

TITSMD006 - Diagnostika a hodnocení kvality kolejového lože pomocí georadaru

**Metodika pro hodnocení stupně znečištění kolejového
lože na základě časosběrného skenování georadarem**



Tento projekt je financován se státní podporou
Technologické agentury ČR
v rámci programu BETA2

www.tacr.cz
Výzkum užitečný pro společnost

Objednatel: Technologická agentura ČR

Zhotovitelé:

G IMPULS Praha spol. s r.o.

J. Nerudy 232

252 61 Jeneč

IČO: 48948624

RNDr. Vojtěch Beneš.....
Odborná způsobilost projektovat, provádět a vyhodnocovat geologické práce (geofyzika). Vydalo MŽP pod. čj.1601/2002.

Mgr. Tomáš Belov.....
Odborná způsobilost projektovat, provádět a vyhodnocovat geologické práce (geofyzika). Vydalo MŽP pod. čj.2377/2018.

Mgr. Jaroslav Jirků, Ph.D.
Odborná způsobilost projektovat, provádět a vyhodnocovat geologické práce (geofyzika). Vydalo MŽP pod. čj.2197/2013.

ČVUT v Praze

Fakulta stavební

Thákurova 7 /2077

166 29 Praha 6 - Dejvice

Ing. Leoš Horníček, Ph.D.

Obsah

1. Cíle metodiky	4
2. Základní pojmy, použité zkratky, přehled tabulek a obrázků	4
3. Kolejové lože a jeho znečištění	6
3.1 Kolejové lože a jeho vlastnosti	6
3.2 Znečištění kolejového lože.....	7
4. Geologický radar (GPR) jako nástroj monitoringu znečištění kolejového lože	8
4.1 Princip radarové metody.....	8
4.2 GPR aparatura pro skenování KL	10
4.3 Nastavení aparatury pro skenování KL.....	10
5. Provedení GPR měření pro stanovení znečištění KL.....	11
5.1 Podmínky pro provedení měření.....	11
5.2 Časově náročný způsob měření	12
6. Interpretace GPR záznamů	13
6.1 Úpravy GPR záznamů	13
6.2 Výpočet interpretačních parametrů s použitím programu RADARGRAM.....	13
6.3 Nastavení programu RADARGRAM pro výpočet interpretačních parametrů.....	15
6.4 Potlačení rušivých vlivů – základní filtrace vypočtených interpretačních parametrů.....	16
6.5 Potlačení vlivu klimatických podmínek v době měření.....	17
6.6 Výpočet reprezentativních hodnot interpretačních parametrů pro úsek tratě délky 20, 200 a 2000 m	18
6.7 Ukládání GPR záznamů a výsledků interpretace do IS PSST	18
7. Stanovení stupně znečištění kolejového lože	18
7.1 Vztah interpretačních parametrů a znečištění KL	18
7.2 Limitní hodnoty interpretačních parametrů pro stupně znečištění KL.....	20
7.3 Ukládání vypočtených hodnot stupně znečištění kolejového lože do IS PSST.....	21
8. Hodnocení vývoje znečištění kolejového lože na základě opakovaných měření.....	21
8.1 Nastavení programu RADARGRAM pro výpočet rozdílových dzt souborů.....	21
8.2 Zásady interpretace rozdílových dzt souborů.....	22
9. Začlenění hodnocení stupně znečištění kolejového lože podle interpretace GPR do systému údržby železničních tratí.....	23
10. Srovnání metodiky s podobným řešením v zahraničí.....	23
11. Popis uplatnění metodiky	24
12. Očekávané ekonomické aspekty metodiky.....	24
13. Literatura, publikace	25

1. Cíle metodiky

Cílem metodiky je stanovení postupu pro hodnocení stupně znečištění kolejového lože na základě jednorázových i opakovaných měření pomocí geologického radaru. Metodika vznikla na základě požadavku Správy železnic, s.o., při řešení projektu TAČR BETA2 TITSMD006. Metodika úzce navazuje na další výstupy projektu, a to na ověřenou technologii „Návrh měřicího systému a ověření technologie založené na georadarovém skenování kolejového lože a stanovení jeho znečištění ve stupních navazujících na jeho technologii údržby a opravy“ a na software pro dávkové ukládání dat z měření stupně znečištění kolejového lože georadarovým skenováním a jejich úsekové a časového hodnocení.

Metodika vychází z dosavadní praxe použití geologického radaru v rámci Správy železnic, s.o., s tím, že významně rozšiřuje možnosti využití naměřených dat pro optimalizaci údržby kolejového lože. Geologický radar je umístěn na speciálním měřicím voze pro hodnocení parametrů železničního spodku. Předpokládaná rychlost měřicího vozu při měření je do 80 km/h. Výstupem metodiky je stanovení limitů pro kategorizaci míry znečištění kolejového lože do 4 stupňů závažnosti a doporučení následných opatření při údržbě kolejového lože.

Klíčová slova: kolejové lože, geologický radar, měřicí vůz, stupeň znečištění kolejového lože

2. Základní pojmy, použité zkratky, přehled tabulek a obrázků

Základní pojmy

Kolejové lože – je částí konstrukce železničního svršku. Nachází se na pláni tělesa železničního spodku, přenáší silové účinky železničního provozu z kolejnicových podpor na pláň tělesa železničního spodku. Kolejové lože slouží ke zpružnění konstrukce železničního svršku a tím k tlumení dynamických účinků železničního provozu. Podílí se na zajištění dostatečného odporu proti příčnému a podélnému posunu kolejového roštu.

Znečištění kolejového lože – výskyt nežádoucích příměsí v kolejovém loži, které je ideálně tvořeno kamenivem frakce 31,5/63 mm. Nejčastěji se jedná o zvýšený podíl jemnozrnné frakce pod 22,4 mm.

Geologický radar – elektromagnetická geofyzikální metoda, která využívá průniku a odrazu elektromagnetického vlnění zkoumaným (geologickým) prostředím. Lze tak zjistit průběh jednotlivých vrstev (geologických, stavebních) a výskyt lokálních nehomogenit (např. inženýrských sítí, dutin).

Radarový scan – záznam průběhu jednotlivého elektromagnetického pulsu po průniku a odrazu ze zkoumaného prostředí.

Radarový záznam – průběh registrovaného elektromagnetického signálu podél měřeného profilu. Skládá se z jednotlivých radarových scanů.

Interpretační parametr (metrika) – číselná hodnota vypočtená podle definovaného vzorce z vybrané části radarového scanu. Charakterizuje průběh scanu z hlediska amplitudového nebo frekvenčního. Hodnota interpretačního parametru (metriky) je závislá na složení kolejového lože, mimo jiné na obsahu jemnozrnné frakce.

Stupeň znečištění kolejového lože – výsledek interpretace radarového signálu. Nabývá hodnot 1 (čisté kamenivo) až 4 (silně znečištěné kamenivo) a je stanoveno na základě limitních hodnot vybraných interpretačních parametrů (metrik).

Použité zkratky

asc: formát interpretovaných dat

ATTr: metrika radarového signálu - (relative) attenuation

CRS: metrika radarového signálu - crossings

ČHMÚ: Český hydrometeorologický ústav

dmsql: formát databázového souboru systému PSST, který obsahuje údaje o pozici měření a měřené hodnoty

dzt: formát radarových dat

EM: elektromagnetický (signál, pole)

FSA: metrika radarového signálu - frequency scan area

GPR: geologický radar (Ground-penetrating radar)

GPS: globální polohový systém (Global positioning system)

hm: traťová metráž vyjádřená v hektometrech

IS PSST: Informační systém Provozní stav sítě tratí

KL: kolejové lože

MV: měřicí vůz

OTP: obecné technické podmínky

PGPK: prostorová a geometrická poloha koleje

PKS: metrika radarového signálu – peaks

RADARGRAM: výstup projektu TAČR TITSMD006 - software pro dávkové ukládání dat z měření stupně znečištění kolejového lože georadarovým skenováním a jejich úsekové a časové hodnocení.

RH: relativní vlhkost (relative humidity)

Rx: přijímač elektromagnetického signálu (Receiver)

STZN: stupeň znečištění dle GPR

SŽ: Správa železnic, státní organizace

SŽDC: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace (nyní SŽ)

Tx: vysílač elektromagnetického signálu (Transmitter)

TSA: metrika radarového signálu - time scan area

Ztech: výstup projektu TAČR TITSMD006 s názvem „Návrh měřicího systému a ověření technologie založené na georadarovém skenování kolejového lože a stanovení jeho znečištění ve stupních navazujících na jeho technologii údržby a opravy“.

Přehled tabulek a obrázků

Tab. 1 Orientační hodnoty relativní permitivity, vodivosti a rychlosti EM signálu pro vybrané materiály.

Obr. 1 Ukázka GPR záznamu v programu RADARGRAM s typickým scanem a parametry nastavení pro výpočet metrik.

Obr. 2 Ukázka průběhu parametrů EM signálu nad pražci.

Obr. 3 Korelace metriky ATTr a podsítného 22,4 mm (%) pro vzorky odebrané na testovacích úsecích in-situ pro 3., 4. a 5. etapu měření (data bez opravy na vlhkost RH).

3. Kolejové lože a jeho znečištění

3.1 Kolejové lože a jeho vlastnosti

Kolejové lože je částí konstrukce železničního svršku, která se nachází na pláni tělesa železničního spodku, přenáší silové účinky železničního provozu z kolejnicových podpor na plášť tělesa železničního spodku, slouží ke zpružnění konstrukce železničního svršku, a tím k tlumení dynamických účinků železničního provozu a podílí se na zajištění dostatečného odporu proti příčnému a podélnému posunu kolejového roštu. Aby kolejové lože splnilo stanovené požadavky, musí být použito kvalitního materiálu, musí být řádně zřízeno, kamenivo musí splňovat požadavky na pevnost a odolnost proti mrazu a otluku, musí mít správné zrnitostní složení a vhodný tvar zrn.

Minimální tloušťka kolejového lože pod ložnou (spodní) plochou pražce je závislá na kategorii dráhy, umístění koleje (traťová, staniční) a materiálu pražců. U celostátní dráhy a regionálních drah v traťových a staničních hlavních a předjízdových kolejích s betonovými pražci je stanovena min. tloušťka 350 mm a v případě dřevěných pražců 300 mm.

Materiál kolejového lože musí při zřizování splňovat řadu podmínek (1-3), mezi nejdůležitější patří:

- musí mít takové vlastnosti, aby po dobu předpokládané životnosti stavby byla při běžné údržbě zaručena zejména mechanická pevnost a stabilita stavby, ochrana zdraví a životního prostředí a ochrana proti hluku,

- smí být použito přírodní kamenivo nové nebo recyklované, a to drcené, o objemové hmotnosti min. 2 000 kg/m³, frakce 31,5/63,
- musí odpovídat křivkám zrnitosti v rámci dané kategorie zrnitosti a třídy kameniva, přičemž se sledují propady v procentech hmotnosti na sítích o velikosti 22,4; 31,5; 40; 50; 63 a 80 mm,
- kamenivo musí obsahovat pouze materiálově a tvarově vhodná zrna,
- kamenivo nesmí překračovat limity výskytu škodlivých látek.

3.2 Znečištění kolejového lože

Znečištění kolejového lože může být souvislé či lokální. Souvislé znečištění má mechanický (fyzikální) charakter a zahrnuje:

- částice z odrcených zrn,
- spad sypkých hmot z nákladních vozů (např. uhlí, písek, železná ruda),
- zeminu vzlínající ze zemního tělesa,
- naváté jemnozrnné materiály, zbytky vegetace,
- oděrky z opotřebených kol, kolejnic a trakčního vedení,
- chemické látky spadlé z nákladních vozů (např. průmyslová hnojiva),
- emise průmyslových škodlivin.

Lokální znečištění má zejména chemický charakter a zahrnuje:

- zbytky tuhých mazadel,
- zbytky olejů,
- zbytky nafty.

Znečištění kameniva kolejového lože se od okamžiku zřízení postupem času mění (narůstá), a to v závislosti na řadě faktorů, zejména:

- typu kameniva kolejového lože (zejména s ohledem na odolnost kameniva),
- intenzitě železniční dopravy (kumulované statické a dynamické zatížení způsobuje drcení kameniva),
- těsnosti nákladních železničních vozů a charakteru přepravovaného zboží (sypké hmoty, kapaliny),
- konstrukci pražcového podloží (při absenci konstrukční vrstvy může docházet k protlačování jemnozrnné zeminy z podloží do kolejového lože),
- hladině podzemní vody (vysoká a kolísající hladina zintenzivňuje migraci jemnozrnné složky zeminy/kameniva),
- intenzitě a schopnosti větru zanést do kolejového lože znečištění z okolí tratě (prach, zbytky vegetace apod.),
- použití strojní mechanizace pro údržbu tratí (podbýječka, čistička kolejového lože).

Jistý obsah jemnozrnné frakce je samozřejmě i součástí nového šterku, který je přítomen z výroby, případně vlivem manipulace s kamenivem během přepravy. Přítomnost jemnozrnné frakce mění/zhoršuje vlastnosti šterku, zejména smykové parametry a schopnost odvádění vody, v důsledku čehož se zvyšuje vlhkost kolejového lože. To zásadně ovlivňuje životnost kolejového lože a v krajním případě může vést až k vlivu na bezpečnost železničního provozu. Z tohoto důvodu je třeba míru znečištění kolejového lože železničních tratí průběžně sledovat a optimalizovat jeho údržbu.

Standardními metodami pro stanovení znečištění kolejového lože je posouzení založené na vizuálním zhodnocení znečištění kameniva a na výsledcích zkoušek odebraných vzorků kameniva, které musí umožňovat objektivní posouzení stavu celého profilu kolejového lože předmětného úseku (4). Při pochůzce hodnoceného úseku trati se vizuálně určí druh znečištění a vymezí se úseky s patrným nadměrným znečištěním, následně se stanoví místa odběru vzorků a rozsah zkoušek pro posouzení vlastností kameniva. Minimálně je nutno zjistit součinitel znečištění kolejového lože a vlhkost kameniva. Pro zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností se odebírá minimálně 1 vzorek na 1 km tratě. Pro zjišťování možné kontaminace se pořídí směsný vzorek minimálně ze 3 sond na 1 kilometr koleje.

Kolejové lože se doporučuje čistit, když součinitel znečištění m dosahuje hodnoty 25–50 % a vlhkosti w_{\max} nejvýše 5 %. Součinitel znečištění m je procentuální hmotnostní podíl podsítného pod 22,4 mm k celkové hmotnosti vzorku.

4. Geologický radar (GPR) jako nástroj monitoringu znečištění kolejového lože

Geologický radar (GPR) je geofyzikální metoda pro průzkum mělkého horninového prostředí, která patří mezi metody geoelektrické (skupina elektromagnetických metod). Od 80. let minulého století se používá také pro průzkum stavu konstrukčních vrstev železničních tratí (5), (7), (9). Zejména se jednalo o stanovení mocnosti a případných deformací konstrukčních vrstev, o průzkum svahových deformací násypů a o posouzení relativní vlhkosti použitých materiálů a podložních sedimentů. V posledních letech se měření pomocí GPR testuje také jako rychlá a nedestruktivní metoda pro určení míry znečištění kolejového lože (8), (9), viz také (10), (11), (13), (15), (16), (17), (18).

4.1 Princip radarové metody

Geologický radar GPR pracuje jako ostatní radary: vysílá elektromagnetické vlnění do zkoumaného prostředí (do kolejového lože a níže uložených vrstev železničního spodku) a registruje jeho odrazy zpět k radaru. Odraz elektromagnetické vlny nastává v případě, kdy signál dorazí na rozhraní se zvýšeným vlnovým odporem prostředí. Vlnový odpor prostředí je závislý na jeho elektrickém odporu a relativní permitivitě.

Při průchodu elektromagnetické vlny prostředím dochází k jejímu útlumu, ke změně rychlosti jejího šíření a ke změně frekvenčního spektra vlny. Uvedené změny jsou dány především charakterem prostředí. Toho lze využít i pro sledování stupně znečištění KL. Při šíření elektromagnetického signálu prostředím sledujeme především následující fyzikální parametry signálu nebo prostředí:

- relativní permitivita (bezrozměrné číslo, které uvádí poměr rychlosti elektromagnetického signálu ve vakuu a v daném médiu),
- rychlost šíření elektromagnetického signálu,
- vodivost prostředí (měrný odpor),
- útlum elektromagnetického signálu,
- rozptyl elektromagnetického signálu,
- frekvenční spektrum signálu.

V Tab. 1 jsou uvedeny orientační hodnoty vybraných parametrů pro některé přírodní materiály. Vztah sledovaných parametrů ke stupni znečištění KL není triviální. Například je zřejmé, že v případě kameniva v kolejovém loži má největší vliv na hodnotu jeho permitivity vzájemný poměr obsahu vzduchu, vody (vlhkosti), matrice (mateční horniny, ze které je kamenivo vyrobeno) a jemnozrnných částic (obecně znečištění). V tabulce vidíme, že vzduch má hodnotu permitivity $\epsilon=1$, voda $\epsilon=80$, mateční horniny $\epsilon \approx 6$ a jemnozrnné materiály $\epsilon \approx 25$. Pro suché nové kamenivo kolejového lože frakce 31,5/63 lze tedy očekávat permitivitu $\epsilon=2$ až 4. V závislosti na stárnutí a degradaci kameniva, která se projevuje hlavně zvyšováním obsahu jemnozrnné frakce (znečištění), permitivita zvolna roste. Silně znečištěné kamenivo, které má většinou díky vysokému obsahu jemnozrnné frakce i vyšší obsah vázané vlhkosti, dosahuje hodnota permitivity až $\epsilon=20$. Pro monitoring kolejového lože a vývoj jeho znečištění se ukazuje jako nejvhodnější a nejjednodušší použití útlumových charakteristik.

Tab. 1 - Orientační hodnoty relativní permitivity, vodivosti a rychlosti EM signálu pro vybrané materiály.

Materiál	Relativní permitivita (-)	Vodivost (S/m)	Rychlost šíření EM signálu (m/ns)
vzduch	1	0	0,3
sladká voda	80	0,01 až 0,5	0,033
slaná voda	80	1	0,01
suchý písek/šterk	3 až 5	0,002 až 0,02	0,15
mokrý písek/šterk	6 až 20	0,01 až 0,05	0,06
jíl	10 až 30	0,1 až 2	0,06
bahno	15 až 50	0,1 až 2	0,07
břidlice	5 až 10	0,005 až 0,05	0,1
žula	4 až 6	0,0003 až 0,003	0,13
vápenec	3 až 7	0,0002 až 0,002	0,13
beton	4 až 8	0,0003 až 0,002	0,12

Elektromagnetická vlna v daném místě (tzv. scan) je v radarové aparatuře ukládána do souboru, např. ve formátu dzt. Scan udává časový průběh amplitudy signálu ve formě časových vzorků (samplů). Počet samplů a velikost časového okna, ve kterém elektromagnetickou vlnu registrujeme, je předmětem nastavení radarové aparatury (viz kapitola 4.3 a Ztech(19)).

4.2 GPR aparatura pro skenování KL

Použití radaru pro potřeby monitoringu KL má specifika. Hlavním omezujícím faktorem pro použití radaru je výskyt (převážně) železobetonových pražců v kolejišti, které deformují radarový signál. Podobný negativní vliv má i „hmota“ měřicího vozu (MV), který je pro GPR měření používán. Dalším specifikem je požadavek na vysokou rychlost a efektivitu měření. Měření železničních tratí je obecně náročné na organizaci práce (zavedení mimořádné jízdy MV, plán úvratí a zastávek apod.) i finančně (zajištění lokomotivy, náklady na personál MV).

GPR aparatura použitá pro monitoring KL pomocí MV musí z výše uvedených důvodů splňovat následující minimální požadavky:

- počet kanálů: minimálně 4 kanály s možností rozšíření na 8 kanálů,
- počet scanů za sekundu: minimální vysílací frekvence 180 scanů/s pro každý kanál/anténu samostatně, to odpovídá hustotě měření 8 scanů na 1 m při rychlosti pohybu MV do 80 km/h,
- vhodný výběr radarových antén: radarové antény v rozsahu 100 MHz až 1,6 GHz, radarové antény typu HORN v rozsahu 800 MHz až 1,6 GHz.

S ohledem na stav použití GPR technologie v rámci Správy železnic, s.o. (SŽ) byla jako aparatura vhodná pro monitoring KL vybrána radarová aparatura SIR 30 (výrobce GSSI, USA). Popis aparatury je uveden v Ztech (19).

4.3 Nastavení aparatury pro skenování KL

Nastavení aparatury SIR 30 pro monitoring kolejového lože vychází z doporučení výrobce zařízení a z dlouholetých zkušeností autorského kolektivu z měření na železnici. Nastavení aparatury se provádí individuálně pro každý typ antény a její umístění na MV. Přesný popis nastavení a umístění antén je uveden v Ztech (19). Dodržení navrženého nastavení a umístění antén je zásadní pro správnou funkci hodnocení stupně znečištění (STZN) pomocí software RADARGRAM (20). V případě, že dojde ke změně typu antény, jejího nastavení nebo umístění na MV, je třeba provést kalibraci systému na známém testovacím úseku a upravit nastavení programu RADARGRAM (20), viz níže.

5. Provedení GPR měření pro stanovení znečištění KL

GPR měření pro stanovení znečištění KL bude prováděno v souladu s technickými návrhy obsaženými v Ztech (19). **Výpočet STZN je založen na datech pořízených anténou HORN 1 GHz při umístění v podvozku MV v ose koleje, při její příčné orientaci a při nastavení hlavní GPR jednotky a antény dle Ztech (19).** Orientačně lze také použít v současnosti provozované antény 400 MHz (normálový odraz, anténa v podvozku, osa koleje). Je však třeba upravit parametry interpretačního programu RADARGRAM (20), viz níže¹. Výhledově lze předpokládat rozšíření anténního systému na MV také na antény HORN 1 GHz umístěné za hlavy pražců.

Měření GPR pomocí MV bude probíhat dle dosavadní praxe u SŽ, kdy naměřená GPR data (stejně jako další parametry měřené pomocí MV) vstupují do informačního systému PSST. K měřeným dzt souborům (výstup měřených dat z radarové aparatury) je třeba vždy přiřadit následující informace:

- datum měření,
- identifikace (lokalizace) tratě a koleje,
- operátor,
- pozice pomocí GPS a odometru, poznámky o pozici významných bodů tratě (přejezdy, výhybky), které slouží pro postprocessing v rámci PSST na stanovení traťové metráže (hm),
- typ nastavení GPR (pro potřeby interpretace STZN musí být nastavení dle Ztech (19)) včetně použitých antén, kanálu radarové aparatury,
- data z meteočidla (do PSST budou vstupovat jako příloha ve formátu csv) nebo poznámka o klimatických podmínkách při měření.

Uvedené informace musí být archivovány jako primární data (zápisník, xls tabulka) a vstupují také do systému PSST společně s měřenými dzt soubory. Při interpretaci GPR záznamů lze tedy používat informace obsažené v PSST včetně videozáznamu jízdy, fotodokumentace a výsledků dalších měření - např. měření prostorové a geometrické polohy koleje (PGPK).

5.1 Podmínky pro provedení měření

Podmínky pro provádění GPR měření lze rozdělit na dvě oblasti:

- klimatické podmínky,
- technické podmínky.

¹ V rámci řešení projektu TITSMD006 byl vyvinut držák antén pro umístění před nárazníky MV. Signál antén na tomto držáku vykazuje sice menší úroveň šumu, ale v obloucích dochází k jeho ovlivnění změnou geometrie anténa/kolejnice. Navíc použití držáku je provozně náročné (při úvrati je třeba s držákem manipulovat). Proto byla dána přednost uchycení antén v podvozku.

Radarové měření je do jisté míry závislé na klimatických podmínkách. Období vhodné pro provádění GPR měření v České republice je na základě dlouholeté zkušenosti od počátku dubna do konce října. Teplota vzduchu v době měření by se měla pohybovat v rozmezí 0 až 30 °C. Měření se nesmí provádět při teplotách vzduchu pod -10 °C a nad 38°C.

Důležité je také sledovat vývoj dešťových srážek. Měření by mělo být prováděno ideálně za sucha. V měření lze pokračovat při drobné přeháňce s intenzitou do 1 mm/h. Celkový úhrn srážek během dne však nemá přesáhnout 5 mm/den. Pokud nejsou tyto podmínky splněny, měření se přeruší a naměřená data nelze použít pro hodnocení STZN. Při výskytu vydatného deště s celkovým úhrnem nad 10 mm/den je nutné počkat s měřením nejméně 24 hodin od jeho skončení. Systém hodnocení STZN počítá s určitou korekcí měřených dat na kolísání vlhkosti v KL během měření. Využita jsou data o relativní vlhkosti (RH) nad štěrkovým ložem z meteočidla v době měření (viz níže).

Základní technickou podmínkou pro GPR měření pomocí MV je dodržení maximální rychlosti jízdy při měření. V případě plánovaného zapojení 4 až 8 antén je maximální rychlost pohybu MV stanovena na 80 km/h. Při takové rychlosti radar dokáže provádět měření s hustotou 8 scanů na 1 m pro každou anténu. Dále je třeba zachovat navržený systém umístění a upevnění antén. V případě, že např. v rámci rekonstrukce MV bude umístění a upevnění změněno, je třeba celý systém stanovení STZN znovu kalibrovat (např. jízdou po testovacím úseku a nastavení upravených parametrů do programu RADARGRAM). Podobně je třeba postupovat při částečné výměně hardwaru (antén, kabeláže).

5.2 Časoběrný způsob měření

Interpretační software RADARGRAM umožňuje také vytvářet rozdílové radarové záznamy. Jedná se o automatické vytváření nových dzt souborů, které vznikají jako rozdíl dvou radarových záznamů téhož úseku v rozdílných časech. Obvykle se jedná o rozdíl „nového“ a „staršího“ souboru, které byly pořízeny v rámci periodického měření železničních tratí v síti SŽ. Rozdílové záznamy jsou vhodným nástrojem pro rychlé hodnocení změn stavu KL měřených úseků a jsou doplňkem při hodnocení STZN.

Z principu vzniku rozdílových záznamů je zřejmé, že u souborů vstupujících do výpočtu je třeba používat stejný typ antén, jejich umístění, upevnění a především jejich stejné nastavení (měřicí okno, filtrace, zesílení). Jedná se o stejný princip jako u měření pro hodnocení STZN. Doporučujeme používat nastavení antén dle Ztech (19). Podmínky měření by měly být stejné jako při měření pro hodnocení STZN (viz kapitola 5.1).

Program RADARGRAM také umožňuje vzájemný posun jednotlivých dzt souborů v podélném i ve vertikálním směru (tj. ve směru metráže a hloubky). Toho lze využít při srovnání starších radarových záznamů se záznamy současnými, kdy je např. jinak nastavena velikost měřicího okna nebo dochází k posunu odrazu od povrchu štěrkového lože. Vzájemným posunem takto rozdílných datových sad je třeba docílit toho, aby došlo k překryvu identických částí radarogramů. Hodnoceno je pak pouze okno překryvu. Podmínkou je použití antény o stejné nosné frekvenci, stejné vzorkování (např. 512 nebo

1024 samplů a 4 nebo 8 scanů/m) a stejné bitové hloubky (např. 32 bitů na sample). Vzorkování radarogramů lze upravit v obslužném softwaru RADAN GSSI pro aparatury SIR.

6. Interpretace GPR záznamů

Pro hodnocení STZN budou interpretovány dzt soubory stažené ze systému PSST včetně souboru dmsql, který obsahuje délkovou kalibraci dzt souborů na traťovou metráž (hm). Hodnocení STZN, případně konstrukce rozdílových záznamů, bude provedeno ze souborů bez filtrace a optimalizace zesílení, tj. budou použita primární data opravená na traťovou metráž².

6.1 Úpravy GPR záznamů

Naměřené radarové záznamy lze upravovat pro účely jejich interpretace tak, aby hledané jevy nebo parametry byly více zřetelné nebo méně ovlivněné šumem. Obecně lze radarové záznamy upravovat pomocí filtrace, dekonvoluce, migrace a optimalizace zesílení. Popis těchto procedur je stručně uveden v Ztech (19). Úpravy radarových dzt souborů se provádějí pomocí specializovaných programů (např. program RADAN GSSI). Nejčastěji se uvedené úpravy používají při interpretaci konstrukčních vrstev tratě nebo pro vyhledání anomálií pod plání.

6.2 Výpočet interpretačních parametrů s použitím programu RADARGRAM

Hodnocení STZN KL je prováděno na základě interpretačních parametrů (metrik), které jsou pro konkrétní dzt soubor vypočteny pomocí programu RADARGRAM. Výpočet je prováděn automaticky pro každý jednotlivý scan souboru, výsledky výpočtů jsou ukládány do csv souborů, které lze pro potřeby další analýzy (sestrojení grafů, detailní rozbor traťového úseku apod.) z programu RADARGRAM exportovat. Interpretační parametry popisují elektromagnetickou vlnu po průniku KL z hlediska její frekvence a amplitudy. Jedná se o následující parametry:

- Peaks (PKS) – frekvenční charakteristika převzatá dle (8), (12) a (14). Jedná se o počet maxim a minim elektromagnetické vlny ve vymezeném časovém úseku. Výpočet je prováděn tak, že pro každý scan identifikujeme počet změn trendu v řadě rostoucích/klesajících samplů. Registrovány jsou tedy jak skutečná maxima a minima sinusoidálního signálu, tak změny trendu odpovídající disperzi signálu a šumu. V programu RADARGRAM lze nastavit velikost a pozici výpočetního okna a míru „vyhlazení“ signálu pomocí klouzavého průměru. Při nízké

² V případě potřeby interpretace průběhu konstrukčních vrstev lze využít soubory po základní filtraci a optimalizaci zesílení, které je prováděno v rámci PSST. Další možností je použití primárních záznamů a jejich úprava pomocí externích softwarů pro úpravu radarových záznamů (pro radary SIR např. program RADAN GSSI).

úrovni vyhlazení (do hodnoty 5 vzorků) jsou hodnoty Peaks značně ovlivněny disperzí a šumem, při vysoké úrovni vyhlazení (nad 15 vzorků) hodnoty Peaks zhruba odpovídají nosné frekvenci signálu.

- Crossings (CRS) – frekvenční charakteristika převzatá dle (8), (12) a (14). Jedná se o počet průsečíků elektromagnetické vlny s „0“ hodnotou signálu ve vymezeném časovém úseku. Výpočet je prováděn tak, že registrujeme každý přechod v řadě hodnot samplů přes nulovou hodnotu. Hodnota Crossings je ovlivněna především nosnou frekvencí signálu, v menší míře také disperzí a šumem. V programu RADARGRAM lze nastavit velikost a pozici výpočetního okna, míru „vyhlazení“ signálu pomocí klouzavého průměru a posun „0“ hladiny signálu. V programu RADARGRAM si lze zobrazit průběh jednotlivých scanů. Registrované scany mohou mít v některých případech „0“ hladinu posunutou a na vyšších časech je viditelný posun střední = nulové hladiny signálu do záporných nebo kladných hodnot. Tento jev je pravděpodobně způsoben v důsledku použití různého hardwaru (konkrétní anténa, kabel) a teplotních změn při registraci radarové vlny.
- FSA – frekvenční charakteristika. Výpočet je založen na stanovení velikosti plochy frekvenčního spektra signálu.
- TSA – amplitudová charakteristika. Metrika odpovídá ploše signálu vymezené „0“ hladinou a obalovou křivkou amplitud. Výpočet je prováděn ve vymezeném časovém okně jako suma součinů absolutních hodnot amplitud a časového intervalu mezi samplu.
- ATTr – amplitudová charakteristika. Metrika odpovídá útlumu signálu normovanému na časový interval mezi body výpočtu útlumu. Výpočet probíhá pomocí dvou definovaných časových intervalů. Horní (1.) interval je okno, které obsahuje vlnu s odrazem od povrchu štěrku, spodní (2.) interval zahrnuje vlnu z báze štěrku (nebo obecně vlnu ze spodní části KL). Poloha a velikost oken se nastavuje v programu RADARGRAM. Okno musí mít šíři minimálně odpovídající časové periodě T nosné frekvence antény. Ve vymezených oknech je nalezena maximální hodnota signálu a odpovídající pořadí samplu. Metrika ATTr se potom počítá:

$$\text{ATTr} = (A2/A1) * (S2-S1) * t$$

kde:

A1 amplituda v horním okně (odraz od povrchu štěrku)

A2 amplituda v dolním okně (vlna/odraz od báze štěrku nebo při bázi štěrku)

S1 pořadí samplu odpovídající poloze A1

S2 pořadí samplu odpovídající poloze A2

t časový interval mezi samplu (ns)

Podrobnosti výpočtu metrik a jejich možného nastavení jsou obsaženy v manuálu k programu RADARGRAM (20).³

6.3 Nastavení programu RADARGRAM pro výpočet interpretačních parametrů

Výpočet interpretačních parametrů provádíme z primárních dzt souborů pro anténu typu HORN 1 GHz, stažených ze systému PSST (bez filtrace a zesilování), které byly délkově nanormovány na traťovou metráž. Radarové měření na MV bylo provedeno podle pokynů a s nastavením aparatury dle Ztech (19). Podrobný popis programu RADARGRAM a jeho nastavení je uveden v jeho manuálu (20).

Dzt soubor načteme do programu RADARGRAM. Pro úplné fungování všech funkcionalit programu musí být ve stejné složce spolu s dzt souborem i dmsql soubor patřící k radarogramu. V programu RADARGRAM lze nastavit délku zobrazeného výřezu z měřeného úseku tratě v široké škále od metrových detailů do přehledu celého měřeného úseku (např. desítky km). Dále lze zvolit vhodný rozsah černobílé škály vlnového pole tak, aby byl radarový záznam čitelný podle jeho útlumu. Primárně je škála volena automaticky podle maximální amplitudy signálu, lze ji však upravit manuálně. Při správném nastavení škály a zvolení délky zobrazeného úseku tratě (cca 50 m) dobře vidíme charakteristický radarový záznam KL se střídáním výrazných odrazů od povrchu pražců (s výjimkou dřevěných pražců, které se projevují spíše útlumem signálu). Pro další analýzu signálu jsou vhodnější scany z mezipražcového prostoru (tj. mezi jednotlivými maximy od pražců).

Na vybraném traťovém úseku vybereme vhodný scan (ideálně z mezipražcového prostoru) a na jeho průběhu (v pravé části obrazovky) provedeme kontrolu nastavení oken a signálu pro výpočet metrik (viz Obr. 1). Základní (defaultní) nastavení pro metriky PKS, CRS, FSA, TSA je:

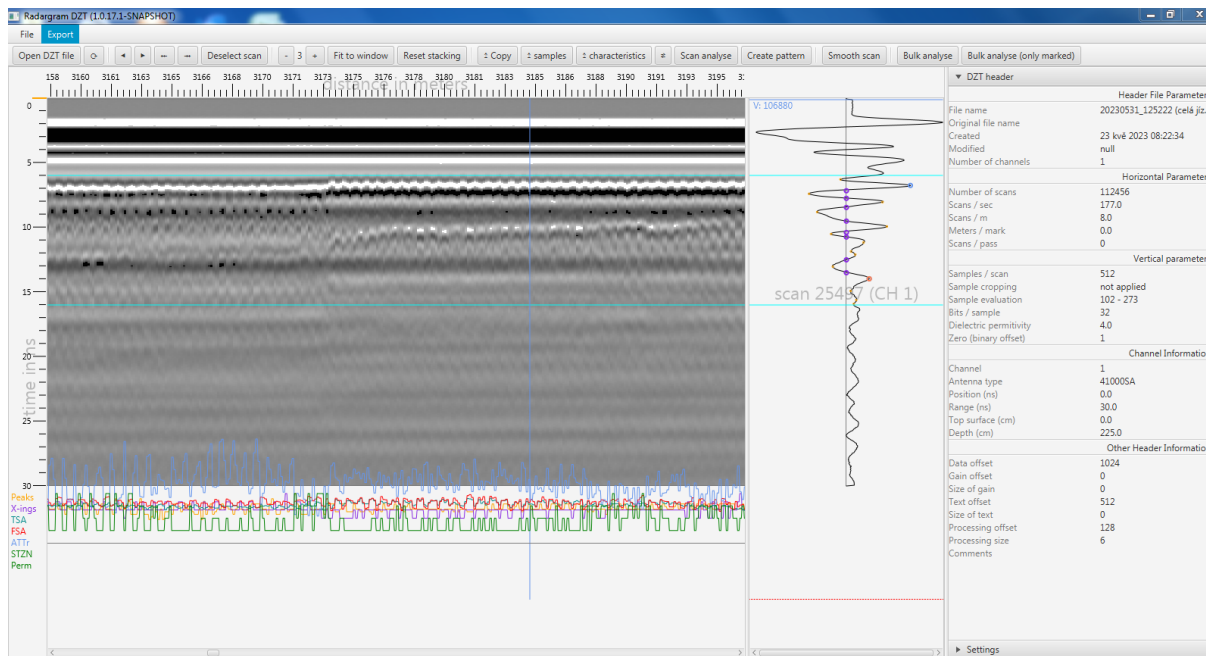
- výpočetní okno 10 ns - interval 6 až 16 ns (výpočetní okno by mělo zasahovat přes celé KL),
- posun „0“ hladiny okno (doporučujeme provést výpočet zkušebně bez posunu a následně s posunem -125000 nebo dle skutečnosti), do systému PSST doporučujeme ukládat výsledky s posunem,
- vyhlazení signálu – volíme délku filtru 9.

Základní (defaultní) nastavení pro metriku ATTr je:

výpočetní okna - horní interval 6 až 7,5 ns, dolní 12 až 16 ns (výpočetní okna musí mít délku minimálně jedné periody),

³ Jedním z významných parametrů charakterizujících prostředí, kterým prochází radarový signál, je relativní permitivita (viz 4.1). Pro výpočet tohoto parametru lze použít některý z programů pro analýzu radarových záznamů (např. RADAN). Hodnoty permitivity jsou úměrné útlumu radarového signálu.

posun „0“ a vyhlazení signálu stejně jako u dalších metrik.^{4,5}



Obr. 1 - Ukázka GPR záznamu v programu RADARGRAM s typickým scanem a parametry nastavení pro výpočet metrik.

6.4 Potlačení rušivých vlivů – základní filtrace vypočtených interpretačních parametrů

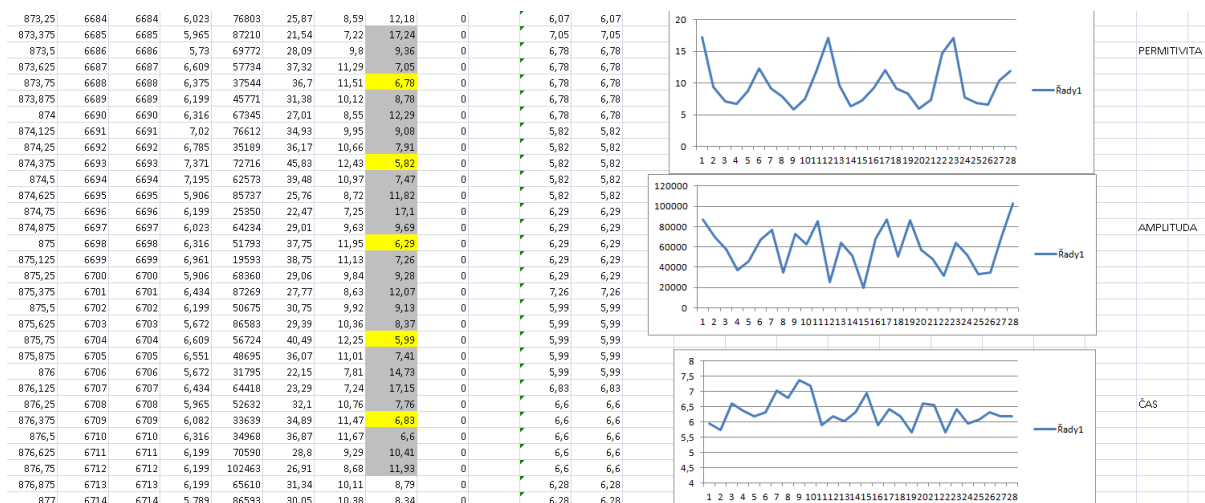
Radarový signál je ovlivněn nejen zkoumaným prostředím KL a jeho podložím, ale také dalšími hmotami (zvláště kovovými) kolem antény. Jedná se především o vlastní MV, kolejnice a pražce. Vliv hmoty MV je sice významný, ale při pevném uchycení antény je konstantní. Vliv kolejnic lze při uchycení v podvozku v blízkosti nápravy MV také považovat za konstantní. Při konstantním vlivu dochází sice ke

⁴ Stejným způsobem lze analyzovat i signál HORN antény 1 GHz z měření na držáku před nárazníky (osa koleje, orientace napříč) nebo také z HORN antén 1 GHz z měření za hlavami pražců. Nastavení parametrů programu RADARGRAM (výpočetní okno, výpočetní okna pro ATTr, posun „0“ a vyhlazení signálu) je třeba provést na základě kalibrace systému na testovacím úseku (viz Kapitola 7.1).

⁵ Stejným způsobem lze analyzovat i signál dalších antén. Z hlediska existence archivních dat je nejdůležitější možnost analýzy záznamů z antény 400 MHz (anténa v ose tratě, umístění v podvozku, normálový odraz). Nastavení parametrů programu RADARGRAM (výpočetní okno, výpočetní okna pro ATTr, posun „0“ a vyhlazení signálu) je třeba provést na základě kalibrace systému na testovacím úseku (viz Kapitola 7.1).

zkreslení signálu (vznik „parazitních“ vln a jejich násobností), ale vliv na výpočet metrik je předvídatelný a stále stejný.⁶

Pro výpočet interpretačních parametrů je nejvýraznějším rušivým vlivem projev pražců, který je proměnný. Ideální by bylo používat pouze mezipražcové scany. Vzhledem k proměnné vzdálenosti (rozdělení) pražců, jejich typů a konstrukce (vliv výztuže) i použitých materiálů (zejména betonové a dřevěné) je určení mezipražcových scanů obtížné. Bylo prokázáno, že metriky nejčastěji dosahují na scanech nad pražci svých maximálních, v některých případech také minimálních, hodnot. Proto jejich vliv v měřených datech potlačujeme tak, že pro každou polohu scanu ukládáme jako validní hodnotu metriky její medián z okolních 32 scanů (viz Obr. 2).



Obr. 2 - Ukázka průběhu parametrů EM signálu nad pražci.

6.5 Potlačení vlivu klimatických podmínek v době měření

Dalším z vlivů, které ovlivňují radarový záznam, jsou klimatické podmínky v době měření (viz kapitola 5.1). Jedná se zvláště o teplotu a vlhkost (srážky) v době měření. Vliv teploty minimalizujeme stanovením pracovní teploty pro měření a vyloučením měření za extrémních teplotních podmínek. Vliv vlhkosti potlačujeme vyloučením měření při a těsně po vydatných srážkách a zavedením korekčních koeficientů podle hodnoty relativní vlhkosti RH (%) měřené pomocí meteočidla v podvozku u antény. Korekční koeficienty jsou zavedeny automaticky při výpočtu některých metrik pomocí programu RADARGRAM.⁷

⁶ Při použití držáku antén před nárazníky MV je vliv kolejnic proměnný vlivem změny vzdálenosti antény ke kolejnicím vybočováním držáku v obloucích malých poloměrů (zvláště na lokálních tratích). Zde je třeba při vyhodnocení GPR dat počítat s tím, že data z oblouků nejmenších poloměrů, kdy se anténa dostává skoro nad kolejnici, bude třeba vyřadit.

⁷ Pro metriku ATTr jsou použity následující korekční koeficienty: pro RH < 30 % koeficient 1,05; pro RH 30-60 % koeficient 1,00; pro RH > 60 % koeficient 0,85.

6.6 Výpočet reprezentativních hodnot interpretačních parametrů pro úsek tratě délky 20, 200 a 2000 m

V souladu s požadavky SŽ bude zkoumaná železniční trať hodnocena po úsecích s délkou 1 (pracovní interval), 20, 200 a 2000 m. Reprezentativní (agregovaná) hodnota se počítá podle průměru vypočtených metrik pro 8 (pracovní interval), 160, 1600 a 16000 scanů. Pro STZN platí, že:

- agregovaná hodnota 1 odpovídá průměru z daného počtu scanů v intervalu 1 -1,74,
- agregovaná hodnota 2 odpovídá průměru z daného počtu scanů v intervalu 1,75 – 2,49,
- agregovaná hodnota 3 odpovídá průměru z daného počtu scanů v intervalu 2,5 – 3,24,
- agregovaná hodnota 4 odpovídá průměru z daného počtu scanů v intervalu 3,25 – 4.

Výhodou hodnocení po úsecích je vyloučení chybových hodnot např. lokálně ovlivněných interakcí okolních vlivů a celkově lepší přehlednost a čitelnost výsledků. Výpočet reprezentativních hodnot je proveden pro všechny výše uvedené metriky a pro STZN (viz níže kapitola 7.1, 7.2).

6.7 Ukládání GPR záznamů a výsledků interpretace do IS PSST

Předpokládá se, že radarové záznamy budou i nadále ukládány do systému PSST, kde dochází k jejich délkové kalibraci na traťovou metráž. Interpretace hodnocení STZN probíhá pomocí programu RADARGRAM na souborech stažených z PSST společně se souborem dmsql, který obsahuje informace o traťové metráži a případně i o dalších měřených parametrech (PGPK).

Do souboru dmsql, který se po interpretaci radarových měření vrací do systému PSST, vstupují vypočtené hodnoty STZN v nově vzniklé tabulce METER_STZN, kde je uveden DM_INDEX a samotná hodnota STZN.

7. Stanovení stupně znečištění kolejového lože

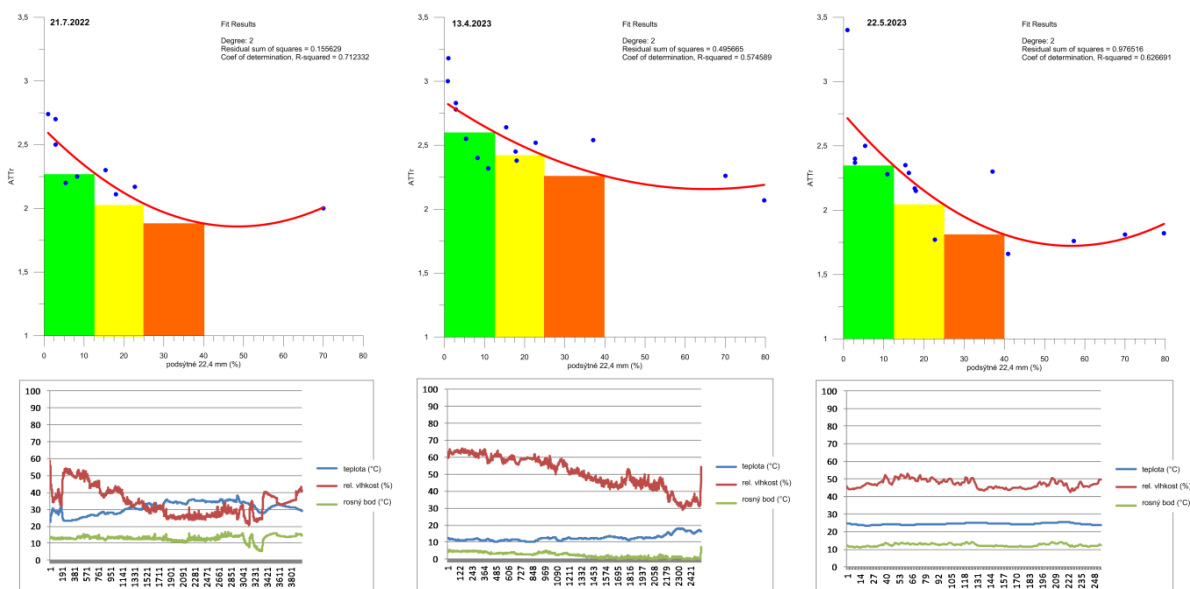
Elektromagnetická vlna vysílaná geologickým radarem se při průchodu zkoumaným prostředím mění. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.1, dochází ke změnám v rychlosti šíření vlny, k jejímu útlumu a k disperzi signálu. Změny signálu odpovídají charakteru prostředí a toho využíváme při stanovení STZN KL.

7.1 Vztah interpretačních parametrů a znečištění KL

Nejvhodnějším parametrem pro stanovení STZN se jeví útlum radarového signálu, případně relativní permitivita (rychlost šíření signálu). Z interpretačních parametrů počítaných programem RADARGRAM (viz kapitola 6.2) používáme pro stanovení STZN metriku ATTr. Ostatní metriky slouží jako podpůrné vodítko při detailní analýze měřených úseků.

Vztah metriky ATTr a znečištění KL byl stanoven na základě souboru vzorků materiálu KL z testovacích úseků in situ Brandýs n. Labem – Neratovice, Neratovice – Kralupy n. Vltavou, Mělník – Mšeno a Pečky – Bečváry. Pozice vzorků byla vybrána tak, aby reprezentovaly tzv. kvazihomogenní bloky tratí dle interpretace GPR. Kvazihomogenní blok je úsek trati, který vykazuje v GPR záznamu stejnou stavbu. U vzorků byla stanovena jejich zrnitost standardním postupem v akreditované laboratoři. Popis testovacích úseků, knihovna radarových záznamů a protokoly z laboratorních měření obsahují přílohy projektu TAČR TITSMD006. Pro kontrolu a zpřesnění vztahu metrik a míry znečištění KL byla dále použita data a zjištěné korelace ze souboru laboratorních měření. Pro korelaci metriky ATTr a znečištění KL je použita hodnota podsítného 22,4 mm v %. Korelační grafy ze všech testovacích úseků in situ jsou uvedeny na Obr. 3. S poklesem metriky ATTr roste míra znečištění. Vztah dalších metrik k STZN není tak těsný a jednoznačný. Souhrnně lze konstatovat:

- PKS - frekvenční charakteristika, nárůst hodnot znamená zvýšenou vlhkost a také míru znečištění,⁸
- CRS - frekvenční charakteristika, nárůst hodnot znamená zvýšenou vlhkost a také míru znečištění,
- FSA - frekvenční charakteristika, nárůst hodnot znamená zvýšenou vlhkost a také míru znečištění,
- TSA - amplitudová charakteristika, nárůst hodnot znamená zvýšenou míru znečištění a také vlhkost.



Obr. 3 - Korelace metriky ATTr a podsítného 22,4 mm (%) pro vzorky odebrané na testovacích úsecích in-situ pro 3., 4. a 5. etapu měření (data bez opravy na vlhkost RH).

⁸ Výpočet PKS je ovlivněn mírou vyhlazení signálu. Srovnáním hodnot PKS při nízkém stupni vyhlazení (0-3) a vysokého stupně vyhlazení (15-50) lze posoudit míru disperze GPR signálu.

Je třeba poznamenat, že korelace je platná pro nastavení HORN antény 1 GHz dle Ztech (19) a dle nastavení programu RADARGRAM uvedeného v kapitole 6.3. Lze očekávat, že celý systém se bude dále vyvíjet a optimalizovat tak, že dojde k modifikaci umístění a způsobu uchycení antén (v souvislosti s plánovanou rekonstrukcí MV) a k obměně radarového vybavení (zvláště antény, kabeláž). Dále předpokládáme, že po nasazení systému do běžného provozu bude interpretace STZN náhodně nebo cíleně ověřována odběrem dalších vzorků materiálu KL z různých druhů tratí. Díky tomu může dojít ke zpřesnění vztahů sledovaných metrik k STZN.

V případě zásadních změn systému (změna umístění/uchycení antén, obměna hardwaru) je třeba provést jeho recalibraci. Zásady recalibrace GPR systému lze shrnout takto:

- Je třeba vybrat vhodný testovací úsek. Ten by měl obsahovat jak úseky s nízkým, tak vysokým STZN. Dále musí z daného úseku existovat GPR data (alespoň 2. etapy měření) naměřená „původním“ systémem. Je vhodné, aby původní hodnocení STZN bylo ověřeno pomocí několika charakteristických vzorků.⁹
- Po změření radarových dat „novým“ systémem je třeba zkontrolovat nastavení programu RADARGRAM (viz Kapitola 6.3). Zvláště je potřeba upravit nastavení výpočetních oken ve vztahu k pozici odrazu elektromagnetické vlny od povrchu šterku (pražců). Okna doporučujeme posunout do vhodné pozice (podle průběhu scanu), ale neměnit jejich velikost. Stejně zkontrolujeme případný posun „0“ hladiny signálu.
- Porovnáme vypočtené metriky „původního“ a „nového“ systému, případně sestavíme nové korelační grafy. Pokud je celkově zachován průběh (tvar) změn metrik podél trati, ale došlo ke změně jejich amplitud/hodnot, stačí posunout limitní hodnoty ATTr pro stanovení STZN (viz níže). Pokud došlo ke snížení míry korelace, je třeba změnit i další nastavení programu RADARGRAM (velikost oken, míru vyhlazení) tak, aby se míra korelace metrik a STZN vyrovnala původnímu systému.

7.2 Limitní hodnoty interpretačních parametrů pro stupně znečištění KL

Limitní hodnoty ATTr pro hodnocení STZN lze nastavit v programu RADARGRAM. Doporučujeme vycházet z kalibrační křivky sestavené z dat z testovacích úseků (např. dle obr. 3 a korekci na RH vlhkost). STZN definujeme následujícím způsobem:

- STZN 1 – obsah podsítného 22,4 mm cca do 12,5 % - ATTr > 2,3 (po opravě na vlhkost)
- STZN 2 – obsah podsítného 22,4 mm cca 12,5 - 25 % - ATTr = 2,3 - 2,0 (po opravě na vlhkost)
- STZN 3 – obsah podsítného 22,4 mm cca 25 - 40 % - ATTr = 2,0 - 1,6 (po opravě na vlhkost)
- STZN 4 – obsah podsítného 22,4 mm cca nad 40 % - ATTr < 1,6 (po opravě na vlhkost)

⁹ Vybraný testovací úsek doporučujeme měřit GPR systémem na MV každý rok. Cílem je kontrola systému a jeho opakovatelnosti.

Limitní hodnoty ATTr pro hodnocení STZN byly stanoveny na základě dat měřených na 4 traťových úsecích, které obsahovaly starší i nově rekonstruované lokální tratě. Chyběly však úseky koridorové. Předpokládáme tedy, že systém hodnocení bude podle zkušeností z běžného provozu kontrolován a případně upravován. Doporučujeme, aby po první a dále nejméně po třetí měřící sezóně byla provedena recalibrace systému.

7.3 Ukládání vypočtených hodnot stupně znečištění kolejového lože do IS PSST

Z programu RADARGRAM lze exportovat dva typy interpretačních datových souborů. První typ souborů (ve formátu csv) obsahuje primární výpočty metrik (PKS, CRS, FSA, TSA, ATTr, STZN) pro každý scan. Tento typ souborů slouží pro detailní analýzu traťového úseku, případně pro kontrolu kalibrace systému hodnocení STZN. Druhý typ souborů (také ve formátu asc) odpovídá úsekovým hodnotám metrik včetně STZN po 1, 20, 200 a 2000 m. Hodnoty STZN lze pomocí programu RADARGRAM dále přímo exportovat do dmsql souboru systému PSST. Jedná se o finální výstup analýzy radarových záznamů, který je určen pro všechny uživatele v rámci SŽ. Data lze využít podobně jako další parametry měřené pomocí MV (např. PGPK) k sestavení grafů (změny STZN podél traťové metráže) nebo map rizikových úseků.

8. Hodnocení vývoje znečištění kolejového lože na základě opakovaných měření

Vývoj znečištění KL je progresivní proces. To znamená, že od výchozího stavu, kdy je obsah podsítného <22,4 mm dán kvalitou nového kameniva, může docházet buď ke zvyšování obsahu podsítného, nebo ke stagnaci vývoje.

Průměrná plánovaná životnost KL je cca 30 let. V době životnosti KL proběhne řada testování, také opakované měření pomocí GPR. Na základě opakovaných měření GPR vznikne časová řada STZN sledující vývoj znečištění KL. Znalost dynamiky znečištění kolejového lože umožní zpřesnění plánování oprav kolejového lože železničních tratí (viz kapitola 9.). Radarová data z opakovaných měření lze využít i ke konstrukci tzv. rozdílových záznamů (viz Kapitola 5.2).

8.1 Nastavení programu RADARGRAM pro výpočet rozdílových dzt souborů

Pro výpočet rozdílových záznamů je třeba mít dva dzt soubory daného traťového úseku se stejným vzorkováním (tj. stejný počet scanů na 1 m a stejný počet samplů na 1 scan). Ideálně by mělo být měření provedeno při stejném/podobném zesílení a za použití stejných základních filtrů. Pokud tomu

tak není, lze využít úpravy jednoho ze souborů např. pomocí programu RADAN tak, aby si byly záznamy „podobné“.

Pokud tedy máme dva takové soubory, v programu RADARGRAM nadefinujeme zónu překryvu. Tj. zadáme levý horní okraj zóny překryvu v obou dtz souborech ve formě hodnoty scan/sampl (20). Program RADARGRAM automaticky následně vypočte rozdílový dtz soubor.

Ten lze otevřít běžným způsobem v programu RADARGRAM nebo v jiných programech pro úpravu radarových záznamů (např. RADAN). Zde lze optimalizovat zobrazení rozdílového záznamu např. volbou vhodného rozsahu škály amplitud nebo zesílením a filtrováním záznamu podobně jako provádíme u primárních záznamů.

8.2 Zásady interpretace rozdílových dtz souborů

Rozdílové dtz soubory slouží jako pomůcka pro rychlé hodnocení změn v rámci měřeného traťového úseku. Lze využít i archivní soubory měřené anténou 400 MHz (anténa v podvozku, osa tratě, normálový odraz). Interpretace rozdílových řezů vychází z těchto zásad:

- Úseky, kde nedochází v čase ke změnám, se projevují rozdílovým záznamem bez výrazného vlnového pole, tj. bez viditelných vln a odrazů. V případě nedokonalého nastavení zóny překryvu (což je běžný stav), se rozdílový radarový řez v „klidném“ prostředí projevuje slabým zvlněním, které kopíruje primární/starší záznam (reziduální signál při nedokonalém překryvu). Takový projev je způsoben drobným fázovým posunem signálu z antén mezi etapami měření, který může být vyvolán změnou vlhkosti KL při měření nebo použitím jiného hardwaru (antény či kabelu). Všechny případy, kdy je rozdílový řez „bez“ odrazů (ideální stav) nebo se objevují slabé odrazy kopírující tvary primárního záznamu, lze považovat za projev tratě bez výrazných změn v období mezi etapami měření.
- Rizikové úseky tratě, kde pravděpodobně dochází ke zhoršení STZN (např. výskyt zblácených míst) nebo k deformacím vrstev KL, se v rozdílových řezech projevují jako úseky s kolísající amplitudou reziduálního signálu nebo místa tvarových odchylek reziduálního signálu ve srovnání s primárním záznamem.
- Taková místa je třeba korelovat s vývojem hodnocení STZN. Pokud taková místa vykazují hodnoty STZN 3 a zvláště 4, doporučujeme je přednostně zařadit do plánu oprav.

9. Začlenění hodnocení stupně znečištění kolejového lože podle interpretace GPR do systému údržby železničních tratí

Předpokládáme, že železniční tratě budou v ČR proměřovány pomocí GPR s četností cca 1x za 6 let (stávající stav) či častěji. Z naměřených dat a interpretace STZN vznikne časová řada, která odpovídá vývoji znečištění KL. Ideálně po 3 etapách měření lze hodnotit trendy:

- STZN se nemění a dosahuje maximálně stupně 2 – ideální stav, trať nevyžaduje z hlediska STZN zásah,
- STZN se nemění a dosahuje místy i stupně 3/4 – stav tratě se nezhoršuje, je však třeba nevyhovující úseky s hodnotou 3/4 zařadit do plánu oprav s horizontem 5/10 let,
- STZN se nemění a převažují úseky se stupněm 3/4 – stav tratě je rizikový, KL nevyhovující, je třeba provést opravu KL ideálně do 5 let,
- STZN se zhoršuje, v nejhorším úseku dosahuje stupně 2/3 – na trati je vhodné zvýšit frekvenci monitoringu GPR,
- STZN se zhoršuje, v nejhorším úseku dosahuje stupně 3/4 – trať je třeba zařadit do plánu oprav KL s horizontem do 5 let,
- STZN se zhoršuje, rozsah úseků se stupněm 3 a 4 převažuje – KL je třeba opravit, ideálně do 3 let.

Vzhledem k tomu, že vývoj znečištění je progresivní proces, neměly by interpretované hodnoty STZN v čase klesat. Pokud se tak stane, je to pravděpodobně způsobeno provedeným čištěním kolejového lože (strojním či ručním). Může však jít také o projev chyby měření (např. nepřesná korekce na klimatické podmínky) nebo systém vyžaduje recalibraci.

10. Srovnání metodiky s podobným řešením v zahraničí

V současné době se v ČR míra znečištění kolejového lože posuzuje na základě subjektivního vizuálního zhodnocení znečištění kameniva, případně podle výsledků zkoušek provedených na odebraných vzorcích kameniva ve zvolených profilech trati. Takové řešení je pracné a vyžaduje vyloučení železničního provozu. Navíc poskytuje sice přesnou, ale pouze bodovou informaci o stavu kolejového lože.

Nově navrhované řešení je založeno na kontinuálním měření kolejového lože prostřednictvím unifikovaného systému vhodných radarových antén na specializovaném měřicím voze. Měření může být prováděno při rychlosti jízdy až 80 km/h. Nelze vyloučit, že v budoucnu bude možné měření provádět i za vyšších rychlostí. Naměřená data obsahují informace o průniku elektromagnetického signálu kamenivem. Jednotlivý elektromagnetický impuls se nazývá scan. Data jsou následně (polo)automaticky vyhodnocena prostřednictvím softwaru vyvinutého v rámci projektu. Počítány jsou amplitudové i frekvenční charakteristiky radarového signálu. Na jejich základě je provedeno zatřídění vybraného úseku trati o délce 20 m, 200 m či 2 000 m do jednoho ze 4 klasifikačních stupňů znečištění kolejového lože.

Podobná řešení jsou rozvíjena i v zahraničí, a to zvláště v modifikaci využití geologického radaru pro hodnocení stavu konstrukčních a podkladních vrstev silnic a dálnic. Jako příklad můžeme uvést firmu ROADSCANNERS OY z Finska. Použití obdobné technologie na železničních tratích vyžaduje však inovativní přístup, který musí vzít v potaz vliv pražců, kolejnic a dalších kovových součástí kolejové infrastruktury na měřený radarový signál.

Výhodou metodiky je, že vychází ze zavedené praxe použití radaru na železnici v ČR a interpretaci stupně znečištění kolejového lože začleňuje do existujícího informačního systému IS PSST. Jeho nadstavba také umožňuje vizualizaci stupně znečištění kolejového lože v GIS systému používaném SŽ, s.o. Navíc Metodika počítá s dlouhodobým monitoringem (opakovaným měřením) tratí a s posouzením dalšího vývoje stavu kolejového lože s návazností na optimální průběh údržby.

Inovací v rámci metodiky je také konstrukce rozdílových radarových řezů pro rychlou vizuální kontrolu změn kolejového lože a podloží dlouhých úseků tratí. Rozdílové řezy v kombinaci s hodnocením míry znečištění kolejového lože a měřením geometrie kolejí (PGPK) tak lze využít pro rychlou identifikaci rizikových úseků tratí a přispět k určení příčin vad (zblácená místa, deformace v podloží, apod.).

11. Popis uplatnění metodiky

Uživatelé metodiky bude Správa železnic, s.o., která jejím prostřednictvím zamýšlí rozšířit systém kontroly stavu kolejového lože na tratích v ČR. Předpokládáme, že radarová měření budou na tratích v ČR probíhat se stejnou četností jako dosud (po 3 až 6 letech podle významu tratí), případně častěji (preferováno). Při předpokládané životnosti kolejového lože 30 let tak bude k dispozici řada nejméně 5 až 10 hodnocení jeho stavu. To umožní optimalizovat plánování údržby a rekonstrukcí železničních tratí v ČR.

Aplikací Metodiky bude možné optimalizovat počet a umístění kontrolních vzorků kameniva z kolejového lože. Kontinuální měření pomocí GPR na tratích dále zamezí „přehlédnutí“ kratších rizikových úseků. V Metodice jsou uvedena doporučení pro údržbu tratí ve vztahu k vývoji stupně znečištění kolejového lože v čase.

Uživatel Metodiky deklaroval, že na základě stanovení limitů pro míru znečištění kolejového lože pomocí GPR zapracuje do svých interních dokumentů návrhy opatření ve vztahu k zajištění ekonomického a bezpečného provozu na železniční síti.

12. Očekávané ekonomické aspekty metodiky

Zavedení nového postupu časosběrného kontinuálního měření kvality kolejového lože v celé železniční síti v ČR umožní správci železniční infrastruktury prostřednictvím již zavedeného diagnostického měřicího vozu získat ucelený a průběžně aktualizovaný přehled o znečištění kolejového lože, vzájemně propojit výsledky měření s dalšími sledovanými parametry kolejové infrastruktury v rámci jednotného informačního systému, efektivně plánovat výměnu či obnovu kolejového lože a omezit či zcela vyloučit stávající subjektivní a bodové hodnocení kolejového lože.

Ekonomické aspekty nelze přesně vyčíslit, nicméně lze předpokládat významné úspory v efektivnějším nakládání s životností kolejového lože a při provádění stávajících kopaných sond a hodnocení odebraných vzorků v akreditovaných laboratořích. Navíc dojde ke zvýšení bezpečnosti provozu na tratích vlivem včasné diagnostiky rizikových úseků tratí (např. vysoká míra znečištění kolejového lože). Dalším přínosem bude postupná tvorba a zkvalitňování báze dat za celou železniční síť v ČR, která umožní další zefektivnění údržby v návaznosti na komplementární údaje o kvalitě železničního svršku a spodku získané prostřednictvím diagnostických prostředků.

Náklady na zavedení Metodiky do praxe lze odhadnout na cca 3,5 milionu Kč (doplnění radarového vybavení pro Správu železnic, s.o., cca 1,5 milionu Kč, úpravy měřicího vozu v souvislosti s instalací radarových antén cca 2 miliony Kč).

13. Literatura, publikace

Přehled použité literatury

1. ČSN EN 13450 Kamenivo pro kolejové lože. Český normalizační institut. Účinnost od dubna 2004.
2. Obecné technické podmínky SŽ Kamenivo pro kolejové lože železničních drah. Oprava č. 1. Účinnost od 1. 1. 2022.
3. Předpis SŽ S3 Železniční svršek. Oprava č. 1, účinnost od 1. 1. 2022. Díl X – Kolejové lože. Změna č. 4, účinnost od 1. 3. 2021.
4. Předpis SŽ S3/1 Práce na železničním svršku. Změna č. 1, účinnost od 17. 7. 2023.
5. Pokyny pro použití nedestruktivních geofyzikálních metod v diagnostice a průzkumu těles železničního spodku. SŽDC 2006.
6. Technické podmínky TP 233. Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací. MD ČR 2011.
7. Borkovcová A., Borecký V., Artagan S.S., et al. Quantification of the mechanized ballast cleaning process efficiency using GPR technology. *Remote Sens.* 2021;13(8):1510.
8. Yunlong Guo, Guixian Liu, Guoqing Jing, Jianjun Qu, Shilei Wang & Weile Qiang (2023) Ballast fouling inspection and quantification with ground penetrating radar (GPR), *International Journal of Rail Transportation*, 11:2, 151-168. (doi:10.1080/23248378.2022.2064346).
9. Shangguan P., Al-Qadi IL, Leng Z. (2012): Ground-penetrating radar data to develop wavelet technique for quantifying railroad ballast–fouling conditions. *Transp Res Rec.* 2012;2289(1):95–102.
10. Ferrante C., Bianchini Ciampoli L., Benedetto A., et al. (2021): Non-destructive technologies for sustainable assessment and monitoring of railway infrastructure: a focus on GPR and InSAR methods. *Environ Earth Sci.* 2021;80 (24):1–20.
11. Gupta, Akash, Bangalore Narasimha Murthy, Madhusudhan, Zervos, Antonios, Powrie, William, Harkness, John and Le Pen, Louis (2022): Grain characterisation of fresh and used railway ballast. *Granular Matter*, 24 (4), 95-104, [96]. (doi:10.1007/s10035-022-01263-1).

12. Liu G, Yang F, Wang S, Jing G, Nateghi Y.: Railway ballast fouling, inspection, and solutions – A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2023;237(8):969-982. (doi:10.1177/09544097221148057).
13. Kind, T. (2012). GPR Antenna Array For The Inspection Of Railway Ballast. National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2011, December 8-10, 2011.
14. Zhao, W., Qiang, W., Yang, F., Jing, G., & Guo, Y. (2023). Data-driven ballast layer degradation identification and maintenance decision based on track geometry irregularities. International Journal of Rail Transportation. (doi:10.1080/23248378.2023.2228802).
15. Leng, Z., & Al-Qadi, I. L. (2010). Railroad Ballast Evaluation Using Ground-Penetrating Radar: Laboratory Investigation and Field Validation. Transportation Research Record, 2159(1), 110-117.
16. Roberts R., Al-Qadi I.L., Tutumluer E. and Kathage A. 2007. Ballast fouling assessment using 2 GHz horn antennas-GPR and ground truth comparison from 238 km of track. In: 9th International Railway Engineering Conference.
17. Kathage A., Niessen J., White G., et al. Fast inspection of railway ballast by means of impulse GPR equipped with horn antennas. Journal of Nondestructive Testing 2005; 10: 1.
18. Graman F.: Hodnocení míry znečištění kolejového lože pomocí georadaru se zaměřením na vliv materiálu způsobujícího znečištění. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta stavební, 2022.
19. Výstup projektu TAČR TITSMD006 – Ztech: „Návrh měřicího systému a ověření technologie založené na georadarovém skenování kolejového lože a stanovení jeho znečištění ve stupních navazujících na jeho technologii údržby a opravy“.
20. Výstup projektu TAČR TITSMD006 – Software: manuál k programu RADARGRAM - software pro dávkové ukládání dat z měření stupně znečištění kolejového lože georadarovým skenováním a jejich úsekové a časové hodnocení.

Přehled vlastních publikací

1. Lojda, V.; Graman, F.; Horníček, L.: Laboratorní hodnocení míry znečištění kolejového lože pomocí georadaru. In: Sborník příspěvků konference Želva 2022. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2022. p. 31-40. ISBN 978-80-01-07046-8.
2. Graman, F.: Hodnocení míry znečištění kolejového lože pomocí georadaru se zaměřením na vliv materiálu způsobujícího znečištění. Bakalářská práce. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2022.
3. Šurovský, J.: Vyhodnocení signálu georadaru pro určení znečištění kolejového lože. Študentská vědecká a odborná činnost stavebních fakúlt České a Slovenské republiky - XXIV. ročník, 2024.