

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta

ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD



PETR BURÁŇ

**VYUŽITÍ GEORADARU V ZÁKLADNÍM A APLIKOVANÉM
GEOLOGICKÉM VÝZKUMU**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Mgr. Ondřej Bábek, Dr.

© 2009 Brno
Petr Buráň
Všechna práva vyhrazena

BIBLIOGRAFICKÁ INFORMACE

Jméno a příjmení autora: Petr Buráň
Název bakalářské práce: Využití georadaru v základním a geologickém výzkumu
Název v angličtině: Application of ground penetrating radar in basic
and applied geological research
Studijní program: Bakalářský
Studijní obor: Geologie
Vedoucí bakalářské práce: doc. Mgr. Ondřej Bábek, Dr.
Rok obhajoby: 2009

Anotace v češtině:

Bakalářská práce popisuje princip a základní pojmy georadaru, možnosti nastavení systémových proměnných před vlastním průzkumem s georadarem, základní metody měření s georadarem, použití georadaru v jednotlivých odvětvích geologie – tektonice, strukturní a environmentální geologii a příklady měření a vyhodnocení průzkumů. Na závěr je prezentována vlastní praktická ukázka měření s georadarem a její vyhodnocení.

Anotace v angličtině:

This bachelor thesis describes the fundamental terms and principles of a ground penetrating radar, setting of system variables before a main survey with the ground penetrating radar, basic methods of measurement and applications of ground penetrating radar in various branches of geology – tectonic, geotectonic and environmental. Measurement and interpretation of surveys are illustrated in another part of the bachelor thesis. In the end, a practical example of a ground penetrating radar survey and its interpretation are presented.

Klíčová slova: georadar, průzkum, vlnová délka, velikost kroku, rozlišení, anténa, podloží

Keywords: GPR, survey, wavelength, stepsize, antenna, samples, subsurface

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením doc. Mgr. Ondřeje Bábka, Dr. Všechna literatura a ostatní prameny, z kterých jsem při tvoření bakalářské práce čerpal, jsou řádně citovány a uvedeny v seznamu použité literatury. Svoluji se zapůjčováním této práce v knihovně PřF MU.

V Brně dne 27. 04. 2009

.....
Petr Buráň

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem mé bakalářské práce bych chtěl poděkovat za cenné podněty a připomínky ke zpracování bakalářské práce svému vedoucímu bakalářské práce doc. Mgr. Ondřeji Bábkovi, Dr. a také vyučujícím předmětů Bakalářský seminář I a II – doc. RNDr. Rostislavu Melicharovi, Dr. a doc. Ing. Jiřímu Faimonovi, Dr. za formální podněty ke stylu a úpravě bakalářské práce.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Petr Buráň

Studijní program : Geologie

Studijní obor : Geologie

Ředitel Ústavu geologických věd PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

Využití georadaru v základním a aplikovaném geologickém výzkumu

Application of ground penetrating radar in basic and applied geological research

Zásady pro vypracování: Úvod: Georadar (ground-penetrating radar, GPR) je přístroj, kterým lze zkoumat struktury pod povrchem Země s hloubkovým dosahem několik desítek metrů. Využívá se v archeologii, stavebnictví a samozřejmě v základní i aplikované geologii. Existuje celá řada typů GPR a různých technik průzkumu. Cíle: Charakterizovat podstatu georadarového měření, technické parametry, podmínky a meze měření, interpretaci získaných dat a využití GPR v základním geologickém výzkumu. Provést cvičná měření georadarem na 2 vybraných profilech a pokusit se o jejich interpretaci. Metody: Převážná část práce je rešeršního charakteru (podmínkou je znalost angličtiny). Literární rešerše: 1) Fyzikální podstata funkce georadaru, sběr dat, zpracování a interpretace radarových záznamů; 2) Využití georadaru v tektonice, strukturní a environmentální geologii; Terénní měření 2 vybraných profilů georadarem (spolupráce s KGG PřF UP); Grafické znázornění naměřených výsledků; Rozsah práce: do 40 stran včetně všech příloh.

Vedoucí bakalářské práce : doc. Mgr. Ondřej Bábek, Dr.

Datum zadání bakalářské práce : 31. října 2007

Datum odevzdání bakalářské práce : 30. dubna 2008

V Brně dne 31.10.2007

doc. RNDr. Jaromír Leichmann, Dr.rer.nat.
ředitel Ústavu geologických věd PřF MU

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
31 5010
ÚSTAV GEOLGICKÝCH VĚD
Kotlářská 2, 602 00 Brno

Zadání bakalářské práce převzal dne:

Podpis studenta

18. 2. 2008

Obsah

Úvod.....	8
1. Podstata georadarového měření, základní pojmy.....	8
1.1 Podstata funkce georadaru.....	8
1.2 Základní fyzikální pojmy.....	9
2. Podmínky a meze měření.....	18
2.1 Reflexní odrazové profily.....	19
2.2 Měření rychlosti.....	24
2.3 Prosvícení.....	26
3. Měření georadarem v tektonice, strukturní geologii environmentální geologii.....	28
3.1 Naváté a pobřežní oblasti.....	28
3.2 Fluviální (říční) prostředí a prostředí aluviálních kuželů.....	28
3.3 Jezera.....	29
3.4 Fosilní sedimenty – ložiska ropy a zemního plynu.....	29
3.5 Tektonika.....	29
3.6 Inženýrské a environmentální aplikace.....	31
4. Interpretace a popis naměřených dat v terénu.....	32
4.1 Měření č. 1 – Veverská Bítýška	32
4.2 Měření č. 2 – Brněnská přehrada.....	35
5. Závěr.....	37
6. Literatura.....	38
7. Přílohy.....	40

Úvod

Motivací mé bakalářské práce bylo alespoň částečné osvětlení principu a měření s georadarem, protože je to velmi zajímavá nedestruktivní geofyzikální metoda, která při správné interpretaci může potvrdit, vyvrátit případně objevit další vědecké předpoklady v podloží dané oblasti. Georadarový průzkum může být velkým přínosem jako samostatná geofyzikální metoda nebo v kombinaci s jinými metodami průzkumu zemního podloží.

Cílem bakalářské práce je otevření základního povědomí o georadaru, georadarovém měření a vyhodnocení.

1. Podstata georadarového měření, základní pojmy

1.1 Podstata funkce georadaru

Georadar (GPR) je přístroj, který pracuje na principu průniku a odrazu elektromagnetických rádiových vln (8 – 4000 MHz) do podpovrchových částí zemské kůry. Z vysílače (antény) na povrchu pulsují velmi vysokou frekvencí (UHF) rádiové vlny (mikrovlnění elektromagnetické energie) do zemního podloží. Vysílané mikrovlny jsou odraženy zpět k povrchu z rozhraní jednotlivých vrstev, které mají odlišné dielektrické vlastnosti. Část vysílané energie je pohlcena okolním nadzemním prostředím, další část se odrazí k povrchu, kde je zachycena druhou přijímací anténou a část energie je rozptýlena do podloží.

Podíl pohlcené a odražené energie vln je často ovlivněn změnami v obsahu vody spojenými v různých typech sedimentů, velikostí zrn, pórovitostí a soudržností zkoumaného podloží.

Různé kombinace frekvencí antén a vysílacích modulů také ovlivňují výsledky změřených údajů v pozorované hloubce průniku, další odrazy vln a rozlišení údajů profilu. Georadar se nejlépe osvědčuje v mělkém podpovrchovém průzkumu sedimentů, stratigrafie a zobrazení podpovrchových profilů ve 2D a 3D perspektivě. Data georadaru mohou být viděna v reálném čase.

Výhodou georadaru je digitální záznam dat profilů, nedestruktivní metoda výzkumu, robustnost, mobilita.

1.2 Základní fyzikální pojmy

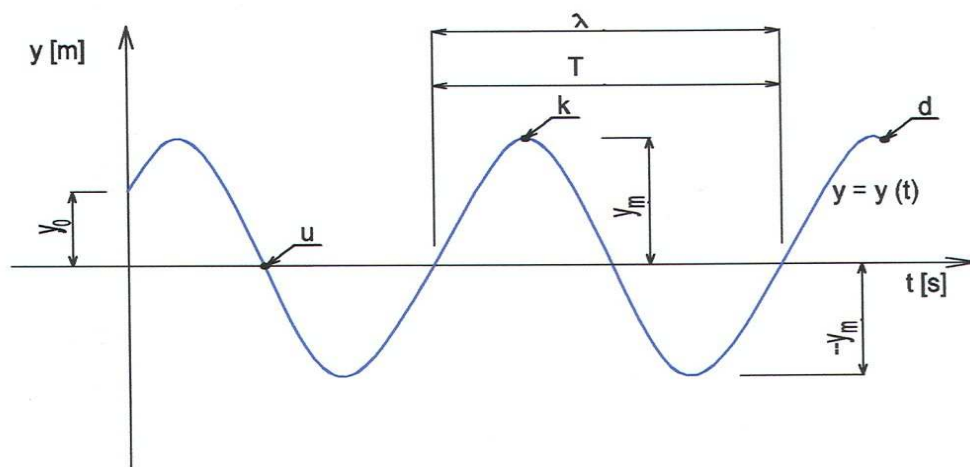
V textu následuje vysvětlení fyzikálních pojmů a na obr.1 jejich grafické znázornění.

Kmitání (oscilace) je pohyb bodu, jehož průběh lze popsat s použitím periodických funkcí času. Je to tedy pohyb, který vykazuje určité znaky periodičnosti v čase. Kmitáním částic prostředí, které se šíří od zdroje vzniká **vlnění**. Vlnění může být např. podélné, příčné, stojaté apod.

Vlnoplocha je spojitá množina bodů prostředí, které kmitají se stejnou fází. Tvar vlnoploch je zpravidla kulovitý a dále je ovlivněn tvarem a velikostí budící síly zdroje, fyzikálními parametry prostředí, atd.

Čelo vlny (d) je množina bodů, do nichž vlnění dospělo v daném čase, čelo vlny je první z vlnoploch.

Lineární kmity - pohyb kmitajícího bodu po přímce, bod v klidu zaujímá rovnovážnou polohu (na horizontální ose – v našem případě na ose t).



Obr.1-Znázornění základních fyzikálních veličin vlnění.
(Popis fyzikálních veličin v textu).

Výchylka (y) - okamžitá vzdálenost bodu od rovnovážné polohy, maximální výchylku (y_m) má těleso v bodech obratu – maximální výchylka se nazývá **amplituda výchylky** nebo **kmityna (k)**, minimální výchylka leží na rovnovážné ose a nazývá se **uzel (u)**.

Perioda T [s] je časový interval, v němž se kmity v prostředí opakují.

Frekvence (kmitočet) f [Hz] - je převrácenou hodnotou periody T ($f = 1/T$) a uvádí počet kmitů za jednotku času.

Vlnová délka λ - vzdálenost, o kterou se vlnění rozšíří za dobu kmitu T.

Okamžitá výchylka z rovnovážné polohy je určena směrem a velikostí výchylky. Pro velikost výchylky platí rovnice :

$$y = y_m \sin (\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

y_mamplituda výchylky [m]

ω úhlový kmitočet [rad s⁻¹], $\omega = 2\pi / T$,

t..... čas [s], k němuž se vztahuje výchylka

φ_0 fázový posun [rad] (počáteční fáze)

Argument sinové funkce, tj. výraz $(\omega t + \varphi_0)$, určuje okamžitý stav kmitajícího bodu při harmonickém pohybu a nazývá se **fáze**. Pro čas $t_0 = 0$ nabývá fáze hodnoty φ_0 ;proto má konstanta φ_0 význam **počáteční fáze**.

Konstanta ω vyjadřuje, jak rychle narůstá fáze s časem a nazývá se **úhlová frekvence (kmitočet)**.

Postupná vlna šířící se rychlostí v [m s⁻¹] překoná za dobu kmitu T vzdálenost vlnové délky λ . [m]:

$$\lambda = v T = v/f \quad (2)$$

Odtud je patrné, že dva body, vzdálené od sebe o celistvý počet vlnových délek, kmitají se stejnou fází. Rychlost šíření vlnění (v) udává také, jak rychle se bodovou řadou šíří určitá fáze ; např. pohyb čela vlny představuje šíření fáze rovné nule. V této souvislosti se proto rychlost (v) nazývá také **fázovou rychlostí**.

Je-li výchylka počátku popsána funkcí $y = y(t)$, pak výchylka bodu o souřadnici X je :

$$y_x = y (t - x/v) \quad (3)$$

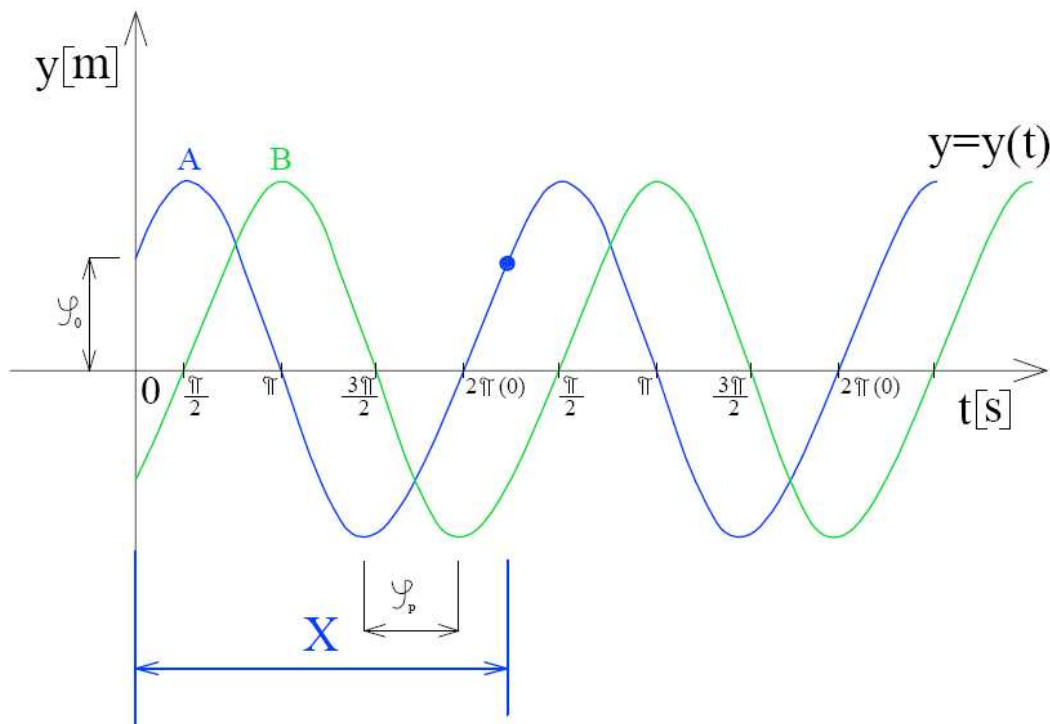
Rychlost (v) georadarových vln závisí na materiálu, kterými vlny prochází, rychlost je v pod povrchové prostředí pomalejší než ve vzduchu a je závislá na relativní permitivitě (dielektrická konstantě) pod povrchové vrstev.

Relativní permitivita (ϵ_r) je podílem permitivity prostředí (ϵ) a permitivity vakua (vzduchu) (ϵ_0). Tato veličina udává schopnost látky polarizovat se v elektrickém poli. Určuje, kolikrát více je látka (materiál) vlivem polarizace schopna absorbovat energie elektrického pole než vakuum. Hodnota relativní permitivity závisí i na obsahu vody a rychlost (v) se zmenšuje s druhou odmocninou relativní permitivity (ϵ_r).

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

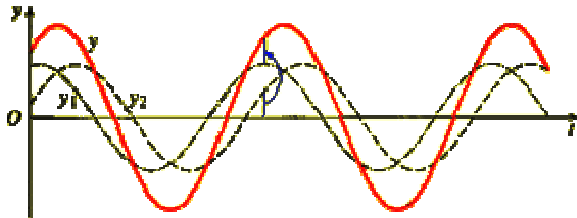
crychlost světla ve vzduchu nebo ve vakuu (tento vzorec předpokládá, že magnetická susceptibilita hornin je zanedbatelná)

Interferenci rozumíme skládání dvou nebo více vlnění v jedno vlnění výsledné. Uvažujme dvě vlnění téže frekvence šířící se tímž směrem (obr.2) s harmonickým (sinusovým) průběhem kmitů. Protože se obě vlnění šíří stejnou fázovou rychlostí (c) je fázový rozdíl kmitů (fázový posun φ_p) obou dílčích vlnění pro každou částici stejný a nezávislý na čase.



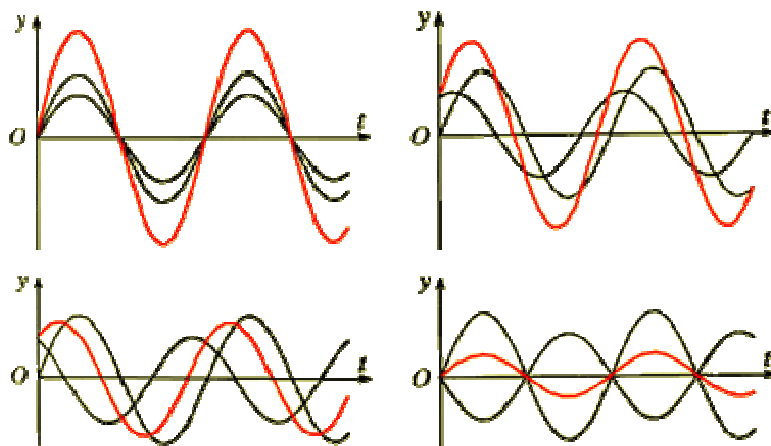
Obr.2-Znázornění fázového posunu φ_p - vlna B je posunuta od vlny A o interval $\pi / 2$,

Pro skládání harmonických kmitů v jedné přímce platí princip superpozice – okamžitá výchylka harmonických kmitů pak je okamžitá výchylka výsledného kmitání rovna součtu výchylek jednotlivých harmonických kmitů (obr.3) : $y = y_1 + y_2 + \dots$



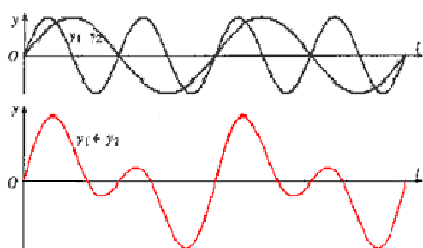
Obr.3-Znázornění skládání harmonických kmitů stejného směru a stejné frekvence s fázovým posunem – vzniká harmonické kmitání téže frekvence, amplituda závisí na fázovém rozdílu složek y_1 a y_2 .(vlneni.wgz.cz/princip-superpozice-slozene,2009)

Jestliže poměr frekvencí nebo period je roven 1 tak je výsledný kmitavý pohyb harmonický, jestli je fázový posun nulový vzniká největší amplituda složeného kmitání. Je- li fázový rozdíl $\varphi = \pi$ – tj. opačná fáze obou složek pak amplituda nejmenší.(obr.4)



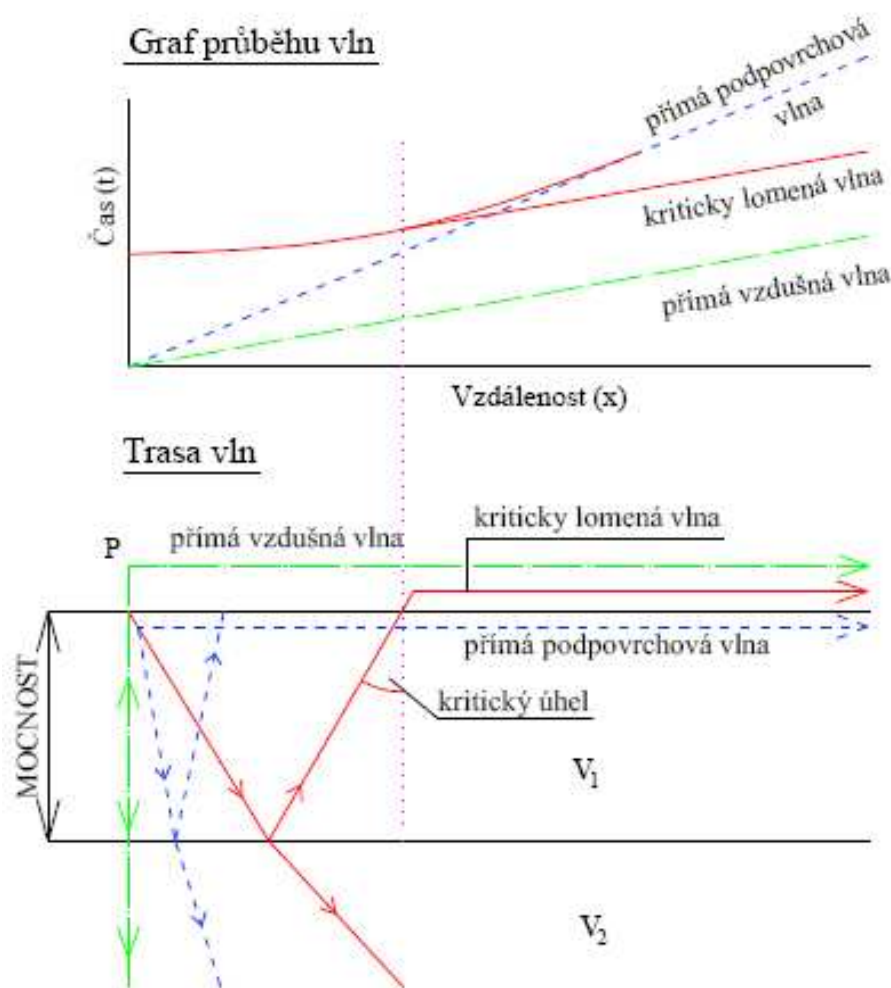
Obr.4-Znázornění skládání harmonických kmitů stejné fáze, s fázovým posunem a s fázovým posunem $\varphi = \pi$ (dole vpravo) (vlneni.wgz.cz/princip-superpozice-slozene,2009)

Superpozicí různé frekvence vzniká kmitání, které není harmonické, avšak může být periodické v případě, že poměr frekvencí nebo period jsou celá čísla. Na obr.5 jsou dvě kmitání s poměrem 1: 2.



Obr.5-Neharmonické kmitání s různým poměrem frekvencí (vlneni.wgz.cz/princip-superpozice-slozene,2009)

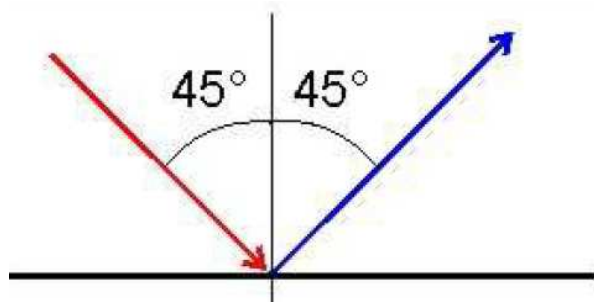
Jako rozlišení označujeme nejmenší posun nebo diskontinuitu, které lze porovnávat mezi jednotlivými vrstvami. Vlnové trajektorie se šíří do všech směrů, uváděny jsou dva typy rozlišení : horizontální a vertikální.



Obr.6-Znázornění georadarových vln - Grafu průběhu a trasa vln (Musset a Khan, 2000)

Vlny přichází do přijímače (P) po různých trajektoriích (obr.6) i z rozhraní vrstev, kdy se v důsledku jiné rychlosti materiálu vrstev (v_1 a v_2) šíří vlny různým směrem.

Vlny, které se šíří vzduchem jsou nejrychlejší, pak následují přímé podpovrchové vlny a nakonec georadarové vlny. Georadarové vlny se tedy mohou od rozhraní vrstev odrážet (obr.6 a 7), lámat, rozptylovat (difrakce) nebo skládat (interferovat).



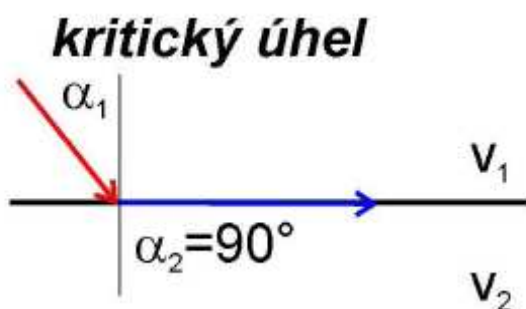
Obr.7- Odraz georadarových vln – úhel dopadu se rovná úhlu odrazu (Havíř,2008)

Na rozhraní dvou vrstev o různých rychlostech šíření georadarových vln dochází k lomu georadarového signálu podle tzv. Snellova zákona:

$$\sin \alpha_1 / v_1 = \sin \alpha_2 / v_2 \quad (5)$$

Podíl sinu úhlu svíraného signálem a přímkou kolmou k rozhraní vůči rychlosti šíření signálu je konstantní. Pokud signál georadarových vln dopadá na rozhraní pod úhlem menším než je tzv. kritický úhel, láme se podle Snellova zákona do následující vrstvy, jestliže signál dopadá na rozhraní pod úhlem větším než je tzv. kritický úhel, nedojde k lomu, ale dojde k totálnímu odrazu paprsku od rozhraní. Pokud vlna dopadá na rozhraní pod kritickým úhlem láme se podél rozhraní. (obr. 8 a 6 - kde je znázorněn kritický lom vlny v důsledku rozdílných rychlostí podpovrchového prostředí a vzduchu.)

platí $\sin \alpha_1 / v_1 = \sin \alpha_2 / v_2 = 1 / v_2$ (6)



Obr.8- Znázornění lomu vlny podél rozhraní vlivem kritického úhlu ((Havíř,2008)

Ve vrstevním prostředí, v němž rychlost šíření vln do hloubky roste, dochází postupně k lámání paprsků „od kolmice“ tak dlouho až dojde k překonání velikosti kritického úhlu a vlna je totálně odrazena zpět k povrchu.

Amplitudový koeficient (R) je poměr amplitud vln odrazu k nahodilým vlnám – závisí na rychlostech obou rozhraní a také na relativní permitivitě (ϵ_r):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} = \frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} \quad (7)$$

Horizontální rozlišení není primárně důležité, ve výzkumu se užívá k určení velikosti podpovrchových objektů.

Vertikální rozlišení je dáno **vlnovou délkou (λ)**. Určuje jak velké části, poruchy nebo diskontinuity je možné detekovat georadarem. Vertikální rozlišení závisí na rychlosti jednotlivých vrstev (tedy i na relativní permitivitě ϵ_r).

Georadarový signál se od rozhraní vrstev s různými rychlostmi odrazí a vrstvy s menší mocností než polovina vlnové délky interferují s jiným odrazem. Předpokladem vlnové teorie je maximální vertikální rozlišení (R_V) - $\frac{1}{4}$ délky vlny - Nyquistův interval (Sheriff a Geldart, 1982). Pokud bude vertikální rozlišení větší než $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ délky vlny nezobrazí v dostatečné kvalitě průnik vln podpovrchovým prostředím.

Vertikální rozlišení se zlepšuje použitím antény s vyšší frekvencí, ale s větším pohlcením signálu (zmenšení délky vlny na čtvrtinu požaduje čtyřnásobnou frekvenci, která redukuje průnik vln v podpovrchových vrstvách na polovinu) (Musset a Khan, 2000). Hloubka průniku georadarového signálu záleží i na vodivosti podpovrchových vrstev - hloubka průniku se snižuje se zvětšením vodivosti a frekvence.

Následující výpočty byly získány vertikálním rozlišením 1 500 MHz anténou a byly získány během laboratorních a kontrolních testů dolomitických hornin (Apel a Dezelic, 2005).

Vztah mezi vertikálním rozlišením (R_V) a vlnovou délkou (λ):

$$R_V = \lambda/4$$

kde $\lambda = v/f$ (viz 2)

v našem konkrétním případě tedy:

v....rychlost georadarových vln

f...anténní frekvence

Např. pro dolomitické horniny:

$v \sim 0,10$ m/ns

anténa o frekvenci $f = 1\,500$ MHz

pak $\lambda = v/f = 0,10/1500 = 0,066$ m

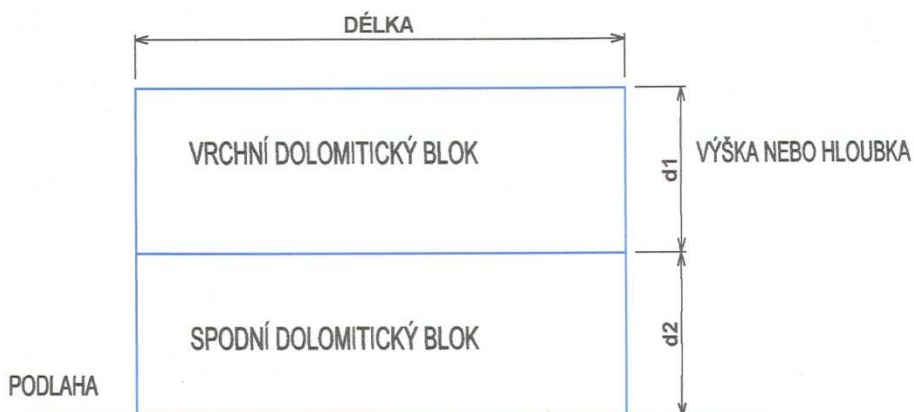
potom vertikální rozlišení je

$$R_V = \lambda/4 = 0,066 / 4$$

$$\underline{R_V = 0,0166 \text{ m}}$$

To znamená, že všechny vrstvy v dolomitech, o mocnosti menší než 16,6 mm nebudou zobrazeny s georadarovým průzkumem s anténami 1,5 GHz.

Pro porovnání hloubky (D) měřené georadarem a skutečné výšky byl vytvořen laboratorní experiment, který byl prováděn s dvěma dolomitickými bloky, které byly přesně zarovnané a položeny na sebe (obr.9).



Obr.9- Znárodnění dvou dolomitických bloků v laboratorním experimentu (Apel a Dezelic, 2005) - upraveno, popis označení viz text

$$d_1 = 0,1397\text{m}$$

$$d_2 = 0,1176\text{m}$$

$$d_1 + d_2 = 0,2573\text{m}$$

Hloubka odrazu - (D) byla vypočítána ze vzorce:

$$D = 0,15 \cdot t_z / \sqrt{\epsilon} \quad (8)$$

kde

t_znaměřený čas v ns (nanosekundy)

ϵ_rdielektrická konstanta pro dolomity (průměrně 6,8 – 8 ~ 7,5)

Materiál	Dielektrická konstanta	Šíření rychlosti radarem (m/ns)
Vzduch	1	0,30
Voda	81	0,033
Vápenec	6	0,12
Dolomit	6,8-8	0,10-0,80
Suchý jíł	8	0,11
Vlhký jíł	33	0,052
Horniny	4-12	0,15-0,087

Tab.1-Typické diaelektrické konstanty (ϵ_r) a rychlost georadarových vln (v) pro různá prostředí (Cardimona, 2002)

Materiál	Dielektrická konstanta	Vodivost (mS/m)	Rychlost (m/ns)	Zeslabení (dB/m)
Vzduch	1	0	0,3	0
Destilovaná voda	80	0,01	0,033	0,002
Čerstvá voda	80	0,5	0,033	0,1
Mořská voda	80	30000	0,01	1000
Suchý písek	3-5	0,01	0,15	0,01
Zvodnělý písek	20-30	0,1-1,0	0,06	0,03-0,3
Vápenec	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Břidlice	5-15	1-100	0,09	1-100
Prach	5-30	1-100	0,07	1-100
Jíl	4-40	2-1000	0,06	1-300
Žula	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Sůl (suchá)	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Led	3-4	0,01	0,16	0,01

Tab.2-Vlastnosti dalších geologických materiálů (Davis et al., 1989)

Materiál	Dielektrická konstanta	$f_c = 100\text{MHz}$	$f_c = 200\text{MHz}$	$f_c = 500\text{MHz}$
Vzduch	1	150	75	30
Destilovaná voda	80	17	8,5	3,5
Čerstvá voda	80	17	8,5	3,5
Mořská voda	80	17	8,5	3,5
Suchý písek	3-5	87-67	43,5-33,5	17,5-13,5
Zvodnělý písek	20-30	34-27	17-13,5	7-5,5
Vápenec	4-8	75-53	37,5-26,5	15-10,5
Břidlice	5-15	67-39	33,5-19,5	13,5-9,5
Prach	5-30	67-27	33,5-13,5	13,5-5,5
Jíl	4-40	67-24	33,5-12	13,5-5
Žula	4-6	75-61	37,5-30,5	15-12
Sůl (suchá)	5-6	67-61	33,5-30,5	13,5-12
Led	3-4	87-65	43,5-37,5	17,5-13

Tab.3-Vypočtené hodnoty vertikálního rozlišení (R_V) v cm georadarových vln pro různé anténní frekvence (Basson, 1992)

Získaný čas (t_z) byl naměřen georadarovým signálem – průnikem dvou dolomitických bloků a odrazem od známého objektu (v našem případě hliníkové plotny). Tento čas (t_z) vyjadřuje dobu času (t_2), kdy byl vybuzen radiový signál georadarem a tento čas byl odečtený od času (t_1), což je doba průniku dolomitickými bloky :

$$t_z = t_1 - t_2 = 149 \text{ ns} - 144,4 \text{ ns} = 4,6 \text{ ns}$$

kde

t_z čas průniku dvěma bloky naměřený georadarem

t_1čas návratu signálu odraženého od hliníkové plotny

t_2počáteční čas georadarového signálu

Užitím vzorce

$$D = 0,15 t_z / \sqrt{\epsilon} \quad (\text{viz } 8)$$

dostaneme

$$d_1 + d_2 = (0,15 \times 4,6) / \sqrt{7,5} = \underline{0,252 \text{ m}}$$

Výsledek přibližně souhlasí s naměřením výšky obou dolomitických bloků.

Hodnoty vertikálního rozlišení (R_V) v cm typické pro různé prostředí za použití antén různých frekvencí jsou pak v Tab.3.

Elektromagnetické pole v horninovém prostředí je do značné míry závislé na fyzikálních vlastnostech hornin, z nichž jsou rozhodující vodivost a relativní permitivita (diaelektrická konstanta) – tyto parametry mění svou hodnotu s frekvencí pole. (Macháček, 2001).Typické relativní permitivity (diaelektrické konstanty) pro různá prostředí jsou v Tab.1 a Tab.2

Hodnoty vertikálního rozlišení (R_V) v cm typická pro odlišná prostředí s anténami různých frekvencí jsou v Tab. 3.

2. Podmínky a meze měření

Georadarová měření probíhají ve třech základních režimech :

- *reflexní (odrazové) profily*
- *měření rychlosti*
- *prosvícení*

2.1 Reflexní (odrazové) profily

Georadar se při sběru dat pohybuje kontinuálně nebo v opakujících se vzdálenostech (krocích). Kontinuální měření je vhodnější spíše pro předběžné průzkumy (kanály, dutiny apod.). Krokové měření se upřednostňuje pro přesnější georadarové průzkumy, kde je důležité vysoké rozlišení a vysoká kvalita dat.

Důležité parametry týkající se průběhu georadarových profilů :

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| - operační (provozní) rozlišení | - <i>operating frequency</i> |
| - velikost kroku | - <i>step size</i> |
| - časový (hloubkový) řez | - <i>length of time window</i> |
| - časový interval načítání | - <i>time sampling interval</i> |
| - separace (vzdálenost) antén | - <i>antennae separation</i> |
| - vytyčení a odstup profilových linií | - <i>line location</i> |
| - orientace antén | - <i>antennae orientation</i> |

Operační (provozní) rozlišení

Při výběru frekvence antény a síly vysílače je nutné uvážit výhody hloubky průniku a rozlišení. Je výhodné sladit hloubku průniku a rozlišení – zvýšení rozlišení snižuje hloubku průniku v závislosti na anténní frekvenci (Davis a Annan, 1989). Nižší frekvence antény zvyšují hloubku průniku, vyšší frekvence antény pak zvyšují rozlišovací schopnost a snižují hloubku průniku (Hänninen, 1992). Výběr frekvence antény závisí na účelu a rozlišovací schopnosti georadarového profilu. Nejvíce průzkumů v sedimentech užívá frekvence antén mezi 50 – 500 Megahertz (MHz), při hlavních a důležitých průzkumech se užívají antény o frekvenci 100 Megahertz (MHz). Vyšší frekvence antén (400 – 1000 MHz) způsobuje kratší délku vln, které mohou proniknout do menších hloubek s lepším rozlišením.

V sedimentárním prostředí se měří proměnlivé délky a hloubky profilů v řádu od milimetrů až po několik desítek metrů.

Anténní frekvence	Litologie		
	Zvodnělý písek 0,06 m/ns	Vlhký písek 0,1m/ns	Suchý písek 0,15 m/ns
$f_c = 50\text{MHz}$	0,3-0,6 m	0,5-1,0 m	0,75-1,5 m
$f_c = 100\text{MHz}$	0,15-0,3 m	0,25-0,50 m	0,375-0,75 m
$f_c = 200\text{MHz}$	0,075-0,15 m	0,125-0,25 m	0,1875-0,375 m

Tab.4 Teoretické hodnoty pro vertikální rozlišení georadaru (R_V) v typických sedimentárních prostředích s variabilními frekvencemi antén. (Jol a Bristow, 2003)

Poznámka: Teoretická limita vlnové délky $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ (Sheriff a Geldart, 1982)

Vlnová délka byla vypočtena ze vzorce $\lambda = v / f$ (kap. 1 Podstata georadarového měření, základní pojmy).

Měření georadarových profilů ukázala různé vlastnosti georadarových antén s odlišnými rychlostmi georadarových vln (v). (Davis a Annan, 1989), (Smith a Jol, 1995). Rozvíjejícím trendem v měření georadarových profilů je využití frekvenčních rozsahů antén pro 3D prostorové měření profilů. Zdroj (vysílací dipól) může emitovat do vyšetřovaného podpovrchového prostředí různou sílu elektromagnetických vln, která může ovlivnit hloubku průniku nebo zvýšit odrazy (reflexe) rozhraní nehomogenit v sedimentárním prostředí. (Jol, 1995)

Velikost kroku

Velikost kroku je vzdálenost mezi každým souborem dat bodů georadarového profilu (rozestup mezi jednotlivými měřeními) a navrhuje se před započítáním průzkumu. Ovlivňuje kvalitu měřených podpovrchových dat a navrhuje se před započítáním georadarového průzkumu. V sedimentárních prostředích se používá maximální velikost kroku 1 m (často 0,1–0,5m) - závisí na frekvenci antén, větší velikost kroku podpovrchové prostředí nedostatečně zobrazí. Menší velikost kroku (0,1–0,5 m) se používá k zobrazení podrobného horizontálního rozlišení sedimentárních rozhraní.

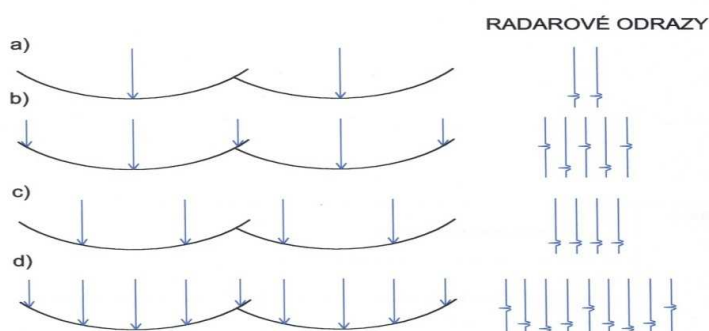
Typický podpovrchový průzkum se 100 MHz anténou má krok o velikosti 0,25 m, větší velikosti kroku se používají tam, kde je stratigrafické rozhraní složené z navazujících podpovrchových vrstev. Zvýšení nebo zmenšení velikosti kroků závisí na faktorech, které

zahrnují velikost podpovrchového sedimentárního prostředí, úhel sklonu a oblast průzkumu (obr.10).

Zobrazení šikmého zvrstvení v podloží je závislé na velikosti kroku a délce měření šikmého zvrstvení – velikost kroku by měla být méně než $\frac{1}{4}$ délky šikmého zvrstvení.

Z praktického hlediska je velmi důležité dodržet Nyquistův interval (od $\frac{1}{4}$ do $\frac{1}{2}$ vlnové délky mocnosti zkoumaných vrstev podloží) pro srozumitelnou kvalitu zobrazení. Hypotetický průzkum ukazuje rozlišení vrcholu a základu 1 m mocné vrstvy s vlnovou délkou mezi $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ mocnosti vrstvy (např. vlnová délka 0,5 m – 0,25 m je vhodná pro rozlišení vrstvy 1 m). Šikmé zvrstvení s dobrou relativní permitivitou ϵ_r (dielektrickými vlastnostmi) zobrazí odrazy (reflexe) skloněné v úhlu 30° - budou v délce kolem 1,75 m (obr.11) - k horizontální velikosti kroku potřebujeme vzdálenost 0,4 m. Pro šikmé zvrstvení s mocností 0,2 m (vlnová délka odpovídá rozlišení od 0,1- 0,05 m) už ale velikost kroku odpovídá méně než 0,1m.

Georadarovým průzkumem byly úspěšně změřeny georadarové profily diagonálního zvrstvení ve vátých píscích a pískovcích, uloženin řek, delt a pobřežních sedimentů. Měření fluvialních sedimentů bylo neúspěšné a bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečnou rozlišovací schopností podpovrchového prostředí.



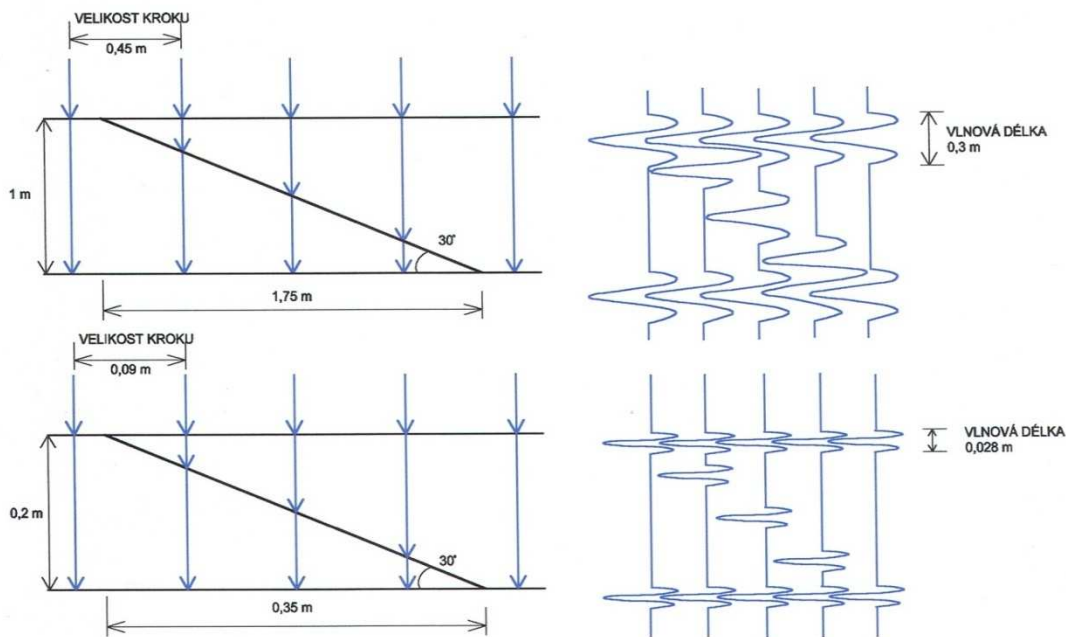
Obr.10-Prostorové vzorkování (schodovitost) v sedimentárních rozhraních způsobená nedostatečným horizontálním odběrem dat

a) chybná velikost kroku v závislosti na šířce zobrazení konvexních předmětů

b) velikost kroku $\frac{1}{2}$ šířky konkávního předmětu vede k prostorové schodovitosti protože konvexní předměty nejsou dostatečně rozlišitelné.

c) velikost kroku $\frac{1}{2}$ šířky konvexního předmětu ale s různým vzorkováním na měřených místech může být zkreslená

d) velikost kroku $\frac{1}{4}$ šířky předmětu odrazy se blíží konvexní formě. Velikost kroku je důležitá k zobrazení šikmého zvrstvení, velikost kroku by měla být spíše menší (upraveno podle Jol a Bristow, 2003)



Obr.11-Zobrazení šikmého zvrstvení o mocnosti vrstvy 1m jsou možná jen s velikostí kroku méně než 0,5 m a vlnovou délkou méně než 0,5 m. Zobrazení sady šikmého zvrstvení ve vrstvě o mocnosti 0,2 m odpovídá velikosti kroku méně než 0,1m a vlnová délka méně než 0,1 m, která je zřídka užívána v průzkumech (upraveno podle Jol a Bristow, 2003),

Časový (hloubkový) řez.

Časový (hloubkový) řez je soustavou vertikálně orientovaných časových záznamů na přijímacím dipólu (Macháček, 2001). Když volíme hloubku časového řezu pro průzkum, navržená hloubka by měla překročit cílovou hloubku o 1/3. Při hlubším průniku georadarových vln se v časovém řezu zvyšuje množství zaznamenávaných a zpracovaných dat a prodlužuje se čas průzkumu.

Časový interval načítání

Časový interval načítání (rychlost načítání) je čas ve kterém je přijímaný odražený (reflexní) signál vzorkován a je základem vlnové délky (λ) / frekvence (f) vysílaného (zdrojového) signálu. Když se frekvence antén zvýší, zvýší se i rychlost načítání (viz Nyquistův interval - oddíl Velikost kroku). Když se rychlost načítání zvyšuje (časový řez je konstantní), čas průzkumu se také zvýší.

Separace (vzdálenost) antén

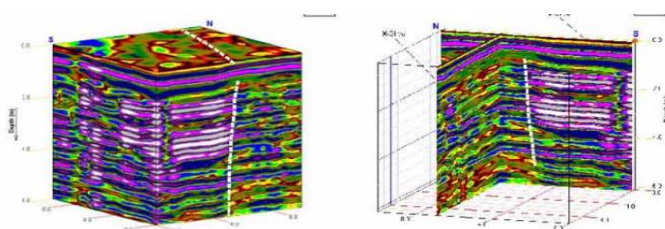
Některé antény mají pevné nastavení vzdálenosti, zatímco u jiných lze nastavení vzdálenosti měnit. Odlišné vzdálenosti pro každou frekvenci antén by měly být co nejmenší, založené na výchozím testování a potřebném průřezu (např. 1m pro 100MHz).

Pevné nastavení může zapříčinit malé množství zachyceného signálu v horních částech odrazu (reflexe) - je to obvykle spojeno s úklonem reflexní vlny v geometrickém zkruslení blízko povrchu a v okolí svislých odrazů (Annan, 2002). Schopnost rozlišení antén s úklonem k povrchu se zvyšuje i když je tento efekt malý.

Vytyčení a odstup profilových linií

Georadarový průřez by měl být vytyčen pokud možno tak, aby vytvářel síť profilových linií běžících rovnoběžně a kolmo k očekávanému směru úklonu sedimentárních textur. Síť přímek v mřížce je důležitá k vytvoření 2D vizualizací a perspektivy podpovrchového podloží.(Bristow, 1995)(Bristow et. al., 1996)(Roberts *et al.*, 1997).

Vzdálenost přímek se volí v závislosti na čase průřezu a požadovaném rozlišení profilů vzhledem k účelu měření. Mřížkové sítě se užívají zejména pro 3D vizualizace profilů, tak aby vzdálenosti přímek byly vhodné pro konstrukci 3D modelů (Beres *et al.*,1995). Podpovrchové sedimentární prostředí může být s využitím 3D modelů zmapováno z jakéhokoliv úhlu pohledu a pomocí řezů se může zobrazit i vnitřní stratigrafie a mocnost vrstev.(obr.12).



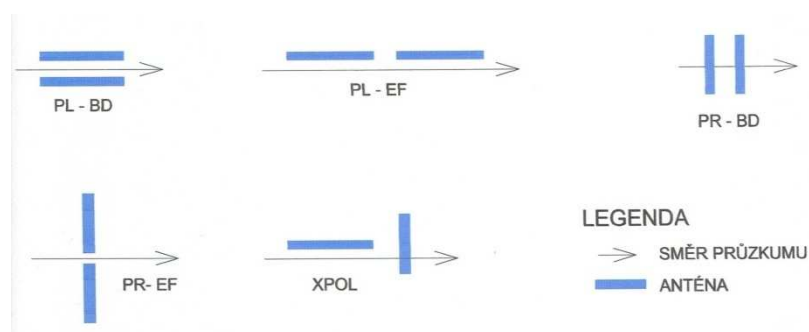
Obr.12-Ukázka 3D georadarových dat z průřezu podél zlomu Katrol Hill Faulty Kachchh (Indie), která pomohla v lokalizaci, porozumění charakteru zlomu kvantifikaci zlomového srážu trhliny (Current Science, 2005)

Orientace antén

Poloha orientace antén ovlivňuje kvalitu měřených profilů. (Smith *et al.*, 1995)(Lutz *et al.*, 2003). Před georadarovým průřezem je potřeba si uvědomit, které antény jsou dvojpólové a mají požadovanou polaritu. Běžně užívané orientace antén, které poskytují širokoúhlé pokrytí podpovrchového odrazu georadarových vln - je kolmé vyzařování ke směru průřezu

(PR- BD) – tato orientace je nejsnadnější pro průzkumy v sedimentárních prostředích. (obr.13).

V jiných případech rovnoběžné vyzařování (PL - BD) lépe identifikuje hladinu podzemní vody (Van Overmeeren, 1994). Pro získání maximálního odrazu vln a přesnosti měření je důležité propojení antén a také používání stejné anténní konfigurace a elektroniky během celého průzkumu, protože změny v polaritě způsobují zvýšení nebo pokles impedance s hloubkou průzkumu.



Obr.13- Ilustrace různých módů orientace antén (elektrické pole se předpokládá vyrovnané podél anténních os)
 PL – rovnoběžné, PR – kolmé, BD- příčně vyzařující polarizace antén ,
 EF- podélná polarizace, XPOL-křížová polarizace
 (Jol a Bristow, 2003)

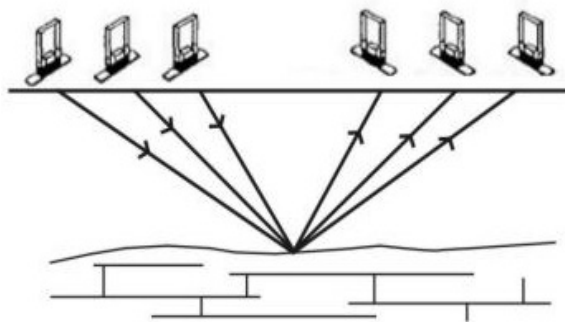
2.2 Měření rychlosti

K určení dráhy času z odrazu podpovrchových rozhraní v georadarovém průzkumu - je třeba stanovit šíření rychlosti elektromagnetických impulsů (c) z profilu sedimentů. To lze stanovit přímým (destruktivním) způsobem - vrtáním nebo karotážními pracemi ke stanovení hloubky - a ze změřeného času odrazu lze odvodit rychlost (viz kap.1).

Více sofistikované a méně destruktivní způsoby určení rychlosti jsou – Společný střední bod (CMP) – (viz obr.8), Odraz a refrakce s širokým úhlem (WARR) - (obr. 9) - obě metody jsou běžně používány v seismickém průzkumu a je možné je použít i při měření georadarem.

CMP a WARR techniky zahrnují průzkum v kterém se rozestupy (vzdálenosti) mezi vysílači a přijímači zvyšují s každým krokem. CMP průzkum se považuje za více přesnější než měření pomocí antén, CMP průzkum je vždy centrován na stejný bod (obr.14).

K průzkumu pomocí CMP se používají antény s frekvencí 12,5 MHz do 1000 MHz a vyšší.



Vzdálenost antén závisí na jejich frekvenci, průniku do hloubky a rychlosti podpovrchových vrstev.

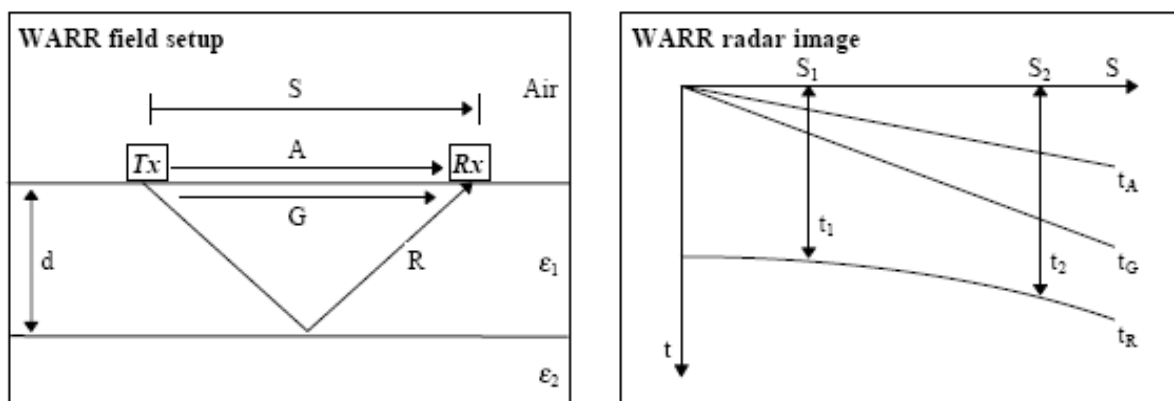
Obr.14-Metoda středního bodu (CMP) – kolmé vyzařování, (Fisher et al.,1992)

Výsledky jsou použity k získání odhadu georadarové rychlosti vln s porovnáním hloubky podloží – tato hloubka je měřena dvěma způsoby drah.

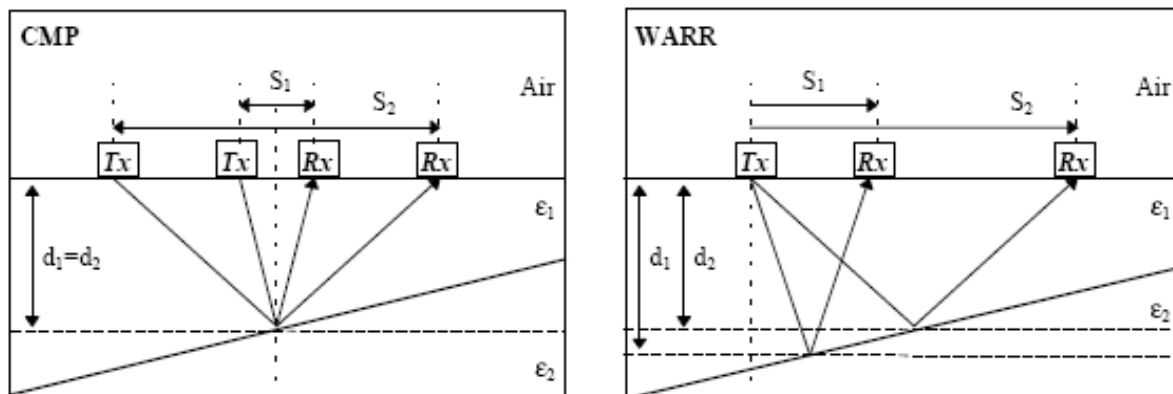
CMP průzkumné sondy se většinou používají jako jedny z prvních průzkumů, pomocí CMP sond by se měly měřit vyšetřované oblasti před hlavním georadarovým průzkumem. Při průzkumu pomocí CMP se začíná nejprve s anténou v minimálním posunu a posunem každé antény o 5 nebo 10 cm (celkové vzdálenosti rozestupů antén je možné zvýšit na 10 nebo 20cm) až tam, kde není znatelný návrat signálu, úhel dopadu je 45-60°. Pozemní vlny se využívají k výpočtu rychlosti průniku sedimenty. .

CMP poskytuje dobrý odhad rychlosti, stanovená hloubka měření může být často nalezena s 10 – 20 cm přesností a to stačí ke stanovení vlastností podpovrchových sedimentů.

Principem průzkumu Odrazu a refrakce s širokým úhlem (WARR) – (obr.15) je pevně fixovaná vysílací anténa a přijímací anténa, která se pohybuje od vysílače. Srovnání metod CMP a WARR je na obr.16.



Obr.15-Metoda Odrazu a refrakce s širokým úhlem (WARR) a její radarové zobrazení
 Legenda: A-vzdušné vlnění- přímá linie, G-podpovrchové vlnění-přímá linie
 R-odražené vlnění od podloží – konkávní linie, S-vzdálenost vysílací (Tx) a(Rx) přijímací antény, d-hloubka podloží od kterého jsou odrazeny georadarové vlny, ϵ_1 a ϵ_2 relativní permitivity (dielektrické konstanty) podpovrchového prostředí, t-čas v (ns). Annan a Davis, 1976)



Obr.16-Na svažitém podpovrchovém horizontu metoda WARR způsobí větší chyby než metoda CMP – způsobené změnou hloubky bodu odrazu během průzkumu.
(Gruber a Ludwig, 1996)

2.3 Prosvícení

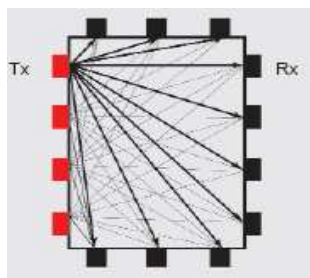
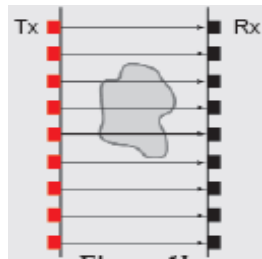
Průzkumy pomocí prosvětlování se používají k zobrazení vnitřních struktur a vlastností konstrukcí např. u opěrných stěn, sloupů, památek, hrází, přehrad apod. Principem průzkumu jsou vysílací a přijímací antény, které se upevní na příslušnou konstrukci proti sobě (obr.17), tak aby došlo k průniku signálu, který je vyslán zdrojovou anténou (T_X) skrz konstrukci do přijímací antény (R_X) - metoda COP.



Obr.17-Znázornění umístění antén na konstrukci (Subsurface Views, 2006)

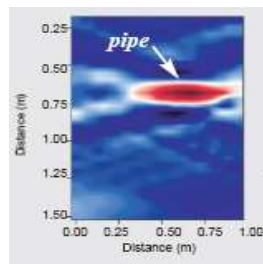
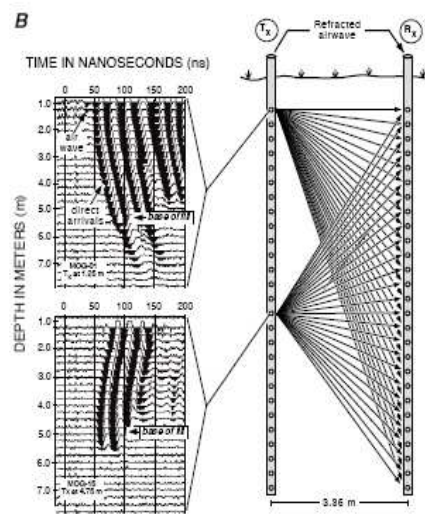
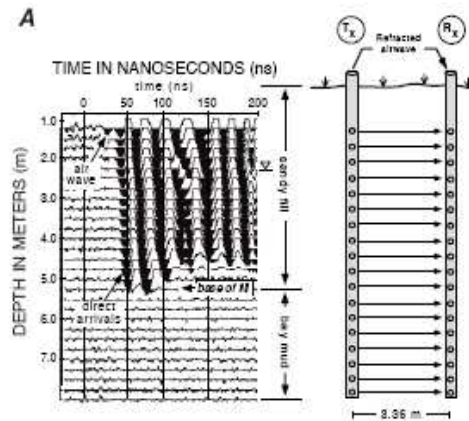
Křížové zobrazení prosvícení konstrukce se provádí metodou vícenásobného vyhodnocení měření - MOG – pracuje na principu vysílání signálů z pevně upevněných vysílacích antén (T_X) a přijímacích antén (R_X), které jsou postupně umísťovány na různé místa konstrukce proti vysílacím anténám pod různými úhly - výsledkem je přesnější zobrazení nehomogenit v konstrukci.(obr.18)

Pomocí metody MOG jsou zobrazeny průzkumy ve 2D zobrazení včetně rychlosti, útlumu a rozptylu. Např. v cisterně vody je vysoce tlumená zóna, která zřetelně zobrazuje vertikální kovovou kruhovou trubku.(obr.19)



Obr.18-Umístění vysílací antény (T_x) a přijímací antény (R_x) na konstrukci

A) možné znázornění metodou COP
 B) možné znázornění metodou MOG
 (Subsurface Views, 2006),(Parsons, 2002)



Obr.19-Ukázka oblasti tlumení (červeně) – kovová trubka v cisterně vody
 (Subsurface Views, 2006)

Správné umístění zdrojové a přijímací antény je rozhodující pro přesné zobrazení průřezu pomocí prosvícení zejména u soch, u silně vyztužených sloupů s výztuží, ale mohou nastat problémy, protože mnoho kovů velmi výrazně rozptyluje georadarový signál a redukuje směr vysílacího signálu.

3. Měření georadarem v tektonice, strukturní geologii a environmentální geologii

Nejlepší výsledky při měření georadarových profilů jsou v podpovrchovém prostředí s vysokým měrným odporem jako je suchý písek a štěrk, rašelina, vápenec, písčité hlíny, led, slabě mineralizovaná voda. Velmi kvalitní data byla získána v sedimentech nasycených sladkovodní vodou a na mořském pobřeží.

Pokles v kvalitě georadarových profilů je často způsoben vysokým množstvím prachu, jílu, kalových krust nebo salinitou vody v sedimentech - tyto příměsi způsobují vysokou vodivost - absorbují a zeslabují elektromagnetické vlny, takže po případném odrazu od rozhraní nedosáhnou povrchu s měřitelnou amplitudou.

Georadarový průzkum je ale možné použít i ve vodivých prostředích pokud jsou profily podpovrchové nebo podloží je odlišné od okolních materiálů.

3.1 Naváté a pobřežní oblasti

Vysoké hodnoty měrného odporu vátých písků umožňují dobrý průnik radarových vln více jak 10m a rozlehlé sedimentární rozhraní mezi pískovými dunami jsou dobře zobrazena georadarových profilech. Georadarové průzkumy zobrazí profil a rozhraní v dunách, přerušeni sedimentace, vnitřní strukturu a postupné ukládání sedimentace. Hloubka průniku v navátých sedimentech lokality Lauder Sandhills- (Havholm at al.,2003) byla méně než 5m. Předpokládá se, že příčinou omezeného průniku radarových vln byly pedogenní prachovce, jíly, karbonáty a oxidy železa.

Navzdory blízkosti moře a velké vodivosti slané vody může georadar pracovat velmi dobře v pobřežních sedimentech jestliže jsou tam vodopropustné vrstvy (kolektory).

Rozvoj využití georadaru k definování stratigrafie v pobřežních sedimentech a k rozpoznání stratigrafických horizontů např. diskordantně zvlněné erozní plochy, se předpokládá v příštích letech.

3.2 Fluviální (říční) prostředí a prostředí aluviálních kuželů

Rozdílné prostředí aluviálních systémů a sedimentů a jejich široké formy usazenin způsobují fluviální sedimenty částečně vhodné pro georadarový průzkum. Schopnost

georadaru zobrazit a charakterizovat geometrii a facie fluvialních sedimentů ve 2D a 3D vizualizacích ukazuje důležité využití v hydrogeologickém odvětví.

Georadarové profily jsou používány také k popisu a interpretaci aluviálních usazenin. (Ekes at al., 2003) doporučují, aby byl georadar využíván k mapování vývoje aluviálních náplavových kuželů a sekvencí ve spojení s geochronologickými daty.

3.3 Jezera

Sladkovodní jezera jsou pro georadarové vlny špatně proniknutelné, ale georadarový průzkum profilů pod dnem je možný, stejně tak měření hloubky vody a mocnosti sedimentů. (Hunter et al., 2003) vytvořil georadarový profil jezera, když bylo zamrzlé – tím se zlepšuje přístup a rychlost měření. Použil georadar k určení odhadu uložených sedimentů v jezeře a k určení mocnosti sedimentů nad skalnatým podložím.

Rychlost ukládání sedimentů se posuzuje srovnáním s dřívějšími hloubkovými průzkumy, údaje o mocnosti sedimentů se užívají ke stanovení rychlostí ukládání sedimentů, které se pak využívají k vyhodnocení lokalit s nejvyšší rychlostí ukládání sedimentace.

3.4 Fosilní sedimenty – ložiska ropy a zemního plynu

Georadarové profily (2D a 3D) z výchozích vrstev (odkryvů) se používají jako analogie ložisek ropy a zemního plynu. Takové měření se používají k poskytování kvalitativních a kvantitativních údajů pro modelování naftových a hydrogeologických ložisek.

3.5 Tektonika

Georadar byl použit pro zobrazování poruch v podloží s různou mírou úspěšnosti. Reiss et al. (2003), popisuje naplavené a koluviální (svahové) sedimenty v severovýchodním Španělsku, jižním Španělsku a Sicílii - ukazují které anomálie mohou být zmapovány užitím georadaru a stanoví se, který georadar by měl být použit jako průzkumný v paleoseismických měřeních.

Kvantitativní vyhodnocení georadarových profilů se využívá k zakreslení nehomogenit podél směru vrstev.

Průzkum georadarem podél Pinjore Garden Fault: Význam pro identifikaci podpovrchové deformace podél aktivního zlomu, NW Himalaya (Malik at al., 2005)

Profil dlouhý 24m byl změřen křížením 6m vysokého Pinjore Garden Fault (dále jen PGF) srázu s 200 MHz anténou, s vysokým rozlišením podpovrchového zobrazení s průnikem

do hloubky 6m. Dvě části s malým úhlem kerného přesmyku (F1 a F2) byli identifikovány podél významného horizontálního rozestoupení a ohybu radarových odrazech. Uzavřená křivka (část zlomu F1 v georadarovém profilu souhlasila se zlomem identifikovaným napříč PGF. Georadarový profil pomohl k dráze křivky F1 ve větší hloubce (>3m), než která byla identifikována ve výkopu a také v novém zlomu F2 ve vyšší části srázu. Zlomy byli zmapovány georadarem, který může pomoci v mapování mělké podpovrchové stratigrafie a v lokalizaci podpovrchových zlomů přemísťujících mladé kvartérní sedimenty v úpatí himalájské zóny.

Zmapování pomocí georadaru bylo vyhodnoceno jako nejvhodnější pro identifikaci vhodných míst pro paleoseismické studie podél aktivních zlomů. Georadarový průzkum odhalil podél San Andreas Fault (SAF), North California dva srázy založené na vertikálním přemístění důležitých georadarových odrazů, ty byly navrženy pro srovnání údajů s výkopovým místem. Tyto srázy byly pravděpodobně hlavní příčinou zemětřesení 1906 v San Franciscu a dříve.

Dříve nebyly v Himalájích užity georadarové techniky k lokalizaci nebo mapování podpovrchových deformací podél aktivních zlomů. Terén zkoumané oblasti byl rozdělen do tří geomorfologických zón:

- a) zóna výše položená zahrnující spodní Siwalik (pohoří), spodno-terciérní horniny formací Dagshai, Kasauli a Subathu
- b) podélné aluviální deprese Pinjore Dun
- c) izolovaný svrchní Siwalik v čelní řadě a Indo-Gangetic plains.

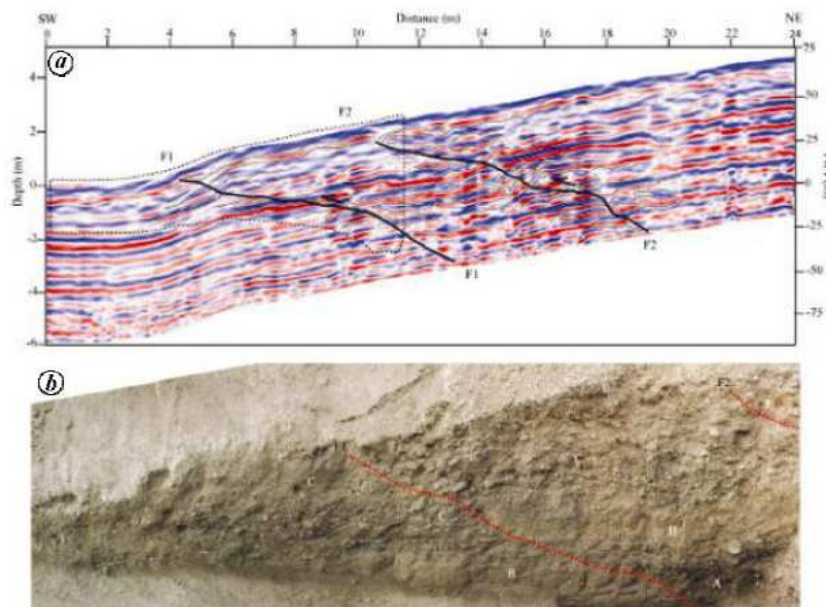
Pro mapování oblasti byl použit georadar SIR 3000 (GSSI, USA), hustota vzorkování byla v běžném módu, anténa byla spojena s kalibrovaným počítačem, vzdálenosti průzkumu byly měřeny na průzkumném kole. Pro georadarový průzkum byly použity antény o frekvencích 100MHz a 200 MHz.

K lepšímu rozlišení a odstranění šumu byly použity IIR filtry s porovnáním mezi nízkými a vysokými frekvencemi.

Radarový profil byl zpracován softwarem RADAN 6.5 (GSSI, USA) s vhodnými korekcemi. Pro povrch a hloubku byla provedena časová korekce, kde nejvyšší amplituda odrazu byla odstraněna ze směru vzduchových vln a zemních vln.

Několik studií zaznamenaných do map podpovrchových zlomových kvartérních sedimentů ukazuje, že zlomy na georadarových profilech mohou být rozpoznány vyrovnáním georadarových odrazů na obou stranách zlomových srázů a prohnutím georadarových odrazů. Georadarové data byly srovnány s výkopovými sondami.

V georadarových profilech bylo možné identifikovat dva průběhy zlomů (F1 a F2). Průběh F1 byl dobře odhalen mezi 4 a 13 m horizontálního značení – obr.20. Bylo možné popsat přesmyk do hloubky 6 m.



Obr.20- a) Upravený georadarový profil po topografické korekci se zarovnáním. Identifikované zlomy jsou indikovány půdními liniemi mezi vzdálenostmi značek 4 -13m a 10 – 20m, tečkovaný úsek ukazuje přibližně vyhloubenou sondu.

b) Severní pohled ukazuje odkop napříč PGF v Ratpuru. Odkrytý sediment ukazuje posloupnost jednotek. Zlomový sráz F1 souhlasí s identifikovanou trasou F1 v georadarovém profilu. Jen cíp břehu F2 byl patrný v horním pravém rohu vyhloubení, kde plán zlomu je označen mezi mocným pískem (F) a štěrkem (C). Zlomové srázy jsou označené červenou linkou. (CURRENT SCIENCE, 2007)

3.6 Inženýrské a environmentální aplikace

Detekce kontaminované oblasti

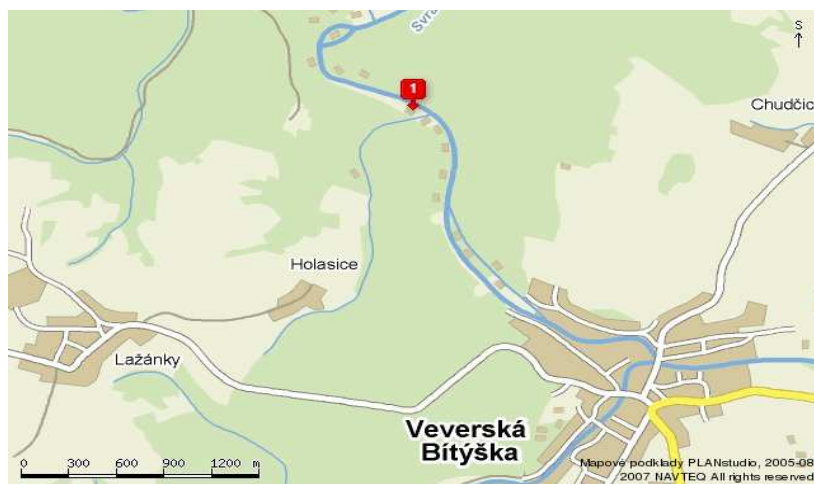
Georadarové průzkumy jsou vhodné pro definování celkové existence kontaminantů v podzemní vodě a půdě. Substance jako soli (např. chloridy), ropné produkty a chlorované uhlovodíky jsou dobře detekovatelné georadarem. Detekovaná hloubka závisí na půdním typu a vlhkostních podmínkách. Georadar pracuje nejlépe v mělkých půdách a kolektorech než v hloubkách. S georadarem je možné detekovat přítomnost plavených uhlovodíků na vodní hladině, mraků kontaminantu a lokalizování skrytých kabelů, trubek, krasových bubnů a nádrží.

4. Interpretace a popis naměřených dat v terénu

4.1 Měření č. 1 – Veverská Bítýška

Měření bylo provedeno ve Veverské Bítýšce, v okrese Brno-venkov - leží zhruba 25 km západně od středu Brna, u řeky Svratky. Všechna měření byla provedena georadarem SIR-3000 od společnosti Geophysical Survey Systems, Inc., použitý softwar pro vyhodnocení Radar Data Analyzer (RADAN) ve verzi 6.5.3.0 Všechna měření se uskutečnila dne 26. 03. 2008.

Délka profilu byla zaměřena pásmem na 44 m, nejprve proběhla kalibrace, a poté byla nastavena data pro vlastní měření. Lokalizace měření obr.21 a 22.



*Obr.21-Stanoviště měření profilu ve Veverské Bítýšce – údolní niva řeky Svratky – červeně.
(www.mapy.cz, 2008)*

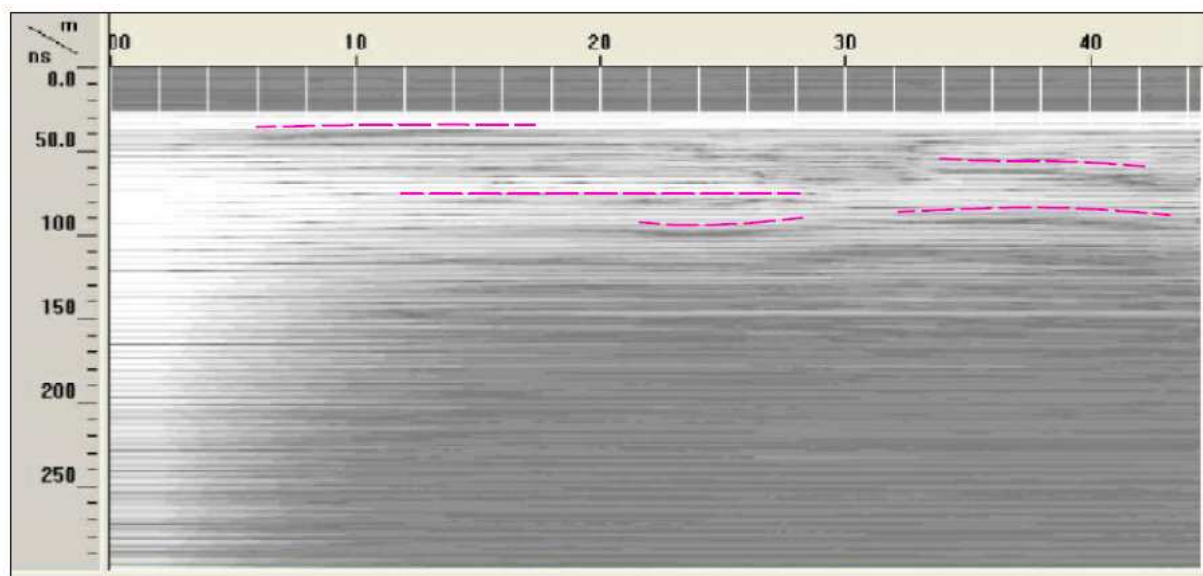


*Obr.22-Měření v údolní nivě řeky Svratky s 200 MHz anténou a georadarem SIR 3000
(Foto O.Bábek, 2008)*

Měření v kontinuálním režimu

Měření v kontinuálním režimu s 200 MHz anténou a nastavením dielektrické konstanty na 14,6 (dle tabulky v manuálu georadaru – zvlhlý jíl 8 – 15), hustota vzorkování 1024, range – (hloubka průniku) zvolena 300 ns – odpovídá přibližně 10m.

V údolní nivě řeky Svatky byla zvolena hodnota dielektrické konstanty 14,6; lokalita Veverské Bítýšky se nachází v oblasti Brněnského masívu – v jeho západní granodioritové části. Podloží je utvářeno granodiority, amfibolity a ortorulami - v období pleistocénu se zde usazovaly písčité štěrky, v holocénu pokračovalo jejich přemístování a usazovaly se fluvialní sedimenty – povodňové hlíny.



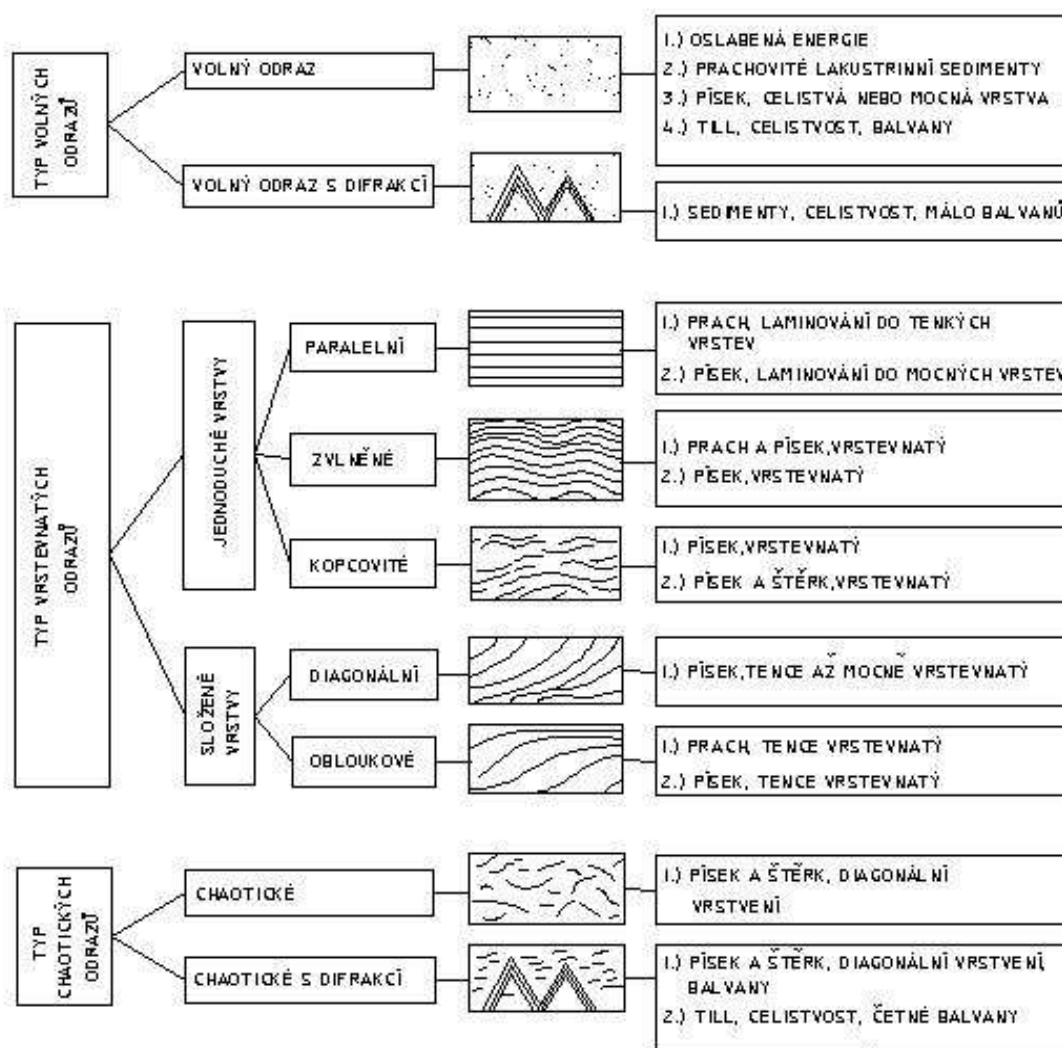
Obr.23-Měření profilu v kontinuálním režimu, s anténou 200 MHz (SIR 3000 ,2008)

Na obr. 23 jsou znázorněny vodorovné (mírně zvlňené) sekvence s kontrastním rozhraním vrstev, kam dobře pronikly elektromagnetické vlny georadaru, světlé místa znázorňují pravděpodobně přítomnost ve zvýšené míře jílovitých vrstev nebo případně mohou být způsobeny salinitou nebo silnou mineralizací vody – zde může být průnik vln omezen nebo absorbován vodivým prostředím (viz kap. 3). Do 150 ns (na svislé ose) se jedná o horizontální odrazy (vrstvy, případně i hladina podzemní vody- hlavní odrazy jsou znázorněny fialově).

Protože vyhodnocení profilů z georadaru je velmi náročné a je potřeba mít praxi v interpretaci, měření georadarem a v ovládání vyhodnocovacího softwaru, dovoluji si pouze zjednodušeně vyhodnotit georadarové profily dle následující Tab. 5.

Měření bych převážně zařadil do typu vrstevnatých odrazů, do jednoduchých vrstev – paralelních a zvlněných – v obou případech bod 1.) – tomu odpovídá vzhledem k lokalitě (údolní niva řeky Svratky) – jílovitým částicím, prachu, hlína – vrstvy jemnozemě.

TYPY ODRAZOVÝCH SKUPIN INTERPRETACE



Tab.5-Tabulka popisující typy odrazových skupin podpovrchových sedimentů.
(Beres and Haeni, 1991) – překresleno a přeloženo

Krokový režim

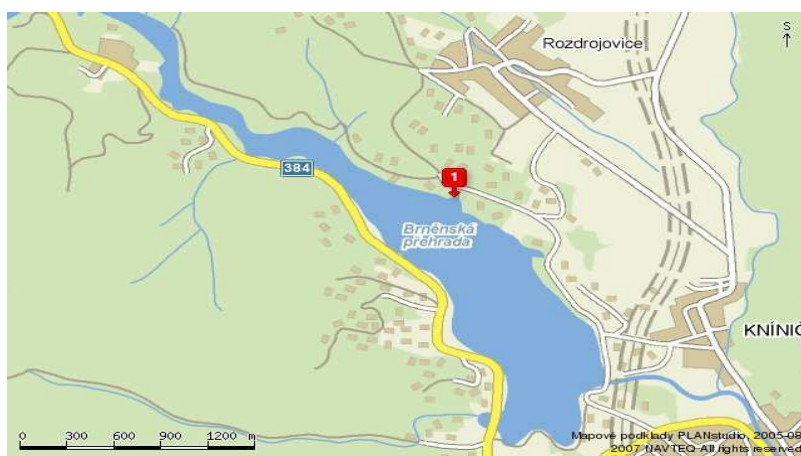
Měření v krokovém režimu po vzdálenostech 0,5 m s 200 Mhz anténou a nastavením dielektrické konstanty na 14,6; hustota vzorkování 1024, range – (hloubka průniku) zvolena 300 ns. Krokový režim je znázorněn na obr.27 v Příloze a na rozdíl od kontinuálního režimu

je v rozvinutější pozici, zde jsou ještě více zdůrazněny světlé místa v podloží což může způsobovat přítomnost spíše jílovité vrstvy- hlavní odrazy (rflexe) jsou znázorněny fialově. Průběh měření profilu v krokovém režimu odpovídá kontinuálnímu měření.

4.2 Měření č. 2 – Brněnská přehrada

Měření bylo provedeno na Brněnské přehradě – v lokalitě (obr.24), provedeno georadarem SIR-3000 od společnosti Geophysical Survey Systems, Inc.

Délka profilu byla zaměřena pásmem na 20 m, nejprve proběhla kalibrace, a poté byla nastavena data pro vlastní měření.



*Obr.24-Stanoviště měření profilu na Brněnské přehradě – červeně.
(www.mapy.cz, 2008)*

Měření v kontinuálním režimu

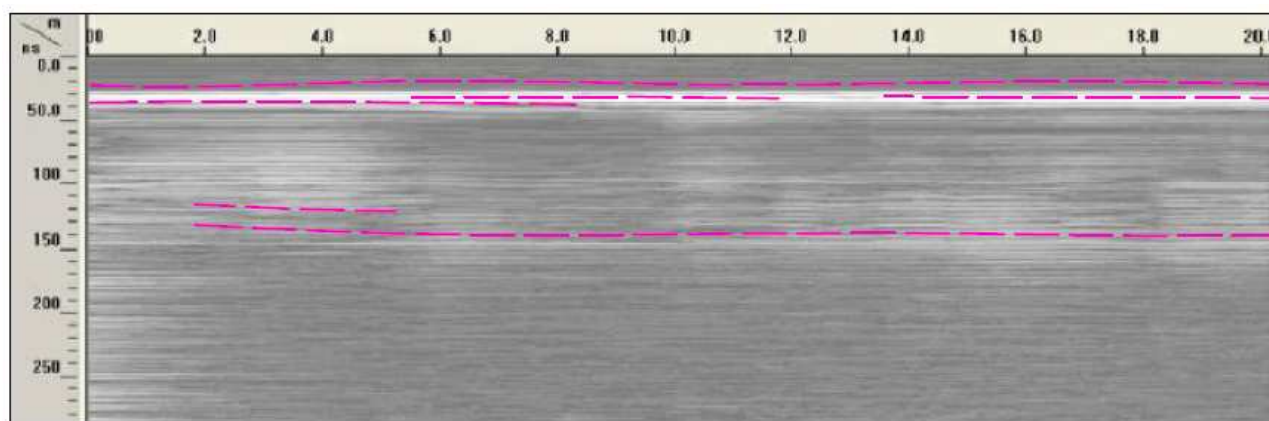
Měření proběhlo v kontinuálním režimu s 200 MHz anténou a nastavením dielektrické konstanty na hodnotu 5 (dle tabulky v manuálu georadaru – suchý písek 3 – 6), hustota vzorkování 2048, range – (hloubka průniku) zvolena 300 ns – odpovídá přibližně 10m. Měření profilu proběhlo na levém břehu Brněnské přehrady, na břehu je patrné vystupování fluvialních štěrkových pleistocenních sedimentů na kterých jsou vrstvy spraší a sprašových hlín - obr.25.



Obr.25-Měřený profil na Brněnské přehradě. (Foto O.Bábek , 2008)

Profil na obr.26 z georadaru ukazuje bílé rozhraní mezi povrchovou (tmavou) částí a spodní podpovrchovou částí profilu (rozhraní mezi 30–40 ns) světlá část se navíc vyskytuje konstantně v celé délce profilu – může indikovat rozhraní mezi sprašemi a podložními šterky, rozhraní kolem 150 ns lze těžko interpretovat – je možné, že až toto je hranice mezi sprašemi a šterky, ale pro přesné určení by bylo nutné provést analýzu rychlosti (např. CMP). Vyhodnocení dle tabulky – Tab.5 odpovídá typu vrstevnatých odrazů - jednoduchým vrstvám – paralelnímu typu – tedy prach, laminování do tenkých vrstev – spraš.

Světlejší pruhy v profilu mohou znázorňovat tenké vrstvy - patrné zejména tenším světlým rozhraním.(znázorněno fialovou čárkovanou čarou).



Obr.26-Měřený profil v kontinuálním režimu, s anténou 200 MHz (SIR 3000 ,2008)

5. Závěr

Srovnáním měření 200 MHz anténou obou profilů (ve Veverské Bítýšce a na Brněnské přehradě) v kontinuálním režimu lze vidět, že v profilu v údolní nivě řeky Svratky je kontrastně vykresleno více tenkých vrstev – pravděpodobně se jedná o více jílovitých vrstev, v profilu na Brněnské přehradě je patrnější světlejší pruh uprostřed profilu - znázorňuje pravděpodobně tenší vrstvu spraší s jinou hustotou.

Georadar patří mezi geofyzikální nedestruktivní metody a jistě se v budoucnosti stane více rozšířeným (zejména v České republice), pro své rozličné možnosti použití – ať už v geologii, stavebnictví, archeologii nebo dalších oborech. Používání georadaru se rozšíří v závislosti na odbornících, kteří dokážou spolehlivě měřit, ovládat, interpretovat a upravovat naměřené data georadarových profilů.

V této bakalářské práci jsem se snažil ukázat základní principy měření, základní georadarové metody, různé možnosti použití georadaru a zkusil jsem si zaměřit georadarové profil a zjednodušeně je interpretovat.

Věřím, že se mi to alespoň zčásti podařilo a v praxi mám zájem se průzkumem georadarových profilů nadále zabývat a zdokonalovat se v jejich interpretaci.

6. Literatura

- Annan, A.P. (2002): Ground Penetrating Radar Work-shop Notes.- Sensors and Software, Incorporated, Mississauga, Ontario
- Apel, D.B.- Dezelic, V., (2005): Using ground penetrating radar (GPR) in analyzing structural composition of mine roof.- SME Publications Dept. University of Missouri-Rolla, Rolla, MO
- Basson U., (1992): Mapping of moisture content and structure of unsaturated sand layers with ground penetrating radar - Thesis submitted for the degree of master of Sciences in Geophysics, Tel-Aviv University, Tel-Aviv
- Beres, M., - Green, A., - Huggenberger, P.- Horstmever, H., (1995): Mapping the architecture of glaciofluvial sediments with three-dimensional georadar. - *Geology*, 23, 1087-1090.
- Bristow, C. (1995): Facies analysis in the Lower Greensand using ground-penetrating radar.- *Journal of the Geological Society, London*. 152. 591-598.
- Bristow, C. - Pugh, J. - Goodall, T (1996): Internal structure of aeolian dunes in Abu Dhabi determined using ground-penetrating radar.- *Sedimentology*, 43, 995-1003.
- Cardimona S. (2002): Subsurface investigation using ground penetrating radar – Proceedings, Second Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, Rolla, MO
- Davis, J.L.- Annan, A.P., (1989): Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy - *Geophysical prospecting*, 37 (1989), 531-551, Canada
- Ekes, C. - Friele, P. (2003): Sedimentary architecture and post-glacial evolution of Cheekye Fan, southwestern British Columbia, Canada. - In: Bristow, C.S.- Jol, H.M. (eds) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society. London. Special Publications. 211. 87-98
- Hänninen, P. (1992): Application of Ground Penetrating Radar and Radio Wave Moisture Probe Technique to Peatland Investigations. - Geological Survey of Finland. Espo, Finland. Bulletin 361.
- Havholm, K.G.- Bergstrom, N.D., - Jol, H.M., - Running, G.L., IV. (2003): GPR survey of a Holocene aeolian/fluvial/lacustrine succession, Lauder Sandhills, Manitoba, Canada. - In: Bristow, C.S.- Jol, H.M. (eds) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society. London. Special Publications. 211. 47-54
- Hunter, L.E.- Delaney, A.J., - Lawson, D.E. - Davis, L. (2003): Downhole GPR for high-resolution analysis of material properties near Fairbanks, Alaska. - In: Bristow, C.S.- Jol, H.M. (eds) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society. London. Special Publications. 211. 275-285

- Jol, H. M. (1995): Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. - *Geophysical Prospecting* , 43, 693-709.
- Jol, H. M.- Bristow, C. S. (2003): GPR in sediments: advice on data collection, Basic processing and interpretation. A good practice guide. In: Bristow, C.S. – Jol, H.M.(eds) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society, London, Special Publications, 211, 9-27.
- Lutz, P.,- Garambois, S. - Perroud, H., (2003): Influence of antenna configurations for GPR survey: information from polarization and amplitude versus offset measurements - In: Bristow, C., S. - Jol, H. M. (eds) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society. London. Special Publications, 211, 299-313.
- Macháček, J.(2001): Aplikace geofyzikálních metod v geotechnickém inženýrství a souvisejících oborech - In: *Geotechnické inženýrství*. Praha : ČVUT, Fakulta stavební, 2001, s. 32-44. ISBN 80-01-02354-0.
- Malik , J.N. - Mathew, G.,(2005):Evidence of Paleoearthquakes from trench investigations across Pinjore Garden fault in Pinjore Dun. NW Himalaya.- *J. Earth Sci.*, 114, 387-400.
- Mussett, A. E. & Khan, M. A. (2000): *Looking into the Earth. An Introduction to Geological Geophysics*. - Cambridge, New York, Melbourne, Madrid: Cambridge University Press. Price
- Reiss, S.,- Reicherter, K.R.- Reuther, C.-D.(2003): Visualization and characterization of active normal faults and associated sediments by high-resolution GPR.- In: Bristow, C.S.- Jol, H.M. (eds) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society. London. Special Publications. 211. 247-255
- Roberts, M. C., - Bravard, J-P.,- Jol. H. M., (1997):Radar signatures and structure of an avulsed channel: Rhone River, - Aoste, France, *Journal of Quaternary Science*, 12, 35-42.
- Sheriff, R. E.- Geldart, L.P.(1982):*Exploration Seismology Volume 1: History, Theory and Data Acquisition*. - Cambridge University Press, New York, New York
- Smith, D. G. - Jol, H.M.(1995): Ground penetrating radar : antennae frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments.- *Journal of Applied Geophysics*, 33, 93-100
- Van Overmeeren, R.A. (1994): High speed georadar data acquisition for groundwater exploration in the The Netherlands. - *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 12-16, Kitchener, Ontario, 3, 1057-1073.

7. Přílohy

Obr.27–Měření profilu – Krokový režim ,anténa 200MHz
- rozvinutý profil (SIR 3000 ,2008)

