

STANOVENÍ STEJNORODOSTI BETONU BIOLOGICKÉHO STÍNĚNÍ REAKTORU LR-0 ULTRAZVUKOVOU PRŮCHODOVOU METODOU

NON-HOMOGENEITY OF BIOLOGICAL SHIELDING CONCRETE OF LR-0 REACTOR DETERMINED BY ULTRASONIC TRANSMISSION METHOD

Zbyněk Hlaváč¹, Evžen Novák², Jan Patera³, Pavel Zahradka⁴

Abstract

Subject of experiment is non-destructive testing of reactor biological shielding concrete using ultrasonic impulse method. The homogeneity is necessary for accurate measurements of reactor radiation properties. Certain characteristic of the concrete can ascertain the results of reactor products specification.

Key words

Reactor biological shielding, ultrasonic pulse method, non-destructive testing, concrete homogeneity.

Klíčová slova

Biologické stínění reaktoru, ultrazvuková impulzová metoda, nedestruktivní zkoušení, stejnorodost betonu.

Anotace příspěvku

Hlavním předmětem tohoto příspěvku je seznámení s výsledky nedestruktivního (NDT) měření betonu biologické ochrany reaktoru LR-0 v Řeži. Naším cílem bylo zjistit možnost využití ultrazvukové průchodové metody pro odhalení nestejnorodosti desek betonu biologické ochrany. Důvodem byla potřeba zpřesnit parametry procházejícího záření, které je ovlivněno především přítomností vody v betonu. Ta ovlivňuje množství a spektrum zachycených neutronů. V případě potvrzení stejnorodosti betonu by byly potvrzeny měřené výsledky. Naopak, v případě zjištění rozdílných vlastností stínění v různých místech betonových desek, bude nutné tyto vlastnosti promítnout do dalších výpočtů prováděných metodami Monte-Carlo (MCNP).

1 METODIKA MĚŘENÍ

Pro správnou interpretaci výsledků ultrazvukových měření je třeba zvládnout základní teoretické vztahy, kterými se ultrazvukové vlnění řídí. Tato teoretická část je silně ovlivněna hlavně zkoušeným materiálem. V našem případě se jedná o beton, o kterém můžeme hovořit jako o pružnoplastickém kvazikřehkém heterogenním materiálu s mikrotrhlinami, póry a nerovnoměrně rozloženými částicemi kameniva. Proto je velmi obtížné stanovit jeho skutečné vlastnosti bez toho, aby byla narušena jeho struktura. Avšak ve velkém počtu případů není možno destruktivní zkoušky provádět, ať už na odebraných vzorcích a nebo na konstrukci samotné. Pro tyto případy je nutné využít nedestruktivních metod.

1.1 Princip šíření ultrazvuku

Ultrazvukem (UZ) jsou nazývány mechanické kmity částic prostředí, jejichž frekvence jsou vyšší než 20 kHz. Pro nedestruktivní zkoušení se ve stavebnictví využívají frekvence v rozmezí od 20 kHz do 500 kHz. Ultrazvuk nemá prakticky žádné fyzikální ani chemické účinky, protože jeho intenzity jsou nízké, nejvýše 0,001 W.mm⁻².

Ultrazvukové metody zkoušení materiálu používané ve stavebnictví využívají impulsové vysílání. Impuls je soubor kmitů, které se od nuly nebo od konstantní hodnoty liší po dobu krátkého časového úseku, jehož trvání je srovnatelné s délkou kmitajícího přechodového jevu, tj. dobou, za kterou amplituda dosáhne své maximální hodnoty. Trvání impulsu se označuje jako šířka, která není jednoznačně určena, protože závisí na jeho tvaru.

¹ Zbyněk Hlaváč, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Morseova 4, 301 00 Plzeň, zbynek.hlavac@cvrez.cz

² Evžen Novák, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, evzen.novak@cvrez.cz

³ Jan Patera, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Morseova 4, 301 00 Plzeň, jan.patera@cvrez.cz

⁴ Pavel Zahradka, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Morseova 4, 301 00 Plzeň, pavel.zahradka@cvrez.cz

1.1.1 Typy vlnění

Částice kmitající v téže fázi tvoří vlnoplochu. Podle jejího tvaru se rozlišují tři typy vln: rovinné, válcové a kulové. Rovinná vlna se šíří tak, že vlnoplocha tvoří rovinu kolmou na směr šíření UZ vln. Válcové vlny vznikají kmitáním nekonečně dlouhého válce se zanedbatelným průměrem, kolem něj se tvoří soustředné vlnoplochy. Kulové vlny vznikají při kmitání bodového zdroje, kolem něhož vzniká všesměrná kulová vlna.

Při šíření UZ vln prostředím se jeho částice rozkmitávají v různém směru vzhledem ke směru postupu vlny. Podle tohoto rozlišujeme druhy vln podélných, příčných, povrchových a deskových.

Částice podélné (longitudinální) vlny kmitají po přímkové dráze ve směru šíření vlny. Dochází k zhušťování a zředění prostředí a dochází ke střídání tlaku a tahu a ke změně objemu prostředí. Toto vlnění se může šířit tuhým, kapalným i plynným prostředím. Podmínkou pro šíření čistě podélných vln jsou dostatečné rozměry prostředí vzhledem k délce vlny.

Při příčné (transversální) vlně kmitají částice po přímkové dráze kolmé na směr šíření impulsu. Vlny se mohou šířit jen v tuhém prostředí. Při jejich šíření nevzniká zhuštění a zředění materiálu, ale částice se vzájemně posunují.

Na volném povrchu tuhé látky se mohou šířit povrchové Rayleighovy vlny, částice prostředí kmitají kolem rovnovážné polohy po eliptické dráze. Vlna zaniká v hloubce rovné délce povrchové vlny. Povrchové vlny se využívají například při určování povrchových vad.

Deskové (Langovy) vlny se šíří v prostředích, jejichž rozměry jsou v jednom nebo ve dvou směrech srovnatelné s délkou vlny. Částice prostředí kmitají po eliptické dráze kolmé k povrchu a tedy i kolmé ke směru šíření kromě částic na neutrální ose.

1.1.2 Rychlost šíření ultrazvukových vln

Jednou ze základních měřených veličin je rychlost procházejících ultrazvukových vln.

Rychlost šíření UZ vln závisí na elastických konstantách prostředí a také na poměrech rozměrů prostředí k vlnové délce.

V neohraničeném prostředí je rychlost šíření podélných vln

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Zde E je modul pružnosti betonu a ρ hustota prostředí. μ je Poissonovo číslo, které pro většinu tuhých prostředí nabývá hodnot 0 až 0,5.

V deskovém prostředí, kde jeden rozměr, kolmý na směr šíření ultrazvukového signálu, je ohraničen je rychlost

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1 + \mu^2}}$$

V tyčovém prostředí, kde jsou ohraničeny dva rozměry, kolmé na směr šíření ultrazvukového signálu, je rychlost

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Rychlost šíření příčných vln v neohraničeném prostředí:

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}}$$

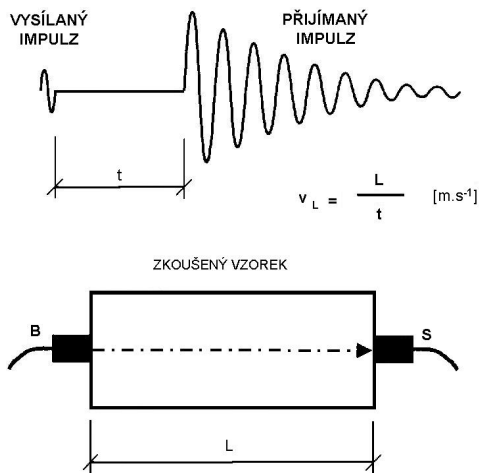
Zde G je modul pružnosti ve smyku.

1.2 Ultrazvuková impulsová metoda

Ultrazvuková impulsová metoda je popsána normou ČSN 73 1371. Zakládá se na měření rychlosti šíření impulsů ultrazvukového vlnění v betonu. K určení fyzikálně-mechanických vlastností betonu se použije odvozených vztahů mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a těmito vlastnostmi betonu.

Ve stavebnictví se používá ultrazvukové (UZ) vlnění s kmitočty v rozmezí od 20 kHz do 150 kHz (výjimečně do 500 kHz). Výhodou UZ vlnění je, že se šíří i relativně silnými vrstvami materiálu, kde se např. slyšitelné vlnění rychle utlumí. [1]

Pro stanovení vlastností materiálů a jejich vad se v praxi používá několik druhů UZ metod. Ultrazvuková impulsová metoda průchodová se používá převážně tam, kde chceme pomocí rychlosti šíření UZ vlnění zjistit jakost zkoušeného materiálu, případně jeho mechanicko-fyzikální charakteristiky. Metoda je založena na opakovaném vysílání UZ impulsů do zkoušeného materiálu a zjištění impulsových rychlostí. Impulsovou rychlost šíření UZ vlnění zjistíme výpočtem z času šíření a dráhy po které se impuls UZ vlnění šířil.



Obr. 1 Měření doby průchodu impulsu UZ vlněním zkoušeným materiálem [2]

Pokud by byly sondy přikládány ke vzorku bezprostředně, vznikla by mezi sondou a vzorkem vždy malá vzduchová mezera. Na této dvojí hranici prostředí (kov sondy – vzduch, vzduch – materiál vzorku) by došlo ke značnému odrazu ultrazvukových vln. Dále by prošlo tak málo impulsů UZ vlnění, že by ve většině případů nestačila citlivost snímače k jejich příjmu. Proto je nutné používat akustický vazební prostředek, tenkou vrstvou mezi sondou a vzorkem. Při jeho použití se sníží nežádoucí odraz vln a výrazně se zvýší průchod ultrazvuku přes uvedené rozhraní. Používá se plastelína, sklenářský tmel nebo vazelína [1], v co nejtenčí vrstvě. Při znečištění prachem a pískem přestává plnit svou funkci a je nutno jej vyměnit za čistý.

Dobu průchodu UZ vlnění vrstvou akustického vazebního prostředku a konstrukcí sondy označujeme jako „mrtvý čas“. Mrtvý čas musíme zjistit a při vyhodnocení o něj opravit všechny měřené údaje. Mrtvý čas zjišťujeme na kalibračním vzorku (etalonu), jehož časovou charakteristiku přesně známe.

1.3 Měřicí přístroj PUNDIT PL

Použitý přístroj byl Proceq PUNDIT PL. Jako akustický vazební prostředek byla použita plastelína. Hodnota etalonu byla 24,5 μs.

Ultrazvukový přístroj (obr. 3) umožňuje měření doby průchodu ultrazvukových vln a záznam signálu jako vektoru nebo matice. Přístroj má digitální dotykový displej, což velmi usnadňuje práci s daty během měření. Během měření byly pomocí kabelů k přístroji připojeny dvě UZ sondy o frekvencích 54 kHz. Jedna vysílá, druhá přijímá.

Součástí přístroje je i etalon, na kterém se přístroj kalibruje (Obr. 2). Rozměry a hmotnost a napájení přístroje umožňují i několika-hodinové měření mimo laboratoř. Toto je výhodné především pro kontrolu stavebních konstrukcí.



Obr. 2 Kalibrace přístroje PUNDIT PL pomocí etalonu



Obr. 3 Kalibrace přístroje PUNDIT PL

2 MĚŘENÁ KONSTRUKCE

Předmětem měření byly desky betonu biologického stínění reaktoru LR-0 v Řeži u Prahy. Jednalo se o dvě desky ze serpentinitového betonu, které jsou součástí modelu betonového (biologického) stínění reaktoru určeného pro výzkum jeho vlastností prostřednictvím měření spekter neutronů a gama záření vycházejících z aktivní zóny reaktoru LR-0.

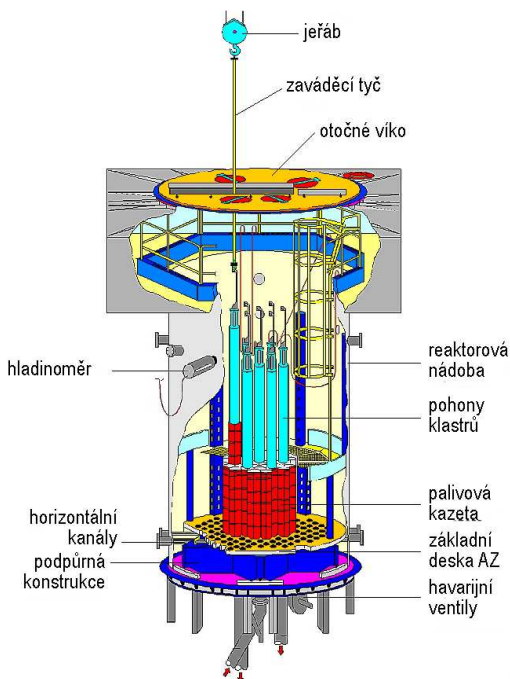
Serpentinit je metamorfovaná hornina obsahující minerál serpentín. Ten se vyznačuje schopností zadržovat chemicky vázanou vodu i za vysokých teplot. Atom vodíku má hmotnost blízkou neutronu, voda je tak vhodným médiem pro odstínění neutronů. Serpentinový beton se tedy používá do stínících betonů, kde je potřeba zpomalit a zachytit rychlé neutrony, například u jaderných reaktorů.

2.1 Reaktor LR-0

Výzkumný reaktor LR-0 je lehkovodní reaktor nulového výkonu. Slouží jako experimentální reaktor pro měření neutronové fyzikálních charakteristik reaktorů typu VVER a PWR (Vodo Vodní Energetický Reaktor a Pressurized Water Reactor).

Poskytuje vědecko-technickou základnu pro experimenty v oblasti fyziky aktivní zóny a stínění lehkovodních reaktorů typu VVER (Temelín, Dukovany a další reaktory ruské konstrukce) a experimenty související se skladováním vyhořelého paliva z jaderných elektráren a s perspektivními směry v jaderné energetice. Reaktor LR-0 je řešen univerzálním způsobem, vhodným pro realizaci fyzikálních experimentů na aktivních zónách typu VVER v širokém rozsahu počtu kazet, obohacení paliva, s různou koncentrací kyseliny borité H_3BO_3 v moderátoru, s různým uspořádáním absorpčních elementů v kazetách apod. Velmi důležitou součástí výzkumu je modelování a experimentální ověřování radiačního poškození materiálů vnitřní částí reaktorů a reaktorových nádob VVER.

V projektu reaktoru LR-0 byly respektovány specifické požadavky vyplývající jednak z hlediska zajištění jaderné bezpečnosti všech provozních stavů a jednak z jeho určení k fyzikálnímu výzkumu aktivních zón typu VVER. [3]



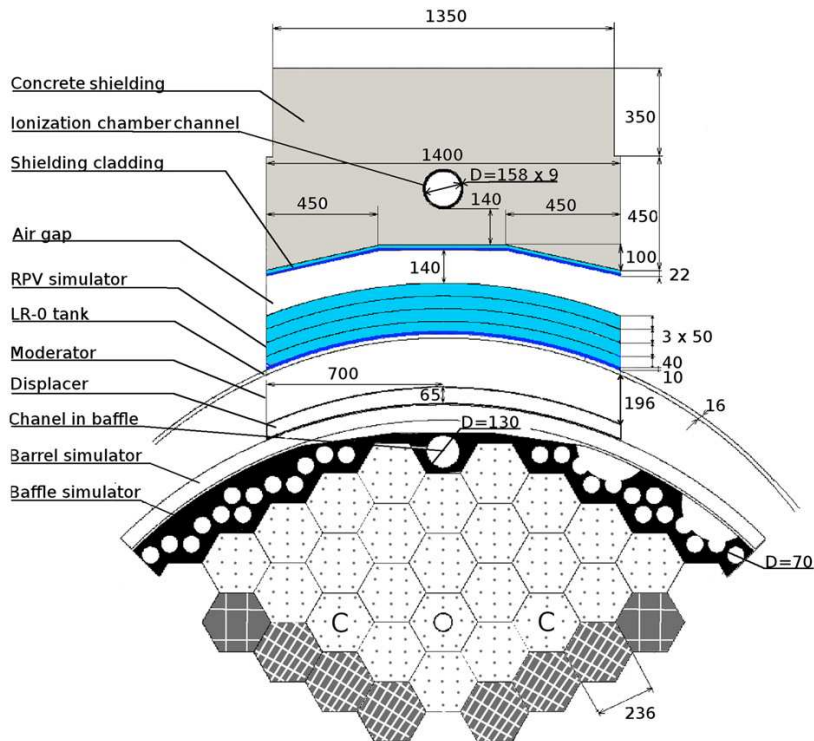
2.1.1 Konstrukce reaktoru

V reaktoru probíhá štěpná reakce tepelných neutronů v palivových proutcích s uranem, který obsahuje také štěpitelný izotop U^{235} . Reakce je řízena buď výškou hladiny moderátoru nebo experimentálním klastrem. Moderátorem – zpomalovačem neutronů na rychlost vhodnou pro další štěpení – je demineralizovaná voda. V ní je rozpuštěná H_3BO_3 o koncentraci 0 až 12 g.l^{-1} a ta slouží jako pomocný absorbátor neutronů. Výkon reaktoru je nízký, jeho maximální tepelný výkon je 1 kW, což zdaleka nestačí k ohřátí vody, které je v reaktoru zhruba 20 m^3 , ani o jediný stupeň celsia. Tento výkon je necelou milióntinou výkonu reaktoru v Temelíně, takže je konstrukce reaktoru LR-0 mnohem jednodušší – ale protože uvnitř platí stejné fyzikální zákony, lze v něm zkoumat i vlastnosti daleko větších reaktorů.

Obr. 4 Schéma reaktoru LR-0 [3]

2.1.2 Nádoba reaktoru

Nádoba reaktoru je umístěna v betonovém stínícím bunkru. Sestává se ze dvou částí vyrobených z hliníku o vysoké čistotě (čistota materiálu nejméně 99,5 %). Spodní válcová část má průměr 3,5 m a výšku 6,5 m, stěny hliníkové reaktorové nádoby mají tloušťku 16 mm, dno 25 mm. Horní čtvercová část má rozměry 6 x 6 m, výšku 1,5 m a je se spodní částí svařena v jeden celek. Vnější válcová část nádoby je zastíněna 1 mm silnými kadmiovými plechy a celá nádoba je zakryta odnímatelnou tepelnou izolací v tloušťce 100 a 200 mm. Příčný řez aktivní zónou reaktoru LR-0 je na obrázku č. 5 na další straně.



Obr. 5 Příčný řez aktivní zónou lehkvodného reaktoru LR-0 [4]

Na obrázku je patrná aktivní zóna s palivovými kazetami (baffle simulator), simulace tlakové nádoby reaktoru tvořená jednotlivými plechy (RPV simulator), beton biologického stínění tvořený různě tlustými deskami (concrete shielding) a ionizační komora/kanál (ionization chambre/channel) určená pro měření různých parametrů záření a teploty v betonu biologického stínění v jaderných elektrárnách s reaktory VVER (Temelín, Dukovany).

2.2 Beton biologického stínění

Stínící betony slouží jako ochrana proti různým typům záření: α (heliová jádra); β (elektrony); γ (tvrdé vlnové záření - rentgenové záření, přirozená radioaktivita); neutronové záření.

Záření α , β mají malou vzdálenost doletu, takže ke stínění postačí velmi malé tloušťky, řádově několik mm.

Tvrdé záření se absorbuje látkami s vysokou hmotností, neutronové záření sloučeninami obsahujícími vodík (voda vázaná v betonu, serpentinit) nebo sloučeniny boru (coemanit, sloučeniny kadmia a hafnia).

Rozhodující význam při snížení γ - záření a neutronového záření je objemová hmotnost betonu.

2.2.1 Účinky záření na stínící beton

Beton biologického stínění má pohlcovat tvrdé záření, obsahuje tedy složky vodíku, v našem případě kamenivo serpentinit. Až do integrovaného neutronového toku (což je míra pro nasčítané působení neutronů odpovídající asi $1E19 \text{ cm}^{-2}$) během 30 roků se neočekávají žádné poškozující vlivy. U betonu, u kterého se kromě ochranných úkolů vůči záření počítá se současným působením teploty (s hodnotou neutronového záření asi $1E19 \text{ cm}^{-2}$ a teplotou $80 \text{ }^\circ\text{C}$), je již při neutronovém záření od $5E19 \text{ cm}^{-2}$, nebo při gama záření $> 2E14 \text{ J/g}$ třeba počítat se změnami parametrů betonu jako je zhoršení pevnosti v tlaku a v tahu jakož i modulu pružnosti. Absorpce záření stoupá silně teplota betonu ($100 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$), což má za následek odvodnění kameniva. To způsobuje pokles pevnosti o 20 až 25%. [5]

2.2.2 Složky stínícího betonu

Stínící beton obsahuje stejné složky jako obyčejný beton, vyjma kameniva, které musí mít buďto výrazně větší objemovou hmotnost (stínění gama záření) nebo zvýšený obsah vody (stínění neutronů).

Používá se zde cement s nízkým hydratačním teplem, s pomalým nárůstem pevnosti, který nemá sklon k tvorbě trhlinek (portlandský cement s nízkým obsahem trikalcialumaluminátu (C_3A), nebo vysokopecní cement s vysokým obsahem vysokopecní strusky.

Kamenivo musí splňovat následující základní podmínky: musí být zaručeny křivky zrnitosti, objemové hmotnosti, obsah krystalicky vázané vody a chemické složení, pevnost a hutnost betonu nesmí být ohrožena charakterem kameniva. Nejvhodnější jsou horniny magnetit, limonit (dobře brzdí rychlé neutrony), baryt (těživec), ferofosfor, serpentinit.

Pro zajištění vhodné konzistence čerstvého betonu je nutné dávkovat plastifikační přísady, pokud ovšem není požadavek, že by se počítalo s vyšším poměrem vody ku cementu w/c, aby se odstínila neutrony. Stejnou funkci mohou zastat sloučeniny boru (colemanit $2 CaO \cdot 3 B_2O_3 \cdot 5 H_2O$ nebo borkalcit $CaO \cdot 2 B_2O_3 \cdot 4 H_2O$). [6]

3 STANOVENÍ STEJNORODOSTI BETONU POMOCÍ ULTRAZVUKU

Pro měření byly vybrána deska T2 (viz Obr. 6) a deska G2 stínícího betonu. Měření bylo provedeno ve dvou směrech. Nejprve byly desky přeměřeny po šířce. Bylo zjištěno, že tloušťka desek není konstantní a to bude ovlivňovat dobu průchodu UZ signálu. Posléze byla změřena doba průchodu UZ signálu.

3.1 Měření rozměrů desek stínícího betonu

Tloušťka desky T2 byla stanovena jako $35,8 \pm 0,9$ mm, u desky G2 $t = 71,1 \pm 0,5$ mm. Relativní odchylka je tedy větší u tenčí desky T2 a tvoří $\pm 2,6$ % průměrné hodnoty. Variační koeficient pro desku G2 je nižší $COV = 0,7$ %. V případě měření obou desek v podélném směru byla měřena délka každé z desek $1500,0 \pm 0,0$ mm. Rozdílné variační koeficienty jsou dány způsobem betonáže, kdy forma ležela naplocho a deska byla odlévána po tloušťce. Rozměry šířka x délka jsou tedy konstantní, dané rozměry formy, tloušťka je proměnlivá, což je dáno nerovnou hladinou betonu před zatvrdnutím.



Obr. 6 Měření příčného rozměru desky betonu biologického stínění pomocí posuvného měřítka

Pro přesnější stanovení tvaru a rozměrů desky plánujeme její trojrozměrné skenování a vytvoření 3D modelu, ze kterého půjdou odečíst rozměry v libovolných řezech. Výpočet parametrů procházejícího paprsku se tím ještě více zpřesní.

3.2 Měření doby průchodu UZ signálu

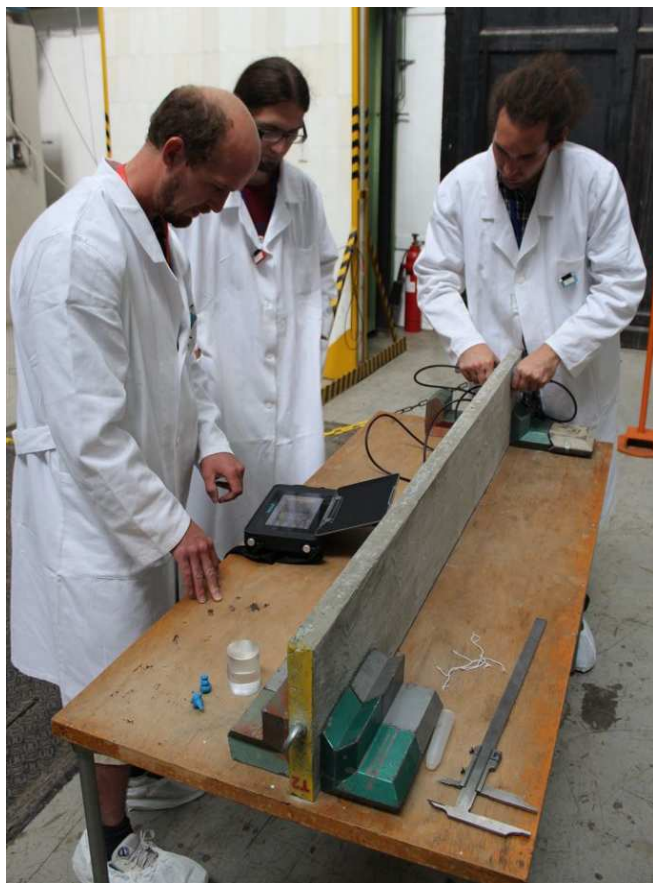
Ultrazvukový signál byl buzen pomocí UZ přístroje PUNDIT PL od společnosti Proceq. K měření byly použity UZ sondy o jmenovité frekvenci 54 kHz.

Měřili jsme každou desku v příčném směru v 7 místech vzdálených od sebe vždy po 150 mm. Celkově bylo tedy možné vytvořit mapu rozložení doby průchodu signálu. Jelikož ve stejných bodech byly měřeny i tloušťky, je možné vyjádřit závislost rychlosti průchodu deskou na poloze zkoušky.

Další měření proběhla v podélném směru obou desek.

3.2.1 Měření desky T2 v příčném směru

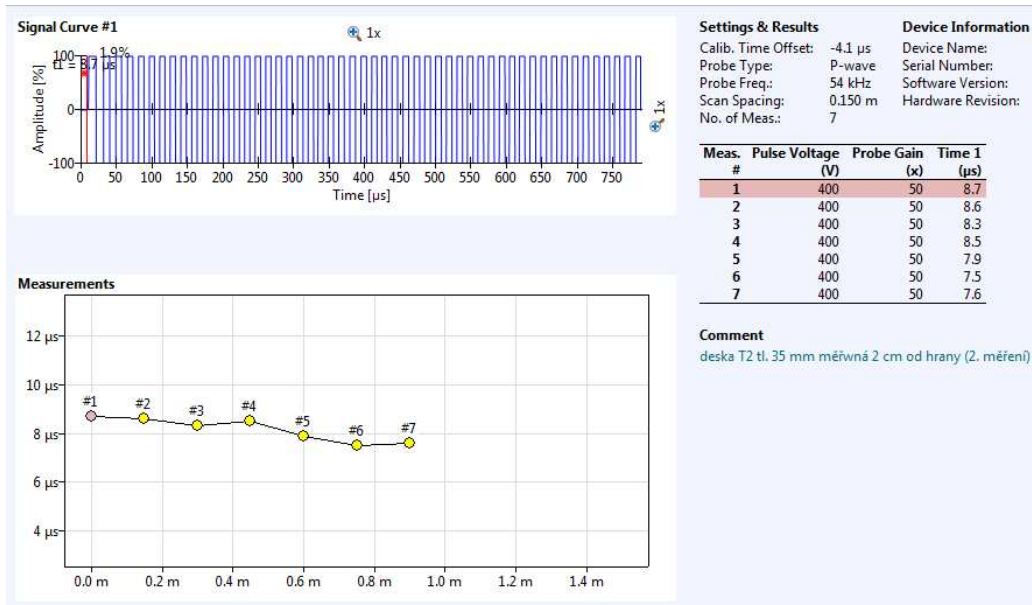
Deska betonu biologického stínění o rozměrech 35x300x1500 mm byla měřena 2x v příčném směru, pokaždé v 7 bodech, přibližně 20 mm pod horní hranou desky. Měření probíhalo v nejtenčím rozměru desky, délka prozvučované části desky byla tedy přibližně 35 mm.



Obr. 7 Měření doby průchodu v různých místech desky T2 pomocí ultrazvukového přístroje PUNDIT PL

Výsledek prvního měření desky T2 v příčném směru byl $8,10 \pm 0,26 \mu\text{s}$. Variační koeficient $\text{COV} = 3,2 \%$.

Záznam z druhého měření je v obrázku č. 8 na další stránce. Je tam také záznam z měření desky G2 (Obr. 9).

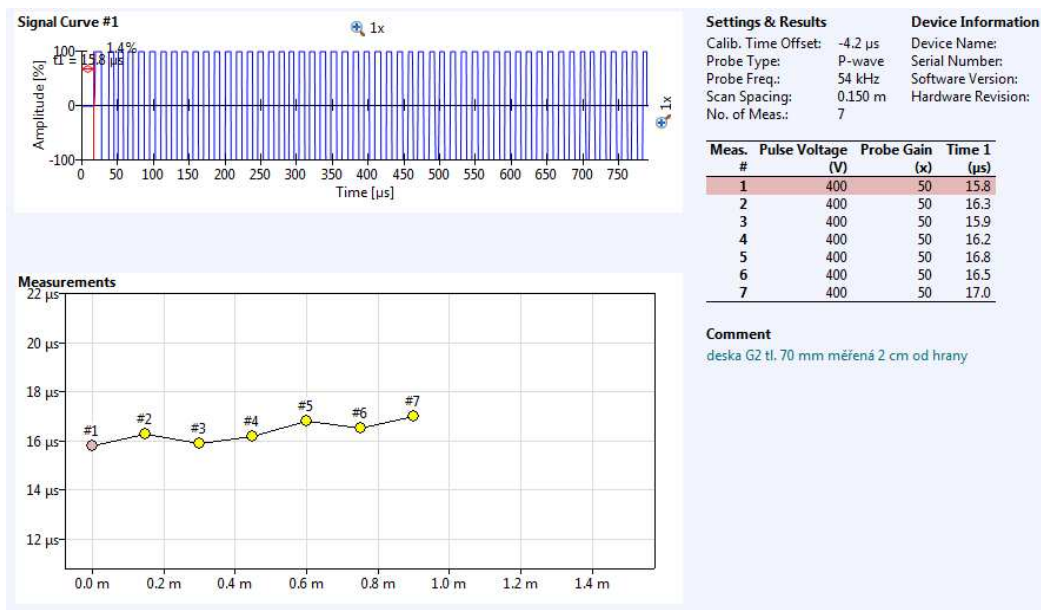


Obr. 8 Záznam měření doby průchodu přes tloušťku desky T2 pomocí přístroje PUNDIT PL

V obrázku č. 8 je patrný signál změřený v bodě #1 (nahore vlevo), dále záznam všech 7 měření rozmístěných v příjme po délce desky á 150 mm. Jedná se o závislost doby průchodu UZ signálu na vzdálenosti od bodu #1. Konečné vyhodnocení experimentu přístrojem PUNDIT PL je v pravé části obrázku. Jsou zde uvedena budičí napětí, 400 V pro každé z měření, zesílení signálu (50x) a doba průchodu v mikrosekundách. Průměrná hodnota je $8,16 \pm 0,45 \mu\text{s}$. Variační koeficient $\text{COV} = 5,6 \%$. Jedná se výsledek 2. měření desky T2 v příčném směru.

3.2.2 Měření desky G2 v příčném směru

Deska betonu biologického stínění o rozměrech 70x300x1500 mm byla měřena 1x v příčném směru, v 7 bodech, přibližně 20 mm pod horní hranou desky. Průměrná naměřená doba průchodu UZ signálu je $16,36 \pm 0,41 \mu\text{s}$. $\text{COV} = 2,5 \%$.



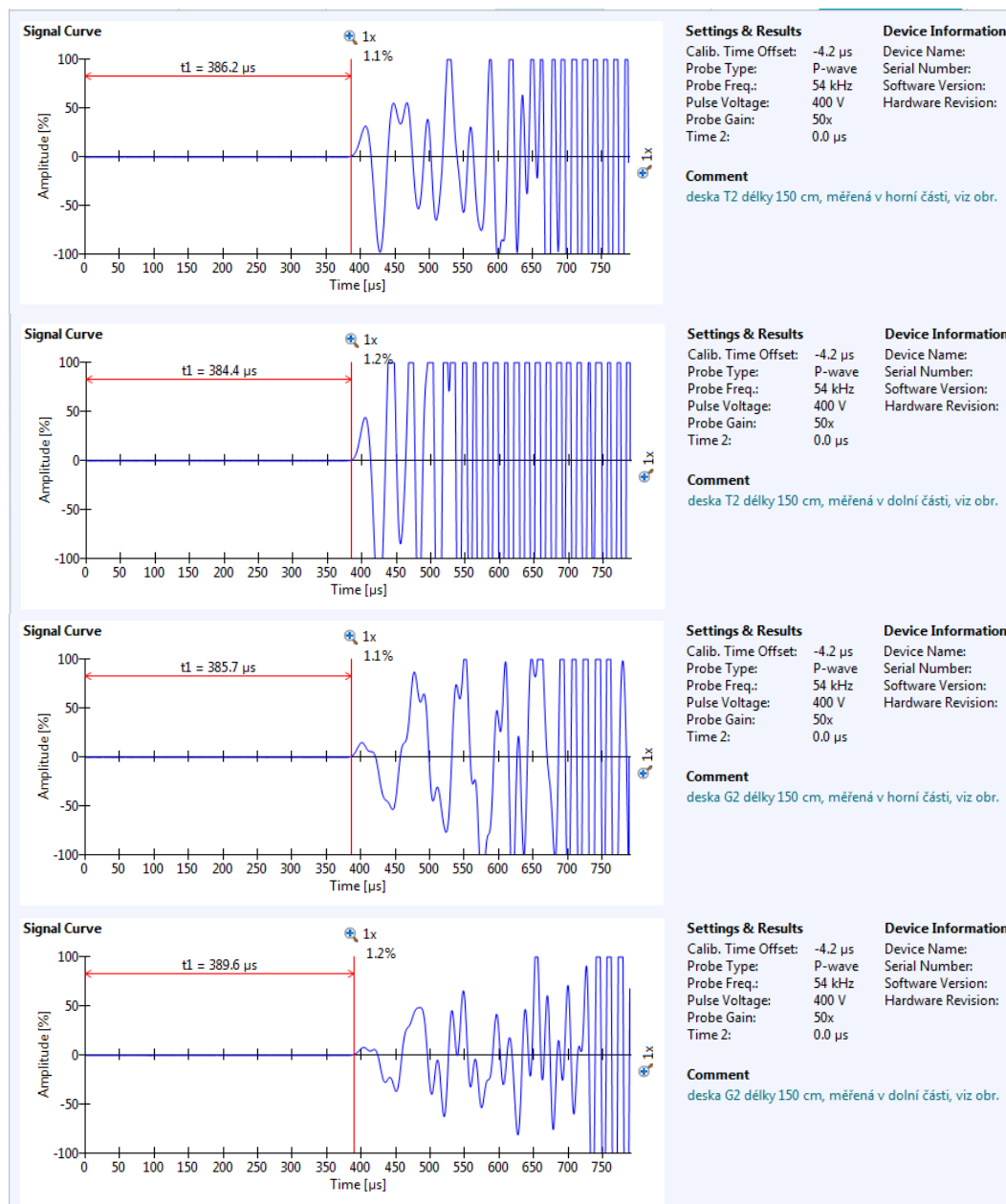
Obr. 9 Záznam měření doby průchodu přes tloušťku desky G2 pomocí přístroje PUNDIT PL

3.2.3 Měření desek T2 a G2 v podélném směru

Obě dvě desky byl změřeny také v podélném směru. Mělo to prověřit správnost měření na delším úseku (1500 mm).

Zanedbá se tím jednak odchylka měřené délky, jednak odchylka v měření doby průchodu, způsobená například nedodržením stejného přitlaku a nárůst “mrtvého času”.

V dalších snímcích jsou uvedeny záznamy z naměřeného signálu ve dvou místech každé desky. Hodnota byla měřena vždy v horní a dolní části výšky (šířky) desky. Průměrná doba průchodu deskou T2 je $385,3 \pm 0,9 \mu\text{s}$. COV = 0,2 %. Průměrná doba průchodu deskou G2 je $387,7 \pm 2,0 \mu\text{s}$. COV = 0,5 %. Ve srovnání s příčným směrem měření se jedná o přibližně 10× přesnější měření doby průchodu. V případě stanovení rychlosti UZ impulsů to bude ještě znatelnější, neboť zde není proměnlivá délka měřeného úseku.



Obr. 10 Záznam měření doby průchodu přes délky desek T2 a G2 pomocí přístroje PUNDIT PL



Obr. 11 Měření doby průchodu v horní části desky T2 v jejím podélném směru

3.3 Výpočet rychlosti šíření UZ signálu

Ultrazvukový signál se šíří v různých místech konstrukce různě rychle. Záleží na typu procházeného prostředí (částice, póry, trhliny, kamenivo, cementový tmel – více, či méně zhutněný beton). To stejné platí i pro různé části jednoho průřezu, signál jde v první části průřezu rychleji (kamenivo), pak pomaleji (přestup signálu mezi zrn) a pak zase rychleji (příklad). Výsledná rychlost šíření se průměruje a vypočítá se jako podíl dráhy a času (doby průchodu),

$$v_L = \frac{L}{t}$$

Zde L je nejkratší dráha, kterou musel signál překonat, t je doba, kterou k tomu potřeboval.

Tab. 1 Naměřené parametry desek betonu biologického stínění

Měřená deska	Dráha [mm]	Doba průchodu [μ s]	Rychlost průchodu [km/s]
T2	35.8 \pm 0.9	8,10 \pm 0,26	4,42 \pm 0,14
		8,16 \pm 0,45	4,39 \pm 0,15
G2	71.1 \pm 0.5	16,36 \pm 0,41	4,35 \pm 0,09
T2	1500.0 \pm 0.0	385,3 \pm 0,9	3,89 \pm 0,01
G2	1500.0 \pm 0.0	387,7 \pm 2,0	3,87 \pm 0,02

Tab. 2 Variační koeficienty jednotlivých parametrů desek betonu biologického stínění, COV [%]

Měřená deska	COV dráhy	COV doby průchodu	COV rychlosti průchodu
T2	2,6	3,2	3,2
	2,6	5,6	3,5
G2	0,7	2,5	2,2
T2	0,0	0,2	0,2
G2	0,0	0,5	0,5

Tabulka č. 1 ukazuje průměrné naměřené hodnoty tloušťky desky, její délky, doby průchodu UZ signálu po dráze (tloušťce či délce desky) a jeho rychlosti. Obě měření desky T2 jsou velmi podobná. To vypovídá o opakovatelnosti metody.

Výsledky měření desky G2 jsou přesnější než desky T2. To je patrné zejména z tabulky č.2, kde jsou zobrazeny relativní odchylky, vztahené k průměrné hodnotě měřené veličiny. Tloušťka desky G2 je měřena s chybou $\pm 0,7 \%$, kdežto T2 $\pm 2,6 \%$. Rychlost se pak liší o $\pm 2,2 \%$ u G2 a $\pm 3,35 \%$ u T2.

Ještě markantnější rozdíly jsou patrné při srovnání s podélným směrem měření. Dostali jsme odlišnou rychlost šíření UZ signálu, v průměrné hodnotě $4,38 \pm 0,13$ km/s pro příčný směr a $3,88 \pm 0,02$ km/s pro směr podélný. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1.2, rychlost šíření UZ signálu může být v různých směrech konstrukce různá, v závislosti na rozměrnosti prostředí. Obecně, v tenkých konstrukcích se UZ šíří pomaleji v podélném směru. Podíl rychlostí v 1D/3D může být například

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}} \cong \frac{1}{1,05} \text{ pro Poissonovu konstantu } \mu = 0,2.$$

Odchylka jednotlivých vypočtených rychlostí od jejich průměrných hodnot je $3,1 \%$ v případě příčného směru měření, $0,5 \%$ pro podélný směr. Rozdíl odchylek je ještě markantnější u měření délky prozvučované dráhy, $2,0 \%$ pro příčný směr vs. $0,0 \%$ pro podélný směr desky.

3 ZÁVĚR

Měření ultrazvukovou impulsní metodou při přímém prozvučování zkoušených desek ukázalo několik zajímavých skutečností, které stojí za další analýzu.

1. Zvolená ultrazvuková metoda je vhodná pro určování nehomogenit, avšak v případě měření na malé vzdálenosti převažují odchylky z jiných měření, např. měření délky dráhy šíření signálu, stanovení „mrtvého času“, míra přítlaku, kvalita vazebného prostředku, kvalita povrchu, atp.
2. Problematika proměnlivé tloušťky desek stínícího betonu může být řešena pomocí moderní metody 3D skenování.
3. Rychlost šíření UZ signálu není konstantní vzhledem ke směru šíření. Rozdíl může být i 12% . Nejedná se o chybu. Přesto tento rozdíl můžeme ovlivnit volbou vhodné budící frekvence UZ sond.
4. Stejnorodost betonu posuzovaná podle kritéria $COV < 10 \%$ zde byla zjištěna ve všech případech. Jedná se tedy o homogenní beton a jeho vlastnosti mohou být pro další výpočty považovány za konstantní.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl díky projektu CZ.1.07/2.3.00/30.0051 Podpora rozvoje znalostí pro implementaci výzkumného programu SUSEN.

Literatura

- [1] SVOBODA, D.; CIKRLE, P. ZJIŠŤOVÁNÍ PORUCH V MASIVNÍCH BETONOVÝCH BLOCÍCH S VYUŽITÍM ULTRAZVUKOVÉ IMPULSOVÉ METODY. In Sborník konference Juniorstav 2007. Brno: VUT v Brně FAST, 2007. s. 173-173.
- [2] ČSN 731371 Ultrazvuková impulzní metoda zkoušení betonu. Československá štátní norma. 1981.
- [3] Webové stránky společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. www.cvrez.cz
- [4] KOŠŤÁL M et al. The effect of biological shielding on fast neutron and photon transport in the VVER-1000 mock-up model placed in the LR-0 reactor. Applied Radiation and Isotopes 75 (2013) 37–43
- [5] NEDBAL F. Speciální betony, Praha 2001.
- [6] HELA R. Technologie betonu II, učební text VUT FAST Brno, 2007.