ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra železničních staveb

HODNOCENÍ MÍRY ZNEČIŠTĚNÍ KOLEJOVÉHO LOŽE POMOCÍ GEORADARU SE ZAMĚŘENÍM NA VLIV MATERIÁLU ZPŮSOBUJÍCÍHO ZNEČIŠTĚNÍ

EVALUTION OF THE BALLAST FOULING LEVEL USING GROUND-PENETRATION RADAR WITH A FOCUS ON THE INFLUENCE OF THE MATERIAL CAUSING THE CONTAMINATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Filip Graman

Studijní program: Stavitelství

Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

Vedoucí práce: Ing. Vít Lojda, Ph.D.

Praha, 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Graman Jméno: Filip Osobní číslo: 484399

Zadávající katedra: Katedra železničních staveb

Studijní program: Stavitelství

Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Hodnocení míry znečištění kolejového lože pomocí georadaru se zaměřením na vliv materiálu způsobujícího znečištění

Název bakalářské práce anglicky: Evaluation of the ballast fouling level using ground-penetrating radar with a focus on the influence of the material causing the contamination.

Pokyny pro vypracování:
Zpracujte stručnou rešerši k tématu s použitím českých i zahraničních zdrojů. V rámci experimentálních prací zaměřených na hodnocení znečištění kolejového lože v laboratorních podmínkách proveďte sérii měření nejméně 3 určených typů kameniva kolejového lože s různým stupněm znečištění. Znečištění kameniva bude zahrnovat jemnozrnnou zeminu a uhelný prach. Pro každý vzorek kameniva stanovte křivku zrnitosti, vlhkost, objemovou hmotnost, sypnou hmotnost, mezerovitost. Výsledky vzájemně porovnejte s relativním permitivitou zjištěnou georadarem v laboratorním boxu.

Seznam doporučené literatury:
[1] KREJČIŘÍKOVÁ, H.: Železniční stavby 1, 1. část. Praha: ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-06157-2
[2] SŽDC OTP. Obecné technické podmínky Kamenivo pro kolejové lože železničních drah č. j. 38992/2020-SŽ-GŘ-O13 (3), Praha: Správa železnic. 2004
[3] ČSN EN 13450. Kamenivo pro kolejové lože. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 721506. 2014
[4] ROBERTS, Roger, Imad AL-QADI, Erol TUTUMLUER, Andreas KATHAGE. Ballast fouling assessment using 2 GHz horn antennas-GPR and ground truth comparison from 238 km of track. In: Proceedings of the 9th International Railway Engineering Conference. London, 2008
[5] ROBERTS, Roger, Imad AL-QADI, Erol TUTUMLUER. Track Substructure Characterization Using 500 MHz and 2 GHz Ground Penetrating Radar: Results from over 250 Miles of Track in Wyoming and Alaska. In: Proceedings of the AREMA 2019 Annual Conference. Minneapolis, 2019

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Vít Lojda, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 18. 2. 2022 Termín odevzdání BP v IS KOS: 15. 5. 2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

18. 2. 2022
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Hodnocení míry znečištění kolejového lože pomocí georadaru se zaměřením na vliv materiálu způsobující znečištění zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 15. května 2022

…….

Filip Graman

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítu Lojdovi, Ph.D. za cenné rady, zdravou kritiku a trpělivost během konzultací. Velice rád bych poděkoval celé Katedře železničních staveb ČVUT v Praze za pomoc s laboratorními testy a odborné konzultace. Chtěl bych poděkovat společnosti G IMPULS Praha, spol, s.r.o., obzvláště panu Mgr. Tomáši Belovovi a RNDr. Vojtěchu Benešovi za odbornou konzultaci a odbornou pomoc při měření. Dále mé poděkování patří panu Ing. Janu Mynářovi ze společnosti 4G Consite s.r.o. a panu Jaroslavu Kasalickému z Katedry silničních staveb ČVUT v Praze za odbornou konzultaci během laboratorních zkoušek. Nakonec bych chtěl poděkovat i Leoši Jourovi a Pavlu Koubíkovi za pomoc s laboratorními zkouškami a všem blízkým za podporu během bakalářského studia.

Tato práce byla podpořena projektem výzkumu a vývoje řešeným v programu TAČR BETA2 Diagnostika a hodnocení kvality kolejového lože pomocí georadaru s číslem grantu TITSMD006.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá údržbou železničního svršku se zaměřením na laboratorní vyhodnocení znečištění kolejového lože stanového pomocí sady konvenčních laboratorních zkoušek se současným sledováním znečištění nepřímou metodou s využitím georadaru. Při vyhodnocení dat byly hledány závislosti z provedených pozorování tak, aby pro indikaci znečištění kolejového lože mohla být použita metoda s aplikací georadaru.

Využití georadaru pro měření znečištění kolejového lože v železniční trati by v budoucnu vyřešilo problém s odběry vzorků z kopaných sond a jejich následnými laboratorními zkouškami, které jsou nákladné a časově náročné. Praktický postup by spočíval v instalaci georadaru s příslušnou anténou na konstrukci drážního vozidla, které by během své jízdy zaznamenalo data pro následné vyhodnocení stavu znečištění kolejového lože.

V laboratoři byly provedeny různé laboratorní modely konstrukce železniční trati v měřítku 1:1 s různými typy kolejového lože měřené použitím georadaru a antény Horn s frekvencí 1 GHz. Měřené modely simulovaly různé znečištění kolejového lože. Vedle pozorování pomocí georadaru byla provedena laboratorní sítová zkouška pro stanovení znečištění kolejového lože a relevantní laboratorní zkoušky pro popis kameniva.

Data z georadaru byla zpracována společností G IMPULS Praha, spol, s.r.o., která z nich vyhodnotila hodnoty permitivity, které poskytla pro tuto bakalářskou práci k návaznému porovnání s výsledky laboratorních zkoušek provedených autorem této bakalářské práce.

Klíčová slova: kamenivo, kolejové lože, znečištění, georadaru, GPR, permitivita

Annotation

The bachelor thesis deals with the maintenance of the railway superstructure with a focus on laboratory evaluation of the fouling of ballast using a set of conventional laboratory tests with simultaneous monitoring of fouling by the indirect method using georadar. During the evaluation of the data, the relations from the performed observations were sought so that the georadar application method could be used to indicate the contamination of the railway ballast.

The use of georadar to measure railway ballast fouling in the railway line would solve the problem of sampling from excavated probes and their subsequent laboratory tests in the future, which are costly and time-consuming. The practical procedure would be to install a georadar with an appropriate antenna on the structure of the railway vehicle, which would record data during the ride for the subsequent evaluation of the state of contamination of the railway ballast.

In the laboratory, various laboratory models of railway construction were performed on a 1:1 scale with different types of railway ballast measured using a georadar and a Horn antenna with a frequency of 1 GHz. The measured models simulated various contamination of the railway ballast. In addition to georadar observations, a laboratory sieve test was performer to determine the contamination of the railway ballast and relevant laboratory tests to describe the aggregate.

The data from the georadar were processed by the company G IMPULS Praha, spol, s.r.o., which evaluated the permittivity values, which it provided for this bachelor thesis for subsequent comparison with the results of laboratory tests performed by the author of this bachelor thesis.

Keywords: aggregate, railway ballast, pollution, georadar, GPR, permittivity

Obsah

1 Úvod ... 1

Rešeršní část ... 2

2 Kolejové lože ... 2

2.1 Funkce kolejového lože ... 2

2.2 Materiál kolejového lože ... 2

2.3 Základní charakteristiky kameniva ... 4

2.4 Popis zkoušek kameniva ... 5

3 Technologie čištění kolejového lože ... 17

3.1 Strojní čistička kolejového lože ... 18

3.2 Recyklační základna ... 20

4 Historie GPR ... 20

4.1 Princip GPR ... 20

5.1 Příklady využití GPR zjištěné v odborné literatuře ... 27

Laboratorní část ... 34

5 Popis laboratorního boxu pro měření s GPR ... 34

6 Použitá zařízení pro měření ... 35

7.1 Měření s georadarem ... 37

7 Zkoušky kameniva s různým stupněm znečištění ... 44

8.1 Stanovení vlhkosti kameniva ... 44

8.2 Stanovení křivky zrnitosti kameniva ... 45

8.3 Stanovení sypné hmotnosti kameniva ... 46

8.4 Stanovení objemové hmotnosti zrn kameniva ... 47

8.5 Stanovení mezerovitosti kameniva ... 47

8.6 Souhrn výsledků z provedených zkoušek kameniva ... 47

8 Vyhodnocení ... 53

9 Závěr ... 58

Reference ... 59

Abecední seznam použitých symbolů a akronymů

ČVUT	České vysoké učení technické
FSv	Fakulta stavební
GPK	Geometrické parametry koleje
GPR	Georadar, ground penetrating radar
GSSI	Geophysical Survey System Inc
KL	Kolejové lože
OTP	Obecné technické podmínky
STFT	Short-Time Fourier Transform
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, s.o.
SŽ	Správa železnic, s.o.

1 Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje vyhodnocování znečištění kolejového lože a porovnání jeho výsledků s výsledky naměřenými za pomoci georadaru (dále jen GPR). Je zde uveden stručný popis kolejového lože, jeho funkce a materiál, který ho tvoří spolu s jeho vlastnostmi.

Tato práce ukazuje na možnost využití GPR k měření a určení míry znečištění kameniva kolejového lože namísto běžně používaného postupu, který zahrnuje odběr vzorků z kopaných sond v tělese železničního svršku a následného laboratorního stanovení znečištění kolejového lože. Běžně používaný postup vyžaduje mnoho kroků, čímž je složitý, časově náročný a jeho výsledky poskytují informaci pouze v takovém místě koleje, ve kterém byla provedena kopaná sonda.

Tato práce je rozdělena na dvě části, a to na rešeršní část a praktickou část, jejíž součástí byla měření provedená v laboratoři Fakulty stavební, Českého vysokého učení technického v Praze (dále jen ČVUT v Praze). Cílem rešeršní části bylo zjištění aktuálních metod, postupů a zkušeností s vyhodnocením znečištění kolejového lože a dále zjištění způsobu měření a vyhodnocování znečištění kolejového lože pomocí GPR. To by v budoucnu mohlo pomoci mnohem efektivněji zjistit míru znečištění kolejového lože, indikovat potřebu provedení strojního čištění nasazením čističky kolejového lože, a tím předejít rapidnímu zhoršování vlastností a funkce kolejového lože a zvětšování provozních odchylek geometrických parametrů koleje (dále jen GPK). Vlastní proces stanovení míry znečištění pomocí GPR by byl mnohem méně náročný časově, z pohledu nákladů, a také bez potřeby vyloučit sledovanou kolej.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo podrobit různě znečištěné kamenivo zvoleným laboratorním zkouškám a pomocí metod v souladu s normami stanovit jeho znečištění. Kamenivo bylo současně změřeno i pomocí GPR zapůjčeného společností G IMPULS Praha, spol, s.r.o. Získaná data ze všech měření byla zpracovaná zaměstnanci společnosti G IMPULS Praha, spol. s.r.o. a poté byla porovnána s hodnotami zjištěnými v této bakalářské práci.

REŠERŠNÍ ČÁST

2 Kolejové lože

Kolejové lože (dále jen KL) je součástí železničního svršku v klasické konstrukci koleje. Jedná se o kamenivo, které zajišťuje spolupůsobení kolejnicových podpor a kolejnic s konstrukcí železničního spodku. Tloušťka kolejového lože závisí na typu koleje a na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny pražce. U ocelových pražců se pohybuje tloušťka od 300 mm do 350 mm. [1] U pražců z předpjatého betonu se tloušťka kolejového lože provádí obvykle 350 mm nebo méně. U pražců z impregnovaného tvrdého dřeva se tloušťka provádí obvykle 300 mm nebo méně. Maximální výška kolejového lože je stanovena na 900 mm, což může nastat ve směrovém oblouku s převýšením. [1] Mezi základní požadavky na kolejové lože patří mrazuvzdornost, propustnost, stabilita, velikost zrn a elektrický odpor. [2]

2.1 Funkce kolejového lože

Jednou z hlavních funkcí kolejového lože je tlumení dynamických účinků vozidel při jízdě a roznos zatížení z kolejového roštu směrem dolů na železniční spodek. Další funkcí kolejového lože je odvádění srážkové vody z konstrukce koleje. Pokud by KL nedostatečně odvádělo srážkovou vodu, mohlo by dojít ke vzniku poruch v železničním spodku a svršku (např. vznik mrazových čoček s následkem rozpadu GPK nebo mnoho jiných typů poruch). Mohlo by tak dojít k rychlejší degradaci pražců a tím zkrácení jejich doby životnosti. [3]

Další z důležitých funkcí kolejového lože je umožnění směrové a výškové úpravy polohy koleje. KL je důležité také pro zajištění dostatečného odporu kolejového roštu proti pohybu, který je důležitý pro správnou funkci bezstykové koleje. [3]

2.2 Materiál kolejového lože

Předpokladem pro splnění výše uvedených požadavků na funkci kolejového lože, je kvalitní materiál kameniva kolejového lože. Pro KL se používá výhradně kamenivo, které je pevné, odolné proti mrazu, odolné proti otluku a musí mít správné zrnitostní složení a vhodný tvar zrn. Aby byla zrna schopna se vzájemně zakotvit a stabilizovat, kontroluje se jejich ostrohrannost. U kolejového lože je důležitá mechanická pevnost. Vyžaduje se, aby vybraný materiál měl zaručené vlastnosti po dobu životnosti stavby a aby byla zajištěna stabilita stavby, ochrana proti hluku a ochrana zdraví a životního prostředí. [3] Vlastnosti kameniva pro KL se řídí dle předpisu SŽDC S3, dílu X. [1]

Kamenivo pro KL se vyrábí v kamenolomech. Dodávat kamenivo do kolejového lože mohou pouze ti výrobci, kteří mají osvědčení o kvalitě kameniva pro KL a jejich přehled je uveden v ,,Závazném seznamu výrobců kameniva", který je k dispozici například na webových stránkách Správy železnic. Dále musí dodržovat platné OTP, mít podepsané TPD (technické podmínky dodací) a provádět předepsané zkoušky. [2] Zřizování kolejového lože je blíže popsáno v předpisu SŽ S3/1 ,,Práce na železničním svršku". [1]

Všechny tyto vlastnosti kameniva pro KL jsou dány Dílem X předpisu SŽ S3 ,Železniční svršek ve znění změny č.4, s účinností od 1.3.2021 [1] a dále jsou popsány Obecně technickými podmínkami čj. 55 110/2004-O13 Kamenivo pro kolejové lože železničních drah [4] a jsou vyžadovány pro dobré a dlouhodobě stabilní zkonsolidování a podbití kolejového lože. Používá

se výhradně hrubé, drcené, hutné kamenivo frakce 31,5/63. V závislosti na typu koleje (Tab. 1) lze použít nové kamenivo přírodní, recyklované nebo umělé kamenivo (vysokopecní struska). [2] Objemová hmotnost kameniva pro KL nesmí být menší a ani rovna 2000 kg/m^3 [3]. Stanovuje se pomocí pyknometrické metody, která je blíže popsána v normě EN 1079-6.

2.2.1 Přírodní kamenivo

Přírodní kamenivo je takové, které bylo zpracováno pouze mechanicky. [2] Vyrábí se zásadně z nenamrzavých hornin, které jsou odolné vůči povětrnostním vlivům a nebyly zasaženy zvětráváním. Pro výrobu kolejového lože je vhodnou horninou například čedič. Dále je také vhodný diorit, žula, andezit či znělec. Mezi nevhodné horniny pro výrobu kolejového lože patří břidlice nebo vápence, a to kvůli vyšší štěpnosti, která je nežádoucí u kolejového lože. Kamenivo musí odpovídat příslušnému OTP, přesněji Kamenivo pro kolejové lože železničních drah [4], které vycházejí z ČSN EN 13450. [5] Při zjišťování vhodnosti kameniva pro KL se hodnotí geometrické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, nežádoucí složky a shoda. [3]

Tab. 1: Použití třídy kameniva [5]

Koleje	Druh kameniva		
	Nové přírodní	Recyklované	Umělé
Hlavní a předjízdné koleje vybraných tratí [1)]	BI	BI [2)]	Není povoleno
Koleje 1. až 4. Řádu	min. BII	Min. BII [2)]	Není povoleno
Koleje 5. až 6. Řádu	min. C	Min. C [2)]	min. C

[1)] Platí pouze pro vybrané trati dle směrnice GŘ SŽ č. 16/2005, Zásady modernizace a optimalizace vybrané železniční sítě České republiky. [5]

[2)] Použití recyklovaného kameniva je možné pouze v trati:

- s rychlostí do 80 km/h a včetně v plném profilu KL. [5]
- s rychlostí nad 80 km/h až do rychlosti 160 km/h a včetně ve spodní části profilu a to do výšky 50 mm pod úroveň lože plochy pražců. [5]

Na tratích s traťovou rychlostí nad 160 km/h není recyklované kamenivo povoleno. [5]

Obr. 1: Přírodní kamenivo pro kolejové lože

2.2.2 Recyklované kamenivo

Recyklované kamenivo je kamenivo opakovaně použité jako KL. Jedná se o kamenivo vyčištěné a upravené buď sanačním strojem, čističkou kolejového lože nebo recyklační linkou. Toto kamenivo bylo vytěženo z kolejového lože a následně upraveno v recyklačních zařízeních podle OTP pro kamenivo kolejového lože. Recyklační zařízení mohou spravovat pouze firmy s platným ,,Osvědčením o způsobilosti k provádění recyklaci kameniva pro kolejového lože. Jsou speciální požadavky na skladování a recyklaci vytěženého kameniva. Musí být od sebe oddělena vytěžená kameniva z kolejí řádu 1. – 4. řádu a kameniva z kolejí 5. – 6. řádu. Důvodem je jejich následné zařazení do tříd jakosti. Recyklované kamenivo lze znovu použít na tratích stejného či nižšího řádu viz tabulka 1. Z hlediska vhodnosti se recyklovaného kameniva zkouší na zrnitost, tvar zrn, zaoblenost zrn, množství odplavitelných částic, množství cizorodých částic a splnění ekologické nezávadnosti. [3]

2.2.3 Umělé kamenivo

Umělé kamenivo bylo zpracováno tepelným nebo jiným způsobem, kde dochází k drcení a následnému třídění vysokopecní strusky, která má vhodné chemické složení. Tato struska vzniká jako odpad při výrobě surového železa a je následovně skladovaná. Musí splňovat ekologické požadavky na nezávadnost. Struskové kamenivo pro KL lze použít pouze od výrobců, kteří mají patřičně osvědčení. Aplikace je značně omezená. Strusku lze použít jen v kolejích 5. – 6. řádu. Na obrázku 2 je možno vidět zrno umělého kameniva pro KL. [3]

Obr. 2: Zrno umělého kameniva pro kolejové lože

2.3 Základní charakteristiky kameniva

Jedná se o požadavky na kamenivo pro KL. Základní charakteristika kameniva se dělí na dvě skupiny, a to na fyzikální vlastnosti a geometrické vlastnosti. [5]

2.3.1 Fyzikální vlastnosti

Hlavní fyzikální vlastnosti, které se u kameniva prokazují, jsou stálost kameniva, odolnost proti drcení a odolnost proti otěru. [5]

Z hlediska stálosti se u kameniva sleduje odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Zkoumá se kvůli vlastnostem kameniva v odlišných klimatických podmínkách, do kterých se bude umisťovat. Zkouška je popsána v normě EN 1367-1. [5]

Dále se z hlediska stálosti u kameniva sleduje nasákavost a současně s ní se měří objemová hmotnost zrn kameniva. Blíže popsáno v normě EN 1079-6. Sleduje se i rozpadavost, což znamená, že hornina ztrácí pevnost a rozpadá se na menší části. Po prozkoumání horniny a zjištění pochybností a možné rozpadavosti horniny se provádí kvalitativní zkoušky dle normy EN 1367-3. [5]

Odolnost proti drcení je další z fyzikálních vlastností, která se zkoumá u kameniva pro KL. Pro stanovení odolnosti kameniva proti drcení se používá zkouška Los Angeles, kde výstupem z ní je výsledný součinitel LA_{RB}, který se stanoví na základě podmínek uvedených v ČSN 13450. Někdy je požadována i hodnota součinitele odolnosti kameniva proti drcení v rázu, která se značí SZ_{RB}. V normě ČSN 13450 jsou pro oba součinitele na základě maximální přípustné hodnoty, stanoveny příslušné kategorie, do kterých spadají. [5]

Další důležitá fyzikální vlastnost kameniva, která je zkoumána, je odolnost proti otěru. Měří se otěr kameniva a výstupem je součinitel mikro-Deval $M_{DE}RB$. Nižší hodnota součinitele značí lepší odolnost proti otěru. Popis zkoušky je popsán v normě ČSN 13450. [5]

2.3.2 Geometrické vlastnosti

Důležité geometrické vlastnosti u kameniva pro KL jsou frakce, zrnitost, obsah jemných částic, obsah drobných zrn a tvar zrn. [5]

Vhodná frakce kameniva pro KL stanovená dle předpisu SŽ S3 je 31,5/63. Jemné částice vyskytující se v kolejovém loži se stanoví prosévací mokrou zkouškou. Drobná zrna se zjišťují obdobným způsobem, a to prosévací zkouškou za sucha. Maximální obsah drobného kameniva je blíže specifikován v normě EN 933-1. Dále se zjišťuje tvar a délka zrna a index plochosti. [5]

Zrnitost kameniva je další důležitá geometrická vlastnost a vyjadřuje se za pomoci křivky zrnitosti. Blíže je popsána v kapitole 2.4.1. [5]

2.4 Popis zkoušek kameniva

Pro zjištění výše uvedených vlastností kameniva se musí provést příslušné zkoušky. Jejich výstupní hodnoty je nutno pro zjištění splnění podmínek porovnat a zařadit dle normy ČSN EN 13450. [5] Nejvíce ale záleží na podmínkách smlouvy, která je uzavřena mezi investorem a zhotovitelem stavby, kde je přímo napsáno, podle čeho se mají řídit při vyhodnocování kameniva. Normy jsou převážně jen doporučené, a tudíž záleží na tom, co je obsahem smlouvy, zda se řídit dle norem či OTP [4], které jsou obecně přísnější. Správa železnic pro tyto zkoušky kameniva používá nejčastěji předpis SŽ S3 [1]. Z hlediska recyklace považujeme za důležité zkoušky sítový rozbor, tvarový index, index plochosti a zaoblenosti hran. Další vlastnosti kameniva, které nás zajímají, jsou vlhkost, sypná a setřesená hmotnost a objemová hmotnost. Níže jsou popsány základní postupy zkoušek, které jsou přesně stanoveny v normě ČSN EN 933. [5]

2.4.1 Sítový rozbor

Sítový rozbor je základní laboratorní zkouška pro zjištění granulometrických vlastností kameniva kolejového lože s cílem stanovit křivku zrnitosti. Provádí se normou stanovená minimální navážka, která je dle příslušného postupu proseta definovanou sadou sít. Po prosetí se zváží jednotlivé propady na sítech a z výsledných hodnot se zpracuje křivka zrnitosti. Postup zkoušky je přesněji popsán v normě ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1 – Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. [6] Velikosti a požadavky na použitelná síta jsou stanoveny v normě ČSN EN 933-2 Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 2 – Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů. [7]

Nejprve se připraví příslušná zkušební navážka viz tabulka 2. Po určení zkušební navážky a jejím připravení se navážka vloží do předehřáté trouby na 110°C ± 5°C a nechá se zde sušit do ustálení své hmotnosti. Po vysušení se zváží a výsledek se zapíše jako M_1. [6]

Tab. 2: Minimální velikost zkušebních navážek [6]

Velikost kameniva *D* (maximum) mm	**Hmotnost kameniva** kg	**Objem pórovitého kameniva** litrů
90	80	–
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

Vysušené kamenivo o hmotnosti M_1 se vloží do předem připravené nádoby s vodou tak, aby bylo zcela pod vodou, a ponechá se zde po dobu 24 hodin namáčet. Vzorek se dostatečně promíchá. Cílem je, aby se dosáhlo oddělení jemných částic od kameniva. [6]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Po 24 hodinách namáčení se vzorek vyjme a postupně se promyje na sítech 0,063 mm a ochranném sítu 2 mm. Před započetím se namočí obě strany sít a smontují se dohromady. Poté se vloží navážka na síto 2 mm a prosévá se pomocí vody tak dlouho, dokud ze zpod síta 0,063 mm nevytéká čistá voda. Tím se pozná, že se kamenivo zbavilo zbytku jemných částic. Zbytek na sítu 0,063 mm se nechá vysušit v předehřáté troubě na 110°C ± 5°C. Po jeho vysušení se zváží a zaznamená jako hodnota M_2. [6]

Dalším krokem je prosévání. Připraví se zkušební síta dle normy ČSN EN 933-2 Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 2 – Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů. [7] Připraví se i síto 0,063 mm a dno, jelikož se nejspíš nezbavilo všech jemných částic. Dále se mechanicky či ručně třese se síty. Musí se předejít možnému přetížení sít, které je blíže popsáno v normě ČSN EN 933-1 [6]. Jednotlivá síta se po prosetí rozeberou a propady na nich se zváží a zapíší. První hmotnost na prvním odebraném sítě se zapíše jako R_1, na druhém R_2 a tak dále. Pokud bude na dně nějaký propad, tak se zváží a zaznamená jako P.

Pro zjištění procenta jemných částic *f* propadlých sítem 0,063 mm se použije vzorec [6]:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \cdot 100 \quad (1)$$

M_1 suchá hmotnost zkušební navážky v kg

M_2 suchá hmotnost zbytku zachyceného na sítě 0,063 mm v kg

P hmotnost vytříděného materiálu zbylého na dně v kg

Pokud se součet hmotností R_i a P liší od hmotnosti M_2 o více jak 1 %, tak se celá zkouška musí opakovat. [6]

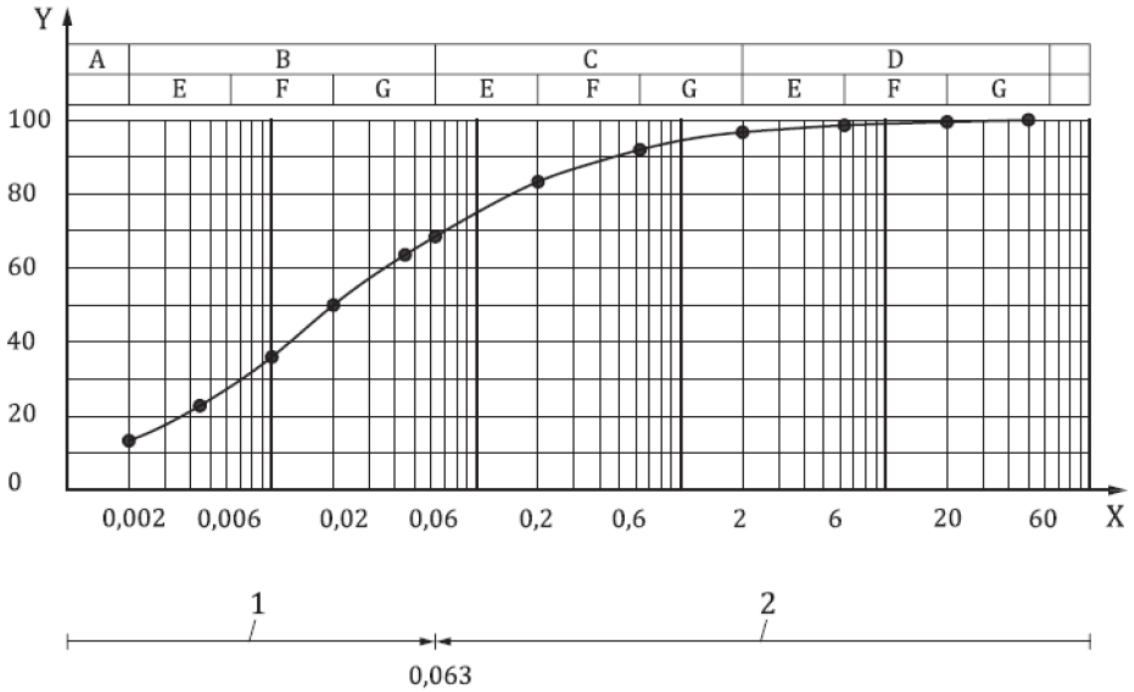
Pokračuje se vyhodnocením zrnitosti kameniva dle platné normy ČN EN 13450 [5] a dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o., Kamenivo pro kolejové lože železničních drah a účinností od 1. ledna 2021. [4]

Křivka zrnitosti

Křivka zrnitosti graficky vyjadřuje zastoupení jednotlivých frakcí ve vzorku kameniva. Určí se výše uvedenou prosévací zkouškou. [5]

Frakce je množina zrn kameniva, které propadnou horním sítem (*D*) a zachytí se na spodním sítu (*d*). Označení frakce je *d/D*. Pro KL je požadovaná frakce 31,5/63. Kamenivo musí být v dané frakci zastoupeno v určitém množství, aby mohlo být použito jako kamenivo pro KL, které je blíže specifikováno níže v tabulce 3 z normy ČN EN 13450 [5], kategorie pro zrnitost, viz tabulka 3. Dále je popsáno v OTP jako kamenivo pro KL. [5]

Ve výsledku stanovení křivky zrnitosti je vidět graficky podíl různých frakcí zrn kameniva, ze kterých se měřený materiál skládá, viz Obrázek 4. Je zde i vidět, jakým způsobem se zjistí dané frakce. Pod sítem 0,063 mm se tyto velmi jemné částice zjistí pomocí sedimentace a vše nad sítem 0,063 se zjistí pomocí prosévací zkoušky. Dále jsou rozděleny typy zemin podle velikosti zrn od A, což jsou jíly až po G, což jsou hrubozrnné zeminy. Na svislé ose je vyznačen procentuální propad a na vodorovné ose je označena velikost zrn v milimetrech. [8]



Obr. 3: Ukázka výsledku stanovení křivky zrnitosti [8]

1	Sedimentace	E	jemnozrnný
2	Prosévání	F	střednězrnný
A	Jíl	G	hrubozrnný
B	Prach	X	velikost zrn [mm]
C	Písek	Y	procentuální propad [%]
D	Štěrk		

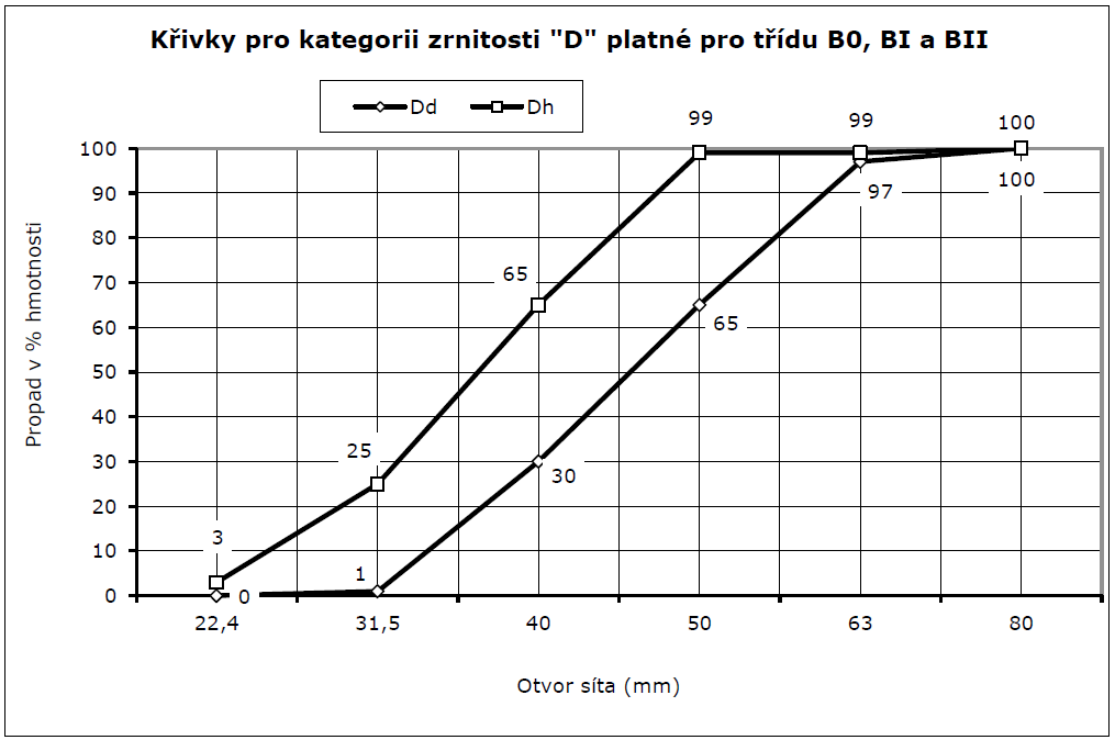
Tab. 3: Kategorie pro zrnitost [5]

Velikost síta mm	Frakce kameniva pro kolejové lože 31,5 mm až 50 mm			Frakce kameniva pro kolejové lože 31,5 mm až 63 mm		
	Propad v procentech hmotnosti					
	Kategorie zrnitosti					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97 až 100	95 až 100	97 až 99	95 až 99	93 až 99
50	70 až 99	70 až 99	70 až 99	65 až 99	55 až 99	45 až 70
40	30 až 65	30 až 70	25 až 75	30 až 65	25 až 75	15 až 40
31,5	1 až 25	1 až 25	1 až 25	1 až 25	1 až 25	0 až 7
22,4	0 až 3	0 až 3	0 až 3	0 až 3	0 až 3	0 až 7
31,5 až 50	≥ 50	≥ 50	≥ 50	–	–	–
31,5 až 63	–	–	–	≥ 50	≥ 50	≥ 50

POZNÁMKA 1 Požadavek pro propad sítem 22,4 mm se použije pro kamenivo pro kolejové lože odebrané v místě výroby.

POZNÁMKA 2 V některých případech se může použít síto 25 mm místo síta 22,4 mm, použijí-li se tolerance 0 až 5 mm (0 až 7 mm pro kategorii F).

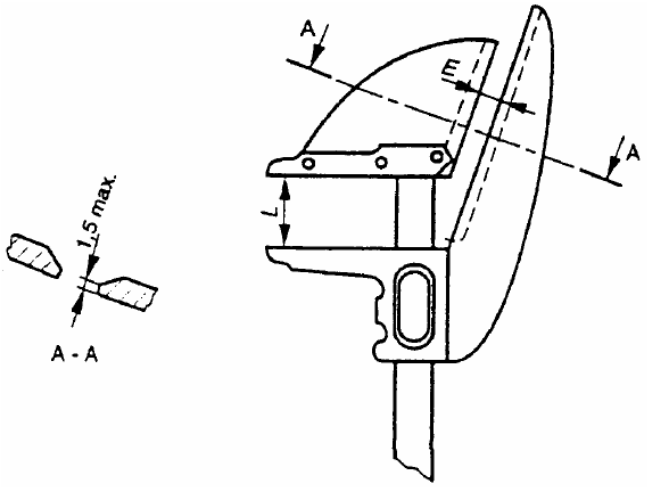
Uvedené kategorie pro zrnitost v tabulce 3 určují jisté hranice, z jakých frakcí by se mělo kamenivo dané zrnitosti pro kolejové lože skládat. Níže je vyobrazena křivka zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o., Kamenivo pro kolejové lože železničních drah a účinností od 1. ledna 2021. [4]



Obr. 4: Křivka zrnitosti kameniva-platné kategorie “D“ pro třídu B0, BI, BII [4]

2.4.2 Tvarový index

Tvarový index je typ zkoušky k roztřídění zrn na základě poměru nejdelšího rozměru k nejmenšímu. Jedná se o měřenou délku *L* k tloušťce *E* a to za pomoci dvoučelisťového posuvného měřítka, které je zobrazeno níže na obrázku 5. „*Tvarový index se vypočte jako hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr rozměrů L/E je větší než 3 a vyjádří jako procento celkové hmotnosti zkoušených zrn.“* [9] Stanovuje se i průměrný tvarový index a to tak, že se udělá aritmetický průměr všech tvarových indexů zrn. Detailněji je postup zkoušky popsán v normě ČSN EN 933-4, Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. [9]



Obr. 5: Příklad dvoučelisťového posuvného měřítka (rozměry v milimetrech) [9]

Prvně se připraví zkušební navážka dle náležitostí, které jsou ve výše uvedené normě ČSN EN 933-4. [9] Ta dále závisí na velikosti horního síta *D*. Níže, viz tabulka 4, jsou uvedeny hmotnosti zkušebních navážek v závislosti na velikosti horního zrna *D*. Změří se zrna pomocí dvoučelisťového posuvného měřítka, kde se prvně změří rozměr *L*, který představuje delší stranu zrna a poté se zkouší, zda zrno projde druhou čelistí, která má třetinovou velikost a označuje se jako rozměr *E*. Pokud zrno neprojde, jedná se o kubické zrno a pokud projde, tak se jedná o nekubické zrno. Na konci měření se sečte hmotnost všech nekubických zrn. Značí se M_2. [9]

Tab. 4: Hmotnost zkušebních navážek [9]

Horní velikost zrna *D* mm	Hmotnost zkušební navážky (nejmenší) kg
63	45
32	6
16	1
8	0,1

Následně se spočítá tvarový index *SI* za pomoci vzorce [9]:

$$SI = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100 \qquad (2)$$

SI tvarový index [%]

M_1 hmotnost zkušební navážky [g]

M_2 hmotnost nekubických zrn [g]

Výsledek je patřičně zaokrouhlen a dále porovnáván s kategoriemi pro maximální hodnoty tvarového indexu a zatříděn viz tabulka 5.

Tab. 5: Kategorie pro maximální hodnoty tvarového indexu [5]

Tvarový index	Kategorie *SI*
≤ 10	SI_{10}
≤ 20	SI_{20}
≤ 30	SI_{30}
5 až 30	$SI_{5/30}$
> 30	$SI_{Deklarovaná}$
Bez požadavku	SI_{NR}

2.4.3 Index plochosti

Index plochosti je typ zkoušky, díky které jsme schopni zjistit tvar zrn pro kolejové lože. Dále musí být index plochosti deklarován dle požadované kategorie viz tabulka 6. Postup a detaily zkoušky jsou popsány v normě ČSN EN 933-3, Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 3: Stanovení tvaru zrn – Index plochosti. [10]

Tab. 6: Kategorie pro maximální hodnoty indexu plochosti [5]

Index plochosti	Kategorie *FI*
≤ 15	FI_{15}
≤ 20	FI_{20}
≤ 35	FI_{35}
> 35	$FI_{Deklarovaná}$
Bez požadavku	FI_{NR}

Index plochosti se obecně určuje u kameniva od 4 mm do 80 mm. Jedná se hlavně o těžené a drcené kamenivo, ale v případě kolejového lože není nutné provádět zkoušku v plném rozsahu sít. [10]

Před započetím zkoušky indexu plochosti je vhodné provést sítový rozbor k oddělení frakcí a urychlení zkoušky. Po dokončení sítového rozboru a rozdělení na dílčí frakce se oddělí frakce nadsítné a podsítné frakce 31,5/63. Zváží se celková hmotnost M_1. Poté je každá frakce proseta příslušnými tyčovými síty pro danou frakci dle rozměrů viz tabulka 7.

Tab. 7: Tyčová síta odpovídajících frakcí a velikost jejich mezer [10]

Zrnitostní podíl d_i/D_i mm	**Šířka mezery tyčového síta** mm
80/100	50 ± 0,5
63/80	40 ± 0,5
50/63	31,5 ± 0,5
40/50	25 ± 0,4
31,5/40	20 ± 0,4
25/31,5	16 ± 0,4
20/25	12,5 ± 0,4
16/20	10 ± 0,2
12,5/16	8 ± 0,2
10/12,5	6,3 ± 0,2
8/10	5 ± 0,2
6,3/8	4 ± 0,15
5/6,3	3,15 ± 0,15
4/5	2,5 ± 0,15

Prosévání kameniva danými síty probíhá ručně. Výsledné kamenivo propadlé dílčím sítem je následně zváženo a popsáno jako hmotnost M_2. [10]

Následně se spočítá celkový index plochosti FI pomocí vzorce [10]:

$$FI = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100 \tag{3}$$

FI index plochosti [%]

M_1 součet hmotnosti jednotlivých frakcí [g]

M_2 součet hmotnosti zrn propadlých jednotlivými síty [g]

2.4.4 Zaoblenost hran

Zaoblenost hran se provádí dle platných Obecných technických podmínek Správy železnic s.o., Kamenivo pro kolejové lože železničních drah a účinností od 1. ledna 2021 [4], příloha F.

Odběr vzorku je v souladu s ČSN EN 932-1 a poté zmenšen dle ČSN EN 932-2. Jeho minimální hmotnost je 20 kg. Navážený vzorek se nechá volně proschnout a poté se proséváním na sítě o velikosti 4 mm zbaví drobnějších zrn. Výsledný vzorek, který je podroben zkoušce musí mít minimálně 300 zrn, které je dále nutno očistit od jemných částic. [4]

Zaoblenost hran je odstupňovaná dle zaoblenosti kameniva viz tabulka 8.

Tab. 8: Stupnice zaoblenosti hran zrn kameniva [4]

ZAOBLENOST	STUPEŇ	POPIS
zrna bez zaoblenosti	ostrohranná zrna	angulární, zcela neopracovaná zrna s ostrými řezavými hranami
zrna s 25% zaobleností	otupená zrna	subangulární, málo opracovaná zrna, ještě úplně zachovaného, původního tvaru, s hranami a rohy jen otupenými, neřezavými
zrna s 50% zaobleností	polozaoblená zrna	zrno s lehce zaoblenými hranami a ještě s patrnými nezaoblenými úseky původního povrchu
zrna s 75% zaobleností	zaoblená zrna	hodně opracovaná zrna s pouhými stopami původního tvaru
zrna s 100% zaobleností	oblá zrna	oblázky velmi dobře zaoblené, plně opracovaného tvaru

Jednotlivá zrna se zařadí do příslušných stupňů zaoblenosti. Po jejich zařazení se stanoví hodnota zaoblenosti hran kameniva. Ta se stanoví jako aritmetický průměr hodnot jednotlivých stupňů dle vzorce pro zaoblenost:

$$\text{Zaoblenost} = (25\ x\ n_{25} + 50\ x\ n_{50} + 75\ x\ n_{75} + 100\ x\ n_{100}) \cdot 1/N \quad [\%\ \text{kusů zrn}] \quad (4)$$

$n_{25}, n_{50}, n_{75}, n_{100}$ počty zrn kameniva v roztřídění

N součet všech těchto rozlišovaných zrn

2.4.5 Vlhkost

Zkouška na zjištění vlhkosti kameniva *W* se provádí dle platné normy ČSN EN ISO 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky Zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti. [11]

Před započetím zkoušky se připraví zkušební vzorek. Zkušební vzorek má být skladován v nekorodujících vzduchotěsných nádobách a při teplotě od 3°C do 30°C. Musí být chráněn před slunečním zářením, lokálním zdrojem tepla či odvětrávání. Stanovení vlhkosti se doporučuje co nejdříve po odebrání vzorku. [11]

Odběr vzorku pro zkoušku musí být proveden až po řádné homogenizaci celého objemu zeminy. V normě ČSN EN ISO 17892-1 jsou doporučené minimální hodnoty pro odebraný vzorek viz tabulka 9.

Tab. 9: Doporučená minimální hmotnost zkušebního vzorku [11]

Průměr zrna D_{max}[a] mm	**Doporučená minimální hmotnost zkušebního vzorku o přirozené vlhkosti**[b] g
0,063	30
2,0	100
10,0	500
31,5	3 000
63,0	21 000

[a] Maximální průměr zrn zeminy s vyloučením ojedinělých hrubších zrn.

[b] Při stanovování vlhkosti na zkušebním vzorku o hmotnosti menší, než minimální hmotnost výše uvedená, se musí postupovat obezřetně, i když tato hmotnost může být pro účely zkoušky dostačující. Tato skutečnost má být uvedena v závěrečném protokolu. Při práci se zkušebním vzorkem o nízké hmotnosti, obsahujícím velké hrubozrnné částice, je vhodné tato hrubá zrna do zkušebního vzorku nezařazovat. Jestliže se tak stane, pak by to opět mělo být uvedeno v závěrečném protokolu.

Na začátku zkoušky se zváží hmotnost nádoby a zapíše se jako hmotnost m_{c1}. Vzorek se vloží do čisté suché nádoby o nám již známé hmotnosti m_{c1}. Zváží se celá nádoba se vzorkem a její hmotnost se zapíše jako m_1. Vloží se do sušárny s teplotou 105°C až 110°C a nechá se zde sušit až do ustálení své hmotnosti. Po dosažení ustálené hmotnosti se nádoba se vzorkem vyjme a zváží se. Stanovená hmotnost se označí jako hmotnost m_2.

Vlhkost zeminy se vypočítá po dosazení známých hodnot do vzorce [11]:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_1} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \qquad (5)$$

W vlhkost zeminy [%]

m_1 hmotnost vysoušecí nádoby a vlhkého zkušebního vzorku [g]

m_2 hmotnost vysoušecí nádoby a suchého zkušebního vzorku [g]

m_c hmotnost vysoušecí nádoby [g]

m_w hmotnost odsušené vody [g]

m_d hmotnost vysušeného zkušebního vzorku [g]

Dále je dobré stanovit i reálnou vlhkost w_{fl} a to tehdy, pokud zkušební vzorek obsahuje například mořské sedimenty, které obsahují soli. Ty totiž mohou ovlivnit hmotnost zkušebního vzorku díky rozpuštění pevných látek v pórové vodě. [11]

Pokud je hmotnostní poměr solí v pórové vodě známý [11]:

$$W_{fl} = \frac{1000 \cdot W}{1000 - \rho \cdot (1 + W/100)} \qquad (6)$$

W stanovená vlhkost [%]

P salinita [mg solí/g vody]

W_{fl} reálná vlhkost [%]

Pokud není hmotnostní poměr solí v pórové vodě známý [11]:

$$W_{fl} = \frac{1000 \cdot W}{1000 - (q/\rho_{fl}) \cdot (1+W/100)} \quad (7)$$

W stanovená vlhkost [%]

P salinita [mg solí / g vody]

W_{fl} reálná vlhkost [%]

ρ_{fl} hustota vody [Mg.m^{-3}]

2.4.6 Objemová hmotnost zrn a nasákavost

Zkouška objemové hmotnosti musí být v souladu s normou ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti [12].

Prvně se připraví navážka, která bude vložena do pyknometru s vodou o teplotě 22°C (±3°C) po dobu 24 hodin. Poté se pyknometr protřepe, aby se odstranil přebytečný vzduch. Po uplynutí 24 hodin se pyknometr s nasáklým materiálem a vodou zváží a zaznamená jako hmotnost M_2. Po zvážení se zaznamená teplota vody. [12]

Dále se vyjme materiál z pyknometru a povrchově se osuší. Osušený materiál se zváží a zaznamená jako hmotnost M_1. [12]

Poté si naplníme pyknometr vodou o shodné teplotě vody, jako byla použita při předešlém vážení. Hmotnost pyknometru s vodou naplněného do stejné výšky, jako byl předtím s kamenivem, zaznamenáme jako hmotnost M_3. [12]

Materiál se dále vloží do sušárny, kde se vysuší při 110°C ± 5°C do ustálení hmotnosti. Poté se nechá ochladit na pokojovou teplotu a zváží se. Zvážená hmotnost se zapíše a označí jako M_4. [12]

Vypočítá se objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených dle vzorce [12]:

$$\rho_{ssd} = \rho_W \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (8)$$

Dále se může vypočítat objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně dle vzorce [12]:

$$\rho_{rd} = \rho_W \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (9)$$

Nasákavost po 24 hodinách ponoření do vody se spočte pomocí vzorce [12]:

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (10)$$

ρ_{ssd} objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených [Mg.m^{-3}]

ρ_{rd} objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených [Mg.m^{-3}]

ρ_w hustota vody při teplotě zaznamenané při stanovení M_2 [Mg.m^{-3}]

M_1 hmotnost zkušební navážky nasáklé a povrchově osušené na vzduchu [g]

M_2 hmotnost pyknometru obsahující zkušební navážku a vodu [g]

M_3 hmotnost pyknometru s vodou [g]

M_4 hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky [g]

WA_{24} nasákavost po 24 hodinách ponoření do vody [%]

Všechny hodnoty objemové hmotnosti se vyjádří s přesností 0,01 $Mg.m^{-3}$ a nasákavost s přesností 0,1 %.

2.4.7 Sypná a setřesená hmotnost

Zkouška pro sypnou hmotnost a setřesenou hmotnost musí být v souladu s ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva [13].

Pro zkoušku se použije vodotěsná válcová nádoba z nerezavějícího kovu. Nádoba musí mít poměr vnitřního průměru k vnitřní výšce mezi 0,5 a 0,8. Objem nádoby pro příslušné kamenivo je stanoven níže, viz tabulka 10.

Tab. 10: Nejmenší objem nádoby v závislosti na zrnění kameniva [13]

Horní zrno kameniva *(D)* mm	Objem l
Do 4	1,0
Do 16	5,0
Do 31,5	10
Do 63	20

Připraví se tři dílčí navážky v souladu s EN 932-2. Vzorky se vysuší v sušárně při 110°C ± 5°C do ustálené hmotnosti. Dílčí navážky musí mít 120 % až 150 % hmotnosti, která je potřeba pro naplnění nádoby. [13]

Zváží se čistá a suchá nádoba a její hmotnost se zapíše jako m_1. Naplní se nádoba pomocí lopatky. Přebytek se opatrně sejme a zarovná se pravítkem tak, aby byl objem kameniva stejný jako objem nádoby, přičemž je důležité, aby nedošlo k segregaci. Zváží se hmotnost naplněné nádoby a označí jako hmotnost m_2. Provede se pro všechny tři navážky. [13]

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva se vypočte pro každou navážku dle vzorce [13]:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \tag{11}$$

ρ_b sypná hmotnost volně sypaného kameniva [Mg/m^3]

m_1 hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg]

V objem nádoby [v litrech]

Vypočte se pro všechny tři navážky a výsledná sypná hmotnost volně sypaného kameniva se určí jako aritmetický průměr všech tří hodnot. U hrubého kameniva se zaokrouhlí na dvě desetinná místa. [13]

2.4.8 Mezerovitost

Pro zjištění mezerovitosti je nejprve třeba znát objemovou hmotnost zrn kameniva, jejíž postup je popsán v kapitole 2.4.6. *Objemová hmotnost zrn a nasákavost* a blíže specifikován v normě ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti [12], příloha B.

Dále je nutno znát sypnou hmotnost volně sypaného kameniva. Postup stanovení je popsán v kapitole 2.4.7. *Sypná a setřesená hmotnost* a blíže specifikován v normě ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva [13].

Po zjištění těchto hodnot se vypočítá mezerovitost pomocí vzorce [13]:

$$V = \frac{\rho_{rd} - \rho_b}{\rho_{rd}} \cdot 100 \qquad (12)$$

V mezerovitost [%]

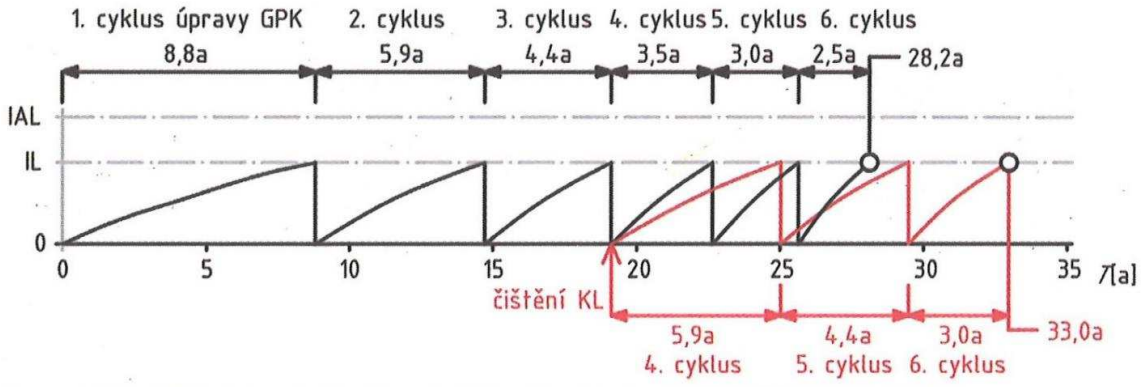
ρ_b sypná hmotnost volně sypaného kameniva [Mg.m^{-3}]

ρ_{rd} objemová hmotnost zrn kameniva vysušených v sušárně nebo předsušených [Mg.m^{-3}]

3 Technologie čištění kolejového lože

Čištění kolejového lože patří mezi běžné údržbové práce konstrukce železničního svršku. V důsledku provozu na dráze, klimatických podmínek a dalších okolních vlivů dochází k degradaci kolejového lože. Původní frakce 31,5/63 je znečištěna drobnými nečistotami, které způsobují zmenšení propustnosti kolejového lože, tudíž dochází ke snížení funkce odvodnění. Dále se zde vyskytuje také problém s pružností štěrkového lože v důsledku znečištění a tím i stabilita GPK. Dále dochází ke zhoršení útlumu kolejového lože absencí pružnosti, což se projevuje nárůstem vibrací, ale i výskytem vyšší hladiny hluku. Cílem čištění kolejového lože je odstranění drobných částic z kolejového lože tak, aby byla navrácena propustnost a pružnost kolejového lože a aby se dosáhlo předepsané tloušťky. [14]

Vhodná doba k recyklaci kolejového lože je v době, kdy podíl jemnozrnných částic, což jsou částice do průměru 22,4 mm, dosáhne 30 % z celkového objemu KL. Z důvodu hospodárnosti je snaha shodovat se s úpravou GPK. Než dojde k obnově železničního svršku, tak většinou proběhne 6 až 10 cyklů úpravy GPK a 1 až 2 cykly čištění KL. Cílem je se životností KL přiblížit co nejvíce k životnosti kolejového roštu, viz obrázek 6. [14]



Obr. 6: Schématické znázornění cyklů čištění kolejového lože [14]

3.1 Strojní čistička kolejového lože

Nejběžnější, nejmodernější a nejrychlejší technologie k čištění kolejového lože je za pomoci strojní čističky kolejového lože. [15]

Před zahájením práce strojní čističky KL je nutné provést přípravné práce, které jsou důležité pro správný proces čističky. Kontroluje se například celistvost pražců, kvůli možnému odpadnutí části pražce a následnému zastavení čištění strojní čističky. Dotahují se upevňovadla, v některých případech je za potřebí jejich úplná výměna. Dále je nutné posoudit stav kolejnic, zda jsou vyhovující. Případně se odstraní lomy a vady na nich. Poté dochází ke kontrole styků a svarů. [14]

Jednou z dalších důležitých činností je průzkum polohy možných překážek pro strojní čističku KL. Jedná se o polohu kabelů či kabelovodů, nástupištní desky a zídky. Pokud by se nějaké takové překážky nalezly, tak je nutné je přeložit, odsunout či demontovat tak, aby nedošlo k jejich poškození. Pokud to není možné, kolejové lože je třeba těžit a vyměnit silniční mechanizací. Dále je nutné před započetím práce strojní čističky demontovat ukolejnění, pražcové kotvy, pojistné úhelníky a prvky zabezpečovacího zařízení a také stanovit hloubku čištění KL včetně sklonu pláně železničního spodku. [14]

Technologický postup prací většinou vypracovává zhotovitel, pokud není ve smlouvě uvedeno jinak. Objednatel musí odsouhlasit před započetím prací v dostatečném předstihu. Dále se musí vybrat vhodná strojní čistička, jelikož zejména u těch výkonnějších, je problém s průjezdem oblouků s menším poloměrem. Volba strojní čističky KL dále záleží na její dostupnosti, jelikož se jedná o velmi nákladnou záležitost, tudíž si ji firmy většinou pronajímají. Dále je důležité při průzkumu vyhodnotit, zda se vyplatí více výkonnější strojní čistička, či nikoli. Většinou na delších tratích s oblouky o větších poloměrech se vyplatí výkonnější strojní čistička KL, která může mít i doplňkové funkce jako je úprava ostrohrannosti či dynamický stabilizátor a to i za cenu vyšších nákladů. [14] Na obrázku 9 je vyobrazena strojní čistička kolejového lože RM 900 VB společnosti STRABAG Rail a.s. Výrobcem čističky je Plasser & Theurer. [16]

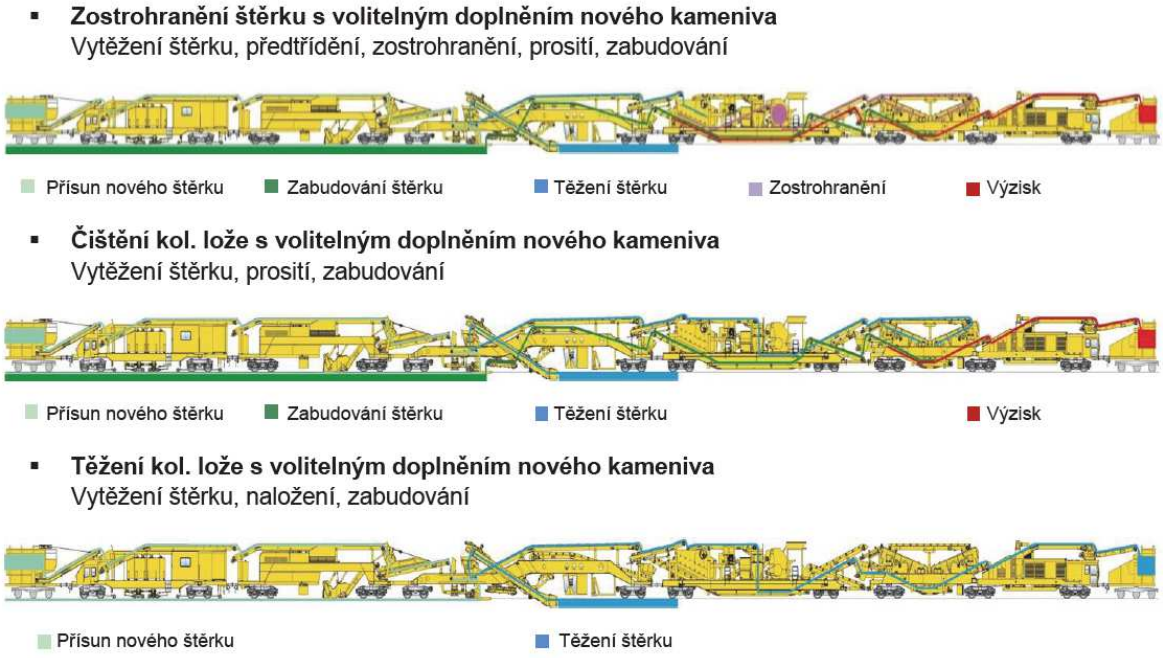
Obr. 7: Strojní čistička kolejového lože RM 900 VB [15]

Díky své konstrukci umožňuje různé pracovní postupy při obnově kolejového lože. Je schopna KL čistit, recyklovat, a i do vytěženého štěrkového lože doplnit nový štěrk. Díky prosévacímu výkonu až 900 m^3/h a rychlosti při práci až 400 m/h, kdy je plynule regulovatelná, je možné ji nasadit i do kratších výluk, a to při stále velmi vysoké kvalitě čištění. Výkon strojní čističky nejvíce záleží na stavu kolejového lože, hloubce těžení a na sklonu a směru jízdy. Vyobrazený model strojní čističky kolejového lože je dále schopný vložit geotextilii na pláň tělesa železničního spodku, stabilizovat a vyrovnávat zemní pláň. Je vybaven přesnějším automatickým zdvihem pro uložení kolejového roštu. [16]

Čištění nebo recyklace štěrku probíhá tak, že se zachytí materiál z kolejového lože, který je určený k vyčištění a pomocí tří-prstého těžebního řetězu se vytěží. Je dopravován pomocí dopravníku k prvnímu odlučovači v sítovém zařízení. Následuje doprava zbylého předtříděného štěrku do nárazového drtiče, kde se oddělí nehomogenní částice a využitelná část štěrku se přiostří. Tento již dvakrát zpracovaný štěrk se dopraví do hlavní třídící jednotky, kde se oddělí nadsítná a podsítná frakce od štěrku, který je vhodný k recyklaci. Odpad ze sít se dopravuje za pomoci dopravníku do vozů MFS na čele stroje. Použitelný štěrk se dopravuje přes dopravník a zaštěrkovací pásy zpět do koleje. Může být libovolně doplňován novým štěrkem z MFS vozů, když je znečištění recyklovaného štěrku velké. [17]

Mezi další pracovní postupy strojní čističky kolejového lože patří vytěžení starého štěrku a vkládání nového štěrku a dále kompletní vytěžení kolejového lože bez doplňujícího dodání nového štěrku. Na obrázku 8 je grafické znázornění pracovních postupů strojní čističky kolejového lože. [15]

Pracovní postupy:



Obr. 8: Grafické znázornění pracovních postupu strojní čističky kolejového lože [15]

Uvedení tratě do provozu po pracích, které měly vliv na polohu a stabilitu železničního svršku, musí být zajištěno měření GPK za pomoci schváleného měřícího zařízení s kontinuálním záznamem. Vše musí proběhnout dle požadavků z předpisu SŽ S3/1 [1]. S ohledem na typ trati, traťovou rychlost, charakter prací a materiál železničního svršku, musí být pro přejímku prací posouzeny odchylky v GPK a porovnány s limitními hodnotami. [17]

3.2 Recyklační základna

Při recyklaci kolejového lože na recyklační základně musí být použito určité minimální množství vytěženého KL, jinak tento proces není efektivní. Toto množství se většinou pohybuje někde mezi 4000 t až 5000 t. Velikost recyklační základny je závislá na množství materiálu ke zpracování, ale obvykle se uvažuje 3000 m^2 a více. Pro místo na její zřízení musí být zajištěné příslušné povolení s ohledem na životní prostředí, hluk, prach a vzdálenost od místa stavby. Jedna mobilní recyklační linka má průměrnou kapacitu mezi 500-800 t/den. Největším limitujícím prvek pro vyšší výkon mobilní recyklační linky je výkon drtiče. Dalším, částečně limitujícím prvkem, je schopnost nakladače na vstupu, tak i na výstupu při deponování výstupních frakcí. [14]

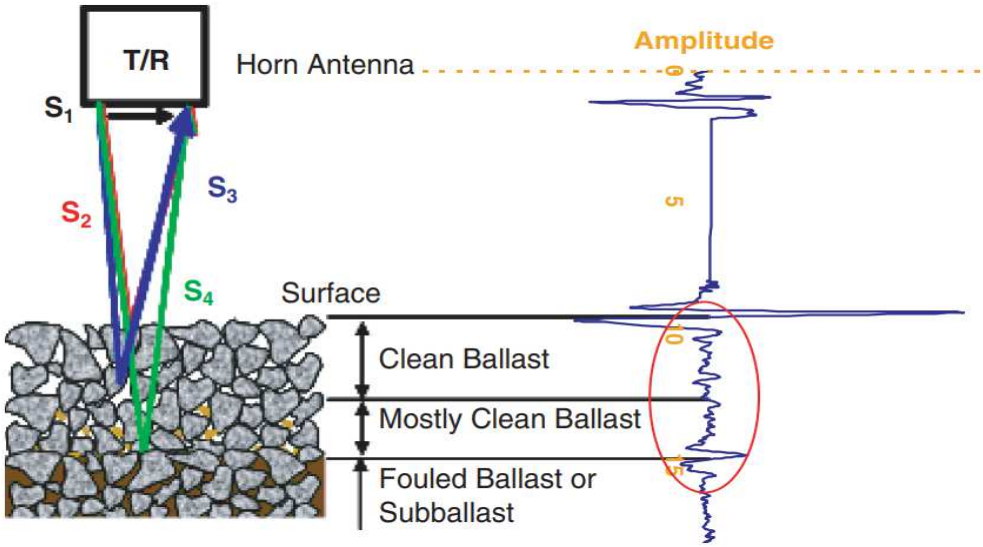
Mobilní recyklační linka pro kolejové lože je tvořena sítovým třídičem s drtičem, kde je materiál na vstupu zbaven jemné frakce, která je běžně 0/20 mm. Magnetický separátor odstraní ocelové prvky na konci první fáze. V první části druhé fáze dochází k drcení materiálu na požadovanou frakci 0/32 nebo 0/32 a 32/63 a následně se roztřídí. Následně putují od třídiče pomocí pásů s tenzními váhami do nakladače. Tenzní váhy slouží k zjištění vyprodukovaného množství dané frakce. Mobilní recyklační základna musí mít zajištěný přístup k vodě, jelikož zde musí být zajištěno skrápění materiálu vodou z důvodu ochrany ovzduší. [14]

4 Historie GPR

GPR se v praxi využívá už více než 40 let. Dříve se používal zejména za účelem nedestruktivního zjištění toho, co se nachází pod povrchem bez jeho porušení. Dále se používá k nalezení a detekci inženýrských sítí, výztuže betonu, ale i třeba pohřbených těl. Dnes se běžně používá ke kontrole dopravní infrastruktury, například posouzení stavu betonových mostovek. U zahraničních správců tratí se GPR používá k zjištění a diagnostice znečištění KL a v budoucnu by jeho nasazení na stanovení znečištění KL mohlo být realizováno i u Správy železnic, kde se v současnosti využívá k monitoringu železničního spodku.

4.1 Princip GPR

V současné době jsou dostupné různé typy GPR systémů, které se liší svou aplikací. Mezi ty základní patří frekvenčně modulovaný GPR, syntetický GPR, stupňovaný frekvenční GPR, syntetický aperturní GPR a impulzní či pulzní GPR. Pro železnici se nejčastěji využívají právě impulsní systémy, které vysílají krátké elektromagnetické impulsy (dále jen EM impulsy) a přijímají odražené impulsy vhodným přijímačem. Na obrázku 9 je vidět pohyb EM impulsů při měření GPR. Signál S_2 je signál zachycující povrch KL. Signál S3 měří vzduchové mezery v kamenivu. Rozhraní mezivrstvy či rozhraní mezi čistým a znečištěným kamenivem zachycuje signál S4. Jako poslední je zde signál S1, který je vysílám z vysílače a jde přímo do přijímače. [18]



Obr. 9: Signál GPR typický pro měření kameniva kolejového lože (anténa Horn) [18]

Nahoře je vidět anténa Horn, kde se nachází vysílač T a přijímač R. Dole je zobrazena část trati v řezu, kde jsou patrné vrstvy. První vrstva od shora je nové kamenivo, pod ním se nachází mírně znečištěné kamenivo a níže je znečištěné kamenivo. V pravé části obrázku je vidět, jak vypadá amplituda signálu GPR při průchodu různými vrstvami. Data v zakroužkované oblasti jsou vhodná k extrahování informací o znečištění KL. Informace v zakroužkované oblasti závisí nejen na průchodu vzduchovou dutinou, její velikosti a tvaru v KL ale i na frekvenci antény. Je zde významný rozptyl signálu GPR čistým KL, kde jsou vzduchové dutiny za pomocí 2 GHz v porovnání s 1 GHz, kde je to hůře sledovatelné. [18]

Pro určení čistého KL musí být známa rychlost EM vlny/impulsu a čas v měřené vrstvě KL. Rychlost pohybu EM vlny lze určit z relativní permitivity kameniva, dříve označované jako dielektrická konstanta, dle následující rovnice [18]:

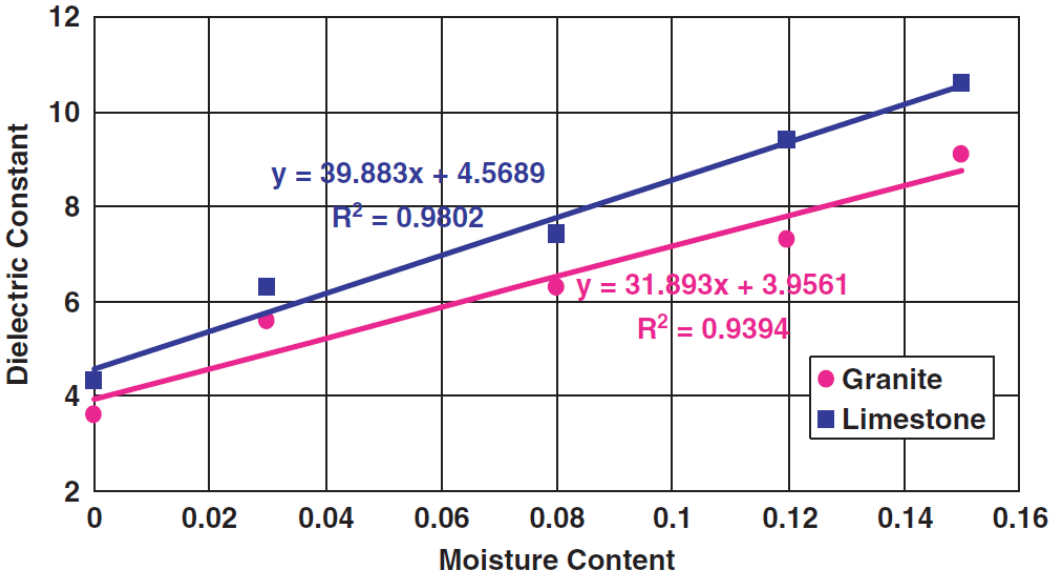
$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{12}$$

v rychlost šíření vln

c rychlost světla ve volném prostoru (1.2 × 1010 in./s = 3 x 108 m/s)

ε_r relativní permitivita materiálu

Obrázek 10 vyjadřuje závislost relativní permitivity na vlhkosti. Například relativní permitivita při znečištění okolo 13 % pro žulu je od 3,9 do 9,1 a vápenec od 4,2 do 10,5. [18]



Obr. 10: Příklad relativní permitivity materiálů v závislosti na vlhkosti [18]

Pro určení tloušťky vrstvy kameniva je nutné znát jeho dielektrickou konstantu. V praxi jsou tyto hodnoty bohužel neznámé, což snižuje přesnost odhadu tloušťky vrstvy. Jakmile je ale známá dielektrická konstanta, lze tloušťku vrstvy KL vypočítat pomocí následující rovnice [18]:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{c \cdot t}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} \tag{13}$$

Kde d je tloušťka kameniva a t je doba cesty signálu od vysílače v GPR k rozhraní materiálu a do GPR do přijímače. ε_r je dielektrická konstanta daného média. Pokud je jasná hranice mezi čistým a znečištěným materiálem, lze cestu snadno určit. Ve většině případů v praxi se lze ale setkat s měnící se rozhraním a nejasnou hranicí mezi vrstvami. To je důvod, proč bude na výsledcích z GPR vidět šum či nejisté rozhraní materiálů. Proto se musí použít vhodné techniky analýzy pro nezpracovaná data z GPR aby bylo možné určit hloubku znečištění. STFT (Short-Time Fourier Transform) je jedna z metod, která se zdá jako slibná a byla využita ve studii Thena Lenga a Imada L. Al-Qadiho, kde byla snaha vyhodnotit znečištění materiálu pomocí naměřených dat z GPR a následně byly výsledky ověřovány v terénu. [18]

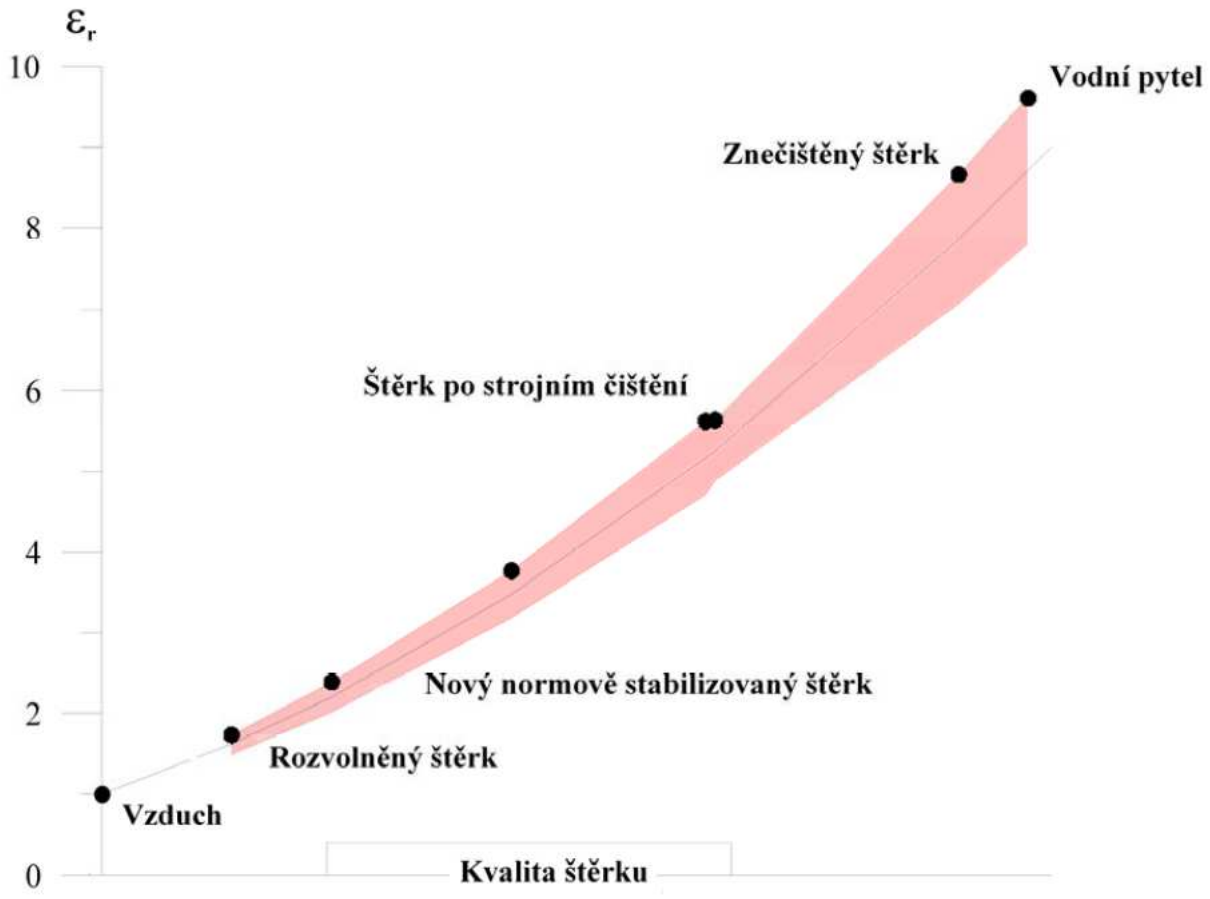
4.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita, dříve dielektrická konstanta, značí schopnost materiálu vést střídavý elektrický proud. Elektrická permitivita je označována ε a jedná se o poměrový koeficient, který vyjadřuje poměr rychlosti elektromagnetického vlnění v daném prostředí a jeho rychlost ve vakuu. Relativní permitivita je označována ε_r a vypočítá se jako podíl permitivity daného materiálu ku permitivitě vakua dle následující rovnice [19]:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{14}$$

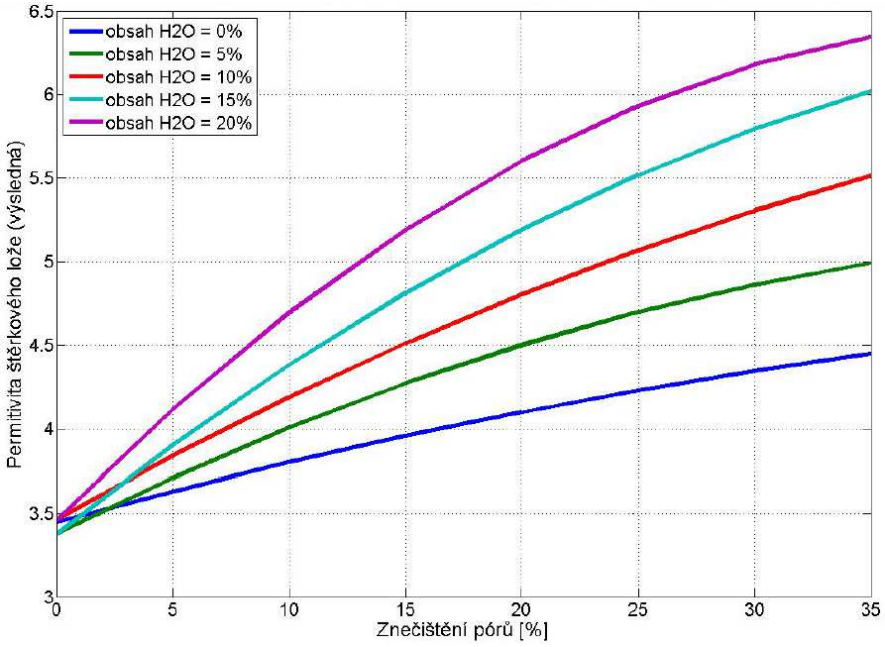
Hodnoty relativní permitivity jsou od 0 po 80, kde 0 značí vzduch a 80 vodu. Okamžitou hodnotu ε_r kolejového lože ovlivňuje typ horniny, úroveň homogenizace a stabilizace KL, jelikož, jak je v praxi již dokázáno, je-li hodnota ε_r menší jak 3, tak se jedná o větší mezerovitost KL. Dále má velký vliv míra a druh znečištění, jelikož čím více jílovitých částic je obsaženo v KL, tím je ε_r větší. Jílové znečištění dále váže část vody a tím pádem se zvyšuje

ε_r. Níže zobrazený obrázek 11 značí vztah mezi relativní permitivitou a kvalitou štěrkového lože. [19]



Obr. 11: Graf vztahu relativní permitivity a kvality kolejového lože [19]

Jedná se o výsledný graf výzkumného projektu Evropské unie s názvem SAFE RAIL. Dle grafu je zřejmé, že pro hodnocení úrovně znečištění KL a výstupů z měření GPR nestačí jen jedno stanovení relativní permitivity, ale mělo by se jednat o dlouhodobé měření, které se bude průběžně po určitých obdobích opakovat. [19]



Obr. 12: Závislost permitivity štěrkového lože pórovitosti 25% na znečištění pórů při daném obsahu vody [19]

Na obrázku 12 je vidět závislost permitivity štěrkového lože pórovitosti 25 % na znečištění pórů v procentech při daném obsahu vody s výchozí permitivitou horniny 5,0. Je očividné, že při vyšším obsahu vody v pórech, je celková permitivita štěrkového lože vyšší.

Způsoby měření okamžité hodnoty relativní permitivity

- Bodově

  Jedná se o měření metodou TDR, kde jsou trvale zabudované mosazné elektrody do štěrkového lože. Relativní permitivita zjištěná tímto měřením je jen pro oblast zabudovaných mosazných elektrod. Je to vhodný způsob pro sledování vývoje vodního pytle a přesnost stanovení ε_r je ± 0,1. [19]

- Spojitě

  Jedná se o měření, při kterém je použit GPR a dvě 500 MHz antény. Po zpracování dat z GPR se získají hodnoty ε_r. [19]

  Výpočet hodnot ε_r je poloautomatický a používají se na to následující vzorce [19]:

$$h = \frac{c \cdot t_1}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (15) \qquad\qquad h = \frac{c \cdot t_2}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (16)$$

  c rychlost světla

  h hloubka štěrkového lože

  t_1 *a* t_2 odečítané časy průchodu vlnění

  ε_r relativní permitivita

Přímý výpočet relativní permitivity při známé hloubce lze provést pomocí vztahu (17): pomocí vyjádření ze vztahu (16):

$$\varepsilon_r = \left[\frac{c * t}{2 * h}\right]^2 \qquad (17)$$

c rychlost světla [m/s]

h hloubka štěrkového lože / dráha vlny [m]

t odečítané časy průchodu vlnění pod povrch a zpět [s]

ε_r relativní permitivita

4.1.2 STFT metoda

Jedná se o metodu, u které je možno uchovávat datové informace v časové i frekvenční oblasti a dá se zde efektivně sledovat změna frekvenčního spektra s časem. Informace o změně frekvenčního spektra v závislosti na čase se získá pomoci rovnice [18]:

$$\mathrm{STFT}\ [t,\Omega]=\int_{T}\ [x[T]\cdot w[T-t]]\cdot e^{-j\Omega t}dT \tag{18}$$

x odražený signál

t časová proměnná

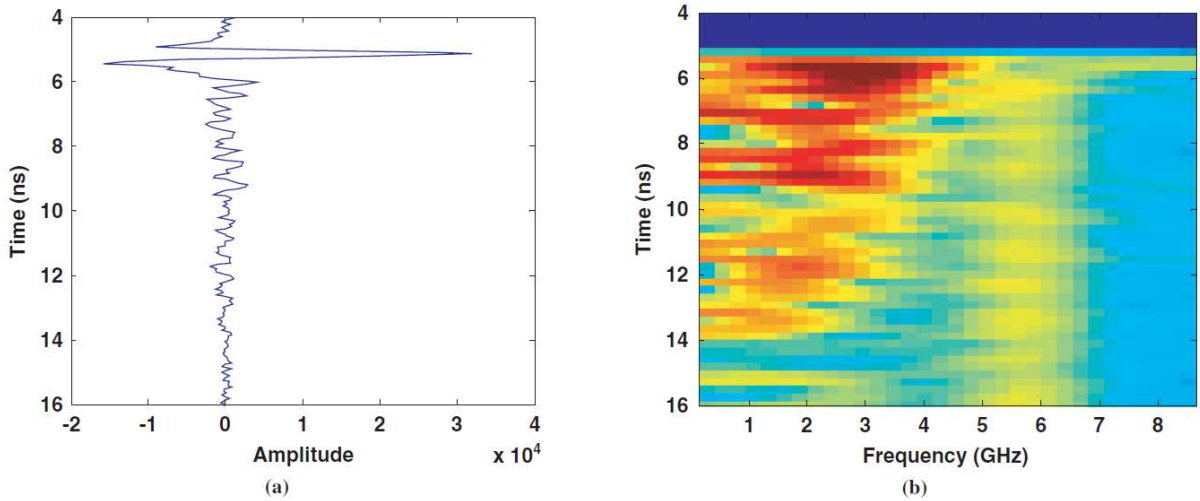
T časová proměnná odraženého signálu

Ω proměnná radiální frekvence

w window function (funkce okna)

STFT frekvenční energie v čase *t* a frekvenci *Ω*

Jakmile je vypočítán STFT, lze jej vykreslit v grafu proti *t* a *Ω* viz obrázek 13, pravá část, obrázek (b). Jedná se o výsledek zpracování dat, kde vstupní data byla ta v levém obrázku (a), kde je vyobrazen průběh STFT spektrum pro časovou doménu. [18]



Obr. 13: Příklad spektra STFT: (a) signál GPR v čase, (b) STFT spektrum signálu GPR [18]

Na obrázku 13 (b) je vidět velikost frekvenční energie vykreslena různými barvami. Horká barva jako červená značí vysokou energii a studené barvy jako modrá či světlá představují slabou energii, která představuje znečištění. Pokud je známa dielektrická konstanta média, lze tak časovou osu snadno převést do hloubky *d* pomocí rovnice již dříve uvedené. [18]

Dále je zajímavý index znečištění, který lze získat dosazením do následující rovnice [18]:

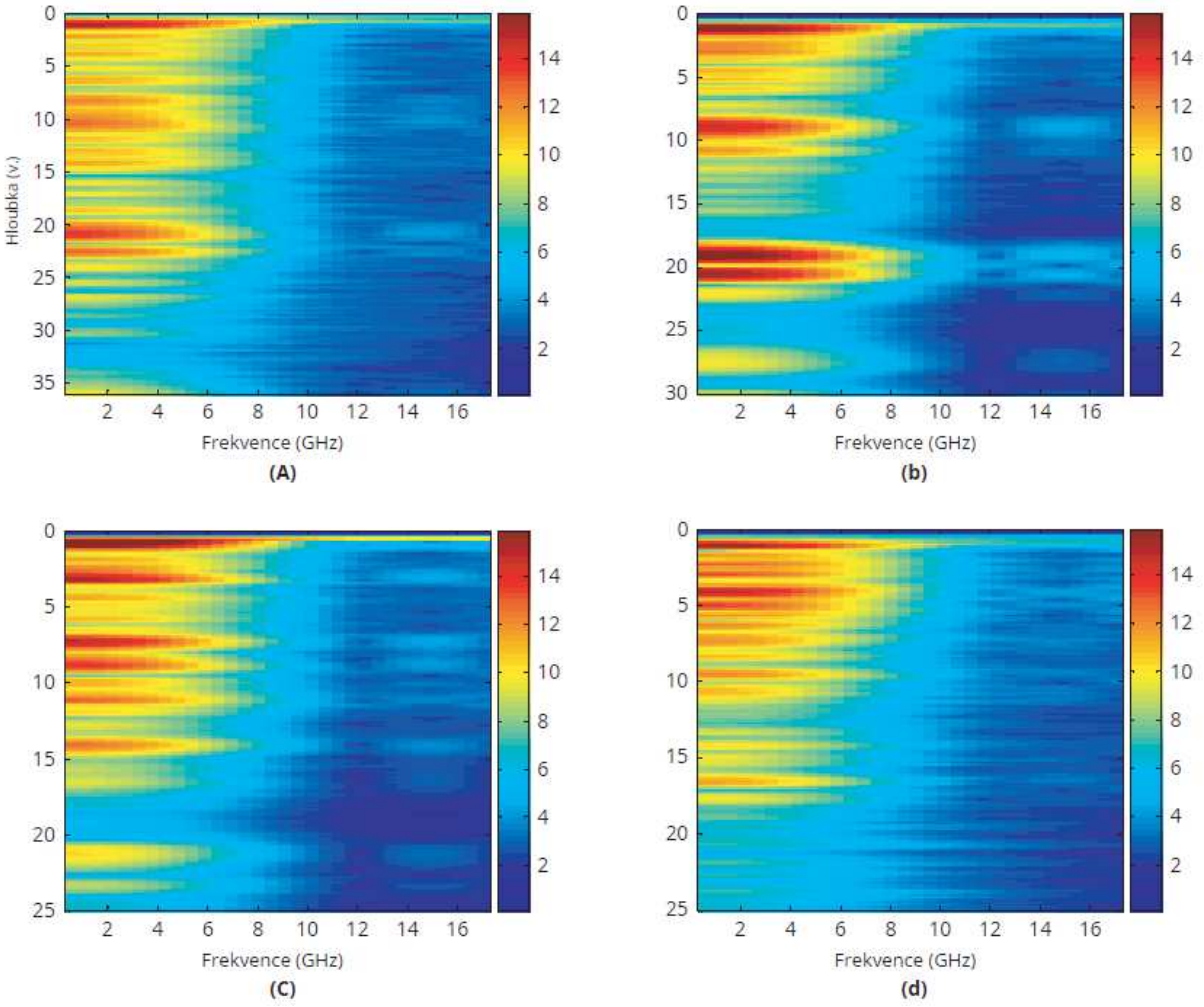
$$F_1 = P_4 + P_{200} \tag{19}$$

Ve výše zmíněné studii byla tato rovnice počítána tak, že P_4 představovalo hmotnostní procento částic propadlých sítem 4 (4,75 mm). P_{200} představovalo procento jemných částic procházejících sítem 200 (0,075 mm). Hodnota menší jak 10% je považována za čistý materiál. Pokud se hodnota objevuje mezi 10 % až 20 %, jedná se o středně znečištěný materiál a pokud je hodnota vyšší jak 20 %, tak se jedná o vážně znečištěný materiál. V tabulce 11 jsou vypočteny indexy znečištění pro čtyři případy. [18]

Tab. 11: Indexy znečištění pro případy 1 až 4 [18]

	Percent at Depth of					
Case	0–6 in.	6–12 in.	12–18 in.	18–24 in.	24–30 in.	30–36 in.
1	1.7	1.1	2.8	7.8	75	82
2	0	0.2	106	87		
3	9.2	5.9	19.3			
4	5.6	5.0	13.8	34.8		

Tabulka byla rozdělena do částí podle hloubky, kde první je od 0 do 6 palců (0 do 150 mm), druhá od 6 do 12 palců (150 mmdo 305 mm) a tak dále, viz tabulka 11. Shodnost výpočtů v tabulce 11 s barevnými mapami na obrázku 14 je očividná. Například pro případ 1 je vidět větší energie v oblasti od 20 do 24 palců (od 508 do 610 mm). Je vidět očividný pokles energie v oblasti 24 palců (610 mm), kde energie klesá až do hloubky 36 palců (915 mm). [18]



Obr. 14: STFT barevné mapy pro případ 1 je (a), 2 je (b), 3 je (c) a 4 je (d) [18]

V případě 2 je vidět pokles energie v oblasti 15 palců (381 mm). V hloubce 20 palců (510 mm) se však nachází silná energie, která představuje místní znečištění. Ta dále v oblasti 22 palců (560 mm) klesá. Dle tabulky 11 v místech 12 až 18 palců (305 až 457 mm) začíná vážné znečištění, což dokazuje, že zabarvené místo na STFT mapě je přiměřené.

Dále je to podpořeno skutečností, že oblast se silnou energii odráží akumulaci vody v hloubce 20 palců (508 mm), tudíž před sběrem dat došlo k významným srážkám. [18]

U případu C je na obrázku 14 vidět očividný pokles energie při 17 palcích (432 mm), což je v dobré shodě s údaji vyzískanými z místního výkopu, které znamená střední až vážné znečištění v místech mezi 12 až 18 palci (305 až 457 mm). [18]

V případě 4 je na obrázku 14 vidět malý pokles energie v místech mezi 11 a 14 palci (279 a 356 mm). Další významnější pokles je možné detekovat při 18 palcích (457 mm). Dle tabulky 11 je tento případ středně znečištěný mezi 12 a 18 palci (305 a 457 mm) a je vážně znečištěn po 18 palcích (457 mm), což odpovídá barevným mapám STFT. [18]

Jak je výše ukázáno, metoda STFT je účinný způsob poskytování přiměřeně přesné předpovědi stavu znečištění kolejového lože a akumulace vody v něm pomocí GPR dat a to pokud jsou poskytnuty přesné relativní permitivity. [18]

5.1 Příklady využití GPR zjištěné v odborné literatuře

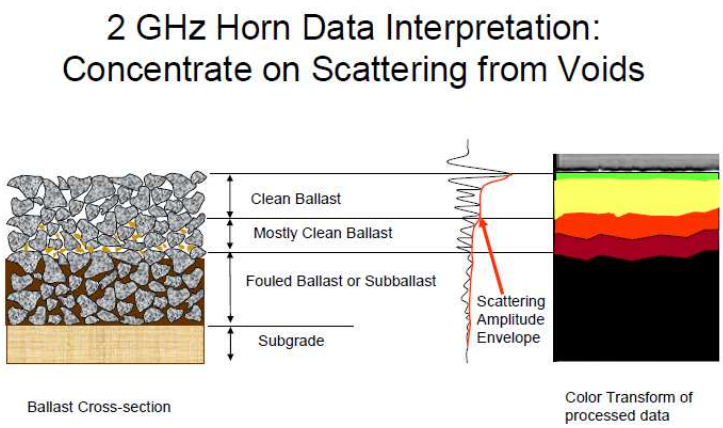
5.1.1 Měření s GPR v trati ve Wyomingu a na Aljašce

Existuje řada typů zařízení a antén, které se využívají pro různé typy snímání při používání GPR. Výhodou antén je právě ta bezkontaktnost s povrchem, což je velká výhoda právě v dopravní infrastruktuře, kde by se jinak musely provádět výkopové práce. [20]

V červnu a srpnu roku 2007, na trati ve Wyomingu a Aljašce došlo k měření za pomoci GPR v délce více než 250 mil (402 km). Jednalo se o výzkum, kde se snažili zjistit pomocí GPR obsah vlhkosti a index znečištění v místě mezi podkladní vrstvou ze štěrku a hladinou podzemní vody. Hlavními autory výzkumu jsou Roger Roberts, Imad Al-Qadi a Erol Tutumluer ze společnosti Geophysical Survey System Inc sídlící v Salemu. Využíval se zde GPR s anténou Horn 2 GHz a Horn 500 MHz, které byly umístěny pod vlakem tak, aby se nedotýkaly země a aby byly mezi kolejnicemi. Dále byly provedeny ruční kopané sondy v místech měření podél trati, kde vzorky sloužily k zjištění obsahu vlhkosti a indexu znečištění už známými metodami, a tudíž se s těmito hodnotami výsledky z GPR mohly porovnat. [20]

Jednalo se o dvě železniční tratě odlišné konstrukcí a znečištěním. Trať ve Wyomingu byla znečištěna uhelným prachem, který se nacházel v trati, a i mimo ni. Na trať se uhelný prach dostal kvůli projíždějícím vlakům s otevřenými průmyslovými přepravními vagóny naloženými uhlím, které jezdily z několika místních dolů. Trať na Aljašce bývá zasažena mrazem, a tak byla vybrána ta nejnáchylnější místa na mráz, na kterých byla měření provedena. [20]

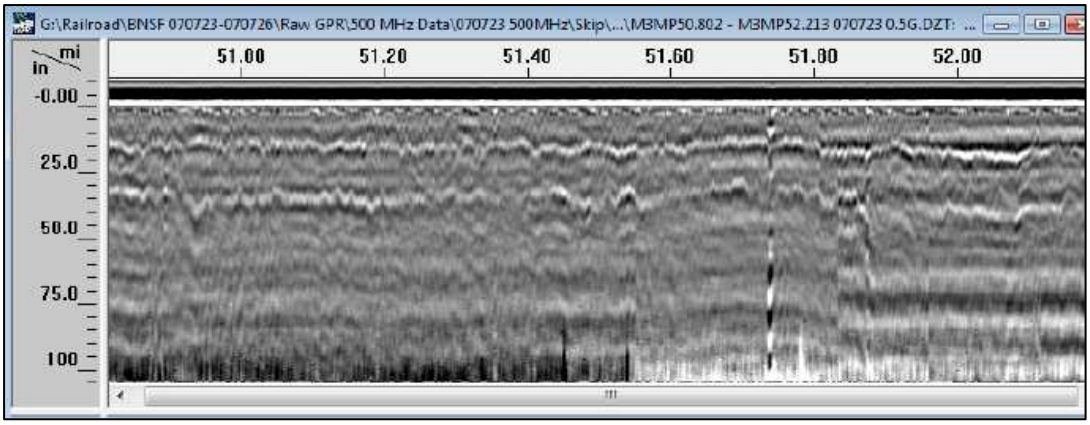
Na trati ve Wyomingu se využíval GPR s anténou Horn 2 GHz na měření a výpočet hloubky znečištění, kde panovala dobrá shoda s opravdovou naměřenou znečištěnou hloubkou z výkopu. Podle toho, jak moc znečištěné KL bylo, tak se měnila vlnová délka a barva na vyobrazeném obrázku z přístroje ze světlejší na tmavě červenou až na černou, která značila minimální až nulovou mezerovitost materiálu. Na obrázku 15 je znázorněné zpracování dat měřených pomocí GPR Horn 2 GHz. [20]



Obr. 15: Grafické znázornění rozhraní vrstev ze zpracovaných dat naměřených pomocí GPR Horn 2 GHz [20]

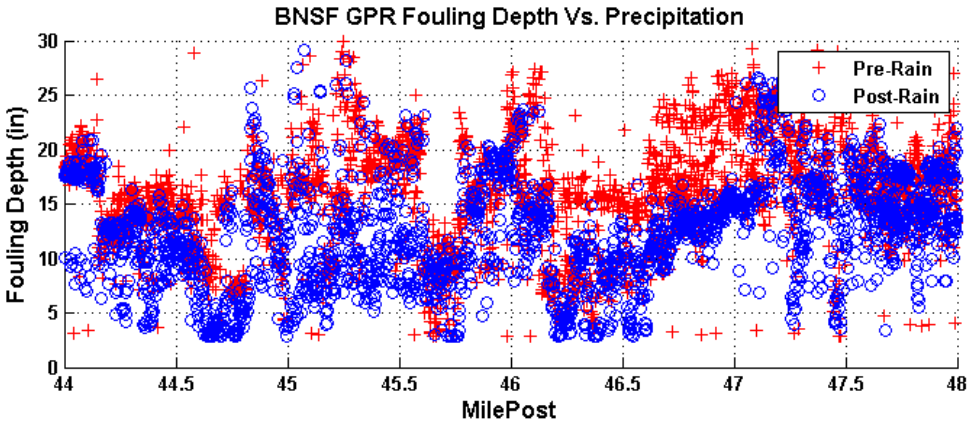
Nahoře je čisté KL, pod ním lehce znečištěné KL, dále se nachází KL se zeminou a pod ním je již upravený terén. [20]

GPR s anténou Horn 500 MHz se též využíval na měření hloubky a zjištění v jaké úrovni se nachází KL a upravený terén. Grafické znázornění zjištěných nezpracovaných dat z měření je na obrázku 16. [20]



Obr. 16: Grafické znázornění nepracovaných dat z GPR a antén Horn 500 MHz [20]

Na obrázku 18 je znázorněná předpokládaná hloubka podle GPR při odlišné vlhkosti měření. [20]



Obr. 17: Znázornění předpokládané hloubky dle GPR při odlišné vlhkosti [20]

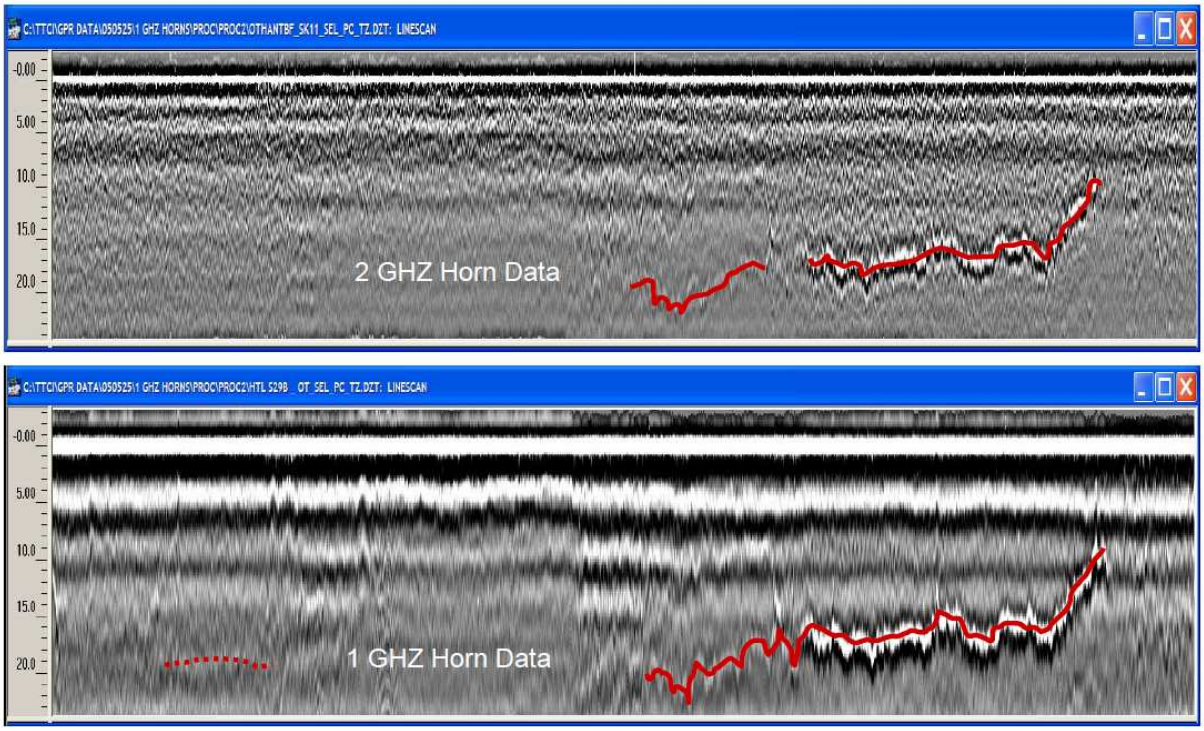
Stejný úsek trati byl změřen dvakrát pomocí GPR s anténou Horn 2 GHz během deště a po dešti. Je zde patrné, že GPR naměřil při dešti větší znečištění právě způsobené deštěm

a jeho spolupůsobení s jinými materiály v KL, které částečně vyplnilo mezery než po dešti, kdy se z mezer dostal pryč a navrátila se předchozí mezerovitost. [20]

5.1.2 Tratě v Pueblu v Coloradu, 2005

V roce 2003 společnost GSSI vyvinula novou anténu 2GHz, která byla testovaná v Transportation Technology Centre, Inc. V Pueblu v roce 2005. Jednalo se o testování nové antény 2GHz vedle starší antény 1 GHz. Ihned po prvním měření byl znát rozdíl z výsledků měření obou antén, zejména v rozptylu v prázdném prostoru. [21]

Byla porovnávána data získaná z obou typů antén, jak z 2 GHz, tak z 1 GHz a to ze stejného úseku trati. Patrný rozdíl je vidět již z grafického znázornění interpretovaných dat na obrázku 18. [21]

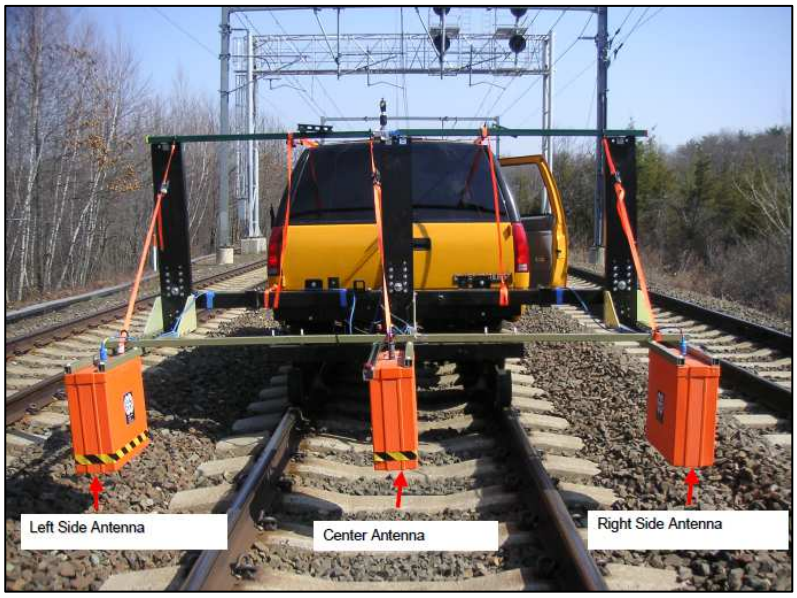


Obr. 18: Nezpracovaná data z GPR rozdílných antén [21]

Na horním obrázku jsou interpretovaná data z antény Horn 2 GHz a v dolním jsou vidět data z antény Horn 1 GHz. Na obrázku jsou vidět data od 0 do hloubky 25 cm. Je zde vidět rozdíl v ucelenosti sběru dat obou antén, kde anténa Horn 2 GHz se jeví jako mnohem lepší pro měření kolejového lože do budoucna, jelikož nám poskytuje ucelenější a uhlazenější data.

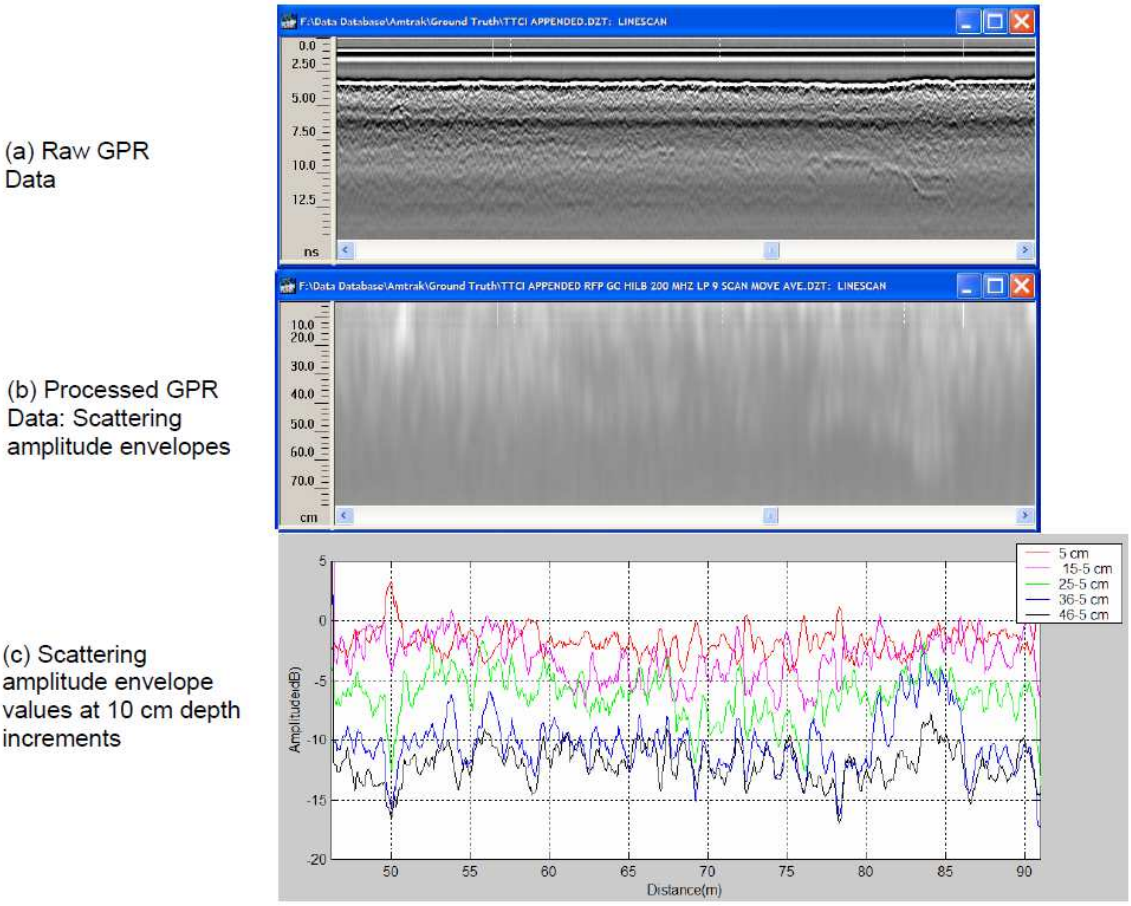
Cílem zpracování těchto dat bylo vytvoření reprezentativní amplitudy rozptylu, která by představovala průměrnou amplitudu rozptylu k hloubce. Byl to velký obnos dat, jelikož při shromažďování dat v hustotě 13 skenů na metr, vygeneruje GPR s anténou Horn 2 GHz při vzdálenost 5 km trati okolo 200 megabajtů dat.

Pro měření zde byl použit speciálně upravený automobil, který měl podvozek upravený adaptérem tak, aby mohl vjet na kolej a simulovat jízdu vlaku. Za sebou měl nainstalovanou konstrukci, která držela antény Horn v předem stanovených vzdálenostech. Jedna se nacházela přímo uprostřed a další dvě byly po stranách mimo kolej, viz obrázek 19. [21]



Obr. 19: Upravený automobil pro měření na železnici [21]

Cílem bylo extrahovat ze zpracovaných dat hodnotu obálky rozptylové amplitudy v hloubkách 5,1; 15,2; 25,4; 35,6 a 45,7 cm. Při výpočtu se používala konstantní relativní permitivita. Hodnota amplitudy při 5,1 cm a následně další hodnoty amplitudy normalizované vzhledem k hodnotě amplitudy 5,1 cm byly poté vyneseny proti vzdálenosti podél stop. Níže na obrázku 20 je vidět postup zpracování dat. [21]

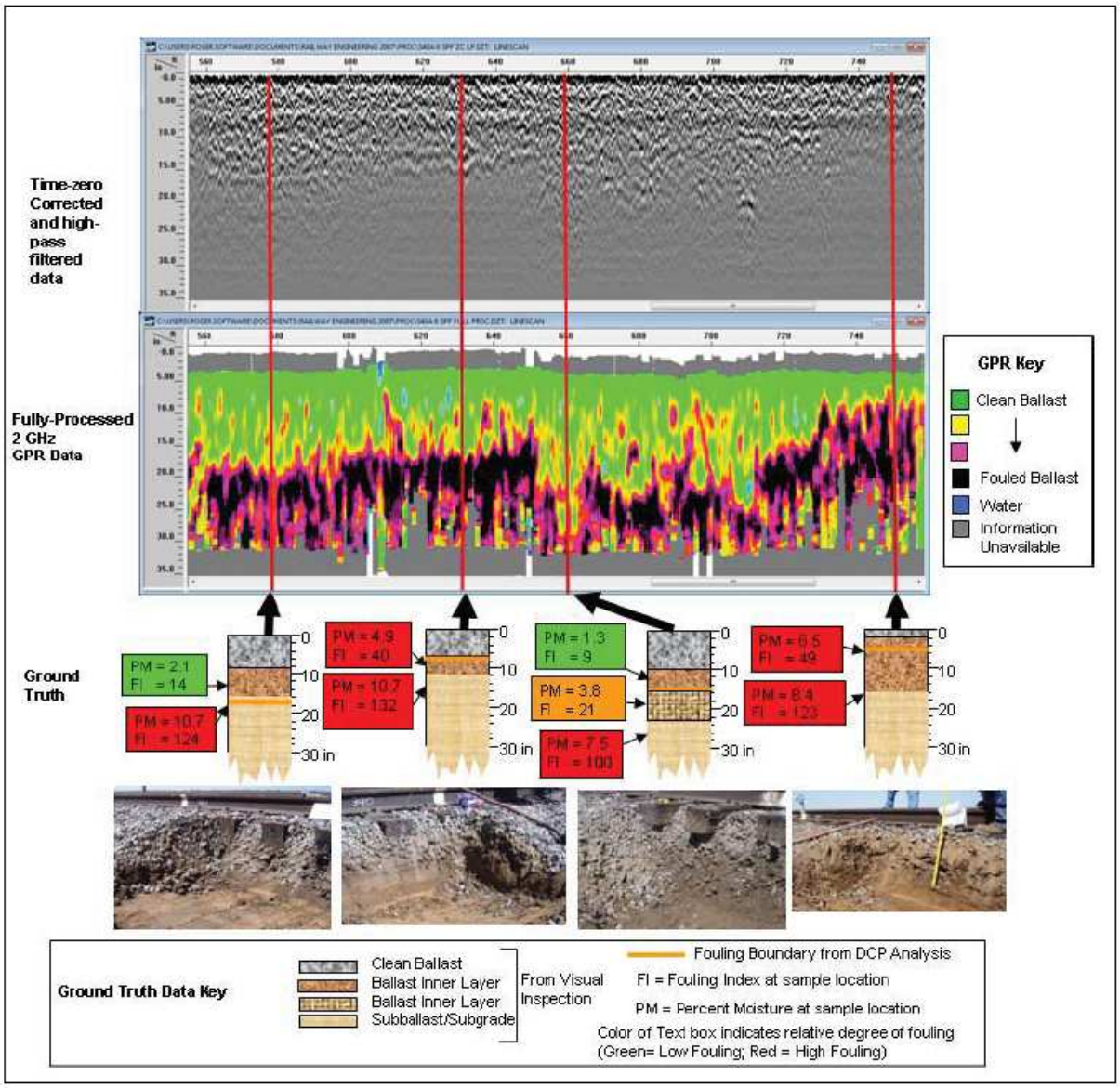


Obr. 20: Metodika zpracování naměřených dat z GPR [21]

V horní části obrázku se nachází neupravená data z GPR, která byla naměřena v trati. Pod nimi se nachází zpracovaná data z GPR dle rozptylu amplitudové obálky. Je zde vidět větší

uhlazenost dat. V dolní části obrázku je vidět rozptyl amplitudové obálky v přírůstcích hloubky 10 cm. Každá vrstva je zde vyobrazena specifickou barvou a je popsána v legendě na obrázku 12. [21]

Jsou zde vidět velké výkyvy, které jsou způsobeny přítomností velmi mělké vody. Jedná se nejspíše o velmi silný odraz od nasyceného kameniva s jílem či jinými nečistotami nebo výrazně většího amplitudového útlumu v hloubkách spojených s větším procentem vlhkosti. Pokud by se jednalo pouze o amplitudový útlum, tak by to znamenalo významné znečištění mezi hloubkou 15 a 25 cm. Na celém úseku se vyskytuje značné množství relativně silných odrazových hranic, které pravděpodobně souvisejí s nasyceným kolejovým ložem, které má zřejmě malou mezerovitost a tudíž je nejspíše znečištěné. Obrázek 21 ukazuje srovnání dat surových z GPR a dat zpracovaných na výstupu GPR. [21]



Obr. 21: Výsledek a porovnání nezpracovaných dat se zpracovanými daty a řezem místa měření [21]

V horní části obrázku jsou surová data z GPR a srovnávají se s daty zpracovanými na výstupu z GPR. V dolní části obrázku je výsledek zjištěný za pomoci antén Horn, který je zformátovaný a ukazuje nám jaké je podloží v příslušné hloubce. Červené čáry označují místa úseku, kde se zpracoval daný výsledek. Je zde vidět, jak hluboko a v jaké hloubce je v příslušné části trati daná vrstva. Příslušné vrstvy jsou dále popsány i indexem znečištění FI a procentem vlhkosti PM. [22]

Šedivá oblast označuje čisté kolejové lože, světle hnědá označuje vnitřní vrstvu spíše čistého KL, tmavší hnědá značí vnitřní vrstvu více znečištěného KL a béžová značí terén/podloží. Po stranách vytvořeného řezu části trati je stupnice značící hloubku. Dle barev ve zpracovaném výstupu jsme schopni zjistit, zda se jedná o čisté KL, vodu, velmi znečištěné KL či lehce znečištěné KL a v jaké hloubce se vyskytují. Bohužel jsou zde i místa bez příslušných informací, jelikož se je nepodařilo zpracovat. [22]

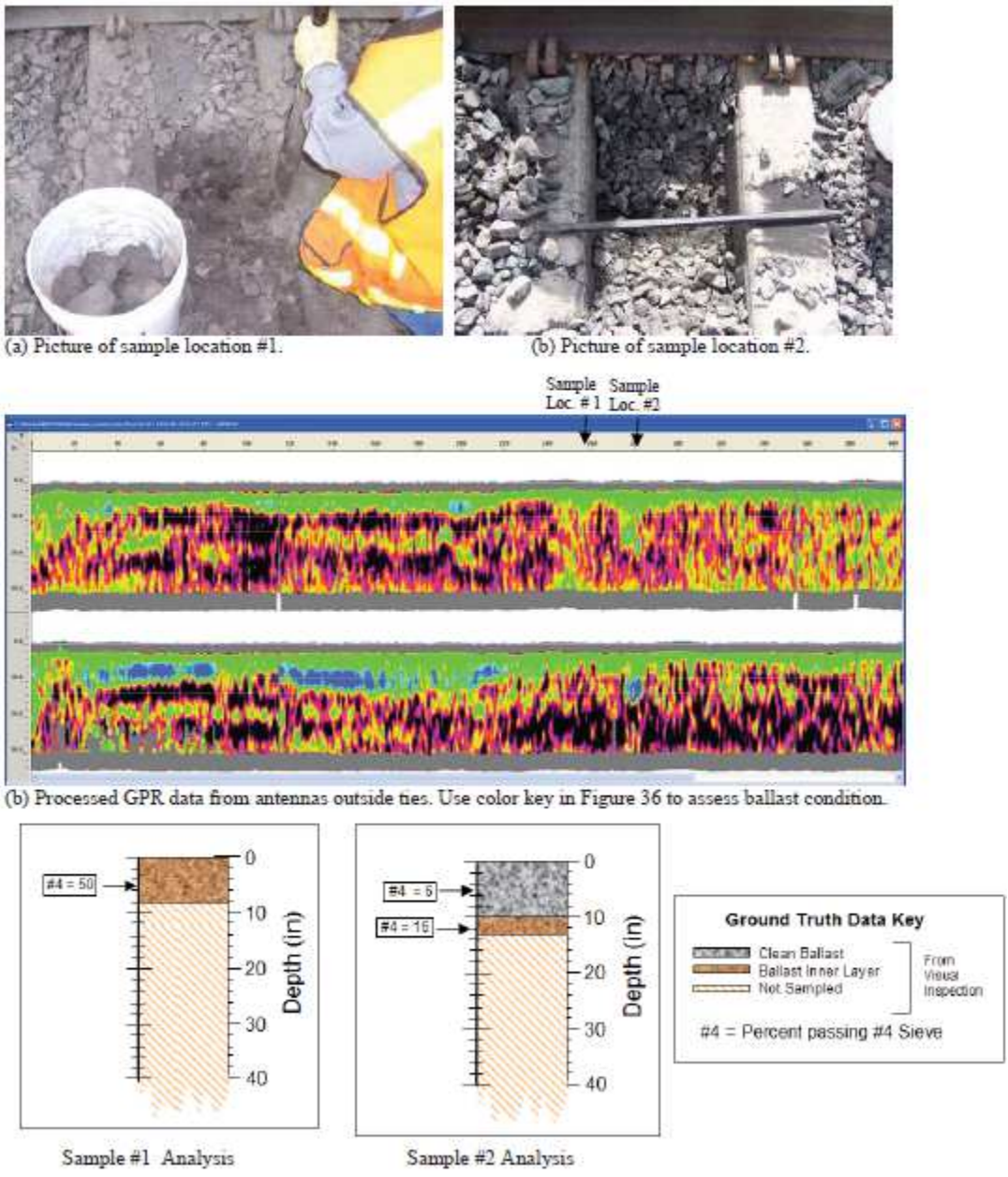
Naměřená data na trati pomocí antén Horn 2 GHz a dále zpracovaná, celkem dobře korelují s realitou v trati a zdají se být přehlednější jak u antény Horn 1 GHz. Použití implementace, která vytváří obálku amplitudy rozptylu proti hloubce, se jeví jako dobrý přístup. K vyhodnocení limitů této metodiky a přesnějšího zjištění stavu trati bude muset být provedeno mnohem více měření a vyhodnocení dat, které se srovnají s realitou v trati. [22]

5.1.3 Měření na hlavních tratích BNSF, 2006

V roce 2006 proběhlo měření na tratích společnosti BNSF Railway Company, dříve Burlington Northern and Santa Fe Railway, v délce šedesát devět mil za pomoci GPR. Jednalo se o hlavní tratě 2 a 3 v okolí Mile Posts počínaje West Bill a konče Shawnee Junction. Byly zde sbírány data v rozsahu 13–59 skenů na metr. Bylo zde odebráno velké množství vzorků z důvodu přesnějšího vyhodnocení a to přímo mezi kolejnicemi. [22]

V některých úsecích trati bylo kolejové lože nasypáno až do výšky temene kolejnice, čímž způsobilo výškový rozdíl mezi měřeným KL a GPR a tak hodnoty naměřené v této části trati se nedaly řádně zpracovat. [22]

Na obrázku 22 ve střední části je vidět, jak výška KL ovlivnila sběr a vyhodnocení dat a je zde KL zbarveno do šeda, což znamená, že se jedná o data, která se nepodařilo řádně zpracovat. Je zde na obrázku vidět jak byla vyhodnocena data z GPR a porovnána s ručními výkopy v daném úseku, které jsou označeny jako vzorky číslo 1 a 2. V grafu ve střední části obrázku jsou vyznačena místa, kde se nacházely příslušné vzorky. První vzorek je očividně velmi znečištěný a to až k samotnému vrcholu KL, jak je vidět v grafu, tak ale i na obrázku z výkopu a na obrázku vyobrazující analýzu řezu KL v dolní části obrázku. Druhý vzorek byl v horních 10 cm čistý, jak ukazují zpracovaná data z GPR, i jak bylo zjištěno přímo na místě za pomoci ručního výkopu. V dolní časti obrázku je opět vidět výsledná analýza řezu KL druhého vzorku, kde je vidět, že horních 10 cm je čistých a až pod nimi je znečištěné KL. Béžová barva značí část KL, kde se neprováděly vzorky pomocí výkopu, tudíž nelze porovnat s daty získanými a zpracovanými z GPR. [22]

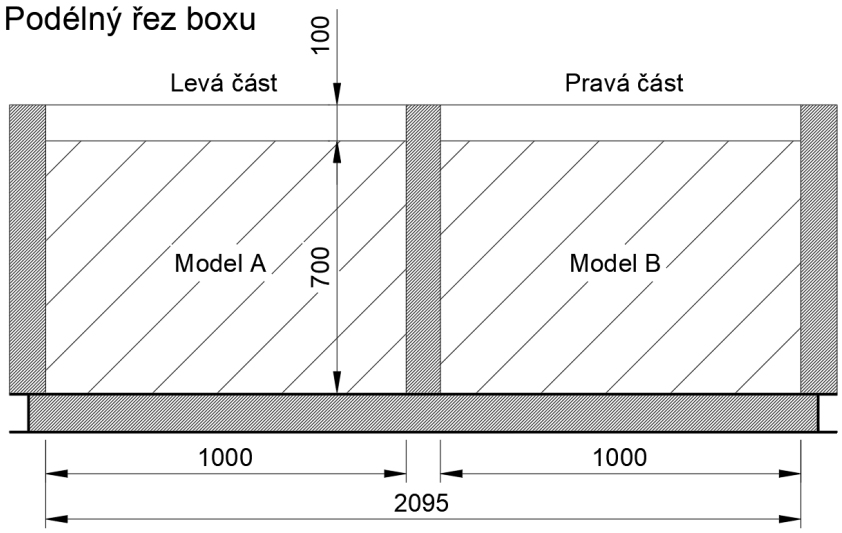


Obr. 22: Výsledek vyhodnocení měření GPR, odběr vzorků, řez v místech odběru vzorku [22]

LABORATORNÍ ČÁST

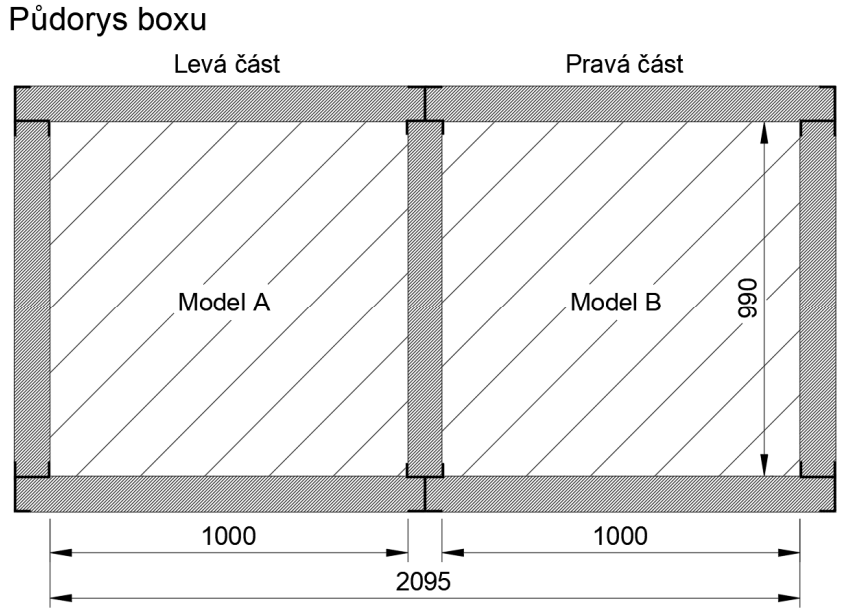
5 Popis laboratorního boxu pro měření s GPR

Měření pomocí GPR bylo provedeno v laboratorním boxu Katedry železničních staveb v laboratoři Experimentálního centra Fakulty stavební, ČVUT v Praze v místnosti D072. Laboratorní box se skládá z ocelové rámové konstrukce s výplní z dřevěných bloků. Podélný řez boxu je na obrázku 23. Z obrázku je zřejmá přepážka v polovině, která umožňuje rozdělení boxu na dvě stejné části, a tím výstavbu dvou laboratorních modelů současně.



Obr. 23: Podélný řez laboratorního boxu pro měření s GPR

Pro výpočet parametrů, mezi které patří objemová hmotnost vloženého materiálu a její návazné použití ve vyhodnocení dat, byly důležité vnitřní rozměry boxu. Výška konstrukce každého provedeného modelu byla 70 cm. Půdorysné rozměry byly 1,000 m × 0,990 m. Půdorys laboratorního boxu s rozměry je v obrázku 24.



Obr. 24: Půdorys laboratorního boxu pro měření s GPR

Vnitřní stěny boxu byly pokryty linoleem (viz obrázek 25) tak, aby spárami mezi dřevěnými bloky nedošlo k vysypávání jemné frakce materiálu, který byl vkládán při stavbě modelu. Ztráty materiálu by negativně ovlivnily přesnost stanovené objemové hmotnosti.

Obr. 25: Laboratorní box upravený pro měření s GPR

6 Použitá zařízení pro měření

Souprava georadaru (GPR), která byla využita pro nepřímé měření znečištění kameniva kolejového lože a pro vyhodnocení permitivity, se skládala z georadaru a antény. Byl použit GPR typ SIR - 30 od výrobce GSSI zapůjčený společností G IMPULS Praha, spol. s.r.o. (Obr. 26).

Obr. 26: GPR SIR – 30 s počítačem Lenovo

Společnost G IMPULS Praha, spol. s.r.o. provedla zaškolení ohledně používání GPR a používání antén k měření s GPR. Firma antény doplnila o dřevěnou konstrukci, pomocí které je bylo možné zavěsit a uložit do předem připravené konstrukce z dřevěných fošen. Mezi fošnami se antény (relativně k laboratornímu boxu) pohybovaly po dráze, která byla jednotně definovaná pro všechna provedená měření. Tím byly mezi jednotlivými modely sníženy rozdíly ve výskytu negativních vlivů v signálu z GPR. Níže je na obrázku 27 vyobrazená anténa typu Horn s frekvencí 1 GHz s dřevěnou konstrukcí pro jízdu na dráze.

Obr. 27: Anténa Horn 1 GHz

Anténa Horn 1 GHz byla hlavní anténou využívanou pro naše měření. Jak vyplívá z názvu, jedná se o anténu, která pracuje s frekvencí 1 GHz.

Dále k měření hmotnosti byla použita závěsná jeřábová váha Crane Scale s měřícím rozsahem 3 000 kg a přesností měření ±0,5 kg, viz obrázek 28.

Obr. 28: Váha Crane Scale

7.1 Měření s georadarem

Nejprve byl sestaven laboratorní box, ve kterém měření probíhalo. Na místo byla umístěna jeho kovová konstrukce, která byla vyčištěna od nečistot. Poté byly umístěny dřevěné výplně. Následně bylo na vnitřní stěny páskou přilepeno linoleum (PVC). Na linoleum bylo vyznačeno ve svislém směru měřítko pro sledování tloušťky vrstev vloženého materiálu (v krocích po 10 cm ode dna).

Následně byl dovezen materiál pro stavbu modelu (kolejové lože, zemina). Pomocí paletového vozíku se KL v pytli na skladovací paletě přivezlo k boxu. Zvážilo se pomocí váhy zavěšené na jeřábu, který v laboratoři slouží k přepravě těžkých předmětů.

Jak bylo zmíněno výše, v každé polovině laboratorního boxu byl umístěn jeden model. Dvojice modelů byly současně stavěny a pak i současně měřeny pomocí GPR. Modely jsou popsány v následujících podkapitolách. Přehled modelů a použitého materiálu je vidět v tabulce 12.

Dále měl být také použit pro laboratorní testy uhelný prach, který měl simulovat znečištění na tratích, kde se ve velké míře převáží uhlí. Bohužel se od tohoto materiálu odstoupilo, jelikož měl velikou prašnost a bylo zde velké riziko znečištění laboratoře a poškození přístrojů. Namísto uhelného prachu byl použit písek.

Tab. 12: Seznam provedených laboratorních modelů měřených pomocí GPR

Označení modelu	Materiál modelu	Poznámka (původ)	Zkonsolidováno
M1-1	Nové kamenivo	Votice	NE
M1-2	Nové kamenivo	Libodřice	NE
M2-1	Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	NE
M2-2	Znečištěné kamenivo	Boletice nad Labem	NE
M2-3	Nové kamenivo	Votice + písek	ANO
M2-5	Nové kamenivo	Jemnozrnná zemina + Votice	ANO
M5-2	Nové kamenivo	Votice	ANO
M5-4	Nové kamenivo	Libodřice	ANO
M5-6	Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	ANO
M5-8	Znečištěné kamenivo	Boletice nad Labem	ANO

7.1.1 Laboratorní model M1-1 a M1-2

První měření proběhlo dne 1. 2. 2022. Jednalo se o laboratorní modely označené M1-1 a M1-2. Model M1-1 představoval nové kamenivo z kamenolomu Votice. Kamenivo bylo k laboratornímu boxu přemístěno ve velkoobjemových vacích pomocí jeřábu. Při zavěšení na jeřáb byla použita jeřábová váha, kterou byla stanovena hmotnost kameniva vloženého do boxu. Kolejové lože u laboratorního boxu bylo zvednuto pomocí jeřábu (kočky) a bylo vysypáno do příslušné části boxu. V případě modelu M1-1 bylo kamenivo nasypáno do levé části boxu ve vrstvě o tloušťce 70 cm. Objemová hmotnost modelu byla 1470 kg.m^{-3}. Kamenivo nebylo zkonsolidované.

Model M1-2 představoval nové kamenivo z Libodřic. Kamenivo bylo opět nasypáno do boxu ve vrstvě o tloušťce 70 cm, avšak tentokrát do pravé části boxu. Objemová hmotnost modelu byla 1534 kg.m^{-3} a kamenivo též nebylo nijak konsolidováno.

Kamenivo bylo v obou modelech vloženo z několika vaků, jejichž hmotnost byla vždy stanovena a sečtena. Kamenivo se vždy řádně rozprostřelo a urovnalo tak, aby bylo všude v patřičné tloušťce 70 cm. Stavba modelu většinou z důvodu fyzické a časové náročnosti trvala jeden den a měření až den následující. Hotový model byl vždy zakrytý tak, aby v prostoru laboratoře nedošlo k nevyžádané kontaminaci jiným materiálem a změně vlhkosti.

Dále byla instalována dráha pro antény GPR a byl zprovozněn motor pro jejich kontinuální posun. Dráha se skládala ze dvou rovných fošen připevněných pomocí šroubů k ocelovým sloupům přilehlé konstrukce nad laboratorním boxem. Poté byl připraven GPR a antény pro měření dle instrukcí odborníka ze společnosti G IMPULS Praha, spol. s.r.o., který provedl zaškolení. Anténa Horn 1 GHz se musí nahřívat po dobu alespoň 20 minut. Po zahřátí započalo měření s anténou Horn 1 GHz. Přivázal se k ní jeden konec provázku a druhý se provlékl přes otáčivou část motoru pro kontinuální pohyb antény. Na prknech byly vyznačeny předem domluvené vzdálenosti, ve kterých se zaznamenávalo měření.

Při kontinuálním měření se pohybovala anténa z levé strany boxu na pravou. Bylo zde 8 měřících bodů, ve kterých se zaznamenávala vzdálenost přímo na počítači u GPR po zahlášení o jejich přejetí. Tento typ měření proběhl minimálně dvakrát.

Obr. 29: 7.1.1 Laboratorní model M1-1 s kamenivem Votice (vlevo) a M1-2 s kamenivem Libodřice (vpravo)

Po doměření s GPR a anténou Horn 1 GHz byly přístroje dle instrukcí vypnuty a uklizeny. Následně bylo provedeno rozebírání modelů a odebírání vzorků v souladu s normou

ČSN EN ISO 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky Zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti [11], která stanovuje jak postup zkoušky, tak doporučenou hmotnost odebraného vzorku. Tyto odebírané vzorky kameniva sloužili pro zjištění vlhkosti v daném materiálu v daném místě. Jednalo se o 2 vzorky ve třech vrstvách. První vzorek v hloubce 10 cm pod povrchem, druhý vzorek uprostřed (35 cm od povrchu a ode dna) a třetí vzorek 10 cm ode dna. Vzorek kameniva byl odebrán v rohu boxu cca 20 cm od obou stran boxu a druhý vzorek ve stejné vrstvě v protějším rohu, opět cca 20 cm od obou stran boxu. Vzorky byly s příslušným popisem odebírány na laboratorní plechy a misky. Tento postup odběru vzorků byl proveden pro oba modely.

Odebírané kamenivo, pokud to tak šlo, se poté dávalo zpět do pytlů a uskladnilo se. Po vyjmutí kameniva se box následně vyčistil a i prostor okolo něj tak, aby byl připraven na následující výstavbu modelu a jeho měření.

7.1.2 Laboratorní model M2-2 a M2-1

Druhé měření proběhlo 3. 2. 2022 opět v odpoledních hodinách. Jednalo se o modely M2-1 a M2-2. Model M2-1 představoval použité, středně znečištěné kamenivo z Berouna, přesněji Beroun-Závodí. Připravené a zvážené kolejové lože u laboratorního boxu se pomocí jeřábu (kočky) v laboratoři zvedlo nahoru a převezlo k laboratornímu boxu, kam se vysypalo do levé části boxu do výšky 70 cm. Objemová hmotnost modelu byla 1489 $kg.m^{-3}$. Nebylo nijak konsolidované. Model M2-2 představoval použité, velmi znečištěné kamenivo z Boletic nad Labem. Opět se kamenivo nasypalo do boxu do výšky 70 cm, tentokrát do pravé části boxu. Objemová hmotnost modelu byla 1640 $kg.m^{-3}$ též nebylo nijak konsolidované. Jeden pytel kameniva většinou nestačil, tudíž se přivezl i druhý pytel, vždy příslušného kameniva, a doplnil se box. Jejich hmotnosti se poté vždy sečetli. Kamenivo se vždy řádně rozprostřelo a urovnalo tak, aby bylo všude v *patřičné výšce 70 cm. Plnění boxu proběhlo předchozí den. Postup přípravy přístrojů na měření probíhal shodně s postupy přípravy u předchozích modelů.

Obr. 30: Model M2-2 a M2-1: vlevo kamenivo Beroun-Závodí, vpravo kamenivo Boletice nad Labem

Po dokončeném měření probíhalo následné vypnutí přístrojů a odebírání vzorků shodným způsobem, jako v předchozích modelech. Odebírané kamenivo, se poté dávalo zpět do pytlů a uskladnilo se. Po vyjmutí kameniva se box následně vyčistil a i prostor okolo něj tak, aby byl připraven na následující výstavbu modelu a jeho měření.

7.1.3 Laboratorní model M5-6 a M5-2

Třetí modelové měření proběhlo 7. 2. 2022 v odpoledních hodinách. Jednalo se o modely M5-6 a M5-2. Model M5-6 představoval použité, znečištěné kamenivo z Berouna, přesněji Beroun-Závodí. Připravené a zvážené kolejové lože u laboratorního boxu se ručně přehazovalo dovnitř do výšky 70 cm. Kamenivo bylo rozděleno na 4 vrstvy, kde každá vrstva představovala 17,5 cm. Jakmile se umístila do boxu první ze čtyř vrstev, tak se poté homogenizovala pěchem po dobu 15 minut, viz obrázek 31. Jednalo se o ruční strojní stabilizační pěch, který měl simulovat homogenizaci KL, obdobnou té na železnici. Provedlo se to pro všechny čtyři vrstvy tak, aby na konci měl výsledný model výšku 70 cm. Na povrchu modelu se nám vytvořila menší mapa z hlíny, ale v předchozích vrstvách to bylo v pořádku, tudíž jsme neřešili. Objemová hmotnost modelu byla 2070 kg.m^{-3}. Model M5-2 představoval nové kamenivo z Votic. Kamenivo se opět skládalo do boxu ručně a homogenizovalo po vrstvách. Tentokrát do pravé části boxu. Objemová hmotnost modelu byla 1786 kg.m^{-}3 a finální výška modelu byla 70 cm. Plnění boxu proběhlo předchozí den. Postup přípravy přístrojů na měření probíhal shodně s postupy přípravy u předchozích modelů.

Obr. 31: Model M2-6 a M5-2: Homogenizace kameniva v modelu M5-2 pomocí pěchu

Obr. 32: Model M2-6 a M5-2: Vlevo kamenivo Beroun-Závodí, vpravo kamenivo Votice

Po dokončeném měření probíhalo následné vypnutí přístrojů a odebírání vzorků shodným způsobem, jako v předchozích modelech. Odebírané kamenivo, se poté dávalo zpět do pytlů a uskladnilo se. Po vyjmutí kameniva se box opět vyčistil a prostor okolo něj uklidil.

7.1.4 Laboratorní model M5-8 a M5-4

Čtvrté modelové měření proběhlo 9. 2. 2022. Jednalo se o modely M5-8 a M5-4. Model M5-8 představoval použité, velmi znečištěné kamenivo z Boletic nad Labem. Připravené a zvážené kolejové lože u laboratorního boxu se ručně přehazovalo dovnitř do výšky 70 cm. Kamenivo bylo rozděleno na 4 vrstvy, kde každá vrstva představovala 17,5 cm. Opět se každá z vrstev po umístění do boxu homogenizovala pěchem po dobu 15 minut. Výsledný model měl výšku 70 cm. Objemová hmotnost modelu byla 2142 $kg.m^{-3}$. Model M5-4 představoval nové kamenivo z Libodřic. Kamenivo se opět skládalo do boxu ručně a homozenizovalo po vrstvách. Tentokrát do pravé části boxu. Objemová hmotnost modelu byla 1933 $kg.m^{-3}$. Finální výška modelu byla opět 70 cm. Plnění boxu proběhlo předchozí den. Postup přípravy přístrojů na měření probíhal shodně s postupy přípravy u předchozích modelů.

Obr. 33: Model M5-8 a M5-4: Vlevo kamenivo Boletice nad Labem, vpravo kamenivo Libodřice

Po dokončeném měření probíhalo následné vypnutí přístrojů a odebírání vzorků shodným způsobem, jako v předchozích modelech. Odebírané kamenivo, se poté dávalo zpět do pytlů a uskladnilo se. Po vyjmutí kameniva se box opět vyčistil a prostor okolo něj uklidil.

7.1.5 Laboratorní model M2-3 a M2-5

Osmé modelové měření proběhlo 1. 4. 2022. Jednalo se o modely M2-3 a M2-5. Model M2-3 představoval nové kamenivo z Votic a písek. Připravené a zvážené kolejové lože u laboratorního boxu se ručně přehazovalo dovnitř do výšky 70 cm. Kamenivo bylo rozděleno na 4 vrstvy, kde každá vrstva představovala 17,5 cm. Opět se každá z vrstev po umístění do boxu homogenizovala pěchem po dobu 15 minut. Poté se tam ručně nasypalo 375 kg spárovacího písku a homogenizovalo ručním stabilizačním přístrojem, viz obrázek 34. Výsledný model měl výšku 70 cm a nacházel se v levé části boxu. Objemová hmotnost modelu byla 2271 $kg.m^{-3}$. Model M2-5 představoval homogenizovaný jíl s novým kamenivem z Votic po 9 vrstvách do výšky 70 cm. Dolní část boxu se plnila jílem a kamenivem po vrstvách do výšky 70 cm a každá vrstva se homogenizovala po dobu 10 minut. Nejprve se udělala cca 3 cm vysoká vrstva jílu a na něj se položila cca 4 cm vrstva kameniva z Votic, aby se jíl lépe propojil s novým kamenivem. Poté se vrstva homogenizovala pěchem po dobu 10 minut. Tímto postupem se box naplnil do výšky 70 cm. Tentokrát do pravé části boxu. Objemová hmotnost modelu byla 2382 $kg.m^{-3}$. Postup přípravy přístrojů na měření probíhal shodně s postupy přípravy u předchozích modelů. Navíc se zde poté přešlo k statickému měření. To spočívalo v měření v příslušných vzdálenostech, které opět byly vyznačeny na prkně. Do měřené vzdálenosti se umístila anténa a provedlo se měření, které probíhalo minimálně 5 sekund. A tak se pokračovalo ve všech vyznačených vzdálenostech.

Obr. 34: Přístroj pro ruční homogenizaci kameniva z Votic s pískem

Obr. 35: Model M2-3 a M2-5: Vlevo kamenivo Votice + písek, vpravo kamenivo Votice + jemnozrnná zemina

Po dokončeném měření probíhalo následné vypnutí přístrojů a odebírání vzorků shodným způsobem, jako v předchozích modelech. Odebírané kamenivo, pokud to tak šlo, se poté dávalo zpět do pytlů a uskladnilo se. Po vyjmutí kameniva se box následně vyčistil a i prostor okolo něj tak, aby byl připraven na následující výstavbu modelu a jeho měření.

7 Zkoušky kameniva s různým stupněm znečištění

Přehled provedených laboratorních zkoušek kameniva s různým stupněm znečištění je v tabulce 13, která u jakého typu kameniva byly dělány zkoušky pro stanovení vlhkosti *W*, zrnitosti a sypné hmotnosti ρ_b, objemové hmotnosti ρ_{ssd} a ρ_{rd} a mezerovitosti *V*.

Tab. 13: Seznam typů materiálů a laboratorních zkoušek

Původ	typ	Vlhkost *W*	Zrnitost	Sypná hmotnost ρ_b	Objemová hmotnost zrn ρ_{ssd} a ρ_{rd}	Mezerovitost *V*
		[%]	[%]	[kg]	[kg.m^3]	[%]
Votice	Nové kamenivo	✓	✓	✓	✓	✓
Libodřice	Nové kamenivo	✓	✓	✓	✓	✓
Boletice nad Labem	Znečištěné kamenivo	✓	✓	✓	✓	✓
Beroun - Závodí	Znečištěné kamenivo	✓	✓	✓	✓	✓
Bratronice	Jemnozrnná zemina (jíl)	✓	Převzato [23]	✘	✘	✘
-	Spárovací písek	✓	✓	✓	✓	✓

V následujících podkapitolách je uveden popis a detaily provedených laboratorních zkoušek kameniva. Vyhodnocení a výsledky jsou pak uvedeny souhrnně v samostatné kapitole.

8.1 Stanovení vlhkosti kameniva

Na začátku zkoušky se stanovila hmotnost laboratorní nádoby, kterou byl kovový tác, a zapsala se hmotnost m_{c1}. Vzorek se vložil na čistý suchý tác o již známé hmotnosti m_{c1} a zvážil se celý tác i se vzorkem a jeho hmotnost se zapsala jako hmotnost m_1. Vložil se do sušárny s teplotou 110°C, viz obrázek 36, a nechal se zde sušit až do ustálené hmotnosti. Po dosažení ustálené hmotnosti se tác se vzorkem vyjmul a zvážil se. Stanovená hmotnost se označila jako hmotnost m_2. Zkouška proběhla dle předepsané normy ČSN EN ISO 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky Zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti [11]. Vlhkost zeminy se vypočítá po dosazení známých hodnot do vzorce (5).

Obr. 36: Sušárna použitá pro stanovení vlhkosti kameniva

8.2 Stanovení křivky zrnitosti kameniva

Nejprve byla připravena příslušná zkušební navážka, která byla oproti požadavku v normě ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1 – Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor [6] po domluvě s vedoucím bakalářské práce zmenšena na 40 kg. Poté se navážka vložila do předehřáté trouby na 110°C a nechala se zde sušit do ustálení své hmotnosti. Po vysušení se vyjmula a zvážila. Výsledek se zapsal jako M_1.

Vysušené kamenivo o hmotnosti M_1 se vložilo do předem připravené nádoby s vodou tak, aby bylo zcela pod vodou a ponechalo se zde po dobu 24 hodin namáčet. Vzorek se dostatečně promíchal. Cílem bylo oddělení jemných částic od kameniva.**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Po 24 hodinách namáčení se vzorek vyndal a postupně se promyl na sítu 0,063 mm a ochranném sítu 2 mm. Před započetím se namočily obě strany sít a smontovaly se dohromady. Poté se vložila navážka na síto 2 mm a prosévala s pomocí tekoucí vody tak dlouho, dokud ze zpod síta 0,063 mm nevytékala čistá voda. Tím se poznalo, že se kamenivo zbavilo zbytku jemných částic. Zbytek na sítě 0,063 se nechal vysušit v předehřáté troubě na 110°C. Po vysušení se zvážil a zaznamenal jako hmotnost M_2.

Dalším krokem bylo už prosévání. Připravila se zkušební síta dle normy ČSN EN 933-2 Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 2 – Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů. Připravilo se i síto 0,063 mm a dno, jelikož se navážka nejspíš nezbavila všech jemných částic. Mechanicky se třáslo se síty. Jednotlivá síta se po prosetí rozebrala a zvážili se na nich propady, které se poznamenali. První hmotnost na prvním odebraném sítě se zapsala jako R_1, na druhém R_2 a tak dále. U znečištěného kameniva se použila i síta o menších rozměrech pro zjištění propadů a křivky zrnitosti materiálu propadlým sítem 22,4 mm.

Obr. 37: Síta pro zkoušku zrnitosti

Postup zkoušky byl v souladu s normou ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1 – Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. [6] a pokračovalo se vyhodnocením zrnitosti kameniva dle platné normy ČN EN 13450 [5] a dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o., Kamenivo pro kolejové lože železničních drah a účinností od 1. ledna 2021. [4] Výsledkem zkoušky byla křivka zrnitosti, která graficky vyjadřuje zastoupení jednotlivých frakcí ve vzorku kameniva. Výsledky zkoušky jsou v kapitole 8.6 Výsledky zkoušek kameniva.

8.3 Stanovení sypné hmotnosti kameniva

Pro zkoušku se použila vodotěsná válcová nádoba. Objem nádoby pro příslušné kamenivo byl stanoven dle tabulky 9.

Připravili se tři dílčí navážky v souladu s EN 932-2. Vzorky se vysušili v sušárně při 110°C do ustálené hmotnosti. Dílčí navážky měly mezi 120 % a 150 % hmotnosti, kterou bylo potřeba pro naplnění nádoby.

Zvážila se čistá a suchá nádoba a její hmotnost se zapsala jako m_1. Pomocí lopatky se ručně naplnila nádoba a přebytek se opatrně sejmul a zarovnal pravítkem tak, aby byl objem kameniva stejný jako objem nádoby, přičemž byla snaha o to, aby nedošlo k segregaci. Zvážila se hmotnost naplněné nádoby a zapsali ji jako hmotnost m_2. Tento postup se provedl pro všechny tři navážky.

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva se vypočítala pro každou navážku dle vztahu (12).

Výsledná sypná hmotnost volně sypaného kameniva se určila jako aritmetický průměr všech tří hodnot. Zkouška pro sypnou hmotnost byla prováděna v souladu s ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva [13].

8.4 Stanovení objemové hmotnosti zrn kameniva

Zkouška objemové hmotnosti probíhala dle normy ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti [12].

Prvně se připravila navážka, která byla vložena do pyknometru s vodou o teplotě 22°C (±3°C) na dobu 24 hodin. Jako pyknometr byla použita velká nádoba s ryskou. Po vložení navážky do pyknometru se pyknometr promíchal, aby se odstranil přebytečný vzduch.

Po uplynutí 24 hodin se pyknometr s nasáklým materiálem a vodou zvážil a zaznamenala se hmotnost M_2. Po zvážení se zaznamenala teplota vody. Dále se vyjmul materiál z pyknometru a povrchově se osušil. Osušený materiál se zvážil a zaznamenal jako hmotnost M_1.

Poté se naplnil pyknometr vodou o shodné teplotě vody, jako byla použita při předešlém vážení. Hmotnost pyknometru s vodou naplněného do stejné výšky, jako byl předtím s kamenivem, se zaznamenala jako hmotnost M_3. Materiál se dále vložil do sušárny, kde se vysušil při 110°C ± 5°C do ustálení hmotnosti. Poté se nechal ochladit na pokojovou teplotu a zvážil se. Zvážená hmotnost se zapsala a označila jako hmotnost M_4.

Dále se vypočítala objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených dle vztahu (8) a objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně dle vztahu dle vztahu (9).

8.5 Stanovení mezerovitosti kameniva

Pro zjištění mezerovitosti se musela nejprve zjistit objemová hmotnost zrn kameniva, viz tabulka 15 a 16 a sypná hmotnost zrn kameniva viz tabulka 17. Po zjištění těchto hodnot se vypočítala mezerovitost dle vztahu (11). Výsledné hodnoty mezerovitosti příslušných modelů jsou uvedeny v tabulce 18.

8.6 Souhrn výsledků z provedených zkoušek kameniva

Zjištěné výsledky vlastností materiálu zkoušených v laboratoři jsou dále uvedeny v tabulkách. V tabulce 14 jsou uvedeny hodnoty vlhkosti W materiálů podrobených zkouškám. Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} příslušných materiálů, zjištěná a spočtená v laboratoři, je uvedena v tabulce 15. V tabulce 16 je uvedena zjištěná objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} příslušných materiálů. Tabulka 17 ukazuje výsledky sypné hmotnosti ρ_b příslušných materiálů. Výsledky mezerovitosti V příslušných materiálů jsou vidět v tabulce 18.

Tab. 14: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – vlhkost *W*

Typ materiálu	Původ	Použito v modelech	Vlhkost *W*
			[%]
Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	M2-1, M5-6	4,8
	Boletice nad Labem	M2-2, M5-8	4,6
Nové kamenivo	Libodřice	M1-1, M5-4	0,3
	Votice	M1-1, M2-3, M2-5, M5-2	0,3
Spárovací písek	-	M2-3	0,1
Jemnozrnná zemina	Bratronice	M2-5	23,4

Tab. 15: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd}

Typ materiálu	Původ	Použito v modelech	Objemová hmotnost zrn ρ_{ssd}
			[kg.m^{-3}]
Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	M2-1, M5-6	2421
	Boletice nad Labem	M2-2, M5-8	2768
Nové kamenivo	Libodřice	M1-1, M5-4	2922
	Votice	M1-1, M2-3, M2-5, M5-2	2780
Spárovací písek	-	M2-3	2635

Tab. 16: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd}

Typ materiálu	Původ	Použito v modelech	Objemová hmotnost zrn ρ_{rd}
			[kg.m^{-3}]
Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	M2-1, M5-6	2093
	Boletice nad Labem	M2-2, M5-8	2656
Nové kamenivo	Libodřice	M1-1, M5-4	2891
	Votice	M1-1, M2-3, M2-5, M5-2	2732
Spárovací písek	-	M2-3	2630

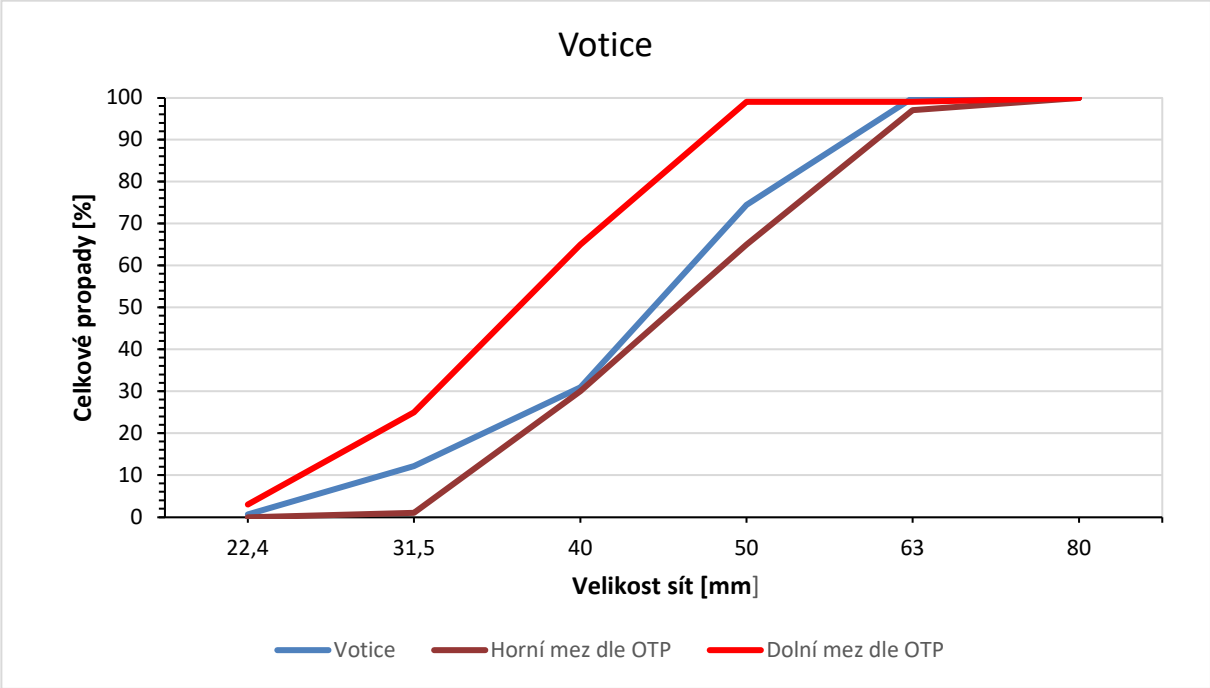
Tab. 17: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – sypná hmotnost ρ_b

Typ materiálu	Původ	Použito v modelech	Sypná hmotnost ρ_b
			[kg.m^{-3}]
Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	M2-1, M5-6	1657
	Boletice nad Labem	M2-2, M5-8	1684
Nové kamenivo	Libodřice	M1-1, M5-4	1504
	Votice	M1-1, M2-3, M2-5, M5-2	1303
Spárovací písek	-	M2-3	1606

Tab. 18: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – mezerovitost *V*

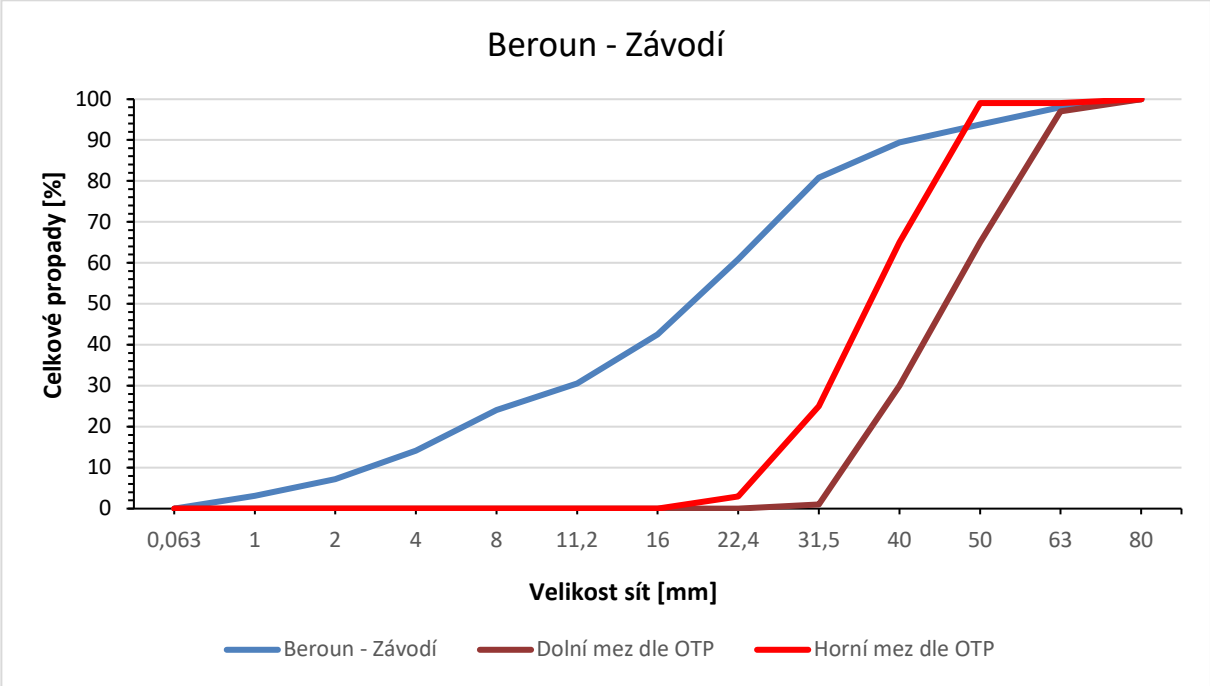
Typ materiálu	Původ	Použito v modelech	Mezerovitost *V*
			[%]
Znečištěné kamenivo	Beroun - Závodí	M2-1, M5-6	20,8
	Boletice nad Labem	M2-2, M5-8	36,6
Nové kamenivo	Libodřice	M1-1, M5-4	47,9
	Votice	M1-1, M2-3, M2-5, M5-2	52,3
Spárovací písek	-	M2-3	38,9

Ze sítové zkoušky byly pro odebrané navážky kameniva Votice, Libodřice, Boletice nad Labem a Beroun – Závodí stanoveny křivky zrnitosti. Dále byla sestavena i pro písek. Křivka zrnitosti jemnozrnné zeminy z Bratronic byla převzata z archivu Katedry železničních staveb. Na obrázku 38 je vidět křivka zrnitosti zjištěná v laboratoři pro kamenivo z Votic spolu s hranicemi určenými dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o., Kamenivo pro kolejové lože železničních drah a účinností od 1. ledna 2021. [4]. Je očividné, že se jedná o vyhovující kamenivo do železniční trati.



Obr. 38: Křivka zrnitosti nového kameniva z Votic s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o.

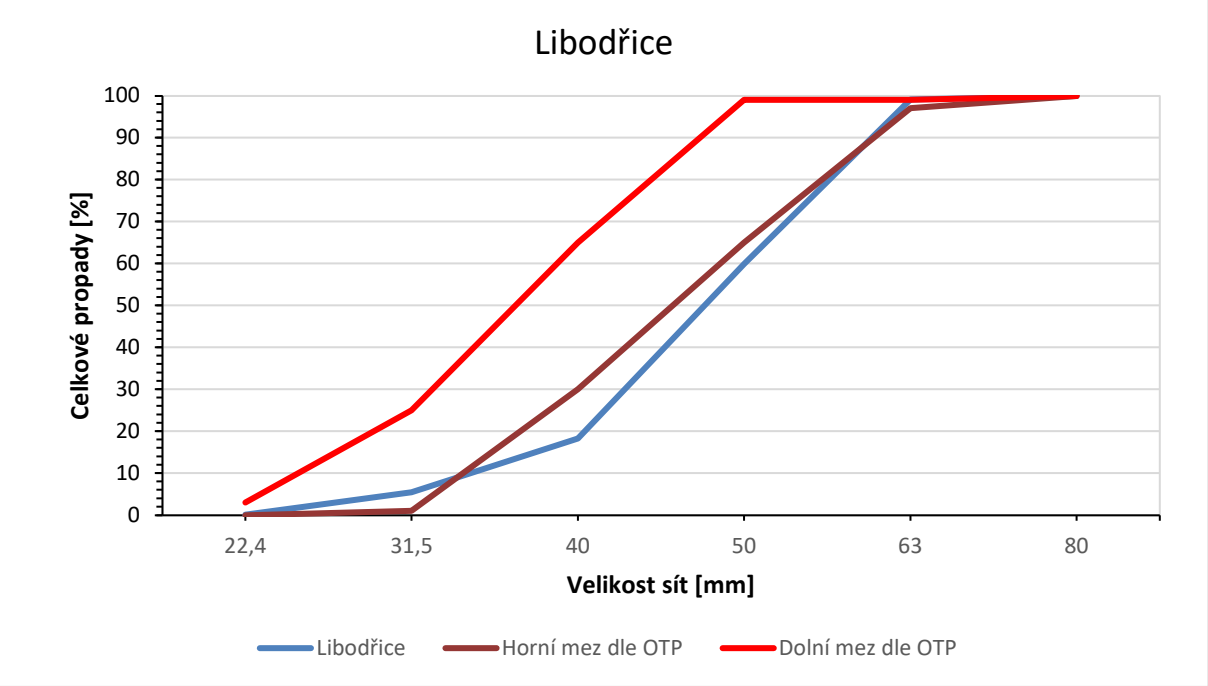
Pro znečištěné kamenivo z Berouna, přesněji Beroun – Závodí, byla vytvořena úplná křivka zrnitosti pro zjištění jednotlivých propadů i na sítech pod sítem 22,4 mm viz obrázek 39.



Obr. 39: Křivka zrnitosti znečištěného kameniva z lokality Beroun - Závodí s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o.

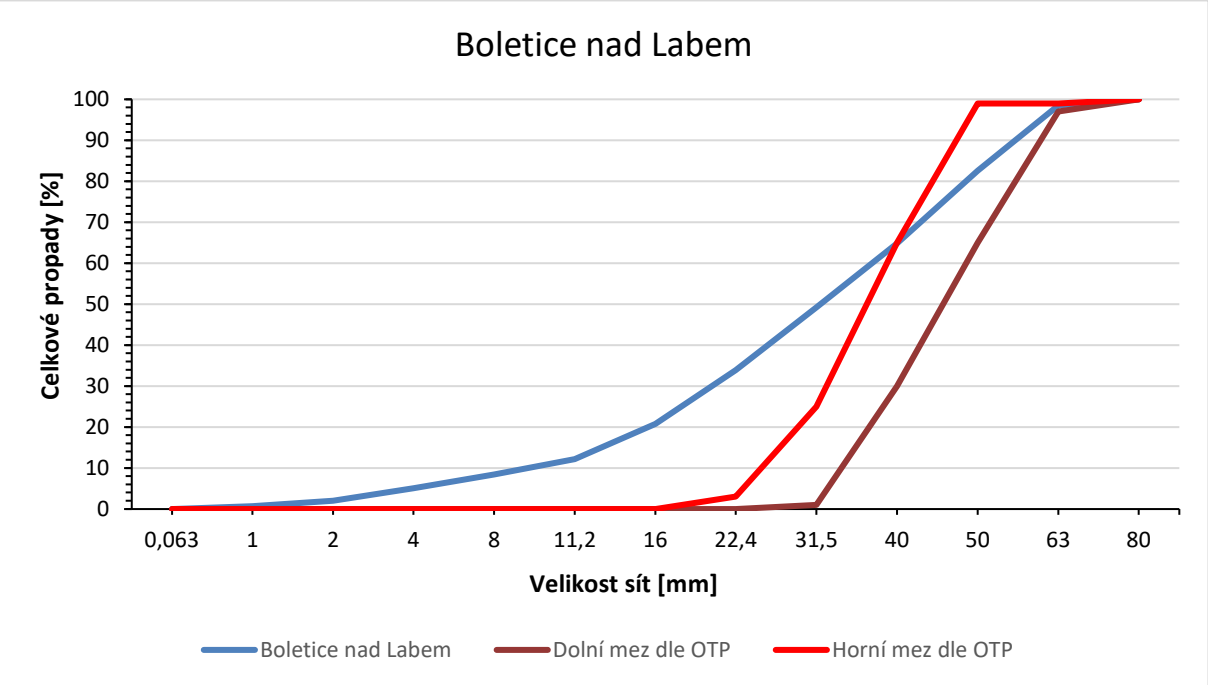
Je zde očividné, že se nejedná o vyhovující kamenivo do železniční trati, jelikož zrnitost kameniva je, krom horní části křivky, zcela mimo hranice určené v OTP Správy železnic s.o., Kamenivo pro kolejové lože železničních drah. [4]

Křivka zrnitosti pro nové kamenivo z Libodřic je vyobrazena na obrázku 40. Je zde patrné mírné vybočení mimo hranice určené v OTP pro nové kamenivo do železniční tratě. [4]



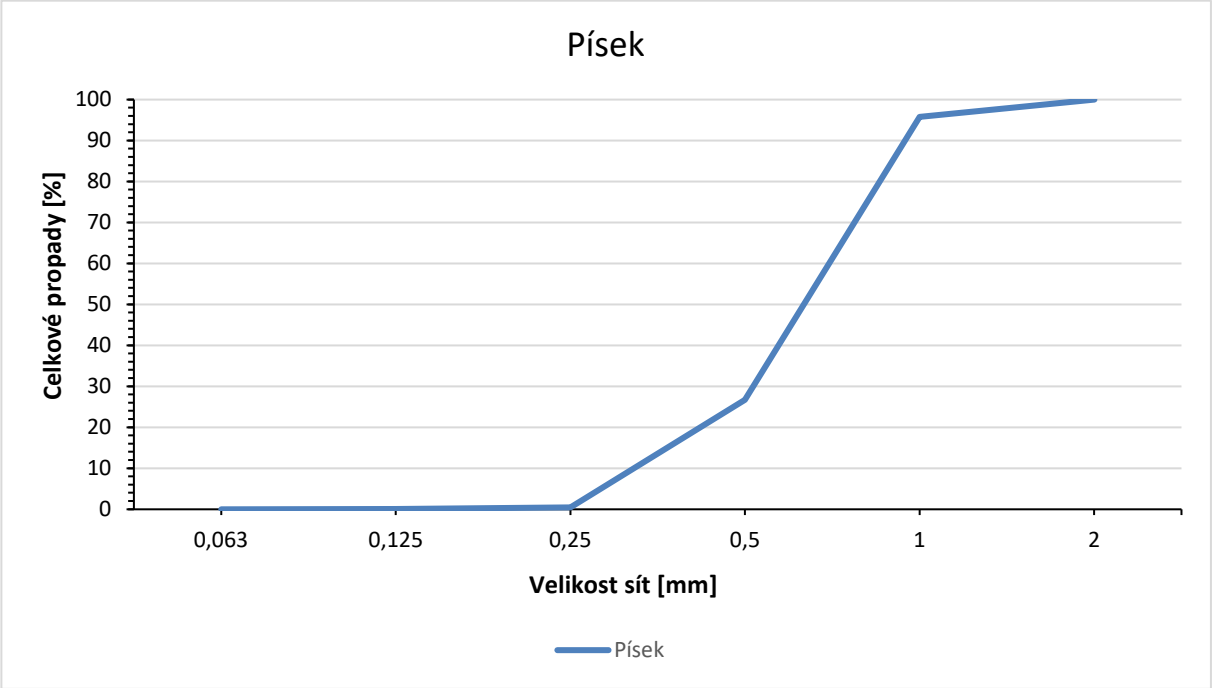
Obr. 40: Křivka zrnitosti nového kameniva z Libodřic s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o.

Pro znečištěné kamenivo z Boletic nad Labem byla opět vyhotovena úplná křivka zrnitosti, která je spolu s hranicemi z OTP vyobrazena na obrázku 41.



Obr. 41: Křivka zrnitosti znečištěného kameniva z Boletic nad Labem s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o.

Křivka zrnitosti písku, který byl použit při laboratorní práci, je vidět na obrázku 42. Je očividné, že se jedná v porovnání s ostatními, o jemné kamenivo, které velmi dobře vyplnilo mezery v modelu M2-3.

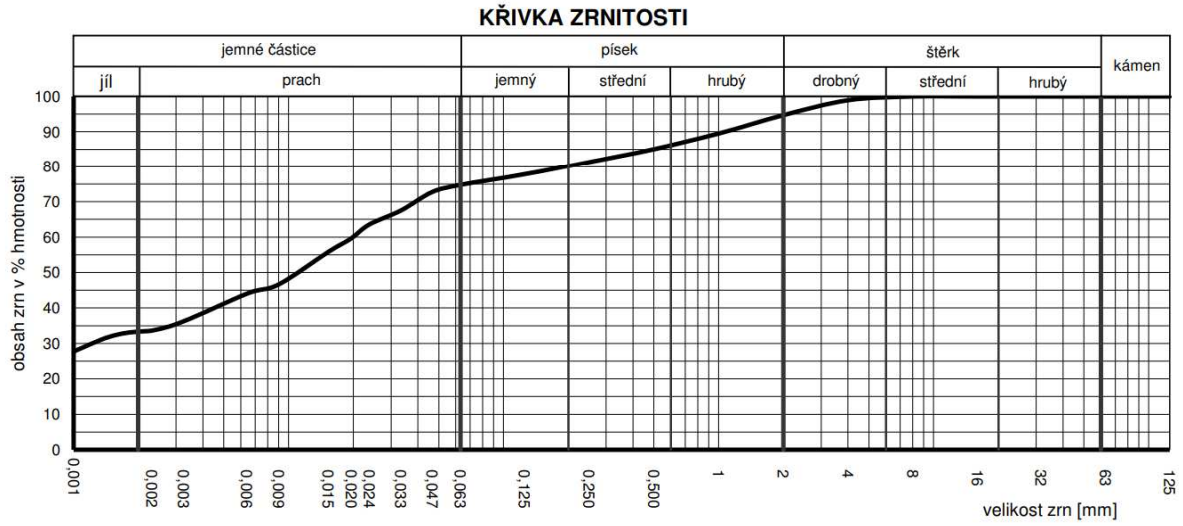


Obr. 42: Křivka zrnitosti písku použitého při laboratorní práci

Na obrázku 43 je vyobrazena křivka zrnitosti jemnozrnné zeminy (jílu) z cihelny Bratronice. Křivku zrnitosti vypracovala společnost 4G consite s.r.o. [23] Z křivky zrnitosti jemnozrnné zeminy je patrné, že se jedná o velmi jemnou zeminu, která je schopna dobře vyplnit mezery v kamenivu.

zastoupení frakcí ve vzorku					
složka:	jíl	prach	písek	štěrk	kámen
podíl frakce [%]:	33,7	41,1	20,0	5,3	0,0
podíl frakce [%]:	74,8		25,2		0,0

rozměr oka síta [mm]:	< 0,063	0,063	0,125	0,250	0,500	1	2	4	8	16	31,5	63	125
propad sítem [%]:	74,8	74,8	77,8	81,4	85,1	89,5	94,7	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0



Obr. 43: Křivka zrnitosti jemnozrnné zeminy (jílu) z cihelny Bratronice. Jedná se o převzatý graf společnosti 4G consite s.r.o. [23]

8 Vyhodnocení

Laboratorní zkoušky kameniva provedené pro tuto bakalářskou práci byly včetně výsledků popsané v předešlých kapitolách, kde byly rozdělené po jednotlivých zkouškách. Jejich výsledky jsou souhrnně prezentovány i v následujících tabulkách, ve kterých jsou doplněny o hodnoty permitivity, která byla stanovena z měření za použití georadaru, který byl aplikován na laboratorní modely, které obsahovaly stejné kamenivo, které bylo podrobeno laboratorním zkouškám v bakalářské práci. Data z georadaru byla vyhodnocena společností G IMPULS Praha, spol. s.r.o. a hodnoty permitivity byly poskytnuty pro tuto práci. [24] Vzájemné porovnání výsledků nezkonsolidovaných materiálů zjištěných laboratorními zkouškami s relativní permitivitou ε_r příslušných materiálů zjištěnou vyhodnocením dat z georadaru je vidět v tabulce 19.

Tab. 19: Vzájemné porovnání parametrů nezkonsolidovaných materiálů z výsledků laboratorních zkoušek s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu

Původ	Objemová hmotnost zrn ρ_{ssd}	Objemová hmotnost zrn ρ_{rd}	Vlhkost *W*	Označení modelu	Relativní permitivita ε_r
	[kg.m^{-3}]	[kg.m^{-3}]	[%]	-	[-]
Votice	2780	2732	0,3	M1-1	3,15
Libodřice	2922	2891	0,3	M1-2	3,60
Beroun - Závodí	2356	2087	4,8	M2-1	5,53
Boletice nad Labem	2768	2656	4,6	M2-2	5,92

V tabulce 20 je vidět vzájemné porovnání laboratorních výsledků zkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r příslušných materiálů zjištěnou vyhodnocením dat z georadaru.

Tab. 20: Vzájemné porovnání parametrů zkonsolidovaných materiálů z výsledků laboratorních zkoušek s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu

Původ	Objemová hmotnost zrn ρ_{ssd}	Objemová hmotnost zrn ρ_{rd}	Vlhkost *W*	Označení modelu	Relativní permitivita ε_r
	[kg.m^{-3}]	[kg.m^{-3}]	[%]	-	[-]
Votice + písek	-	-	0,2	M2-3	4,57
Votice + jíl	-	-	0,3	M2-5	5,46
Votice	2780	2732	0,3	M5-2	3,93
Libodřice	2922	2891	0,2	M5-4	4,22
Beroun - Závodí	2356	2087	4,9	M5-6	8,21
Boletice nad Labem	2768	2656	4,0	M5-8	9,16

Tabulka 21 ukazuje vzájemné porovnání vypočtené objemové hmotnosti příslušných nezkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r příslušných materiálů.

Pojem vypočtená objemová hmotnost byl použit vzhledem k výstavbě modelů, kde pravděpodobně došlo během výstavby k menší konsolidaci a tím pádem je vypočtená objemová hmotnost přesnější pro následné porovnání a vyhodnocení výsledků změřených na příslušných modelech.

Tab. 21: Vzájemné porovnání vypočtených parametrů nezkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu

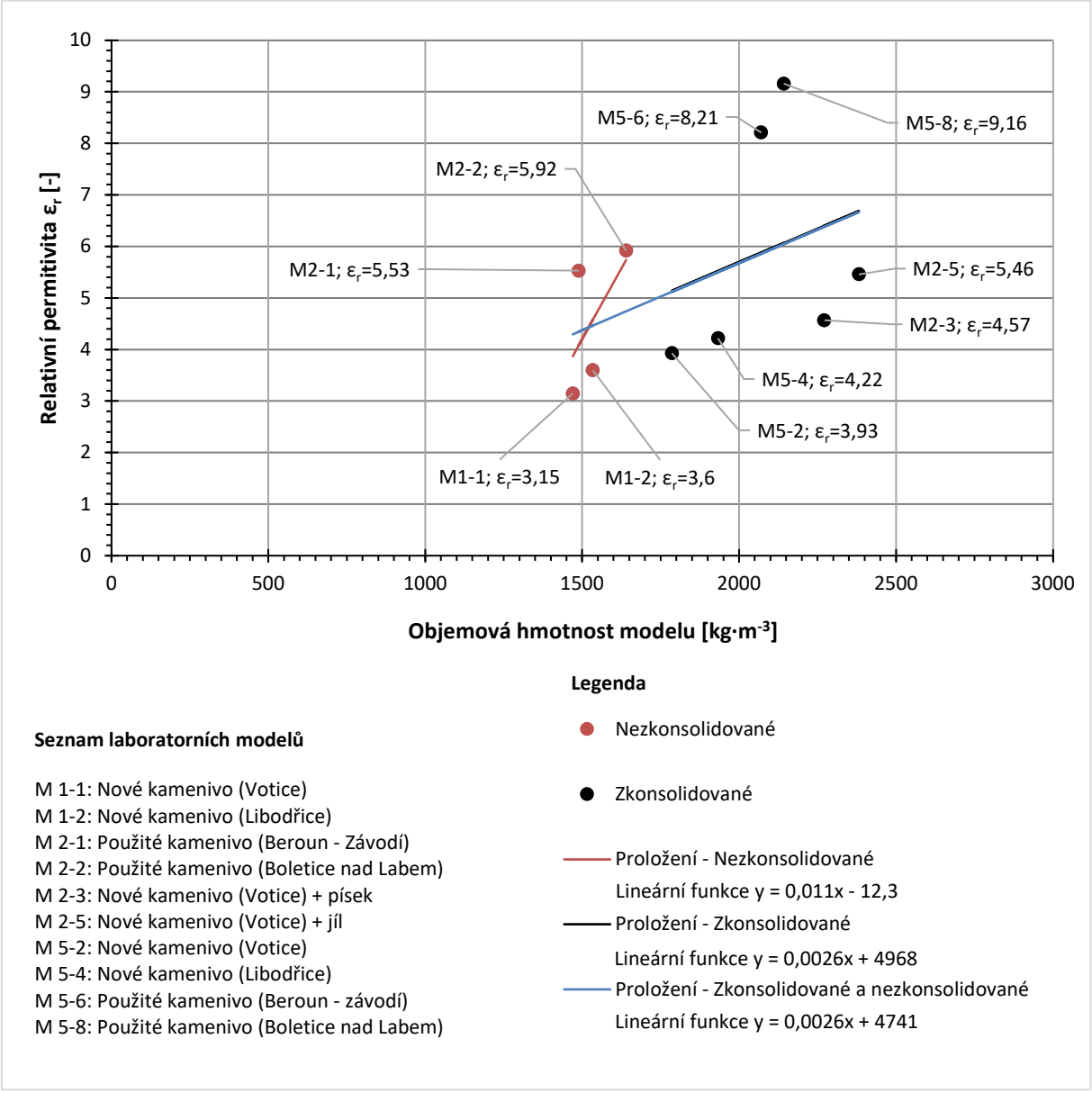
Původ	Označení modelu	Vypočtená objemová hmotnost	Relativní permitivita ε_r
	-	[kg.m^{-3}]	[-]
Votice	M1-1	1470	3,15
Libodřice	M1-2	1534	3,60
Beroun - Závodí	M2-1	1489	5,53
Boletice nad Labem	M2-2	1640	5,92

Vzájemné porovnání vypočtené objemové hmotnosti příslušných nezkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r příslušných materiálů je v tabulce 23.

Tab. 22: Vzájemné porovnání vypočtených parametrů zkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu

Původ	Označení modelu	Vypočtená objemová hmotnost	Relativní permitivita ε_r
	-	[kg.m^{-3}]	[-]
Votice + písek	M2-3	2271	4,57
Votice + jíl	M2-5	2382	5,46
Votice	M5-2	1786	3,93
Libodřice	M5-4	1933	4,22
Beroun - Závodí	M5-6	2070	8,21
Boletice nad Labem	M5-8	2142	9,16

Výsledné porovnání vypočtené objemové hmotnosti modelů s jejich příslušnou permitivitou je vidět na obrázku 44. Je zde patrné, že s rostoucí objemovou hmotností modelu roste i jeho permitivita. Z výsledného grafu na obrázku 44 je patrná viditelně vyšší permitivita u modelů se znečištěným kamenivem, než u modelů s čistým materiálem, který má sice vyšší objemovou hmotností, ale nižší permitivitu. Příslušné body jsou také proloženy křivkou, která potvrzuje dřívější myšlenku, že objemová hmotnost materiálu má vliv na velikost permitivity daného materiálu. Pro získání lineární funkce v grafu byla v MS Excel použita spojnice trendu s lineárním předpisem.



Obr. 44: Výsledné porovnání objemové hmotnosti příslušných modelů s jejich změřenou permitivitou

Z tohoto výsledného grafu lze uvažovat, že při rostoucím znečištění materiálu roste jeho objemová hmotnost a tím pádem i jeho relativní permitivita. Dalo by se tím říct, že vyšší relativní permitivita naměřená například v trati by znamenala větší znečištění a vice versa. V úvahu je potřeba brát i vliv srážek a nárůst vlhkosti kameniva kolejového lože v trati. Hodnocení vlivu srážek však nebylo předmětem bakalářské práce, ale mělo by být provedeno v návazném výzkumu.

Výsledky laboratorních testů lze shrnout následujícím způsobem:

Model M1-1 představoval nové kamenivo z Votic. Jednalo se o nezkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost W tohoto materiálu byla 0,3 %. Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} byla 2780 kg.m^{-3}. Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} byla 2732 kg.m^{-3}. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M1-1 vyšla 1470 kg.m^{-3}. Sypná hmotnost volně sypaného materiálu ρ_b byla 1303 kg.m^{-3}. Mezerovitost materiálu V vyšla 52,3 %. Relativní permitivita ε_r naměřená a následně zpracovaná na modelu M1-1 vyšla 3,15.

Model M1-2 představoval nové kamenivo z Libodřic. Jednalo se o nezkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto materiálu byla 0,3 %. Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} byla 2922 kg.m^{-3}. Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} byla 2891 kg.m^{-3}. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M1-2 vyšla 1534 kg.m^{-3}. Sypná hmotnost volně sypaného materiálu ρ_b byla 1504 kg.m^{-3}. Mezerovitost materiálu *V* vyšla 47,9 %. Relativní permitivita ε_r naměřená a následně zpracovaná na modelu M1-2 vyšla 3,60.

Model M2-1 představoval znečištěné kamenivo z Berouna, přesněji Beroun – Závodí. Jednalo se o nezkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto materiálu byla 4,8 %. Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} byla 2421 kg.m^{-3}. Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} byla 2093 kg.m^{-3}. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M2-1 vyšla 1489 kg.m^{-3}. Sypná hmotnost volně sypaného materiálu ρ_b byla 1657 kg.m^{-3}. Mezerovitost materiálu *V* vyšla 20,8 %. Relativní permitivita ε_r naměřená a následně zpracovaná na modelu M2-1 vyšla 5,53.

Model M2-2 představoval znečištěné kamenivo z Boletic nad Labem. Jednalo se o nezkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto materiálu byla 4,6 %. Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} byla 2768 kg.m^{-3}. Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} byla 2656 kg.m^{-3}. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M2-2 vyšla 1640 kg.m^{-3}. Sypná hmotnost volně sypaného materiálu ρ_b byla 1684 kg.m^{-3}. Mezerovitost materiálu *V* vyšla 36,6 %. Relativní permitivita ε_r naměřená a následně zpracovaná na modelu M2-2 vyšla 5,92.

Model M2-3 představoval nové kamenivo z Votic a spárovací písek. Jednalo se o zkonsolidovaný materiál. Kamenivo z Votic je již výše popsáno. Naměřená vlhkost spárovacího písku *W* byla 0,1 %. Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} byla 2635 kg.m^{-3}. Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} byla 2630 kg.m^{-3}. Sypná hmotnost volně sypaného písku ρ_b byla 1606 kg.m^{-3}. Mezerovitost písku *V* vyšla 38,9 %.

Naměřená vlhkost *W* spojeného zkonsolidovaného materiálu v modelu M2-3 byla 0,2 %. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M2-3 vyšla 2271 kg.m^{-3}. Relativní permitivita ε_r naměřená a následně zpracovaná na modelu M2-3 vyšla 4,57.

Model M2-5 představoval nové kamenivo z Votic a jemnozrnnou zeminu (jíl). Jednalo se o zkonsolidovaný materiál. Kamenivo z Votic je již výše popsáno. Naměřená vlhkost jemnozrnné zeminy (jílu) *W* byla 23,4 %.

Naměřená vlhkost *W* spojeného zkonsolidovaného materiálu v modelu M2-5 byla 0,3 %. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M2-5 vyšla 2382 kg.m^{-3}. Relativní permitivita ε_r naměřená a následně zpracovaná na modelu M2-5 vyšla 5,46.

Model M5-2 představoval nové kamenivo z Votic. Jednalo se o zkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto zkonsolidovaného materiálu byla 0,3 %. Vlastnosti nového kameniva z Votic jsou již dříve v této práci specifikovány. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M5-2 vyšla 1786 kg.m^{-3}. Relativní permitivita ε_r modelu M5-2 byla 3,93.

Model M5-4 představoval nové kamenivo z Libodřic. Jednalo se o zkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto zkonsolidovaného materiálu byla 0,2 %. Vlastnosti nového kameniva z Libodřic jsou již dříve v této práci specifikovány. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M5-4 vyšla 1933 kg.m^{-3}. Relativní permitivita ε_r modelu M5-4 byla 4,22.

Model M5-6 představoval znečištěné kamenivo z Berouna, přesněji Beroun – Závodí. Jednalo se o zkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto materiálu byla 4,9 %. Vlastnosti tohoto znečištěného materiálu jsou již dříve v této práci specifikovány. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M5-6 vyšla 2070 kg.m^{-3}. Relativní permitivita ε_r modelu M5-6 byla 8,21.

Model M5-8 představoval znečištěné kamenivo z Boletic nad Labem. Jednalo se o zkonsolidovaný materiál. Naměřená vlhkost *W* tohoto materiálu byla 4,0 %. Vlastnosti tohoto znečištěného materiálu jsou již dříve v této práci specifikovány. Vypočtená objemová hmotnost materiálu použitého v modelu M5-8 vyšla 2142 kg.m^{-3}. Relativní permitivita ε_r modelu M5-8 byla 9,16.

9 Závěr

V rešeršní části byl popsán a charakterizován materiál kolejového lože, jeho rozdělení a stanovení jeho vlastností. Dále bylo pojednáno o jeho znečištění a metodách, kterými se znečištění kameniva stanovuje. Dále byl popsán způsob recyklace kameniva kolejového lože pomocí strojního čištění. V další části byly popsány možnosti stanovení znečištění kameniva pomocí relativní permitivity vyhodnocené z dat získaných pomocí měření georadarem.

Laboratorní část bakalářské práce obsahovala provedení a vyhodnocení laboratorních zkoušek kameniva, mezi které bylo zařazeno stanovení vlhkosti, zrnitosti, sypné hmotnosti, objemové hmotnosti zrn a mezerovitosti. Zkouškám bylo podrobeno znečištěné kamenivo odebrané z koleje z Boletic nad Labem a z oblasti výhybky v koleji v Berouně – Závodí. Dále bylo použito nové kamenivo z lomu Votice a z lomu Libodřice. Poté byl zkoumán vliv jemnozrnné zeminy (jíl) a písku, které byly míseny se zmiňovaným kamenivem a modelovaly jeho znečištění. Uhelný prach pro simulaci znečištění kameniva na uhelné dráze byl pořízen, ale od jeho aplikace bylo upuštěno z důvodu prašnosti, potíže se znečištěním laboratoře a rizika poškození okolních přístrojů.

Laboratorní část měla souvislost s projektem Diagnostika a hodnocení kvality kolejového lože pomocí georadaru (TAČR BETA2, TITSMD006) řešeným na Katedře železničních staveb, Fakulty stavební, ČVUT v Praze, v rámci kterého byl aplikován georadar. Data z georadaru byla externě zpracována společností G IMPULS Praha, spol, s.r.o., která z nich vyhodnotila hodnoty permitivity, které poskytla pro tuto bakalářskou práci k návaznému porovnání s výsledky laboratorních zkoušek provedených autorem této bakalářské práce.

Mezerovitost zkonsolidovaných materiálů v modelech M2-3, M2-5, M5-2, M5-4, M5-6, M5-8 vyhodnocená z laboratorní zkoušky byla nižší vzhledem k nárůstu objemové hmotnosti daných modelů vůči objemovým hmotnostem materiálů v předchozích modelech. Taktéž se zvýšila relativní permitivita ε_{r} zmíněných modelů. Je tedy zřetelné, že vyšší objemová hmotnost materiálu (spojena s menší mezerovitostí) souvisí s relativní permitivitou ε_{r}, která je u těchto modelů vyšší. Příkladem je porovnání nového a znečištěného kameniva. Tato práce tedy úspěšně prokázala závislost mezi relativní permitivitou a objemovou hmotností kameniva a potvrdila potenciál aplikace georadaru pro hodnocení míry znečištění kameniva kolejového lože.

V další fázi výzkumu by bylo vhodné provést obdobná měření s novými modely a materiály, které by byly opět složeny z nového a znečištěného kameniva, či z různých kombinací materiálů, a porovnat výsledky a specifikovat souvislosti mezi nimi. Speciální pozornost by měla být věnována vlivu vlhkosti. Dále je vhodné vyhodnotit zkušenosti získané v laboratorním prostředí a navázat na ně měřením v železniční trati.

Reference

[1] Správa železnic s.o., Předpis SŽ S3 Železniční svršek, 2019.

[2] Správa železnic s.o., Učební texty pro kurz mistrů tratí, 2020.

[3] Hana Krejčiříková, Železniční stavby, 1. část, ČVUT v Praze, 2017.

[4] Správa železnic s.o., Obecně technické podmínky: Kamenivo pro kolejové lože železničních drah, Účinnost od 1. ledna 2021.

[5] ČSN EN 13450, Kamenivo pro kolejové lože, Česká agentura pro standardizaci, 2014.

[6] ČSN EN 933-1, „Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1 – Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor“.

[7] ČSN EN 933-2, „Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 2 – Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů“.

[8] ČSN EN ISO 17892-4, „Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti“.

[9] ČSN EN 933-4, „Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index“.

[10] ČSN EN 933-3, „Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 3: Stanovení tvaru zrn – Index plochosti“.

[11] ČSN EN ISO 17892-1, „Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky Zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti“.

[12] ČSN EN 1097-6, „Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti“.

[13] ČSN EN 1097-3, „Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastnosti kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva“.

[14] Kolektiv Autorů, Technologie prací na železničním svršku, ČKAIT, ISBN 978-80-88265-17-7, 2019.

[15] Emil Filip, STRABAG Rail a.s., „Čištění kolejového lože jako prostředek kvalitní údržby železničního svršku - 20. Konference železniční dopravní cesta,“ Ústí nad Labem, 2018.

[16] STRABAG Rail a.s., „https://www.strabagrail.cz/databases/internet/_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=A97AB0AE80BA4F7DC125839A00568E80&men1=2&men2=undefined&sid=240,“ citace 19.2.2022. [Online].

[17] Správa železnic s.o., „Příloha I/7 k SŽDC (ČD) S8/3 - Účinnost od 1.4.2016“.

[18] Zhen Leng; Al-Qadi, „Railroad Ballast Evaluation Using Ground-Penetrating Radar 2010“.

[19] Michal Tesař, Ondřej Jiroušek a Petr Štěpánek, „České dráhy - numerické modelování hodnot elektrické permitivity štěrkového lože a možnosti využití pro správu železničních tratí - 2009“.

[20] Roger Roberts, Imad Al-Qadi a Erol Tutumluer, „Track Substructure Characterization Using 500 MHz and 2 GHz Ground Penetrating Radar: Results from over 250 Miles of Track in Wyoming and Alaska,“ 2008.

[21] Roger Roberts, „Railroad Ballast Fouling Detection Using Ground Penetrating Radar“.

[22] Roger Roberts, „Ballast fouling assesment using 2 GHz Horn antennas - GPR and ground truth comparison," 2006.

[23] 4G consite s.r.o., „Protokol o zkoušce stanovení indexových parametrů zemin, číslo protokolu 21 271 / 02, 8.11.2021".

[24] G IMPULS Praha, spol. s.r.o., „Zpracovaná data a výsledky relativní permitivity".

Seznam tabulek

Tab. 1: Použití třídy kameniva [5] 3

Tab. 2: Minimální velikost zkušebních navážek [6] 6

Tab. 3: Kategorie pro zrnitost [5] 8

Tab. 4: Hmotnost zkušebních navážek [9] 10

Tab. 5: Kategorie pro maximální hodnoty tvarového indexu [5] 11

Tab. 6: Kategorie pro maximální hodnoty indexu plochosti [5] 11

Tab. 7: Tyčová síta odpovídajících frakcí a velikost jejich mezer [10] 12

Tab. 8: Stupnice zaoblenosti hran zrn kameniva [4] 13

Tab. 9: Doporučená minimální hmotnost zkušebního vzorku [11] 14

Tab. 10: Nejmenší objem nádoby v závislosti na zrnění kameniva [13] 16

Tab. 11: Indexy znečištění pro případy 1 až 4 [18] 26

Tab. 12: Seznam provedených laboratorních modelů měřených pomocí GPR 37

Tab. 13: Seznam typů materiálů a laboratorních zkoušek 44

Tab. 14: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – vlhkost *W* 48

Tab. 15: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených ρ_{ssd} 48

Tab. 16: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně ρ_{rd} 48

Tab. 17: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – sypná hmotnost ρ_b 49

Tab. 18: Výsledky provedených laboratorních zkoušek – mezerovitost *V* 49

Tab. 19: Vzájemné porovnání parametrů nezkonsolidovaných materiálů z výsledků laboratorních zkoušek s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu 53

Tab. 20: Vzájemné porovnání parametrů zkonsolidovaných materiálů z výsledků laboratorních zkoušek s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu 53

Tab. 21: Vzájemné porovnání vypočtených parametrů nezkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu 54

Tab. 22: Vzájemné porovnání vypočtených parametrů zkonsolidovaných materiálů s relativní permitivitou ε_r zjištěnou georadarem v laboratorním boxu 54

Seznam obrázků

Obr. 1: Přírodní kamenivo pro kolejové lože 3
Obr. 2: Zrno umělého kameniva pro kolejové lože 4
Obr. 3: Ukázka výsledku stanovení křivky zrnitosti [8] 8
Obr. 4: Křivka zrnitosti kameniva-platné kategorie “D“ pro třídu B0, BI, BII [4] 9
Obr. 5: Příklad dvoučelisťového posuvného měřítka (rozměry v milimetrech) [9] 10
Obr. 6: Schématické znázornění cyklů čištění kolejového lože [14] 17
Obr. 7: Strojní čistička kolejového lože RM 900 VB [15] 18
Obr. 8: Grafické znázornění pracovních postupu strojní čističky kolejového lože [15] 19
Obr. 9: Signál GPR typický pro měření kameniva kolejového lože (anténa Horn) [18] 21
Obr. 10: Příklad relativní permitivity materiálů v závislosti na vlhkosti [18] 22
Obr. 11: Graf vztahu relativní permitivity a kvality kolejového lože [19] 23
Obr. 12: Závislost permitivity štěrkového lože pórovitosti 25% na znečištění pórů při daném obsahu vody [19] 23
Obr. 13: Příklad spektra STFT: (a) signál GPR v čase, (b) STFT spektrum signálu GPR [18] 25
Obr. 14: STFT barevné mapy pro případ 1 je (a), 2 je (b), 3 je (c) a 4 je (d) [18] 26
Obr. 15: Grafické znázornění rozhraní vrstev ze zpracovaných dat naměřených pomocí GPR Horn 2 GHz [20] 28
Obr. 16: Grafické znázornění nepracovaných dat z GPR a antén Horn 500 MHz [20] 28
Obr. 17: Znázornění předpokládané hloubky dle GPR při odlišné vlhkosti [20] 28
Obr. 18: Nezpracovaná data z GPR rozdílných antén [21] 29
Obr. 19: Upravený automobil pro měření na železnici [21] 30
Obr. 20: Metodika zpracování naměřených dat z GPR [21] 30
Obr. 21: Výsledek a porovnání nezpracovaných dat se zpracovanými daty a řezem místa měření [21] 31
Obr. 22: Výsledek vyhodnocení měření GPR, odběr vzorků, řez v místech odběru vzorku [22] 33
Obr. 23: Podélný řez laboratorního boxu pro měření s GPR 34
Obr. 24: Půdorys laboratorního boxu pro měření s GPR 34
Obr. 25: Laboratorní box upravený pro měření s GPR 35
Obr. 26: GPR SIR – 30 s počítačem Lenovo 35
Obr. 27: Anténa Horn 1 GHz 36
Obr. 28: Váha Crane Scale 36
Obr. 29: 7.1.1 Laboratorní model M1-1 s kamenivem Votice (vlevo) a M1-2 s kamenivem Libodřice (vpravo) 38

Obr. 30: Model M2-2 a M2-1: vlevo kamenivo Beroun-Závodí, vpravo kamenivo Boletice nad Labem 39

Obr. 31: Model M2-6 a M5-2: Homogenizace kameniva v modelu M5-2 pomocí pěchu 40

Obr. 32: Model M2-6 a M5-2: Vlevo kamenivo Beroun-Závodí, vpravo kamenivo Votice 41

Obr. 33: Model M5-8 a M5-4: Vlevo kamenivo Boletice nad Labem, vpravo kamenivo Libodřice 42

Obr. 34: Přístroj pro ruční homogenizaci kameniva z Votic s pískem 43

Obr. 35: Model M2-3 a M2-5: Vlevo kamenivo Votice + písek, vpravo kamenivo Votice + jemnozrnná zemina 43

Obr. 36: Sušárna použitá pro stanovení vlhkosti kameniva 45

Obr. 37: Síta pro zkoušku zrnitosti 46

Obr. 38: Křivka zrnitosti nového kameniva z Votic s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o. 50

Obr. 39: Křivka zrnitosti znečištěného kameniva z lokality Beroun - Závodí s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o. 50

Obr. 40: Křivka zrnitosti nového kameniva z Libodřic s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o. 51

Obr. 41: Křivka zrnitosti znečištěného kameniva z Boletic nad Labem s hranicemi danými křivkou zrnitosti kameniva platné kategorie D pro třídu B0, BI a BII, dle Obecně technických podmínek Správy železnic s.o 51

Obr. 42: Křivka zrnitosti písku použitého při laboratorní práci 52

Obr. 43: Křivka zrnitosti jemnozrnné zeminy (jílu) z cihelny Bratronice. Jedná se o převzatý graf společnosti 4G consite s.r.o. [23] 52

Obr. 44: Výsledné porovnání objemové hmotnosti příslušných modelů s jejich změřenou permitivitou 55