

**METODIKA VYUŽITÍ NEINVAZIVNÍCH PRŮZKUMOVÝCH METOD  
– GEORADARU, IMPAKT ECHA A POVRCHOVÉHO MĚŘENÍ ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU  
K POSOUZENÍ STAVU A KONSTRUKČNÍCH DETAILŮ PÍSKOVCOVÉHO PLÁŠTĚ  
STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ**

*Autoři: Jakub Havlín, Monika Slavíková, Jan Válek, Karel Pavelka*

*Metodika vznikla v rámci projektu MK ČR NAKI na základě smlouvy č.27/2011/OVV, s identifikačním číslem projektu NAKI DF11P010VV027 a názvem „**Vybrané památkové postupy pro zkvalitnění péče o sochařské a stavební památky**“. Svým obsahem naplňuje dílčí úkol projektu: *Specifické památkové a restaurátorské postupy ve stavební obnově. Příjemcem projektu byla Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování Univerzity Pardubice (FR UPCe), dalším účastníkem Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR (ÚTAM). Na řešení se odborně podíleli Ing. Jakub Havlín, Ing. Monika Slavíková, Ing. Jan Válek, Ph.D. a prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.**

## OBSAH

1. CÍL METODIKY .....	3
2. POPIS METODIKY .....	3
2.1. Obecný popis a princip jednotlivých metod .....	4
2.1.1. GEORADAR (GPR).....	4
2.1.2. IMPAKT ECHO (IE) .....	4
2.1.3. ULTRAZVUKOVÁ MĚŘENÍ.....	6
2.2. POPIS ZPŮSOBU MĚŘENÍ POMOCÍ JEDNOTLIVÝCH METOD PŘI PRŮZKUMU PLÁŠŤOVÉHO ZDIVA .....	10
2.2.2. Impakt echo .....	10
2.2.3. GPR.....	13
2.2.4. Ultrazvuková měření .....	17
2.3. MOŽNOSTI A OMEZENÍ PŘI VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT A VÝHODY KOMBINOVÁNÍ.....	21
2.3.2. GPR.....	21
2.3.3. IMPAKT ECHO.....	28
2.3.4. ULTRAZVUKOVÁ MĚŘENÍ.....	31
2.3.5. KOMBINOVÁNÍ METOD .....	37
3. SROVNÁNÍ A ZDŮVODNĚNÍ NOVOSTI POSTUPU METODIKY.....	39
4. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY .....	39
5. Seznam použité související literatury a literatury obdobného tématu. Internetové odkazy.....	40

## **Úvod**

Průzkum vnitřní struktury a posouzení stavu kamenných bloků případně způsobu jejich zapojení do zdiva v historických konstrukcích je v památkové praxi často velmi komplikovanou úlohou. V krajních případech se průzkum provádí sondáží, která zasahuje do integrity zkoumaného objektu a představuje tedy tzv. destruktivní způsob průzkumu. Na druhé straně v moderní památkové péči vždy převládá snaha minimalizovat jakýkoliv invazivní zásah. To platí i v případě průzkumů historických stavebních konstrukcí z kamene. Proto se stále častěji uplatňují metody, které poskytují dostatečné množství informací bez nutnosti zasahovat do hmotné podstaty památky. V následujícím textu jsou popsány jednotlivé použité neinvazivní metody obecně, postup při měření a při interpretaci výsledků měření těmito metodami. V příloze je pouze pro informaci čtenáře připojen přehled současných možností zjišťování stavu a poškození stavebních materiálů a konstrukcí.

### **1. CÍL METODIKY**

Cílem této metodiky je popsat a ukázat možnosti využití neinvazivních metod pro stavebně historické či stavebně technické průzkumy architektonických památek z blokového pískovcového zdiva. Metody georadar (GPR), impakt echo (IE) a ultrazvuk (UZ), byly pro přípravu metodiky vybrány, protože umožňují průzkum stavebních objektů nebo jejich částí bez odběru vzorků či jiné formy zasahování do jejich integrity. Vybrané metody lze vhodně kombinovat s cílem upřesnit a zvýšit spolehlivost správné interpretace získaných výsledků.

### **2. POPIS METODIKY**

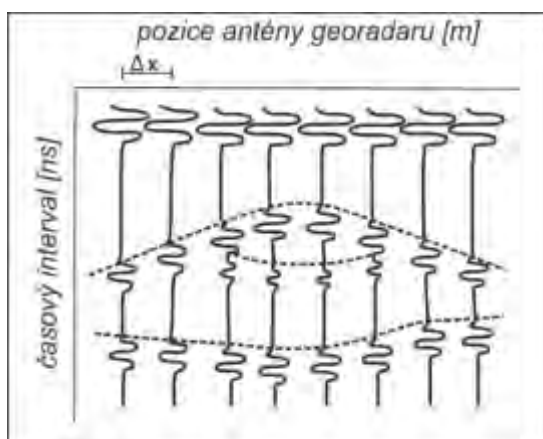
Uvedená metodika popisuje princip vybraných neinvazivních metod (georadaru, impakt echa, ultrazvuku), jejich možnosti, omezení a výhody jejich vzájemné kombinace při objektivním zkoumání a posuzování stavu i skrytých konstrukčních detailů plášťového zdiva z pískovců. V metodice je uveden názorný návod jak postupovat při samotném měření a vyhodnocování získaných dat. Dále je uveden příklad pro kombinované i individuální použití těchto vybraných neinvazivních průzkumových metod – georadaru, impakt echa a povrchového měření šíření ultrazvuku.

Průzkum plášťového kamenného zdiva se týká především historických konstrukcí. Uvedené přírodovědné průzkumové diagnostické metody a hlavně jejich kombinace mohou poskytnout velmi cenné informace o stavu a konstrukčních detailech tohoto typu stavebních památek nebo jejich částí. Identifikace a správná interpretace stavu konstrukcí je pro prodloužení životnosti stavební památky a pro stanovení správného postupu její obnovy často zásadní. Získané poznatky mohou sloužit jako důležitý podklad ke kvalifikovanému posouzení stavu dané konstrukce a následně usnadnit zkvalitnit přípravu stavebně-restaurátorských záměrů.

## 2.1. Obecný popis a princip jednotlivých metod

### 2.1.1. GEORADAR (GPR)

Georadar, zemní radar, nebo také GPR (zkratka z angl. GroundPenetrating Radar) je přístroj využívající radarový signál k průzkumu a následnému zobrazování vnitřní struktury pod zkoumaným povrchem. Jde o geofyzikální metodu, kterou lze využít pro celou škálu nedestruktivních průzkumových úkolů od zakládání staveb, archeologii po detailní průzkum podpovrchových defektů staveb.



Obrázek 1: Znárodnění signálů georadaru tvořících radarogram

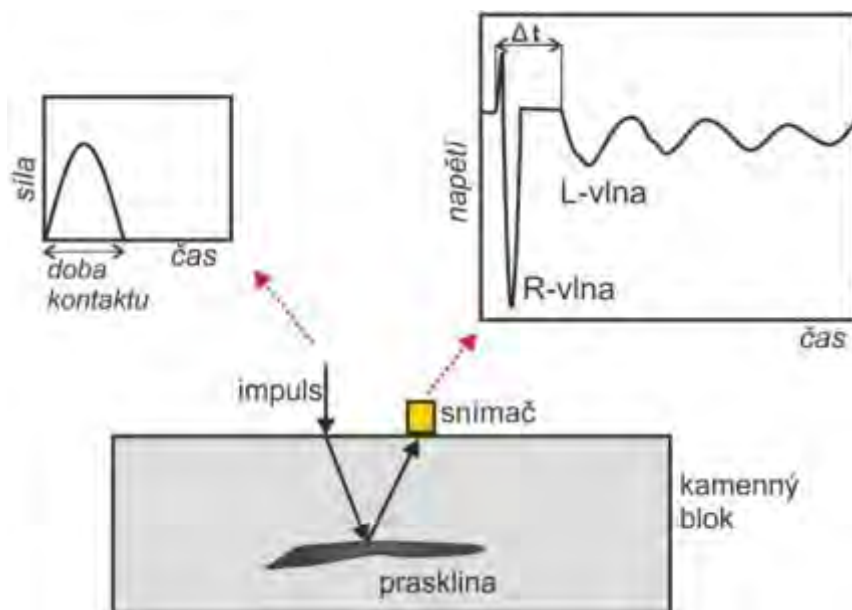
Základním principem měření je pulzní (< 1 ns) vysílání elektromagnetických vln, které prochází daným prostředím (zkoumaným materiálem). V inženýrských aplikacích se využívá frekvencí v rozsahu od 300 MHz do 2,5 GHz. Odražené složky jsou anténou zpětně přijímány a vyhodnocovány. Odražený paprsek se mění, pokud prochází prostředím, kde se mění permitivita (např. rozhraní kámen-vzduch) a vodivost (např. přítomnost železných spojovacích prvků). Měřeným parametrem je čas. Pokud je známa rychlost šíření vln v daném materiálu, pak lze určit hloubku, kde dochází ke změně či odrazu signálu. Při měření se nejčastěji využívá pohybu antény po přímce v rovině povrchu. Pokud je v materiálu přítomen předmět (popř. dutina, nehomogenita atd.), od kterého se odrazí vlny, pak při přibližování antény dochází ke zkracování vzdálenosti určující jeho hloubku a při oddalování následně k prodlužování této vzdálenosti. V radiogramech tyto odrazy vytvářejí hyperboly. Pro následnou interpretaci a lokalizaci nálezů je nutné znát pozici antény během měření. Posuv antény je zaznamenáván nejčastěji kolečkem, které měří lineární vzdálenost od počátečního bodu. Měření většinou probíhá v předem navržené rastrové síti.

### 2.1.2. IMPAKT ECHO (IE)

Technika je založena na šíření mechanického vlnění pevným, elastickým a izotropním materiálem. Vlnění je vyvoláno vnějším jednorázovým mechanickým impulsem. Tento impuls je generován impaktorem (např. kladívkem, dnes častěji elektromechanickým zdrojem) a šíří se materiálem do té doby, než dosáhne materiálového rozhraní nebo nehomogenity. Pokud je takového místa dosaženo, je část energie odražena nazpět a vrací se materiálem k povrchu, kde je umístěn zdroj impulsu i detekční systém. Po dosažení povrchu materiálu způsobí rozdíl akustických impedancí materiál-vzduch novou reflexi a cesta pulsu se opakuje několikrát po sobě až do doby, kdy je jeho energie vyčerpána. Na rozhraní materiál-vzduch dochází k téměř

4

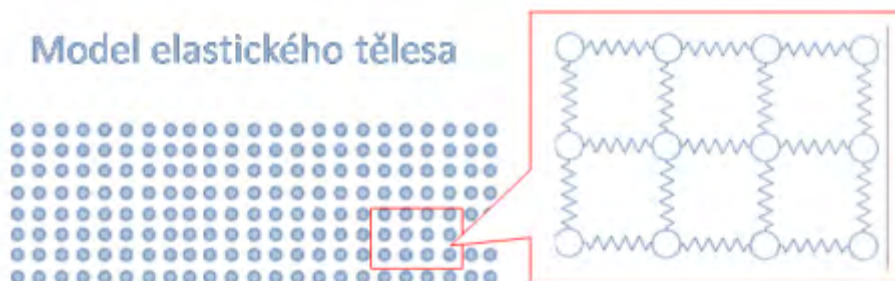
úplnému odrazu vlny. Možnosti detekce defektu a její omezení jsou ovlivněny orientací a plochou defektu. Analýza získaných dat předpokládá převedení změřených časových úseků pomocí Fourierovy transformace na spektrum amplitud v závislosti na frekvenci. Cílem je stanovení dominantních frekvencí. Z hodnoty frekvence o dané amplitudě lze pak stanovit hloubku odrážejícího místa na základě znalosti rychlosti šíření vlny testovaným materiálem.



Obrázek 2: Schéma znázorňující princip metody impakt echo. Mechanický impuls vybudí ve vzorku vlnění na vlastní frekvenci a na vyšších harmonických frekvencích, které však závisí především na rozměrech a materiálových vlastnostech komponent. Na rozhraní prasklina-kámen dochází k odrazu vlnění zpět na detektor. [4]

### 2.1.3. ULTRAZVUKOVÁ MĚŘENÍ

Ultrazvukové (nebo obecněji mechanické, neboli elastické, ultrazvukové i akustické) vlnění se může šířit ve všech skupenstvích, což umožňují vazebné síly mezi jednotlivými částicemi daného prostředí (kmity se přenášejí z jedné částice na okolní). Šíření umožňují vazebné síly mezi jednotlivými částicemi daného prostředí, viz obrázek 3 a 4, přičemž se kmity přenášejí z jedné částice na okolní. Ve vakuu se na rozdíl od elektromagnetických vln (záření) ultrazvukové vlnění nešíří.



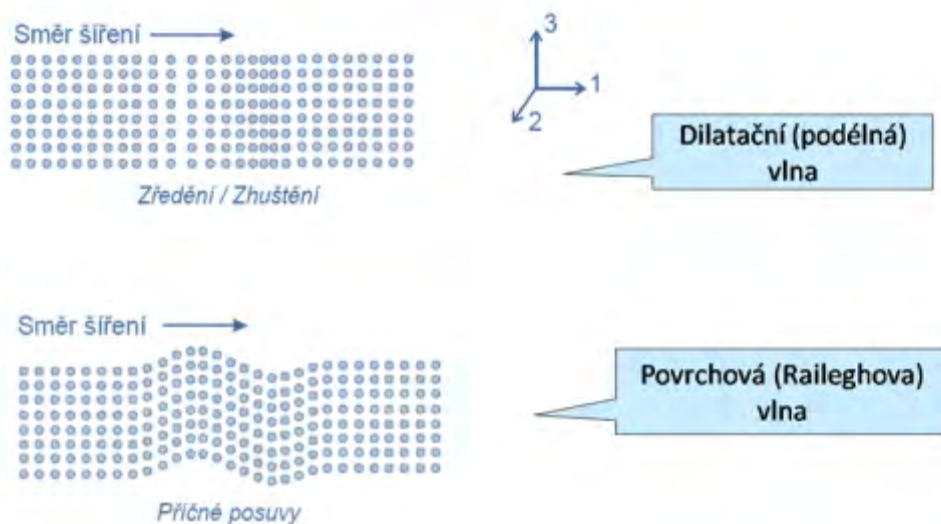
Obrázek 3: Základní model elastického tělesa (Krautkrämer, 1986)

V plynném nebo kapalném prostředí se ultrazvuk šíří pouze jako P-podélné neboli longitudinální (dilatační) vlnění, kde amplituda výchylky je rovnoběžná se směrem postupu vlny. V pevných látkách vznikají i příčné (transverzální) S-smykové vlny (amplituda je kolmá na směr postupu vln), dále také povrchové (R-Rayleighovy) vlny s podélnou i smykovou složkou a v tělesech, jejichž alespoň jeden rozměr je srovnatelný s délkou vlny také vlny deskové (Lambovy) a na rozhraních dvou materiálů Stoneleyovy vlny apod.

Při šíření ultrazvukových vln v hmotném prostředí tedy vzniká několik základních typů vln:

- longitudinální vlny neboli tzv. P-vlny (dilatační), kmitají ve směru šíření vlnění
- transversální vlny neboli tzv. S-vlny, kmitají kolmo na směr šíření vlnění; rychlost šíření je pomalejší než rychlost šíření P-vln
- povrchové vlny neboli tzv. R-vlny (Rayleighovy vlny), kmitání částic je eliptické, přičemž jedna osa je paralelní a druhá kolmá na směr šíření vlnění
- Lambovy vlny (deskové vlny) jsou tzv. dispersní

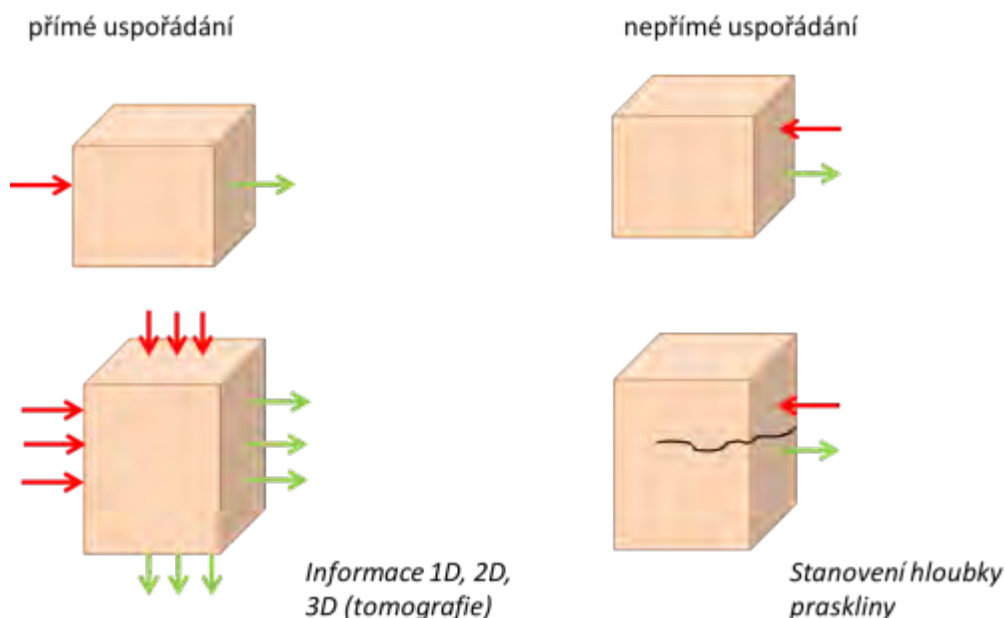
Každá z uvedených typů vln se v materiálu šíří jinou rychlostí  $C$  ( $C_D$ ,  $C_T$ , ...), která je dána elastickými konstantami ( $E$ -modul pružnosti,  $\nu$  - Poissonova konstanta), hustotou  $\rho$  a v případě Lambových vln také poměrem vlnové délky  $\lambda$  k tloušťce desky resp. tyče  $d$ . Lambovy vlny jsou tzv. dispersní, což znamená, že rychlost šíření závisí na  $\lambda = C/f$ , kde  $f$  - je frekvence UZ vln. Za "tlustou" desku lze považovat zhruba tu, pro niž platí, že tloušťka  $d > 1,5 \lambda$ . Na tuto okolnost je třeba dát pozor při buzení nízkofrekvenčními UZ nebo akustickými vlnami, jejichž vlnová délka může být i desítky cm. Vlnová disperse má při pulzním buzení za následek také postupné rozšiřování původně úzkého pulzu, šířícího se tělesem se vzdáleností od zdroje.



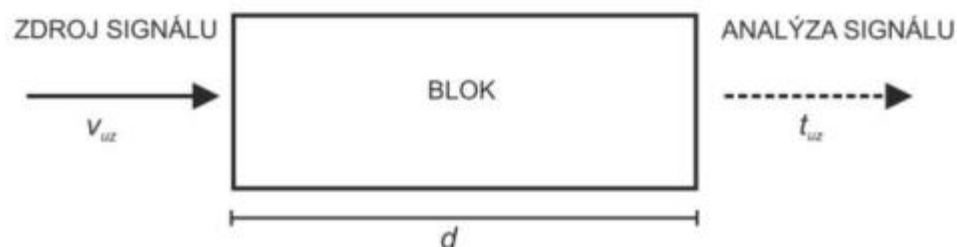
Obrázek 4: Ukázka dvou typů vln na modelu elastického tělesa. Každá z uvedených typů vln se v materiálu šíří jinou rychlostí  $C$ , která je dána elastickými konstantami, tj.  $E$  – modul pružnosti, ( $\nu$  – Poissonova konstanta), nebo hustotou  $\rho$  materiálu.

V masivnějších, kompaktnějších horninách s vyšším modulem pružnosti a s nízkou pórovitostí je rychlost ultrazvuku obvykle vyšší než v horninách poréznějších, obvykle i méně stmelených. Tato závislost se uplatňuje a využívá při srovnávání nepoškozené, neztvrdlé horniny s degradovanou horninou stejného typu. V degradovaných horninách resp. jejich částech je rychlost ultrazvuku nižší než v nepoškozených „zdravých“ částech. V místech, kde došlo např. v důsledku působení povětrnosti ke změně vlastností původní horniny, tj. např. ke zvýšení pórovitosti, je UZ-signal zpomalený, více zatlučený nebo zdeformovaný. Podobný vliv může mít i přítomnost nehomogenních míst a při větších poruchách (např. praskliny) bývá signal utlučený úplně.

Transmisní ultrazvukové (UZ) metody jsou založeny na měření průchodu vln (podélných či smykových) zkoumaným materiálem, viz obrázek 5, 6. Tento způsob měření není většinou možné provádět na kamenném zdivu, protože není obvykle přístupné z protilehlých stran, ale při vyjímání (a to pouze v krajních případech) bloků je možné tuto metodu využít pro hodnocení stavu pískovců. Při měření se na povrch protilehlých ploch nebo na povrch stejné plochy zkoumaného objektu umístí zdroj ultrazvuku (vysílač) a přijímač. Jako základní měřicí veličina se přitom využívá rychlost průchodu ultrazvukového signálu. Vlastním měřením lze zjistit čas průchodu signálu daným místem. Rychlost se vypočítává jako podíl dráhy (vzdálenosti měřicích sond) a naměřeného času. Rychlost šíření UZ-vln je závislá na typu materiálu. Je ovlivněna jeho složením (např. mineralogickým složením u hornin), stmelením, pórovitostí za určitých podmínek je pro daný materiál charakteristickou veličinou, na modulech pružnosti a hustotě. Rychlost šíření vln ovlivňuje u pórovitých a nasávkavých materiálů také vlhkost či přítomnost vody v dutinách a otevřených trhlinách.



Obrázek 5: Obecné možnosti uspořádání ultrazvukové sondy



Obrázek 6: Transmisní uspořádání UZ měření

$$v_{uz} = d/t_{uz} \text{ rovnice (1)}$$

$v_{uz}$  - rychlost ultrazvuku (rychlost šíření longitudinálních, tzv. primárních vln)

$d$  - měřená vzdálenost

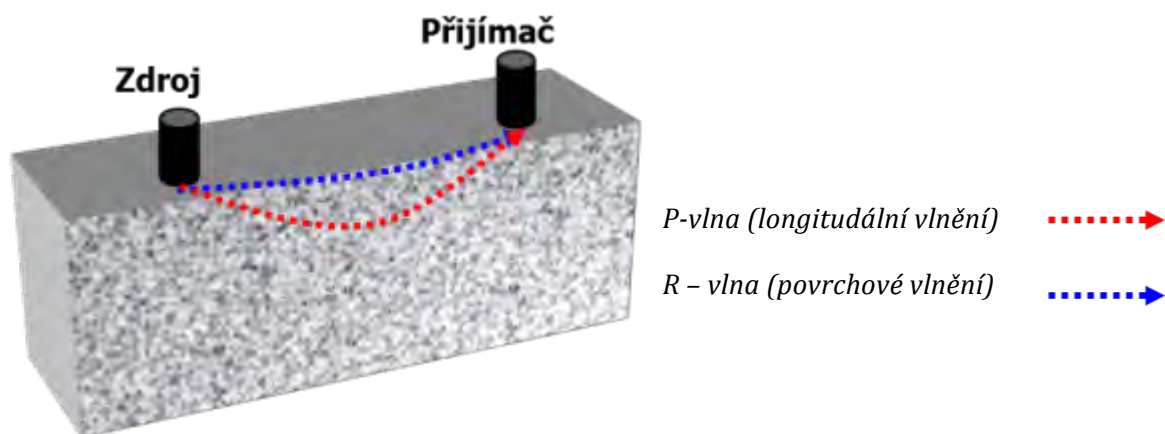
$t_{uz}$  - změřený čas přechodu ultrazvukového signálu

Použití transmisního uspořádání techniky ultrazvuku je v případě pískovcového zdiva možné pouze ojediněle, např. při hodnocení stavu vytaženého, demontovaného bloku, nebo při kvádrech vystupujících z vlastní stavební konstrukce, kdy je umožněn přístup k bloku kamene z více stran. Pro hodnocení bloku ve zdivu metodika lze využít ultrazvukové měření v povrchovém uspořádání.

Princip měření povrchového uspořádání sondy je podobný jako u transmisního měření, tj. zjišťuje se především rychlost šíření ultrazvukového vlnění a dále i amplituda a tvar signálu. Přijímaný zaznamenaný signál se skládá zejména z longitudinálního a povrchového vlnění a jejich vzájemné odlišení může být často poměrně složité. Uspořádání je schematicky znázorněno na

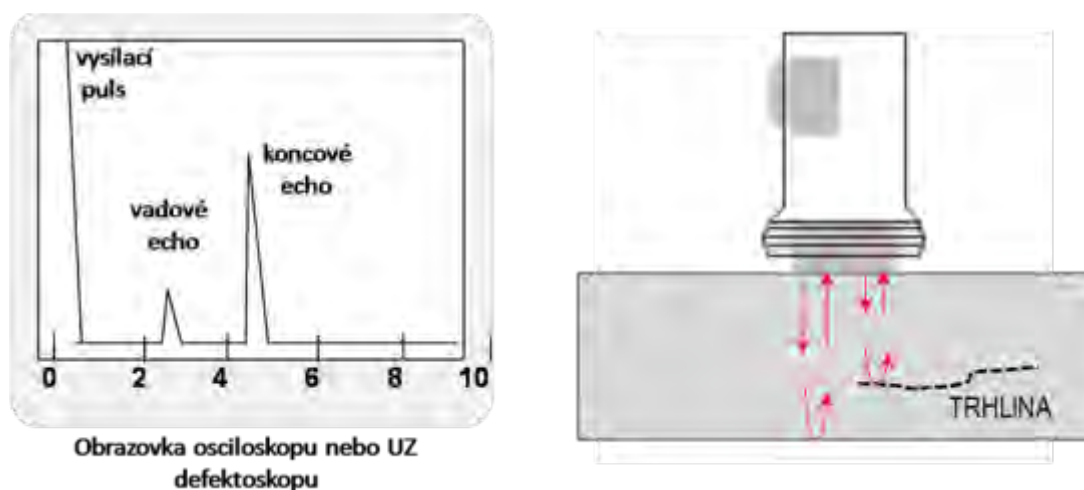


obrázku 7, 8. Povrchové měření se pro kamenné objekty používá zcela logicky pro posouzení stavu povrchu (obvykle maximálně do hloubky několika cm). Lze jím získat informace resp. indicie o přítomnosti, lokalizaci a hloubce prasklin kolmých k povrchu, o přítomnosti povrchových vrstev s větší kompaktností než hlubší vrstvy kamene (např. krusty, zpevněné vrstvy atd.) a také o přítomnosti a lokalizaci prasklin paralelních s povrchem.



Obrázek 7: Uspořádání povrchového ultrazvukového měření

Povrchové uspořádání ultrazvukové techniky může být využité při posuzování stavu povrchu, zejména přítomnosti a lokalizace mikrotrhlin a las směřujících od povrchu dovnitř kamenného bloku.



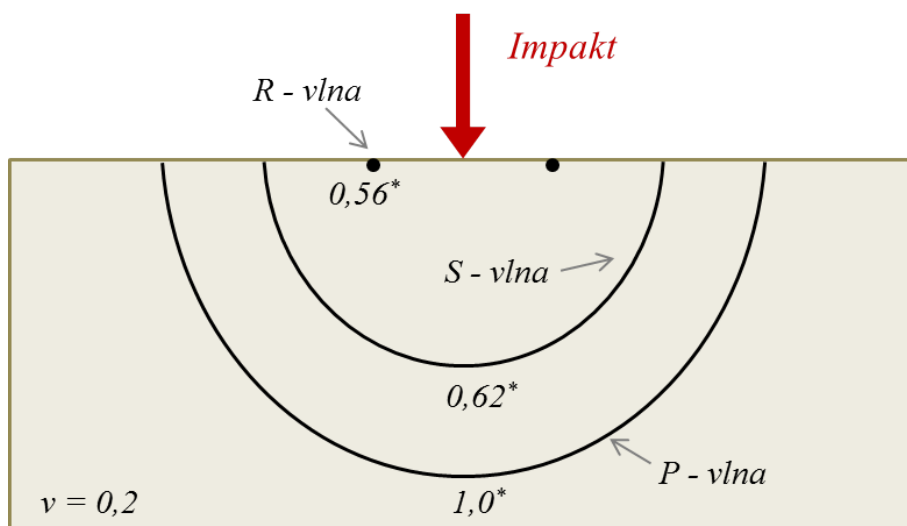
Obrázek 8: Ultrazvuková defektoskopie - Ultrazvukové vlny jsou emitovány do materiálu a odrážejí se zpět od povrchů nebo defektů. Odražené signály jsou zobrazeny na časové ose a inspektor může pozorovat na průřezu vzorku hloubku nehomogenit, které odrážejí UZ vlny.

## 2.2. POPIS ZPŮSOBU MĚŘENÍ POMOCÍ JEDNOTLIVÝCH METOD PŘI PRŮZKUMU PLÁŠŤOVÉHO ZDIVA

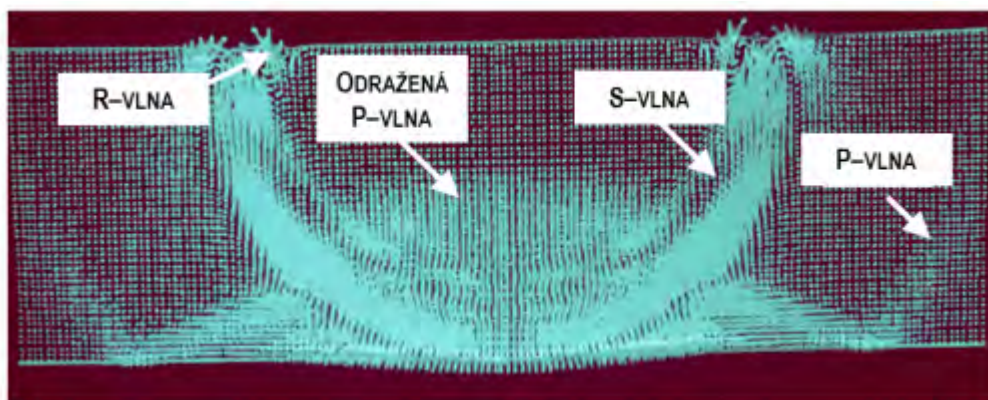
### 2.2.2. Impakt echo

Konstrukce Impakt echa může mít více podob. Důležitým parametrem je síla nárazu, která nesmí deformovat povrchové vrstvy měřeného objektu. Elektromechanické impaktory umožňují provádět reprodukovatelný úder. Po dopadu impaktoru (běžně se používá nerezová kulička) na povrch materiálu dochází k vybuzení nízkofrekvenčního vlnění, které je následně na rozhraní vrstev s rozdílnými impedancemi částečně odraženo zpět, viz obrázek 9. Konstrukce přístroje může být řešena tak, aby byl do jisté míry potlačen efekt povrchové R - vlny. Detektor je v takovém případě umístěn dále od impaktoru.

Je vhodné pozici impaktoru zvolit blízko středu pohledové strany měřeného bloku. Tímto způsobem by měly být co nejvíce potlačeny vlivy bočních stran daného kvádrů. Vzhledem k tomu, že se vlnění šíří izotropně všemi směry, je pak nutné brát v úvahu projevy bočních stěn v hloubce odpovídající nejkratší straně stěny kvádrů. Efekt bočních stěn je patrnější v případech, kdy měříme jednotlivé kvádrů samostatně, nebo kdy nejsou kvádrů ve zdivu v dobrém kontaktu (chybějící spárová hmota, apod.). Z tohoto pohledu je zdivo jako celek tvořený z kvádrů pro měření příznivější.



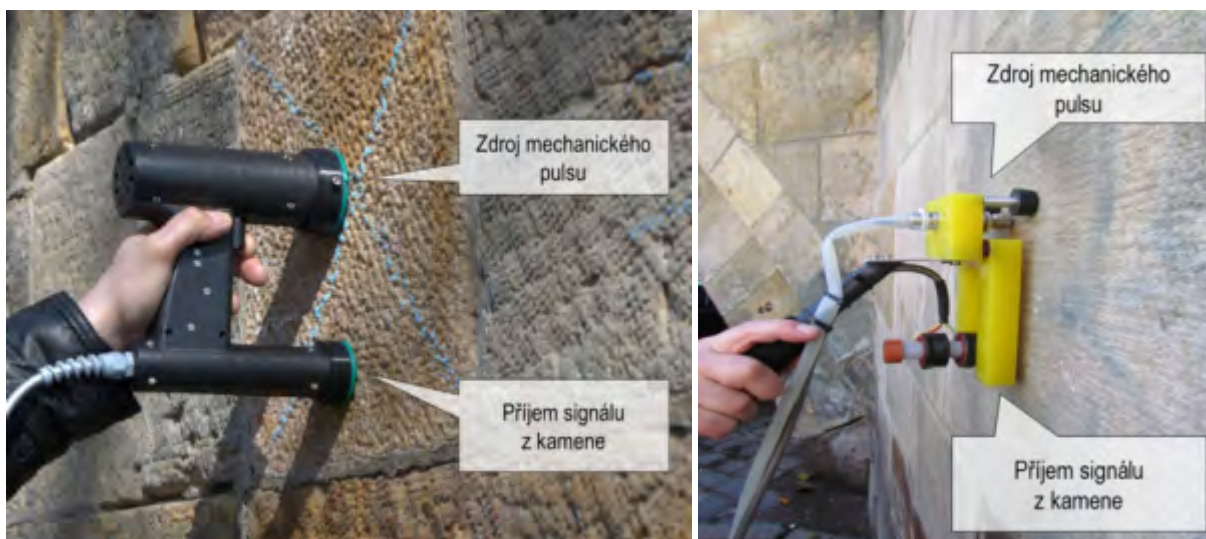
Obrázek 9: Ukázka jak se v bloku materiálu šíří několik vln vycházející z impaktoru. Nejrychlejší vlnou je P-vlna, poté ji následuje S-vlna a po povrchu se šíří R-vlna.



Obrázek 10: Matematická simulace šíření vlny v materiálu při měření impakt echem. Nejrychlejší P-vlna se odráží od spodního konce materiálu. (Carino 2001)

Postup měření pomocí metody Impakt echa:

- Před vlastním měřením je důležité zdokumentovat měřené místo
- Pomocí ultrazvukové sondy stanovit rychlost jakou ultrazvuk prochází měřeným materiálem. Tento údaj je důležitý pro správné vyhodnocování hloubek, ve kterých se nachází zkoumané jevy (trhlina, příložka, konec bloku, apod.). V případě, že není k dispozici ultrazvuk, je možné využít rychlost šíření vlny, pokud je obecně známá její hodnota.
- Vhodné je začít s měřením ve středu pohledové stěny kvádrů, kde je případný efekt bočních stěn nejméně výrazný. Pro detailnější proměření bloku je ovšem třeba postupně proměřit různé pozice na stěně kvádrů, viz obrázek 11.
- Zlepšení spektra můžeme dosáhnout rotováním detektoru okolo impaktoru, který zůstává na stejném místě. Tímto způsobem lze identifikovat defekty, které nejsou orientací blízké 90° k dopadajícímu vlnění.
- Po ukončení měření lze při znalosti rychlosti šíření vlnění materiálem v SW ze spekter odečítat frekvence odpovídající dané hloubce, viz obrázek 12.
- Získaná data se poté zpracovávají pomocí specializovaného SW. Zpracované výsledky se uvádí v podobě frekvenčních spekter, z nichž lze v některých případech odhadnout hloubku defektu



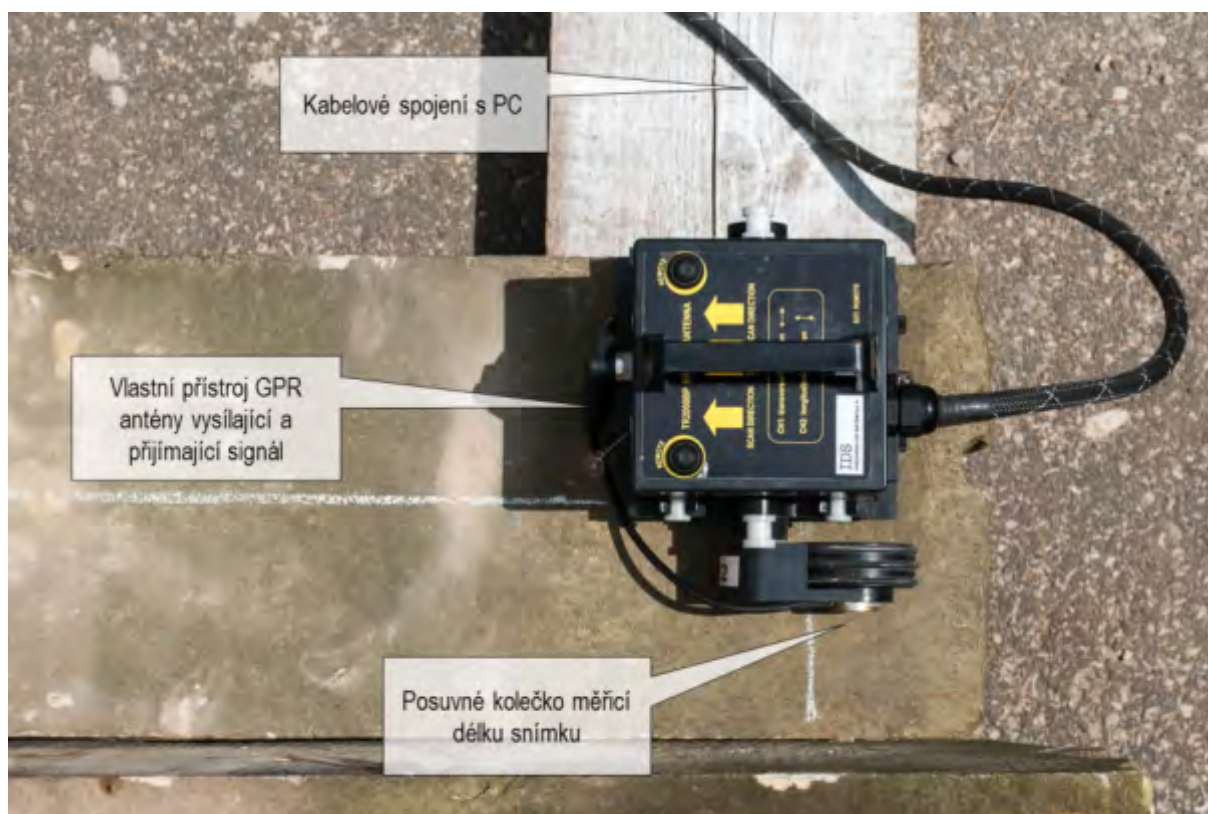
Obrázek 11: Ukázka podoby přístroje impact echa složeného s detektorem a hlavy impaktoru budící mechanický signál



Obrázek 12: Ukázka měření v terénu při simultánním připojení s PC.

### 2.2.3. GPR

Vlastní měření vždy závisí na zkoumaném jevu, okolních podmínkách, přístroji, který je pro měření k dispozici, geometrii konstrukce a možnosti měřit přímo v kontaktu s konstrukcí. Základní vybavení pro měření je zemní radar s anténou o určité frekvenci, viz obrázek 13.



Obrázek 13: Popis GRP přístroje

Penetrace neboli hloubka průniku signálu závisí na frekvenci vysílaného signálu. Vyšší frekvence mají lepší rozlišení, ale větší útlum signálu, a tudíž mají omezenou hloubku průniku. V tabulce 1 jsou uvedeny orientační hodnoty hloubky průniku signálu, z které je možné vizualizovat měřený objekt. Hloubku průniku signálu definuje zvolená frekvence antény a typ materiálu.

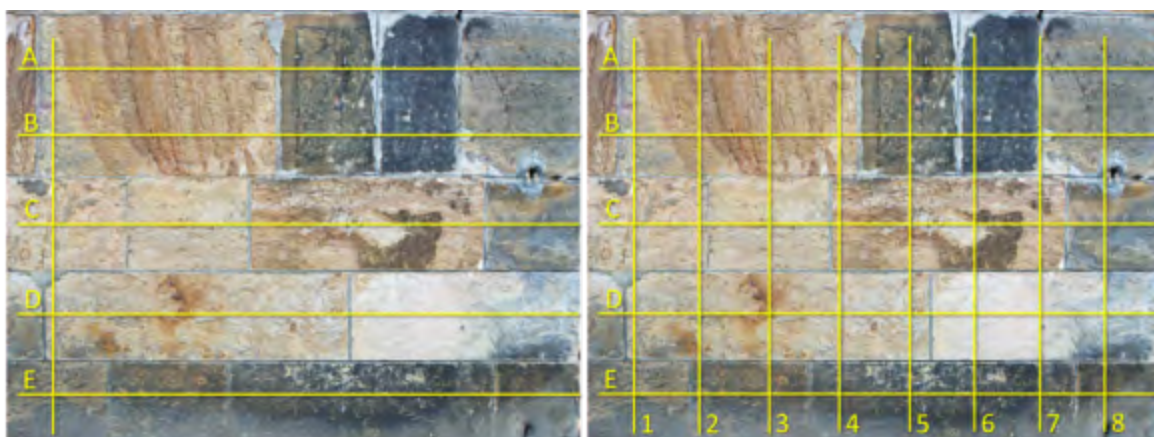
#### Tabulka 1

Orientační vztah frekvence GPR antény a hloubky průniku signálu pro měření zdiva

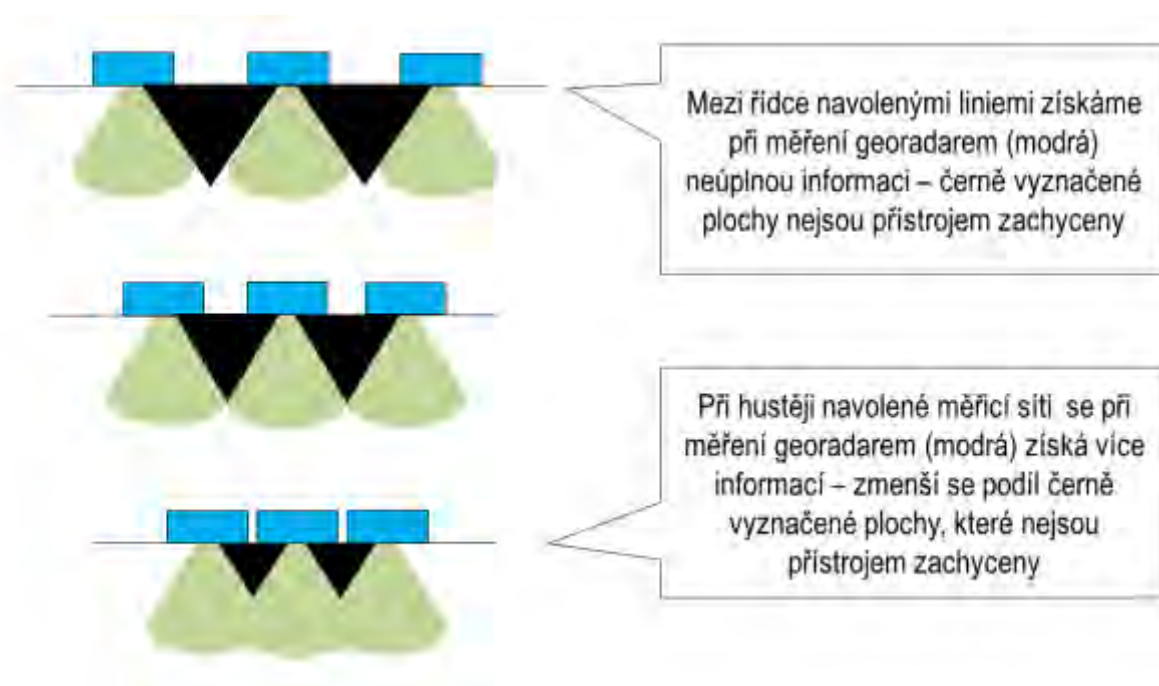
Frekvence	500MHz	1GHz	1,5-2GHz
hloubka dosahu signálu	> 1,5 m	1,0 – 1,5 m	0,5 – 1,0 m

Postup měření pomocí GPR antény zahrnuje:

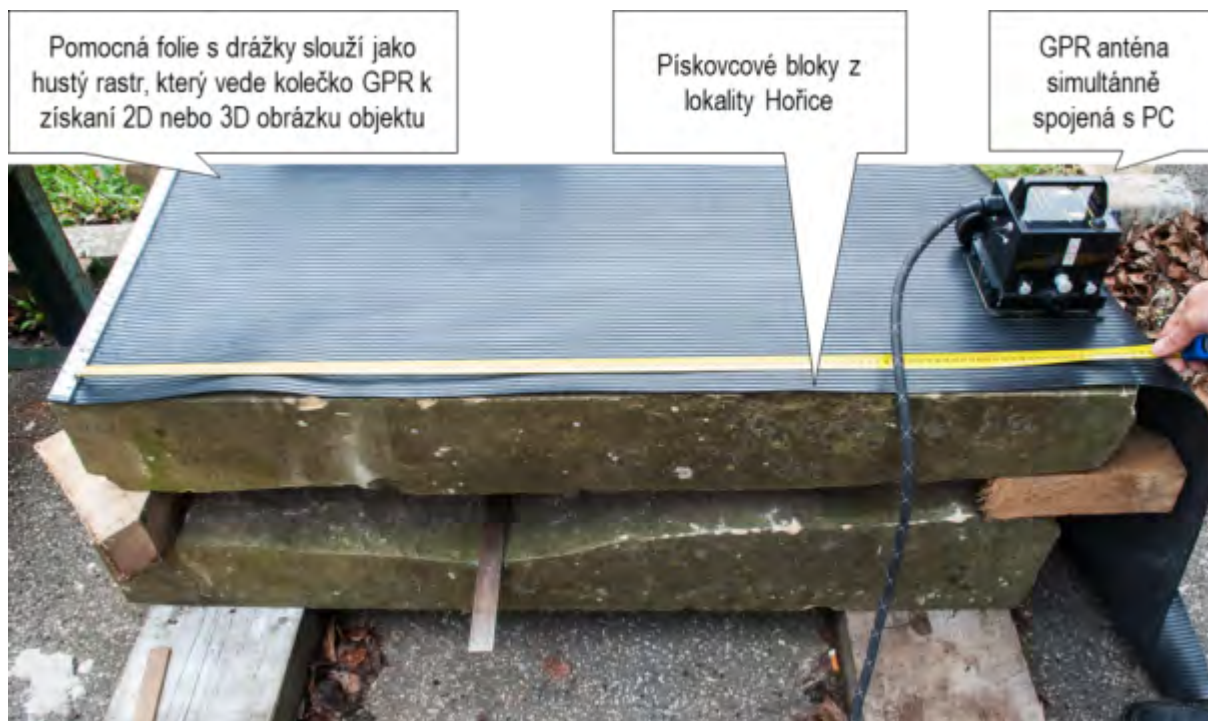
- Před vlastním měřením je důležité zdokumentovat měřené místo a připravit rastr zkoumané plochy s popisem (např. školní křídou), viz obrázek 14, 15.
- Vlastní měření začíná nastavením základních parametrů přístroje, tj. čas (time), počet vzorků na snímek (sample per scan), rychlost šíření signálu (velocity). Optimalizaci nastavených parametrů lze provádět během měření na základě sledování in situ radarogramů.
- Určení snímacího rastru, který zároveň odpovídá možnostem pozičního systému daného přístroje. V případě zdiva se většinou jedná o souběžné lineární snímání ve dvou na sebe kolmých směrech v jedné rovině (rovina líce zdiva). Vždy je potřeba zaměřit počáteční bod ve vztahu k měřené ploše. Délka jednoho snímání je nejčastěji měřena měřicím kolečkem. Způsob rozvržení měřených linií musí odpovídat i předpokládanému způsobu vyhodnocení a zobrazení hledaných efektů.
- Při měření je důležitá přesnost určování pozice antény. S ohledem na rozměry určovaných jevů je potřeba zvolit správné rozlišení měřicího kolečka, rozteč souběžných snímacích trajektorií a případně kolmých snímacích trajektorií. Při měření je nutné dodržet jejich rovnoběžnost. Nejčastěji se využívá podkreslení měřicích trajektorií křídou, ale lze využít i speciálně upravené podložky, viz obrázek 6 a 7, které jsou vhodné pro měření v husté a pravidelné ortogonální síti, z nichž lze vytvářet 3D radarogramy.
- Vlastní posuv antény po ploše a záznam přijímaného signálu, viz obrázek 8.
- Pro detailnější průzkum vybrané plochy zdiva je vhodné měřicí dráhy volit v hustějším rastu, tak aby docházelo k překryvu. Tento postup je významný v případě zobrazování 3D radarogramů, ale zároveň eliminuje ztráty informací blíže k povrchu, viz obrázek 16.
- Po ukončení sběru dat následuje jejich softwarové zpracování a interpretace výsledků, které jsou prezentovány v podobě radarogramů, obrázek 17.



Obrázek 14: Možné podoby rastru pro měřené oblasti



Obrázek 15: Schéma zachycuje, jak zvolená hustota rastru ovlivňuje množství získaných informací – zeleně je značená plocha, která je přístrojem snímaná.



Obrázek 16: Speciálně upravená podložka



Obrázek 17: Vlastní proces měření GPR anténou na pískovcové zdi



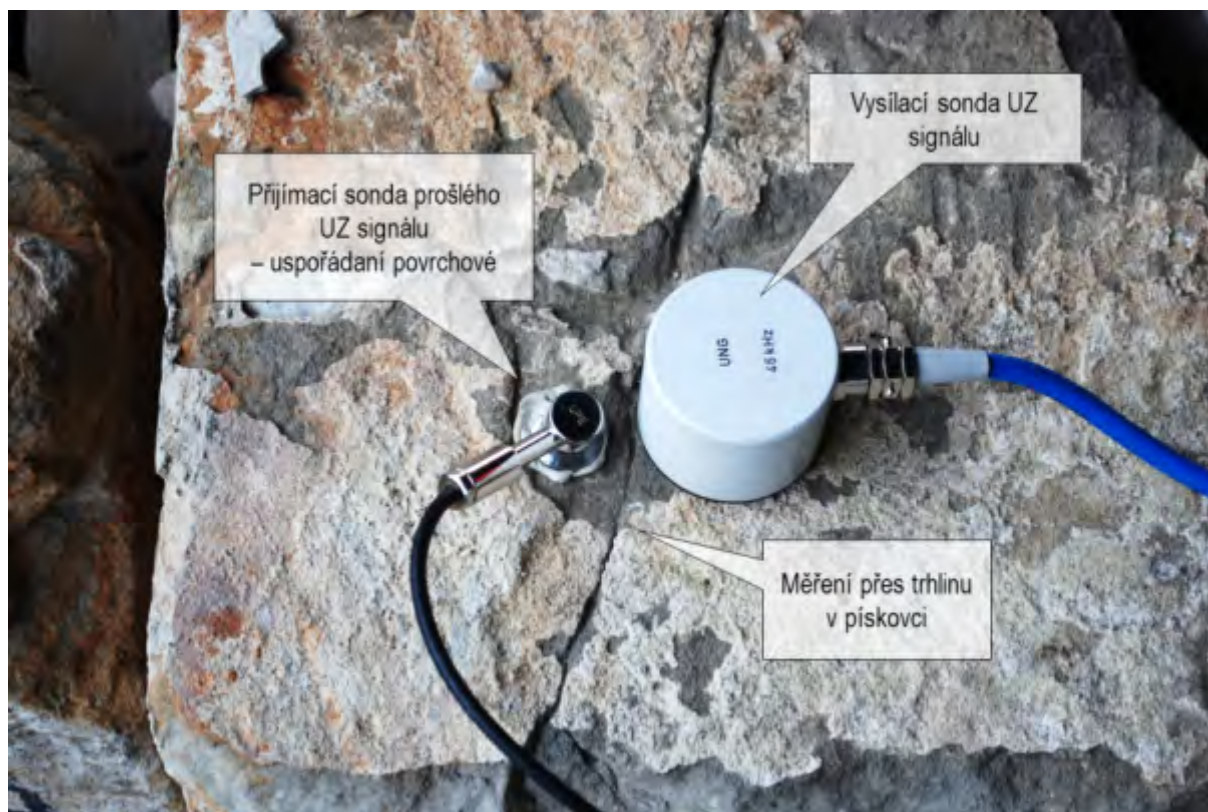
### 1.1.1. Ultrazvuková měření

V případě povrchového měření lze principiálně využívat stejnou přístrojovou techniku jako v případě transmisního měření. Praktický rozdíl je v uspořádání měření, výběru vhodných měřících sond (vysílače – zdroje ultrazvukového vlnění a přijímače) a použití případného pomocného zařízení pro uchycení sond. Dle dosavadních zkušeností je vhodné používat širokopásmové sondy umožňující pracovat s rozličnými frekvencemi ultrazvukového vlnění – nejčastěji v rozpětí 100 až 300 kHz, viz obrázek 18, 19. Lze používat i zdroje s pevnou frekvencí, přičemž jako optimální lze doporučit frekvenci 250 kHz. Pro zmenšení nepřesností při stanovení vzdálenosti zdroje a přijímače (měřená vzdálenost resp. dráha) je vhodné používat sondy s konickým tvarem zakončeným malou kruhovou plochou s průměrem cca 1-2 mm, viz obrázek 18. Optimální vzdálenost mezi zdrojem ultrazvuku i přijímačem se při povrchovém měření pohybuje dle dosavadních zkušeností mezi 4-8 cm. Tato vzdálenost by měla být při průzkumu v průběhu celého měření stejná. Jako spojovací materiál mezi sondou a povrchem kamene se nejčastěji používá trvale plastický tmel na bázi silikonového kaučuku (bez přísady změkčovadel).



Obrázek 18: Širokopásmové sondy (vysílač a přijímač) s konickým zakončením - vlevo, komerčně vyráběné zařízení pro uchycení měřících sond pro povrchové ultrazvukové měření - vpravo

Povrchové uspořádání ultrazvukové techniky může být užitečné při posuzování stavu a rozsahu trhlin a las směřujících od povrchu do jádra kamenného bloku. V případě, kdy dochází k rozevírání praskliny či lasy a tím ke vzniku mezer vyplněných vzduchem, je signál silně ovlivněn diskontinuitou materiálu a dochází k jeho výraznému zeslabení a deformaci tvaru průběhu. Kritickým faktorem zde může být omezená znalost a nedostatečné zkušenosti uživatele této techniky, které pak vedou k nesprávné interpretaci naměřených dat. Po celou dobu měření musí být udržován dobrý kontakt zdroje ultrazvukového vlnění a přijímače s měřeným povrchem. V případě nedostatečného kontaktu pak může docházet k nesprávné interpretaci naměřených výsledků a měřená část bloku se může jevit jako poškozená. Vysoká míra útlumu v případě nedostatečného buzení UZ může způsobit dojem, že měřená část bloku je poškozená či nekompaktní. Pokud je při povrchovém měření objeveno místo se silně ztlumeným nebo deformovaným signálem bez znatelné přítomnosti povrchového poškození, je nezbytné nejprve zkontrolovat stav styčných ploch (akustického kontaktu) budící i detekční sondy s testovaným blokem a měření opakovat pro ověření výsledku.



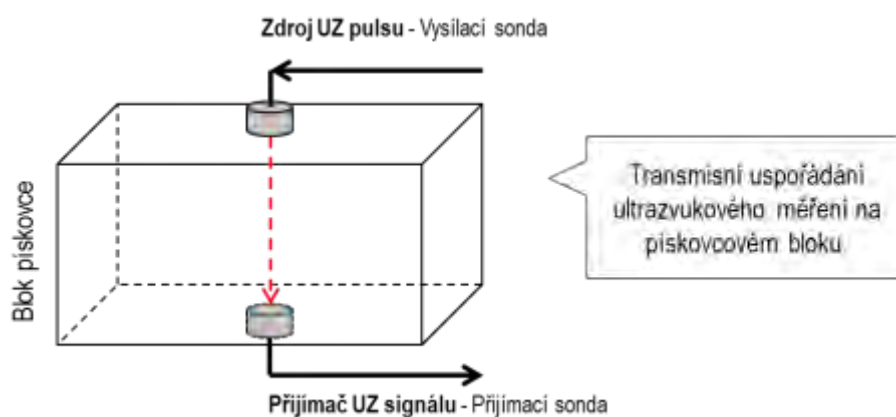
Obrázek 19: Povrchové měření otevřené praskliny s využitím standardních měřících sond

Postup průzkumu pomocí povrchového ultrazvukového měření:

- Před zahájením vlastního měření je vhodné vizuálně podrobně prozkoumat vybranou plochu nebo plochy, které jsou předmětem zkoumání. Všechna zjištění je nutné písemně a pokud možno i fotograficky dokumentovat.
- Na plochách, které jsou předmětem zkoumání se doporučuje vyznačit místa měření (lehce odstranitelným způsobem). Pokud není k dispozici pomocné zařízení na uchycení sond v pevné vzdálenosti, tak je také vhodné přesně vyznačit měřící body pro obě sondy, aby byla v průběhu celého měření dodržena stejná měřící vzdálenost.
- Vybrané plochy by neměly být pokryté silnou vrstvou nečistot nebo povlaků biologického původu (např. řasy, lišejníky, atd.).
- Vlastní měření probíhá přikládáním sond na vybraná místa. Je vhodné používat přibližně stejný přítlak sond k povrchu kamene. Kontakt sond se zkoumaným povrchem lze zlepšit použitím trvale plastického tmelu (nejčastěji na bázi silikonového kaučuku bez přísady změkčovadel), viz obrázek 19.
- Hlavním měřeným parametrem je čas šíření ultrazvukového vlnění, dále se sleduje amplituda a tvar signálu na osciloskopu.
- Ze získaných dat (čas šíření ultrazvuku a měřící vzdálenost) se následně vypočítá rychlost šíření ultrazvukového vlnění. Podstatnou roli hraje při interpretaci výsledků i amplituda a tvar signálu.

Jak již bylo zmíněno v předcházejícím textu v kapitole 2.1.3., lze v případě kvádrů nebo částí stavební konstrukce, které jsou přístupné nejen z jedné strany využít i transmisní uspořádání měření. Přístrojové vybavení je stejně, měřicí sondy (zdroj a přijímač) se přikládají v místě měření z protilehlých stran, viz obrázek 21. Měřicí přístroj je stejný jako v případě povrchového měření, rozsah frekvencí ultrazvukového vlnění se pohybují nejčastěji v rozpětí 40 až 300 kHz. V závislosti od morfologie povrchu zkoumaného prvku i od zadání lze používat sondy s větším plochým zakončením (lepší přenos signálu) nebo s konickým tvarem (přesnější určení měřicího bodu). Jako spojovací materiál mezi sondou a povrchem kamene se i v tomto případě nejčastěji používá trvale plastický tmel na bázi silikonového kaučuku (bez přísady změkčovadel).

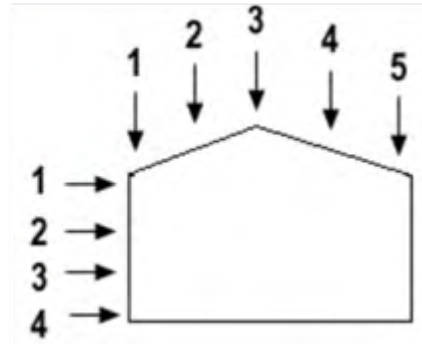
Samotný postup i záznam výsledků měření je velmi podobný jako v případě povrchového měření, rozdíl spočívá zejména v již zmiňovaném způsobu umístění sond. Výhodou transmisního uspořádání je hlavně možnost zjišťování stavu a případných poruch v celém objemu kvádrů nebo jiných kamenných objektů (např. sochy) a nejen na povrchu. V případě kvádrů pravidelného tvaru, lze při dodržení určitých podmínek měření pomocí ultrazvukové transmise zjišťovat i modul pružnosti dané horniny.



Obrázek 20: Schéma transmisního uspořádání UZ

Při zjišťování celkového stavu kvádrů nebo solitérního objektu je nutné počet a polohu měřících bodů volit tak, aby bylo možné prozkoumat daný objekt v celém objemu (např. u kvádrů 500×400×300 cm kolem 30-50 měřících bodů). Měření by měla být prováděna v různých směrech (horizontálně i vertikálně), pokud je zkoumaný objekt přístupný z různých stran. Tímto způsobem lze získat nejen ucelenější data, ale lze pak hodnotit i případnou anizotropii použité horniny. Lze pak vzájemně srovnávat místa s degradovanou horninou a místa se „zdravým“ kamenem, kde žádné poškození není patrné. Toto srovnání tak umožňuje zpřesnit interpretaci a posuzování stavu kamene, případně lokalizaci poruch.

Rozmístění měřících bodů a následné grafické znázornění výsledků měření lze ilustrovat na příkladu zjišťování stavu a lokalizace případných poruch na kamenném kvádru 17/XV B demontovaném z Karlova mostu a deponovaném na úložišti na Šutce v Praze, viz obrázek 21



Obrázek 21: Schematické uspořádání měřících bodů v jednotlivých osách měření ve vertikálním (1-4) a horizontálním směru (1-5) na kvádru.

Tento UZ rychlostní profil je vhodné proměřit od jednoho konce bloku ke druhému se zvolením vhodného kroku posunu k dané velikosti měřeného objektu.

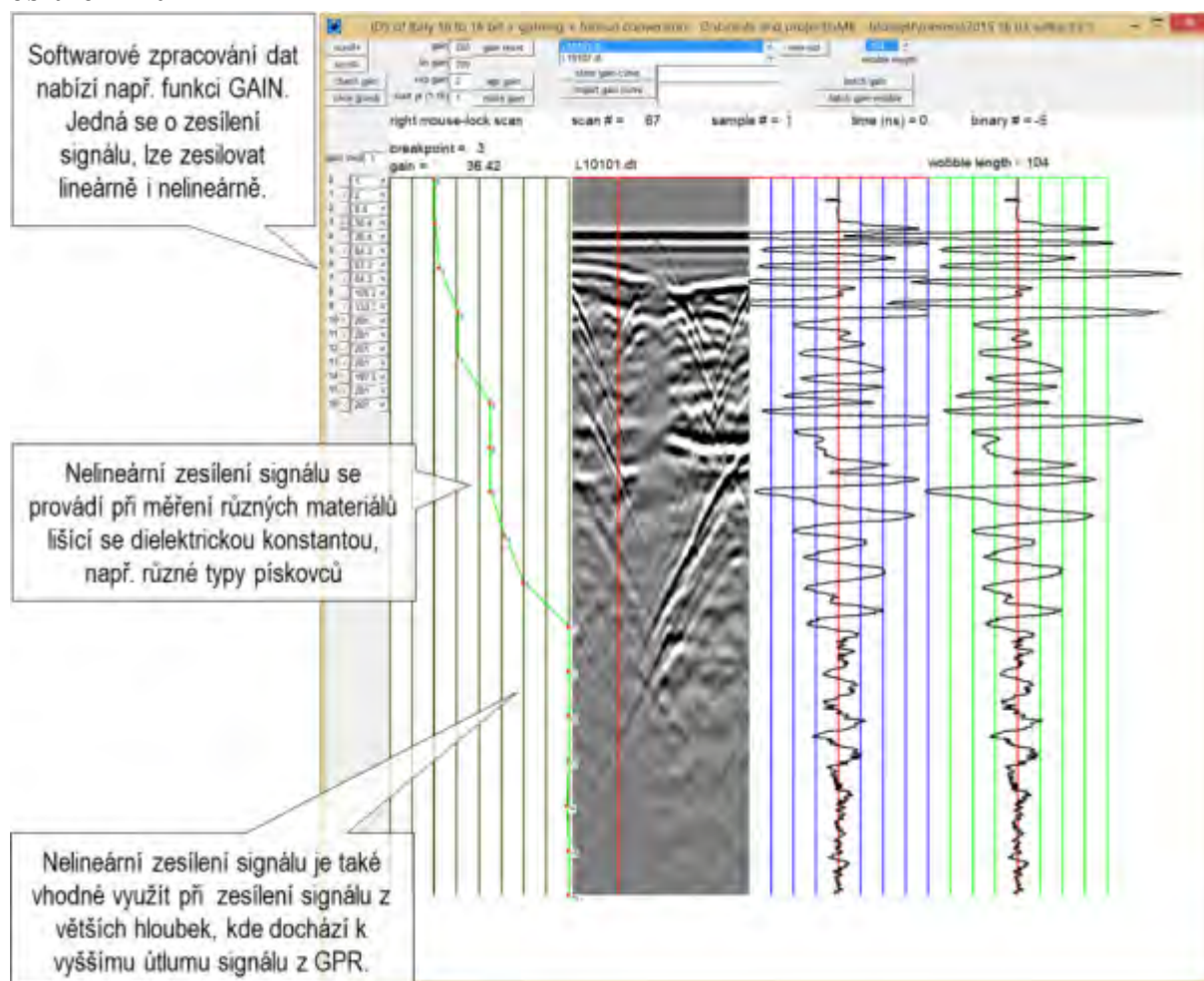
## 2.3. MOŽNOSTI A OMEZENÍ PŘI VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT A VÝHODY KOMBINOVÁNÍ

### 2.3.2. GPR

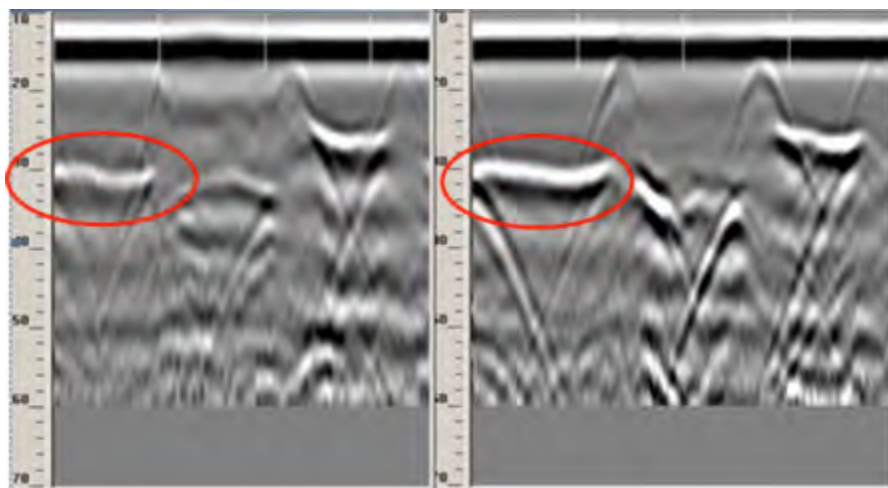
Výsledky získané z měření GPR lze vyhodnocovat na různých úrovních znalosti techniky i typu zkoumaného materiálu. Velmi přehledné zobrazení měření bývá zpravidla dostupné již během samotného měření. Příklad neupraveného radarogramu získaného ihned po provedení měření in situ je znázorněn na obrázku 24. Viditelné jsou pozice spár, některé přechody a výraznější hyperboly, přes které ovšem není jednoduché rozeznávat přechody přítomné za prvními rozhraními. Hyperboly lze ve velké míře eliminovat funkcí *Migrace*. Dalším omezením vizualizace během měření je jednotné zesílení signálů. Toto se může nevýhodně projevit tak, že některé efekty jsou zesíleny málo, tudíž jsou rozhraní nečitelná anebo naopak zesíleny moc, pak i standardní pozadí může být zobrazeno ve velkém kontrastu a komplikovat interpretaci. Radarogramy získané in situ slouží především k optimalizaci měřících parametrů, (např. čas, počet skenů, rychlost).

### Úprava síly signálu

Zesílení signálu lze provést lineárně i nelineárně pomocí funkce *Gain*. Je možné zesílit pouze některé oblasti nebo postupně zesilovat signály a tím potlačit slábnutí signálu buďto s přibývajícím hloubkou nebo s výskytem materiálu, pro který je vhodná jiná hodnota zesílení, viz obrázek 22 a 21.



Obrázek 22: Ukázka použití úpravy funkce GAIN



Obrázek 23: Blok libnavského pískovce (vlevo červeně vyznačeno) při srovnání dvou úrovní zesílení signálů

### **Korekce nulového bodu**

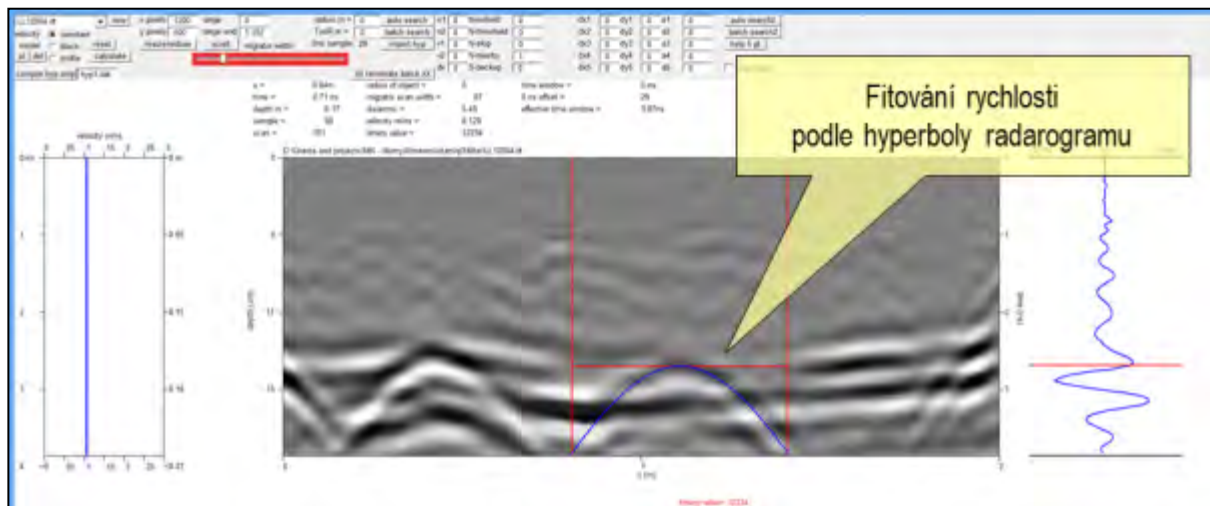
Tato operace umožňuje zobrazení měřeného bloku od povrchu kamene, eliminuje tedy přítomnost dráhy vlny mezi anténou a povrchem kamenného bloku, viz obrázek 24.



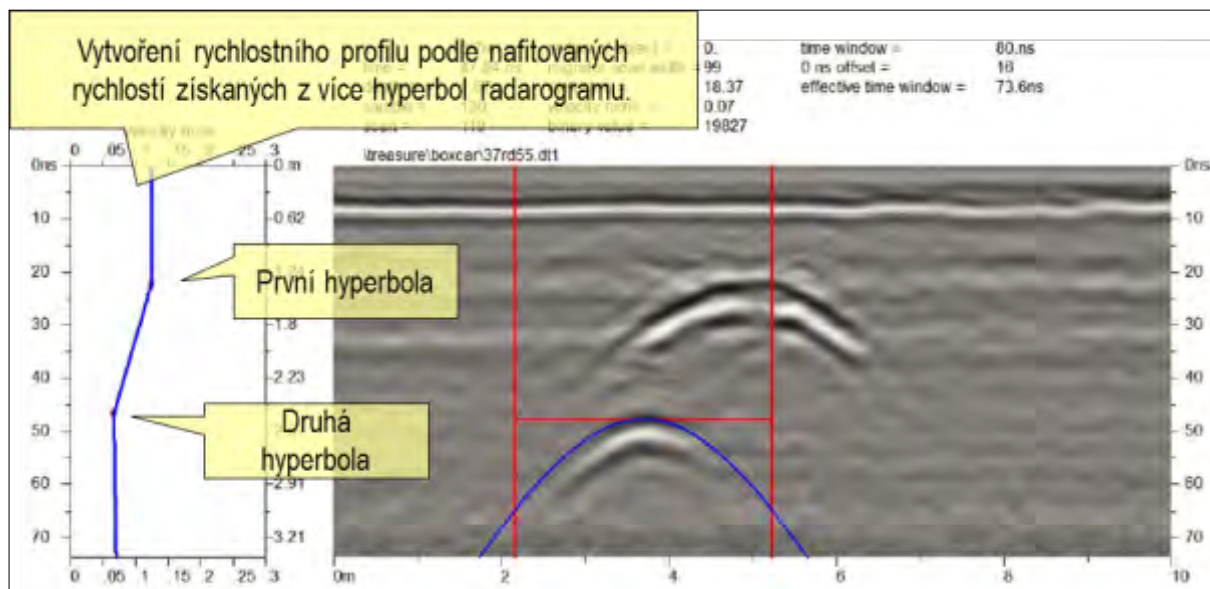
Obrázek 24: Ukázka neupraveného radarogramu bez dodatečných SW úprav

## Fitování rychlosti podle hyperbol

Vyhodnocovací SW umožňují stanovit rychlost šíření vlny dle tvaru získané hyperboly, respektive tvaru jednoho z ramen hyperboly. V případě lícového zdiva se výrazné hyperboly vyskytují díky přítomnosti děr a předmětů z rozličných materiálů, ale také na rozhraních spár a přechodových vrstev. SW umožňují použít průměrnou rychlost shodnou pro všechny vrstvy nebo vytvoření rychlostního profilu v případě, že jsou k dispozici informace o rychlostech v různé hloubce, viz obrázek 25, 26.



Obrázek 25: GPR – Fitování rychlosti z naměřené odezvy



Obrázek 26: Rychlostní profil podle hyperbol

Zásadním parametrem georadarového měření je dominantní vlnová délka antény. Tato hodnota určuje několik významných charakteristik přístroje:

a) *Detekční limit*

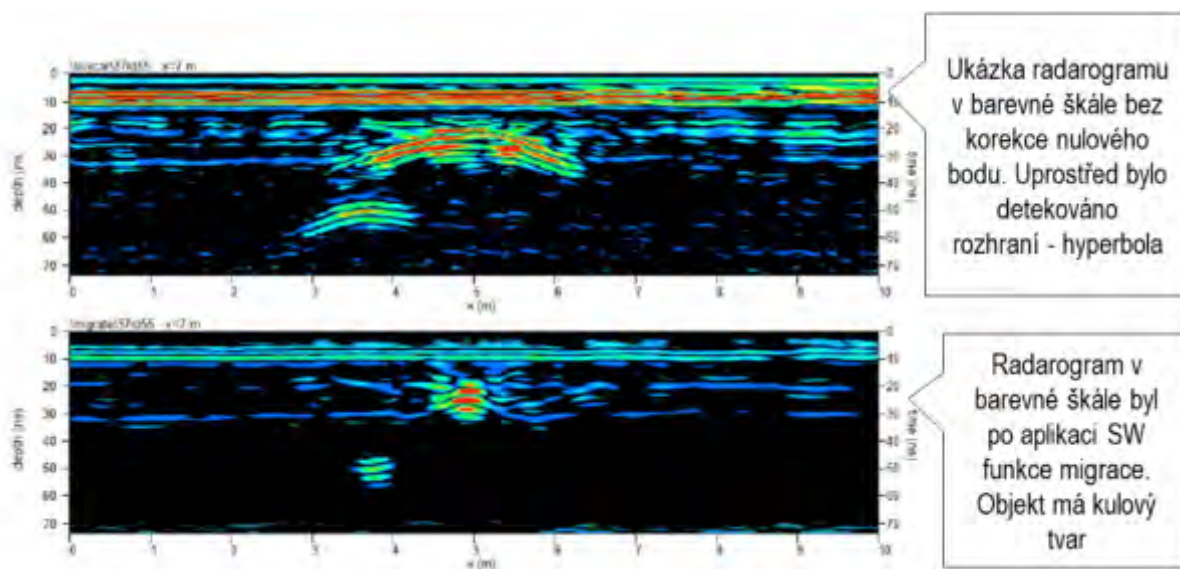
Jedná se o stanovení minimální velikosti rozhraní, tak aby jej bylo možné daným přístrojem detekovat. Převážně se tato hodnota počítá jako jedna osmina dominantní vlnové délky frekvence použité antény, tj.  $\lambda/8$ . Některé práce však uvádějí hodnotu jednu pětadvacetinu dominantní vlnové délky frekvence použité antény, tj.  $\lambda/25$ .

b) *Rozlišení*

Jedná se o rozlišení mezi dvěma efekty, tak aby se nejevily jako jeden. V literatuře lze dohledat složitější vztahy pro výpočet vertikálního i horizontálního rozlišení. Přesné hodnoty záleží na charakteru materiálu i konstrukci antény. Aby bylo možné rozlišit s velkou pravděpodobností dvě rozhraní, je lepší předpokládat hodnotu dominantní vlnové délky frekvence použité antény ( $\lambda$ ). Ukázka vertikálního rozlišení je demonstrována na obrázcích 30.

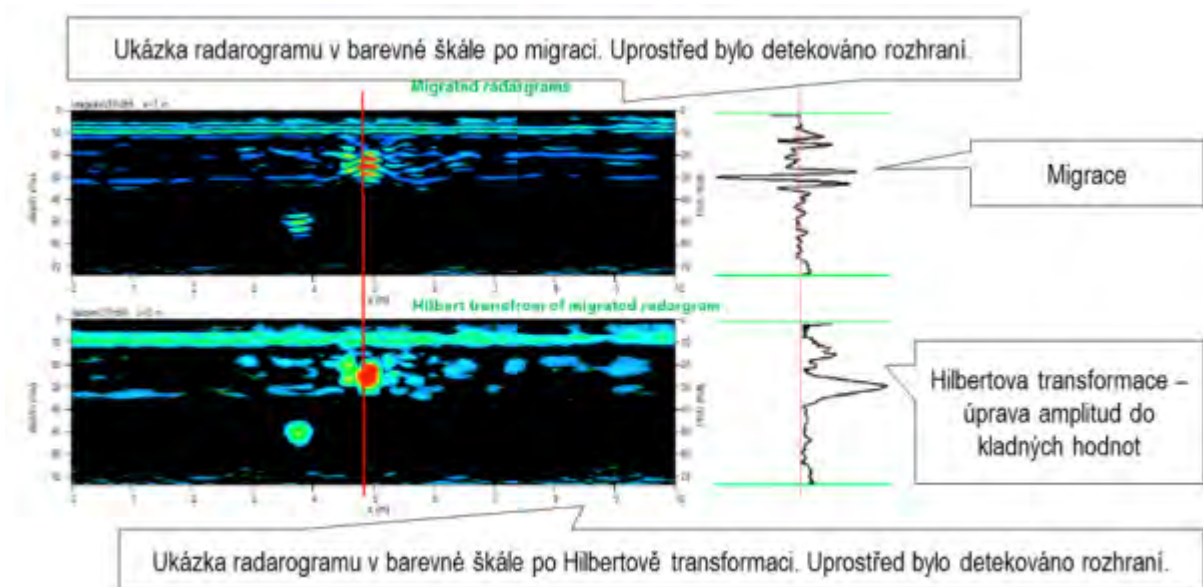
### **Funkce Migrace a Hilbertova transformace**

Vizualizace tvaru rozhraní lze zlepšit kombinováním funkcí Migrace/Hilbertova transformace. *Migrace* eliminuje přítomnost hyperbol a přiblíží tak rozhraní reálnému tvaru. *Hilbertova transformace* pak upraví vlnu tak, aby byly amplitudy pouze pozitivní, zobrazení tvaru se více blíží realitě, viz obrázky 27 - 29.

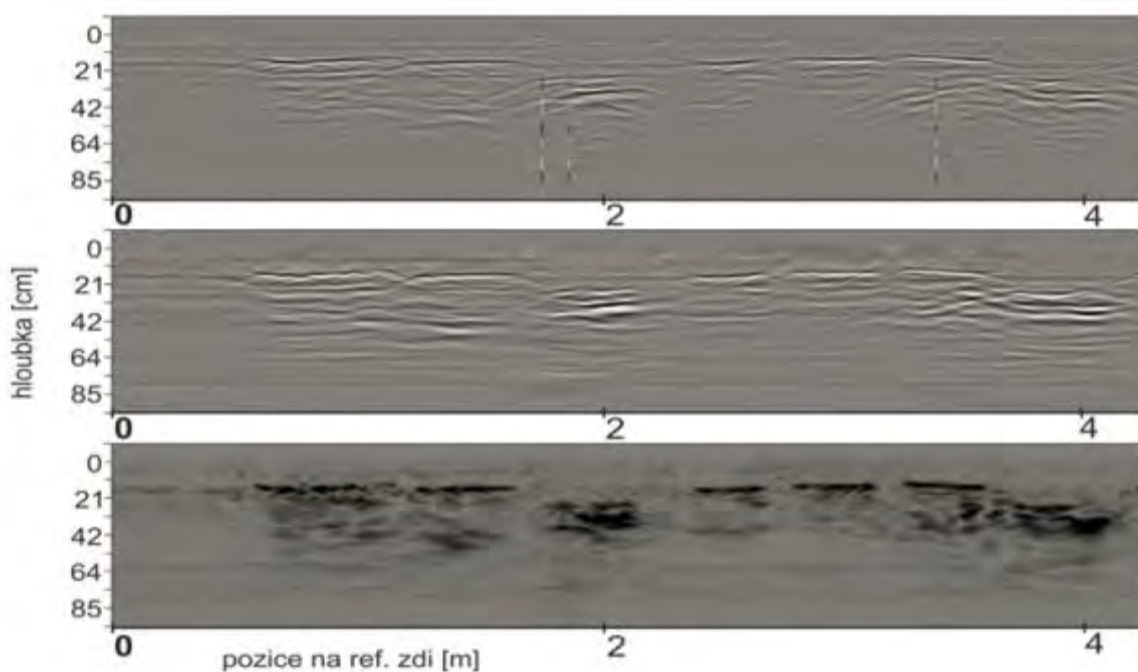


Obrázek 27: Radarogram v barevné škále (User's Manuál 2012)



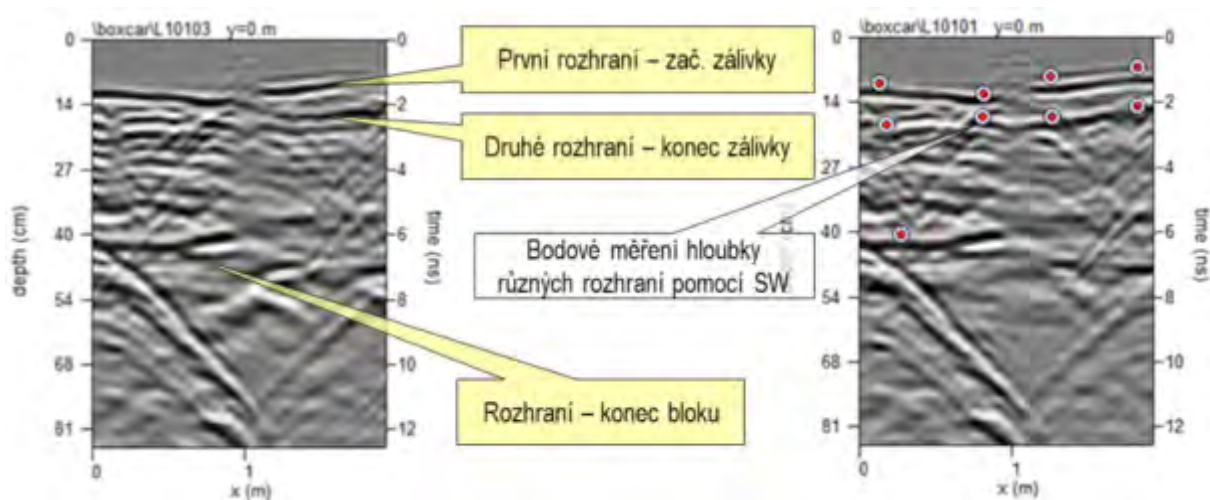


Obrázek 28: Radarogram v barevné škále (User's Manuál 2012)

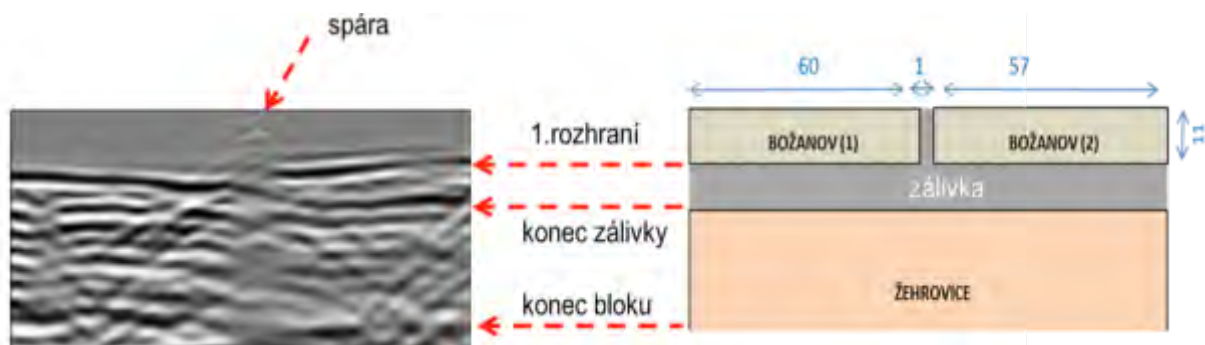


Obrázek 29: Ukázka použití funkce korekce nulového bodu, migrace a Hilbetovy transformace na radarogramu, měřeného na pískovcové zdi

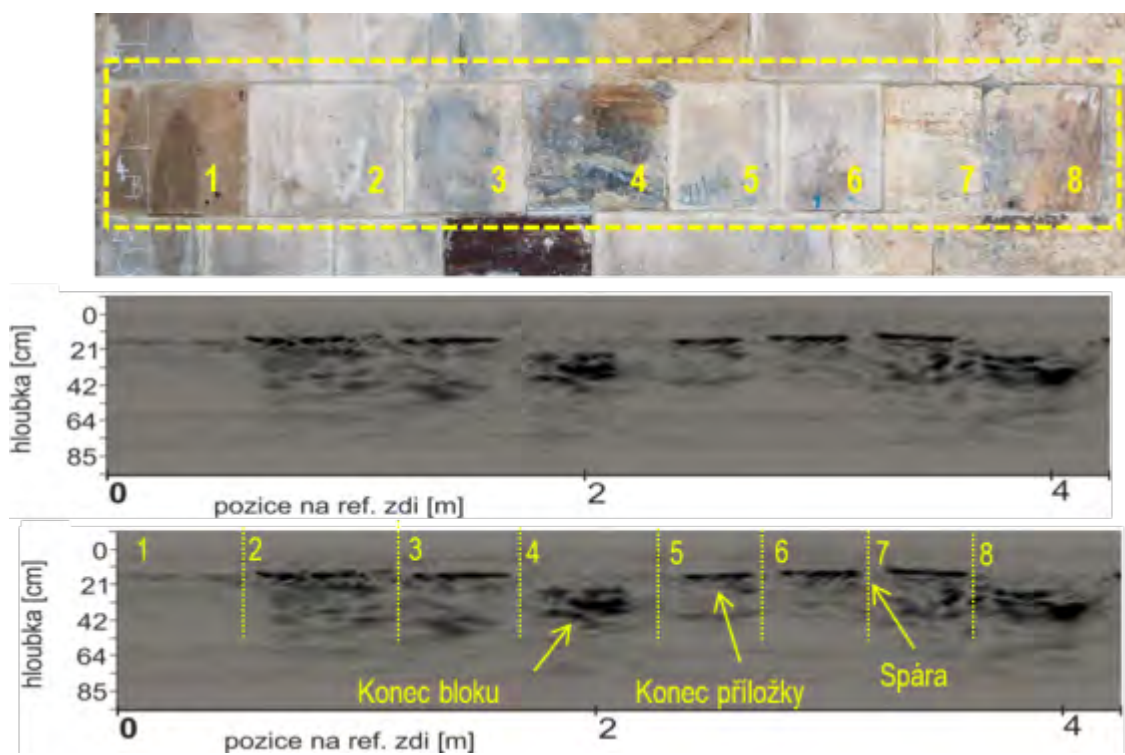
Ukázka několika interpretací radarogramu je demonstrována na obrázcích 30 – 32.



Obrázek 30: Ukázka radarogramu, při kterém je možné hodnotit tloušťku několikacentimetrové zálivky



Obrázek 31: Ukázka radarogramu, při kterém je možné hodnotit tloušťku několikacentimetrové zálivky při porovnání se schématickým obrázkem měřeného objektu



Obrázek 32: Ukázka interpretace radarogramu po Hilbertově transformaci s ukázkou měřené zdi

### 2.3.3. IMPAKT ECHO

Interpretace IE je založena na odečtu frekvencí nejintenzivnějších píků. Odpovídající hloubky lze vypočítat na základě jednoduchého vztahu, kdy rychlost šíření P-vlny daným materiálem je podělena odečtenou frekvencí a číselnou hodnotou dvě, zohledňující cestu vlny tam a zpět.

$$T = Cp/2f$$

$f$  = frekvence odpovídající odražené vlně

$Cp$  = rychlost P-vlny daným materiálem

$T$  = hloubka

Pokud vlna dosáhne přechodu mezi materiály s rozdílnou impedancí, viz tabulka 2, dojde k jejímu částečnému odrazu. Intenzita píku, patřící odražené vlně, závisí na rozdílu impedancí a úhlu dopadu. Maximální intenzity dosahuje, pokud je úhel dopadu roven 90°. Pokud je rozhraní rovnoběžné se směrem vlny, pravděpodobně nebude pro přístrojové uspořádání (IE) viditelné.

#### Tabulka 2

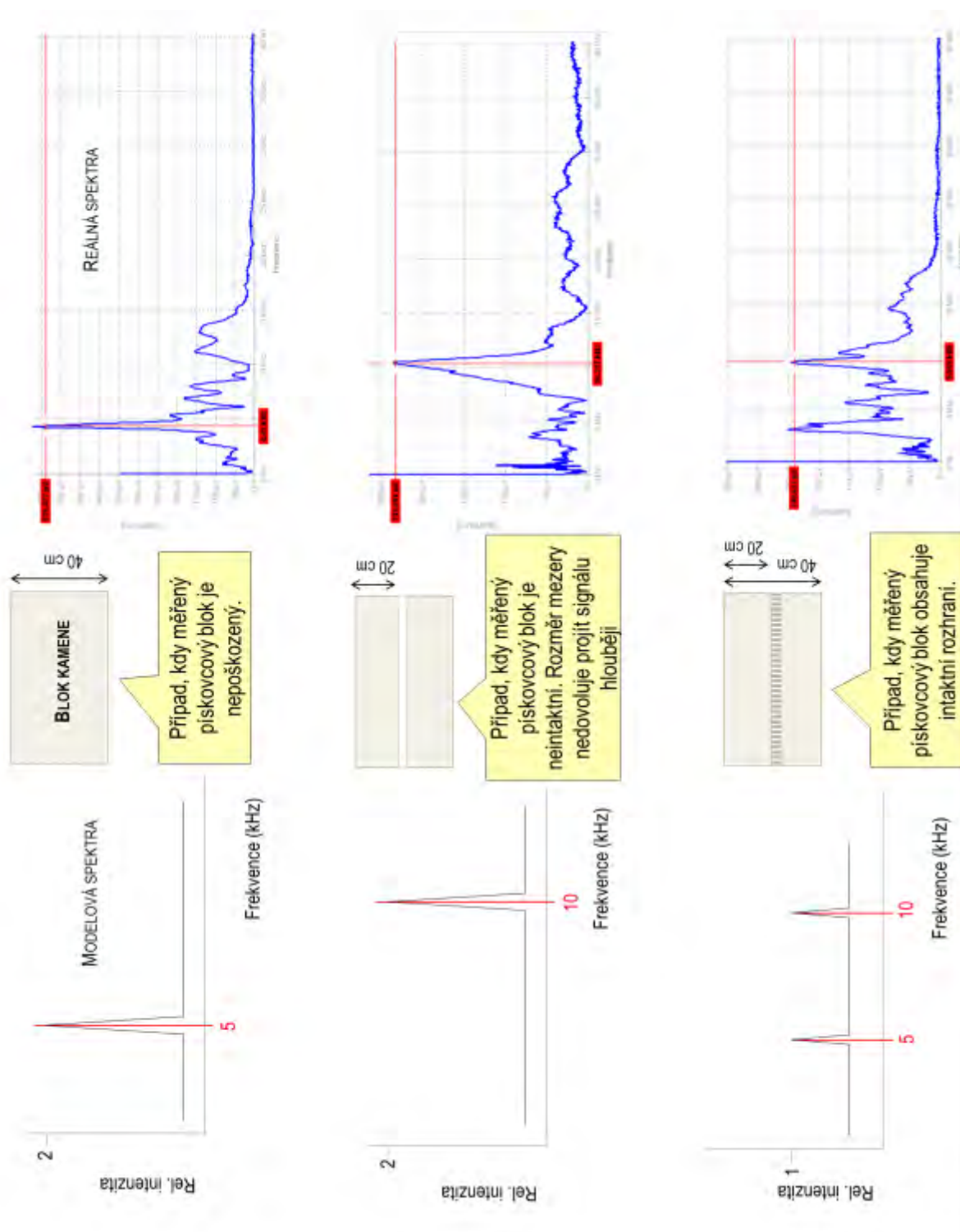
Hodnoty specifické akustické impedance pro vybrané materiály

Materiál	Specifická akustická impedance [kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Vzduch	0,4
Voda	0,5 x 10 <sup>6</sup>
Půda	0,3 až 4 x 10 <sup>6</sup>
Cement	7 až 10 x 10 <sup>6</sup>
Ocel	47 x 10 <sup>6</sup>

Původně byla analýza prováděna na základě určení času od začátku úderu k návratu P-vlny. Jako zásadní posun metody se ukázala tzv. Frekvenční analýza. Při návratu odražené vlny zpět k povrchu dochází k opakovanému odrazu od povrchu zpět do hmoty kamene. Dochází tedy ke vzniku periodicky se opakující vlny se slábnoucí amplitudou. Frekvenční analýza má za cíl určit dominantní frekvence ze záznamu vlny. Rychlá Fourierova transformace pak převádí časové spektrum na frekvenční, tedy závislost amplitudy na frekvenci. Pokud kamenný blok nemá přítomnou prasklinu nebo přechod na materiál s jinou impedancí, odpovídá obvykle nejintenzivnější píku konci bloku. V případě, že blok obsahuje vzduchový nebo jiný materiálový přechod, jehož velikost a orientace jsou pro Impakt echo detekovatelné, dochází ke vzniku intenzivního píku při vyšší frekvenci odpovídajícího hloubce přechodu. Při známé rychlosti šíření vlny materiálem jsme schopni stanovit hloubku efektu, viz obrázek 33.

Hloubka výskytu efektu, jeho velikost a kvalita kontaktu v případě rozpadu materiálu určuje to, zda bude viditelný pouze materiálový přechod anebo konec bloku. Pokud není přítomná frekvence odpovídající konci bloku, lze předpokládat, že je určitá plocha vrstvy nebo celá vrstva kompletně odloučena a na základě hloubky pak odhadnout minimální plochu rozhraní. K tomu je potřebné mít představu o hloubce bloků anebo provést další komplementární měření, např. pomocí georadaru (GPR). V případě opravných zásahů v podobě filuňků a obkladových desek lze posuzovat aktuální stav adheziva.

Předpokládaný dosah detekovatelné odražené vlny je 100 – 120 cm. Při interpretaci spekter se pracuje především s frekvencemi v rozmezí 2 – 15 kHz.



Obrázek 33: Ukázka modelových spekter pro několik typů modelových situací a ukázka reálných spekter měřená impakt echem. Blok bez poškození se na spektru projeví jedním výrazným píkem – detekce konce bloku. Blok kamene s neintaktním rozhraním (trhlina) se na spektrech projeví výrazným píkem posunutý k vyšším frekvencím. Blok kamene s intaktním rozhraním se projeví detekcí jak rozhraní tak také konce bloku – na spektrech se objeví 2 píky podobné intenzity.

V případě, že výsledkem měření je jeden nebo menší počet výrazných píků, bývá interpretace jednoznačná. Velmi obezřetně je nutno postupovat při hodnocení spekter, kdy získáme větší množství píků o relativně vysoké intenzitě. Interpretace počtu jevů a jejich hloubky nemusí být jednoznačná. Ke správné interpretaci je důležité získat definované spektrum, v opačném případě interpretaci nelze provést. Impakt echo může velmi dobře doplňovat georadarové měření. – komplementární technika, např. může potvrdit hloubku stanovení rozhraní – materiálového přechodu, nebo zlepšit představu o stavu a integritě sledovaného místa.

Nejmenší detekovatelná velikost defektu je závislá na hloubce. Předpokládá se, že detekovatelné rozhraní je takové, jehož velikost plochy je větší než  $1/3$  hloubky. Pokud velikost plochy rozhraní přesáhne 1,5 násobek hloubky, pak se přístroji jeví jako nekonečný. Přítomnost efektu může mírně zkreslit, snížit hodnotu odečítané hloubky konce bloku.

### 2.3.4. ULTRAZVUKOVÁ MĚŘENÍ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.4., v první fázi zpracování a interpretace výsledků měření se vypočítá ze získaných dat (času šíření ultrazvuku a měřící vzdálenosti) rychlost šíření ultrazvukového vlnění podle rovnice:

$$v_{uz} = d/t_{uz}$$

$v_{uz}$  - rychlost ultrazvuku (rychlost šíření longitudinálních, tzv. primárních vln)

$d$  - měřená vzdálenost

$t_{uz}$  - změřený čas přechodu ultrazvukového signálu

Vypočítané hodnoty se potom srovnávají navzájem (plochy a místa s různým stavem povrchových vrstev), nebo s databází výsledků získaných při předcházejících měřeních nebo na standardech.

#### **Tabulka 3**

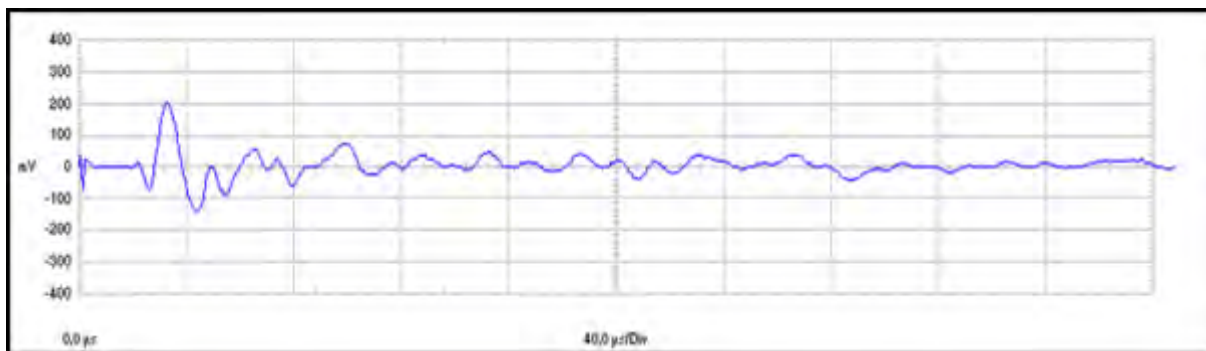
*Přehled rychlostí šíření longitudinálního vlnění pro některé materiály*

Materiál	Rychlost šíření P-vlny
Vzduch	0,3 km/s
Voda	1,5 km/s
Beton	4,0 – 5,0 km/s
Pískovec	2,0 – 4,3 km/s
Vápenec	2,2 – 6,8 km/s
Mramor	5,4 – 6,7 km/s

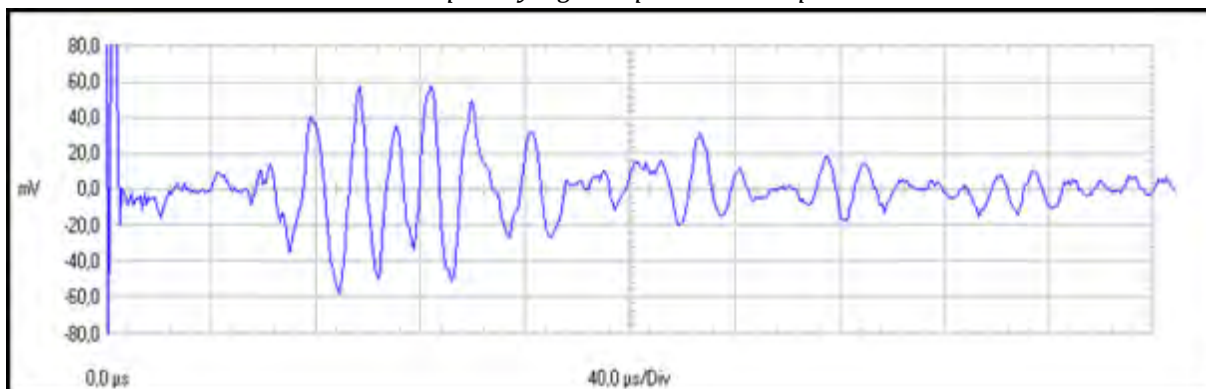
Velmi důležitou roli při interpretaci naměřených výsledků hraje amplituda a tvar signálu, viz obrázek 34 - 39.

V případě, kdy dochází k rozevírání praskliny či lasy kolmo k povrchu a tím ke vzniku mezer vyplněných vzduchem, je signál silně ovlivněn diskontinuitou materiálu. Odezva signálu je zpomalená, protože dráha šíření vlnění se prodlužuje. Pokud se v místě praskliny oddělené části kamene částečně nebo slabě dotýkají, povrchová vlna je detekována přibližně ve stejném čase jako

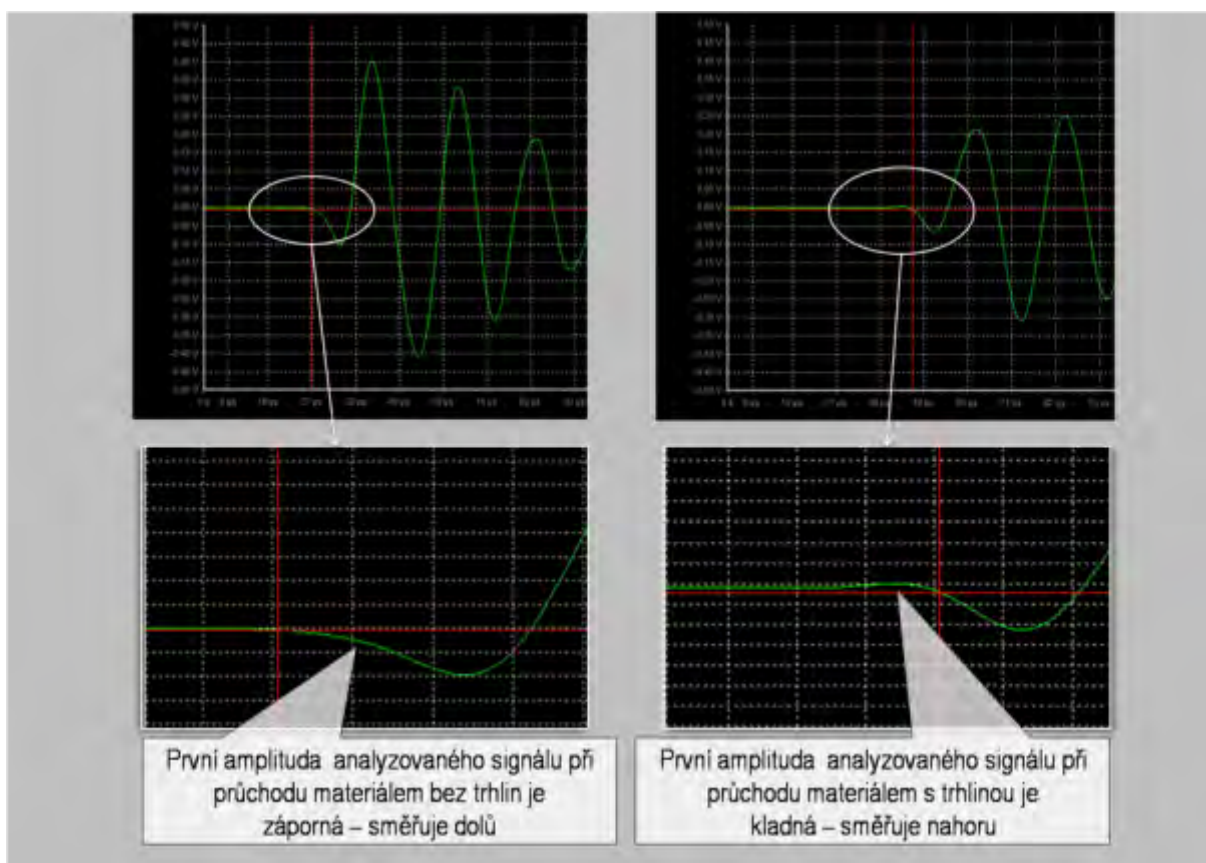
u nepoškozeného bloku nebo místa, ale amplituda signálu může být výrazně oslabena. Často se také setkáváme s posunem fáze vlny – první amplituda pak směřuje nahoru, viz obrázek 34-36. Při hodnocení směru prvního kmitu je nutné vycházet z konstrukčního uspořádání daného přístroje, které není u všech přístrojů stejné. Výraznější signál může být detekován se zpožděním. Toto zpoždění pak odpovídá vzdálenosti, kterou musela urazit P-vlna a S-vlna kolem praskliny, později pak odrazům od bočních stěn a zadní stěny bloku, viz obr 37-39.



Obrázek 34: Tvar amplitudy signálu při měření nepoškozeného místa

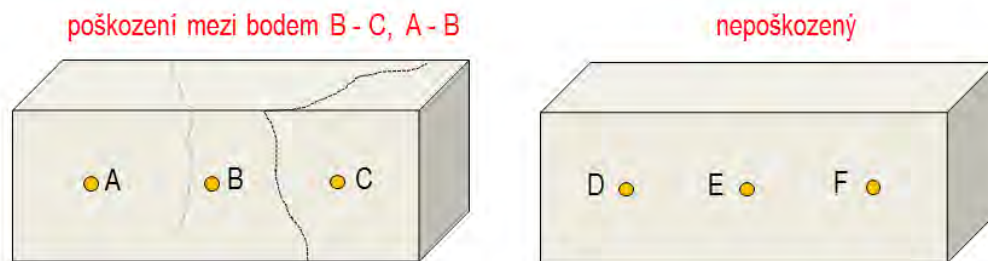


Obrázek 35: Tvar a amplituda signálu při měření přes prasklinu kolmou k povrchu

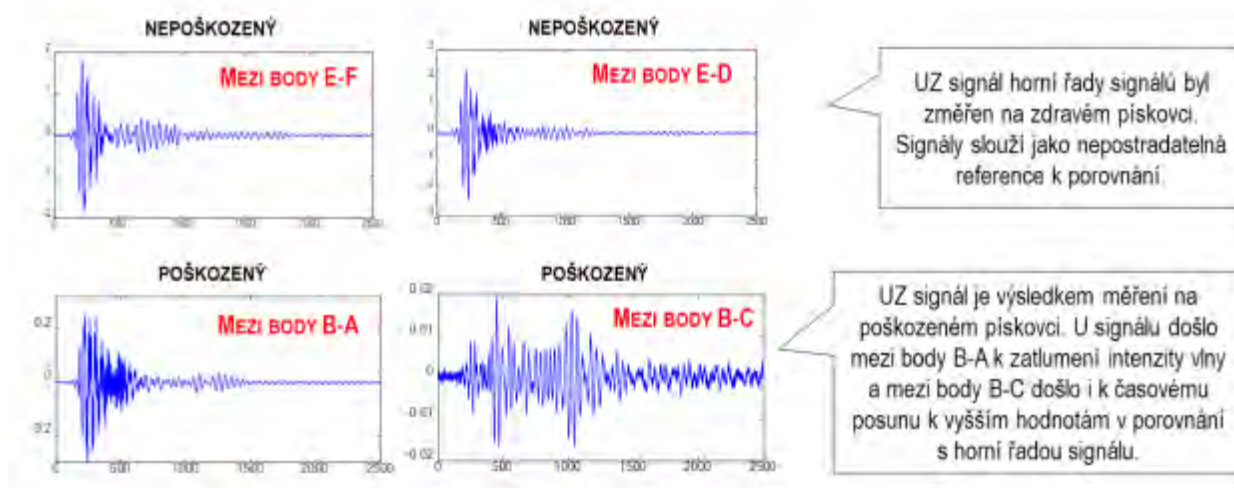


Obrázek 36: Detailní ukázka analyzovaného UZ signálu ve dvou případech – průchod nepoškozeným pískovcem vlevo, průchod pískovcem s trhlinou vpravo. Při průchodu poškozenou částí kamene dochází k významnému zpoždění vlny z 27  $\mu$ s na 47  $\mu$ s.

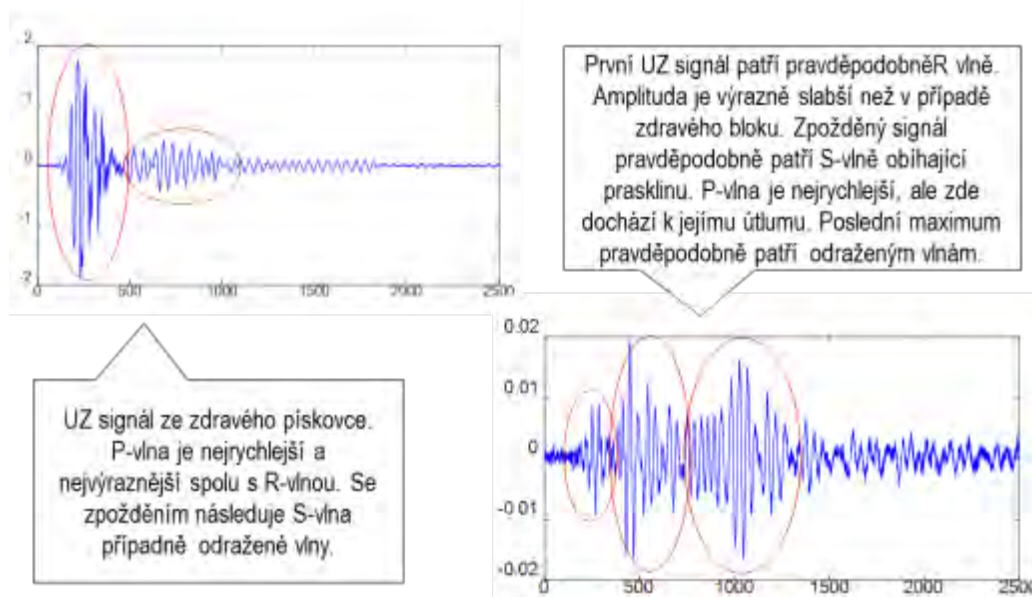




Obrázek 37: Schéma měřených pískovců – poškozený a nepoškozený



Obrázek 38: Výsledek měření UZ technikou v povrchové uspořádání na blocích pískovce, viz obr. 36.

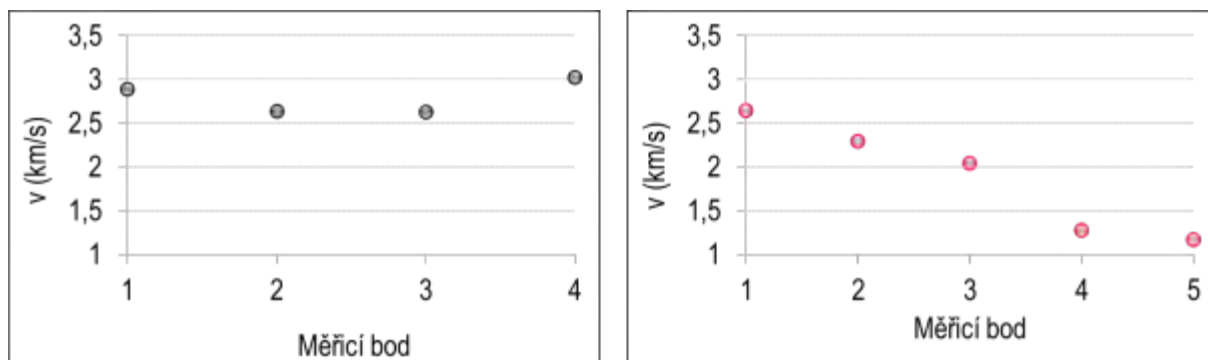


Obrázek 39: Bližší popis výsledného signálu měřeno na 2 blocích z pískovce – poškozený a nepoškozený

Zásadní význam z hlediska správnosti interpretace naměřených dat hraje zkušenost uživatele této průzkumové metody. Je důležité i správné provedení měření, tj. dobrý kontakt měřících sond (zdroje i příjmu) s povrchem zkoumané horniny resp. kamenného kvádru z důvodu přenosu zvukového vlnění. V případě nedostatečného kontaktu může docházet k nesprávné interpretaci (resp. k dezinterpretaci) naměřených výsledků a měřená část bloku se může jevit jako poškozená. Při zjištění místa s utlumeným a deformovaným signálem bez znatelné přítomnosti povrchového poškození, je nezbytné zkontrolovat stav styčných ploch přístroje a měření opakovat a tím výsledek ověřit.

V případě transmisního uspořádání měření se postupuje při vyhodnocení a interpretaci získaných výsledků podobně jako u povrchového měření. Hodnotí se hlavně zjištěná rychlost nebo útlum šíření longitudálních vln, dále pak amplituda a tvar signálu. Vzhledem k tomu, že povrchové vlny se v přijímaném signálu neprojevují vůbec nebo pouze nepatrně, je interpretace přijímaného signálu jednodušší a průkaznější.

V místech se zvětralou horninou dochází jednak ke snižování rychlosti šíření longitudálního vlnění a současně i amplitudy (viz obr 38, 39) ve srovnání s nepoškozeným kamenem. Pokud jsou v místě měření přítomné praskliny, tak v závislosti na rozsahu praskliny může být signál utlumený (snížená amplituda, např. u vlasových prasklin) nebo zpomalený (při „obcházení“ praskliny), nebo může být utlumený úplně (u širších prasklin, kde není mezi měřenými částmi žádný kontakt).



Obrázek 40: Profily rychlostí šíření p-vlny na jednotlivých měřených osách na kvádru 60 cm od levého okraje, vlevo v horizontálním směru a vpravo ve vertikálním směru.

Transmisním měřením jsou patrné poměrně výrazné rozdíly v horizontálním a vertikálním směru na bloku pískovce, viz obr 40. Při hodnocení je nutné počítat i s přirozeným kolísáním míry stmelení a pórovitosti použité horniny, to se pak projevuje i kolísáním rychlosti šíření longitudálních vln. Obvykle odchylky činí do 10-20 % od průměrné rychlosti šíření longitudálního ultrazvukového vlnění pro daný objekt/kvádr.

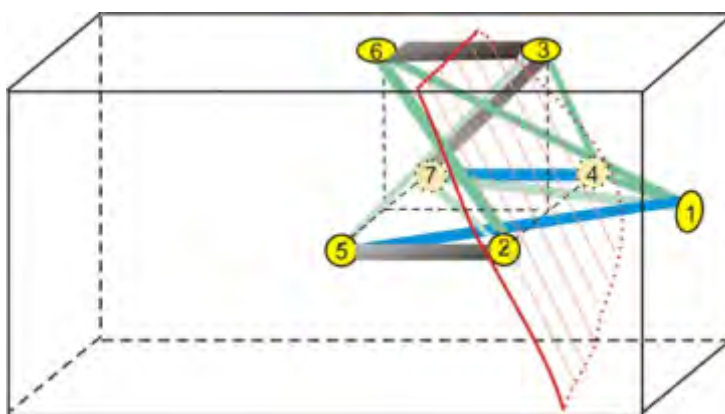
Transmisní uspořádání UZ umožňuje také rekonstruovat poškození kamene. Ze získaných útlumů při zvolené budící frekvenci (použita 48 kHz) a za předpokladu že intaktní kvádr neobsahuje žádný větší defekt, je možné přiblížit vnitřek kamene pomocí tomografické rekonstrukce plochy trhliny. Níže uvedené obrázky jsou výsledkem měření UZ tomografie, viz obrázky 40 a 41.

**Tabulka 4**

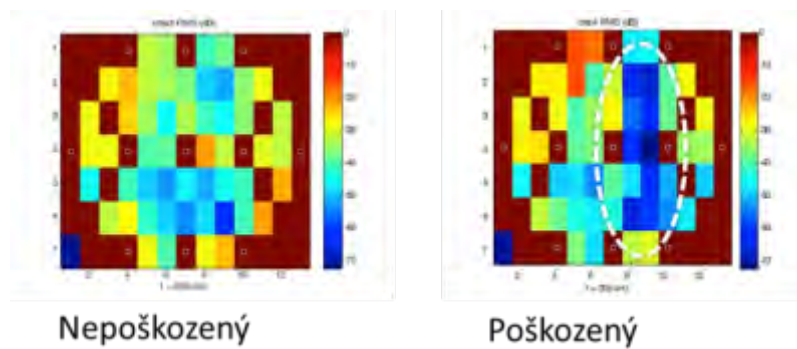
*Relativních útlumy  $\alpha_{rel}$  [dB /m] mezi dvojicemi sond při buzení frekvencí 48 kHz*

Mezi sondami	Útlum $RMS^2\alpha_{rel}$ [db/m]
1-2	-10
1-3	32
1-4	-51
1-5	-63
1-6	-48
2-3	31
2-4	2
2-5	-110
2-6	-43
3-4	-52
3-5	-23
3-6	-232
4-5	-5
4-6	35
5-6	-1

Hodnoty, kde relativní útlum přesahuje -20 dB, zvýrazněné v Tab. 4 červeně, vyznačují signálové cesty v poškozeném vzorku, které protínají plochu trhliny a dalších případných defektů, mající za následek relativně velký pokles energie signálu oproti vzorku bez defektu.



*Obrázek 40: Schematický náhled 3D rekonstrukce trhliny na základě relativních útlumů energie přenášené mezi vysílacími a přijímacími sondami. Útlumy mezi sondami jsou znázorněny šířkou spojnice a barvou (černá = max. útlum, následuje modrá, zelená).*



Obrázek 41: Mapy RMS hodnot signálů přenášených na drahách mezi jednotlivými sousedícími sondami na obou kvádrech a mapa rozdílů mezi nepoškozeným a prasklým vzorkem. Kvádry jsou vykresleny v rozvinutém tvaru

### *2.3.5. KOMBINOVÁNÍ METOD*

Metodika se zabývá kombinací tří vybraných technik, které jsou poměrně dobře dostupné. Jedná se o kombinaci metod využívajících vysílání a příjem vlnění dvojího typu. Elektromagnetické vlnění (GPR) a mechanické vlnění (UZ a IE). Průchod mechanického vlnění je závislý na kontinuitě hmoty. Pokud se po cestě vyskytne trhлина, odluka, pak se jí vlna musí vyhnout, čímž se její příchod k detektoru zpožďuje, případně se natolik utlumí během dlouhé cesty materiálem, že ji již není přístroj schopen detekovat. Z popsaného principu je zřejmé, že schopnost detekce trhlin je v případě mechanického vlnění na sub-milimetrové úrovni. Rozhraní materiál-vzduch způsobuje absolutní odraz mechanického vlnění. Georadarová technika, založená na vysílání a přijímání elektro-magnetických vln je z pohledu průchodu signálu omezena pouze útlumem. Metody se tedy zcela jistě doplňují a překrývají svou odlišnou schopností pronikat do hloubky materiálu a zároveň mezí detekce materiálových přechodů a rozhraní, viz obrázek 42. Všechny metody mají, v závislosti na vybavení, hloubku průniku cca 50-100 cm. Kombinací všech tří metod získáváme podpovrchový obraz v rozlišení 1 cm a dále předpoklad přítomnosti prasklin různé velikosti a orientace. Georadar poskytuje náhled do celkového uspořádání kamenného bloku, což nám umožňuje se orientovat ve stavu a případných dřívějších opravách bloku. Následné otestování metodou IE dovoluje předpokládat na přítomnost a stav poruch a přechodů, které jsou blízké paralelní orientaci s povrchem. Povrchová (nepřímá) metoda UZ pak umožňuje detekovat jevy kolmé k povrchu. Konkrétní praktický příklad kombinace může být odhalení dřívější opravy (příložky či filuňku) pomocí techniky GPR a stavu zálivkové hmoty, kdy při odluce nekvalitní zálivky je metodou IE detekovatelný pouze přechod s výskytem zálivky a není detekován konec bloku, protože signál na rozhraní pevný materiál-vzduch nepronikne hlouběji.

	<b>GPR</b>	<b>Impakt Echo (infrazvuk)</b>	<b>Ultrazvuk</b>
Charakter vlny → princip měření	elektromagnetické vlnění (radiové vlny) ↓ materiálové rozhraní prostředí s různou dielektrickou konstantou a vodivostí	mechanické vlnění ↓ materiálové rozhraní prostředí s různou akustickou impedancí	mechanické vlnění ↓ materiálové rozhraní prostředí s různou akustickou impedancí
Rozlišení (šířka rozhraní nebo trhliny)	podle frekvence antény pro 2 GHz cca 1 cm	< 1 mm	< 1 mm
Hloubka měření	podle frekvence antény pro 2 GHz cca 1 m	1 – 1,2 m	30 – 100 cm dle použité frekvence
Neinvazivnost	naprostá	Pozor na zdroj! energie impaktoru	naprostá

Obrázek 42: Parametry a charakteristika jednotlivých technik

### **3. SROVNÁNÍ A ZDŮVODNĚNÍ NOVOSTI POSTUPU METODIKY**

Hodnocení stavu a konstrukčních detailů plášťového zdiva na historických budovách a konstrukcích v současnosti stále většinou pouze vizuálně, případně poklepem (pomocí perkusních metod) a často pomocí vrtaných nebo sekaných sond. Neinvazivní metody se používají jen zřídka, a pokud ano, tak spíše jednotlivě. Kromě toho se některé známě metody do dnešní doby systematicky neodzkoušely na plášťovém pískovcovém zdivu, a proto byly možnosti odpovídající interpretace pouze velmi omezené.

Novost spočívá i v kombinaci několika neinvazivních metod, což umožňuje postihnout stav zdiva v různých hloubkách a vzájemným srovnáním resp. doplněním současně také zvýšit spolehlivost interpretace získaných výsledků měření.

Značný přínos spočívá také v tom, že všechny metody jsou neinvazivní a umožňují objektivně prozkoumat větší plochy zdiva, části konstrukcí bez jejich narušení. Mohou velmi účinně doplnit informace získané „standardními“ metodami průzkumu zmiňovanými v úvodu této kapitoly. Při rozsáhlejších objektech je možné před zahájením průzkumu využít matematické modelování změn a rozložení zatížení stavební konstrukce – upřesnění výběru ploch pro provedení měření.

### **4. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY**

Metodiku lze uplatnit při zjišťování konstrukčních detailů pískovcových plášťových konstrukcí stavebních památek (struktura a vrstvení jednotlivých částí zdiva, tloušťka pláště nebo doplňků pláště). Lze ji využít při přípravě podkladů k hodnocení stavu a vzájemného propojení jednotlivých částí (vrstev) plášťového pískovcového zdiva. Další využití se naskýtá při hledání a lokalizaci defektů v kvádrech vnějšího pláště zdiva a při hodnocení již provedených stavebních nebo restaurátorských opatření z minulosti.

Metodika je určena odborníkům z oblasti památkové péče, kteří navrhují nebo realizují průzkumy kamenných historických konstrukcí pro přípravu stavebně-restaurátorských záměrů. Metodika je dále určena přírodovědcům a stavebním firmám, kteří pracují nebo si objednávají popisované neinvazivní techniky, s cílem ukázat jejich možnosti a omezení při průzkumu kamenných, často historických konstrukcí.

#### **Seznam publikací, které předcházely metodice**

- European Commission. On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. Onsiteformasonry – EC report, Luxembourg 2006
- Válek, J. a kol. Report on the evaluation at pilot sites (report for owners of historic buildings) Pilot Site: VELTRUSY CASTLE / Czech Republic, report D10.2&D10.4 of ONSITEFORMASONRY project EVK4-2001-00091, September 2004

## 5. Seznam použité související literatury a literatury obdobného tématu. Internetové odkazy

- Pešta, J. Zkoumání historických staveb; Národní památkový ústav: Praha, 2012, ISBN: 978-80-86516-41-7.
- Černý, R., Fiala, L., Fořt J., Kočí V., Pavlík Z.: Tepelně-vlhkostní chování pískovcového historického zdiva v různých klimatických podmínkách, Stavební obzor 5-6/2014, ISSN 1805-2576
- Prouzová, P.; Pálková, M. Využití metod impact echo a akustické emise. Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, 5. ročník konference doktorského studia JUNIORSTAV; Pazdera, L., Ed.; Brno, 2003.
- Kořenská, M. Aplikace akustických metod ve stavebnictví. Habilitační práce, VUT v Brně, 2006., ISBN 80-214-3276-4
- Bayer, K.; Köhler, W.; Wallasch, S. Ultraschallmessungen an mineralischen Baustoffen. In WTA-Schriftenreihe Heft 17, Verfahren zur Bauwerksinstandsetzung Gestern - Heute - Morgen; , Ed.; Fraunhofer IRB Verlag, 1998.
- Weber, J.; Köhler, W.; Bayer, K. Stone material and construction history of the main portal of Saint Stephan's Cathedral: non-destructive measurements. In Proceedings of 5th International Conference on non-destructive testing, microanalytical methods and environmental evaluation for study and conservation of works of art; , Ed.; Budapest, 1996.
- Köhler, W. Structure changes of weathered Carrara marble sculptures as a function of their destructioned position. In ICOM Committee for Conservation, 9th triennial meeting, 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation: Dresden; Grimstad, K., Ed.; 1990; pp 330-335.
- Sansalone, M. J.; Streett, W. Impact-echo: nondestructive evaluation of concrete and masonry; Bullbrier Press: New York, 1997.
- Lombillo, I.; Thomas, C.; Villegas, L.; Fernández-Álvarez, J. P.; Norambuena-Contreras, J. Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. Construction and Building Materials 2013, (1), 266-277.
- Neal, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Sci. Rev. 2004, (66), 261-330.
- Reynolds, J. M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd ed.; John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, 2011.
- Pérez-Gracia, V.; Caselles, J. O.; Clapés, J.; Martínez, G.; Osorio, R. Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. NDT & E International 2013, (59), 40-47.
- Ground-Penetrating Radar, 2011. U.S. Environmental Protection Agency. [http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface\\_Geophysical\\_Methods/Electromagnetic\\_Methods/Ground-Penetrating\\_Radar.htm](http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electromagnetic_Methods/Ground-Penetrating_Radar.htm) (accessed Aug 25, 2014).
- Rybařík, V. Kámen v dějinách Karlova mostu v Praze. Kámen Revue 2007, 2, 11-20.
- Marek Suchý, Solutio Hebdomadaria Pro Structura Templi Pragensis. Stavba svatovítské katedrály v letech 1372-1378 I, in: Castrum Pragense 5, Prague 2003.
- Valečka, J. Juditin most v Praze a „Petřínské“ železité pískovce. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2005-2006, 170-174.
- Přikryl, R. Jaký přírodní kámen vybrat pro opravu Karlova mostu? Oprava Karlova mostu ČSSI, Šel, Praha 2004, str. 50-54, ISBN 80 86426165
- Pavelka, K. - Svatušková, J. - Preisler, J. - Balík, R. - Králová, V. - et al.: The Complex Documentation of Charles Bridge in Prague by Using Laserscanning, Photogrammetry and GIS Technology. Conference proceedings, VAST CIPA. Cyprus, Nicosia. 2006, p. 356-362
- Dipl.-Phys. Wolfram Köhler, Zerstörungsfreie Rissuntersuchung an Natursteindenkmalen Natursteinsanierung Stuttgart 2005; Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen
- Dipl.-Phys. Wolfram Köhler. : Ultraschallmethode - <http://www.labor-koehler.de/2001>
- KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H.: „Werkstoffprüfung mit Ultraschall“ - SpringerVerlag. 1986
- Dipl.-Ing. Astrid Wendrich „Zerstörungsfreie Ortung von Anomalien in historischem Mauerwerk mit Radar und Ultraschall- Möglichkeiten und Grenzen“, BAM-Dissertationsreihe Band 47 Berlin 2009
- Dean G., GPR-SLICE – ground penetrating radar imaging software, User's Manual, Woodland Hills 2012
- Carino N.J., The impact echo method: an overview, NIST, Washington 2001



## Příloha

### Přehled NDT metod stavebních prvků a konstrukcí

## Metody zjišťování poškození ve stavebních materiálech a konstrukcích

IAEA (International Atomic Energy Agency) uvádí v příručím průvodci [1] přehled a typické použití NDT metod pro zkoušení a hodnocení betonových a jiných stavebních konstrukcí a dílů. Jde především o měření pevnostních a dalších charakteristik betonu, týkajících se vytvrzování, vlhkosti apod., ale i detekci přítomnosti defektů. Jako jsou pórovitost, dutiny, trhliny, nehomogenity apod. Pro použití NDT metod stavebních prvků a konstrukcí byly navrženy příslušné normy a standardní doporučení přijaté jak v ISO a CEN, tak v USA (ASTM), Velké Británii a Austrálii (BS) a v Německu (TGL), kde Německá společnost pro NDT (DGZfP) schválila navíc řadu vlastních standardních doporučení. Většina těchto norem se hodí i ke zkoušení celistvosti kamenných kvádrů. Jako základní NDT metody pro zkoušky betonu, vhodné i pro kamenné kvádry jsou v normách standardizovány zejména následující postupy:

1) **Vizuální inspekce (VI)** by měla předcházet dalším ND testům. Standardizovány jsou mimo základní VI i postupy využívající endoskopy a metody digitálního zpracování obrazu.

2) **Testy Schmidovým kladívkem** – hodnocení tvrdosti povrchu, ale může sloužit i v defektoskopii. V současné památkové péči není tato metoda vhodná kvůli svému destruktivnímu účinku.

3) **Test permeability** – měření páry (pórovitost, ale i praskliny).

4) **Penetrační test (průnik) Windsorovou sondou** – měření povrchové tvrdosti a pevnosti, ale i pevnosti podpovrchových vrstev; malá část povrchu může být mírně poškozena.

5) **Radiografické testy** – detekce dutin a trhlin, změn hustoty apod. – rtg. metody nebo pomocí gama-zářičů (isotopy Ir192, Cs137, Co60, Ra226), příp. lineární urychlovače. (normy **BS 1881 Part 205, TGL 21 100/01**).

6) **Zvukové (sonické) metody** s použitím instrumentovaného kladiva apod. umožňující jak měření odrazového echa tak na průchod (doporučené normy jsou např. ISO/DIS 8045, BS 1881 Part 201). K nim lze zařadit i seismické metody (např. doporučení DGZfP „Recommendations for Seismic Methods for Subsurface Detection and Materials Parameters Determination of Soil“).

7) Testy **Impakt-Echo** [2] – detekce dutin, delaminace a dalších anomálií (**ASTM C 1383-98a, ASTM C 1074, ACI 228.1R**). Podrobněji viz dále.

8) **Pulzní ultrazvuková měření rychlosti šíření zvuku** a zprostředkovaně i tlakové pevnosti nebo přítomnosti defektů (BS 1881: Part 203).

9) **Tomografické modelování** využívající data z transmisních ultrazvukových testů ve dvou nebo více směrech – nejspolehlivější pro detekci dutin a prasklin.

10) **GPR** – "ground penetrating" radar (0.5 - 2 GHz), nebo i impulsní radarové testy – u betonu především k detekci pozice výztuže kanálků, ve spojení s pokročilými metodami zpracování signálů i detekce poruch vnitřní struktury (trhliny, dutiny, změny hustoty, obsah vody) díky odrazům na rozhraní dvou materiálů s různými dielektrickými konstantami (k přesnému určení polohy jsou nutná kalibrační měření rychlosti a útlumu elmag. vln v daném materiálu). Testy lze provádět podle std. doporučení **ASTM D6087-97**.

11) **Elektromagnetické testy** ("covermeter", 90 Hz) – využívají podobné efekty jako vířivé proudy či magnetickou indukci - většinou jen pro detekci kovových příměsí nebo výztuží.

12) **Testy pomocí mikrovln** (okolo 10 GHz) – především zjišťování dutin či puklin vyplněných vodou. Nejnověji také metody využívající terahertzové mikrovlny (0,2 – 1,2 THz).

13) **Měření elektrického odporu** (resistivity) – velmi levná metoda; reaguje na vlhkost, která může ukazovat i na dutiny apod. Podobná je potenciometrická metoda, ale ta vyžaduje částečnou vodivost kamene, např. díky kovovým příměsím (železité pískovce) nebo pórům vyplněným vodou.

14) **Částečně destrukční testy** jako je navrtávání apod., kdy dochází k mikroskopickým nárůstům drobných trhlinek, ale i např. ke tření ploch větších trhlin a puklin o sebe, lze sledovat i zcela nedestruktivními metodami jako např. měření **akustické emise** (AE) či změn vibrační odezvy při slabém zatížení. AE je vhodná i pro kontinuální sledování kamenů např. při okolních teplotních změnách, změnách vlhkosti apod. a navíc umožňuje spolehlivou lokalizaci emitujících zdrojů.

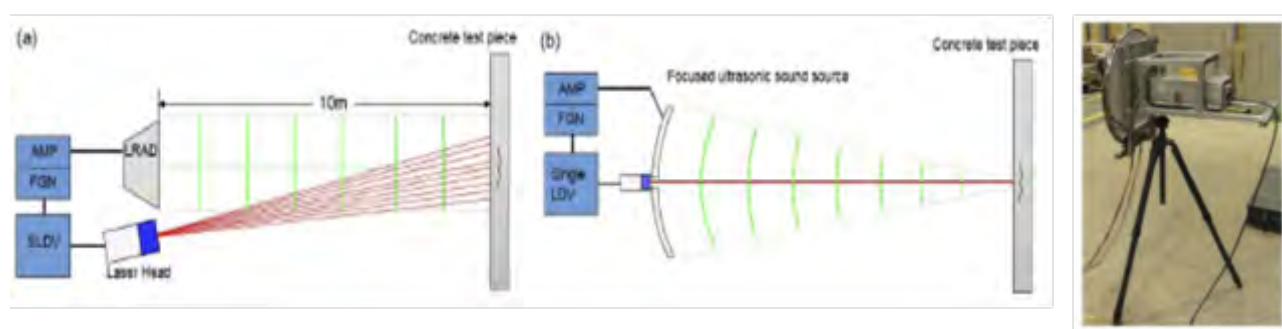
13) **Infračervená termografie – IR** (zejména aktivní) – detekce dutin, prasklin, delaminace a dalších anomálií (také např. přítomnost vody apod.). Pro určení hloubky defektu je vhodná zejména pulzní IR a přechodová termografie, kdy se sleduje teplotní kontrast v závislosti na čase. Pro každou hloubku je nutné volit různou frekvenci pulzů. Standardní doporučení jsou obsažena např. v **ASTM D4788-88**.

### **Testování metodou Impakt-Echo (I-E)**

Přehled technik impakt-echa a jejich využití k detekci trhlin v betonu uvádí zpráva výzkumné laboratoře budov NIST (National Institute of Standards and Technology, USA, dříve NBS) [2], kde se touto problematikou zabývají již od 80. let minulého století. V NBS/NIST byla od té doby navržena celá řada standardních doporučení pro defektoskopii betonových konstrukcí, které lze vhodně využít i pro NDT kamenných kvádrů (viz obecný průvodce ASTM C 1074 a ACI 228.1R). V r. 1998 NIST schválil standard ASTM C 1383 pro aplikaci metody I-E na principu elastických vln, která se ukázala jako rychlý a jednoduchý prostředek detekce trhlin v betonu, analogický ultrazvukové Puls-Echo metodě v klasické defektoskopii kovových materiálů, ale s použitím relativně nízkých frekvencí, neboť mnohem vyšší UZ frekvence se k testování betonu, díky jeho agregátnímu složení a nehomogenní struktuře často příliš nehodí (na vyšších frekvencích mají vlny v nehomogenním materiálu vysoký útlum). Na základě studií s umělými trhlinami a numerickými simulacemi byly postaveny teoretické základy I-E metody a standardizovány optimální konfigurace pro její použití. Přijatá norma nahrazuje dřívější postupy s využitím úderů kladívkem, které byly do značné míry subjektivní a závislé na zkušenostech testujícího pracovníka. I-E metoda, založená na odrazu podélných vln na rozhraní dvou prostředí s různou akustickou impedancí, vyžaduje znalost jak geometrie tělesa, tak hustoty zkoumaného materiálu i rychlosti c šíření podélných vln. Rozhraním může být protilehlá strana tělesa nebo dutina či trhlina otevřená kolmo na směr šíření elastické vlny od dobře definovaného rázu např. elektromechanickým impaktorem, u něhož lze měnit dobu trvání úderu. Odražený signál, detekovaný přijímací sondou umístěnou na stejném povrchu jako pulzní zdroj je zaznamenáván a analyzován jak v časové, tak ve spektrální oblasti. Podle NIST normy je k detekci odražené vlny

používán např. piezoelektrický, kvazibodový širokopásmový snímač akustické emise s konickým piezoelementem. V současné době lze s výhodou použít také bezdotykové snímání povrchových posuvů např. pomocí laserového vibrometru (SLDV - Scanning Laser-Doppler Vibrometer).

V současné době jsou rozpracovávány také zcela bezkontaktní I-E metody, kdy impakt je generován fokusovanou vzduchovou vlnou, a povrchové vibrace jsou snímány skenovacím laserovým vibrometrem. Jako příklad lze uvést náhradu úderu instrumentovaným kladívkem, označovanou jako "Long Range Acoustic Device (LRAD)" [4] využívající rezonance v oblasti 500 – 7000 Hz vybuzené rázovou zvukovou vlnou o tlaku vyšším než 100 dB (ref. 20  $\mu$ Pa) na vzdálenost 5-10 m, která může být generována amplitudovou modulací silného, fokusovaného ultrazvukového zdroje na subharmonických frekvencích. Dvě různá uspořádání a fotografie LRAD jsou na obr.2.



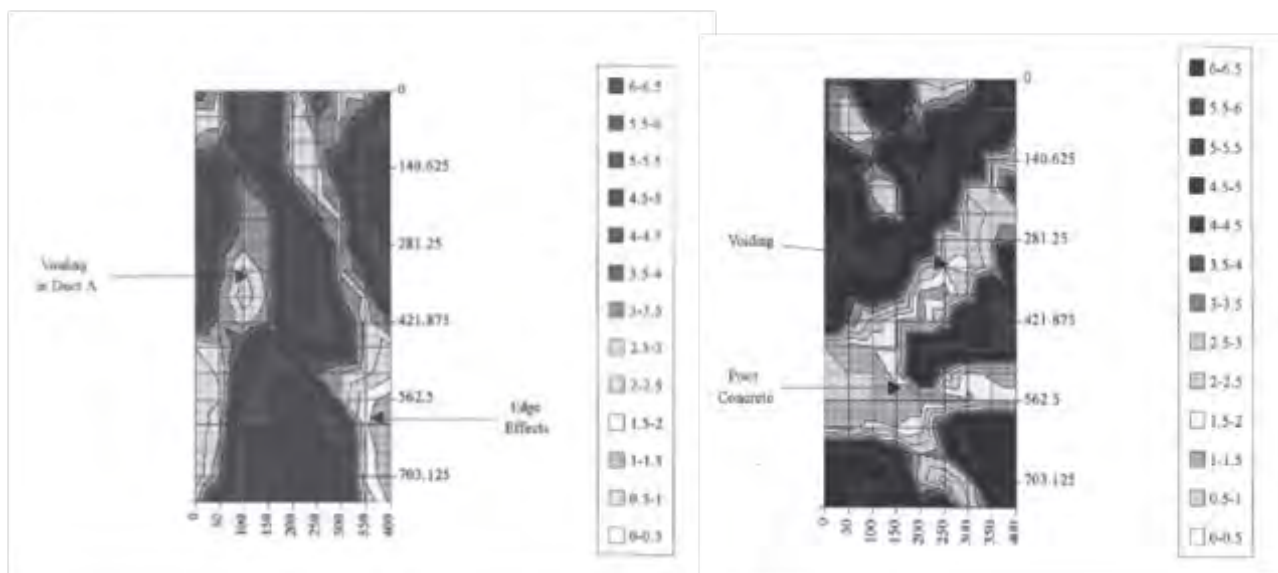
**Obr. 2:** Dvě různá uspořádání bezkontaktní I-E metody: a) sLRAD a skenovacím vibrometrem, b) s kompaktním ultrazvukovým zdrojem s jednobodovým laserovým vibrometrem (viz foto).

## Ultrazvukové metody.

Ultrazvukové metody jsou využívány v defektoskopii již velmi dlouhou dobu (viz např. [5]). Lze je rozdělit na přímé (průchodové – přijímací sonda je na opačné straně zkoumaného vzorku než vysílací sonda) a nepřímé (odrazové – přijímací sonda je na téže straně zkoumaného vzorku jako vysílací sonda). Přímé metody zkoumají ultrazvukový signál, který materiálem prošel, nepřímé naopak signál, který se v materiálu (nebo na jeho nějakém rozhraní dvou prostředí s rozdílnou akustickou impedancí) odrazil a byl detekován přijímací sondou. Vyšetřovat lze pomocí UZ např. rychlosti šíření vln a jejich změny, útlum, frekvenční charakteristiky přijatých signálů nebo výskyt odrazů od nehomogenit v materiálu. Na základě změřených veličin lze pak usuzovat na složení materiálu, přítomnost nehomogenit či defektů i vnitřní strukturu a elastické vlastnosti vyšetřovaného vzorku. Z tohoto pohledu lze nahlížet na metodu Impakt - Echo jako na nepřímou zvukovou metodu, kde je vysílací sonda nahrazena mechanickým nebo elektromechanickým zdrojem (buzením) signálu. Mechanické zdroje mohou mít oproti UZ sondám výhodu mnohem větší energie generovaného signálu, nevýhodou může být ale možnost drobného poškození povrchu zkoumaného materiálu.

## UZ tomografie

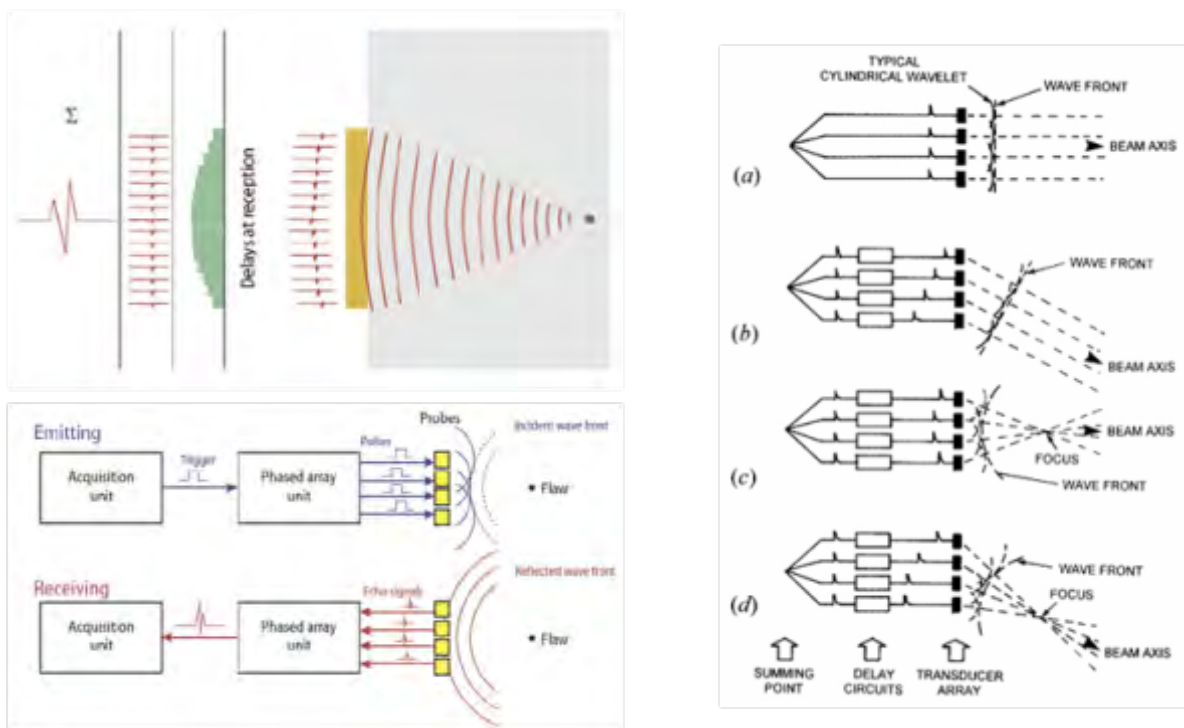
Pokroky sonické a UZ tomografie s využitím spojení tomografického modelování s fuzzy-logikou a dalšími matematickými metodami umožňují vytvářet 2D řezy struktury kamenných materiálů i zdiva založené na rychlosti šíření podélných vln (rychlostní tomografie) nebo jejich útlumu (absopční tomografie). Pomocí UZ systému na frekvenci 50 kHz byly např. úspěšně získány jednoduché 2D řezy struktury betonových nosníků o tloušťce 1 – 2 m [6], znázorněné na obr. 3, na nichž jsou dobře patrné špatně propojené oblasti a dutiny v betonu s mnohem nižšími rychlostmi vlivem částečného šíření vzduchovými mezerami, kde je rychlost podélných vln pouze 330 m/s oproti 3 – 6 km/s v betonu.



*Obr. 3 Tomografické řezy betonového nosníku 0,4 a 0,8 m od předního konce (vlevo a vpravo)*

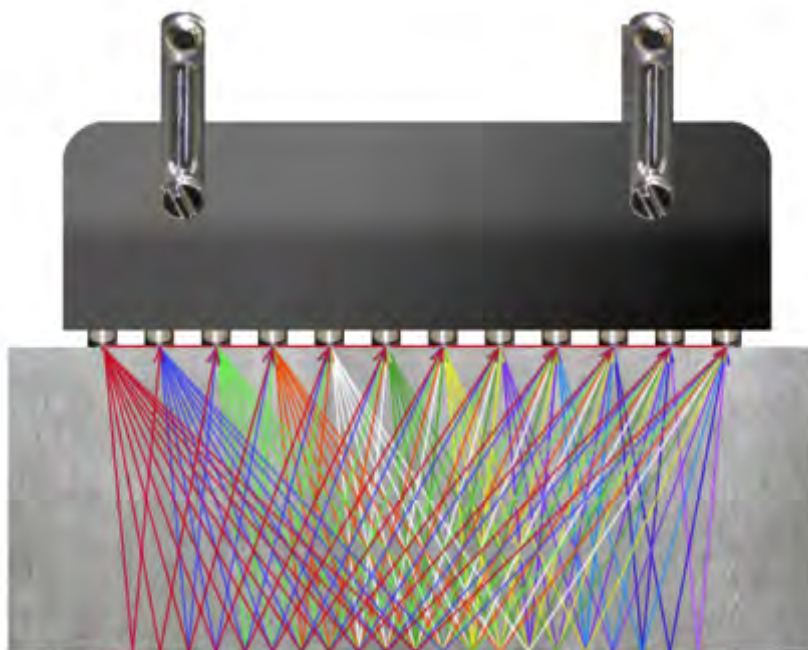
### UZ metoda "Phased Array" – PA (zfázovaná pole ultrazvukových měničů) [7].

Vysílá-li i přijímá UZ sonda z více piezoelementů, lze na základě zpoždění mezi vysílanými ultrazvukovými pulzy výsledný paprsek vychylovat, fokusovat, tvarovat a po zpracování tak vytvořit 2D či 3D zobrazení zkoumaného vzorku. Tímto způsobem lze celý vzorek také pouze "elektronicky" skenovat, čímž odpadne nutnost použít např. mechanický skener a vytvářet i tomografická zobrazení defektů. Na obr. 7 je schematicky znázorněn způsob elektronického vychylování a fokusace UZ paprsku pomocí PA.

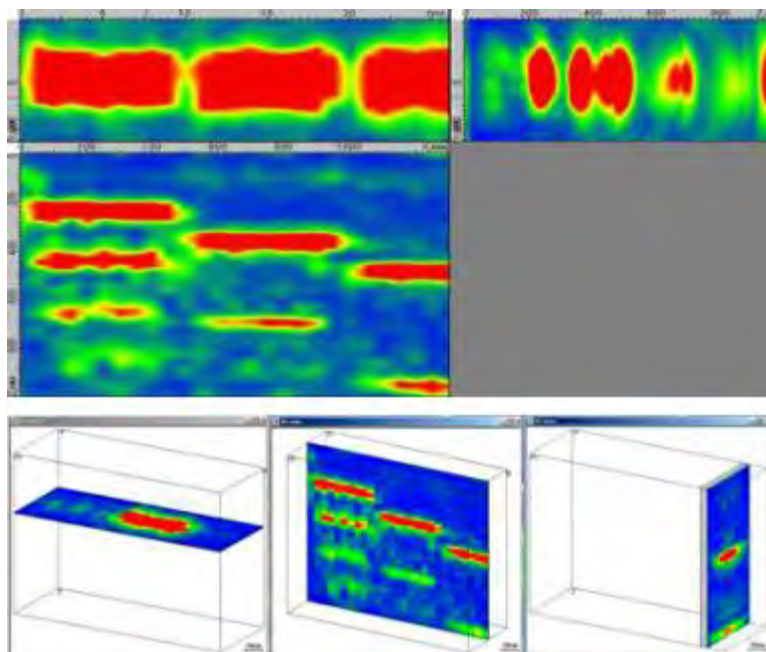


**Obr. 7:** Schéma fokusace, tvarování a vychylování UZ paprsku pomocí PA se 4 elementy.

Tento přístup využívá např. zařízení „Ultrazvukový tomograf A1040 MIRA“ (<http://www.acsys.ru/eng/production/detail/a1040-mira/>) používaný úspěšně pro vyšetřování betonových konstrukcí. K vychylování vysílaného pulzu používá přístroj A1040 MIRA Phased Array technologii programovaného časového řízení buzení jednotlivých měničů a speciální program pro analýzu zpětně přijatých odražených signálů. Na obr. 8 je vyobrazeno vychylování paprsku a přístrojem získaný výsledný 3D tomografický obraz defektů uvnitř betonového vzorku.



ukázka 3D zobrazení



*Obr. 8: Schéma elektronického skenování betonového vzorku PA přístrojem "MIRA" a výsledné tomografické zobrazení defektů.*

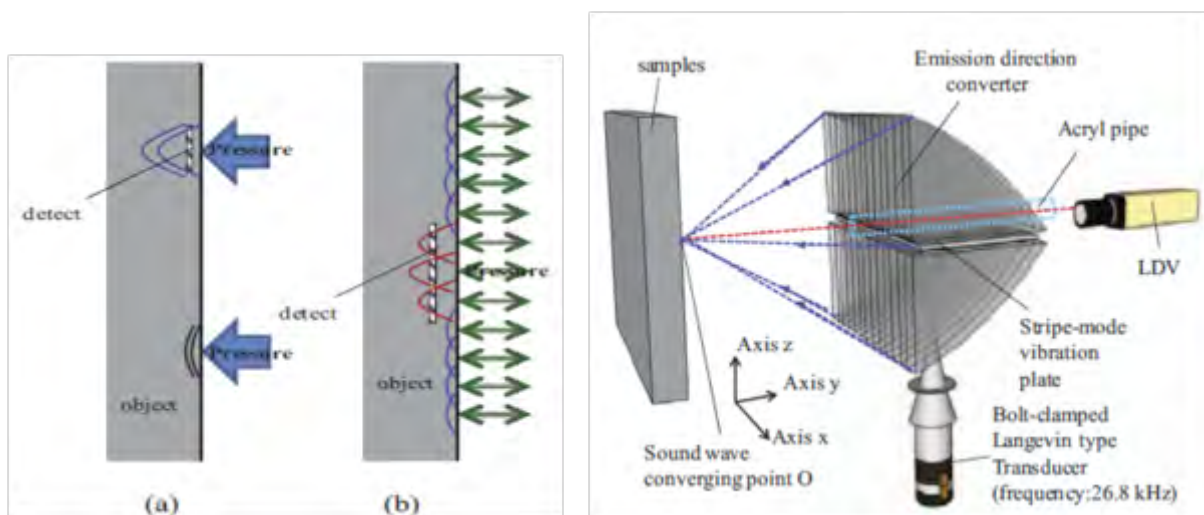
## Bezkontaktní buzení ultrazvukových vln

Testování pomocí PA vyžaduje jako většina UZ metod dobrý kontakt vícenásobné sondy s povrchem materiálu. UZ vlny v tělese je ale možné budít i bezkontaktně, např. pomocí pulsního laseru (tzv. Laser Ultrasonics), nebo také speciálními sondami se vzduchovou vazbou, jejichž účinnost je ale relativně nízká, takže se užívají např i pro beton a kamenné kvádry pouze na průchod. Buzení laserem je energeticky mnohem účinnější, dnes u kovů již hojně využívané, ale vyžaduje vhodně volenou úpravu absorbujícího povrchu.

Autoři práce [8] vyvinuli bezkontaktní metodu detekce defektů uvnitř materiálu pomocí ultrazvukových vln, buzených na povrchu bodově fokusovanou konvergentní vzduchovou zvukovou vlnou s relativně vysokou amplitudou, podobně jako u výše zmíněné I-E metody [4]. Zatímco akustický zdroj pracuje na jedné rezonanční frekvenci, bodově vygenerovaná ultrazvuková vlna má nelineární charakteristiky, projevující se generováním vyšších harmonických v bodu fokusace. Na základě analýzy harmonických složek buzených vibrací lze v materiálu detekovat defekty. Pomocí této metody buzení se autoři pokusili určit i hloubku a velikost defektu v homogenním médiu.

Princip měření je znázorněn na schematickém obr. 9. Část a) vlevo znázorňuje, jak síla působící na povrch objektu nad vnitřním defektem (trhlinou) má za následek větší deformaci než nad bezdefektní oblastí. Část b) na obr. 9 vlevo ukazuje zjednodušený vibrační model, v němž je síla (akustický tlak) bodově aplikován na tuhou, na okraji podepřenou desku. V tomto modelu je dosažena maximální deformace, když je síla aplikována na střed desky a výchylka na periférii je velmi malá. Je-li bodová síla aplikována na každý měřený bod na povrchu desky, lze na základě změny rychlosti vibrací v jednotlivých bodech určit, zda pod nimi leží vnitřní defekt. K měření rychlosti vibrací v jednotlivých bodech je použit laser-dopplerovský vibrometr (LDV). Schema celého experimentálního uspořádání je znázorněno na obr. 9 vpravo, kde jako akustický bodově konvergující zdroj slouží pruhovým módem vibrující deska na frekvenci 26,8 kHz s fokusujícími parabolickými odražeči. Vibrace desky jsou buzeny sondou Langevinova typu. Laserový paprsek je veden středem vibrující desky uvnitř akrylátové trubice. Frekvence povrchových vibrací je pak zjišťována pomocí rychlé Fourierovy transformace. K detekci defektu se zjišťují rychlosti vibrační výchylky jak na základní frekvenci, tak na jejích harmonických.

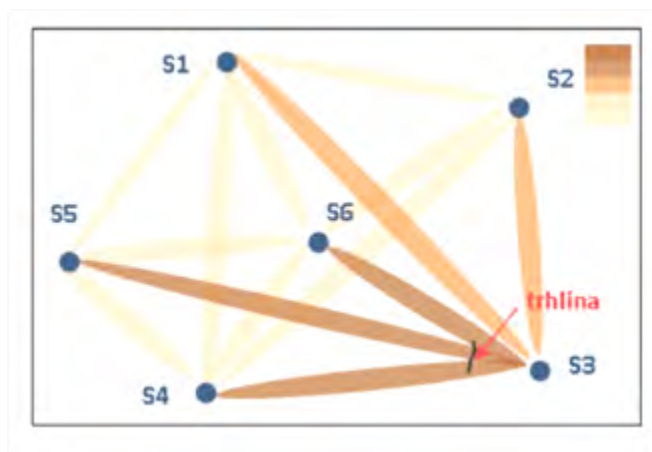




**Obr. 9:** Schematické znázornění principu detekce defektu pomocí vzduchem buzené ultrazvukové vlny (vlevo) a schéma experimentálního zařízení pro vzduchem buzené ultrazvukové vlny (vpravo).

### Nelineární zvukové a ultrazvukové metody.

Nelineární ultrazvukové metody detekce defektů jsou založeny na různých přístupech k charakterizaci lokálních nelinearit v materiálu. Obecně lze říci, že nelineární metody zkoumají nelineární jevy, které vznikají při průchodu zvukových či ultrazvukových vln materiálem, v němž se nachází nějaký defekt, představující lokální elastickou nelinearitu, která se projevuje závislostí odezvy na amplitudě dynamického mechanického buzení, jak stacionárního (kmitání), tak přechodového (vlna). Nelineární dynamická odezva materiálu se může projevovat různými způsoby: nelineárním útlumem, posunem rezonančních frekvencí tělesa s rostoucí amplitudou buzení, vznikem nových harmonických složek ve spektru, vznikem postraních pásem okolo význačných rezonancí, frekvenční modulací několika interagujících vln, zpožděnou časovou pamětí apod. Nelineární jevy jsou přitom v průběhu degradace materiálu pozorovány daleko dříve, než můžeme pozorovat změny lineárních parametrů jako jsou rychlost šíření, útlum, elastické moduly, tuhosti apod., vyvolané poškozením. O základech a použití nelineárních metod zejména pro horniny souhrnně pojednávají dvě knižní publikace [10] a [11]. První z nich, která shrnuje zkušenosti mnoha laboratoří (spoluautory jsou i pracovníci ÚT AV ČR), je zaměřena na teoretické základy neklasické nelineární elasticity materiálů a spektroskopické metody, jimiž lze zjišťovat neklasické nelinearity, spojené s přítomností defektů struktury. Druhá publikace je orientovaná zejména na projevy nelineárního chování granulárních materiálů, jako jsou horniny a zeminy. Prakticky všechny makroskopicky či mesoskopicky nehomogenní materiály vykazují lokální elastické nelinearity [12]. Nelineární parametry charakterizující jednotlivé nelineární jevy se ukázaly být velmi citlivé na přítomnost jakýchkoliv lokálních nehomogenit a na rostoucí poškození struktury materiálu (vznik a rozvoj trhlin či mikrotrhlin, zvětšování pórů, koroze, atd. [13]. Nelineární efekty jsou kvantifikovány vhodně zvolenými parametry nelinearity, které charakterizují přítomnost defektů a při použití soustavy budičů a snímačů také vymezují oblasti jejich výskytu [14], jak je znázorněno na obr. 10.



*Obr. 10: Schéma lokalizace defektu nelineárními metodami pomocí soustavy měničů.*

Výhody nelineárních metod jsou zejména jejich mnohem vyšší citlivost - lze detekovat řádově menší defekty než při použití lineárních metod. Tyto metody mají nižší nároky na vysílací a přijímací aparaturu, neboť energii vysílaného ultrazvukového signálu lze koncentrovat v místě nehomogenity a tedy není nutné používat velká zesílení vysílaných i zaznamenávaných signálů, signál je přitom méně zkreslen, což opět zvyšuje citlivost metod.

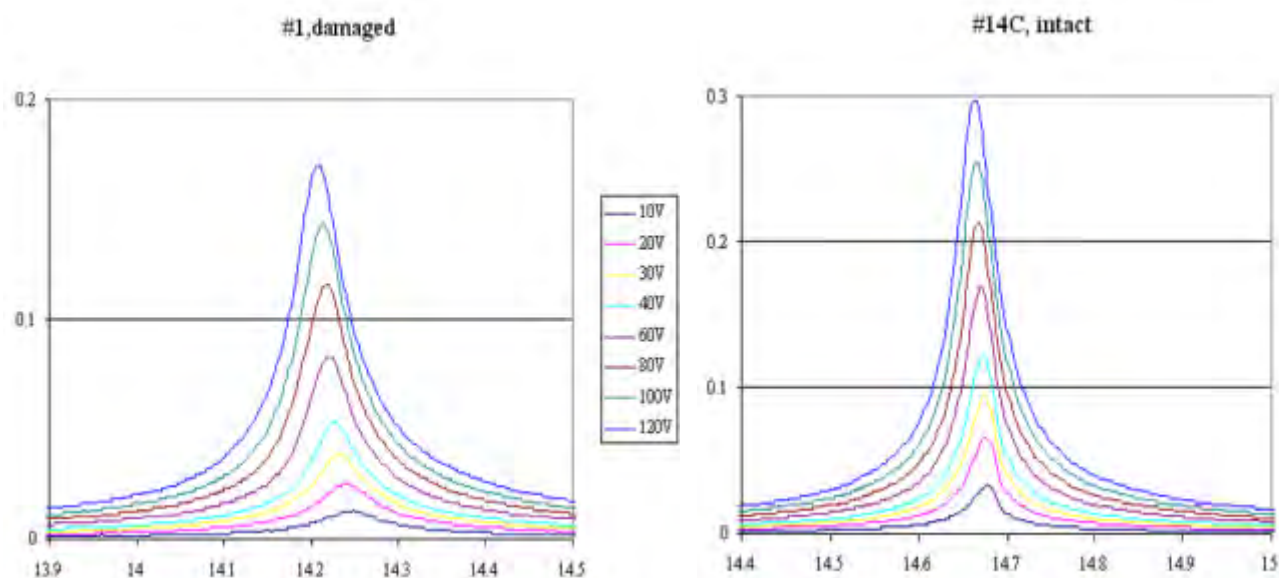
Mezi nevýhodami nelineárních metod lze uvést vyšší složitost zpracování signálů - měření je třeba zpracovávat náročnějšími počítačovými programy a interpretaci výsledků by měl provádět pouze zkušený pracovník. Obtížnější je také lokalizace zjištěných vad, kterou lze někdy řešit použitím více vysílacích a přijímacích sond (pseudotomografie).

### **Nelineární spektroskopie elastických vln "NEWS"**

Spektroskopické nelineární metody vycházejí z frekvenčních spekter odezvy materiálu na zvukové či ultrazvukové buzení s proměnlivou amplitudou. Od určité velikosti budící amplitudy se ve spektru mohou objevit harmonické i subharmonické frekvence, při zvyšování amplitudy rostou liché harmonické rychleji než sudé a při buzení dvěma nesoudělnými frekvencemi se objevují postranní pásma (metoda NWMS - Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy [15]). Při kontinuálním buzení se s rostoucí amplitudou mohou při výskytu lokálních nelinearit spojených s přítomností defektů posouvat některá rezonanční maxima k nižším frekvencím (NRAS / NRUS - Nelineární rezonanční akustická nebo ultrazvuková spektroskopie) apod. Další nelineární ultrazvukové metody jsou založeny na analýze nesymetrické odezvy, jako např. metoda inverzních pulzů, kdy se liší odezva na budící pulzy s opačnou fází, nebo i obecněji s různě posunutými fázemi (t.zv. ESAM - Excitation Symmetry Analysis nebo PI- Pulse Inversion). Metody s pulzním buzením jsou často kombinovány s časovou reverzací přijatých signálů (NLTRM - Nonlinear Time Reversal Methods). Nelineární vlnové jevy v závislosti na amplitudě buzení dobře charakterizuje také metoda SSM (Scaling Subtraction Method) při níž se odečítá s amplitudou rostoucí lineární "šumové" pozadí.

## NRAS / NRUS - Nelineární rezonanční akustická spektroskopie [16]

Při kontinuálním buzení se s rostoucí amplitudou při výskytu lokálních nelinearit spojených s přítomností defektů posouvají některá rezonanční maxima k nižším frekvencím. Podobně lze také zkoumat např. závislosti tlumení na rezonančních frekvencích a amplitudě budícího signálu.



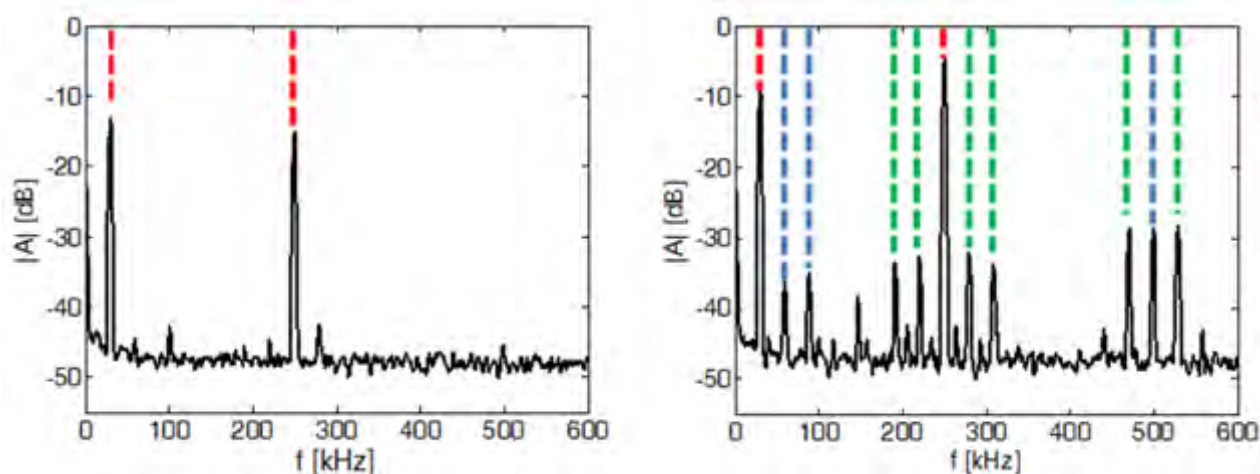
*Obr. 11: Při zvyšující se amplitudě budícího signálu klesá u poškozeného vzorku zvolená rezonanční frekvence a snižuje se hodnota Q-faktoru.*

## NWMS - Nelineární vlnově-modulační spektroskopie [17]

Při buzení dvěma nesoudělnými frekvencemi se se vzrůstající amplitudou ve spektru objevují píky odpovídající součtovým a rozdílovým frekvencím. Dále lze zkoumat výskyt vyšších harmonických frekvencí, a jejich intermodulací - viz obr. 12.

Určitou nevýhodou NEWS metodiky je právě její citlivost pouze na výskyt dosud málo rozvinutých defektů ve struktuře materiálu. Signalizuje tedy např. přítomnost málo rozevřeného kořene trhliny, ale nikoli její délku. Proto je v SHM systému nutné kombinovat tuto techniku s dalšími, méně citlivými metodami jako jsou např. vibrační, jejíž citlivost je opačná (malé defekty nejsou, ale velké jsou indikovány).

V laboratoři ÚT AV ČR jsou vedle lineárních ultrazvukových metod (ultrazvuková defektoskopie a akustická emise) rozvíjeny nové nelineární ultrazvukové metody, jako je kromě NWMS také ESAM, NLTRM a SSM, které byly v ÚT testovány také na betonových [18] a pískovcových [19] kvádrech. NDT laboratoř ÚT AV ČR je jedním ze tří pracovišť, která se v ČR rozvojem nelineárních UZ metod zabývají, a spolupracuje přitom s předními zahraničními laboratořemi v USA, Německu, Francii, Belgii, Itálii, Japonsku a dalších zemích.



**Obr.12:** Typická spektra odezvy při NWMS experimentu na nepoškozeném (vlevo) a poškozeném (vpravo) vzorku. Budící frekvence jsou označeny červeně, harmonické frekvence modře a intermodulační frekvence zeleně,

### ESAM - Excitation Symmetry Analysis [20]

Tato metoda zjišťuje nelineární složku (3. řádu) přijatého signálu v závislosti na vysílaném signálu. Lze ji i interpretovat tak, že měří odezvu signálu při posouvání fází budících pulzů, čímž eliminuje lineární a kvadratickou složku odezvy.

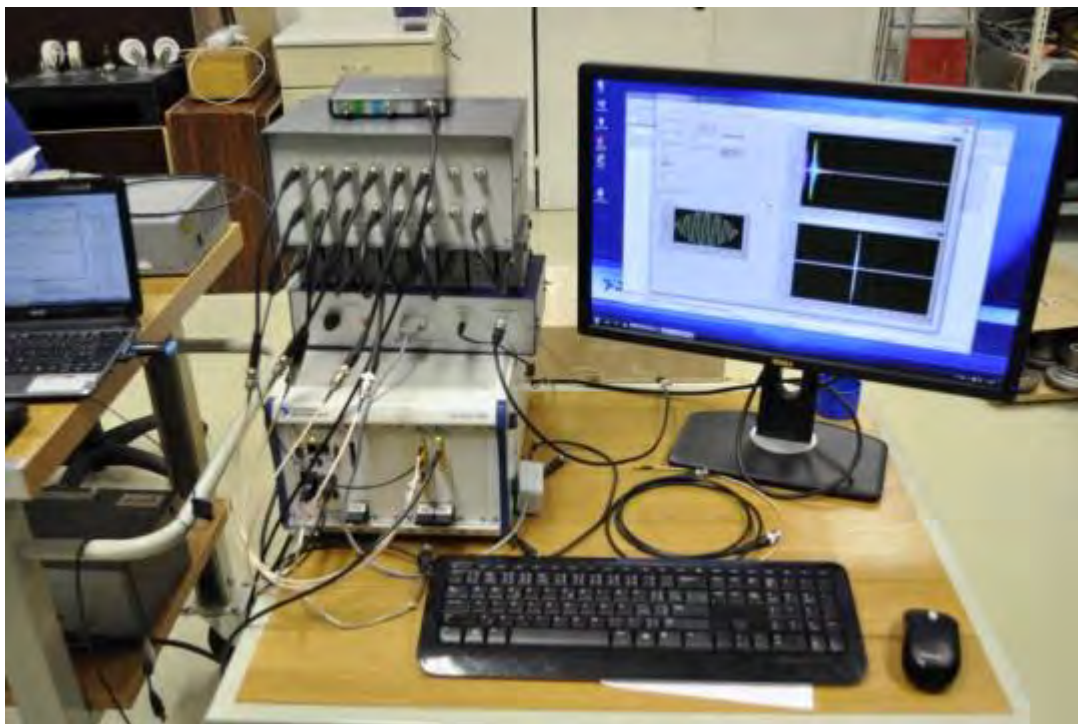
### NLTRM - Nonlinear Time Reversal Mirrors (nelineární časově reverzní zrcadla) [21]

"Time reversal" je technika, při které je přijatý signál časově otočen a opětně vyslán do zkoumaného vzorku, kde se ve zcela lineárním materiálu signál v místě původního zdroje zrekonstruuje [22]. Pokud je v materiálu nějaký defekt (nelinearita), v důsledku otočení se zpětně vyslaná vlna fokusuje v jeho okolí a v místě původního zdroje nedochází k rekonstrukci a defekt je tedy snáze detekován. Tuto techniku je vhodné kombinovat s předchozí metodou ESAM nebo také s jednodušší metodou inverze pulzu (Puls Inversion -PI), kdy se vysílá budící signál a po něm tentýž signál, ale s obrácenou polaritou - v lineárním systému se oba zpětně vyslané signály odečtou (platí zde princip superpozice), zatímco v přítomnosti lokální nelinearity zůstane po součtu obou signálů nenulový zbytek, úměrný nelinearitě 2. řádu. Časovou reverzaci lze použít i při měření lineárními metodami, čímž se výrazně zvyšuje jejich citlivost.

### SSM - Scaling Subtraction Method [23]

Metoda extrahuje z přijatého signálu nelineární složku. Předpokládá se, že při dostatečně malé amplitudě vysílacího signálu bude závislost amplitudy přijatého signálu na vysílacím lineární. Takto získaný signál se považuje za referenční. Při zvyšující se amplitudě je pak od přijímaného signálu odečten příslušný násobek referenčního signálu a vyhodnocuje se růst harmonických frekvencí.

Všechny uváděné nelineární metody byly v NDT laboratoři i v mnoha praktických aplikacích úspěšně použity ke zjišťování defektů v jednoduchých i tvarově komplikovaných konstrukcích z různých materiálů (beton, kovy, horniny, kompozity, polymery). Na obr. 13 je fotografie jednoho ze sestavených měřících systémů, které spolu se vyvinutým programovým vybavením umožňují aplikaci jak nelineárních, tak také lineárních ultrazvukových NDT metod.



**Obr. 13:** Aparatura v NDT laboratoři ÚT AV ČR, umožňující měření pomocí lineárních i nelineárních UZ metod.

#### Literatura:

- [1] *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures.* (IAEA-TCS-17, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002, ISSN 1018-5518)
- [2] N.J. Carino: *The Impact-Echo Method: An Overview.* (Proc. of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, P. C. Chang, Ed., 18 pp., 2001)
- [3] D. A. Sack, L. D. Olson: *Advanced NDT methods for evaluating concrete bridges and other structures.* (NDT&E International, 28 (6), 349-357, 1995)
- [4] Tsuneyoshi Sugimotoa, Itsuki Uechia, Kazuko Sugimotoa, Noriyuki Utagawab, Kageyoshi Katakura: *Study on the Non-contact Acoustic Inspection Method for Concrete Structures by using Strong Ultrasonic Sound source.* (International Congress on Ultrasonics, "ICU 2015", Metz, Physics Procedia 70, 398 – 401, 2015)
- [5] *Obraz J.: Zkoušení materiálu ultrazvukem..* (SNTL Praha, 1989)

- [6] Martin J., Giannopoulos A., Hardy M. S. A., Forde M.): *Ultrasonic tomography of concrete duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams*. (In: *Proc. of the 8th International Conf. on Structural Faults and Repair*, 1999)
- [7] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. (OLYMPUS, [www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/](http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/))
- [8] Ayumu Osumi, Youichi Ito: *A Non-destructive Imaging Method for Detecting Defect in Mortar Sample by High-intensity Aerial Ultrasonic Wave*. (International Congress on Ultrasonics, "ICU 2015", Metz, Physics Procedia 70, 167 – 170, 2015)
- [10] P.P. Delsanto, ed.: *The universality of Nonclassical Nonlinearity with Applications to Nondestructive Evaluation and Ultrasonics*, (SPRINGER - Kluwer Academic Publishers, New York, Heidelberg,, 2007)
- [11] Guyer RA, Johnson PA: *Nonlinear mesoscopic elasticity*. (Wiley- CHVerlag, Weinheim, 2009)
- [12] Smith E, Ten Cate JA: *Sensitive determination of nonlinear properties of Berea sandstone at low strains*. (Geophysical Research Letters; 27(13), 1985–8, 2000)
- [13] Pasqualini D, Heitmann K, TenCate JA, Habib S, Higdon D, Johnson PA: *Non equilibrium and nonlinear dynamics in Berea and Fontainebleau sandstones: low-strain regime*. (Journal of Geophysical Research; 112(1), 1–16, 2007)
- [14] Z. Prevorovsky, S. Vejvodova, J. Krofta, D. Prevorovsky: *Non-linear time reversal ultrasonic pseudo-tomography*. (Int. J. Microstructure and Materials Properties, 6 (3/4), 206-213, 2011)
- [15] Převorovský Z.: *Localization of defects in complex structures by nonlinear wave modulation and time reversal*. (XII International Workshop on Nonlinear Elasticity of Materials "IWNEM 2007", Ajaccio, France, June 2-9, 2007)
- [16] A. Quiviger, J.-P. Zardan, V. Garnier, C. Payan, J.-F. Chaix, J. Salin: *Non linear acoustic applied to the concrete study*. (Proc. of the Acoustics 2012 Nantes Conference, 23-27 April 2012, Nantes, France)
- [17] Kober J, Prevorovsky Z: *Theoretical investigation of nonlinear ultrasonic wave modulation spectroscopy at crack interface*. (NDT & E International, 6, 10–15, 2014)
- [18] Převorovský, Z., Krofta, J., Chlada, M.: *Nedestruktivní hodnocení stavu betonových konstrukcí metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie*. (38. Mezinár. Conf. DEFEKTOSKOPIE 2008-NDE for safety, Brno, 4-6 Nov. 2008)
- [19] Z. Převorovský, J. Krofta, J. Kober, *Nedestruktivní hodnocení stavu pískovcových kvádrů*, Výzkumná zpráva, Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i, 2015.
- [20] S. Vejvodova, Z. Prevorovsky, S. Dos Santos: *Nonlinear Time Reversal Tomography of Structural Defects* (14<sup>th</sup> Internat. Conf. on Nonlinear Elasticity in Materials, "XIV ICNEM", Lisbon, June 1-5, 2009, ASA POMA Vol. 3, Issue 1, pp. 045003-10, 2009)
- [21] S. Dos Santos, S. Vejvodova, Z. Prevorovsky: *Nonlinear elastic wave spectroscopy in symbiosis with time reversal for localization of defects : TR-NEWS*. Proc. of the 5<sup>th</sup> International Workshop "NDT in Progress", Prague - Pruhonice, October 12-14, 2009; pp.27-36 (2009)
- [22] Fink M, Cassereau D, Derode A, Prada C, Roux P, Tanter M, et al.: *Time-reversed acoustics*. (Reports on Progress in Physics; 63(12), 1933–95. 2000)
- [23] M. Scalerandi, A. S. Gliozzi, C. L. E. Bruno, K. Van Den Abeele: *Nonlinear acoustic time reversal imaging using the scaling subtraction method*. (J. Phys. D: Appl. Phys., 41, 215404-13, 2008)