

Metodická část výstupů projektu: “Kontrola kvality stavebních prací při opravách a rekonstrukcích silnic II. a III. tříd pomocí moderních technologií”



Doporučení k pravidlům používání GPR, LS a 3D ACC metody k měření asfaltových vozovek

Obsah

1. ÚVOD	3
2. TECHNOLOGIE GEORADARU, 2D LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ A 3D AKCELEROMETRU	5
2.1 TECHNOLOGIE GEORADAROVÉHO MĚŘENÍ (GPR)	7
2.1.1 Technologie GPR obecně	7
2.1.2 Elektrické vlastnosti ovlivňující GPR vlny	7
2.1.3 Principy různých GPR systémů	7
2.1.4 Principy GPR zobrazení	9
2.1.5 Použití georadaru na měření asfaltových vozovek	10
2.2 GPR ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ASFALTOVÝCH VOZOVEK	11
2.2.1 GPR zařízení obecně	11
2.2.2. Teorie testovací metody	12
2.2.3. Specifikace systému GPR a kalibrace zařízení	13
2.3 TECHNOLOGIE 2D LASEROVÉHO SKENERU A 3D AKCELEROMETRU	14
2.3.1 Metoda 2D laserového skenování	14
2.3.2 Metoda 3D akcelerometru	15
2.3.3 Metody výpočtu parametru IRI a vyjetých kolejí /příčných nerovností/ z dat laserového skeneru a 3D akcelerometru programem Road Doctor	17
2.4 POSOUZENÍ NEROVNOSTÍ POVRCHU VOZOVEK	21
2.5 PLÁNOVÁNÍ A PROVEDENÍ MĚŘENÍ	22
2.5.1 Načasování měření, plánování a informace	22
2.5.2 Realizace měření	24
2.5.3. Přesnost měření	25
2.5.4. Ostatní data z měření	25
2.6 ZPRACOVÁNÍ GPR DAT A HODNOCENÍ	26
2.6.1 Obecně	26
2.6.2 Předzpracování dat	26
2.6.3 Zpracování dat a hodnocení	26
2.7 PŘEDÁNÍ ZÁVĚREČNÝCH ZPRÁV A VÝSLEDKŮ	27
2.7.1 Obecně	27
2.7.2. Formáty předávaných výsledků	27
2.7.3 Tisk do obrázkových souborů	28
2.8. POPIS JEDNOTLIVÝCH VÝSTUPŮ	29
2.8.1 GPR výstupy	29
2.8.2 2D LS a 3D ACC výstupy	38
3 TECHNOLOGIE 3D LASEROVÉHO SKENERU A MOBILNÍHO TABLETU SE SOFTWAREM APLIKACÍ KONTINUÁLNÍHO ZOBRAZOVÁNÍ GEOMETRICKÉ STATISTIKY KONTROLOVANÉHO ÚSEKU S POLOHOU GPS	43
3.1 ÚČEL VYDÁNÍ METODIKY	43
3.2 POŽADAVKY NA MĚŘENÍ LASEROVÝM SKENOVÁNÍM A MODEL REALITY	45
3.2.1. Přesnost výstupů	45
3.2.2. Hustota měření	46
3.2.3. Kontrola kvality dat a ověřitelnost výstupních informací	47

3.2.4. Rychlost dodání výstupních informací.....	49
3.2.5. Požadované výstupy.....	49
3.2.6. Přístupy k výstupním informacím.....	52
3.3. POŽADAVKY NA MODEL STAVBY	56
3.3.1. Model stavby z projektové dokumentace	56
3.3.2. Model stavby z procesu re-profilace	56
3.4. PROCES VYUŽITÍ DAT NA STAVBĚ – KONTROLA KVALITY STAVEBNÍCH PRACÍ.....	58
3.4.1. Výběr staveb pro kontrolu kvality stavebních prací	58
3.4.2. Výběr dodavatele měření laserového skenování.....	58
3.4.3. Koordinace měření	59
3.4.4. Limitující parametry měření.....	60
3.4.5. Vyhodnocení dat	61
3.5. PROCES VYUŽITÍ DAT NA STAVBĚ – RE-PROFILACE SILNIC	62
3.5.1. Výběr staveb pro re-profilaci silnic.....	62
3.5.2. Výběr dodavatele modelu stavby.....	62
3.5.3. Implementace modelu stavby.....	62
3.5.4. Využití modelu stavby	63
4 ZÁVĚR	64
5 POUŽITÁ LITERATURA	65
6 PŘÍLOHA	67
6.1. Technologie georadaru	67
6.2. Technologie 3D laserového skeneru	67

1. ÚVOD

Nedestruktivní diagnostické metody jsou důležitým nástrojem určování stavu a kvality komunikace a vstupní parametry pro návrh údržby, oprav a rekonstrukcí. Z pohledu snižování nákladů na údržbu a zjišťování kvalitativního stavu komunikací je důležité využití moderních nedestruktivních metod, porovnání a kombinování výsledků se stávajícími postupy a metodami.

Cílem projektu bylo ověření použití nedestruktivní diagnostické metody georadaru, 2D laserového skeneru, akcelerometru, 3D laserového skeneru a tabletu se zobrazováním geometrické statistiky s polohou GPS pro potřeby kontrol stavu komunikací po pokládce nové obrusné vrstvy (controlling) a výsledků měření zjištěných touto nedestruktivní metodou pro využití v oblasti navrhování údržby a oprav netuhých vozovek.

Výběr výše uvedených typů technologií by měl v rámci controllingu umožnit zjištění všech základních informací o stavu komunikace – struktura a mocnost konstrukčních vrstev ve srovnání s projektovanými hodnotami, dále parametr IRI - vyhodnocení nerovnosti povrchu vozovek a také kontrola rovinatosti resp. „vyjetých kolejí“ - vyhodnocení podélných, příčných

nerovností, vyhodnocení tloušťek položených konstrukčních vrstev, sklonů, množství nově položeného množství asfaltové vrstvy, odtokových poměrů.

Tento dokument vznikl na základě ověření použitelnosti výše zmíněných technologií v etapě A tohoto projektu (viz výstupy etapy A projektu "Kontrola kvality stavebních prací při opravách a rekonstrukcích silnic II. a III. tříd pomocí moderních technologií") jako soupis doporučených technologických postupů a soubor praktických zkušeností pro splnění cílů kontrolních činností při realizaci stavebních projektů oprav a rekonstrukcí silnic ve správě KSÚS Vysočina.

Tato metodika popisuje ve dvou kapitolách (kapitola 2 a 3) dva rozdílné přístupy k řešení těchto kontrolních činností:

- Využití technologie **georadaru** v kombinaci s 2D laserem a akcelerometrem (více viz kapitola 2);
- Využití **3D laserového skeneru** a tabletu se zobrazováním geometrické statistiky s polohou GPS pro potřeby kontrol stavu komunikací po pokládce nové ohrusné vrstvy (více viz kapitola 3).

2. Technologie georadaru, 2D laserového skenování a 3D akcelerometru

Georadarová metoda (GPR) je nedestruktivní metoda měření která může být použita při zkoumání silnic, železnic, mostů, letištních drah, tunelů a okolních objektů. Hlavní výhodou technologie GPR je poskytnutí kontinuálního profilu konstrukce vozovky a podloží. Technologie GPR se stává stále důležitějším nástrojem pro hodnocení konstrukcí silnic ve fázi návrhu, avšak v poslední době se stále častěji používá pro kontrolu kvality a zajištění kvality stavebních prací.

Za posledních 15 let dosáhly severské země velmi vysoké úrovně v oblasti použití GPR aplikací v silničním hospodářství. Nicméně každá z těchto zemí - Finsko, Švédsko i Norsko - uplatňuje v rámci technologie GPR mírně odlišné postupy, což vyvolává potřebu jejich sjednocení pro působení za hranicemi těchto států. Odlišná je i úroveň znalostí, informovanosti a zkušeností týkajících se používání GPR metody v oblasti silniční správy a je proto potřeba sdílet tyto znalosti a rozvíjet postupy pro zajištění vyšší kvality GPR služeb.

V reakci na tyto potřeby byl zrealizován projekt „Kontrola kvality stavebních prací při opravách a rekonstrukcích silnic II. a III. tříd pomocí moderních technologií“ pro kraj Vysočina, za finanční podpory Státního fondu dopravní infrastruktury (SFDI). Výsledkem měření a hodnocení v rámci tohoto projektu je metodika, která podrobně popisuje používanou technologii. Hlavním partnerem projektu je Krajská správa a údržba silnic Vysočiny, příspěvková organizace a Státní fond dopravní infrastruktury (SFDI). Za společné pokyny a metodiku zodpovídá Ing. Ján Filipovský, Ph.D. zastupující společnost Roadscanners Central Europe s.r.o. Tato doporučení byla sepsána prof. Timem Saarenketo, PhD., generálním ředitelem společnosti Roadscanners Oy, Ing. Jánem Filipovským, PhD., prokuristou společnosti Roadscanners Central Europe s.r.o., Česká republika.

Severské země byly průkopníky v oblasti použití technologie georadaru (GPR) na pozemních komunikacích. První použití těchto technologií bylo v Dánsku a Švédsku zaznamenáno již v roce 1980. Technologie GPR je ve Finsku používána jako nástroj pro analýzu podloží a konstrukce vozovek již téměř 30 let a pro návrhy rehabilitačních prací ji používá i finská Silniční agentura.

Tato doporučení pro použití GPR metody k měření asfaltových vozovek byla sepsána za účelem zpřístupnění současné praxe zainteresovaným stranám a poskytnutí potřebných informací o správném postupu a průběhu GPR měření i požadované úrovni kvality předávaných výsledků.

V projektech kontroly kvality mohou výsledky GPR měření, v nejhorších případech, vést k vysokým ekonomickým sankcím pro dodavatele, a proto jsou na jejich spolehlivost kladeny velmi vysoké požadavky. Výsledky musí být opakovatelné a výstupy musí být provedeny takým způsobem, který vyloučí všechny formy spekulací a/nebo manipulací s výsledky. Jinými slovy, výsledky musí být nezpochybnitelné a spravedlivé pro všechny zúčastněné strany.

Tato doporučení pro pravidla používání GPR metody by měla být dodržována při provádění návrhu měření, sběru dat, analýze i samotném hodnocení 2D GPR dat. Publikace dále popisuje postup propojení výsledků měření se silniční databází či jinými GIS aplikacemi. V problematice týkající se částí a metod, které nejsou v této publikaci popsány, by měly být aplikovány a dodržovány národní požadavky a předpisy týkající se kontroly a zajišťování kvality staveb.

Tato publikace současně představuje krátký úvod do teorie a principů GPR metody. Tyto pokyny byly sepsány tak, aby splňovaly obecné zásady, postupy a mohly být úspěšně aplikovány kdekoli na světě.

2.1 Technologie georadarového měření (GPR)

2.1.1 Technologie GPR obecně

Technologie georadaru je založena na použití rádiových elektromagnetických (EM-) vln ve frekvenčním rozsahu 30 až 3000 MHz. Uvnitř tohoto rozsahu frekvencí se říká, že EM- vlny mohou šířit prostředí s nízkou elektrickou vodivostí. Mezi fyzikální parametry, které ovlivňují rychlost průniku vln materiálem, patří vodivost, relativní permitivita a magnetická citlivost. V severských zemích nemá magnetická citlivost významný vliv na chování signálu georadaru.

2.1.2 Elektrické vlastnosti ovlivňující GPR vlny

2.1.2.1 Relativní permitivita prostředí (dříve dielektrická konstanta)

Relativní permitivita (dříve dielektrická konstanta) popisuje schopnost materiálů přijmout nebo polarizovat proud vlivem elektrického pole. Jakmile elektrické pole přestane působit, materiál se vrátí do původního stavu. Je-li struktura materiálu taková, že se úplně nevrátí do původního stavu, je její polarizace částečně ztracena. V takovém případě lze dielektrickou hodnotu považovat za komplexní množství, kde reálná část popisuje vratnou polarizaci a ztráta je imaginární částí. Nejdůležitějším prvkem v molekulární polarizaci silničních materiálů a půdy v podloží je molekula vody. Rozsah permitivity nejvíce závisí na skutečnosti, kolik volné vody se nachází v materiálu, jelikož permitivita vody je 10 krát vyšší než dielektrická hodnota jiných silničních materiálů. Z tohoto důvodu obsah vody zvyšuje permitivitu materiálu. V horké asfaltové směsi kameniva, pojiva a vzduchu se nicméně voda nenachází, což vysvětluje, proč permitivita asfaltu závisí na objemových vlastnostech asfaltové směsi a na stupni zhutnění. Relativní permitivita asfaltového pojiva běžně dosahuje hodnoty 2,8; suché a horké kamenivo v rozmezí 5-7 a vzduch 1.

2.1.2.2 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost média popisuje schopnost volných nábojů se v prostředí pohybovat. Vnější elektrické pole přesouvá náboje z místa na místo, přičemž platí, že čím více volných nábojů, iontů a elektronů existuje, tím vyšší je vodivost materiálu a útlum georadarového signálu. Taktéž sůl, která se běžně v nově vybudovaných asfaltových vozovkách nenachází, způsobuje problémy GPR signálu. Prokazatelně významný vliv na útlum GPR signálu má i speciální materiál ocelových trnů, který snižuje spolehlivost výsledků měření mezerovitosti v asfaltových vozovkách.

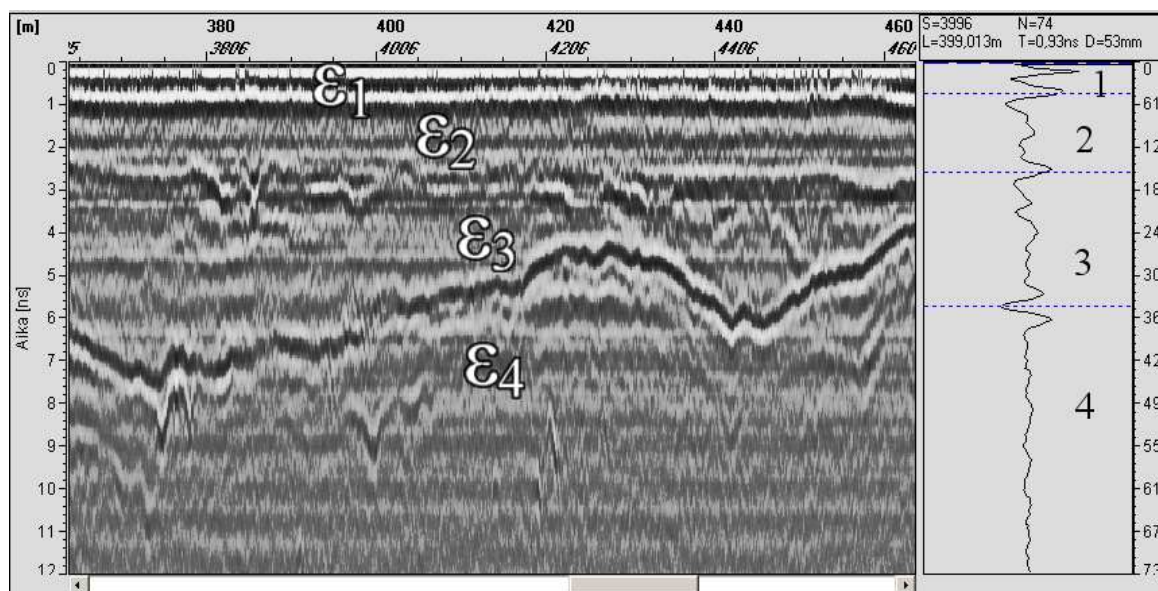
2.1.3 Principy různých GPR systémů

Systém pozemních georadarových zařízení používaných na měření silnic lze rozdělit do dvou kategorií: impulsní radary a radary s odstupňovanou frekvencí. Principy těchto systémů jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1.3.1 Impulsní radar

Impulsní radar je nejčastěji používaný typ georadaru. Princip fungování je popsán níže. Pulsy, které vznikají ve vysílači antény, jsou vysílány do zkoumaného prostředí. Délka impulsu je od nanosekundy do desítek nanosekund v závislosti na frekvenci. Při vysílání signálů do konstrukce vozovky a podloží se část energie impulsu odrazí od povrchu s různými elektrickými vlastnostmi; některé impulsy jsou šířeny přes rozhraní a některé se odráží zpět od různých jednotlivých rozhraní. K zeslabení signálu dochází vlivem geometrického útlumu, rozptylu signálu, odrazů a tepelných ztrát. GPR systém zaznamenává obousměrný čas a amplitudy odrazu signálu a tyto jsou prezentovány jako funkce doby odrazu signálu. Jsou-li měření mezi jednotlivými sekvenčními body provedena dostatečně rychle, lze sestavit GPR profil (radarový snímek).

V protokolech georadarových projektů prováděných v severských zemích by měl být zobrazen šedý tón a odraz polarity jako na obr. 1.



Obrázek 1. Profil měření georadarem s "horn" anténou individuálním pulsem. Profil zobrazuje odraz od dvou vrstev s různými dielektrickými hodnotami (ϵ). Obrázek ve vrstvě 1 zobrazuje asfaltovou vrstvu, vrstva 2 zobrazuje vrchní podkladovou vrstvu, vrstva 3 zobrazuje spodní podkladovou vrstvu a vrstva 4 filtrační vrstvu. Obrázek ukazuje, že dielektrická hodnota materiálu (vlhkost) se zvyšuje směrem dolů od povrchu vozovky, s výjimkou dielektrické hodnoty ve vrstvě (ϵ_4), která je menší než v podkladní vrstvě a polarita odrazu je převrácená (černá čára uprostřed dvou bílých čar).

2.1.3.2 Princip radaru s odstupňovanou frekvencí

Vlnová délka s odstupňovanou frekvencí se skládá ze série sinusových vln. Radar měří fázi amplitudy odraženého signálu z každé frekvence a za použití Fourierovy transformační metody dostáváme data v časovém profilu. To znamená, radary s časovou frekvencí zaznamenávají data ve frekvenční oblasti a pomocí počítačového zpracování je převádí do časového profilu. Výsledný radargram je podobný radargramu impulzního georadaru. Vzhledem k tomu, že data s odstupňovanou frekvencí jsou

zaznamenávány ve frekvenční oblasti, umožňují pokročilé filtrování a zpracování signálu přímo na surových datech frekvenční oblasti.

2.1.4 Principy GPR zobrazení

2.1.4.1 Odraz a polarita

Jestliže dochází k šíření GPR signálu z prostředí 1 do prostředí 2, přičemž permitivita těchto prostředí je ϵ_1 a ϵ_2 , lze odrazovou amplitudu vyjádřit následujícím vzorcem:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Jak vyplývá ze vzorce, polarita odezvy se změní, jestliže permitivita prostředí ϵ_1 je menší než permitivita prostředí ϵ_2 , což je obvykle běžná situace na silnici a v konstrukci podloží (obsah vody se zvyšuje s rostoucí hloubkou). Jestliže je permitivita prostředí ϵ_1 vyšší než prostředí ϵ_2 , pak polarita odražené vlny zůstává stejná jako polarita progresivní vlny na rozhraní. Nicméně v georadarovém měření je běžnou praxí, že se odraz vln od povrchu jeví jako pozitivní a to i přesto, že koeficient odrazu je negativní. Podobně i v ostatní vrstvách, kde permitivita horní vrstvy je nižší než permitivita spodní vrstvy, tedy $\epsilon_{(\text{vrchní})} < \epsilon_{(\text{spodní})}$, jsou odrazy zaznamenány jako pozitivní. V šedém zobrazení radargramu by tyto odrazy měly být zobrazeny jako bílá vlna ve středu (viz obr. 1 $\epsilon_1 < \epsilon_2$). Obdobně je tomu v případě, že permitivita dolní vrstvy je nižší než permitivita vrstvy horní (jako například v konstrukci na obr. 1, kde $\epsilon_3 > \epsilon_4$), kdy je odraz zaznamenán jako negativní reflexe a zobrazen jako černá vlna ve středu. Polaritu GPR signálu vyslaného anténou a postupujícího do zkoumaného prostředí může být změněna o 180° změnou polohy vysílače a přijímače antén, případně v průběhu vyhodnocování dat vynásobením signálu hodnotou -1.

2.1.4.2 Hloubka penetrace, rozlišení a hloubka rozhraní

Dosažitelná hloubka penetrace georadaru závisí na použitém typu a druhu georadaru, na frekvenci používané antény a tudíž vlnové délce signálu. S rostoucí centrální vysílací frekvencí GPR signálu, dochází k většímu útlumu signálu. Vysoká elektrická vodivost zkoumaného prostředí má za následek zvýšení množství energie rozptylu objektu při zkrácení jeho vlnové délky. Stejným způsobem se hloubka průniku sníží při zvýšení použité frekvence, současně se však zlepší rozlišovací schopnost naměřených dat, stejně jako při zvýšení dielektrické konstanty.

Úroveň rozlišení dat je závislá i na vzdálenosti mezi jednotlivými rozhraními a současně možností jednotlivá rozhraní samostatně identifikovat. Toto platí pro oba směry, horizontální i vertikální.

Vertikální rozhraní signálu lze vypočítat z následující rovnice (1):

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad \text{kde} \quad (1)$$

c = rychlost světla ve vakuu (0.3 m/ns)

τ = vlnová délka signálu (ns)

ϵ_r = relativní permitivita (dielektrická hodnota) zkoumaného prostředí

Hloubku ke zkoumanému rozhraní lze vypočítat z této rovnice (2) (pro monostatické antény):

$$s = v \cdot t = \frac{0.5 \cdot twt \cdot c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad \text{kde} \quad (2)$$

twt = čas odezvy oboustranného signálu

2.1.5 Použití georadaru na měření asfaltových vozovek

Od konce roku 1990 se zvýšila popularita použití GPR pro měření kontroly kvality nových silničních staveb. V prvních letech byla GPR metoda používána v oblasti kontroly jakosti pouze pro ověření tloušťek jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky (Al-Qadi 2003, Saarenketo 2008). Později byly vyvinuty nové GPR aplikace pro kontrolu kvality včetně měření mezerovitosti a odhalování segregací v asfaltové směsi (Saarenketo 1998, 2008, Roimela 1998). Největšími výhodami GPR metody v porovnání s tradičními metodami, jako jsou např. jádrové vrtý, je její nedestruktivní charakter, nižší náklady a skutečnost, že GPR měření lze provádět z jedoucího vozidla, čímž jsou snižována bezpečnostní rizika pracovníků na dálnici. Současně GPR měření umožňuje průběžný a lineární sběr dat, čímž dochází k 100% pokrytí kontroly nové konstrukce vozovky. Tradiční metoda jádrových vrtů přitom poskytuje pouze informaci o jednom specifickém místě, v němž došlo k vývrtnu, a její využití k identifikaci vadných míst v nových asfaltových vrstvách tedy není spolehlivé.

Georadarová (GPR) technologie se využívá pro měření dielektrické hodnoty asfaltových vrstev, které lze následně použít k výpočtu obsahu mezerovitosti v asfaltové vrstvě. Tato metoda je však vhodná pro měření obsahu mezerovitosti **pouze nových asfaltových vozovek**, bez ohledu na kvalitu ložní vrstvy.

Termín „mezerovitost“, tedy obsah vzduchu v materiálu, se používá k vyjádření poměru mezi objemem pórů a celkovým objemem asfaltu a uvádí se v procentech.

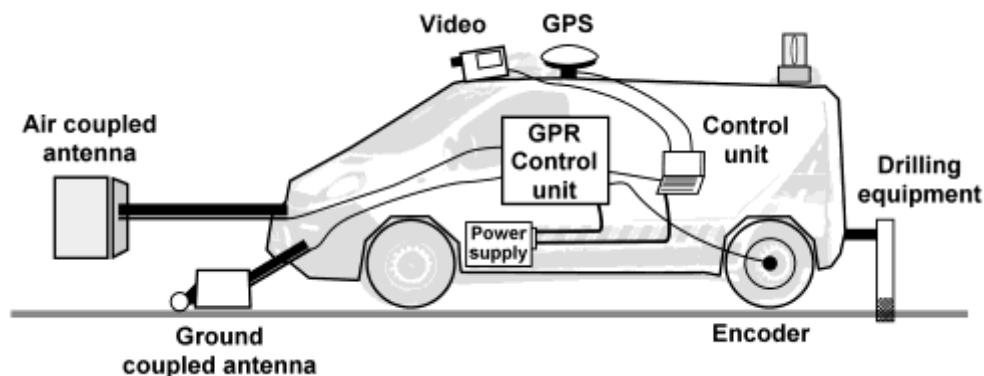
Termín „dielektrická konstanta“, případně „relativní dielektrická permitivita“ se vztahuje ke schopnosti materiálu přijímat a umožnit průchod elektromagnetické energii v elektrickém poli. Také

jej lze popsat jako míru schopnosti materiálů se polarizovat v elektromagnetickém poli a tudíž reagovat na šířené elektromagnetické vlny. Velikost permitivity prostředí má vliv na rychlost šíření a útlum elektromagnetického vlnění v daném prostředí. Dielektrická hodnota neboli permitivita materiálu je závislá na podílu objemu materiálu a jeho dielektrických vlastností.

2.2 GPR zařízení pro měření asfaltových vozovek

2.2.1 GPR zařízení obecně

Většina GPR systémů využívaných pro měření silnic pracuje s technologií a principy impulsních radarů, které byly popsány výše. Zařízení pro měření silnic se skládá z několika částí (obr. 2). Měřicí antény se skládají z vysílače, který vysílá impulsy do zkoumaného prostředí a přijímače, který odražené signály přijímá. Antény jsou řízeny řídicí jednotkou, jejíž pomocí je regulována vlnová délka a síla impulsu. V digitizérů jsou přijaté impulzy převedeny do digitální podoby. Digitizér může být umístěn v anténě, v ovládacím prvku nebo centrální procesorové jednotce. Nastavení sběru dat je ovládáno pomocí softwaru. Možnosti nastavení zahrnují parametry, jako např. skeny za čas, nebo vzdálenost (např. scan/sec, scan/m), měřicí časové okno (ns), počet vzorků na snímek (např. 512, 1024 vzorků/scan) a formátu dat (např. 8, 16, 32 bit). Pro spuštění řídicí jednotky se využívají kalibrované optické přístroje (přístroje pro měření vzdálenosti) nebo systémy, které se spouštějí pohybem. V současné době je nezbytnou součástí GPR měření použití GPS antény spolu s digitálním videem. Chod těchto systémů zabezpečuje napájecí jednotka.



Obrázek 2. Typické uspořádání nástrojů GPR systému na vozidle používaném pro silniční průzkum.

Bezkontaktní „air-coupled“ anténní systémy, nazývané i „horn“ antény, nevyžadují kontakt s měřeným povrchem, avšak později byly vyvinuty i jiné anténní systémy (kontaktní - „ground-coupled“). Frekvence bezkontaktních antén se liší od 400 MHz do 2.5 GHz, ale nejčastěji je používána centrální frekvence 1.0 GHz a 2.0 GHz. Na trhu se však vyskytují i bezkontaktní antény s frekvencí 2.0-2.2 GHz, které se projeví jako účinné při detekci jednotlivých stmelených vrstev, při měření

obrusné vrstvy na šterkových silnicích a při lokaci ocelových výztužných prvků. Běžný hloubkový dosah bezkontaktních antén je mezi 0.5 – 0.9 m, což je předurčuje k použití při průzkumech konstrukcí vozovek. Během měření jsou antény umístěny přibližně 0.3 – 0.5 m nad povrchem zkoumané vozovky. Jelikož pulzní radar bezkontaktních antén je zavěšen ve vzduchu, spojení s anténou se v případě změny elektrických vlastností povrchu vozovky nezmění. Pro tuto vlastnost jsou bezkontaktní antény používány pro opakovaná měření, kdy i při změně vlastností vozovky by kvalita georadarových dat měla zůstat nezměněna. Takto je možné posoudit kvalitativní ukazatele na základě odrazu amplitudy a frekvenční odezvy. Bezkontaktní anténa navíc umožňuje provádět sběr dat při rychlosti až 80-100 km/h a tudíž neomezuje provoz na silnici.

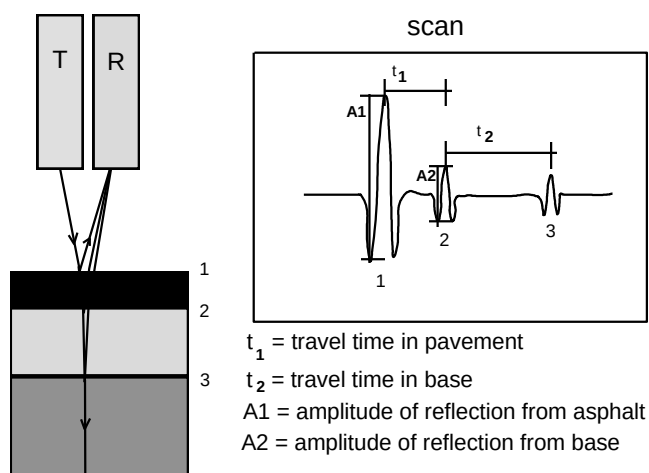
Mezi současné největší výrobce GPR zařízení pro průzkum silnic patří Geophysical Survey Systems, Inc. (U.S.A.), IDS (Italy), Mala Geoscience (Švédsko), 3d-Radar A/S (Norsko), Sensors&Software (Kanada), Utsi Electronics (U.K.), Penetradar (U.S.A.), Radarteam Sweden Ab (Švédsko), Geoscanners AB (Švédsko) a několik dalších menších společností.

2.2.2. Teorie testovací metody

Měření tloušťky vozovky je v této metodě založeno na permitivitě prostředí a času odezvy oboustranného signálu. Permitivita vozovky je závislá na dielektrické konstantě a objemových poměrech jejich jednotlivých složek – kamene, asfaltu a vzduchu. Zhutnění vozovky snižuje její mezerovitost, což vede ke snížení objemu složek s nízkou dielektrickou hodnotou – vzduchu – a zvýšení poměru obsahu asfaltu a kameniva. Tímto způsobem vede zhutnění ke zvýšení dielektrické hodnoty vozovky.

Metoda „povrchového odrazu“, kterou umožňuje pouze použití GPR systému s bezkontaktní anténou se používá k určení permitivity, dielektrické hodnoty, asfaltového povrchu. Dielektrická hodnota vozovky se získává na základě výpočtu odrazu amplitudy z elektrického rozhraní, například rozhraní vzduchu/asfaltu. Bezkontaktní anténa vysílá elektromagnetické impulsy a pomocí přijímače registruje jejich odrazy z elektrického rozhraní. Jakmile se EM impuls vyslaný anténou setká s elektrickým rozhraním, například povrchem vozovky, část energie se odrazí a tento odraz je zachycen přijímací anténou. GPR jednotka měří příslušné vrcholy amplitudy A1 pro odraz od povrchu vozovky. Obrázek 3 znázorňuje princip fungování bi-statické bezkontaktní antény: vysílač (T) a přijímač (R) antény a vrstvy rozhraní konstrukce vozovky znázorněné čísly 1, 2 a 3.

Horn Antenna Pair



Obrázek 3. Princip fungování bezkontaktní antény.

Relativní permitivita (dielektrická hodnota) vozovky může být vypočtena použitím následujícího vzorce (3):

$$\varepsilon_a = \left(\frac{1 - \frac{A_a}{A_m}}{1 + \frac{A_a}{A_m}} \right)^2 \quad (3), \text{ kde}$$

A_a je amplituda odrazu od povrchu vozovky a A_m je amplituda odrazu od kovové desky (úplný odraz).

2.2.3. Specifikace systému GPR a kalibrace zařízení

GPR zařízení pro použití na vozovkách zahrnuje:

- 1.0 – 2.5 GHz horn anténu (případně jiný typ bezkontaktní antény) a anténní kabel
- Elektrický vysílač / přijímač (pokud není součástí antény)
- Centrální jednotka s displejem a systémem pro ukládání dat
- Měřicí vozidlo
- Počítač (pc) pro zpracování naměřených dat

Zařízení používaná pro průzkum by měla každoročně podstoupit test na technický stav anténního systému (Scullion, Lau & Saarenketo 1996), současně by mělo dojít ke kalibraci systému pomocí zkoušky vzduchových impulsů a kovové desky. Zároveň může dojít k nepovinné kalibraci za použití gumové/pogumované desky se známou dielektrickou hodnotou.

2.3 Technologie 2D laserového skeneru a 3D akcelerometru

2.3.1 Metoda 2D laserového skenování

Metoda laserového skenování je založená na měření času laserového paprsku vysílaného skenerem na měřený povrch a odtud nazpět, z něhož je vypočtena vzdálenost. Pokud je znám úhel laserového paprsku, je možné určit tvar příčného řezu vozovky. Pokud je známa poloha vozidla, lze vytvořit zobrazení povrchu vozovky a jejího okolí. Laserový skener (obr. 4) taktéž měří intenzitu odrazivosti měřeného povrchu a tím pomáhá při identifikaci různých materiálů a sekcí na vozovce, jelikož intenzita paprsku po odrazu je pro různé materiály různá (vodorovné dopravní značení, lokální opravy, starý nebo nový asfaltový povrch).



Obrázek 4. Laserový skener SICK LMS500 společnosti Roadscanners Central Europe, s.r.o.

Technická specifikace:

- Laser bezpečnostní třídy 1 (bezpečný pro zrak)
- Po zahájení měření nejsou nutné žádné další úpravy či nastavení systému
- Ideální pro skenování povrchu vozovky a jejího okolí
- Dostatečná přesnost pro změření vyjetých kolejí
- Dosah skenování až 30 m

2.3.2 Metoda 3D akcelerometru

Akcelerometr je zařízení pro měření síly zrychlení (obr. 5). Zrychlení je vyjádřené druhou derivací polohy. V případě, kdy se automobil pohybuje po drsném povrchu, drsnost se projevuje jako zrychlení na automobilové pneumatice. Vyšší amplitudy kratší vlnové délky drsnosti vytváří větší zrychlení, tzn., že závažné poruchy povrchu vozovky vytváří velké zrychlení. Při použití spolu s GPS navigačním systémem je možné naměřené zrychlení přesně lokalizovat v datech měřeného povrchu (umístit na měřený povrch). Samotné zrychlení závisí i na rychlosti jízdy, a tudíž je nutné měřit při konstantní rychlosti jízdy po dobu měření daného úseku.

Měření zrychlení se provádí pomocí měřicí jednotky Xsens MTi-G akcelerometru a integrovaného GPS přijímače. Akcelerometr je umístěn na pravé zadní nápravě měřicího vozidla, takže tlumiče nemají žádný vliv na měření zrychlení. Během měření pomocí MTi-G se měří zrychlení při frekvenci 100 Hz (100 krát za sekundu). Měření se provádí při konstantní rychlosti jízdy.



Obrázek 5. Xsens MTi-G akcelerometr (oranžový) a GPS-přijímač (černý) společnosti Roadscanners Central Europe, s.r.o.

Technická specifikace:

- Akcelometr je GPS-aided MEMS založené na inerciální měřicí jednotce
- Design ideální pro průzkum z vozidla
- Vlastní GPS jednotka – společně s NovAtel GPS-700 dvojnásobné zajištění informací o poloze

- Rozměry: 51x40x21 mm

2.3.3 Metody výpočtu parametru IRI a vyjetých kolejí /příčných nerovností/ z dat laserového skeneru a 3D akcelerometru programem Road Doctor

2.3.3.1 Metoda výpočtu parametru IRI

Hodnota IRI je měřena pomocí vysoce rychlého snímače pohybu, který zahrnuje akcelerometry, gyroscopy a GPS. Měřicí zařízení je umístěno přímo na zadní nápravu měřicího vozidla vpravo, vlevo, případně na obě strany, čímž je změřena IRI hodnota na pravé, levé či obou stranách samostatně. Zařízení měří vertikální i horizontální zrychlení, natočení, sklon, vybočení a umístění GPS

Algoritmus výpočtu IRI používá hodnotu náklonu, který měří podélný sklon zařízení a měřicího vozidla. Úhel je měřen 100 nebo 200 krát za sekundu. Přesná vzdálenost měřené linie je změřena pomocí GPS nebo odometru. Profil silnice se vypočítá součtem změn náklonu (úhlu sklonu) v každém měřeném bodě. Vzorec pro změnu náklonu (úhlu sklonu):

$$dZ_n = \tan(\text{sklon}_n) * (D_n - D_{n-1}), \text{ kde}$$
$$D_{n-1} = \text{vzdálenost v poloze } n-1$$
$$D_n = \text{vzdálenost v poloze } n$$
$$\text{sklon}_n = \text{hodnota sklonu v poloze } n$$

Sklon v poloze n je

$$Z_n = \sum_{j=1-n} (dZ_j)$$

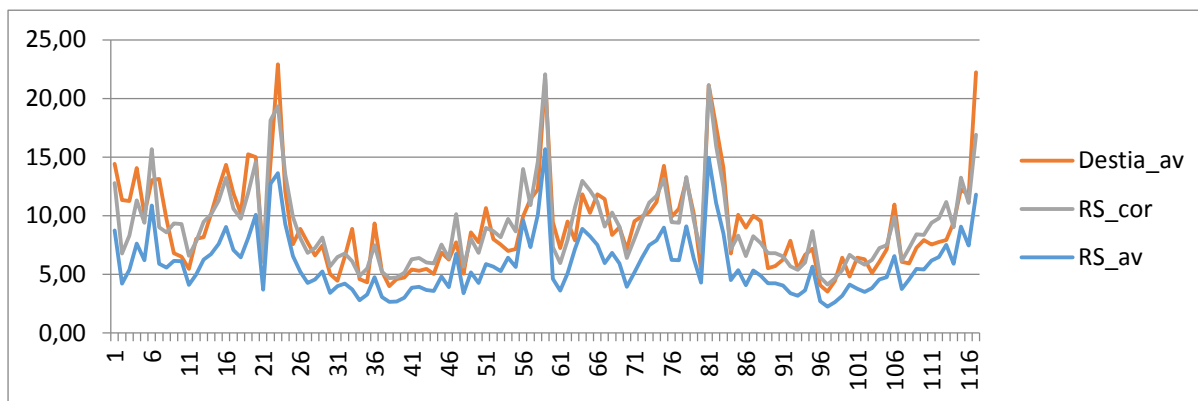
Profil je převzorkován na 0,25 m interval a filtrován pomocí 100m high-pass 3rd Butterworth filtru, aby byly odstraněny nejdelší vlnové délky a případné zkreslení jak popisuje definice IRI. Převzorkovaný a filtrovaný profil se použije pro výpočet IRI v každém z bodů. Použitý vzorec odpovídá vzorci publikovaném v WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER 46, Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, 1986, by Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D. O. Paterson. Naměřené hodnoty IRI se používají pro výpočet požadovaných průměrů vzdáleností 5 m, 10 m, 20 m, 100 m atd.

Zjištěné hodnoty IRI byl porovnány s hodnotami získanými pomocí Greenwood profilometru - porovnání bylo provedeno ve Finsku a Ázerbájdžánu a korelace byla vyhodnocena jako dobrá. Metoda je zvláště vhodná pro použití na šterkových silnicích a silnicích ve velmi špatném stavu, kde mohou profilometry založené na laserové technologii či akcelerometru selhat. Metoda zároveň umožňuje změnu rychlosti od 0 km/h do 60 km/hod. Vyšší rychlost může významně ovlivňovat hodnoty sklonu tlumením vyšších IRI hodnot.

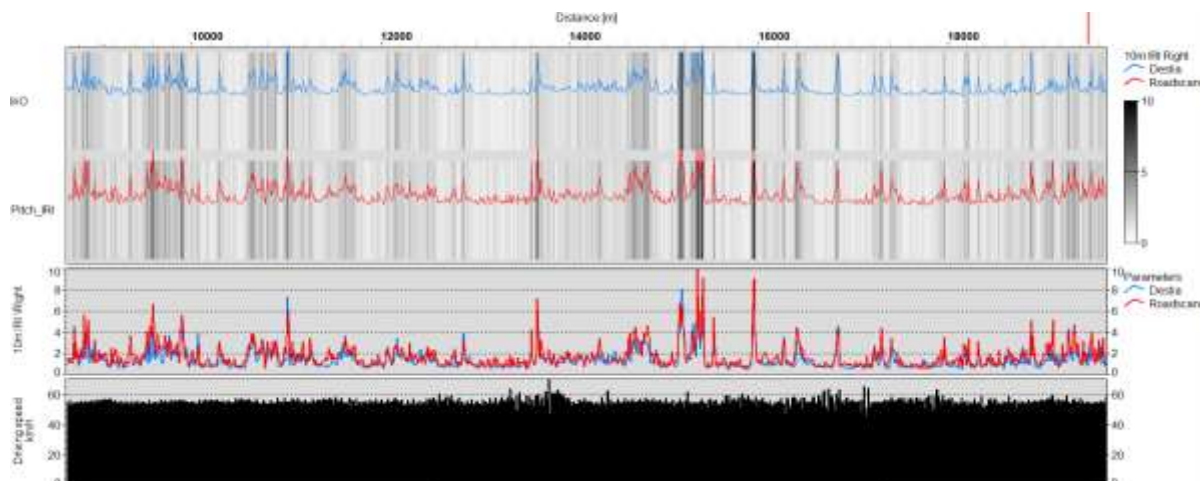
Výsledky Road Doctor systému Laser skeneru a 3D akcelerometru a systému Greenwood společnosti Destia Oy byly korelovány při měření na síťové úrovni v Ázerbájdžánu. Charakteristika ukazatelů byla správná, avšak hodnoty byly posunuty. K jejich vyrovnaní (sladění) byl použit korekční vzorec:

$$IRI = 1.335 * IRI_{roadscanners} + 1.1408$$

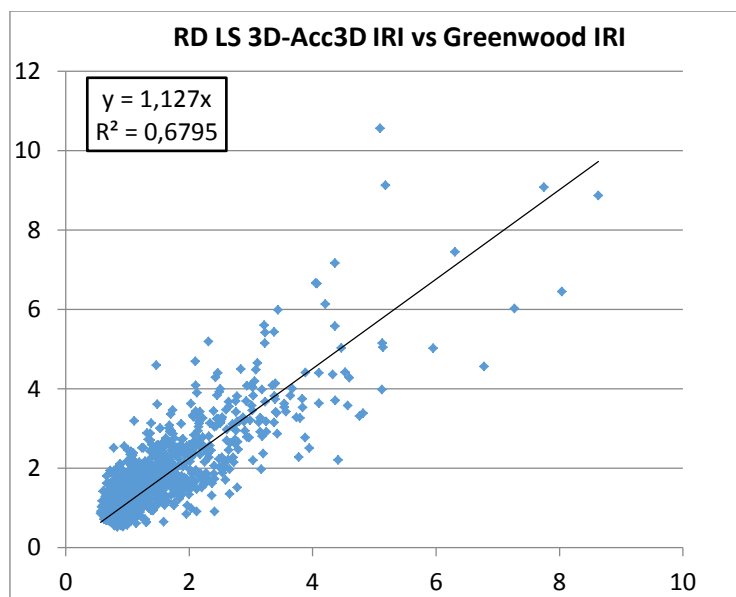
Po korekci byla hodnota R^2 0,807.



Obrázek 6. Hodnoty IRI změřené v Ázerbájdžánu pomocí Greenwood profilometru a Roadscanners metody náklonu. Destia_av je hodnota IRI změřená Greenwood metodou, RS_av jsou původní hodnoty metody náklonu a RS_cor jsou hodnoty metody náklonu získané korekcí vzorce.



Obrázek 7. Hodnoty IRI naměřené pomocí Greenwood profilometru společnosti Destia a metodou náklonu společnosti Roadscanners (Finsko).



Obrázek 8. Korelace hodnot IRI zaměřených Greenwood profilometrem (Destia) a metodou náklonu (Roadscanners).

2.3.3.2 Měření podélné nerovnosti „C“ povrchu vozovky vozidlem se snímačem svislého zrychlení

Účelem zkoušky je zjišťování podélných nerovností povrchu vozovek, charakterizovaných mírami nerovnosti C, CL a CS. Míra CL se vztahuje na dlouhé vlny nerovnosti v rozsahu vlnových délek od 6,25 m do 50 m, které způsobují zejména kmitání karoserie včetně jedoucích osob a nákladu, CS se se vztahuje na krátké vlny nerovnosti v rozsahu vlnových délek od 0,78 m do 6,25 m, které způsobují zejména kmitání kol. C je jednotnou mírou nerovnosti pro celý rozsah vlnových délek nerovnosti od 0,78 m do 50 m a lze ji stanovit podle vztahu $C = \sqrt{C_{Lx}C_{S}}$. Délky vln se zjišťují v závislosti na staničení nebo jako průměrné hodnoty na daném úseku vozovky. Výsledné hodnocení vozovky je dáno hodnotou maxima ze všech 3 ukazatelů (Zdroj: ČSN 73 6175 *Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek*).

2.3.3.3 Metoda výpočtu příčných nerovností (vyjetých kolejí)

Příčné nerovnosti jsou změřeny RD LS-3DAcc-systémem za použití laserového skeneru, který snímá povrch vozovky v příčném směru. Hustota skenování je 0,6667 stupňů při frekvenci snímání 100 Hz. Typická velikost mřížky je 3x17 cm při rychlosti 60 km/h a umístění skeneru ve výšce 3 m. Pro každou mezi-sekci o šířce 3,2 m je 85 bodů. Statistická chyba pro každý bod laserového skenerového skeneru je 7 mm samostatně, avšak při použití průměrné sítě 10 cmx100 cm na 17 bodů je statistická chyba pouhých 1,7 mm. Jelikož skutečný výstup je poskytnut ve formě průměru 5, 10, 20 nebo 100 m, je statistická chyba snížena na 0,76 mm, 0,54 mm, 0,38 mm a 0,17 mm. Tato přesnost je pro většinu účelů vyhovující.

Obsluha může definovat šířku pro výpočet, obvykle se používá šířka 3,2 m. Zároveň lze definovat hodnoty vyjetých kolejí vpravo, vlevo a maximální hodnotu a krajní hodnotu pomocí standartní řetězové metody. Software zároveň obsahuje algoritmus pro kalkulaci vyjetých kolejí pomocí metody odstranění kraje a spojnicovou metodou. Zároveň lze z výpočtu odstranit body mimo linii, čímž je zajištěna nižší chybovost.

Systém zároveň měří mapu odrazivosti povrchu vozovky, která umožňuje monitorovat lokaci průzkumného vozidla v porovnání se středovou osou nebo značením jízdního pruhu. Problémem, který způsobuje chyby ve výpočtech vyjetých kolejí a porovnání výsledků mezi jednotlivými roky je měnící se jízdní dráha. Záznam jízdní dráhy umožňuje, aby oblasti pro výpočet odpovídaly, a zajišťuje platnost výsledků pro srovnání.

2.4 Posouzení nerovností povrchu vozovek

Dle Technických podmínek Ministerstva dopravy – Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek se měření podélné a příčné nerovnosti hodnotí klasifikačními stupni dle tabulky 5 TP - *Hodnocení podélné a příčné nerovnosti povrchu vozovky* (obr. 9) a splnění klasifikace dle tabulky 6 TP - *Požadovaná klasifikace podélných nerovností povrchu vozovky* (obr. 10).

Klasifikační stupeň	1	2	3	4	5
Parametr					
Podélná nerovnost pro úsek 20 m – mezinárodní index <i>IRI</i> (m/km)	≤ 1,9	2,0 – 3,0	3,1 – 4,2	4,3 – 6,3	> 6,3
– Míra nerovnosti <i>C</i> (10 ⁻⁶ rad·m)	≤ 0,9	1,0 – 2,2	2,3 – 4,6	4,7 – 10,0	> 10,0
Příčná nerovnost v měřeném profilu – hloubka vyjeté koleje <i>R</i> (mm)	< 5 (4) ¹	(4) ¹ 5 – 10 (8) ¹	(9) ¹ 11 – 22	23 – 35	> 35
– teoretická hloubka vody <i>W</i>	<i>W</i> < 8 mm – hodnocení vyhovující				
	<i>W</i> ≥ 8 mm – hodnocení nevyhovující				

Obrázek 9. Tabulka 5. Hodnocení podélné a příčné nerovnosti povrchu vozovek. Zdroj TP 87 – Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury.

Poznámky:

¹ Hodnota v závorce platí pro PK s dovolenou rychlostí vyšší než 90 km·h⁻¹

Klasifikační stupeň	1	2	3	4	5
Nerovnosti	<i>C, IRI</i>				
PK s dovolenou rychlostí > 50 km·h ⁻¹					
PK s dovolenou rychlostí ≤ 50 km·h ⁻¹					

	Přejímka povrchu pro uvedení vozovky do provozu ¹
	Posouzení povrchu na konci záruční doby ²
	Plán souboru opatření pro zvýšení provozní způsobilosti povrchu vozovky
	Provedení opatření pro zvýšení provozní způsobilosti a únosnosti vozovky ³

Obrázek 10. Tabulka 6 - Požadovaná klasifikace podélných nerovností povrchu vozovky. Zdroj TP 87 – Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury.

Poznámky:

¹ Při vyhodnocení měření podélné nerovnosti pro přejímku povrchu před uvedením vozovky do provozu se připouští pro PK s dovolenou rychlostí 90 km·h⁻¹ a nižší maximálně 5 % hodnot *C* nebo *IRI* vyšších než klasifikační stupeň 1 (*C* = 1 a *IRI* = 1,9), nesmí však překročit hodnotu poloviny rozpětí klasifikačního stupně 2, což je u *C* hodnota 1,6 a u *IRI* hodnota 2,5.

² Do doby provedení opatření se na úseku osadí dopravní značky A 7 Nerovnost vozovky, případně se sníží nejvyšší dovolená rychlost jízdy dopravní značkou B 20a.

2.5 Plánování a provedení měření

2.5.1 Načasování měření, plánování a informace

Obdobím obvyklým pro provedení kontroly kvality pomocí technologie GPR je jar, léto, případně začátek podzimu, což je doba, kdy je dokončována většina projektů oprav silnic. Při kontrole kvality asfaltové vrstvy a dalších jednotlivých vrstev vozovky se doporučuje použití bezkontaktních antén zvláště v případě, že je předmětem zájmu určení tloušťky vrstvy asfaltové vrstvy a nestmelené podkladní vrstvy a jejich kvality. Než dojde k samotnému odsouhlasení objednávky finální kontroly kvality, mělo by s klientem být projednáno následující:

I. Kvalita konstrukce vozovky:

Je-li předmětem zájmu ze strany klienta zjistit informace o kvalitě konstrukce vozovky, analýzou GPR dat lze identifikovat/vypočítat:

- a. Mezerovitost v asfaltové směsi
- b. Segregace asfaltové směsi
- c. Homogenita asfaltové vozovky
- d. Kvalita nevázané podkladní vrstvy
- e. Anomálie vlhkosti ve struktuře

II. Centrální frekvence antény

V závislosti na centrální vysílací frekvenci v zásadě rozlišujeme 2 kategorie bezkontaktních antén:

a) 1,0 GHz „horn“ antény a b) 2,0 – 2,5 GHz „horn“ antény. Při použití antény s nižší centrální frekvencí a delší vlnovou délkou informace o odrazu od povrchu přichází ze silnější vrstvy, která začíná asfaltovým povrchem v porovnání s anténou o vyšší frekvenci. Proto je běžně 1,0 GHz anténa používána pro měření mezerovitosti v asfaltové směsi, avšak v případě, že množství nového asfaltu je 60 kg/m² nebo méně, doporučuje se použít anténu s centrální frekvencí 2,0 GHz.

III. Umístění měřených linií, hustota měření, příčné řezy

Počet a umístění měřených linií musí být definován na základě projednání se zákazníkem před provedením měření. V praxi je běžně požadován sběr dat pouze z vnější trajektorie jízdního kola, avšak pro přesnější informace se doporučuje sběr dat z vnější trajektorie jízdního kola i mezi trajektoriemi jízdních kol, což umožňuje eliminovat zkreslení výsledků měření vlivem nadměrné dopravy. Výsledky provedených testování potvrdily, že nejpřesnějších údajů je dosaženo při měření 2 linií v jednom jízdním pruhu včetně zaměření 1 linie ve středu jízdního pásu ve spojnici jízdních pruhů. Na základě provedených testů se i tvůrci metodiky přiklání k doporučení

provést měření ve zvolené trajektorii jízdního kola a další měření ve středu jízdního pásu ve spojnici jízdních pruhů.

IV. Určení polohy měření

Jednou z věcí, která může způsobit značný zmatek při hodnocení výsledků GPR měření kontroly kvality je určování polohy. Určování polohy by vždy mělo vycházet z GPS souřadnic. Před samotným prováděním měření by měla být zvolena jedna z metod určování polohy:

a. Určování polohy dle projektového staničení

V tomto případě je počátek měření a výchozí bod staničení 0 m a konec měření souhlasí s plánem projektového staničení. Jedná se o vhodný způsob, jelikož navrhované tloušťky pak mohou být lehce porovnány s daty z GPR měření. Jedinou problematickou oblastí je následné převádění těchto dat do silničních databází, avšak existuje několik GPR softwarových balíčků, jež tento transfer umožní.

b. Určování polohy dle informací silniční databáze

Tento způsob je vhodný především pro projekty, kdy předmětem zaměření není souvislý úsek, ale několik oddělených sekcí, jako tomu v mnoha rehabilitačních projektech bývá. Výhodou tohoto způsobu je možnost přímého převedení informací o konstrukci do silniční databáze.

V. Formát předání výsledků kontroly kvality

Výsledky GPR měření kontroly kvality mohou být prezentovány několika způsoby a výstupní formát musí být se zákazníkem předem dohodnut. Jednotlivé výstupní formáty jsou uvedeny v kapitole 2.6.2.

VI. Časový harmonogram měření a případné zpoždění

Časové rozvrhy prací pro kontrolu kvality bývají obvykle poměrně těsné a hektické, jelikož finální jednání mezi zhotovitelem a zákazníkem jsou, ve většině případů, plánována poměrně brzy po dokončení stavebních prací. Z tohoto důvodu mohou změny v časovém plánu způsobit problémy poskytovateli GPR služeb. Významnou roli hraje i počasí – například vytrvalý a silný déšť představuje nepříjemný problém pro měřicí tým a může způsobit zpožděné předání výsledků.

Před provedením měření by měl být kontaktní osobě zákazníka zaslán přesný plán určující termín a způsob provedení měření vč. popisu měřicího zařízení a personálu. Informaci lze zaslat poštou, emailem, případně faxem a není-li to možné, pak může být projednána po telefonu.

Bezpečnostní pokyny pro GPR měření vycházejí z „Pravidel bezpečnosti práce na dálnicích a silnicích – Směrnice generálního ředitele ŘSD ČR č. 4/2007, v 3.0“, a také z pravidel dle místních zvyklostí zemí, kde jsou měření prováděna, zejména na silnicích s vysokou intenzitou dopravy. Obecně platí, že každý člen posádky musí být s pravidly bezpečnosti práce na dálnicích a silnicích seznámen a tato dodržovat. Při měření na silnicích a dálnicích s vysokou intenzitou dopravy musí být informováni příslušné orgány a případně zajištěno doprovodné bezpečnostní vozidlo. Místní předpisy mohou dále specifikovat zvláštní geografické oblasti (např. letiště, výzkumné stanice, věznice nebo místa obranných sil), v nichž je používání GPR zařízení zakázáno, případně jeho použití podléhá zvláštnímu povolení.

2.5.2 Realizace měření

Minimálně jsou zaznamenány 4 měření (skeny) na metr, ale současná doporučená hustota je 10 skenů/metr. Doba měření (rozsah) je 20 nanosekund. Maximální rychlost měření je 50-60 km/h. Jedno zaměření obsáhne plochu přibližně 300 x 300 mm. Sběr dat je prováděn formou kontinuálního profilu od začátku měřené sekce do jejího konce. Přesné určení polohy pro provedení měření musí být zákazníkem předem definováno – viz různé způsoby určování polohy měření v kapitole 2.5.1. Pokud je potřeba, zhotovitel a objednatel projektu opravy vozovky se mohou dohodnout na množství, délce a umístění měřených linií. Jestliže jsou zaměřeny linie pod jízdním kolem, mělo by k jejich zaměření dojít nejpozději do 3 týdnů po dokončení stavebních prací, jelikož později mohou být výsledky ovlivněny provozem na silnici.

Měření nelze provádět za deště nebo na mokré vozovce, stejně jako jej nelze provádět na promrzlé vozovce. Rychlost měření by měla být konstantní, s minimem zastavení.

Během samotného sběru dat musí být GPR hardware bezpečně upevněn na měřicím vozidle a průběh měření musí probíhat tak, aby neohrozil průzkumný tým, ostatní účastníky provozu na silnici ani osoby v její blízkosti. Měřicí vozidlo musí být vybaveno výstražnými světly a bezpečnostními značkami celostátně akceptovanými v místě provádění měření. Pro zajištění vysoké kvality GPR dat a pro bezpečnost dopravy a silničního provozu se doporučuje, aby se měření účastnily vždy dvě osoby – jedna zabezpečuje řízení vozidla, druhá se zaměřuje na provoz a kontrolu měřicích přístrojů. O množství personálu však rozhoduje zákazník.

Informace o čísle a úseku silnice, vzdálenosti i směru a jménech pracovníků provádějících průzkum by měly být obsaženy v záhlaví protokolu z měření. V měřicím vozidle by dále měla být k dispozici kniha pro zaznamenání času měření, použitého vybavení, počasí během měření, případných

problémů

a dalších záznamů.

Před zahájením měření musí být přesně zajištěna správná poloha – obvykle odpovídá počátek a konec měření bodům či uzlům dle záznamů silniční databáze, případně začátku a konci opravovaného úseku a nové asfaltové vozovky. Jestliže měření neprobíhá dle záznamů silniční databáze, je třeba počátek a konec měření na silnici označit. Značení není nutné, pokud se jedná o jednoduše zapamatovatelná a nezaměnitelná místa, jako jsou například propustky či mostní závěry. Jak bylo popsáno v kapitole 2.5.1, jednodušším způsobem v případě nových či opravovaných silnic bývá následovat projektové značení a staničení.

Obsluha GPR zařízení může doplnit značky i v místech křižovatek, mostů, propustků apod. a s jejich pomocí je následně možné propojit GPR soubory s videem pro případ, že k propojení nedojde během měření. Značky je možné použít i v případě, že je měřeno více linií a pruhů a neznáme GPS z každé linie.

Při používání bezkontaktních antén je nutné po každém měření a před vypnutím GPR zařízení zaznamenat odraz od kovového plátu, zároveň se doporučuje toto provádět před zahájením měření. Při měření bezkontaktní anténou by měl být po celou dobu měření zcela viditelný tzv. přímý impuls, vycházející z anténního vysílače do anténního přijímače.

2.5.3. Přesnost měření

Deklarovaná přesnost měření mezerovitosti pomocí GPR technologie odrazu signálu od povrchu je +/- 0,9 procent (Roimela 1998). K tomuto výsledku došla statistická analýza porovnáním výsledků jádrových vrtů a statického georadarového měření na jednotlivé měřicí body ($R=0,9223$).

2.5.4. Ostatní data z měření

Dalšími technologiemi, které lze použít současně s GPR měřením kontroly kvality jsou digitální videa, termální kamery, 3D akcelerometry a technologie laserového skenování. Data pořízená digitálním videem a termokamerou jsou i podpůrnými údaji a mohou pomoci při analýze příčin, např. segregace, v problematických sekcích. 3D akcelerometr poskytuje informace o rovinatosti asfaltového povrchu, a data pořízená laserovým skenerem mohou být použita k výpočtu zpevněné/vyasfaltované plochy, příčného sklonu vozovky a hloubky vyjetých kolejí.

2.6 Zpracování GPR dat a hodnocení

2.6.1 Obecně

Hlavním cílem GPR měření kontroly kvality asfaltové směsi je poskytnout informaci o kvalitě vozovky jejímu správci/majiteli, případně zhotoviteli. Pokud sběr dat proběhl správně a za použití vhodného zařízení, umožní pečlivé a profesionální zpracování a interpretaci provedené kontroly kvality. V následujících kapitolách jsou obecně popsány postupy pro zpracování dat a jejich interpretaci.

2.6.2 Předzpracování dat

Předzpracování dat v tomto případě znamená editaci dat GPR a jejich kombinaci s daty návrhu projektu a dalšími údaji získanými v průběhu procesu kontroly kvality. Editace dat zahrnuje operace, při kterých není změněn původní informační obsah dat. Patří sem například nastavení měřítka vzdálenosti, spojování a rozdělování jednotlivě měřených linií a opačného směru.

Souřadnice určitých bodů v měřeném úseku jsou často známy a tyto body by měly být propojeny s daty, aby tak byly uloženy i jejich z-souřadnice. Ve většině případů jsou informace o souřadnicích shromažďovány v průběhu měření pomocí GPS systémů v reálném čase.

2.6.3 Zpracování dat a hodnocení

Primární terénní data se dále zpracovávají v interpretačních softwarech, které jsou dodávány výrobci georadarových aparatur. Tyto software se používají k filtraci primárních záznamů, kdy cílem zvoleného typu filtrace je zvýraznění zájmových jevů (např. bodové nehomogenity x souvislého odrazného rozhraní), k popisu záznamů a vnesených značek, k normalizaci záznamů vzhledem ke skutečně ujeté vzdálenosti, k provedení interpretace, ke grafické prezentaci georadarových záznamů a interpretace a k převodu interpretace do textových souborů (TP 233 - Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací). Společnost Roadscanners Central Europe spol. s r.o. používá ke zpracování a hodnocení GPR dat vlastní software Road Doctor.

Primárním výstupem georadarového měření je časový řez, který se přepočítává na hloubkový řez. Výsledná interpretace georadarových záznamů se zakresluje přímo do nich nebo se přikládá interpretovaný hloubkový řez se zakreslenými interpretovanými jevy. Interpretaci georadarových záznamů lze uložit do textových souborů, kterou lze pak dále prezentovat ve formě tabulek a v dalších grafických formátech (TP 233 - Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací). Příklady jednotlivých výstupů jsou zobrazeny v kapitole výstupů.

2.7 Předání závěrečných zpráv a výsledků

2.7.1 Obecné

V běžné praxi jsou GPR data a výsledky měření předávány ve formě přepočtených GPR údajů (tedy údajů, které byly použity v interpretacích), jelikož rastrový obrázek GPR profilu není dostačující. Majetková práva k předmětu předání má zákazník, pokud není dohodnuto jinak.

Výsledky měření (a výtisky) mohou být předány v tiskové podobě, digitální formě zkopírované nebo zipované na paměťové kartě, DVD případně pevném disku HDD. Způsob předání dat a výsledků záleží na dohodě se zákazníkem.

2.7.2. Formáty předávaných výsledků

Výsledky měření jsou prezentovány formou diagramů (podélné profily) nebo tabulek a ukazují hodnoty po 1, 5, 10 nebo 100 metrech.

Dalším způsobem prezentace výsledků je prezentace na mapě GIS, což však vyžaduje přesné informace o umístění objektu odpovídající silniční a dálniční databance.

Výsledky jsou počítány pro celý objekt i samostatně pro každou měřenou linii. Jako podklad pro případné kompenzace či odškodnění jsou směrodatné celkové výsledky objektu.

Závěrečná zpráva by měla obsahovat následující informace:

- Název organizace, která průzkum provedla
- Název organizace klienta
- Výzkumná metoda, použité zařízení a software
- Datum provedení měření
- Obecné informace o objektu měření
- Celková délka měřeného objektu
- Délka měření

Tabulky finálních výstupů prezentují výsledky výpočtů, průměru, směrodatné odchylky, délek (m) přesahujících horní limit případně nedosahující spodní limit a průměrné dielektrické hodnoty měřené linie. Výsledky mohou být prezentovány samostatně pro každou měřenou linii, i pro celkový kompletní objekt.

Konzultant GPR měření by měl pro klienta taktéž připravit stručnou zprávu popisující průběh a výstupy měření.

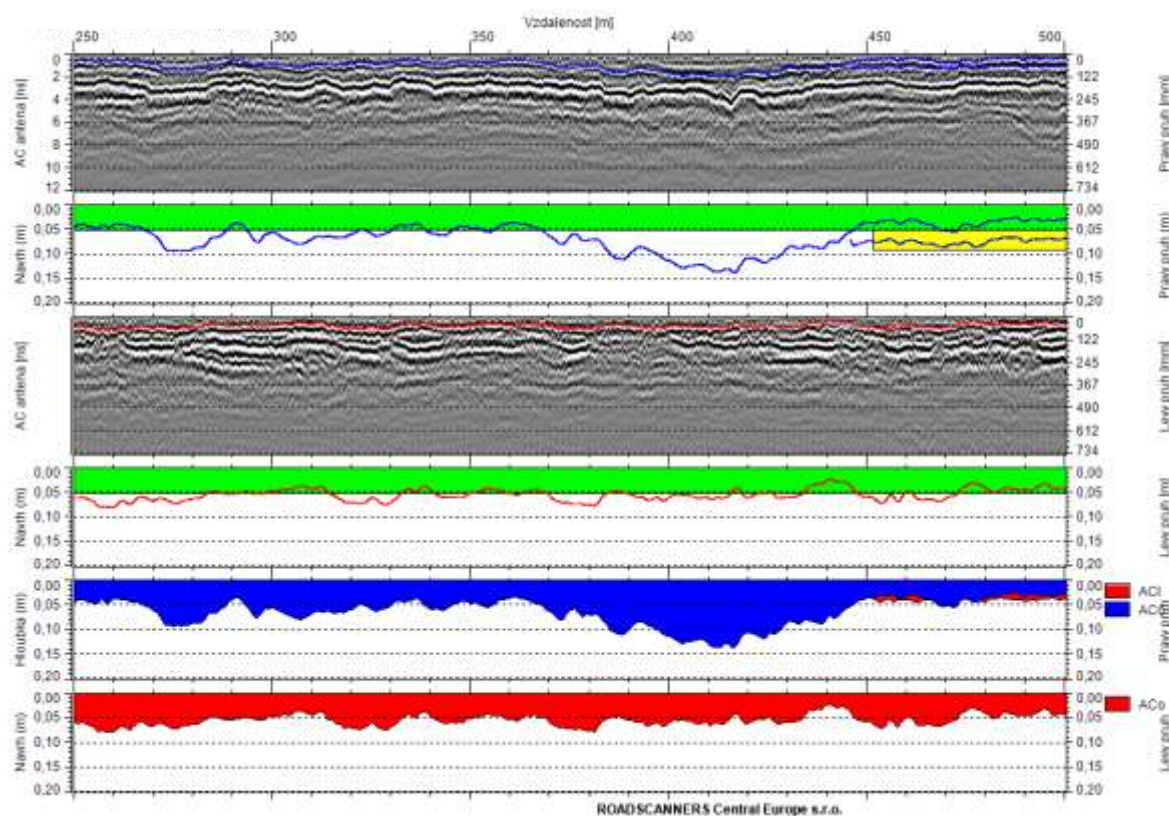
2.7.3 Tisk do obrázkových souborů

Obrazové soubory by měly být dodány ve formátu png. V případě horizontálně orientovaného formátu A4 by minimální šířka měla být 1096 pixel a výška 756 pixel. Zákazník určí, jak dlouhá vzdálenost by měla být uvedena na jedné stránce, není-li však specifikováno, uvádí se 500 m na jedné stránce v měřítku 20 cm/m. Názvy obrázkových souborů by měly obsahovat číslo silnice i sekci (pokud je více sekcí) a vzdálenost a být očíslovány, např.: 21_216.001 PNG, 21_216.002 PNG.

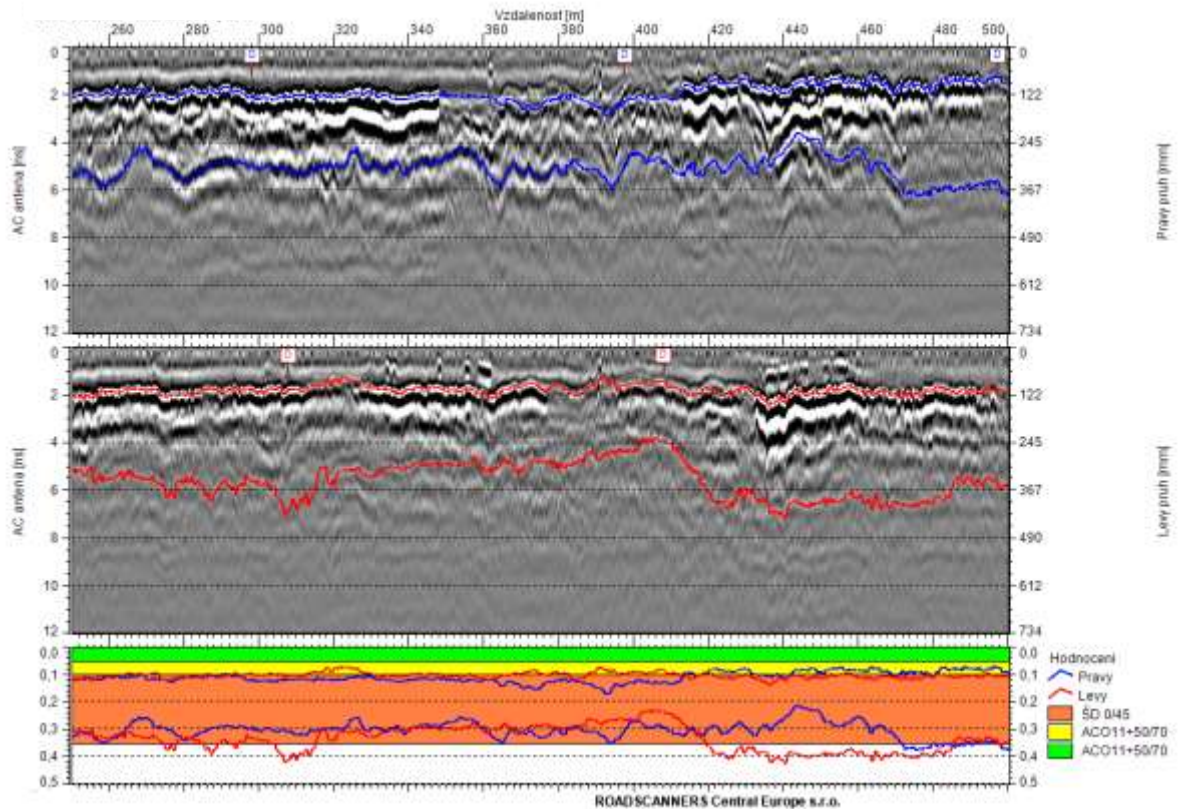
2.8. Popis jednotlivých výstupů

2.8.1 GPR výstupy

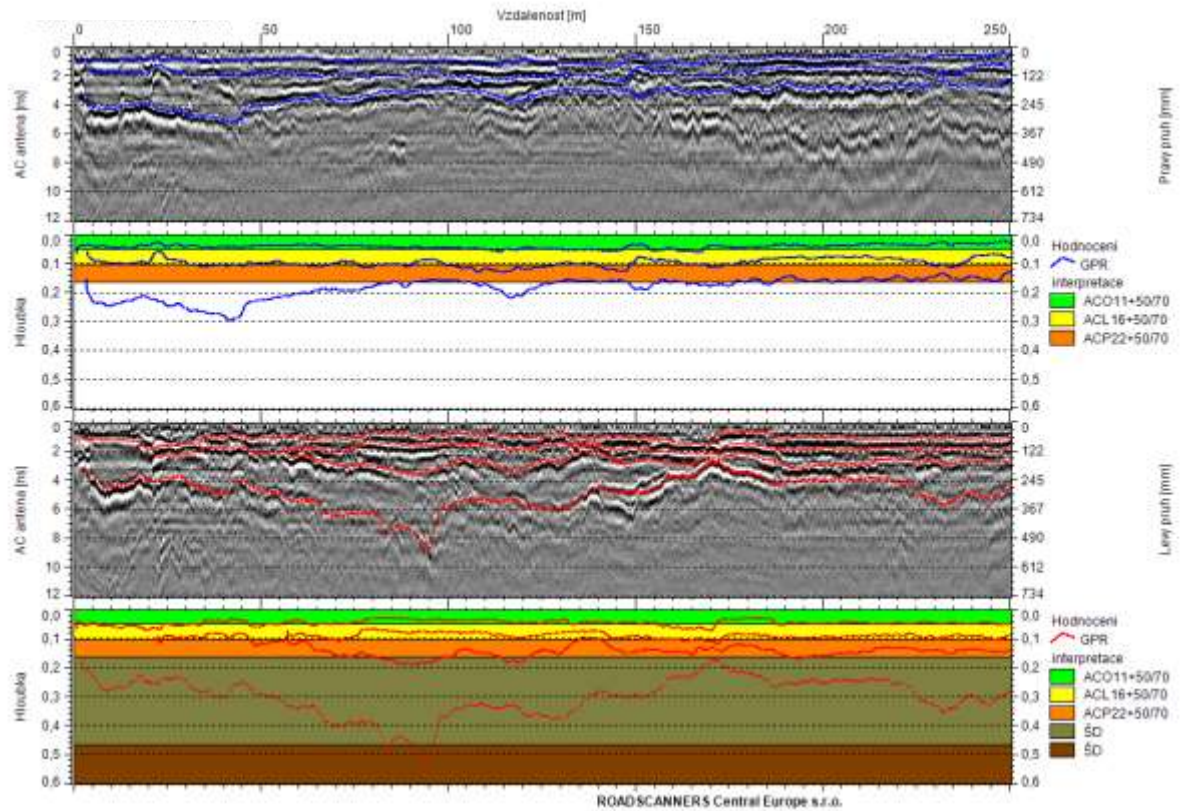
Zobrazení interpretace georadarových údajů včetně porovnání výsledků s návrhem projektové dokumentace. Součástí výstupů je zpracovaný videozáznam s výsledky měřených parametrů v jednom grafickém rozhraní a lokalizací měřeného úseku.



V prvním a třetím okně obrázku výše je zobrazena interpretace georadarového záznamu z AC (air-coupled) antény s frekvencí 2 GHz v obou směrech (pravý pruh = směr 1, levý pruh = směr 2). Druhé a čtvrté okno zobrazuje průběh interpretovaných vrstev s podkladem projektovaných tloušťek dle projektové dokumentace. Poslední dvě okna zobrazují kontinuální průběh konstrukčních vrstev v obou směrech (pravý pruh = směr 1, levý pruh = směr 2).



V prvním a druhém okně obrázku výše je zobrazena interpretace georadarového záznamu z AC (air-coupled) antény s frekvencí 2 GHz v obou směrech (pravý pruh = směr 1, levý pruh = směr 2). Třetí okno zobrazuje průběh interpretovaných vrstev s podkladem projektovaných tloušťek dle projektové dokumentace (pravý pruh = směr 1 je zobrazen modrou linkou, levý pruh = směr 2 je zobrazen červenou linkou).



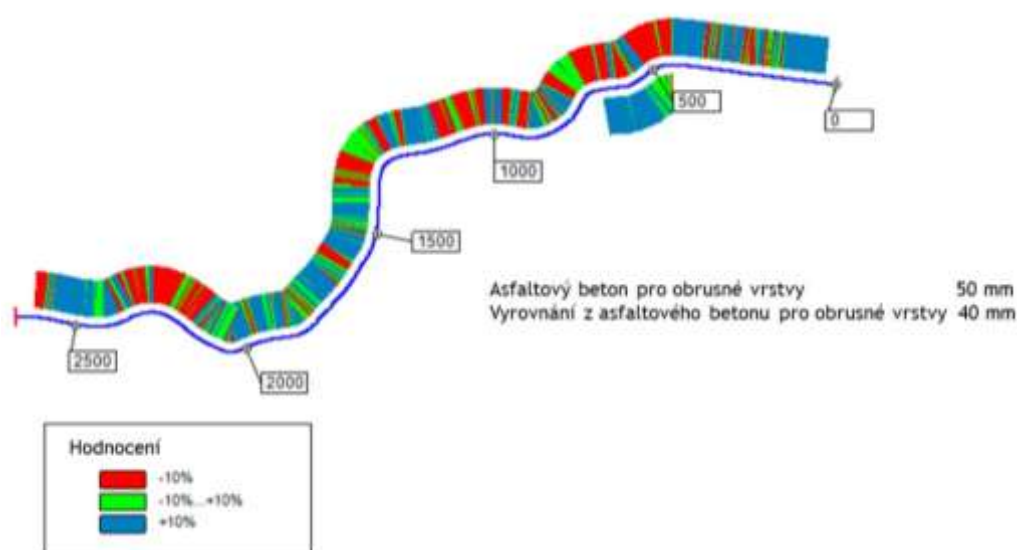
V prvním a třetím okně obrázku výše je zobrazena interpretace georadarového záznamu z AC (air-coupled) antény s frekvencí 2 GHz v obou směrech (pravý pruh = směr 1, levý pruh = směr 2). Druhé a čtvrté okno zobrazuje průběh interpretovaných vrstev s podkladem projektovaných tloušťek dle projektové dokumentace (pravý pruh = směr 1 je zobrazen modrou linkou, levý pruh = směr 2 je zobrazen červenou linkou).

Grafické zobrazení statistického vyhodnocení na mapě daného úseku - porovnání skutečných tloušťek jednotlivých konstrukčních vrstev s projektovou dokumentací. Statistické hodnocení bylo provedeno dle klasifikace tloušťek jednotlivých vrstev do tří skupin (a barev které zobrazují jednotlivé skupiny na mapě):

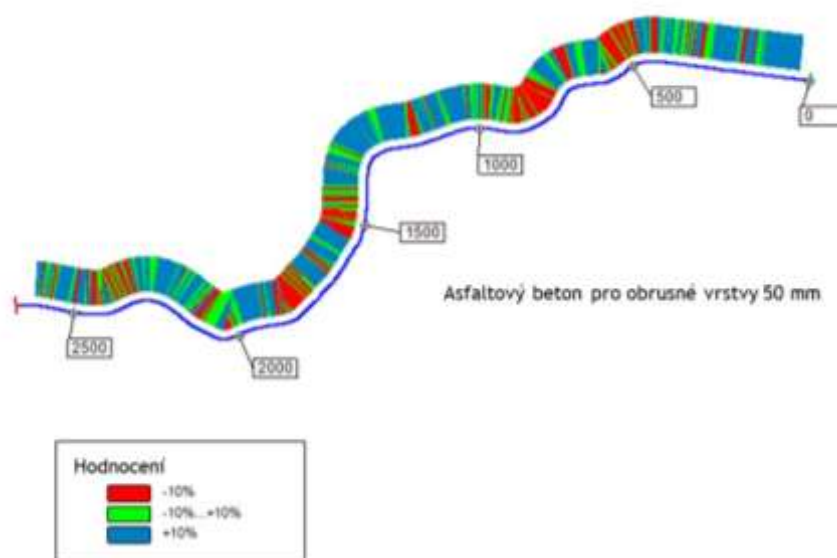
červená – tloušťky které jsou o 10 % tenčí oproti návrhu

zelená – tloušťky které jsou mezi $\pm 10\%$ tloušťky návrhu

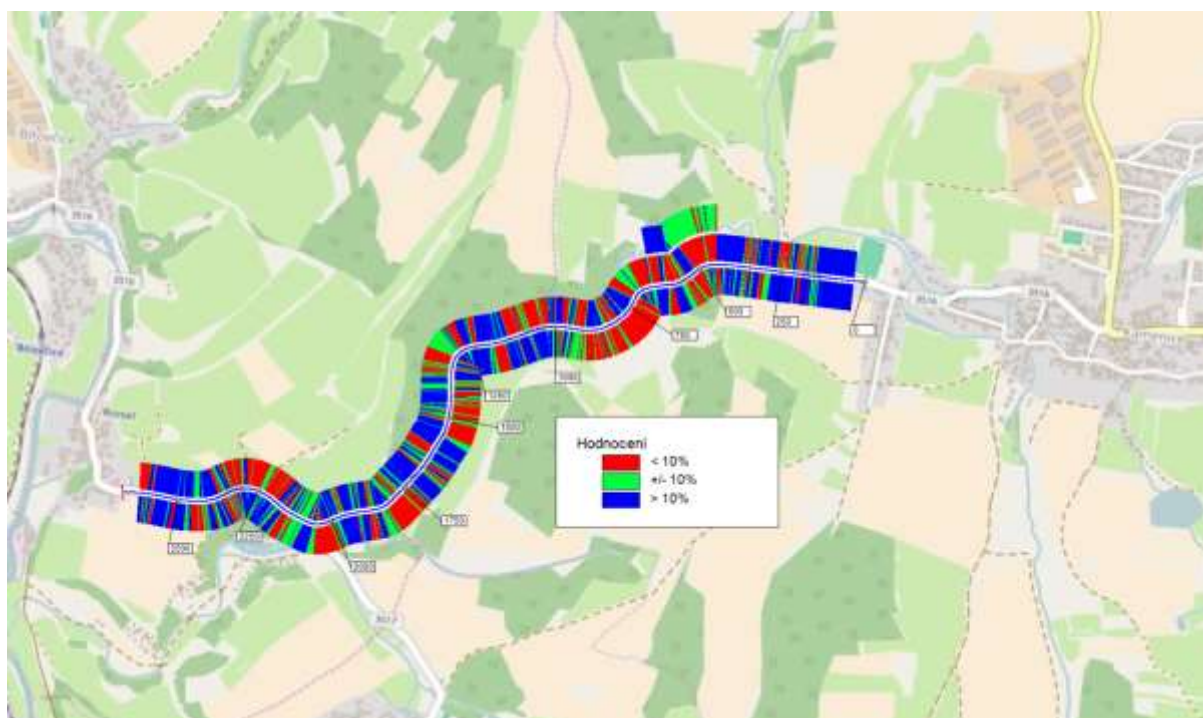
modrá – tloušťky které jsou o 10 % silnější oproti návrhu



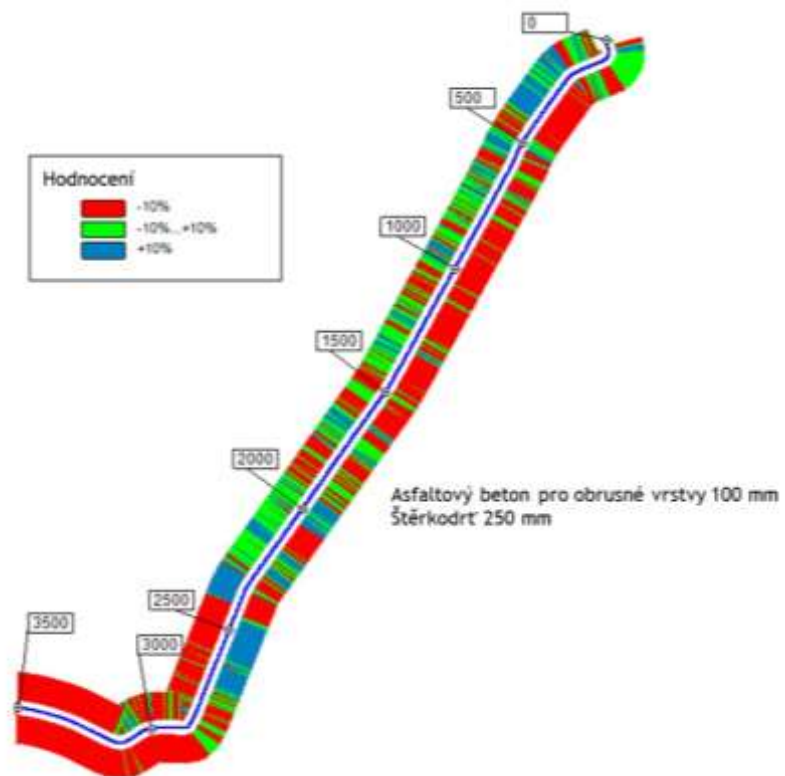
Obrázek 11. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě, směr 1.



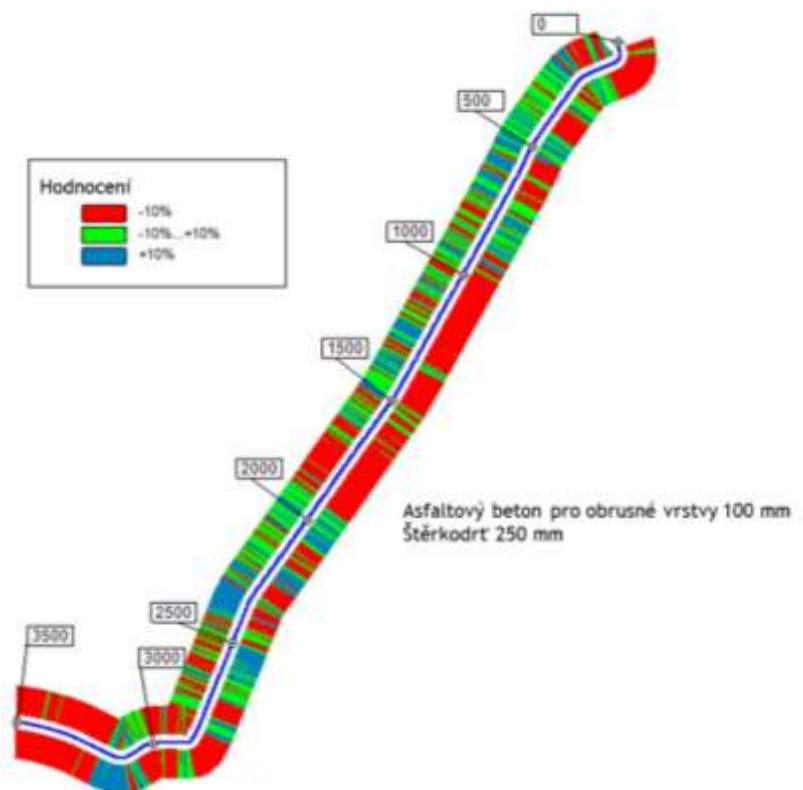
Obrázek 12. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě, směr 2.



Obrázek 13. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě.



Obrázek 14. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě, směr 1.



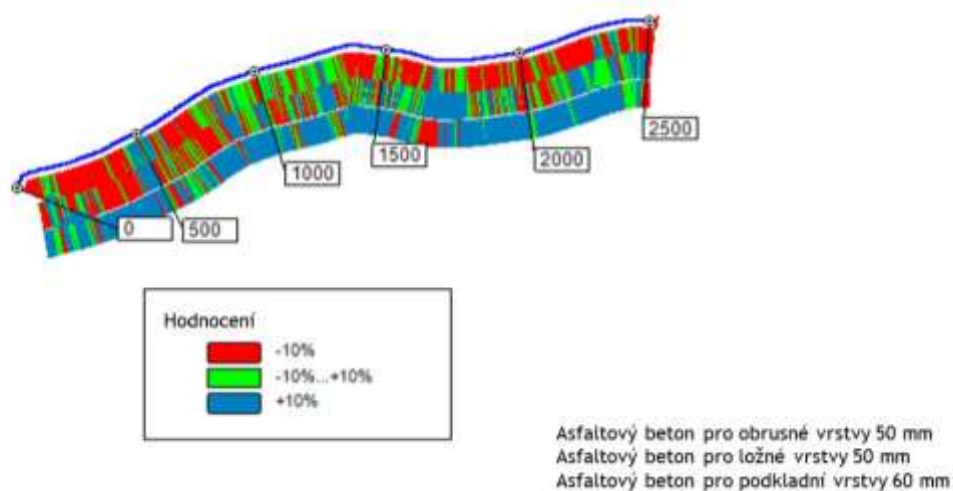
Obrázek 15. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě, směr 2.



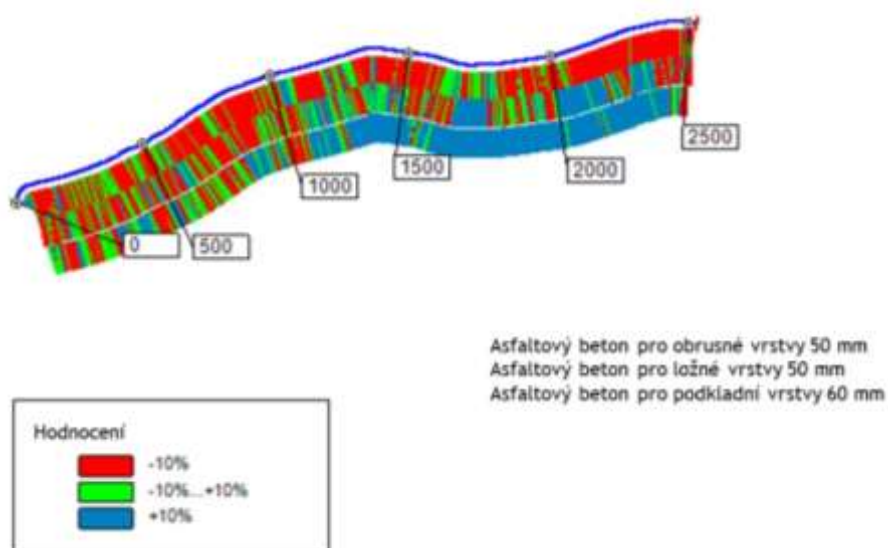
Obrázek 16. Grafická interpretace výsledků vrstvy ACO na mapě úseku.



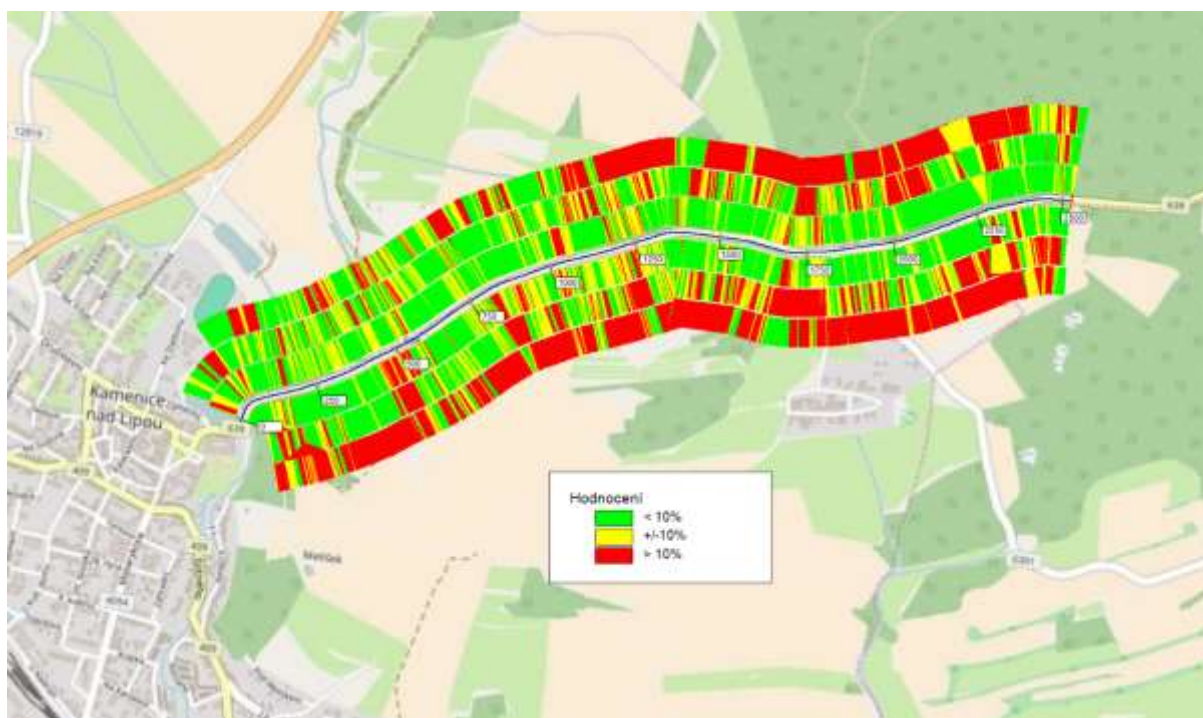
Obrázek 17. Grafická interpretace výsledků vrstvy ŠD na mapě úseku.



Obrázek 18. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě, směr 1.



Obrázek 19. Grafická interpretace výsledků úseku na mapě, směr 2.



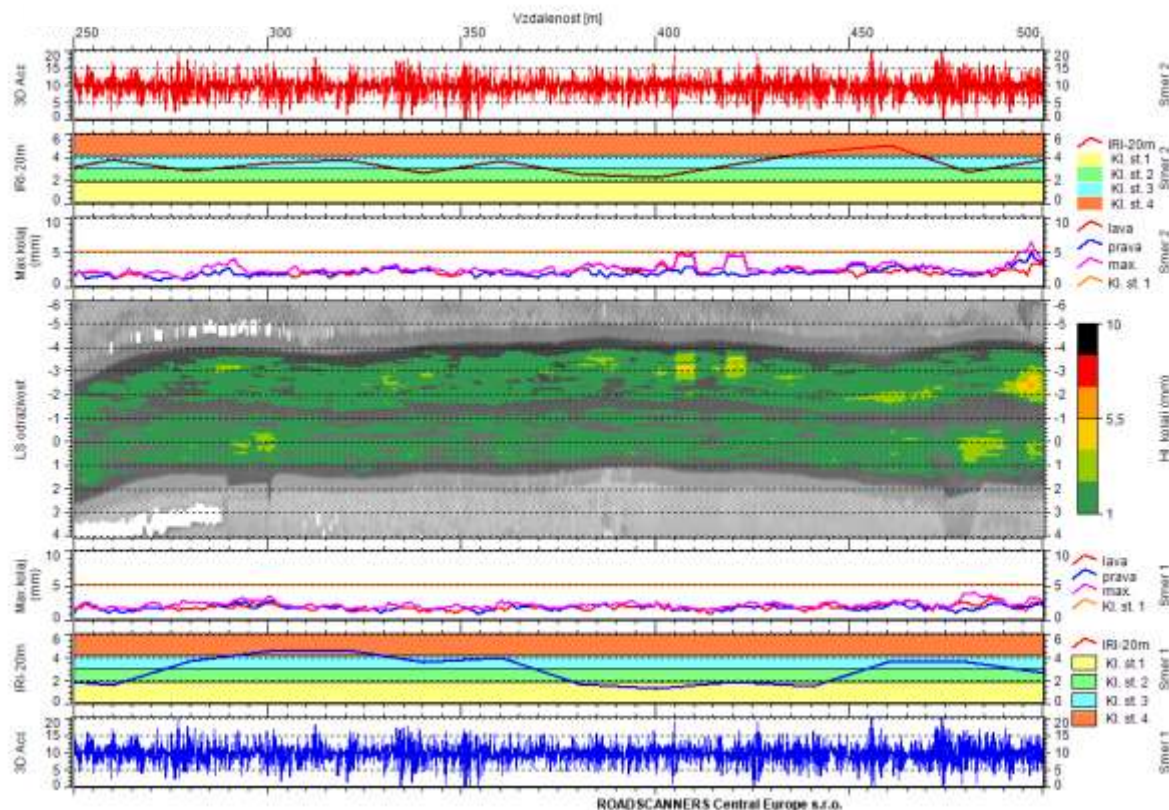
Obrázek 20. Grafická interpretace výsledků AC vrstvy na mapě úseku.



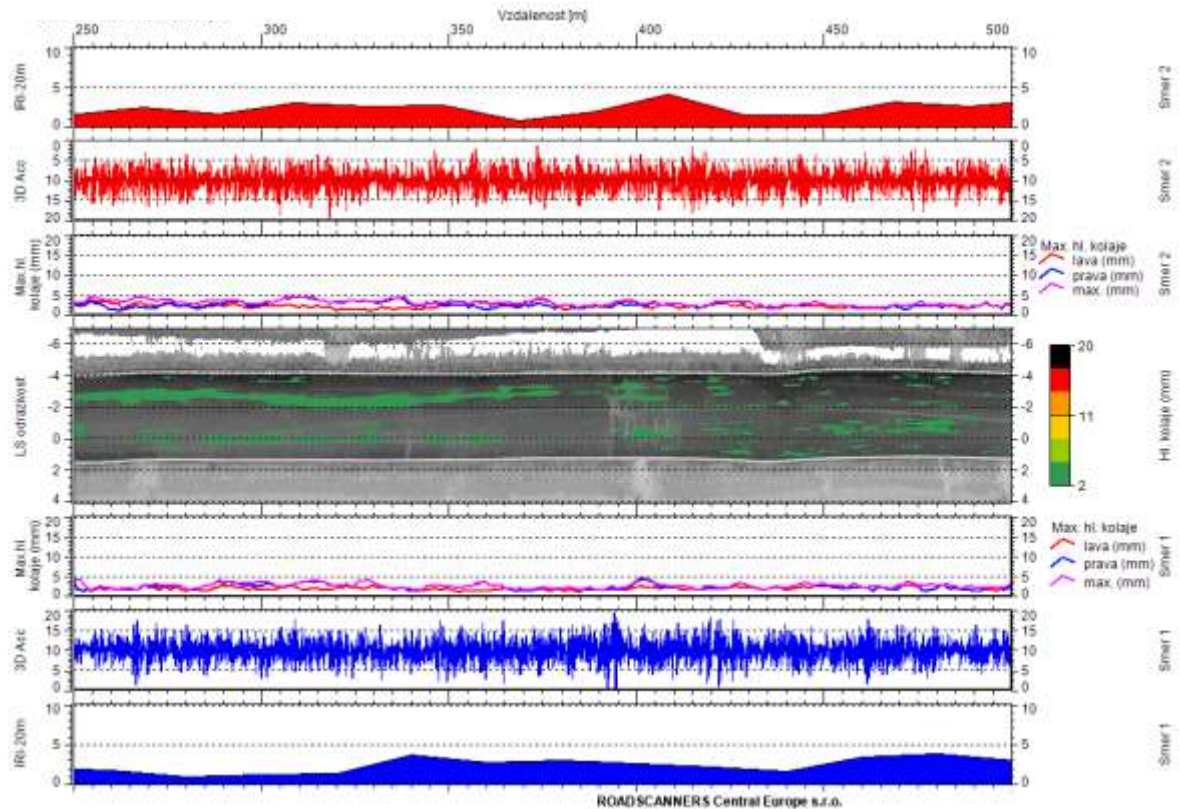
Obrázek 21. Grafická interpretace výsledků na mapě úseku.

2.8.2 2D LS a 3D ACC výstupy

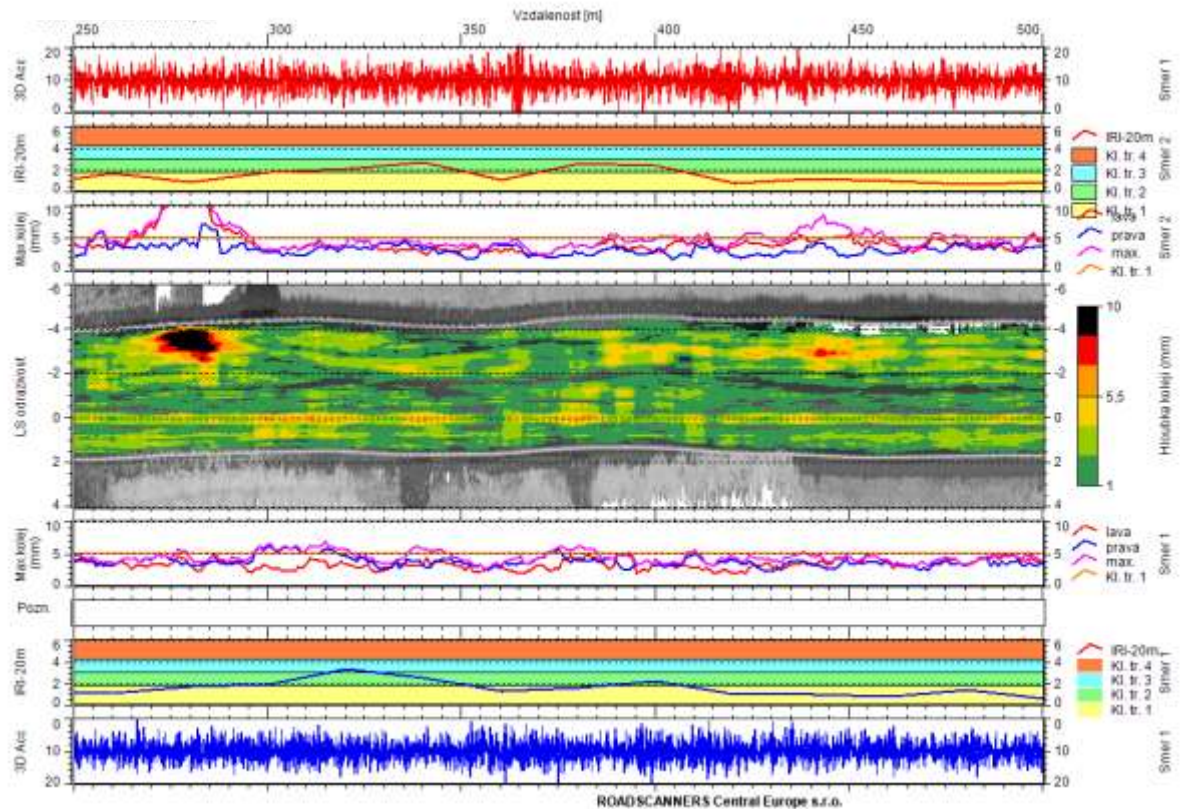
Zobrazení interpretace 2D LS a 3D ACC údajů včetně mapy odrazivosti z laserového skeneru (intenzity odrazu) pro identifikaci nových úseků s pokládkou asfaltové směsi, vyhodnocení hloubky vyjetých kolejí a hodnot podélných a příčných nerovností a mezinárodního indexu IRI dle ČSN 73 6175.



V prvním a posledním okně obrázku výše je zobrazena podélná nerovnost povrchu vozovky v obou směrech (směr 1 = modrá barva, směr 2 = červená barva). Druhé a přeposlední okno shora zobrazuje průběh parametru IRI-20m a barevnou klasifikaci jednotlivých stupňů dle TP 87 v obou směrech. Třetí okno shora a třetí okno zdola zobrazují maximální hloubku vyjetých kolejí a hloubku v jednotlivých liniích jízdního kola automobilu, přičemž oranžová vodorovná čára zobrazuje stupeň 1 klasifikace dle TP 87. Prostřední okno zobrazuje plošné vyhodnocení hloubky vyjetých kolejí v obou směrech ve směru staničení na podkladu mapy odrazivosti laserového skeneru.



V prvním a posledním okně obrázku výše je zobrazen parametr IRI-20m (směr 1 = modrá barva, směr 2 = červená barva). Druhé okno shora i zdola zobrazuje podélnou nerovnost povrchu vozovky v obou směrech (směr 1 = modrá barva, směr 2 = červená barva). Třetí okno shora a třetí okno zdola zobrazují maximální hloubku vyjetých kolejí a hloubku v jednotlivých liniích jízdního kola automobilu v obou směrech. Prostřední okno zobrazuje plošné vyhodnocení hloubky vyjetých kolejí v obou směrech ve směru staničení na podkladu mapy odrazivosti laserového skeneru.



V prvním a posledním okně obrázku výše je zobrazena podélná nerovnost povrchu vozovky v obou směrech (směr 1 = modrá barva, směr 2 = červená barva). Druhé a přeposlední okno shora zobrazuje průběh parametru IRI-20m a barevnou klasifikaci jednotlivých stupňů dle TP 87 v obou směrech. Třetí okno shora a třetí okno zdola zobrazují maximální hloubku vyjetých kolejí a hloubku v jednotlivých liniích jízdního kola automobilu, přičemž oranžová vodorovná čára zobrazuje stupeň 1 klasifikace dle TP 87. Prostřední okno zobrazuje plošné vyhodnocení hloubky vyjetých kolejí v obou směrech ve směru staničení na podkladu mapy odrazivosti laserového skeneru.



Obrázek 22. Zobrazení parametru IRI-20-m zatříděného do klasifikace dle TP 87 na mapě úseku.



Obrázek 23. Zobrazení parametru IRI-20-m zatříděného do klasifikace dle TP 87 na mapě úseku.



Obrázek 24. Zobrazení parametru IRI-20-m zatříděného do klasifikace dle TP 87 na mapě úseku.



Obrázek 25. Zobrazení max. hloubky koleje v mm zatříděné do klasifikace dle TP 87 na mapě úseku.



Obrázek 26. Zobrazení max. hloubky koleje v mm zatříděné do klasifikace dle TP 87 na mapě úseku.



3 Technologie 3D laserového skeneru a mobilního tabletu se softwarovou aplikací kontinuálního zobrazování geometrické statistiky kontrolovaného úseku s polohou GPS

3.1 Účel vydání Metodiky

Metodika má za účel vysvětlit jednotlivé požadavky na měření a následně i kroky, kterých je zapotřebí, aby technologie 3D laserového skenování bylo možné účelně a správně vyžít při realizaci staveb a oprav silnic. Tedy k tomu, jak po stránce technické i ekonomické usnadnit a zrychlit práci kontrolních a vedoucích složek stavby na straně zadavatele při přejímání provedených prací zhotovitelem, ale také jak usnadnit a zrychlit rozhodování v procesu výstavby.

Prostorové měření laserovým skenerem je proces sběru dat 3D měřícím systémem. Během měření laserový skener zachycuje geometrické parametry prostoru pomocí rozměrů a vzájemných vztahů těles. Základní výstup z tohoto skenování je mračno bodů (Obrázek 28.), z něhož lze vygenerovat velmi přesný a podrobný digitální model reality.

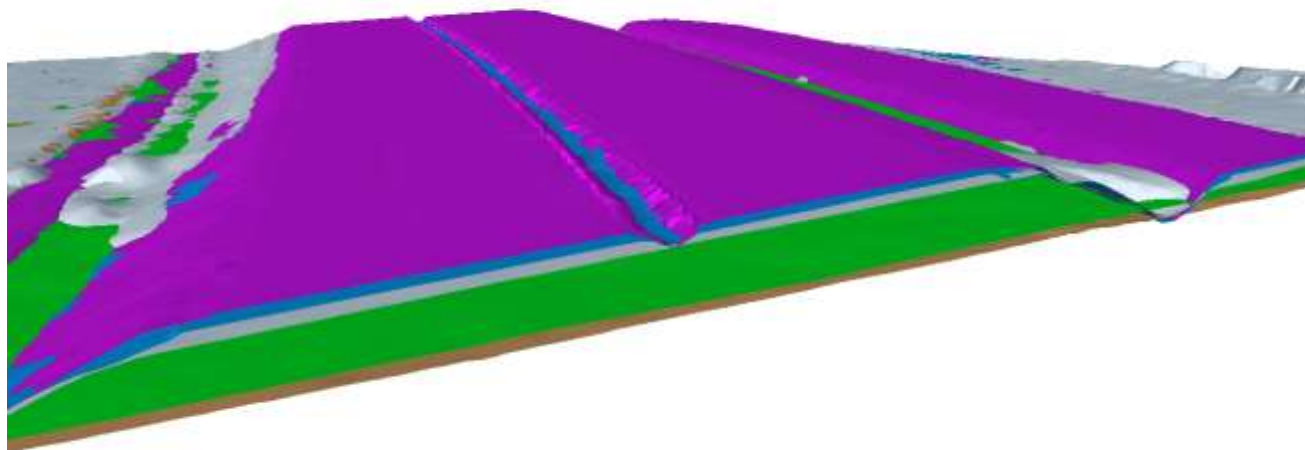


Obrázek 28. Mračno bodů – základní výstup laserového skenování a povinné spojnice kraje vozovky.

Text metodiky má za úkol jasně stanovit požadavky a kroky jak **kontroly kvality**, tak i **re-profilace** ve fázi přípravy a zadání prací, realizace prací a přejímání výsledků měření. Následně i během procesu vyhodnocování výsledků, rozhodování na základě získaných výsledků měření a shromažďování podkladů z měření. A konečně i ve finální fázi archivace všech výsledků měření a zjištění pro závěrečnou zprávu zadavatele, která je podkladem pro přejímky stavby.

3.2 Požadavky na měření laserovým skenováním a model reality

Popsány jsou především základní požadavky zadavatele na výstupní informace z laserového skenování, zabezpečení jejich bezchybnosti, základní požadavky na modely reality (**Obrázek 29.**) tak, aby byly využitelné pro kontrolu kvality, přípravu a zadání stavebních prací (dále v textu jen „základní požadavky A“). Tyto „základní požadavky A“ je nezbytné vyžadovat po dodavateli měření:



Obrázek 29. Modely reality – přesný a detailní model skutečného povrchu zaměřený laserovým skenováním

3.2.1. Přesnost výstupů

Přesnost výstupních dat (modelů reality) a následné informace o geometrických parametrech komunikací musí být vázány k jednotnému výškovému horizontu stavby. Tedy připojení měření na bodové pole stavby (účelová síť geodetických bodů určená k zaměření a vytyčování prostorové polohy stavebního objektu), kdy jednotlivé zaměřené a vyhodnocené povrchy konstrukčních vrstev vozovky lze porovnávat vůči sobě nebo s projektovou dokumentací (PD) ve 3D.

Přesnosti modelů reality jednotlivých povrchů konstrukčních vrstev stavby:

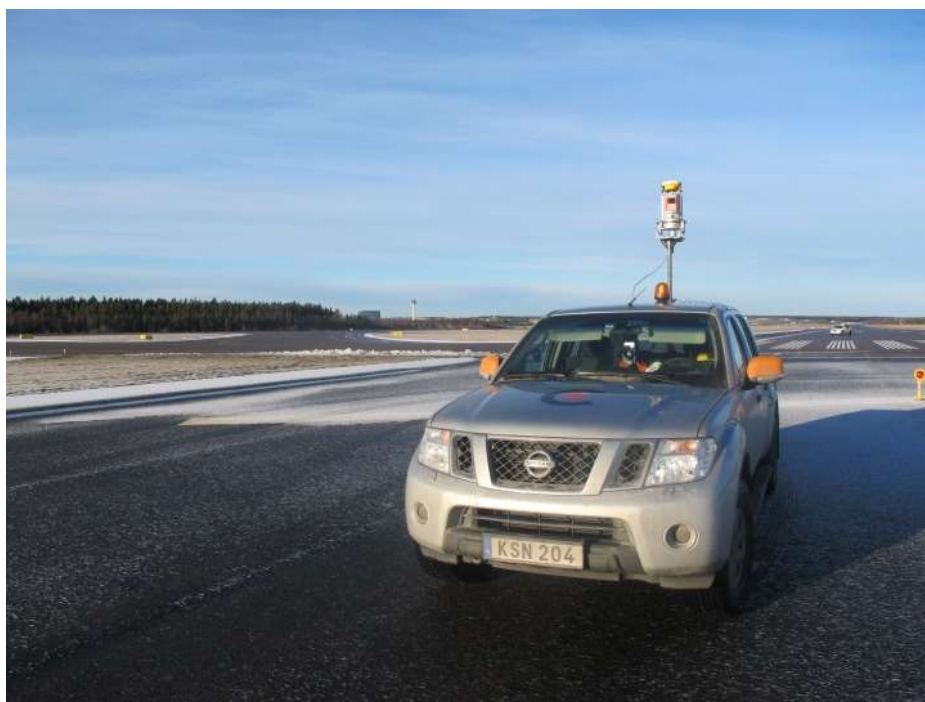
- Hutněné asfaltové vrstvy: $\sigma_Z = \max 3 \text{ mm}$, $\sigma_{XY} = \max 20 \text{ mm}$
- Stmelená konstrukční vrstva MZK (mechanicky zpevněné kamenivo): $\sigma_Z = \max 10 \text{ mm}$, $\sigma_{XY} = \max 20 \text{ mm}$
- Stmelená konstrukční vrstva ŠD (šterkodrť): $\sigma_Z = \max 10 \text{ mm}$, $\sigma_{XY} = \max 20 \text{ mm}$
- Zemní pláň: $\sigma_Z = \max 15 \text{ mm}$, $\sigma_{XY} = \max 20 \text{ mm}$
- Nezpevněné plochy: $\sigma_Z = \max 20 \text{ mm}$, $\sigma_{XY} = \max 20 \text{ mm}$

Přesnost je charakterizována výškovou směrodatnou odchylkou σ_Z a polohovou směrodatnou odchylkou σ_{XY} vzhledem k bodovému poli stavby. Jedná se o přesnost k bodovému poli stavby a lze tedy porovnávat v dané přesnosti jednotlivé etapy měření modelů reality a k digitálnímu modelu projektu (modelu stavby). Požadavek na přesnost modelu reality jednotlivých povrchů konstrukčních vrstev je odvozen a dán požadavky na geometrické parametry jednotlivých konstrukčních vrstev silnic z důvodu kontroly nedodržení mezních hodnot geometrických parametrů konstrukčních vrstev silnic, z důvodu přesného výpočtu objemů vybraných položek výkazu výměr. Bodové pole stavby musí být vybudováno s výškovou přesností zaručující dodržení přesností modelu reality jednotlivých povrchů konstrukčních vrstev (nivelační pořad nebo trigonometrický výškový pořadu ($m < 3\text{mm}$)) a s polohovou přesností GNSS ($m < 20\text{mm}$). Stabilizace jednotlivých bodů bodového pole musí zaručovat stálou polohu a výšku po celou dobu výstavby a to i v zimních měsících.

3.2.2. Hustota měření

Hustota měřených bodů jednotlivých povrchů konstrukčních vrstev stavby na liniových stavbách bude provedena s minimálním dodržением 2000 bodů/ m^2 (cca $25 \times 25 \text{ mm}$). Vysoký požadavek na hustotu je z důvodu přesné rekonstrukce obvodu stavby, ověřitelnosti dat měření, zaměření okolí stavby pro kontrolu kvality dat i po zakrytí konstrukčních vrstev silnice, garance výstupů a přesného výpočtu objemů vybraných položek výkazu výměr.

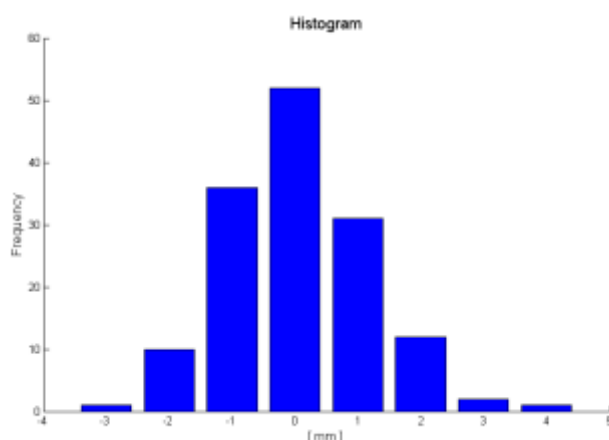
Měření povrchu vrstev musí být provedeno laserovým skenováním statickým (na stativu) nebo metodou Stop&go (Metoda měření technologií laserového skenování, kdy při měření je skener na jednom místě umístěný např. na vozidle a tvoří celek. Při změně pozice není nutná demontáž měřicího systému, systém se přemístí jako celek). Použití mobilního laserového skenovacího systému snímajícího za pohybu se vzhledem k požadavkům na přesnost nepovoluje.



Obrázek 30. Měření stop&go – měření probíhá ve statickém režimu, přesun na další stanovisko měření je mobilní

3.2.3. Kontrola kvality dat a ověřitelnost výstupních informací

Kontrola kvality dat z měření laserovým skenováním se prokazuje provedením kontrolního měření, každé konstrukční vrstvy, v celém rozsahu stavby s hustotou jeden kontrolní bod na 100 m^2 . Kontrolní měření se provádí s připojením na bodové pole s vyšší než je požadovaná přesnost na danou konstrukční vrstvu. Po zpracování dat do podoby modelu reality je ke každému modelu reality uvedena směrodatná výšková odchylka a jeho kontrolního měření (Obrázek 31.).

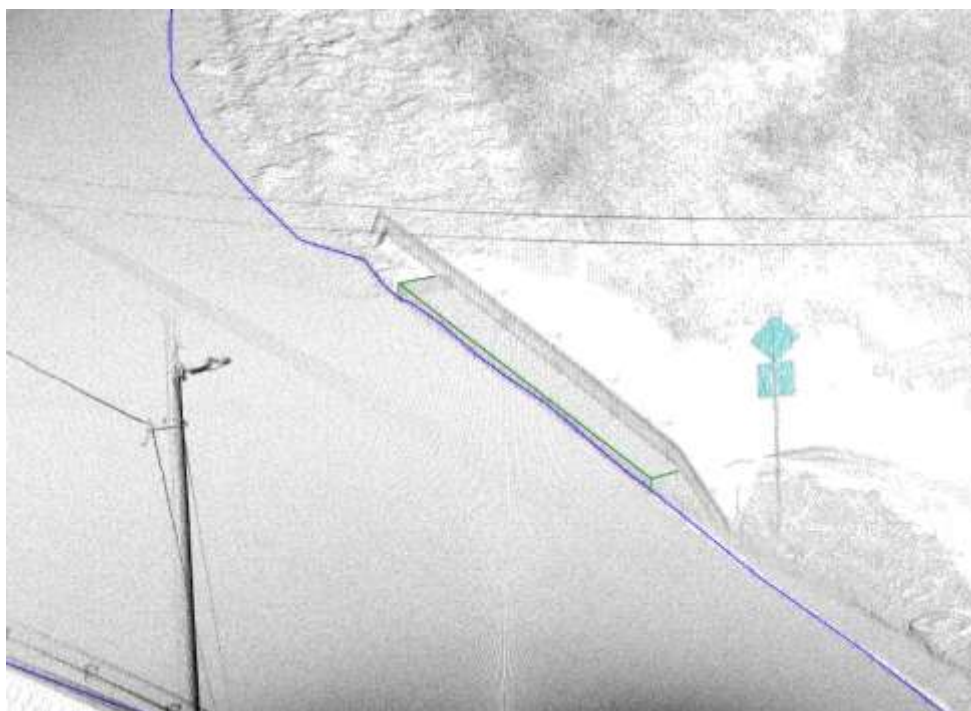


Obrázek 31. Histogram kontroly kvality vyjadřující výškovou kvalitu modelu reality pomocí normálního rozdělení

Ověřitelnost výstupních informací i po zakrytí konstrukčních vrstev – požadavek minimalizace sporů se zhotoviteli staveb. Kontrola kvality dat začíná už v průběhu měření. Veškeré vlivy, které mohou ovlivnit kvalitu dat, se musí dokumentovat (chvění přístroje vlivem stavebních strojů, aj). Musí být později kdykoliv umožněno identifikovat případné vlivy, které kvalitu měření ovlivňují.

Povinnou součástí je zaměření okolí stavby s objekty, které stavbou nejsou dotčeny kvůli ověřitelnosti výstupních informací získaným z 3D laserového skenování i po zakrytí jednotlivých konstrukcí (**Obrázek**). Toto slouží pro zpětnou kontrolu a případné řešení některých sporů. Následující seznam udává vhodné objekty pro ověření měření i po zakrytí konstrukčních vrstev. Vhodné objekty pro ověření jsou ty, které jsou trvanlivého charakteru v blízkosti stavby. Vhodné objekty pro ověření měření jsou:

- Zpevněné plochy okolní stávající komunikace
- Pilíře a piloty mostů
- Betonové paty elektrického vedení a sloupů
- Budovy a jiné pevné objekty jako např. zděné ploty
- Výrazné terénní zlomy bez vegetace (např. skály)
- Apod.



Obrázek 32. Ověřitelnost měření například na mostku – mračno bodů na objektech, které nemění polohu v průběhu výstavby

Vyžaduje se technologie laserového skenování s možností měření minimálně na vzdálenost 100m při 10% odrazivosti povrchu. Tato podmínka bezpečně zaručí zpětnou kontrolu měřených skutečností na základě měření na okolní vhodné objekty (ověřitelnost metody).

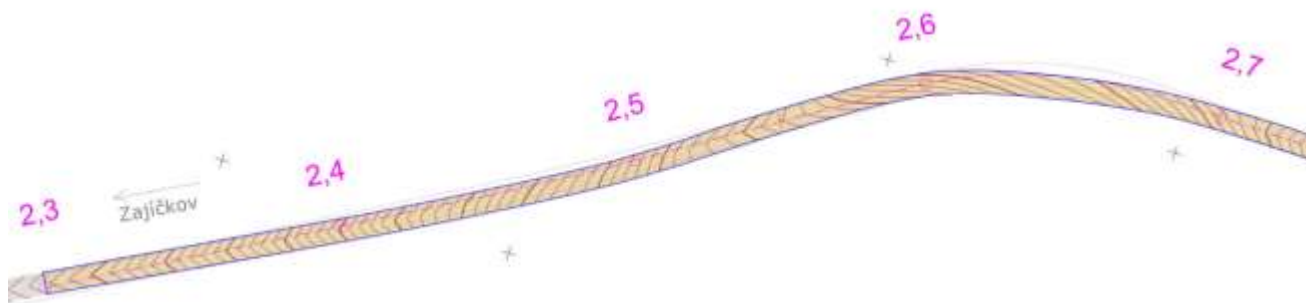
Kontrola kvality dat pokračuje i v průběhu zpracování. Mezi „základní požadavky A“ patří také doložit výpočetní postup a parametry, které byly použity pro výpočty od naměřených dat po výsledná výstupní informace od dodavatele měření laserového skenování. Tzn. matematicky doložitelná výpočetní cesta (transformační matice, posuny, rotace, atd).

3.2.4. Rychlost dodání výstupních informací

Rychlost dodání výstupních informací a jejich aktivní využití při kontrole stavebních prací s možností kontroly přímo v terénu, je základním kritériem efektivního využívání informací. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby zadavatel měl výstupní informace k dispozici v době přebírání konstrukčních vrstev (lze požadovat i předání do 24 hodin).

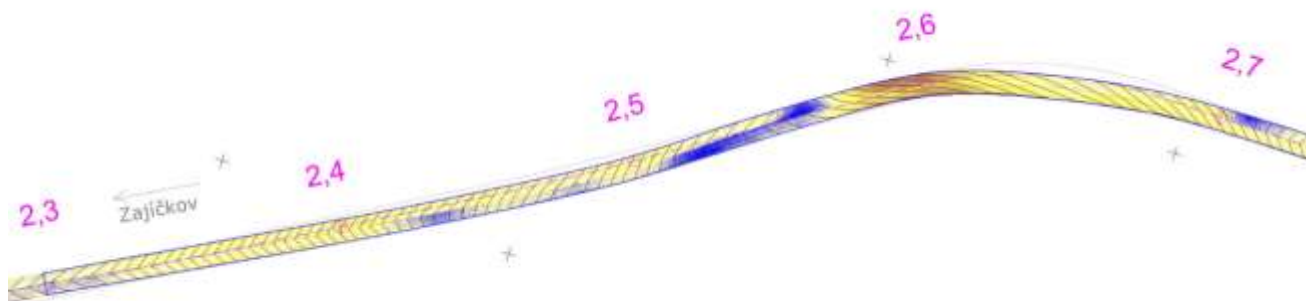
3.2.5. Požadované výstupy

Modely reality – (matematický model reality nebo také digitální model terénu) je základní a hlavní výstup z měření laserovým skenováním povrchů objektů představuje digitální reprezentaci průběhu skutečné topografické plochy terénu na základě měřených dat. Reliéf terénu je v tomto případě bez jakéhokoliv pokryvu (stromy, budovy, auta apod.) s požadovanou hustotou bodů 20cm x 20cm, s požadovanou přesností a v potřebném rozsahu. Model reality je v CAD formátu (dwg, dgn, dxf), PDF.



Obrázek 33. Digitální model reality – standartní zobrazení pomocí vrstevnic jsou viditelné příčné sklony a změny klopení

Výkres odtokových poměrů - analýza je vytvořena metodou zvýraznění ploch se sklonem menším než 1% a 2%, na těchto plochách je zvýšené riziko tvoření souvislé vodní plochy a případně náledí. Výstup v PDF formátu.



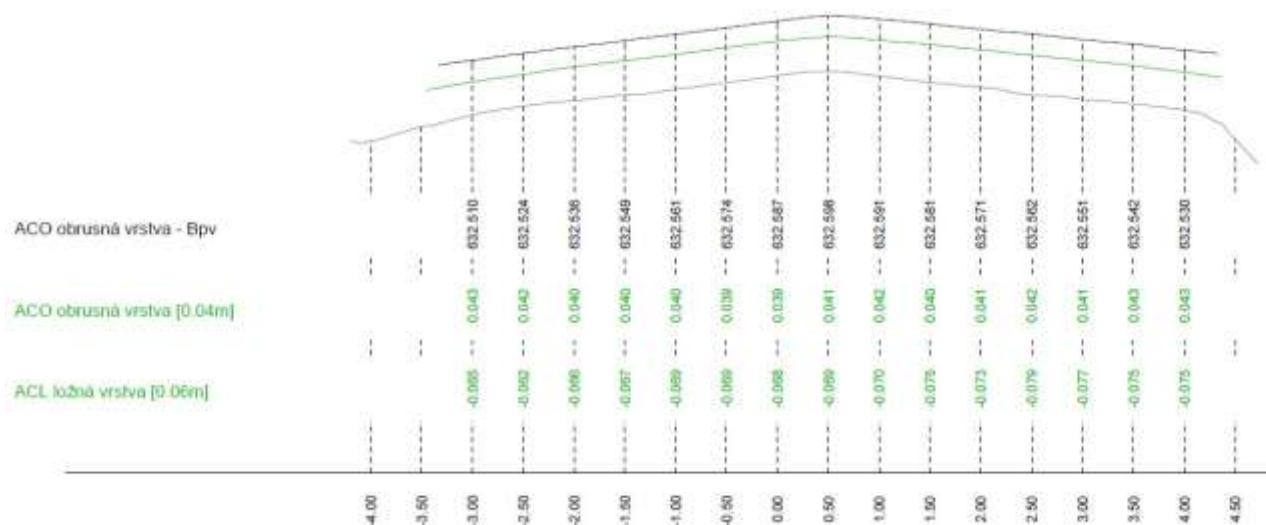
Obrázek 34. Výkres odtokových poměrů – modře jsou označeny místa s malým nebo nulovým sklonem

Rozdílové modely - na základě výsledných modelů reality lze vytvářet rozdílové modely mezi etapami s barevným vyznačením jednotlivých tloušťek. Výstup v PDF formátu.



Obrázek 35. Rozdílový model – červeně jsou označeny místa, kde projektovaná tloušťka není dodržena o více jak 20%

Příčné řezy s vyznačením rozdílů geometrických parametrů mezi jednotlivými vrstvami např. po 5 metrech. Výstup v PDF formátu.



Příčné řezy – vygenerované po 5m, na řezu kóta každých 50cm

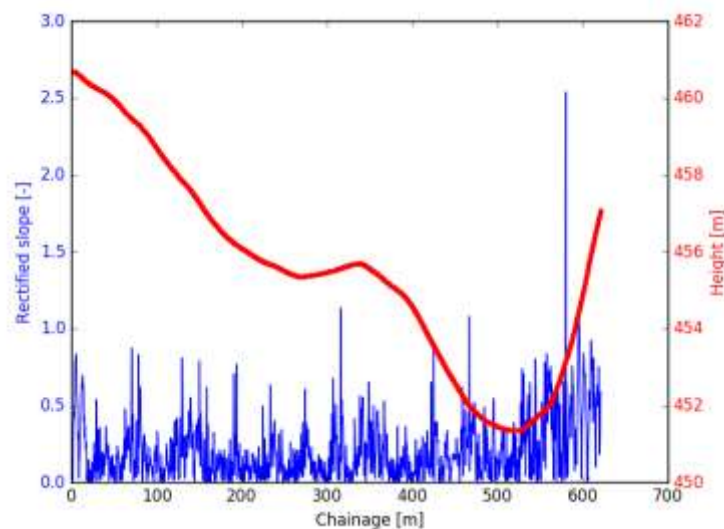
Technická zpráva

- Kontrola kvality dat a ověřitelnost výstupních informací
- Výkaz výměr - na základě modelů reality jednotlivých konstrukčních vrstev lze provést výpočet objemů, ploch, délek a tloušťek pro vybrané položky výkazu výměr.

etapy	materiál	popis	plocha výpočtu [m2]	teoretická tloušťka [m]	teoretický objem [m3]	skutečný objem [m3]	objemový rozdíl [m3]	objemový rozdíl [%]	průměrná tloušťka [m]	průměrná šířka vozovky [m]
2. - 1. etapa	ložná vrstva 1. pol. st.2,3km-3,2km	ACL 16S	3 498	0,06	210	246	36	17,2%	0,070	3,89
4. - 3. etapa	ložná vrstva 2. pol. st.2,3km-3,2km	ACL 16S	3 313	0,06	199	244	45	22,7%	0,074	3,68
2. a 4. - 1. a 3. etapa	ložná vrstva celek st.2,3km-3,2km	ACL 16S	6 811	0,06	409	490	81	19,9%	0,072	7,57
5. - 2. a 4. etapa	obrusná vrstva celek st.2,3km-3,2km	ACO 11S	6 712	0,04	268	266	-2	-0,9%	0,040	7,46

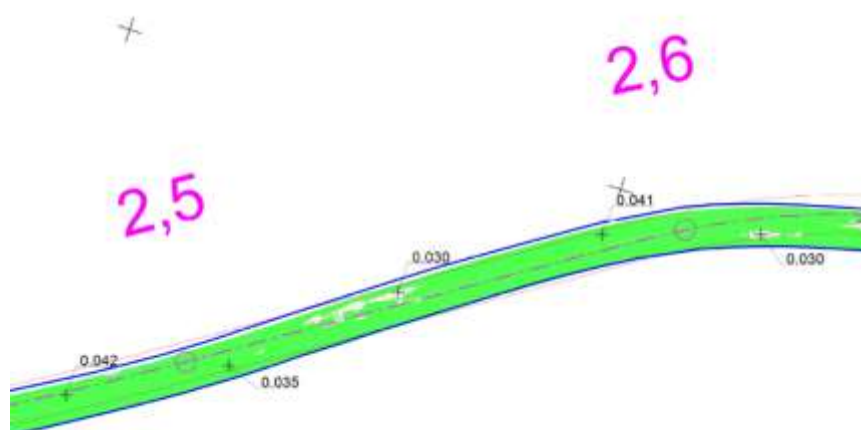
Obrázek 37. Výkaz výměr včetně objemových rozdílů proti teoretické tloušťce tedy více práce/méně práce

- Parametry IRI – na základě modelu reality s požadovanou hustotou a přesností lze provést alternativní výpočet parametru IRI k normě ČSN 73 6175 (Měření a hodnocení nerovností povrchů vozovek, říjen 2009)



Obrázek 38. Parametry IRI (modře) ve vztahu ke staničení a niveletě stavby (červeně)

- Vyznačení extrémních míst – na základě rozdílového modelu ze dvou měření lze identifikovat extrémní místa nedodržení mezní hodnoty tloušťky konstrukční vrstvy



Obrázek 39. Extrémní místa - červeně jsou označeny místa, kde projektovaná tloušťka není dodržena o více jak 20%

3.2.6. Přístupy k výstupním informacím

Výstupní informace lze poskytnout několika způsoby:

- **Online datové úložiště** – jedná se o centrální datové úložiště se všemi požadovanými výstupy (kapitola 2.4), které je stále připojené k internetu. Přístup k úložišti je šifrovaný a uživatel se musí vůči úložišti autorizovat.



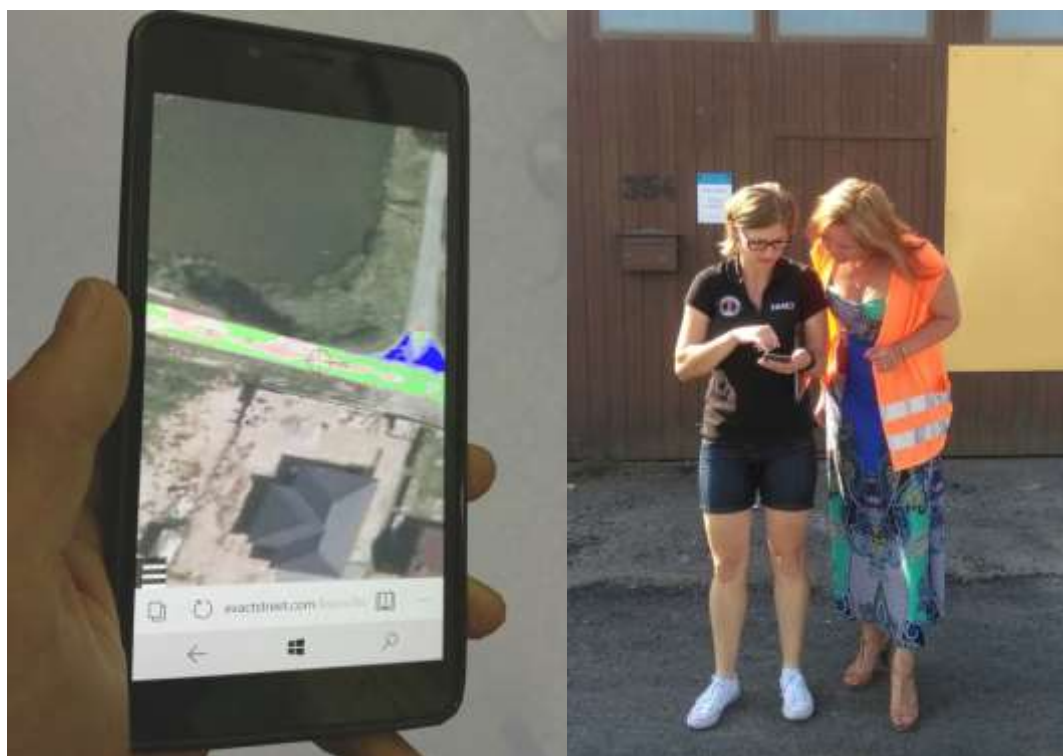
Obrázek 40. Datové úložiště - přístup k uložitě je šifrovaný a jedinečný

- **Online mapová aplikace pro aktivní práce s daty, vlastní výpočty a výstupy** – aplikace umožňuje vizualizaci porovnání původního plánu s naměřenou skutečností s rozlišením míst, kde C, kde došlo k nedodržení mezních odchylek v záporných nebo kladných hodnotách s možností vizualizace řezů v libovolném místě konstrukce a s možností výpočtu kubatur materiálů jednotlivých vrstev.



Obrázek 41. Aplikace pro aktivní práce s daty, výpočty objemů řezy v libovolném místě stavby

- **Offline navigační aplikace pro využívání dat přímo v terénu** - umožňuje načítat mapové podklady z vlastního zdroje, umožňuje spolupracovat s GPS systémem a zobrazovat aktuální souřadnice podle aktuální polohy zobrazuje uživatelské informace (vlastní body na mapě) např. o tloušťce konstrukčních vrstev silnic.



Obrázek 42. Aplikace pro využívání dat přímo v terénu – Technický dozor stavby KSUSV Ing. Monika Vavřínková a zaměstnanec Exact Ing. Martina Hulanová, při identifikaci místa s nedodrženou tloušťkou obrusné vrstvy.

- **Online inventární karta projektu pro zabezpečené ukládání a poskytování dat a certifikace dat** – všechny požadované výstupy (kapitola 2.4) v centrálním datovém uložišti jsou zabezpečena proti jejich poškození nebo ztrátě. Všechny požadované výstupy jsou opatřeny digitálním podpisem ÚOZI a digitálním časovým razítkem.
- **Offline záložní archiv** - záloha dat je proces, při kterém jsou důležitá data zkopírovaná na jiné místo, aby byla v případě potřeby rychle a snadno obnovitelná. Zálohy musí být prováděny tak, aby se předešlo ztrátě nebo poškození dat. Místa, kam se data zálohují, musí být geograficky oddělené. Přenos zálohovaných dat musí být zabezpečený. Zálohy musí být soudržné, neporušené a snadno obnovitelné. Přístup k zálohám mají pouze pověřené osoby. Data k

zálohování jsou majetkem zadavatele. Zhotovitel nemůže data předat třetí osobě a použít za účelem obchodního užití bez jeho písemného svolení.

3.3. Požadavky na model stavby

Model stavby představuje ideální prostorovou digitální reprezentaci vyprojektované plochy stavebního objektu (povrchu), na základě digitálního modelu reality, dodané projektové dokumentace, jádrových vývrtů nebo jiných podkladů o stavu budoucí konstrukční vrstvy stavebního objektu (dále v textu jen „základní požadavky B“).

3.3.1. Model stavby z projektové dokumentace

V případě existence projektové dokumentace pro provedení stavby (PDPS) s výškovým řešením stavby v absolutních výškách se provede převod PDPS do modelu stavby.

3.3.2. Model stavby z procesu re-profilace

Na základě modelu reality („základní požadavky A“), dodané projektové dokumentace (2D výkresy, situace stavby, charakteristické vzorové řezy, apod), jádrových vývrtů nebo jiných podkladů o stavu budoucí konstrukční vrstvy stavebního objektu se vytvoří ideální model stavby s důrazem na:

- Rovinatost vyjádřenou parametrem IRI (International Roughness Index) - mezinárodně uznávaný parametr vyjadřující jízdní kvalitu povrchu komunikace.
- Dodržení mocnosti asfaltových vrstev pro požadavky únosnosti vozovky,
- Odvodnění povrchu pozemní komunikace - model stavby je navržen tak, aby byl zajištěn odvod srážkové vody z povrchu komunikací. Účelem je především zabránit vzniku ploch se stojící vodou ("kaluží") a zabránit namrzání povrchu vozovky. Zajištěním vhodného odvodnění povrchu komunikace se také prodlužuje životnost konstrukce vozovky.
- Podélné a příčné nerovnosti - navrženou re-profilací se zlepšuje stavebně technický stav komunikace.
- Vyřešení výškových návazností na okolí a povrchové znaky (obrubníky, křižovatky, kanály, autobusové zastávky, vjezdy, apod).
- Sklony – při tvorbě modelu stavby jsou vyřešeny sklony v zatáčkách, aby odpovídaly normovým požadavkům a bezpečnému provozu na pozemních komunikacích.

V souhrnu lze zmínit, že navržený model stavby má nesrovnatelně vyšší kvalitativní parametry, ve srovnání s provedením rekonstrukce bez optimalizace výškového řešení a re-profilace příčných

sklonů. Umožňuje taktéž zajištění normových požadavků na výsledné stavební dílo dle platných TP, TKP, CSN, CSN EN a souvisejících předpisů.

S výhodou lze pak použít model stavby pro řízené stavební stroje a docílit tak snížení podélných nerovností.

3.4. Proces využití dat na stavbě – kontrola kvality stavebních prací

Popsány jsou především základní kroky ve fázi přípravy a zadání prací, realizace prací, shromažďování podkladů z měření, přejímání výsledků měření laserového skenování, vyhodnocování výsledků, rozhodování na základě získaných výsledků měření a archivace všech výsledků. Výstupní informace slouží pro závěrečnou zprávu zadavatele, která je podkladem pro přejímky stavby tak, aby se maximalizovala využitelnost dat laserového skenování pro kontrolu kvality stavebních prací.

3.4.1. Výběr staveb pro kontrolu kvality stavebních prací

Měření laserového skenování je výhodné použít všude, kde se pokládají nové konstrukční vrstvy na velké ploše o relativně malé mocnosti, tedy tam kde nedodržená tloušťka pokládky může znamenat značné snížení životnosti, nedodržení výkazu výměr a bezpečnostní rizika. Pro vyhodnocení dat o konstrukční vrstvě je nezbytné provést zaměření před pokládkou a po pokládce vrstvy. Vhodné vrstvy pro měření laserového skenování jsou:

- Obrusná vrstva
- Ložná vrstva
- Podkladní vrstva
- Obalové kamenivo
- Mechanicky zpevněné kamenivo
- Štěrkodrt'

Příklad: Nedodržení 50 mm tloušťky konstrukční vrstvy o 10 mm znamená, že na stavbě chybí cca 20 procent materiálu. Tedy na stavbě o ploše 10 000m² chybí 100m³ materiálu tedy cca 300 000 Kč při ceně 3000 Kč/m³.

3.4.2. Výběr dodavatele měření laserového skenování

Vhodný dodavatel měření laserového skenování musí prokázat zkušenosti realizování tvorby modelu reality s minimálně těmito požadavky pro kontrolu kvality stavebních prací („základní požadavky A“):

- Přesnost měření – kontrola kvality dat s maximální výškovou směrodatnou odchylkou $\sigma_Z = 3$ mm vzhledem k bodovému poli stavby, včetně nezávislé kontroly certifikovanými laboratorními vývrty.
- Hustota měření - minimální hustotou 2000 bodů / m² (tedy použití laserového skeneru).

- Ověřitelnost měření – měření laserovým skenerem s minimální vzdáleností na 100m, z důvodu zmapování blízkého okolí pro ověřitelnost dat na místech, které nejsou ovlivněny stavbou.

Rychlost dodání - data k dispozici v době přebírání konstrukčních vrstev (lze požadovat i předání do 24 hodin).

- Výstupní informace
 - tištěná forma - Úředně ověřenou technickou zprávu podle zákona č.200/1994 Sb. o zeměměřictví, § 13, odst. (1), písm. c).
 - online datové úložiště s aplikací pro aktivní práci s daty
 - offline navigační aplikace pro práci s daty v terénu

3.4.3. Koordinace měření

Při provádění kontrol stavebních prací v terénu je nezbytná koordinace prací – cyklus zodpovědností:

- **Zadavatel** (investor) informuje zhotovitele stavby o provánění kontrolního měření laserovým skenováním a na kterých vrstvách se bude měření laserového skenování provádět. Dále mu uloží povinnost spolupracovat a informovat dodavatele měření (termín, úsek, konstrukční vrstva, stavební objekt, apod).
- **Zhotovitel** stavby informuje dodavatele měření laserového skenování o průběhu stavebních prací - minimálně 2 dny předem o ukončení konstrukční vrstvy a její připravenosti k měření. Zhotovitel musí umožnit přístup na stavbu dodavateli měření a musí mu poskytnout čas a prostor nezbytný k provedení měření.
- **Dodavatel** měření laserového skenování provede zaměření konstrukční vrstvy v požadovaném rozsahu, kvalitě a data předá zadavateli v termínu podle jeho potřeb pro přebírání konstrukčních vrstev (lze požadovat i předání dat do 24 hodin v offline navigační aplikaci).



Obrázek 43. Offline navigační aplikace – Zobrazení aktuální polohy přímo na datech kontroly kvality v mobilním zařízení.

3.4.4. Limitující parametry měření

Provádění měření může být ovlivněno vlivy, ke kterým je nezbytné přihlédnout při plánování měření:

- Stavební stroje, uskladněný materiál a podobně – pokud terén je zastíněn umělými objekty, při měření je nezbytné minimalizovat počet těchto objektů vhodným postupem a organizací práce. Při čištění dat měření musí být odstraněny měřené body objektů, které nejsou předmětem měření.
- Sníh, led na povrchu – pokud je terén zastíněn souvislou vrstvou ledu nebo sněhu ovlivňující vystižení reliéfu objektu, měření se neprovádí a stanoví se nejbližší vhodný termín nebo na základě rozhodnutí zadavatele bude měření provedeno klasickou geodetickou metodou tachymetricky.
- Voda na povrchu – pokud je terén pokrytý vodou, tak se měření provádí v případě, že je možné dodržet požadovanou hustotu měření (nezpevněný povrch minimálně 25 bodů na 1 m², zpevněný povrch minimálně 2000 bodů na 1 m²). V případě, že se měření neprovádí, stanoví se

nejbližší vhodný termín nebo na základě rozhodnutí zadavatele bude měření provedeno klasickou geodetickou metodou tachymetricky.

3.4.5. Vyhodnocení dat

Zadavatel využívá výstupní informace k přijetí / nepřijetí jednotlivých konstrukčních vrstev, z výstupních informací může mimo jiné kontrolovat:

- Dodržení tloušťky položené konstrukční vrstvy v mezních hodnotách
 - Rozdílové modely
 - Konstrukční řezy
 - Histogram tloušťek
 - Lokalizace míst s extrémní tloušťkou – podklad pro jádrové vývrty
- Dodržení sklonů položené konstrukční vrstvy v mezních hodnotách
 - Konstrukční řezy
 - Odtokové poměry
- Výkaz výměr
 - kontrola množství odfrézovaného materiálu méně/více práce
 - kontrola množství položeného materiálu méně/více práce
 - kontrola plochy položeného materiálu méně/více práce
- Statistické údaje
 - Parametry IRI
 - Kvalita měření

Kontrola kvality stavebních prací jako podklad pro kontrolní dny je vhodnou metodou zpětnou vazební regulace pro kontrolu kvality staveb a zabraňuje vadám staveb.

3.5. Proces využití dat na stavbě – re-profilace silnic

Popsány jsou především základní kroky ve fázi přípravy a zadání prací, realizace prací a přejímání výsledků procesu reprofilace silnic v podobě modelu stavby.

3.5.1. Výběr staveb pro re-profilaci silnic

Re-profilaci je výhodné použít na rekonstrukci, kde se provádí odstranění původních vrstev (frézování, recyklace, apod.) a pokládka nových konstrukčních vrstev. Řízenou opravou podle modelu se zlepšují tyto parametry:

- Normové parametry (příčné a podélné sklony)
- Kvalitativní parametry (IRI)
- Bezpečnostní parametry (Odvodnění komunikace)
- Návaznosti na okolí a povrchové znaky (obrubníky, křižovatky, kanály, vjezdy, apod)
- Úspora materiálu
- Úspora času – zkrácení doby výstavby

Nejprve se provede zaměření stávajícího povrchu metodou laserového skenování a vytvoří se model reality povrchu. Na základě modelu reality, projektové dokumentace, jádrových vývrtů se provede návrh ideálního modelu stavby finálního povrchu, případně i vrstvy frézování, recyklace, pláň, štěrkodrtí, atd.)

3.5.2. Výběr dodavatele modelu stavby

Vhodný dodavatel modelu stavby musí prokázat zkušenosti realizování modelu stavby s minimálně těmito požadavky („základní požadavky B“):

- Model stavby vytvořený na základě modelu reality s důrazem na přesnost a hustotu bodů („základní požadavky A“)
- Zlepšení parametru IRI
- Odvodnění celé plochy modelu stavby na stávající odvodňovací systém (příkopy, kanalizace, apod) v případě potřeby návrh doplnění systému odvodnění
- Zlepšení podélných a příčných nerovností na normové parametry v rámci možnosti reprofilace

3.5.3. Implementace modelu stavby

Tvorba modelu stavby je časově náročný proces, do kterého vstupuje mnoho faktorů jako digitální model reality, projektové dokumentace, hodnoty jádrových vývrtů a jiné podklady a proto i výsledný model stavby může být různě nastavený. Z těchto důvodů je žádoucí, aby tvorbu (objednávku) modelu stavby prováděl zadavatel (investor) nikoli zhotovitel.

- Zadavatel (investor) – objednává tvorbu modelu stavby s požadavky na výsledný model („základní požadavky B“) u dodavatele měření laserového skenování
- Dodavatel modelu stavby – na základě požadavků vytvoří model stavby, který certifikovaný předá zadavateli na zabezpečeném úložišti dat
- Zhotovitel stavby – je povinen provést realizaci stavby na základě modelu stavby

3.5.4. Využití modelu stavby

Zhotovitel využívá model stavby k přesnému frézování a k přesnému položení (urovnání) konstrukční vrstvy. Nejčastější způsob navigace stavebních strojů podle modelu stavby jsou:

- Dálkové řízení strojů
- Sprejování potřebných hodnot na vozovku v potřebné hustotě a přesnosti
- Zobrazení potřebných hodnot na displeji mobilního zařízení
- Lankodráha

4 Závěr

Cíle projektu byly, dle názoru realizátorů projektu, splněny a všechny zmíněné technologie a technologické postupy byly aplikovány v praxi v rámci kontrolingu na vybraných projektech KSÚS Vysočina v roce 2016. Na základě praktických výsledků a zkušeností z realizace v rámci etapy A tohoto projektu byla vypracována metodika a doporučení pro účely KSÚS Vysočina.

Byly aplikovány oba přístupy k řešení kontrolních činností v rámci realizace stavebních projektů oprav a rekonstrukcí silnic:

- Využití technologie **georadaru** v kombinaci s 2D laserem a akcelerometrem (více viz kapitola 2);
- Využití **3D laserového skeneru** a tabletu se zobrazováním geometrické statistiky s polohou GPS pro potřeby kontrol stavu komunikací po pokládce nových konstrukčních vrstev (více viz kapitola 3).

Na základě praktických zkušeností z realizace v rámci etapy A projektu, lze konstatovat následující srovnání a doporučení pro správce silnic II. a III. tříd:

- Technologie georadaru (v kombinaci s 2D laserem a akcelerometrem) je vhodná jako kontrolní nástroj plošného charakteru, tedy je vhodná pro plošný kontroling všech realizovaných oprav a rekonstrukcí (popř. i nové výstavby) v rámci daného období, tj. většinou kalendářní rok. Důvodem je zejména nižší náročnost na podmínky pro realizaci měření (provede se po dokončení stavby) a také relativně nižší finanční náročnost ve srovnání s druhým přístupem.
- Technologie 3D laserového skeneru je výhodné použít všude, kde se pokládají nové konstrukční vrstvy na velké ploše o relativně malé mocnosti, tedy tam kde nedodržená tloušťka pokládky může znamenat značné snížení životnosti, nedodržení výkazu výměr a bezpečnostní rizika. Oproti prvnímu přístupu přináší detailnější a přesnější informace pro technické dozory stavby, ovšem na druhou stranu se jedná o metodu náročnější finančně a na koordinaci postupů se stavbou.

Realizační tým projektu by, na základě těchto závěrů, doporučil KSÚS Vysočina, aby v rámci aktivit technického dozoru a kontrolingu svých stavebních projektů využívala výsledků tohoto projektu a implementovala doporučení vyplývající z tohoto projektu do svých procesů a postupů.

V Praze dne.....

Podpis:

Zpracovali:

Ing. Lukáš Vodehnal

Ing. Ján Filipovský, PhD.; Ing. Michaela Sekaninová; Ing. Lukáš Kutil; Ing. Marek Přikryl, PhD.

5 Použitá literatura

Al-Qadi, I., Lahouar, S., and Loulizi, A. 2003. Successful Application of GPR for Quality Assurance/Quality Control of New Pavements. Transportation Research Board Paper 03-3512, 21 p.

Ground Penetrating Radar, 1992. Geophysical Survey Methods, The Finnish Geotechnical Society and The Finnish Building Centre Ltd. Finland 64 p.

Pälli, A. Aho, S. and Pesonen, E., 2005. Ground Penetrating Radar as a Quality Assurance Method for Paved and Gravel Roads in Finland, Proceedings of the 3rd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Eds. S. Lambot and A. G. Gorriti, May 2-3, 2005, Delft, The Netherlands.

Roimela, P. 1998. Ground Penetrating Radar Surveys in Pavement Quality Control 1996-1997. Tielaitoksen selvityksiä 4/1998. Rovaniemi, Finland (English abstract), 55 p.

Saarenketo, T. 1997. Using Ground Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control. Transportation Research Record 1997, pp. 34-41.

Saarenketo, T. and Roimela, P. 1998. Ground Penetrating Radar Technique in Asphalt Pavement Density Quality Control. Proceedings of the Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar, May 27-30, 1998, Lawrence Kansas. Volume 2, pp. 461-466

Saarenketo, T. 2008. NDT Transportation. Chapter 13 in text book "Ground Penetrating Radar: Theory and Applications" Ed- Harry M. Jol. Publisher Elsevier, 524 p.

Sebesta, S. and Scullion, T. 2002. Application of Infrared Imaging and Ground Penetrating Radar for Detecting Segregation in Hot-Mix Asphalt Overlays. Transportation Research Board Paper, 15 p.

Nedvěd, J. 2011. Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací. Technické podmínky TP-233. Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací a územního plánu.

Vosselman, G. And Maas, H. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning, Whittles Publishing, Scotland, UK

Štroner, M., Pospíšil, J., Koska, B., Křemen, T., Urban, R., Smítka, V., Třasák, P., 2013 3D skenovací systémy, Fakulta stavební ČVUT v Praze

3D měření technologií laserového skenování, Švédsko - silnice 41 (Väg41) – Bergham - Gullberg. Ročník 2011, Sborník KONFERENCE ASFALTOVÉ VOZOVKY 2011.

Zaměření dálničního mostu technologií laserového skenování a využití 3D dat pro projekt rekonstrukce mostu. Ročník 2013, Sborník 18. Mezinárodní symposium mosty 2013.

Přínos využití 3D přístupu při realizaci rekonstrukce silnice I/2 průtah Říčany u Prahy. Ročník 2013, Sborník KONFERENCE ASFALTOVÉ VOZOVKY 2013.

Zaměření a zpracování 3D dat pro re-profilaci komunikace. Ročník 2015, Sborník KONFERENCE ASFALTOVÉ VOZOVKY 2015.

6 PŘÍLOHA

6.1. Technologie georadaru

6.2. Technologie 3D laserového skeneru

- Stavba II/390 Budišov – průtah

Budisov_dmt_160803_odtokove_pomery.pdf

Budisov_dmt_160803_puvodni.pdf

Budisov_dmt_160803_puvodni_stav.dwg

Budisov_dmt_160826_frezovani.dwg

Budisov_dmt_160826_frezovani.pdf

Budisov_dmt_160831_odtokove_pomery.pdf

Budisov_dmt_160831_vyrovnacni_vrstva.dwg

Budisov_dmt_160901_vyrovnacni_vrstva.pdf

Budisov_dmt_160907_obrusna_vrstva_ACO.dwg

Budisov_dmt_160907_obrusna_vrstva_ACO.pdf

Budisov_dmt_160907_odtokove_pomery.pdf

Budisov_pricne_rezy_160803.pdf

Budisov_rdmt_160826_frezovani_X_160803_puvodni.pdf

Budisov_rdmt_160831_vyrovnacni_X_160826_frezovani.pdf

Budisov_rdmt_160907_ACO_X_160831_vyrovnacni.pdf

Budisov_TZ_160803_MH1.pdf

Budisov_Ekonomické_zhodnocení_161117_LK1.pdf

- II/112 hr. kraje – Horní Cerekev, I. Etapa – Zajíčkov

Zajickov_dmt_160922_Frezovani_1.dwg

Zajickov_dmt_160922_Frezovani_1.pdf

Zajickov_dmt_160922_Frezovani_1_odtokove.pdf

Zajickov_dmt_160926_Lozna_vrstva_1.dwg

Zajickov_dmt_160926_Lozna_vrstva_1.pdf

Zajickov_dmt_160926_Lozna_vrstva_1_odtokove.pdf

Zajickov_dmt_161005_Frezovani_2.dwg

Zajickov_dmt_161005_Frezovani_2.pdf
Zajickov_dmt_161005_Frezovani_2_odtokove.pdf
Zajickov_dmt_161007_Lozna_vrstva_2.dwg
Zajickov_dmt_161007_Lozna_vrstva_2.pdf
Zajickov_dmt_161007_Lozna_vrstva_2_odtokove.pdf
Zajickov_dmt_161010_Obrusna_vrstva.dwg
Zajickov_dmt_161010_Obrusna_vrstva.pdf
Zajickov_dmt_161010_Obrusna_vrstva_odtokove.pdf
Zajickov_pricne_rezy_161011.pdf
Zajickov_rdmr_Frezovani_1_X_Lozna_1.pdf
Zajickov_rdmr_Frezovani_2_X_Lozna_2.pdf
Zajickov_rdmr_Lozna_X_Obrus.pdf
Zajickov_TZ_161011_MH1.pdf
Zajickov_Ekonomické_zhodnocení_161117_LK1