

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Barbora Jindrová



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VYUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ METODY PRO STANOVENÍ ROVNOMĚRNOSTI BETONU V KONSTRUKCI

THE USE OF THE ULTRASONIC PULSE VELOCITY TEST FOR THE DETERMINATION
OF CONCRETE HOMOGENEITY IN A STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Jindrová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

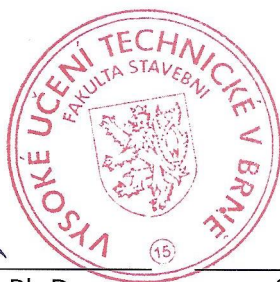
Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Barbora Jindrová
Název	Využití ultrazvukové metody pro stanovení rovnoměrnosti betonu v konstrukci
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

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



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

PODKLADY A LITERATURA

Anton, O. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2002.

Schmid, P. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.

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

Aitcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton.

Neville, A.M.: Properties of concrete.

Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Proceq, manuál k přístroji Pundit PL-200.

Odborné tuzemské i zahraniční příspěvky pojednávající o zadané problematice.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k normám ČSN EN 206, ČSN EN 12504-4, ČSN 73 1371, ČSN ISO 1920-10 a k řadě ČSN EN 12390.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: Rešerše pramenů – konstrukční beton a jeho vlastnosti, problematika nedestruktivního (NDT) zkoušení betonu, možnosti ověřování rovnoměrnosti betonu ve stávajících konstrukcích s přihlédnutím k využití ultrazvukové impulzové metody. Popis použitých metod zkoušení betonu, podrobný popis principu ultrazvukové impulzové metody, nastudování manuálu nového přístroje Pundit PL-200 švýcarské firmy Proceq.

Praktická část: Zpracování plánu experimentu – ověření možností, které umožňuje moderní ultrazvukový přístroj Pundit PL-200, zejména vzhledem k liniovým a především plošným skenům. Provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové metody nejdříve v laboratoři, poté provedení měření na vybrané konstrukci. Vyhodnocení výsledků měření, tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek a sepsání vyplývajících závěrů.

Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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



Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje základům diagnostiky stavebních konstrukcí a uvádí její nejčastěji užívané metody. V kontextu nedestruktivní diagnostiky dále rozebírá ultrazvukovou impulsovou metodu, její princip a možnosti jejího využití.

Hlavní náplní práce je pak popis a aplikace různých postupů, jaké při měření nabízí ultrazvukový přístroj Pundit PL-200 firmy Proceq. Jsou zde zpracovány výsledky měření v laboratoři i na konstrukci, se zaměřením především na posouzení srovnatelnosti výsledků naměřených na stejném prvku při různém nastavení přístroje. Dalším výstupem je vyhodnocení rovnoměrnosti betonu podle normy ČSN 73 2011.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stavební diagnostika, nedestruktivní zkoušení, ultrazvuková impulsová metoda, rovnoměrnost betonu, Pundit PL-200

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the basics of diagnostics of structures and states the most frequently used methods. In the context of non-destructive diagnostics, there is described the ultrasonic pulse velocity test in detail, along with its principle and possible ways of application.

The main content of the thesis is description and application of several approaches that are offered by the ultrasonic pulse testing instrument Pundit PL-200 by Proceq SA. The results of several measurements, performed both in laboratory and in situ, are processed here, focusing mainly on the assessment of the comparability of values acquired with different measuring settings on the same element. Another conclusion is the determination of concrete homogeneity in the structures according to the standard ČSN 73 2011.

KEYWORDS

Diagnostics of structures, non-destructive testing, ultrasonic pulse velocity test, concrete homogeneity, Pundit PL-200

JINDROVÁ, Barbora. *Využití ultrazvukové metody pro stanovení rovnoměrnosti betonu v konstrukci*. Brno, 2018, 87 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce: Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Využití ultrazvukové metody pro stanovení rovnoměrnosti betonu v konstrukci“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za poskytnutí potřebných materiálů, pomoc při měření a především za konzultace a podnětné připomínky v průběhu zpracování práce.

Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Petru Misákovi, Ph.D. za cenné rady ohledně statistického vyhodnocení výsledků a za pomoc při zpracování laboratorního měření zkušební desky.

Brno

.....

podpis autorky

Obsah

Úvod	11
1 Teoretická část	13
1.1 Diagnostika stavebních konstrukcí	13
1.2 Problematika železobetonových konstrukcí	13
1.3 Diagnostické metody	14
1.3.1 Nedestruktivní metody	15
1.3.2 Destruktivní metody	16
1.4 Ultrazvuková metoda	16
1.4.1 Obecná charakteristika	16
1.4.2 Podstata měření	17
1.4.3 Výhody a nevýhody, využití ve stavebnictví	19
1.4.4 UZ impulsová metoda v platných normách	20
1.4.5 Materiálové charakteristiky betonu ve vztahu k rychlosti šíření UZ impulzů	21
1.4.6 „Kalibrační vztahy“	25
2 Experimentální část	26
2.1 Laboratorní měření	28
2.1.1 Zkušební betonová deska	28
2.1.2 Jádrový vývrt odebraný z betonového bloku	42
2.2 Aplikace na vybraných konstrukcích	45
2.2.1 Betonový blok v areálu Fakulty stavební	45
2.2.2 Sloupy parkovací budovy Žižkova	57
3 Závěr	65
Literatura	66
Seznam symbolů, veličin a zkratk	68
Seznam příloh	70
A Zkušební betonová deska	71
B Betonový blok a jádrový vývrt	77
C Sloupy parkovací budovy Žižkova	86

Seznam obrázků

1.1	Způsoby prozvučení konstrukce při průchodovém měření	18
1.2	Ukázka znázornění rovnoměrnosti betonu prvku pomocí izovel	22
1.3	Určení posunu základní křivky pro UZ impulsovou metodu	24
2.1	Shrnutí rozdílů mezi přístroji Pundit PL-200 a PL-200PE	26
2.2	Ukázka grafického výstupu liniového skenu	27
2.3	B-sken – schéma	27
2.4	B-sken – ukázka grafického výstupu	28
2.5	Zkušební betonová deska	29
2.6	Izovely plošných skenů 54 kHz na desce	30
2.7	Krabicový graf plošných skenů – 54 kHz	31
2.8	Krabicový graf plošných skenů – tři různé frekvence	32
2.9	Izovely podle jednotlivých dob průchodu 54 kHz na desce	33
2.10	Krabicový graf jednotlivých měření t_0 – 54 kHz	34
2.11	Krabicový graf výsledků plošných skenů a jednotlivých měření t_0 – 54 kHz	34
2.12	Rovnoměrnost betonu na základě UZ metody – ČSN 73 2011	35
2.13	Tabulka výsledků plošných skenů betonové desky	36
2.14	Variační součinitele s obyčejnou směrodatnou odchylkou	36
2.15	Tabulka výsledků jednotlivých měření t_0 na betonové desce	38
2.16	Izovely plošných skenů provedených na desce odrazovou sondou	39
2.17	Porovnání izovel získaných průchodovou a odrazovou metodou	40
2.18	Pundit PL-200PE s odrazovou sondou	41
2.19	Otvory na spodní straně desky	41
2.20	Jádrový vývrt rozdělený na jednotlivé vzorky	42
2.21	Tabulky výsledků vzorků z jádrového vývrtu	44
2.22	Půdorys betonového bloku	45
2.23	Blok A – základní rastr	46
2.24	Tabulka výsledků základního plošného skenu bloku A	47
2.25	Porovnání izovel na bloku A	48
2.26	Blok A – podrobné rastry	50
2.27	Ukázky izovel podrobných plošných skenů na bloku A	51
2.28	Otvory po jádrových vývrtech na bloku A	52
2.29	Izovely podrobných měření na bloku A v kontextu základního rastru	52
2.30	Blok B	53
2.31	Ukázka izovel bloku B	54
2.32	Tabulka výsledků plošných skenů bloku B a C	55
2.33	Blok C	56

2.34	Ukázka izovel bloku C	57
2.35	Schematický půdorys parkovací budovy Žižkova	57
2.36	Sloup I	58
2.37	Ukázka izovel sloupu I	59
2.38	Tabulka výsledků plošných skenů sloupů I a II	60
2.39	Sloup II	61
2.40	Ukázka izovel základního měření sloupu II	62
2.41	Izovely podrobného měření sloupu II	63
2.42	Izovely podrobného měření sloupu II v kontextu základního rastru	63
2.43	Průběhy snímaného vlnění v bodech II-9 a VIII-8	64
2.44	Průběh měření na sloupu II	64
A.1	Izovely plošných skenů 82 kHz na desce	71
A.2	Izovely plošných skenů 150 kHz na desce	72
A.3	Krabicový graf plošných skenů – 82 kHz	73
A.4	Krabicový graf plošných skenů – 150 kHz	73
A.5	Histogramy plošných skenů	74
A.6	Izovely podle jednotlivých dob průchodu 150 kHz na desce	75
A.7	Krabicový graf jednotlivých měření t_0 – 150 kHz	76
A.8	Krabicový graf výsledků plošných skenů a jednotlivých měření t_0 – 150 kHz	76
B.1	Betonový blok a ověření jeho rozměrů	77
B.2	Odběr jádrového vývrtu	78
B.3	Zkušební vzorky z jádrového vývrtu	78
B.4	Měření vzorku V1 UZ impulsovou metodou	79
B.5	Vzorek V1 před a po zkoušení ve zkušebním lisu	79
B.6	Izovely plošných skenů 54 kHz na bloku A	80
B.7	Izovely plošných skenů 150 kHz na bloku A	81
B.8	Izovely podrobných plošných skenů na bloku A – střed	82
B.9	Izovely podrobných plošných skenů na bloku A – dole	83
B.10	Izovely plošných skenů 54 kHz na bloku B	84
B.11	Izovely plošných skenů 54 kHz na bloku C	85
C.1	Izovely plošných skenů 150 kHz na sloupu I	86
C.2	Izovely plošných skenů 150 kHz na sloupu II	87

Úvod

Úvod

Neustálý technologický vývoj ve všech směrech lidské činnosti vedl nejen ve stavebnictví k efektivnějším postupům a rozvoji moderních materiálů. Nedílnou součástí jejich využití je větší důraz kladený na přesnost návrhu a provedení, stejně jako důkladnější kontrola vlastností.

Diagnostika stavebních konstrukcí se zabývá zjišťováním reálného stavu a charakteristik stavebních objektů, nejčastěji za účelem ověření vlastností určených projektem u novostaveb nebo zjištění stavu staršího objektu při vzniku poruch, případně před jeho plánovanou přestavbou. Využívá při tom metod přímých – na vzorku odebraném z konstrukce je změřena přímo požadovaná vlastnost; nepřímých – je měřena jiná charakteristika, která je s požadovanou vlastností v určitém matematickém vztahu (obvykle bez poškození konstrukce); nebo jejich kombinace.

Jedním z nejpoužívanějších, a tedy nejčastěji zkoušených stavebních materiálů, je železobeton. Jeho nejdůležitějšími vlastnostmi jsou mimo jiné pevnost v tlaku, modul pružnosti, rovnoměrnost a objemová hmotnost. U výztuže se pak sleduje její množství, průměr a krytí.

Na železobetonové konstrukce lze aplikovat celou řadu diagnostických postupů, ze kterých jsou nejčastější tvrdoměry, elektrodynamické metody (ultrazvuková impulsová, rezonanční), radiografická či radiometrická metoda. Tyto nedestruktivní zkoušky bývají často prováděny v kombinaci s odběrem a zkoušením jádrových vývrtů a následným porovnáním výsledků.

Ultrazvuková impulsová metoda nabízí čistě nedestruktivní cestu, jak prostřednictvím průchodu ultrazvukového vlnění materiálem určit jeho rovnoměrnost, hutnost, modul pružnosti, poruchy vnitřní struktury nebo i pevnost v tlaku. Moderní přístroje jako Pundit PL-200 navíc usnadňují aplikaci této metody v laboratoři i v terénu a rozšiřují možnosti jejího využití.

Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je zasazení ultrazvukové impulsové metody do kontextu stavební diagnostiky a rozebrání možností jejího využití s použitím přístroje Pundit PL-200 od firmy Proceq.

V teoretické části práce je nastíněna problematika železobetonových konstrukcí a stavební diagnostiky. Jsou zde uvedeny různé druhy diagnostických postupů s důrazem na zkoušení nedestruktivní. Více dopodrobna rozvedená je zde ultrazvuková impulsová metoda, její princip, výhody a nevýhody a také vlastnosti betonu, které lze s její pomocí zjišťovat.

Praktická část se věnuje nejdříve laboratornímu měření na zkušební betonové desce, na které bylo vyzkoušeno několik různých postupů. Naměřené hodnoty byly zpracovány statistickou analýzou, jejímž cílem bylo především zjistit, jak se liší výsledky naměřené na stejném prvku různými způsoby.

Dále byla metoda aplikována na modelovou konstrukci (betonový blok v areálu Fakulty stavební) a jádrový vývrt z ní odebraný. Kromě porovnání výsledků získaných na bloku a na vývrtu proběhlo měření na různých délkách měřicí základny a vyhodnocení rovnoměrnosti jednotlivých částí bloku. Na vývrtu byla rovněž ve zkušebním lisu zjištěna pevnost v tlaku, která byla zasazena do vztahu s odhadem pevnosti získaným na základě nepřímého měření.

Nakonec byla zkoušena reálná konstrukce – dva sloupy v parkovací budově Žižkova. Na obou sloupech byla zjišťována rovnoměrnost betonu a na jednom z nich byl proveden i podrobný plošný sken pro přesnější zjištění nerovnoměrností v betonu.

Cílem bakalářské práce bylo především ověření možností přístroje Pundit PL-200, aplikace různých postupů měření s tímto moderním přístrojem a zhodnocení jejich vhodnosti k daným účelům.

1 Teoretická část

1.1 Diagnostika stavebních konstrukcí

Všeobecný technologický vývoj vedl v minulosti v oblasti stavebnictví k zásadním změnám ve zpracování a využití materiálu. Tisíce let používaný kámen a cihlu upozadily sofistikovanější materiály – beton, ocel, později třeba i sklo nebo polymery. Nové materiály s sebou přinesly možnost efektivnějšího pojetí stavby, odlehčení (zeštíhlení) konstrukčních prvků, zvýšení budov a překlenutí větších rozpětí, zároveň však i nutnost přesného provedení a důkladné kontroly vlastností.

Kromě laboratorního zkoušení vzorků a stavebních dílců má zásadní význam také diagnostika stavebních konstrukcí, jejímž úkolem je zjišťovat reálný stav a vlastnosti stavebního objektu, případně jeho částí nebo použitých materiálů. Hlavními důvody k provedení diagnostiky jsou:

- ověření dodržení vlastností uvedených v projektu u nových staveb – kvalita materiálu, krytí výztuže apod.,
- vznik závažných poruch na starší konstrukci a obavy o její bezpečnost,
- zjištění stavu staršího objektu před plánovanou rekonstrukcí, nástavbou, přístavbou nebo změnou užívání,
- pokyny v projektové dokumentaci nařizující diagnostiku po uplynutí určité doby od výstavby [1].

1.2 Problematika železobetonových konstrukcí

Počátky železobetonu (dále jen ŽB) ve stavebnictví sahají více než sto let do minulosti a za poslední desítky let se stal velmi rozšířeným a často používaným materiálem. Během této doby prošel určitým vývojem a docházelo k četným změnám v přístupu k němu. Proto je na místě očekávat při průzkumu objektů nejen různý stupeň degradace, ale i různé vlastnosti a nedostatky v závislosti na době výstavby, jako například:

- nekonzistentní a nízká kvalita kameniva a cementu u staveb z konce 19. století,
- výskyt kaveren v konstrukci způsobený prokládáním betonu kameny,
- málo zhutněný až mezerovitý beton v mostních opěrách a jiných masivních konstrukcích (období po první světové válce),
- pozůstatek betonu s hlinitanovým cementem z doby 30.–50. let minulého století,
- pozůstatky konstrukcí poničených požárem nebo výbuchem v obnovených objektech po druhé světové válce,

- nedostatečná kvalita provedení, nahrazení stavební oceli jiným druhem, případně koroze výztuže způsobená nedostatečným krytím (období 1948–1989)[1].

Norma ČSN 73 2011 [2] uvádí vlastnosti, které se obecně při průzkumu ŽB konstrukcí zjišťují.

Vlastnosti betonu:

- Rovnoměrnost
- Pevnost v tlaku
- Modul pružnosti
- Hutnost
- Objemová hmotnost
- Vlhkost
- Chemické vlastnosti
- Vlastnosti povrchových vrstev

Vlastnosti výztuže:

- Množství a průměr
- Uložení
- Krytí
- Koroze

Vlastnosti konstrukce:

- Únosnost a ohybová tuhost při statickém zatížení
- Provozně funkční vlastnosti, např. mrazuvzdornost a vodotěsnost

Vady a poruchy – jejich výskyt a rozsah [1, 2].

1.3 Diagnostické metody

Při průzkumu stavebních objektů lze aplikovat různé postupy, které se v základu liší především mírou zásahu do konstrukce. Dříve se dělily na nedestruktivní (dále NDT), semidestruktivní a destruktivní [1], současné normy však používají pouze dělení na metody destruktivní a nedestruktivní (např. ČSN 73 2011 [2]), případně hovoří o metodách přímých a nepřímých (ČSN EN 13791 [3]).

Při dělení na přímé a nepřímé metody pak rozhoduje, zda měříme přímo zjišťovanou veličinu, nebo je nutné ji následně dopočítat z naměřených hodnot veličiny pomocné. Z tohoto důvodu si kategorie zcela neodpovídají – například tvrdoměrné vnikací zkoušky jsou považovány za destruktivní, ale zároveň jsou nepřímé, jelikož neměří pevnost betonu přímo. Obecně však lze považovat NDT zkoušky za nepřímé.

Při výběru vhodných metod pro konkrétní konstrukci hraje roli především její typ, stáří a předpokládaný stav, stejně jako vlastnosti, které má průzkum za cíl

zjistit. Hlavními kritérii jsou pak přesnost výsledků, rychlost a cena měření a vyhodnocení, a v neposlední řadě co nejmenší poškození konstrukce nebo jejích částí [1, 4].

1.3.1 Nedestruktivní metody

Za nedestruktivní se označují takové diagnostické postupy, které konstrukci nepoškozují, maximálně zahrnují drobné úpravy povrchu, jako je zbroušení, vryp nebo vtisk.

Jejich hlavní výhodou je možnost opakovaného měření ve stejném místě, potažmo sledování změn v čase a statistické analýzy.

Nevýhodou naopak je, že se jedná o nepřímé měření – požadovanou charakteristiku obvykle nelze přímo změřit bez poškození konstrukce, proto měříme tzv. pomocnou charakteristiku, která je s požadovanou vlastností v určitém vztahu [1].

Nedestruktivní zkoušky lze následovně kategorizovat podle fyzikálních principů, na nichž jsou jednotlivé metody založeny:

a) Tvrdoměrné metody

- měření tvrdosti povrchu a zjištění pevnosti materiálu na základě korelačních vztahů,
- mohou být vrypové, vtiskové, odrazové,
- popsány v normách ČSN 73 1373 [5] a ČSN EN 12504-2 [6].

b) Elektrodynamické metody

- cílené vyvolání mechanického vlnění v konstrukci a jeho následné vyhodnocení,
- ultrazvuková impulzová metoda je popsána v normách ČSN 73 1371 [7] a ČSN EN 12504-4 [8]
- rezonanční metodu uvádí norma ČSN 73 1372 [9],
- také sem řadíme metody fázových rychlostí, tlumeného rázu, mechanické impedance, akustické emise a impact-echo.

c) Elektromagnetické metody

- využívají elektromagnetických vlastností zkoušeného materiálu,
- spadají sem elektromagnetické sondy, mikrovlnné metody a indukčnostní metody.

d) Elektrické metody

- měření s využitím elektrických vlastností materiálu,
- používají se metody odporové, kapacitní a polovodičové.

e) Radiační metody

- detekce zeslabení ionizujícího záření při průchodu materiálem nebo moderace rychlých neutronů na jádrech vodíku,
- radiografická metoda je uvedena v normě ČSN 73 1376 [10],
- radiometrickou metodu popisuje norma ČSN 73 1375 [11],
- řadí se sem i měření koncentrace radonu v půdě a obytných domech [1].

1.3.2 Destruktivní metody

Výsledky nedestruktivního zkoušení nejsou vždy zcela objektivní nebo dostačující, a proto se provádějí i destruktivní zkoušky na odebraných vzorcích, případně přímo na povrchu konstrukce. Umístění a rozsah zkoušení jsou pečlivě voleny tak, aby nedošlo k narušení stability nebo funkčnosti konstrukce a aby se dalo poškození snadno opravit.

Najčastější podobou destruktivního zkoušení jsou jádrové vývrty umožňující vizuální zhodnocení struktury použitého materiálu, stanovení postupu karbonatace, provedení laboratorních zkoušek pevnosti a dalších vlastností. Při těchto zkouškách je možné změřit požadovanou charakteristiku přímo, ale je nutné jejich použití důkladně zvážit, vzhledem k omezené možnosti získání vzorků.

Jako další příklady lze uvést:

- odtrhové zkoušky povrchových vrstev,
- naříznutí zděné stěny pro vložení plochých lisů,
- brusné a vrtné zkoušky pro stanovení pevnosti betonu nebo malty ve zdivu,
- vstřelovací metody pro určení pevnosti betonu,
- tvrdoměrné metody vnikací (špičákové).

Použití kombinace destruktivních a nedestruktivních zkoušek umožňuje přesnější stanovení vztahů mezi jejich výsledky a tedy vede i k přesnější aplikaci nedestruktivních metod v budoucnu [1].

1.4 Ultrazvuková metoda

1.4.1 Obecná charakteristika

Jednou ze základních nedestruktivních metod využívaných při diagnostice stavebních objektů je ultrazvuková (dále UZ) impulsová metoda. Jedná se o metodu čistě nedestruktivní, která nachází využití jak při měření v laboratoři (obvykle na vzorcích odebraných z konstrukce), tak in situ.

Zvuk definujeme jako mechanické vlnění v látkovém prostředí o určité frekvenci. Pro lidské ucho je slyšitelný zvuk s frekvencí v rozmezí přibližně 16 Hz–16 kHz,

vlnění s frekvencí nad 20 kHz pak nazýváme ultrazvukem. Ve stavebnictví jsou nejběžněji využívány frekvence v rozmezí 20–150 kHz, méně často až do 500 kHz. S vyšší frekvencí roste i rozlišovací schopnost ultrazvukového přístroje, což vede k přesnějšímu měření, ale zároveň dochází k výraznějšímu zeslabování při průchodu konstrukcí, a proto je potřeba volit kompromis s ohledem na tloušťku měřeného prvku a další parametry.

Rychlost šíření vlnění materiálem se odvíjí od fyzikálně mechanických vlastností tohoto materiálu a od přítomnosti nepravidelností a defektů. To umožňuje při použití UZ v diagnostice sledovat nejčastěji:

- materiálové charakteristiky betonu (dynamický modul pružnosti s možností přepočtu na statický, objemovou hmotnost, pevnost v tlaku),
- rovnoměrnost betonu v prvku,
- porušení vnitřní struktury (trhliny, větší dutiny),
- změny vlastností betonu v čase (zrání, degradace) [1, 7, 12].

1.4.2 Podstata měření

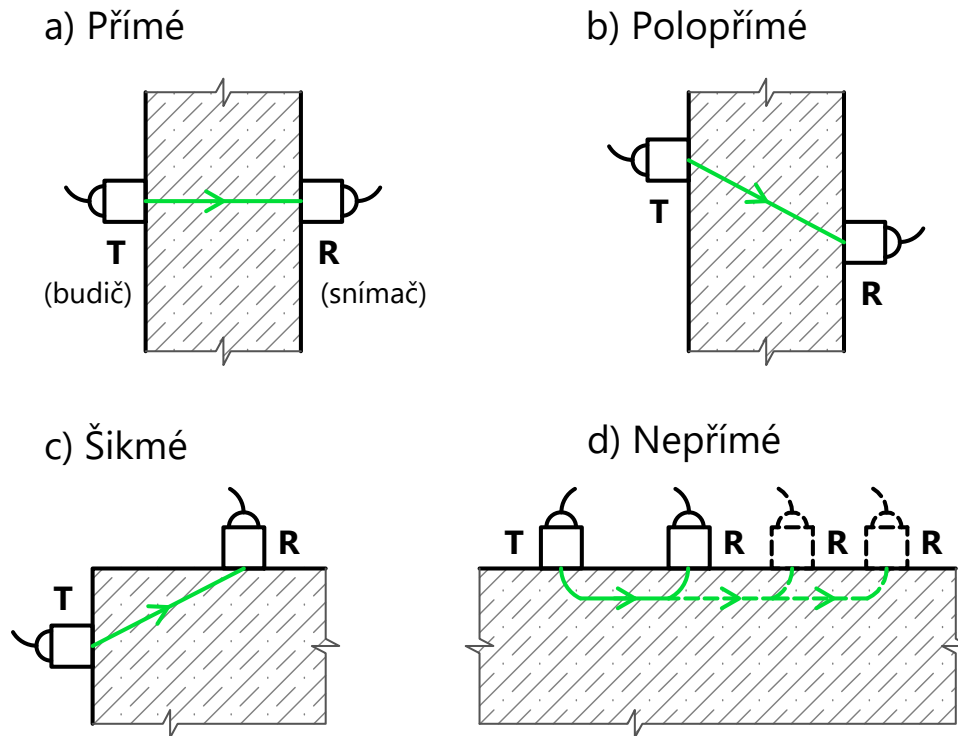
Základním principem této metody je vysílání opakovaných ultrazvukových impulsů budičem osazeným na konstrukci a jejich následné snímání po průchodu materiálem.

Častější podobou použití UZ je metoda **průchodová**, která využívá dvou sond – budiče a snímače – umístěných nejlépe na protilehlých stranách konstrukce. Sleduje čas, za jaký dorazí vlnění od jedné sondy ke druhé.

UZ vlnění má nejvyšší energii ve směru kolmém na plochu budiče, ale v případě špatného či nemožného přístupu k oběma stranám konstrukce lze měřit impulsy i v jiných směrech. Podle umístění sond se používají následující způsoby prozvučení:

- přímé prozvučení – sondy jsou kolmo proti sobě na protilehlých stranách prvku, jde o nejvýhodnější variantu,
- polopřímé prozvučení – používá se v případě, kdy je konstrukce přístupná z obou stran, ale sondy nelze umístit přesně naproti sobě,
- šikmé prozvučení – sondy vůči sobě nejsou orientované přímo, ale kolmo,
- nepřímé prozvučení – rovněž nazývané povrchovým. Snímač je umístován rovnoběžně s budičem na stejné straně konstrukce. Měření se několikrát opakuje s posouváním snímače po pravidelných intervalech a je sledován rozdíl naměřených hodnot mezi jednotlivými vzdálenostmi sond. Při tomto způsobu je měření značně citlivé na vnější vlivy, proto se používá, jen pokud je přístupná pouze jedna strana konstrukce nebo při důkladné kontrole povrchu [1, 7, 8, 13, 14].

Norma ČSN 73 1371 [7] nerozlišuje mezi polopřímým a šikmým prozvučením a uvádí obojí v jedné kategorii. ČSN EN 12504-4 [8] zmiňuje rozdíl mezi těmito způsoby prozvučení, ale rovněž je sdružuje do jedné položky.



Obr. 1.1: Způsoby prozvučení konstrukce při průchodovém měření [1, 8].

Na základě změřené doby průchodu vlnění na známé vzdálenosti mezi sondami lze snadno dopočítat rychlost, a to následujícím vzorcem pro přímé a polopřímé prozvučení podle normy ČSN 73 1371 [7]:

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

kde značí:

- v_L rychlost impulsu [$\frac{km}{s}$]
- L délku měřící základny [mm]
- T čas, za který impuls projde měřící základnou [μs], přičemž $T = T_L \pm t_{kor}$,
- t_{kor} je korekce složená z tzv. mrtvého času přístroje a případného rozdílu času šíření impulsů zjištěného při kalibraci přístroje, tedy $t_{kor} = t_e - E$
- t_e je doba průchodu ultrazvuku etalonem [μs]
- E je časová charakteristika etalonu [μs]

Podle zjištěné rychlosti průchodu vlnění lze následně s pomocí příslušných převodních vztahů vyhodnotit vlastnosti daného materiálu. Na základě rychlosti je také možno posoudit přítomnost a rozsah nehomogenit a defektů ve stavivu. Vlnění je při průchodu prvkem „obchází“, a tím dochází k prodloužení doby od vyslání signálu z budiče do jeho detekce snímačem.

Dalším způsobem UZ měření je **odrazová** metoda. Sdružená sonda zahrnuje budič i snímač (nebo v případě odrazové sondy přístroje PUNDIT PL-200PE devět budičů a devět snímačů) a zkoumá odraz vlnění od zadní stěny prvku a od dutin a nehomogenit. Umožňuje tak určení tloušťky konstrukce až do 1000 mm a ohledání defektů v materiálu.

Při použití ultrazvukové metody je třeba brát ohled i na další faktory, které mohou ovlivnit přesnost měření. Jedná se především o použitou frekvenci sond, akustickou vazbu mezi sondami a materiálem, rozměry vzorku, případné vady v jeho struktuře a vlhkost zkoušeného materiálu [1, 13].

1.4.3 Výhody a nevýhody, využití ve stavebnictví

Hlavní výhodou ultrazvukové metody je, že při jejím použití nedochází k žádnému zásahu do konstrukce. Jedná se tedy o metodu čistě nedestruktivní a měření lze neomezeně opakovat na více místech konstrukce nebo na stejném místě v průběhu času. Z opakovaného měření a tím pádem většího množství získaných hodnot vyplývá další výhoda, a tou je možnost statistické analýzy výsledků, která vede k vývoji a zpřesňování korelačních vztahů mezi hodnotami naměřenými ultrazvukem a materiálovými charakteristikami betonu.

Za nepříznivou vlastnost lze označit nákladnost zkušebního zařízení, která je v porovnání s tvrdoměry značná, ale oproti destruktivním zkouškám je použití UZ stále výrazně úspornější. Mohou se však objevit rozdíly v kvalitě měření a ve výsledcích v závislosti na druhu a ceně přístroje. Nezanedbatelnou nevýhodou je také nepřímá povaha měření, kdy data získaná přístrojem sama o sobě nenesou jednoznačnou informaci a je nutné je co nejpřesněji interpretovat – což nikdy nelze provést zcela objektivně. Další komplikací v tomto směru je i citlivost UZ na řadu vnějších vlivů.

Celkově jde však o metodu stále rozšířenější, jednoduchou a rychlou při použití v laboratoři i in situ. Ve stavební diagnostice nachází využití ať už samostatně, nebo jako doplňková metoda k ostatním zkouškám, přičemž nezůstává jen u betonu. Jedná se o metodu vhodnou například i pro kámen, keramiku a dřevěné prvky [1, 12, 14].

1.4.4 UZ impulsová metoda v platných normách

Popis užití UZ najdeme v celé řadě technických norem pro zkoušení stavebních materiálů, dílců, nebo celých konstrukcí. Hlavní význam pro UZ impulsovou metodu ve stavební diagnostice z nich mají dvě – ČSN 73 1371 [7] a ČSN EN 12504-4 [8].

ČSN 73 1371:2011 Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu [7] je novější verzí téže normy z roku 1982, ČSN 73 1371 Ultrazvuková impulsová metoda skúšania betónu [15], kterou nahradila 1. října 2011. Hlavním cílem nové verze byla tzv. harmonizace (přepracování, aby nebyla v rozporu) s evropskou normou ČSN EN 12504-4 [8]. Norma [7] tedy obsahuje postupy a přístup k měření a hodnocení vycházející z 80. let minulého století a díky tomu je považována za normu původní, přestože podle data vydání je novější než evropská norma [8]. Kromě požadavků na zkušební zařízení a postupů měření se věnuje především:

- stanovení rychlosti šíření impulsu s ohledem na rozměrnost prostředí (jedno rozměrné – pruty, dvojrozměrné – desky, trojrozměrné – kvádry, válce atp.),
- stanovení vlastností betonu (dynamický modul pružnosti, rovnoměrnost, pevnost betonu v tlaku a jiné pevnosti),
- zjištění narušení nebo změny struktury betonu.

Stejně jako nadřazená norma ČSN 73 2011 [2] přikládá větší význam nedestruktivnímu zkoušení betonu a zkoušky na vzorcích odebraných z konstrukce považuje za doplňkové [1, 12, 14].

ČSN EN 12504-4:2005 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [8] oproti nedestruktivním metodám přikládá větší váhu zkouškám na vzorcích. Pro NDT (tedy nepřímé) metody požaduje 90% bezpečnost „kalibračních vztahů“, což brzdí jejich častější využití a rozšíření. V porovnání s ČSN 73 1371 [7] zde také chybí postup pro výpočet dynamického modulu pružnosti.

Norma obsahuje požadavky na zkušební zařízení a postupy pro využití zjišťování rychlosti šíření UZ impulsu v betonu.

Dále v příloze A popisuje postup měření při nepřímém (povrchovém) prozvučení. V příloze B rozebírá faktory ovlivňující měření – konkrétně vlhkost a teplotu betonu, délku měřicí základny, tvar a velikost zkoušených těles, vliv výztuže v betonu, trhliny a dutiny. V příloze C je pak uveden postup pro zpracování vztahu mezi rychlostí šíření UZ impulsů a pevností betonu [1, 12, 14].

1.4.5 Materiálové charakteristiky betonu ve vztahu k rychlosti šíření UZ impulzů

Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a tahu

Ke zjištění dynamického modulu pružnosti lze využít ultrazvukovou impulsovou metodu (měření in situ nebo na vzorcích) a metodu rezonanční (měření na odebraných vzorcích). Výhodou při použití UZ metody je, že rychlost průchodu vlnění má přímou souvislost s modulem pružnosti, ten je tedy možné vypočítat dosazením do vzorce a není nutné použití „kalibračních vztahů“. Vztah mezi veličinami je podle ČSN 73 1371 [7] následující:

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

E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu [MPa]
ρ	objemová hmotnost betonu [$\frac{kg}{m^3}$]
v_L	impulsová rychlost podélného ultrazvukového vlnění [$\frac{km}{s}$]
k	součinitel rozměrnosti prostředí [–]

Součinitel k je pro jednorozměrné prostředí $k_1 = 1$, pro dvoj- a trojrozměrné prostředí lze dopočítat pomocí Poissonova koeficientu ν_{cu} pro daný materiál, a to podle následujících vzorců:

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu_{cu}^2}}$$

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

Z dynamických modulů pružnosti zjištěných na konstrukci nebo na vzorcích lze následně určit i statický modul pružnosti E_c . V ČSN 73 2011 [2] jsou uvedeny hodnoty zmenšovací součinitelů zvláště pro UZ impulsovou a zvláště pro rezonanční metodu. Tyto součinitele však nemusí vždy odpovídat realitě, jelikož jejich hodnota závisí na druhu (kvalitě) betonu. Proto je vždy lepší určit zmenšovací součinitel experimentálně [2, 7, 16].

Hutnost betonu

Další vlastností, kterou lze zjistit pouze výpočtem s dosazením rychlosti průchodu UZ vlnění, je hutnost betonu. Závisí především na měrných hmotnostech hutných složek betonu (tedy kameniva a zatvrdlého cementového tmele). Zjišťuje se z impulsové rychlosti měřené na více zkušebních místech, rozmístěných pokud možno

pravidelně po povrchu betonu. Výsledná hutnost betonu v konstrukci nebo její části se spočítá jako aritmetický průměr těchto hodnot. Vztah pro výpočet hutnosti je následující:

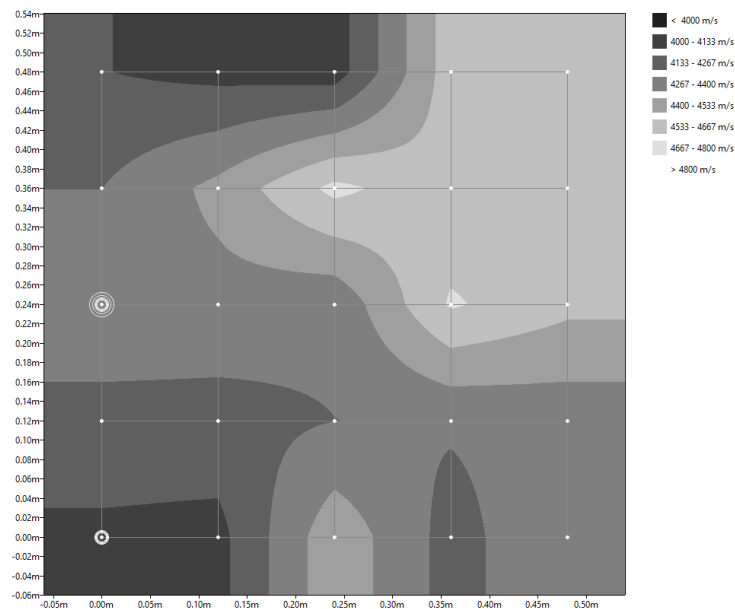
$$T_{hut} = 100 - \frac{a \cdot \rho_{hut} - v_{L3}}{b}$$

T_{hut}	poměr objemové hmotnosti k měrné hmotnosti zatvrdlého betonu [%]
a, b	součinitele pro daný beton [-]
ρ_{hut}	měrná hmotnost hutných složek betonu [$\frac{kg}{m^3}$] (dosazuje se bez rozměru)
v_{L3}	impulsová rychlost [$\frac{m}{s}$] (dosazuje se bez rozměru) [2, 16]

Rovnoměrnost betonu

Základem posouzení rovnoměrnosti betonu je naměření a následné porovnání rychlosti průchodu UZ v různých místech konstrukce.

V případě, že je konstrukce přístupná z obou stran, lze použitím přímého prozvučení stanovit průměrnou kvalitu betonu uvnitř prvku. Součástí obvyklého postupu je vyznačení měřicí sítě na obou stranách, se vzdáleností jednotlivých uzlů přibližně odpovídající délce měřicí základny (tloušťce prvku). V těchto uzlech pak probíhá měření ultrazvukem. Zjištěné rychlosti průchodu se následně zanesou do výkresu prvku a vykreslí se izovely, což jsou čáry spojující místa se stejnými hladinami rychlostí (nejčastěji se používají izovely s intervalem 100 $\frac{m}{s}$). Z takového grafického znázornění lze snadno usoudit na defekty vnitřní struktury konstrukce.



Obr. 1.2: Ukázka znázornění rovnoměrnosti betonu prvku pomocí izovel

Zároveň se rovnoměrnost betonu v prvku vyhodnocuje výpočtem s použitím statistických ukazatelů – variační součinitel naměřeného souboru a rozdíly hodnot mezi sousedními body na rastru se porovnají s limity uvedenými v tabulce 3 v ČSN 73 2011 [2] a na základě toho se zkoušený beton vyhodnotí jako rovnoměrný nebo nerovnoměrný.

Pokud není konstrukce přístupná z obou stran, využívá se kombinovaná metoda podle ČSN 73 2011 [2] složená z povrchového prozvučení ultrazvukem a použití tvrdoměru. Příhodné je měření tvrdoměrem v místech mezi uzly měřicí sítě vyznačené pro UZ [2, 16].

Porušení betonu, změny struktury, degradace

Následkem působení vnějších vlivů dochází ke strukturálním změnám na povrchu betonu, ale i uvnitř konstrukce. Nejvýrazněji působí na beton povětrnostní podmínky, jako je déšť, vítr, vlhkost, UV záření nebo mráz, dále to je agresivní vnější či vnitřní prostředí, se kterým beton přichází do styku, statické a dynamické namáhání konstrukce, teplotní extrémny a další mimořádné vlivy.

Posouzení míry a způsobu degradace betonu je možné pouze tehdy, známe-li hodnoty rychlosti šíření UZ impulsu na neporušeném betonu stejného nebo podobného prvku. Sledují se pak změny těchto hodnot nebo zjišťovaných vlastností betonu.

Povrchovou degradaci lze posoudit na základě výsledků nepřímého prozvučení. Porušená oblast se projeví výrazným zpomalením průchodu UZ a zmenšením amplitudy snímaného signálu. Při tomto měření je tedy žádoucí použití ultrazvukového měřicího přístroje s obrazovkou. Celkově je zjišťování povrchové degradace jedno-dušší než detekce poruch uvnitř prvku.

Narušení vnitřní struktury vyžaduje komplikovanější postupy měření a vyhodnocení, a je také potřeba provést zkoušky ve větším počtu směrů a míst na konstrukci. Postupuje se obdobně jako u zjišťování rovnoměrnosti betonu – provádí se plošné měření na měřicí síti nebo na křižujících se základnách. Následně se pomocí izovel vyhodnocuje stejnoměrnost betonu v konstrukci [7, 16].

Pevnost v tlaku

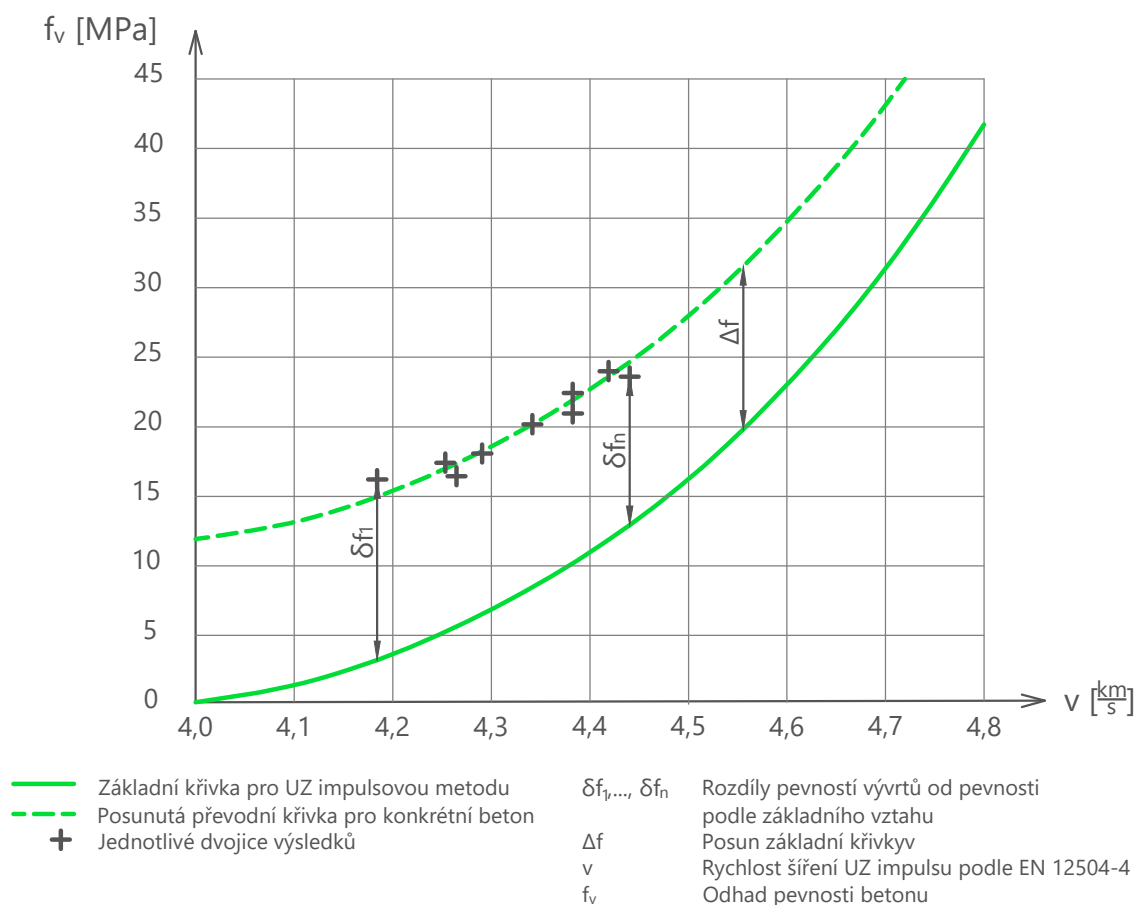
Rychlost šíření UZ impulsu v betonu nejvíce ovlivňuje druh a složení kameniva a cementové kaše. Od těchto vlastností se odvíjí modul pružnosti a hutnost, zatímco pevnost betonu v tlaku je více závislá na vodním součiniteli než na pevných složkách betonové směsi, vztahy mezi pevností betonu a rychlostí průchodu vlnění proto nejsou fyzikálně přímé.

Podle normy ČSN EN 13791 [3] lze nepřímé zkoušky použít k určení pevnosti v tlaku betonu v konstrukci buď samostatně s pomocí tzv. „kalibračních vztahů“,

v kombinaci s jinou nepřímou metodou, nebo v kombinaci s vývrty.

Při použití v kombinaci s vývrty jsou zde uvedeny dva možné postupy. První alternativou je **přímá korelace s vývrty**, ke které je potřeba nejméně 18 dvojic výsledků (naměřených nepřímou metodou na 18 místech na konstrukci a přímou metodou na jádrových vývrtech odebraných v těchto místech). Tyto dvojice jsou zaneseny do grafu, ve kterém se uvažuje výsledek NDT zkoušky jako proměnná a pevnost zjištěná na vývrtnu jako funkce této proměnné. Regresní analýzou se získá výchozí křivka vyjadřující vztah mezi těmito výsledky. Dalšími úpravami je pak stanoven vztah pro odhad pevnosti, platný pro méně než desetinu hodnoty pevnosti, což zajišťuje požadovanou bezpečnostní úroveň – tedy předpoklad, že 90 % hodnot bude vyšších než odhadnutá pevnost.

Druhou možností je použití omezeného počtu vývrtnů k **určení posunu základní křivky** a lze ji použít na betony ze stejného materiálu a zhotovené stejným výrobním postupem.



Obr. 1.3: Určení posunu základní křivky pro UZ impulsovou metodu [3]

Používá se při ní minimálně 9 dvojic výsledků, které jsou opět vyneseny do grafu, jsou pro ně určeny hodnoty $\delta f_1, \dots, \delta f_n$ vyjadřující odchylku jednotlivých bodů od základní křivky. Základní křivku pro UZ impulsovou metodu vyjadřuje rovnice $f_v = 62,5 \cdot v^2 - 497,5 \cdot v + 990$, platná pro $4 \leq v \leq 4,8$. Z jednotlivých odchylek se následně získá hodnota Δf , tedy hodnota posunu celého souboru vůči základní křivce. Podle posunuté základní křivky lze pak určit odhad pevnosti v tlaku [3, 8, 12].

1.4.6 „Kalibrační vztahy“

Kalibrace je proces stanovení vztahu mezi hodnotou indikovanou měřicím přístrojem a známou skutečnou hodnotou měřené veličiny (například na etalonu) za specifických podmínek. Zjednodušeně lze říct, že jde o určení chyby, s jakou přístroj momentálně měří.

Vztahy, o kterých v kontextu této práce hovoříme jako o „kalibračních“ vyjadřují souvislost mezi veličinou změřenou na přístroji při NDT zkoušce a jinou vlastností zkoušeného materiálu, která není na naměřené veličině nijak fyzikálně závislá. Vychází z toho, že na odpovídajícím materiálu byly někdy v minulosti naměřeny obě tyto vlastnosti a mezi jejich hodnotami byl vysledován určitý vztah matematický.

Z toho důvodu není pojem „kalibrační vztah“ odpovídající, ale některé normy (např. ČSN 73 1371 [7] nebo ČSN 73 2011 [2]) s ním v tomto významu běžně pracují.

Norma ČSN 73 1370 [17] uvádí dělení kalibračních vztahů na:

- obecné, stanovené z výsledků na minimálně 300 zkušebních vzorcích,
- směrné, stanovené minimálně ze 100 vzorků,
- určující – úzké, určené pro jednu třídu betonu na 18–24 vzorcích,
- určující – široké, platné pro více tříd betonu.

Úzké a široké určující kalibrační vztahy lze použít pro určení **upřesněné** pevnosti betonu v tlaku, stejně jako obecné a směrné vztahy s použitím upřesňujícího součinitele α (podle ČSN 73 1370 [17]).

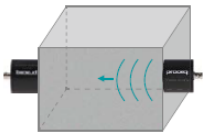
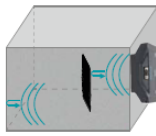
Obecné a směrné kalibrační vztahy samotné umožňují stanovit pevnost betonu s **nezaručenou přesností**. Nelze je však použít pro betony s cementem a kamenivem jiných než běžných vlastností, málo zhutněné a mezerovité betony, betony zkorodované, zhotovené s použitím proteplování atp.

2 Experimentální část

V praktické části této bakalářské práce budou odzkoušeny a rozebrány různé možnosti využití přístroje PUNDIT PL-200 při diagnostice betonových stavebních prvků.

PUNDIT PL-200 a **PUNDIT PL-200PE** jsou dvě verze nejmodernějšího ultrazvukového měřicího přístroje od Švýcarské firmy Proceq, která se od svého založení v roce 1954 zaměřuje na přenosné nástroje vysoké kvality pro nedestruktivní diagnostiku materiálů a mimo jiné má na kontě třeba i odrazové tvrdoměry Schmidt.

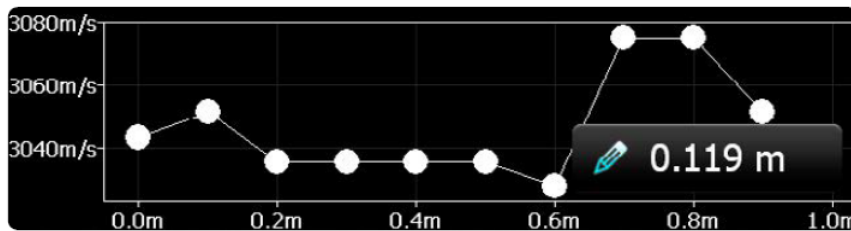
Výše zmíněné ultrazvukové přístroje jsou první svého druhu především v tom, že jsou vybaveny dotykovou jednotkou, která zaručuje velmi snadné ovládání a vysokou míru kontroly nad průběhem měření v reálném čase. Rovněž jsou svojí velikostí a přídatným popruhem uzpůsobeny k pohodlnému použití při měření v terénu. Rozdílem mezi nimi je, že Pundit PL-200 je dodáván a primárně určen k použití s průchodovými sondami, zatímco k verzi PE (= Pulse Echo) přísluší odrazová sonda. Oba přístroje však mají stejné parametry a odlišnosti jsou stírány kompatibilitou (po dokoupení odpovídající verze softwaru) se všemi průchodovými i odrazovými sondami firmy Proceq včetně těch, které uvedení na trh teprve čeká.

Pundit PL-200	Pundit PL-200PE
Through Transmission: Access from two sides	Pulse Echo: Single side access
	
Assessment of Concrete Quality	
Ultrasonic Pulse Velocity	
Uniformity	
Compressive strength and SONREB	Slab thickness from a single side
Determination of crack depth	Detection and localization of voids, pipes, cracks (parallel to surface), and honeycombing
Modulus of elasticity	
Scan Modes	
A-Scans Line Scans E-Modulus Data Logging Area Scan	A-Scans B-Scans Area Scan

Obr. 2.1: Shrnutí rozdílů mezi přístroji Pundit PL-200 a PL-200PE [18]

Při použití průchodových sond přístroj nabízí:

- liniové a plošné skeny pro zjišťování rovnoměrnosti betonu a hledání nepravidelností – obojí s možností prohlížení grafických výstupů, oprav nebo přeměňování za chodu,
- automatický přepočet naměřené doby průchodu na impulsovou rychlost, pevnost v tlaku podle zadané korelace, případně i modul pružnosti nebo objemovou hmotnost, v případě použití přídavných sond pro měření S-vln,
- zjišťování tloušťky konstrukce a hloubky trhlin,
- měření povrchové rychlosti.

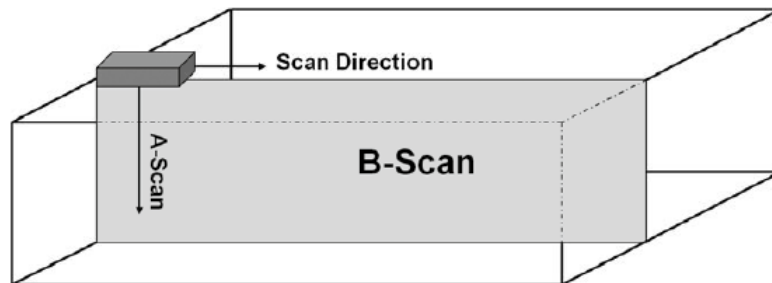


Obr. 2.2: Ukázka grafického výstupu liniového skenu [19]

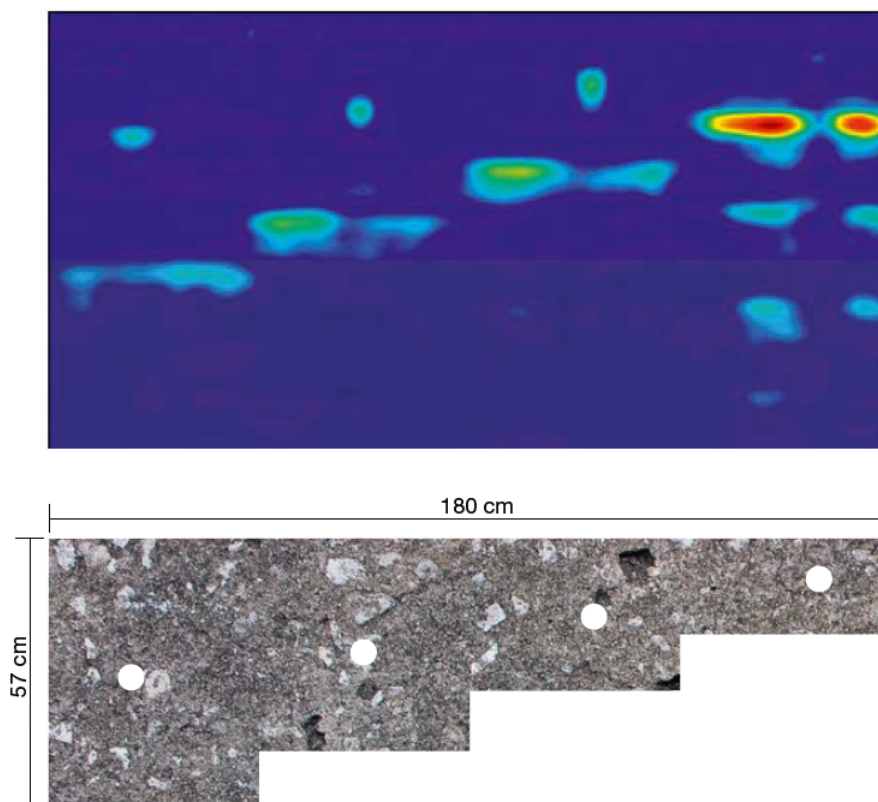
Měření po jedné straně konstrukce odrazovou sondou umožňuje:

- zjištění tloušťky desky,
- lokalizaci dutin, trhlin a jiných vad struktury materiálu,
- odhad rychlosti šíření impulsu,
- tzv. B-sken, což je hloubkové proměření a vykreslení plochy kolmé na povrch konstrukce.

Výhodou odrazové sondy je odbourání nutnosti použití přídavného média pro akustickou vazbu, a to i na hrubém povrchu [18, 19].



Obr. 2.3: Schéma měření odrazovou sondou v módu „B-sken“ [19]



Obr. 2.4: Ukázka grafického výstupu „B-skenu“ provedeného odrazovou sondou na odstupňované desce s ocelovou výztuží [18]

Výše uvedené informace o přístroji pochází z materiálů od výrobce – není tedy jisté, nakolik jsou řečené možnosti funkční v praxi a nakolik se jedná o reklamní kampaň.

Následující kapitoly se budou věnovat především průchodovým sondám o různých frekvencích a jejich porovnání, využití plošného skenu vs. měření doby průchodu vlnění v jednotlivých bodech, zjišťování přítomnosti a umístění dutin, určení rovnoměrnosti betonu a srovnání výstupů z měření průchodovými sondami a odrazovou sondou.

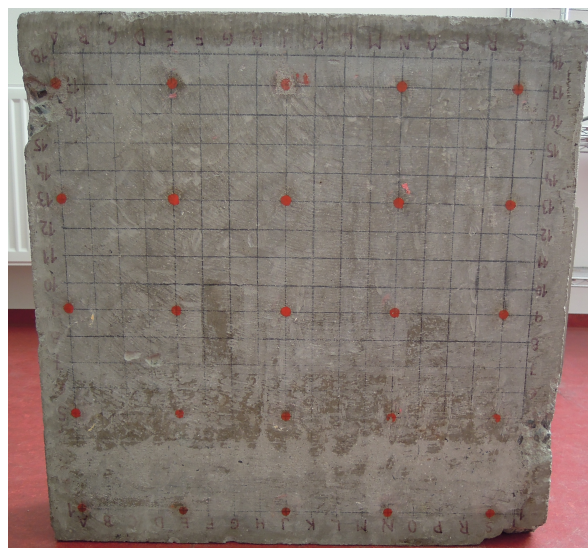
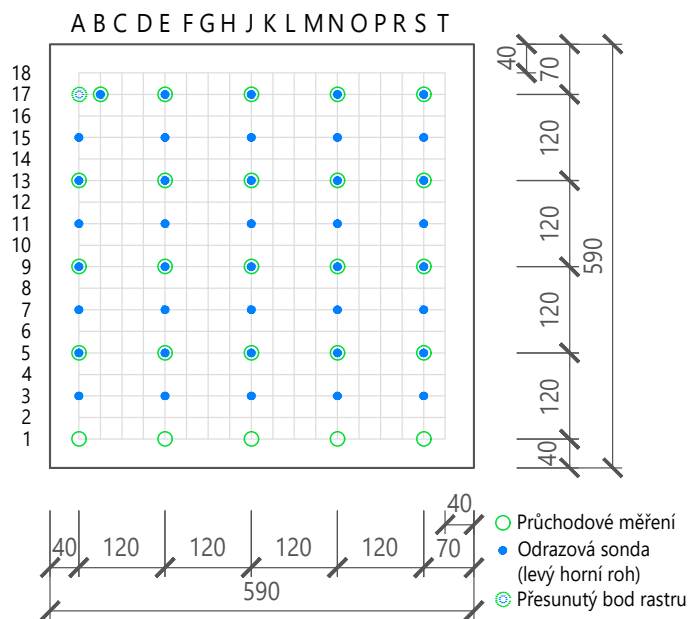
2.1 Laboratorní měření

2.1.1 Zkušební betonová deska

V první části proběhlo několik měření na zkušební betonové desce na ústavu zkušebnictví. Byly použity sondy pro průchodovou UZ metodu o frekvencích 54 kHz, 82 kHz a 150 kHz, kterými byly provedeny plošné skeny. Sondami o frekvenci 54 kHz

a 150 kHz byly také naměřeny doby průchodu UZ vlnění deskou jednotlivě, ve stejných bodech a stejném pořadí jako při plošném skenu. Nakonec byl pro srovnání proveden plošný sken odrazovou sondou.

Zkušební deska má rozměry 590 x 590 x 110 mm, je na ní vyznačený podrobný rastr s kolmou vzdáleností jednotlivých bodů 30 mm, a také hrubší síť 25 bodů vzdálených od sebe po 120 mm. Na této síti měření probíhalo, s výjimkou bodu A17, který byl z důvodu odštípnutého povrchu na rohu desky přesunut na bod B17. Tato změna mohla způsobit drobnou nepřesnost při zpracování dat, ale vzhledem k celkově horšímu stavu betonu v těchto místech ji lze zanedbat.

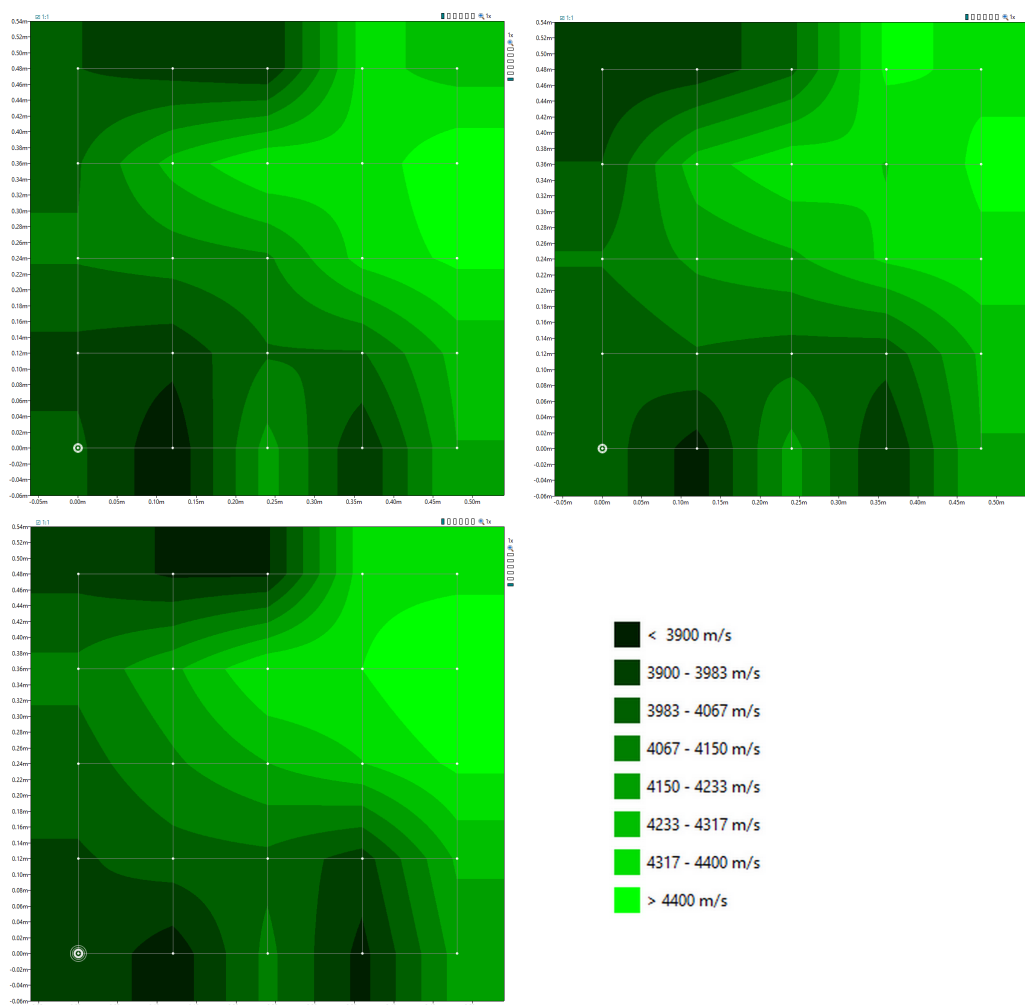


Obr. 2.5: Zkušební betonová deska

Pro zjednodušení následujícího textu budu nadále slovní spojení „sonda o frekvenci x kHz“ zkracovat na „x kHz“. Měření 150 kHz tedy znamená, že bylo provedeno měření se sondami o frekvenci 150 kHz.

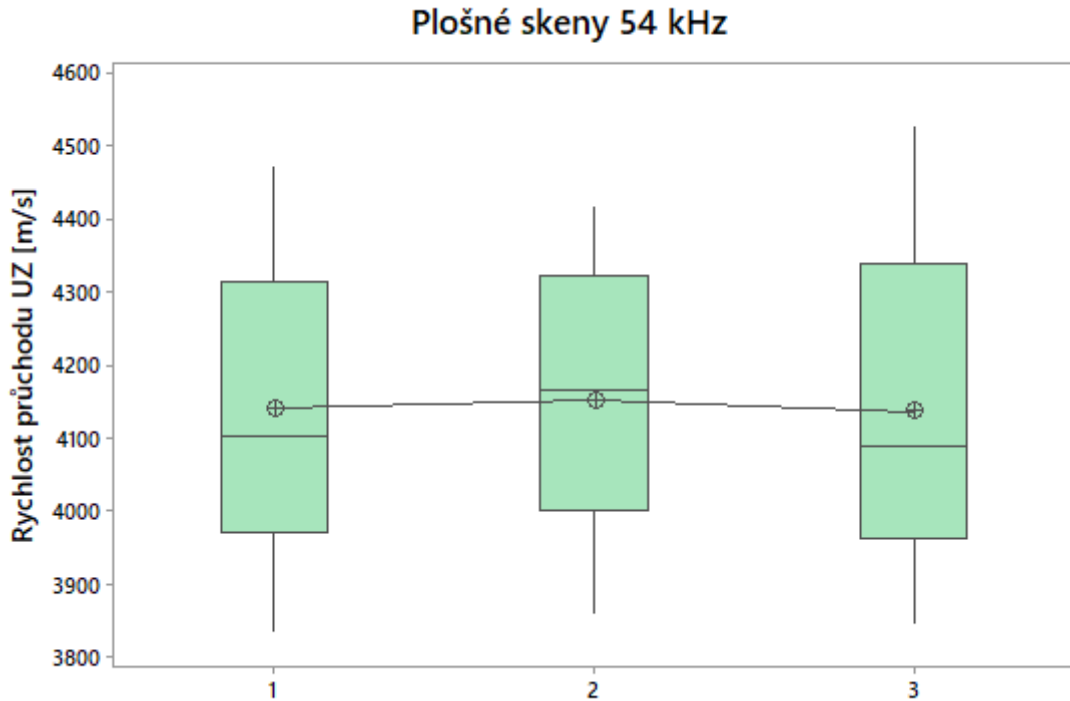
Plošné skeny

Jako první byly provedeny plošné skeny sondami o třech různých frekvencích, s každou frekvencí třikrát. Výstupem byly rychlosti průchodu UZ impulsu v každém bodě rastru, které byly přístrojem automaticky vypočítány z doby průchodu na základě známé velikosti měřicí základny (v tomto případě 110 mm) – tyto rychlosti byly používány v dalších výpočtech při zpracování výsledků. Součástí bylo i grafické znázornění rovnoměrnosti prvku pomocí izovel, které bylo generováno již v průběhu měření. Jako příklad zde uvádím grafy vztahující se k frekvenci 54 kHz, ostatní jsou k nahlédnutí v přílohách práce.



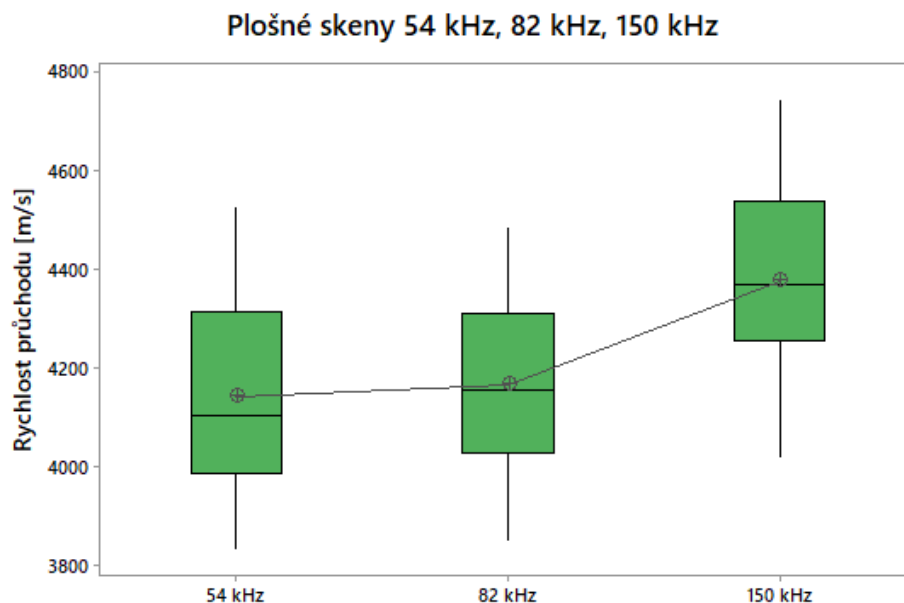
Obr. 2.6: Izovely plošných skenů provedených sondami 54 kHz na zkušební desce

Při vyhodnocení byla nejdříve zjišťována podobnost výsledků trojího měření s použitím stejné frekvence. Pomocí analýzy rozptylu na hladině významnosti 0,05 bylo ověřeno, že tři soubory o 25 hodnotách se statisticky významně neliší, a tedy je lze sloučit do jednoho souboru čítajícího 75 hodnot (toto platí pro každou ze tří frekvencí).



Obr. 2.7: Krabicový graf tří plošných skenů sondami o frekvenci 54 kHz

Následně byly tyto sdružené soubory výsledků tří různých frekvencí porovnány mezi sebou a analýza rozptylu zamítla rovnost středních hodnot na hladině významnosti 0,05. Vyplynulo tedy, že různými frekvencemi byly naměřeny různé rychlosti průchodu vlnění. Z krabicového grafu je patrné, že konkrétně při použití 150 kHz byly naměřeny obecně vyšší hodnoty než se druhými dvěma frekvencemi. Byl tedy aplikován dvouvýběrový t-test s jednostrannou hypotézou na jednotlivé dvojice frekvencí. U dvojic 150 kHz/82 kHz a 150 kHz/54 kHz dvouvýběrový t-test potvrdil, že se soubory hodnot statisticky významně liší, zatímco u dvojice 54 kHz/82 kHz jsou srovnatelné.



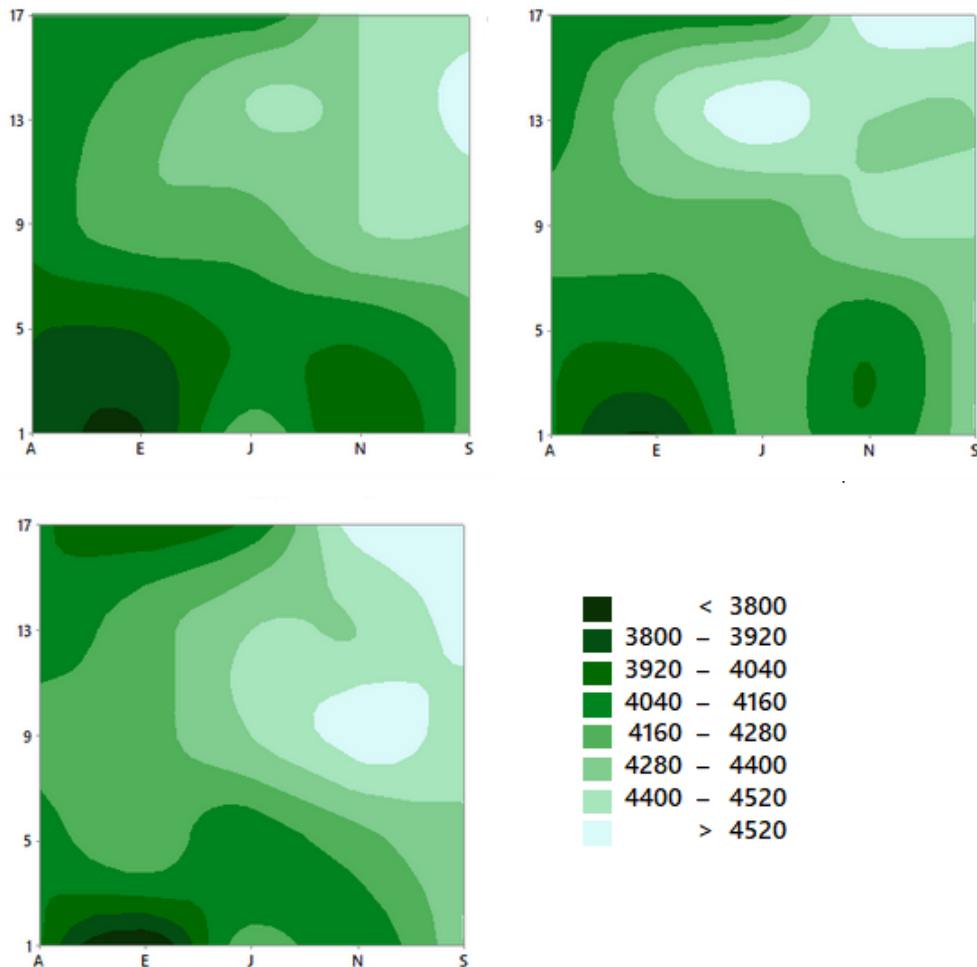
Obr. 2.8: Krabicový graf porovnávající plošné skeny naměřené různými frekvencemi

Tato skutečnost vede k zamyšlení, jak moc je vhodné spoléhat na použití výsledků získaných UZ metodou k určování vlastností, jako je modul pružnosti betonu, objemová hmotnost nebo pevnost v tlaku. Rozdílnost výsledků naměřených různými frekvencemi není problém, pokud potřebujeme beton na základě průchodové rychlosti porovnávat – různé betony nebo prvky mezi sebou, stejný prvek v průběhu času, rovnoměrnost betonu v prvku, hledání defektů nebo cizích těles – v těchto případech nás totiž nezajímají konkrétní čísla, ale rozdíly mezi nimi. Pokud však potřebujeme dospět ke konkrétní hodnotě, na jejímž základě se pak bude materiál nějakým způsobem hodnotit, tak je důležité brát zřetel na správnou volbu použitých sond v závislosti na rozměrech zkoumaného prvku a předpokládané pevnosti betonu. Nemalou roli hrají také zkušenosti osoby, která zkoušku provádí, a možnosti nastavení měřicího přístroje.

Doby průchodu t_0 v jednotlivých bodech

Dalším krokem zkoušení desky bylo měření doby průchodu UZ (t_0) v jednotlivých bodech – jednalo se vlastně o provedení plošného skenu „ručně“, třikrát pro 54 kHz a třikrát pro 150 kHz. Nákrasy izovel byly vytvořeny dodatečně jako povrchové grafy v programu Minitab a hodnoty byly po přepočtu z doby průchodu t_0 na rychlost průchodu v_L porovnány s předchozími plošnými skeny odpovídající frekvence. Cílem bylo zhodnotit, zda přístroj při nastavení módu plošný sken hodnoty nějakým způsobem nezkrsluje.

Pro zjednodušení textu pojem „měření t_0 “ v následujících odstavcích označuje hodnoty rychlosti průchodu v_L získané přepočtem z hodnot t_0 naměřených v jednotlivých bodech. Tyto jednotlivě naměřené rychlosti jsou zde porovnávány s průchodovými rychlostmi v bodech rastru získanými při plošných skenech.

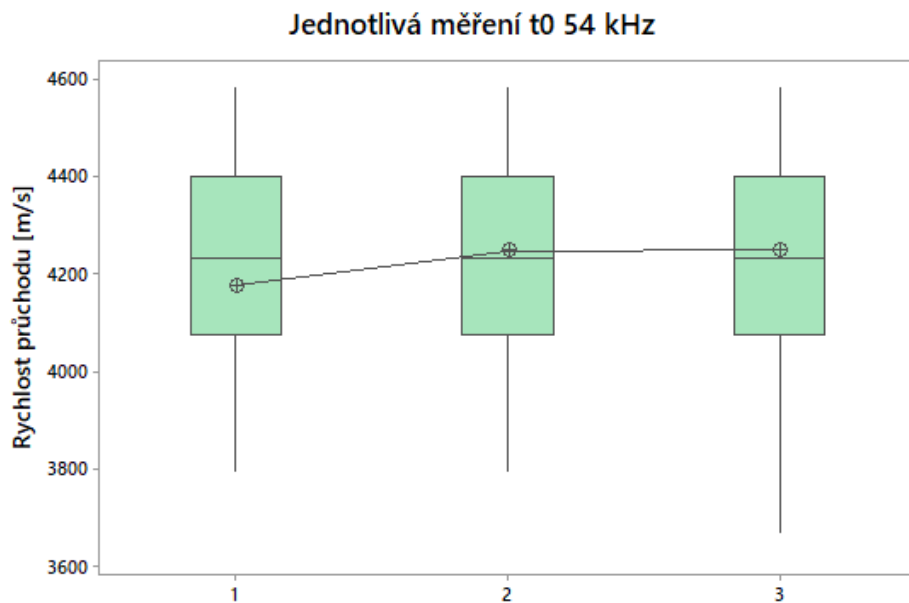


Obr. 2.9: Izovely vytvořené pro jednotlivá měření doby průchodu při 54 kHz

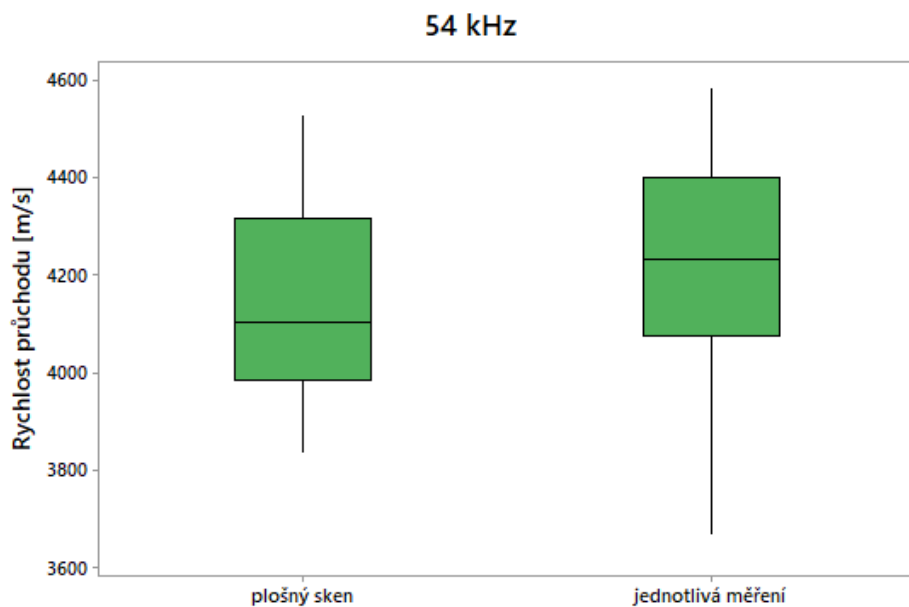
Na výsledky tří měření t_0 v rámci jedné frekvence byla opět aplikována analýza rozptylu, která v obou případech na hladině významnosti 0,05 potvrdila, že se soubory statisticky významně neliší. U každé frekvence tedy byly tři soubory výsledků po 25 hodnotách sloučeny do sdruženého souboru o 75 hodnotách.

Porovnání těchto sdružených souborů s odpovídajícími soubory hodnot získaných plošným skenem dané frekvence dopadlo kladně – dvouvýběrový t-test potvrdil, že výsledky získané jednotlivým měřením a plošným skenem se od sebe na hladině významnosti 0,05 statisticky neliší.

Lze tedy usoudit, že nastavení plošného skenu nemá na získané hodnoty vliv a jeho použití výrazně usnadňuje tento typ měření.



Obr. 2.10: Krabicový graf trojího měření t_0 v jednotlivých bodech frekvencí 54 kHz



Obr. 2.11: Krabicový graf porovnávající plošné skeny a měření t_0 v jednotlivých bodech frekvencí 54 kHz

Rovnoměrnost betonu zkušební desky

Dalším úkolem bylo vyhodnotit na základě plošných skenů a jednotlivých měření rovnoměrnost betonu v desce podle ČSN 73 2011 [2]. Norma předepisuje užití NDT zkoušky na minimálně šesti místech pravidelně rozmístěných po povrchu konstrukce (pro objem betonu pod 1 m^3 nebo plochu pod 5 m^2). Variační součinitel získaného souboru hodnot v_x a největší rozdíl hodnot ve dvou sousedních bodech Δ se následně porovnájí s tabulkou a beton se vyhodnotí jako rovnoměrný (v_x a Δ jsou menší nebo rovny kritériím v tabulce) nebo nerovnoměrný (některý z ukazatelů překračuje hraniční hodnotu).

zkoušená vlastnost betonu	třída betonu	v_x [%]	Δ [%]
Rychlost šíření impulsů podélných UZ vln	C 12/15	4	7,5
	C 16/20	4	7,5
	C 25/30	3,5	7,5
	C 30/35 - C 50/60	3	7,5

Obr. 2.12: Část tabulky 3 z ČSN 73 2011 [2] – kritéria pro rovnoměrnost betonu na základě UZ metody

Z naměřených rychlostí průchodu UZ impulsu byl vypočítán variační součinitel podle vzorce:

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100 \%$$

\bar{x} aritmetický průměr souboru hodnot

s_x výběrová směrodatná odchylka, přičemž

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

n počet měřených bodů

x_i jednotlivé hodnoty rychlosti průchodu UZ

Třída betonu zkušební desky není s určitostí známá. Pokud by se jednalo o třídu C 25/30 nebo vyšší, beton by byl vyhodnocen jednoznačně jako nerovnoměrný, jelikož všechny získané variační koeficienty jsou vyšší než 3,5 %. Za předpokladu třídy betonu C 16/20 nebo C 12/15 se variační součinitele pohybují v těsné blízkosti hraniční hodnoty, avšak více než dvě třetiny z nich 4 % přesahují.

měření	54 kHz			82 kHz			150 kHz		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
BOD	průchodová rychlost [m/s]			průchodová rychlost [m/s]			průchodová rychlost [m/s]		
1	4000	4029	3971	4019	4029	3969	4107	4176	4201
2	3833	3860	3846	3947	3929	3926	4091	4053	4185
3	4183	4183	4089	4187	4247	4133	4492	4428	4475
4	3915	3901	3873	4004	3943	4072	4217	4256	4317
5	4231	4231	4183	4285	4215	4294	4385	4519	4549
6	4264	4247	4247	4203	4215	4228	4316	4446	4421
7	4059	4015	3943	4140	3915	4133	4282	4392	4385
8	4059	4029	4044	4079	4059	4133	4266	4256	4300
9	3929	4059	4029	4079	4000	4072	4217	4306	4368
10	3957	3986	3971	4034	3986	4072	4217	4240	4317
11	4074	4074	4029	4171	4104	4117	4367	4273	4385
12	4104	4167	4135	4219	4104	4212	4350	4290	4368
13	4135	4215	4231	4156	4167	4180	4299	4323	4368
14	4348	4331	4314	4370	4314	4487	4684	4537	4684
15	4418	4382	4418	4405	4435	4311	4567	4464	4567
16	4472	4418	4527	4285	4418	4469	4664	4537	4724
17	4348	4314	4400	4388	4382	4345	4567	4464	4606
18	4400	4382	4400	4459	4453	4415	4704	4613	4745
19	4264	4280	4215	4219	4215	4277	4438	4482	4549
20	4059	3986	4089	3990	4089	4102	4266	4256	4351
21	3986	3915	3957	3919	4015	4087	4137	4144	4300
22	3943	3929	3887	3850	3901	3898	4091	4083	4017
23	3901	4044	3887	3975	3901	4057	4061	4068	4217
24	4348	4418	4365	4319	4435	4415	4605	4575	4704
25	4280	4382	4365	4336	4247	4311	4548	4537	4549
\bar{x}	4140	4151	4137	4162	4149	4189	4358	4349	4426
s_x	186,3	180,3	201,6	168,2	183,5	163,0	200,0	167,9	185,8
v_x [%]	4,499	4,343	4,872	4,042	4,423	3,892	4,589	3,860	4,198

Obr. 2.13: Tabulka výsledků plošných skenů betonové desky

	t_0 150 kHz			plošný sken 82 kHz			plošný sken 150 kHz		
\bar{x}	4359	4372	4399	4162	4149	4189	4358	4349	4426
σ_x	179,0	175,2	161,7	164,8	179,8	159,7	195,9	164,5	182,1
v_x [%]	4,107	4,007	3,676	3,960	4,333	3,813	4,496	3,782	4,114
\bar{v}_x [%]	3,930			4,035			4,131		

Obr. 2.14: Variační součinitele s obyčejnou směrodatnou odchylkou

Norma [2] neuvádí postup pro vyhodnocení více souborů výsledků při opakovaném měření stejného prvku. Možností by bylo například zprůměrovat variační součinitele duplicitních měření (provedených stejnými sondami a stejným způsobem), mezi kterými se vyskytly hodnoty menší než 4 %.

Tímto postupem bychom získali hodnoty:

- $\bar{v}_x = 4,119\%$ pro plošné skeny 82kHz sondami,
- $\bar{v}_x = 4,216\%$ pro plošné skeny 150kHz sondami,
- $\bar{v}_x = 4,011\%$ pro jednotlivá měření t_0 150kHz sondami.

Všechny tři tyto výsledky jsou větší než 4 %, beton lze tedy jednoznačně vyhodnotit jako nerovnoměrný.

Dalším nedostatkem v normě [2] je, že neuvádí, zda se pro výpočet variačního součinitele má použít směrodatná odchylka výběrová (výše popsany postup), nebo obyčejná, která je daná vzorcem:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Obyčejná směrodatná odchylka je menší než odchylka výběrová, proto při jejím použití bude i variační součinitel nižší. Z výše uvedených tří souborů výsledků, které se pohybují v těsné blízkosti kritéria rovnoměrnosti, by pak u jednoho (konkrétně u jednotlivých měření t_0 150kHz sondami) byl průměrný variační součinitel 3,93 % a beton by podle něj bylo možné vyhodnotit jako rovnoměrný. Obecně by tedy při použití obyčejné směrodatné odchylky bylo pravděpodobnější, že beton bude určen jako rovnoměrný a to by mohlo mít nepříznivý vliv na další hodnocení odvíjející se od tohoto výsledku. Proto bude nadále v této práci při vyhodnocení rovnoměrnosti betonu použit „bezpečnější“ variační součinitel získaný ze směrodatné výběrové odchylky.

Ačkoliv o nerovnoměrnosti betonu bylo rozhodnuto již podle variačních koeficientů, uvádím ještě vyhodnocení podle rozdílu sousedních hodnot. Největší rozdíl impulsové rychlosti byl zjištěn u plošného skenu 150kHz sondami – v bodě J17 bylo naměřeno $4061 \frac{m}{s}$ a v bodě J13 $4704 \frac{m}{s}$, rozdíl tedy činí $643 \frac{m}{s}$. Tento rozdíl nemá být pro rovnoměrný beton vyšší než 7,5 %, v normě [2] ovšem není uvedeno, z jakého základu. Nabízí se tři případy:

- a) 7,5 % vyšší z hodnot, $4704 \cdot 0,075 = 352,8 \frac{m}{s} < 643 \frac{m}{s}$,
- b) 7,5 % nižší z hodnot, $4061 \cdot 0,075 = 304,6 \frac{m}{s} < 643 \frac{m}{s}$,
- c) 7,5 % průměru hodnot, $\frac{4704+4061}{2} = 4382 \frac{m}{s}$; $4382 \cdot 0,075 = 328,7 \frac{m}{s} < 643 \frac{m}{s}$.

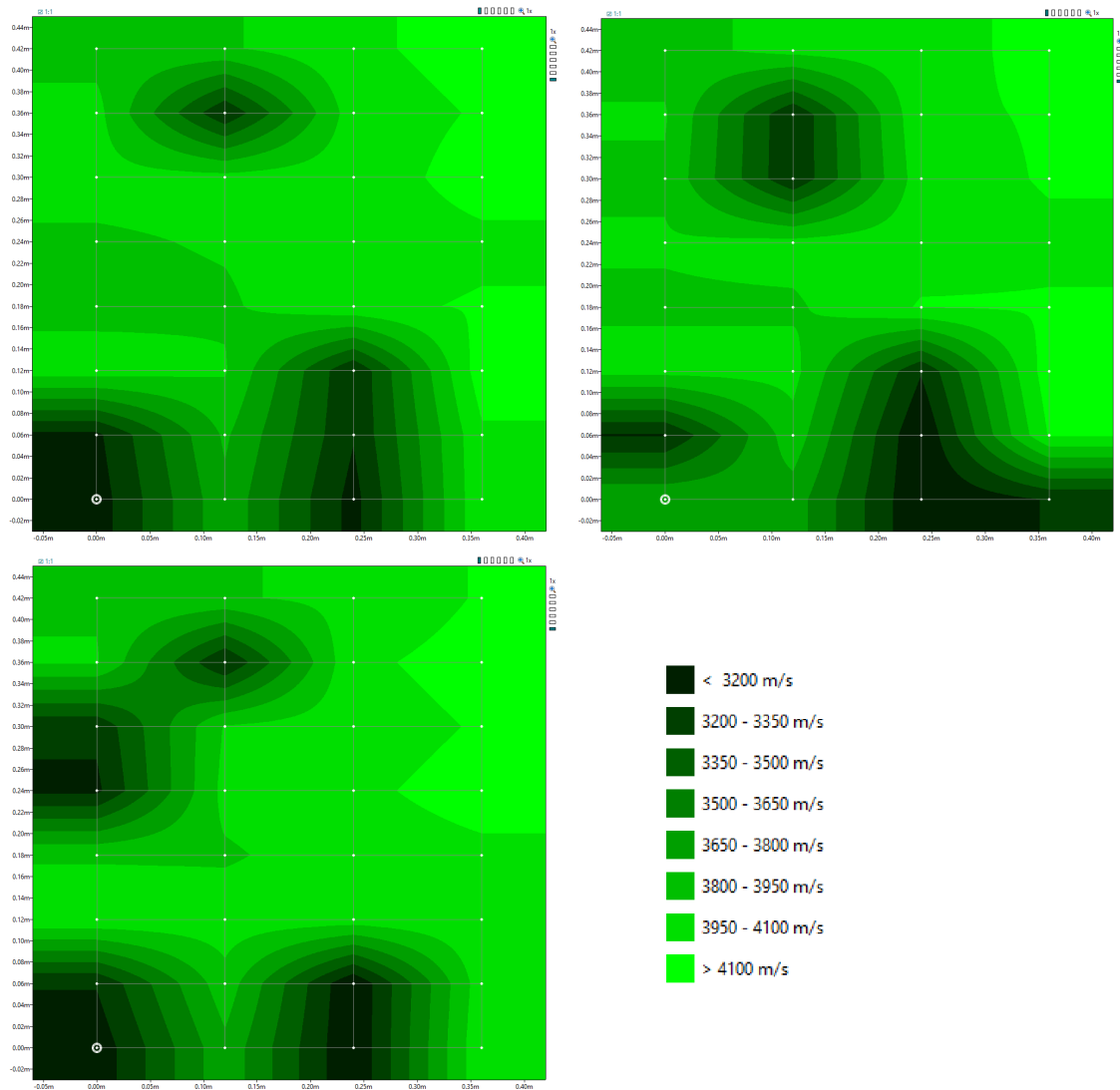
U našeho měření ukazují všechny tři varianty na nerovnoměrný beton, ale není vyloučen případ, kdy by mezi těmito výsledky vznikl spor. Proto je chyba, že norma [2] neobsahuje přesný postup a výsledek posouzení rovnoměrnosti betonu v tomto může záležet čistě na úsudku osoby, která měření vyhodnocuje.

měření	54 kHz						150 kHz					
	1		2		3		1		2		3	
	čas [μs]	rychlost [m/s]	čas [μs]	rychlost [m/s]	čas [μs]	rychlost [m/s]	čas [μs]	rychlost [m/s]	čas [μs]	rychlost [m/s]	čas [μs]	rychlost [m/s]
BOD												
1	28	3929	27	4074	27	4074	26	4231	27	4074	26	4231
2	29	3793	29	3793	30	3667	26	4231	27	4074	26	4231
3	26	4231	26	4231	26	4231	25	4400	24	4583	25	4400
4	28	3929	27	4074	27	4074	27	4074	26	4231	27	4074
5	26	4231	25	4400	25	4400	25	4400	25	4400	25	4400
6	26	4231	25	4400	25	4400	25	4400	25	4400	25	4400
7	27	4074	27	4074	26	4231	26	4231	25	4400	25	4400
8	27	4074	26	4231	27	4074	26	4231	26	4231	26	4231
9	28	3929	27	4074	26	4231	26	4231	25	4400	26	4231
10	28	3929	27	4074	27	4074	26	4231	26	4231	26	4231
11	27	4074	26	4231	26	4231	26	4231	26	4231	25	4400
12	26	4231	26	4231	26	4231	25	4400	25	4400	25	4400
13	26	4231	26	4231	25	4400	25	4400	25	4400	25	4400
14	25	4400	25	4400	24	4583	24	4583	24	4583	24	4583
15	25	4400	25	4400	25	4400	24	4583	24	4583	24	4583
16	24	4583	25	4400	24	4583	24	4583	24	4583	24	4583
17	25	4400	25	4400	25	4400	24	4583	24	4583	24	4583
18	25	4400	24	4583	25	4400	24	4583	24	4583	23	4783
19	26	4231	25	4400	26	4231	24	4583	25	4400	24	4583
20	27	4074	27	4074	27	4074	26	4231	26	4231	25	4400
21	27	4074	27	4074	27	4074	26	4231	26	4231	25	4400
22	27	4074	27	4074	28	3929	27	4074	26	4231	26	4231
23	27	4074	27	4074	27	4074	27	4074	27	4074	26	4231
24	25	4400	24	4583	24	4583	24	4583	24	4583	24	4583
25	25	4400	24	4583	24	4583	24	4583	24	4583	25	4400
\bar{x}	4176		4247		4249		4359		4372		4399	
s_x	198,8		202,0		227,3		182,7		178,8		165,0	
v_x [%]	4,760		4,757		5,350		4,191		4,089		3,752	

Obr. 2.15: Tabulka výsledků jednotlivých měření t_0 na betonové desce

Plošný sken odrazovou sondou

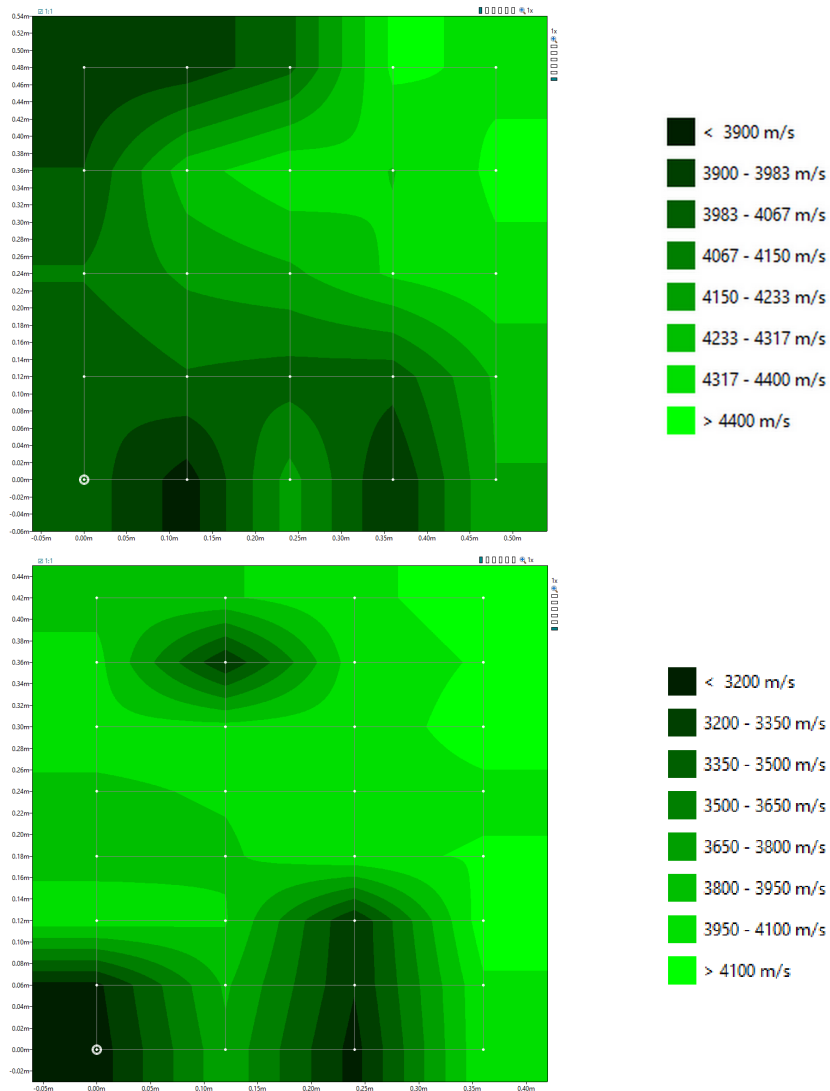
Na závěr byl na betonové desce třikrát proveden plošný sken odrazovou sondou, pro srovnání rozsahu naměřených hodnot a grafického výstupu s předchozím průchodovým měřením.



Obr. 2.16: Izovely plošných skenů provedených na desce odrazovou sondou

Již z grafů izovel je patrné, že odrazová sonda nemá tak dobrou rozlišovací schopnost jako průchodové sondy. Spíše než menší rozdíly v rychlosti šíření UZ zaznamenává výrazné propady v oblasti dutin, ovšem i jejich odhadovaná velikost a umístění se mezi jednotlivými měřeními liší. Obecně zde byly naměřeny nižší hodnoty rozptýlené na širším rozsahu ($3200\text{--}4100 \frac{m}{s}$) s tím, že ve dvou ze tří měření se objevily i odlehlé hodnoty výrazně pod jeho spodní hranicí.

Lze tedy usoudit, že odrazová sonda se pro tento typ měření hodí výrazně méně než průchodové sondy. Ty jsou upřednostňovány, kdykoliv je to z hlediska přístupnosti konstrukce možné, a to z opodstatněných důvodů.



Obr. 2.17: Porovnání izovel získaných průchodovou a odrazovou metodou



Obr. 2.18: Pundit PL-200PE s odrazovou sondou



Obr. 2.19: Otvory po jádrových vývrtech na spodní straně zkušební desky

2.1.2 Jádrový vývrt odebraný z betonového bloku

Druhým předmětem laboratorního měření byl jádrový vývrt pocházející z betonového bloku na nádvoří Fakulty stavební.

Vývrt jmenovitého průměru 100 mm a délky 500 mm byl upraven seříznutím konců a rozdělením na tři části o různé délce. U těch byly přesněji změřeny rozměry a hmotnost, potom byla aplikována UZ metoda pro zjištění doby průchodu vlnění po délce zkušebního tělesa (na každém vzorku třikrát), a nakonec byly vzorky postupně vloženy do zkušebního lisu pro zjištění pevnosti betonu v tlaku. Cílem je porovnat zjištěnou pevnost v tlaku s odhadem pevnosti vypočteným z doby průchodu UZ vlnění.



Obr. 2.20: Jádrový vývrt rozdělený na jednotlivé vzorky

Při nedestruktivním měření vzorků byly zjištěné rychlosti průchodu UZ mírně stoupající směrem od povrchu (vzorek V1) dovnitř konstrukce (vzorek V3). To může být způsobeno nerovnoměrným rozmístěním kameniva, ale není vyloučena ani degradace betonu na povrchu bloku. Průměrné rychlosti u jednotlivých vzorků byly použity pro výpočet odhadu pevnosti v tlaku s nezaručenou přesností podle ČSN 73 1371 [7] dosazením do vzorce:

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

v_{L3} impulsová rychlost UZ v trojrozměrném prostředí [$\frac{km}{s}$]
 f_{be} pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností [MPa]

Tento vzorec – v normě [7] označen jako směrný kalibrační vztah – byl v nezměněné podobě převzatý z předchozí verze této normy z 80. let minulého století [15] a v době jejího vydání měl za sebou již necelých dvacet let používání. Vznik vzorce se totiž datuje přibližně do let šedesátých. Pro tehdejší betony šlo patrně o věrohodný odhad

pevnosti v tlaku, avšak dnešní betony jsou výrazně odlišné a tento vztah je pro ně neodpovídající. Na základě tohoto výpočtu byl výsledný odhad pevnosti na vzorcích v rozmezí 19,7–22,9 MPa.

Skutečné pevnosti naměřené ve zkušebním lisu Alpha 3-3000 S firmy FORM+TEST byly výrazně vyšší – u vzorku V1 56,5 MPa, u V2 45,6 MPa a u V3 42,6 MPa. Poměrně velký rozptyl těchto výsledků je způsoben různými poměry stran u jednotlivých vzorků. V případě vzorku V1 je výška válce téměř stejná jako jeho průměr – poměr stran je tedy 1:1 a pevnost naměřená na tomto vzorku odpovídá pevnosti krychelné. U dalších dvou vzorků je poměr stran přibližně 1:1,7, pevnost zjištěná ve zkušebním lisu se tedy u nich blíží spíše pevnosti válcové (zjišťované na zkušebních válcích s poměrem stran 1:2). Poměr mezi válcovou a krychlenou pevností se u jednotlivých tříd betonu obvykle pohybuje kolem 0,8, což souhlasí i u těchto hodnot.

Pro představu uvádím ještě výpočet součinitele α pro upřesnění vztahu mezi skutečnou pevností v tlaku a jejím odhadem na základě UZ měření a směrného kalibračního vztahu [7]:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{cl}}{\sum_{i=1}^n f_{cel}}$$

- f_{cl} pevnost betonu v tlaku zjištěná ve zkušebním lisu [MPa],
- f_{cel} pevnost v tlaku s nezaručenou přesností stanovená UZ impulsovou metodou [MPa],
- n počet zkušebních těles.

V tomto případě je jeho hodnota

$$\alpha = \frac{56,5 + 45,6 + 42,6}{19,7 + 19,9 + 22,9} = 2,32.$$

V navazující části práce jsou měřeny také rychlosti průchodu UZ na samotném bloku. Hodnoty naměřené v blízkosti místa vývrtu budou porovnány s těmi naměřenými přímo na válci. Takový postup je sice v opačném pořadí, než probíhá v běžné praxi, avšak pro účely bakalářské práce tento rozdíl není zásadní.

V1			průměrná hodnota
průměr [mm]	103,64	103,68	103,7
	103,63	103,67	
výška [mm]	104,71	104,59	104,7
doba průchodu UZ [μ s]	26,4	27,3	27,1
rychlost šíření UZ [m/s]	3964	3833	3862
průměrná rychlost [m/s]	3886		
odhad pevnosti f_{be} [MPa]	19,7		
plocha vzorku A_c [mm ²]	8438,60		
maximální síla F [kN]	477,1		
pevnost v tlaku f_c [MPa]	56,5		

V2			průměrná hodnota
průměr [mm]	103,63	103,58	103,6
	103,57	103,57	
výška [mm]	169,24	169,58	169,4
doba průchodu UZ [μ s]	43,3	44,0	43,1
rychlost šíření UZ [m/s]	3912	3850	3931
průměrná rychlost [m/s]	3898		
odhad pevnosti f_{be} [MPa]	19,9		
plocha vzorku A_c [mm ²]	8427,61		
maximální síla F [kN]	384,30		
pevnost v tlaku f_c [MPa]	45,6		

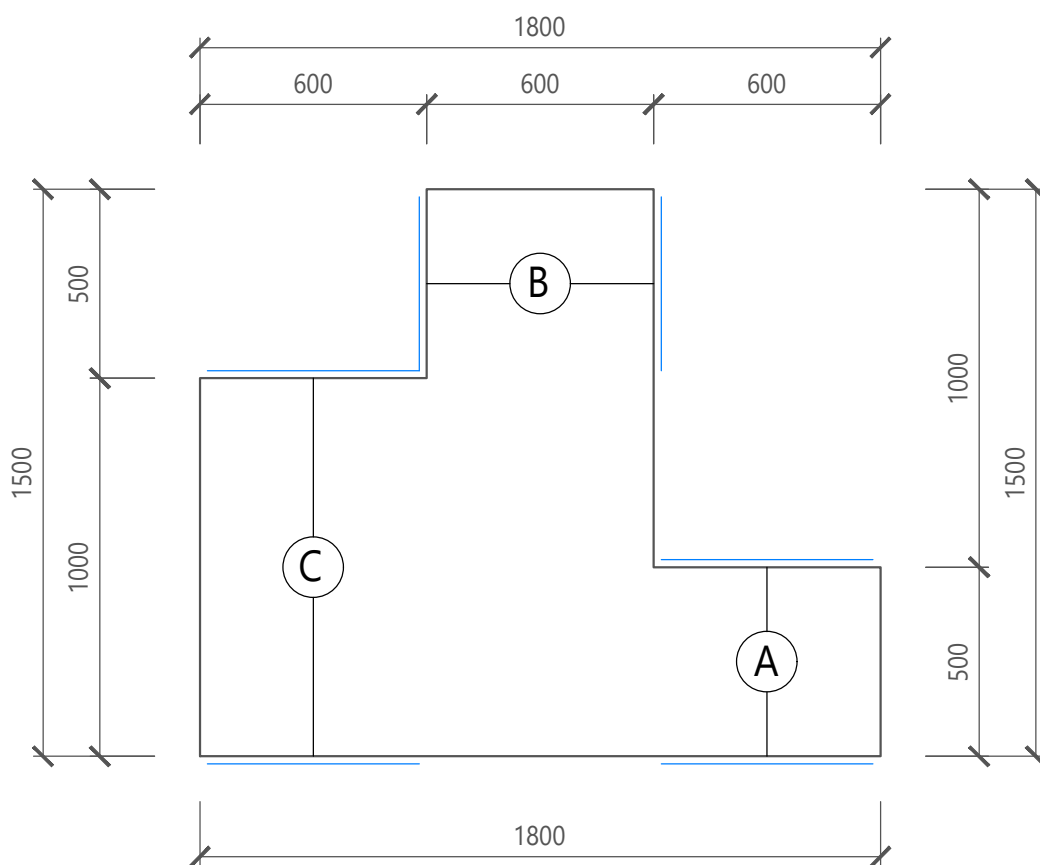
V3			průměrná hodnota
průměr [mm]	103,46	103,54	103,5
	103,29	103,89	
výška [mm]	170,96	171,42	171,2
doba průchodu UZ [μ s]	42,7	42,5	42,3
rychlost šíření UZ [m/s]	4009	4028	4047
průměrná rychlost [m/s]	4028		
odhad pevnosti f_{be} [MPa]	22,9		
plocha vzorku A_c [mm ²]	8420,70		
maximální síla F [kN]	358,5		
pevnost v tlaku f_c [MPa]	42,6		

Obr. 2.21: Tabulky výsledků vzorků z jádrového vývrtu

2.2 Aplikace na vybraných konstrukcích

2.2.1 Betonový blok v areálu Fakulty stavební

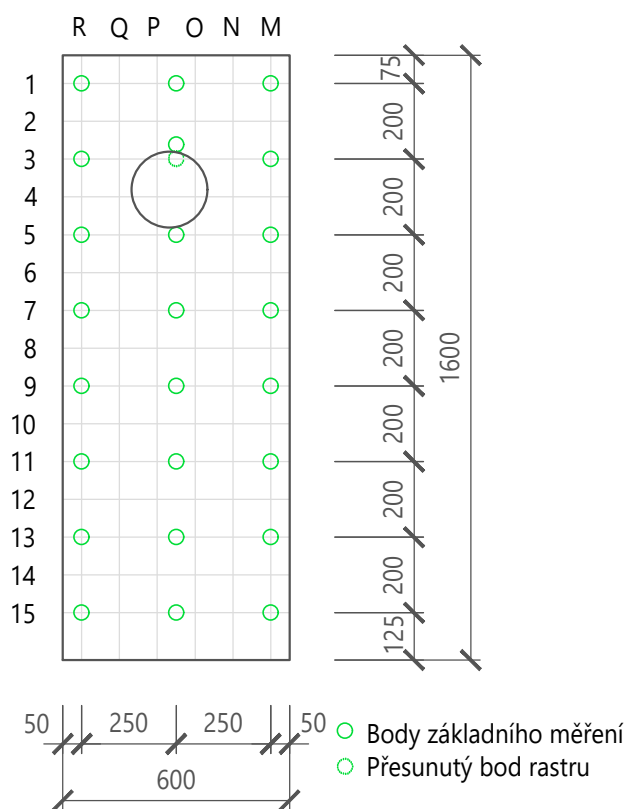
První vybranou konstrukcí pro aplikaci UZ metody je blok z prostého betonu stojící v areálu Fakulty stavební před budovou B. Blok je vysoký 160 cm a má nepravidelný pravoúhlý půdorys, což umožnilo měření na třech různých základnách.



Obr. 2.22: Půdorys betonového bloku s vyznačenými měřicími základnami

Část A

Část A je 60 cm široká a je na ní vyznačený rastr 10 x 10 cm. Nejprve zde byly provedeny základní plošné skeny na síti 3 x 8 bodů umístěných vodorovně po 25 cm (sloupec R, uprostřed mezi P a O, a sloupec M) a svisle po 20 cm (liché řádky). Bod PO3 byl mírně posunut kvůli otvoru po jádrovém vývrtnu, vedoucímu rovnoběžně se základnou skrz celou konstrukci. Nový bod měření byl umístěn nad původním bodem, tečně k otvoru.



Obr. 2.23: Blok A – základní rastr

Základní plošné skeny byly měřeny třikrát frekvencí 150 kHz a třikrát 54 kHz. V této části bloku je několik otvorů po jádrových vývrtech různých průměrů a hloubek, většina kolmo na měřicí základnu, některé rovnoběžně včetně otvoru skrz. Při plošných skenech bylo sledováno, jak se tyto defekty projeví na výsledcích a při které frekvenci budou lépe rozeznatelné.

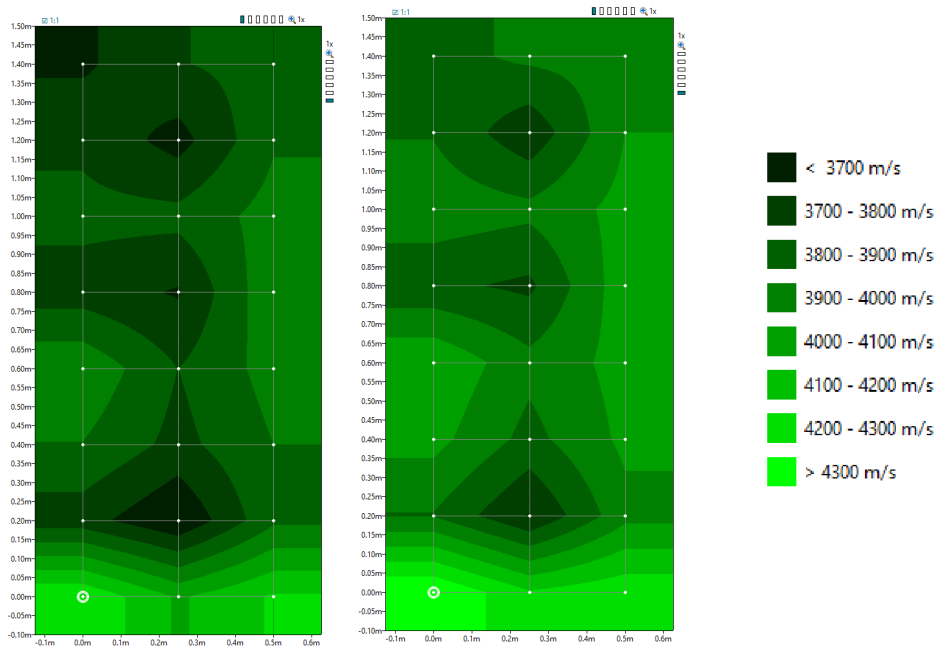
Výsledky obou frekvencí byly velmi podobné. Sondy 150 kHz opět naměřily o něco vyšší rychlosti průchodu, stejně jako tomu bylo při měření desky. Zároveň ale

nepatrně lépe určily umístění a přibližnou velikost dutin.

Ze základního měření byla vyhodnocena rovnoměrnost betonu stejným postupem jako u zkušební desky. Z jednotlivých souborů hodnot je jen u prvního měření frekvencí 54 kHz variační součinitel menší než 4 %. Po zprůměrování tří variačních součinitelů měření touto frekvencí je však výsledek 4,1 %, tedy beton v části A je při jakékoliv předpokládané třídě nerovnoměrný.

	54 kHz			150 kHz		
měření	1	2	3	1	2	3
BOD	průchodová rychlost [m/s]			průchodová rychlost [m/s]		
1	4218	4292	4303	4386	4405	4348
2	4094	4085	4095	4223	4212	4181
3	4193	4212	4167	4326	4274	4340
4	3884	3879	3846	3940	3968	3968
5	3604	3584	3556	3679	3693	3704
6	3750	3743	3765	3867	3894	3873
7	3902	3897	3928	4020	4036	4029
8	3778	3768	3768	3855	3867	3867
9	3927	3900	3909	3969	4023	3975
10	3927	3940	3918	4039	4036	4042
11	3816	3799	3814	3919	3931	3918
12	3986	3981	3956	4109	4088	4122
13	3756	3751	3757	3823	3823	3852
14	3694	3690	3690	3765	3779	3785
15	3973	3978	3968	4042	4062	4082
16	3936	3940	3949	4023	4032	4045
17	3827	3831	3828	3931	3928	3934
18	3845	3831	3834	3931	3962	3940
19	3787	3779	3785	3904	3894	3918
20	3681	3660	3666	3754	3726	3737
21	3911	3888	3888	4016	4000	4026
22	3848	3840	3831	3947	3937	3940
23	3822	3794	3797	3910	3925	3912
24	3756	3682	3731	3835	3858	3826
\bar{x}	3871	3864	3865	3967	3973	3974
s_x	149,6	166,0	162,0	168,4	163,4	161,9
v_x [%]	3,864	4,295	4,191	4,245	4,113	4,075

Obr. 2.24: Tabulka výsledků základního plošného skenu bloku A



Obr. 2.25: Porovnání izovel získaných na bloku A 54kHz a 150kHz sondami

Jelikož známe přesně velikost a polohu dutin vyskytujících se v bloku po jádrových vývrtech, bylo toto měření ideální příležitostí sledovat, jak se tyto defekty projeví na rychlosti šíření ultrazvuku. Na nákresech izovel získaných základním měřením celé části A jsou patrná tři hlavní místa snížené rychlosti průchodu UZ.

První z nich v bodě PO3 je nejspíše způsoben umístěním měřicího bodu v těsné blízkosti otvoru o průměru 200 mm vedoucímu skrz konstrukci. Kvůli odrazu vlnění na stěně otvoru mohlo dojít k prodloužení doby průchodu a dalšímu zkreslení výsledků.

Druhá oblast v řadě 7 sahá od levého okraje přibližně ke středu základní sítě a zahrnuje skupinu tří vývrtů W, X a Y v levé stěně bloku. Sahají do hloubky 300–500 mm a výškové rozestupy mezi nimi jsou minimální, proto se v nákrese izovel jeví jako jedna větší skvrna. Přibližně v této výšce jsou také dva otvory rovnoběžné s měřicí základnou (průměr 20 mm v blízkosti bodu OP6 a průměr přibližně 57 mm v bodě OP8). Nesahají do velké hloubky a body měření od nich byly vždy vzdáleny minimálně 50 mm – tyto otvory proto nebyly při měření UZ metodou nijak detekovány.

Třetí tmavší místo je ve výšce řady 13 a nejvýrazněji se projevuje ve středu šířky bloku, přestože ho způsobuje otvor vyvrtaný v levé stěně do hloubky 33,5 cm. Neodpovídající tvar této oblasti může znamenat, že se v bloku nachází další dutina, o které nevíme, ale není vyloučeno, že se jedná pouze o následek odrazu ultrazvukových vln a zkreslení výsledků v blízkosti levé stěny.

Co dále stojí za pozornost, je oblast vyšší rychlosti průchodu UZ ve spodní části bloku. Lze usoudit, že v těchto místech má beton lepší vlastnosti než ve zbytku konstrukce, což mohlo být zapříčiněno například postupným hutněním a klesáním těžšího kameniva dolů během tuhnutí.

Z těchto měření byla rovněž spočítána průměrná rychlost průchodu naměřená v okolí vývrtu zkoušeného v předchozí části práce (vývrt X). Byly uvažovány hodnoty v bodě nad a pod oblastí snížené rychlosti průchodu UZ R5 a R9 naměřené sondami 150 kHz – stejnou frekvencí, jaká byla použita při měření na vývrtu. Průměrná rychlost v této oblasti je:

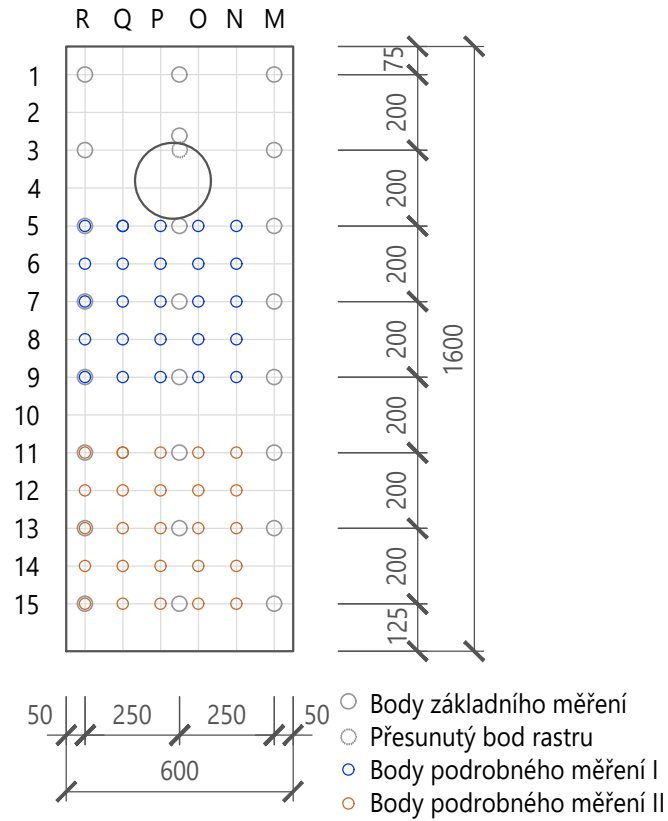
$$\bar{v}_{blok} = \frac{4109 + 4088 + 4122 + 3931 + 3962 + 3940}{6} = 4025,33 \frac{m}{s},$$

zatímco průměrná rychlost naměřená na vývrtu je:

$$\bar{v}_{vývrt} = \frac{3886,32 + 3897,77 + 4028,06}{3} = 3937,38 \frac{m}{s}.$$

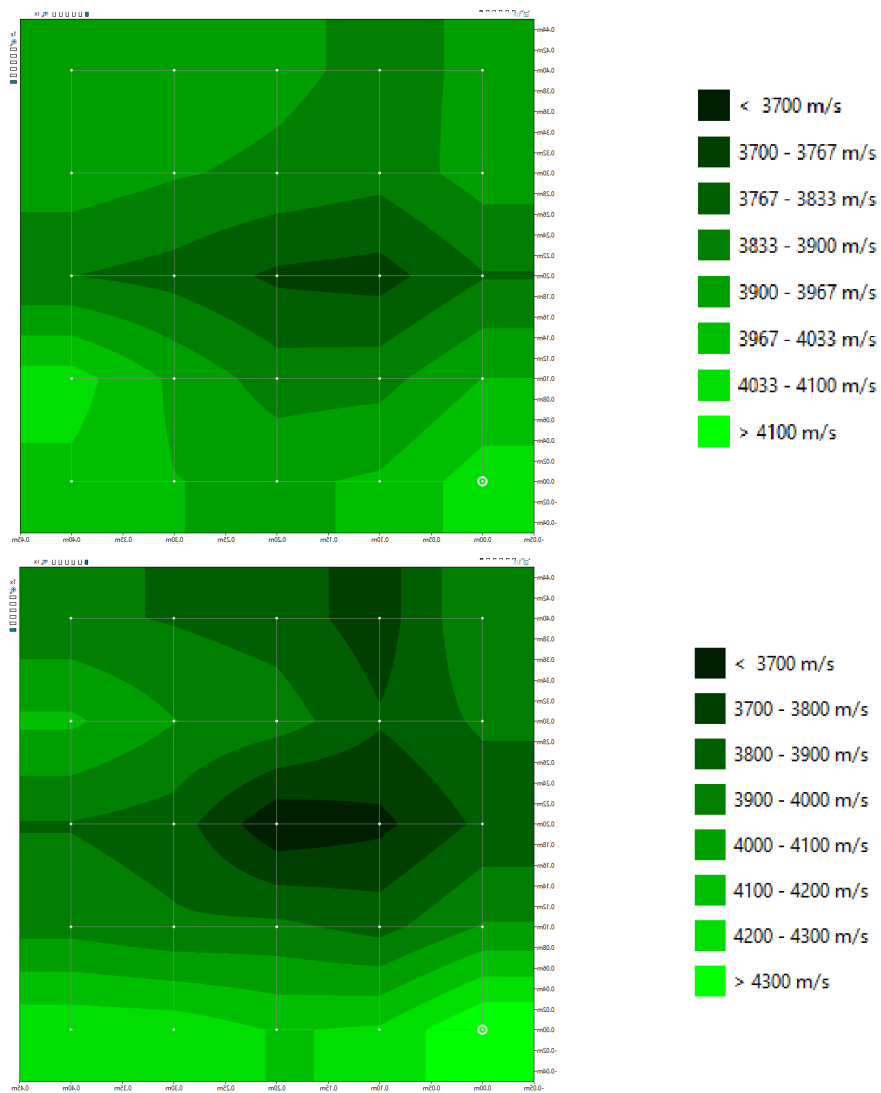
Rozdíl mezi těmito dvěma rychlostmi není nijak propastný a lze tvrdit, že odpovídá celkové nerovnoměrnosti betonu v bloku.

Na základě plošných skenů byly zvoleny dvě oblasti pro podrobné měření za účelem detailnějšího prozkoumání oblastí s vývrty. Jednalo se o rastry 10 x 10 cm umístěné v oblastech R5–N9 (rastr I) a R11–N15 (rastr II).



Obr. 2.26: Rastry podrobných měření na bloku A

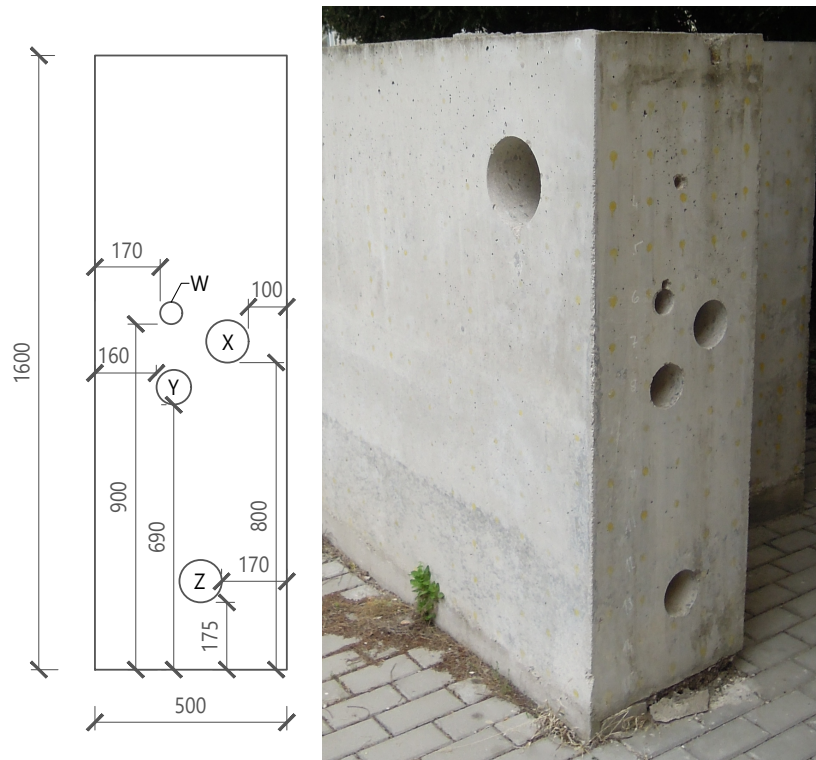
Při podrobných plošných skenech byly detailněji naměřeny přechody mezi oblastmi s vyšší a nižší rychlostí průchodu UZ, avšak tvarem a umístěním se tyto oblasti nijak výrazně nelišily od těch zjištěných při základním měření. Skupinu vývrťů ve střední části od sebe opět nebylo možné rozeznat a dutina ve spodní části také podle izovel vypadala, že je spíše uprostřed šířky bloku.



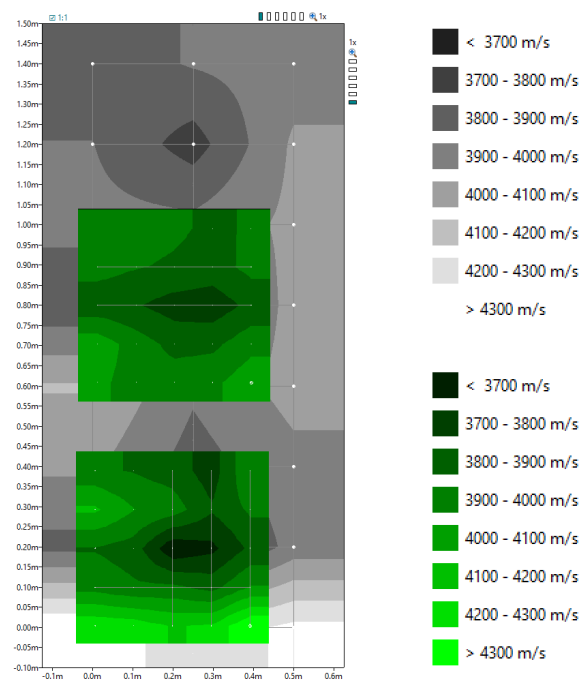
Obr. 2.27: Ukázky izovel podrobných plošných skenů na bloku A

Zde je pro úplnost uveden přehled otvorů po vývrtech v levé stěně bloku A:

- W – průměr 57 mm, hloubka 430 mm,
- X – průměr 110 mm, hloubka 480 mm,
- Y – průměr 96 mm, hloubka 300 mm, pokračuje průměr 50 mm do hloubky 505 mm,
- Z – průměr 110 mm, hloubka 335 mm.



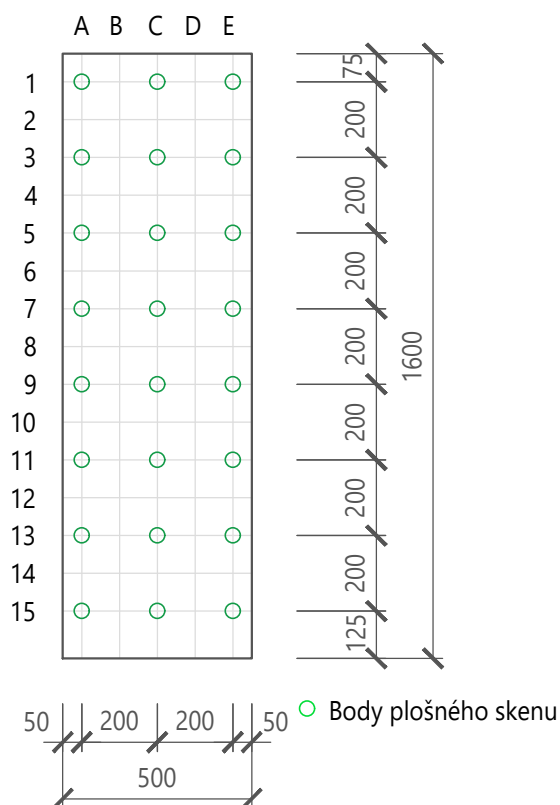
Obr. 2.28: Otvory po jádrových vývrtech na bloku A



Obr. 2.29: Izovely podrobných měření na bloku A v kontextu základního rastru

Část B

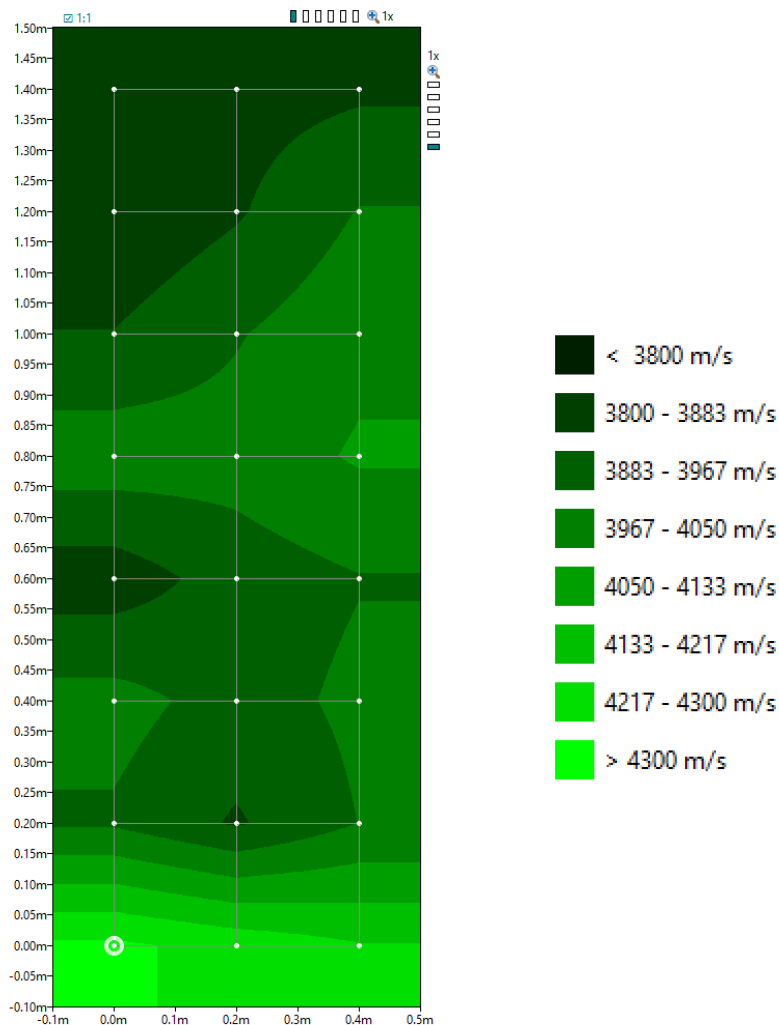
Část B betonového bloku je široká 50 cm a její tloušťka (tedy délka měřicí základny) je 60 cm. Stejně jako na všech stěnách bloku je zde vyznačena síť bodů 10 x 10 cm. Plošný sken zde byl proveden sondami o frekvenci 54 kHz na rastru 20 x 20 cm (sloupce A, C, E a liché řádky). V této části nejsou žádné známé dutiny. Při měření byla sledována hlavně rovnoměrnost betonu.



Obr. 2.30: Blok B

Podle izovel lze odhadnout, že se uvnitř této části nenachází žádné výraznější defekty a že rozdíly v rychlosti šíření UZ jsou způsobeny především odlišnou mírou zhutnění. Spodní vrstvy betonu se stejně jako v části A jeví nejlepší a kvalita směrem vzhůru klesá.

Při vyhodnocení rovnoměrnosti byly variační součinitele všech tří měření v blízkosti hodnoty 3,4 %. Pokud je tedy beton třídy C 25/30 nebo nižší, je podle ČSN 73 2011 [2] a tohoto kritéria rovnoměrný.



Obr. 2.31: Ukázka izovel bloku B

Největší rozdíl naměřených rychlostí mezi dvěma sousedními body byl zaznamenán ve třetím měření, kdy v bodě C15 byla hodnota rychlosti $4270 \frac{m}{s}$ a v bodě C13 $3873 \frac{m}{s}$ – rozdíl tedy činí $397 \frac{m}{s}$. Z důvodu nejednoznačnosti pokynů v normě [2] opět porovnám rozdíl Δ se třemi hodnotami:

- $7,5 \%$ vyšší z hodnot, $4270 \cdot 0,075 = 320,3 \frac{m}{s} < 397 \frac{m}{s}$,
- $7,5 \%$ nižší z hodnot, $3873 \cdot 0,075 = 290,5 \frac{m}{s} < 397 \frac{m}{s}$,
- $7,5 \%$ průměru hodnot, $\frac{4270+3873}{2} = 4071 \frac{m}{s}$; $4071 \cdot 0,075 = 305,4 \frac{m}{s} < 397 \frac{m}{s}$.

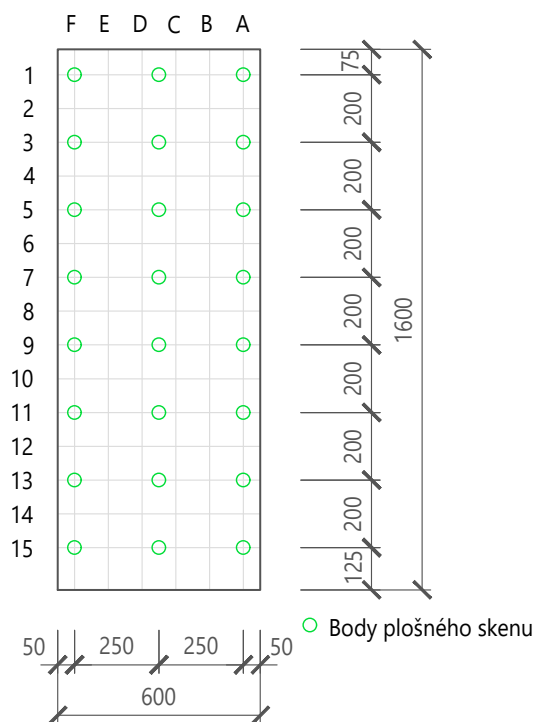
Podle všech tří možností lze beton označit za nerovnoměrný.

měření	B			C		
	1	2	3	1	2	3
BOD	průchodová rychlost [m/s]			průchodová rychlost [m/s]		
1	4335	4326	4317	4080	4044	4002
2	4246	4261	4270	4163	4134	4134
3	4202	4234	4222	4290	4216	4214
4	3940	3953	3968	3795	3785	3789
5	3861	3881	3873	3896	3885	3890
6	3934	3942	3955	3923	3953	3937
7	3981	3981	3997	3957	3997	3995
8	3924	3937	3932	3942	3953	3948
9	3987	3992	3984	3854	3860	3867
10	3953	3981	3963	3842	3836	3834
11	3911	3916	3922	3905	3903	3891
12	3863	3846	3836	3962	3981	3986
13	4019	3997	4016	4105	4095	4093
14	4005	4000	4003	4026	4021	4024
15	4071	4060	4060	3949	3957	3956
16	4021	4016	4027	3946	3945	3942
17	3958	3945	3960	3975	3978	3957
18	3891	3881	3886	4049	4054	4055
19	3795	3800	3810	3926	3967	3968
20	3894	3889	3873	3891	3879	3902
21	3987	3974	3971	3857	3852	3857
22	3861	3856	3868	3792	3772	3778
23	3836	3851	3849	3882	3858	3880
24	3800	3807	3812	3873	3874	3888
\bar{x}	3970	3972	3974	3953	3950	3949
s_x	134,0	135,1	133,9	117,4	108,3	104,2
v_x [%]	3,377	3,401	3,370	2,969	2,743	2,639

Obr. 2.32: Tabulka výsledků plošných skenů bloku B a C

Část C

Část C je z celého betonového bloku nejmasivnější – délka měřicí základny je 1 m. Na ploše šířky 60 cm je opět vyznačen rastr 10 x 10 cm, plošný sken byl proveden obdobně jako u části A na síti 3 x 8 bodů (sloupec F, střed mezi D a C, sloupec A a liché řádky).



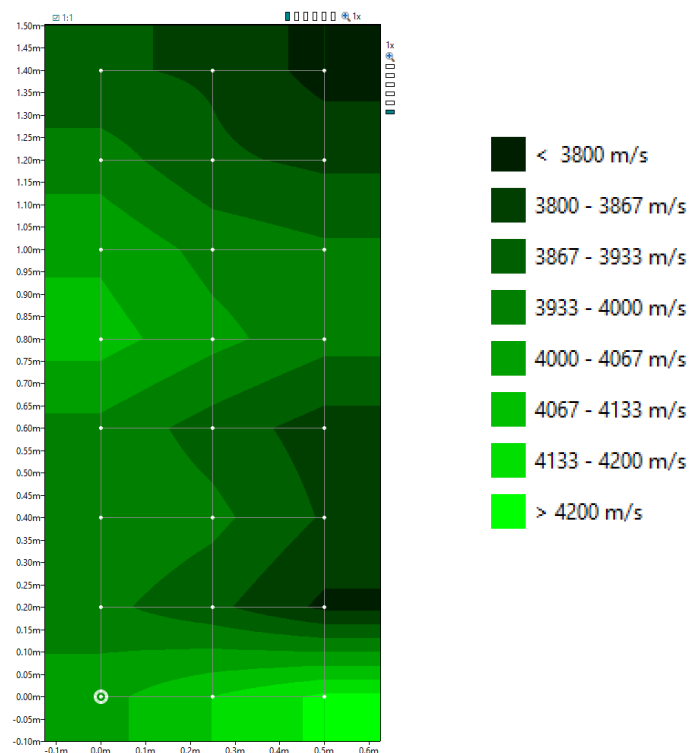
Obr. 2.33: Blok C

Izovely bloku C ukazují oblasti s nižší rychlostí průchodu vlnění u pravého kraje ve spodní polovině a v horním rohu. Přechody jsou plynulé, takže spíše než o dutiny se jedná o špatně zhutněná místa. Druhou možností by bylo zkreslení výsledků působením odrazů vlnění při průchodu podél stěny na dlouhé měřicí základně. Oblasti vyšší rychlosti průchodu UZ jsou při spodním okraji a na levé straně přibližně v polovině výšky. Pravděpodobně je opět příčinou hutnění a klesání kameniva.

Co se týče rovnoměrnosti, tak při hodnocení podle variačních součinitelů souborů hodnot je beton v části C rovnoměrný – všechny variační součinitele jsou menší nebo rovny 3 %, takže podle ČSN 73 2011 [2] splňují podmínku pro jakoukoliv třídu betonu.

V pravém dolním rohu bloku byly však v sousedících bodech naměřeny velmi rozdílné rychlosti. Při prvním měření v bodě A15 $4290 \frac{m}{s}$ a v bodě A13 $3795 \frac{m}{s}$, tedy $\Delta = 495 \frac{m}{s}$. Podle porovnání s možnými limitními hodnotami je nakonec beton nerovnoměrný:

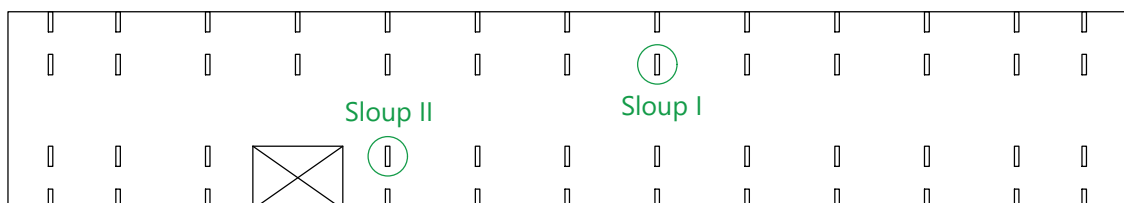
- 7,5 % vyšší z hodnot, $4290 \cdot 0,075 = 321,8 \frac{m}{s} < 495 \frac{m}{s}$,
- 7,5 % nižší z hodnot, $3875 \cdot 0,075 = 290,6 \frac{m}{s} < 495 \frac{m}{s}$,
- 7,5 % průměru hodnot, $\frac{4290+3875}{2} = 4083 \frac{m}{s}$; $4083 \cdot 0,075 = 306,2 \frac{m}{s} < 495 \frac{m}{s}$.



Obr. 2.34: Ukázka izovel bloku C

2.2.2 Sloupy parkovací budovy Žižkova

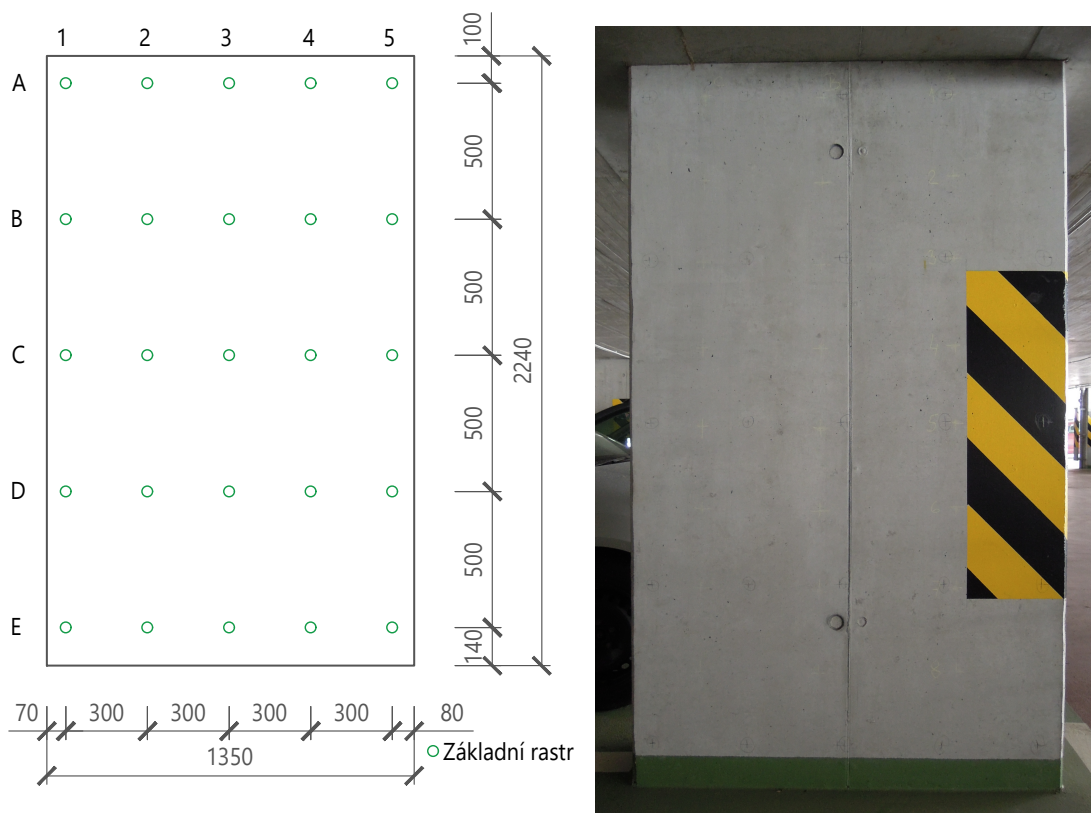
Druhou vybranou konstrukcí pro aplikaci UZ metody jsou sloupy ve druhém nadzemním podlaží parkovací budovy Žižkova. První sloup byl vybrán náhodně s přihlédnutím k přístupnosti. Pro výběr druhého sloupu byla orientačně změřena rychlost průchodu UZ na několika sloupech, u každého ve třech výškových úrovních, a pro další měření bych vybrán ten, u kterého byly po výšce zjištěny největší rozdíly.



Obr. 2.35: Schematický půdorys parkovací budovy Žižkova – 2NP

Sloup I

U prvního sloupu byly nejprve změřeny jeho rozměry – výška 224 ± 1 cm, šířka 135 ± 1 cm a tloušťka (= délka měřicí základny) $30\pm 0,5$ cm. Poté byl třikrát proveden plošný sken sondami 150 kHz na rastru 5 x 5 bodů, vzdálených od sebe vodorovně po 30 cm a svisle po 50 cm.



Obr. 2.36: Sloup I

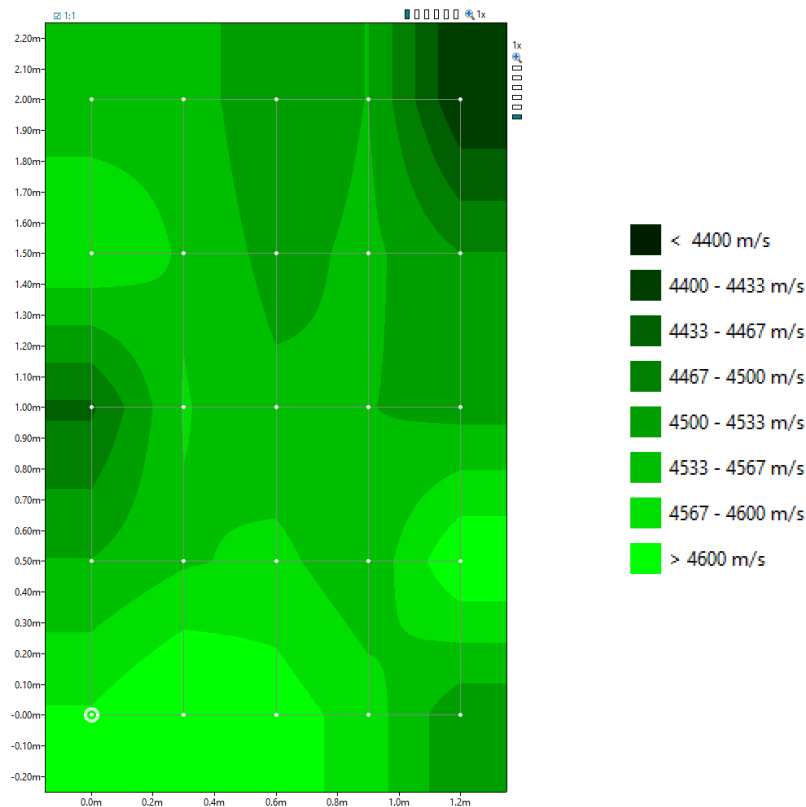
Na plošných skenech byly zjištěny jen malé rozdíly v rychlosti průchodu UZ. Na většině plochy sloupu se hodnoty pohybovaly mezi $4500\text{--}4600 \frac{m}{s}$, jen v blízkosti pravého horního rohu a na levém okraji v polovině výšky byly při dvou ze tří měření hodnoty nižší. Nejvyšší rychlost byla vždy naměřena přibližně v dolní třetině sloupu, což odpovídá vlivu hutnění. Tento projev zde ale není zdaleka tak výrazný, jako byl u betonového bloku.

Na základě hodnot ze tří plošných skenů byla vyhodnocena rovnoměrnost. Varianční součinitele souborů hodnot se pohybují mezi 0,9–1,4 % – podle tohoto kritéria je beton rovnoměrný. Největší rozdíl mezi hodnotami v sousedních bodech byl zjištěn při třetím měření, kdy v bodě A4 byla rychlost průchodu $4535 \frac{m}{s}$ a v bodě

A5 $4402 \frac{m}{s}$, rozdíl těchto hodnot je $133 \frac{m}{s}$. Při porovnání s možnými limitními hodnotami vypadá následovně:

- 7,5 % vyšší z hodnot, $4535 \cdot 0,075 = 340,13 \frac{m}{s} > 133 \frac{m}{s}$,
- 7,5 % nižší z hodnot, $4402 \cdot 0,075 = 330,15 \frac{m}{s} > 133 \frac{m}{s}$,
- 7,5 % průměru hodnot, $\frac{4535+4402}{2} = 4469 \frac{m}{s}$; $4469 \cdot 0,075 = 335,18 \frac{m}{s} > 133 \frac{m}{s}$.

Beton lze tedy i podle rozdílu sousedních hodnot vyhodnotit jako rovnoměrný.



Obr. 2.37: Ukázka izovel sloupu I

Sloup II

U sloupu II byla naměřena výška $225 \pm 0,5$ cm, šířka $135,5 \pm 0,5$ cm a měřicí základna $30 \pm 0,5$ cm. Jako první byl opět proveden třikrát plošný sken 150kHz sondami na síti 5 x 5 bodů, 30 x 50 cm. Zjištěné rozdíly v průchodových rychlostech byly větší než u sloupu I. Ve spodní polovině se hodnoty pohybovaly mezi 4400–4600 $\frac{m}{s}$, zatímco v horní polovině se snižovaly směrem do rohů až pod 4200 $\frac{m}{s}$.

Variační součinitele všech tří měření se pohybují kolem 2 % a největší rozdíl hodnot v sousedních bodech A5 ($4167 \frac{m}{s}$) a B5 ($4373 \frac{m}{s}$) je 206 $\frac{m}{s}$.

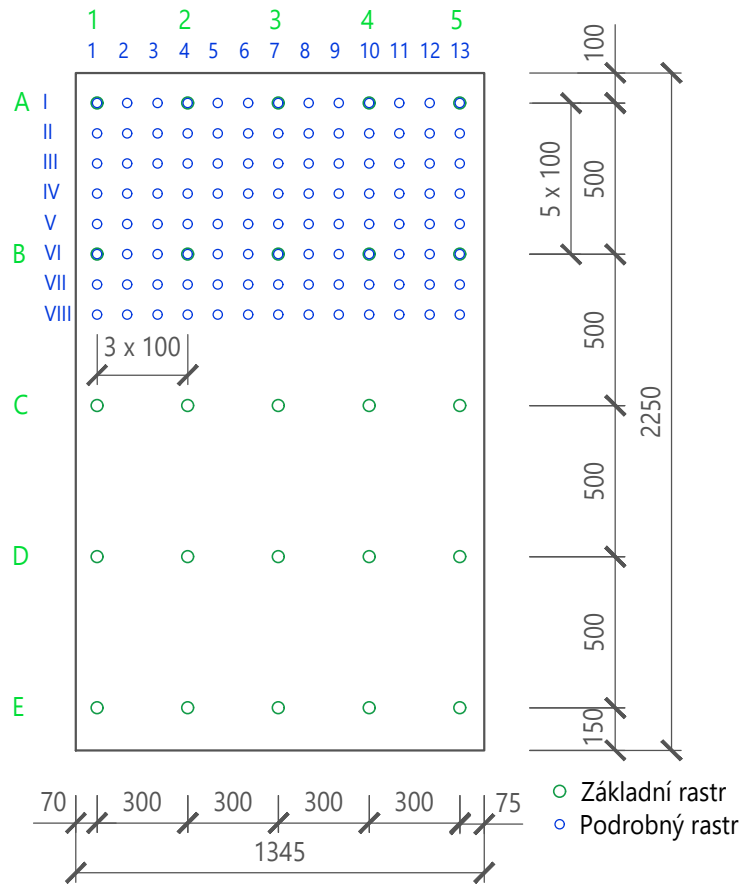
měření	Sloup I			Sloup II		
	1	2	3	1	2	3
BOD	průchodová rychlost [m/s]			průchodová rychlost [m/s]		
1	4630	4616	4604	4559	4580	4630
2	4673	4659	4647	4505	4491	4511
3	4637	4666	4618	4559	4573	4580
4	4595	4616	4583	4587	4608	4608
5	4546	4485	4507	4478	4484	4498
6	4644	4630	4633	4471	4451	4484
7	4588	4567	4542	4438	4458	4451
8	4602	4616	4576	4532	4545	4566
9	4574	4581	4562	4491	4458	4505
10	4471	4519	4535	4412	4431	4451
11	4471	4458	4461	4580	4552	4587
12	4512	4526	4569	4518	4539	4573
13	4532	4553	4542	4566	4545	4505
14	4532	4546	4535	4505	4518	4518
15	4532	4485	4521	4580	4580	4580
16	4498	4445	4501	4373	4348	4323
17	4485	4553	4542	4412	4451	4444
18	4532	4526	4521	4601	4566	4580
19	4525	4512	4562	4438	4399	4425
20	4623	4688	4597	4418	4444	4405
21	4581	4588	4548	4274	4261	4329
22	4637	4602	4555	4386	4386	4348
23	4539	4546	4501	4360	4342	4342
24	4519	4532	4535	4367	4354	4360
25	4478	4505	4402	4167	4167	4138
\bar{x}	4558	4561	4548	4463	4461	4470
s_x	57,5	63,6	43,8	86,9	90,3	94,6
v_x [%]	1,262	1,395	0,964	1,947	2,024	2,116

Obr. 2.38: Tabulka výsledků plošných skenů sloupů I a II

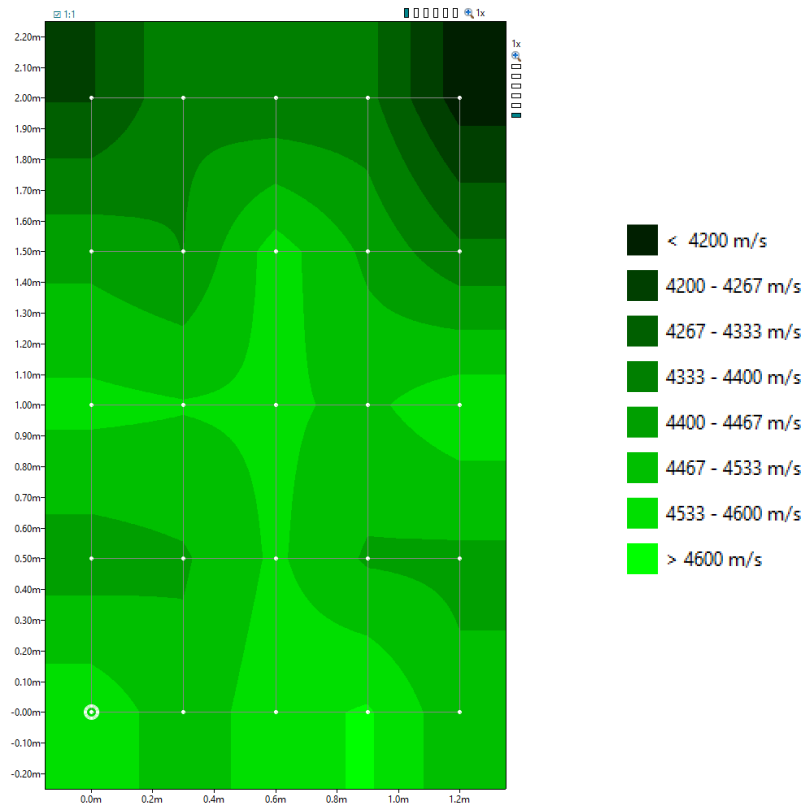
Při porovnání s možnými hraničními hodnotami vychází:

- 7,5 % vyšší z hodnot, $4373 \cdot 0,075 = 328 \frac{m}{s} > 206 \frac{m}{s}$,
- 7,5 % nižší z hodnot, $4167 \cdot 0,075 = 312,5 \frac{m}{s} > 206 \frac{m}{s}$,
- 7,5 % průměru hodnot, $\frac{4373+4167}{2} = 4270 \frac{m}{s}$; $4270 \cdot 0,075 = 320,3 \frac{m}{s} > 206 \frac{m}{s}$.

Podle obou kritérií je i beton ve sloupu II rovnoměrný.



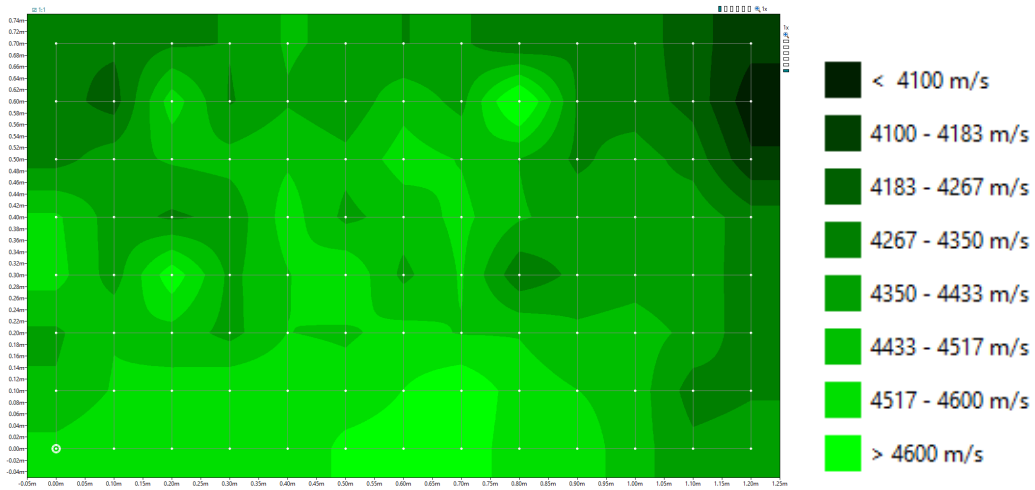
Obr. 2.39: Sloup II



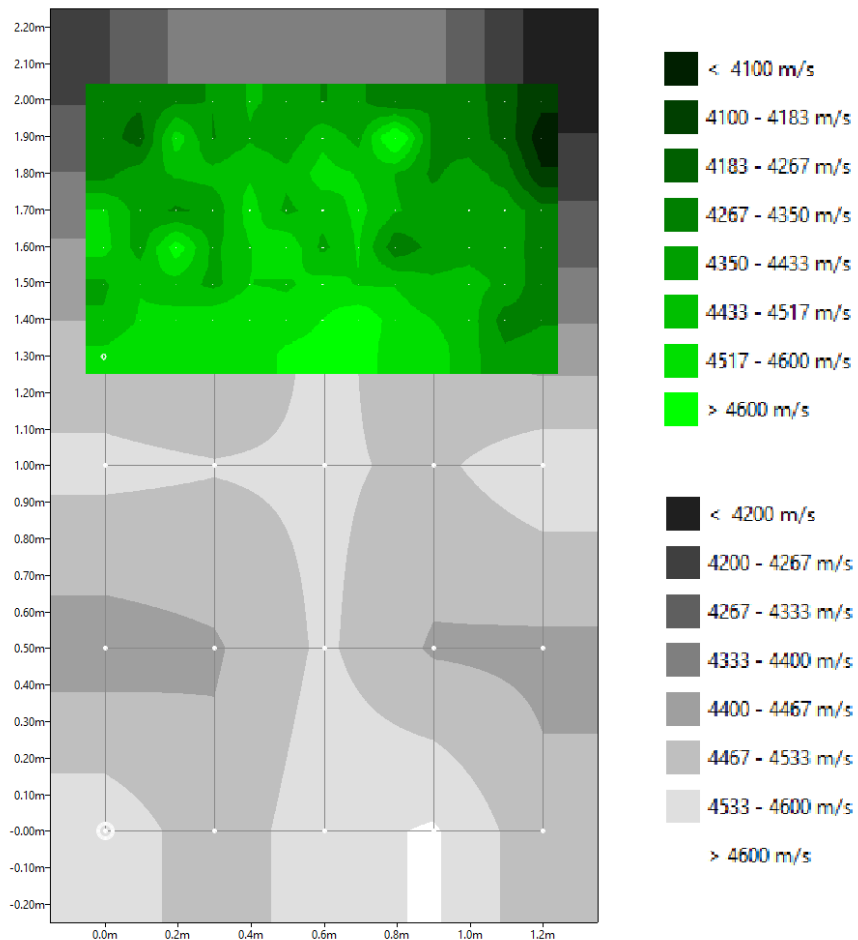
Obr. 2.40: Ukázka izovel základního měření sloupu II

Na základě plošných skenů bylo určeno ještě detailní proměření horní třetiny sloupu. Byl vynesena podrobný rastr 8 x 13 bodů v intervalech po 10 cm a proveden nový plošný sken sondami 150 kHz. Při podrobném měření byly výrazně lépe rozeznány nepravidelnosti v betonu, které mohou být následkem nedostatečného hutnění v horní části sloupu, případně jiných nepříznivých vlivů během betonáže.

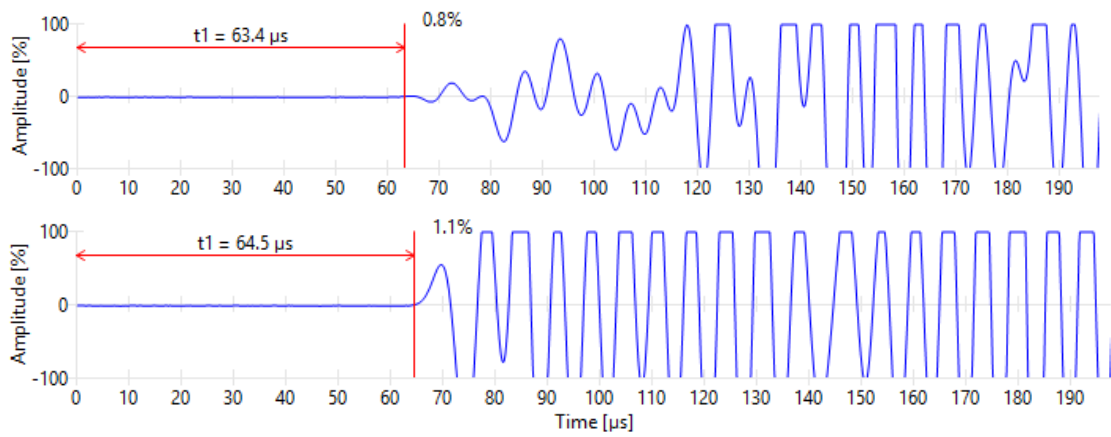
V nákresu izovel se rovněž objevila místa s výrazně vyšší rychlostí průchodu UZ oproti svému okolí, která při základním měření pozorována nebyla. Tyto oblasti jsou umístěny přesně v bodech měřicí sítě (konkrétně V-3 a II-9) a průběh vlnění detekovaný na snímači se v nich poněkud liší od průběhů v jiných bodech na stejné hladině rychlosti. Podle těchto ukazatelů se nabízí možnost, že se v těchto místech nachází části příčné výztuže sloupu (trmínky nebo spony) a měření proběhlo přímo skrz ně.



Obr. 2.41: Izovely podrobného měření sloupu II



Obr. 2.42: Izovely podrobného měření sloupu II v kontextu základního rastru



Obr. 2.43: Průběhy snímaného vlnění v bodech II-9 (nahore) a VIII-8 (dole)



Obr. 2.44: Průběh měření na sloupu II

3 Závěr

Cílem práce bylo popsat ultrazvukovou impulsovou metodu a následně vyzkoušet několik různých postupů při její aplikaci. Při měření byla použita různá nastavení přístroje Pundit PL-200 od firmy Proceq, přičemž byla hodnocena jejich využitelnost v různých situacích. Při zpracování výsledků byly srovnávány hodnoty dosažené různými postupy a rovněž bylo nastíněno několik nedostatků normy ČSN 73 2011 [2] v popisu vyhodnocení rovnoměrnosti betonu.

Při laboratorním měření byly na zkušební desce provedeny plošné skeny sondami o třech frekvencích a měření doby průchodu UZ v jednotlivých bodech. Výsledky byly zpracovány statistickou analýzou, ze které vyplynulo, že hodnoty z plošných skenů a měření v jednotlivých bodech jsou v rámci stejné frekvence srovnatelné a nastavení plošného tedy skenu nemá na výsledky vliv. Zároveň se ukázalo, že výsledky jednotlivých frekvencí se od sebe statisticky významně liší – tedy že použitý typ sond ovlivňuje naměřené hodnoty a je proto důležité řídit se při jeho výběru parametry konstrukce. Dále byla z předchozích výsledků vyhodnocena rovnoměrnost betonu. Na desce byl proveden také plošný sken odrazovou sondou, která soudě podle výsledků není pro tento typ měření vhodná tolik jako sondy průchodové.

Dalším předmětem laboratorního měření byl jádrový vývrt odebraný z betonového bloku na nádvoří Fakulty stavební. Z vývrtu byly upraveny tři vzorky o různé délce, na nich byly změřeny rychlosti průchodu UZ vlnění a následně provedena destruktivní zkouška pevnosti v tlaku. Odhad pevnosti v tlaku na základě průchodové rychlosti UZ podle normy ČSN 73 1371 [7] se ukázal jako neodpovídající naměřené reálné pevnosti, neboť v normě uvedený „kalibrační vztah“ pro výpočet pevnosti betonu v tlaku nebyl již několik desítek let aktualizován a je tedy určen pro betony z poloviny minulého století, nikoliv pro současné moderní betony.

UZ impulsová metoda byla dále aplikována na samotném betonovém bloku, a to na třech různých částech. U části A byla v oblasti, ze kterých pocházel jádrový vývrt pro předchozí měření, zjištěna velmi podobná hladina rychlosti průchodu vlnění. Lze tedy usoudit, že mezi měřením celé konstrukce a jádrového vývrtu není výrazný rozdíl. Dále byly v části A zkoumány možnosti lokalizace dutin v betonovém prvku, které lze považovat za uspokojivé. U všech tří částí bloku byl pak na základě výsledků plošných skenů beton vyhodnocen podle ČSN 73 2011 [2] jako nerovnoměrný.

Jako poslední byly měřeny sloupy v parkovací budově Žižkova. Na obou byl proveden plošný sken na základním rastru a vyhodnocena rovnoměrnost betonu (v obou sloupech je beton rovnoměrný), na druhém ze sloupů pak následoval ještě podrobný plošný sken v horní třetině, kde beton podle základního měření vykazoval horší vlastnosti. Na malé měřicí základně (300 mm) prokázal Pundit PL-200 velmi dobrou citlivost pro rozeznání míst s lepší a horší kvalitou betonu.

Literatura

- [1] HOBST, Leonard, ADÁMEK, Jiří, CIKRLE, Petr, SCHMID, Pavel. *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky*. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2005.
- [2] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí..* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [3] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [4] CIKRLE, Petr, ANTON, Ondřej. Vývoj nedestruktivních metod pro zkoušení betonu od roku 1990. *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. Praha: BETON TKS, s. r. o., 2015, sv. 3, str. 3–7, ISSN 1213-3116.
- [5] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [7] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [8] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [9] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [10] ČSN 73 1376. *Radiografie betonových konstrukcí a dílců*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1975.
- [11] ČSN 73 1375. *Radiometrické zkoušení objemové hmotnosti a vlhkosti*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1971.
- [12] CIKRLE, Petr, KOCÁB, Dalibor, POSPÍCHAL, Ondřej. Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. Praha: BETON TKS, s. r. o., 2013, sv. 3, str. 74–79, ISSN 1213-3116.

- [13] BROŽOVSKÝ, Jiří, BODNÁROVÁ, Lenka. Využití ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení míry degradace betonu vystaveného účinkům vysokých teplot. *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. Praha: BETON TKS, s. r. o., 2012, sv. 6, str. 102–105, ISSN 1213-3116.
- [14] BROŽOVSKÝ, Jiří. K problematice určování pevnosti betonu v konstrukci z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu podle ČSN EN13791. *BETON – technologie, konstrukce, sanace*. Praha: BETON TKS, s. r. o., 2012, sv. 1, str. 80–83, ISSN 1213-3116.
- [15] ČSN 73 1371. *Ultrazvuková impulzová metoda skúšania betónu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1981.
- [16] SCHMID, Pavel. *Modul BI02 – M02 Stavební zkušebnictví* Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2004.
- [17] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [18] PROCEQ SA. *Pundit PL-2 Sales Flyer*. [online] Švýcarsko: Proceq SA, 2014 [cit. 23. 5. 2018]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [19] PROCEQ SA. *Pundit 2 Operating Instructions*. [online] Švýcarsko: Proceq SA, 2017 [cit. 23. 5. 2018]. Dostupné z: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%202_Operating%20Instructions_English.pdf

Seznam symbolů, veličin a zkratk

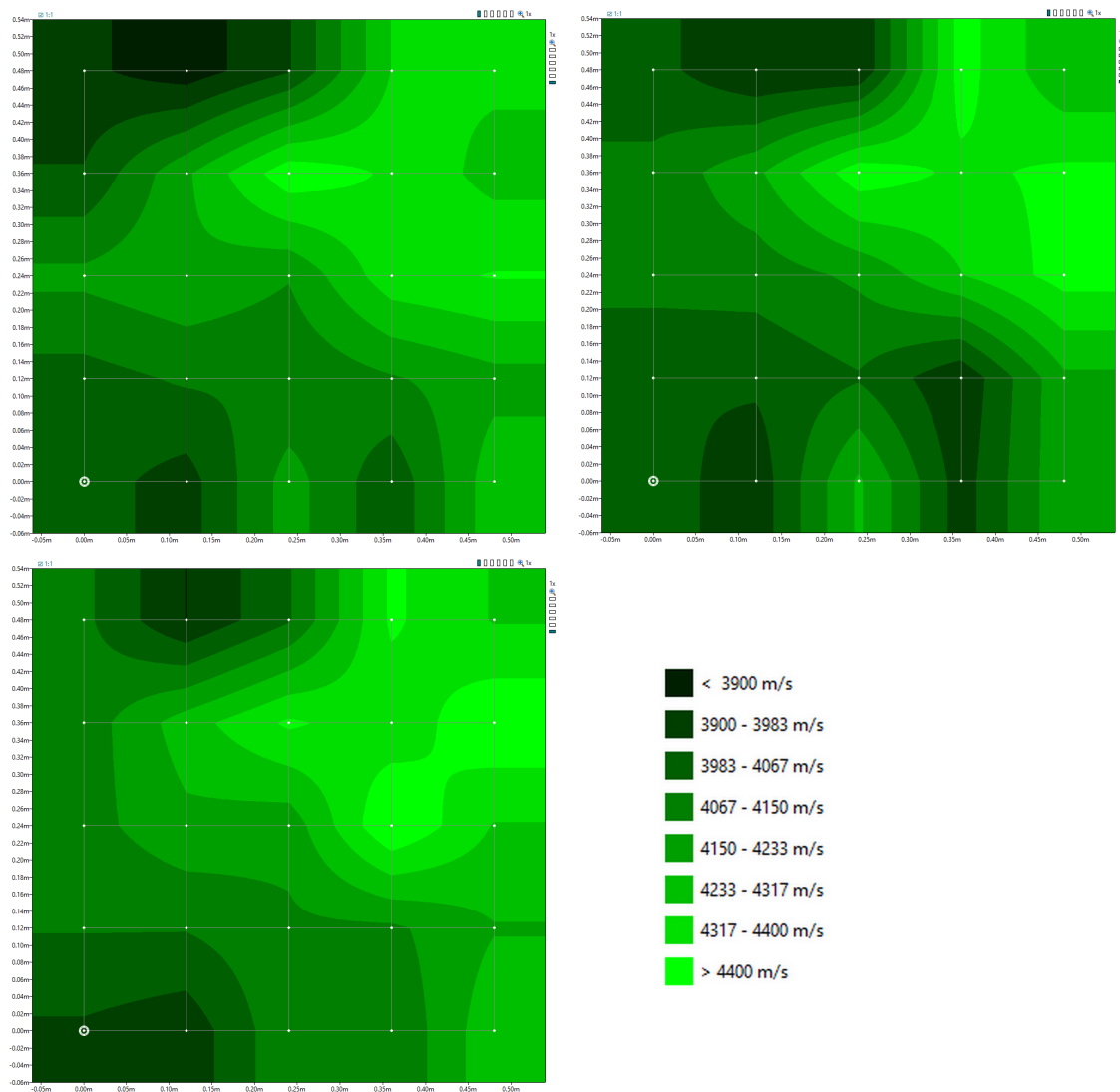
v_L	rychlost impulsu [$\frac{km}{s}$]
L	délka měřicí základny [mm]
T	čas, za který impuls projde měřicí základnou [μs]
t_{kor}	korekce složená z mrtvého času přístroje a rozdílu času šíření impulsů zjištěného při kalibraci přístroje [μs]
t_e	doba průchodu ultrazvuku etalonem [μs]
E	časová charakteristika etalonu [μs]
E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu [MPa]
ρ	objemová hmotnost betonu [$\frac{kg}{m^3}$]
k	součinitel rozměrnosti prostředí [–]
k_1	součinitel pro jednorozměrné prostředí [–]
k_2	součinitel pro dvojrozměrné prostředí [–]
k_3	součinitel pro trojrozměrné prostředí [–]
ν_{cu}	Poissonův koeficient pro daný materiál [–]
T_{hut}	poměr objemové hmotnosti k měrné hmotnosti zatvrdlého betonu [%]
a, b	součinitele pro daný beton pro výpočet hutnosti [–]
ρ_{hut}	měrná hmotnost hutných složek betonu [$\frac{kg}{m^3}$]
v_{L3}	impulsová rychlost v trojrozměrném prostředí [$\frac{km}{s}$]
$\delta f_1, \dots, \delta f_n$	jednotlivé odchylky od základní křivky [MPa]
f_v	základní křivka pro ultrazvukovou metodu
v	impulsová rychlost [$\frac{km}{s}$]
Δf	posun základní křivky [MPa]
t_0	doba průchodu impulsu měřicí základnou [μs]
ν_x	variační součinitel [%]
s_x	výběrová směrodatná odchylka
\bar{x}	aritmetický průměr souboru hodnot
n	počet měření nebo těles
x_i	jednotlivé hodnoty
σ_x	obyčejná směrodatná odchylka
f_{be}	odhad pevnosti betonu v tlaku s nezaručenou přesností [MPa]
f_{cl}	pevnost betonu v tlaku zjištěná ve zkušebním lisu [MPa]
f_{cel}	pevnost v tlaku s nezaručenou přesností stanovená UZ impulsovou metodou [MPa]
α	součinitel vztahu mezi skutečnou pevností v tlaku a jejím odhadem [–]
σ_x	obyčejná směrodatná odchylka
v_{blok}	průměrná rychlost průchodu v bloku v okolí vývrtu X [$\frac{km}{s}$]

<i>v_{vývrt}</i>	průměrná rychlost průchodu naměřená na vývrtu X [$\frac{km}{s}$]
ŽB	železobeton
NDT	nedestruktivní
UZ	ultrazvuk

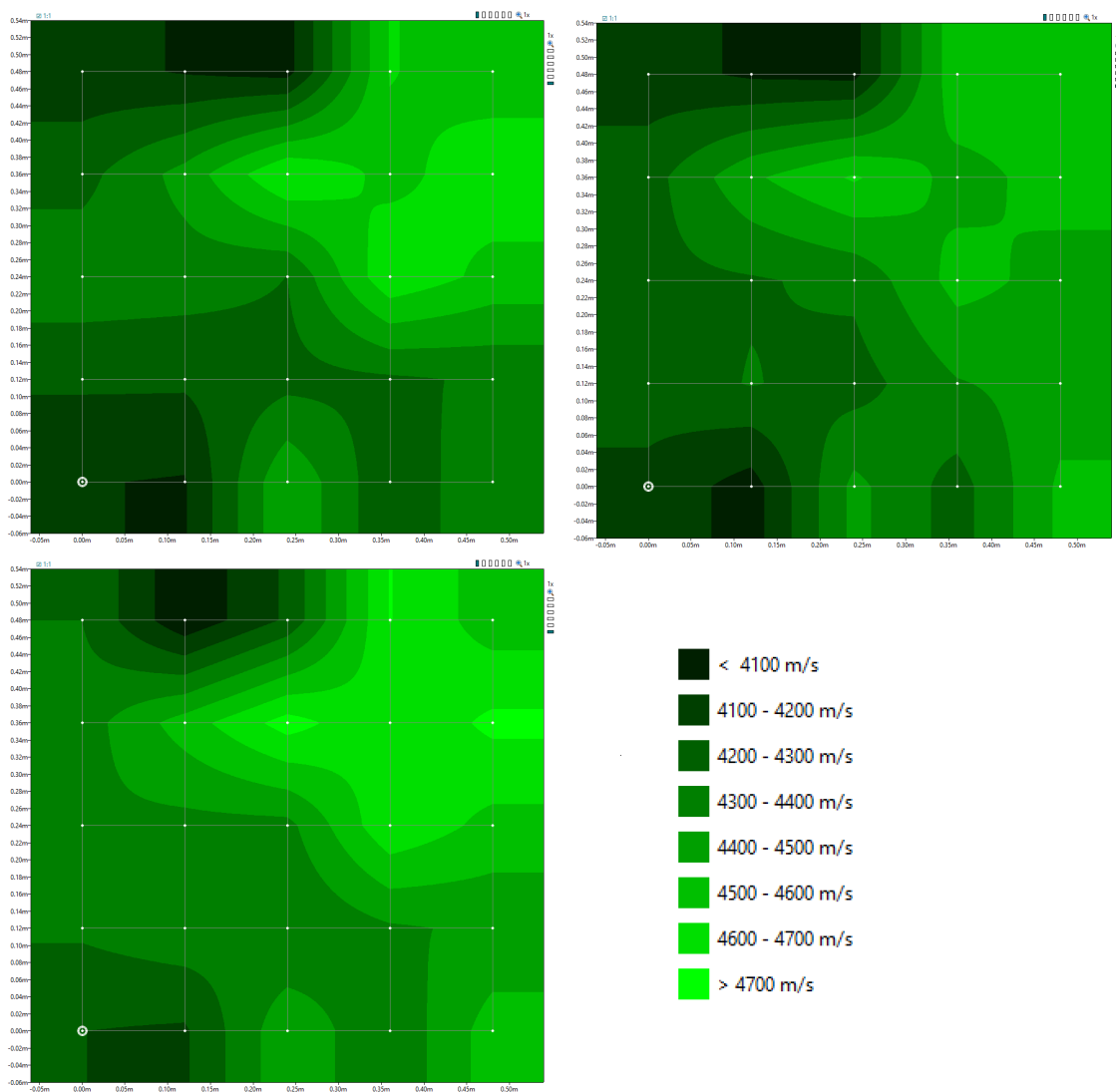
Seznam příloh

A Zkušební betonová deska	71
B Betonový blok a jádrový vývrt	77
C Sloupy parkovací budovy Žižkova	86

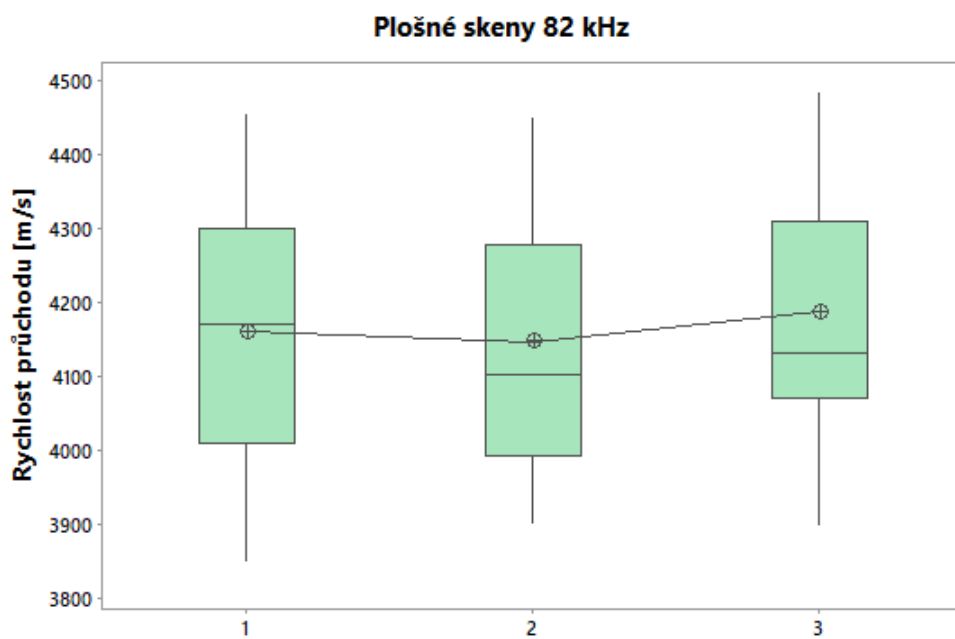
A Zkušební betonová deska



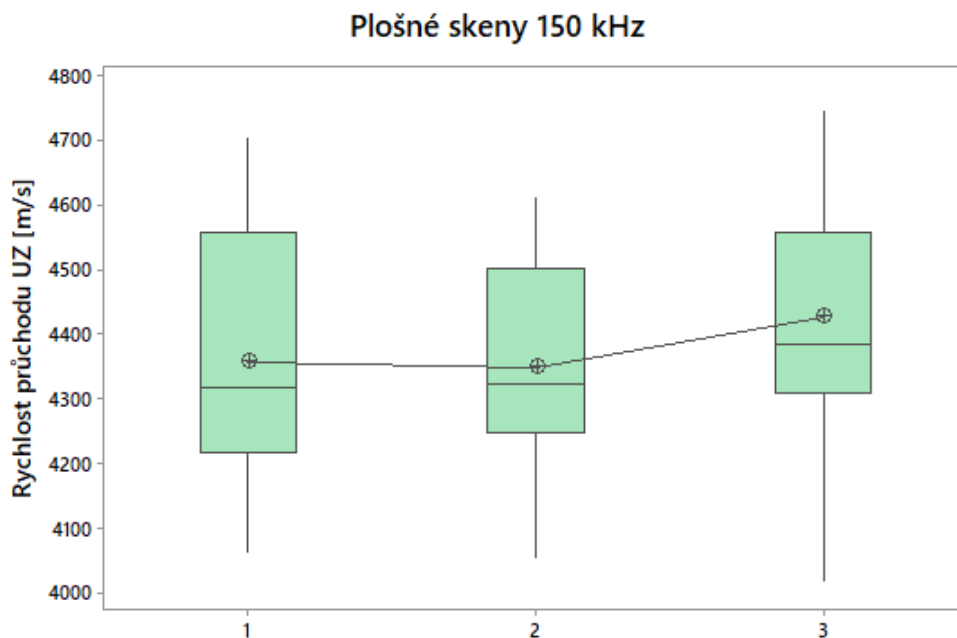
Obr. A.1: Izovely plošných skenů provedených sondami 82 kHz na zkušební desce



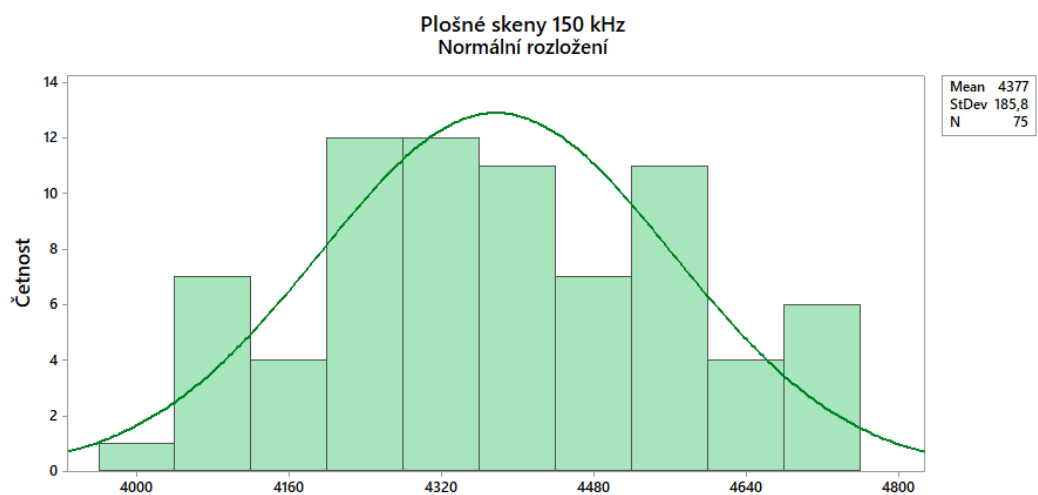
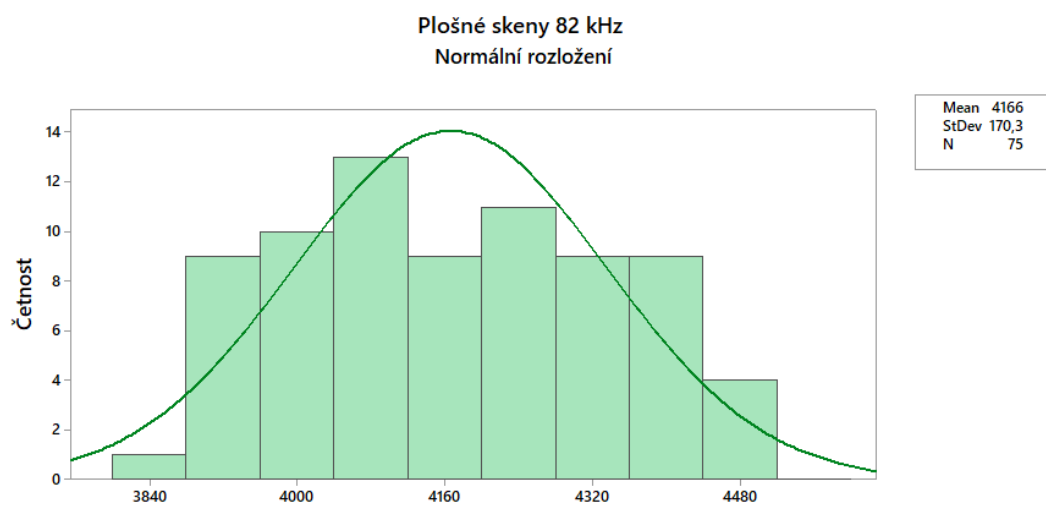
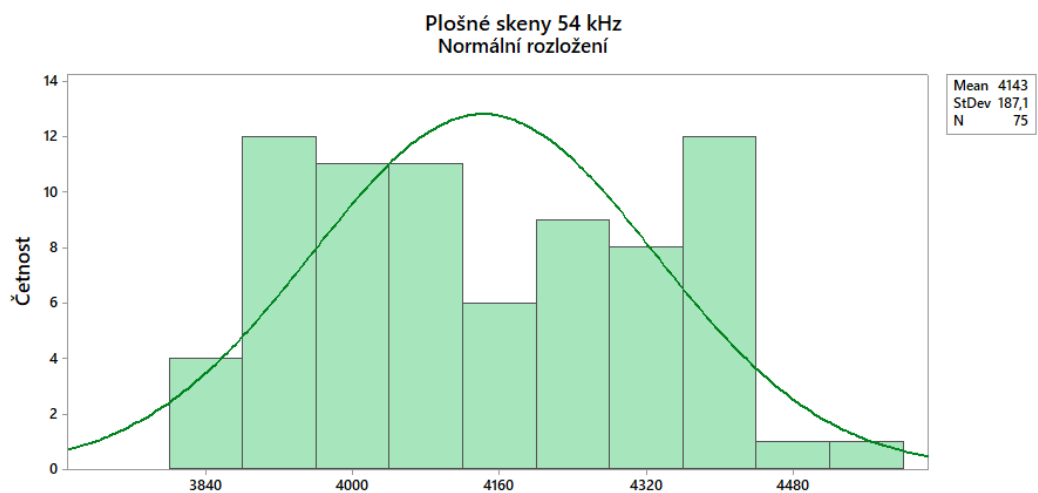
Obr. A.2: Izovely plošných skenů provedených sondami 150 kHz na zkušební desce



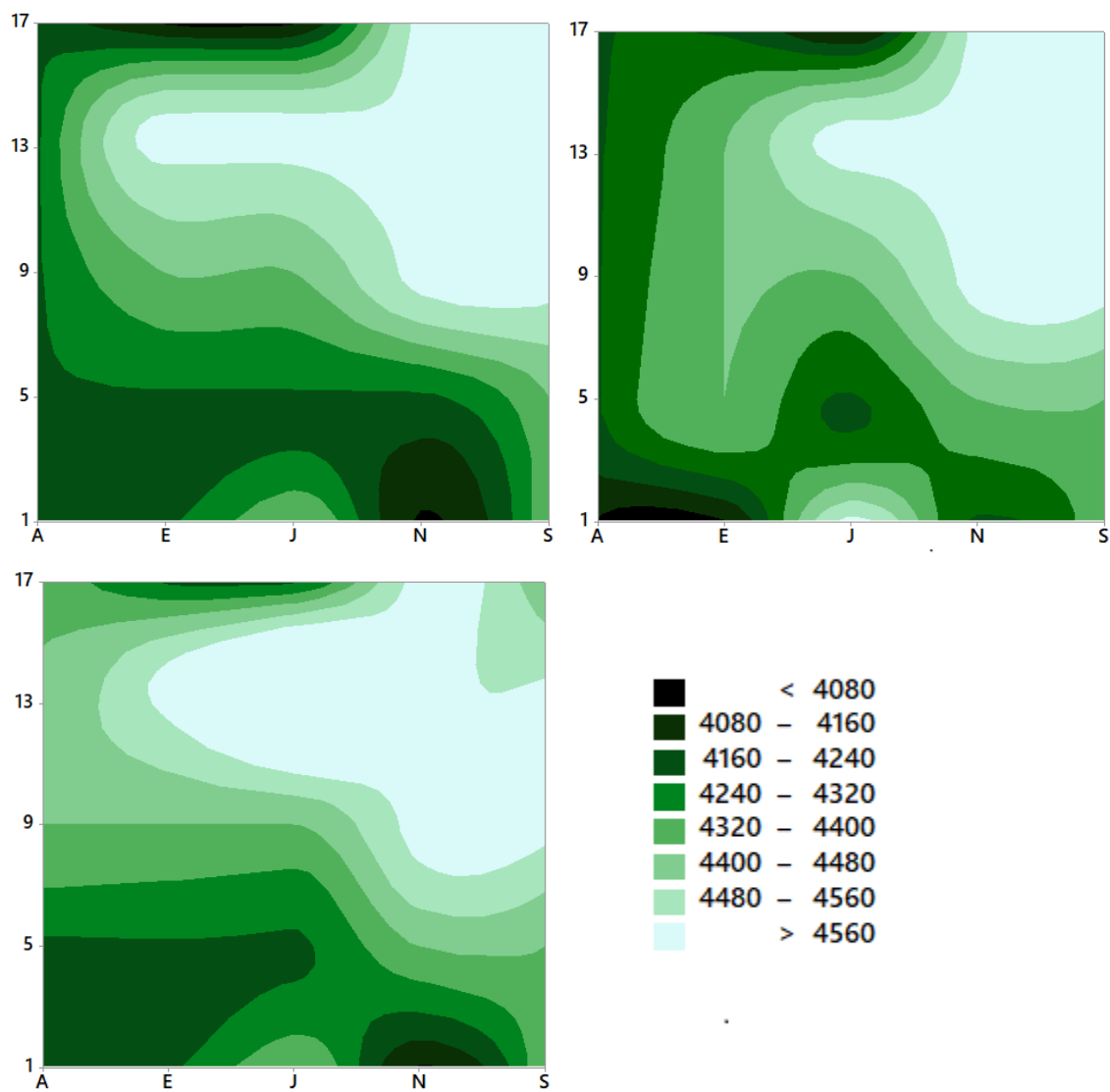
Obr. A.3: Krabicový graf tří plošných skenů sondami o frekvenci 82 kHz



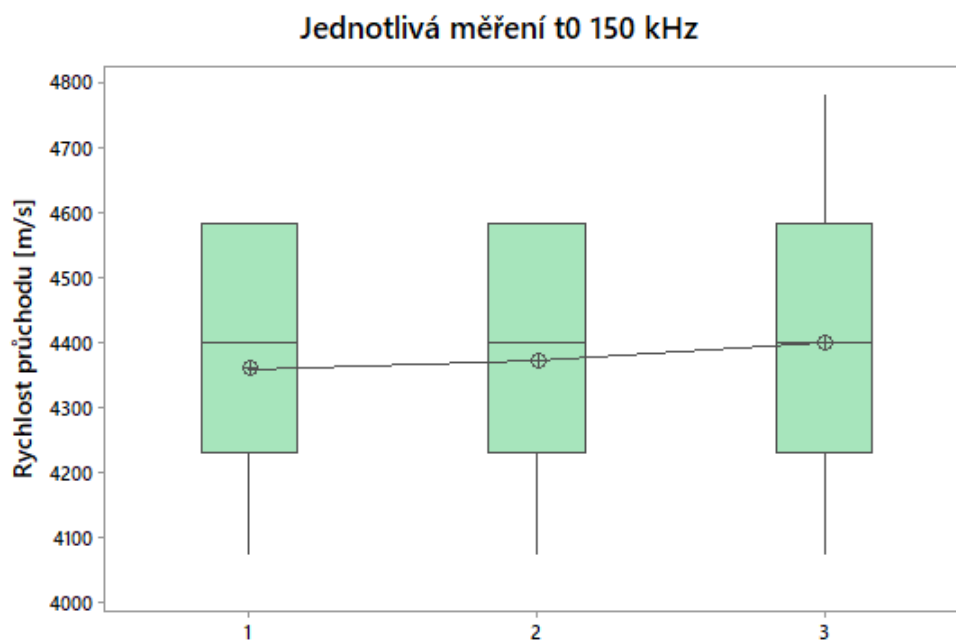
Obr. A.4: Krabicový graf tří plošných skenů sondami o frekvenci 150 kHz



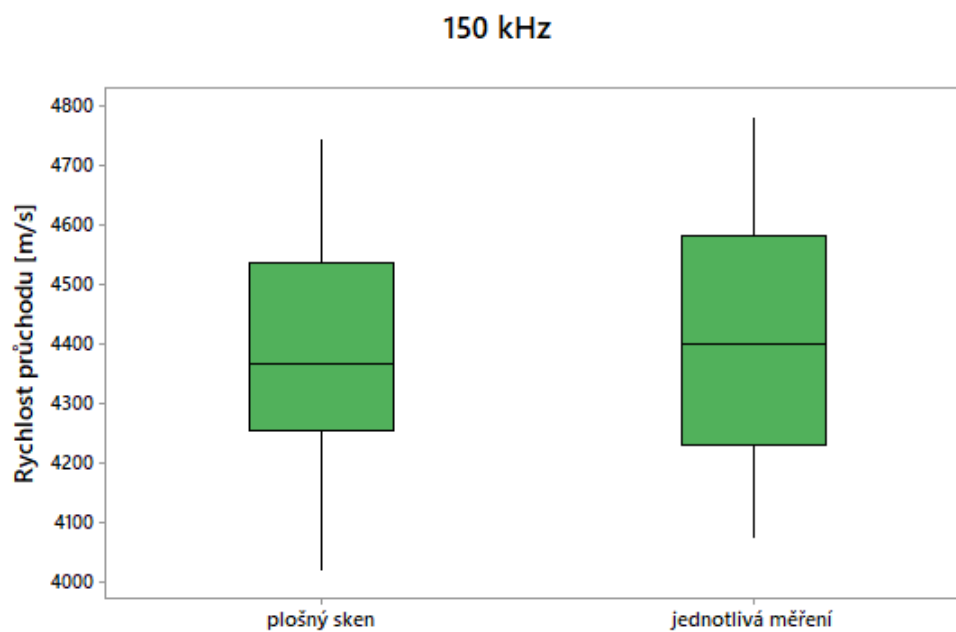
Obr. A.5: Histogramy hodnot naměřených při plošných skenech



Obr. A.6: Izovely vytvořené pro jednotlivá měření doby průchodu při 150 kHz



Obr. A.7: Krabicový graf trojího měření t_0 v jednotlivých bodech frekvencí 150 kHz



Obr. A.8: Krabicový graf porovnávající plošné skeny a měření t_0 v jednotlivých bodech frekvencí 150 kHz

B Betonový blok a jádrový vývrt



Obr. B.1: Betonový blok a ověřování jeho rozměrů



Obr. B.2: Odběr jádrového vývrtnu



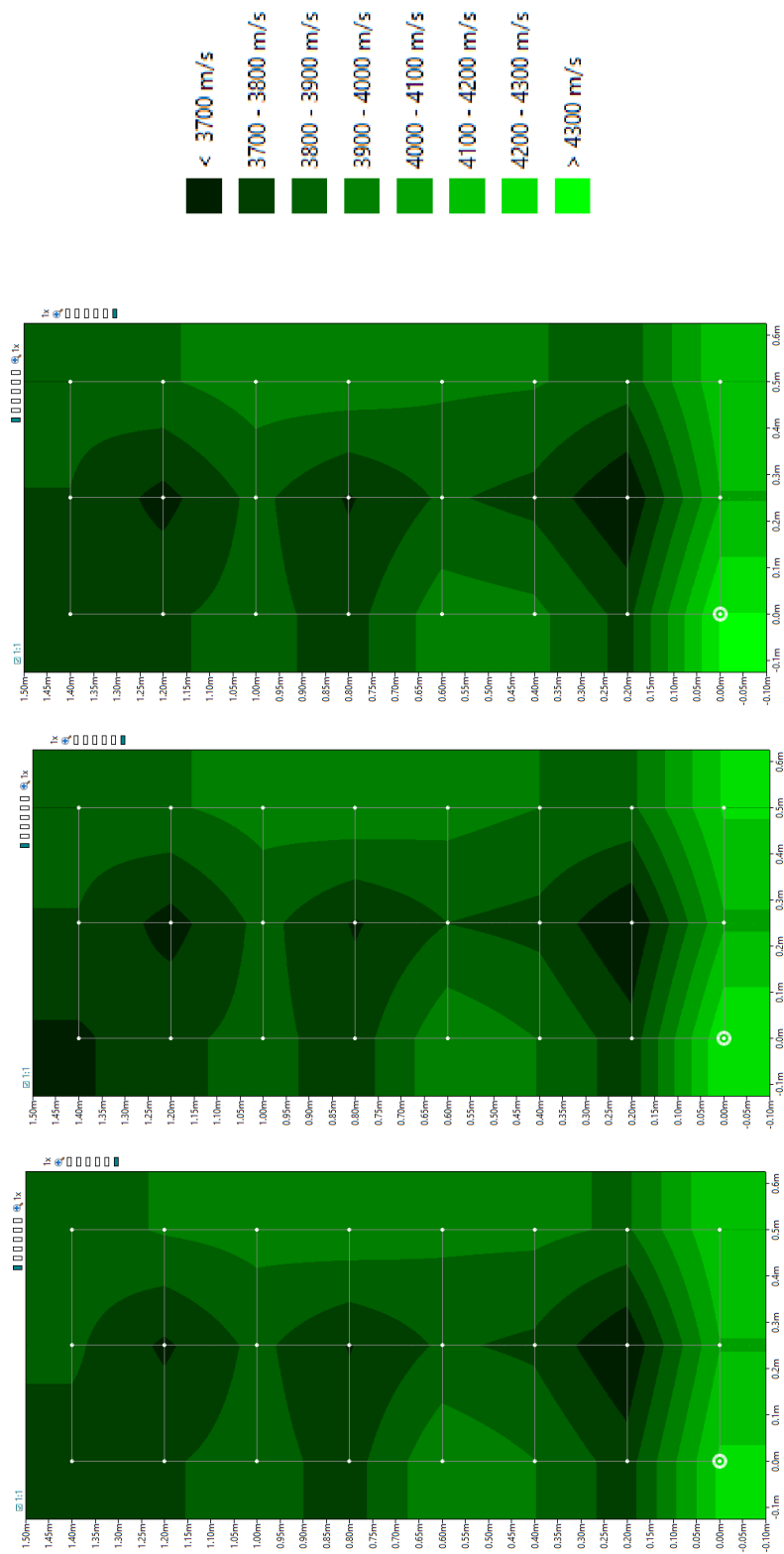
Obr. B.3: Zkušební vzorky z jádrového vývrtnu



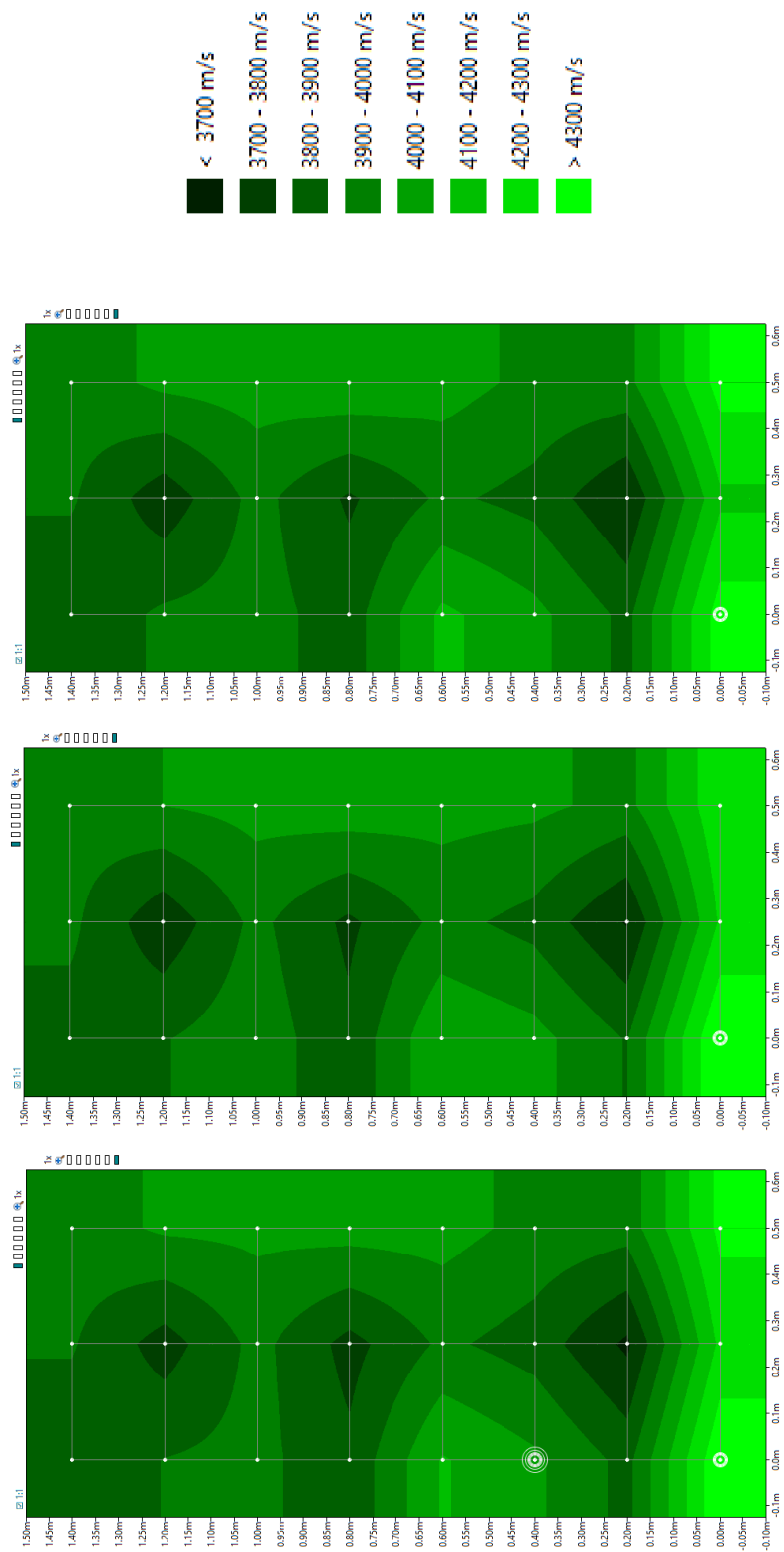
Obr. B.4: Měření vzorku V1 UZ impulsovou metodou



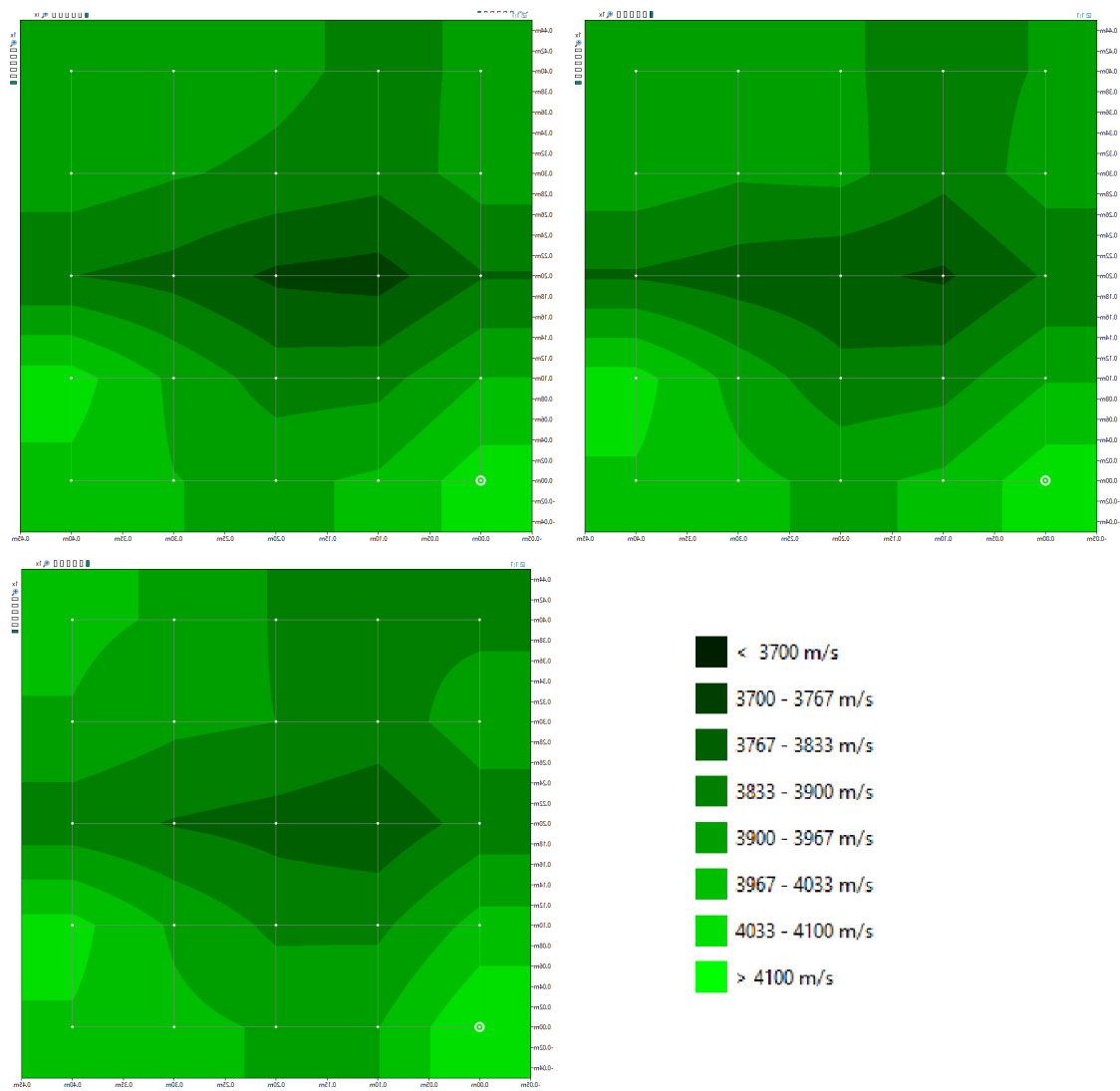
Obr. B.5: Vzorek V1 před a po zkoušení ve zkušební lisu



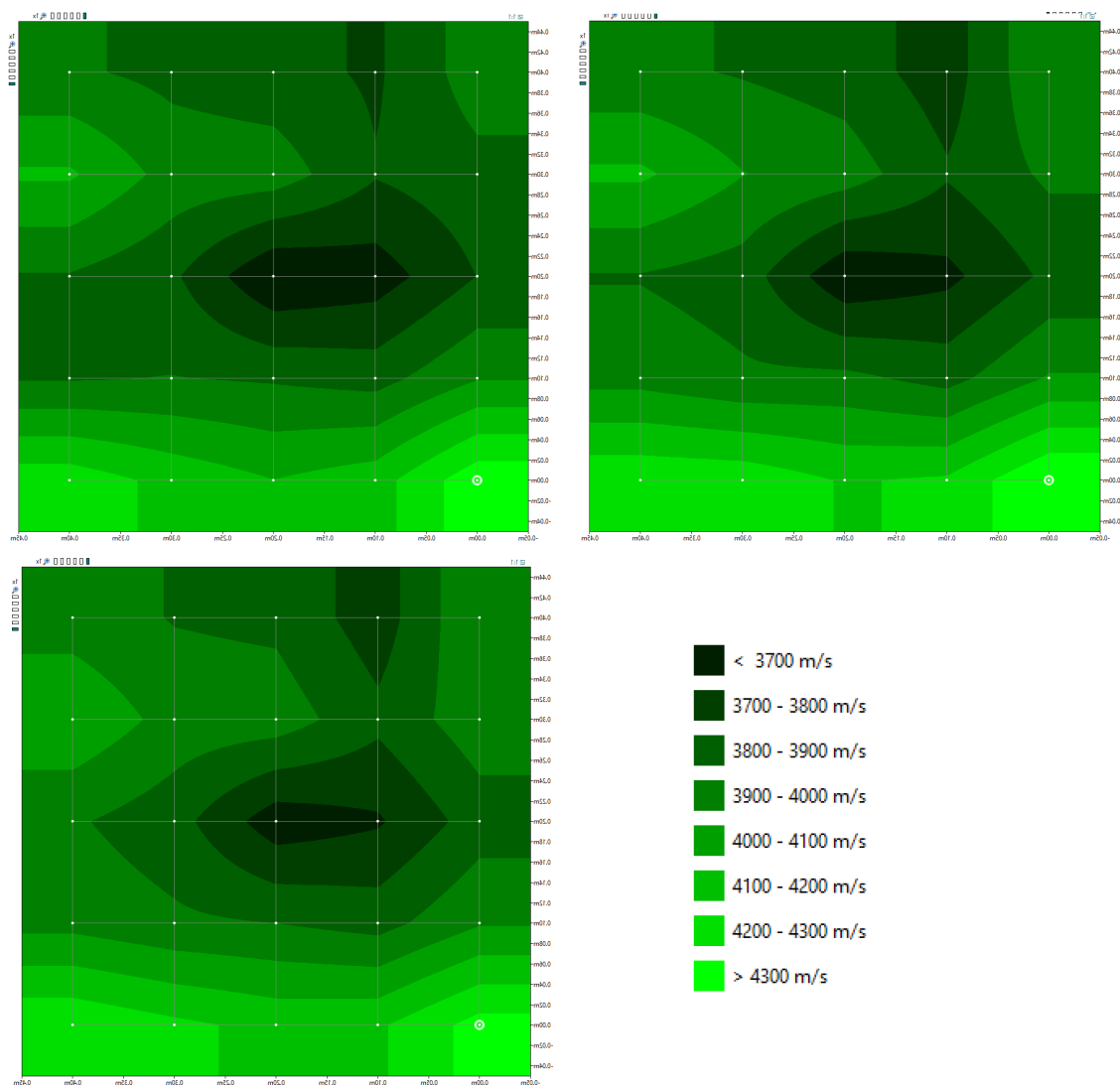
Obr. B.6: Izovely plošných skenů provedených sondami 54 kHz na bloku A



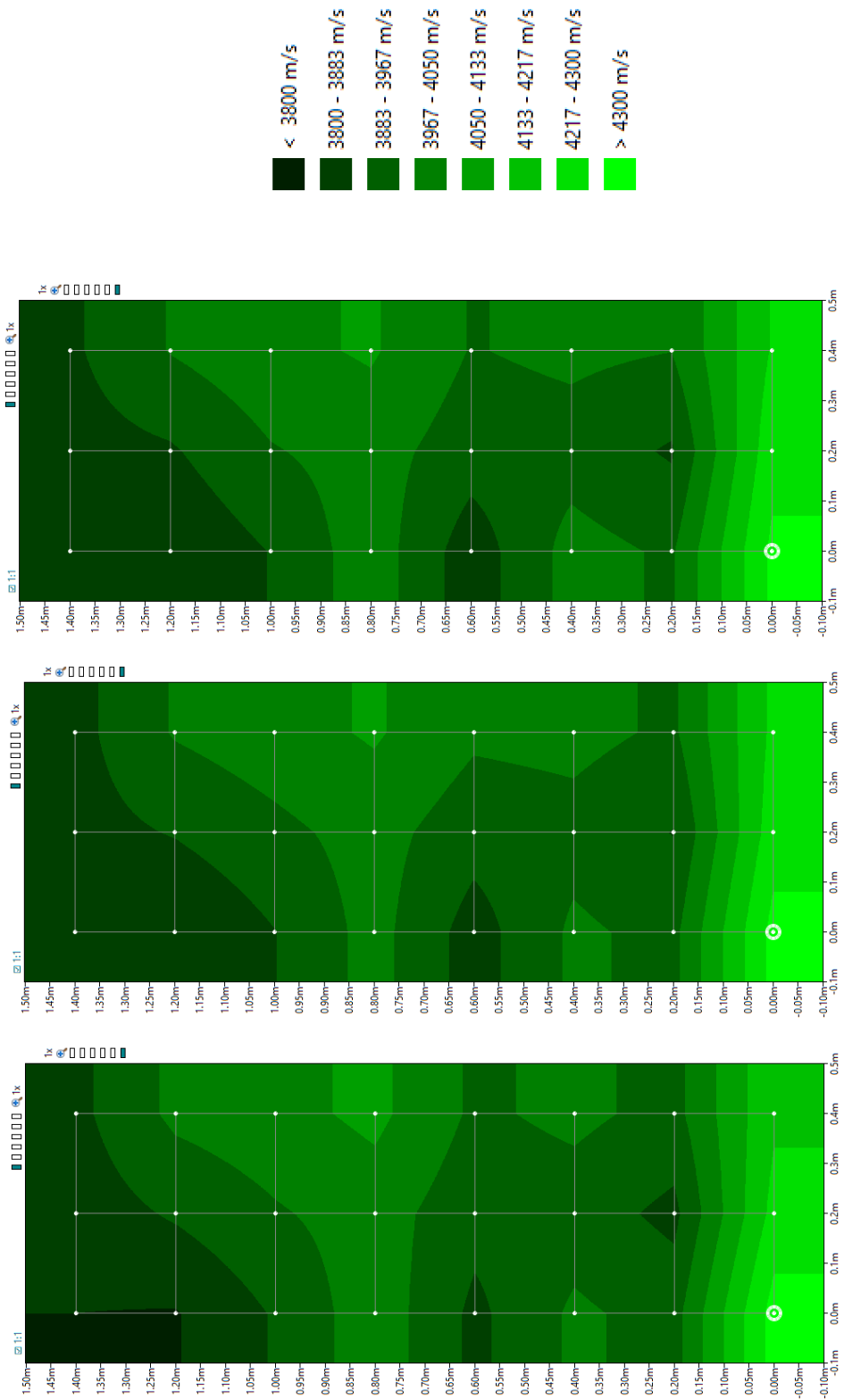
Obr. B.7: Izovely plošných skenů provedených sondami 150 kHz na bloku A



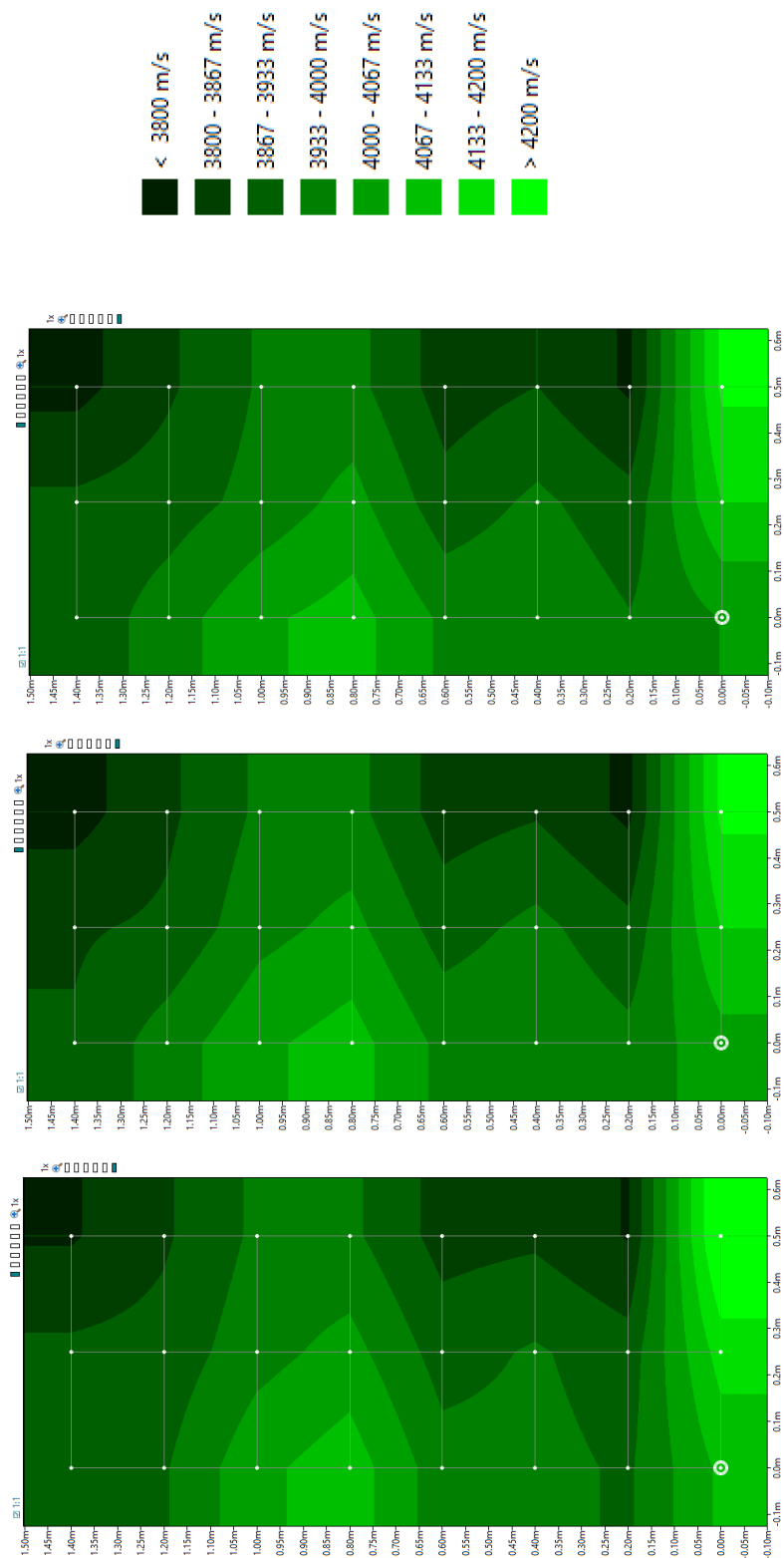
Obr. B.8: Izovely podrobných plošných skenů na bloku A – střed



Obr. B.9: Izovely podrobných plošných skenů na bloku A – dole

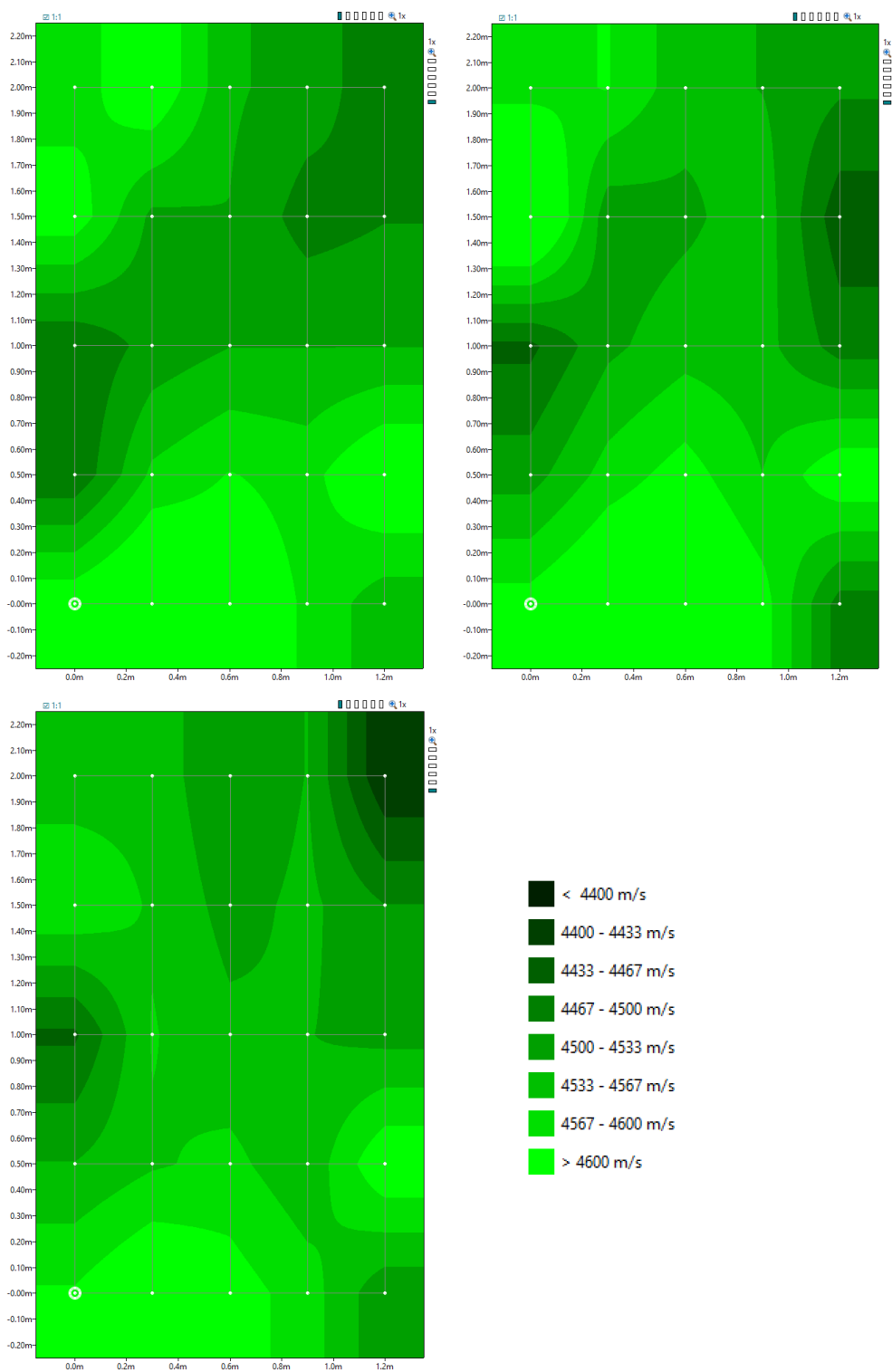


Obr. B.10: Izovely plošných skenů provedených sondami 54 kHz na bloku B

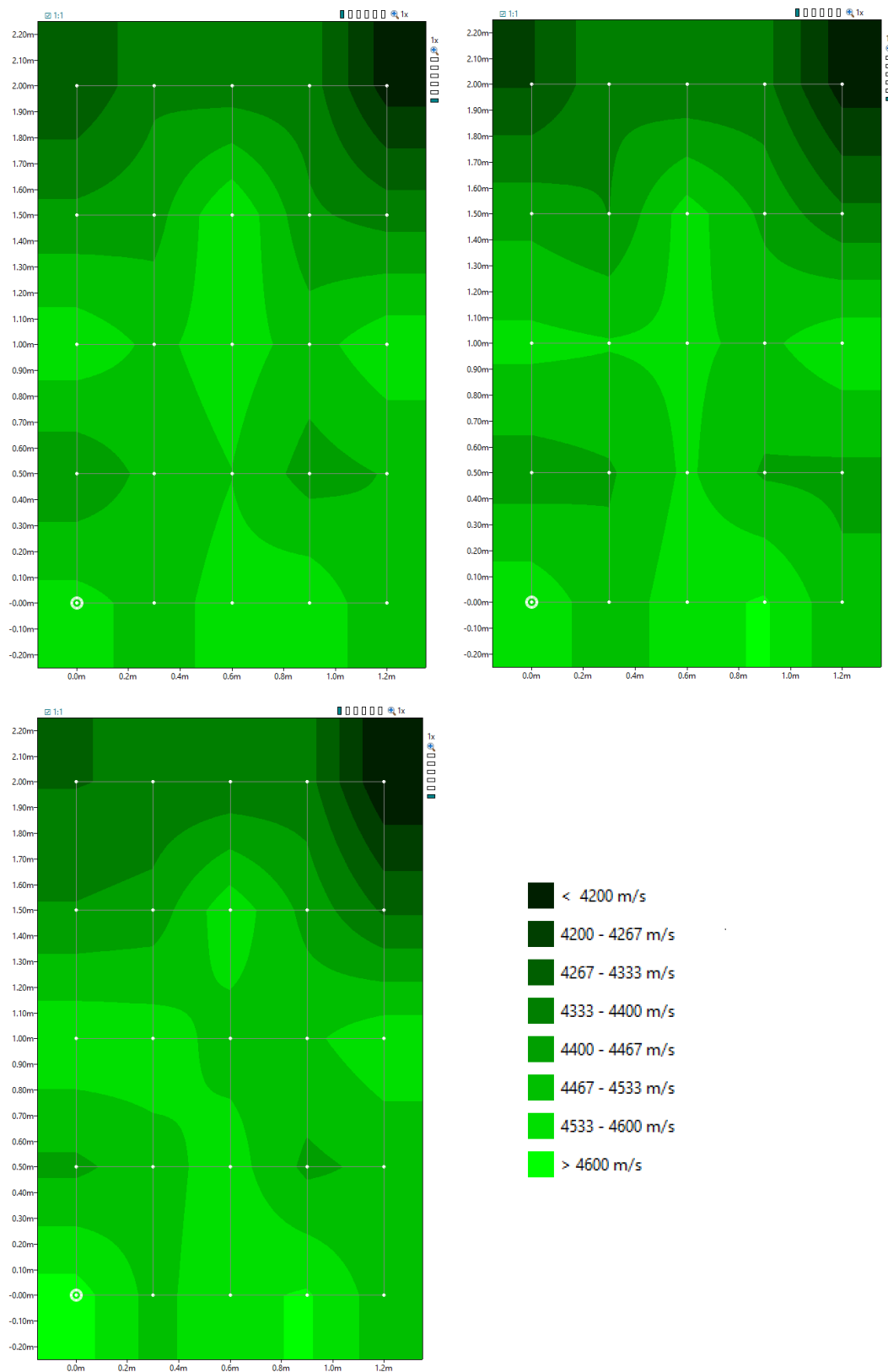


Obr. B.11: Izovely plošných skenů provedených sondami 54 kHz na bloku C

C Sloupy parkovací budovy Žižkova



Obr. C.1: Izovely plošných skenů provedených sondami 150 kHz na sloupu I



Obr. C.2: Izovely plošných skenů provedených sondami 150 kHz na sloupu II