E_{cu} [GPa] 14 dní	E_{cu} [GPa] 28 dní
A1	2272	4271	37,3	-
A2	2259	4282	37,3	-
A3	2302	4393	40,0	-
A4	2288	4532	42,3	-
A5	2298	4464	41,2	43,6
A6	2326	4473	41,9	43,4
B1	2315	4541	43,0	41,3
B2	2318	4572	43,6	42,7
B3	2328	4618	44,7	43,8
B4	2317	4633	44,8	-
B5	2347	4540	43,5	46,9
B6	2343	4681	46,2	48,1
C1	2299	4406	40,2	-
C2	2295	4461	41,1	-
C3	2293	4390	39,8	-
C4	2331	4538	43,2	44,5
C5	2316	4541	43,0	44,3
C6	2329	4524	42,9	45,5



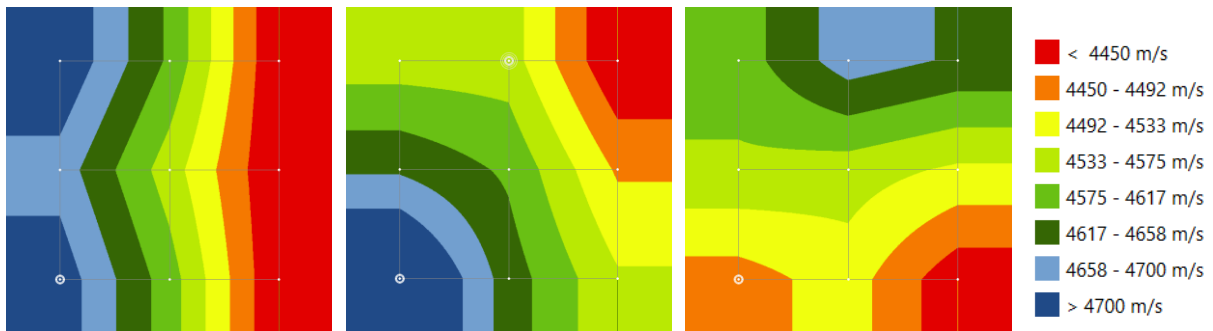
Obr. 28: Ultrazvuk telies skupiny A, 1-3 (14 dní).



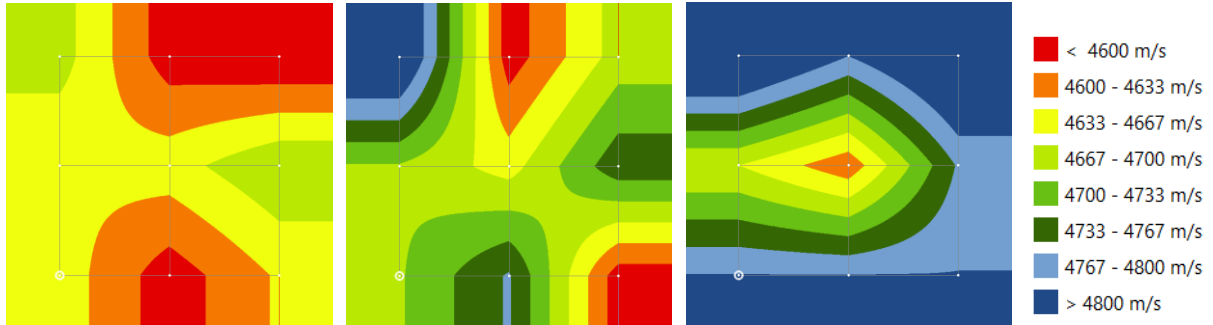
Obr. 29: Ultrazvuk telies skupiny B, 1-3 (14 dní).



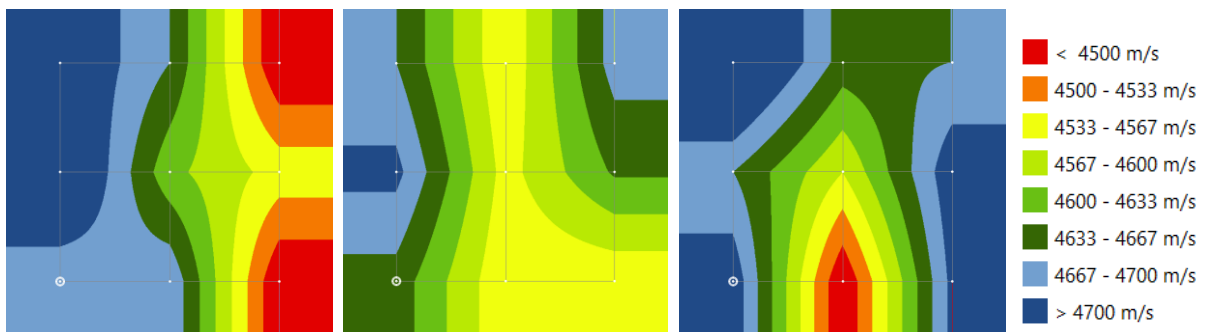
Obr. 30: Ultrazvuk telies skupiny C, 1-3 (14 dni).



Obr. 31: Ultrazvuk telies skupiny A, 4-6 (14 dni).

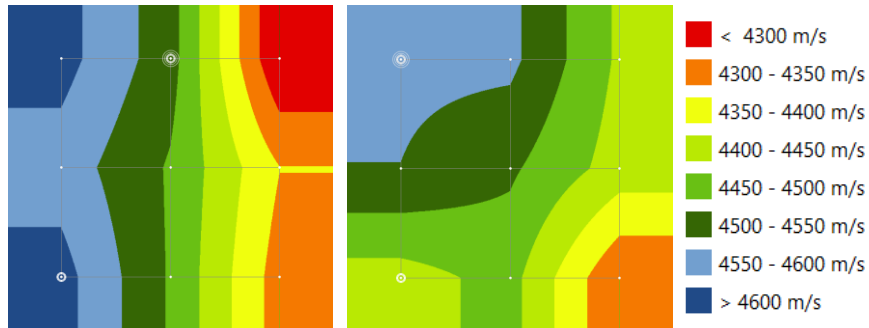


Obr. 32: Ultrazvuk telies skupiny B, 4-6 (14 dni).

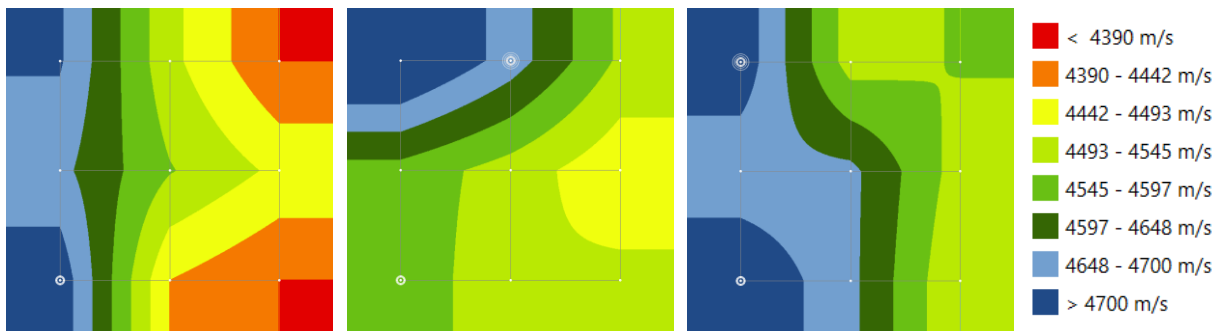


Obr. 33: Ultrazvuk telies skupiny C, 4-6 (14 dni).

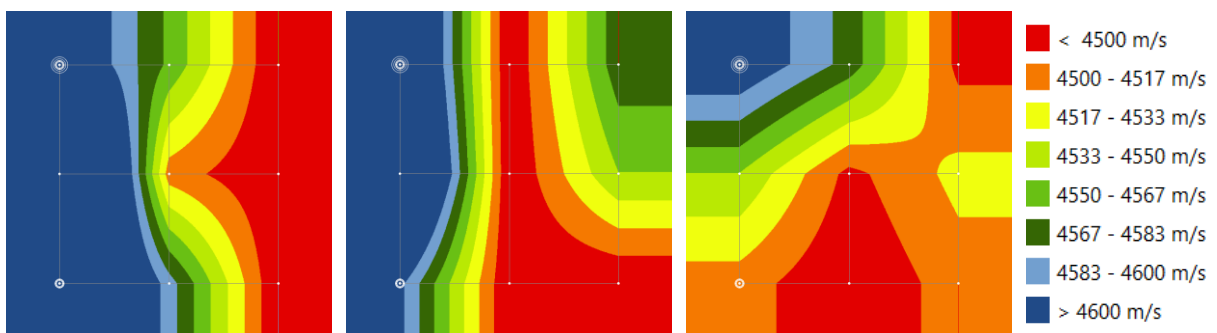
Z dôvodu lepšieho rozlíšenia výstupov z Pundit-PL 200 bol upravený rozsah rýchlostí ultrazvuku. Na obrázkoch 29-34 je meraná rýchlosť ultrazvukom na skúšobných telesách po 14 dňoch, 35 až 38 po 28 dňoch.



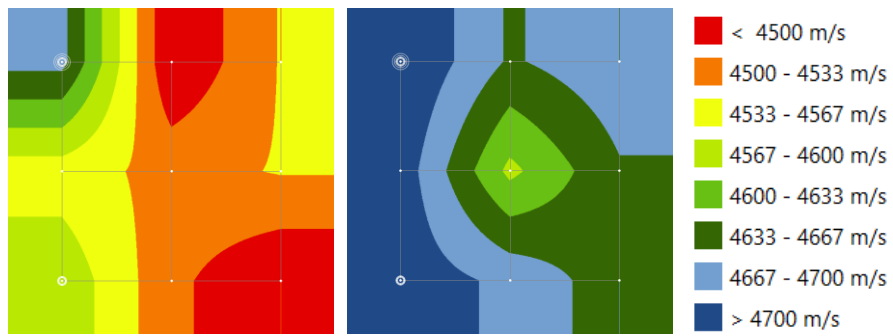
Obr. 34: Ultrazvuk telies skupiny A, 5,6 (28 dní).



Obr. 35: Ultrazvuk telies skupiny B, 1-3 (28 dní).



Obr. 36: Ultrazvuk telies skupiny C, 4-6 (28 dní).



Obr. 37: Ultrazvuk telies skupiny B, 5,6 (28 dni).

4. Vyhodnotenie výsledkov

Vo finalizácii boli vypracované 2 regresné vzťahy, jeden pre Original Schmidt N a druhý pre Silver Schmidt N. Z dôvodu získania širších hodnôt boli skúšobné telesá rozdelené do troch skupín. Krivka spoľahlivosti je posunutá výrazne nadol a je odskúšaná na veľkom množstve betónu. V toho dôsledku nie je úplne vhodná na odhad triedy betónu, keďže je v priemere posunutá až o dve triedy pevnosti. Aby bol betón pevnostnej triedy C30/37 podľa normy ČSN EN 206 + A2 [29] musí platiť:

- mediánova pevnosť $37 + 4 = 41$ MPa,
- minimálna pevnosť $37 - 4 = 33$ MPa.

Tabuľka z normy je prevzatá od výrobcu, ktorý mal regresný vzťah, posunutý výrazne na stranu bezpečnú, preto hodnoty odčítané z grafu obr. 23:

- R pre $f_c = 33$ MPa odpovedá hodnote $R_{\min} = 34,5$ MPa,
- R pre $f_c = 41$ MPa odpovedá hodnote $R_{\text{med}} = 37,5$ MPa,

sa podľa tabuľky tab.5, **B.1** v norme ČSN EN 13 791 [22].

Tab. 6: Normová tabuľka založená na vzdialenosti odrazu (typ R) [22].

R_{\min} najnižšia veľkosť odrazu zo všetkých skúšobných miest skúšobnej oblasti	R_{med} médian veľkosti odrazu pre skúšobnú oblasť	trieda pevnosti v tlaku podľa EN 206 ^a
≥ 35	≥ 38	C20/25
≥ 37	≥ 40	C25/30
≥ 40	≥ 43	C30/37
≥ 44	≥ 47	C35/45

Z výsledkov odčítaných z konkrétnych regresných vzťahov, vytvorených pre Original Schmidt typu N a v porovnaní s tabuľkou v prílohe normy ČSN EN 13 791 [22] vyplýva, že tu existuje veľká disproporcija medzi oboma vzťahmi. Vzťah uvedený v informatívnej prílohe normy uvádza výrazne vyššie hodnoty pre dosiahnutie danej pevnostnej triedy. Dôvodom je že ide o všeobecný vzťah, vytvorený pre veľké množstvo betónu a vďaka tomu je hranica spoľahlivosti posunutá výrazne dolu, a teda pevnosť vyhodnotená podľa tohto normového stavu je veľmi podhodnotená. Vlastný regresný vzťah, vytvorený pre konkrétny betón, je vždy presnejší a lepšie odpovedá danému betónu. V našom prípade sa prakticky jedná o rozdiel dvoch pevnostných tried.

Hodnoty pre odrazový tvrdomer Silver Schmidt typu N odčítame z grafu obr. 25:

- Q pre $f_c = 33$ MPa odpovedá hodnote $Q_{\min} = 41,5$ MPa,
- Q pre $f_c = 41$ MPa odpovedá hodnote $Q_{\text{med}} = 47,5$ MPa,

tieto hodnoty porovnáme opäť s normovou tabuľkou **B.2** z normy ČSN EN 13791 [22], vid. tab. 6.

Tab. 7: Normová tabuľka založená na vzdialenosti odrazu (typ Q) [22].

R_{\min} najnižšia veľkosť odrazu zo všetkých skúšobných miest skúšobnej oblasti	R_{med} médian veľkosti odrazu pre skúšobnú oblasť	trieda pevnosti v tlaku podľa EN 206 ^a
≥42	≥49	C20/25
≥46	≥52	C25/30
≥51	≥56	C30/37
≥56	≥60	C35/45

Rovnako ako pri prístroji Original Schmidt N, tak aj pre prípad Silver Schmidt N sa jedná o veľkú disproporciu medzi regresným vzťahom, vytvoreným pre konkrétny betón a tabuľkou v norme ČSN EN 13 791 [22]. Tu tiež uvažujeme o rozdielne minimálne dvoch pevnostných tried.

Nasledovalo overenie regresnej analýzy priamo na konštrukcii, tu sme na dvanástich miestach spravili deväť platných meraní s prístrojmi Original Schmidt N a SilverSchmidt N, ktoré sme zaznamenali do tabuľky 7.

Tab. 8: Tabuľka hodnôt z terénu pre Original Schmidt N.

	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	SK9	Me	$f_{c,0,05}$	$f_{c,0,5}$
S1	45	42	42	52	42	42	29	44	47	42	52,7	57,5
S2	42	43	40	41	41	41	46	43	41	41	50,1	55,0
S3	42	41	43	46	40	41	42	43	45	43	55,2	60,0
S4	44	43	43	43	40	42	42	27	43	42	52,7	57,5
S5	41	40	43	46	41	47	42	44	45	43	55,2	60,0
S6	45	45	40	41	42	45	46	51	44	45	60,3	65,0
S7	41	39	40	44	41	46	46	39	44	41	50,1	55,0
S8	46	40	41	46	41	42	54	43	41	42	52,7	57,5
S9	40	39	40	42	48	44	45	46	45	44	57,8	62,5
S10	42	42	42	39	43	41	42	42	38	42	52,7	57,5
D1	44	44	42	48	43	46	52	43	53	44	57,8	62,5
D2	43	44	42	48	44	46	43	42	45	43	55,2	60,0

Tab. 9: Tabuľka hodnôt z terénu pre Silver Schmidt N.

	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	SK7	SK8	SK9	Me	$f_{c,0,05}$	$f_{c,0,5}$
S1	58	54,5	54	58,5	61,5	55,5	53,5	59,5	67	58	53,5	58,1
S2	55	62,5	57	60,5	58,5	57	59	56,5	57,5	57,5	52,9	57,5
S3	53,5	55,5	63	54,5	54	53,5	55	54	57	60,5	56,5	61,1
S4	60	60,5	59	56,5	60,5	60,5	61,5	59,5	62,5	54,5	49,4	53,9
S5	59	63,5	66,5	64,5	61	63	55	54	58	61	57,0	61,7
S6	60	53,5	53	47	56,5	56	56	53	55	55	50,0	54,5
S7	54,5	59,5	59,5	55,5	60	52	54	55,5	55	55,5	50,6	55,1
S8	56	55	57	59,5	53	60	59,5	56,5	58,5	57	52,3	56,9
S9	54	47,5	59	58,5	55	55,5	56,5	49,5	56	55,5	50,6	55,1
S10	50,5	60,5	53	53	52	56,5	58	54	50	53	47,6	52,1
D1	52,5	55	67,5	67	57,5	52	55	60,5	49,5	55	50,0	54,5
D2	55,5	57	53,5	49	49	48,5	58	52	46,5	52	46,5	50,9

Hodnoty pre odrazový tvrdomer Silver Schmidt typu N odčítame z tabuľky 8:

- Q pre $f_c = 33$ MPa odpovedá hodnote $Q_{\min} = 50,1$ MPa,
- Q pre $f_c = 41$ MPa odpovedá hodnote $Q_{\text{med}} = 50,6$ MPa.

Hodnoty pre odrazový tvrdomer Original Schmidt typu N odčítame z tabuľky 7:

- Q pre $f_c = 33$ MPa odpovedá hodnote $R_{\min} = 46,5$ MPa,
- Q pre $f_c = 41$ MPa odpovedá hodnote $R_{\text{med}} = 55,2$ MPa.

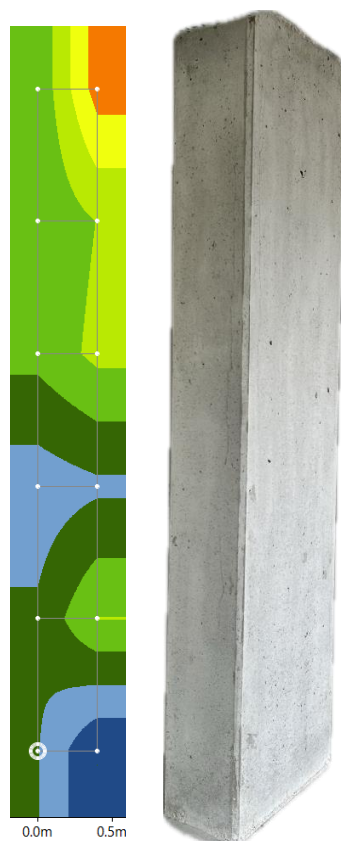


Obr. 38: Terén - pohľad na skúšanú časť.



Obr. 39: Terén- stĺp 4, stĺp 10, doska 1.

Niektoré zo stĺpov boli premerané dôkladne, plošne. Meranie prebiehalo v dvoch vodorovných bodoch a po výške v šiestich bodoch.



Obr. 40: Terén - stĺp 1 meraný plošne.



Obr. 41: Terén - stĺp 1 meranie pomocou ultrazvuku.



Obr. 42: Terén - stĺp 1 meranie pomocou Schmidtovho tvrdomeru.

5. Záver

Cieľom práce bolo overiť postup pre kontrolu kvality betónu, prípadne pre overenie vlastností v prípade pochybností, podľa novej normy ČSN EN 13 791. Experimentálna časť bola prevádzaná na konkrétnej konštrukcii a betóne, odobratom pri betonáži tejto konštrukcie. Jednalo sa o parkovací dom v meste Brno na ulici Vevří. Betónové vzorky boli odobraté priamo zo stavby tohto parkoviska, z ktorého bolo vyrobených 18 skúšobných telies o hrane 150x150x150 mm. Tieto telesá sme následne použili na tvorbu vlastného regresného vzťahu

Porovnaním vlastného regresného vzťahu a vzťahu uvedeného v informatívnej prílohe B normy ČSN EN 13 791 vyplynulo, že vzťah uvedený pre screeningový test, uvedený v norme, výrazne posunutý na stranu bezpečnú. Avšak regresný vzťah vytvorený pre betón sa prakticky odlišuje o dve pevnostné triedy.

Po zhotovení vlastného regresného vzťahu sme previedli overovacie meranie priamo na konštrukcii pre overenie kvality betónu. Meranie prebehlo pomocou dvojice tvrdomerov typu N, Original Schmidt a Silver Schmidt. Meraných bolo 10 stĺpov a 2 dosky. Z každého objektu bolo tvrdomerom odobratých deväť meraní. Na základe meraní bola odhadnutá pevnosť v tlaku.

Vo výsledku môžeme teda konštatovať že betón v konštrukcii odpovedá požadovanej pevnostnej triede.

6. Zoznam použitej literatúry

- [1] *Diagnostika betonových konstrukcí* | ASB Portal. ASB-portal.cz | odborný portál | architektura, stavebnictví, byznys [online]. Copyright © JAGA GROUP, s. r. o. Všechna práva vyhrazena [cit. 13.01.2020]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cementa-beton/diagnostika-betonovych-konstrukci>
- [2] *6. Diagnostika betonových a železobetonových konstrukcí* - PDF Free Download. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz. [cit. 2024-05-17] Dostupné z: <http://docplayer.cz/8563764-6-diagnostikabetonovych-a-zelezobetonovych-konstrukci.html>
- [3] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN isbn80-214-1816-8.
- [4] ANTON, Ondřej. *Základy zkušebnictví: návody do cvičení*. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN isbn80-214-2079-0.
- [5] ČSN 73 1371 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] *Pundit PL-200* [online] [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-200>
- [7] *Schmidt-hammer exposure-age dating: a review of principles and practice* [online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825222001222>
- [8] *Schmidt Hammer* [online]. <https://www.pcte.com.au/original-schmidt-hammer>
- [9] *Schmidt rebound hammers* [online] [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.ncconsulting.com.sg/schmidt-rebound-hammers>
- [10] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [11] ČSN EN 12390-1 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [12] CIKRLE, Petr, ANTON, Ondřej, DANĚK, Petr, KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, MISÁK, Petr a KOMÁRKOVÁ, Tereza. *NDT zkoušení ve stavebnictví: příručka kurzu ČŽV*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2016. 158 s.
- [13] *Silver Schmidt hammer, Digital* [online] [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.matest.com/en/product/c383-10-silver-schmidt-hammer-digital>.
- [14] *Original Schmidt OS8000* [online] [cit. 2024-05-17] <https://www.screeningeagle.com/en/products/original-schmidt-os8000>
- [15] *Pundit Ultrasonic Pulse Velocity and Echo* [online]. Dostupné z: <https://www.humboldtmg.com/pundit-ultrasonic-pulse-velocity-echo.html>
- [16] *Pundit PL-200* [online]. Dostupné z: <https://www.pcte.com.au/images/pdf/Pundit-PL/Pundit-PL-200.pdf>

- [17] *Proceq* [online] [cit. 2024-05-17] Dostupné z: https://hammondconcrete.co.uk/wp-content/uploads/2018/09/Pundit-pl200-operating-Instructions_English.pdf
- [18] *ČSN 73 1373 Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [19] *Lineární regrese (Linear regression)* [online]. Dostupné z: <https://www.czechwealth.cz/slovník-pojmu/linearni-regrese>
- [20] *Medián* [online]. Dostupné z: <https://www.matematika.cz/median/>
- [21] *Korelační a regresní analýza* [online] [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: https://wikisofia.cz/wiki/Korela%C4%8Dn%C3%AD_a_regresn%C3%AD_anal%C3%BDza
- [22] *ČSN EN 13 791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [23] *ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [24] *DIAMANTOVÝ JÁDROVÝ VRTACÍ STROJ OD 250-CA* [online] [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.hilti.cz/c/CLS_POWER_TOOLS_7125/CLS_DIAMOND_CORING_7125/r12321865
- [25] *Homoscedasticity vs Heteroscedasticity* [online] [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://medium.com/the-data-nerd/homoscedasticity-vs-heteroscedasticity-366e8b21d79>
- [26] *Intervaly spolehlivosti* [online]. Dostupné z: https://www.karlin.mff.cuni.cz/~turcic/Konfidencni_intervaly.pdf
- [27] *Osud rozbitého parkoviště na Šumavské je zpečetěn. Radní vybrali zhotovitele zakázky* [online] [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://urbancentrum.brno.cz/udalosti/osud-rozbitého-parkoviste-na-sumavske-je-zpeceten-radni-vybrali-zhotovitele-zakazky/>
- [28] *Prezentácia firmy STRABAG, pre študentov VUT – Ústav stavebního zkušebnictví*.
- [29] *ČSN EN 206 + A2 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

7. Zoznam použitých skratiek a veličín

m	je počet odhadovaných hodnôt pevnosti
v_L	v_L rýchlosť impulzu
t_0	korekcia
T	čas počas ktorého prejde impulz meracou základňou, vrátane t_0
L	dĺžka vzorku alebo meranej konštrukcie daná
T_e	čas prechodu vlny cez etalon
E	časová charakteristika etalonu
E_{cu}	dynamický modul pružnosti
D	objemová hmotnosť betónu
k	koeficient rozmernosti prostredia
v_L	rýchlosť pozdĺžneho ultrazvukového vlnenia
α	je veľkosť odrazu
f_c	je pevnosť v tlaku
F	je maximálne zaťaženie pri porušení
A_c	je prierezová plocha telesa kde pôsobí tlak
Me	median
m	meter
s	Sekunda
kN	kilonewton
m^3	meter kubický
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
V	objem
O	Original Schmidt
S	SilverSchmidt
$S1-9$	stĺpy
SK	skúšobná kocka

8. Zoznam obrázkov

1	Jadrový vrták [24].....	15
2	Šírenie vlnenia.....	16
3	Postavenie sond a šírenie ultrazvuku [17].....	17
4	Sondy so spojovacím materiálom (plastelína).....	17
5	Etalónový valec určený nakalibráciu.....	18
6	Pundit PL-200 ultrazvukový prístroj [6].....	19
7	Plošný sken Pundit PL-200 [17].....	20
8	Typy prístrojov Schmidt [9].....	20
9	10: Odrazový tvrdomer – 1) baran, 2) nárazník, 3) ťažná pružina, 4) puzdro, 5) stupnica [12].....	21
10	Odrazový tvrdomer Original Schmidt OS8000 [14].....	21
11	Odrazový tvrdomer SilverSchmidt [13].....	22
12	Body regresnej analýzy preložené priamkou [21].....	23
13	Homoscedasticita a heteroskedasticita [25].....	24
14	Pohľad na finalizáciu parkovacieho domu [27].....	25
15	Skúška sadania kužeľu (165 mm).....	26
16	Naplnené formy, pripravené na zretie.....	27
17	Telesá uložené vo vonkajších podmienkach.....	28
18	Zrejúce telesá v laboratórií.....	28
19	Meranie UZ prístrojom Pundit-PL 200.....	29
20	Skúšobné teleso upnuté lisom, SilverSchmidt typu N.....	30
21	Meranie maximálneho porušenia lisom.....	30
22	Regresní pás betónu pre tvrdomer typu Original Schmidt N.....	33
23	Výstup z programu jupyter pre R.....	34
24	Krabicový graf pre tvrdomer typu Original Schmidt N.....	34
25	Regresní pás betónu pre tvrdomer typu Silver Schmidt N.....	35
26	Výstup z programu jupyter pre Q.....	36
27	Krabicový graf pre tvrdomer typu SilverSchmidt N.....	36
28	Ultrazvuk telies skupiny A, 1-3 (14 dní).....	37
29	Ultrazvuk telies skupiny B, 1-3 (14 dní).....	37
30	Ultrazvuk telies skupiny C, 1-3 (14 dní).....	38
31	Ultrazvuk telies skupiny A, 4-6 (14 dní).....	38
32	Ultrazvuk telies skupiny B, 4-6 (14 dní).....	38
33	Ultrazvuk telies skupiny C, 4-6 (14 dní).....	38

34	Ultrazvuk telies skupiny A, 5,6 (28 dní).....	39
35	Ultrazvuk telies skupiny B, 1-3 (28 dní).....	39
36	Ultrazvuk telies skupiny C, 4-6 (28 dní).....	39
37	Ultrazvuk telies skupiny B, 5,6 (28 dní).....	40
38	Obr. 38: Terén- pohľad na skúšanú časť.....	43
39	Obr. 39: Terén- stĺp 4, stĺp 10, doska 1.....	44
40	Obr. 40: Terén- stĺp 1 meraný plošne.....	44
41	Obr. 41: Terén- stĺp 1 meranie pomocou ultrazvuku.....	45
42	Obr. 42: Terén- stĺp 1 meranie pomocou Schmidtovho tvrdomeru.....	45

9. Zoznam tabuliek

<i>Tab. 1: Minimálny počet skúšobných miest pre nepriame skúšky [22].....</i>	13
<i>Tab. 2: Stanovenie objemovej hmotnosti.....</i>	30
<i>Tab. 3: Hodnoty namerané Original Schmidtom N.....</i>	31
<i>Tab. 4: Hodnoty namerané Silver Schmidtom N.....</i>	32
<i>Tab. 5: Tabuľka hodnôt s dynamickým modulom pružnosti.</i>	37
<i>Tab. 6: Normová tabuľka založená na vzdialenosti odrazu (typ R) [22].....</i>	40
<i>Tab. 7: Normová tabuľka založená na vzdialenosti odrazu (typ Q) [22].....</i>	41
<i>Tab. 8: Tabuľka hodnôt z terénu pre Original Schmidt N.....</i>	41
<i>Tab. 9: Tabuľka hodnôt z terénu pre Silver Schmidt N.....</i>	4