



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# DIAGNOSTIKA BETONOVÉHO SOUVRSTVÍ METODOU PULSE ECHO

DIAGNOSIS OF CONNECTED CONCRETE LAYERS BY PULSE ECHO METHOD

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Lokos

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

BRNO 2023

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav stavebního zkušebnictví  
Student: **Ondřej Lokos**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

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

## **Diagnostika betonového souvrství metodou pulse echo**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce spočívá v měření a vyhodnocení vlastností povrchu parkoviště pro kamiony, tzv. Whitetoppingu. Na vybraném parkovišti bude metodou pulzního echa stanovena přídržnost horní betonové vrstvy k podkladní asfaltobetonové vrstvě. Počet měřených polí - cca 600 ve 3 místech, vybrané plochy budou změřeny podrobně. Metoda bude ověřena na modelu beton-beton pomocí jádrových vývrtů.

### **Cíle a výstupy bakalářské práce:**

Teoretická část: Rešerše literatury - princip, metodika a možnosti využití metody pulzního echa pro diagnostiku betonových konstrukcí, se zaměřením na tloušťku konstrukce a delaminace vrstev.

Praktická část:

Provedení praktických měření in situ na parkovišti pro kamiony přístrojem Pundit 250 Array. Zpracování výsledků měření, statistické vyhodnocení. Ověření metody na zkušebním bloku. Laboratorní zkoušky betonu. Zpracování výsledků zkoušek, analýza výsledků, závěr.



**Seznam doporučené literatury a podklady:**

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

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

Schabowicz, K: Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example. In: Archives of civil and mechanical engineering 14, Elsevier, 2014.

Proceq SA: Pundit 2: Operating Instruction

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2022

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## **Abstrakt**

Tato studie se zabývá měřením přídržnosti horní betonové vrstvy k podkladní vrstvě na parkovišti pro kamiony. Využívá se metody pulse echo k zjištění delaminací whitetoppingu. Cílem práce je ověřit účinnost této metody a její přesnost při měření přídržnosti betonové vrstvy. Výsledky měření jsou porovnány s výsledky měření na zkušebním bloku. Tato studie přispívá k lepšímu porozumění soudržnosti betonových vrstev a může pomoci při vylepšení návrhu a údržby parkovišť pro kamiony.

## **Klíčová slova**

beton, asfaltobeton, ultrazvuk, pulzní echo, zkoušení, přídržnost, whitetopping

## **Abstract**

This study deals with the measurement of the adhesion of the upper concrete layer to the underlying layer in a truck parking lot. The pulse echo method is used to detect delaminations of whitetopping. The aim of the work is to verify the efficiency of this method and its accuracy in measuring the adhesion of the concrete layer. The results of the measurements are compared with the results of the measurements on the test block. This study contributes to a better understanding of the coherence of the concrete layers and may help in improving the design and maintenance of truck parking lots.

## **Keywords**

Concrete, Asphalt concrete, Ultrasound, Pulse echo, Testing, Adhesion, Whitetopping

## **Bibliografická citace**

LOKOS, Ondřej. *Diagnostika betonového souvrství metodou pulse echo*. Brno, 2023.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

## **Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy závěrečné práce**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Diagnostika betonového souvrství metodou pulse echo* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2023

---

Ondřej Lokos  
autor

## **Prohlášení o původnosti závěrečné práce**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Diagnostika betonového souvrství metodou pulse echo* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

---

Ondřej Lokos  
autor

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Petru Cikrlovi, Ph.D., za jeho vstřícnost, odborné rady a neustálou ochotu pomoci při konzultacích. Dále bych rád poděkoval Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D., za jeho cennou pomoc při měřeních.

Nakonec, ale zcela jistě ne nejméně důležitě, bych rád vyjádřil své upřímné díky své rodině za jejich trpělivost, podporu a pochopení během celého procesu psaní této práce. Bez jejich podpory bych nebyl schopen dokončit tento důležitý milník ve svém studiu.

# Obsah

1	Úvod a cíle práce.....	3
2	Ultrazvuková metoda pulse-echo .....	4
2.1	Princip metody pulse-echo.....	4
2.2	Měřicí přístroje.....	5
2.2.1	Vývoj pulse-echa .....	5
2.2.2	Možnost zobrazení výstupu dat .....	6
2.2.3	Příklady přístrojů .....	8
2.3	Použití UPE ve stavebnictví .....	11
3	Whitetopping.....	13
3.1	Historie whitetoppingu .....	13
3.2	Rozdělení whitetoppingu .....	14
3.2.1	Tradiční whitetopping .....	15
3.2.2	Tenký whitetopping.....	16
3.2.3	Ultra tenký whitetopping .....	16
3.3	Návrh whitetoppingu .....	17
3.3.1	Přednosti whitetoppingu.....	17
3.3.2	Betonová směs .....	18
3.3.3	Konstrukční zásady.....	18
3.4	Poruchy .....	22
3.4.1	Poruchy HMA .....	22
3.4.2	Poruchy whitetoppingu .....	23
3.4.3	Zkoušení whitetoppingu.....	23
4	Experimentální práce in situ – parkoviště Ldná .....	24

4.1	Konstrukční řešení parkoviště .....	24
4.2	Ověření soudržnosti WT .....	26
4.2.1	Přehled probíhajících měření .....	26
4.2.2	Měření metodou pulse-echo.....	26
4.2.3	Způsob vyhodnocení měření metodou pulse-echo.....	27
4.2.4	Výstupy měření – typické příklady .....	28
4.2.5	Úvahy poruch .....	32
5	Ověřovací měření na zkušebním bloku.....	36
5.1	Měření metodou pulse echo .....	38
5.2	Ověření na jádrových vývrtech.....	39
5.2.1	Zkušební tělesa.....	43
5.2.2	Zkoušky na tělesech .....	43
6	Závěr .....	45
7	Seznamy.....	46
7.1	Seznam použitých zdrojů.....	46
7.2	Seznam použitých zkratk a veličin .....	50
7.3	Seznam obrázků .....	52
7.4	Seznam tabulek .....	55
7.5	Seznam příloh.....	56



# 1 Úvod a cíle práce

Údržba a opravy asfaltových vozovek jsou nevyhnutelnou součástí správy a udržování dopravní infrastruktury. S postupujícím opotřebením a stárnutím vozovek se často objevují různé poruchy, jako jsou trhliny, propady nebo vyjeté koleje. Zajištění bezpečnosti a pohodlí silničního provozu vyžaduje efektivní metody rekonstrukce a sanace těchto vozovek.

V posledních letech se metoda whitetoppingu stává v mezinárodním měřítku stále populárnější volbou pro rekonstrukci asfaltových vozovek. Whitetopping představuje technologii, která spočívá v aplikaci vrstvy betonu na stávající asfaltovou vozovku. Tato kombinace materiálů nabízí řadu výhod, jako je zvýšená životnost, lepší odolnost vůči zatížení a snížená potřeba častých oprav.

Avšak i přes své výhody a rostoucí popularitu v zahraničí zatím whitetopping není v České republice příliš často využívanou metodou pro rekonstrukce vozovek. Existuje zde prostor pro prozkoumání a zhodnocení této metody s ohledem na místní podmínky a případné přínosy, které by mohla přinést v českém kontextu.

Cílem této bakalářské práce je tedy detailní zkoumání a zhodnocení metody whitetoppingu jako vhodného způsobu pro rekonstrukci asfaltových vozovek. Zaměříme se na analýzu jejich výhod a nevýhod, hodnocení její efektivity, a také na posouzení možnosti jejího uplatnění v českém prostředí. Důkladným prostudováním dostupných informací a prováděním případových studií se snažíme přinést ucelený pohled na whitetopping jako potenciální metodu rekonstrukce vozovek v České republice.

V rámci hodnocení whitetoppingu je zásadním faktorem i soudržnost jednotlivých vrstev v rekonstruovaném vozovém povrchu. Pro posouzení stavu soudržnosti a kvality spoje mezi vrstvami se v této práci využívá metoda pulse echo. Metoda pulse echo umožňuje neinvazivní měření a vyhodnocování stavu betonových souvrství pomocí analýzy odrazů ultrazvukových vln.

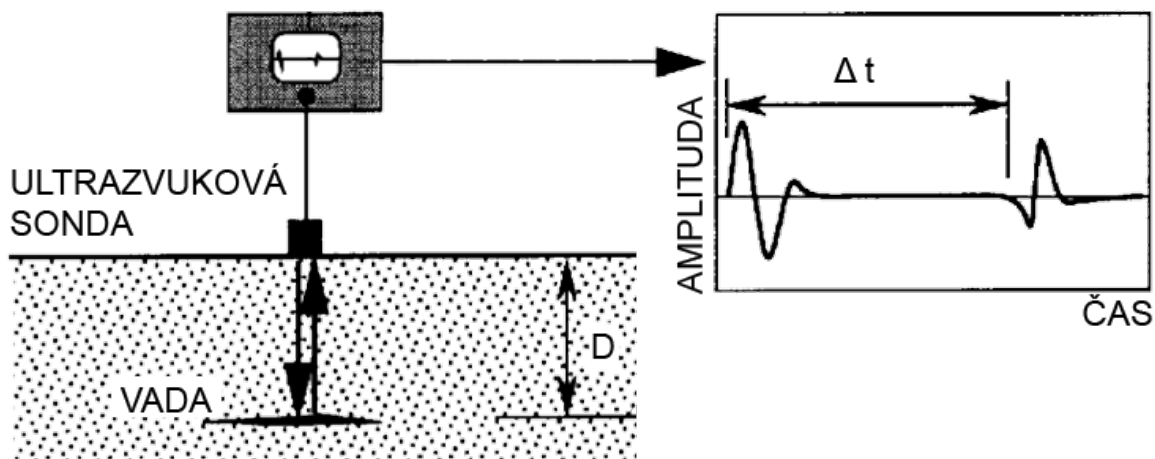
## 2 Ultrazvuková metoda pulse echo

V dnešní době se ve stavebnictví klade čím dál větší důraz na přesné a spolehlivé zkoušení konstrukcí, které by mělo být co nejefektivnější a pokud možno bez samotného narušení konstrukce. K tomu se využívají různé nedestruktivní metody, které umožňují získat informace o stavu a kvalitě konstrukce bez nutnosti jejího poškození. U betonových konstrukcí se zjišťují vlastnosti betonu jako například rovnoměrnost, pevnost v tlaku nebo statický modul pružnosti, ale také skryté vady a poruchy, ke kterým patří nedodržení tloušťky konstrukce, přítomnost kavern a delaminace.

Ultrazvuková odrazová metoda, nazývaná též pulse echo (UPE), je nedestruktivní způsob zkoušení, který nám umožňuje ověřit kvalitu konstrukce bez nutnosti náročné přípravy povrchu, jako je odstraňování nátěru nebo broušení. Jednou z hlavních předností této metody je, že není potřeba přístupu ke konstrukci z obou stran, což znamená, že můžeme měřit z jedné strany konstrukce [1], [2].

### 2.1 Princip metody pulse echo

Metoda UPE je založena na vysílání a přijímání ultrazvukových impulzů, které se šíří kontinuálním prostředím. Při dosažení nespojitosti, jako je náhlá změna vlastností materiálu nebo rozhraní mezi dvěma vrstvami, se elastické vlny částečně přenášejí a částečně odrážejí v závislosti na kontrastu akustické impedance (viz *Obrázek 1*). Zejména pokud dojde k odrazu v důsledku snížení impedance, znaménko amplitudy se obrátí. Zvláštní případ představuje vzduchová mezera uvnitř betonu. V tomto případě dochází k úplnému odrazu spolu s obrácením znaménka vlny v důsledku zanedbatelné hustoty a rychlosti pro tlakové i smykové elastické vlny ve vzduchu. Díky tomu je UPE velmi citlivá na delaminace a dutiny v betonových prvcích [3]. S tím souvisí frekvence ultrazvuku, která musí být až 50 kHz kvůli rozptylu zvukových vln agregáty a vzduchovými póry. Akustická vlna však prochází kovy, čehož se využívá při měření betonových prvků hustě vyztužených nebo při posuzování stavu injektáže předpínacích kanálků [4], [5].



Obrázek 1: Typické UPE s A-skenem [2].

Metoda UPE umožňuje stanovit tloušťku konstrukce, případně i hloubku zjištěných vad na základě přesného času průchodu ultrazvukových vln prostředím. Tento časový interval měří dobu mezi vysláním ultrazvukového impulzu a zaznamenáním odraženého signálu od zjištěné vady. Hloubka vady/zadní stěny  $D$  se dá vypočítat pomocí jednoduché rovnice:

$$D = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

kde  $v$  je rychlost šíření ultrazvukových vln v prostředí a  $\Delta t$  je rozdíl času, při kterém je dosaženo vady/zadní stěny  $t_1$  a počátečního času  $t_0$ . Rychlost šíření ultrazvukových vln je pro každý materiál rozdílná, je tedy nutné rychlost určit na vzorku vyňatého z konstrukce, u kterého známe přesnou tloušťku, případně u novějších přístrojů lze využít funkce automatického odhadu rychlosti [1], [6], [7].

## 2.2 Měřicí přístroje

### 2.2.1 Vývoj pulse echa

Metoda UPE, se hojně využívá nejen ve stavebnictví, ale také v lékařství, strojírenství, a dokonce i k měření tloušťky ledu na zamrzlých jezerech. Využití této metody ve stavebnictví se zkoumá již od 60. let 20. století, kdy byla vyvinuta řada experimentálních systémů pro ultrazvukové zkoušení betonu. Skutečný systém pulse echo, kde budič i přijímač jsou integrovány do jednoho snímače, byl použit až v roce 1993 a byl omezen pouze na měření

betonů s malým kamenivem. Nicméně v posledním desetiletí se tato metoda dostává do popředí a její využití se stává nedílnou součástí diagnostiky stavebních konstrukcí [2]. Hlavními výrobci přístrojů pro UPE jsou v dnešní době švýcarská firma Proceq a německá firma ASC Group.

### 2.2.2 Možnost zobrazení výstupu dat

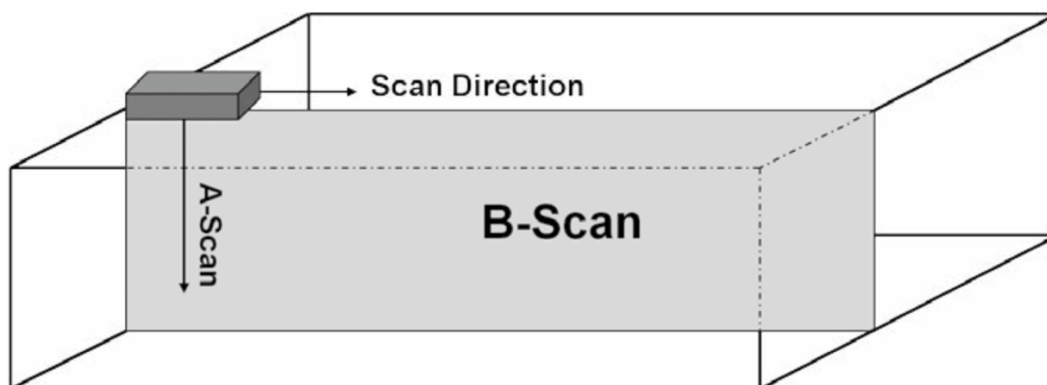
UPE poskytuje různé možnosti zobrazení výstupních dat, které umožňují vizualizaci a analýzu měřených informací.

#### A-sken

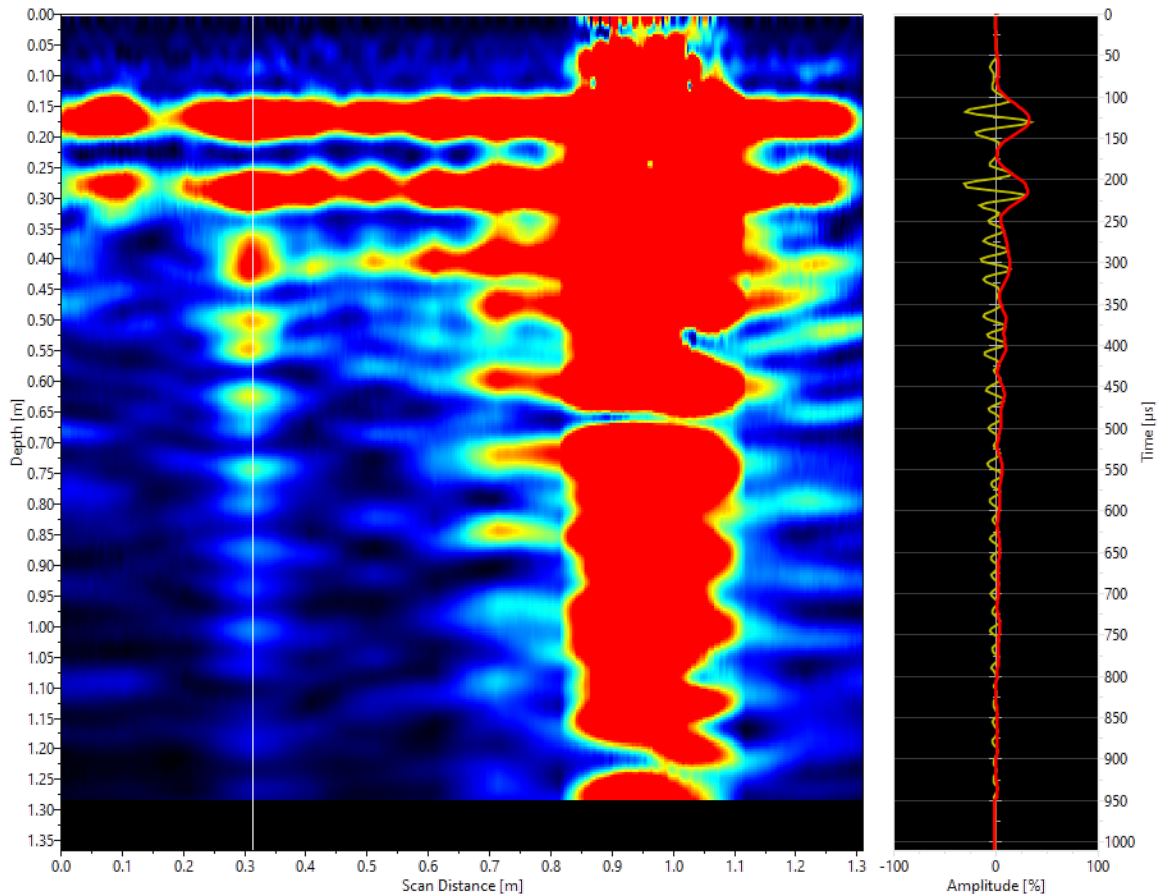
A-sken (Amplitude Scan) je nejjednodušší a nejzákladnější způsob zobrazení dat při použití UPE. Při A-skenu je zobrazena závislost amplitudy odraženého signálu na čase. Graficky je amplituda zobrazena na horizontální ose a čas na vertikální ose (viz *Obrázek 3*). Tento typ zobrazení je obvykle využíván pro rychlé získání informací o hloubce a lokalizaci vad v testovaném materiálu.

#### B-sken

B-sken (Brightness Scan) je pokročilejší metoda zobrazení, která umožňuje vizualizaci struktury materiálu ve formě dvourozměrného obrazu. Při B-skenu je ultrazvukový snímač pohybem posouván přes plochu testovaného materiálu a zaznamenává se amplituda odraženého signálu v jednotlivých bodech (viz *Obrázek 2*). Výsledkem je obraz, kde různé barvy reprezentují různé amplitudy signálu (tmavě modrá znázorňuje nízkou amplitudu a sytě červená vysokou amplitudu) a tím identifikují strukturální charakteristiky materiálu (viz *Obrázek 3*) [6], [8].



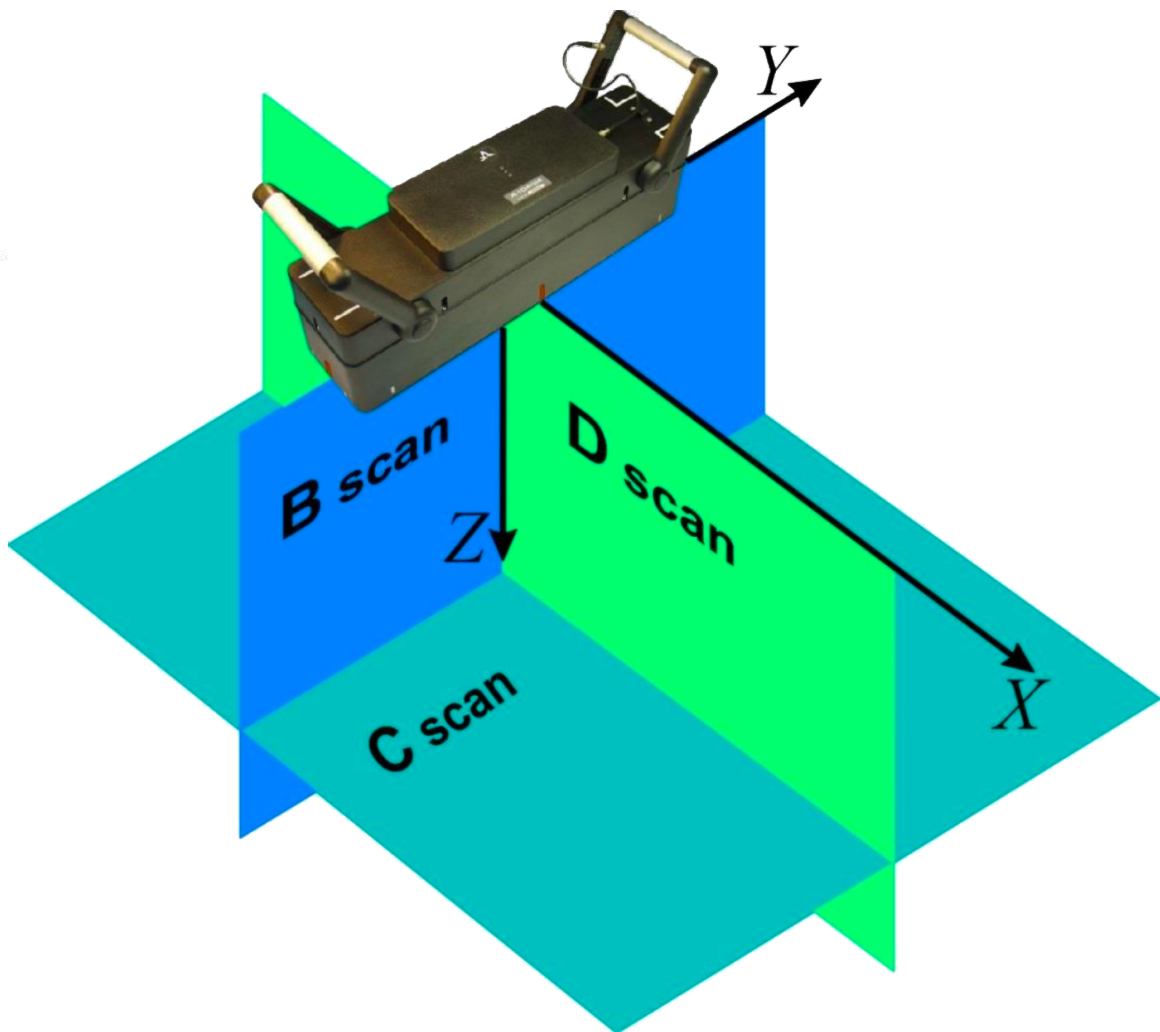
*Obrázek 2: Schéma výstupu měření – A-sken a B-sken [6].*



Obrázek 3: Příklad výstupu měření ze zařízení Pundit 250 Array od firmy Proceq. Vlevo liniový B-sken, vpravo A-sken.

### C-sken, D-sken

C-sken a D-sken jsou dalšími metodami zobrazení, která poskytují dvojrozměrný obraz testovaného materiálu. Oproti B-skenu však C-sken a D-sken zobrazují kolmou rovinu B-skenu. Budeme-li uvažovat že B-sken je zobrazením struktury materiálu v podélném směru svisle, potom C-sken je zobrazením vodorovným a D-sken zobrazením příčným svislým (viz Obrázek 4) [9].

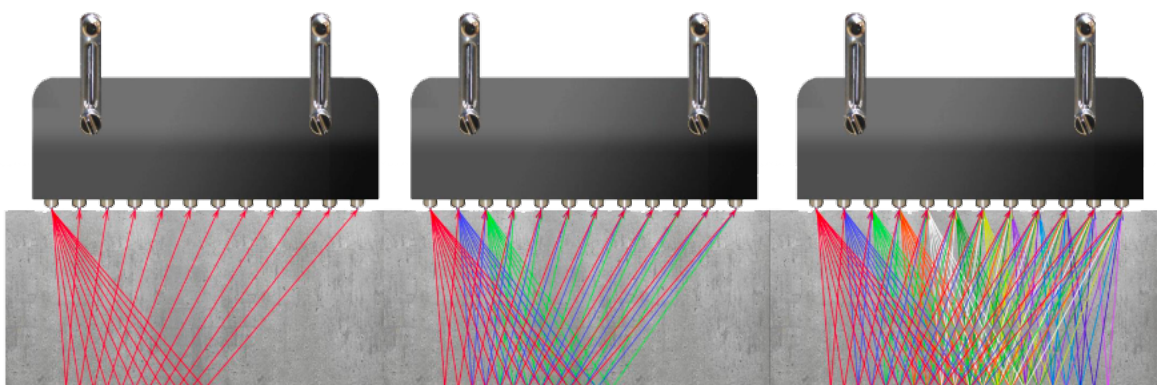


Obrázek 4: Schéma výstupu měření – B-sken, C-sken a D-sken [9].

Současné přístroje již dokážou s těmito skeny pracovat a jejich vzájemnou kombinací vytvářet výstupy v podobě plošných, případně prostorových zobrazení (viz Obrázek 8). Je na operátorovi, aby vybral nejvhodnější metodu v závislosti na konkrétních potřebách a cílech měření.

### 2.2.3 Příklady přístrojů

Nové přístroje sebou přináší vícero snímačů, které napomáhají k urychlení práce a lepšímu obrazovému výstupu. Každý snímač vysílá ultrazvukový signál a ozvěny jsou přijímány všemi zbylými snímači (viz Obrázek 5). Tento proces provedou všechny snímače, kompletní měření se tedy, např. při 8 snímačích, skládá z 28 A-skenů. Ty se v reálném čase převádí na B-sken [10].



Obrázek 5: Proces vysílání a přijímání ultrazvukového impulsu [9].

Firma Proceq nyní na trhu disponuje čtyřmi zařízeními určenými k nedestruktivnímu zkoušení konstrukcí pomocí UPE: Pundit PL-200PE, PD8000, PD8050 a v rámci praktické části bakalářské práce použitý Pundit 250 Array.

#### **Pundit PL-200PE**

Základní přístroj vybavený 18 ultrazukovými DPC snímači, které jsou schopny měřit až do hloubky jednoho metru (viz *Obrázek 6*). Samotný přístroj je schopen pracovat s režimy jako je A-sken, B-sken, ale také plošný sken [6].



Obrázek 6: Snímač Pundit PL-200PE [6].

#### **Pundit 250 Array**

Jedná se již o pokročilejší přístroj, na kterém nalezneme ultrazukové snímače ve třech řadách po osmi, tedy celkový počet ultrazukových DPC snímačů je 24 (viz *Obrázek 7*).

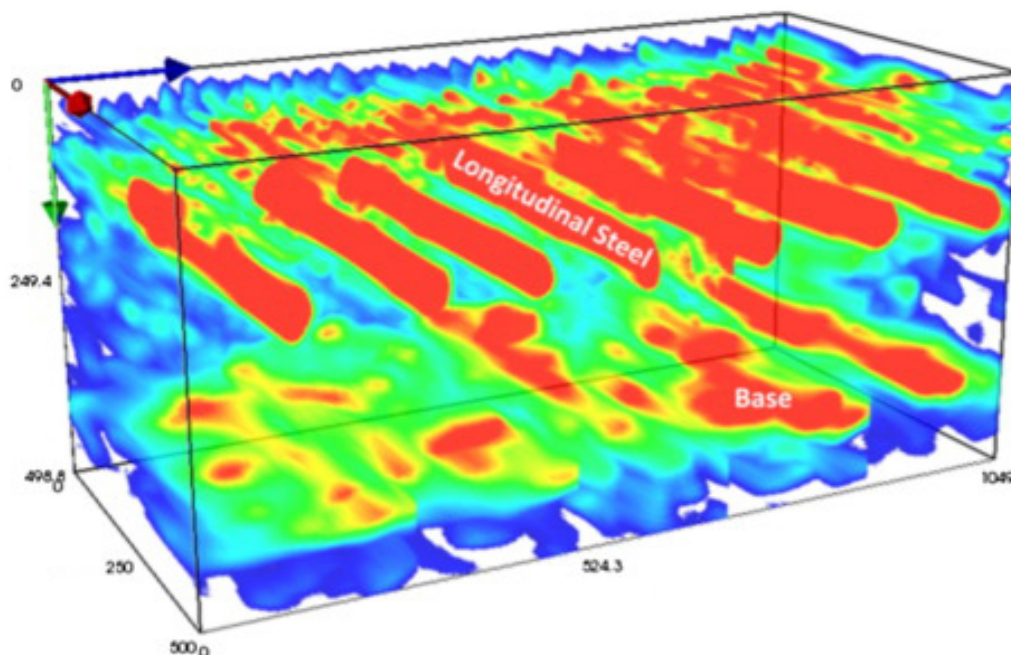


Schopnost měření do jednoho metru je stejná jako u předchůdce, stejně jako schopnost pracovat s režimy A-sken a B-sken, vyjma plošného skenu.



Obrázek 7: Pundit 250 Array.

Firma ASC Group disponuje třemi zařízeními pro UPE: A1220 MONOLITH 3D, A1040 MIRA 3D a A1040 MIRA 3D PRO. Vlajkové lodě obou firem již dokáží propojit B-sken, C-sken a D-sken v 3D model prvku i s vyobrazením veškerých diskontinuit měřeného prostředí.



Obrázek 8: 3D analýza MIRA s vyobrazením diskontinuit [11].



## 2.3 Použití UPE ve stavebnictví

UPE je významným nástrojem pro nedestruktivní testování a diagnostiku materiálů a konstrukcí ve stavebnictví. Je schopna poskytnout užitečné informace o různých aspektech konstrukce a umožňuje detekovat a charakterizovat různé vadné stavy materiálů či konstrukcí.

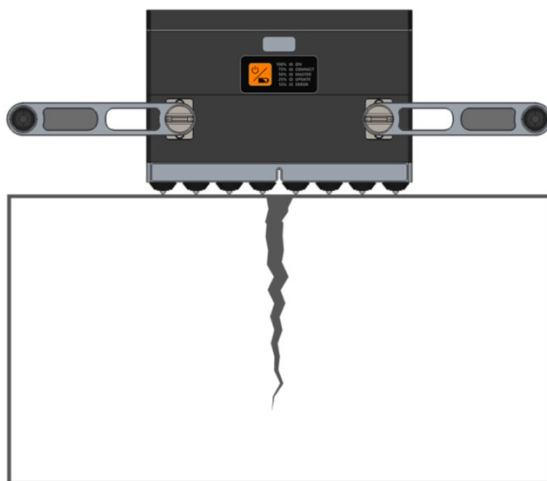
### Zjišťování tlouštěk vrstev

Technologie UPE je vynikající pro detekci tlouštěk betonových konstrukcí. Tato metoda je zejména užitečná v situacích, kdy je přístup ke konstrukci omezený a možný pouze z jedné strany. S pomocí metody UPE je možné zjistit změny tlouštěk v konstrukci a identifikovat případné nedostatky nebo poškození, které by mohly ovlivnit její stabilitu a bezpečnost. Tímto způsobem lze provádět kontrolu kvality a monitoring stavu vrstev v průběhu času.

### Detekce trhlin

UPE je schopna detekovat primárně trhliny, které jsou víceméně rovnoběžné se snímanou plochou. Při průchodu ultrazvukových vln prostředím dochází k jejich odrazu a změně signálu v přítomnosti trhliny. Tímto způsobem lze lokalizovat a posoudit rozsah trhlin v konstrukci. Detekce trhlin je důležitá pro hodnocení bezpečnosti a životnosti konstrukce [12].

Použití přístroje A1040 MIRA 3D v režimu C-Det (crack detection) umožňuje operátorovi vyhodnotit hloubku otevřené trhliny (viz *Obrázek 9*). Vyhodnocovací algoritmus však vyžaduje, aby trhlina dosahovala hloubky větší než 100 mm [8].



Obrázek 9: Schéma měření svislé trhliny přístrojem A1040 MIRA 3D [8].

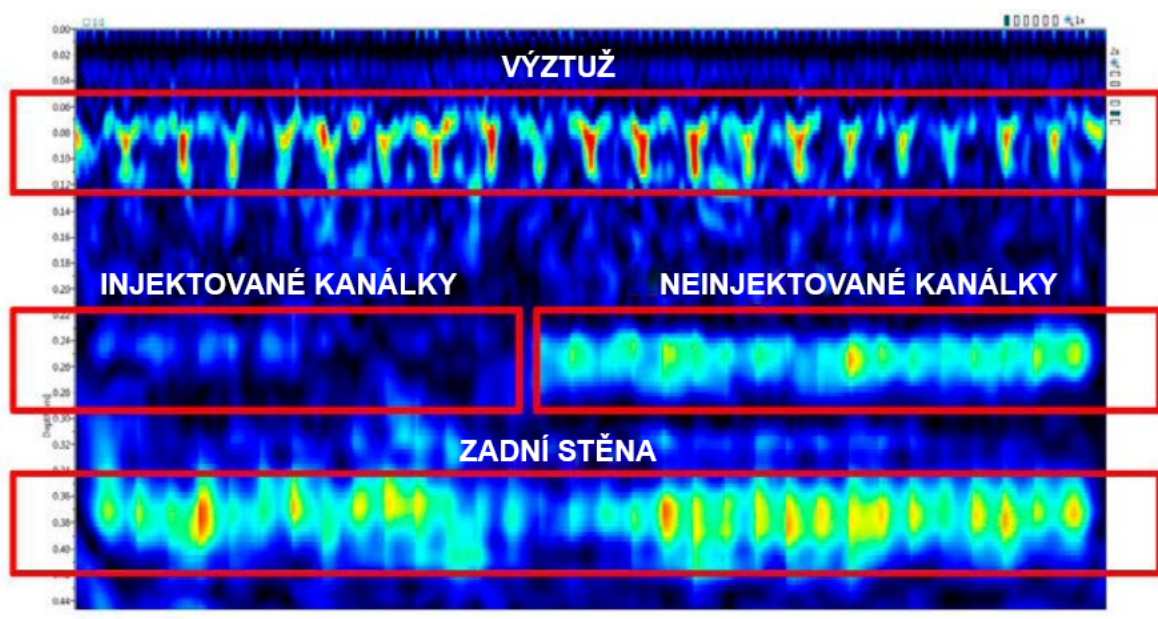
## Identifikace delaminace

UPE je také užitečná při identifikaci delaminace, což je oddělení vrstev v konstrukčních materiálech. Delaminace může být způsobena špatnou vazbou mezi vrstvami nebo vadami v materiálu. Použitím UPE lze detekovat a lokalizovat delaminace v konstrukcích, což umožňuje přijmout vhodná opatření pro jejich opravu a prevenci dalších poškození.

## Průzkum stavu injektáže kabelových kanálků předpínací výztuže

Technologii UPE lze použít k lokalizaci kabelových kanálků předpínací výztuže a do jisté míry ji lze použít i k průzkumu stavu injektáže těchto kanálků. V ideálním případě lze identifikovat nedostatečně injektované části kanálků nebo přítomnost dutin (viz *Obrázek 10*).

Diagnostika stavu kabelových kanálků je řešenou problematikou a použití právě UPE by mohlo být řešením. Nicméně, je třeba poznamenat, že tato aplikace UPE je zatím převážně v teoretické fázi a vyžaduje další vývoj a ověřování v laboratorních podmínkách a případně i na reálných stavbách [12].



Obrázek 10: Liniový B-sken zkušebního modelu s kabelovými kanálky vyplněnými injektážní maltou (vlevo) a kabelovými kanálkami bez injektáže (vpravo) [12].

## 3 Whitetopping

Whitetopping (WT) představuje moderní technologii oprav dopravních ploch a vozovek, která umožňuje minimalizaci nákladů a zároveň maximalizaci únosnosti stávajících vrstev. Konkrétně se jedná o metodu, při které se na původní asfaltovou nebo betonovou konstrukci pokládá tenká vrstva cementobetonového krytu. Tento postup představuje alternativu pro sanaci pružných vozovek a optimalizaci jejich životnosti, a navíc i zlepšení vlastností krytu vozovky (lepší odolnost proti trvalým deformacím, vyšší únosnost, ...) [13], [14].

### 3.1 Historie whitetoppingu

První zmínky o WT v literatuře sahají až do roku 1918, kdy byly uváděny ve Spojených státech amerických (USA). Od té doby až do roku 1991 bylo zdokumentováno přibližně 200 samostatných projektů WT [15]. V polovině osmdesátých let 20. století přišli výzkumníci v Evropě s novou koncepcí spolupůsobení vrstev WT a podkladní vrstvy, což umožnilo použití tenčího betonového překryvu, a tedy i možnost projektování ultratenkého whitetoppingu (UTW) [16]. V roce 1991 se v USA v Louisville začaly realizovat projekty právě s použitím UTW, od té doby bylo po území USA zaznamenáno dalších více než 300 projektů. Projekty obnovy vozovky formou WT se rozšířily také do dalších zemí. V roce 1993 postavilo Švédsko čtyři zkušební úseky tenkého whitetoppingu (TWT), kde byla testována výkonnost těchto vozovek. Následovalo Mexiko s výzkumným projektem UTW v Tijuane. WT se dále rozšířil do zemí v Jižní Americe i na asijském kontinentu [15].

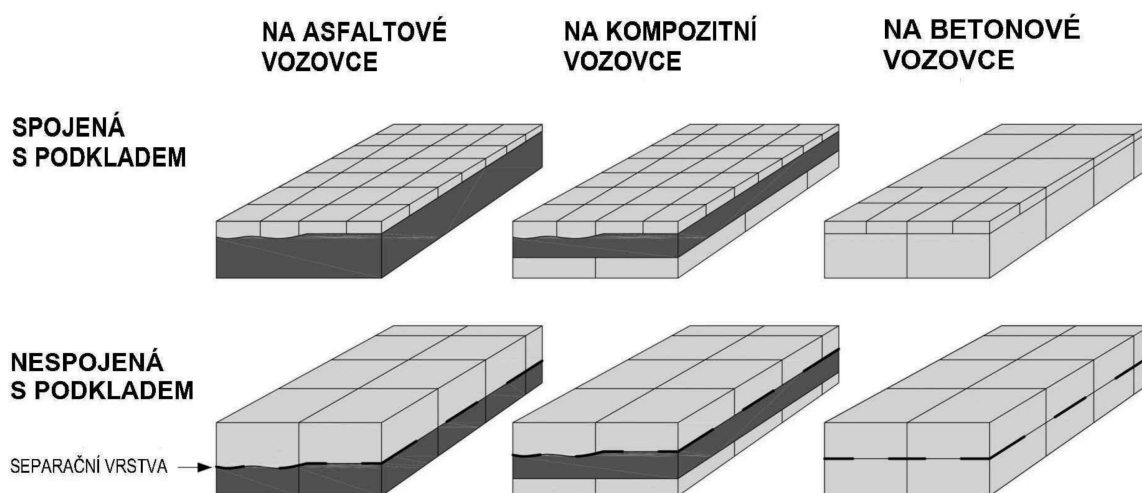
V České republice je podpora vývoje a realizace projektů oprav vozovek technologií WT relativně nová, ŘSD a SFDI se aktivně problematice WT věnuje od roku 2018. Pro pilotní projekty byly vybrány dálniční odpočívky Rajhrad na dálnici D52 a Ladná na dálnici D2 (viz *Obrázek 11*). Obě realizace byly navrženy jako TWT spojený s asfaltovým podkladem. Odstavné stání pro kamiony v Rajhradu bylo dokončeno v roce 2020 s tloušťkou WT vrstvy 140 mm, odpočívka Ladná byla realizována rok poté s tloušťkou WT vrstvy 160 mm. V srpnu 2022 byla provedena rekonstrukce nádvoří Ústavu hematologie a krevní transfúze v Praze, kde byla poprvé v ČR použita technologie UTW [14].



Obrázek 11: Zrekonstruovaná dálniční odpočívka Ladná metodou TWT.

### 3.2 Rozdělení whitetoppingu

Na samotné rozdělení WT se dá nahlížet z vícero aspektů. Prvním zásadním rozdělením je dle materiálu původní vozovky, může se jednat o kompozitní, betonovou a nejčastější variantu asfaltovou vozovku. Dalším velice důležitým rozdělovacím aspektem je soudržnost WT vrstvy a podkladu (viz Obrázek 12) [14]. Třetím a pro potřeby této bakalářské práce stěžejním rozdělením je dle tloušťky vrchní cementobetonové vrstvy: tradiční whitetopping, TWT a UTW [17].



Obrázek 12: Rozdělení WT dle soudržnosti a dle materiálu původní vozovky [14].

V zahraniční literatuře se však pohlíží na WT jako na betonovou vrstvu, která se pokládá na stávající konstrukci z horké asfaltové směsi (HMA) a od ostatních typů betonových převrstvení se liší. Příkladem může být spřažené betonové převrstvení, kde je vrstva betonu zhotovována přímo na stávající betonové vozovce a je zajištěno spojení a spolupůsobení obou vrstev. Provádí se také nespojité betonové převrstvení, kde jsou také v kontaktu dvě betonové vrstvy, avšak s rozdílem záměrné nesoudržnosti těchto vrstev (viz *Obrázek 13*) [16].



*Obrázek 13: Rozdělení betonových převrstvení; a) whitetopping, b) soudržné betonové převrstvení, c) nesoudržné betonové převrstvení [16].*

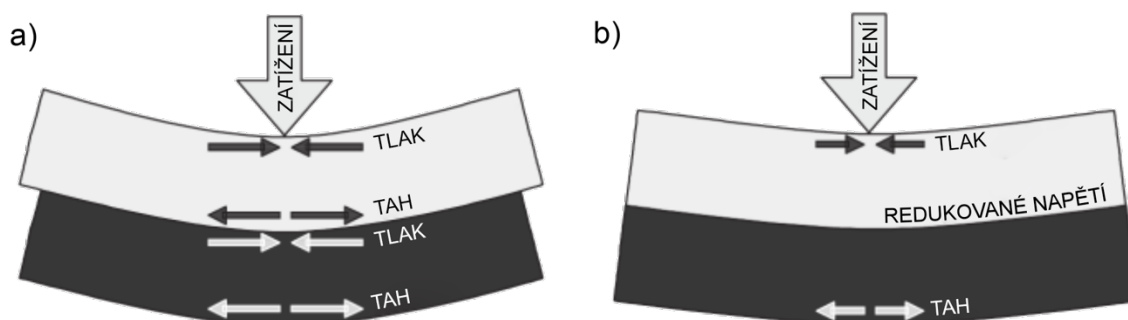
### 3.2.1 Tradiční whitetopping

Tradiční WT se vyznačuje tím, že není spojen s podkladem, což znamená, že je třeba ho realizovat ve větších tloušťkách, nad 200 mm. V porovnání s TWT a UTW jsou rozteče spár u tradičního WT výrazně širší, mohou dosahovat až dvojnásobku, tj. 1200–3000 mm, v závislosti na tloušťce desky [18].

Tradiční WT může být realizován pomocí různých betonových směsí, včetně prostého betonu, železobetonu a betonu vyztuženého vlákny. Jeho hlavní výhodou je možnost přenášet značné zatížení od nákladní dopravy, což jej činí vhodným pro použití na dálnicích a letištních plochách. Oproti TWT a UTW není nutná téměř žádná příprava povrchu stávající vozovky, jako například frézování, oprava poruch vozovky, protože beton poškození povrchu překlene. Díky velké mocnosti betonové vrstvy však není možné tradiční WT realizovat v situacích, kde je třeba zachovat určitou výšku, například v místech s danými obrubami nebo pod mostem. Tradiční WT byl v minulosti hojně využíván, avšak s příchodem pevného spojení vrstev WT s původní vozovkou se od této technologie upouští [17], [18].

### 3.2.2 Tenký whitetopping

TWT se dělí na dva typy v závislosti na požadavcích na soudržnost s podkladem. Pokud není požadována soudržnost, chová se TWT podobně jako tradiční WT, akorát s tloušťkou betonové vrstvy 130-200 mm, a tedy s možností přenesení menšího dopravního zatížení. Pro vysoce frekventované silnice, po kterých jezdí velké množství těžkých nákladních vozidel, lze využít rozložení napětí v soudržných systémech, kde působí WT překrytí a podkladní vrstva jako jeden celek, nikoliv jako dvě nezávislé vrstvy (viz *Obrázek 14*) [17]. V důsledku kompozitního působení jsou napětí v horní cementobetonové vrstvě u soudržného systému výrazně nižší než v případě nesoudržného řešení. Vzhledem k tomu, že beton má vyšší pevnost v tlaku než v tahu, je možné dosáhnout nižších tloušťek vrchní vrstvy, a to 100-150 mm [16]. S klesající tloušťkou desky je nutné snižovat vzdálenost spár, aby se zabránilo zvlnění. Soudržnost souvrství je náchylná k oddělení v důsledku nesprávného provedení přípravy stávající vozovky, což může také způsobit propisování reflexních trhlin od podkladní vrstvy [17].



*Obrázek 14: Vliv soudržnosti na chování WT*

*a) bez vazby mezi vrstvami, b) plná vazba mezi vrstvami CB a HMA [16].*

### 3.2.3 Ultra tenký whitetopping

UTW je tenká betonová vrstva o tloušťce 50-100 mm, která se používá na obnovu a prodloužení životnosti stávajících vozovek, zejména na parkovištích, obytných ulicích a silnicích s nízkou intenzitou dopravy [15]. UTW je vhodný pro sanaci asfaltových vozovek, kde je porušena pouze vrchní vrstva, ale podkladní vrstva stávající komunikace je strukturálně zdravá a kde je provoz nákladních vozidel omezen. Podkladní vozovka je nedílnou součástí konstrukčního systému UTW, a proto je nutná její tloušťka po odfrézování alespoň 70 mm. Pro zajištění dobrých vlastností je rovněž nezbytná správná příprava povrchu před

samotnou betonáží [17]. Rozměry desek jsou menší než u tradičního WT kvůli vysokému poměru povrchu k objemu, což způsobuje mírné prodražení díky velkému množství řezaných spár [15].

### **3.3 Návrh whitetoppingu**

Při návrhu WT se hledí na několik parametrů ovlivňujících výslednou podobu zamýšlené sanace povrchu. Mezi hlavní uvažované aspekty patří míra poškození stávající asfaltové vozovky a její podkladní vrstvy, intenzita dopravního zatížení, ale také časové omezení provozuschopnosti [15].

#### **3.3.1 Přednosti whitetoppingu**

WT je moderní technologií, která má mnoho výhod oproti tradičním asfaltovým překryvům. Například výzkumy ukazují, že WT může vydržet dvakrát až třikrát déle než asfaltové překryvy s životností delší než 20 let. WT si zachovává provozuschopnost a vyžaduje výrazně méně údržby po celou dobu své projektované životnosti [19]. U technologie WT většinou platí, že je ekonomicky i časově výhodnější než kompletní rekonstrukce vozovky. Dále lze poznamenat, že použití WT má příznivý dopad na snížení uhlíkové stopy a zároveň přináší úsporu nákladů [14].

WT také zvyšuje bezpečnost díky snížení pravděpodobnosti aquaplaningu a eliminaci poruch, jako jsou vyjeté koleje, vymývání, vyhrnování a výmoly. Díky povrchu odrážejícímu světlo se zvyšuje viditelnost, což může snížit náklady na pouliční osvětlení.

Díky době vytvrzení kratší než 24 hodin, u rychlých betonových směsí, může být realizace WT, například opravy křižovatek, dokončena za den nebo dva [17]. Studie také ukazují až 20% úsporu paliva u betonových površích ve srovnání s asfaltovými povrchy. Vzhledem k tomu, že větší dopravní zatížení způsobuje větší průhyby, které pohlcují více energie vozidel, úspory z WT se zvyšují s rostoucí hmotností nákladních vozidel [20].

V neposlední řadě, beton je méně ovlivněn sezónním oslabením podkladu, což umožňuje použití WT ke snížení omezení jarního zatížení. WT také eliminuje problémy jako je asfalt zachycený v pneumatikách a odolává poškození v důsledku rozlití pohonných hmot na parkovištích [17].



### 3.3.2 Betonová směs

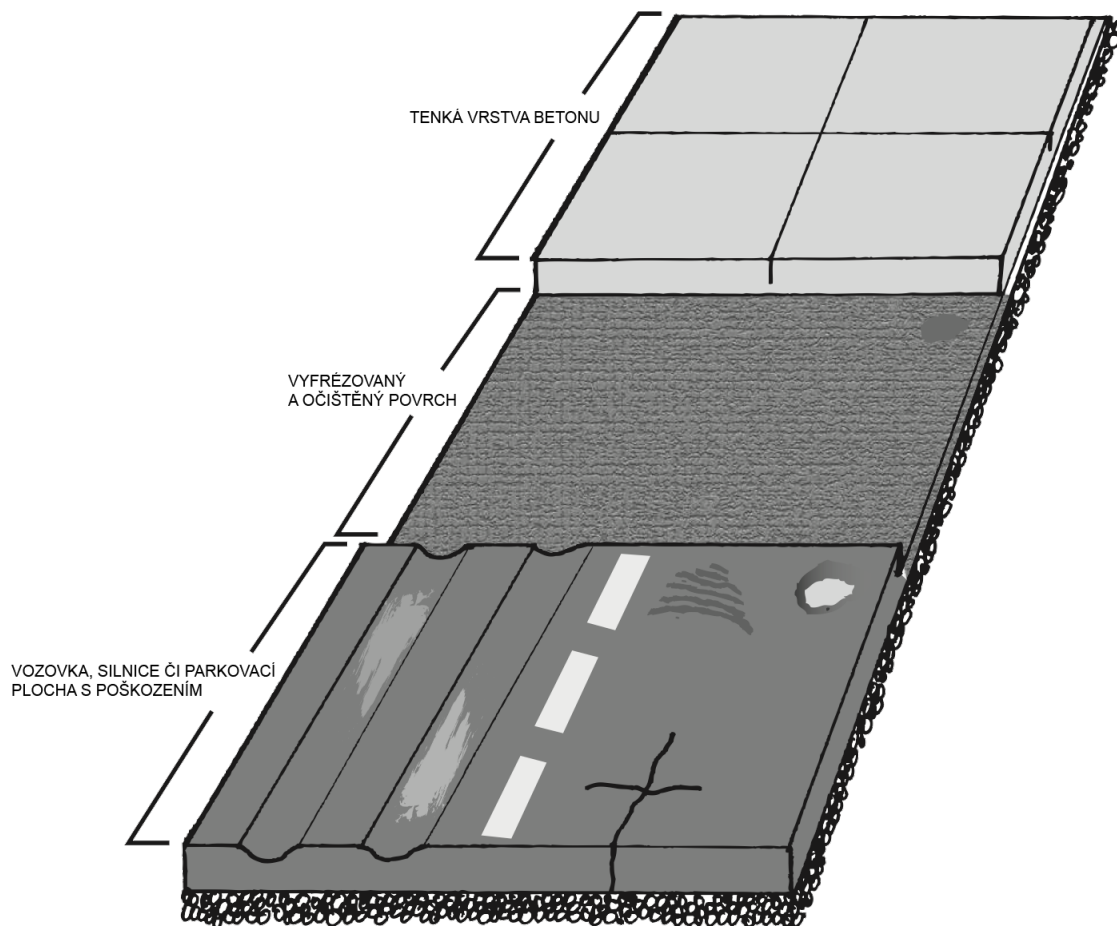
Obsah cementu v betonové směsi ovlivňuje pevnost betonu a velikost jeho smršťování. Hlavním problémem při nadměrném množství cementu jsou smršťovací trhliny a odtržení betonu od HMA, zejména v počátečním stádiu. Proto je nutné zvolit minimální obsah cementu, který splní požadavky na pevnost a zpracovatelnost konkrétního projektu. Doporučený poměr vody a cementu je v rozmezí 0,40 až 0,42. Pokud je požadován vyšší obsah cementu, měly by být provedeny další úpravy návrhu směsi, například vlhké vytvrzování, dodatečné dávkování vláken a kratší rozměry desek. Maximální velikost kameniva se navrhuje jako tloušťka desky dělená třemi. Tedy například pro desku o tloušťce 90 mm je maximální velikost kameniva 30 mm [15].

Výztužná vlákna zvyšují ohybovou a mezní únosnost desek z prostého betonu, zmenšují šířku povrchových trhlin, měly by zajistit odolnost proti reflexním trhlinám ve srovnání s prostým betonem a měly by prodloužit funkční životnost. Výztužná vlákna se liší materiálem i tvarem, nejčastější příklady jsou přímá a kroucená syntetická vlákna (polypropylenová či polyolefinová), dále také ocelová vlákna. Vlákna však výrazně zvyšují náklady na směs a nemusí se vždy vyplatit. Použití u UTW je téměř samozřejmostí, u TWT by možnost užití vláken měla být zvážena a u tradičních WT se použití nedoporučuje [15], [17].

### 3.3.3 Konstrukční zásady

Zhotovení WT se skládá ze čtyř základních kroků: příprava povrchu, lití betonu, úprava a strukturování povrchu nové betonové vrstvy, a nakonec vytvrzení WT části (viz *Obrázek 15*). Kvalita provedení každé z těchto fází se odrazí na výsledné podobě sanace vozovky a její životnosti [15].





Obrázek 15: Jednotlivé fáze přípravy WT [13].

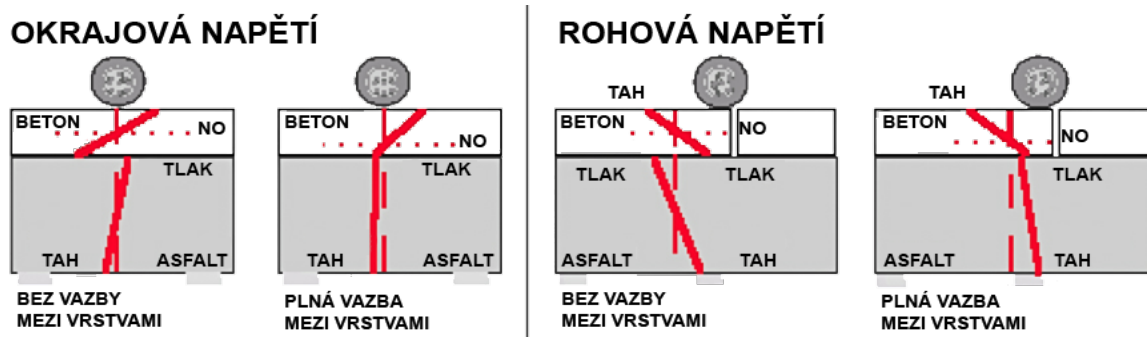
### Příprava povrchu

Příprava povrchu je klíčovou částí při pokládání betonové vrstvy hlavně u UTW a TWT. U tradičního WT není úprava povrchu tak důležitá, jelikož není nutná soudržnost mezi betonovou a asfaltovou vrstvou. Nejlepší alternativou přípravy povrchu je frézování, které zlepšuje vazbu, protože obnažuje drsné, čerstvě rozlámané kamenivo a vytváří drsný povrch nezbytný pro rozvoj mechanické vazby. Frézování také pomáhá odstranit případné vyjeté koleje na stávajícím asfaltovém povrchu a obnovuje správný sklon a příčný sklon vozovky. Pokud je povrch silně narušený, mělo by se před frézováním provést záplatování. Pro správné spojení obou vrstev je nejdůležitější čistý povrch. Toho lze dosáhnout buď nízkotlakým mytím, nebo mechanickým smetákem. Jakmile je povrch očištěn, je nesmírně důležité udržovat jej čistý až do zahájení pokládky CB vrstvy. Pokud je povrch čištěn déle než několik hodin před pokládkou, bude jej nutné opětovně vyčistit těsně před betonáží, aby se odstranil veškerý prach, špína nebo nečistoty. Pokud je na vyfrézovaném povrchu povolen provoz, musí být povrch před pokládkou WT znovu vyčištěn. Před uložením CB vrstvy je

třeba zvážit teplotu připraveného asfaltového povrchu. Betonáž na horký povrch může vést k tvorbě trhlin následkem smršťování. Řešením je shlazení povrchu například vodním mlžením [15], [17].

### Vazba mezi WT a HMA

Při navrhování UTW a TWT se v různé míře připouští soudržnost souvrství. Čím tenčí je WT, tím větší úsilí je třeba vynaložit na dosažení soudržnosti. Pokud je dosaženo dostatečné vazby, lze pro návrh a výstavbu použít techniku soudržného převrstvení z CB. V opačném případě může být vhodnější postup převrstvení CB bez soudržnosti. Kompozitní spolupůsobení podstatně sníží maximální tahová napětí v betonu, a to 2krát pro rohová napětí a 4krát pro okrajová napětí (viz *Obrázek 16*). WT tak může být při stejném zatížení výrazně tenčí ve srovnání s WT bez vazby na podkladový asfalt. Kromě toho soudržnost posouvá neutrální osu v betonu směrem dolů, což snižuje tahová napětí ve spodní části betonové vrstvy. V horní části betonové vrstvy se však zvyšují rohová napětí. Pokud se neutrální osa v betonu posune dostatečně nízko, kritické místo zatížení se přesune z okraje do rohu. Toto napětí lze snížit pomocí dostatečně silné asfaltové vrstvy, která desku WT podepře [17].

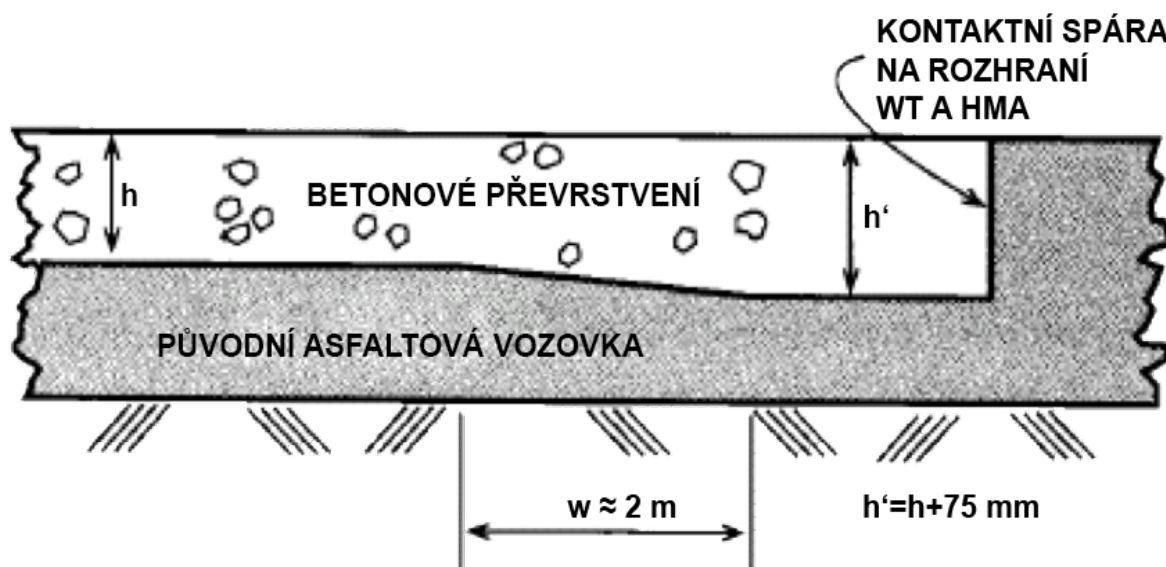


*Obrázek 16: Vliv soudržnosti na napětí [17].*

### Tloušťka WT vrstvy

Jak již bylo výše uvedeno, WT se provádí v tloušťkách od 50 mm až po 400 mm. V dnešní době se již preferují mocnosti betonové vrstvy u TWT 100 až 200 mm a UTW 50 až 100 mm. Tloušťka CB vrstvy se odvíjí hlavně od intenzity dopravního zatížení a od soudržnosti WT a HMA [15]. Pro UTW a TWT se v přechodových oblastech mezi vrstvou CB a přilehlou vozovkou HMA doporučuje deska zesílit, aby se minimalizovalo praskání způsobené rázovým

zatížením od dopravy (viz *Obrázek 17*). Doporučená minimální tloušťka zesílené části je 150 mm, pokud je tloušťka WT 75 mm [17].



*Obrázek 17: Přechod z WT na HMA [17].*

### **Smršťovací spáry**

Kratší vzdálenosti mezi smršťovacími spárami zvyšují životnost betonových převrstvení. Délka spár u UTW a TWT se obvykle pohybuje v rozmezí 0,6 až 1,8 metru, zatímco u tradičního WT jsou délky spár až dvojnásobné. Tloušťka řezu je 3 mm a zasahuje až do jedné třetiny hloubky betonové vrstvy [21]. Správné načasování řezání spojů je rozhodující pro prevenci předčasného poškození. Příliš brzké řezání spár může způsobit nadměrné zvlnění betonu, naopak příliš pozdní řezání může umožnit vznik tahových napětí a vést k nekontrolovatelnému praskání desek. Obvykle se spáry betonu řežou mezi 4 a 12 hodinami po uložení, a to v závislosti na mnoha faktorech, jako jsou okolní podmínky, teplota betonové směsi a rychlost hydratace cementu [15]. U některých konstrukcí TWT se spáry těsní proti vniku vody a nečistot. Spáry UTW jsou obvykle umístěny v kratších rozestupech a neotevírají se tolik jako spáry o větších délkách. Z tohoto důvodu se tyto spáry obvykle netěsní. Rozteč spár má významný vliv na rychlost vzniku rohových trhlin. Krátké rozteče spár, které jsou běžné u UTW a TWT, snižují napětí související se zatížením, protože desky nejsou dostatečně dlouhé, aby vyvinuly tak velký ohybový moment. Umístění spár je také důležité, aby se zabránilo soustředěnému zatížení [17].

## **3.4 Poruchy**

Porušené vozovky podléhají průzkumu stavu a jeho výsledek často vede k sestavení souboru možných alternativ oprav nebo sanace, z nichž lze nakonec vybrat nejvhodnější postup [17].

### **3.4.1 Poruchy HMA**

Pro úspěšné projekty s využitím TWT a UTW je zásadní přesné vyhodnocení stavu HMA vozovky. Nejčastější poruchy HMA, které souvisejí s použitím TWT a UTW, a jejich příčiny jsou definovány následovně:

#### **Vyjeté koleje**

Podélná prohlubeň na povrchu vozovky v dráze kola, která může mít také související příčný posun. Hlavními příčinami jsou vlastnosti pojiva v HMA, vlhkost a vysoké napětí v podloží a podkladu. Sanace je nutná, pokud jsou vyjeté koleje větší než 12 mm [17].

#### **Únavové trhliny**

Řada vzájemně propojených trhlin tvořících mnohostranné, ostře ohraničené kusy o velikosti 150 mm nebo méně, které se obvykle nacházejí ve stopách kol nebo v místech, kde se koncentruje dopravní zatížení. Hlavními příčinami jsou ztuhnutí HMA a slabé podepření [17].

#### **Blokové praskání**

Vzor trhlin rozdělující dlažbu na přibližně obdélníkové bloky. Velikost bloků se pohybuje od 150 mm do 1 m. Tento typ poruchy obvykle pokrývá celý povrch vozovky. Hlavními příčinami jsou smršťování a oxidace HMA. Pokud se v HMA na zrnitém podkladu vyskytují metrové blokové trhliny, není nutná žádná oprava. Nicméně závažné blokové trhliny je třeba opravit před pokládkou TWT a UTW [17].

#### **Ztráta hmoty**

Oddělení asfaltového pojiva od kameniva v důsledku přítomnosti vlhkosti. UTW a TWT vyžadující spojení s HMA nelze pokládat na porušenou HMA vozovku [17].

### **3.4.2 Poruchy whitetoppingu**

Poruchy WT je možné rozdělit do dvou skupin podle období vzniku:

#### **Poruchy WT v raném stádiu**

Mezi poruchy raného stádia patří náhodné trhliny, odprýskání a ulamování betonu v místech spár. Společným faktorem vzniku trhlin v raném stádiu je často vysoký obsah cementu nebo nízký poměr vody a cementu v betonové směsi, a také tenká nosná vrstva HMA. Poruchy raného stádia můžou mít za následek odtržení betonové vrstvy od vrstvy HMA. Je tedy důležité pečlivě plánovat a připravovat výstavbu WT, aby se minimalizovala rizika vzniku poruch v raném stádiu. To zahrnuje výběr vhodné betonové směsi, správnou přípravu povrchu a kontrolu podmínek prostředí během výstavby [15], [17].

#### **Dlouhodobé poruchy WT**

Hlavní dlouhodobé poruchy jsou rohové zlomy, příčné a podélné trhliny, delaminace a u UTW i samotné roztržení desky. Příčiny těchto poruch jsou spojeny s konstrukčním návrhem, dopravním zatížením, kvalitou betonu a podmínkami prostředí po výstavbě. Pro minimalizaci rizika dlouhodobých poruch je důležité použít kvalitní materiály a provést správnou konstrukční přípravu. Konkrétně správnou tloušťku vrstvy WT, vhodný návrh spojení vrstev CB/HMA, řádnou přípravu povrchu a kontrolu podmínek prostředí po výstavbě. Pravidelná údržba a oprava poruch jsou také nezbytné pro prodloužení životnosti a funkčnosti povrchu vozovky [17].

### **3.4.3 Zkoušení whitetoppingu**

Zkoušení WT je nezbytnou součástí procesu jeho výstavby a údržby. Existuje řada různých měřících technik, které se používají k posouzení stavu a funkčnosti WT. Zkoušky se provádí jak během výstavby, tak posléze během životnosti konstrukce. Pro průběžný monitoring je někdy zapotřebí vložit měřící přístroje do konstrukce, jako např. strunový tenzometr pro měření deformací, indukční snímače pro snímání separace mezi betonovou a asfaltovou vrstvou. Běžně se používá zkouška FWD. Odebírají se jádrové vývrty, na kterých se provádí zkoušky v laboratořích. Pro zjištění delaminace povrchu se používá UPE [14], [18].

## 4 Experimentální práce in situ – parkoviště Ladná

Dálniční odpočívka Ladná se nachází na dálnici D2 na 44,5 km. Jedná se o levou odpočívku, tedy ve směru na Brno. U daného projektu bylo třeba nedestruktivně ověřit delaminaci vrstev původního asfaltu a nového betonového převrstvení.

### 4.1 Konstrukční řešení parkoviště

Rekonstrukce původní vozovky, tvořené asfaltobetonovým krytem a podkladem z kame-niva stmelého cementem, byla provedena pomocí metody TWT. Tento postup zahrnoval odfrézování 140 mm původního poškozeného asfaltového povrchu, důkladné upravení podkladu a následnou betonáž nového betonového převrstvení o tloušťce 160 mm (u pří-lehlé komunikace 180 mm). Celková tloušťka souvrství je tedy 270 mm, kde 110 mm tvoří spodní vrstva původní asfaltobetonové vozovky. Betonová směs byla vyztužena rozptýle-nou výztuží, za použití skelných vláken délky 36 mm s modulem pružnosti 72 GPa.



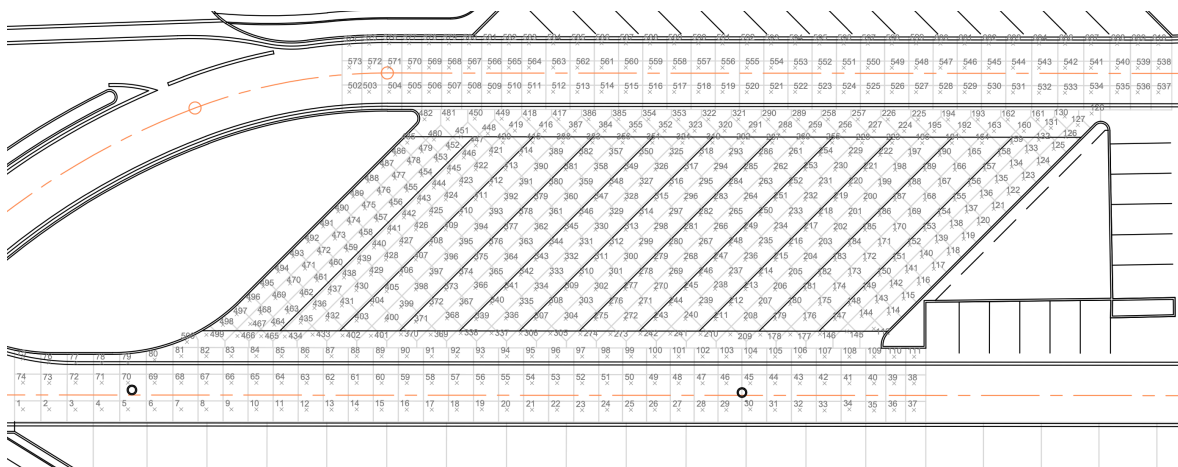
*Obrázek 18: Dálniční odpočívka Ladná před rekonstrukcí. Je zde vidět dříve provedená oprava asfaltového krytu na příjezdových komunikacích (Google Street View 2018).*





*Obrázek 19: Rekonstrukce dálniční odpočívky Ladná. Vlevo – odfrézovaný povrch rekonstruovaného parkoviště. Vpravo – přechod mezi vyfrézovanou částí parkoviště pro kamiony a částí s odstraněnou skladbou vozovky, určenou pro osobní automobily [22].*

Celková plocha zrekonstruované části odpočívky dosahuje 2010 m<sup>2</sup> (viz Obrázek 20). Plocha byla rozdělena na 604 desek pomocí řezů, které dosahují do poloviny jejich výšky. Spáry byly vyplněny pružnou záplivkou. Dilatační celky jsou čtvercového, obdélníkového nebo mnohoúhelníkového tvaru. Spáry v parkovací ploše jsou od sebe vzdáleny 1750 mm, krajní pole mají rozteč spár 1400 mm. Přilehlé komunikace jsou rozděleny spárami v podélném směru po 1650 mm a v příčném směru po 2000 mm. Prostorové spáry rozdělují parkovací plochu na čtyři celky a také oddělují parkovací plochu od přilehlých komunikací. Rozteč spár je nastavena tak, aby se nenacházely přímo pod kola odstavených nákladních vozidel.



*Obrázek 20: Číslování WT desek.*



*Obrázek 21: Detail napojení WT a asfaltové vozovky.*



*Obrázek 22: Detail řezané spáry vyplněné pružnou zálivkou.*

Vybrané dilatační celky byly vyztuženy ocelovou sítí 100/100/8 mm. Jedná se především o místa, kde se i po odfrézování vrchní části asfaltové vozovky nacházely trhliny. Vyztužením se omezilo kopírování trhlin na povrch betonového převrstvení. Vyztuženy byly také krajní desky s atypickými tvary.

Krajní tři pásy desek komunikací jsou realizovány jako zesílené (viz schéma *Obrázek 17*).

## **4.2 Ověření soudržnosti WT**

### **4.2.1 Přehled probíhajících měření**

V rámci tohoto projektu bylo provedeno několik měření, některá z nich stále probíhají. Jedním příkladem může být ověření únosnosti vozovky pomocí rázových deformačních zkoušek. Během výstavby byly do vybraných míst instalovány strunové tenzometry, které slouží k měření deformací jednotlivých vrstev. Samotná separace vrstev byla sledována pomocí indukčních snímačů. Po dokončení projektu byla separace vrstev ověřována dalšími metodami, jako jsou měření georadarem, akustická emise, impuls echo a námi prováděné měření metodou pulse echo.

### **4.2.2 Měření metodou pulse echo**

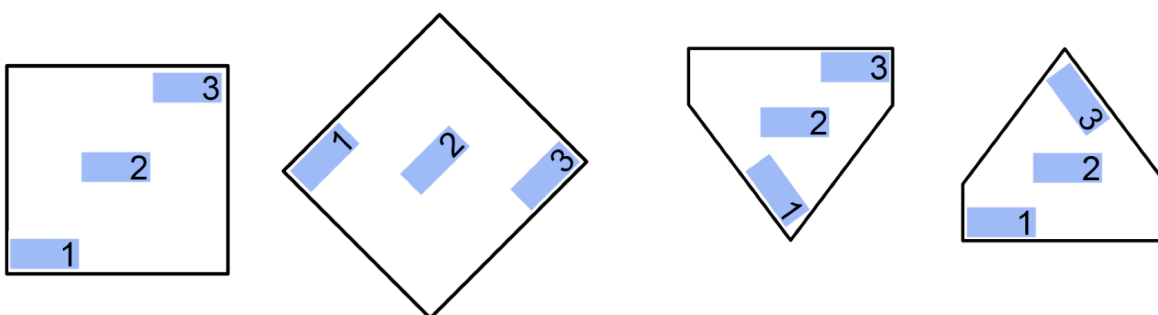
Pro měření pomocí UPE jsme použili přístroj Pundit 250 Array od švýcarské firmy Proceq, který disponuje osmi snímači uspořádanými do tří řad, celkem tedy 24 snímačů (viz *Obrázek*



23). Měřeny byly všechny dilatační celky vyjma desek č. 469, 470, 471, 472, 491, 492, 493, 494 a 495, kde měření z důvodu nepřístupnosti nebylo provedeno. Každé měření jsme provedli vždy ve třech bodech – u jednoho okraje, ve středu desky a u protějšího okraje (viz *Obrázek 24*). Nastavení intenzity signálu bylo pro všechny desky totožné. Celkem jsme tak provedli 1785 měření v jednotlivých bodech na 595 deskách.



*Obrázek 23: Měření in situ metodou pulse echo přístrojem Pundit 250 Array.*



*Obrázek 24: Schéma umístění ultrazvukové sondy.*

#### **4.2.3 Způsob vyhodnocení měření metodou pulse echo**

Jednotlivá měření UPE potvrdila mocnosti vrstev, tedy tloušťku betonové vrstvy 160 mm v parkovací ploše a 180 mm v ploše příjezdové komunikace. U některých skenů je možné

vidět tloušťku asfaltové vrstvy 110 mm. Také je zaznamenáno zvětšení tloušťky WT v místech napojení na asfaltovou vozovku.

Pro hodnocení výsledků byla použita číselná škála s rozmezím od 0 do 4, která byla dále vizualizována pomocí barevného kódu (viz *Tabulka 1*). Každý panoramatický sken byl následně pečlivě analyzován a na základě charakteru a velikosti odrazového echa mu byla přiřazena odpovídající číselná hodnota. Tato hodnota byla poté zobrazena v barvě odpovídající jejímu číselnému rozsahu. Pro dosažení vyšší přesnosti hodnocení byly v rámci škály využity také mezilehlé hodnoty s krokem 0,5 stupně. Tento systém hodnocení umožnil detailní a vizuálně srozumitelné vyjádření stavu jednotlivých skenů a jejich porovnání.

Škála pro vyhodnocování jednotlivých skenů:

- 0 dokonalé spojení betonové a asfaltové vrstvy, bez výrazného rozdělení vrstev;
- 1 dokonalé spojení betonové a asfaltové vrstvy, s viditelným rozhraním vrstev;
- 2 počínající porucha spojení betonové a asfaltové vrstvy;
- 3 rozvíjející se porucha spojení betonové a asfaltové vrstvy;
- 4 plné oddělení betonové a asfaltové vrstvy.

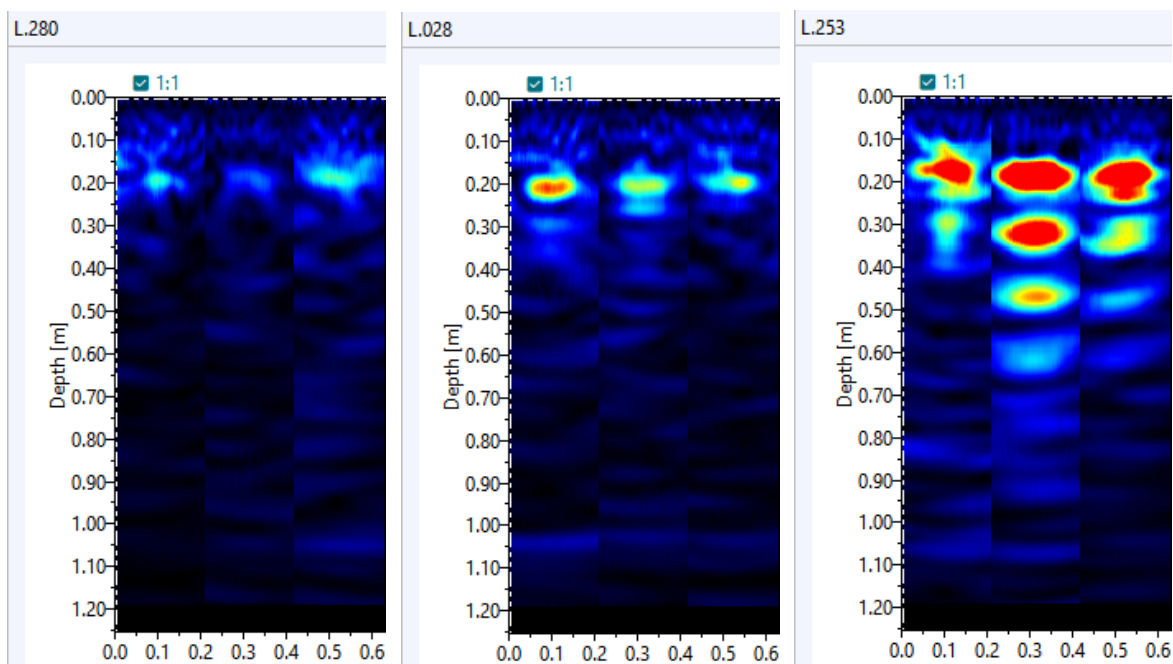
*Tabulka 1: Barevná škála použitá pro hodnocení desek metodou pulse echo.*

0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0

#### 4.2.4 Výstupy měření – typické příklady

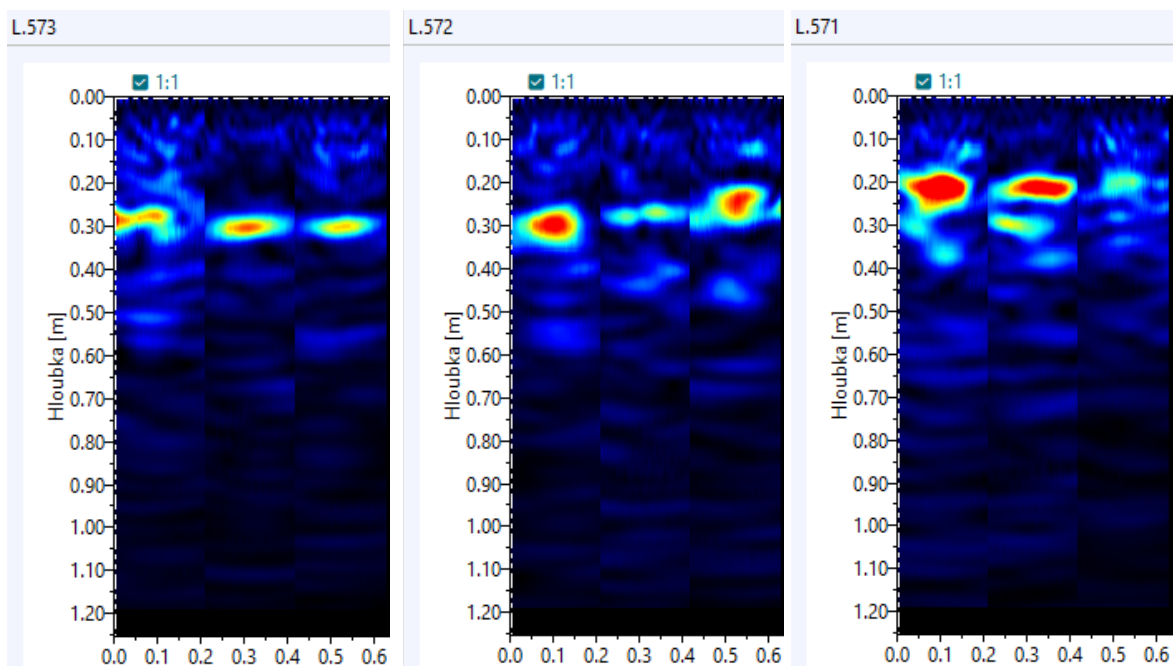
Na panoramatických B-skenech níže jsou uvedeny typické příklady soudržnosti betonového převrstvení k původní asfaltové vozovce.

U panoramatického B-skenu (viz *Obrázek 25*) desky č. 280 můžeme vidět pouze náznak rozhraní dvou materiálů, jedná se o dokonalé spojení betonové a asfaltové vrstvy. U B-skenu desky č. 28 pozorujeme již počínající delaminaci vrstev a u B-skenu desky č. 253 vidíme úplné oddělení obou vrstev.



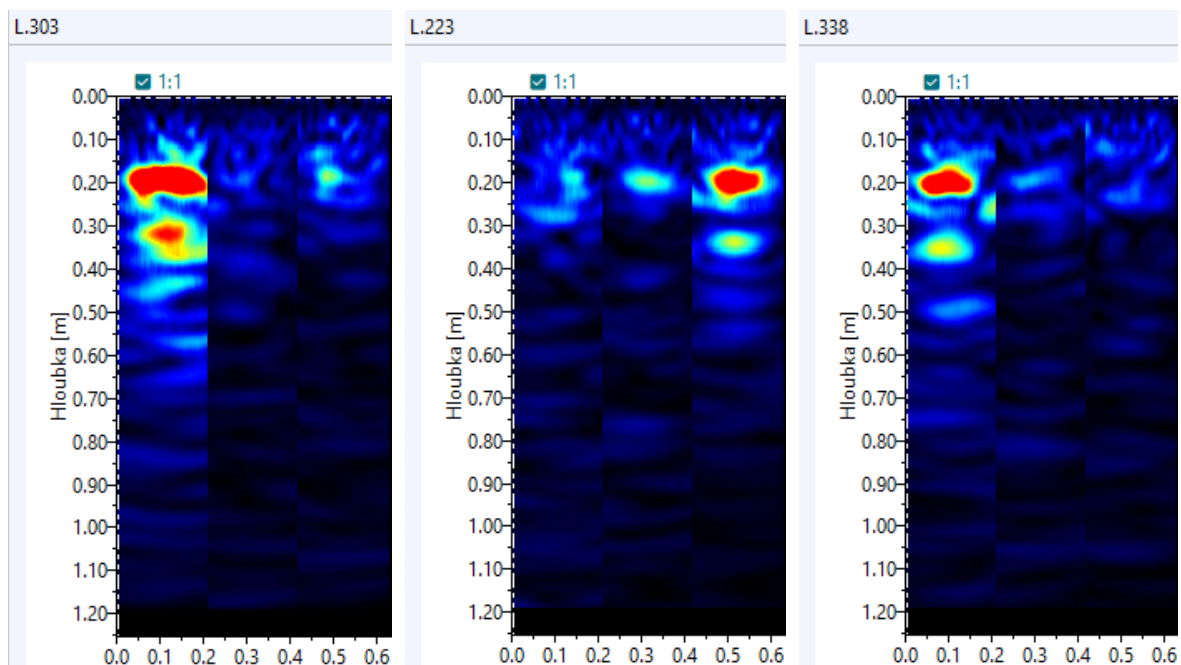
Obrázek 25: Panoramatické B-skeny desek č. 280, 28 a 253.

U panoramatických B-skenů (viz Obrázek 26) desek č. 573, 572 a 571 můžeme vidět postupný nárůst tloušťky betonového převrstvení. V tomto konkrétním případě je zde patrný přechod z tloušťky desky 175 mm (B-sken 571) na tloušťku desky 250 mm (B-sken 573). Jedná se o krajní desky komunikace, kde dochází k přechodu z WT na asfaltovou vozovku.

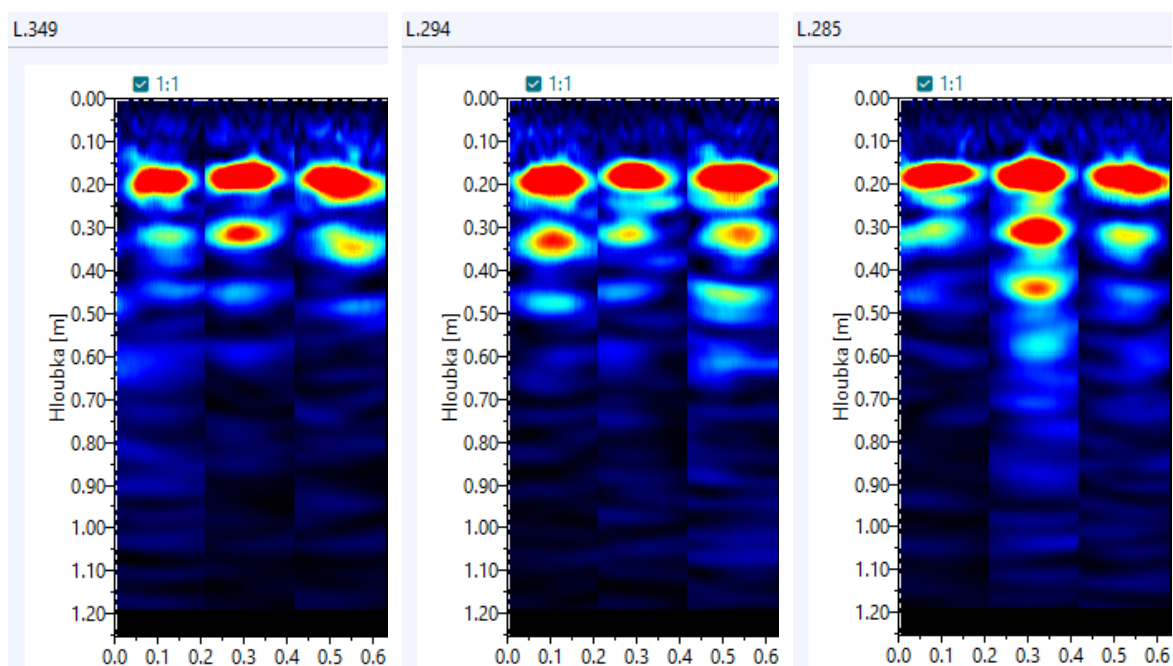


Obrázek 26: Panoramatické B-skeny desek č. 573, 572 a 571 – nárůst tloušťky betonového převrstvení.

U panoramatických B-skenů (viz *Obrázek 27*) desek č. 303, 223 a 338 můžeme pozorovat výbornou soudržnost vrstev, vyjma krajního měřeného bodu, který se nachází v blízkosti prostorové spáry.

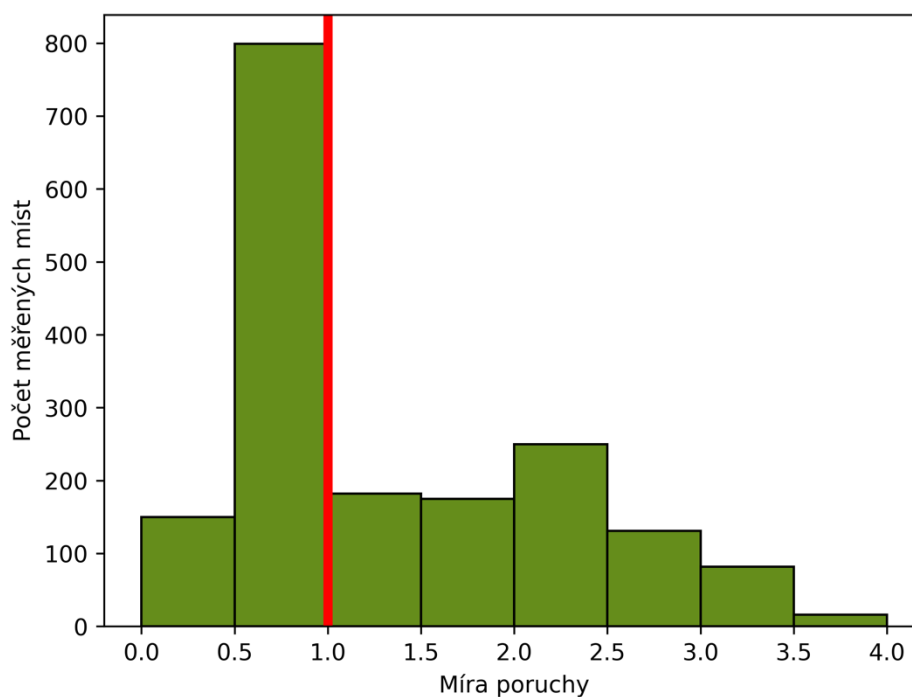


*Obrázek 27: Panoramatické B-skeny desek č. 303, 223 a 338 – delaminace v blízkosti prostorové spáry.*



*Obrázek 28: Panoramatické B-skeny desek č. 349, 294 a 285 – delaminace v místě trhlin v původní asfaltové vrstvě.*

Za účelem zhodnocení výsledků byly jednotlivé měřené body zpracovány a vyhodnoceny (viz *Tabulka 2*), což vedlo k následujícím závěrům. Více než polovina z celkových 1815 měřených bodů (konkrétně 949) byla vyhodnocena jako plně soudržná, což představuje pozitivní výsledek. Nicméně u zbývajících 836 měřených bodů byla zjištěna narušená vazba mezi vrstvami nebo jsou vrstvy dokonce plně odděleny (viz *Obrázek 29*).

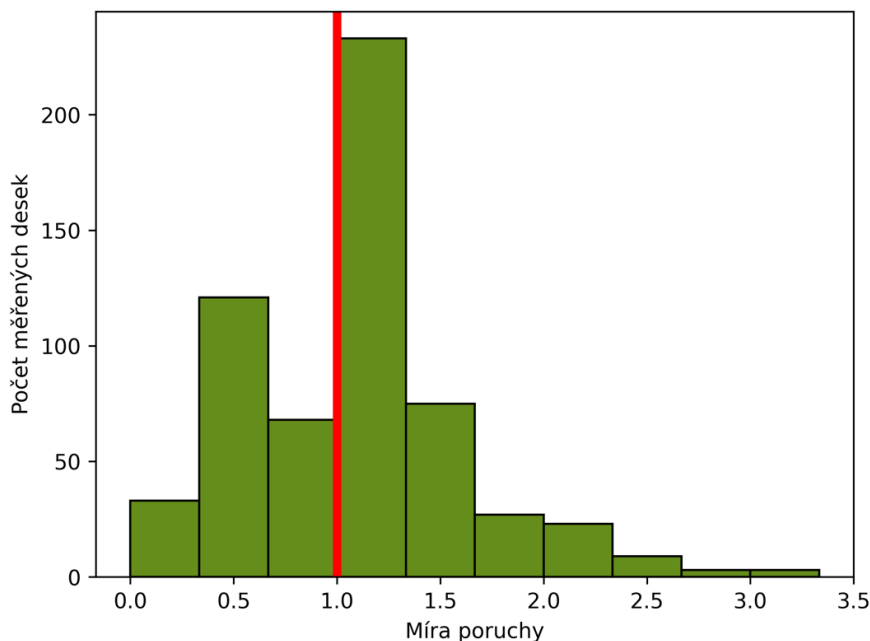


*Obrázek 29: Histogram všech měřených míst metodou pulse echo.*

*Tabulka 2: Ukázka hodnocení prvních deseti desek metodou pulse echo. Hodnocení všech desek je součástí přílohy.*

číslo desky	pozice sondy pulse echo			maximum	průměr
	1	2	3		1+2+3
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	1.0	0.5	1.0	1.0	0.8
3	1.5	2.0	1.0	2.0	1.5
4	1.0	2.0	1.0	2.0	1.3
5	1.0	0.5	2.0	2.0	1.2
6	2.0	0.5	2.0	2.0	1.5
7	0.5	0.5	1.5	1.5	0.8
8	0.5	0.5	1.0	1.0	0.7
9	2.5	2.5	0.5	2.5	1.8
10	1.5	0.5	1.0	1.5	1.0

Vzhledem k tomu, že bylo měřeno vždy ve třech bodech na každé desce, bylo možné zprůměrovat tři hodnoty na každém dilatačním celku a celkově vyhodnotit stav jednotlivých desek. Výsledkem bylo zjištění, že pouze 222 desek bylo plně soudržných, zatímco u zbývajících 373 dilatačních celků byla vazba mezi asfaltovou a betonovou vrstvou narušená (viz *Obrázek 30*).



*Obrázek 30: Histogram průměrných hodnot jednotlivých dilatačních celků.*

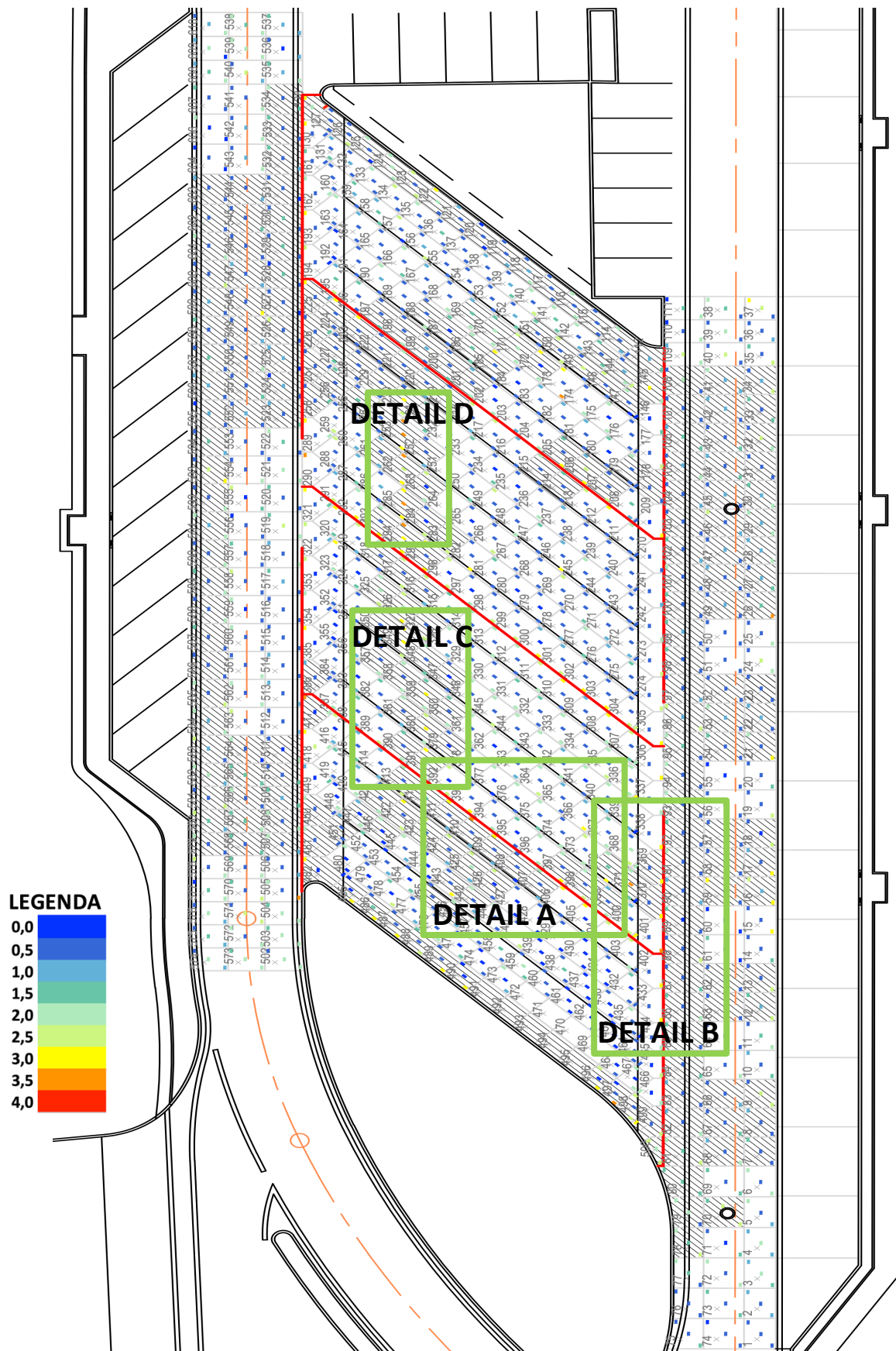
#### 4.2.5 Úvahy poruch

Po zanesení naměřených bodů do výkresu dálniční odpočívky Ladná (viz *Obrázek 31*) bylo zjištěno, že vznik delaminací je spojen s konstrukčním řešením a průběhem samotného provádění projektu.

V blízkosti prostorové spáry je patrné výrazné zhoršení soudržnosti obou vrstev (viz *Obrázek 27*, *Obrázek 32* a *Obrázek 33*). Příčinou těchto poruch může být tepelná roztažnost, případně zvedání okrajů desek způsobeného namáháním v ohybu.

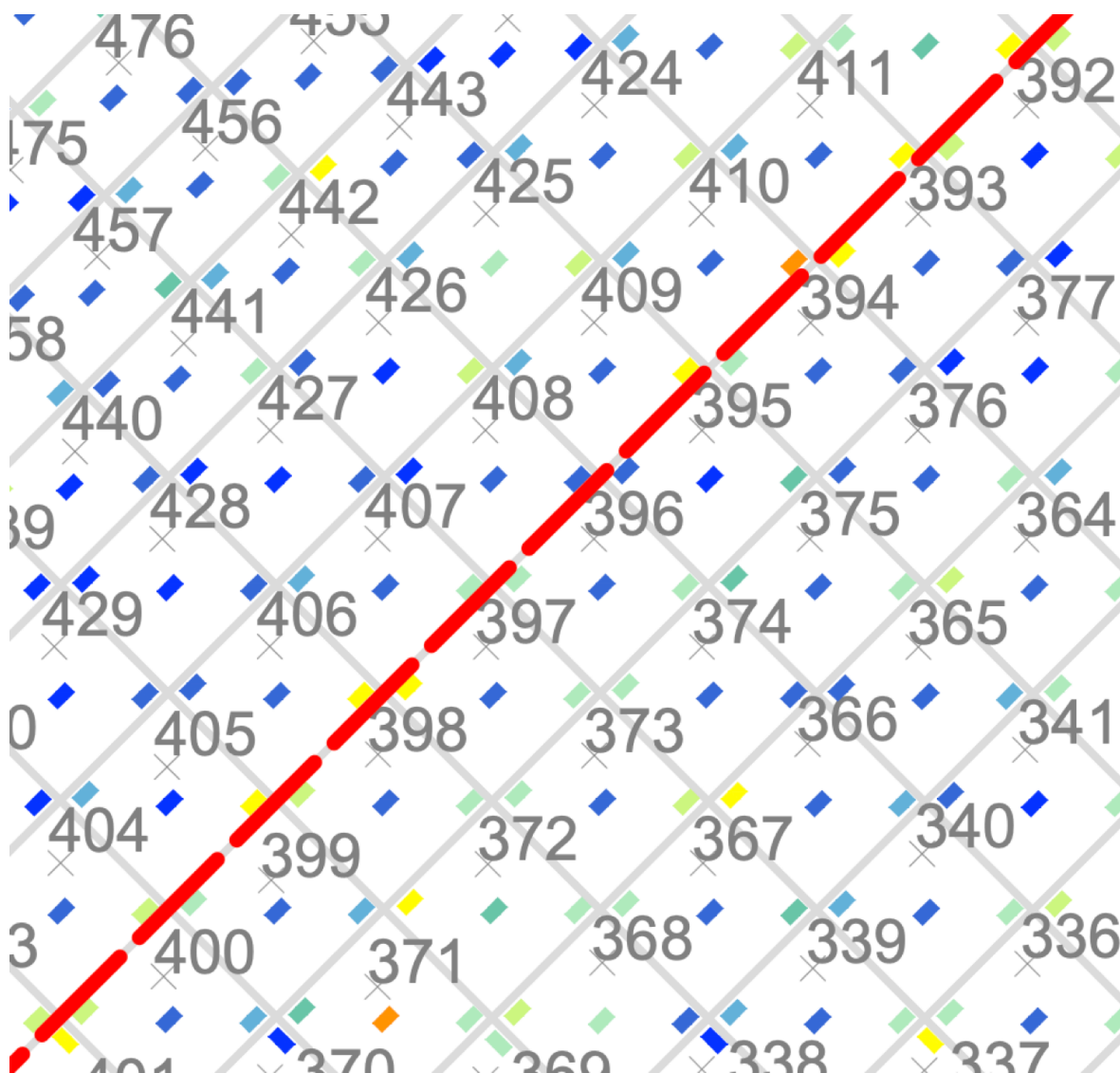
V místech, kde byly při odfrézování původní povrchové vrstvy asfaltové vozovky zaznamenány trhliny v dolní vrstvě, byly před betonáží instalovány výztužné sítě a asfaltové pásy šířky 200 mm, aby se zabránilo jejich propisování na povrch WT (viz *Obrázek 34* a *Obrázek 35*). I když bylo šíření trhlin k povrchu WT úspěšně zamezeno, v těchto místech dochází k významné delaminaci vrstev (viz *Obrázek 28*).



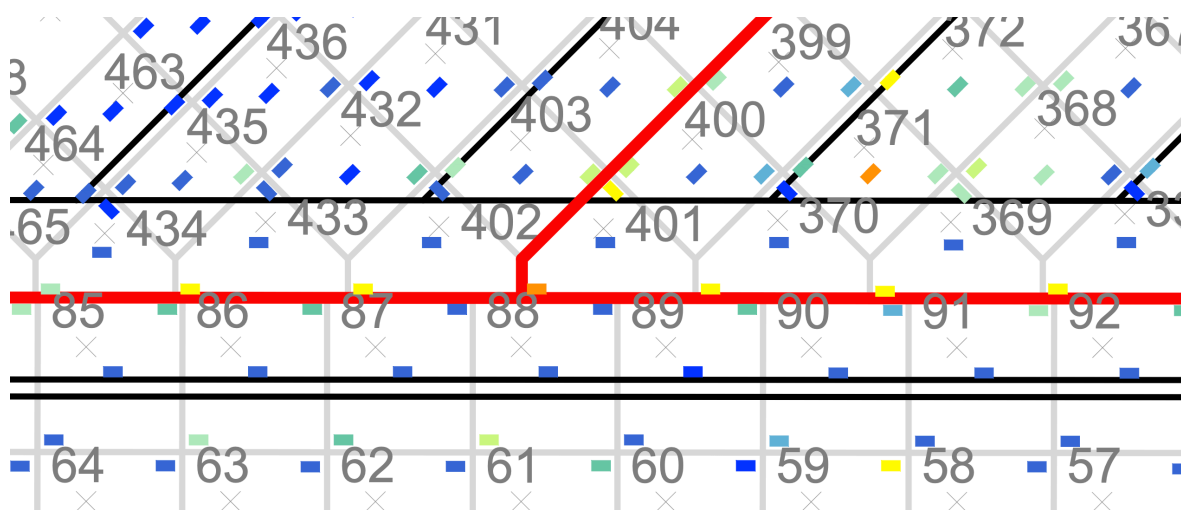


Obrázek 31: Měření 06/2022 metodou pulse echo – jednotlivé měřené body v situaci.

Podrobný výkres je součástí přílohy.

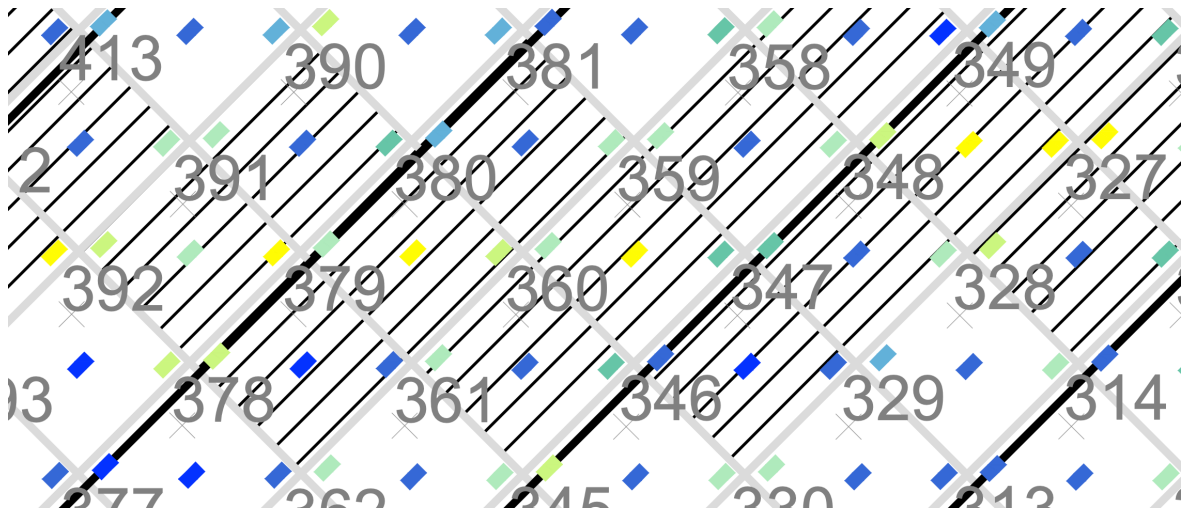


Obrázek 32: Detail A – zhoršení soudržnosti v blízkosti prostorové spáry (červená čárkovaná čára).

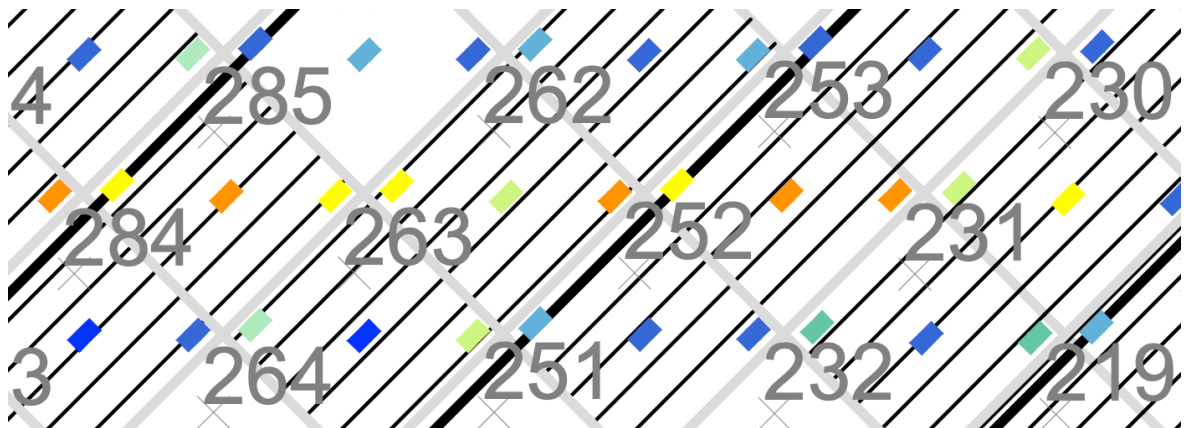


Obrázek 33: Detail B – zhoršení soudržnosti v blízkosti prostorové spáry (červená čára).





Obrázek 34: Detail C – zhoršení soudržnosti v místech s použitou výztužnou sítí  
(černé šrafování).



Obrázek 35: Detail D – zhoršení soudržnosti v místech s použitou výztužnou sítí  
(černé šrafování).

## 5 Ověřovací měření na zkušebním bloku

Pro ověření měření metodou pulse echo na dálniční odpočívce Ladná byl zřízen zkušební blok v prostorech Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Bylo využito původního zkušebního bloku z betonu C20/25, na který byla dne 24. 9. 2021 vybetonovaná nová betonová vrstva z betonu C70/85 (viz *Obrázek 36*). Tato nová vrstva je tvořena pěti dilatačními celky. Povrch mezi vrstvami byl před betonáží ošetřen Duvilaxem, s výjimkou míst, kde byly uměle vytvořeny poruchy v podobě štěrkových hnízd a vložených fólií (viz *Obrázek 37*).

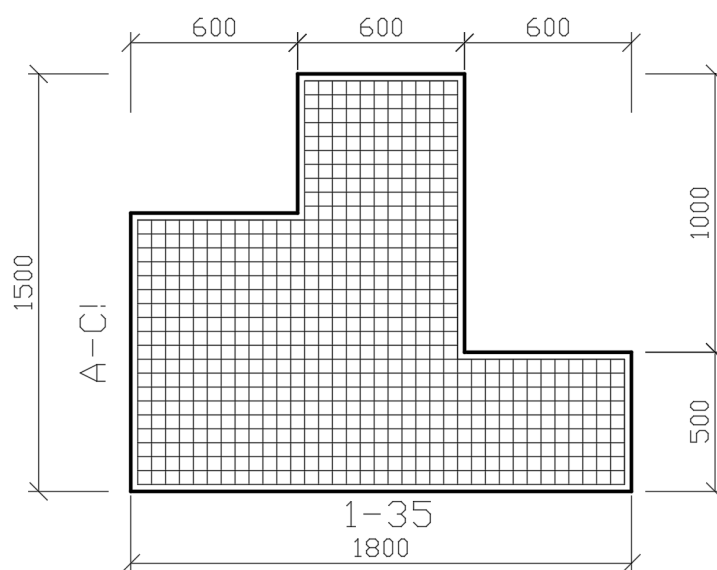


*Obrázek 36: Betonáž zkušebního bloku (Jaroslav Šnědar).*



*Obrázek 37: Uměle vytvořené poruchy: štěrková hnízda, fólie (Jaroslav Šnědar).*

Na měřeném povrchu se zavedla síť, kde na jedné ose je označena čísla 1-35 po 50 mm a na druhé ose písmeny A-C! (viz *Obrázek 38*).



*Obrázek 38: Měřený povrch zkušebního bloku se zavedenou pomocnou sítí.*

Pro získání podrobného a vizuálně atraktivního 3D modelu zkušebního bloku byla využita moderní technologie a software. K vytvoření 3D modelu byla použita aplikace RealityScan ve spojení s platformou Sketchfab.

Celý proces začal snímáním zkušebního bloku pomocí mobilního telefonu. Bylo vyfoceno celkem 200 snímků, které zachytily různé úhly a detaily bloku. Důkladné a kvalitní fotografování je klíčové pro získání přesného a detailního 3D modelu.

Následně byly tyto fotografie zpracovány pomocí aplikace RealityScan. Tato aplikace umožňuje převést fotografie na 3D model prostřednictvím algoritmů počítačového vidění. Během procesu byly fotografie analyzovány a rekonstruovány do podoby 3D objektu.

Po dokončení rekonstrukce byl výsledný 3D model exportován a nahrán na platformu Sketchfab, kde byl následně model dopraven do výsledné podoby (viz *Obrázek 39*). Sketchfab je online platforma určená k sdílení a prohlížení 3D modelů. Uživatelé mohou prozkoumat 3D model zkušebního bloku z různých úhlů, přiblížit si ho a detailněji si prohlédnout jeho strukturu.

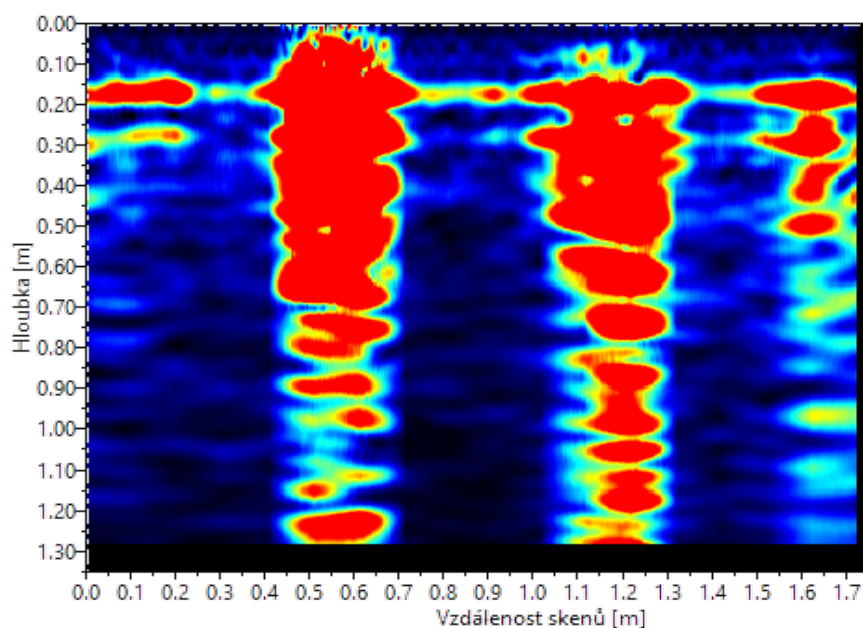
3D model představuje cenný nástroj pro dokumentaci a sdílení výsledků a poskytuje nové možnosti v oblasti vizualizace a prezentace výzkumných projektů ve stavebnictví.



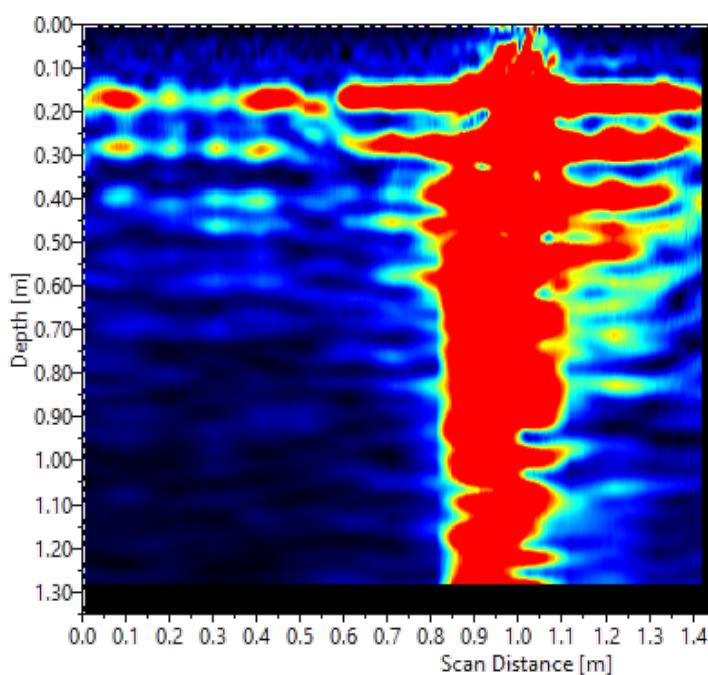
*Obrázek 39: 3D model zkušebního bloku.*

## 5.1 Měření metodou pulse echo

Na horním povrchu zkušebního bloku byla provedena měření UPE pomocí liniových skenů s přesahem B-skenů vždy o 110 mm. Pro zajištění komplexního měření bylo provedeno měření celé plochy ve dvou na sebe kolmých směrech. Celkově tedy bylo měřeno 255 bodů a z nich bylo sestaveno 31 liniových skenů (viz *Obrázek 40*, *Obrázek 41*).

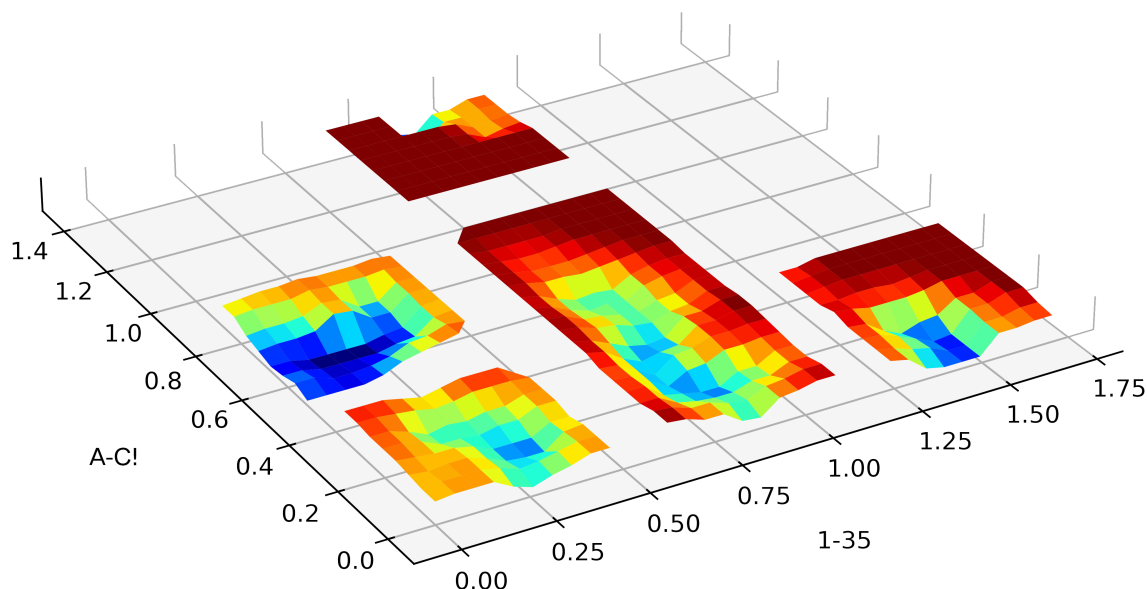


*Obrázek 40: Liniový B-sken zkušebního bloku ve směru 1-35 v poloze C-E.*



*Obrázek 41: Liniový B-sken zkušebního bloku ve směru A-C1 v poloze 15-17.*

Hodnoty vyhodnocení měření byly následně zprůměrovány a na základě nich byl sestaven graf povrchových delaminací (viz *Obrázek 42*). Vzhledem k provedení liniových skenů přes dilatační spáry nebylo možné stanovit hodnoty delaminací v blízkosti těchto spár kvůli přesytení signálu, v povrchovém grafu jsou tedy tato místa vynechána.



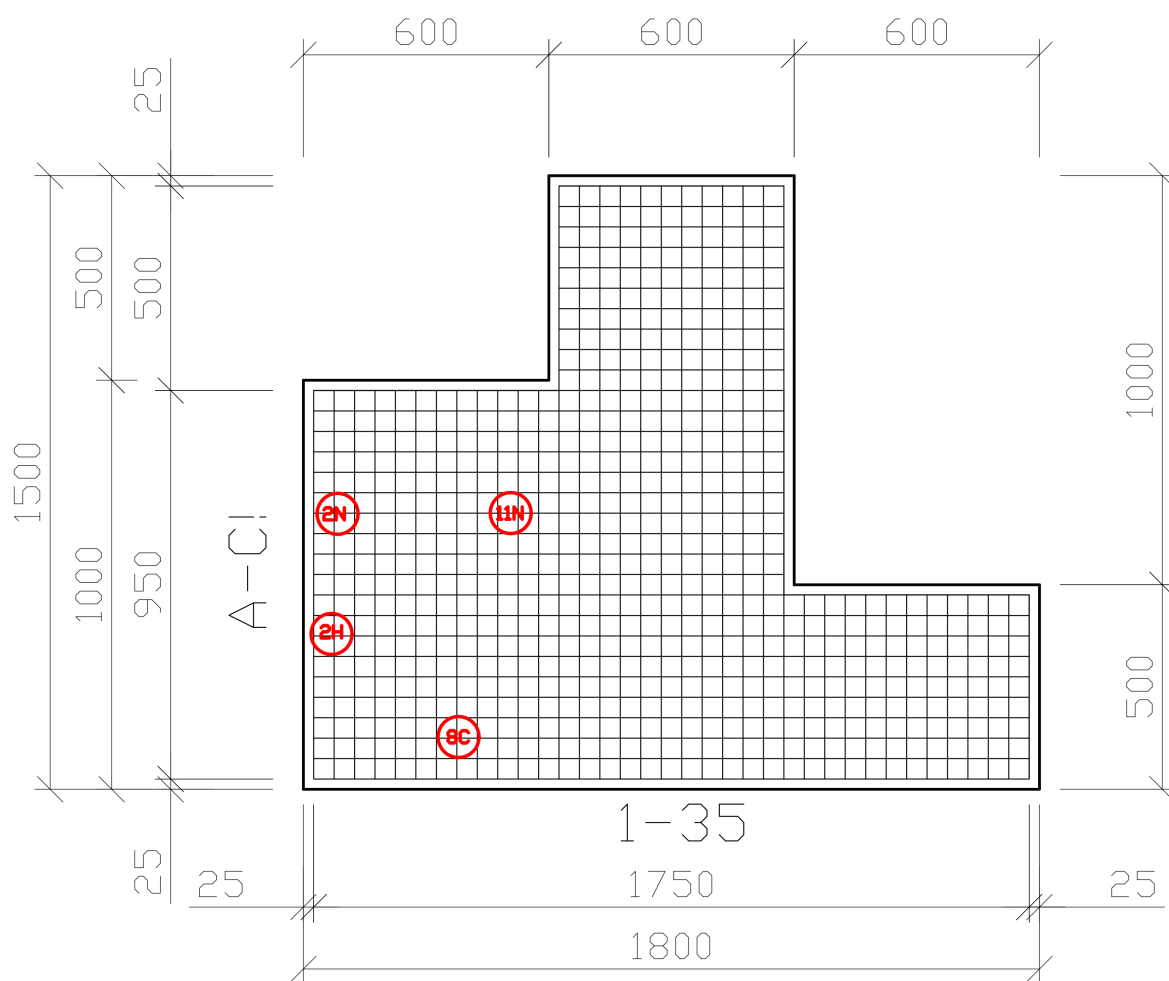
*Obrázek 42: Povrchový graf delaminace vrstev zkušebního bloku.*

Při retrospektivním hodnocení je zřejmé, že úmyslně vytvořené poruchy představují pouze malý podíl celkového počtu skutečných delaminací. Nejvíce se projevuje vliv smršťování betonu a jeho objemových změn v důsledku teploty. Měření bylo také ovlivněno skutečností, že polystyrénová výplň, tvořící při betonáži dilatačních celků jejich rozhraní, byla nesprávně umístěna a vytvořila tak šikmou spáru mezi jednotlivými celky (zaznamenáno v lokaci 11N).

## 5.2 Ověření na jádrových vývrtech

Pro ověření přesnosti a spolehlivosti měření UPE byly ve vybraných místech provedeny čtyři jádrové vývrty o průměru 100 mm. Konkrétní lokace vývrtů byly označeny jako 2N, 11N, 8C a 2H (viz *Obrázek 43*). Při vrtání jádrových vývrtů byla použita vrtačka Hilty DD 130 a vrtání probíhalo za mokra, což zajišťuje lepší chlazení a odvod vrtacího prachu (viz *Obrázek 44*). Pro šetrné vylomení vývrtů byl při lokacích 2N a 11N navrtán malý otvor pod úrovní horní vrstvy betonu. Tímto způsobem bylo umožněno vyjmutí vyvrtaných vzorků ze zkušebního bloku bez poškození soudržnosti vrstev.





Obrázek 43: Schéma zkušební bloku s vyobrazením polohy jádrových vývrtů.



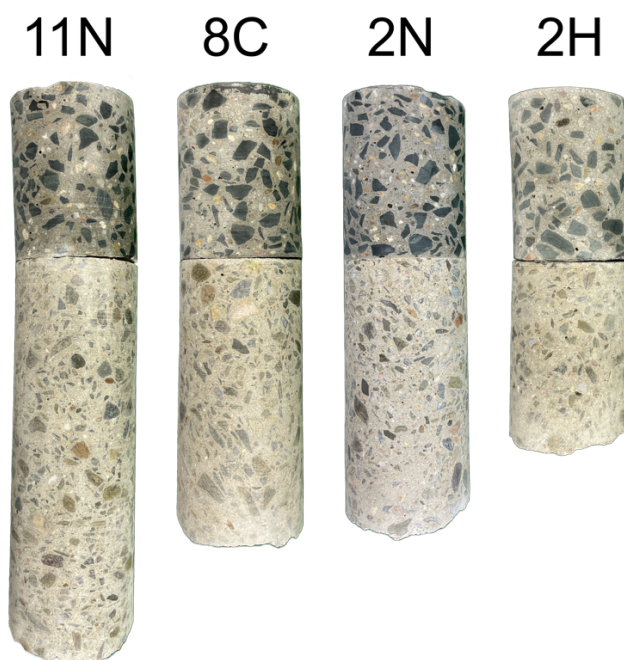
Obrázek 44: Vrtání jádrovou vrtačkou Hilty DD 130.



Obrázek 45: Označení směrů I.- IV. u jádrových vývrtů.

Pro všechny jádrové vývrty na horním povrchu zkušební bloku bylo zavedeno označení do základních čtyř směrů I.-IV. pro lepší orientaci při vyhodnocování trhlin (viz Obrázek 45).

U všech jádrových vývrtů (viz *Obrázek 46*) byly změřeny hodnoty tloušťek vrstev (viz *Tabulka 3*). Průměrná hodnota horní betonové vrstvy v místech vývrtů je 126 mm. Každý z vývrtů dosahuje jiné hloubky. Nejdelší je vývrt 11N, který má průměrnou hodnotu délky spodní betonové vrstvy 285 mm (celková průměrná délka je tedy 411 mm). Naopak nejkratší je vývrt 2H, který má celkovou délku 259 mm.



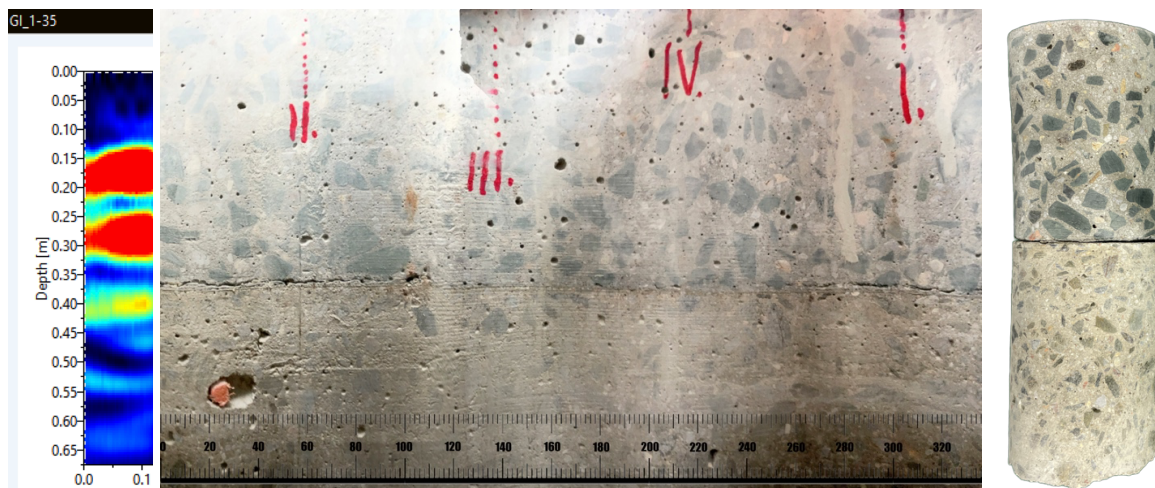
*Obrázek 46: Jádrové vývrty ze zkušebního bloku.*

*Tabulka 3: Hodnoty tloušťek vrstev u jádrových vývrtů v mm, měřené v jednotlivých směrech I.-IV.*

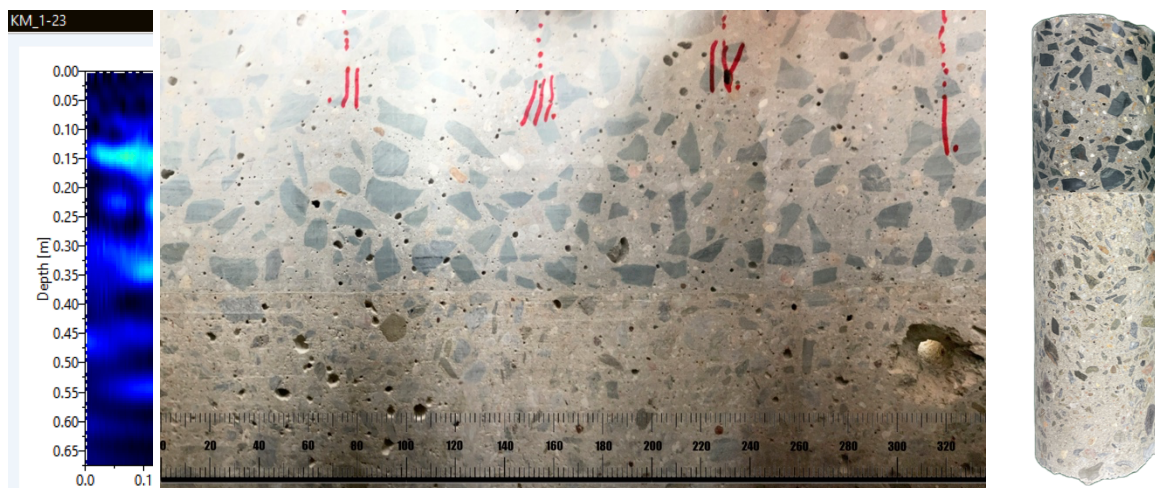
Vrt		I.	II.	III.	IV.	průměr
2H	W	125	125	126	127	<b>126</b>
	Z	138	134	125	136	<b>133</b>
8C	W	128	127	126	128	<b>127</b>
	Z	204	213	207	192	<b>204</b>
11N	W	126	125	126	126	<b>126</b>
	Z	287	295	280	277	<b>285</b>
2N	W	125	126	124	124	<b>125</b>
	Z	198	200	201	199	<b>200</b>

Všechny vývrty potvrdily správnost měření UPE. Vývrty v místě 8C a 11N měly částečnou přídržnost a tedy při vyjmutí vyvrtaného vzorku ze zkušebního bloku, se dvě vrstvy betonu od sebe oddělily. Navíc vývrt 11N zasahuje do šikmé dilatační spáry. U vývrtu 2H došlo, jak

jsme předpokládali, k oddělení vrstev již při vrtání (viz *Obrázek 47*). Výborná soudržnost vrstev byla potvrzena u vývrtnu 2N, kde se podařilo vyjmout vzorek se soudržným betonovým souvrstvím (viz *Obrázek 48*).



*Obrázek 47: Porovnání měření metodou pulse echo s jádrovým vývrtem v místě H2. Jádrový vývrt s rozdělenými vrstvami (vpravo). B-sken s násobným odrazem v daném místě (vlevo). Na rozvinutém panoramatickém snímku zevnitř jádrového vývrtnu (uprostřed) je viditelná delaminace vrstev v maximální tloušťce 0,8 mm.*



*Obrázek 48: Porovnání měření metodou pulse echo s jádrovým vývrtem v místě N2. Jádrový vývrt s plnou vazbou mezi vrstvami (vpravo). B-sken pouze s náznakem rozhraní dvou rozdílných vrstev v daném místě (vlevo). Na rozvinutém panoramatickém snímku zevnitř jádrového vývrtnu (uprostřed) není viditelná žádná nespojitost na rozhraní obou vrstev. Můžeme zde také vidět pomocný vrtaný otvor (směr I.), který sloužil k šetrnému vyjmutí jádrového vývrtnu.*



### 5.2.1 Zkušební tělesa

Z jádrových vývrtů o průměru 100 mm byla připravena zkušební tělesa o výšce 100 mm. Vzorky byly dle své polohy v konstrukci rozděleny na tři vzorky z horní vrstvy (11N, 2H a 8C) označené jako *W* a na čtyři vzorky ze spodní betonové vrstvy (11N, 2H, 8C a 2N) označené jako *Z* (viz *Obrázek 49*). Pouze v jednom jádrovém vývrtu, označeném jako 2N, byly vrstvy stále spojené i po vyjmutí ze zkušebního bloku, a proto byl připraven pouze jeden vzorek reprezentující plnou vazbu v betonovém souvrství.



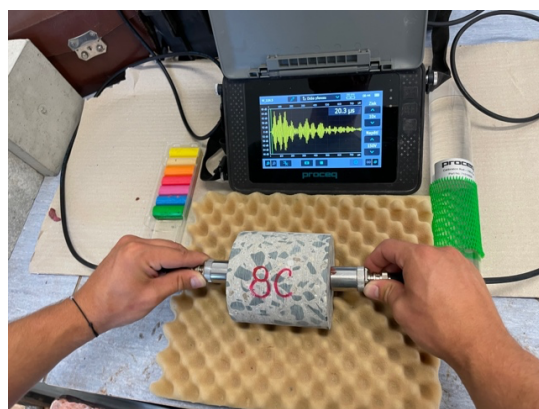
*Obrázek 49: Zkušební tělesa připravená z jádrových vývrtů.*

### 5.2.2 Zkoušky na tělesech

Pro doplnění vlastností betonové podkladní vrstvy a nadbetonované vrstvy zkušebního modelu se na odebraných tělesech provedly zkoušky pevnosti v tlaku (viz *Obrázek 50*) a měření ultrazvukovou průchodovou metodou (viz *Obrázek 51*).



*Obrázek 50: Zkouška betonu v tlaku – vzorek 8C/W.*



*Obrázek 51: Měření ultrazvukovou průchodovou metodou – vzorek 8C/W.*

Tabulka 4: Naměřené hodnoty na zkušebních vzorcích.

vzorek	poloha ve vrtu	d [mm]	l [mm]	m [g]	T <sub>uz</sub> [μs]			F [kN]
2H	W	97,7	100,5	1870,5	19,5	19,4	19,5	644,9
	Z	97,6	99,3	1704,2	26,4	26,2	26,5	250,4
8C	W	98,2	100,6	1892,3	19,9	19,8	19,4	659,8
	Z	98,4	99,4	1739,5	26,4	26,4	27,9	296,9
11N	W	98,4	99,7	1864,6	19,7	19,6	19,7	585,6
	Z	98,3	98,9	1724,9	29,2	29,2	27,9	333,4
2N	Z	98,4	99,0	1726,5	27,7	27,5	27,8	301,5

Výsledky potvrdily, že horní betonová vrstva má třídu C70/85. U spodní betonové vrstvy byla deklarována třída C20/25, nicméně díky provedeným zkouškám lze předpokládat, že třída betonu spodní vrstvy je C25/30.

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty pevností betonu v tlaku a dynamických modulů pružnosti betonu v tlaku.

vzorek	poloha ve vrtu	V [m <sup>3</sup> ]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Ø T <sub>uz</sub> [μs]	v <sub>uz</sub> [m/s]	f <sub>c, 1:1</sub> [MPa]	E <sub>cu</sub> [GPa]
2H	W	0,000753	2482,6	19,5	5163	86,0	66,2
	Z	0,000743	2293,9	26,4	3766	33,5	32,5
8C	W	0,000762	2483,6	19,7	5107	87,1	64,8
	Z	0,000756	2301,2	26,9	3695	39,0	31,4
11N	W	0,000758	2459,3	19,7	5069	77,0	63,2
	Z	0,000751	2298,1	28,8	3438	43,9	27,2
2N	Z	0,000753	2293,2	27,7	3578	39,6	29,4

Na zkušebním vzorku 2N byla provedena zkouška betonu v prostém tahu (viz Obrázek 52). Vypočtená hodnota pevnosti betonu v tahu f<sub>t</sub> = 1,7 MPa.



Obrázek 52: Zkouška betonu v prostém tahu – vzorek N2.

## 6 Závěr

V rámci této bakalářské práce bylo podrobně zkoumáno technické provedení a výhody metody whitetoppingu, která představuje moderní techniku renovace asfaltových vozovek.

První část práce popisuje metodu pulse echo, která byla použita k provedení měření na dálniční odpočívce Ladná. Tato metoda umožňuje detekovat přítomnost delaminací a poruch v betonových vrstvách pomocí analýzy odrazů ultrazvukových vln. Představily se postupy měření a vyhodnocování naměřených dat, které byly následně aplikovány při samotném měření na dálniční odpočívce.

Druhá část se věnovala rozdělení WT na tradiční WT, TWT a UTW. Také se zaměřila na způsob návrhu, včetně konstrukčních zásad a možnosti porušení.

Ve třetí části práce jsme prezentovali výsledky měření provedených na dálniční odpočívce Ladná. Analýzou naměřených dat jsme zjistili, že vznik delaminací souvisí s konstrukčním řešením a technologií provádění povrchu. Výrazné zhoršení soudržnosti betonových vrstev jsme pozorovali zejména v blízkosti prostorové spáry, které bylo pravděpodobně způsobené tepelnou roztažností a namáháním desky v ohybu. Dále jsme zaznamenali významné delaminace vrstev v místech, kde byly před betonáží instalovány výztužné sítě a asfaltové pásy z důvodu trhlin v asfaltové vozovce.

Pro ověření provedených měření byl využit zkušební blok, na kterém byly kromě měření UPE prováděny další testy. Výsledky pevnostní zkoušky v tlaku ukázaly, že horní betonová vrstva má třídu C70/85, zatímco spodní vrstva je pravděpodobně třídy C25/30. Zkouška betonu v prostém tahu na vzorku 2N prokázala hodnotu pevnosti betonu v tahu  $f_t = 1,7$  MPa. Jádrové vývrty ve vybraných místech potvrdily správnost měření UPE.

Na základě provedených měření a analýz lze konstatovat, že na konstrukci dálniční odpočívky Ladná se projeví delaminace a poruchy vrstev, které jsou způsobeny jak konstrukčním řešením, tak i technologií provádění povrchu. Metoda pulse echo se osvědčila jako účinný nástroj pro detekci těchto poruch a měla by být nadále používána při diagnostice a monitorování betonových konstrukcí.

## 7 Seznamy

### 7.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] P. Cikrle, D. Juráň, D. Kocáb, a J. Šnédar, „KONTROLA BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ METODOU PULSE ECHO", 2021. Viděno: 15. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://webinare.cbsbeton.eu/akce/secret/SBORNIK\\_17\\_TECH\\_2021.pdf](https://webinare.cbsbeton.eu/akce/secret/SBORNIK_17_TECH_2021.pdf)
- [2] A. G. Davis *et al.*, „Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures", 2013. Viděno: 17. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2282r\\_98.pdf](http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2282r_98.pdf)
- [3] R. Felicetti a F. Lo Monte, „Pulse-Echo Monitoring of Concrete Damage and Spalling during Fire", 2016. Viděno: 15. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://republic.polimi.it/handle/11311/1040775>
- [4] „Guidebook on non-destructive testing of concrete structures", 2002. Viděno: 17. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20305546>
- [5] M. Janků, P. Cikrle, J. Grošek, O. Anton, a J. Stryk, „Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges", *Constr Build Mater*, roč. 225, s. 1098–1111, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.320>.
- [6] „Pundit PL-200PE - Operating Instructions", 2015. Viděno: 15. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20PL-200PE\\_Operating%20Instructions\\_English\\_high.pdf](https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20PL-200PE_Operating%20Instructions_English_high.pdf)
- [7] J.-P. Balayssac a V. Garnier, „Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures", 2018.
- [8] „A1040 MIRA 3D Operation manual Ultrasonic low-frequency tomograph", 2022. Viděno: 24. květen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://acs-international.com/instruments/ultrasonic-pulse-echo-tomography-systems-mira/>

- [9] „Ultrasonic Concrete Testing: Principles and Instrumentation by ACS", Viděno: 15. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://acs-international.com/technology/>
- [10] „Pundit<sup>®</sup> Live Array Pro". Viděno: 15. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20Live%20Array%20Pro%20Sales%20Flyer%20English\\_high.pdf](https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20Live%20Array%20Pro%20Sales%20Flyer%20English_high.pdf)
- [11] P. Choi, D.-H. Kim, B.-H. Lee, a M. C. Won, „Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in concrete pavement and bridge", *Constr Build Mater*, roč. 121, s. 81–91, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.126>.
- [12] „Pundit 250 Array - Application Booklet", 2017. Viděno: 24. květen 2023. [Online]. Dostupné z: [https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20250%20Array\\_Application%20Booklet.pdf](https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20250%20Array_Application%20Booklet.pdf)
- [13] „Whitetopping", 2. duben 2023. [www.skanska.cz/whitetopping](http://www.skanska.cz/whitetopping) (viděno 2. duben 2023).
- [14] B. Slánský a L. Vysloužil, „WHITETOPPING A ULTRATENKÝ WHITETOPPING V ČR", 2023. Viděno: 20. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.ebeton.cz/clanky/2023\\_1\\_42\\_whitetopping-a-ultratenky-whitetopping-v-cr/](https://www.ebeton.cz/clanky/2023_1_42_whitetopping-a-ultratenky-whitetopping-v-cr/)
- [15] P. By, J. Roesler, A. Bordelon, M. Beyer, a D. Wang, „Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping", 2008, Viděno: 17. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.ideals.illinois.edu/items/9731>
- [16] R. O. Rasmussen, D. K. Rozycki, a N. C. H. R. Program, *Thin and Ultra-thin Whitetopping: A Synthesis of Highway Practice*. in National cooperative highway research program; Synthesis of highway practice. Transportation Research Board, National Research Council, 2004. Viděno: 18. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=0DkPhUxezmEC>

- [17] Chunhua Han, „SYNTHESIS OF CURRENT MINNESOTA PRACTICES OF THIN AND ULTRA-THIN WHITETOPPING", 2005. Viděno: 19. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.lrrb.org/PDF/200527.pdf>
- [18] M. J. Sheehan, S. M. Tarr, a S. Tayabji, „INSTRUMENTATION AND FIELD TESTING OF THIN WHITETOPPING PAVEMENT IN COLORADO AND REVISION OF THE EXISTING COLORADO THIN WHITETOPPING PROCEDURE", 2004. Viděno: 18. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.codot.gov/programs/research/pdfs/2004/whitetopping2.pdf>
- [19] R. L. Hutchinson, E. C. Lokken, K. H. Mcghee, G. B. Peck, L. F. Spaine, a R. S. Thomas, *Resurfacing with portland cement concrete*. Transportation Research Board, National Research Council, 1982. Viděno: 20. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_99.pdf](https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_99.pdf)
- [20] J. P. Zaniewski, B. G. Butler, G. Cunningham, a R. Machemehl, „Vehicle operating costs, fuel consumption, and pavement type condition factors", 1982. Viděno: 20. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/1012>
- [21] U. Siva Rama Krishna a C. Tadi, „Sustainable concrete pavements for low volume roads-Scientometric analysis of the literature", in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, bře. 2022. doi: 10.1088/1755-1315/982/1/012005.
- [22] „Práce na odpočívce Ladná a pokračující opravy dálnice D2", 2021. <https://kraje.rsd.cz/jihomoravsky/prace-v-odpocivce-ladna-a-pokracujici-opravy-dalnice-d2/> (viděno 22. květen 2023).
- [23] ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [24] ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Praha: ÚNMZ, 2021.

- [25] ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [26] Podklady poskytnuté firmou Skanska a.s.

## 7.2 Seznam použitých zkratek a veličin

aj.	a jiný/jiní/jinak/jiné
CB	cementobetonový/cementobetonové/cementobetonová
č.	číslo
ČR	Česká republika
d	průměr vzorku
DPC	diferenciální fázový kontrast (Differential Phase Contrast)
$E_{cu}$	modul pružnosti betonu v tlaku
$f_{c, 1:1}$	pevnost betonu v tlaku
FWD	rázová zatěžovací zkouška (Falling Weight Deflectometer)
g	gram
GPa	gigapascal
HMA	horká asfaltová směs (Hot Mix Asphalt)
kHz	kilohertz
km	kilometr
kN	kilonewton
l	délka vzorku
m	hmotnost vzorku
m	metr
$m^3$	metr krychlový
mm	milimetr
MPa	megapascal
např.	například
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic ČR
SFDI	Státní fond dopravní infrastruktury
$T_{uz}$	změřený čas přechodu ultrazvukového signálu
TWT	tenký whitetopping
UPE	ultrazvuková metoda pulse echo
USA	Spojené státy americké
UTW	ultratenký whitetopping
V	objem vzorku



$v_{uz}$	impulzová rychlost podélného ultrazvukového vlnění
W	označení vzorků vyrobených z horní vrstvy betonu
WT	whitetopping
Z	označení vzorků vyrobených ze spodní vrstvy betonu
$\mu s$	mikrosekunda
$\rho$	objemová hmotnost betonu
$\emptyset T_{uz}$	průměrná hodnota času přechodu ultrazvukového signálu

## 7.3 Seznam obrázků

Obrázek 1: Typické UPE s A-skenem [2].	5
Obrázek 2: Schéma výstupu měření – A-sken a B-sken [6].	6
Obrázek 3: Příklad výstupu měření ze zařízení Pundit 250 Array od firmy Proceq. Vlevo liniový B-sken, vpravo A-sken.	7
Obrázek 4: Schéma výstupu měření – B-sken, C-sken a D-sken [9].	8
Obrázek 5: Proces vysílání a přijímání ultrazvukového impulzu [9].	9
Obrázek 6: Snímač Pundit PL-200PE [6].	9
Obrázek 7: Pundit 250 Array.	10
Obrázek 8: 3D analýza MIRA s vyobrazením diskontinuit [11].	10
Obrázek 9: Schéma měření svislé trhliny přístrojem A1040 MIRA 3D [8].	11
Obrázek 10: Liniový B-sken zkušebního modelu s kabelovými kanálky vyplněnými injektážní maltou (vlevo) a kabelovými kanálkami bez injektáže (vpravo) [12].	12
Obrázek 11: Zrekonstruovaná dálniční odpočívka Ladná metodou TWT.	14
Obrázek 12: Rozdělení WT dle soudržnosti a dle materiálu původní vozovky [14].	14
Obrázek 13: Rozdělení betonových převrstvení; a) whitetopping, b) soudržné betonové převrstvení, c) nesoudržné betonové převrstvení [16].	15
Obrázek 14: Vliv soudržnosti na chování WT a) bez vazby mezi vrstvami, b) plná vazba mezi vrstvami CB a HMA [16].	16
Obrázek 15: Jednotlivé fáze přípravy WT [13].	19
Obrázek 16: Vliv soudržnosti na napětí [17].	20
Obrázek 17: Přejchod z WT na HMA [17].	21
Obrázek 18: Dálniční odpočívka Ladná před rekonstrukcí. Je zde vidět dříve provedená oprava asfaltového krytu na příjezdových komunikacích (Google Street View 2018).	24
Obrázek 19: Rekonstrukce dálniční odpočívky Ladná. Vlevo – odfrézovaný povrch rekonstruovaného parkoviště. Vpravo – přechod mezi vyfrézovanou částí parkoviště pro kamiony a částí s odstraněnou skladbou vozovky, určenou pro osobní automobily [22].	25
Obrázek 20: Číslování WT desek.	25
Obrázek 21: Detail napojení WT a asfaltové vozovky.	26

Obrázek 22: Detail řezané spáry vyplněné pružnou zálivkou.....	26
Obrázek 23: Měření in situ metodou pulse echo přístrojem Pundit 250 Array. ....	27
Obrázek 24: Schéma umístění ultrazvukové sondy.....	27
Obrázek 25: Panoramatické B-skeny desek č. 280, 28 a 253. ....	29
Obrázek 26: Panoramatické B-skeny desek č. 573, 572 a 571 – nárůst tloušťky betonového převrstvení. ....	29
Obrázek 27: Panoramatické B-skeny desek č. 303, 223 a 338 – delaminace v blízkosti prostorové spáry.....	30
Obrázek 28: Panoramatické B-skeny desek č. 349, 294 a 285 – delaminace v místě trhlin v původní asfaltové vrstvě. ....	30
Obrázek 29: Histogram všech měřených míst metodou pulse echo.....	31
Obrázek 30: Histogram průměrných hodnot jednotlivých dilatačních celků. ....	32
Obrázek 31: Měření 06/2022 metodou pulse echo – jednotlivé měřené body v situaci. Podrobný výkres je součástí přílohy. ....	33
Obrázek 32: Detail A – zhoršení soudržnosti v blízkosti prostorové spáry (červená čárkovaná čára). ....	34
Obrázek 33: Detail B – zhoršení soudržnosti v blízkosti prostorové spáry (červená čára). ....	34
Obrázek 34: Detail C – zhoršení soudržnosti v místech s použitou výztužnou sítí (černé šrafování). ....	35
Obrázek 35: Detail D – zhoršení soudržnosti v místech s použitou výztužnou sítí (černé šrafování). ....	35
Obrázek 36: Betonáž zkušebního bloku (Jaroslav Šnédar). ....	36
Obrázek 37: Uměle vytvořené poruchy: štěrková hnízda, fólie (Jaroslav Šnédar). ....	36
Obrázek 38: Měřený povrch zkušebního bloku se zavedenou pomocnou sítí. ....	36
Obrázek 39: 3D model zkušebního bloku.....	37
Obrázek 40: Liniový B-sken zkušebního bloku ve směru 1-35 v poloze C-E. ....	38
Obrázek 41: Liniový B-sken zkušebního bloku ve směru A-C! v poloze 15-17. ....	38
Obrázek 42: Povrchový graf delaminace vrstev zkušebního bloku. ....	39
Obrázek 43: Schéma zkušebního bloku s vyobrazením polohy jádrových vývrtů. ....	40
Obrázek 44: Vrtání jádrovou vrtačkou Hilty DD 130. ....	40
Obrázek 45: Označení směrů I.- IV. u jádrových vývrtů. ....	40
Obrázek 46: Jádrové vývrty ze zkušebního bloku.....	41

Obrázek 47: Porovnání měření metodou pulse echo s jádrovým vývrtem v místě H2. Jádrový vývrt s rozdělenými vrstvami (vpravo). B-sken s násobným odrazem v daném místě (vlevo). Na rozvinutém panoramatickém snímku zevnitř jádrového vývrtu (uprostřed) je viditelná delaminace vrstev v maximální tloušťce 0,8 mm. ....	42
Obrázek 48: Porovnání měření metodou pulse echo s jádrovým vývrtem v místě N2. ....	42
Obrázek 49: Zkušební tělesa připravená z jádrových vývrtů. ....	43
Obrázek 50: Zkouška betonu v tlaku – vzorek 8C/W. ....	43
Obrázek 51: Měření ultrazvukovou průchodovou metodou – vzorek 8C/W. ....	43
Obrázek 52: Zkouška betonu v prostém tahu – vzorek N2. ....	44

## 7.4 Seznam tabulek

Tabulka 1: Barevná škála použitá pro hodnocení desek metodou pulse echo. ....	28
Tabulka 2: Ukázka hodnocení prvních deseti desek metodou pulse echo. Hodnocení všech desek je součástí přílohy.....	31
Tabulka 3: Hodnoty tloušťek vrstev u jádrových vývrtů v mm, měřené v jednotlivých směrech I.-IV. ....	41
Tabulka 4: Naměřené hodnoty na zkušebních vzorcích.....	44
Tabulka 5: Vypočtené hodnoty pevností betonu v tlaku a dynamických modulů pružnosti betonu v tlaku.....	44

## **7.5 Seznam příloh**

Příloha č. 1: Hodnocení měření desek na dálniční odpočívce Ladná metodou pulse echo

Příloha č. 2: Výstup měření UPE v situaci

**Příloha č. 1: Hodnocení měření desek na dálniční odpočívce Ladná metodou pulse echo**

číslo desky	pozice sondy pulse echo			maximum	průměr
	1	2	3		1+2+3
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
3	1,5	2,0	1,0	2,0	1,5
4	1,0	2,0	1,0	2,0	1,3
5	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
6	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
7	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
8	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
9	2,5	2,5	0,5	2,5	1,8
10	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0
11	2,0	1,5	0,5	2,0	1,3
12	2,5	1,0	1,5	2,5	1,7
13	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
14	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
15	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
16	3,0	1,0	2,5	3,0	2,2
17	3,0	0,5	1,0	3,0	1,5
18	2,5	0,0	0,5	2,5	1,0
19	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
20	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
21	3,0	0,5	2,0	3,0	1,8
22	0,5	1,0	1,0	1,0	0,8
23	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
24	2,0	2,5	0,5	2,5	1,7
25	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
26	3,5	1,5	0,5	3,5	1,8
27	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0
28	2,0	1,0	1,0	2,0	1,3
29	2,0	1,0	2,0	2,0	1,7
30	2,0	1,0	1,5	2,0	1,5
31	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
32	2,0	2,5	0,5	2,5	1,7
33	1,5	0,5	1,5	1,5	1,2
34	2,5	1,0	0,5	2,5	1,3
35	2,5	0,5	1,5	2,5	1,5
36	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7



37	0,5	2,5	3,0	3,0	2,0
38	0,5	1,5	2,0	2,0	1,3
39	0,5	2,0	0,5	2,0	1,0
40	0,5	2,5	0,5	2,5	1,2
41	1,0	1,0	2,0	2,0	1,3
42	0,5	1,0	1,0	1,0	0,8
43	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
44	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0
45	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
46	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
47	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
48	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
49	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
50	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
51	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
52	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
53	0,5	1,0	2,0	2,0	1,2
54	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
55	0,5	0,0	0,0	0,5	0,2
56	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
57	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
58	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
59	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
61	0,0	0,5	1,5	1,5	0,7
62	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
63	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
64	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
65	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
66	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
67	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
68	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
69	1,5	0,5	1,5	1,5	1,2
70	2,5	2,5	1,5	2,5	2,2
71	1,5	0,0	0,5	1,5	0,7
72	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
73	1,5	0,5	1,5	1,5	1,2
74	0,5	0,5	0,0	0,5	0,3
75	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
76	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
77	0,5	1,5	2,0	2,0	1,3
78	2,5	1,5	2,0	2,5	2,0

79	0,5	2,0	2,0	2,0	1,5
80	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
81	2,5	1,5	2,0	2,5	2,0
82	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
83	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
84	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
85	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
86	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
87	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
88	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
89	0,5	0,0	1,5	1,5	0,7
90	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
91	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
92	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
93	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
94	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
95	0,5	1,5	2,0	2,0	1,3
96	2,5	1,0	2,5	2,5	2,0
97	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
98	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
99	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0
100	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
101	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
102	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
103	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
104	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
105	2,0	1,0	0,5	2,0	1,2
106	1,5	1,5	1,0	1,5	1,3
107	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
108	0,5	2,0	0,5	2,0	1,0
109	2,0	2,5	1,0	2,5	1,8
110	2,0	0,5	0,0	2,0	0,8
111	2,0	1,5	0,0	2,0	1,2
112	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0
114	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
115	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
116	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
117	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
118	2,0	1,0	0,5	2,0	1,2
119	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
120	0,0	0,5	0,0	0,5	0,2
121	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7

122	0,5	2,0	3,0	3,0	1,8
123	2,5	0,5	2,5	2,5	1,8
124	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
125	0,0	0,5	2,0	2,0	0,8
126	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
127	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
128	4,0	2,0	3,0	4,0	3,0
130	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
131	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0
132	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
133	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
134	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
135	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
136	0,5	1,5	0,5	1,5	0,8
137	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
138	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
139	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0
140	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
141	1,5	1,5	2,0	2,0	1,7
142	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
143	1,5	0,5	1,5	1,5	1,2
144	2,0	1,0	0,5	2,0	1,2
145	2,0	3,0	2,5	3,0	2,5
146	1,5	0,0	0,0	1,5	0,5
147	0,0	0,5	2,0	2,0	0,8
148	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
149	0,5	2,5	0,5	2,5	1,2
150	2,5	0,5	2,5	2,5	1,8
151	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
152	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0
153	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
154	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
155	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
156	2,5	1,0	0,5	2,5	1,3
157	0,0	0,5	2,5	2,5	1,0
158	1,5	1,5	1,0	1,5	1,3
159	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0
160	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
161	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
162	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
163	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
164	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7

165	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
166	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
167	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
168	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
169	2,0	1,5	1,0	2,0	1,5
170	2,0	2,0	1,5	2,0	1,8
171	2,0	2,0	2,5	2,5	2,2
172	2,0	0,0	3,0	3,0	1,7
173	3,5	0,5	3,0	3,5	2,3
174	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
175	2,0	0,0	2,0	2,0	1,3
176	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
177	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
178	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
179	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
180	0,5	0,0	1,5	1,5	0,7
181	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
182	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
183	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
184	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
185	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
186	1,5	1,5	2,0	2,0	1,7
187	0,5	0,0	1,5	1,5	0,7
188	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
189	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
190	0,5	1,0	2,0	2,0	1,2
191	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
192	0,0	0,5	0,0	0,5	0,2
193	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
194	0,0	0,5	2,5	2,5	1,0
195	2,5	1,5	1,0	2,5	1,7
196	3,0	0,5	1,5	3,0	1,7
197	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
198	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
199	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
200	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
201	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
202	2,5	0,0	0,0	2,5	0,8
203	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
204	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
205	3,0	0,5	1,5	3,0	1,7
206	3,0	2,5	1,0	3,0	2,2

207	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
208	1,0	1,5	0,5	1,5	1,0
209	3,0	0,0	0,5	3,0	1,2
210	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
211	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
212	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
213	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
214	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
215	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
216	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
217	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
218	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
219	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
220	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
221	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
222	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
223	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
224	2,5	0,5	3,0	3,0	2,0
225	1,0	0,5	3,0	3,0	1,5
226	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
227	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
228	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
229	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
230	2,5	3,0	0,5	3,0	2,0
231	1,5	0,5	1,5	1,5	1,2
232	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
233	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
234	1,5	0,0	0,5	1,5	0,7
235	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
236	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
237	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
238	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
239	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
240	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
241	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
242	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
243	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
244	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
245	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
246	3,0	0,5	1,0	3,0	1,5
247	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
248	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0

249	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
250	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
251	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
252	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
253	3,0	3,5	3,5	3,5	3,3
254	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
255	0,5	1,5	0,5	1,5	0,8
256	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
257	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
258	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
259	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
260	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
261	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
262	3,0	2,5	3,5	3,5	3,0
263	2,0	0,0	2,5	2,5	1,5
264	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
265	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
266	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
267	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
268	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
269	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
270	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
271	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
272	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
273	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
274	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
275	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
276	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
277	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
278	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
279	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
280	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
281	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
282	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
283	2,5	0,5	1,5	2,5	1,5
284	2,5	0,0	0,5	2,5	1,0
285	3,0	3,5	3,0	3,5	3,2
286	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
287	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0
288	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
289	2,0	0,5	3,0	3,0	1,8
290	0,5	0,5	3,5	3,5	1,5

291	2,5	0,5	1,0	2,5	1,3
292	3,0	0,5	2,0	3,0	1,8
293	3,0	0,5	2,0	3,0	1,8
294	3,0	3,0	3,5	3,5	3,2
295	3,0	0,5	3,0	3,0	2,2
296	2,5	0,0	2,5	2,5	1,7
297	2,0	0,0	0,5	2,0	0,8
298	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
299	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
300	3,0	0,0	1,0	3,0	1,3
301	2,5	0,5	1,0	2,5	1,3
302	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
303	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
304	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
305	3,0	0,5	2,5	3,0	2,0
306	3,0	0,5	2,0	3,0	1,8
307	1,5	0,5	2,5	2,5	1,5
308	2,0	0,5	3,0	3,0	1,8
309	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
310	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
311	2,0	0,5	2,5	2,5	1,7
312	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
313	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
314	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
315	0,5	1,5	1,5	1,5	1,2
316	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
317	2,5	0,5	2,5	2,5	1,8
318	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
319	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
320	1,5	0,5	3,0	3,0	1,7
321	1,5	0,5	3,0	3,0	1,7
322	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
323	2,0	0,0	3,0	3,0	1,7
324	1,5	0,0	0,5	1,5	0,7
325	2,5	2,0	2,0	2,5	2,2
326	3,0	2,0	2,5	3,0	2,5
327	2,5	0,5	1,5	2,5	1,5
328	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
329	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
330	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
331	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
332	2,5	0,5	1,5	2,5	1,5



333	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
334	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
335	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
336	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
337	2,0	0,5	3,0	3,0	1,8
338	3,0	0,5	0,0	3,0	1,2
339	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
340	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
341	0,5	0,0	2,0	2,0	0,8
342	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
343	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
344	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
345	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
346	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
347	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
348	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
349	2,5	3,0	3,0	3,0	2,8
350	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
351	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
352	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
353	0,5	0,0	2,5	2,5	1,0
354	0,5	0,0	2,0	2,0	0,8
355	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
356	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
357	2,0	0,5	0,0	2,0	0,8
358	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
359	2,0	3,0	1,5	3,0	2,2
360	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
361	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
362	0,5	0,0	2,0	2,0	0,8
363	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
364	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
365	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
366	3,0	0,5	1,0	3,0	1,5
367	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
368	2,5	2,0	0,5	2,5	1,7
369	3,0	0,5	2,0	3,0	1,8
370	3,0	0,5	0,0	3,0	1,2
371	1,5	3,5	2,0	3,5	2,3
372	3,0	1,5	2,0	3,0	2,2
373	2,0	0,5	2,5	2,5	1,7
374	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0

375	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
376	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
377	0,0	0,0	2,0	2,0	0,7
378	0,0	0,0	0,5	0,5	0,2
379	2,5	0,0	0,5	2,5	1,0
380	2,0	3,0	2,5	3,0	2,5
381	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
382	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
383	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5
384	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
385	0,5	0,0	3,0	3,0	1,2
386	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
387	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
388	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
389	2,5	0,5	1,0	2,5	1,3
390	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
391	2,5	2,0	3,0	3,0	2,5
392	2,5	0,0	2,5	2,5	1,7
393	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
394	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
395	0,5	0,0	1,5	1,5	0,7
396	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
397	3,0	0,5	2,0	3,0	1,8
398	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
399	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
400	2,5	0,5	1,0	2,5	1,3
401	3,5	0,5	3,0	3,5	2,3
402	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
403	2,0	0,5	2,5	2,5	1,7
404	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
405	1,0	0,0	3,0	3,0	1,3
406	0,5	0,5	3,0	3,0	1,3
407	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
408	0,0	0,5	0,5	0,5	0,3
409	1,0	0,5	3,0	3,0	1,5
410	1,0	0,5	3,5	3,5	1,7
411	1,0	0,5	3,0	3,0	1,5
412	2,0	1,5	3,0	3,0	2,2
413	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
414	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
415	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0
416	1,0	0,0	2,5	2,5	1,2

417	2,0	0,0	3,5	3,5	1,8
418	2,0	2,5	3,0	3,0	2,5
419	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
420	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
421	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
422	2,5	0,5	3,0	3,0	2,0
423	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
424	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
425	1,0	2,0	2,5	2,5	1,8
426	0,5	0,0	2,5	2,5	1,0
427	0,0	0,0	0,5	0,5	0,2
428	0,0	0,0	0,5	0,5	0,2
429	0,0	0,0	0,5	0,5	0,2
430	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
431	0,0	0,0	0,5	0,5	0,2
432	0,5	0,0	1,5	1,5	0,7
433	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
434	2,0	0,5	0,0	2,0	0,8
435	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
436	0,0	0,0	0,5	0,5	0,2
437	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
438	0,5	1,5	0,5	1,5	0,8
439	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
440	2,5	0,0	0,5	2,5	1,0
441	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
442	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
443	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
444	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
445	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
446	0,0	0,0	2,0	2,0	0,7
447	2,0	0,0	1,0	2,0	1,0
448	2,0	0,0	0,0	2,0	0,7
449	1,5	0,0	1,0	1,5	0,8
450	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
451	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
452	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
453	1,0	0,5	0,0	1,0	0,5
454	1,5	0,0	0,5	1,5	0,7
455	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
456	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
457	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
458	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0

459	1,5	2,0	0,5	2,0	1,3
460	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
461	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
462	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
463	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
464	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
465	2,5	0,0	0,5	2,5	1,0
466	2,0	0,0	2,0	2,0	1,3
467	2,0	0,0	2,0	2,0	1,3
468	0,5	0,0	1,5	1,5	0,7
469					
470					
471					
472					
473	1,0	0,0	2,0	2,0	1,0
474	0,5	0,0	0,0	0,5	0,2
475	1,5	0,0	0,0	1,5	0,5
476	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
477	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
478	2,5	0,0	1,5	2,5	1,3
479	0,5	0,0	0,5	0,5	0,3
480	0,0	0,0	2,0	2,0	0,7
481	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
482	0,0	0,0	3,0	3,0	1,0
485	3,0	0,0	0,0	3,0	1,0
486	3,0	1,5	0,5	3,0	1,7
487	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
488	2,5	0,5	1,5	2,5	1,5
489	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
490	3,0	0,0	0,0	3,0	1,0
491					
492					
493					
494					
495					
496	3,0	0,0	2,5	3,0	1,8
497	3,5	0,5	0,0	3,5	1,3
498	2,5	0,5	2,5	2,5	1,8
499	2,5	0,5	3,0	3,0	2,0
500	2,5	2,0	2,5	2,5	2,3
502	2,0	2,0	0,5	2,0	1,5
503	2,0	2,0	1,5	2,0	1,8

504	2,0	2,0	1,5	2,0	1,8
505	3,5	0,5	2,0	3,5	2,0
506	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
507	1,0	0,5	2,0	2,0	1,2
508	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
509	1,5	1,0	1,5	1,5	1,3
510	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
511	2,0	0,0	0,5	2,0	0,8
512	1,0	0,5	2,5	2,5	1,3
513	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
514	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
515	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
516	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
517	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0
518	2,0	0,5	1,0	2,0	1,2
519	2,0	2,5	1,5	2,5	2,0
520	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
521	2,0	2,0	0,5	2,0	1,5
522	0,5	1,5	2,0	2,0	1,3
523	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0
524	0,5	1,0	0,0	1,0	0,5
525	0,0	1,0	1,0	1,0	0,7
526	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
527	0,0	0,5	0,5	0,5	0,3
528	0,5	1,5	0,0	1,5	0,7
529	3,5	1,5	0,5	3,5	1,8
530	0,5	1,5	0,5	1,5	0,8
531	0,0	0,5	0,5	0,5	0,3
532	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
533	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
534	1,5	0,5	2,0	2,0	1,3
535	2,0	1,0	1,5	2,0	1,5
536	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5
537	1,0	1,0	1,5	1,5	1,2
538	2,0	1,5	2,0	2,0	1,8
539	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
540	1,0	2,5	0,5	2,5	1,3
541	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
542	2,0	1,0	0,5	2,0	1,2
543	2,0	1,0	0,5	2,0	1,2
544	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
545	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8

546	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
547	1,0	0,5	1,0	1,0	0,8
548	3,0	0,5	0,5	3,0	1,3
549	1,0	0,5	0,5	1,0	0,7
550	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
551	1,5	0,5	0,5	1,5	0,8
552	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
553	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
554	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
555	1,5	0,0	2,5	2,5	1,3
556	0,5	0,5	0,0	0,5	0,3
557	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
558	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
559	0,5	0,0	2,0	2,0	0,8
560	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
561	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
562	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
563	0,5	0,5	2,5	2,5	1,2
564	0,0	0,5	2,0	2,0	0,8
565	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
566	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
567	2,0	1,5	1,5	2,0	1,7
568	1,5	0,5	1,5	1,5	1,2
569	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
570	2,5	0,5	1,5	2,5	1,5
571	2,5	2,5	0,5	2,5	1,8
572	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
573	2,0	2,0	1,5	2,0	1,8
574	1,0	2,0	0,5	2,0	1,2
575	1,0	1,5	0,5	1,5	1,0
576	1,0	2,0	0,5	2,0	1,2
577	2,0	1,5	0,0	2,0	1,2
578	2,0	0,5	2,5	2,5	1,7
579	0,5	0,5	2,0	2,0	1,0
580	1,0	1,5	2,5	2,5	1,7
581	2,5	0,5	0,5	2,5	1,2
582	1,0	2,0	2,0	2,0	1,7
583	0,5	1,0	2,5	2,5	1,3
584	2,0	1,0	2,0	2,0	1,7
585	2,5	0,5	2,0	2,5	1,7
586	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
587	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8

588	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
589	2,0	0,5	1,5	2,0	1,3
590	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
591	2,0	1,0	2,0	2,0	1,7
592	2,0	0,5	0,5	2,0	1,0
593	3,0	2,5	0,5	3,0	2,0
594	1,0	1,5	0,5	1,5	1,0
595	0,5	1,0	0,0	1,0	0,5
596	0,5	1,0	1,0	1,0	0,8
597	0,5	1,5	0,5	1,5	0,8
598	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
599	0,5	1,0	0,5	1,0	0,7
600	2,5	0,5	0,0	2,5	1,0
601	2,0	0,5	2,0	2,0	1,5
602	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
603	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7
604	0,0	0,5	0,0	0,5	0,2
606	0,0	0,0	2,0	2,0	0,7
607	0,5	0,5	1,5	1,5	0,8
608	2,0	1,5	1,0	2,0	1,5
609	0,0	2,0	1,0	2,0	1,0
610	2,0	1,0	0,5	2,0	1,2