

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Implementace technologie GPR do současných metod diagnostiky  
pozemních komunikací

Vladislav Borecký

Dizertační práce

2017

**Studijní program:**

P3710 Technika a technologie v dopravě a spojkách

**Studijní obor:**

3706V005 Dopravní prostředky a infrastruktura

**Školitel:** doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

**Školitel specialista:** Ing. František Haburaj, Ph.D.

**Disertační práce vznikla na školícím pracovišti:**

Katedra dopravního stavitelství

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně

V Pardubicích dne 1. 4. 2017



Vladislav Borecký

Rád bych poděkoval mému školiteli panu doc. Ing. Vladimíru Doleželovi, CSc. za odborné vedení disertační práce, cenné rady a připomínky a Ing. Františku Haburajovi, Ph.D., jako odbornému školiteli, za jeho pomoc při zajišťování i provádění experimentálních měření. Děkuji také dalším kolegům z Katedry dopravního stavitelství, především Ing. S. S. Artaganovi a Ing. Ladislavu Řoutilovi, Ph.D.

## **ANOTACE**

Tato práce se zabývá možnostmi použití technologie georadaru v oblasti diagnostiky pozemních komunikací. Je zde popsán princip této technologie a její možné aplikace s důrazem na problematiku dopravních staveb, zvláště pozemních komunikací. Dále je zde popsáno experimentální měření s dostupnou sestavou, jeho zpracování a vyhodnocení. Hlavním cílem práce je ověření možnosti použití georadaru pro diagnostiku vozovek v kombinaci s dalšími nedestruktivními metodami.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

georadar, pozemní komunikace, diagnostika, vozovka

## **TITLE**

*Implementation of GPR technology into existing methods of road structures diagnosis.*

## **ABSTRACT**

*This work deals with the possibilities of using ground penetrating radar technology in the diagnosis of road constructions. It shows the principle of this technology and its possible applications with emphasis on transport structures, particularly road constructions. There is also described experimental measurement with the available equipment, its processing and evaluation. The main objective is to verify the possibility of using GPR for pavement diagnosis in combination with other non-destructive methods.*

## **KEYWORDS**

*Ground penetrating radar, road structure, diagnostics, pavement*

# OBSAH

<b>0</b>	<b>ÚVOD DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>15</b>
<b>1</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A JEJÍ STRUKTURA .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>HISTORIE GPR.....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>TEORIE GPR.....</b>	<b>23</b>
3.1	Elektromagnetické vlnění.....	23
3.2	Obecný princip technologie GPR .....	24
3.3	Elektromagnetické vlastnosti materiálu .....	26
3.3.1	Permitivita materiálu .....	26
3.3.2	Magnetická permeabilita.....	28
3.3.3	Elektrická vodivost.....	29
3.3.4	Shrnutí .....	30
3.4	Hlavní komponenty GPR sestav, příslušenství a další vybavení.....	31
3.5	Antény.....	32
3.6	Vertikální a horizontální rozlišení GPR.....	34
3.7	Způsoby měření a sběru dat .....	36
3.8	Šíření a odrazy signálu GPR.....	36
3.9	Metody stanovení rychlosti šíření GPR signálu.....	39
<b>4</b>	<b>LEGISLATIVA A TECHNICKÉ PŘEDPISY .....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>APLIKACE GPR V OBLASTI DIAGNOSTIKY PK.....</b>	<b>49</b>
5.1	Uplatnění GPR .....	49
5.2	Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev PK .....	51
5.3	Stanovení obsahu vody v konstrukci a zemním tělese PK .....	54
5.4	Stanovení vlastností materiálů konstrukcí PK.....	56
5.5	Detekce trhlin ve vozovkách PK .....	57
5.6	Detekce výztužných prvků vozovek PK .....	60
5.7	Shrnutí a doporučení.....	61
5.7.1	Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev .....	61
5.7.2	Obsah vody .....	63
5.7.3	Stanovení vlastností materiálů .....	63
5.7.4	Detekce trhlin ve vozovkách PK.....	64
5.7.5	Detekce výztužných prvků vozovek PK .....	64

<b>6</b>	<b>OSTATNÍ APLIKACE GPR .....</b>	<b>66</b>
6.1	Hydrologie, stanovení vlhkosti a obsahu vody v prostředí .....	66
6.2	Geologické a geotechnické aplikace .....	69
6.2.1	Těžební průmysl.....	70
6.2.2	Vulkanologie .....	71
6.3	Konstrukce z betonu a zděné konstrukce .....	71
6.3.1	Mostní konstrukce .....	72
6.3.2	Zděné konstrukce .....	74
6.3.3	Tunely, opěrné a zárubní zdi.....	74
6.3.4	Stanovení vlastností stavebních materiálů.....	75
6.4	Železnice.....	76
6.5	Inženýrské sítě.....	79
6.6	Archeologie .....	80
6.7	Glaciologie, led, sníh, permafrost .....	81
6.7.1	Permafrost .....	81
6.7.2	Laviny .....	82
6.7.3	Ledovce .....	83
6.8	Ekologie.....	83
6.9	Forenzní vědy .....	84
6.10	Detekce min.....	84
<b>7</b>	<b>DOSTUPNÉ GPR SESTAVY A SOFTWARE.....</b>	<b>86</b>
<b>8</b>	<b>POUŽITÉ VYBAVENÍ.....</b>	<b>89</b>
8.1	GPR sestava.....	89
8.1.1	Řídící jednotka DAD MCh Fast Wave společnosti IDS.....	92
8.1.2	Použité antény společnosti IDS.....	93
8.2	Zařízení FWD .....	93
<b>9</b>	<b>POUŽITÝ SOFTWARE.....</b>	<b>96</b>
9.1	K2 Fast Wave .....	96
9.2	ReflexW .....	96
9.3	Road Doctor .....	97
<b>10</b>	<b>POSOUZENÍ MOŽNOSTÍ GPR V OBLASTI DIAGNOSTIKY PK. ....</b>	<b>99</b>
10.1	Testování parametrů GPR systémů .....	102
10.2	Testování dostupného GPR systému .....	103
<b>11</b>	<b>POUŽITÉ POSTUPY MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ A INTERPRETACE DAT .....</b>	<b>108</b>
11.1	Počáteční nastavení měřící sestavy .....	108
11.2	Zpracování naměřených dat .....	110
11.3	Interpretace dat.....	116
<b>12</b>	<b>STANOVENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY A RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ SIGNÁLU .....</b>	<b>118</b>
12.1	Hyperbolické odrazy .....	118
12.2	Známa poloha odražeče .....	119
12.3	Metoda reflexního koeficientu .....	120
12.4	Shrnutí a doporučení .....	121

<b>13</b>	<b>KOREKCE ÚTLUMU A ROZPTYLU SIGNÁLU.....</b>	<b>123</b>
13.1	Útlum signálu.....	123
13.2	Rozptyl signálu.....	126
13.3	Vypočtené a naměřené parametry materiálů.....	129
13.4	Naměřené a vypočtené hodnoty testů RCMM.....	129
13.5	Závěr.....	132
<b>14</b>	<b>ZÁVISLOST MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VOZOVEK PK A GPR MĚŘENÍ .....</b>	<b>133</b>
14.1	Teorie.....	133
14.2	Měřící pole.....	135
14.3	Postup měření na měřících polích.....	137
14.3.1	FWD.....	137
14.3.2	GPR.....	138
14.4	Identifikace rozhraní vrstev na měřících polích.....	139
14.5	Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev měřících polí.....	140
14.6	Závislost GPR a FWD dat.....	140
14.6.1	Předpoklady.....	141
14.6.2	Související studie.....	142
14.7	Výsledky měření na měřících polích.....	147
14.7.1	Vliv umístění snímačů FWD.....	149
14.7.2	Posouzení odrazů od rozhraní konstrukčních vrstev.....	151
14.8	Závěr.....	153
<b>15</b>	<b>ZÁVĚR DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>154</b>
<b>16</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>156</b>
<b>17</b>	<b>PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM PRÁCE.....</b>	<b>168</b>

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b> Vodivost, relativní permitivita a rychlosti šíření EM signálu .....	27
<b>Tabulka 2</b> Relativní permitivita materiálů železničního spodku .....	77
<b>Tabulka 3</b> Přehled výrobců GPR a nabízeného HD a SW vybavení.....	88
<b>Tabulka 4</b> Výsledky testů dlouhodobé stability .....	106
<b>Tabulka 5</b> Výsledky testů stability signálu.....	106
<b>Tabulka 6</b> Porovnání hodnot rychlostí signálu stanovených RCM a tabulkových hodnot ...	121
<b>Tabulka 7</b> Použité materiály .....	123
<b>Tabulka 8</b> Útlum signálu v testovaných materiálech .....	126
<b>Tabulka 9</b> Rozptyl signálu na povrchu .....	128
<b>Tabulka 10</b> Rozptyl signálu na ocelovém plechu.....	129
<b>Tabulka 11</b> Vybrané parametry testovaných materiálů.....	129
<b>Tabulka 12</b> Kombinace souvrství testů RCMM.....	130
<b>Tabulka 13</b> Porovnání výsledků metod RCM a RCMM.....	131

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1</b> Stožáry britských radarů během tzv. <i>Bitvy o Británii</i> 2. světové války.....	20
<b>Obrázek 2</b> Georadarové zařízení na Měsíci.....	21
<b>Obrázek 3</b> Kmitočtové spektrum.....	23
<b>Obrázek 4</b> Vztah mezi frekvencí a rychlostí signálu pro materiály s různou vodivostí.....	24
<b>Obrázek 5</b> Základní princip GPR technologie.....	25
<b>Obrázek 6</b> Diagram hlavních součástí běžného GPR systému.....	31
<b>Obrázek 7</b> Příklad GPR systému pro měření vozovek.....	32
<b>Obrázek 8</b> Velikost radarové stopy.....	37
<b>Obrázek 9</b> Druhy signálů zachycené přijímačem GPR.....	38
<b>Obrázek 10</b> Znárodnění principu hyperbolického odrazu.....	39
<b>Obrázek 11</b> Princip metody Common Source.....	41
<b>Obrázek 12</b> Princip metody Common Receiver.....	42
<b>Obrázek 13</b> Schematické znárodnění tři hlavních typů měření rychlosti GPR signálu.....	43
<b>Obrázek 14</b> Princip transiluminace.....	45
<b>Obrázek 15</b> Kruhová dráha LCPC pro testování únavy vozovek.....	53
<b>Obrázek 16</b> Tříkanálový systém RoadMap.....	59
<b>Obrázek 17</b> Experimentální úsek vozovky pro detekci trhlin pomocí GPR.....	60
<b>Obrázek 18</b> Použití zařízení RIS One společnosti IDS pro měření koryta řek.....	68
<b>Obrázek 19</b> Zařízení RIS One společnosti IDS pro geologické aplikace.....	69
<b>Obrázek 20</b> Použití systému MALA CX12.....	73
<b>Obrázek 21</b> Měřicí konstrukce určená pro diagnostiku stěn.....	75
<b>Obrázek 22</b> 3D zobrazení A-skenu po použití STFT.....	78
<b>Obrázek 23</b> Vozidlo Husky uzpůsobené pro detekci min s připevněným GPR.....	85
<b>Obrázek 24</b> Zařízení pro určení polohy UZ senzorů.....	89
<b>Obrázek 25</b> Použitá GPR sestava na měřicím voze Renault Master.....	90
<b>Obrázek 26</b> Použité měřicí vozíky.....	91
<b>Obrázek 27</b> Kontrolní jednotka DAD MCh Fast Wave.....	92
<b>Obrázek 28</b> Použité antény.....	93
<b>Obrázek 29</b> Použité zařízení FWD.....	94
<b>Obrázek 30</b> Průhybová čára vozovky.....	95

<b>Obrázek 31</b> Pracovní rozhraní programu ReflexW .....	97
<b>Obrázek 32</b> Pracovní rozhraní programu Road Doctor .....	98
<b>Obrázek 33</b> Graf průběhu LTSST 1 .....	104
<b>Obrázek 34</b> Graf průběhu LTSST 2 .....	104
<b>Obrázek 35</b> Graf průběhu LTSST 3 .....	105
<b>Obrázek 36</b> Graf průběhu LTSST 4 .....	105
<b>Obrázek 37</b> Radargram s vyznačením změn v určení polohy povrchového rozhraní .....	106
<b>Obrázek 38</b> Výsledky testů linearity 1 až 5 na ocelovém plechu se stanovením trendu .....	107
<b>Obrázek 39</b> Zobrazení dat v programu K2 Fast Wave .....	110
<b>Obrázek 40</b> Zobrazení frekvenčního spektra a histogramu pro frekvenci 900MHz .....	112
<b>Obrázek 41</b> Zobrazení frekvenčního spektra a histogramu pro frekvenci 400MHz .....	112
<b>Obrázek 42</b> Zobrazení frekvenčního spektra a histogramu pro frekvenci 2000MHz .....	112
<b>Obrázek 43</b> Příklad interpretace měření konstrukčních vrstev PK v programu ReflexW .....	117
<b>Obrázek 44</b> Zobrazení hyperbolických odrazů v programu ReflexW.....	118
<b>Obrázek 45</b> Zobrazení identifikace rozhraní materiálů v programu ReflexW .....	120
<b>Obrázek 46</b> Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: písek 1 .....	124
<b>Obrázek 47</b> Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: písek 2 .....	124
<b>Obrázek 48</b> Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: písek 3 .....	124
<b>Obrázek 49</b> Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: štěrk 1 .....	125
<b>Obrázek 50</b> Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: štěrk 2 .....	125
<b>Obrázek 51</b> Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: štěrk 3 .....	125
<b>Obrázek 52</b> Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: písek 1 .....	126
<b>Obrázek 53</b> Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: písek 2 .....	127
<b>Obrázek 54</b> Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: štěrk 1 .....	127
<b>Obrázek 55</b> Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: štěrk 2 .....	127
<b>Obrázek 56</b> Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: štěrk 3 .....	128
<b>Obrázek 57</b> Pohled na měřicí pole 1 .....	135
<b>Obrázek 58</b> Pozice měřicího pole 2 v areálu VVCD.....	136
<b>Obrázek 59</b> Zobrazení kontinuálního záznamu na ose MP ve formě <i>pointmode</i> .....	139
<b>Obrázek 60</b> Zobrazení záznamu na jednom z bodů MP ve formě <i>wigglemode</i> .....	140
<b>Obrázek 61</b> Závislost velikosti povrchového odrazu na počtu pojezdu válce.....	143

<b>Obrázek 62</b> Srovnání hodnot objemové hmotnosti .....	145
<b>Obrázek 63</b> Korelace GPR a FWD dat.....	147
<b>Obrázek 64</b> Vztah mezi poklesy FWD (na všech snímačích) a GPR odrazy – měřeno na bodech MP1 .....	148
<b>Obrázek 65</b> Vztah mezi poklesy FWD na snímači DO a GPR odrazy - měřeno na bodech osy MP2.....	148
<b>Obrázek 66</b> Schéma znázorňující umístění a měření FWD na bodech měřících polí .....	149
<b>Obrázek 67</b> Vztah mezi poklesy FWD na snímači D210 a GPR odrazy na souvisejících bodech MP1 .....	150
<b>Obrázek 68</b> Vztah mezi poklesy FWD na snímači D180 a GPR odrazy na souvisejících bodech osy MP2.....	150
<b>Obrázek 69</b> Vztah mezi poklesy FWD na snímači D90 a GPR odrazy na souvisejících bodech MP 1 .....	151
<b>Obrázek 70</b> Vztah mezi poklesy FWD na snímači D90 a GPR odrazy na souvisejících bodech osy MP2.....	151
<b>Obrázek 71</b> Vztah mezi inverzní hodnotou poklesů FWD na snímači DO a GPR odrazy na rozhraní první a druhé konstrukční vrstvy – měřeno na bodech MP1 .....	152
<b>Obrázek 72</b> Vztah mezi inverzní hodnotou poklesů FWD na snímači DO a GPR odrazy na rozhraní první a druhé konstrukční vrstvy – měřeno na bodech osy MP2 .....	152

## SEZNAM ZKRATEK

AGC	Automatic Gain Control
ASTM	American Society for Testing and Materials
CB	Cementobetonový
CDV	Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
CMP	Common Midpoint
COM	Common Offset Method
COST	Cooperation in Science and Technology
CRIM	Complex Refractive Index Model
ČD	České dráhy
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DFJP	Dopravní fakulta Jana Pernera
DS	Dopravní stavitelství
DWT	Discrete Wavelet Transform
EK	Evropská komise
EM	Elektromagnetické
EMC	Elektromagnetic Compatibility
EN	Evropská norma
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Evropská unie
FDTD	Finite Difference Time-Domain Method
FHWA	The Federal Highway Administration
FIR	Finite Impulse Response
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FOM	Fixed Offset Method
FRVŠ	Fond rozvoje vysokých škol
FWD	Falling Weight Deflectometer
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Georadar
GSSI	Geophysical Survey Systems, Inc.
HW	Hardware
IBC	Intermediate Bulk Container
IDS	Ingegneria Dei Sistemi
IE	Impact-Echo
IIR	Infinite Impulse Response
JTFA	Joint Time-Frequency analysis
KDS	Katedra dopravního stavitelství
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LDD	Lehká dynamická deska
LFWD	Light Falling Weight Deflectometer
LTSST	Long Term Signal Stability Test
MF	Match filter
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MP	Měřicí pole
MRT	Multi-Receiver
MTA	Multiple Trace Analysis

NDT	Nedestruktivní technologie
NMO	Normal-Moveout
PC	Personal Computer
PILE	Propagation Inside Layer Expansion
PK	Pozemní komunikace
PQI	Pavement Quality Indicator
PTP	Peek to Peek
R&TTE	Radio and Telecommunications Terminal Equipment
RCM	Reflection Coefficient Method
RCMM	Reflection Coefficient Method - modifikovaná
SR	Spectral Ratio
SST	Signal Stability Test
STA	Single Trace Analysis
STFT	Short-Time Fourier Transformation
SW	Software
SZZ	Statická zatěžovací zkouška
TDR	Time-Domain Reflektometry
TLM	Transmission Line Method
TP	Technické podmínky
TWT	Two-Way Traveltime
UPa	Univerzita Pardubice
USA	United States of America
VB	Velká Británie
VOM	Variable Offset Methods
VVCD	Výukové a výzkumné centrum v dopravě
WARR	Wide Angle Reflection/Refraction
ZOP	Zero-Offset Profiling

## 0 Úvod disertační práce

V současné době je velmi aktuální požadavek na snižování ekonomické náročnosti výstavby a údržby dopravních staveb. Do nástrojů pro splnění tohoto požadavku lze s jistotou zahrnout diagnostiku pozemních komunikací (PK) jako činnost, která poskytuje údaje pro návrh oprav a rekonstrukcí daných staveb. Jedná se nejen o diagnostiku konstrukcí stávajících PK, ale i posuzování kvality nově budovaných úseků před jejich uvedením do provozu. Tato diagnostika musí poskytovat rychlé a spolehlivé výsledky, a zároveň by měla být pokud možno rychlá, co nejméně finančně náročná a mít nedestruktivní charakter. Měla by poskytnout včasné odhalení vad a poruch konstrukce komunikace a eventuálně i podloží, což umožní přijetí konkrétních opatření před tím, než dojde u těchto vad a poruch k progresi, a tím i ve výsledku k nárůstu nákladů na jejich odstranění. Použitím takové diagnostiky lze případně umožnit reklamaci díla a požadovat po dodavateli odstranění závad díla ještě před jeho převzetím.

Jednou z metod, která se jeví do budoucna jako vhodná v oblasti diagnostiky pozemních komunikací, je použití technologie georadaru (*Ground Penetrating Radar - GPR*), jež umožňuje nedestruktivní posouzení stavu konstrukce i podloží pozemních komunikací. Oproti některým, standardně používaným, metodám nabízí poměrně rychlé vyhodnocení velkých ploch a odhalení i skrytých vad. V současné době (2016) nicméně nejsou pro použití GPR v České republice v této oblasti stanovena přesná pravidla a postupy.

V předložené disertační práci se autor zabývá použitím GPR jako nástroje pro doplnění a případně nahrazení stávajících metod diagnostiky PK. Popisuje princip, metody a použití této nedestruktivní technologie (NDT) a předkládá závěry a doporučení.

Na úvod této práce bych chtěl také citovat dva odstavce, které mě zaujaly během studia literatury a které, dle mého názoru, velmi dobře vystihují problematiku měření a zpracování dat pomocí GPR. Cituji: [1]

- 1) *„Preliminary calibrations that are necessary in order for optimal data acquisition can often be a somewhat nerve-wracking experience, especially if bystanders are looking on expecting immediate results and asking the most common and annoying question: “Have you found anything yet?” When this occurs, all one can do is politely explain that a great deal of thought must go into preliminary analysis of field conditions before any results are available, and then get back to work.“* (Convey, 2004, s. 15)
- 2) *„The standard joke in the seismic data-processing laboratory is that if the reflection data do not produce the desired outcomes, just send them back to the data-processing experts, as they can produce whatever results one would like!“* (Convey, 2004, s. 131)

# 1 Cíle disertační práce a její struktura

Cílem této práce je zpracování problematiky implementace GPR především do procesu diagnostiky PK a částečně i do oblasti dopravního stavitelství obecně. Jedná se o zpracování možností doplnění nebo případně nahrazení některých standardně prováděných zkoušek a postupů (často nedostačujících a mnohdy časově i finančně náročných) diagnostiky konstrukce a aktivní zóny PK nedestruktivní technologií GPR.

Jelikož se autor práce s technologií GPR začal seznamovat až v průběhu doktorského studia, jsou v práci nastíněny i principy a historie této technologie, jejichž studium bylo součástí přípravy pro praktickou část této práce, a jejichž znalost je nezbytná pro správný postup měření a zpracování GPR dat. Součástí práce je také popis aplikací technologie GPR v dalších oblastech dopravního stavitelství, které více či méně souvisí nebo se překrývají s diagnostikou PK. Práce nicméně, vzhledem k odbornému zaměření autora, neobsahuje bližší rozbor a popis teorie z oblasti elektromagnetické (EM) energie nebo problematiku návrhu antén a dalšího hardwaru (HW) nebo příslušného softwaru (SW).

V teoretické části jsou mimo jiné popsány různé možnosti využití uvedené technologie včetně rešerše literatury vztahené k dané problematice. V praktické části jsou pak popsána laboratorní měření a měření in-situ s konkrétní sestavou GPR, jejíž účel a parametry vymezily možné konkrétní dílčí aplikace a cíle. Na základě poznatků zpracovaných v teoretické části a také vlastních měření uvedených v části praktické jsou pak formulovány závěry a doporučení pro koncového uživatele GPR technologie převážně v oblasti diagnostiky pozemních komunikací. Práce se také částečně zabývá stanovením podmínek měření, pracovních postupů, a posouzení vlivu vlastností zkoumaných materiálů, jako faktorů, jež mají vliv na možnosti sběru GPR dat a přesnost interpretace výsledků.

Hlavním cílem práce je zpracování problematiky závislosti elektromagnetických a mechanických vlastností materiálů konstrukcí PK, konkrétně možnosti použití technologie GPR spolu se zařízením *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Toto zařízení využívá jako vstupní data mimo jiné údaje o tloušťce konstrukčních vrstev PK z jádrových vývrtů nebo právě ze zařízení GPR. Výstupem jsou potom hodnoty ekvivalentních modulů pružnosti pro danou konstrukci, z nichž lze stanovit tzv. zbytkovou životnost konstrukce a případně navrhnout plán oprav či rekonstrukce. Cílem této části práce je tedy ověření možné závislosti

údajů (hodnot průhybů, resp. ekvivalentních modulů) získaných zařízením FWD a dat získaných pomocí GPR na konstrukcích PK a to nejlépe bez nutnosti provádění jádrových vývrtů. Na základě této závislosti (pokud bude prokázána) by pak mohla být v budoucnu s jistou pravděpodobností stanovena zbytková živostnost konstrukce na základě GPR měření bez nutnosti využití FWD.

Pro správné stanovení tloušťky konstrukčních vrstev PK (potřebný údaj pro posouzení výše popsané závislosti) je nicméně nutné přesně vypočítat jejich relativní permitivitu a tedy i rychlost šíření signálu v těchto vrstvách. Jedním z dílčích cílů je tedy zpracování možnosti stanovení rychlosti GPR signálu při průchodu různými materiály (souvrstvími) a stanovení relativních permitivit těchto materiálů s dostupnou GPR sestavou, jako základního údaje nutného pro veškerá GPR měření, resp. pro vyhodnocení GPR dat.

**Konkrétní cíle předložené práce lze pak shrnout následovně:**

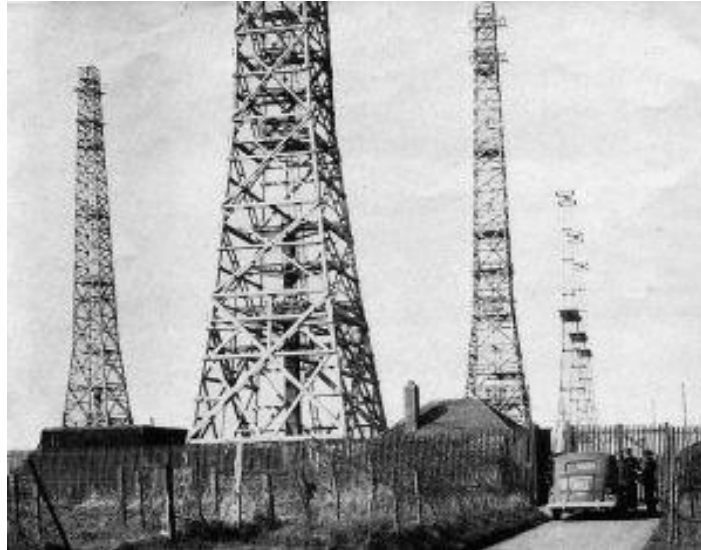
1. Posouzení možností využití GPR v oblasti diagnostiky PK.  
(rešerše literatury, obecné posouzení, posouzení a testování použité GPR sestavy)
2. Ověření možností využití použité GPR sestavy pro stanovení relativní permitivity ( $\epsilon_r$ ) a určení rychlosti šíření signálu v prostředí.
3. Ověření možné závislosti FWD a GPR dat.

## 2 Historie GPR

Slovo RADAR je zkratka vytvořená ve třicátých letech dvacátého století pro spojení RAdio Detection And Ranging, což lze přeložit jako radiová detekce a určování vzdálenosti (polohy). Existence EM vln, jež radar využívá, byla poprvé popsána Jamesem Clerkem Maxwellem (1831 -1879) v roce 1861. Historie zkoumání principu šíření a odrazů těchto vln sahá až do konce 19. století, kdy byly Heinrichem Hertzem (1857-1894) provedeny první experimenty. Hertz testoval EM teorie Jamese Clerka Maxwella z jeho díla „Pojednání o elektřině a magnetismu“ (*Treatise on Electricity and Magnetism*) z roku 1873. V roce 1887 Heinrich Hertz úspěšně vyvinul jednoduchý vysílač a přijímač. Zjistil, že EM vlny by mohly být přenášeny prostřednictvím různých typů materiálů a byly reflektovány ostatními materiály, jako jsou vodiče a dielektrika. [2], [3]

Tyto objevy byly využity v roce 1900 v Německu, kdy byl Christianem Hülsmejerem podán patent na anti kolizní zařízení pro lodě (vzhledem k dosahu přibližně 1 míle však nebyl příliš úspěšný). V roce 1917 pak Nikola Tesla stanovil zásady týkající se frekvence a síly signálu pro první primitivní radarové jednotky. [4]

Během druhé světové války byla radarová zařízení systematicky používána jako nástroj ke zlepšení vojenských obranných systémů. Radary poskytly včasnou detekci nepřátelských letadel a lodí. Během tohoto období byly zavedeny pulzní radary k umožnění určení vzdálenosti cíle výpočtem z prodlení signálu během jeho cesty k cíli a zpět známou rychlostí [2]. Radarový systém Velké Británie je zobrazen na obrázku 1. Během Vietnamské války (1955-1975) vyvinula Armáda Spojených států amerických radarový systém s názvem "*Combat Radar*" pro vyhledávání dolů, tunelů a bunkrů. Prostřednictvím dalšího výzkumu vedl tento radarový systém k rozvoji jiných radarů používaných pro identifikaci a profilování podpovrchových geologických jevů [3].

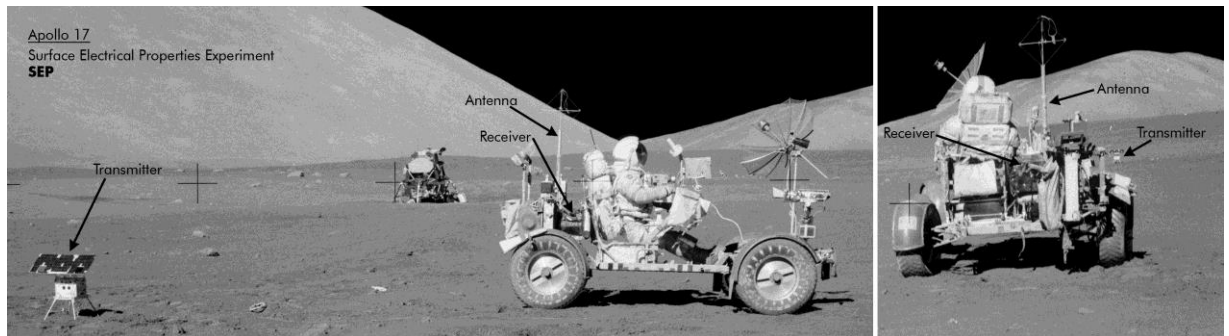


**Obrázek 1** Stožary britských radarů během tzv. *Bitvy o Británii* 2. světové války [5]

Ground penetrating radar – GPR (také *georadar*, *ground probing radar*, nebo *subsurface radar*) je speciální druh radaru navržený pro průzkum zemin a hornin. Jedná se o geofyzikální zobrazovací metodu založenou na měření odrazů EM vln vysílaných do země v podobě radarových impulsů. [4]

V roce 1910 Gotthelf Löwy a Heinrich Leimbach uložili dipólové antény do pole vertikálních vrtů a porovnaly síly signálů na jednotlivých dipólech. To umožnilo vytvořit hrubý obraz horninového tělesa mezi vrty. K detekci předmětů uložených pod povrchem byly radarové vlny poprvé použity v roce 1926 (Hulsenberg) kdy byl také prezentován význam relativní permitivity prostředí [3]. Georadar jako takový byl poprvé použit o tři roky později v Rakousku v roce 1929 (Stern) pro stanovení mocnosti ledovce. Tato technologie se následně přibližně dvě desetiletí rozvíjela spíše izolovaně a nebyla jí věnována příliš velká pozornost. To se změnilo až v padesátých letech, kdy se letoun leteckých sil USA pokusil přistát za nízké viditelnosti na ledové ploše v Grónsku. V důsledku průniku radarových paprsků palubního radaru do ledové masy byla ale chybně určena výška letounu nad povrchem a letoun havaroval. Následné vyšetřování ukázalo schopnost radarových paprsků pronikat do podpovrchových vrstev ledu a dalších materiálů a dále také možnosti užití takových zařízení pro stanovení hladiny podzemní vody, nebo mapování geologického podloží. [6], [2]

První „moderní“ georadar byl vyvinut v šedesátých letech minulého století v laboratořích *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [7]. V roce 1967 byl GPR použit na misi Apollo 17 na Měsíci v rámci *Surface Electrical Properties Experiment* (znázorněno na obrázku 2) [6].



**Obrázek 2** Georadarové zařízení na Měsíci [8]

V roce 1972 začala společnost GSSI (Rex Morey a Art Drake) prodávat první komerční GPR systém vůbec, což znamenalo počátek rychlého rozvoje (během následujících 20 let bylo podáno více než 300 patentů). Tento výzkum byl v počátcích podporován především ze strany *The Geological Survey of Canada* a *The US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory* [6]. V sedmdesátých letech pak byl GPR používán například pro průzkum v uhelných a solných dolech, nebo v oblasti glaciologie. Historie použití GPR v oblasti diagnostiky PK sahá právě do této doby (poloviny sedmdesátých let), kdy *The Federal Highway Administration* (FHWA) v USA testoval možnosti použití GPR pro aplikace v tunelech a později i na mostovkách (také pro určování vlhkosti a vlastností materiálů). Později byl systém využit i pro detekci dutin pod tuhými vozovkami. Od sedmdesátých let se GPR používal v mnoha aplikacích, včetně detekce inženýrských sítí, určování tloušťek ledu a profilování dna jezer a řek [3]. Dále byl GPR používán například v archeologii, těžebním průmyslu nebo pro určování lokalit vhodných pro uložení jaderného odpadu [4].

V osmdesátých letech začaly GPR průzkumy probíhat také v Kanadě a Skandinávii. První testy zde sice byly provedeny ve Švédsku a v Dánsku, ale běžným nástrojem při průzkumu a diagnostice PK se GPR stal v těchto zemích až po roce 1986, kdy byla tato technologie testována ve Finsku. První testy GPR ve Velké Británii (VB) byly provedeny v roce 1984 a přibližně ve stejné době ve Francii a Nizozemí. Ve Francii byl hlavní důraz

kladen na testování vozovek a v Nizozemí na měření tloušťky konstrukčních vrstev. V roce 1985 byl pro FHWA vyvinut první GPR systém navržený pro připevnění na silniční vozidlo [9]. Koncem osmdesátých a počátkem devadesátých let byla většina aplikací GPR v oblasti diagnostiky PK v severní Americe zaměřena na stanovení tloušťky konstrukčních vrstev vozovek, detekci dutin pod konstrukcí PK a mapování oblastí degradace materiálu na mostních konstrukcích. [10]

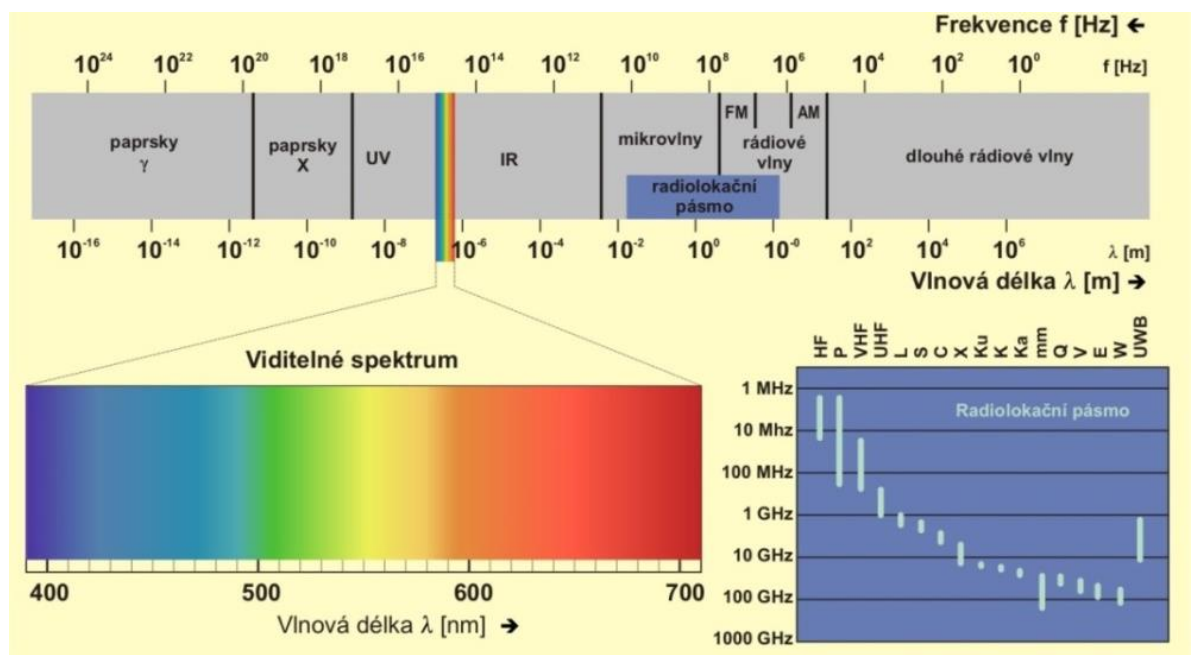
V polovině devadesátých let pak došlo k masivnímu rozšíření GPR technologie, a k rozvoji mnoha výrobců hardwaru a softwaru (Mala, Roadscanners, Ingegneria Dei Sistemi (IDS), Penetradar, Sensors and Softwares, UTSI Electronics). Koncem devadesátých let se GPR využíval v oblasti PK pro stanovení tloušťky konstrukčních vrstev, detekci dutin a delaminací, detekci výztuže, určení geologických profilů, detekci izolačních vrstev atd. [10]. V této době začala být věnována pozornost uvedené problematice také v akademické oblasti a to v souvislosti s rozvojem výpočetní techniky, přechodem zpracování signálu z analogového na digitální a možnostmi 2D a 3D numerického modelování [11].

### 3 Teorie GPR

V této kapitole jsou stručně popsány principy technologie GPR a jeho součástí. Jsou zde také uvedeny základní informace z oblasti EM vlnění a EM vlastností materiálů.

#### 3.1 Elektromagnetické vlnění

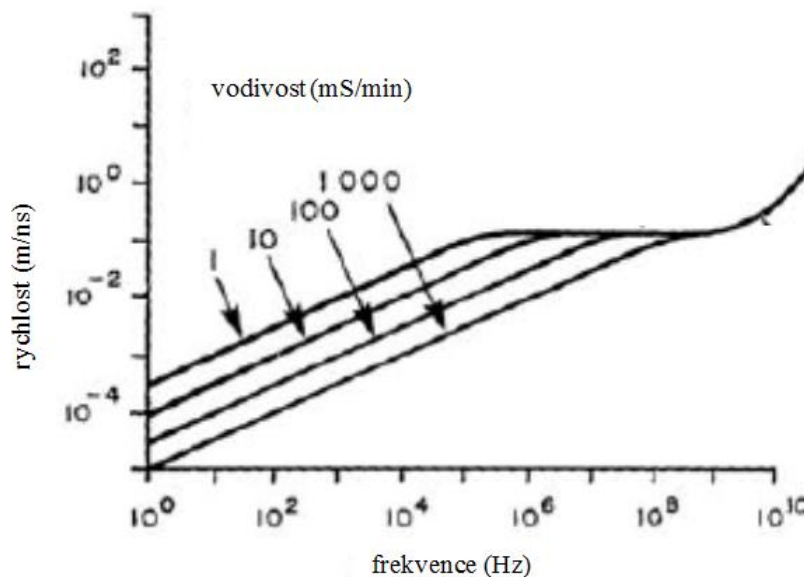
Radiové vlny, procházející jak vzduchem, tak pevnými materiály, jsou formou EM energie složené z oscilujícího elektrického a magnetického pole. Tyto vlny jsou produkovány, když elektrický proud osciluje ve vodivém tělese, což vytváří vedlejší magnetické pole. Generované elektromagnetické vlny se pak šíří směrem od zdroje se vzájemně kolmou elektrickou a magnetickou složkou. Jestliže dojde k absorpci nebo rozptýlení elektrické nebo magnetické nebo složky, EM pole zanikne.



Obrázek 3 Kmitočtové spektrum [12]

Radiové vlny zaujímají část EM spektra s frekvencí  $f$  [Hz] od 3Hz (vlnová délka  $\lambda = 100\,000$  km) do 300GHz ( $\lambda = 1$  mm). Kmitočtové spektrum je znázorněno na obrázku 3. Tyto vlny se ve volném prostoru šíří rychlostí světla  $c$  (299 792 458m/s). Geometrie šíření, odraz a lom probíhá analogicky šíření viditelného světla.

Frekvenční rozsah EM záření, které GPR využívá, vychází ze závislosti způsobu šíření na použité frekvenci. Obrázek 4 ukazuje, jak rychlost vlnění závisí na frekvenci a na vodivosti prostředí, ve kterém se vlna šíří. Důležitým skutečností je, že pro většinu zemin a hornin, kde je vodivost menší než 100mS/m, při použití frekvencí v řádech stovek a tisíců MHz je rychlost relativně konstantní [13].



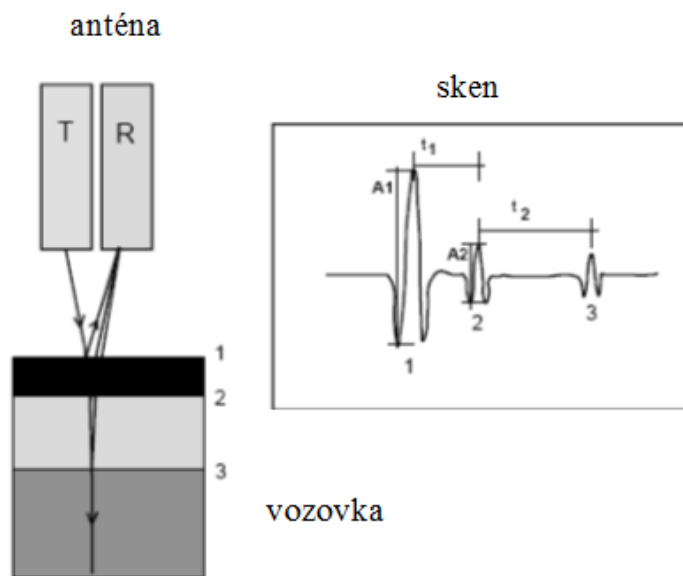
**Obrázek 4** Vztah mezi frekvencí a rychlostí signálu pro materiály s různou vodivostí – upraveno z [13]

### 3.2 Obecný princip technologie GPR

GPR je druh radarového zařízení, které detekuje objekty a rozhraní pod zemským povrchem. Pomocí georadaru může být detekován jakýkoli objekt, který má odlišné EM vlastnosti než okolní zeminy, může být určena jeho velikost, tvar a poloha a případně materiál, ze kterého se skládá. Na rozdíl od detektorů kovů je schopen detekovat kovové i nekovové cíle. Radarový záznam se obecně nazývá radargram.

GPR systém používá pro přenos pulsů EM energie do média krátké (do 1ns) diskretní pulzy radarové energie s centrální frekvencí v rozmezí od několika desítek MHz až po přibližně 2,5 GHz. Když impuls dosáhne rozhraní dvou materiálů s různými EM vlastnostmi, část energie se odrazí zpět, zatímco zbytek pokračuje dále do média. Odražená energie je přijata, zaznamenána a zobrazena jako křivky skládající se z amplitud na časové ose mezi vysláním a přijetím signálu (A-sken). Základní princip GPR technologie je znázorněn na

obrázku 5. Časový úsek mezi vysláním a přijetím odraženého signálu [ns] se nazývá *two-way travel time* (twt). [11]



**Obrázek 5** Základní princip GPR technologie – upraveno z [10]

T-vysílač (*transmitter*),  
R-přijímač (*receiver*),  
1 - rozhraní vzduch/asfalt,  
2 - rozhraní kryt/podkladní vrstvy,  
3 - rozhraní podkladní vrstvy/podloží,  
A - amplituda,  
T - čas

Výhodou použití GPR je fakt, že se jedná o neinvazivní a nedestruktivní metodu, která umožňuje měření velkých ploch v poměrně krátkém čase s relativně nízkými náklady. I přes tyto výhody má GPR určité limitující faktory: [14]

- použití v nehomogenní půdě může zvýšit počet falešných detekcí a omezit dosah
- citlivost na nežádoucí signály (rušení) způsobené různými přírodními (balvany, kořeny stromů atd.) a umělými faktory (vozidla, budovy, atd.)
- citlivost na další zdroje EM polí (mobilní telefony, rádiové a televizní vysílání, kabelová vedení atd.)
- nutnost vyškolené obsluhy při vlastním měření a nutnost vysoce subjektivní interpretace dat, založené na zkušenostech a znalostech této obsluhy

Naměřená GPR data se skládají z: [14]

- vazby mezi vysílací a přijímací anténou (*direct coupling* nebo *ground coupling*)
- odrazů od povrchu
- stochastických EM interferencí (z GPR systému, nebo okolního prostředí)
- odrazů od podpovrchových cílů
- rozptýleného nebo odraženého signálu od nehomogenit

### 3.3 Elektromagnetické vlastnosti materiálu

Výše uvedenými EM vlastnostmi média se rozumí relativní permitivita (dielektrická konstanta)  $\epsilon$ , magnetická permeabilita  $\mu$  a elektrická vodivost  $\sigma$ .

#### 3.3.1 Permitivita materiálu

Permitivita  $\epsilon$  [F/m] popisuje schopnost materiálu ukládat a přenášet elektrický náboj indukovaný EM polem. Je to číslo, které v podstatě udává, jak rychle radarová energie prochází materiálem. Tato energie se bude vždy pohybovat nejvyšší možnou rychlostí, ovšem v závislosti na zpomalení konkrétním materiálem, jímž bude procházet. [14], [15]

Hodnoty permitivity spolu s hodnotami rychlosti a vodivosti pro různé materiály jsou uvedeny v tabulce 1.

Ve volném prostoru (vzduch) se předpokládá hodnota permitivity stejná jako ve vakuu, a to dle vzorce 1.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]} \quad (1)$$

Kde:

$c$  ... rychlost světla [m/s]

$\mu_0$  ... permeabilita vakua [H/m]

Relativní permitivitu (resp. dielektrickou konstantu) lze potom vyjádřit dle vzorce 2 jako:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

Kde:

$\varepsilon$  ... permitivita prostředí [F/m]

$\varepsilon_0$  ... permitivita vakua [F/m]

**Tabulka 1** Vodivost, relativní permitivita a rychlosti šíření EM signálu – upraveno z [16]

Materiál	Relativní permitivita	Vodivost [S/m]	Rychlost [m/ns]
Vzduch	1	0	0,3
Destilovaná voda	80	0,01	0,033
Sladká voda	80	0,5	0,033
Mořská voda	80	0,003	0,01
Suchý písek	3-5	0,01	0,15
Vlhký písek	20-30	0,1-1	0,06
Vápenec	4-8	0,5-2	0,12
Břidlice	5-15	1-100	0,09
Bahno	5-30	1-100	0,07
Jíl	5-40	2-1000	0,06
Žula	4-6	0,01-1	0,13
Sůl	5-6	0,01-1	0,13
Led	3-4	0,01	0,16
Permafrost	3-6	-	-
Beton	4-10	-	-
Kov	1-2	-	-

Na rozdíl relativní permitivity dvou sousedních vrstev závisí velikost amplitud odraženého signálu (kontrast). Čím větší je tento rozdíl, tím větší množství energie je od rozhraní odráženo [17]. Tyto rozdíly jsou v horninách a zeminách často spojeny se změnou textury, litologie, pórovitosti a hustoty materiálů, ale zejména s obsahem vody [16]. V oblasti dopravního stavitelství se pak jedná o rozhraní konstrukčních vrstev, výztuž v betonu apod.

Podíl odražené energie se nazývá koeficient zpětného odrazu ( $R$ ) a je určen v závislosti na rychlostech GPR signálu v prostředích dle vzorce 3 [17].

$$R = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (3)$$

Kde:

$V_1$  ... rychlost v prostředí 1 [m/s]

$V_2$  ... rychlost v prostředí 2 [m/s]

Odražená vlna má přibližně sinusový tvar, a amplitudy tedy mají střídavě pozitivní a negativní hodnoty (jednotka volt). Když elektromagnetická vlna prochází materiálem s relativně nízkou relativní permitivitou a dostane se na rozhraní s materiálem o vyšší relativní permitivitě, amplituda má nejprve kladnou hodnotu (*positive*). Pokud naopak prochází materiálem s vyšší relativní permitivitou a dostane se na rozhraní s materiálem s nižší relativní permitivitou, amplituda je zprvu záporná (*negative*). [18], [19]

Hodnotu relativní permitivity jednotlivých materiálů lze sice získat v literatuře, nicméně při tomto postupu není brána v úvahu komplexní povaha tohoto parametru ve ztrátovém prostředí [20]. K odhadu relativní permitivity na dielektrickém rozhraní mohou být zpětně použity i jiné postupy uvedené v dalších kapitolách. Všechny konstrukční materiály PK a materiály podloží mohou být popsány jako kompozitní materiály, jejichž relativní permitivity závisí na relativních permitivitách jednotlivých složek, objemovém podílu složek, geometrii a tvaru složek a na elektrochemických interakcích mezi těmito složkami. V pūdách a nestmelených konstrukčních materiálech PK jsou to obvykle vzduch, voda (nebo sníh a led), minerální agregáty a produkty jejich zvětrávání, jíly, koloidní částice, soli a organické sloučeniny. [10]

### 3.3.2 Magnetická permeabilita

Magnetická permeabilita  $\mu$  [H/m] popisuje schopnost materiálu stát se zmagnetizovaným v přítomnosti elektromagnetického pole. Je to míra magnetické polarizace materiálu. Materiály, které jsou více magneticky propustné, snadněji interferují s magnetickou částí elektromagnetické vlny, čímž dochází k zeslabení vlny, což má za následek menší dosah GPR. [14], [15]

Relativní permeabilitu lze zapsat dle vzorce 4 jako:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

Kde:

$\mu$  ... permeabilita materiálu [H/m]

$\mu_0$  ... permeabilita vakua, která je stanovena dle vzorce 5 jako:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]} \quad (5)$$

Na základě hodnoty relativní permeability se materiály dělí do tří skupin: diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Diamagnetické materiály mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1 (např. měď, stříbro, zlato). Tyto materiály vykazují velmi omezené interakce s vnějším magnetickým polem. Paramagnetické materiály mají relativní permeabilitu nepatrně větší než 1 (např. hliník, hořčík, platina), a také nevykazují téměř žádné interakce s vnějším magnetickým polem. Oproti tomu materiály feromagnetické, jež mají relativní permeabilitu mnohem větší než 1 (např. kobalt, nikl, železo), na vnější magnetické pole silně reagují. Tyto materiály jsou považovány za ztrátové a jejich permeabilita je závislá na frekvenci budícího EM pole [3]. Asfalt, beton a většina zemin a hornin mají hodnotu relativní permeability rovnou přibližně jedné, tudíž se vliv této veličiny ve většině aplikací GPR zanedbává [14].

### 3.3.3 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost  $\sigma$  [S/m], popsaná ve vzorci 6 jako reciproká hodnota elektrického odporu, popisuje schopnost materiálu vést elektrickou část EM vlny. Signál je schopen proniknout velkým množstvím materiálu o nízké vodivosti (např. velmi suchý písek, led nebo suchý beton), ale pokud je materiál vodivý (např. slaná voda nebo vlhký beton), je EM energie poměrně rychle absorbována, a tím je snížen dosah GPR aparatury. [15]

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ [S/m]} \quad (6)$$

Kde:

$\rho$ ...elektrický odpor [ $\Omega$ ]

Je také nutné poznamenat, že vodivost může být závislá na použité frekvenci. Například pro beton je vodivost při frekvenci 1GHz 1,5 krát vyšší než vodivost u stejnosměrného proudu. [4]

### 3.3.4 Shrnutí

Z výše uvedeného vyplývá, že signál putuje rychleji materiálem s nízkou relativní permitivitou než materiálem, který má vyšší permitivitu. Vodivost materiálu potom určuje, jak rychle se signál utlumuje (menší amplitudy odrazu) v závislosti na vzdálenosti, a tím určuje, jak hluboko vlna do materiálu pronikne. Tyto dvě vlastnosti jsou většinou nezávislé. Například sladká a slaná voda mají v přibližně stejné hodnoty permitivity (u slané vody je mírně nižší), nicméně slaná voda vykazuje mnohem vyšší vodivost než voda sladká. GPR signál tedy putuje v obou případech podobnou rychlostí, ale ve slané vodě je velmi rychle utlumován a neproniká tak hluboko [21]. Toto je například nutné brát v úvahu při zpracování dat z PK naměřených po zimní údržbě.

Z hlediska teorie šíření EM vln lze z výše uvedených fyzikálních veličin odvodit rychlost šíření signálu v prostředí podle vzorce 7 jako:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \text{ [m/s]} \quad (7)$$

Kde

$c$  ... rychlost světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$  m/s),

$\mu_r$  ... relativní magnetická permitivita [-]

$\epsilon_r$  ... relativní dielektrická permitivita [-]

Dále je nutné upozornit na fakt, že při frekvencích obvykle vyšších než 1500MHz vykazují některé geologické materiály obsahující vodu vyšší energetický útlumu než obvykle. K této ztrátě energie dochází takzvanou molekulární relaxací. K tomuto jevu dochází proto, že molekuly vody jsou bipolární a otáčejí se do souladu s orientací vnějšího EM pole. Tato rotace způsobí, že radarová energie je převedena na energii mechanickou, která se následně rozptýlí ve formě tepla. Energetická ztráta tohoto druhu nastane obvykle pouze ve vlhkém prostředí při použití vysokých frekvencí. [1]

Útlum signálu  $\alpha$  [dB/m] je pak stanoven dle vzorce 8 [16].

$$\alpha = 1,69 \cdot 10^3 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ [dB/m]} \quad (8)$$

Kde:

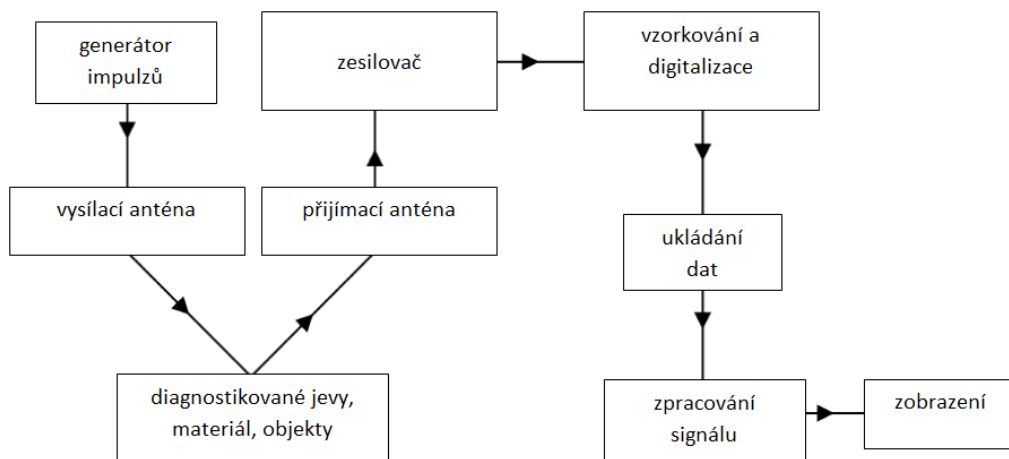
$\sigma$  ... vodivost [S/m]

$\epsilon_r$  ... relativní dielektrická permitivita [-]

### 3.4 Hlavní komponenty GPR sestav, příslušenství a další vybavení

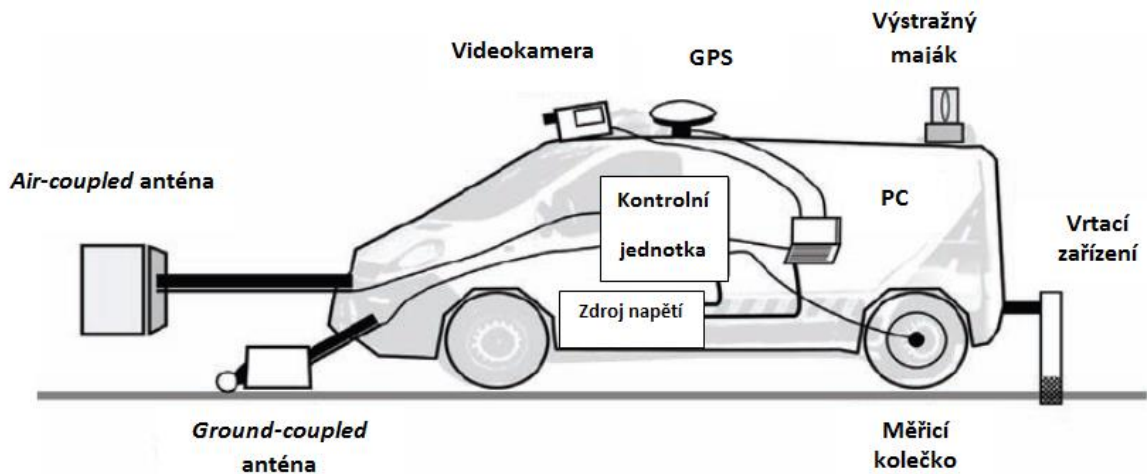
System GPR se obvykle skládá z následujících součástí: [14]. Schematicky jsou tyto součásti zobrazeny na obrázku 6.

- vysílací a přijímací antény, nebo pole antén
- řídicí (centrální) jednotky, která generuje EM pulzy a zaznamenává přijaté signály
- zobrazovací jednotky, která v reálném čase poskytuje zobrazení naměřených dat
- zdroje napětí - baterie (obvykle 12V), pro napájení jednotky
- měřicí platformy – automobil, kolejové vozidlo, měřicí vozík, sáně, apod.



**Obrázek 6** Diagram hlavních součástí běžného GPR systému – upraveno z [22]

Dalšími součástmi jsou pak datové a napájecí kabely, zařízení pro určení polohy (odometr, *Global Navigation Satellite System* - GNSS), laserové nebo ultrazvukové snímače, kamerové systémy atd. Na obrázku 7 je zobrazena typická sestava měřicího vozidla pro měření na pozemních komunikacích.



**Obrázek 7** Příklad GPR systému pro měření vozovek – upraveno z [10]

### 3.5 Antény

Nejdůležitější složkou v GPR systému jsou antény. Na anténách je produkována energie oscilujícím proudem o různých vlnových délkách. Čím vyšší je frekvence oscilace, tím kratší je vlnová délka produkované elektromagnetické energie. Velikost antén roste se vzrůstající vlnovou délkou produkovaného EM pole. Anténní sady, které umožňují vysílat signál i přijímat jeho odraz se nazývají monostatické a sady, které jsou pouze vysílače, nebo pouze přijímače, se nazývají bistatické. Existují také vícekanálové antény multistatické nebo anténní pole, kdy se několik antén používá jako vysílače a další antény jako přijímače. [1]

V současné době existuje velké množství typů antén (válcové monopóly a dipóly, *Vee* dipóly, bikónické dipóly, *bow-tie*, *horn* s dielektrikem, *double-ridged horn*, *quad-ridged horn*, atd.). Typ použité antény závisí vždy na konkrétní aplikaci (detekovaný objekt, předpokládaná hloubka, EM vlastnosti objektu a okolního materiálu). Protože je anténa umístěna velmi blízko povrchu (často v kontaktu se zemí nebo diagnostikovaným materiálem), mají EM vlastnosti prostředí vliv na vyzařovací charakteristiky antény. Vysílaný signál by měl mít, vzhledem k velmi krátké době cesty signálu z vysílače do přijímače (*twt*),

velmi krátkou dobou trvání a anténa by měla být schopna přenášet signál s malým zkreslením, aby se zabránilo překrytí požadovaných odrazů šumem a rušením. [22]

Důležitým parametrem antén je tzv. centrální frekvence (nejčastější detekovaná frekvence). Ta závisí především na potřebné hloubce detekce v konkrétní aplikaci. Útlum signálu v prostředí je obecně významnější u vyšších frekvencí. Čím větší je tedy požadovaná hloubka, tím musí být centrální frekvence použitých antén nižší. Aplikace GPR vyžadují detekci od hloubek několika centimetrů až po stovky metrů. Centrální frekvence se v důsledku tohoto pohybují od několika desítek MHz až po přibližně 2,5GHz. Přibližný vztah mezi horizontálním rozlišením  $\Delta x$  a koeficientem útlumu  $\alpha$  lze vyjádřit dle vzorce 9 [22].

$$\Delta x = 4d \sqrt{\frac{\ln 2}{2 + \alpha d}} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

Kde:

$d$  ... tloušťka vrstvy materiálu [m]

$\alpha$  ... konstanta útlumu prostředí [-]

Na útlum signálu má také vliv vlhkost, hustota a homogenita materiálu. Dalším faktorem výběru antény je postup měření a její pozice. Dvě základní kategorie antén jsou v tomto ohledu *air-coupled* a *ground-coupled*.

*Air-coupled* antény (obvykle typu *horn*) jsou navrženy tak, aby mohly být použity s odsazením od povrchu (obvykle 150 až 500mm nad povrchem), tedy se vzduchovou mezerou mezi anténou a povrchem, což je výhodné pro sběr dat na velkých plochách při vysokých rychlostech (např. na PK a železničních tratích) [21]. Nedochází tak k omezování běžné dopravy během měření. Při využití v diagnostice PK obvykle pracují v rozsahu od 500MHz do 2,5GHz. Největší výhodou těchto systémů je fakt, že tzv. *antenna coupling* (vzájemné ovlivňování jednotlivých antén) se nemění se změnami vlastností vozovek. To umožňuje použití těchto antén pro měření změn materiálových vlastností [10]. Nevýhodou těchto systémů je ale nízká hloubka penetrace signálu (obvykle do 0,5 až 0,9m), protože část vyzařené energie se odráží zpět od povrchu vozovky.

Naproti tomu *ground-coupled* antény jsou při měření v plném kontaktu s povrchem (nebo v malém konstantním odstupu), což umožňuje větší hloubku penetrace signálu, ale

omezuje rychlost sběru dat. Tyto antény jsou obvykle typu *bow-tie* [2]. Při využití v diagnostice PK obvykle pracují v rozsahu od 80MHz do 1,5GHz a hloubka pronikání signálu může dosahovat až 20 nebo 30m, což je hlavní výhoda oproti *air-coupled* anténám. Další jejich výhodou je vyšší vertikální rozlišení. Nevýhodou je pak zkreslení a interference signálu v blízkosti antény v oblasti těsně pod povrchem (v tzv. *near field zone*). [10]

Tento vliv je způsoben elektromagnetickým polem v blízkém okolí antény o poloměru přibližně 1,5 násobku vlnové délky signálu přijímaného anténou. V případě antén s nižší frekvencí, což jsou většinou antény *ground-coupled* je tedy tato oblast větší než u antén s vyššími frekvencemi. V případě *ground-coupled* antén je další nevýhodou fakt, že jsou umístěny přímo na povrchu a tedy povrchový odraz je generován přímo v této zóně. V případě *air-coupled* antén jsou obvykle používány vyšší frekvence a antény jsou umístěny v určité vzdálenosti od povrchu.

Každá anténa má jedinečné parametry a charakteristiky a výkon antén se v průběhu času mění. Proto se doporučuje provádět tzv. komparační měření a testování následujících parametrů anténních systémů: [10]

- Poměr intenzity šumu a signálu (*Noise to Signal ratio, N/S ratio*)
- Stabilita signálu (kolísání amplitud and časových údajů)
- Linearita *twt*
- Dlouhodobá stabilita (posun časového okna)
- Hloubka penetrace

### **3.6 Vertikální a horizontální rozlišení GPR**

Rozlišení GPR lze definovat dvěma způsoby. První se týká schopnosti určování polohy cíle v prostoru nebo čase. Druhá definice se vztahuje ke schopnosti rozpoznat dva cíle, které se nacházejí velmi blízko sebe. Rozlišení ovlivňuje mnoho faktorů. Jde o charakteristiky signálu, metodu měření, EM vlastnosti prostředí a vzdálenost antény od objektu. Před měřením je tedy nutné zvážit použitou frekvenci, krok měření a počet vzorků na jedné stopě. Pro *ground-coupled* systémy platí, že GPR má nejvyšší rozlišení, pokud je anténa umístěna přímo na povrchu, a klesá s rostoucí vzdáleností mezi anténou a povrchem. Rozlišení antén je nepřímo úměrné použité frekvenci a klesá s rostoucím útlumem signálu v materiálu. Horizontální rozlišení závisí také na schématu vyzařování antény (*antenna*

*footprint, radiation pattern*). Čím užší je vyzařovaný svazek, tím je lépe možné rozlišit dva objekty v těsné blízkosti. [23]

Schopnost GPR aparatury rozlišit jednotlivé objekty je také omezena velikostí tzv. Fresnelovy zóny, jejíž velikost je dána poloměrem  $r$  [m] podle vzorce 10 [24].

$$r = \sqrt{\frac{d \cdot v}{2f}} \text{ [m]} \quad (10)$$

Kde:

$d$  ... tloušťka vrstvy [m]

$v$  ... rychlost šíření signálu [m/s]

$f$  ... frekvence [Hz]

Centrální frekvence odraženého signálu přijímaného anténou, je obvykle nižší, než je nominální střední frekvence anténou vysílaná. Uvedený jev má příčinu v tom, že vyslaný signál se skládá z určitého frekvenčního pásma. Vyšší frekvence jsou v prostředí více utlumovány, což má za následek zvýšení průměrné vlnové délky přijatého signálu. Z tohoto důvodu je přesnější určovat vertikální rozlišení dle centrální frekvence přijatého vlnění. [25]

Vertikální rozlišení profilu GPR je potom vzdálenost mezi dvěma sousedními odrazy podél jedné stopy. Tato vzdálenost se v ideálních podmínkách rovná  $\lambda/4$ , přičemž v reálných podmínkách je to spíše  $\lambda/2$ . Hodnota  $\lambda$  [m] je vlnová délka signálu a lze ji dle vzorce 11 vyjádřit jako [16]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \text{ [m]} \quad (11)$$

Kde:

$v$  ... rychlost signálu [m/s]

$f$  ... frekvence [Hz]

Energie vyzařovaná z povrchu antény vytváří silné elektromagnetické pole kolem antény v okruhu asi 1,5 vlnové délky centrální frekvence. Tato oblast (*near-field* zóna)

v blízkosti standardní dipólové antény je tedy technicky vlastně částí antény, protože zde není zaznamenáno žádné šíření vln. Pro detekci cílů v blízkosti povrchu by tedy měly být použity antény s vyšší frekvencí a tedy menší vlnovou délkou. [1]

### 3.7 Způsoby měření a sběru dat

Georadarem lze měřit buď na určitém bodě, kde je měřena jediná stopa signálu (*trace*). Záznam se pak nazývá A-sken, nebo na měřící linii (série po sobě jdoucích bodových měření s určitým přírůstkem staničení) při pohybu antény po měřícím profilu - tento záznam se nazývá B-sken [22]. V 2D matici B-skenu (jde vlastně o vertikální řez daným materiálem nebo konstrukcí) každý řádek reprezentuje jeden bodový vzorek (*sample*) na určité stopě a daný sloupec pak představuje tuto stopu. Hodnota prvku matrice je amplituda napětí pro danou stopu a daný vzorek. Nejnověji lze provádět měření na velkých plochách, a to buď opakováním měření po měřících liniích s danou ekvidistancí (a jejich spojením do 3D obrazu) nebo pomocí anténních polí. Záznam takového 3D měření se pak nazývá C-sken a umožňuje oproti předchozím metodám (například i díky možnosti vytvořit horizontální nebo vertikální řezy v libovolném místě) snadnější interpretaci dat a identifikaci cílů. [14]

### 3.8 Šíření a odrazy signálu GPR

Zjednodušeně lze říci, že EM vlny (hlavní svazek) se z GPR antén šíří přibližně ve formě rotačního kužele s vrcholem ve vysílači antény. Radarová stopa (plocha podstavy kužele) v určité hloubce závisí na vlnové délce použitého záření a relativní permitivitě materiálu dle vzorce 12 [26]. Schematicky je toto znázorněno na obrázku 8.

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K-1}} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

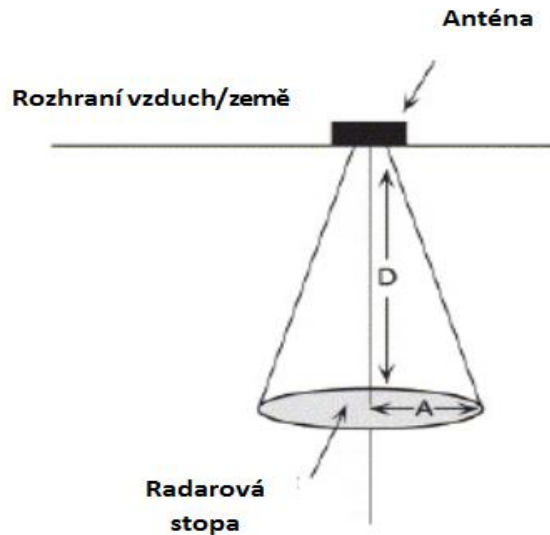
Kde:

A ... poloměr podstavy [m]

$\lambda$  ... vlnová délka [m]

D ... hloubka [m]

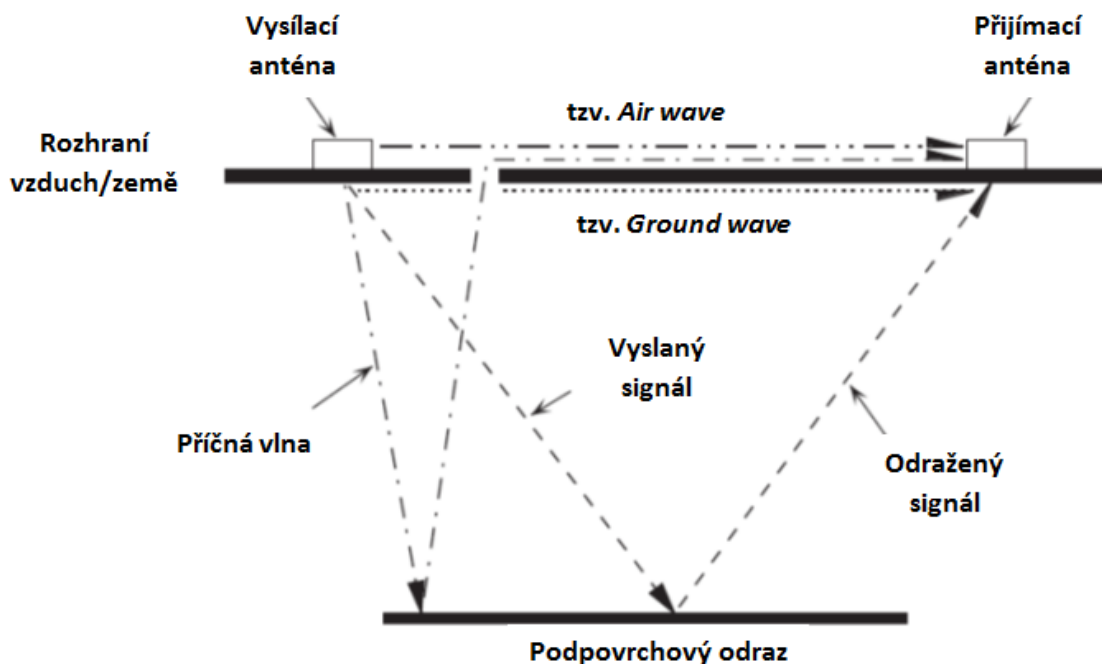
K ... relativní permitivita prostředí [-]



**Obrázek 8** Velikost radarové stopy – upraveno z [26]

Během přechodu EM vlny ze vzduchu do země dochází k lomu paprsku tak, že vzniká užší kužel, než je ten, v němž se EM vlny šířily z antény [1]. Čím je relativní permitivita materiálu vyšší, tím nižší je rychlost vlny a kužel šíření užší. Tento efekt většinou přetrvává s postupem paprsku do větších hloubek. Toto je dáno faktem, že se s narůstající hloubkou ve většině případů také zvyšuje stlačení půdy a saturace, což znamená také zvyšování hodnoty relativní permitivity. U stavebních objektů a zemních konstrukcí tento předpoklad samozřejmě ne vždy platí, a proto musí být ověřen stanovením permitivit jednotlivých horizontálních vrstev.

Odrazy od podpovrchových diskontinuit nejsou jediné zaznamenané signály, jak je znázorněno na obrázku 9. Úplně první impuls přijatý přijímačem je tzv. *air wave*, což je vlna šířící se z vysílače do přijímače vzduchem po přímé trajektorii (*direct coupling*) rychlostí světla. Druhá vlna je tzv. *ground wave* (*ground coupling*), která se šíří materiálem (zemí) opět přímo z vysílače do přijímače. Tyto vlny mohou zakrýt žádoucí odrazy v horních částech diagnostikovaného média. Přijímány jsou také vlny příčné (*lateral wave*), které jsou způsobeny odrazem těsně pod povrchem a po dosažení povrchu pod kritickým úhlem se následně lámou a dále šíří po rozhraní vzduch/země. [25]



**Obrázek 9** Druhy signálů zachycené přijímačem GPR – upraveno z [25]

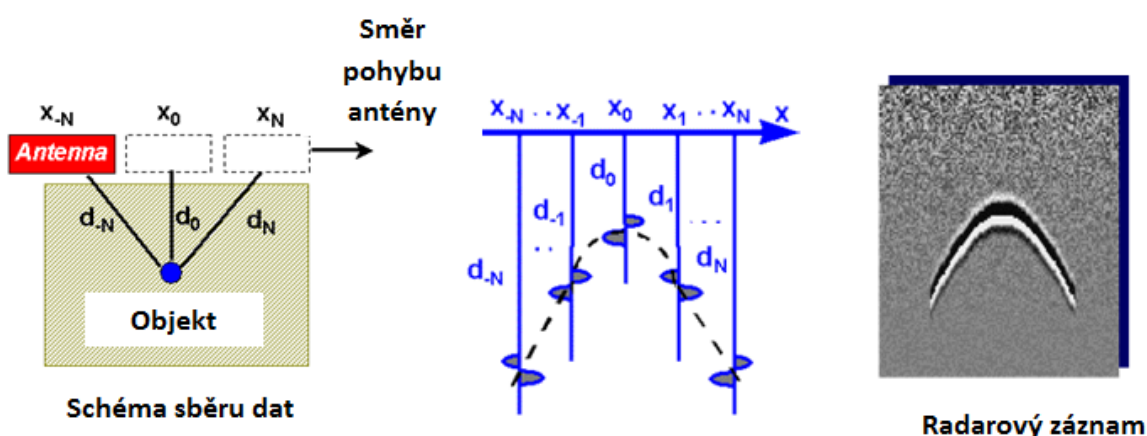
V podloží mohou být hranice vrstev mající tvar hřebenů nebo žlabů, nebo jsou jinak nepravidelné. Tyto útvary mohou způsobit buď zaostření, nebo rozptýlení radarové energie v závislosti na orientaci povrchu a pozici antény. Pokud je reflexní rovina skloněna od antény, nebo je konvexního tvaru, většina energie je odražena od antény a zaznamenány jsou pouze nízké amplitudy. Toto se nazývá radarový rozptyl (*scatter*). Pokud je naopak reflexní rovina skloněna směrem k anténě, nebo je konkávní, odražená energie bude zaostřena (*focus*) a zaznamenány budou pouze vysoké amplitudy. [1]

V důsledku výše uvedeného způsobu šíření signálu GPR se na konkrétní stopě záznamu neobjevují pouze odrazy od objektů o staničení dané stopy (přímo pod anténou), což může způsobit následující zkreslení: [25]

- Zdánlivě mírnější pokles bodů odrazu na skloněném povrchu (rozhraní), než je sklon tohoto povrchu ve skutečnosti
- Tvorba difrakce na izolovaném bodovém odražeči (hyperbolické odrazy)
- Deformace způsobené zvlněnými povrchy (zúžení konvexních odrazných ploch a rozšíření ploch konkávních)
- Tvorba odrazů mimo rovinu rozhraní

## Hyperbolické odrazy od bodových zdrojů

Hyperbolický odraz je forma odrazu od bodových zdrojů (např. příčná výztuž nebo potrubí uložené kolmo k orientaci měřícího profilu), která vzniká v důsledku výše zmíněného vyzařování EM signálu z antény ve tvaru kužele. Vyslaná energie se tedy odráží i od objektů, které nejsou přímo pod anténou, ale tyto odrazy jsou zaznamenány v pozici (staničení), kde se právě anténa nachází (přímo pod anténou). V důsledku delší trajektorie šikmé vlny jsou pak tyto odrazy, vzhledem k vyšší hodnotě  $twt$ , také zaznamenány ve větších hloubkách, než se skutečně nacházejí. Tímto je právě způsoben hyperbolický tvar odrazu znázorněný na obrázku 10. Aktuální polohu cíle označuje vrchol hyperboly a tvar hyperboly je dán vodorovným krokem skenování a rychlostí šíření vlny v daném materiálu (vyšší rychlost šíření daná nižší relativní permitivitou způsobuje širší hyperboly a opačně). Velikost zdroje odrazu lze zhruba odhadnout podle šířky plochého vrcholu hyperboly. [14]



Obrázek 10 Znáornění principu hyperbolického odrazu – upraveno z [27]

### 3.9 Metody stanovení rychlosti šíření GPR signálu

Důležitým prvkem při používání technologie GPR je znalost rychlosti šíření emitovaného EM záření ve zkoumaných materiálech a vrstvách zemin a hornin. Jestliže je totiž známa rychlost šíření a je změřen čas mezi vysláním a příjmem odraženého signálu ( $twt$ ), může být odhadnuta hloubka objektu nebo rozhraní (ale i tloušťky jednotlivých vrstev materiálů).

Doba cesty GPR signálu ( $twt$ ), je v podstatě jediné přímé měření získané v terénu. Pokud se jedná o přímý odraz a pozice vysílače a přijímače je stejná, lze zjednodušeně (předpoklad homogenní vrstvy s konstantní relativní permitivitou) stanovit rychlost šíření GPR signálu dle vzorce 13 [16].

$$v = \frac{2L}{t} \quad [\text{m/s}] \quad (13)$$

Kde:

L ... vzdálenost objektu a antény [m]

t ... čas mezi vysláním a přijetím odraženého signálu [s]

Rychlost šíření je však proměnná (zpomalení v materiálech oproti vzduchu) a závislá na fyzikálních a dielektrických vlastnostech média (popsáno výše). Počáteční odraz je pak stanoven pomocí záznamu první pozitivní amplitudy odraženého signálu. Tento postup platí ale pouze pro jednovrstvé prostředí.

Tabelární hodnoty rychlostí šíření EM signálu uváděné v literatuře lze vzhledem ke komplexnosti problematiky a charakteristických vlastností pro každou lokalitu a materiál použít pouze orientačně. Stanovit rychlost šíření lze také přímým měřením relativní permitivity vzorků v laboratoři například pomocí percometru. Tyto hodnoty ale ne vždy odpovídají podmínkám in-situ. Relativní permitivitu lze ale stanovit i samotným GPR měřením.

Pro stanovení rychlosti pomocí GPR existují obecně dva postupy. Jsou to metody využívající odražené vlny (*Reflected Wave Methods*) a metody využívající přímé vlny (*Direct Wave methods*). Metody využívající odražené vlny vyžadují, aby vyslaná energie byla zpět odražena od objektů nebo stratigrafických rozhraní ve známé (měřené) hloubce. Metody využívající přímé vlny pracují s vyslanou vlnou, která putuje z vysílače přímo přes médium do přijímače po známé, předem změřené, dráze. [1]

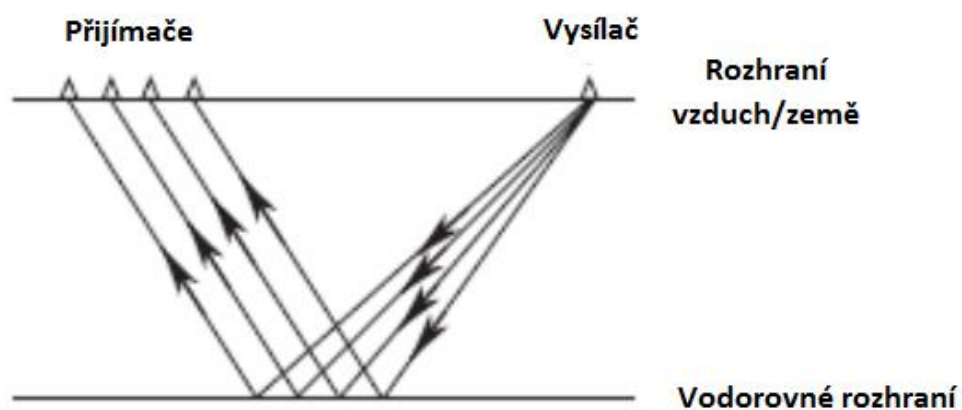
Nejjednodušším způsobem stanovení rychlosti šíření GPR signálu je samozřejmě identifikace stávajících objektů nebo rozhraní způsobující odraz, u kterých je (ať už provedením sondy, jádrového vývrtu nebo získáním informací z projektové dokumentace) známa hloubka. Dalším způsobem by bylo záměrné umístění takového objektu do předem

určené hloubky v příkopu nebo sondě provedené v blízkosti měřeného profilu. Tato kalibrační měření jsou ovšem časově a finančně náročná a nelze je vždy aplikovat. Také by byla eliminována jedna z hlavních výhod použití GPR technologie, kterou je její nedestruktivní povaha.

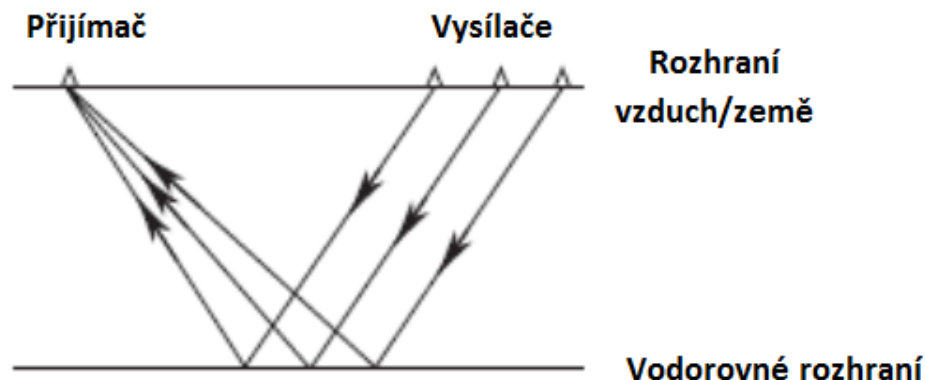
Analýzu rychlosti šíření GPR signálu bez nutnosti provádět přímé měření hloubky (nebo sond a vývrtů) je možné uskutečnit, pokud je vzájemná pozice vysílače a přijímače fixní nebo s proměnnou vzdáleností těchto komponent.

Mezi metody, u kterých dochází ke změnám vzájemné pozice vysílače a přijímače, patří metoda *Wide Angle Reflection/Refraction (WARR)* nebo *Common Midpoint (CMP)*. V prvním případě jedna anténa zůstává stacionární, zatímco druhá se pohybuje podél profilu měření. V druhém případě se obě antény současně pohybují od sebe navzájem na obou stranách od společného středového bodu. V případě poměrně homogenního prostředí je obecně takový postup poměrně přesný, ale pro více vrstev s různou relativní permitivitou poskytuje pouze hrubý odhad. Uvedené metody se vzhledem k jejich charakteru označují jako *variable offset methods (VOM)*. [28]

Vzhledem k tomu, že v obou metodách se používá více stop signálu, nazývá se analýza dat těchto metod *multiple trace analysis (MTA)* [29]. Do této skupiny metod lze také zařadit například metodu *Common Source* (společný vysílač – obrázek 11) nebo *Common Receiver* (společný přijímač – obrázek 12) [25].



**Obrázek 11** Princip metody Common Source – upraveno z [25]



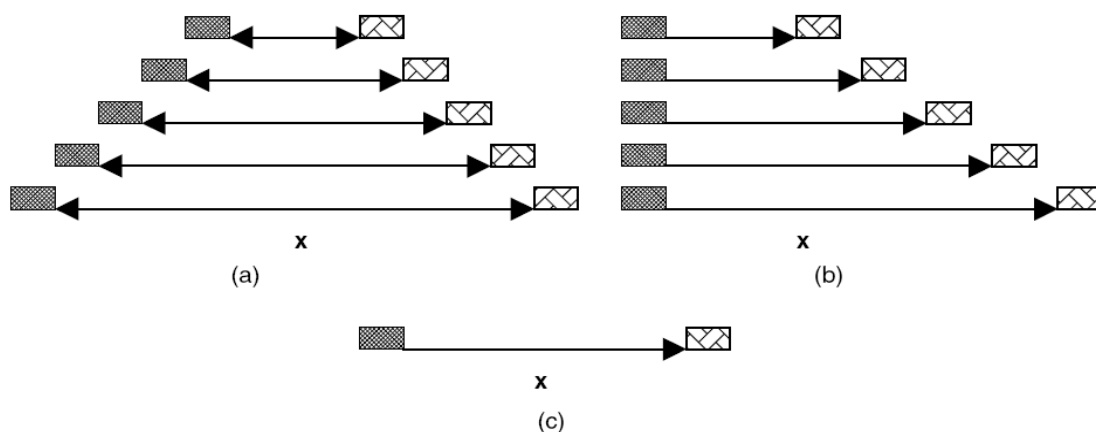
**Obrázek 12** Princip metody Common Receiver – upraveno z [25]

Uvedené metody tedy zaznamenávají odrazy ze stejného bodu odrazu několikrát v průběhu zvětšování vzdálenosti přijímače a vysílače. Skládání těchto odrazů zvyšuje energii signálů oproti náhodnému šumu. Dochází také ke zvýšení přesnosti určení prostorové polohy a kvality zobrazení. [30]

Ve většině případů se CMP a WARR testy obvykle používají pouze k určení rychlosti signálu ve vrstvách ležících v blízkosti povrchu. Pro větší hloubky by měly být používány pouze v případech, kdy je možné zjistit skutečné dráhy GPR signálu. [1]

U běžného způsobu měření pomocí GPR se vysílač a přijímač současně pohybuje po měřící linii s konstantním vzájemným rozestupem. Tato metoda se nazývá profilování nebo *fixed offset method* (FOM) nebo také *common offset method* (COM) a způsob analýzy dat se nazývá *single trace analysis* (STA), protože se pro odhad rychlosti na každém místě používá jediná stopa. U těchto metod je třeba brát v úvahu kolísání doby počátečního času u různých GPR sestav a také v závislosti na změnách teploty prostředí nebo ohýbání kabelů. [29]

Schematické znázornění představující typy měření CMP, WARR a FOM představuje obrázek 13.



**Obrázek 13** Schematické znázornění tří hlavních typů měření rychlosti GPR signálu

(a) CMP; (b) WARR; (c) FOM; (tmavá pole - vysílač, světlá pole - přijímač) [29]

Pokud je měřicí profil (získaný metodou FOM nebo COM) veden nad bodovými zdroji odrazu (potrubí, stěny, kameny, atd.) jsou generovány hyperbolické odrazy. Tvar vytvořených hyperbol je funkcí průměrné rychlosti šíření signálu v médiu a velikosti bodového zdroje, který odraz způsobil (popsáno výše). Určení rychlosti při takovém měření se tedy může provádět také pomocí analýzy geometrie těchto reflexních hyperbol. Zjednodušeně řečeno je rychlost šíření určena podle tvaru hyperboly. I zde ale platí předpoklad, že se v médiu všechny vlny šíří konstantní rychlostí, což způsobuje v nehomogenním prostředí nepřesné a zkreslené hodnoty (pro určité úlohy nicméně dostačující).

Jiná metoda zvaná *Reflection Coefficient Method* – (RCM - metoda reflexního koeficientu) využívá porovnání amplitud signálu na rozhraní dvou materiálů. V diagnostice pozemních komunikací jsou často porovnávány amplitudy odrazů od povrchu vozovky a odrazů od kovového plechu umístěného ve stejné vzdálenosti od antény (také na povrchu vozovky). [7]

Tímto způsobem lze však přesně určit relativní permitivitu materiálu (případně rychlost šíření) především svrchní vrstvy a to dle vzorce 14 [10].

$$\varepsilon_a = \left[ \frac{1 + A_1 / A_m}{1 - A_1 / A_m} \right]^2 \quad (14)$$

Kde:

$\varepsilon_a$  ... relativní permitivita povrchové vrstvy [-]

$A_1$  ... hodnota amplitudy odrazu od povrchu [mV]

$A_m$  ... hodnota amplitudy odrazu od tzv. úplného odražeče (kovový plech) [mV]

Pro následnou druhou vrstvu se postupuje způsobem odvozeným ze vzorce 14 a to následovně – vzorec 15 [10].

$$\sqrt{\varepsilon_b} = \sqrt{\varepsilon_a} \cdot \left[ \frac{1 - \left[ \frac{A_1}{A_m} \right]^2 + \left[ \frac{A_2}{A_m} \right]}{1 - \left[ \frac{A_1}{A_m} \right]^2 - \left[ \frac{A_2}{A_m} \right]} \right] \quad (15)$$

Kde:

$\varepsilon_b$  ... relativní permitivita druhé vrstvy [-]

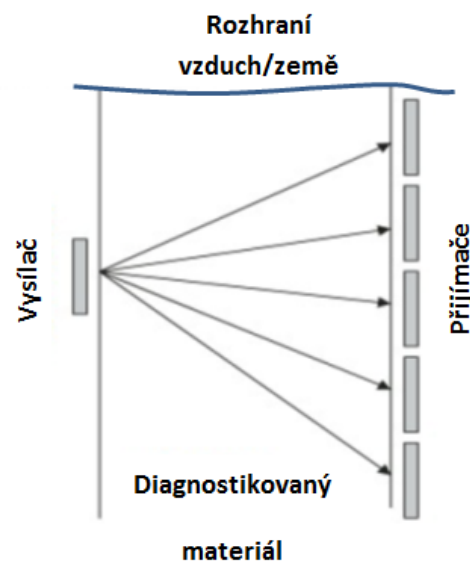
$A_2$  ... hodnota amplitudy na rozhraní povrchové a následné vrstvy [mV]

Analogicky může být postupováno při výpočtu permitivit dalších podkladních vrstev.

Tato metoda je však vhodná pouze pro tzv. *air-coupled* antény. Také předchází Vzorec platí pouze za předpokladu zanedbání útlumu v povrchové vrstvě. Nejpřesnější výsledky pak dle [10] tato metoda dává v případech, kdy je svrchní stmelená vrstva vozovky tloušťky více než 60mm bez dalších tenkých mezilehlých vrstev mezi první a druhou posuzovanou vrstvou. U následných vrstev (vrstvy podkladu, materiál podloží) přesnost této metody klesá.

Další metodou určení rychlosti šíření GPR signálu je tzv. transiluminace (znázorněno na obrázku 14). Jedná se o metodu využívající přímé vlny původně vyvinutou pro hodnocení integrity neporušených struktur pro inženýrství a archeologické aplikace. Při samotném měření se na dvě protilehlé stěny tvořící okraje zemního tělesa umístí vysílač a přijímač.

Nevýhodou této metody je, stejně jako u metody WARR a CMP, nejistota v určení přesné trajektorie signálu putujícího materiálem z vysílače do přijímače. [1]



**Obrázek 14** Princip transiluminace – upraveno z [31]

Kromě výše uvedených základních metod byly vyvinuty i další speciální metody. V roce 2004 byla prezentována metoda [32] pro určení času putování signálu pojmenovaná Optaprox, založená na simulacích. Byl zde popsán postup získání výsledků z modelových referenčních křivek. Na rozdíl od hyperbolické aproximace tento postup zohledňuje změny rychlosti šíření signálu ve vrstevnatých materiálech. Další z efektivních metod [33], která slouží také k měření skutečného časového rozsahu systému GPR je založena mnohonásobné skenování ploché kovové desky v různých vzdálenostech. Může být použita také pro vyšetření změny časového rozsahu v závislosti na počtu vzorků na stopu a také k identifikaci typu chyb způsobujících kolísání, a následně minimalizování jejich dopadu. Modelový signál sloužící k odhadu skutečného časového rozsahu GPR systému je zde založen na klasickém geometrickém modelu obousměrné cesty optického paprsku pro bistatickou anténu.

Ve většině případů není tedy stanovení rychlosti snadný úkol. I když je možné použít také zpracování radarových dat metodou seizmické migrace, kterou se stanoví závislost hloubky na rychlosti, je určení této závislosti pracné. Mnohokrát je také obtížné určit příčiny rozdílů rychlostí v různých oblastech, protože ty mohou být způsobeny buď změnou saturace, změnou mechanických vlastností materiálu nebo obojím.

## 4 Legislativa a technické předpisy

Všechny typy elektrických a elektronických zařízení prodávaných v rámci zemí Evropské unie jsou předmětem regulace. Obecně platí, že pokud zařízení způsobuje pohyb elektronů, pak je regulováno.

V Evropské unii (EU) je použití GPR řízeno směrnicemi vydanými Evropskou komisí (EK) a národními úřady. Na GPR zařízení konkrétně se vztahuje směrnice 1999/5/EC R&TTE (*Radio and Telecommunications Terminal Equipment*). Prokázání splnění této směrnice je zákonný požadavek, který umožňuje výrobcí nebo jeho zplnomocněnému zástupci uvést výrobek na trh. Toto rozhodnutí se vztahuje na výrobce i dodavatele a to v rámci i mimo EU. Přesto je ve většině zemí EU navíc vyžadována národní licence. V zemích mimo EU existuje mnoho různých přístupů, a to od nulové regulace až po velmi striktní technické a licenční podmínky. V mnoha zemích je ale vycházeno z požadavků stanovených ve standardech vytvořených Evropským institutem pro normalizaci v telekomunikacích (*European Telecommunications Standards Institute - ETSI*). V USA a Kanadě je pak prokázání shody s příslušnými předpisy doloženo čestným prohlášením. [34]

Základní požadavky na GPR se pak řídí následujícími dílčími předpisy:

- Směrnice 73 /23/EEC stanovuje požadavky na ochranu zdraví a bezpečnosti uživatele a jakýchkoli dalších osob.
- Směrnice 89/336 / EES obsahuje požadavky na ochranu týkající se elektromagnetické kompatibility (EMC).
- Normy ETSI EN 302 066-2 a EN 302 066-1 pak stanovují požadavky na efektivní využití rádiového pásma přiděleného pro pozemskou/kosmickou radiokomunikaci a orbitálních zdroje, aby se zabránilo rušení, a dále uvádí metody měření a mezní hodnoty.
- Doporučení ETSI EG 202 730. Celkovým cílem tohoto dokument je zajistit, aby záření z GPR směřovalo (z důvodu pohlcení a rozptylu) do země nebo do materiálů jako beton, cihly nebo kámen, které jsou použity do konstrukcí a nikoli do atmosféry.

Technické předpisy, které se zabývají používáním technologie GPR jsou v různých státech značně odlišné. Nejedná se ani tak o rozdílnost technických specifikací a doporučení,

ale rozdíl spočívá především v ambicích těchto předpisů. Některé normy obsahují podrobně popsané postupy a technická data pro použití při řešení konkrétních problémů při diagnostice PK, zatímco jiné uživatele pouze obecně informují o této technologii a stanovují spíše rámec jejího užití.

V ČR se k roku 2016 používáním georadaru pro diagnostiku pozemních komunikací zabývají technické podmínky TP 233 Ministerstva dopravy – Georadarová metoda pozemních komunikací [35] z roku 2011 v rozsahu 13 stran. Norma si klade za cíl „*stanovení obecných zásad použití georadarové metody při diagnostickém a geotechnickém průzkumu pozemních komunikací*“ [35]. Seznamuje uživatele se základním názvoslovím z oblasti GPR a obecně popisuje georadarovou metodu. Obsahuje popis georadarových aparatur, jejich rozdělení a hlavní výrobce ve světě a nejrozšířenější systémy používané v České republice (ČR). V kapitole 3.1.1 uvedené normy jsou popsány vybrané parametry anténních systémů. Tyto jsou uvedeny v tabulce, která byla sestavena podle materiálů společnosti Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) a dle „*Design Manual for Roads and Bridges*“ Ministerstva dopravy VB.

Dále norma přibližně na dvou stránkách popisuje princip georadarové metody, metodiku sběru dat, jejich zpracování a výstupy georadarového měření. Jsou zde také stručně popsány následující možnosti využití technologie GPR v oblasti PK: [35]

- *Měření na trhlinách krytu vozovek*
- *Zjišťování stavu a tloušťek konstrukčních vrstev*
- *Zjišťování stavu aktivní zóny a stavu zemního tělesa pozemních komunikací*
- *Určování prostorové orientace kluzných trnů a kotev cementobetonového (CB) krytu*
- *Dohledání nehomogenit – propustků*
- *Diagnostika mostních objektů*
- *Detekce vlhkosti v konstrukčních vrstvách*

V jednotlivých kapitolách jsou potom uvedeny především parametry antén pro konkrétní úlohu, rozsah měření a očekávaná přesnost výsledků. Dále jsou v normě také popsány možnosti využití georadarové metody při přejímacím řízení staveb a požadavky na kvalifikaci zhotovitele.

Dále jsou uvedeny vybrané zahraniční normy týkající se využití GPR v oblasti diagnostiky pozemních komunikací: [36]

- ASTM D6432-11: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, 2011.
- ASTM D4748-10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar, 2010.
- ASTM D6087-08: Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar, 2008.
- ASTM D6429-99(2011)e1: Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods, 2011
- DMRB 3.1.7: Design Manual for Roads and Bridges, Advice notes on the non-destructive testing of highway structures - advice note 3.5 BA 86/2006: Ground Penetrating Radar (GPR), UK, Department for Transport, 2006.
- DMRB 7.3.2: Design Manual for Roads and Bridges, Data for pavement assessment - annex 6 HD 29/2008: Ground-Penetrating Radar (GPR), UK, Department for Transport, 2008.
- B 10 Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), 2008.

## 5 Aplikace GPR v oblasti diagnostiky PK

Tato kapitola obsahuje rešerši dosavadních studií a projektů zaměřených na použití GPR v oblasti diagnostiky pozemních komunikací. Je rozdělená do několika částí, které se zabývají konkrétními aplikacemi na PK. V závěru této kapitoly je pak zpracováno shrnutí problematiky spolu s doporučeními pro jednotlivé aplikace. Přestože, již dle názvu, tvoří tato kapitola těžiště teoretické části práce zaměřené na diagnostiku PK pomocí GPR, je nutné podotknout, že informace nacházející se v kapitole 6 (která je věnována dalším možnostem využití GPR) se diagnostiky, údržby, rekonstrukce, ale i výstavby nových pozemních komunikací v souvislosti s použitím GPR týkají také, a obsahově se často s touto kapitolou překrývají. Jako příklad lze uvést použití GPR v geologii a geotechnice (stanovení druhu podloží PK a jeho vlastností, diagnostika zemních těles PK), diagnostice betonových konstrukcí (např. mostní konstrukce, mostovky, opěrné a zárubní zdi PK) nebo hydrologii (vodní režim podloží PK). Všechny tyto obory jsou součástí problematiky, na kterou je tato práce zaměřena, a pokud má být téma implementace GPR do oblasti diagnostiky pozemních komunikací řešeno komplexně, nelze tyto aplikace opomenout. Dalším důvodem studia uvedených využití GPR je fakt, že pracovní postupy a techniky při sběru dat, nebo i jejich vyhodnocení, jsou často shodné (nebo velmi podobné) postupům využívaných pro diagnostiku PK.

V této i následujících kapitolách, věnujících se dalším možnostem využití technologie GPR, jsou tedy uvedeny studie a projekty, které byly autorem vybrány pro svůj význam, rozsah, speciální zaměření, nebo takové, ve kterých byl dle autora popsán inovativní přístup nebo metoda pro danou konkrétní aplikaci GPR.

### 5.1 Uplatnění GPR

Technologie GPR má v aplikacích pro diagnostiku pozemních komunikací velký potenciál. Ve většině rozvinutých zemí jsou sice silniční a dálniční sítě téměř kompletní a nepředpokládá se masivní výstavba, o to větší důraz je ale správci těchto komunikací kladen na jejich údržbu s cílem zachovat parametry spolehlivosti a únosnosti. Zároveň se zmíněné organizace často potýkají se snížením finančních prostředků. Tyto a další důvody vedou správce komunikací k hledání nových pokročilých technologií, které umožňují rychlou diagnostiku PK s nízkými náklady. GPR je v podstatě jediným nástrojem, který poskytuje

údaje o konstrukci komunikace a případně podloží a který může být použit za běžného provozu bez většího omezení dopravy. Velkou výhodou této metody je také její nedestruktivní charakter.

Vady a poruchy netuhých vozovek mohou mít mnoho příčin. Může se jednat o chyby v návrhu, špatně provedenou technologii konstrukce, klimatické faktory nebo nadměrné dopravní zatížení. Pro potřeby oprav a rekonstrukcí je nutné identifikovat příčiny těchto poruch, aby mohl být navržen adekvátní postup jejich odstranění.

Materiály vrstev krytu a podkladu vozovek vykazují většinou podobné elektromagnetické charakteristiky, což je hlavním důvodem, proč je jejich diagnostika pomocí neadaptabilních automatických postupů poměrně obtížná. Z koncepčního hlediska je možné identifikovat tři různé kategorie poruch, které mohou být odlišeny z hlediska technologie GPR. Tyto kategorie jsou: [37]

- bodová singularita uvnitř homogenní vrstvy (např. zvodnělé místo, dutina, trhlina, apod.)
- krátkovlnná singularita mezi dvěma vrstvami (např. tzv. pumpování)
- dlouhovlnná singularita mezi dvěma vrstvami (např. pokles nebo zvlnění).

Vlivem drsnosti povrchu vozovky na rozptyl elektromagnetických vln odražených od jednotlivých konstrukčních vrstev se zabývala studie provedená Université Nantes Angers Le Mans, Polytech'Nantes (Francie) v roce 2010 [38]. Pro simulaci odražených signálů zde byla využita metoda s názvem *Propagation-Inside-Layer-Expansion* (PILE). K posouzení přesnosti odhadu parametrů signálu pomocí rozptylového modelu byl použit algoritmus ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*). V této studii bylo prokázáno, že drsnost povrchu má větší vliv na hlubší odrazy než na odrazy povrchové, a že dochází ke značným prostorovým variacím amplitud a poklesu frekvence odražených signálů (zejména pro vyšší frekvence GPR).

Měření na PK se provádí většinou GPR sestavou umístěnou na vozidle nebo na ručním vozíku. Výběr této platformy závisí na metodě sběru dat, druhu použitých antén a rozsahu měření. Jako zajímavost lze uvést inovativní přístup [39], kdy byla navržena aplikace pro zobrazení a zjednodušené real-time vyhodnocení GPR dat v tabletech nebo smartphonech, což může být výhodné z hlediska časových úspor při inspekcích a mobilním monitorování.

Při zpracování GPR dat, jejich vyhodnocování a tvorbě výstupů se je jako velmi výhodné i využití dalších nedestruktivních, ale i destruktivních, metod diagnostiky PK. Naopak data GPR mohou být často vhodný podklad nebo doplnění standardních diagnostických metod. Jako podklad pro GPR byla již zmíněna možnost využití např. jádrových vrtů, které umožňují kalibraci GPR z hlediska určení rychlosti EM signálu v dané konstrukci. Data GPR jsou naopak využívána např. jako vstupní údaje pro zařízení FWD, kdy jako výstup jsou získány údaje o tloušťce konstrukčních vrstev spolu s moduly pružnosti. Výsledkem pak může být celkové posouzení stavu konstrukce, její zbytkové životnosti spolu např. s plánem oprava rekonstrukcí.

Dalšími vhodnými zařízeními mohou být přístroje pro měření příčných a podélných nerovností jako je planograf nebo laserový profilometr, nebo technologie pro plošné zaměření povrchu vozovky jako 3D laserové skenery nebo mikrovlnné interferometry. Případně lze využít i další zařízení jako termokamery, zařízení pro stanovení vlastností materiálů konstrukce, geotechnická zařízení pro stanovení vlastností materiálů podloží, a další. Uvedená zařízení nejen že usnadňují zpracování a interpretaci dat, což vede k zpřesnění výsledků GPR průzkumu, ale zvyšují také komplexnost prováděné diagnostiky.

## **5.2 Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev PK**

Jednou z informací, která je nejčastěji požadována při diagnostice vozovek PK, je určení tloušťky konstrukce vozovky celkově, ale i tloušťky jednotlivých vrstev PK. Standardně se pro tyto účely provádějí již zmíněné jádrové vrty. Ty jsou však časově náročné a poskytují informace pouze v bodech, kde byly provedeny. GPR naproti tomu poskytuje údaje kontinuální, nicméně konstrukce PK je často teoreticky zjednodušena pouze na stmelenu svrchní vrstvu a vrstvu podkladní z nestmelého materiálu, která je uložena na podloží [40]. Dalším nedostatkem zpracování GPR dat pro tyto účely je fakt, že během měření na velkých plochách (dlouhých měřených profilech) se podaří získat poměrně rychle velké množství dat, která je pak následně velmi zdlouhavé manuálně zpracovat. Toto zpracování musí být prováděno kvalifikovanými pracovníky se zkušenostmi z tohoto oboru a vyžaduje mnohonásobně více času, než samotné měření. Řešením je vytvoření takových softwarových nástrojů, které umožní, alespoň částečnou automatizaci tohoto procesu.

Údaje o tloušťkách vrstev jsou důležité pro kontrolu kvality provedení nových vozovek, jako podklad pro návrh způsobu oprav a rekonstrukcí, ale i jako vstupní data jiných diagnostických metod, například FWD. Přesnost měření tloušťky vrstev PK pomocí GPR se

obvykle pohybuje v rozsahu  $\pm 10\%$  skutečné tloušťky [41]. Využitím GPR pro určení tloušťky vrstev jako vstupních dat pro FWD měření, a následné určení modulů pružnosti a únosnosti vozovky se zabývala například studie National Technical University of Athens (Řecko) z roku 2009 [42]. Jiným přístupem ke stanovení tloušťky vrstev je použití zpětného výpočtu z dat získaných pomocí výše zmíněného zařízení FWD.

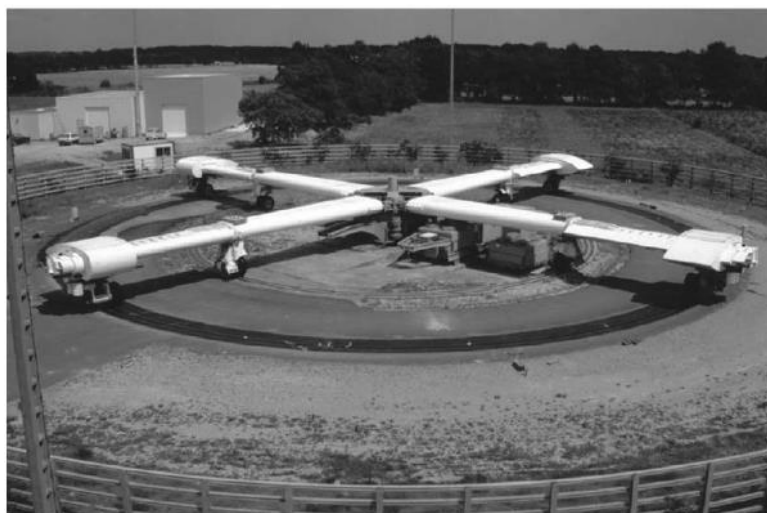
Jedno z nejrozsáhlejších měření ve výše uvedené oblasti bylo provedeno společností Infrasense, Inc. pro potřeby California Department of Transportation (USA) v roce 2003 [43]. Cílem tohoto projektu bylo posoudit různé NDT pro stanovení tloušťky konstrukčních vrstev nových vozovek s přesností do 2,5mm a to jak v laboratorních podmínkách, tak i in-situ. Testování in-situ bylo provedeno na 11 vybraných úsecích vozovek v Kalifornii, 6 asfaltových a 5 cementobetonových o délce 305m. Tyto metody byly dále ověřeny sérií laboratorních testů. Laboratorní testy ukázaly, že použití *horn* antén a metody CMP má potenciál dosažení požadované přesnosti pro asfaltové vozovky. Pro cementobetonové vozovky pak je doporučena metoda CMP v kombinaci s mechanickými metodami *impact-echo* (IE) a *multi-receiver* (MRT) s omezeními metody CMP pro čerstvé betony z důvodu vysoké tepelné vodivosti spojené s volnou vodou. Analýzou dat byla pro netuhé vozovky zjištěna přesnost měření tloušťky pomocí *horn* antény a metody CMP 2,5mm (nicméně s omezením metody CMP tloušťkou asfaltových vrstev do 89mm). Pro zajišťování tloušťky cementobetonových vrstev autoři metodu CMP nedoporučují.

Komplexní srovnávací analýza určení tloušťky konstrukcí PK pomocí GPR byla také provedena National Technical University of Athens (Řecko) v roce 2008 [9]. Na odlišných konstrukcích byly testovány různé přístupy stanovení relativní permitivity, které byly následně statisticky porovnány. Relativní permitivita byla stanovena pomocí GPR přímo z měření profilů, ze vzorků získaných jádrových vrtů a na základě měření v laboratoři pomocí percometru. Pro měření profilů byla použita *air-coupled* anténa s centrální frekvencí 1 GHz připevněná na vozidle. Dle autorů poskytly všechny tři přístupy srovnatelně přesné výsledky.

Další studie popisuje poměrně rychlý a přesný postup pro řešení problému detekce vícenásobného rozhraní konstrukčních vrstev PK [40]. Řešení spočívá v opakované detekci silných odrazů v jednotlivých stopách při užití filtru detekce prahových hodnot nebo detekce odpovídajících si signálů. Zjištěné impulsy jsou pak použity v modelu odrazů signálu pro syntetizaci modelového signálu metodou nejmenších čtverců tak, aby odpovídal signálu měřenému. Syntetizovaný signál se pak odečte od signálu měřeného, což odhalí maskované

slabé odrazy, na které se v dalším kroku použije stejná metoda. Pro posouzení výkonosti detekce signálů bylo provedeno terénní měření na experimentálním úseku komunikace: *The Virginia Smart Road*. Bylo zjištěno, že v závislosti na tloušťce a počtu vrstev tvořících vozovku je nutné použít různé algoritmy detekce odrazů. V případě, že jde o poměrně tlusté vrstvy, (tloušťka vrstev jsou v tomto případě porovnávány se šířkou impulzu) je optimální použití MF (*match filter*) detektoru. Nicméně v případě tenčích vrstev by měl být použit detektor prahových hodnot. U konstrukcí s tenkými i tlustšími vrstvami pak tyto filtry musí být aplikovány opakovaně s modelováním signálu po každém kroku. Takto získané tloušťky vrstev vykazovaly oproti hodnotám přímo měřeným průměrnou odchylku 2,5 %. Tato chyba se pak zvětšila na 10,2 %, pokud byly brány v úvahu pouze silné odrazy.

V Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC (Francie) byly provedeny experimenty s cílem ověřit možnosti komerčních systémů určit tloušťky asfaltových vrstev [44]. Pro experimentální část byla využita kruhová dráha pro testování únavy vozovek znázorněná na obrázku 15. Rychlosti šíření signálu byly stanoveny nově vyvinutým algoritmem numerické inverze založeným na metodě CMP. Z porovnání stanovených hodnoty relativní permitivity dle autorů vyplývá, že EM vlastnosti testovaných materiálů nejsou závislé (nebo jen velmi málo) na typu kameniva nebo pojiva, nebo na hustotě. Za hlavní příčinu změn permitivity byly označeny změny vlhkosti materiálů.



**Obrázek 15** Kruhová dráha LCPC pro testování únavy vozovek [44]

V jedné z dalších studií je popsán nový poloautomatický program pro zpracování a vizualizaci GPR dat, který dle autorů poskytuje značnou úsporu času právě při vyhodnocování dat pro účely stanovení tloušťky konstrukčních vrstev na velkých plochách

a je určen i pro uživatele bez zkušeností se zpracováním GPR dat [41]. Pro ověření byly měřeny profily v délce od 100m do 20km a ve všech případech čas potřebný k průběhu výpočetního algoritmu nepřesáhl 30s. Program umožňuje také vložení dat z jádrových vrtů, GPS, profilometru, videa a dalších.

Další způsob stanovení tloušťky konstrukčních vrstev PK je založen na jednoduchém algoritmu zpracovávajícím tzv. *ground waves (ground coupling)* bistatitckých systémů [45]. Pro ověření dráhy této vlny byly využity numerické simulace založené na *Transmission Line Method (TLM)*.

### **5.3 Stanovení obsahu vody v konstrukci a zemním tělese PK**

Tato kapitola obsahuje vybrané studie zabývající se stanovením obsahu vody a vodního režimu v zemním tělese a konstrukci PK. Obecněji jsou hydrologické aplikace GPR popsány v příslušné kapitole, kde jsou také uvedeny standardní metody užívané pro tyto účely. Množstvím obsažené vody je do značné míry ovlivněna únosnost podkladních vrstev netuhých vozovek, tedy jeden z rozhodujících parametrů pro posouzení stavu vozovky a návrh rekonstrukce. Zvýšení obsahu vody v konstrukci PK samozřejmě snižuje jejich únosnost a přispívá k nárůstu deformací, ale také může způsobit narušení vazby mezi asfaltovým pojivem a kamenivem. Odhady obsahu vody v podkladních vrstvách a podloží jsou rovněž nezbytné pro stanovení účinnosti drenážních systémů.

Relativní permitivita materiálů vrstev netuhých vozovek se mění v závislosti na mnoha faktorech (pórovitosti, typu kameniva, teplotě, atd.) Největší vliv na permitivitu má nicméně obsah vody. V případě, že je obsah vody dostatečně velký, může být permitivita materiálu stanovena ze známé permitivity vody a suchého materiálu vozovky (relativní permitivita vzduchu je 1, vody 80 a suchých asfaltových vrstev přibližně 3 až 8). Rovnic, které popisují vztah mezi vlhkostí a relativní permitivitou materiálů, existuje v závislosti na charakteru materiálu velké množství. Nejčastěji je používána tzv. Toppova rovnice.

Toppova rovnice platí obecně pro materiály s hustotou od  $1,5\text{g/cm}^3$  až  $1,85\text{g/cm}^3$ , nicméně nemůže být bez úprav použita pro materiály s vysokou hustotou. Z tohoto důvodu byl navržen vzorec 16 upravený pro materiály vrstev, které se používají v konstrukcích pozemních komunikací. [18]

$$\nu = -6,216 + 2,383 \varepsilon_r - 0,0598 \varepsilon_r^2 + 0,0006 \varepsilon_r^3 \quad (16)$$

Kde:

$\nu$  ... vlhkost [%]

$\varepsilon_r$  ...relativní permittivita [-]

Stanovení obsahu vody bylo předmětem studie provedené na University Roma Tre (Itálie), kdy byl GPR použit při monitoringu sesouvání zemního tělesa (na kterém byla zbudována komunikace) v blízkosti města Limiti di Greccio (Itálie) [46]. Byly zde použity dvě metody odhadu vlhkosti v podloží. První z nich byla založena na principu útlumu amplitud signálu. Druhá metoda, zaměřená na distribuci vody v podloží, byla založena na rozptylu signálu podle Rayleighovy teorie. Použité algoritmy, založené na modulaci amplitud signálu, výpočtu relativní permittivity a zpracování frekvenčního spektra, mohou dle autorů obecně usnadnit identifikaci hranic nestabilních oblastí zemních těles v mnoha případech.

V další ze studií byl GPR použit pro nedestruktivní sledování obsahu vody v podkladních nestmelených vrstvách asfaltových vozovek během experimentu s několikaměsíční řízenou infiltrací [20]. Pro odhad obsahu vody v každé z vrstev kameniva a jeho změny v čase byly použity údaje o rychlosti šíření GPR signálu (pomocí metody CMP a COM), a pro stanovení oblastí s vysokým obsahem vody byla použita analýza amplitud signálu. Pozornost byla věnována přesnosti určení rychlosti šíření signálu a jejím vlivu na výsledné hodnoty obsahu vody. Porovnání odhadů obsahu vody pomocí GPR a gravimetrického měření ukázalo, že rozdíl mezi těmito dvěma metodami byl přibližně  $0,02\text{cm}^3/1\text{cm}^3$ . Tyto výsledky naznačují, že GPR může být použit jako nedestruktivní metoda stanovení obsahu vody v podkladních vrstvách konstrukcí PK a pro posouzení účinnosti drenážních systémů. Pro velmi přesné stanovení obsahu vody musí být ale známa přesná tloušťka jednotlivých vrstev. Použitá metoda také dle autorů umožňuje získání informací o způsobu průniku vody do konstrukce vozovky a mapování průsakových cest mezi vrstvami.

## 5.4 Stanovení vlastností materiálů konstrukcí PK

Materiálové charakteristiky PK jsou standardně stanovovány přímo, většinou destruktivními zkouškami. GPR disponuje potenciálem stanovovat tyto vlastnosti sice nepřímo (na základě EM vlastností), ale zato na velkých plochách a se značnými časovými i finančními úsporami. Typickými vlastnostmi cementobetonových vozovek PK, které je možné stanovit pomocí GPR, jsou objemová hmotnost, mezerovitost, saturace a obsah chloridů [2]. Pro analýzu vozovek z asfaltových směsí je z hlediska GPR nejdůležitějším ukazatelem relativní permitivita. Je to z toho důvodu, že hodnota relativní permitivity závislá na poměru objemu pórů a materiálu (kameniva a pojiva) v asfaltové vrstvě. Stlačení (zvýšení objemové hmotnosti) asfaltové směsi tedy vede ke snížení objemu vzduchu, který má nízkou relativní permitivitu, a tím dochází ke zvýšení celkové relativní permitivity.

Odhadem objemové hmotnosti a tedy poměru objemu jednotlivých složek těchto materiálů, tvořených z asfaltového pojiva, kameniva a dutin vyplněných vzduchem (případně vodou), jako funkce elektrických vlastností se zabývalo mnoho studií. Z těchto výzkumů bylo dále rozvinuto několik modelů. V kapitole 14, která se zabývá vztahem mezi EM a mechanickými vlastnostmi materiálů PK, je uveden model (vzorec 19), který dle [18] poskytuje nejpřesnější výsledky.

Stanovením vlastností materiálů PK se zabývala mimo jiné i práce předložená na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze (ČVUT) v roce 2013 [26]. Experimentální měření bylo cíleno na stanovení tloušťek jednotlivých konstrukčních vrstev a jejich porovnání s provedenými jádrovými vrty a na určení materiálových charakteristik asfaltových směsí (konkrétně stanovení vlivu vlhkosti a mezerovitosti asfaltové směsi na rychlost šíření GPR signálu). Měření probíhalo laboratorně a na úseku silnice I. třídy I/16 Byšice – Mělnické Vtelno. Autor zde uvádí dosaženou průměrnou 5% přesnost stanovení tloušťek asfaltového souvrství. Dále je zde popsána závislost rychlosti šíření EM vln na vlhkosti a mezerovitosti asfaltové směsi. Také došlo k určení deformačních charakteristik vozovky s cílem stanovit závislost mezi daty získanými lehkou dynamickou deskou (LDD), statickou zatěžovací zkouškou (SZZ) a tloušťkou jednotlivých vrstev.

Studie National Technical University of Athens (Řecko) provedená v roce 2008 si kladla za cíl pomocí GPR určit hustotu a obsah vlhkosti v asfaltových vrstvách se záměrem poskytnout praktické informace pro tvorbu standardizovaného postupu diagnostiky netuhých

vozovek [18]. Autoři pro měření permitivity asfaltových vrstev doporučují použití různých frekvencí a posuzování homogenity a hustoty materiálu a jejich proměnlivosti s hloubkou na základě porovnání těchto dat.

V roce 2014 byl v Itálii proveden výzkum týkající se určení vztahu mechanických a EM vlastností materiálů tvořících vozovky PK [47]. Na základě dat z porovnávání Youngova modulu pružnosti získaného pomocí lehké dynamické desky LDD (použito bylo závaží o hmotnosti 10kg) a hodnot EM odrazu na zkušebním úseku komunikace byl vytvořen semiempirický model pro odhad Youngova modulu pružnosti z GPR měření. Ověření modelu dle autorů ukázalo relativně velkou shodu s přímo měřenými hodnotami s hodnotou koeficientu determinace 0,87.

Ke studiu degradace vozovek byl GPR použit například na Universit`a di L'Aquila (Itálie) v roce 2010 [48]. Cílem bylo najít pomocí GPR dat vztah mezi druhem degradace, hloubkou poruch a dopravním zatížením. Integrita a únosnost vozovek byla hodnocena pomocí kvantitativní analýzy výkonových křivek (výkonem je myšlena síla signálu v dB na jednotku času v ns). Pomocí 1600MHz a 600MHz antén bylo změřeno 40 profilů na místech se stejnými geometrickými i geotechnickými charakteristikami jak na poškozených, tak na nepoškozených úsecích komunikace. Pokud mají koeficienty absorpce poškozených a nepoškozených silničních úseků téměř stejnou hodnotu, pak je dle autorů pravděpodobnou příčinou degradace únava nebo tepelné smršťování. Pokud tomu tak není, pak je degradace dle autorů způsobena různým stlačením podkladních vrstev, které je způsobeno nadměrnou nákladní dopravou. Korelaci výsledků analýzy výkonových křivek a údajů získaných vyhodnocením stavu povrchu dokazuje statistické srovnání poškozených a nepoškozených oblastí. [48]

## **5.5 Detekce trhlin ve vozovkách PK**

Se stále vyšším prostorovým rozlišením GPR se rozšiřují možnosti jeho využití v diagnostice PK. Jednou z novějších aplikací v této oblasti je jeho využití pro detekci a mapování různých druhů vertikálních i horizontálních trhlin, které jsou často projevem poruch v podkladních vrstvách nebo podloží (např. reflexní trhliny). Trhliny na povrchu vozovky mohou vzniknout z více příčin a jsou přímým důsledkem degradace konstrukce vlivem jejího používání a vlivu prostředí. Pro automatickou detekci trhlin se v současné době využívají například technologie automatického zpracování digitálního obrazu z digitálních kamer, 3D kamer (tyto postupy ale poskytují data pouze z povrchu trhlin), nebo zpracování

záznamu infračervené tomografie. Přístupy v kontrole trhlin pomocí GPR lze obecně rozdělit na měření jednotlivých profilů a na pseudo3D měření [49]. Při měření profilů vznikají tzv. B-skeny, kde jsou trhliny nebo lokální nehomogenity zobrazeny jako difrakční hyperboly. Příčné trhliny, orientované kolmo na měřící profily, mohou být podrobněji studovány při měření více souběžných profilů. Toto pseudo3D skenování (skenované oblasti jednotlivých profilů se nepřekrývají) vyžaduje poměrně velkou hustotu měřených dat u kterých je také nutná speciální metoda prostorové synchronizace.

Rozsáhlá analýza detekce trhlin pomocí GPR byla provedena v Road and Bridge Research Institute, Warsaw (Polsko) v roce 2012 [49]. Tato studie vedla k určité klasifikaci projevů trhlin v zaznamenaných GPR datech. Hlavním cílem této studie bylo:

- rozpoznání GPR projevů doprovázejících viditelné trhliny se zvláštním zřetelem na případy slabého GPR projevu
- stanovení charakteristik odrazu užitečných při identifikaci trhlin
- rozpoznání geometrických a materiálových vlastností trhlin, které mohou být zodpovědné za tvorbu charakteristických odrazů
- rozpoznání podmínek, které způsobují slabé odrazy signálu a jiné obtíže v detekci trhlin

Uvedené cíle byly studovány v rámci dlouhodobého sledování, kdy byla provedena opakovaná měření, laboratorní pokusy, jádrové vývrty a numerické simulace. I když bylo detekováno mnoho druhů a tvarů trhlin, byly zjištěny určité společné znaky pro jednotlivé druhy konstrukcí. Identifikované projevy v GPR záznamu umožnily vytvořit určitou klasifikaci diagnostikovaných jevů.

V další studii byla v roce 2010 pomocí numerického modelování (*Finite Difference Time-Domain Method* – FDTD a GprMax3D algoritmu) doložena závislost rozptylových charakteristik signálu na vlastnostech materiálu [50]. Při měření byly použity 3 antény (dvě antény Noggin 1000MHz a jedna Noggin 250MHz) připevněné k měřící platformě RoadMap. Tento systém je zobrazen na obrázku 16.



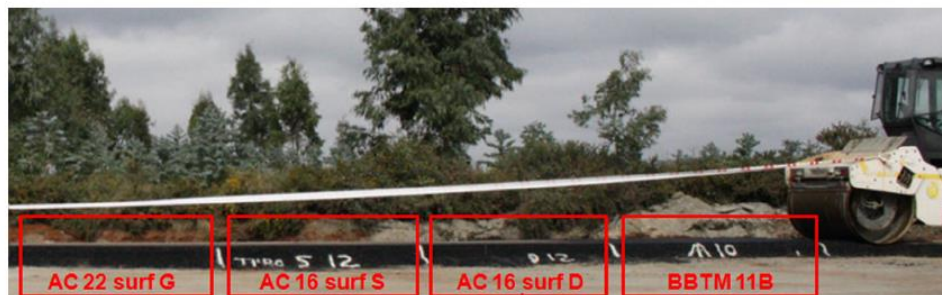
**Obrázek 16** Tříkanálový systém RoadMap [50]

Na některých asfaltových vozovkách měření ukázalo, že oproti předpokladům frekvence signálu 250MHz často poskytuje výraznější odrazy od svislých trhlin než 1000MHz. To lze dle autorů vysvětlit drsností povrchu trhlin a vlivem efektu tzv. vlnovodu. Často byl také zaznamenán nejsilnější odraz ze dna trhliny, kde trhlina protíná rozhraní spodní asfaltové vozovky a pokladních vrstev. Toto pak autoři objasňují zvýšeným množstvím drceného zrnitého materiálu usazeného na dně trhlin. Pomocí numerického modelování byl také demonstrován význam výplňového materiálu trhlin, hloubky trhliny, vodivosti asfaltových směsí a v neposlední řadě vliv použité centrální frekvence na přesnost GPR dat. Autoři v závěru zdůrazňují potenciál GPR detekovat a charakterizovat vertikální trhliny. Doporučují však multifrekvenční průzkumy vozovek za použití *ground-coupled* antén, přičemž nižší frekvence by měla být použita pro detekci trhlin a vysoká frekvence pro jejich charakterizaci.

V roce 2012 byl na University Roma Tre (Itálie) navržen algoritmus pro trojrozměrné sledování a mapování trhlin s využitím 3D zobrazovacích technik. Numerické postupy byly testovány na datech získaných na mostě pomocí GPR systému RIS HiBright určeného pro analýzu mostovek pomocí 3D tomografie. Uvedený algoritmus na základě nárůstu amplitud signálu a vyšších hodnot relativní permitivity v místech zvýšené vlhkosti analyzuje signál a porovnává jeho charakteristiky v celé oblasti měření. Tento postup umožňuje značné zvýšení rychlosti a částečnou automatizaci procesu zpracování dat s přesností v jednotkách

centimetrů. Nejdůležitější inovací je nicméně schopnost stanovení přesné geometrie trhliny v trojrozměrném prostoru. [51]

Dalším přístupem pro detekci a charakterizaci trhlín a jejich příčin bylo spojení technologie GPR a infračervené termografie [52]. Pro potřeby testování byl vybudován testovací úsek (obrázek 17) z několika používaných materiálů krytu PK, kde byly vyřezány trhliny v předem určených polohách s danými rozměry.



**Obrázek 17** Experimentální úsek vozovky pro detekci trhlín pomocí GPR – upraveno z [52]

Pozice trhlín byla detekována pozorováním změn hodnot amplitud odrazů od testovaného povrchu. Porovnání amplitud odrazu prokázalo závislost na typu trhliny, jejich geometrii, sklonu a hloubce a také značné rozdíly v případech, kdy byla v trhlině přítomná voda. Vztah mezi změnou hodnot amplitud signálů a hloubky trhlín však nalezen nebyl, proto bylo nutné použít také data z infračervené termografie.

## 5.6 Detekce výztužných prvků vozovek PK

Výztužnými prvky vozovek PK jsou v této kapitole myšleny především kluzné trny a kotvy ve spárách cementobetonového krytu vozovek. Tyto prvky, které mají zabezpečit spolupůsobení sousedních desek a zabránit jejich vzájemnému pohybu, se z hlediska funkčnosti dělí na nekotvené (nepřenáší zatížení mezi deskami) a kotvené (přenáší zatížení mezi deskami). Zabudování těchto prvků do desek probíhá většinou strojním zařízením. Cílem použití GPR je tedy ověření polohy a orientace těchto prvků a určení případného posunu, ke kterému by mohlo dojít vlivem dalších prací. Toto platí nejen pro PK, ale také pro diagnostiku vzletových a přistávacích drah a pojezdových drah letišť.

Zjišťováním přesnosti určení polohy výztužných prvků pomocí GPR a identifikací potencionálních rizikových míst se zabývala například práce předložená na Univerzitě Pardubice (UPa) v roce 2013 (část výzkumu centra dopravního výzkumu (CDV) je také uvedena např. v článku [53]) [7]. Cílem práce bylo připravit podklady pro stanovení norem použití GPR v této aplikaci. Konkrétně se jednalo o: [7]

- *detekci vychýlení výztužných prvků v cementobetonových deskách a zjištění přesnosti její lokalizace*
- *detekci a zjištění přesnosti při stanovení tloušťky cementobetonového krytu*
- *detekci rozhraní cementobetonového krytu a nadměrného obsahu vody v konstrukčních vrstvách vozovek.*

Byla zde provedena laboratorní měření na zhotovených betonových vzorcích, měření in-situ i softwarové modelování. Součástí práce je také porovnání výsledků získaných pomocí GPR s daty jádrových výtřtů a zařízením MIT SCAN (magnetická tomografie). Laboratorní měření byla realizována CDV. V závěru je mimo jiné uveden přínos této práce (a dalšího projektu CDV) pro spolehlivou identifikaci rizikových míst v souvislosti s nesprávným uložením výztužných prvků, kdy byly určeny limity přesnosti detekce a navržena metodika provádění a vyhodnocování uvedených měření.

Detekci předepjaté výztuže a zhodnocení jejího stavu se také např. zabývala studie týkající se posuzování vzletové a přistávací dráhy na jednom z italských letišť [54]. GPR data byla kalibrována jádrovými vrty a následně byl vytvořen softwarový model pro stanovení únosnosti posuzované vzletové a přistávací dráhy. I když se nejedná o studii prováděnou na PK, postupy a zpracování dat je téměř shodné s podobnými pracemi zaměřenými na diagnostiku tuhých vozovek.

## **5.7 Shrnutí a doporučení**

Postupy a doporučení určené pro koncového uživatele GPR v oblasti diagnostiky PK, uvedené v této kapitole, vychází ze studia odborné literatury a z vlastních zkušeností autora při práci na konkrétních aplikacích GPR.

### **5.7.1 Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev**

Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev je nejrozšířenější aplikací GPR na pozemních komunikacích. Rozpoznat a označit konkrétní rozhraní jednotlivých vrstev v radargramu, kde

je zobrazeno velké množství odrazů (ať už skutečných nebo falešných), a správně je interpretovat není stále snadný úkol.

Pro přesnou identifikaci polohy rozhraní v radargramu je nutné mít alespoň základní představu o vlastnostech diagnostikovaných materiálů. V případě, že svrchní vrstva rozhraní má relativní permitivitu nižší než vrstva spodní, pozice rozhraní by měla korespondovat s maximální pozitivní hodnotou amplitudy pro dané rozhraní. Toto je případ rozhraní vzduchu a povrchu materiálu, který má vždy vyšší hodnotu relativní permitivity. V případě, že má svrchní vrstva relativní permitivitu vyšší, potom by měla být pozice rozhraní v místě maximální negativní hodnoty. Jestliže nejsou tyto permitivity známy nebo je předpoklad podobných hodnot relativní permitivity pro obě vrstvy rozhraní, je vhodné za rozhraní označit pozici je kde hodnota amplitudy nulová aby se minimalizovala chyba. Pokud je detekována nějaká lokální anomálie v podloží konstrukcí PK, je možné předpokládat, že relativní permitivita této anomálie je většinou vyšší, než okolního materiálu. Postupuje se tedy jako v případě rozhraní vzduchu a povrchu materiálu. V případě předpokladu větších dutin vyplněných pouze vzduchem potom podle opačného schématu.

Manuálně provést tuto identifikaci a označení rozhraní je značně zdlouhavé a přesnost určení tloušťky vrstev se obvykle pohybuje v rozsahu několika centimetrů. Zvláště při měření na dlouhých měřicích profilech, které GPR umožňuje je efektivita manuálního zpracování dat velmi nízká. Řešením je vytvoření takových softwarových nástrojů, které umožní, alespoň částečnou automatizaci tohoto procesu.

Pro tyto účely bylo vyvinuto několik algoritmů, které jsou popsány výše. Obecně lze říci, že jejich použitím se zvyšuje efektivita zpracování GPR dat. Spolehlivost této interpretace je nicméně ovlivněna stavem komunikace. Na nově vybudovaných úsecích lze tato data použít s daleko větší mírou jistoty než na úsecích komunikací, kde se nachází mnoho příčných, podélných, ale i vertikálních diskontinuit (delaminace, trhliny, kaverny, atd.) způsobených ať už klimatickými faktory nebo zatížením dopravou. Proto je i pro tyto částečně automatizované postupy stále vhodné použití dat z jádrových vývrtů apod. Pro poměrně tlusté vrstvy lze použít MF detektoru a v případě tenčích vrstev pak detektor prahových hodnot. U konstrukcí s tenkými i tlustšími vrstvami by pak tyto filtry měli být aplikovány opakovaně s modelováním signálu po každém kroku.

Důležitým faktorem v této aplikaci je také výběr metody stanovení rychlosti signálu. Nejspolehlivější je samozřejmě použití dat z jádrových vývrtů, které jsou ale prováděny pouze v omezeném počtu a někdy je není možné provést vůbec. Pro asfaltové vozovky se také jeví z hlediska přesnosti vhodná metoda CMP, kde lze pro běžné tloušťky dosáhnout několikamilimetrové přesnosti. Nutno ovšem dodat, že tuto metodu není možné použít u všech GPR systémů a že náročnost měření a zpracování dat snižuje její efektivitu pro mapování dlouhých úseků PK. Pro cementobetonové vozovky pak doporučována není. Doporučit ovšem lze metodu RCM a to především pro vrstvy krytu komunikace. Její použití v této práci i navržená modifikace jsou popsány níže v praktické části práce.

### **5.7.2 Obsah vody**

Obecně je doporučováno vyhnout se měření na PK, kdy by toto měření mohlo být ovlivněno právě přítomností vody v konstrukci po dešti nebo po zimním období. Existují nicméně konkrétní úlohy, kdy stanovení vlhkosti nebo obsahu vody je právě cílem měření.

Indikací zvýšené vlhkosti materiálu je v radargramu oblast, kde se vyskytují bez jiného vysvětlení rozdílné amplitudy od jinak konzistentních rozhraní nebo kde jsou tato rozhraní posunuta oproti okolním úsekům na časové ose. Elementárním přístupem je stanovení permitivity materiálu tak, že je určen poměr jednotlivých složek (kamenivo, vzduch, voda) a výsledná permitivita je spočítána jako vážený průměr relativních permitivit těchto složek v závislosti na tomto poměru. Vztah mezi relativní permitivitou materiálů a vlhkostí (obsahem vody) potom popisují speciální rovnice. Nejčastěji je používána tzv. Toppova rovnice a její modifikace pro konkrétní materiály. Pokud je známa relativní permitivita suchého materiálu (zeminy, konstrukční vrstvy), lze pak obsah vody stanoven jednoduše na základě rozdílu relativních permitivit analogicky předchozímu postupu.

### **5.7.3 Stanovení vlastností materiálů**

Relativní permitivita (jako jeden z hlavních výstupů GPR měření) stavebních materiálů vykazují velmi vysokou závislost na změnách vlhkosti diagnostikovaného materiálu. Závislost relativní permitivity na mechanických vlastnostech však obecně není vždy jednoznačná a není ovlivněna takovou měrou jako právě v případě změn vlhkosti. Je však významně závislá na poměru objemu pórů a materiálu. Velký vliv má také drsnost povrchu, která způsobuje změny amplitud a pokles frekvence odražených signálů. Pro měření permitivity asfaltových vrstev je tedy vhodné použití různých frekvencí a vzájemné porovnání

výsledků. K odhadu objemové hmotnosti a poměru objemu jednotlivých složek materiálů existuje několik modelů, kde jsou jako vstupní data použity měrné hmotnosti jednotlivých složek a jejich permitivity. Pokročilejší metody pak kromě analýz v časové oblasti využívají také frekvenční analýzy. Při zpracování GPR dat pro tyto účely je velmi výhodné i využití dalších nedestruktivních, ale i destruktivních, metod diagnostiky PK. Stanovením vzájemných vztahů výsledků těchto metod a výstupů GPR by mohlo umožnit zjednodušení a zrychlení diagnostiky PK obecně. Jendou z často používaných metod diagnostiky PK je stanovení modulů pružnosti konstrukce pomocí zařízení FWD. Problematika určení možného vztahu těchto modulů a výstupu GPR je zpracována v jedné z kapitol praktické části práce.

#### **5.7.4 Detekce trhlin ve vozovkách PK**

Možnost lokalizace trhliny pomocí GPR je obecně velmi náročná a bez použití dalších diagnostických metod nejsou výsledky zcela spolehlivé. Tloušťka trhlin je většinou menší než rozlišení GPR i při použití antén s vysokými frekvencemi. Přítomnost trhlin lze tedy spíše predikovat na základě změny dielektrických vlastností a změn amplitud signálu. Významnou roli hrají vlastnosti výplňového materiálu trhlin, jejich hloubky, vodivosti asfaltových směsí a v neposlední řadě vlastní příčina vzniku trhliny, jež určuje její charakter. Zásadní věcí je také použitá centrální frekvence. Efektivní je použití několika antén (anténních polí) o různých centrálních frekvencích, kdy nižší frekvence slouží k detekci trhlin a vyšší pro její následnou charakterizaci pomocí vyhodnocení změn amplitud signálu, které vykazují závislost na charakteru trhlin. Velký vliv má pak také samozřejmě přítomnost vody, která je v trhlínách koncentrována.

#### **5.7.5 Detekce výztužných prvků vozovek PK**

Detekce výztuže z pohledu její identifikace v radargramu není složitou záležitostí. Komplikovanější je však přesné stanovení její polohy a orientace a případně jejího průměru a stavu. Výztuž se na radarovém záznamu v případě měřícího profilu vedeného kolmo na její směr zobrazí jako řada hyperbol. Vrchol každé hyperboly označuje pozici jednotlivého prutu. Jako u ostatních aplikací, i zde je nutné přesné určení relativní permitivity okolního materiálu, tedy betonu.

Oblasti v okolí zkorodované výztuže mají nižší relativní permitivitu než oblasti výztuže nekorodované. Také jsou zde zaznamenávány obecně nižší amplitudy odrazu. Nutné je zdůraznit, že materiál výztuže jako úplný odrazeč pak znemožňuje detekci výztuže, která se nachází hlouběji (případ kari sítí). Přesnost určení polohy a orientace pak závisí na přesném

určení polohy GPR sestavy. Co se týče přesnosti stanovení hloubky uložení, ta závisí na přesnosti stanovení relativní permitivity betonu a jeho homogenitě a pohybuje se v podobném intervalu jako přesnost stanovení konstrukčních vrstev.

Většinou je poloha výztuže stanovena manuálním odečtením z radargramu, ale existují i částečně automatizované postupy, které často využívají funkcí migrace (popsáno v podkapitole popisující použité algoritmy). Technologii GPR lze pro účely také kombinovat s dalšími metodami jako například infračervená termografie (spíše oblasti v blízkosti povrchu).

## 6 Ostatní aplikace GPR

V této kapitole jsou popsány aplikace GPR, které sice nejsou zaměřené přímo na použití GPR pro diagnostiku PK, ale s touto problematikou úzce souvisí. Zde uvedené pracovní postupy a techniky zpracování dat lze s výhodou použít také pro diagnostiku PK.

### 6.1 Hydrologie, stanovení vlhkosti a obsahu vody v prostředí.

Obsah vody v půdě je základní složkou v predikci hydrologických poměrů v dané lokalitě a hydraulických vlastností zemin. V oblasti dopravního stavitelství je znalost vodního režimu podloží a jeho změn v prostoru a čase důležitá z hlediska stanovení únosnosti podloží a jeho konsolidace, stability svahů, atd. Vodu v zeminách a horninách lze rozdělit na hygroskopickou vodu (adsorpce), viskózní nebo kapilární vodu a volnou vodu. Její permitivita závisí na stupni spojování molekul vody kolem pevných částic [10].

Běžné metody pro stanovení obsahu vody v půdě, jako je například gravimetrické vzorkování, *time-domain reflectometry* (TDR), neutronové sondy a kapacitní snímače, umožňují určovat výše uvedené hodnoty na rozdíl od GPR pouze v určitých bodech a na větších plochách by byli velmi pracné [55]. Technika pro získání informací pomocí GPR pro vytvoření modelových vertikálních řezů znázorňujících vlhkost využívá tzv. *normal-moveout* (NMO) analýzu. Výsledky této analýzy jsou následně používány k určení intervalů rychlostí signálu pro jednotlivé vrstvy podloží. [56]

V mnoha studiích je používáno tomografické nebo multi-offsetové radarové metody k určení rychlosti elektromagnetické vlny v podloží, ze které může být následně přibližně vypočtena relativní permitivita. Obsah vody pak může být odvozen z relativní permitivity pomocí empirických korelací. Často užívaným vztahem je již výše zmíněná empirická Toppova rovnice. Další teoretický přístup, který popisuje vztah relativní permitivity a obsahu vody v půdě, je založen na tzv. dielektrickém míchání. Výsledná permitivita je zde vypočtena z objemu a relativních permitivit všech zastoupených frakcí. Ostatní metody jsou založeny na odhadech relativní permitivity výpočtem časového zpoždění odrazu, jakmile je určena hodnota rychlosti šíření vln v médiu. V každém případě se jedná o metody vyžadující postupnou kalibraci, protože rychlosti signálu nelze předem přesně stanovit.

Cílem jedné ze studií [57] zabývajících se touto problematikou bylo posoudit heterogenitu pískového tělesa a distribuci vody v tomto tělese. Byla provedena měření pomocí TDR a GPR pro stanovení obsahu vody a jejího napětí. Dle autorů může být obsah vody odvozen od rychlosti šíření GPR signálu, nicméně obecně platí, že přímé odvození obsahu vody z GPR amplitudy není možné, a to zejména ve složitých půdních souvrstvích.

Ověřením přínosu metody CMP se zabývala studie [30] uskutečněná na Tohoku University (Japonsko) s cílem průzkumu bylo určit hladinu podzemní vody v jižní části města Ulánbátar (Mongolsko) v blízkosti řeky Tuul. Podařilo se zde úspěšně identifikovat vrstvu nasycenou podzemní vodou a vypočítat její hloubku. Odhadovaná hloubka a dielektrická konstanta všech vrstev odpovídala údajům z předchozího hydrogeologického průzkumu.

Další studie [58] zkoumala přesnost COM při mapování heterogenních půdních vrstev s prostorově proměnným obsahem vody v Kalifornii s cílem stanovení stupně nasycení vodou. Výsledky ukázaly, že COM mohou být použity pro odhad průměrného stupně nasycení půdy s chybou  $0,018 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Tato metoda tedy dosahuje přesnosti srovnatelné s existujícími běžnými metodami (tj. neutronová sonda, TDR, kapacitní sondy) a navíc umožňuje poměrně rychlý sběr dat na velkých plochách neinvazivním způsobem. Přesnost však stále závisí na přesné kalibraci pomocí vhodně zvolených jádrových vrtů.

Obsah vody v půdě a jeho změny v čase byly sledovány pomocí technologie GPR v rámci studie [56] provedené na University of Waterloo a University of Guelph (Kanada). Bylo provedeno měření metodou CMP s následnou NMO analýzou rychlosti založenou na sledování proměnlivosti vlhkosti půdy v závislosti na hloubce. Pomocí této analýzy byly dle autorů úspěšně charakterizovány hlavní sezónní trendy.

Další experimentální měření [59] bylo provedeno například na Cambridge Research Station Univerzity of Guelph (Kanada). Bylo zde měřeno metodou WARR a následně metodou FOM. Pro porovnání a ověření výsledků GPR byl také použit počítačem řízený automatický TDR systém. V obou fázích (zavlažování i odvodňování) se výsledky GPR a TDR přibližně shodovaly. V závěru autoři doporučují GPR jako vhodnou metodu ke sledování dynamiky půdní vody jak při zavlažování, tak při odvodňování. Výhoda GPR oproti TDR při srovnatelné přesnosti pak dle autorů spočívá především v možnosti poměrně rychlého měření na velkých plochách.

Konkrétní aplikací GPR technologie související s výše uvedeným je rychlé a nedestruktivní určení stavu a stanovení životnosti zemních hrází a svahů koryt řek. Klíčová je v těchto případech detekce a charakterizace podzemních dutin (například i zvířecí nory) v uvedených vodních stavbách. Tímto problémem se, kromě jiných, zabývala studie [16] prováděná na University of Bologna (Itálie). Tato studie se zaměřila především na testování proveditelnosti a účinnosti GPR průzkumu hrází nebo hliněných náspů zejména pokud jde o detekci dutin zvířecích nor. GPR je dle autorů této studie vhodný pro identifikaci uvedených diskontinuit. Během šetření však byly definovány faktory, které svojí povahou znesnadňují sběr a interpretaci dat a ve výsledku snižují kvalitu prováděného průzkumu.

Mnoho hydrologických a geomorfologických studií se také zabývá mapováním změn koryt řek. Ukázka takového mapování je na obrázku 18. Technologie GPR je pro tyto aplikace velmi užitečná, protože umožňuje i zobrazování fragmentů koryt a lužních oblastí a struktur zachovaných v mělkém podloží. Jedno z takových mapování [60] bylo například provedeno Univerzitou Adama Mickiewicze (Polsko) k určení přirozeného průběhu řeky Obra a změny územního rozsahu Obrzańskieho jezera.



**Obrázek 18** Použití zařízení RIS One společnosti IDS pro měření koryta řeky [61]

## 6.2 Geologické a geotechnické aplikace

Znalost podpovrchových geologických vrstev je velmi důležitá z mnoha důvodů. Za jednu z nejvíce zajímavých aplikací GPR technologie vůbec lze považovat její použití při průzkumu mimo planetu Zemi. GPR byl již použit pro mapování struktur a geologického složení Měsíce a Marsu. V oblasti dopravních staveb spočívá přínos geologických a geotechnických aplikací převážně ve stanovení vlastností podloží, zejména jeho únosnosti a případných poruch, před samotným založením stavby. Dalším přínosem je charakterizace geologických struktur v blízkosti stavby a jejich možných vlivů při výstavbě, ale i po dokončení stavby. Vzhledem k nízkým použitým frekvencím se u těchto aplikací používají antény s většími rozměry. Příklad takové antény je na obrázku 19. Možnosti GPR detekovat a zobrazit jak geologické struktury o velikosti desítek metrů, tak struktury o rozměrech menších než 1 m, jsou například popsány ve studii jeskynního systému z období spodního Ordoviku v centrálním Texasu (USA) [62].



**Obrázek 19** Zařízení RIS One společnosti IDS pro geologické aplikace [61]

Pro mnoho aplikací nejen ve stavebnictví je důležité určení obsahu jílu v půdě. Obecně platí, že přítomnost jílu v nesoudržných zeminách souvisí, díky schopnosti jílu pojmout značné objemy vody, s chováním zemin a změnami jejich objemu při zatížení. Nejpoužívanější metodou pro vyhodnocení obsahu jílu v zemině je provádění jádrových vrtů. Z NDT pak je často používáno zařízení Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) nebo metoda TDR. Nicméně většina používaných metod poskytuje pouze lokální vzorky dat a není časově efektivní pro posuzování větších úseků komunikací. Tímto úkolem se zabývala např. studie [63].

Potenciál GPR pro detailní popis říčních sedimentů byl zkoumán například v případové studii [64] u řeky Maas (Nizozemí). Tato studie byla zaměřena na rozpoznávání jednotlivých koryt a rozpoznávání způsobu uložení a klasifikaci přítomných usazenin. V uvedené studii byl demonstrován potenciál měření GPR pro interpretaci struktury říčních sedimentů v obdobných případech.

Příkladem aplikace GPR technologie v paleontologii byly např. průzkumy [65] provedené v křídových horninách v Texasu v roce 2003. Anomálie zjištěné v podloží byly zaznamenány do map. Takto aktualizované mapy pak byly použity paleontologickými terénními týmy jako podklad pro následné vykopávky. Tyto práce pak identifikovaly detekované anomálie jako paleontologické nálezy.

### **6.2.1 Těžební průmysl**

GPR lze s výhodami využít také v těžebním průmyslu. Touto metodou lze předběžně určit rozsah předpokládaných těžebních prací, stanovit mocnost vrstev hornin a jejich sklon a také detekovat případné poruchy a nehomogenity v podloží. Jedním z aktuálních problémů podzemní těžby automatizovanými stroji je také měření a udržování úrovně těžebního horizontu, nebo stanovení tzv. zbytkové mocnosti. Nový algoritmus pro stanovení uvedených údajů byl představen ve studii [66] provedené Queensland University of Technology (Austrálie). Metoda umožňuje dle autorů interpretovat GPR data v situacích, kdy tradiční filtrovací techniky selžou.

Kombinace GPR a seizmických metod byla v těžebním odvětví použita například při posuzování stability sádrového lomu ve Francii [67] s cílem lokalizovat hlavní trhliny a poškozené plochy, které jevíly známky dosažení mezních pevností. Tato studie představila použití potenciálně užitečné techniky automatického zpracování, která umožňuje rychlé

vytvoření grafického výstupu s vyznačením hlavních trhlin. Výsledky naznačují některé silné analogie mezi jednotlivými typy průzkumu a oblastmi nestability korespondují s oblastmi vymezenými odrazovými anomáliemi v GPR záznamu a oblastmi, kde došlo ke snížení rychlosti seizmické vlny. Obdobná studie [68] byla provedena na Ankara University, Faculty of Engineering (Turecko), kde bylo cílem posouzení kvality a homogenity mramorových bloků před jejich výlomem v oblasti Polatli Town (Ankara). V této studii je mimo jiné popsána interaktivní transparentní 3D vizualizace 2D GPR profilů ke stanovení nespojitostí a změn v tloušťkách vrstev.

### **6.2.2 Vulkanologie**

Další z aplikací GPR v geologii je průzkum a mapování geologických struktur vzniklých vulkanickou činností. Jde o mapování rozměrů a orientace těchto struktur z důvodu porozumění a případné predikce vulkanické činnosti v rizikových lokalitách, ale také mapování a určování vlastností vulkanických hornin pro geologický a geotechnický průzkum v oblasti stavebnictví a těžebního průmyslu.

GPR byl úspěšně použit pro detekci přibližně 1000 let starého lávového tunelu (jeskyně Komoriana) v čedičovém materiálu sopky Fuji (Japonsko) [69]. Na Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver (Kanada) byl proveden výzkum [70] použití GPR pro získání informace o prostorové variabilitě pórovitosti u mladých vulkanických struktur. V této studii se podařilo určit jasný vztah mezi pórovitostí a relativní permitivitou pro suché vyvěřelé horniny neobsahující bazalt a potvrdila se možnost využití inverzního modelování.

### **6.3 Konstrukce z betonu a zděné konstrukce**

Posuzování stavu betonu pomocí GPR zahrnuje diagnostiku konstrukcí z prostého, vytuženého, ale i předem nebo dodatečně předpjatého betonu. Typickým cílem studií v této oblasti je mimo jiné přesně lokalizovat pruty výztuže, předpínací kabely, kanálky a dutiny, ale také stanovit tloušťku betonových prvků samotných.

Dielektrické vlastnosti betonu ovlivňuje mnoho faktorů. Za primární a dominantní faktor pro změnu permitivity materiálu se považuje přítomnost vody. Během hydratačního procesu se množství vody zmenšuje a tato voda je postupně absorbována a vázána probíhajícími chemickými reakcemi.

Další ovlivňující faktory jsou: [71]

1. frekvence EM signálu
2. vodní součinitel betonu
3. poréznost
4. přítomnost iontů v roztocích obsažených v pórech
5. jílové minerály

Polarizace vázané vody v důsledku vnějšího elektromagnetického pole je omezená, protože voda je pevně navázána na pevný povrch. Naproti tomu voda volně obsažená zvyšuje celkovou polarizaci tvorbou dielektrika (společně se zrny). Přechod z volně obsažené vody na vázanou může být tedy odhalen pomocí změny velikosti polarizace. Snaha charakterizovat konkrétní dielektrické vlastnosti betonu pomocí GPR byla součástí studie prováděné na The Hong Kong Polytechnic University (Čína) [71]. Ve studii jsou stručně popsány změny permitivity s ohledem na stáří betonu, velikost vodního součinitele, použití lehkého a běžného kameniva a účinky hydratace cementu.

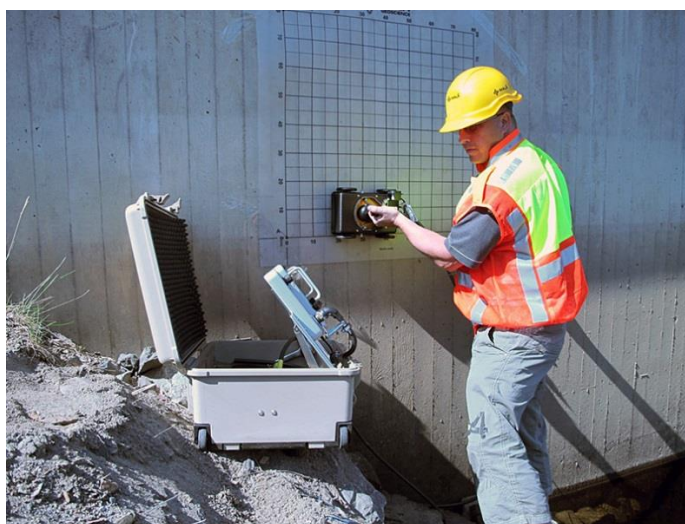
### **6.3.1 Mostní konstrukce**

Důležitou částí inspekce a sanace betonových mostů je posouzení stavu mostovky a identifikace koroze a delaminací. Je zřejmé, že při kontrole mostovek nebo dalších rozsáhlých konstrukcí je výhodné používání mobilního systému z důvodu snížení doby snímání a tedy omezení dopravy. Potenciální oblasti poškození se v záznamu GPR objeví jak zóny s útlumem signálu. Delaminace se téměř vždy vyskytují kolem výztužných prvků v betonu v závislosti na stupni koroze výztuže. Oblasti zkorodované výztuže mají nižší relativní permitivitu než oblasti výztuže nekorodované a způsobují nesouvislý nebo slabší odraz signálu GPR [11]. Výztuž se na radarovém záznamu (B-sken) zobrazí jako řada hyperbol a vrchol každé hyperboly označuje pozici jednotlivých prutů. Na obrázku 20 je znázorněn jede z typických GPR systémů používaných pro diagnostiku železobetonových konstrukcí.

I když je pomocí GPR možné detekovat delaminace v různých stupních, přesná interpretace naměřených parametrů není ještě plně automatizována. Většina postupů používá méně sofistikované techniky detekce a postupy dodatečného zpracování mají stále určité nedostatky. Proto roste poptávka po vývoji částečně automatizovaných a plně automatizovaných technik zpracování, které jsou spolehlivé a rychlé. Jednou metod, která se

běžně používá pro zpracování dat ve frekvenční oblasti, je migrace, pomocí které lze rozložit hyperboly do krátkých lineárních oblastí. Dalším trendem je použití neurálních sítí nebo fuzzy logiky pro detekci obloukových odrazů. Nicméně pouze velmi málo z takových metod je koncipováno přímo pro detekci zkorodované výztuže betonových mostů z důvodů mnohem vyšší obtížnosti oproti klasické detekci objektů v médiu. [11]

Silniční mosty mohou být vlivem aplikace soli v zimních obdobích vystaveny korozi výztuže. Důsledkem může být v nejhorším případě až jejich strukturální selhání. Chloridové ionty obsažené ve vodě z roztátého sněhu a ledu postupně prostupují póry a trhlinami asfaltových vrstev. V důsledku toho se slaná voda hromadí na rozhraní mezi asfaltem a betonem a roztok se postupně šíří do pórů v betonu a dosahuje výztužné vrstvy. Ionty chloridu neutralizují ochranu pasivační vrstvy na povrchu ocelové výztuže a začne proces lokální koroze. [72]



**Obrázek 20** Použití systému MALA CX12 [73]

Jedním ze způsobů jak zlepšit přesnost použití GPR pro hodnocení mostovek s korozi výztuže způsobenou chloridem sodným u železobetonových mostních konstrukcí byl postup navržený na Dalhousie University (Nové Skotsko, Kanada) [74]. Ukázalo se, že na exponovaných částech mostovky z vyztuženého betonu se snižují amplitudy odrazu od příčné výztuže umístěné v její horní části.

Nový inverzní algoritmus byl pro bistatické GPR s *air-coupled* anténami vyvinut na École Polytechnique Federale de Lausanne (Švýcarsko) [72]. Tento algoritmus, umožňuje odhad kvantitativních EM vlastností zkoumaných materiálů. Obsah chloridů má dle autora

výraznější vliv na šíření vln než relativní vlhkost vzduchu. Ukázalo se, že je možné rozlišit samostatné účinky obsahu chloridů a relativní vlhkosti vzduchu jak pro vodivost, tak pro relativní permitivitu.

### **6.3.2 Zděné konstrukce**

Typické problémy související s GPR diagnostikou zděných konstrukcí jsou detekce více vrstev stěn, nesoudržnost těchto vrstev, odlišnost materiálů v různých vrstvách, injektážní chyby, inkluze, větší dutiny a poškození vlivem vlhkosti. Zatímco nedávné studie v oblasti infračervené termografie ukázaly rostoucí úspěch detekce prvků a charakteristik ve zdivu těsně pod povrchem, metody GPR umožňují průzkum hlubších vnitřních struktur.

Cílem jedné ze studií [75] financované Slovenian Research Agency bylo předložit možnosti z doplňkového průzkumu pomocí radaru, ultrazvukového měření a komplexní odporové tomografie zdiva pro detekci větších dutin za různých vlhkostních podmínek. Všechny analyzované metody prokázaly schopnost detekovat velké vzduchové dutiny, ačkoli se významně lišily v účinnosti. Dle autorů bylo prokázáno, že GPR je zdaleka nejspolehlivější technika posuzování dutin v suchém i mokřém zdivu.

V jedné z dalších studií [76] byla využita kombinace technologie GPR spolu se seismickou tomografií s cílem získání informací o struktuře stavebního prvku tvořeného cihlami a maltou. Data byla dále ověřena endoskopicky. Radarová data ukázala, asymetrické a nepravidelné anomálie, spojené s nepravidelným uspořádáním různých složek. Nicméně, nebylo možné rozlišit odrazy od trhlin a odrazy od malých fragmentů cihel.

### **6.3.3 Tunely, opěrné a zárubní zdi**

Stejně jako u mostů je znalost aktuálního stavu konstrukce nutná také v případě tunelů, opěrných a zárubních zdí a obdobných konstrukcí. Informace jsou nezbytné nejen pro potřeby oprav a údržby, ale i pro posouzení stability a bezpečnosti těchto konstrukcí.

Aplikaci GPR pro kontrolu opěrných zdí se zabývala například studie [77] Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (Švýcarsko). Za účelem dosažení tohoto cíle byl vyvinut částečně automatizovaný přístroj (obrázek 21) skládající se ze systému umožňujícího pohyb svislé konstrukce podél stěny, vertikálních vodících kolejnic pro svislý pohyb antény, anténního boxu, elektrického motoru jako pohonné jednotky a měřících zařízení pro určování polohy antény. Tento přístroj umožnil efektivní sběr dat s vysokou přesností určování průběžné polohy antény.



**Obrázek 21** Měřicí konstrukce určená pro diagnostiku stěn [77]

#### **6.3.4 Stanovení vlastností stavebních materiálů**

Většina zavedených metod zpracování signálu GPR klade důraz na zvyšování kvality signálu a pochopení jeho vnitřních charakteristik. Ve většině případů je hlavním cílem těchto metod rekonstruovat srozumitelné signály v časové oblasti. Při interpretaci GPR signálu pro studium vlastností materiálů není ale analýza v časové oblasti dostatečná, protože není možné jednoznačně stanovit změny ve frekvenční charakteristice spolu se změnami na časové ose.

Z těchto důvodů je pro transformaci a vyhodnocení signálu doporučována dvojrozměrná společná časově-frekvenční analýza (JTFA). Doporučováno je také použití krátkodobé Fourierovy transformace (STFT), která převádí jednorozměrný tvar vlny signálu do dvourozměrného časově-frekvenčního děje. Tato aplikace časově-frekvenční analýzy GPR pro určení materiálových charakteristik byla použita v roce 2010 na BAM Federal Institute for Materials Research and Testing v Berlíně (Německo) a to pro určování koroze ocelové výztuže v betonu, hydratace betonu a prostorové distribuce vody v cihlové zdi. [78]

Popisem měření EM vlastností na fyzikálních modelech dvousložkových vrstevnatých médií s podobnými hodnotami se zabývali na Department of Seismometry and Geoacoustics, Faculty of Geology, Moskevské státní univerzity (Rusko) [79]. Proběhlo zde srovnávání vypočtených dat a dat naměřených GPR sestavou.

V další ze studií [80] je popsán způsob detekce dutin a pórů v železobetonových stěnách nebo deskách pomocí tzv. oboustranného profilování metodou *zero-offset profiling*

(ZOP). GPR měření byla realizována pomocí automatického systému, který umožnil synchronní pohyb antén (vysílač a přijímač) na obou stranách diagnostikovaného prvku. Bylo prokázáno, že touto metodou lze mapovat výskyt dutin v betonu s tou výhodou, že signál je oproti standardním metodám utlumován méně v důsledku pouze jednoho průchodu diagnostikovaným prvkem.

## 6.4 Železnice

Přesné poznatky o železničním tělese jsou důležité pro efektivní hodnocení a rozhodování o jeho údržbě a rekonstrukci. Pro kalibraci a ověření dat z GPR se skutečným stavem je nicméně v současné době stále nutné hloubení příčných inspekčních příkopů nebo provádění sond v klíčových místech. Je také možné přímé měření rychlosti pulzu GPR v každé z vrstev s využitím metod jako WARR nebo CMP.

GPR umožňuje kontinuální, „*top-of-rail*“, měření následujících parametrů v tělese železničního spodku: [4]

- tloušťka konstrukčních vrstev
- obsah vody ve štěrkových vrstvách a podloží
- přítomnost vody způsobená špatným odvodněním
- měkké podloží s vysokým obsahem vody
- deformace a změny v konstrukci železničního tělesa
- znečištění štěrkových vrstev

Textura radarového záznamu umožňuje rozeznat hrubozrné vrstvy od jemně zrnitých. Postupem času je ale horní vrstva štěrkového lože kontaminována jemným materiálem. Jinde může smícháním vody a hlíny z nižších vrstev vznikat kaše, která může vnikat do svrchních vrstev.

Čistý štěrk má větší objem vzduchových pórů, což snižuje průměrnou relativní permitivitu média. Voda naopak relativní permitivitu média zvyšuje. Postupem času jsou štěrkové vrstvy znečišťovány čím dál větším množstvím jemného materiálu, který je v sobě schopen vázat vodu. Relativní permitivita svrchních vrstev železničního spodku se tedy zvyšuje se stářím trati. Posouzením vzoru rozptylu textury záznamu GPR může být tedy stanoveno množství znečištění ve štěrkové vrstvě [21]. Relativní permitivitu materiálů štěrkového lože udává tabulka 2.

**Tabulka 2** Relativní permitivita materiálů železničního spodku – upraveno z [4]

Materiál	Relativní permitivita
Vzduch	1,0
Voda	81,0
Suchý čistý štěrk	3,0
Vlhký čistý štěrk (5%)	3,5
Saturovaný čistý štěrk	26,9
Suchý degradovaný štěrk	4,3
Vlhký degradovaný štěrk (5%)	7,8
Saturovaný degradovaný štěrk	38,5

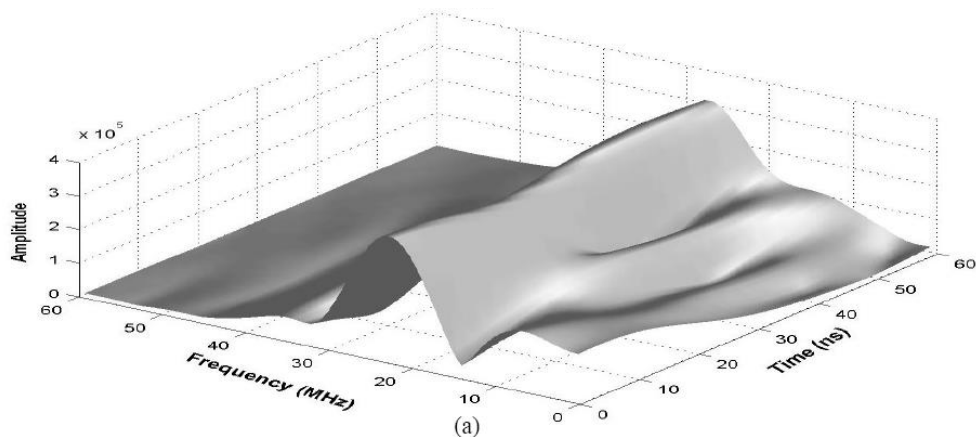
Změny vlhkosti, znečištění a degradace materiálu v železničním tělese způsobují odrazy signálu, které jsou snadno rozpoznatelné. V případě čistého štěrku se rychlost EM signálu pohybuje mezi 0,12m/ns a 0,21m/ns. U štěrku kontaminovaného jemnozrnným materiálem se pohybuje v rozmezí od 0,08m/ns a 0,12m/ns. [81]

Jedním z projektů, jehož snahou bylo usnadnit detekci rozhraní jednotlivých vrstev železničního tělesa, byl projekt vývoje geosyntetika [82] (nazvaného Terram PW 5) snadno zjistitelného pomocí GPR, jako odrazné plochy pro signál GPR. Cílem bylo stanovit přesnou rychlost šíření signálu a tím získat přesné údaje o hloubkách jednotlivých konstrukčních vrstev. Cílem autorů je vývoj řady "inteligentních geotextilií", které by umožnily neinvazivně sledovat všechny důležité geotechnické charakteristiky železničních tratí.

V roce 2009, v rámci společného financování od Asociace amerických železnice a Federální správy železnic zahájilo Centrum dopravní technologie USA rozsáhlý projekt, jehož cílem je objektivní zhodnocení různých technologií GPR na železničních tratích, rozvoj GPR směrnic v této oblasti a určení další potřeby výzkumu pro zlepšení aplikace GPR [83]. V další ze studií [84] byl představen automatický systém pro posouzení stavu materiálu železničního spodku založený na výběru amplitud odrazů charakteristických frekvencí a jejich klasifikaci.

Cílem studie [85] provedené ve VB byla aplikace JTFA na GPR data tělesa železničního spodku s cílem výběru relevantních dat pro následné použití v automatickém detekčním systému. Pro zpracování GPR signálu byla z důvodu potřeby analýzy závislosti frekvence v čase použita STFT (výstup této metody uveden na obrázku 22). Z výsledků vyplývá, že centrální frekvence roste spolu se stupněm znečištění materiálu. Toto umožňuje

navrženému detekčnímu systému rozpoznat stupeň znečištění materiálu tělesa železničního spodku v reálném čase.



**Obrázek 22** 3D zobrazení A-skenu po použití STFT [85]

Dalším důležitým parametrem tělesa železničního spodku je modul přetvárnosti. V několika provedených studiích byla prokázána velmi vysoká korelace mezi EM vlastnostmi a deformačními vlastnostmi v různých typech půd a agregátů. Jedna z takových studií [86] byla prováděna v Transport Technology Centre, Inc. ve městě Pueblo, Colorado (USA), na zařízení Americké asociace železnic. Předběžné výsledky dle autorů ukazují, že za určitých podmínek je možné předpovědět modul s přesností do 3,4MPa.

V ČR je analýza železničního tělesa pomocí GPR poměrně detailně zpracována. Měření se zde řídí především následujícími předpisy:

- Pokyny pro použití nedestruktivních geofyzikálních metod v diagnostice a průzkumu tělesa železničního spodku. [87]  
Zde jsou, mimo jiné, uvedeny příklady použití georadaru, popsány jeho výhody, nevýhody a omezení, popsány příprava a způsob měření a zpracování a vyhodnocení dat včetně interpretace výsledků.
- Podmínky pro měření tratí Českých drah (ČD) georadarem a pro měření překážek prostorové průchodnosti tratí ČD mimodrážními zhotoviteli.
- Pokyny pro používání georadaru v měřicím voze pro železniční svršek.

## 6.5 Inženýrské sítě

Při použití GPR pro detekci potrubí a podzemních vedení je jednou z hlavních z nevýhod při vyhodnocování záznamu skutečnost, že signál je poměrně snadno ovlivňován a zkreslován odrazy z okolního prostředí, které mohou zcela zakrýt odrazy od detekovaných objektů. Kromě toho mohou být hlouběji umístěné objekty zakryty četnými objekty v menších hloubkách, což způsobuje změny tvarů odrazových hyperbol. Tento vliv může způsobit chybnou interpretaci pozice, velikosti a geometrie detekovaných objektů. Odražený signál je tedy ve výsledku funkcí relativní pozice antény vůči potrubí nebo vedení, vlastností potrubí a materiálu, v němž je uloženo, rozptylového úhlu, tloušťky potrubí a interference signálu od ostatních objektů.

Použitelnost GPR jako nástroje pro detekci průměru, umístění a hloubky podzemních potrubí byla zkoumána např. ve studii National Cheng Kung University (Taiwan) [17]. Autoři v závěru této studie připouštějí možnost použití nezpracovaných GPR signálů pro detekci potrubí a podzemních vedení, nicméně zdůrazňují užitečnost pokročilých technik zpracování signálů jako nástroje pro zvýšení přesnosti měření. Podle výsledků experimentů mohou být při detekci podzemních potrubí získány podrobnější informace použitím *Discrete Wavelet Transform* (DWT) analýzy signálu, což umožní jednoznačné určení umístění, hloubky a průměru potrubí, i když bude vyrobeno z různých materiálů. Jako jeden z nejtěžších úkolů v této oblasti potom definují identifikaci podzemních potrubí, která se překrývají v paralelním uspořádání. V jedné z dalších studií [88] byl řešen problém detekce lokalizace, a stanovení geometrie potrubí naplněného různými materiály. Cílem analýzy bylo zejména pochopit účinek materiálu média dopravovaného potrubím.

Další metoda pro identifikaci a lokalizaci plastových trubek v GPR záznamu byla navržena v rámci projektu Universitat Politècnica de Valencia (Španělsko) z roku 2010 [89]. Tato metoda, která může být upravena pro různé typy materiálů potrubí (kov, beton, atd.), je založena na víceprvkových systémech pracujících s upravenými záznamy GPR. Získané výsledky, dle autorů, ukazují přínos uvedené metody pro lokalizaci plastových potrubí i ve složitých podmínkách. [89]

## 6.6 Archeologie

Snímky a mapy získané pomocí GPR slouží jako prvotní údaje, které mohou být použity jako vodítko pro určení míst následných výkopových prací a definování citlivých oblastí archeologických nalezišť, která obsahují kulturní pozůstatky. Tímto způsobem může být potenciálně získáno značné množství informací o archeologických nalezištích, aniž by musely být prováděny rozsáhlé tradiční archeologické výkopy, které jsou časově i finančně velmi náročné a jsou často omezeny v důsledku tlaků investorů při nových stavebních projektech.

Jedna z prvních aplikací GPR v archeologii byla uskutečněna na Chaco Canyon v Novém Mexiku (USA) v roce 1976 [1]. Bylo zjištěno, že některé z neobvyklých radarových odrazů označovaly umístění podzemních stěn. Na tuto průkopnickou studii navázala řada dalších prací. Koncem osmdesátých a počátkem devadesátých let byl GPR úspěšně použit v řadě archeologických studií. Ve většině případů šlo ale o nezpracovaná nebo částečně zpracovaná data GPR profilů v podobě papírových záznamů nebo snímků obrazovek počítače, která s určitou pravděpodobností mohla upozornit na možnost výskytu zajímavých objektů. Nejrozsáhlejší a nejvíce úspěšné práce před rokem 1993 byly provedeny v Japonsku s cílem zmapovat pozůstatky domů a mohyl v jedné ze známých archeologických lokalit na ostrově Honšú. Na tyto úspěchy bylo navázáno v mnoha dalších projektech v Japonsku v letech 1993 až 1998. [1]

Dále je uvedeno několik vybraných studií provedených v posledních letech.

V roce 2007 bylo v Bahariya Oasis (Egypt) objeveno tzv. „Valley of Mummies“ [90]. Díky GPR bylo nalezeno 105 mumií starých přibližně 2000 let. Dále byly určeny oblasti následného průzkumu. Konečnými výsledky radarového průzkumu byly 2D profily a 3D schémata sloužící k lepší orientaci v průběhu následných archeologických prací. Jedno z dalších šetření bylo provedeno v roce 2011 v Pompejích, v oblasti Regio III [91]. Analýza GPR záznamu z naměřených profilů jasně ukázala vrstvení sopečných materiálů s jasně diferencovanými základy římské architektury. Podrobné průzkumy pomocí GPR byly provedeny také na středověkých Vikinských hřbitovech a na farmě Stóra-Seyla ve Skagafjordur (Island) v roce 2012 [92]. Radarové profily nad hroby obsahovaly silné hyperbolické odrazy vycházející z kosterních pozůstatků. V tomto průzkumu se uplatnila metoda časových řezů, modelování a analýza koeficientů odrazu. V roce 2013 byl GPR použit v kombinaci s metodou seismické tomografie pro stanovení změn materiálu použitého na

sochy Moai na Velikonočním ostrově [93]. Měření bylo provedeno na vrstvách jemnozrnného tufu, který byl vystaven povětrnostním podmínkám. Vyhodnocení a srovnání měření ukázalo povrchové oblasti se změnami vlivem povětrnostních podmínek a vnitřní zóny s vyšší vlhkostí, což usnadnilo zhodnocení stavu těchto památek. Spolu s GPR bylo také provedeno geodetické zaměření a laserové skenování vybraných soch. Další významný přínos GPR byl zaznamenán při průzkumu na nalezišti v městě Nysa (západní Turecko), hlavním lokálním kulturním střediskem z helénistické a římské doby [94]. Díky měření pomocí GPR byla odhalena existence nové budovy včetně určení jejích rozměrů a tvaru a do jisté míry i stavebního stylu.

## **6.7 Glaciologie, led, sníh, permafrost**

Jednou z původních aplikací technologie GPR je její použití v oblasti glaciologie a příbuzných oborech. Jedná se o stanovení tloušťky ledu (kry, ledovce), vyšetřování lokalit pokrytých permafrostem (hledání objektů pod zemí nebo měření mocnosti permafrostu jako podloží staveb), stanovení množství sněhové masy nebo dokonce hledání obětí lavin. [95]

Měření tloušťky vrstev ledu a sněhu závisí, jako u jiných materiálů, na rychlosti šíření signálu v médiu, která je ovlivněna především relativní permitivitou materiálů. Touto tematikou se zabývala studie [96] provedená na University of Manitoba a Université de Sherbrooke v Kanadě v roce 2006. Naměřené fyzikální vlastnosti sněhu a ledu byly použity k výpočtu skutečné tzv. profilů permitivity, které odpovídali změnám teploty uvnitř materiálu a také změnám hustoty. Výsledky měření mocností vrstev sněhu a mořského ledu se lišily od přímých měření méně než o 8,3 %. V některých místech pak bylo možné i rozlišit rozhraní mezi sněhem a mořským ledem a rozhraní mezi mořským ledem a vodou. Limitem měření se ukázaly být dolní meze mocností jednotlivých vrstev.

### **6.7.1 Permafrost**

Přibližně jedna pětina pevniny na celé Zemi je pokryta permafrostem. Jeho tání má vliv na geotechnickou stabilitu dotčených oblastí. Z pohledu dopravního stavitelství je cílem zmapovat tyto oblasti a mocnost vrstev (tvořící podloží staveb) pro stanovení jejich únosnosti. Permafrost velmi vhodným materiálem pro použití GPR. Díky nízkým energetickým ztrátám je zde umožněn průnik signálu do značných hloubek a to i při použití vyšších frekvencí.

Jedna z nejobsáhlejších studií technik, které se zabývají degradací permafrostu a následnými dopady na dopravní infrastrukturu, byla realizována v roce 2008 Yukon

Highways Public Works na experimentální lokalitě blízko Beaver Creek na Aljašské dálnici, Yukon (USA) [97]. Tato komunikace, křížící četné terénní jednotky uložené na přerušovaných vrstvách permafrostu, vykazuje známky poškození vyvolané jeho degradací. Jedním

z hlavních cílů této studie bylo stanovení isotermického profilu pod silnicí a jejím násypem. Získané poznatky mohou dle autorů vést u nově budované silniční infrastruktury k identifikaci potenciálně problematických oblastí a k následné změně trasy tak, aby se zabránilo nežádoucím atmosférickým dopadům. Tam, kde se nelze vyhnout takové oblasti jsou tyto poznatky nezbytné jako podklad pro přizpůsobení návrhu konstrukce nepříznivým podmínkám.

Použitím multifrekvenčního GPR na detekci a mapování zbytků ledovcového materiálu a sedimentů v permafrostu se zabývali mimo jiné na Norském polárním institutu ve spolupráci s University of Oslo [95]. Studie [98] provedená v roce 2015 na železnici v úseku Qinghai-Tibet se zabývala zmapování trvale zmrzlých oblastí v tělese železničního spodku. Byla zde představena metoda pro odstranění mnohonásobných odrazů a zvýšení tzv. signal/noise ratio v prostředí s teplotami trvale pod bodem mrazu a algoritmus pro automatickou detekci trvale zmrzlých vrstev.

### **6.7.2 Laviny**

Lokalizace obětí lavin je další aplikací GPR zkoumanou v posledních letech jako alternativy ke stávajícím časově náročným a mnohdy nesystematickým metodám. Oběti lavin ve velkých hloubkách je často obtížné najít, protože manuální metody, jako je manuální sondování, jsou časově náročné a mají na rozdíl od GPR pouze omezený dosah (3 až 4m). Uvedeným využitím GPR se mimo jiné zabýval Norský geotechnický institut [99]. Cílem bylo prokázat schopnost radarového systému v měření mocnosti sněhových vrstev, umístění trhlin v ledovci a hledání obětí lavin. Výsledky studie ukazují, že radar může detekovat dutiny, batohy nebo osoby do hloubky více než 2m.

Dalším příkladem aplikace GPR může být jeho použití k hledání obětí sněhových lavin na Špicberkách (Norsko) a ve švýcarských Alpách, provedená University Centre on Svalbard v roce 2001 [100]. Za účelem testování schopnosti GPR lokalizovat osoby zasypané sněhem byla provedena řada testů s dobrovolníky umístěnými v dutinách vyhloubených ve sněhu v různé hloubce. Na základě testů se dospělo k závěru, že pohřešovaná osoba může být

lokalizována pomocí GPR pokud „se vznáší“ ve sněhu, tzn., jestliže se nachází v prostoru mezi výše uvedenými rozhraními.

### **6.7.3 Ledovce**

Během posledního desetiletí bylo získáno pomocí GPR mnoho důležitých poznatků o geomorfologii vysokohorských oblastí. Studie se zaměřily na různé morfologické vlastnosti horských ledovců, jako jsou suťové svahy, ledovcové usazeniny apod. V jedné ze studií [101] z této oblasti byl použit GPR ke zkoumání horského ledovce Thabor v severních Francouzských Alpách. Byly klasifikovány a popsány povrchové vlastnosti horského ledovce s důrazem na oblasti podloží, které byly odkryty v důsledku ústupu ledovce. Integrace morfologie, rychlosti signálu GPR a vnitřní stratigrafie umožnila identifikovat hlavní strukturální jednotky skalního ledovce, stejně jako vysvětlit jeho genezi.

## **6.8 Ekologie**

Technologie GPR bývá využívána také v oborech environmentálních. Ekologické studie běžně vyžadují znalosti komplikovaného členění půdních vrstev. Pomocí GPR lze detekovat přítomnost škodlivých látek, které mění vlastnosti půd, hledat skládky odpadu apod.

Technologie GPR byla pro tyto účely poprvé použita v roce 2010 v blízkosti Garmisch - Partenkirchenu v severních Alpách (Německo) [102]. Z této studie vyplývá, že s použitím technologie GPR, je možné detekovat a rozlišit půdní a horninové vrstvy. I přes několik omezení lze přibližně stanovit tloušťky těchto vrstev a jejich proměnlivost. GPR průzkum také poskytuje názornější obraz složení zemního tělesa než jakého by mohlo být dosaženo pomocí omezeného množství kopaných nebo vrtaných sond.

Další ze zajímavých aplikací [103] je použití GPR pro odhad objemu biomasy kořenového systému stromů z důvodu stanovení absorbovaného objemu oxidu uhličitého. Pro tyto účely bylo na Tohoku University (Japonsko) v součinnosti s University of Miami (USA) použito zařízení GPR v součinnosti s vysoce přesným laserovým systémem na určení přesné polohy. Tato kombinace umožnila velmi podrobnou datovou mřížku k vytvoření dostatečně přesného 3D modelu.

## 6.9 Forenzní vědy

Další možností využití technologie GPR je její použití v oblasti kriminalistiky a forenzních věd obecně. Jedná se o vyhledávání skrytých objektů a předmětů souvisejících s kriminální činností, které by byly konvenčními metodami téměř neodhalitelné. V nedávné době byla technologie GPR použita při odhalování skladů nelegálního alkoholu v takzvané „metanolové aféře“. GPR může být použit ale i v odhalování závažnější trestné činnosti při zajišťování důkazních prostředků v případech vražd a podobně. Účinnost GPR je vysoce specifická pro dané lokality a úspěch závisí nejen na příznivých půdních podmínkách. Možnosti detekce jsou ovlivněny vlastnostmi hrobu, ale je také nutné brát změny pohřebních praktik v průběhu času v rámci daného hřbitova. Pravděpodobnost nalezení hrobu pak naznačuje detekce anomálie v podobě předpokládaného tvaru a rozměru daného hrobu.

Příkladem uvedených aplikací může být testování GPR na neoznačených hrobech v Connecticutu, které bylo provedeno Connecticut Archaeology Center při University of Connecticut (USA) [104].

## 6.10 Detekce min

Odhaduje se, že v osmdesáti zemích celého světa je uloženo přes 10 miliard nášlapných a protitankových min [105]. Jejich detekce je značně obtížná jednak vzhledem k jejich malým rozměrům (od 40mm v průměru), ale také k nízkému, nebo v některých případech téměř žádnému, obsahu kovových součástí. Je známo, že výrobní náklady miny jsou velmi nízké, ale detekce a náklady na odstranění jsou mnohonásobně vyšší [106]. GPR detekuje objekt pod povrchem, pokud se liší od okolí vodivostí (kovové látky), permitivitou (nevodivé cíle) nebo permeabilitou (feromagnetické látky). GPR lze tedy využít i pro detekci položených minových polí ukončených nebo probíhajících válečných konfliktů a ukrytých nástražných zařízení. V poslední době se pro tuto aplikaci začínají používat poloautomatické nebo plně automatické GPR systémy. Jedno z takových zařízení je znázorněno na obrázku 23.



**Obrázek 23** Vozidlo Husky uzpůsobené pro detekci min s připevněným GPR [107]

V roce 2006 byla na University of Melbourne (Austrálie) vyvinuta metoda pro klasifikaci min, která používá elektromagnetický podpis miny zaznamenaný GPR [105]. Tato metoda vychází ze znalosti přibližné velikosti a složení detekovaných min, které ovlivňují jejich EM podpis a na tomto základě určuje algoritmus pro vyhodnocení detekovaného objektu jako miny. Pomocí tohoto algoritmu bylo dle autorů dosaženo vyšší úspěšnosti oproti dosavadním postupům.

Dalším významným projektem z této oblasti bylo vybudování zkušebního zařízení pro detekci min v Haagu [108]. Byl zde navržen experimentální GPR systém pracující na frekvenci od 200MHz do 3GHz. Dále bylo postaveno venkovní zkušební zařízení na testování odminování s možností polo-automatického měření pomocí několika různých snímačů na zkušebních pruzích s různými typy zemin.

## 7 Dostupné GPR sestavy a software

Dostupné je velké množství GPR systémů od mnoha výrobců pro různé druhy aplikací. Většina výrobců HW také nabízí speciální programy pro sběr a vyhodnocení dat, které umožňují import různých formátů dat i od konkurenčních systémů. Některé GPR sestavy lze upevnit na vhodný dopravní prostředek, ale jednodušší systémy je možné používat spolu s taženým nebo tlačným ručním vozíkem. Systémy pro určité aplikace (např. geologii) je možné, vzhledem ke geometrii antén, také nést ručně s některými komponenty umístěnými v batohu operátora.

Standardní GPR sestava se skládá ze tří hlavních prvků: řídicí jednotky (generátor impulzů), osobního počítače (PC) s příslušným SW a antény (nebo anténního pole). Dále jsou součástí datové kabely, které přenášejí elektrické impulsy (koaxiální měděné nebo z optických vláken), baterie a další zařízení jako kamery, ultrazvukové měřiče vzdálenosti apod. Součástí sestavy je vždy také zařízení na určení polohy měřícího zařízení. Většinou se jedná o měřící kolečko připojené k vozíku nebo kolu dopravního prostředku. Toto měřící kolečko (odometr) pak na základě počtu otáček při pohybu aparatury po měřícím profilu umožňuje určit hodnotu staničení v daném profilu. U mnoha systémů lze také použít GNSS zařízení, díky kterému je možné stanovit polohu v používaných souřadnicových systémech v určitých bodech měřeného profilu. S nižší přesností poskytují tato zařízení kontinuální data o poloze během celého měření.

Většina systémů může při použití poměrně lehkých napájecích článků pracovat několik hodin. Obvykle se používá např. 12V baterie. Všechny systémy GPR obsahují jeden nebo více vnitřních pevných disků (integrováné nebo v připojeném PC), kde je nainstalován příslušný SW a kam se ukládají naměřená data. Zařízení mají obvykle několik různých portů, které umožňují převod dat do PC. Novější modely umožňují ukládání dat na flash disky nebo paměťové karty. Všechny GPR systémy umožňují zobrazení měřených dat v reálném čase na obrazovce buď integrované do řídicí jednotky, nebo připojeného PC.

Všeobecné informace zobrazené na displeji zahrnují obvykle (kromě samotného radarového záznamu) datum, frekvence antén, název měření, číslo měřeného profilu, polohu měřící sestavy, komentáře a základní nastavení. Kromě toho některé SW umožňují zobrazení záznamu z kamer, GNSS souřadnic a dalších připojených externích zařízení. Kalibrace měřící

aparatury je u modernějších jednotek prováděna částečně automaticky, nicméně je zde zachována možnost i ručního nastavení parametrů. Toto je umožněno přes SW rozhraní pomocí myši a klávesnice (touchpadu) nebo u některých systémů také dotykovou obrazovkou. Nastavení měřicí sestavy je podrobněji popsáno v příslušné kapitole.

V tabulce 3 na následující stránce je uveden seznam většiny výrobců GPR sestav a společností vyvíjejících související programové vybavení a jejich produktů. U uvedených zařízení je výrobcem v popisu zařízení a technické specifikaci většinou uveden okruh aplikací a použití pro každé jednotlivě. Je tomu tak i u zařízení určených speciálně pro diagnostiku pozemních komunikací, které jsou relevantní pro tuto práci. V tabulce je nicméně uveden přehled různých zařízení a SW, neboť do problematiky diagnostiky, výstavby, údržby a rekonstrukcí pozemních komunikací lze zahrnout i například aplikace pro detekci inženýrských sítí, stanovení hladiny podzemní vody, diagnostiku mostovek, mapování podloží, atd.

Detailní popis zařízení (RIS Hi-Pave) a programového vybavení (K2 Fast Wave, ReflexW, Road Doctor) které byly použity v této práci, je uveden v kapitole popisující použité zařízení a pomůcky.

**Tabulka 3** Přehled výrobců GPR a nabízeného HD a SW vybavení

Výrobce	URL <a href="http://www.">http://www.</a>	HW	SW
Ingegneria Dei Sistemi (Itálie)	idscorporation.com	Opera, Detector Duo; Stream EM, X; RIS; Aladdin; SafeRailSystem;	K2 Fast Wave; GRED moduly; SRS moduly
Radar Systems Inc. (Řecko)	georadar.gr	Zond-12e	PrismMobile ; Prism2.5
Geoscanners AB (Švédsko)	geoscanners.com	U-Explorer ; Geo; Scorpio; PiL; Rex	GPR Soft;GaiaSpectrum Geopointer X; GAS XP
3D-RADAR (Norsko)	3d-radar.com	GeoScope MkIV; DX; DXG	GeoScope; 3rd Examiner
Geophysical Survey Systems Inc. (USA)	geophysical.com	StructureScan; SIR; UtilityScan; RoadScan 30; BridgeScan; Profiler	RADAN: 3D; RoadScan; BridgeScan; StructureScan
MALÅ Geoscience (Švédsko)	malags.com	GroundExplorer; ProEx System; CX System; EasyLocator System; MIRA System; Borehole System; RTA System	RadExplorer ; rSlicer; Object Mapper; CX, XV, Easy Locator Monitor; MIRASoft; WinTomo; RadInter; GPS Mapper; Monitor; GPR 3D, GroundVision;
Penetradar Corporation (USA)	penetradar.com	IRIS	RDA; RDP; RDD
Radarteam AB (Švédsko)	radarteam.se	COBRA Plug-in; COBRA Wireless	
Sensors & Software Inc. (Kanada)	sensoft.ca	pulseEKKO PRO; Noggin;SPIDAR; Conquest; LMX100; Utility SmartCart; FINDAR; Rescue Radar; SnowScan; IceMap;	EKKO Project: Interpretation Module; SliceView Module, 3D Visualization; IcePicker; Processing Module ConquestView; QuickMap; GeoTomCG
Utsi Electronics Ltd. (UK)	utsielelectronics.co.uk	Crack detection head; Datalogger; GROUNDVUE	
Roadscanners Oy (Finsko)	roadscanners.com		Road Doctor; Geo Doctor; RDMS
Dr. K. J. Sandmeier (Německo)	sandmeier-geo.de		REFLEX W

## 8 Použité vybavení

Jako hlavní zařízení byla v této práci samozřejmě použita sestava GPR (popsána níže). Pro hlavní cíl práce bylo také použito zařízení FWD a údaje z jádrových vývrtů. Technické specifikace zařízení GPR a FWD uvedené v této práci jsou převzaty z dostupné technické dokumentace a manuálů pro obsluhu těchto zařízení. Při měření ve fázi stanovení vlivu polohy antén na získaná data byly použity ultrazvukové snímače U-GAGE Q45U společnosti Banner Engineering s příslušenstvím (znázorněno na obrázku 24). Snímače napojené na měřicí ústřednu umožnily určit pohyb antén vzhledem k povrchu během jízdy vozidla po měřícím profilu.



**Obrázek 24** Zařízení pro určení polohy senzorů

V případě, kdy byl zaměřován povrch geodetickými metodami, byla využita totální stanice Leica TCR 307. Pro stanovení geotechnických vlastností vzorků zemina hornin bylo použito příslušné vybavení sekce dopravního stavitelství (DS) Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD) Dopravní fakulty Jana Pernera (DFJP).

### 8.1 GPR sestava

Pro veškerá laboratorní GPR měření i měření na vozovkách PK, popsaná v této práci, byla použita GPR sestava zakoupená Katedrou dopravního stavitelství (KDS) DFJP z prostředků Fondu rozvoje vysokých škol (FRVŠ) za finanční spoluúčasti UPa. Konkrétně se

jednalo o projekt FRVŠ č. 475/2013 - *Využití vícekanálového georadaru pro výuku diagnostiky a monitoringu inženýrských dopravních staveb*. Další prostředky na drobné vybavení a materiál pro potřeby měření v této disertační práci byly čerpány z prostředků Studentské grantové soutěže 2013 - 2017 a z prostředků KDS. Jako platformy GPR byla při měření použita vozidla Renault Master ( GPR sestava instalovaná na tomto vozidle je znázorněna na obrázku 25) a Renault Kangoo společnosti DSP a.s. a také ruční měřicí vozíky (obrázek 26). GPR zařízení bylo také přímo umístěno na pomocné dřevěné konstrukci a to při měření na vzorcích materiálu uložených v *Intermediate Bulk Container (IBC)* a při měření na vzorcích z betonu a železobetonu v rámci projektu: „*A probabilistic model for estimation of the bond-slip failure of the reinforcement bar in the fire exposed beam-column joint specimen*“ (není součástí disertační práce).



**Obrázek 25** Použitá GPR sestava na měřicím voze Renault Master



**Obrázek 26** Použité měřicí vozíky

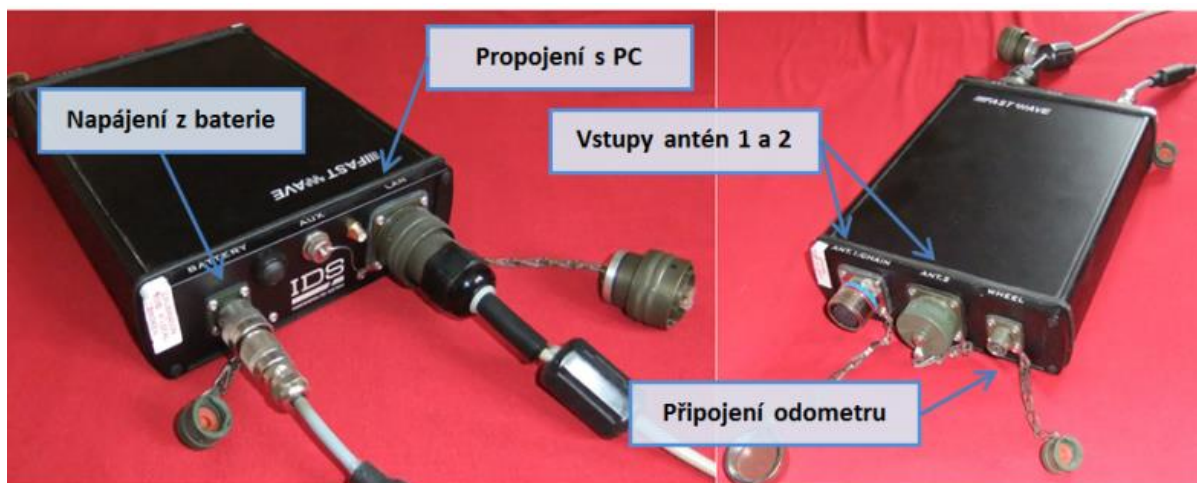
Použitá GPR sestava výrobce IDS nese označení RIS Hi-Pave. Tento systém je dle výrobce určen pro použití v oblasti tuhých i netuhých vozovek, převážně pro určování tloušťky asfaltových vrstev do max. hloubky 1m [61]. Skládá se z vícekanálové řídicí jednotky DAD MCh Fast Wave (popsána níže), 12V baterie o kapacitě 12Ah, dvojice antén (popsány níže), měřicího kolečka WHE PAVE pro osobní vůz (odometr), rámu z hliníku a skelného vlákna (nosič Thule, konzole ze skelného vlákna a mechanické upevnění TRDual F), koaxiálních, napájecích a datových kabelů a také Toughbooku Panasonic CF-53 pro záznam a zpracování dat.

Použité antény byly v případě upevnění na vozidla usazeny na konzolu, která je umístěna na zadní části vozidla. *Horn* anténa byla upevněna ve výšce 250 až 350mm nad vozovkou. *Ground-coupled* anténa potom přibližně 50mm nad terénem. Odometr byl připevněn na zadní kolo vozidla. Řídicí jednotka byla spolu s baterií umístěna v kabině vozidla a pomocí datového kabelu spojena s počítačem ovládaným operátorem. V případě měření pomocí ručního vozíku byla *horn* anténa umístěna na rameni ve výšce 300mm nad povrchem a *ground-coupled* anténa byla v kontaktu s povrchem přes kluznou podložku. Při

měření v laboratořích VVCD DFJP bylo s anténami manipulováno ručně na dřevěné konstrukci.

### 8.1.1 Řídící jednotka DAD MCh Fast Wave společnosti IDS

DAD Fast Wave Control Unit, popsaná na obrázku 27, je řídicí jednotka odpovědná za řízení antén a digitalizaci získaných radarových dat.



Obrázek 27 Kontrolní jednotka DAD MCh Fast Wave

#### Technické specifikace poskytnuté výrobcem:

Frekvence pulzů: 400kHz;

Rychlost skenování: až 4760 skenů za sekundu (@ 128 vzorků na sken)

Dosah: až 9999ns;

Počet A/D převodníků: 2;

Frekvence sběru dat (A/D clock): 400kHz;

Vzorkování: 16bit;

Rozlišení: více než 5psec;

Počet vzorků na sken: 128-8192 (1 kanál); 128-4196 (2 kanály); 128-2048 (4 kanály);

Porty: anténa 1, anténa 2, odometr, LAN, baterie;

Maximální počet antén: 2 standard; až 8 TR s rozšiřujícím boxem; až 4 TR DUAL F;

Počet kanálů 8;

Rozměry: 22cm x 17cm x 5,5cm;

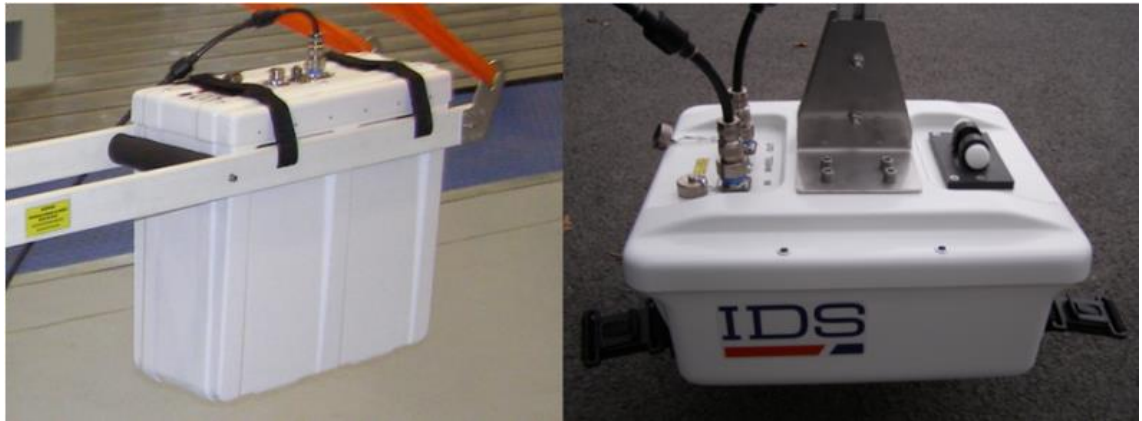
Váha: 1,5 kg;

Odolnost proti prachu a vodě (IP 64);

Průměrná spotřeba: < 10 W

### 8.1.2 Použité antény společnosti IDS

Při měřeních byly použity antény výrobce IDS dodané jako součást GPR sestavy. Jednalo se o *horn air-coupled* anténu HN-2000 (obrázek 28 vlevo) s centrální frekvencí 2GHz a dvoufrekvenční *ground-coupled* anténu TR DUAL-F 400/900 (obrázek s centrálními frekvencemi 400 a 900MHz (obrázek 28 vpravo).



Obrázek 28 Použité antény

#### Technické specifikace poskytnuté výrobcem:

##### **anténa HN-2000**

Typ antény: stíněná dipólová (air-coupled)

Počet kanálů: 1

Centrální frekvence: 2GHz

Rozměry: 60cm x 22cm x 40cm

Váha: 7 kg

Provozní vlhkost: < 90 %

Odolnost proti vodě (IP 65)

Provozní teplota: -40°C až 50°C

##### **anténa TR DUAL-F 400/900**

Typ antény: stíněná dipólová

Počet kanálů: 2

Centrální frekvence: 400/900MHz

Rozměry 43cm x 37cm x 20cm

Váha: 6 kg

Provozní vlhkost: < 90 %

Odolnost proti vodě (IP 65)

Provozní teplota: -40°C až 50°C

### 8.2 Zařízení FWD

Pro stanovení mechanických vlastností konstrukcí PK byl použit měřicí systém FWD RODOS (obrázek 29) poskytnutý společností DSP a.s. Měřicí systém FWD je zařízení sloužící pro měření průhybů vozovek PK pod definovaným zatížením a následného výpočtu

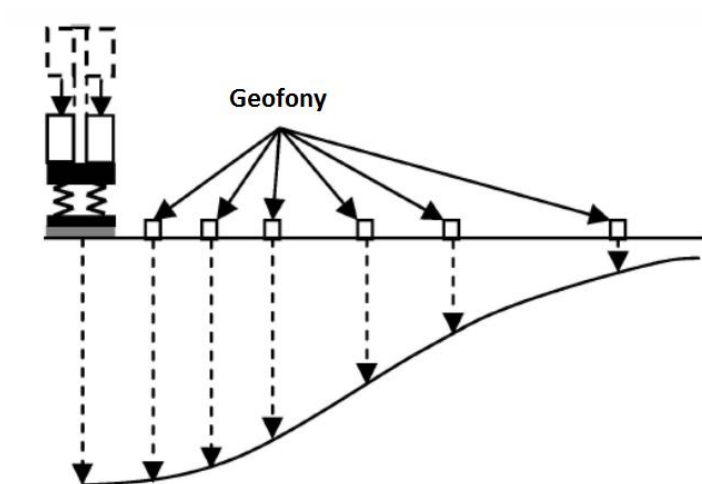
ekvivalentních modulů konstrukce vozovky. Jedná se o dvoukolový přívěs nesoucí zatěžovací zařízení, měřicí rám, řídicí a měřicí elektronikou. Pohon zatěžovacího zařízení je proveden hydraulicky a zajišťuje jej benzinový motor rovněž umístěný na přívěsu.



**Obrázek 29** Použité zařízení FWD

Zatěžovacím zařízením je pomocí tlumeného rázu závaží (zatěžovacího impulsu) působícího přes kruhovou desku na povrch vozovky vyvozen silový účinek, který je roven násobku hmotnosti použitého závaží (použito bylo závaží o hmotnosti 300kg) a tíhového zrychlení.

Před vlastním měřením jsou zatěžovací desky a měřicí rám osazený snímači průhybu (geofony) umístěny na povrch vozovky. Po vyvození zatěžovacího impulsu jsou na geofonech umístěných v místě dopadu a na měřicím rámu (u použitého zařízení bylo použito 9 geofonů umístěných na měřicím rámu ve vzdálenostech 0, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800 a 2100mm od středu zatěžovací desky) změřeny deformace povrchu a na jejich základě je stanovena průhybová čára vozovky (znázorněno na obrázku 30). Z naměřených hodnot průhybů se vypočítávají pomocí zpětného výpočtu rázové moduly pružnosti konstrukce vozovky, vztažených ke konkrétnímu zařízení a k teplotním podmínkám zjištěných při měření. Tato data slouží pro výpočty únosnosti, zbytkové doby životnosti vozovky a jako podklad k opravám nebo rekonstrukci PK.



**Obrázek 30** Průhybová čára vozovky - upraveno z [109]

Použité zařízení pracovalo v rozsahu zatížení 25 – 120kN s délkou zatěžovacího pulsu 20 – 35ms a max. výškou pádu 47cm. Zatěžovací hmotu tvořilo 14 ocelových půlkruhových segmentů. Zatěžovací deska o průměru 300mm s kulovým kloubem, zajišťujícím správné dosednutí desky na vozovku, byla opatřena plastovou podložkou o síle 20mm, podlepenou rýhovanou gumou.

## 9 Použitý software

V souvislosti s pořízením GPR sestavy bylo také ze stejných prostředků jako sestava GPR pořízeno Katedrou dopravního stavitelství speciální programové vybavení určené ke kalibraci GPR sestavy, záznamu, ukládání, zpracování a interpretaci naměřených dat. Pro sběr dat byl v této práci použit software K2 Fast Wave společnosti IDS. K následnému zpracování a interpretaci dat byl ve většině případů použit software ReflexW a u některých měření bylo provedeno také porovnání s využitím softwaru RoadDoctor.

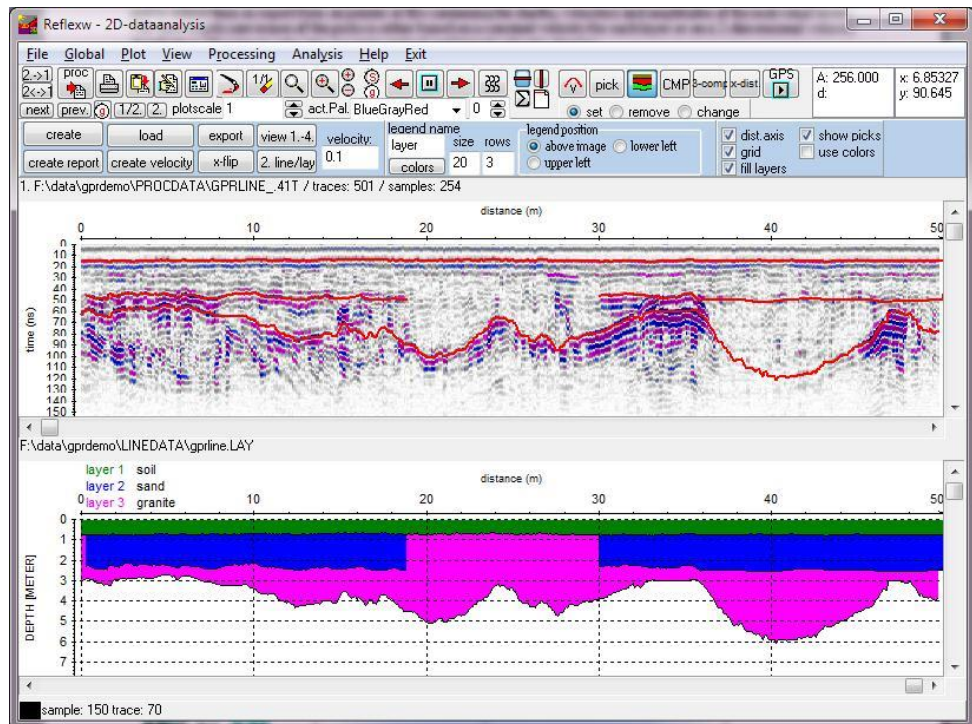
### 9.1 K2 Fast Wave

Software K2 FAST WAVE pro sběr dat je navržen pro práci s IDS DAD FastWave řídicími jednotkami. K2 FastWave je schopen podporovat až 8 antén připojených v řetězci a umožňuje zobrazení dvou radargramů na obrazovce současně v reálném čase. Poskytuje nástroje pro přizpůsobení parametrů při sběru dat, nastavení antén a kalibraci jednotlivých kanálů. Umožňuje také předběžné stanovení rychlosti šíření signálu. Tento systém může být připojen k GPS a dalším externím zařízením jako digitální kamera apod. [61]

Způsob práce s tímto softwarem při laboratorních měřeních a měřeních in-situ je popsán v kapitole zabývající se sběrem dat a nastavením systému GPR.

### 9.2 ReflexW

Program ReflexW (pracovní rozhraní tohoto programu je znázorněno na obrázku 31) je program, který umožňuje uživateli zpracování a interpretaci dat v prostředí, které lze díky modulárnímu uspořádání nastavit dle specifických potřeb. Umožňuje import a integraci všech běžných datových formátů. Modul 2D analýza dat umožňuje zpracování 2D dat zejména georadaru, seismických metod, ultrazvukových metod a průzkumných vrtů. Nabízí mnoho možností zpracování dat (filtrování, zisk, odstranění složených a vícenásobných odrazů, statické korekce, migrace atd.). Dále obsahuje například možnost zpracování metody CMP, NMO analýzy a dalších. [110]



**Obrázek 31** Pracovní rozhraní programu ReflexW [110]

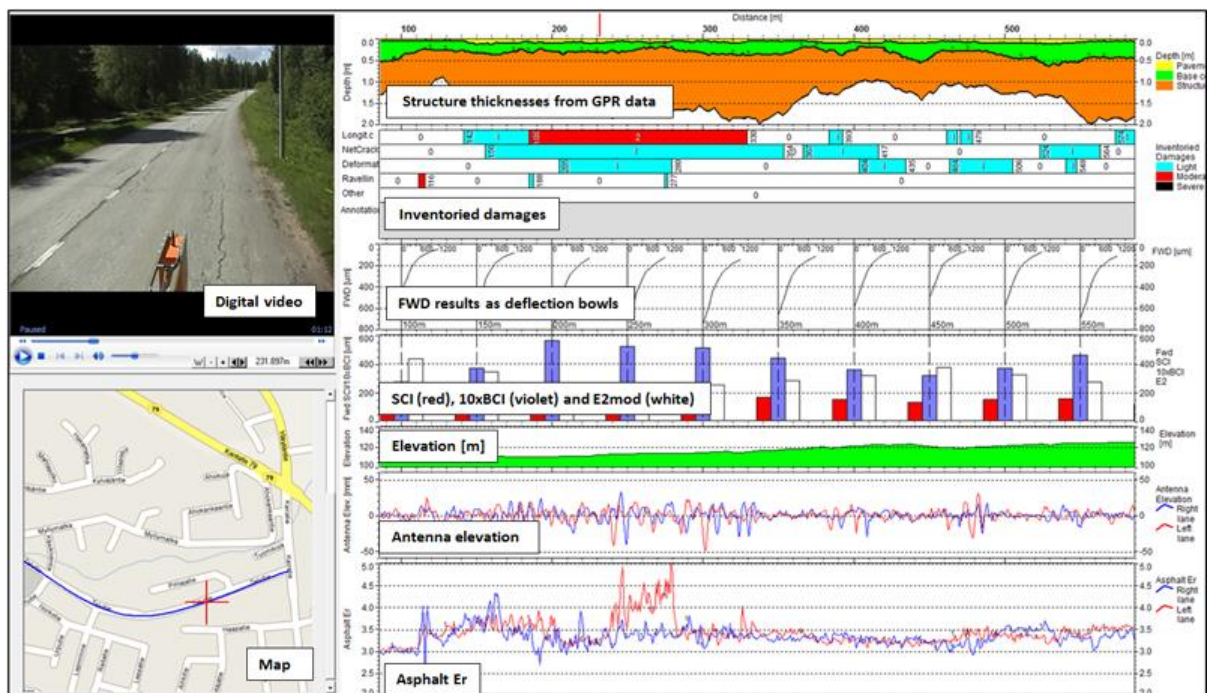
Modul interpretace 3D dat umožňuje interpretaci pomocí zobrazení profilů v ose  $x$ ,  $y$  nebo  $z$  a to  $z$  dat georadaru nebo seismických metod. Nabízí také možnost složení těchto řezů do trojrozměrné krychle, výběr odrazů v tomto 3D prostředí a také vytvoření video souborů pro spojitě zobrazení posunu ve 3D. Modul určený pro modelování (inverzní tomografii) umožňuje inverzi seismických dat prvotního odrazu, tomografickou inverzi dat časové oblasti a 2D simulaci průchodu vlny metodou konečných diferencí. [110]

### 9.3 Road Doctor

Program Road Doctor (pracovní rozhraní tohoto programu je znázorněno na obrázku 32) je zaměřen na využití GPR převážně v oblasti diagnostiky vozovek pozemních komunikací a kombinuje výsledky měření georadarem s daty dalších zařízení jako je FWD, laserové skenování nebo měření podélných a příčných nerovností a měření drsnosti povrchu. Rozhraní programu spojuje všechny získané informace do jednoho projektu. Data mohou být nahrána do softwaru a zobrazena integrovaným způsobem tak, aby různé typy datových souborů byly synchronizovány.

Program také umožňuje on-screen zpracování údajů bez předběžného zpracování souborů a obsahuje účinné nástroje pro velké datové soubory. Interpretace dat je spojena s referenčními údaji, jako je videozáznam, mapa a další informace. Program umožňuje plánování údržby a oprav a také dimenzování stávajících komunikací včetně odhadu potřebného množství materiálu a předběžných nákladů. Umožňuje import většiny GPR formátů a výstupní formáty jsou vhodné pro použití v jiných softwarech, jako jsou například CAD programy. [111]

Software zahrnuje běžné kroky *preprocessingu* dat pro *air-coupled* i *ground-coupled* antény jako změna měřitek, nastavení rozsahu měření, odstranění šumu, topografické korekce a další. V *postprocessingu* pak nabízí širokou škálu kroků, jako je například korekce zisku, odstranění šumu, horizontální a vertikální filtry, korelační filtry, Hilbertova transformace, Kirchoffova migrace a další aritmetické operace. K programu Road Doctor jsou také nabízeny speciální moduly jako 3D GPR Module, Bridge Module, Track Geometry Module a doplňky jako Railway Data Management System nebo Road Doctor CamLink. [111]



Obrázek 32 Pracovní rozhraní programu Road Doctor [111]

## 10 Posouzení možností GPR v oblasti diagnostiky PK.

V této kapitole je zpracováno posouzení možností využití GPR v oblasti diagnostiky PK obecně, včetně posouzení možností využití konkrétní sestavy, jež byla použita v této práci. Doporučení jsou pak formulována pro koncového uživatele GPR.

Obecně u každého GPR systému udávají výrobci účel, pro který je sestava určena, centrální frekvenci a dosah. Aplikace, pro kterou je sestava určena, závisí především na typu a konstrukci antény a na charakteristikách schématu vyzařování. Při výběru GPR systému a použitých antén by měli být brány v potaz především tyto hlediska:

- Požadovaný druh výstupu (A-sken, B-sken nebo C-sken), (lokální nebo plošné měření), (samostatné antény nebo anténní pole)
- Požadované vertikální a horizontální rozlišení (požadavek na detekci a rozlišení nejmenších zájmových objektů, detekce velmi tenkých vrstev)
- Dosah (tloušťka konstrukce, mocnosti vrstev, hloubka detekovaných objektů)
- Rychlost sběru dat (použití *air-coupled* nebo *ground-coupled* antén), (volba platformy pro GPR systém)
- Okolní rušení (projíždějící motorová vozidla, elektrická vedení, inženýrské sítě, indukční smyčky)
- Prostředí a podmínky (geologické a geotechnické podmínky, povětrnostní podmínky, vodní režim podloží)

Měření by obecně neměla být prováděna na mokřích vozovkách po dešti a samozřejmě ne za deště. Zvláště ne v období zimní údržby nebo po něm (přítomnost solí). Pokud to je možné, měření by mělo proběhnout za vyloučení provozu nebo alespoň v časech nižších intenzit dopravy. Z hlediska atmosférických podmínek je pak vhodné měřit v době, kdy nedochází k velkému kolísání teplot a kdy velmi vysoké nebo naopak velmi nízké teploty mohou mít významnější vliv na vlastnosti a chování diagnostikovaného materiálu.

Rovněž způsob kalibrace rychlosti signálu GPR na PK je důležitý. Ideální je samozřejmě kombinace několika metod s ověřením hodnot v literatuře. Některé metody jsou ale poměrně časově náročné, proto se v praxi na PK používá kalibrace především pomocí jádrových vývrtů. U nich je důležitá volba umístění. Ideálně by měly být jádrové vývrtů

provedeny přímo na měřícím profilu po ukončení GPR měření a to v místech kde jsou na radargramu jasně viditelné spojité linie reprezentující rozhraní jednotlivých vrstev. Počet vývrtů je pak vhodné určit podle variability konstrukce, rušení a kolísání tloušťky jednotlivých vrstev.

Velký rozdíl ve využití je v případě jednotlivých antén a anténních polí. Zatímco v prvním případě lze snadno získat měřený profil, sestavení C-skenu je poměrně obtížné a časově náročné. Naproti tomu v případě anténních polí je vytvoření 3D výstupu a časových řezů mnohdy zautomatizované. Toto lze s výhodou využít například pro detekci trhlin ve vozovkách, detekci výztužných prvků nebo mapování vlhkosti například na mostovkách mostů PK.

Důležitým parametrem je také, jestli je anténa bistatická nebo monostatická a samozřejmě kolik antén o jakých frekvencích je k dispozici. Toto ovlivňuje například možnosti použití méně obvyklých technik sběru dat nebo metod stanovení relativních permitivit/rychlostí GPR signálu jako jsou CMP nebo WARR.

Vliv na měření má také umístění antén a měřící platforma. S měřícím vozíkem rychlost měření odpovídá rychlosti chodce, zatímco při umístění antén na motorovém vozidle lze data zaznamenávat v rychlostech i kolem 100km/hod. Výhodou měření při nižších rychlostech vozidla je ale (vzhledem k toku dat) možnost zaznamenat data s vyšším rozlišením, což ale není vždy možné z důvodu narušování plynulosti dopravy. Takzvané *ground-coupled* systémy jsou určeny pro přímý kontakt s povrchem nebo ve výšce v jednotkách centimetrů. Nelze je tedy zcela využít jako *air-coupled* systémy, kde se předpokládá vzdálenost od povrchu v desítkách centimetrů a které je tedy možno připevnit na měřící vůz, který se pohybuje několik desítek km/h.

Naměřené hodnoty amplitud a odvozené hodnoty relativní permitivity se liší nejen mezi jednotlivými výrobci, ale i jednotlivě mezi anténami stejného typu a výrobce. Různé radarové systémy, byť pracují se stejnou centrální frekvencí a jsou od stejného výrobce, nelze využít pro stejné aplikace a očekávat stejné výsledky. Důležité je tedy se nejen řídit pokyny výrobce a určením antény, ale také provést vlastní testy a v případě použití více antén nebo systémů, provést také komparační měření, jež stanoví vztah mezi výstupy (hodnoty relativních permitivit, velikosti amplitud odrazů). U systémů výrobce IDS je například známo, že v porovnání s dalším významným výrobcem společností GSSI, vykazují za stejných

podmínek obecně silnější odrazy. U systémů GSSI pak například získané hodnoty relativní permitivity rostou s centrální frekvencí použitých antén.

Důležitými vlastnostmi jsou také dosah a rozlišení systému. Ty jsou ovlivněny nejen parametry zařízení, ale také vlastnostmi prostředí a okolními vlivy – nelze je tedy brát jako absolutní a neměnné. Samozřejmě vliv na výsledky má také způsob provedení kalibrace antén na diagnostikované médium, umístění antén a nastavení parametrů sběru dat. Obecně se při běžných aplikacích v diagnostice pozemních komunikací nastavuje inkrement od 1 do 10 stop na metr. Počet vzorků na stopu je pak pro běžné aplikace nejčastěji nastavován na hodnotu 512 (omezeno tokem dat a kapacitou datového úložiště). Dosah je pak nastavován podle frekvence použitých antén a předpokládané hloubky cíle. Pro antény s vyššími centrálními frekvencemi jsou běžně používány dosahy v intervalu od 10ns do 20ns. U nižších frekvencí pak pro aplikace v diagnostice PK dosah roste až k 90ns. Pokud je známa hloubka cíle, nastavuje se dosah GPR systému asi na její 1,3násobek. Při nastavování dosahu je nejen důležité velikost, ale také vlastní umístění časového okna. V případě *air-coupled* antén by měl být totiž také zaznamenán tzv. *direct coupling*, protože právě tento puls bývá u některých systémů využíván jako referenční.

Sestava GPR použitá v této práci určena výrobcem pro diagnostiku vozovek PK. Vzhledem k jejím parametrům může být využita hlavně k určení konstrukčních vrstev vozovek a detekci nehomogenit jako jsou propustky a různé inženýrské sítě. Při použití pouze *air-coupled* antény je možné využít měřicí vozidlo za běžného provozu ovšem za předpokladu omezeného dosahu (přibližně 0,5m). V případě jiných aplikací klesá efektivita využití této sestavy a spolehlivost získaných dat. Na některé aplikace pak nelze využít vůbec. Protože se nejedná o anténní pole hlavním výstupem je tzv. měřicí profil (B-sken) a použití například pro detekci trhlin není efektivní. Jelikož byly dostupné pouze 2 monostatické antény o rozdílných frekvencích, nebylo také možné efektivně použít metody, u kterých dochází ke změnám vzájemné pozice vysílače a přijímače (CMP, WARR, ...), tedy metody stanovení relativní permitivity/rychlosti GPR signálu. Při měření na PK byla tedy používána metoda kalibrace pomocí jádrových vrtů nebo pomocí metody reflexního koeficientu. Počet stop na metr, počet vzorků na stopu a dosah byl pak při měření in-situ nastavován dle účelu měření přibližně v rozmezí výše uvedených hodnot. Při laboratorním měření se pak používal většinou časový sběr dat s 1024 vzorky na stopu. Dosah byl v laboratoři nastaven v závislosti na rozměrech vzorků materiálů a případně jejich umístění v IBC.

## 10.1 Testování parametrů GPR systémů

Každá anténa má jedinečné parametry a charakteristiky a výkon antén se v průběhu času mění. Před zahájením měření s nevyzkoušeným GPR systémem je tedy vhodné nejdříve otestovat jeho stabilitu a výkon při sběru dat. Získá se tak představa o datech, jež lze očekávat při vlastním měření. To vede k eliminaci některých chyb a zkreslení při jejich interpretaci. Lze provést následující testy: [3], [10]

- *NOISE TO SIGNAL RATIO TEST*
- *SIGNAL STABILITY TEST (SST)*
- *LONG TERM SIGNAL STABILITY TEST (LTSST)*
- *VARIATIONS IN TIME CALIBRATION FACTOR TEST*  
(Linearity in the Time Axis and Time Window Accuracy)
- *END REFLECTION TEST*
- *SYMMETRY OF METAL PLATE REFLECTION TEST*

*Noise to Signal Ratio Test* je dle ASTM dán poměrem úrovně hluku/rušení a úrovně signálu získaného odrazem od zamýšleného cíle. *Signal Stability Test* je dán vzorcem 17 [3].

$$SST = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\text{avg}}} \quad (17)$$

Kde:

$A_{\max}$  ... maximální hodnota amplitudy [mV]

$A_{\min}$  ... hodnota minimální amplitudy [mV]

$A_{\text{avg}}$  ... hodnota průměrné amplitudy ve zvoleném časovém intervalu [mV]

*Long Term Signal Stability Test* je pak dle ASTM získán sběrem dat po dobu dvou hodin, kdy je zaznamenána stopa každé 2 minuty a je vyjádřen vzorcem 18 [3].

$$LTSST = \frac{A_{max} - A_{20}}{A_{20}} \quad (18)$$

Kde:

$A_{20}$  ... hodnota amplitudy po 20 minutách od začátku testu [mV]

$A_{max}$  ... maximální hodnota amplitudy [mV]

Pokud je test spuštěn co nejdříve po zapnutí GPR systému, může být ukazatelem doby ustálení signálu po tzv. „zahřátí systému“. Tato doba je dle ASTM doporučena 15 až 20 minut při provedení minimálně 100 skenů.

*Variations in Time Calibration Factor Test (Linearity Test)* určuje změny v rychlosti signálu udávané aparaturou pro *air-coupled* antény při jejich umístění v různých výškách nad povrchem.

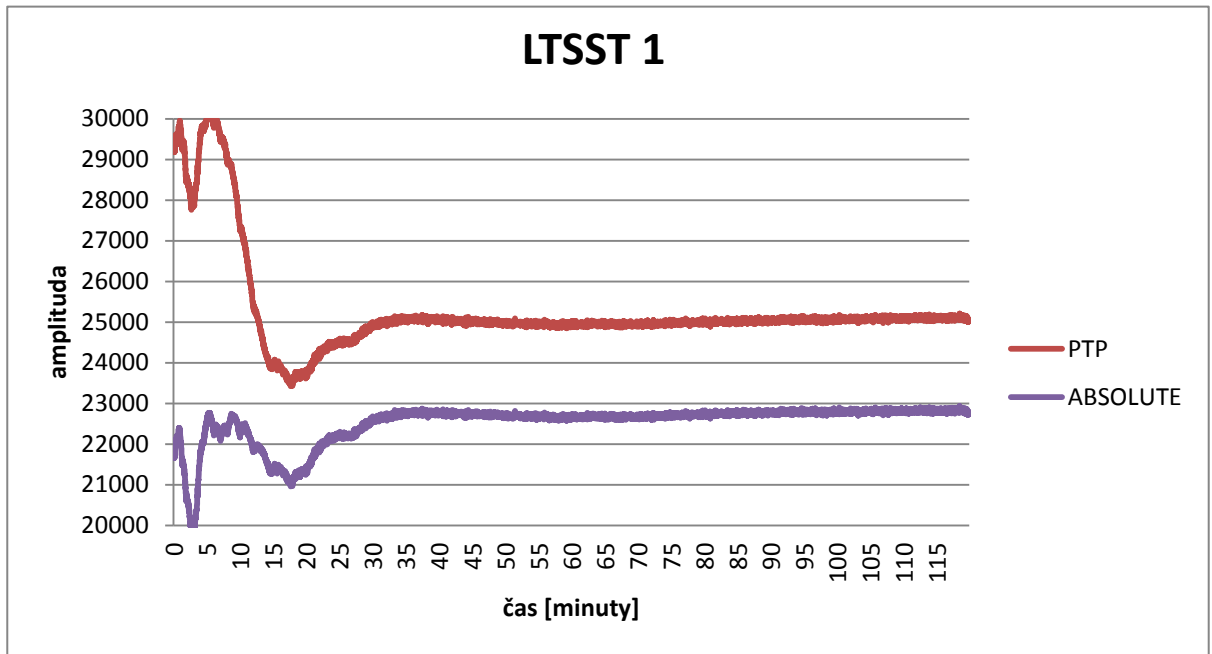
*End Reflection Test* porovnává hodnotu amplitudy koncového odrazu a odrazu na úplném odražeči (plech).

*Symmetry of Metal Plate Reflection Test* udává čas mezi maximální negativní hodnotou odrazu od povrchu k nulové hodnotě amplitudy.

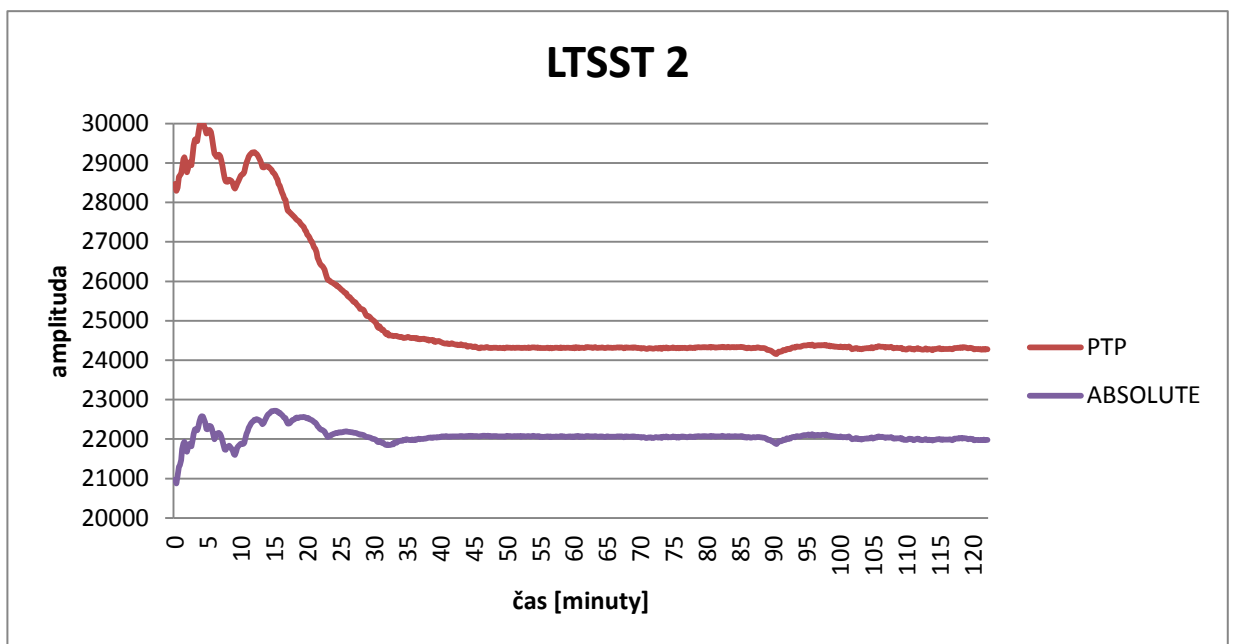
## 10.2 Testování dostupného GPR systému

Níže popsané testy byly provedeny mimo jiné pro potřeby tvorby pracovních návodů v rámci akce TU 1208 *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar* programu Cooperation in Science and Technology (COST) v rámci rámcového programu EU Horizon 2020. Před prováděním ostatních testů bylo nejprve nutné zjistit dobu tzv. *warm-up period*, pro ustálení signálů aparatury. Obecně doporučovaná doba 15-20 minut pro ustálení signálu po zapnutí aparatury se ukázala v případě dostupné aparatury jako nedostačující. Na základě série předběžných testů byla zvolena minimální doba 40 minut od zapnutí systému. Data naměřená během těchto testů byla následně použita pro výpočet hodnot jak SST tak LTSST. Při všech testech byl použit jako úplný odražeč ocelový plech.

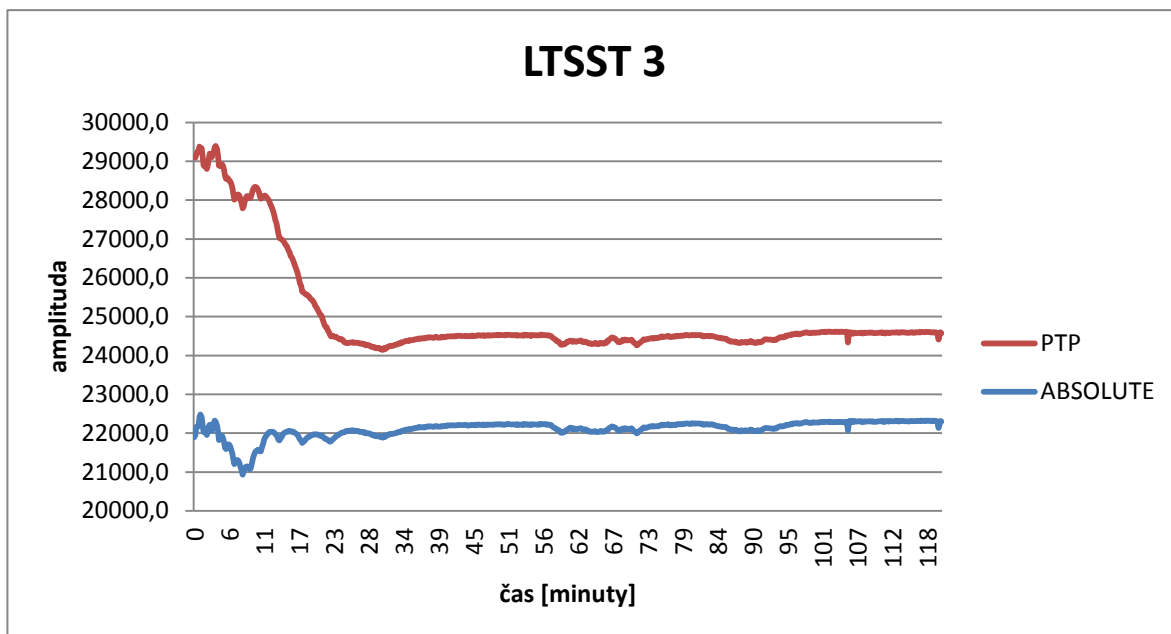
Křivky na následujících grafech (obrázek 33 až 36) znázorňují absolutní hodnotu amplitudy (ABSOLUTE) a rozdíly hodnot pozitivních a negativních amplitud (*peek to peek* - PTP) pro odrazy od ocelového plechu při závěrečných testech stability.



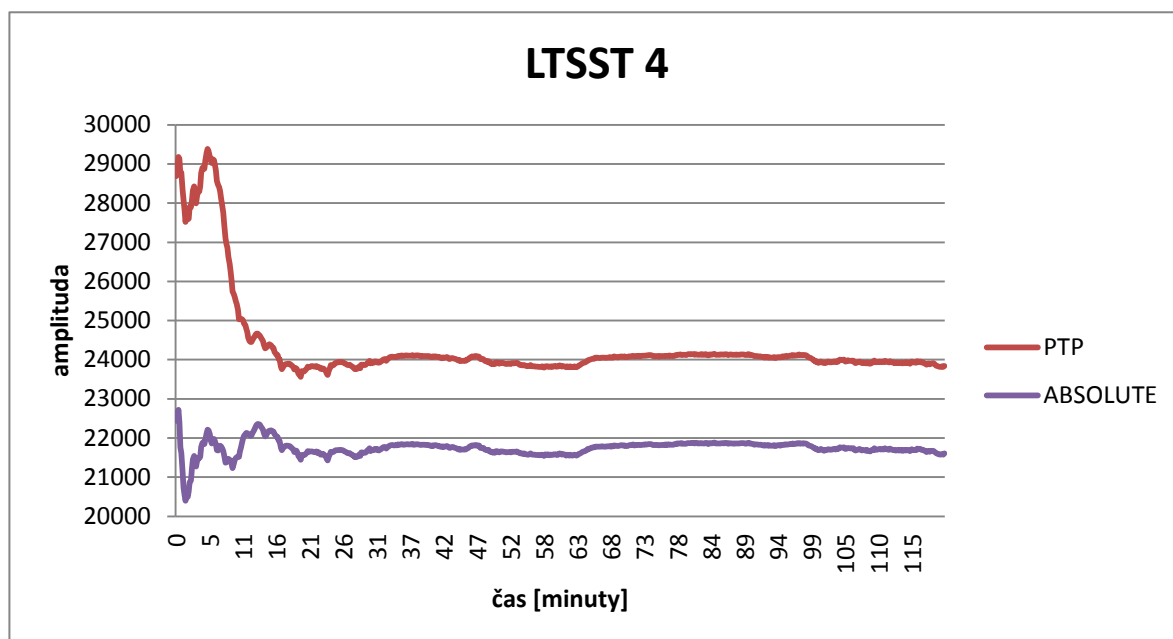
Obrázek 33 Graf průběhu LTSST 1



Obrázek 34 Graf průběhu LTSST 2



Obrázek 35 Graf průběhu LTSST 3



Obrázek 36 Graf průběhu LTSST 4

Při testech dlouhodobé stability se postupovalo jak dle standardu ASTM (popsáno výše), tak podle doporučení COST TU1208. Testy byly spuštěny od 2 do 3 minut po zapnutí centrální jednotky (nutnost spuštění a nastavení SW) v režimu časového záznamu. V průběhu dlouhodobých testů byla zaznamenána data také pro testy krátkodobé.

Délka dlouhodobých testů byla stanovena dle doporučení na 120 minut. Krátkodobé testy byly pak spočítány z intervalů o délce 2 a 20 minut. Pro standard ASTM byly vybrány hodnoty 20. a 40. minuty, pro COST pouze 40. minuty. Výsledky testů dlouhodobé stability uvádí tabulka 4 a výsledky testů krátkodobé stability (interval 20 minut) tabulka 5.

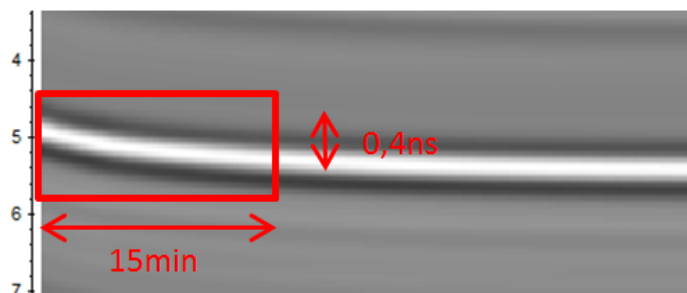
**Tabulka 4** Výsledky testů dlouhodobé stability

	<i>warm-up period</i>	LTSST1	LTSST1	LTSST3	LTSST4
ASTM	20min ABSOLUTE (40min) ABSOLUTE	6% (1%)	1% (3%)	2% (1%)	5% (4%)
	20min PTP (40min) PTP	27% (21%)	11% (23%)	17% (20%)	24% (22%)
COST	40min ABSOLUTE	0,7%	0,25%	0,66%	0,32%
	40min PTP	0,5%	0,00%	0,60%	0,27%

**Tabulka 5** Výsledky testů stability signálu

	SST2	SST4	SST5	SST6
ABSOLUTE	0,9%	0,5%	1,2%	0,9%
PTP	0,9%	0,4%	1,2%	0,8%

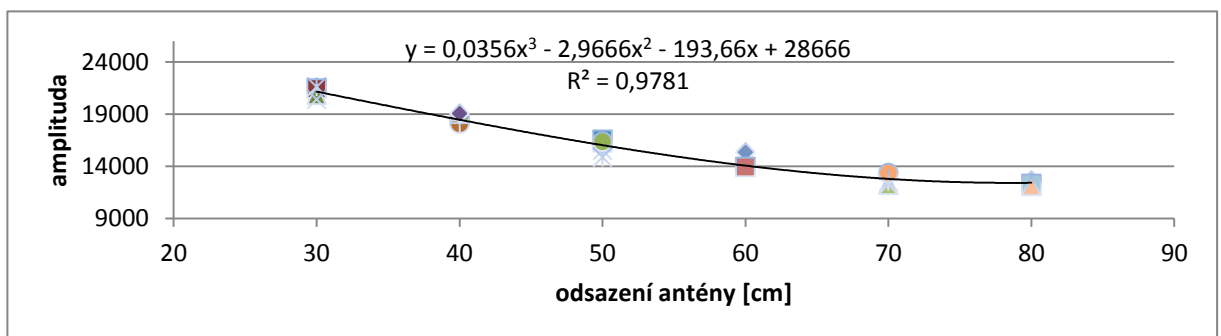
Při provádění testů dlouhodobé stability se také ukázala proměnlivost určení polohy povrchového rozhraní v přibližně prvních 15 minutách od spuštění systému. Tuto nestabilitu lze nicméně kompenzovat ve fázi zpracování dat (*postprocessing*) využitím funkce *Static Correction*. Uvedená nestabilita je znázorněna a zvýrazněna na obrázku 37.



**Obrázek 37** Radargram s vyznačením změn v určení polohy povrchového rozhraní

Provedeny byly také testy linearity. Dle standardu ASTM byly nastaveny hodnoty vzdálenosti mezi anténou a ocelovým plechem na 34, 68 a 113cm (15, 30 a 50 % použitého časového rozsahu). Výsledky se pohybovaly v rozsahu od 10,5 % do 12,5 %.

Pro potřeby dalšího měření (určování útlumu materiálů) byly provedeny také obdobné testy jak na ocelovém plechu, tak na vzorcích různých stavebních materiálů. Odstupy byly voleny v intervalu od 20 až 120cm s krokem měření 10cm. Pro určení trendu byl nicméně použit pouze interval 30 až 80cm, což odpovídá rozsahu od hodnoty doporučené vzdálenosti antény od povrchu až do hodnoty vzdálenosti antény do rozhraní v hloubce 50cm. Tato mez byla stanovena v závislosti na dosahu používané antény a předpokládaných tloušťkách konstrukcí PK. Výsledky testů prováděných na stavebních materiálech jsou blíže popsány v kapitole věnující se modifikaci metody RCM. Na ocelovém plechu bylo provedeno celkem 5 testů. Na obrázku 38 je stanovena spojnice trendu těchto testů na ocelovém plechu pro interval 30 až 80cm.



**Obrázek 38** Výsledky testů linearity 1 až 5 na ocelovém plechu se stanovením trendu

## 11 Použité postupy měření, zpracování a interpretace dat

V této kapitole jsou uvedeny postupy, které byly v této práci použity při měření s cílem stanovit tloušťku konstrukčních vrstev PK, tedy hlavního určení použité sestavy a nejčastějšího využití GPR v diagnostice PK vůbec. Nastavení a kalibrace sestavy, stejně jako zpracování a interpretace dat byly samozřejmě vždy přizpůsobeny konkrétním podmínkám a cílům. Z textu je nicméně možné vytvořit si obecnou přibližnou představu o způsobu měření a zpracování GPR dat při běžném měření na PK.

### 11.1 Počáteční nastavení měřicí sestavy

Po sestavení systému a jeho případném upevnění na měřicí platformu (vozik, osobní automobil) následovalo jeho nastavení a kalibrace ve výše popsaném softwaru K2 Fast Wave společnosti IDS.

V případech kdy byl použit odometr byla také nutná kalibrace tohoto zařízení a to pro správné určení ujeté vzdálenosti, tedy hodnot staničení v měřicím profilu. Kalibrace byla uskutečněna projetím předem určené referenční přímky o přesně stanovené délce (volena byla délka 20 m, která se ukázala jako dostačující). Tuto kalibraci nebylo nutné opakovat před každým měřením.

Postup při práci s K2 Fast Wave se skládal z následujících základních kroků:

- Výběr konfigurace antén
- Nastavení parametrů sběru dat
- Kalibrace sestavy
- Výběr měření
- Vlastní sběr dat
- Zpětné prohlížení a kontrola naměřených dat

Prvním krokem po spuštění systému byl nejprve nastaven počet a druh antén (použité antény jsou podrobněji popsány v příslušné kapitole), nastavena poloha vysílačů a přijímačů vzhledem ke zvolenému relativnímu souřadnicovému systému a nastavení způsobu pohybu sestavy.

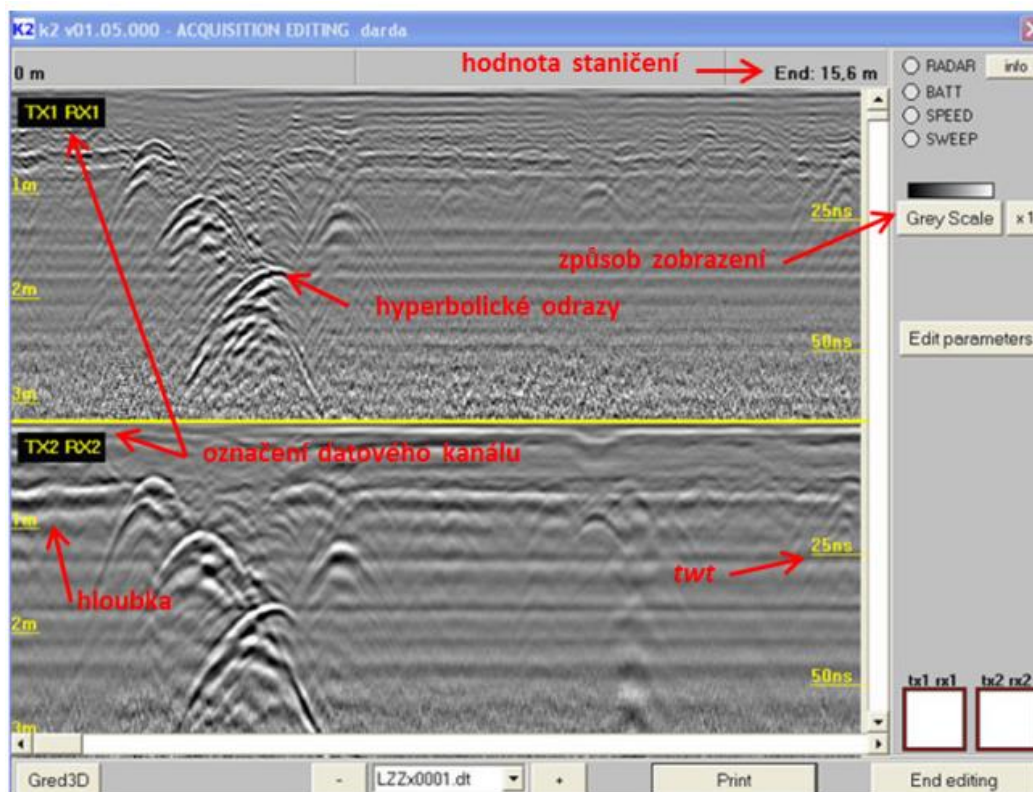
Po výběru antén byl jako první krok nastavení a kalibrace zvolen časový interval (*time window, range*) [ns] záznamu odraženého signálu pro každou jednotlivou frekvenci. Poté byla zadána předpokládaná rychlost šíření [m/ns] v diagnostikovaném médiu (způsoby určení rychlosti signálu v materiálu jsou popsány v předchozích kapitolách). Na základě těchto hodnot byla předběžně vypočtena maximální hloubka, ze které je odražený signál zaznamenáván.

Po určení časového intervalu bylo další fází nastavení počtu vzorků, které jsou nezbytné pro záznam stopy odražené vlny. Každý vzorek je digitální hodnota, která definuje část stopy. Čím více vzorků je tedy použito, tím je tvar odražené vlny přesnější. Z toho vyplývá, že pro delší časové okno je pro zachování přesnosti tvaru stopy odraženého signálu nutný větší počet vzorků. Ten byl volen vzhledem k rychlosti pohybu antén, možnostem systému a požadovanému rozlišení (nejčastěji 512, 1024). Současně bylo provedeno nastavení faktoru odometru, konkrétně násobku, kterým je určen faktor měřítka ujeté vzdálenosti. Tímto faktorem je násoben krok daný rozlišením odometru a ve výsledku určena vzdálenost jednotlivých stop záznamu (používáno od 2 do 20cm).

GPR se poté kalibroval také z hlediska tzv. počátečního odrazu, což bylo provedeno po nastavení antény a její fixaci do polohy, ve které byla po celou dobu měření. Většina GPR systémů má tento proces identifikování prvního odrazu zautomatizován. Automatická kalibrace proběhla při pohybu antény (měřící platformy) po měřeném profilu nebo v případě měření na laboratorních vzorcích po určitý časový úsek.

Dalším krokem užitým v několika měřeních bylo nastavení způsobu a hodnot zvýšení zisku signálu a to buď automaticky s přednastavenými parametry, nebo manuálně, dle požadavků operátora. Toto umožnilo systému nastavit a uložit požadované parametry umožňující zobrazení radarového záznamu v reálném čase.

Výše uvedené úpravy byly v mnoha případech společně uloženy jako šablony nastavení a při opakování měření importovány a upravovány dle potřeb. Po těchto úpravách následovalo založení nové složky měření, vložení identifikačních údajů a vlastní měření. Ukázka naměřených dat v programu K2 Fast Wave s popisem je zobrazena na obrázku 39.



Obrázek 39 Zobrazení dat v programu K2 Fast Wave [61] - autorem doplněn popis

Po úspěšném sběru dat a jejich kontrole následovalo kancelářské zpracování dat (utřídění, záloha, ...) a jejich import do příslušného softwaru pro zpracování a interpretaci GPR dat (ReflexW nebo Road Doctor).

## 11.2 Zpracování naměřených dat

Data zaznamenaná pomocí GPR obsahují vždy v menší nebo větší míře tzv. šum nebo ozvěny či interference (v anglickém jazyce označováno jako: *noise*, *reverberations*, *interference*, *multiples*, *clutter*, *spikes*, *snow*). Data jsou také zaznamenávána s nepřesným určením rychlosti šíření signálu a v měřících profilech také například s nepřesnými hodnotami staničení. Záznam musí být tedy před interpretací dat pro znázornění podstatných jevů nejdříve upraven a uvedené nežádoucí vlivy a jevy minimalizovány. Tyto činnosti jsou nazývány *postprocessing*. K těmto činnostem a následné interpretaci dat byl ve většině případů použit výše popsaný software ReflexW a u některých měření bylo provedeno také porovnání s využitím softwaru Road Doctor.

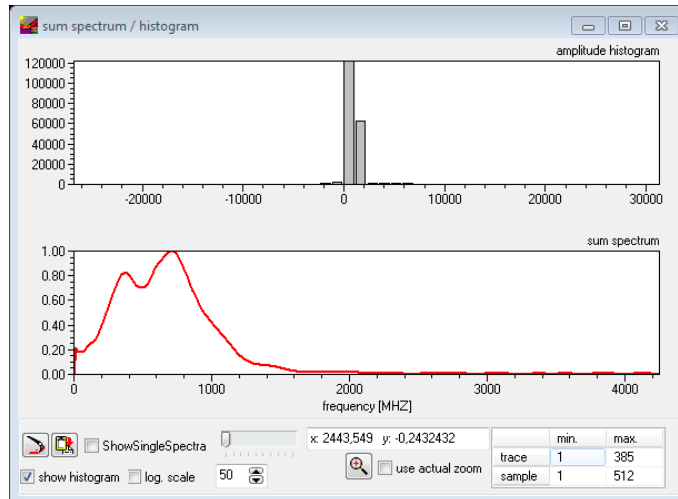
Šum, nebo interference v GPR záznamu mohou být způsobeny nejen vlivem samotného GPR systému a jeho komponent (nižší frekvence), ale také například rušením

z mobilních telefonů, radiových vysílačů, bezdrátového internetu (vyšší frekvence) a dalších elektronických zařízení, která pracují na frekvencích v pásmu používaných GPR sestavami [25]. Množství těchto zdrojů rušení způsobuje značnou složitost zpracování dat a v některých případech interpretaci zcela znemožňuje. V anglicky psané literatuře věnující se GPR se většinou rozděluje rušení na *noise* a *clutter* [2]. *Noise* je způsoben především interferencemi GPR s dalšími zdroji EM polí (rádio, mobilní telefony atd.) které ovlivňují aparaturu během sběru dat. *Clutter* na druhou stranu představuje nežádoucí odrazy a interference GPR signálu a to buď inherentní (spojené s GPR systémem), nebo vnější (nezávislé), které jsou způsobeny dorazy a lomy signálu v měřeném prostředí. Ne všichni autoři nicméně tuto terminologii rozlišují, což často způsobuje nedorozumění a případně i nevhodně zvolené filtrování dat.

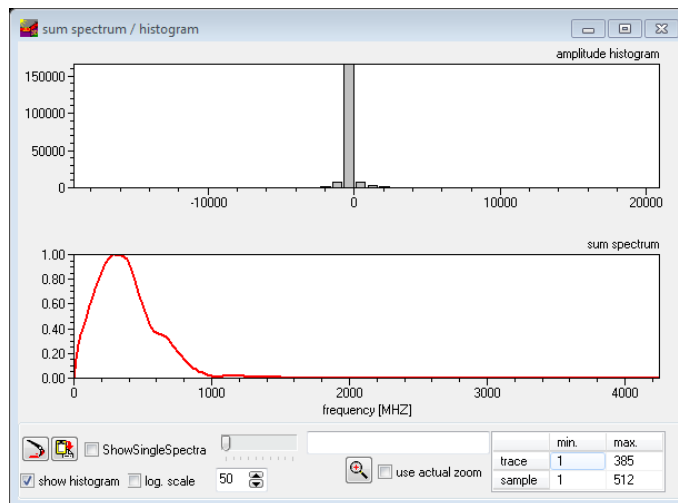
Filtry mohou být obecně rozděleny na časové (aplikuje se jednotlivé stopy v čase) a prostorové (uplatnění v řadě stop ve zvoleném intervalu staničení). Tyto jsou často kombinovány do pokročilých dvourozměrných filtrů. Do časových filtrů lze zařadit: *Simple mean*, *Simple median*, *Low-pass* nebo *High-pass*, *Band-pass* filtry a do prostorových potom například: *Simple running average*, *Average subtraction*, *Background removal* filtry.

Pro odstranění vysoko nebo nízkofrekvenčního šumu používají filtry *Infinite Impulse Response* (IIR) nebo *Finite Impulse Response* (FIR), které se liší hlavně použitými algoritmy interpolace a průměrování. Tzv. *High-pass* filtry (např. *dewow* filtr) odstraňují nízkofrekvenční obsah (umožňují projítí vyšších frekvencí), který je často způsoben systémovým šumem a tzv. *Low-pass* filtry naopak odstraňují vysokofrekvenční obsah, způsobený většinou externím rušením [112]. Tento vysokofrekvenční šum je viditelný například jako „blikání“ záznamu i když se anténa během měření nepohybuje. Filtry, jež využívají obou předchozích, se nazývají *Band-pass filters*, což lze vyložit jako filtry propouštějící pouze určité frekvenční pásmo.

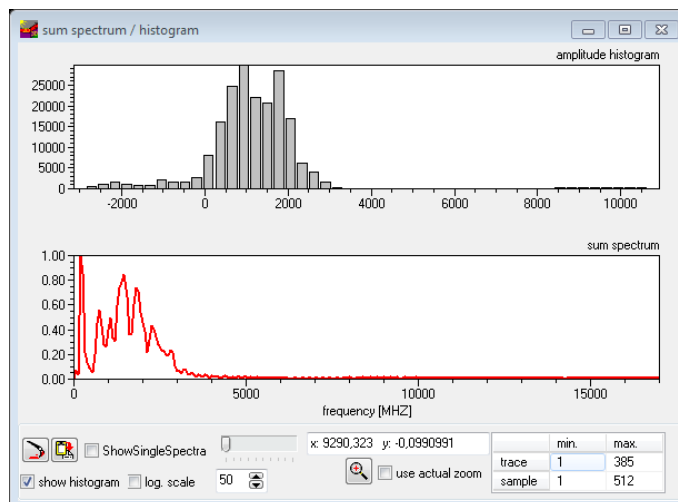
Pro ilustraci jsou níže uvedeny nefiltrovaná frekvenční spektra a histogramy zobrazené v programu Reflex W při měření na netuhých vozovkách PK. Zobrazení těchto spekter bylo vodítkem pro nastavení výše uvedených frekvenčních filtrů. Obrázek 40 zobrazuje frekvenční spektrum pro centrální frekvenci 400MHz a obrázek 41 pro frekvenci 900MHz použité *ground-coupled* antény. Obrázek 42 zobrazuje frekvenční spektrum pro centrální frekvenci 2000MHz použité *air-coupled* antény.



Obrázek 40 Zobrazení frekvenčního spektra a histogramu pro frekvenci 900MHz



Obrázek 41 Zobrazení frekvenčního spektra a histogramu pro frekvenci 400MHz



Obrázek 42 Zobrazení frekvenčního spektra a histogramu pro frekvenci 2000MHz

## Použité algoritmy

Jednotlivé kroky zpracování dat, které byly použity s různým nastavením během většiny měření (tloušťky konstrukčních vrstev), jsou uvedeny v dalších odstavcích. Některé kroky byly použity opakovaně, některé naopak při určitých měřeních vynechány. Uvedené pořadí jednotlivých kroků odpovídá standardnímu zpracování dat, ale ne vždy bylo dodrženo. Zde je třeba upozornit, že neexistuje jediný správný postup aplikace kroků *postprocessingu* a že nastavení jednotlivých algoritmů, výběr filtrů a další úpravy zpracování probíhaly u každé datové sady opakovaně, často v různém pořadí v několika krocích „ladění“ s cílem dosáhnout co nejsrozumitelnějšího a nejvíce názorného výstupu. Všechny takovéto úpravy prováděné po vlastním sběru dat by měly být aplikovány s detailní znalostí jejich principu a vzájemného vlivu tak, aby ve výsledku nebyla data příliš zkreslena a příliš vzdálena původnímu měření, což je riziko hlavně při zpracování dat, kde se objevuje silné rušení srovnatelné se zaznamenanými podstatnými odrazy hledaných jevů.

Jako jeden z prvních kroků po importu dat byla provedena úprava horizontálního i vertikálního měřítka, nastavení vertikálního rozsahu a další úpravy související s upřesněním rychlosti šíření signálu měřeným prostředím a zpřesněním staničení významných odrazů. Byly nastaveny možnosti zobrazení, formátu a ukládání dat. Bylo také provedeno roztřídění naměřených dat, rozdělení měřících profilů a vybrány sekce určené ke zpracování. Některé profily byly naopak spojeny nebo byl změněn směr jejich staničení pro lepší vzájemné srovnání. V tomto kroku je také nutné upozornit na nastavení barevné stupnice hodnot amplitud. V použitém programu ReflexW byla maximální kladné hodnotě implicitně přiřazena barva bílá a v programu Road Doctor barva černá. Toto může vést například k nepřesné identifikaci polohy jednotlivých rozhraní nebo chybnému stanovení relativních permitivit lokálních jevů.

Pro potvrzení správné identifikace odrazu od povrchu komunikace byla často používána funkce *Envelope*. (Hilbertova transformace). Tento krok nebyl nicméně zahrnut do výsledného zpracování, protože zde docházelo k nežádoucímu zkreslení hodnot amplitud. Povrchový odraz byl také kontrolován záměrným vertikálním pohybem antén na začátku měřených profilů.

Dalším krokem bylo odstranění inherentního nelineárního šumu o nízké frekvenci (*wow noise*), který je vztažen k charakteristikám použité antény a to pomocí 1D tzv. *Dewow*

filtru, kde se interval filtru nastavuje v závislosti na frekvenci použité antény. Tímto filtrováním byly použitím klouzavého průměru odstraněny nízkofrekvenční složky signálu každé stopy, které jsou zapříčiněny EM indukcí v aparatuře („vnitřním šumem systému“). Použitá hodnota nastavení tohoto filtru je omezena dobou periody signálu použité frekvence a je tedy nastavena na čas  $1/f$  [Hz] v jednotkách nanosekundy. Pro použitou frekvenci 2GHz byla nastavena hodnota maximálně 0,5ns, pro 900MHz maximálně 1,1ns a pro 400MHz maximálně 2,5ns.

Při měření v terénu je nutné brát v úvahu topografické variace povrchu. Ty mohou být korigovány posouváním stopy na vertikální ose záznamu pomocí vhodného *twt* vzhledem ke společné počáteční hodnotě a to na základě znalosti rychlosti signálu a hloubky odrazů [25]. Aby bylo možné tyto korekce provést, musí být dostatečně charakterizována topografie profilu. To se uskutečňuje obvykle buď pomocí totální stanice, laserových snímačů nebo GNSS. Obecně lze použít dva typy topografických korekcí a to: *elevation static* (v podstatě konstantní korekce rychlosti) a *maximum phase corrections* (korekce fáze maximální amplitudy v tzv. *near-field zone*). Z důvodu určení počátečního odrazu, jeho variací a pro přesnější stanovení tloušťek diagnostikovaných konstrukcí a vzorků bylo v několika případech provedeno zaměřování měřících profilů buď totální stanicí, GPS, ultrazvukovými snímači, planografem nebo kombinací některých uvedených metod. Pro kompenzaci vertikálního pohybu antény během jízdy vozidla vyššími rychlostmi byla použita funkce **Correct max phase** (*Bouncing removal operation*), což umožnilo znázornit povrch jako horizontální linii. Pro posun této linie do nulového *twt* (pro pozdější usnadnění interpretace) byla použita funkce **Move starttime** (*zero timing*). Jedná se o statickou korekci (posun) prvního odrazu od povrchu měřeného materiálu nebo konstrukce na počátek (nulovou hodnotu) časové osy záznamu GPR dat (odraz od povrchu je umístěn do nulové hloubky). Tato nulová hodnota se může během měření na měřícím profilu měnit a to například v důsledku kolísání rozdílů teploty vzduchu a aparatury nebo v důsledku deformace nebo poškození kabelů. Uvedenou úpravou byla všechna data umístěna do správné pozice na ose znázorňující *twt* [ns] (po určení relativní permitivity prostředí do správné hloubky [m]).

Dalším používaným krokem bylo odstranění pozadí signálu (pomocí tzv. **Background removal filter**) způsobujícího šum ve formě tzv. horizontálních pruhů v záznamu měřených profilů, což je jeden z nejčastějších způsobů zpracování *dat*. Tento jev je způsoben tzv. „zvonením“ (*ringing*) některých antén, jehož příčinou může být jak „šum systému“ nebo

externí EM rušení, ale také odrazy od povrchových objektů, které mají stejnou vzdálenost od antény jako vyhodnocované odrazy z diagnostikovaného materiálu. Jedná se například o osobu tlačící měřící vozík nebo automobil, na kterém jsou antény upevněny. Pomocí tohoto typu filtru se zvýší tzv. *noise to signal ratio* a odstraní vlny (odrazy), které se objevují v záznamu dlouhodobě na rozdíl od vln vykazujících náhodný charakter. Tento filtr tedy na druhou stranu znesnadňuje nalezení rozhraní konstrukčních vrstev i detekci povrchového odrazu. Princip spočívá ve výpočtu průměrné amplitudy na stopách, která je následně odečtena.

Protože se signál z vysílače GPR šíří ve tvaru kužele a je utlumován během průchodu materiálem, dochází s narůstající hloubkou ke zmenšení amplitud odrazu. Anomálie ve větší hloubce vyvolá tedy menší amplitudu, než stejná anomálie umístěná blíže k povrchu. Existuje několik možností zesílení signálu. Může se jednat o konstantní přírůstek, přírůstek exponenciální anebo tzv. *Automatic Gain Control* (AGC). Všechny funkce zesílení nicméně používají určitý násobící faktor aplikovaný na zvolený interval stopy (interval na ose *twf*). Pro zvýraznění velmi slabých signálů je také možno použít krok zvaný Hilbertova transformace. Je nutné zdůraznit, že pokud je aplikována funkce *gain* na oblasti s velmi slabými nebo téměř žádnými odrazy, tak v takových oblastech dochází významně ke zvýšení šumu generovaného sestavou nebo vlivy okolního rušení. Ke zvýraznění utlumených jevů byla použita funkce **Gain** (*Linear and Exponential Gain*), která umožnila identifikaci a vyhodnocení i anomálií ve větších hloubkách. Tvar funkce byl při laboratorním měření volen dle zjištěných hodnot snížení amplitud odrazů totožných prvků umístěných v různých hloubkách. Pro asfaltová souvrství měřená in-situ byla použita exponenciální funkce 15dB/m.

Dále byl využíván filtr **Bandpassbutterworth** (Vertical Filtering in Time Domain) převážně pro odstranění vysokofrekvenčního šumu. Rozsah tohoto filtru je nastavován dvěma hodnotami frekvencí (*low-cut frequency, high cut frequency*). Frekvenční mez jsou stanoveny dle spektra přijatého signálu konkrétní antény a záznam GPR tedy po použití tohoto filtru obsahuje pouze signály z takto nastaveného frekvenčního intervalu.

Po odstranění šumu v některých případech následovalo odstranění vícenásobných odrazů (*multiple reflections, multiples*), které byly způsobeny opakovaným odrazem signálu mezi detekovanou anomálií a povrchem nebo mezi vrstvami materiálu a které způsobují zakrytí nebo potlačení důležitých odrazů, které jsou zaznamenávány ve stejnou dobu. Každý z opakovaných odrazů je zachycen přijímačem antény, zaznamenán a zobrazen v měřeném

profilu (B-sken). Hyperboly znázorňující tyto odrazy jsou pak zobrazeny ve stejném staničení v pravidelných vertikálních rozestupech. Takový záznam může vést k mylné interpretaci těchto anomálií jako více vrstev materiálu odlišných EM vlastností, nicméně tomu, že se jedná o vícenásobné odrazy, napovídá právě jejich pravidelný rozestup. V některých případech může také k vícenásobným odrazům vést interference antén v oblasti nazývané jako *near field zone*. Proces odstranění vícenásobných odrazů se nazývá *Deconvolution (Predictive Deconvolution)* [112], což je možné vyložit jako vyřešení/rozložení vícenásobného (složeného) odrazu na základní prvky z důvodu objasnění/predikce tvaru vyslaného radarového pulzu a jeho změn během jeho průchodu materiálem. Je to tedy proces obnovení původního tvaru odražených vln. V programu Reflex W je tento algoritmus nazýván ***Suppress multiples***.

Speciálně pro aplikaci stanovení tloušťky konstrukčních vrstev byl používán také algoritmus ***Running average (Stacking)***. Pomocí tohoto algoritmu byla potlačena energie místních nehomogenit a naopak zvýrazněna energie tzv. horizontálně koherentní.

Naopak pro zvýraznění lokálních jevů (bohužel současně s potlačením horizontálně koherentních jevů) byl využíván algoritmus ***Subtracting average***.

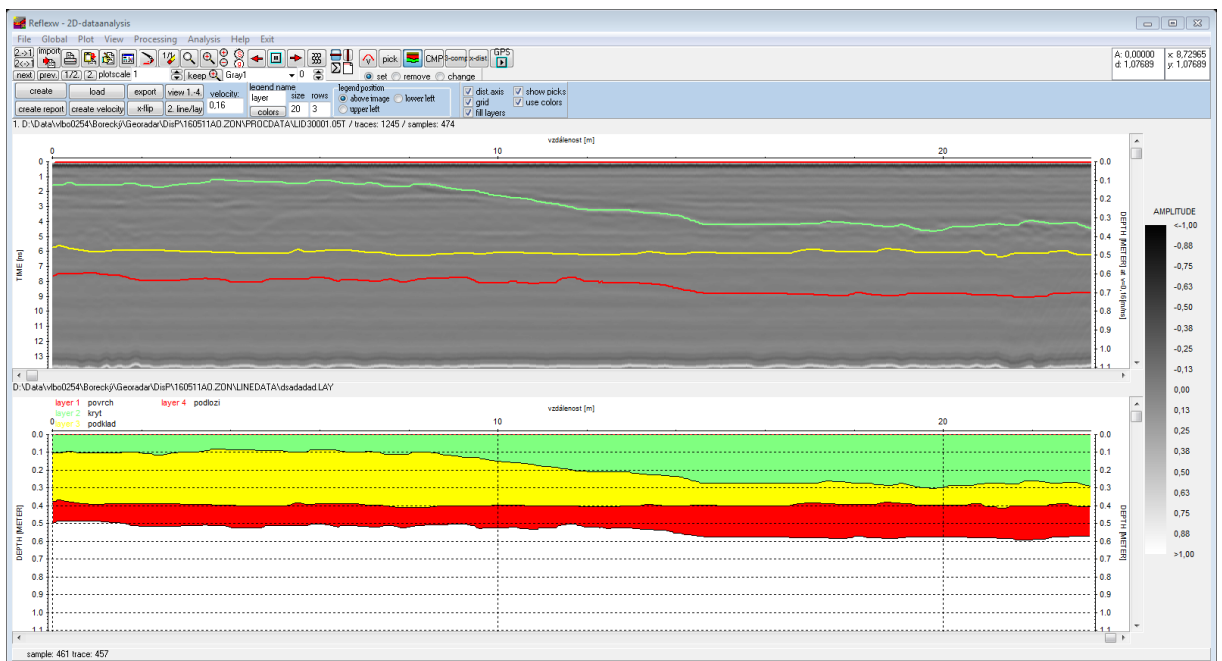
Jako jeden ze závěrečných kroků byla používána funkce **migrace**. Jde o dvojrozměrný inverzní zobrazovací proces pro korekci zkreslení (rozložení hyperbol, soustředění rozptýleného signálu a oprava polohy „zanořujících se“ signálů), která vyplývá ze skutečnosti, že radarové antény vyzařují EM energii ve tvaru komplexního kuželu [25]. Jedná se tedy o operaci, kdy je spočítána původní pozice odrazu před jeho zkreslením. Tato zkreslení byla způsobena odrazy z bodových zdrojů (které se zobrazily jako hyperboly) a lomem signálu a to v důsledku pohybu antény po měřicím profilu, změnami rychlosti anebo vlivem geometrie šíření paprsku. V zásadě existují dva typy migrace: časová a hloubková. Při zpracování dat v této práci byla konkrétně použita **Kirchoffova** nebo **Stoltova** (*phase-shift*) metoda.

### 11.3 Interpretace dat

Výstupem fáze zpracování dat byl v případě měření tloušťky konstrukcí PK podélný profil konstrukce komunikace a jejího podloží se zobrazením rozhraní a lokálních nehomogenit s rozdílnou relativní permitivitou. V některých případech byla pro lepší znázornění výstupu zvolena přednastavená barevná schémata, která přiřazují barvy

jednotlivým odrazům na základě velikosti amplitud. Ve většině případů bylo nicméně použito černobílé schéma, které je dle mnoha autorů pro lidský mozek jednodušeji interpretovatelné než mnohobarevné stupnice. Úkolem uživatele GPR ve fázi interpretace je potom přiřadit těmto rozhráním a nehomogenitám konkrétní význam (specifikovat rozhraní vrstev nebo konkrétní fyzické objekty) a zvýraznit je (případně doplnit popisem) v grafickém výstupu nebo popsat jejich tvar, vlastnosti a polohu ve výstupu textovém.

Interpretace je založena na zkušenostech uživatele a jeho znalostí nejen problematiky zpracování GPR signálu ale i problematiky konkrétní aplikace (konstrukce PK, betonové konstrukce, železniční spodek, ...), pro kterou je GPR použit. Je také nutné, aby uživatel měl informace (z dokumentace nebo předchozího průzkumu) o možných jevech, objektech a druhu materiálů, jež se v zájmové oblasti nachází. Samozřejmě je nutné shromáždit co nejvíce informací o objektech a jevech, které jsou předmětem vlastního měření. Pro zpracování dat a jejich interpretaci jsou v oblasti diagnostiky PK vhodné především jádrové vývrty, projektová dokumentace, údaje o poloze inženýrských sítí, nebo např. geodetické zaměření dané PK. Příklad interpretace naměřených dat na PK s cílem stanovení tloušťky konstrukčních vrstev v programu ReflexW je znázorněn na obrázku 43.



**Obrázek 43** Příklad interpretace měření konstrukčních vrstev PK v programu ReflexW

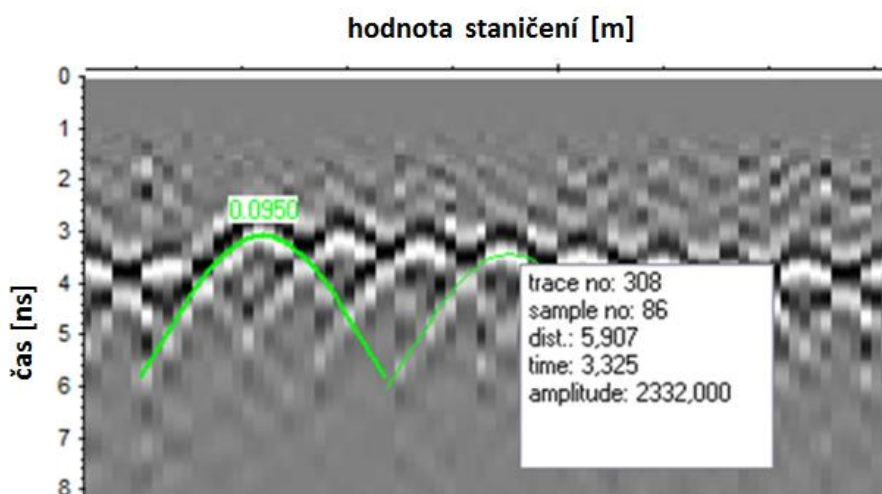
## 12 Stanovení relativní permitivity a rychlosti šíření signálu

Stanovení relativní permitivity diagnostikovaného materiálu a tedy i rychlosti šíření GPR signálu je základem pro všechna GPR měření, kdy je nutné získat data o poloze a rozměrech hledaného jevu nebo předmětu.

Testy, které měli za cíl posoudit metody stanovení rychlost šíření GPR signálu, resp. relativní permitivitu materiálů (písky a šterky) byly prováděny především v laboratoři při použití IBC kontejnerů. V případě metody hyperbolických odrazů a předem známé hloubky rozhraní byla objektem měření železobetonová podlaha laboratoře a přilehlá PK s netuhou vozovkou. Testovány byly pouze metody, jež umožňovala použitá GPR aparatura. Veškerá laboratorní měření bylo prováděno ve spolupráci s ing. Salihem Serkanem Artaganem v laboratoři sekce DS ve VVCD.

### 12.1 Hyperbolické odrazy

Pro posouzení metody hyperbolických odrazů byla využita pouze *ground-coupled* anténa. V případě průchodu GPR signálu různými materiály nelze totiž aplikovat geometrické principy této metody a *air-coupled* anténa je tedy ze své podstaty pro tuto metodu nepoužitelná. Pro zaznamenání hyperbolického odrazu bylo samozřejmě nutné pohybovat anténou po měřicím profilu nad objektem měření s kontinuálním záznamem polohy antény (staničením na měřicím profilu). Takto byla například měřena výztuž v železobetonové podlaze laboratoře (obrázek 44).



Obrázek 44 Zobrazení hyperbolických odrazů v programu ReflexW

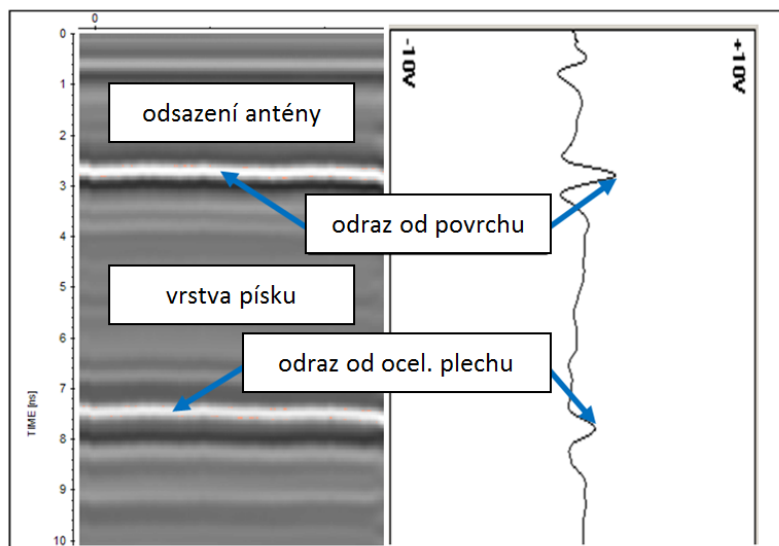
Protože diagnostikované materiály byly uloženy v IBC kontejnerech, nebylo výše popsaný způsob pohybu antén možné dodržet. Proto byl GPR systém použit v módu *auto stacking*, což znamená, že jednotlivé stopy byly zaznamenávány bez závislosti na staničení ale v určitém časovém intervalu. Anténa byla v tomto případě umístěna na podpůrné konstrukci a pohyb byl zajištěn manuálně. Objektem měření byl ocelový prut umístěný v diagnostikovaném médiu ve známé hloubce ve směru kolmo k měřící linii.

Při tomto způsobu měření je nutné pohybovat anténou pokud možno konstantní rychlostí a spustit záznam dat v okamžiku kdy je anténa uvedena do pohybu a ukončit záznam v okamžiku ukončení pohybu na konci předem změřené linie pohybu. Po záznamu dat je nutné nastavit rozestup zaznamenaných stop nastavit tak, aby poslední stopa byla umístěna ve staničení odpovídajícímu délce měřící linie. Pouze za těchto předpokladů, koresponduje tvar hyperboly s jejím skutečným tvarem tak, jako by bylo měření provedeno standardní cestou s kontinuálním záznamem hodnot staničení.

Nejistoty v uvedených předpokladech konstantní rychlosti a synchronizace záznamu dat s pohybem antény pak samozřejmě snižují spolehlivost takto získaných hodnot rychlosti GPR signálu. Hodnoty rychlostí byly ověřeny díky údajům o poloze výztuže z dostupné dokumentace stavby a pohybovaly se v rozmezí uváděném v literatuře pro beton, tedy od 9cm/ns do 15cm/ns. Ověření pomocí jádrových vývrtů nebylo možné.

## 12.2 Známá poloha odražeče

Posouzení metody založené na využití známé polohy objektů (*ground truth data*) měření bylo provedeno na výše uvedených materiálech taktéž uložených v IBC kontejnerech. Testy byly provedeny při různě tlustých vrstvách materiálů. Použita byla pouze *air-coupled* anténa. Při každém měření byl v radargramu identifikován odraz od povrchu materiálu a odraz od ocelového plechu umístěného pod vrstvou daného materiálu o známé tloušťce. Na obou rozhraních byly odečteny hodnoty *twt* a určen jejich rozdíl. Na základě tohoto údaje a známé hloubce byly vypočteny výsledné rychlosti šíření GPR signálu v daných materiálech. Záznam z jednoho z těchto měření s vyznačením detekovaných rozhraní je znázorněn na obrázku 45.



**Obrázek 45** Zobrazení identifikace rozhraní materiálů v programu ReflexW

Při použití této metody je důležité nejen přesné určení polohy rozhraní (což závisí mimo jiné na vertikálním rozlišení antény), ale také přesné měření výchozí hloubky umístění odražeče signálu (ocelového plechu). Například 1% nepřesnost v určení pozice odražeče vede ke stejné nepřesnosti vypočtené hodnoty rychlosti šíření signálu. Pokud je odražeč umístěn v poloviční hloubce vzhledem k výchozí hodnotě, výsledná chyba je pak dvojnásobná. Pro další hodnoty toto platí analogicky. Při měření kdy byla hloubka odražeče 0,5m měřená s předpokládanou přesností do 2cm (chyba 4%), byla chyba určení výsledné rychlosti v písku (od 12,9cm/ns do 13,8cm/ns) v hodnotách od 0,52cm/ns do 0,55cm/ns, což pro vrstvu o mocnosti například 2m znamená chybu 8cm způsobenou pouze nepřesným změřením hloubky odražeče. Přesnost stanovení rychlosti touto metodou tedy roste dle přesnosti stanovení hloubky odražeče přímo úměrně hloubce rozhraní.

### 12.3 Metoda reflexního koeficientu

Při testování metody RCM byla použita pouze *air-coupled* anténa a to z důvodu eliminace tzv. *Near field zone effect*. Hodnoty porovnávaných amplitud jsou závislé na poloze antény (její vzdálenosti od odražeče), proto byla anténa umístěna vždy v doporučené vzdálenosti 30cm od povrchu ocelového plechu i povrchu materiálu, který byl urovnán. Hodnoty rychlostí GPR signálu získané metodou RCM jsou pak spolu s porovnáním s hodnotami z literatury (neobsahuje bližší informace o zkoumaném materiálu) uvedeny v tabulce 6.

**Tabulka 6** Porovnání hodnot rychlosti signálu stanovených RCM a tabulkových hodnot

Materiál	Rychlost pomocí RCM [cm/ns]	Tabulkové hodnoty [cm/ns]
Asfalt	10,1 - 11,1	13,0 - 17,0
Jílovitá zemina (suchá)	13,6 - 15,1	4,7 - 13,4
Beton	10,2 - 10,3	9,5 - 15,0
Štěrka (16/32 mm)	19,0 - 20,8	8,0 - 21,0
Písek (suchý)	14,8 - 15,6	13,4 - 17,3

Uvedené hodnoty byly, jak je uvedeno výše, získány přímým měřením hodnot amplitud povrchu materiálu na rozhraní vzduch materiál. Jednalo se tedy, v kontextu metody RCM o první krok, tedy svrchní vrstvu. Pro následné (hlouběji uložené) vrstvy se postupuje způsobem odvozeným z vzorce pro vrstvu svrchní (popsáno v teoretické části práce), ovšem při zanedbání útlumu v povrchové vrstvě (svrchnějších vrstvách), což snižuje přesnost této metody.

## 12.4 Shrnutí a doporučení

Pro všechny použité metody platí pravidlo využití vypočtených rychlostí pouze ve stejných nebo velmi podobných podmínkách (rušení, interference), za podobných atmosférických podmínek (teplota) a pro stejné materiály (složení, vlhkost, křivka zrnitosti, apod.). Výsledky takových testů lze tedy použít při dalších měřeních pouze s jistou mírou nejistoty. Při použití jiné GPR sestavy nebo jiné centrální frekvence byt' za stejných podmínek a na stejných materiálech by byly výsledky taktéž odlišné. Využívání hodnot uváděných v literatuře by potom mělo být pouze orientační a pro přesnější využití by bylo nutné získat další údaje o podmínkách měření, měřící sestavě a vlastnostech materiálu.

Pokud je měření nutno provádět v laboratoři, pak je vhodné odebrat materiál přímo z místa předpokládaného budoucího měření. Rovněž je nutné provádět ostatní měření a případné geotechnické zkoušky in-situ a za podobných podmínek (teplota vlhkost) jako následná GPR měření.

Z hlediska nejpoužívanějšího GPR měření na PK (detekce konstrukčních vrstev PK) je pak samozřejmě nejspolehlivější metodou pro určení rychlosti signálu GPR využití metody známé polohy odražeče (*ground truth data*), tedy jádrových vývrtů, ovšem s výše zmíněnými nevýhodami. Další využitelnou metodou je metoda RCM, která je nicméně přesná pouze pro

jednu svrchní vrstvu, tedy vrstvu obrusnou, případně pro kompletní kryt (uvažujeme-li velmi podobné hodnoty relativních permitivit asfaltových vrstev) v případě, kdy rozhraní obrusné a ložné vrstvy není detekováno (poměrně často není vyžadováno). Pro podkladní vrstvy, které jsou obvykle provedeny ve větších tloušťkách a mají odlišné hodnoty relativní permitivity, je tato metoda méně přesná z důvodu zanedbání útlumu ve svrchnějších vrstvách a rozptylu signálu.

Ostatní metody stanovení rychlosti jsou pro běžného koncového uživatele v oblasti diagnostiky PK z důvodu časové náročnosti, požadavků na vybavení a také sofistikovanějšího způsobu měření a zpracování dat velmi těžko využitelné.

## 13 Korekce útlumu a rozptylu signálu

Informace uvedené v předchozích kapitolách vedly autora k úpravě metody RCM. Hlavní myšlenkou bylo odstranění nedostatku spočívajícího v poklesu přesnosti metody při určování rychlosti GPR signálu pro podkladní vrstvy. Jedná se tedy o zapracování útlumu vrstev ležících nad vyšetřovaným rozhraním a rozptylu signálu v této oblasti do použitého výpočetního postupu. Konkrétně jde mimo jiné také o stanovení křivek procentního poklesu hodnot amplitud odrazu tzv. úplného odražeče pro různé materiály v závislosti na hloubce jeho uložení. O hodnotu tohoto útlumu jsou potom pro konkrétní hloubky (tloušťky vrstev) zvýšeny hodnoty amplitud takzvaného úplného odražeče na vyšetřovaném rozhraní (povrchu vrstvy, pro nějž je rychlost počítána). Pro výpočty je také použito hodnot rozptylu signálu pro jednotlivé materiály.

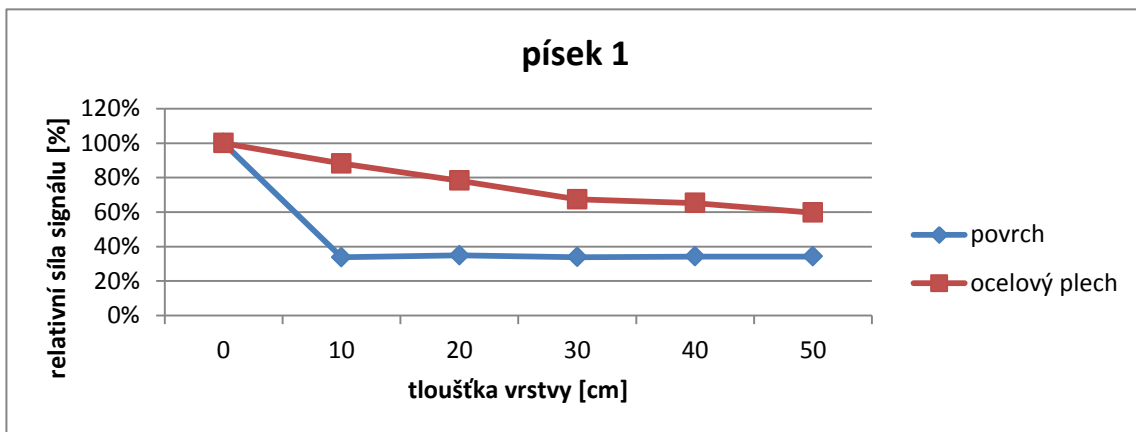
Výsledné hodnoty rychlostí GPR signálu by tedy měli být při použití navržené modifikace určeny přesněji i v případě podkladních vrstev. Navržená metoda byla pro potřeby textu nazvána RCMM (RCM-modifikovaná). Testy byly prováděny na materiálech uvedených v tabulce 9.

**Tabulka 7** Použité materiály

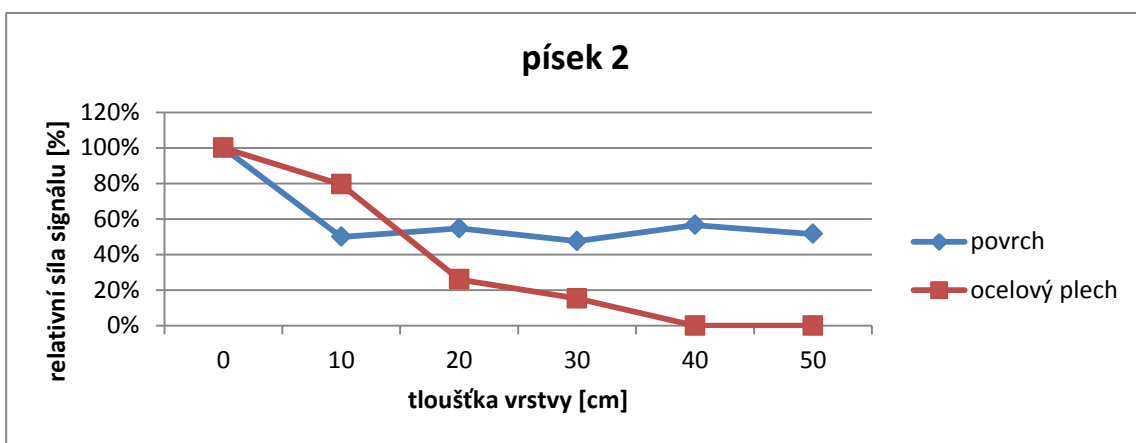
Materiál	frakce [mm]	vlhkost [%]
Písek 1	x	0%
Písek 2	x	9%
Písek 3	x	4%
Štěrk 1	4-8mm	x
Štěrk 2	8-16mm	x
Štěrk 3	31,5-63mm	x

### 13.1 Útlum signálu

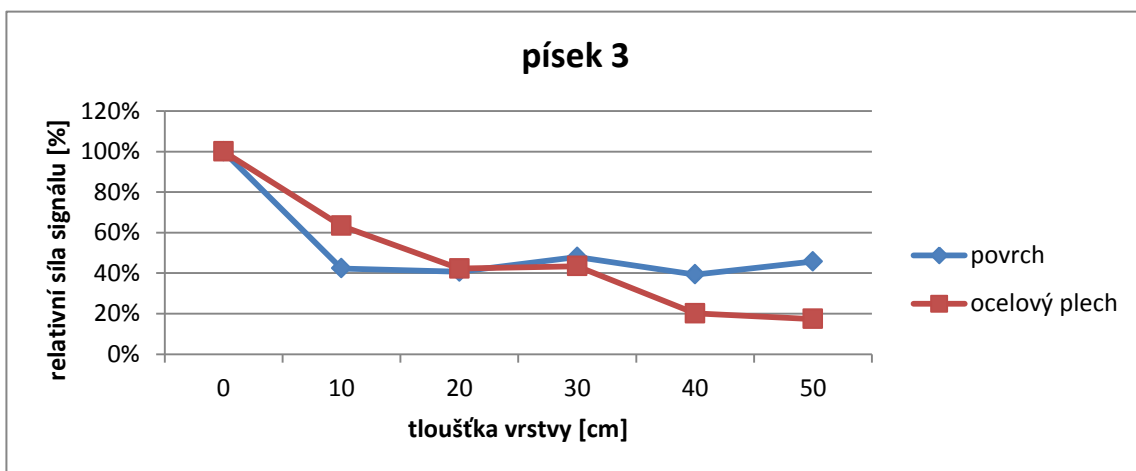
V této části textu jsou uvedeny grafy (obrázky 46 až 51 pro materiály uvedené v tabulce 9) znázorňující pokles velikosti odraženého signálu od takzvaného úplného odražeče a to v závislosti na tloušťce a druhu nadložního materiálu. Pro porovnání jsou v grafech uvedeny také hodnoty odrazu od povrchu těchto materiálů. Testy byly prováděny v IBC. Jako úplný odražeč byl použit ocelový plech o rozměrech 70cm na 90cm. Anténa byla umístěna vždy 30cm nad povrchem vzorku. Měření byla prováděna s krokem 10cm a to od tloušťky vrstvy 0cm až do 50cm.



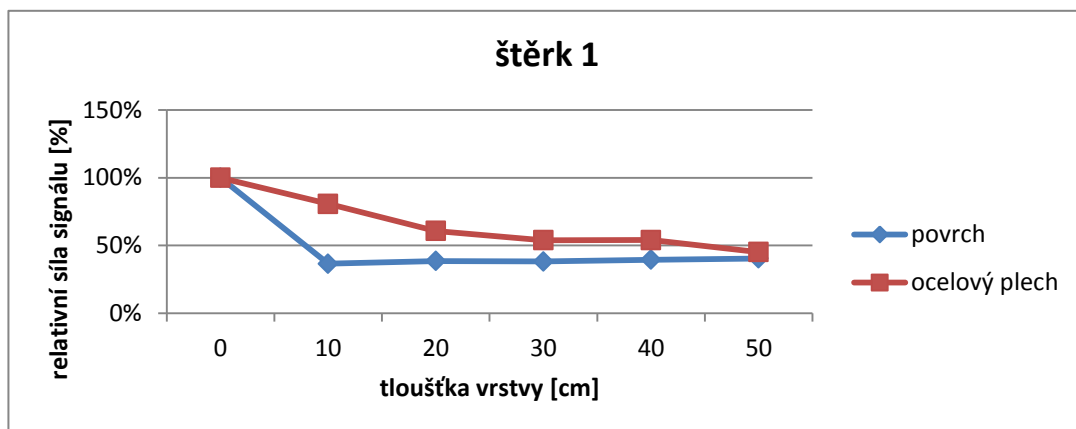
**Obrázek 46** Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: písek 1



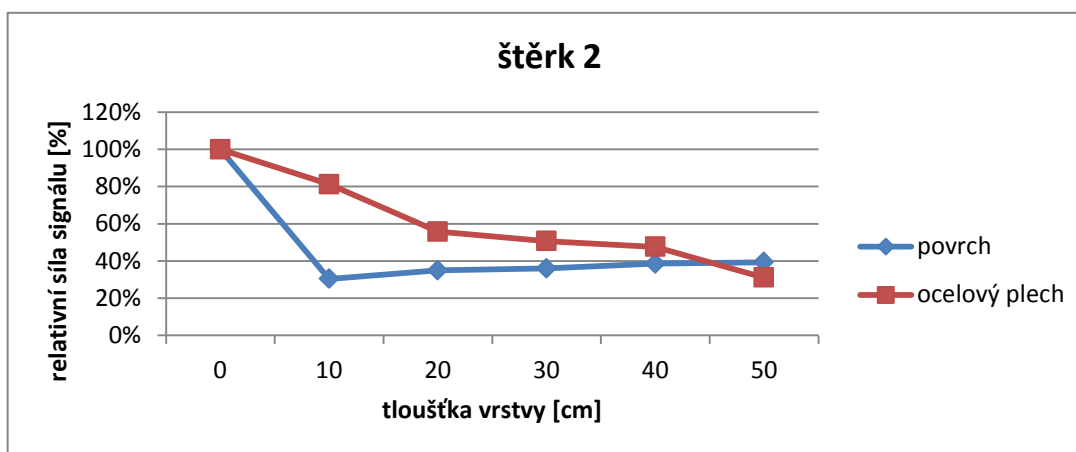
**Obrázek 47** Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: písek 2



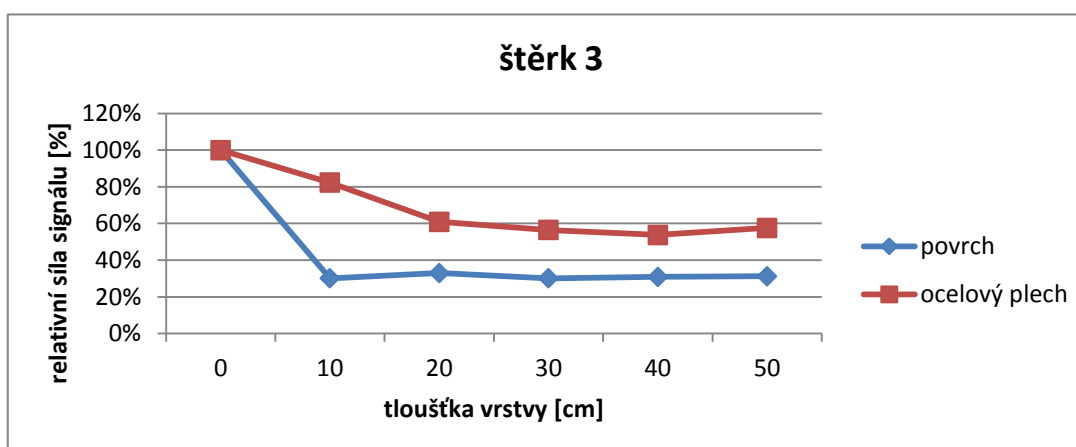
**Obrázek 48** Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: písek 3



**Obrázek 49** Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: štěrk 1



**Obrázek 50** Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: štěrk 2



**Obrázek 51** Velikost odraženého signálu při testech útlumu v materiálu: štěrk 3

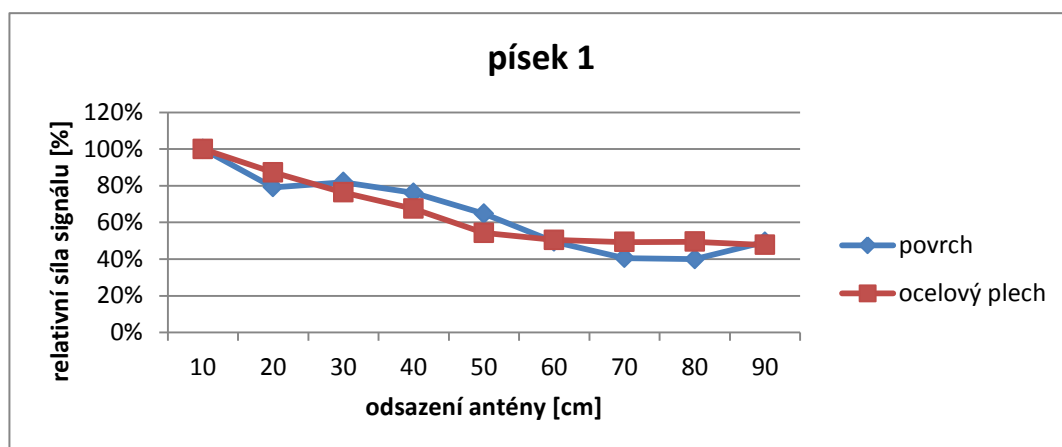
Hodnoty uvedené v grafech 46 až 51 jsou shrnuty v tabulce 8. U materiálu písek 2 došlo ke znemožnění zaznamenání odrazu a to vlivem vysokého útlumu signálu daného vysokou vlhkostí materiálu. Lze konstatovat, že na útlum měla vliv především právě vlhkost, vliv frakce kameniva byl méně významný.

**Tabulka 8** Útlum signálu v testovaných materiálech

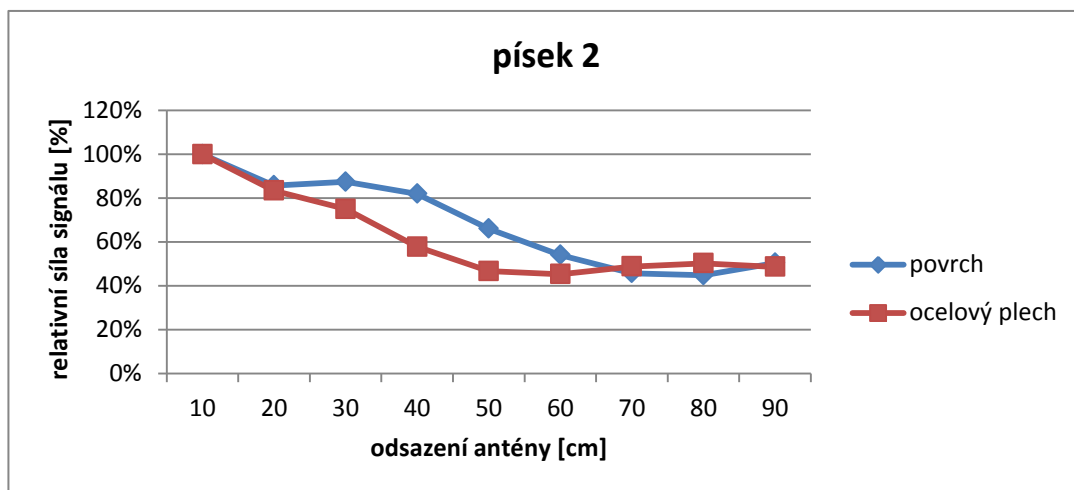
útlum signálu [%]						
tloušťka vrstvy [cm]	písek 1	písek 2	písek 3	štěrk 1	štěrk 2	štěrk 3
0-10	11,8%	20,5%	36,7%	19,3%	18,7%	17,7%
10-20	9,9%	53,5%	21,1%	19,9%	25,5%	21,3%
20-30	10,9%	10,7%	-1,1%	6,8%	5,1%	4,5%
30-40	2,1%	15,3%	23,3%	-0,1%	3,0%	2,7%
40-50	5,6%	x	2,8%	8,9%	16,6%	-3,9%
<b>útlum signálu celkem</b>	<b>40,3%</b>	<b>100,0%</b>	<b>82,7%</b>	<b>54,8%</b>	<b>69,0%</b>	<b>42,4%</b>

## 13.2 Rozptyl signálu

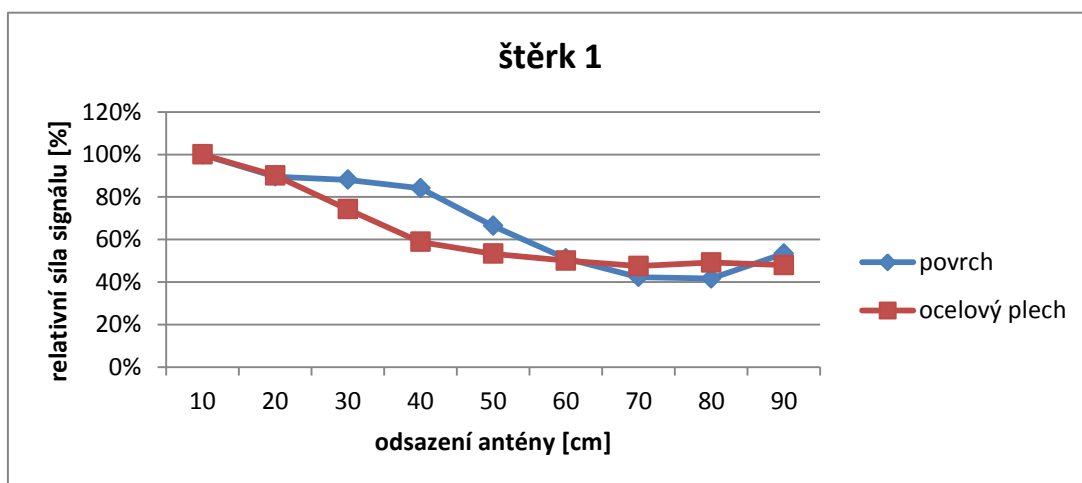
V této části textu jsou uvedeny grafy (obrázky 52 až 56) znázorňující pokles velikosti odraženého signálu od povrchu vrstvy materiálu o tloušťce 10cm a to v závislosti na odsazení antény od povrchu. Pro porovnání jsou v grafech uvedeny také hodnoty odrazu tzv. úplného odražeče umístěného pod touto vrstvou. Testy byly prováděny v IBC. Jako úplný odražeč byl použit ocelový plech o rozměrech 70cm na 90cm. Anténa byla umístěna od 10cm do 90cm nad povrchem vzorku. Měření byla prováděna s krokem 10cm.



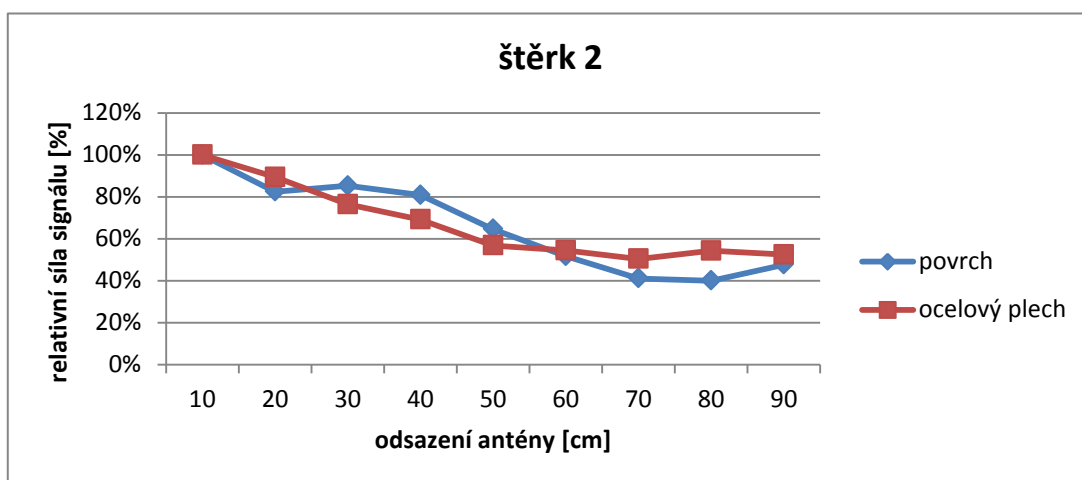
**Obrázek 52** Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: písek 1



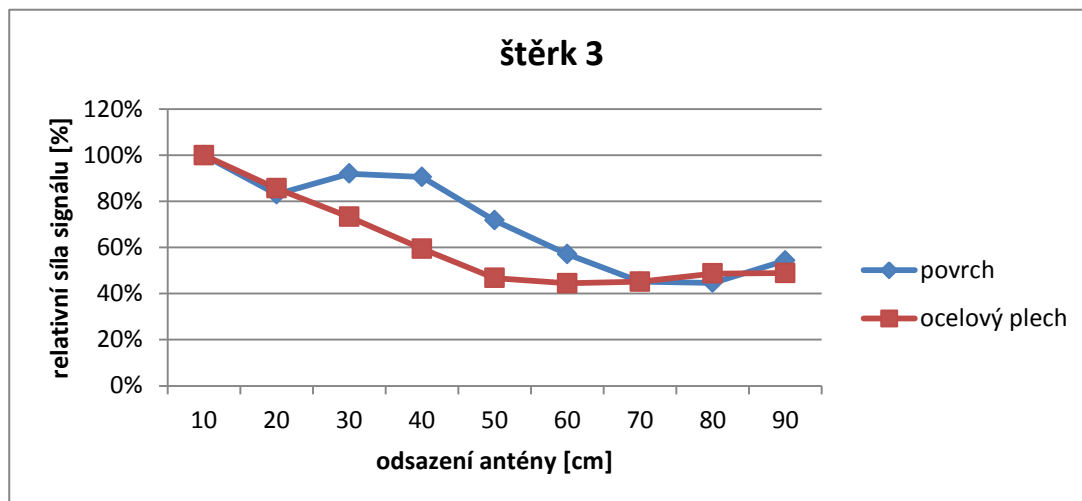
Obrázek 53 Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: písek 2



Obrázek 54 Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: štěrk 1



Obrázek 55 Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: štěrk 2



**Obrázek 56** Velikost odraženého signálu při testech rozptylu v materiálu: štěrk 3

Hodnoty uvedené v grafech 52 až 56 jsou shrnuty v následujících tabulkách. Tabulka 9 uvádí hodnoty rozptylu signálu od povrchu, tabulka 10 uvádí hodnoty rozptylu signálu od ocelového plechu. Jsou zde uvedena data v rozsahu odsazení antény od 30cm do 80cm, tedy konfiguraci simulující měření v intervalu mezi povrchem a hloubkou 50cm. Lze konstatovat, že na rozptyl signálu měla vliv především frakce kameniva. Měření s odsazením antény v intervalu 10cm až 30cm je zatíženo tzv. *Near-field* efektem a u měření s odsazením antény větším než 80cm se předpokládá vliv způsobený rozměry vzorku a IBC, tedy tzv. *Border effect*. Ten je způsoben větším rozptylem signálu při vyšších hodnotách odsazení a to právě až na/za hranici testovaného vzorku.

**Tabulka 9** Rozptyl signálu na povrchu

rozptyl signálu povrchu [%]					
odsazení antény [cm]	písek 1	písek 2	štěrk 1	štěrk 2	štěrk 3
30-40	5,9%	5,5%	4,0%	4,5%	1,5%
40-50	11,4%	15,9%	17,7%	16,2%	18,8%
50-60	15,2%	12,0%	15,2%	12,9%	14,6%
60-70	8,9%	8,3%	8,8%	10,6%	12,0%
70-80	0,6%	1,0%	0,7%	1,1%	0,5%
rozptyl celkem	42,0%	42,7%	46,5%	45,2%	47,3%

**Tabulka 10** Rozptyl signálu na ocelovém plechu

rozptyl signálu ocelového plechu [%]					
odsazení antény [cm]	písek 1	písek 2	štěrk 1	štěrk 2	štěrk 3
30-40	8,9%	17,2%	15,3%	7,3%	13,8%
40-50	13,2%	11,1%	5,6%	12,3%	12,7%
50-60	3,8%	1,3%	3,2%	2,3%	2,3%
60-70	1,2%	-3,5%	2,6%	4,1%	-0,8%
70-80	-0,2%	-1,5%	-1,6%	-3,9%	-3,5%
rozptyl celkem	<b>26,9%</b>	<b>24,7%</b>	<b>25,1%</b>	<b>22,2%</b>	<b>24,6%</b>

### 13.3 Vypočtené a naměřené parametry materiálů

Na základě známé pozice tzv. úplného odražeče byly stanoveny rychlosti šíření signálu jednotlivými materiály. Použity byly vždy testy popsané v kapitole útlum signálu, kdy tloušťky vrstev měly hodnotu 50cm, tedy nejvyšší. Takto spočtené hodnoty rychlosti by měly být zatíženy nejmenší relativní chybou, neboť přesnost urovnání a přímého změření tloušťky vrstev měřítkem je uvažována konstantní 2cm, tedy s chybou 4 % pro 50cm silnou vrstvu. Relativní permitivity byly poté vypočítány dle vzorce 7. Koeficient odrazu byl stanoven jako poměr odraženého signálu od ocelového plechu k signálu odraženému od testovaných materiálů. Uvedené hodnoty byly vypočteny jako aritmetický průměr hodnot získaných při testech útlumu. Z testů vyplývá závislost koeficientu odrazu na vlhkosti testovaného materiálu. Popsané parametry použitých materiálů jsou uvedeny v tabulce 11.

**Tabulka 11** Vybrané parametry testovaných materiálů

materiál	rychlost šíření signálu [cm/ns]	relativní permitivita	koeficient odrazu [%]
písek 1	17,2 ± 4,0%	3,03 ± 4,0%	34,2
písek 2	17,5 ± 6,7%	2,94 ± 6,7%	52,1
písek 3	12,9 ± 4,0%	5,43 ± 4,0%	43,2
štěrk 1	16,0 ± 4,0%	3,52 ± 4,0%	38,7
štěrk 2	15,2 ± 4,0%	3,90 ± 4,0%	35,9
štěrk 3	16,7 ± 4,0%	3,23 ± 4,0%	31,0

### 13.4 Naměřené a vypočtené hodnoty testů RCMM

Měření provedená pro zjištění hodnot útlumu a rozptylu signálu uvedená výše, byla následně použita pro korekci hodnot odrazu na rozhraních vrstev v souvrstvích z testovaných

materiálů. Cílem těchto měření bylo eliminovat nedostatky metody RCM a tedy zpřesnit výpočty relativní permitivity a rychlosti šíření signálu pro vrstvy nacházející se pod jednou nebo více nadložními vrstvami.

Hodnoty odrazu ocelového plechu na uvažovaném rozhraní byly vypočteny jako hodnoty přímého odrazu ve vzdálenosti 30cm od antény (výchozí pozice) snížené o hodnotu útlumu nadložní vrstvy (nebo vrstev) v závislosti na jejich tloušťce nad uvažovaným rozhraním. Hodnoty rozptylu signálu pro jednotlivé materiály byly použity pro korekci hodnot odrazů od uvažovaných rozhraní. Korekce byla provedena zvýšením hodnoty odrazu rozhraní v poměru koeficientu odrazu k 100 %. Pro dvě nadložní vrstvy byly použity koeficienty obou nadložních vrstev/materiálů.

Takto upravené hodnoty byly poté použity ve vzorci 14 pro svrchní vrstvu metody RCM, kde jako  $A_m$  byla vložena opravená hodnota odrazu ocelového plechu a jako  $A_1$  opravená hodnota odrazu daného rozhraní. Tímto postupem byl přibližně eliminován jak vliv útlumu nadložních materiálů, tak vliv měnící se vzdálenosti antény od rozhraní způsobený zvyšující se hloubkou tohoto rozhraní. Metoda byla testována převážně pro jednu nadložní vrstvu, pro dvě nadložní vrstvy tam, kde bylo možné jednoznačně identifikovat rozhraní vrstev a odečíst hodnotu odraženého signálu. Testy byly prováděny na souvrstvích v kombinacích materiálů dle tabulky 12.

**Tabulka 12** Kombinace souvrství testů RCMM

kombinace	svrchní vrstva		střední vrstva		spodní vrstva	
	materiál	tloušťka [mm]	materiál	tloušťka [mm]	materiál	tloušťka [mm]
1	x	x	x	x	šterk 3	20
2	x	x	šterk 2	10	šterk 3	20
3	x	x	šterk 2	20	šterk 3	20
4	písek 1	10	šterk 2	20	šterk 3	20
5	písek 2	10	šterk 2	20	šterk 3	20
6	šterk 1	10	šterk 2	20	šterk 3	20
7	šterk 2	10	šterk 2	20	šterk 3	20
8	x	x	x	x	šterk 3	20
9	x	x	šterk 1	10	šterk 3	20
10	x	x	šterk 1	20	šterk 3	20
11	písek 1	10	šterk 1	20	šterk 3	20
12	písek 2	10	šterk 1	20	šterk 3	20
13	šterk 1	10	šterk 1	20	šterk 3	20
14	šterk 2	10	šterk 1	20	šterk 3	20

**Tabulka 13** Porovnání výsledků metod RCM a RCMM

komb. x	vrstva x	materiál x	RCM		RCMM		známá poloha	
			ε	v [cm/ns]	ε	v [cm/ns]	ε	v [cm/ns]
1	svrchní	x	x	x	x	x	x	x
	střední	x	x	x	x	x	x	x
	spodní	štěrka 3	3,19	6,8	3,19	6,8	3,23	6,7
2	svrchní	x	x	x	x	x	x	x
	střední	štěrka 2	3,58	5,19	3,58	5,19	3,90	5,2
	spodní	štěrka 3	6,97	11,4	8,7	10,2	3,23	16,7
3	svrchní	x	x	x	x	x	x	x
	střední	štěrka 2	3,32	16,5	3,32	16,5	3,90	15,2
	spodní	štěrka 3	4,3	14,5	2,62	18,5	3,23	16,7
4	svrchní	písek 1	4,14	14,8	4,14	14,8	3,03	17,2
	střední	štěrka 2	6,96	11,4	4,82	13,7	3,90	15,2
	spodní	štěrka 3	7,7	10,8	3,33	16,4	3,23	16,7
5	svrchní	písek 2	5,07	13,3	5,07	13,3	2,94	17,5
	střední	štěrka 2	8,75	10,1	3,00	17,3	3,90	15,2
	spodní	štěrka 3	x	x	x	x	3,23	16,7
6	svrchní	štěrka 1	3,78	15,4	3,78	15,4	3,52	16,0
	střední	štěrka 2	6,32	11,9	4,38	14,3	3,90	15,2
	spodní	štěrka 3	7,0	11,4	3,01	17,3	3,23	16,7
7	svrchní	štěrka 2	4,09	14,8	4,09	14,8	3,90	15,2
	střední	štěrka 2	6,49	11,8	4,05	14,9	3,90	15,2
	spodní	štěrka 3	x	x	x	x	3,23	16,7
8	svrchní	x	x	x	x	x	x	x
	střední	x	x	x	x	x	x	x
	spodní	štěrka 3	3,50	16,0	3,50	16,0	3,23	16,7
9	svrchní	x	x	x	x	x	x	x
	střední	štěrka 1	4,26	14,5	4,26	14,5	3,52	16,0
	spodní	štěrka 3	8,74	10,1	8,15	10,5	3,23	16,7
10	svrchní	x	x	x	x	x	x	x
	střední	štěrka 1	4,30	14,5	4,30	14,5	3,52	16,0
	spodní	štěrka 3	6,01	12,2	2,95	17,5	3,23	16,7
11	svrchní	písek 1	3,80	15,4	3,80	15,4	3,03	17,2
	střední	štěrka 1	6,92	11,4	6,46	11,8	3,52	16,0
	spodní	štěrka 3	7,80	10,8	3,42	16,2	3,23	16,7
12	svrchní	písek 2	5,91	12,3	5,91	12,3	2,94	17,5
	střední	štěrka 1	10,97	9,1	6,46	11,8	3,52	16,0
	spodní	štěrka 3	x	x	x	x	3,23	16,7
13	svrchní	štěrka 1	3,79	15,4	3,79	15,4	3,52	16,0
	střední	štěrka 1	6,68	11,6	5,20	13,2	3,52	16,0
	spodní	štěrka 3	7,50	11,0	3,16	16,9	3,23	16,7
14	svrchní	štěrka 2	3,51	16,0	3,51	16,0	3,90	15,2
	střední	štěrka 1	6,03	12,2	5,55	12,7	3,52	16,0
	spodní	štěrka 3	6,7	11,5	3,52	16,0	3,23	16,7

Tabulka 13 na předchozí stránce udává porovnání výsledných hodnoty relativní permitivity a rychlosti signálu pro jednotlivé kombinace vypočtené metodou RCM a metodou uvažující útlumy a rozptyl signálu RCMM. Pro srovnání jsou zde uvedeny také výsledky získané díky známé poloze rozhraní uvedené již dříve. U kombinací, kde se nad posuzovanou vrstvou nenachází jiná vrstva, jsou samozřejmě výsledky RCM a RCMM stejné, protože nejsou uvažovány žádné korekce (v tabulce zvýrazněno žlutě). Hodnoty, kde došlo ke zpřesnění použitou modifikací metody, jsou v tabulce označeny zeleně. Hodnoty kde ke zlepšení nedošlo, jsou označeny červeně. V určitých kombinacích pak nebylo možné z radargramů odečíst hodnotu amplitudy na rozhraních střední a spodní vrstvy, toto je v tabulce označeno křížkem.

### 13.5 Závěr

Výsledky metod RCM a RCMM byly porovnány vzájemně a také s údaji z přímého měření předem zvolených hloubek úplných odražečů resp. tloušťky vrstev. Vztahují se pouze k použité GPR sestavě s anténou o centrální frekvenci 2GHz a ke konkrétním testovaným materiálům.

Uvedené výsledky (porovnání se skutečnými hodnotami) ukazují zpřesnění RCM metody použitím navržené modifikace pro testované materiály. Lze tedy předpokládat obdobné zpřesnění při použití tohoto postupu na konstrukčních vrstvách PK. Toto bude předmětem dalšího výzkumu. Uvedený postup však vyžaduje náročné laboratorní GPR měření. Na tomto místě je nutné konstatovat, že nejjednodušší a nejrychlejší je určení relativní permitivity a konstrukční vrstvy vozovky a rychlosti šíření GPR signálu uvnitř této vrstvy na základě přímo měřené tloušťky vrstvy. Získat ale data o tloušťkách těchto vrstev je nutné provedením jádrových vývrtů s již zmíněnými nedostatky a to přímo v místech kde bylo provedeno měření GPR. Měření GPR přímo na vzorku jádrového vrtu by vzhledem k velikosti vzorku a standardě používanému vybavení pro diagnostiku PK nebylo možné.

## 14 Závislost mechanických vlastností vozovek PK a GPR měření

V této kapitole je zpracována problematika použití zařízení GPR spolu se zařízením FWD (zařízení specifikována výše). Konkrétním cílem je zjištění možné závislosti údajů získaných zařízením FWD a dat získaných pomocí GPR na konstrukcích PK.

Základní měření probíhalo na dvou lokalitách s rozdílnými netuhými konstrukcemi PK (popsány níže). Na každé lokalitě byla předem vytyčena totožná bodová síť. Na této bodové síti bylo provedeno měření FWD a následně, s co nejmenším časovým odstupem, měření GPR. Autor práce obsluhoval samostatně GPR a asistoval při obsluze zařízení FWD. Toto zařízení obsluhoval ing. František Haburaj, Ph.D., školitel-specialista autora disertační práce.

Hodnoty relativní permitivity a tedy i rychlostí signálu v jednotlivých vrstvách byly stanoveny na základě srovnání výsledků měření s údaji z dokumentace.

### 14.1 Teorie

Možnost stanovit a popsat vztah mezi EM a mechanickými vlastnostmi stavebních materiálů byla poprvé zkoumána v roce 1993 (J. K. Mitchell). Byl zde popsán možný vliv relativní permitivity na vazby mezi jednotlivými částicemi materiálu a tedy na jeho pevnost. Byl stanoven předpoklad, že útlum EM signálu a frekvence, při které k němu dochází, jsou závislé na typu a síle mezimolekulárních vazeb, což poskytuje možnost určit pevnostní charakteristiky zemin a hornin pomocí měření jejich EM vlastností [47], [10]. Relativní permitivita a vodivost materiálu může být vztažena také k jeho dalším vlastnostem jako namrzavost, smyková pevnost, mez plasticity a zhutnění a obsah pórů [10]. Další autoři [86] také vyslovily předpoklad, že tyto informace mohou být také nepřímo využity pro stanovení modulu přetvárnosti.

Výše uvedené předpoklady potvrdilo několik výzkumných projektů. Výzkum, zabývající se stanovením EM a mechanických vlastností materiálů používaných v konstrukcích PK začal v roce 1994 v Texas Transportation Institute. Byly zde vyvinuty nové metody společného testování uvedených vlastností (Saarenketo 1995a, Saarenketo & Scullion 1995, Saarenketo & Scullion 1996, Scullion & Saarenketo 1997, Syed a kol. 2000, Guthrie a kol. 2002) [10]. Potvrzena byla vysoká korelace mezi EM a mechanickými a reologickými vlastnostmi všech použitých typů zemin a hornin [86]. V druhé polovině

devadesátých let tento výzkum pokračoval porovnáváním těchto vlastností na stmelěných a nestmelěných materiálech v laboratořích Tampere University of Technology (Saarenketo a kol. 1998, Saarenketo a kol. 2000a, Saarenketo a kol. 2001). V posledních letech se výzkum soustředil na detailnější porozumění vztahu mezi EM vlastnostmi a trvalými deformacemi nestmelěných materiálů (Kolisoja & Vuorimies 2003, 2004, Schneider 2003, Dawson & Kolisoja 2005). Výzkum prováděný na University of Oulu (2006) ukázal, že GPR technologie poskytuje nejen informace o struktuře zemních těles, ale také množství informací, jež mohou být využity pro přesnější stanovení mechanických vlastností materiálů uvnitř těchto těles [10].

Několik studií bylo také provedeno za použití GPR a dalších nedestruktivních technologií přímo v diagnostice PK a dopravní infrastruktury obecně. V roce 2011 (Pedret a Pérez-Gracia) byla zkoumána závislost mezi daty získanými z měření pomocí deflektografu a GPR kalibrovaného pomocí jádrových vývrtů [113]. V roce 2013 (Benedetto a Tosti) byl popsán empirický vztah mezi relativní permitivitou a modulem pružnosti zkoumaného materiálu a bylo provedeno porovnání mezi změřenými a předpokládanými hodnotami modulu pružnosti získaného měřeními pomocí GPR a LFWD na PK [114]. Na ČVUT byl v roce 2014 (Eichler) použit GPR, statická zatěžovací zkouška a lehká dynamická deska pro určení tloušťky vrstev materiálu a stanovení vztahu mezi výsledky z jednotlivých zařízení. Experiment byl proveden na nově konstruované PK. Bylo tedy možné provádět zkoušky na každé z konstrukčních vrstev. Jedním z doporučení uvedeným v této práci [26] bylo použití GPR spolu s FWD k určení zbývajících životnosti vozovek PK.

V kombinaci s FWD je GPR využíván velmi často. Jedná se však především o nezávislá měření, kde není zkoumán vztah mezi naměřenými daty ([115], [116], [117], [118]). GPR zde slouží především jako způsob získání tloušťky konstrukčních vrstev, tedy vstupního údaje pro výpočet FWD modulů. V roce 2002 (Saeed a Hall) bylo porovnáno několik metod pro stanovení vlastností materiálů vozovek PK in-situ. Autoři studie uvádějí jako nejvhodnější kombinaci metod, kombinaci GPR a FWD. Dle autorů jedné ze studií z roku 2005 (Noureldin a kol.) může kombinace FWD a GPR poskytnout hodnotné informace o stavu vozovky a být velmi přínosnou metodou pro plánování údržby a oprav [10].

GPR byl také používán (Szykiewicz a Grabowski 2004) se zařízením Heavy Weigh Deflectometer (HFWD) pro testování vozovek vzletových a přistávacích drah letišť. V roce 2011 (Picoux a kol.) byl pak GPR použit spolu s FWD a metodou impact-echo (IE) pro

detekci delaminace vrstev vozovky. Kombinace uvedených zařízení byla také použita (Sybilski a kol., 2012) pro identifikaci přítomnosti vody v konstrukci vozovky, jako příčiny vzniku trhlin. [113]

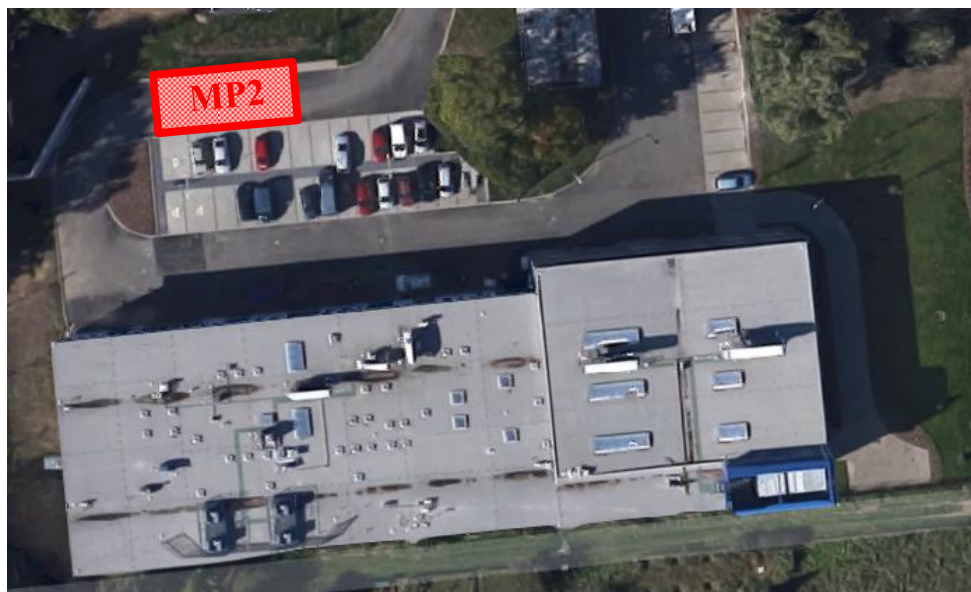
V roce 2014 (Tosti, Adabi, Pajewski, Schettini, Benedetto) byl vytvořen semiempirický model pro stanovení pevnostních vlastností vozovky, jež byl založen na porovnání modulu pružnosti získaného pomocí lehké dynamické desky a odrazu EM signálu GPR. Modelové hodnoty korespondovaly s hodnotami přímo měřenými, což dle autorů slibuje provádění takovéto diagnostiky ve větším měřítku v budoucnu. [47]

## 14.2 Měřicí pole

Měření probíhalo na dvou měřicích polích (MP1, MP2). Každé z polí tvořilo 50 bodů vyznačených na povrchu PK. Body byly vytyčeny v pěti řadách s rozstupem 0,5m a v každé řadě bylo 10 bodů s rozstupem 1m. Rozměr polí tedy byl 9m x 2m s počtem 50 bodů v poli. Lokality byly vybrány z důvodu vyloučení nutnosti omezení dopravy a také proto, že byla známa konstrukce komunikací z projektové dokumentace. Rovněž se zde dle dostupné dokumentace nenacházely žádné inženýrské sítě, které by mohla být příčinou nežádoucích odrazů GPR signálu, případně jiného rušení. Okraje měřicích polí byly v obou případech vzdáleny nejméně 1m od okraje komunikace z důvodu vyloučení změn konstrukce komunikace při přechodu na jinou konstrukci nebo u obrub a také pro možnost umístění zařízení FWD. Měřicí pole 1 (obrázek 57) bylo umístěno v areálu společnosti DSP a.s. a měřicí pole 2 (pozice vyznačena na obrázku 58) v areálu VVCD DFJP.



Obrázek 57 Pohled na měřicí pole 1



**Obrázek 58** Pozice měřicího pole 2 v areálu VVCD (zdroj: <https://www.google.com/maps/>)

Konstrukce komunikací na měřicích polích byly dle převzaté dokumentace následující (značení dle TP 170):

**MP1:**

SMA 8	Asfaltový koberec mastixový	40mm
PS-E	postřik spojovací, asf. emulze	500g/m <sup>2</sup>
ACL 16+	Asfaltový beton pro ložnou vrstvu	70mm
PI-E	postřik infiltrační asf. emulze	650g/m <sup>2</sup>
SC C <sub>8/10</sub>	Směs stmelená hydraulickým pojivem	140mm
ŠD <sub>A</sub>	Štěrkoдр	200mm
<b>KONSTRUKCE CELKEM</b>		<b>450mm</b>

**MP2:**

ACO11+	Asfaltový beton	40mm
ACP 16+	Obalované kamenivo	60mm
SC C <sub>8/10</sub>	Směs stmelená hydraulickým pojivem	130mm
ŠD	Štěrkoдр	200mm
<b>KONSTRUKCE CELKEM</b>		<b>450mm</b>

### 14.3 Postup měření na měřících polích

Před každým měřením byla zajištěna stabilita signálu GPR 40 minut dlouhým stabilizačním intervalem (délka nutného stabilizačního intervalu byla získána pomocí testů dlouhodobé stability). Pokaždé bylo nastaveno časové okno posunutím povrchového odrazu na vhodnou hodnotu *twf*. Vždy byla provedena automatická kalibrace systému buď samostatně na povrchu PK, nebo společně s kalibrací na ocelovém plechu. Doba měření byla volena tak, aby nedocházelo k významnému kolísání teplot. Měřeno bylo vždy na suché vozovce. Kromě GPR a FWD dat byla zaznamenávána také teplota povrchu vozovky.

1. měření: areál DSP a.s.; 2. 8. 2016; 15-18hod.; průměrná teplota povrchu PK: 20°C
2. měření: areál VVCD; 19. 8. 2016; 15-18hod.; průměrná teplota povrchu PK: 25°C

#### 14.3.1 FWD

Vlastní měření FWD na MP bylo provedeno těsně před měřením pomocí GPR. Měření na bodech měřícího pole probíhalo v pořadí dle číslování bodů. Se zařízením FWD bylo manipulováno ručně. Na každém z bodů byly provedeny tři úderů. Doba měření sekvence 3 úderů na měřeném bodě se pohybovala v intervalu 12 až 20s. Celková doba měření na MP byla přibližně 1 hodina. Zařízení FWD bylo orientováno (měřící rám směřoval) ve směru číslování bodů.

Zaznamenávány byly grafy časového průběhu síly a průhybů na všech snímačích, grafy průhybových čar a tabulky maximálních hodnot. Zároveň byla zaznamenávána teplota vzduchu, povrchu vozovky a teplota uvnitř vozovky na každém měřeném bodě. Při měření bylo také možné zobrazit frekvenční spektrum měřených signálů jednotlivých snímačů a aplikovat různé číslicové filtry. Po ukončení měření FWD byl zahájen první krok měření pomocí GPR.

Při zpracování dat a zpětném výpočtu ekvivalentních rázových modulů pružnosti byly využity výstupní soubory vytvořené při exportu dat. Data byla zpracována na základě iterační metody, která přibližuje teoreticky vypočtenou průhybovou křivku průhybové křivce naměřené. Zpracování zahrnovalo zadání teplotních údajů, údajů GPR o tloušťkách konstrukčních vrstev a nastavení kritérií pro ukončení iterace. Výsledkem pak kromě hodnot ekvivalentních modulů byly také chyby iterace a zbytkové doby životnosti a tloušťky zesílení dle TP 170.

### 14.3.2 GPR

Sestava GPR byla pro tato měření umístěna na ručně tlačeném měřicím vozíku. V této práci byla používána pouze dostupná anténa o centrální frekvenci 2GHz.

Prvním krokem GPR měření byl sběr vstupních dat pro metodu RCM, tedy stanovení hodnot relativních permitivit jednotlivých konstrukčních vrstev a tedy i rychlostí GPR signálu v těchto vrstvách. Kalibrace byla provedena v režimu *wheel mode* jak na plechu, tak na povrchu komunikace. Měření probíhalo v režimu *auto stacking*. Jednotlivé stopy byly tedy zaznamenávány v časovém intervalu, nikoli dle staničení. Na ocelovém plechu bylo zaznamenáno 10 stop a poté se pokračovalo na 10 bodech v ose měřícího pole. Na každém bodě bylo zaznamenáno 5 stop. Interval mezi záznamem jednotlivých stop byl nastaven na 10s z důvodu vyloučení krátkodobého náhodného rušení. Měření na jednom bodě tedy trvalo cca 1min. Po záznamu páté stopy na daném bodě následoval přejezd na následující bod. Data byla zaznamenávána bez přerušení do jediného souboru. Dosah GPR byl nastaven na 15, resp. 20ns s počtem 512 vzorků na stopu. Z dat naměřených na jednotlivých bodech byly vypočteny střední hodnoty pro celé měřící pole. Cílem tohoto kroku bylo získat hodnoty amplitud na jednotlivých rozhraních, zpřesnit hodnotu rychlosti šíření signálu, stanovit relativní permitivity materiálů konstrukčních vrstev a určit skutečné hodnoty tloušťky jednotlivých konstrukčních vrstev reprezentující oblast konstrukce komunikace na celém MP. Výsledné hodnoty tloušťky konstrukčních vrstev určené pomocí RCM byly poté porovnány s hodnotami z dostupné dokumentace PK a následně použity (společně s hodnotami teploty PK) jako vstupní data pro nastavení zařízení FWD.

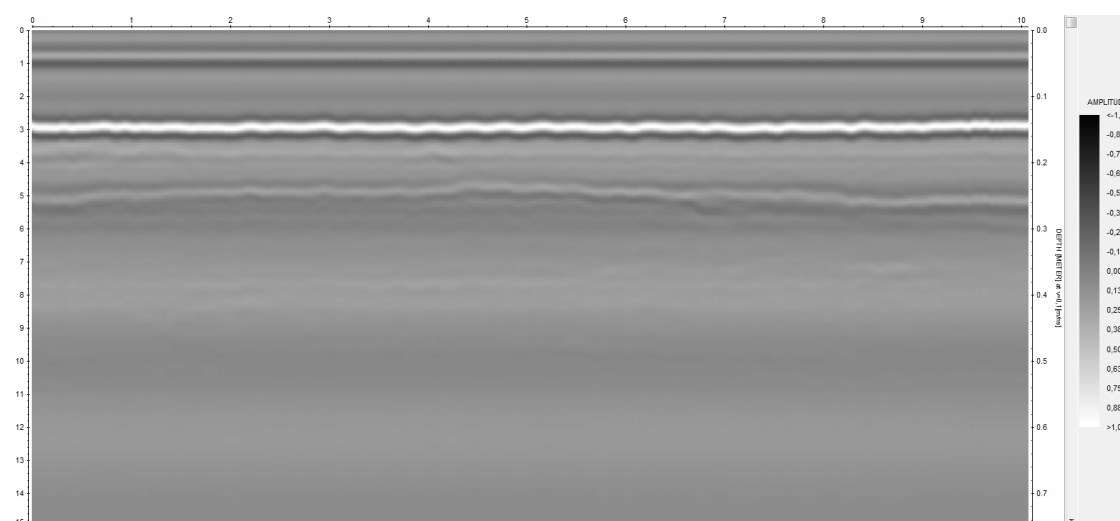
Druhým krokem bylo měření v režimu *wheel mode*, tedy za použití odometru, provedené v ose měřícího pole. Kalibrace pro toto měření byla provedena automaticky ve stejném režimu a to pouze na povrchu komunikace. Vzdálenost stop byla stanovena na 2cm s dosahem 15, resp. 20ns a počtem 512 vzorků na stopu. Cílem tohoto kroku bylo získat kontinuální záznam rozhraní jednotlivých konstrukčních vrstev s vysokým horizontálním rozlišením pro jejich snadnější identifikaci s údaji z dokumentace PK. Použita byla anténa HN-2000 ve výšce 30cm nad povrchem.

Třetím krokem GPR měření bylo získání hodnot amplitud jednotlivých rozhraní na všech bodech měřících polí. Nejprve byla provedena nová kalibrace GPR v režimu *wheel mode* a to rovněž pouze na povrchu PK. Poté byl nastaven režim *auto stacking* s intervalem mezi stopami 10s. Dosah GPR byl nastaven na 15, resp. 20ns s počtem 512 vzorků na stopu.

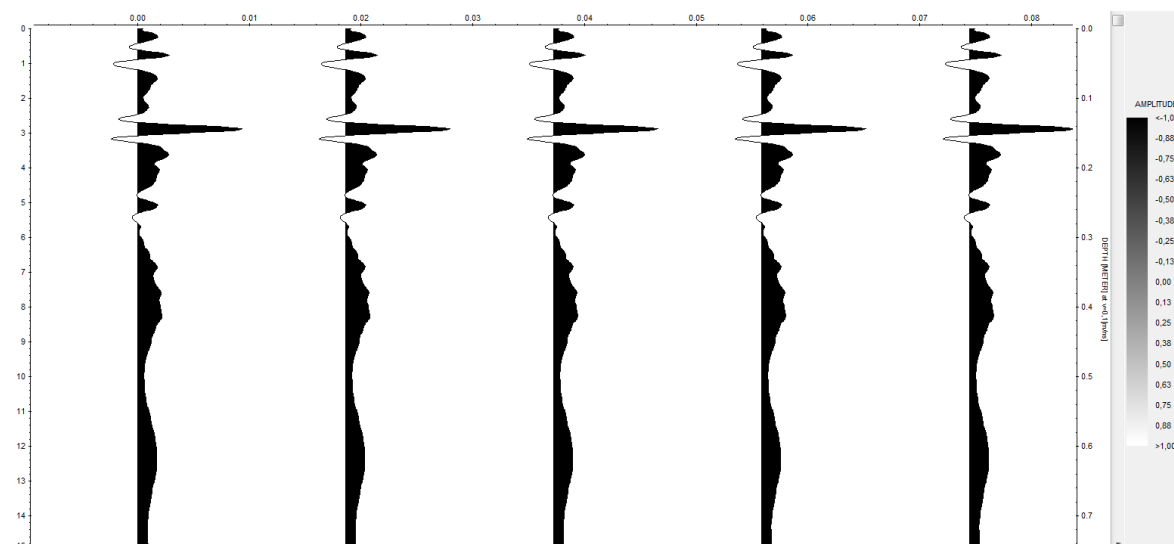
Na každém z 50 bodů bylo zaznamenáno 5 stop. Měření na každém bodě bylo uloženo samostatně. Naměřeno bylo tedy 50 záznamů, kdy každý obsahoval 5 stop. Tato fáze měření trvala přibližně 1 hodinu.

#### 14.4 Identifikace rozhraní vrstev na měřících polích

Při určování polohy jednotlivých rozhraní a jejich identifikaci se vycházelo z hodnot tloušťky konstrukčních vrstev z dostupné dokumentace PK a hodnot rychlosti šíření signálu GPR uváděných v literatuře. V programu pro zpracování GPR dat bylo identifikováno povrchové rozhraní (rozhraní 1) a nastavena předpokládaná hodnota (z dostupné literatury) rychlosti signálu pro obrusnou vrstvu, což společně se znalostí očekávané tloušťky obrusné vrstvy umožnilo stanovení předběžné polohy rozhraní obrusné a ložné vrstvy (rozhraní 2). Toto rozhraní bylo poté identifikováno jak na záznamu z prvního kroku měření pro RCM ve formě *Wigglemode* (na jednotlivých stopách), tak ve formě zobrazení *Pointmode* (zobrazení amplitud na barevné škále) na kontinuálním záznamu z druhého kroku měření. Poté byla v softwaru nastavena předpokládaná rychlost signálu v ložní vrstvě a obdobným způsobem byla nalezena poloha rozhraní ložní vrstvy a svrchní podkladní vrstvy (rozhraní 3). Analogicky bylo postupováno pro rozhraní svrchní a spodní podkladní vrstvy (rozhraní 4) a pro rozhraní spodní podkladní vrstvy a podloží (rozhraní 5). Během této fáze byly samozřejmě použity různé kroky zpracování a filtrace dat uvedené v kapitole týkající se *postprocessingu*. Naměřená data v programu ReflexW ve formě zobrazení *Pointmode* jsou znázorněna na obrázku 59, data zobrazená ve formě *Wigglemode* na obrázku 60.



Obrázek 59 Zobrazení kontinuálního záznamu na ose MP ve formě *pointmode*



**Obrázek 60** Zobrazení záznamu na jednom z bodů MP ve formě *wigglemode*

## 14.5 Stanovení tloušťky konstrukčních vrstev měřících polí

Poté co byly určeny polohy jednotlivých rozhraní, byla pozornost zaměřena na stanovení hodnot relativních permitivit a rychlostí signálu v jednotlivých vrstvách. Hodnoty amplitud byly vyhledány (na základě znalosti poloh rozhraní) v 10 textových souborech charakteru ASCII - MATRIX (TRACE/COL), jež byly exportovány z radargramů na jednotlivých bodech (10 bodů v ose pole). Tyto soubory se skládaly z 5 sloupců odpovídajícím 5 stopám na každém z bodů MP a 512 řádkům odpovídajícím 512 vzorkům na stopě. V každém souboru tedy bylo zaznamenáno 2560 hodnot.

Byly vypočteny střední hodnoty amplitud pro jednotlivá rozhraní na celém MP a také střední hodnota amplitudy na ocelovém plechu, jež byly použity v příslušných rovnicích RCM. Tímto způsobem byly získány střední hodnoty permitivit, rychlostí signálu pro jednotlivé konstrukční vrstvy a také střední tloušťky těchto vrstev. Takto získané hodnoty tloušťky byly poté porovnány s údaji z dokumentace PK na MP. Hodnoty permitivit a rychlostí GPR signálu byly rovněž porovnány s hodnotami uváděnými v literatuře.

## 14.6 Závislost GPR a FWD dat

V tomto oddílu jsou popsány předpoklady autora a uvedeny studie, jež se týkají problematiky vzájemného vztahu EM a mechanických vlastností materiálu vrstev vozovek PK. Jedná se především o vztah mezi únosností, mírou ztuhnutí a EM vlastnostmi těchto materiálů/konstrukčních vrstev.

### 14.6.1 Předpoklady

Prvním z předpokladů autora při ověřování závislosti FWD a GPR dat byla existence závislosti objemové hmotnosti materiálu konstrukčních vrstev a ekvivalentních modulů FWD získaných zpětným výpočtem (resp. průhybových křivek). Předpokladem bylo, že hodnoty těchto modulů jsou úměrné míře zhutnění vrstev a tedy i jejich objemové hmotnosti. Kromě objemové hmotnosti pak samozřejmě musí být brány v potaz další vlastnosti jako pevnosti a deformační vlastnosti jednotlivých složek materiálu konstrukčních vrstev a jejich spojení, skladba a míra spolupůsobení konstrukčních vrstev na jejich styku, vlastnosti podloží a další.

Dále byla předpokládána závislost velikosti útlumu GPR signálu na hustotě materiálu, jímž prochází. Jinak řečeno vyšší hodnoty amplitud GPR signálu dané stopy znamenají větší průhyby měřené zařízením FWD a naopak nižší objemovou hmotnost materiálu, tedy nižší útlum a tedy i nižší hodnoty ekvivalentních modulů. Zde je potřeba uvést, že hodnoty amplitud jsou použity z intervalu  $twt$ , jež odpovídá celkové tloušťce konstrukce. Pro další výzkum by bylo výhodné určit způsob (především maximální hloubku) šíření rázových vln FWD aby tato mohla být porovnána s příslušnými intervaly  $twt$  a průhyby u jednotlivých snímačů FWD.

Dále byla předpokládána závislost relativní permitivity materiálu na jeho hustotě. Jinak řečeno vyšší relativní permitivita znamená vyšší objemovou hmotnost materiálu a vyšší hodnoty ekvivalentních modulů a tedy menší průhyby měřené zařízením FWD. Vyšší relativní permitivita obrusné vrstvy, resp. krytu vozovky (podobné hodnoty relativní permitivity vrstev krytu oproti vzduchu) se pak projeví silnějším odrazem na povrchu vozovky.

#### **Výše uvedené předpoklady platí za následujících podmínek:**

- Homogenita v jednotlivých vrstvách

Vzhledem k poměrně malé ploše měřících polí je zde předpoklad homogenity jednotlivých vrstev. Výraznější nehomogenity by bylo možné identifikovat na radargramech, avšak kvantifikace jejich dopadu na sílu odraženého signálu by však byla značně subjektivní. Pro přesné posouzení by pak bylo nutné provést jádrový vývrt na každém z bodů.

- Absence vlhkosti, přítomnosti vody, zvodnělých místa

Rovněž v tomto bodě je předpoklad takových podmínek. Přítomnost vody obecně zvyšuje celkovou hodnotu signálu na stopě z důvodu vysoké relativní permitivity oproti okolnímu materiálu a také proto, že má (v závislosti na frekvenci) oproti většině materiálů nižší útlum. Slaná voda má ale při zachování permitivity i mnohonásobně vyšší útlum. Přítomnost vody v konstrukci také znamená předpoklad určitých poruch a tedy i předpoklad snížené únosnosti.

- Konstantní tloušťky konstrukčních vrstev

Především v případě MP1 je takový předpoklad. Na všech bodech MP byly nicméně porovnány tloušťky jednotlivých vrstev a hodnoty GPR signálu byly opraveny o takto stanovený koeficient (podrobněji popsáno níže).

Zde je nutné uvést, že vzhledem k poměrně malým rozměrům MP je předpoklad velmi malých rozdílů v tloušťkách vrstev, vlastnostech materiálů a míře zhutnění vrstev. Pro další práci by bylo vhodné provést měření na několika úsecích pozemních komunikací, kde je předpoklad vzájemně odlišných parametrů a chyby a nepřesnosti v měření FWD a GPR by byly vůči rozdílům posuzovaných hodnot relativně menší a jejich závislost tedy pravděpodobně zřetelnější.

#### **14.6.2 Související studie**

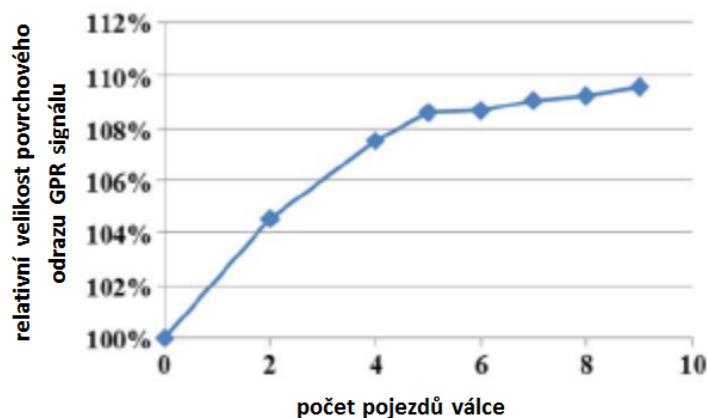
V dalším textu je odkazováno na studie, které mimo jiné vycházejí z obdobných předpokladů a potvrzují jejich oprávněnost. Měření objemové hustoty materiálu v konstrukčních vrstvách vozovky vyžaduje obvykle provedení jádrových vývrtů. Jsou také používána zařízení využívající EM signál (*Pavement Quality Indicator* - PQI) nebo radiologické metody (*Nuclear Density Gauge* - NDG). Uvedené metody mají ale svá omezení a umožňují měření pouze bodově. Metody NDG například používají jako zdroj záření radioaktivní materiál a metody PQI je nutné kalibrovat dalšími údaji, jako je například tloušťka konstrukčních vrstev.

V roce 1992 Al-Qadi zveřejnil první studii, kde popsal model pro stanovení obsahu vlhkosti asfaltové směsi v závislosti na relativní permitivitě. V roce 1995 (Lytton) byl představen program pro stanovení objemové hmotnosti a obsahu vlhkosti ve vícevrstevném prostředí s názvem SIDAR. Tento program pracoval na základě tzv. *Mixing theory*, kdy je každá vrstva vozovky řešena jako soustava složená ze tří složek: pevné, kapaliny a plynu.

V roce 2010 (Al-Qadi, Leng, Lahouar, a Baek) bylo provedeno srovnání několika modelů pro stanovení objemové hmotnosti materiálu. Autoři uvádějí jako nejpřesnější tzv. *Complex Refractive Index Model* (CRIM) jež využívá výše zmíněnou *Mixing theory*, kde je permitivita směsi vypočtena na základě podílu objemu kameniva, asfaltu a vzduchu s ohledem na hodnoty relativních permitivit těchto složek. Hodnota relativní permitivity byla také použita pro výpočet obsahu vzduchových pórů (Al-Qadi, Leng & Larkin, 2011). [119]

Na základě těchto a dalších přístupů bylo v posledních letech zpracováno několik studií, jež si kladou za cíl použít pro výpočet objemové hmotnosti materiálu v konstrukčních vrstvách vozovky zařízení GPR. Ten má oproti uvedeným metodám řadu výhod jako například nedestruktivní charakter měření, rychlé kontinuální získávání dat nebo minimální nároky na omezení dopravy.

Objemovou hmotnost materiálu konstrukčních vrstev jako klíčový faktor, který ovlivňuje výkonost vozovky, popisuje například studie z roku 2015 provedená na *University of Illinois* [120]. Cílem uvedené studie bylo sledování objemové hmotnosti asfaltu v reálném čase během hutnění pomocí GPR připevněného na hutnicím zařízení. Je zde popsána závislost mezi zvyšující se objemovou hmotností asfaltové vrstvy a její relativní permitivitou (a hodnotou povrchového odrazu). Obrázek 61 ukazuje závislost velikosti povrchového odrazu na netuhé vozovce na počtu pojezdů válce.



**Obrázek 61** Závislost velikosti povrchového odrazu na počtu pojezdů válce – upraveno z [120]

Autoři se zde odkazují na existující model (popsaný v [121]) využívající algoritmus pro vyhledávání obsahu vzduchových pórů s cílem sledování objemové hmotnosti asfaltových

směsí během konstrukce vrstev krytu PK. Objemová hmotnost asfaltové směsi je zde popsána vzorcem 19 [121].

$$G_{mb} = \frac{\frac{\varepsilon_{AC} - \varepsilon_b}{3\varepsilon_{AC} - 2,3\varepsilon_b} - \frac{1 - \varepsilon_b}{1 - 2,3\varepsilon_b + 2\varepsilon_{AC}}}{\left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_b}{\varepsilon_s - 2,3\varepsilon_b + 2\varepsilon_{AC}}\right) \cdot \left(\frac{1 - P_b}{G_{se}}\right) - \left(\frac{1 - \varepsilon_b}{1 - 2,3\varepsilon_b + 2\varepsilon_{AC}}\right) \cdot \left(\frac{1}{G_{mm}}\right)} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (19)$$

Kde:

$G_{mb}$  ... výsledná objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m<sup>3</sup>]

$G_{mm}$  ... maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m<sup>3</sup>]

$G_{se}$  ... efektivní měrná hmotnost kameniva [kg/m<sup>3</sup>]

$P_b$  ... obsah pojiva [%]

$G_b$  ... specifická hmotnost pojiva [kg/m<sup>3</sup>]

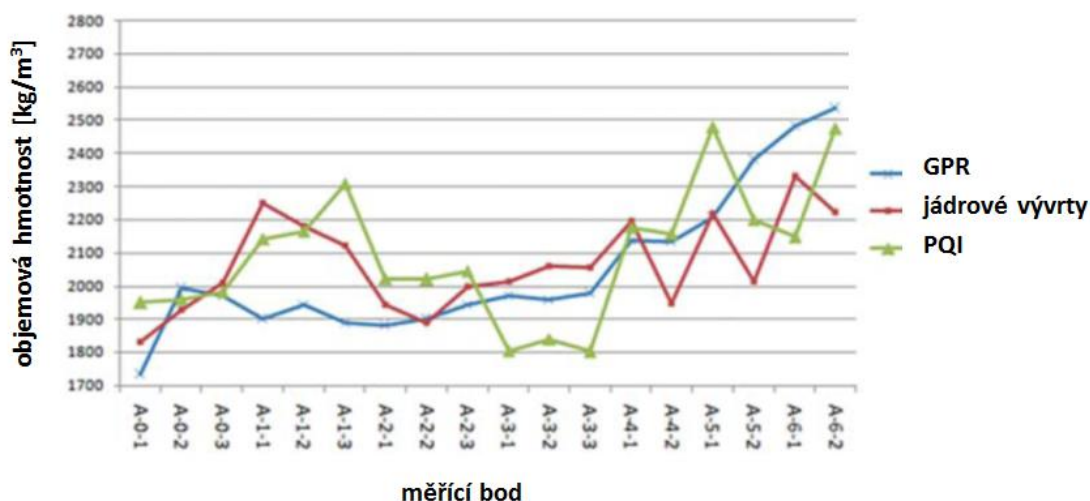
$\varepsilon_{HMA}$  ... relativní permitivita asfaltové směsi [-]

$\varepsilon_b$  ... relativní permitivita pojiva [-]

$\varepsilon_s$  ... relativní permitivita kameniva [-]

Výše uvedenou rovnicí pro určení objemové hmotnosti asfaltové směsi jako soustavy skládající se z asfaltového pojiva, kameniva a vzduchu používají také autoři ve studii [122], která si klade za cíl stanovení jak objemové hmotnosti materiálu asfaltových směsí, tak jejich vlhkosti pouze pomocí GPR. Autoři vycházejí z faktu, že kontrast mezi dvěma vrstvami na radargramu je přímo úměrný rozdílu jejich relativních permitivit.

Další studie [119] se věnovala přesnosti určování objemové hmotnosti asfaltové směsi pomocí zařízení PQI a GPR. Výsledky byly poté porovnány s údaji z jádrových vrtů. Autoři konstatují, že GPR poskytuje přesnější určení objemové hmotnosti než PQI. V této studii byl také využit výše popsáný CRIM model. Srovnání hodnot objemové hmotnosti vypočtených na základě měření GPR a PQI spolu s hodnotami z jádrových vývrtů je uvedeno na obrázku 62.



Obrázek 62 Srovnání hodnot objemové hmotnosti – upraveno z [119]

Další ze studií zabývajících se určením hustoty vozovky PK pomocí GPR a která potvrdila útlum signálu v materiálu v závislosti na jeho objemové hmotnosti byl projekt zpracovaný na *Universiti Putra Malaysia* [123]. Bylo zde použito jak přímé GPR měření tak počítačové simulace. Byla měřena a porovnána síla vyslaného a přijatého signálu a stanoven útlum dle vzorce 20. Mimo jiné bylo pozorováno, že nejvyšší objemová hmotnost materiálu znamená nejnižší úroveň obdrženého signálu a tedy že v hustším materiálu dochází k vyššímu útlumu signálu.

$$A = 10 \log \left( \frac{P_i}{P_o} \right) [\%] \quad (20)$$

Kde:

$P_i$  ... síla obdrženého signálu [mV]

$P_o$  ... síla vyslaného signálu [mV]

Znalost útlumu GPR signálu v daném prostředí je důležitý předpoklad k určení dalších EM vlastností tohoto prostředí. Jde zejména o relativní permitivitu a elektrickou vodivost ale také o maximální dosah použitého GPR [124]. Vlivem útlumu signálu na zaznamenaná data byla v minulosti věnována značná pozornost. Byly prováděny jak simulace (Bano, 1996;

Hollender a Tillard, 1998), tak laboratorní měření a měření in-situ (Powers, 1997; Turner a Siggins, 1994) [125].

Je potřeba zdůraznit, že absorpce EM vln je závislá na frekvenci. Při použití více frekvencí může tato závislost také poskytnout potřebné údaje o diagnostikovaném materiálu. Změny v energii odraženého signálu byly studovány například pomocí tzv. *Spectral Ratio (SR) methods* (Harbi a McMechan, 2012) anebo metod využívající údaje o frekvenčním posunu odraženého signálů jako *Frequency Centroid* nebo *Frequency Peak Shift*, (Liu a kol., 1998; Quan a Harris, 1997; Bradford, 2007). Pro aproximaci frekvenčně závislé části útlumu byl také navržen (Turner a Siggins, 1994) tzv. *Quality factor*. [126]

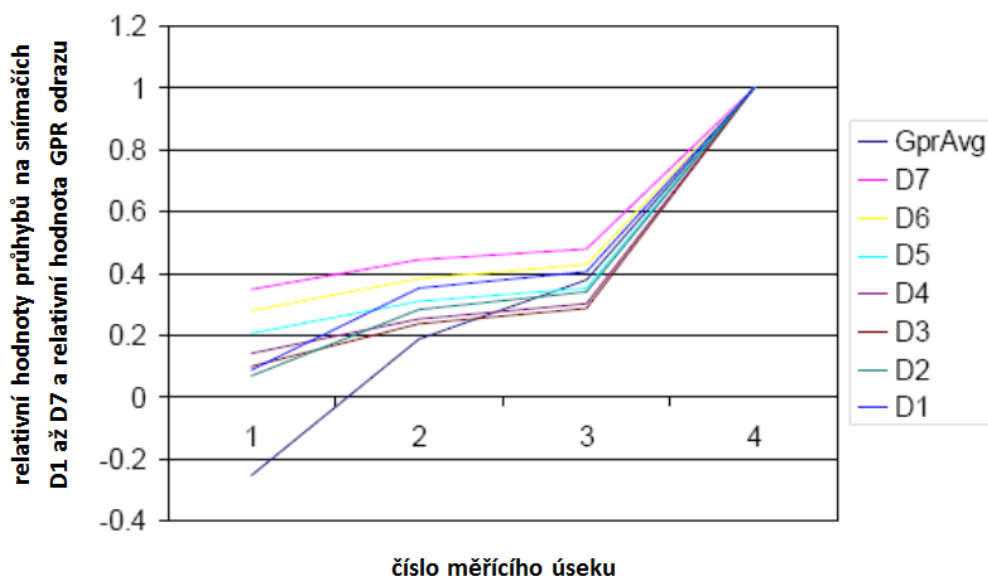
Kompenzací útlumu signálu v materiálu a vlivem tohoto útlumu na sílu odraženého signálu se zabývala například studie na *Universidade Federal do Rio Grande do Norte* (Brazílie) v roce 2005 [125]. V další práci provedené na *Universit`a del Salento* v roce 2008 [124] je prezentována metoda pro určení útlumu radarové energie přímo z radargramů pořízených in-situ. Autoři provedli korekci získaného signálu o pokles způsobený rozptylem GPR signálu v prostředí. Hodnota útlumu byla poté použita pro výpočet vodivosti i relativní permitivity zkoumaného materiálu. Výsledky vykazovaly vysokou shodu s laboratorně získanými daty. Následně byl stejný postup použit in-situ, kde se výsledky shodovaly s dalšími geoelektrickými měřeními.

Jak již bylo uvedeno výše, použití zařízení GPR a FWD je téměř vždy redukováno na využití údajů o tloušťce konstrukčních vrstev PK získaných pomocí GPR (a kalibrovaných jádrovými vývrty) jako vstupu do iteračního procesu při zpětném výpočtu ekvivalentních modulů pružnosti z průhybových křivek získaných zařízením FWD.

Jedinou prací (kterou se podařilo autorovi dohledat), kde bylo s daty z uvedených zařízení dále pracováno ve smyslu ověření vzájemného vztahu, byla studie provedená v roce 2005 na *University of Houston* [127]. V této studii byla nejprve provedena série laboratorních měření s cílem ověřit vztah mezi hustotou asfaltové směsi a její relativní permitivitou. Použit byl jak pulzní radarový systém, tak *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)* radar.

Po potvrzení této závislosti následovalo měření na konkrétních pozemních komunikacích se zařízením GPR a FWD. Byly vybrány čtyři úseky, kde se předpokládal výrazný rozdíl mechanických vlastností souvrství. Autoři provedli porovnání síly přijatého GPR signálu s průhyby vozovky vyvozenými zařízením FWD. Korelace těchto dat pro 4

vybrané úseky komunikací je patrná z obrázku 63. Dle autorů pak nejsilnější korelaci s GPR daty vykazuje snímač FWD umístěný přímo v bodě vyvození impulsu zatížení. [127]



Obrázek 63 Korelace GPR a FWD dat – upraveno z [127]

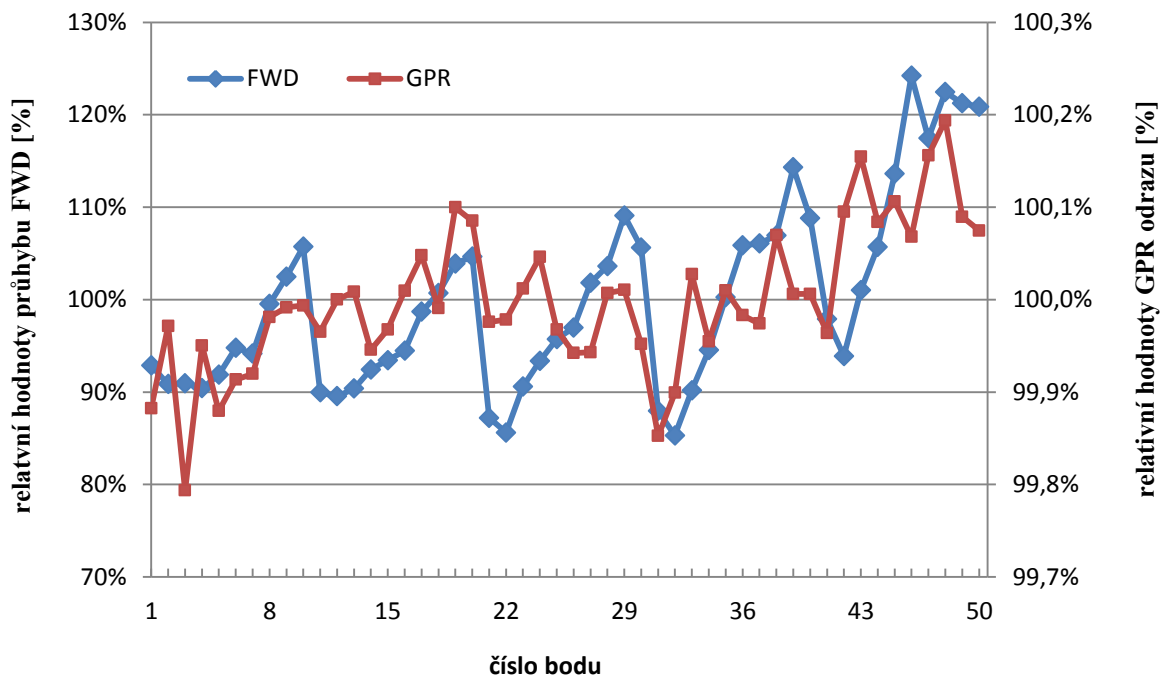
Zjištěný empirický vztah byl poté využit pro přepočítání GPR dat na průhyby konstrukce tak, aby je bylo možné přímo srovnat s průhyby získanými pomocí zařízení FWD. Relativní chyba mezi těmito výstupy byla pak dle autorů v 80 % nižší než 0,2. [127]

## 14.7 Výsledky měření na měřicích polích

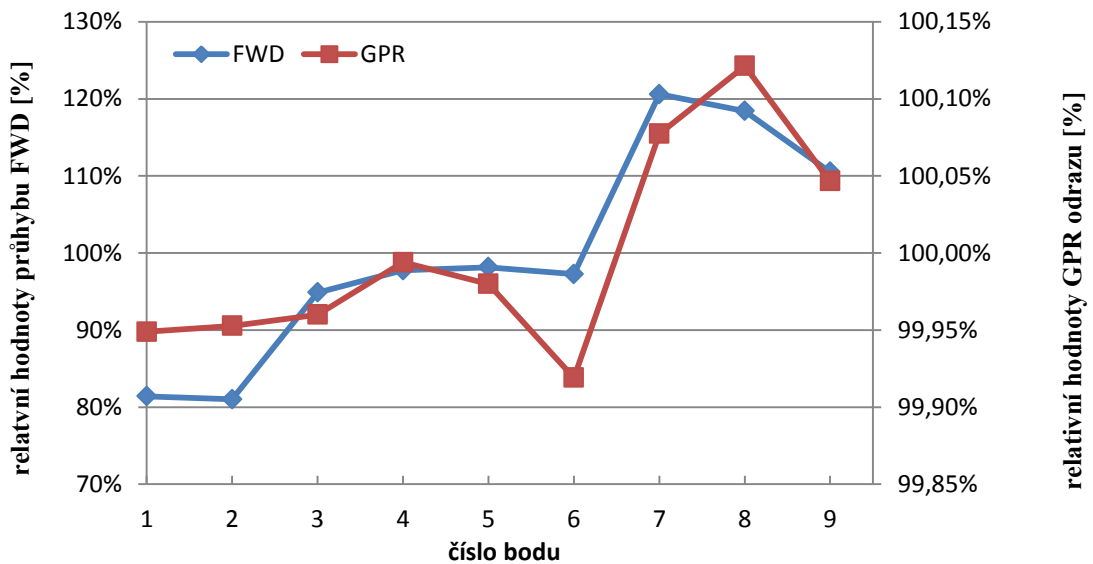
Při hledání vztahu GPR odrazů a poklesů při použití zařízení FWD bylo vycházeno z výše popsaných předpokladů. V první fázi byla posuzována závislost hodnot průměrné amplitudy na každém z 50 bodů MP1 (v rozsahu 20ns – tedy kompletního časového okna) s průměrnou hodnotou poklesu ze všech snímačů (s pozicí snímače D0 na měřeném bodě). Korelační koeficient je v tomto případě roven  $R=0,63$ . Tuto korelaci zobrazuje obrázek 64 (jde o relativní hodnoty vztažené k aritmetickému průměru).

Oproti MP1 byla na MP2 zjištěna značná nehomogenita materiálu, výrazné změny ekvivalentních modulů na okrajích vozovky (u obrubníků) a významné kolísání tloušťky konstrukčních vrstev ve směru kolmo k ose MP2. Z uvedených důvodů jsou zde zpracovány výsledky obdobného měření pouze v ose MP2, kde byl předpoklad provedení konstrukce v nejvyšší shodě s projektem. Závislost hodnot průměrné amplitudy na bodech osy MP2 (v rozsahu 20ns – tedy kompletního časového okna) s hodnotou poklesu snímačů snímače D0

na měřených bodech je znázorněna na obrázku 65. Korelační koeficient byl v tomto konkrétním případě  $R=0,87$ .



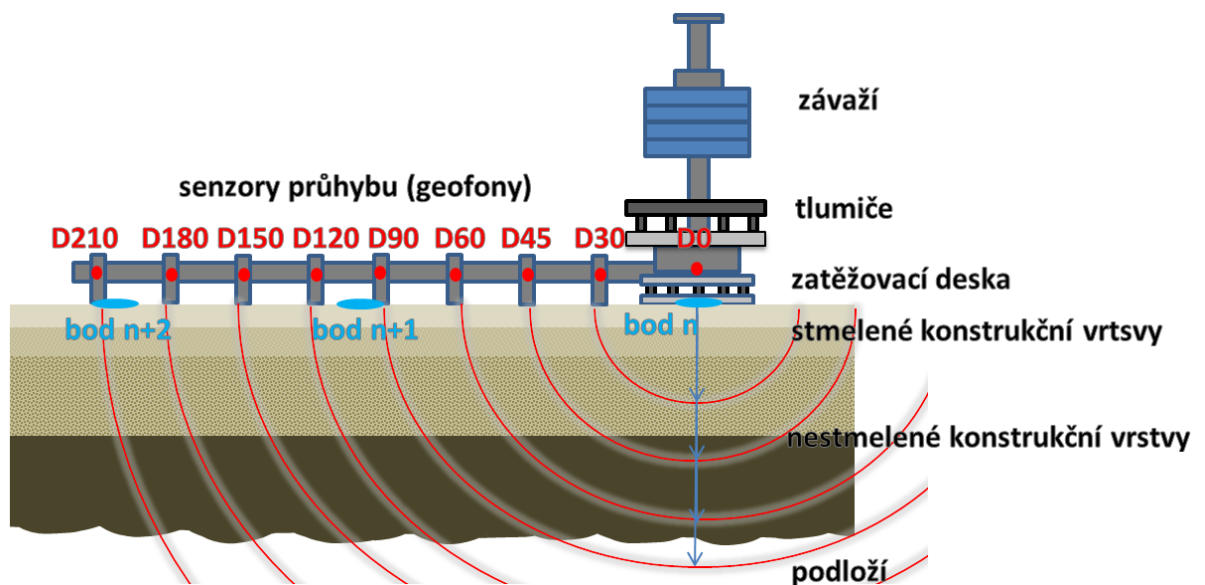
**Obrázek 64** Vztah mezi poklesy FWD (na všech snímačích) a GPR odrazy – měřeno na bodech MP1



**Obrázek 65** Vztah mezi poklesy FWD na snímači DO a GPR odrazy - měřeno na bodech osy MP2

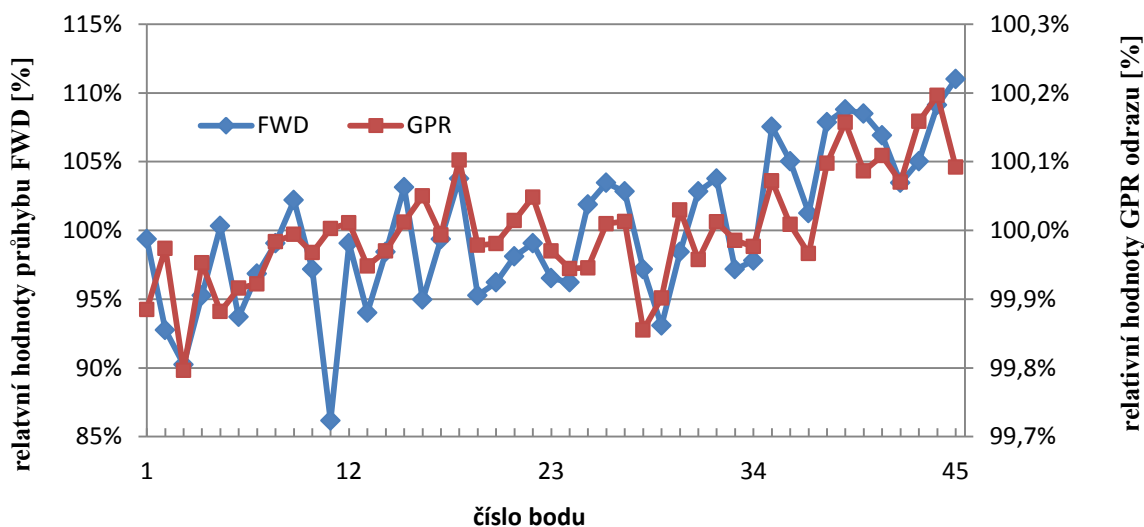
### 14.7.1 Vliv umístění snímačů FWD

Nedostatky výše uvedeného přístupu autor viděl ve faktu, že zatímco je GPR měřeno přímo na bodě, snímače průhybu zařízení FWD jsou umístěny na rameni ve vzdálenosti 0cm až 210cm od měřeného bodu. Nejvíce vypovídající by tedy měly být hodnoty poklesu měřené na snímači D0 a například ke snímači D210 impuls vyvozený zatížením FWD je veden minimálně 210cm konstrukcí komunikace (předpoklad šíření rázových vln vyvozených FWD vychází nicméně z tvaru polokoule). Na obrázku 66 je znázorněno umístění a měření FWD na bodech měřících polí.

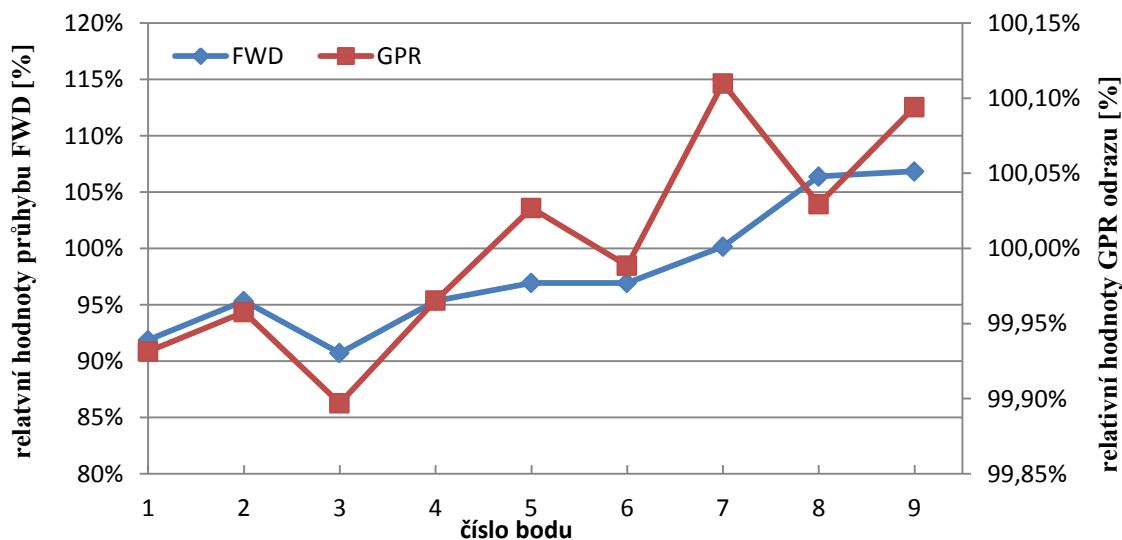


Obrázek 66 Schéma znázorňující umístění a měření FWD na bodech měřících polí

Z těchto důvodů byl tedy také posouzen vztah hodnot poklesu na snímači D210 (resp. D180) a hodnot GPR získaných v místě přibližně v polovině vzdálenosti místa působení rázu a místa snímače, tedy ve vzdálenosti 1m od měřeného bodu. Vzhledem k faktu, že vzdálenost bodů MP1 a MP2 v podélném směru byla právě 1m, byly jako GPR data použity hodnoty získané měření na bodě následujícím. Korelační koeficient pro body MP1 byl  $R=0,69$  (D210) a pro body na ose MP2  $R=0,82$  (D180). Uvedené závislosti ukazují dva následující grafy. Obrázek 67 ukazuje vztah mezi poklesy FWD na snímači D210 a GPR odrazy na bodech MP1 a obrázek 68 ukazuje vztah mezi poklesy FWD na snímači D180 a GPR odrazy na souvisejících bodech osy MP2.



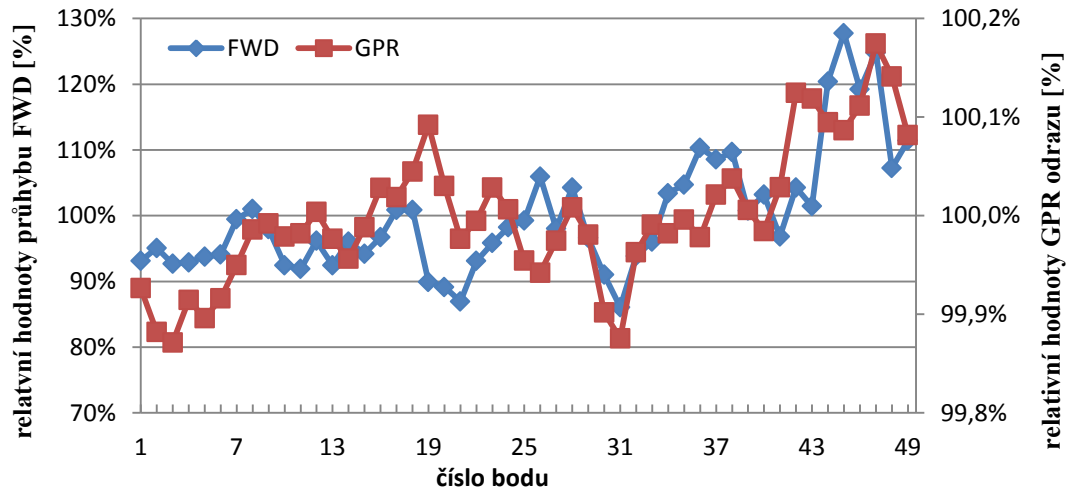
Obrázek 67 Vztah mezi poklesy FWD na snímači D210 a GPR odrazy na souvisejících bodech MP1



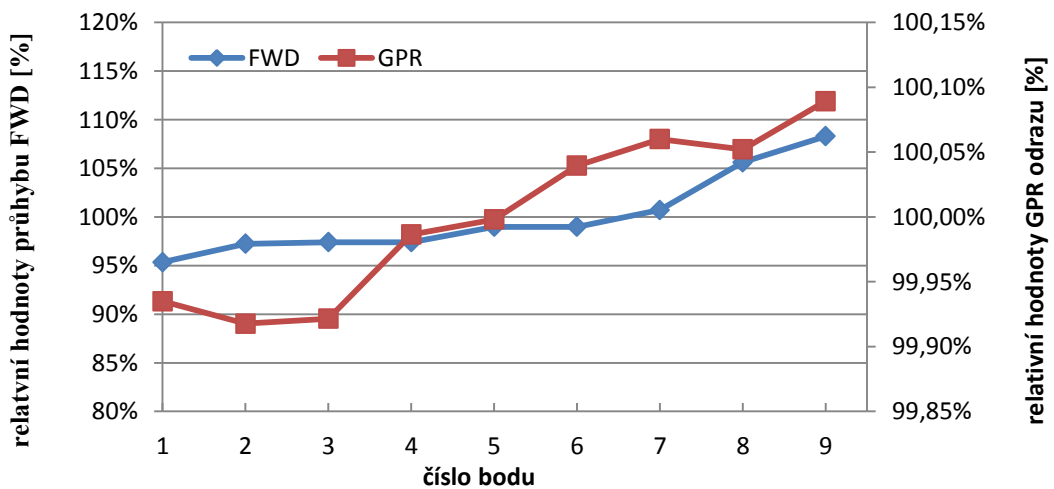
Obrázek 68 Vztah mezi poklesy FWD na snímači D180 a GPR odrazy na souvisejících bodech osy MP2

Podobnou úvahou byly poté porovnány hodnoty poklesů měřených na snímači D90 a hodnot GPR stanovených jako průměr z hodnot měřených na příslušném bodě a bodě následujícím (tedy vzdáleném 1m). Korelace v tomto případě je na MP1 rovna  $R=0,64$  a na bodech osy SF2  $R=0,82$ . Uvedené závislosti ukazují dva následující grafy. Vztah mezi poklesy FWD na snímači D90 a GPR odrazy na souvisejících bodech MP 1 ukazuje obrázek

69 a vztah mezi poklesy FWD na snímači D90 a GPR odrazy na souvisejících bodech osy MP2 ukazuje obrázek 70.



Obrázek 69 Vztah mezi poklesy FWD na snímači D90 a GPR odrazy na souvisejících bodech MP 1

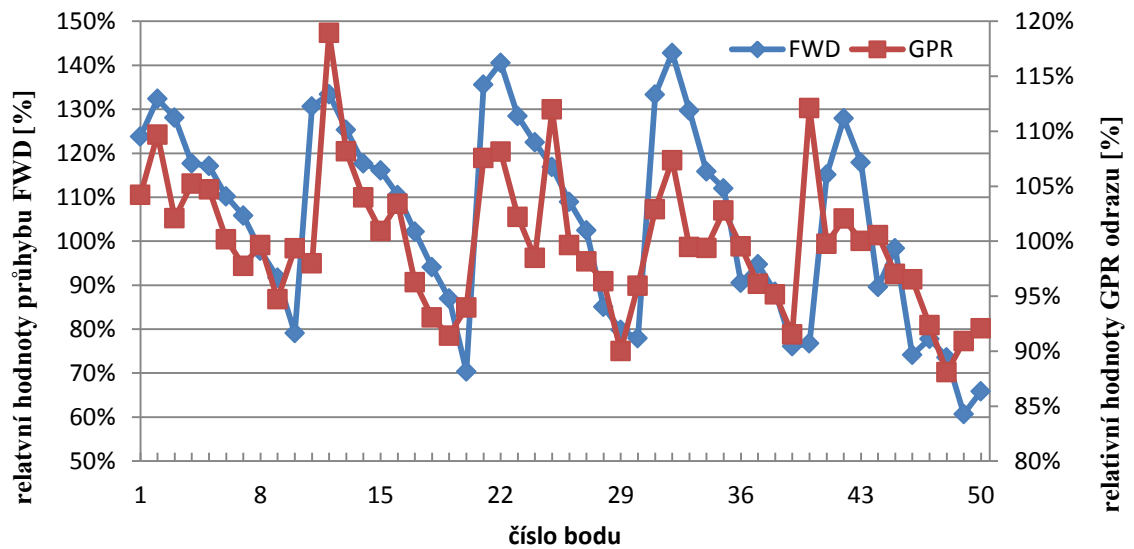


Obrázek 70 Vztah mezi poklesy FWD na snímači D90 a GPR odrazy na souvisejících bodech osy MP2

### 14.7.2 Posouzení odrazů od rozhraní konstrukčních vrstev

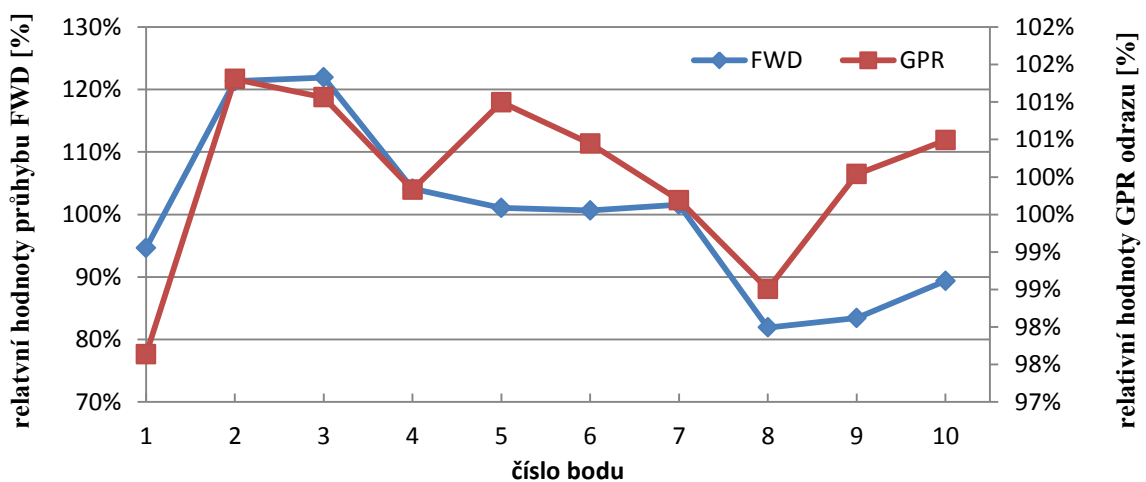
Dále byly s poklesy FWD porovnány také hodnoty amplitud na jednotlivých konstrukčních rozhráních. Na obrázku 71 je znázorněna závislost velikosti odrazu GPR

signálu na rozhraní první a druhé vrstvy a převrácené hodnoty poklesu měřené na snímači D0 na MP1. Korelace byla v tomto případě rovna  $R=0,70$ .



**Obrázek 71** Vztah mezi inverzní hodnotou poklesů FWD na snímači D0 a GPR odrazy na rozhraní první a druhé konstrukční vrstvy – měřeno na bodech MP1

Na obrázku 72 je pak znázorněna závislost velikosti odrazu GPR signálu na povrchu vozovky a převrácené hodnoty poklesu měřené na snímači D0 na ose MP2.



**Obrázek 72** Vztah mezi inverzní hodnotou poklesů FWD na snímači D0 a GPR odrazy na rozhraní první a druhé konstrukční vrstvy – měřeno na bodech osy MP2

## 14.8 Závěr

Výše uvedené výsledky potvrzují závěry uvedené v citovaných studiích zmíněných v teoretických částech této kapitoly. Byla potvrzena jak závislost EM a mechanických vlastností materiálu vozovek PK, tak vztah mezi naměřenými hodnotami průhybů vyvozených zařízením FWD a daty z měření pomocí GPR. Po zpracování dat byly s ohledem na výše zmíněné předpoklady a podmínky měření získány poměrně vysoké hodnoty korelačních koeficientů mezi měřeními uvedenými metodami. Dle názoru autora práce potvrzují tyto výsledky užitečnost a oprávněnost použití GPR, nejen jako nástroje pro měření tloušťky konstrukčních vrstev vozovek PK, ale i jako nástroje pro určení míst, vhodných pro provedení měření pomocí FWD.

Výsledky měření a určené závislosti uvedené v této kapitole se vztahují pouze k použité GPR sestavě s anténou o centrální frekvenci 2GHz, použitému zařízení FWD a konkrétním testovaným konstrukcím. Pro širší využití těchto výsledků v případě měření s jinými sestavami GPR a FWD by bylo nutné provést srovnávací měření obou druhů zařízení a stanovit kalibrační koeficienty. Rovněž při použití tohoto modelu na jiných konstrukcích PK by muselo dojít k jeho modifikacím. Toto bude předmětem dalšího výzkumu.

Navazující výzkum bude zaměřen na vytvoření pokročilejších technik zpracování dat s cílem nalezení a využití výše popsaných vztahů na různých konstrukcích PK a při měření s různými typy GPR a FWD zařízení. Dále bude pozornost věnována detailnějšímu vyšetření uvedených vnějších vlivů a podmínek měření (např. měření za odlišných klimatických podmínek). Toto může, dle názoru autora, vést k částečnému nahrazení FWD měření měřeními GPR a tedy ke zjednodušení a zrychlení diagnostiky vozovek a snížení požadavku na dopravní omezení při jejím provádění,

## 15 Závěr disertační práce

Cílem této práce bylo zpracování problematiky implementace GPR především do procesu diagnostiky PK. Práce byla zaměřena na použití GPR jako nástroje pro doplnění a případně nahrazení stávajících metod diagnostiky PK, především pak zařízení FWD.

V práci jsou nastíněny principy a historie této technologie, jejichž studium bylo součástí přípravy pro praktickou část práce. Práce obsahuje také popis aplikací technologie GPR jednak v oblasti diagnostiky PK, ale i v dalších oblastech dopravního stavitelství, které se částečně překrývají s diagnostikou PK.

V praktické části jsou pak popsána laboratorní měření a měření in-situ s konkrétní sestavou GPR, jejíž účel a parametry vymezily možné konkrétní dílčí aplikace a cíle této části. Na základě poznatků zpracovaných v teoretické části a vlastních měření uvedených v části praktické jsou pak formulovány závěry a doporučení pro koncového uživatele GPR technologie převážně v oblasti diagnostiky pozemních komunikací.

Práce obsahuje posouzení možností využití GPR v oblasti diagnostiky PK. Prováděny byly testy, jejichž parametry nebyly v době tvorby práce zcela definovány a jejichž sjednocení je jedním z cílů akce TU1208 programu COST v rámci rámcového programu EU Horizon 2020, do které se autor zapojil. Konkrétně se jednalo o testy dlouhodobé a testy krátkodobé stability a testy linearity. Obecně doporučovaná doba 15 až 20 minut pro ustálení signálu po zapnutí aparatury se ukázala v případě dostupné aparatury jako nedostačující. Na základě provedených testů byla tedy stanovena minimální doba 40 minut od zapnutí systému. Při provádění testů dlouhodobé stability se také ukázala proměnlivost určení polohy povrchového rozhraní v přibližně prvních 15 minutách od spuštění systému.

V jedné z kapitol praktické části práce se autor práce zabýval možnostmi využití dostupné GPR sestavy pro stanovení relativní permitivity a určení rychlosti šíření signálu v prostředí. Testy, které měli za cíl posoudit dostupné metody stanovení rychlosti šíření GPR signálu, resp. relativní permitivitu materiálů (písky a šterky) byly prováděny především v laboratoři při použití IBC kontejnerů. Jednalo se o metodu využívající hyperbolické odrazy, metodu se známou polohou cíle a RCM. Metoda RCM, která se vzhledem k dostupnému vybavení a zaměření práce jevila jako nejvhodnější, byla upravena s cílem zpřesnění výstupů.

Navrženou úpravou (porovnání se skutečnými hodnotami) došlo k zpřesnění RCM metody při určení relativních permitivit testovaných materiálů, tzn. ke zpřesnění určení rychlosti šíření signálu GPR v těchto materiálech a ve výsledku tedy k přesnějšímu určení polohy detekovaných rozhraní. Lze tedy předpokládat obdobné zpřesnění při použití tohoto postupu na konstrukčních vrstvách PK. Nevýhodou této modifikace však byla nutnost provádění náročných laboratorních měření.

Hlavního cíle práce, tedy ověření možnosti použití technologie GPR spolu se zařízením FWD, resp. závislosti výstupů GPR a FWD měření, bylo dosaženo kombinovaným měřením uvedených zařízení na měřících polích. Uvedené výsledky potvrzují závěry uvedené v citovaných studiích. Byla potvrzena závislost EM a mechanických vlastností materiálu vozovek PK, konkrétně vztah mezi naměřenými hodnotami průhybů vyvozených zařízením FWD a daty z měření pomocí GPR. Po zpracování dat byly s ohledem na zmíněné předpoklady a podmínky měření získány poměrně vysoké hodnoty korelačních koeficientů mezi měřeními uvedenými metodami. Dle názoru autora práce potvrzují tyto výsledky užitečnost a oprávněnost použití GPR, nejen jako nástroje pro měření tloušťky konstrukčních vrstev vozovek PK, ale i jako nástroje pro určení míst, vhodných pro provedení měření pomocí FWD.

Navazující výzkum bude na základě dat a výsledků uvedených v této práci zaměřen na vytvoření semiempirického modelu pro stanovení modulů přetvárnosti z GPR měření a tedy na možnost částečného nahrazení zařízení FWD zařízením GPR. Dále bude obdobným způsobem prováděno kombinované měření GPR s dalšími nedestruktivními technologiemi používanými pro diagnostiku PK s cílem zjednodušení a zkvalitnění diagnostiky PK pomocí GPR a ke zvýšení její komplexnosti.

## 16 Použitá literatura

- [1] CONYERS, Lawrence B. *Ground-penetrating radar for archaeology*. Walnut Creek, CA: AltaMira Press, 2004. ISBN 0-7591-0772-6.
- [2] LAHOUAR, Samer. *Development of data analysis algorithms for interpretation of ground penetrating radar data* [online]. B.m., 2003 [vid. 2014-04-05]. Virginia Polytechnic Institute and State University. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10242003-162114/>
- [3] LOULIZI, Amara. *Development of ground penetrating radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment* [online]. B.m., 2001 [vid. 2014-04-04]. Virginia Polytechnic Institute and State University. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02062001-220414/>
- [4] DE BOLD, Robert Paul. *Non-destructive evaluation of railway trackbed ballast* [online]. Edinburgh, 2011 [vid. 2014-04-05]. School of Engineering University of Edinburgh. Dostupné z: <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/5027>
- [5] PALBA.CZ .Portál [online]. [vid. 2014-09-15]. Dostupné z: <http://www.palba.cz/>
- [6] OLHOEFT, G.R. Applications and frustrations in using ground penetrating radar. *IEEE aerospace and electronic systems magazine* [online]. 2002, **17**(2), 12–20. ISSN 0885-8985. Dostupné z: doi:10.1109/62.987130
- [7] MATULA, RADEK. *Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem* [online]. Brno, 2013. Disertační práce. Univerzita Pardubice. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/54072>
- [8] NASA [online]. [vid. 2014-09-15]. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/>
- [9] LOIZOS, Andreas. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2007, **40**(2), 147–157. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2006.09.001
- [10] SAARENKETO, Timo. *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys*. Oulu, 2006. University of Oulu.
- [11] WANG, Zhe Wendy. Automatic Detection of Bridge Deck Condition From Ground Penetrating Radar Images. *IEEE transactions on automation science and engineering* [online]. 2011, **8**(3), 633–640. ISSN 1545-5955. Dostupné z: doi:10.1109/TASE.2010.2092428
- [12] *Šíření rádiových vln :: Slovník pojmů a zkratek :: Vzdělání a zábava* [online]. [vid. 2014-09-21]. Dostupné z: <http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/84604/start/-1>

- [13] BANCROFT, Stuart W. *Optimizing the imaging of multiple frequency GPR datasets using composite radargrams: An example from Santa Rosa Island, Florida* [online]. B.m., 2010 [vid. 2016-07-06]. University of South Florida. Dostupné z: <http://www.academia.edu/download/32948116/thesis.pdf>
- [14] NURUL JIHAN FARHAH BOSTANUDIN. *Computational Methods for Processing Ground Penetrating Radar Data*. Portsmouth, 2013. University of Portsmouth.
- [15] KIMBERLY, MARIE BELLI. *Ground penetrating radar bridge deck investigations using computational modeling*. Boston, Massachusetts, 2008. Northeastern University.
- [16] DI PRINZIO, Monica. Application of GPR to the monitoring of river embankments. *Journal of applied geophysics* [online]. 2010, **71**(2–3), 53–61. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2010.04.002
- [17] NI, Sheng-Huoo. Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete wavelet transform. *Computers and geotechnics* [online]. 2010, **37**(4), 440–448. ISSN 0266-352X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compgeo.2010.01.003
- [18] PLATI, Christina a Andreas LOIZOS. Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2013, **97**, 3–10. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2013.04.007
- [19] GEHRIG, Michael D., Derek V. MORRIS a John T. BRYANT. Ground Penetrating Radar for Concrete Evaluation Studies. *Technical Presentation Paper for Performance Foundation Association*. 2004, 197–200.
- [20] GROTE, K. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of applied geophysics* [online]. 2003, **57**(2). ISSN 0926-9851. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09269851/57/2>
- [21] HYSLIP, James P., Stanley S. SMITH, Gary R. OLHOEFT a Ernest T. SELIG. Assessment of railway track substructure condition using ground penetrating radar. In: *2003 Annual Conference of AREMA* [online]. 2003 [vid. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://205.252.224.180/files/library/2003\\_Conference\\_Proceedings/0010.pdf](http://205.252.224.180/files/library/2003_Conference_Proceedings/0010.pdf)
- [22] UDUWAWALA, Disala, KUNGLIGA TEKNISKA HÖGSKOLAN a AVDELNINGEN FÖR ELEKTROTEKNISK TEORI OCH KONSTRUKTION. *A comprehensive study of resistor-loaded planar dipole antennas for ground penetrating radar applications*. Stockholm, 2006. Division of Electromagnetic Engineering, School of Electric Engineering, Royal Institute of Technology.
- [23] PÉREZ-GRACIA, V., R. GONZÁLEZ-DRIGO, D. DI CAPUA a L. G. PUJADES. Experimental analysis of the resolution in shallow GPR survey. In: Manfred EHLERS a Ulrich MICHEL, ed. [online]. 2007, s. 67492M–67492M–11 [vid. 2016-06-10]. Dostupné z: doi:10.1117/12.737761

- [24] HUGENSCHMIDT, J. *Geophysics and non - destructive testing for transport infrastructure, with special emphasis on ground penetrating radar*. B.m., 2010. University of St. Gallen.
- [25] NEAL, Adrian. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews* [online]. 2004, **66**(3–4), 261–330. ISSN 0012-8252. Dostupné z: doi:10.1016/j.earscirev.2004.01.004
- [26] EICHLER, Filip. *Experimentální ověření vlastností silničních materiálů* [online]. Praha, 2013 [vid. 2014-03-09]. Disertační práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/15541>
- [27] GPR TEAM FALL WORKSHOP2011. Evaluating The Health Of Structures \_with Microwaves. In: *A brief introduction to GPR and \_Radar Interferometry*. B.m. 2011.
- [28] TILLARD, Sylvie. Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination. *Journal of applied geophysics* [online]. 1995, **33**(1–3), 77–91. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/0926-9851(95)90031-4
- [29] GALAGEDARA, L. W. An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement. *Hydrological processes* [online]. 2003, **17**(18), 3615–3628. ISSN 0885-6087. Dostupné z: doi:10.1002/hyp.1351
- [30] NAKASHIMA, Yuichi. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections. *Journal of applied geophysics* [online]. 2001, **47**(3–4), 241–249. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/S0926-9851(01)00068-4
- [31] SEAN R SHIEH, Wajahat Ali. Exploring Shallow Subsurface of Mars and Introducing the GPR Technique for Planetary Sciences(Exploring Mars beyond the Surface Features). *Journal of Geology & Geosciences* [online]. 2014, **03**(01) [vid. 2014-08-18]. ISSN 23296755. Dostupné z: doi:10.4172/2329-6755.1000142
- [32] CAUSSE, Emmanuel. Model-based automatic dense velocity analysis of GPR field data for the estimation of soil properties. *Journal of geophysics and engineering* [online]. 2006, **3**(2), 169–176. ISSN 1742-2132. Dostupné z: doi:10.1088/1742-2132/3/2/008
- [33] STRANGE, A D. A systematic method for characterizing the time-range performance of ground penetrating radar. *Journal of geophysics and engineering* [online]. 2013, **10**(3), 034001. ISSN 1742-2132. Dostupné z: doi:10.1088/1742-2132/10/3/034001
- [34] *Rules & regulations* [online]. [vid. 2014-08-05]. Dostupné z: [http://www.eurogpr.org/joomla/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=45&Itemid=62](http://www.eurogpr.org/joomla/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=45&Itemid=62)
- [35] *TP 233 GEORADAROVÁ METODA KONSTRUKCÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ*. B.m.: MINISTERSTVO DOPRAVY, Odbor pozemních kom unikací a územního plánu. Praha, červen 2011

- [36] CDV V. V. I. <http://gpr.cdvinfo.cz> - *Publikace a odkazy - Georadar, nástroj pro diagnostiku vozovek* [online]. [vid. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://gpr.cdvinfo.cz/publikace-a-odkazy/>
- [37] BENEDETTO, A. Reliability of signal processing technique for pavement damages detection and classification using ground penetrating radar. *IEEE sensors journal* [online]. 2005, **5**(3), 471–480. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2005.846176
- [38] PINEL, N. *Influence of layer roughness for road survey by ground penetrating radar at nadir: theoretical study*. 2011
- [39] JOL, Harry M., ed. *A Mobile Android Application for Road and Pavement Inspection by GPR Data Processing*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. ISBN 978-0-444-53348-7.
- [40] LAHOUAR, Samer. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2008, **41**(2), 69–81. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2007.09.001
- [41] VARELA-GONZÁLEZ, María, Mercedes SOLLA, Joaquín MARTÍNEZ-SÁNCHEZ a Pedro ARIAS. A semi-automatic processing and visualisation tool for ground-penetrating radar pavement thickness data. *Automation in Construction* [online]. 2014, **45**, 42–49. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2014.05.004
- [42] PLATI, Christina. Investigating In Situ Properties of Recycled Asphalt Pavement with Foamed Asphalt as Base Stabilizer. *Advances in civil engineering* [online]. 2010, **2010**(911), 1–10. ISSN 1687-8086. Dostupné z: doi:10.1155/2010/565924
- [43] FINAL REPORT. *Non-Destructive Measurement of Pavement Layer Thickness*. B.m.: Infrasense, Inc. 25. duben 2003
- [44] FAUCHARD, C. GPR performances for thickness calibration on road test sites. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2003, **36**(2), 67–75. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/S0963-8695(02)00090-7
- [45] LI, Jing, Huichun XING, Ying WANG, Chienping KAO a Richard LIU. A Ground-wave Technique for Pavement Permittivity and Thickness Estimation from GPR Data [online]. nedatováno [vid. 2016-06-10]. Dostupné z: <http://piers.org/piersproceedings/download.php?file=cGllcnMyMDA3QmVpamluZ3w0UDJiXzE4MTIucGRmfDA2MDkwNzEwMjI1NA==>
- [46] BENEDETTO, Andrea, Fabio TOSTI, Giuseppe SCHETTINI a Célestin TWIZERE. Evaluation of geotechnical stability of road using GPR. In: *Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2011 6th International Workshop on* [online]. B.m.: IEEE, 2011, s. 1–6 [vid. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5963858](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5963858)

- [47] F. TOSTI, S. ADABI, L. PAJEWSKI, G. SCHETTINI, A. BENEDETTO. *Large-Scale Analysis of Dielectric and Mechanical Properties of Pavement using GPR and LFWD*. B.m.: Department of Engineering, Roma Tre University. 2014
- [48] COLAGRANDE, Sandro. Ground Penetrating Radar Assessment of Flexible Road Pavement Degradation. *International journal of geophysics* [online]. 2011, **16**(3), 1–11. ISSN 1687-885X. Dostupné z: doi:10.1155/2011/989136
- [49] KRYSIŃSKI, Lech a Jacek SUDYKA. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2013, **97**, 27–36. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2013.03.010
- [50] DIAMANTI, Nectaria. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of applied geophysics* [online]. 2012, **81**, 106–116. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2011.09.006
- [51] BENEDETTO, Andrea. A three dimensional approach for tracking cracks in bridges using GPR. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2013, **97**, 37–44. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2012.12.010
- [52] SOLLA, M., S. LAGÜELA, H. GONZÁLEZ-JORGE a P. ARIAS. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT & E International* [online]. 2014, **62**, 55–65. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2013.11.006
- [53] STRYK, Josef. Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Journal of applied geophysics* [online]. 2013, **97**, 11–26. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2013.06.013
- [54] MARECOS, Vania, Simona FONTUL, Maria L. ANTUNES a Mercedes SOLLA. Assessment of a concrete pre-stressed runway pavement with ground penetrating radar. In: *Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2015 8th International Workshop on* [online]. B.m.: IEEE, 2015, s. 1–4 [vid. 2016-06-10]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=7292635](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7292635)
- [55] GROTE, Katherine. Experimental estimation of the GPR groundwave sampling depth EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE GPR GROUNDWAVE. *Water resources research* [online]. 2010, **46**(10), n-a-n/a. ISSN 0043-1397. Dostupné z: doi:10.1029/2009WR008403
- [56] STEELMAN, Colby M. a Anthony L. ENDRES. Assessing vertical soil moisture dynamics using multi-frequency GPR common-midpoint soundings. *Journal of Hydrology* [online]. 2012, **436–437**, 51–66. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2012.02.041
- [57] SCHMALZ, B. Analyses of soil water content variations and GPR attribute distributions. *Journal of hydrology (Amsterdam)* [online]. 2002, **267**(3–4), 217–226. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(02)00152-X

- [58] LUNT, I.A. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of hydrology (Amsterdam)* [online]. 2005, **307**(1–4), 254–269. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2004.10.014
- [59] GALAGEDARA, L.W. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of hydrology (Amsterdam)* [online]. 2005, **301**(1–4), 182–197. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.031
- [60] MARCIN SŁOWIK. *GPR and aerial imageries to identify the recent historical course of the Odra River and spatial extent of Obrzańskie Lake, altered by hydro-technical works - Springer* [online]. [vid. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-012-2215-9/fulltext.html>
- [61] *IDS GeoRadar* [online]. 2014 [vid. 2014-04-13]. Dostupné z: <https://www.idscorporation.com/georadar>
- [62] MCMECHAN, George A. Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas. *Journal of applied geophysics* [online]. 1998, **39**(1), 1–10. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/S0926-9851(98)00004-4
- [63] TOSTI, Fabio, Claudio PATRIARCA, Evert SLOB, Andrea BENEDETTO a Sébastien LAMBOT. Clay content evaluation in soils through GPR signal processing. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2013, **97**, 69–80. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2013.04.006
- [64] VANDENBERGHE, J. Ground penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands. *Sedimentary geology* [online]. 1999, **128**(3–4), 245–270. ISSN 0037-0738. Dostupné z: doi:10.1016/S0037-0738(99)00072-X
- [65] MAIN, Derek J. The application of Ground Penetrating Radar as a mapping technique at vertebrate fossil excavations in the Cretaceous of Texas. *Cretaceous research* [online]. 2003, **24**(3), 335–345. ISSN 0195-6671. Dostupné z: doi:10.1016/S0195-6671(03)00047-8
- [66] STRANGE, A.D. Application of Ground Penetrating Radar Technology for Near-Surface Interface Determination in Coal Mining. In: [online]. 2005, s. 701–704. ISBN 1520-6149. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1416400>
- [67] DÉROBERT, Xavier. GPR and seismic imaging in a gypsum quarry. *Journal of applied geophysics* [online]. 2000, **45**(3), 157–169. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/S0926-9851(00)00025-2
- [68] KADIOGLU, Selma. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualisation. *Journal of applied geophysics* [online]. 2008, **64**(3–4), 109–114. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2008.01.001

- [69] TOSHIOKA, Tetsuma a Hideaki MIYAMOTO. Acquisition of ground penetrating radar data to detect lava tubes: preliminary results on the Komoriana cave at Fuji volcano in Japan. *Bulletin of engineering geology and the environment* [online]. 2003, **62**(4), 281–288. ISSN 1435-9529. Dostupné z: doi:10.1007/s10064-002-0182-1
- [70] RUST, A.C. Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks. *Journal of volcanology and geothermal research* [online]. 1999, **91**(1), 79–96. ISSN 0377-0273. Dostupné z: doi:10.1016/S0377-0273(99)00055-4
- [71] LAI, W.L. Characterization of concrete properties from dielectric properties using ground penetrating radar. *Cement and concrete research* [online]. 2009, **39**(8), 687–695. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2009.05.004
- [72] KALOGEROPOULOS, ALEXIS. *Non-Destructive Determination of Chloride and Water Content in Concrete Using Ground Penetrating Radar* [online]. B.m.: EPFL (Lausanne). 2012 [vid. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://data.datacite.org/10.5075/epfl-thesis-5354>
- [73] *MALA GPR Australia* [online]. [vid. 2014-08-06]. Dostupné z: <http://malagpr.com.au/#prettyPhoto>
- [74] BARNES, Christopher L. Improved concrete bridge deck evaluation using GPR by accounting for signal depth–amplitude effects. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2008, **41**(6), 427–433. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2008.03.005
- [75] COTIC, Patricia. Effect of moisture on the reliability of void detection in brickwork masonry using radar, ultrasonic and complex resistivity tomography. *Materials and structures* [online]. 2013, **46**(10), 1723–1735. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-0011-3
- [76] SANTOS-ASSUNÇÃO, Sonia, Vega PEREZ-GRACIA, Oriol CASELLES, Jaume CLAPES a Victor SALINAS. Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies. *Remote Sensing* [online]. 2014, **6**(9), 8220–8237. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs6098220
- [77] HUGENSCHMIDT, J. a A. KALOGEROPOULOS. The inspection of retaining walls using GPR. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2009, **67**(4), 335–344. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2008.09.001
- [78] LAI, W.L. Using ground penetrating radar and time–frequency analysis to characterize construction materials. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2011, **44**(1), 111–120. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2010.10.002
- [79] VLADOV, M. L. a M. S. SUDAKOVA. Dielectric measurements using georadar: A laboratory experiment. *Moscow University Geology Bulletin* [online]. 2009, **64**(5), 324–327. ISSN 0145-8752, 1934-8436. Dostupné z: doi:10.3103/S014587520905007X

- [80] TRELA, Ch, Th KIND a M. SCHUBERT. Detection of air voids in concrete by radar in transmission mode. In: *Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2015 8th International Workshop on* [online]. B.m.: IEEE, 2015, s. 1–4 [vid. 2016-06-10]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=7292650](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7292650)
- [81] MATURANA, Raúl Mínguez, Begoña Duclos BAUTISTA, Álvaro Andrés AGUACIL, Miguel Rodríguez PLAZA a Senén Sandoval CASTAÑO. Preventive Maintenance of Railway Infrastructures using GPR–Ground Penetrating Radar [online]. 2011, **2011** [vid. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.railway-research.org/IMG/pdf/g7\\_minguez\\_maturana\\_raul.pdf](http://www.railway-research.org/IMG/pdf/g7_minguez_maturana_raul.pdf)
- [82] CARPENTER, D, P.J JACKSON a A JAY. Enhancement of the GPR method of railway trackbed investigation by the installation of radar detectable geosynthetics. *NDT & E International* [online]. 2004, **37**(2), 95–103. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2003.06.003
- [83] LI, Dingqing, David READ, Hugh THOMPSON, Ted SUSSMANN, Russell MCDANIEL, Norfolk Southern RAILWAY a V. A. ROANOKE. Evaluation of Ground Penetrating Radar Technologies for Assessing Track Substructure Conditions [online]. nedatováno [vid. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.arena.org/files/library/2010\\_Conference\\_Proceedings/Evaluation\\_of\\_Ground\\_Penetrating\\_Radar\\_Technologies\\_for\\_Assessing\\_Track\\_Substructure\\_Conditions.pdf](http://www.arena.org/files/library/2010_Conference_Proceedings/Evaluation_of_Ground_Penetrating_Radar_Technologies_for_Assessing_Track_Substructure_Conditions.pdf)
- [84] SHAO, Wenbin, Abdesselam BOUZERDOUM, Son Lam PHUNG, Lijun SU, Buddhima INDRARATNA a Cholachat RUJIKIATKAMJORN. Automatic Classification of Ground-Penetrating-Radar Signals for Railway-Ballast Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2011, **49**(10), 3961–3972. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2011.2128328
- [85] SHIHAB, S., O. ZAHRAN a W. AL-NUAIMY. Time-frequency characteristics of ground penetrating radar reflections from railway ballast and plant. In: [online]. B.m.: IEEE, 2002, s. 8 [vid. 2016-06-10]. ISBN 978-0-7803-7618-2. Dostupné z: doi:10.1109/HFSC.2002.1088424
- [86] NARAYANAN, Ram M. Railroad track modulus estimation using ground penetrating radar measurements. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2004, **37**(2), 141–151. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2003.05.003
- [87] *POKYNY PRO POUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH GEOFYZIKÁLNÍCH METOD V DIAGNOSTICE A PRŮZKUMU TĚLESA ŽELEZNIČNÍHO SPODKU*. B.m.: Správa železniční dopravní cesty s. o., České dráhy a. s., účinnost od 1. 1. 2006
- [88] PETTINELLI, E. GPR Response From Buried Pipes: Measurement on Field Site and Tomographic Reconstructions. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* [online]. 2009, **47**(8), 2639–2645. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2009.2018301

- [89] AYALA-CABRERA, David. Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. *Journal of applied geophysics* [online]. 2011, **75**(4), 679–686. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2011.09.024
- [90] SHAABAN, Fathy A. Ground-penetrating radar exploration for ancient monuments at the Valley of Mummies -Kilo 6, Bahariya Oasis, Egypt. *Journal of applied geophysics* [online]. 2009, **68**(2), 194–202. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2008.11.009
- [91] BARONE, P. M. Ground-penetrating Radar in the Regio III (Pompeii, Italy): Archaeological Evidence GPR Investigations in Pompeii. *Archaeological prospection* [online]. 2011, **18**(3), n-a-n/a. ISSN 1075-2196. Dostupné z: doi:10.1002/arp.405
- [92] DAMIATA, Brian N., John M. STEINBERG, Douglas J. BOLENDER a Guðný ZOËGA. Imaging skeletal remains with ground-penetrating radar: comparative results over two graves from Viking Age and Medieval churchyards on the Stóra-Seyla farm, northern Iceland. *Journal of Archaeological Science* [online]. 2013, **40**(1), 268–278. ISSN 03054403. Dostupné z: doi:10.1016/j.jas.2012.06.031
- [93] ORLANDO, Luciana a Beatrice RENZI. Non-destructive Testing for the Characterization of Moai Statues (Easter Island, Chile): Combined Georadar and Seismic Tomography Surveys at Moai. *Archaeological Prospection* [online]. 2013, **20**(1), 23–37. ISSN 10752196. Dostupné z: doi:10.1002/arp.1436
- [94] YALÇINER, C.Ç. New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western Turkey) using GPR method. *Journal of archaeological science* [online]. 2009, **36**(8), 1680–1689. ISSN 0305-4403. Dostupné z: doi:10.1016/j.jas.2008.12.016
- [95] BRANDT, Ola. Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: A case examination on Svalbard. *Remote sensing of environment* [online]. 2007, **111**(2–3), 212–227. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2007.03.025
- [96] GALLEY, R.J. Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness. *Cold regions science and technology* [online]. 2009, **57**(1), 29–38. ISSN 0165-232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2009.01.003
- [97] STEPHANI, Eva, Daniel FORTIER, Yuri SHUR, Richard FORTIER a Guy DORÉ. A geosystems approach to permafrost investigations for engineering applications, an example from a road stabilization experiment, Beaver Creek, Yukon, Canada. *Cold Regions Science and Technology* [online]. 2014, **100**, 20–35. ISSN 0165232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2013.12.006
- [98] GUO, Zhenwei, Hefeng DONG a Jianping XIAO. Detection of Permafrost Subgrade Using GPR: A Case Examination on Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geoscience and Environment Protection* [online]. 2015, **03**(05), 35–47. ISSN 2327-4336, 2327-4344. Dostupné z: doi:10.4236/gep.2015.35005

- [99] JAEDICKE, Christian. Snow Mass Quantification and Avalanche Victim Search by Ground Penetrating Radar. *Surveys in geophysics* [online]. 2003, **24**(5/6), 431–445. ISSN 0169-3298. Dostupné z: doi:10.1023/B:GEOP.0000006075.80413.69
- [100] INSTANES, Arne. Location of avalanche victims with ground-penetrating radar. *Cold regions science and technology* [online]. 2004, **38**(1), 55–61. ISSN 0165-232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2003.08.002
- [101] MONNIER, Sébastien. Structure and genesis of the Thabor rock glacier (Northern French Alps) determined from morphological and ground-penetrating radar surveys. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)* [online]. 2011, **134**(3–4), 269–279. ISSN 0169-555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2011.07.004
- [102] WINKELBAUER, Jennifer. Methods of surveying the thickness of humous horizons using ground penetrating radar (GPR): an example from the Garmisch-Partenkirchen area of the Northern Alps. *European journal of forest research* [online]. 2011, **130**(5), 799–812. ISSN 1612-4669. Dostupné z: doi:10.1007/s10342-010-0472-2
- [103] YOKOTA, Yuya. Estimation of biomass of tree roots by GPR with high accuracy positioning system. In: [online]. B.m.: IEEE, 2011, s. 190–193. ISBN 2153-6996. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6034618>
- [104] DOOLITTLE, James A. The search for graves with ground-penetrating radar in Connecticut. *Journal of archaeological science* [online]. 2010, **37**(5), 941–949. ISSN 0305-4403. Dostupné z: doi:10.1016/j.jas.2009.11.027
- [105] A. BHUIYAN. Anti-personnel Mine Detection and Classification Using GPR Image. In: [online]. 2006, s. 1082–1085. ISBN 1051-4651. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1699396>
- [106] KHAN, Umar S. Detection of landmines and underground utilities from acoustic and GPR images with a cepstral approach. *Journal of visual communication and image representation* [online]. 2010, **21**(7), 731–740. ISSN 1047-3203. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvcir.2010.05.007
- [107] *Global military army magazine defence security industry technology news exhibition world land forces - Army Recognition* [online]. [vid. 2014-08-06]. Dostupné z: <http://www.armyrecognition.com/>
- [108] RHEBERGEN, Jan B. a Jan RHEBERGEN. Mine-Detection Test Facilities at TNO-FEL Site “Waalsdorp”: Some Examples of Results Obtained with an Array Based GPR System. *Subsurface sensing technologies and applications : an international journal* [online]. 2002, **3**(4), 369–385. ISSN 1566-0184. Dostupné z: doi:10.1023/A:1020369515478

- [109] AHMED, M., R. TAREFDER a A. MAJI. Variation of FWD modulus due to incorporation of GPR predicted layer thicknesses. In: *Ground Penetrating Radar (GPR), 2014 15th International Conference on* [online]. B.m.: IEEE, 2014, s. 345–350 [vid. 2016-09-05]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6970442](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6970442)
- [110] *Sandmeier scientific software for GPR and refraction and reflection seismics* [online]. [vid. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.sandmeier-geo.de/index.html>
- [111] *Roadscanners - Home* [online]. [vid. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.roadscanners.com/>
- [112] LEUCCI, Giovanni. Ground Penetrating Radar: A Useful Tool for Shallow Subsurface Stratigraphy Characterization [online]. nedatováno [vid. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/36318.pdf>
- [113] BENEDETTO, Andrea a Lara PAJEWSKI, ed. *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [vid. 2016-09-05]. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. ISBN 978-3-319-04812-3. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-04813-0>
- [114] BENEDETTO, A. a F. TOSTI. Inferring bearing ratio of unbound materials from dielectric properties using GPR: the case of Runaway Safety Areas. *Airfield Highw. Pavement*. 2013, 1336–1347.
- [115] UZAROWSKI, Ludomir, Michael MAHER a Andrew BALASUNDARAM. Practical Application of GPR to Supplement Data from FWD for Quick Pavement Performance Prediction. In: *Annual Conference of the Canadian Society of Civil Engineers, Toronto, ON* [online]. 2005 [vid. 2016-09-19]. Dostupné z: <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2005/docs/s4/uzarowski.pdf>
- [116] PLATI, Christina, Andreas LOIZOS, Vasilis PAPAVALIIOU a Antonis KALTSOUNIS. Investigating In Situ Properties of Recycled Asphalt Pavement with Foamed Asphalt as Base Stabilizer. *Advances in Civil Engineering* [online]. 2010, **2010**, 1–10. ISSN 1687-8086, 1687-8094. Dostupné z: doi:10.1155/2010/565924
- [117] PICOUX, B., M. TAKARLI a C. PETIT. Non-destructive testing of an experimental pavement. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing* [online]. 2011 [vid. 2016-09-19]. Dostupné z: [https://community-adhel.unilim.fr/file.php/88/Publications/Non\\_Destructive\\_Testing\\_of\\_an\\_Experimental\\_Pavement.PDF](https://community-adhel.unilim.fr/file.php/88/Publications/Non_Destructive_Testing_of_an_Experimental_Pavement.PDF)
- [118] DOMITROVIĆ, Josipa a Tatjana RUKAVINA. Application of GPR and FWD in Assessing Pavement Bearing Capacity. *Romanian Journal of Transport Infrastructure* [online]. 2013, **2(2)** [vid. 2016-09-19]. ISSN 2286-2218. Dostupné z: doi:10.1515/rjti-2015-0015

- [119] AMERI, Mahmoud, Mohammad KASHANI NOVIN a Bahram YOUSEFI. Comparison of the field measurements of asphalt concrete densities obtained by ground-penetrating radar, pavement quality indicator and the borehole coring methods. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2014, **15**(4), 759–773. ISSN 1468-0629, 2164-7402. Dostupné z: doi:10.1080/14680629.2014.909874
- [120] SHANGGUAN, Pengcheng a Imad L. AL-QADI. Calibration of FDTD Simulation of GPR Signal for Asphalt Pavement Compaction Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2015, **53**(3), 1538–1548. ISSN 0196-2892, 1558-0644. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2014.2344858
- [121] SHANGGUAN, Pengcheng, Imad L. AL-QADI a Samer LAHOUAR. Pattern recognition algorithms for density estimation of asphalt pavement during compaction: a simulation study. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2014, **107**, 8–15. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2014.05.001
- [122] PLATI, Christina a Andreas LOIZOS. Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2013, **97**, 3–10. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2013.04.007
- [123] ABDULLAH, RSA Raja, Helmi Zulhaidi BIN MOHD SHAFRI a Mardeni Bin ROSLEE. Data analysis of road pavement density measurements using Ground Penetrating Radar (GPR). In: *Computer and Communication Engineering, 2008. ICCCE 2008. International Conference on* [online]. B.m.: IEEE, 2008, s. 732–737 [vid. 2016-11-24]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4580701](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4580701)
- [124] LEUCCI, Giovanni. Ground Penetrating Radar: The Electromagnetic Signal Attenuation and Maximum Penetration Depth. *Scholarly Research Exchange* [online]. 2008, **2008**, 1–7. ISSN 1687-8299, 1687-8302. Dostupné z: doi:10.3814/2008/926091
- [125] XAVIER NETO, Pedro a Walter EUGÊNIO DE MEDEIROS. A practical approach to correct attenuation effects in GPR data. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2006, **59**(2), 140–151. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2005.09.002
- [126] ECONOMOU, Nikos a George KRITIKAKIS. Attenuation analysis of real GPR wavelets: The equivalent amplitude spectrum (EAS). *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2016, **126**, 13–26. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2016.01.005
- [127] EKBOTE, Aditya. *Feasibility Study of Non-Contact , High-Speed Elastic Property Measurement of Pavements: Theoretical and Experimental Results*. B.m.: Feasibility Study of Non-Contact , High-Speed Elastic Property Measurement of Pavements: Theoretical and Experimental Results by Aditya Ekbote, Jing Li, Xuemin Chen, and Richard Liu Technical Report 0-4827-1 Project Number: 0-4827, Houston, prosinec 2005

## 17 Publikační činnost doktoranda související s tématem práce

ARTAGAN, S., BORECKÝ, V. History of using GPR, *Sborník konference 6th International Scientific Conference*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. s. 24-29. ISBN 978-80-7395-924-1 (příspěvek ve sborníku)

ARTAGAN, S., BORECKÝ, V. Estimation Methods for Obtaining GPR Signal Velocity, *Sborník konference Third International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering – ACSEE 2015*. Zurich: Institute of Research Engineers and Doctors, 2015. s. 43-47. ISBN: 978-1-63248-065-1 doi: 10.15224/978-1-63248-065-1-40

ARTAGAN, S., BORECKÝ, V., Applicability of GPR on Turkish Railways, 1st International workshop on construction and electricity applications on vocational education (IWCEA 2015): workshop proceeding book, s. 199-212. ISBN:978-975-06-1861-1, Anadolu University, Eskisehir

ARTAGAN S., BORECKÝ, V., Incorporation of Materials' Attenuation Effect into the Relative Permittivity Calculations Using GPR, European Geosciences Union General Assembly 2017, EGU 2017 – 23-28 duben, 2017 (přijato), (prezentace na konferenci)

BORECKÝ, V., HABURAJ, F., ARTAGAN, S., ŘOUTIL, L., Analysis of GPR and FWD Data Dependency Based on Road Test Field Survey, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Print ISSN: 1964-8189 Online ISSN: 2116-7214; (článek v recenzi)