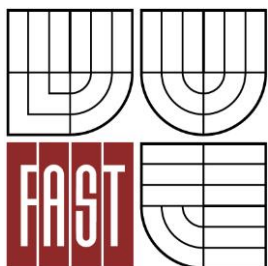




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VLIV VNITŘNÍHO NAPĚTÍ A VLHKOSTI PŘI MĚŘENÍ VÁPENOPÍSKOVÝCH CIHEL ULTRAZVUKOVOU IMPULSOVOU METODOU

THE INFLUENCE OF INTERNAL STRESSES AND MOISTURE FOR MEASURING CALCIUM
SILICATE BRICKS ULTRASONIC PULSE METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KRISTÝNA MORKUSOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BROŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Kristýna Morkusová

Název Vliv vnitřního napětí a vlhkosti při měření
vápenopískových cihel ultrazvukovou
impulsovou metodou

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

**Datum zadání
bakalářské práce** 30. 11. 2015

**Datum odevzdání
bakalářské práce** 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....	
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA Vedoucí ústavu	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Büyüköztürk, O., Taşdemir, M.A. : Nondestructive Testing of Materials and Structures, Springer, 2011

J. Obraz: Zkoušení materiálů ultrazvukem, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989

Malhotra, V. N., and Carino, N. J. Handbook on nondestructive testing of concrete, 2nd edition. – CRC Press, USA, 2004

Martinček, G.: Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií, Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1962

Pavlík, A. – Doležel, J.: Nedeštruktivní vyšetřování betonových konstrukcí, SNTL, 1977

Články v odborných časopisech a z konferencí zahraniční a tuzemské.

Příslušné české a zahraniční technické normy.

Rozsah práce cca 40 stran.

Zásady pro vypracování

Výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou materiálů jsou ovlivňovány řadou faktorů. Při zkoušení materiálů, které mají ve své struktuře otevřené póry je významným vlivem i vlhkost. Dalším vlivem je i míra vnitřního napětí ve vyšetřovaném materiálu.

Cílem práce je zjištění vlivu vlhkosti a vnitřního napětí, tj. míry zatížení vzorků, na výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou při zkoušení vápenopiskových cihel.

Pro naplnění zadání práce je třeba v teoretické části:

Uvést přehled norem pro ultrazvukovou impulsovou metodu a jejich stručnou anotaci.

Popsat podstatu ultrazvukové impulsové metody a stručně uvést přehled faktorů ovlivňující výsledky měření.

Popsat vliv vlhkosti a vnitřního napětí na výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou – údaje uvedené v technických normách a odborné literatuře.

Popsat metodiku měření a vyhodnocení výsledků zkoušek při měření vápenopiskových cihel.

V experimentální části provést měření na vápenopiskových cihlách plných min. při 4 různých vlhkostních stavech a při 5 různých zatíženích. Mezní stavy budou – při sledování vlivu vlhkosti vápenopiskové cihly nasycené vodou a vysušené a při sledování vlivu vnitřního napětí to bude zatížení cihel, které odpovídá 0 až 60% od pevnosti v tlaku vápenopiskových cihel.

Provést zhodnocení a analýzu dosažených výsledků.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem vnitřního napětí a vlhkosti na měření vápenopískových cihel ultrazvukovou impulzovou metodou.

Klíčová slova

vápenopískové cihly
nedestruktivní zkoušení
ultrazvuková impulzová metoda
rychlost šíření ultrazvukového impulzu
vliv vnitřního napětí
vliv vlhkosti

Abstract

This bachelor's thesis describes the influence of internal stresses and moisture for measuring calcium silicate bricks ultrasonic pulse method.

Keywords

calcium silicate brick
non-destructive testing
ultrasonic pulse method
ultrasonic pulse velocity
influence of internal stresses
influence of moisture

Bibliografická citace VŠKP

Kristýna Morkusová *Vliv vnitřního napětí a vlhkosti při měření vápenopiskových cihel ultrazvukovou impulsovou metodou*. Brno, 2016. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

podpis autora

Kristýna Morkusová

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce, panu doc. Ing. Jiřímu Brožovskému, CSc., za doporučení literatury, za cenné rady a především za pomoc při provádění experimentální části

Obsah:

1	Úvod	10
2	Cíl práce	11
3	Normy pro zkoušení materiálů ultrazvukovou impulzovou metodou	12
4	Ultrazvuková impulzová metoda	15
4.1	Podstata ultrazvukové impulzové metody	15
4.2	Ultrazvukové přístroje.....	15
4.2.1	Budič a snímač	16
4.2.2	Akustické vazby	17
4.3	Uspořádání sond (budiče a snímače).....	19
5	Faktory ovlivňující výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou	20
5.1	Šíření vlnění ve hmotě	20
5.2	Faktory ovlivňující měření ultrazvukovou impulzovou metodou.....	21
6	Vliv vlhkosti a napětí na výsledky měření nedestruktivními zkouškami	29
6.1	Vliv vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou	29
6.1.1	Vliv vlhkosti na pevnosti odvozené z ultrazvukového měření	31
6.2	Vliv vnitřních napětí na výsledky měření nedestruktivními metodami.....	33
6.2.1	Vliv napětí na měření ultrazvukovou impulzovou metodou	34
6.2.2	Vliv napětí na měření odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt	37
7	Metodika měření a vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou na vápenopískových cihlách	40
7.1	Metodika zkoušení	40
7.1.1	Zkušební vzorky.....	40
7.1.2	Postup měření ultrazvukovou impulzovou metodou	40
7.1.3	Ostatní zkoušky	41
7.2	Vyhodnocení výsledků měření a zkoušek	41
7.2.1	Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou	41
7.2.2	Vyhodnocení zkoušek vlhkosti, nasákavosti, objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku	42
8	Experimentální část	44
8.1	Výsledky měření.....	44
8.2	Diskuze k výsledkům experimentálních prací.....	51

8.2.1	Změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v závislosti na vnitřním napětí a vlhkosti	51
8.2.2	Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou	55
8.2.3	Zhodnocení výsledků experimentálních prací	61
9	Závěr	64
10	Použitá literatura	66
11	Seznam použitých obrázků	69
12	Seznam tabulek	69
13	Seznam grafů	70
14	Použité symboly a zkratky	71

1 Úvod

Ultrazvuková impulzová metoda se řadí mezi nedestruktivní metody využívané pro zjišťování některých vlastností daného materiálu. Pomocí této metody lze určit, zda se ve struktuře materiálu nacházejí necelistvosti, například trhlinky nebo defekty, které vznikly již při výrobě nebo vlivem vnějších mechanických či jiných namáhání. Lze také odhadnout například hodnotu pevnosti v tlaku nebo modulu pružnosti, aniž by při měření byl vyšetřovaný materiál porušen. V rámci bakalářské práce byl sledován vliv vybraných faktorů na výsledky měření plných vápenopískových cihel ultrazvukovou impulzovou metodou.

Materiál vápenopískových cihel lze charakterizovat jako necementový jemnozrnný beton. Vyrábí se autoklávováním ze tří základních surovin: vody, písku a měkce páleného vápna. Vytvořená drolenka se lisuje pod tlakem 20 MPa do forem a výlisky poté putují na 8 – 10 hodin do autoklávu, kde probíhá za zvýšeného tlaku a teploty hydrotermální reakce, při které vzniká reakcí všech složek minerál tobermorit ($C_5S_6H_5$). Tento minerál se vyskytuje především v betonu, proto také je na vápenopískové cihly pohlíženo jako na materiál podobný svou strukturou betonu.

Z tohoto důvodu je možné při hodnocení vlivu sledovaných faktorů na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou na vápenopískových cihlách vycházet z poznatků studií získaných ze zkoušení betonů. Avšak tyto poznatky uváděné v odborné literatuře a normách pro beton bez ověření nelze aplikovat na výsledky měření prováděných na vápenopískových cihlách, poněvadž je každý materiál charakteristický svým projevem vůči okolním vlivům.

Tato bakalářská práce se především zabývá dvěma vlivy při měření vápenopískových cihel ultrazvukovou impulzovou metodou, konkrétně vlivem vlhkosti a vnitřního napětí ve zkoušených vzorcích.

2 Cíl práce

Většina vědeckých studií a odborných prací se zabývá vlivem vnitřního napětí a vlhkosti při zkoušení ultrazvukovou impulzovou metodou pouze na betonových zkušebních tělesech. Poznatky o vlivech na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou získané ze zkoušení betonu nemusí mít stejnou platnost pro jiné stavební materiály v důsledku jejich různého složení, vlastností složek či vnitřní struktury.

Cílem bakalářské práce bylo zhodnocení míry vlivu vnitřního napětí a vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při zkoušení plných vápenopískových cihel.

Pro splnění cílů bakalářské práce bylo v teoretické části třeba:

- uvést přehled norem pro ultrazvukovou impulzovou metodu a sepsat jejich stručné anotace;
- popsat podstatu ultrazvukové impulzové metody;
- uvést přehled faktorů ovlivňující výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou;
- detailněji popsat vliv vlhkosti a vnitřního napětí na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou;
- popsat metodiku měření a vyhodnocení výsledků zkoušek při měření ultrazvukovou impulzovou metodou na vápenopískových cihlách.

V experimentální části bylo pro splnění cílů bakalářské práce třeba:

- nejdříve stanovit celkovou pevnost v tlaku vápenopískových cihel pro odvození příslušného zatěžovacího stavu;
- provést měření ultrazvukovou impulzovou metodou na plných vápenopískových cihlách při 4 vlhkostních stavech a při 5 různých zatíženích. Přičemž mezní stavy při sledování vlivu vlhkosti byly charakterizovány vysušenými a plně nasycenými vzorky a při sledování vlivu vnitřního napětí byly vyjádřeny zatížením 0 % a 60 % z celkové pevnosti v tlaku vápenopískových cihel.;
- provést zhodnocení a analýzu výsledků;
- porovnat výsledky vlastního experimentu s výsledky dřívějších studií.

3 Normy pro zkoušení materiálů ultrazvukovou impulzovou metodou

- ČSN 73 1370 Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení
- Tato norma stanovuje všeobecná a společná ustanovení pro jednotlivé metody nedestruktivního zkoušení zkušebních vzorků, stavebních dílců a konstrukcí z obvyčejného hutného betonu, které jsou uvedeny v návazných zkušebních normách.
 - Některé z těchto metod lze použít pro zkoušení lehkého mezerovitého betonu nebo i jiných stavebních materiálů, pokud to zkušební normy pro tyto metody dovolí a pokud jsou stanoveny těsné korelační vztahy mezi ukazatelem nedestruktivního zkoušení a sledovanou vlastností.
 - Definuje zkoušené vlastnosti, zkušební přístroje používané pro nedestruktivní zkoušení betonu a zkušební vzorky.
 - Dále určuje podmínky pro zkoušení a vyhodnocení zkoušek.
- ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu
- Tato norma uvádí postup pro zkoušení a hodnocení vlastností obvyčejného i lehkého hutného betonu na základě stanovení rychlosti šíření impulzu ultrazvukových podélných vln.
 - Jiné druhy betonu a jiné materiály lze zkoušet podle zásad této normy, k hodnocení výsledků zkoušení je nutno stanovit těsné korelační vztahy mezi ukazatelem nedestruktivního zkoušení a sledovanou vlastností. Tato norma navazuje na ČSN 73 1370 a zohledňuje ČSN EN 12504-4.
- ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí

- Podle této normy lze stanovit vlastnosti betonu konstrukce a vlastnosti betonové konstrukce a dílců pomocí nedestruktivního zkoušení.
- Norma stanovuje postup při stanovení rovnoměrnosti betonu a modulu pružnosti betonu pomocí ultrazvukové impulzové metody.
- Dále obsahuje postup při stanovení hloubky trhliny ultrazvukovou impulzovou metodou.
- V příloze norma uvádí zkoušení pevnosti betonu v tlaku za použití kombinace ultrazvukové impulzové metody a Schmidtova tvrdoměru N.

ČSN EN 12504 - 4 Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

- Tato evropská norma uvádí metodu pro stanovení rychlosti šíření impulsu ultrazvukových podélných vln v betonu pro různé aplikace.
- Je zde uvedena podstata zkoušky ultrazvukovou impulzovou metodou, popis zkušebního zařízení, zkušební postup, vyjádření výsledků zkoušky.
- V přílohách jsou uvedeny informace o stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu pomocí nepřímého prozvučování, dále faktory ovlivňující měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

ČSN EN 1330 - 2 Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 2: Společné termíny pro metody nedestruktivního zkoušení

- Definice termínů vztahujících se k metodám nedestruktivního zkoušení.

ČSN EN 1330 - 4 Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 4: Termíny používání při zkoušení ultrazvukem

- Definice termínů vztahujících se k popisu přístrojů a zkoušení.

- ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a
v prefabrikovaných betonových dílcích
- Tato evropská norma uvádí způsoby pro stanovení pevnosti betonu v tlaku v konstrukci a v prefabrikovaných betonových dílcích nepřímými metodami.
 - Norma uvádí vztah pro určení pevností betonu v tlaku v konstrukci z rychlostí šíření ultrazvukového impulzu
- ASTM C 597 – 09 Standard test method for pulse velocity through concrete
(Norma pro zkušební metodu rychlosti šíření
ultrazvukového impulzu v betonu)
- Tato americká norma se týká zkoušení betonu pomocí ultrazvukové impulzové metody.
 - Uvádí údaje o zkušební metodě a jejím a použití, popis měřicího zařízení, zásady provedení zkoušky a vyhodnocení výsledků zkoušky.
- ISO 1920 – 7: 2004 Testing of concrete – Part 7: Non-destructive tests on
hardened concrete
(Zkoušení betonu – Část 7: Nedestruktivní zkoušení
zatvrdlého betonu)
- Tento mezinárodní předpis specifikuje nedestruktivní zkoušky používané pro zatvrdlý beton.
 - Norma zahrnuje zásady pro stanovení ultrazvukové impulzové rychlosti v betonu.

4 Ultrazvuková impulzová metoda

Impulzové dynamické metody tvoří skupinu metod přímého měření rychlosti šíření pružného vlnění v tělese. Jejich výhodou je, že nepotřebují zkušební těleso přesného geometrického tvaru [2].

Ultrazvuková impulzová metoda patří mezi nedestruktivní metody pro zjišťování nejrůznějších vlastností daného materiálu, dílce či konstrukce. Jedná se o tzv. elektroakustické metody, jindy nazývané elektrodynamické nebo dynamické [1].

4.1 Podstata ultrazvukové impulzové metody

Princip ultrazvukové impulzové metody spočívá v tom, že se měří čas, za který projde ultrazvukový impulz ve zkoušeném materiálu z jednoho bodu do druhého. Rychlost šíření ultrazvukového impulzu V ve zkoušeném materiálu se vypočítá dle vztahu uvedeného v ČSN 12504-4 [3]:

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

V rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s];

L délka měřicí základny [mm];

T čas, který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou [μ s].

Rychlost šíření ultrazvukového impulzu v tuhých tělesech závisí na pružných charakteristikách materiálu tělesa a na objemové hmotnosti [2].

Ze změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v materiálu lze určit, zda se ve vnitřní struktuře zkoušeného materiálu vyskytují poruchy či defekty (např. trhliny, kaverny). Takovéto místo porušení je možné pomocí ultrazvuku lokalizovat a u trhlín souvisejících s povrchem určit nejen umístění ale i hloubku, kam až trhlina sahá do vnitřní struktury [4].

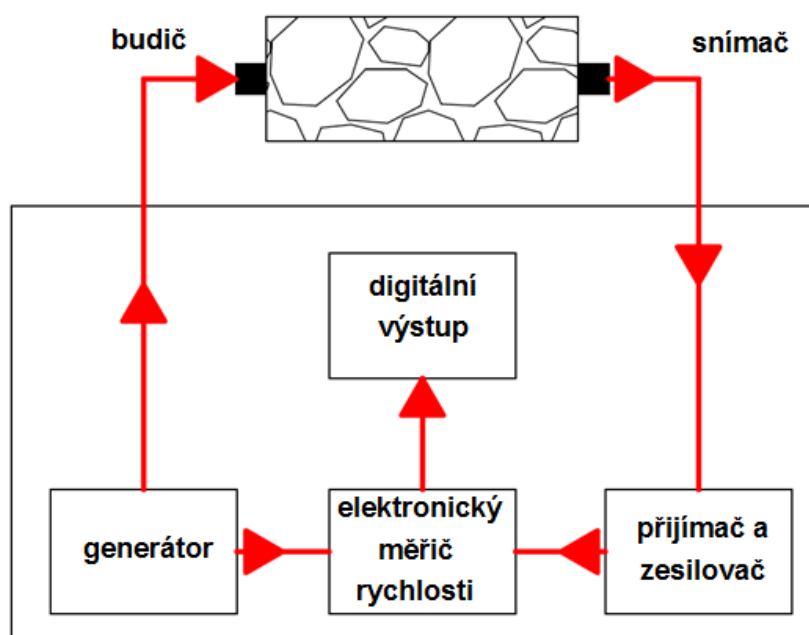
4.2 Ultrazvukové přístroje

Ultrazvuky jsou elektronické přístroje, které jsou schopné vyvodit impulz pro vytvoření mechanického vlnění. Toto vlnění je vysíláno do materiálu a po projití daným vzorkem a zesílení se zaznamenává. Ultrazvukové přístroje se

skládají ze základních částí a to: ze synchronizátoru, z generátoru, ze zesilovače, ze zobrazovacích zařízení a ze dvou sond – z budiče a snímače. Synchronizátor zabezpečuje přesný chod ostatních obvodů a jako zdroj spouštěcích impulsů je nastaven v opakovací frekvenci. Generátor dává budiči, který je ke generátoru přímo napojen, pokyn k vyslání impulsu do zkoušené konstrukce (materiálu) [4].

Zobrazovací zařízení ultrazvukového přístroje mohou být více druhů. Výsledky měření jsou buď znázorněny jako elektrický obraz na obrazovce osciloskopu nebo jako číselné hodnoty na digitálním nebo číslicovém výstupu [5].

Celá aparatura je zobrazena na schématu na obrázku 4.1:



Obr. 4.1: Schématické zobrazení aparatury pro měření ultrazvukem [6]

4.2.1 Budič a snímač

Při ultrazvukové impulzové metodě je prostřednictvím sond vysíláno mechanické vlnění o frekvenci, která se pro stavební materiály pohybuje v rozmezí 20 – 150 kHz. Není vhodné měření při vyšších frekvencích z důvodu výrazného zeslabování signálu při průchodu materiálem.

Obecně platí, že se zvyšujícím se kmitočtem se také zvyšuje přesnost měření a rozlišovací schopnosti. Z tohoto důvodu se doporučuje používat níže uvedené vlastní frekvence sond [1]:

- vlastní frekvence 60 – 200 kHz pro krátké do 50 mm měřící základny;
- vlastní frekvencí 10 – 40 kHz pro dlouhé až 15 m měřící základny;
- nejobvyklejší jsou sondy s vlastní frekvencí 40 – 60 kHz.

V závislosti na přístrojové konstrukci mohou sondy, budič a snímač, pracovat na dvou odlišných principech [5]:

- magnetostrikční – jádro cívky budiče je pomocí kovu elektromagneticky rozkmitáno. Tento budič je vhodný při měření vzorků s dlouhými měřícími základnami a materiálů s velkým útlumem.;
- piezoelektrické – působením elektrického impulzu na vodivé plošky dielektricky polarizovaných krystalů se destičky začnou zkracovat nebo prodlužovat. Toto střídání vyvolá kmitání destičky ve vlastní rezonanční frekvenci. Pro snímač toto platí právě naopak – deformace destičky vyvolá elektrické napětí.

4.2.2 Akustické vazby

Při zkoušení materiálu ultrazvukem je důležitý výběr akustického navázání sond se zkoušeným materiálem. Mezera, která vznikne pod sondou, se vyplňuje různým druhem prostředí. Toto prostředí může být buď kapalné, nebo tuhé. Na poměru tloušťky vazební vrstvy a vlnové délce jsou závislé přenosové vlastnosti sondy, tedy její citlivost a frekvenční pásmo. Dle relativní tloušťky vazební vrstvy, která je daná poměrem tloušťky vazební vrstvy a délky vlny, můžeme rozdělit vazby do třech kategorií: vazba kontaktní, vazba mezerová a vazba imerzní. U některých speciálních sond je možné měřit bez přímého kontaktu s materiálem. V tomto případě hovoříme o tzv. bezkontaktních sondách [4].

Pokud je povrch materiálu nerovný a drsný, je potřeba upravit tento povrch tak, aby hodnoty nerovností byly menší než 0,2 mm [7].

Vazba kontaktní

U tohoto druhu vazby je typická tloušťka vazebné vrstvy, která je o hodně menší než vlnová délka. Při tomto měření je sonda v těsném kontaktu s povrchem zkušebního tělesa. Vazebné prostředí vyplňuje pouze nerovnosti povrchu materiálu. Akustickou vazbu můžeme v praxi považovat za kontaktní, pokud její relativní tloušťka je menší nebo rovna 0,1. Kontaktní vazba se používá výhradně při ručním měření, kde sonda není upevněna v držáku a nevymezuje mezeru s relativní tloušťkou větší než 0,1.

Jako vazebné prostředí pro nenasákavé materiály se nejčastěji používá určitý druh kapaliny, například olej, glycerín, petrolej, vazelíny nebo pasty. Další možností, jak navázat sondu, je tzv. suchá sonda. Zde se jako prostředí používají určité druhy fólií z pryže, plastu či tvárného kovu. Pro použití suché vazby je důležité zajistit silnější přitlak na daný zkoušený materiál než jak je tomu u vazby kapalné. Suchá vazba se výrazně osvědčila při měření na ultrazvukových frekvencích nižších než 1MHz [4]. Tento typ vazby se používá nejčastěji při zkoušení stavebních materiálů a výrobků.

Vazba mezerová

Vazba mezerová se vyznačuje tím, že mezi sondou a povrchem materiálu je mezera, která je svojí tloušťkou srovnatelná s délkou vlny. Velikost tloušťky se pohybuje od desetin milimetru až po cca dva milimetry. Sonda bývá upevněna v držáku, který má v sobě zabudované vtoky pro vazebnou kapalinu a také odvzdušňovací otvory [4].

Vazba s předsádkou – imerzní

Pro tuto akustickou vazbu je charakteristická tlustá mezera mezi sondou a zkoušeným materiálem. Tloušťka mnohonásobně převyšuje délku vlny. Imerzní vazbu je vhodné použít pro měření materiálů s tvarovaným, nerovným povrchem. Vazební prostředí je nejčastěji tvořeno kapalinou (nazývanou imerzní vazba) nebo tuhým materiálem (označovanou jako vazba s předsádkou) [4].

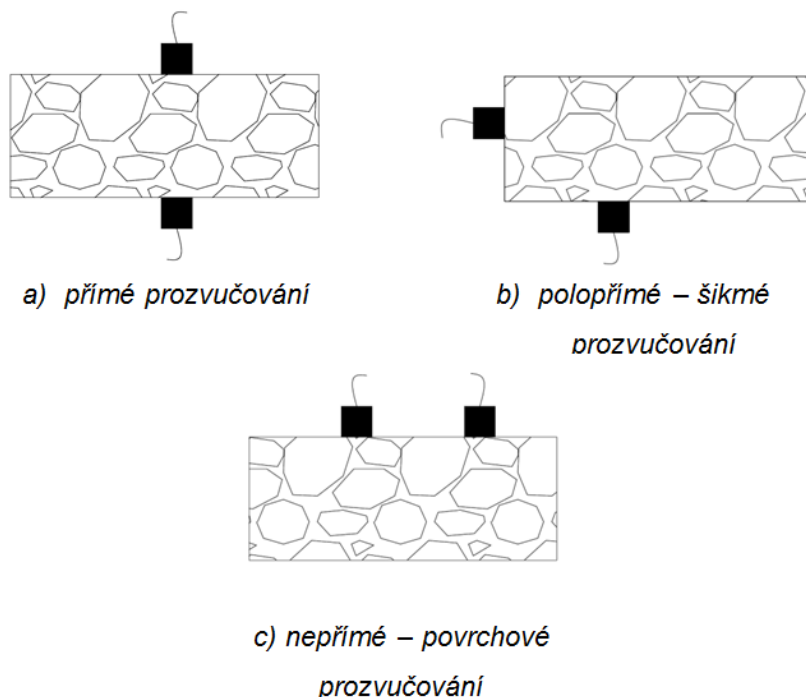
Vazba na horké povrchy

Tato akustická vazba je volena dle teplot a běžně se při zkoušení stavebních materiálů a výrobků nevyužívá [4].

4.3 Uspořádání sond (budiče a snímače)

Podle způsobu přiložení sond na povrch konstrukce vyšetřovaného materiálu jsou možné tři způsoby prozvučování, které jsou znázorněny na obrázku 4.2 a) až c):

- přímé prozvučování (obrázek 4.2 a)) – sondy jsou umístěny v protilehlé pozici;
- polopřímé prozvučování (obrázek 4.2 b)) – sondy jsou přiloženy na dvou přilehlých stranách vzorku nebo jsou naproti sobě, ale ne ve stejné rovině;
- nepřímé prozvučování (obrázek 4.2 c)) – sondy jsou umístěné na stejné straně vzorku. Nepřímé prozvučování se používá pouze v případech, kdy nelze aplikovat polopřímé nebo přímé prozvučování, například při detailní kontrole kvality povrchu daného materiálu. Nepřímé prozvučování se totiž vyznačuje velkou citlivostí na vnější vlivy [1].



Obr. 4.2: Způsoby prozvučování dle přiložení sond na povrch materiálu [8]

5 Faktory ovlivňující výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Výsledky a průběh měření ultrazvukovou impulzovou metodou závisí nejen na vlastnostech zkoušeného materiálu, ale také na různých faktorech, které je třeba při vyhodnocování výsledků a fyzikálních vlastností daného materiálu zohlednit.

5.1 Šíření vlnění ve hmotě

Šíření vln napětí ve hmotě se řídí podle obecně platných zákonitostí, které platí pro každé vlnění. Teoretické zákonitosti jsou odvozeny pro ideální případ, tedy pro homogenní dokonale pružné prostředí. V takovémto prostředí lze pozorovat, že vyslané opakující se impulzy vytvoří částicové kmitání o malých amplitudách. Kmitající částice poté vytvoří prostorové vlnění, které se šíří dále ideální hmotou. Zde je možné pozorovat hned několik druhů vlnění v závislosti na směru vlnění a rozměrech materiálu. Jsou to například: příčná, podélná, povrchová (Rayleighovo), ohybová a kroutící torzní vlnění.

Ve skutečnosti nejsou hmoty dokonale homogenní, ani pružné, ale v některých případech jsou až heterogenní, což značně působí na rychlost, tvar a vývoj vlnění.

Kromě pružných vlastností materiálu se na změně rychlosti šíření vlnění a na deformaci vlnění podílí tyto další vlivy:

- rozhraní dvou prostředí;
- otvory;
- tuhé překážky;
- zrnitost hmoty, tedy její struktura.

Rozmezí dvou prostředí může způsobit lom vlnění, pokud vlnění dopadá šikmo na rozhraní, nebo odraz vlnění, jestliže dopadne na rozmezí dvou prostředí s různým modulem pružnosti.

Vývoj vlnění za otvorem závisí především na velikosti otvoru d v poměru s vlnovou délkou. Pokud je velikost otvoru menší než vlnová délka, vlnění je za otvorem šířeno pomocí kulových ploch. V případě, kde je otvor značně větší než vlnová délka, se změna vlnění pouze nepatrně projeví.

Přítomnost překážky se projeví akustickým stínem vzniklým za překážkou a dle velikosti překážky můžeme předpovídat další vývoj vlnění. Odraz vlnění nastane, pokud vlnění narazí na překážku, jejíž velikost h je v poměru k vlnové délce λ mnohonásobně větší než 1. Čím se poměr přibližuje k jedničce, tím více se začínají vlny ohýbat. Když se poměr změní na $h/\lambda \leq 1$, pak nastane úplné ohnutí vln [9].

5.2 Faktory ovlivňující měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou mohou být ovlivněny řadou faktorů, konkrétně souvisejících s:

- materiálovými charakteristikami – složky a složení materiálu, hutnost materiálu;
- vlhkostním stavem – podrobněji viz kapitola 6.1;
- mikrostrukturou – dutiny, póry, kaverny;
- defekty a degradací materiálu – mikrotrhliny a trhliny;
- tvarem a rozměrem vzorku;
- podmínkami měření – zatížení zkušebních vzorků (velikost vnitřního napětí – podrobněji viz kapitola 6.2), akustická vazba, drsnost povrchu, teplota materiálu.

a) Složení materiálu

Rychlost šíření ultrazvukového impulzu není dána procentuálním zastoupením složek a jejich jednotlivých rychlostí, ale velice složitě vytvořeným finálním vlněním. Rychlost v daném materiálu závisí na všech obsažených složkách, například u betonu je to: typ horniny, ze které je tvořeno kamenivo, množství kameniva, frakce kameniva, množství a druh pojiva, obsah vody a obsah vzduchu [9]. Některé vybrané materiály uvádí následující tabulka 5.1.

Tab. 5.1: Rychlost šíření ultrazvukového impulzu ve vybraných materiálech [9]
[10]

Materiál	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Rychlost šíření ultrazvukového impulzu [m/s]
vzduch	1,205	330
beton	2300	3000 – 4500
křemenec	2620	5600 – 6100
zemina	1400 – 2150	200 – 2000
voda (20° C)	1000	1500
sádra	2260	4790

b) Druh mateční horniny

Větší rychlosti šíření ultrazvukového impulzu dosahují hutnější horniny nejčastěji vyvřelé, magmatické, nebo přeměněné. U usazených hornin je rychlost menší, což je způsobeno nižší hutností materiálu [9]. V tabulce 5.2 jsou uvedeny hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu pro vybrané horniny.

Tab. 5.2: Rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v různých druzích hornin [9]

Název horniny	Rychlost impulzu [m/s]
diabas	4900
mramor	4500
čedič	4400
žula	4300
droba	3700
opuka	3500
vápenec	3400
pískovec	3300

Rychlost šíření ultrazvukového impulzu je ovlivňována jednak typem mateční horniny a jedna druhem a podílem mateční horniny v kompozitu. Pro betony jsou v odborné literatuře uvedeny tyto poznatky - u betonů s vyšším modulem pružnosti kameniva než má pojivová složka, je rychlost šíření ultrazvukového impulzu ovlivněna takto:

- větší frakce kameniva rychlost značně zvyšují;
- rychlost se zvyšuje také při větším množství hrubého kameniva;
- zvýšením množství jemného kameniva se rychlost naopak snižuje.

Obecně platí, že zvětšením obsahu kameniva se dynamické moduly pružnosti v tlaku – tahu E zvyšují a tím i průběh impulsu se zrychluje [9].

c) Množství, druh a čistota vápna

Je zřejmé, že za použití většího množství pojivové složky a k němu odpovídajícího množství vody se hutnost materiálu značně zvýší a tím i rychlost šíření ultrazvukového impulsu [9].

Pro výrobu vápenopískový cihel se nejčastěji používá měkce pálené vápno, které se vyznačuje vyšší reaktivitou s vodou a větším měrným povrchem než vápno tvrdě pálené [18]. Což značí, že při použití měkce páleného vápna a k tomu odpovídajícího množství vody dosáhneme větší hutnosti materiálu a tím i vyšší rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při zkoušení materiálu.

Čistota je dalším velice důležitým faktorem. Pokud vzdušné vápno obsahuje i malé množství přepalu, pak při reakci s vodou nejdříve reaguje čisté vápno a potom zmíněný přepal. Opožděná reakce má za následek vznik nejrůznějších destrukcí, trhlin a tedy narušení vnitřní struktury. Veškeré vnitřní nehomogenity posléze zpomalují rychlost šíření ultrazvukového impulsu.

d) Množství vody

Množství přidané vody se výrazně projevuje na hutnosti daného materiálu a tedy i na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Stejně jako u betonu i zde platí že, pokud vápenopísková směs obsahuje více přidané vody než je potřeba, pak se tato přebytková voda při tvrdnutí a vysychání snaží dostat vlivem difuze ven z materiálu. Přitom voda vytváří velké množství kapilár a mikrotrhlinek, které mají posléze negativní dopad na rychlost průchodu ultrazvukového impulsu.

Se zvětšením množství vody v receptuře se také snižuje dynamický modul pružnosti v tlaku – tahu E a dynamický modul pružnosti ve smyku G , což způsobuje i snížené hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [9].

Při nedostatku vody se nestačí veškeré vápno zhasit a při pozdějším zhašení vytváří destrukce, které zpomalují rychlost šíření ultrazvukového impulsu.

e) Hutnost materiálu [9]

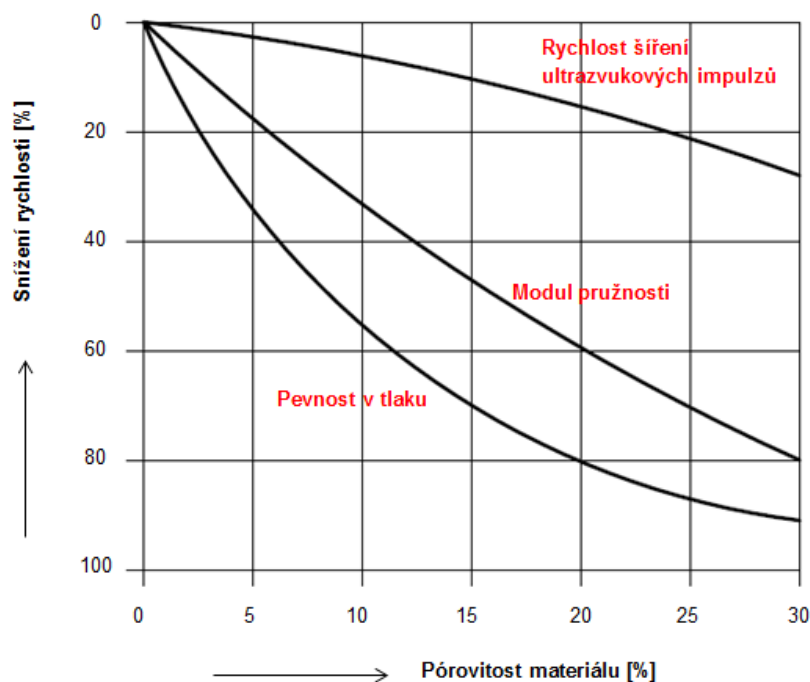
Nejzásadnějším činitelem ovlivňující rychlost šíření ultrazvukového impulzu je hutnost materiálu. Hutnost, respektive pórovitost nebo mezerovitost materiálu, má však také vliv na frekvenci a amplitudu vlnění a v neposlední řadě na modul pružnosti materiálu, což ukazuje následující vztah:

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

(2)

- v_L rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s];
 ρ objemová hmotnost [kg/m³];
 E dynamický modul pružnosti v tlaku – tahu [GPa];
 k koeficient rozměrnosti prostředí [-].

Při zvýšené pórovitosti, tedy větším množství vzduchových dutin ve hmotě, se nejen snižuje modul pružnosti, ale také se tlumí a brzdí šíření ultrazvukového impulzu, což je zřejmé z grafu na obrázku 5.1, který je uveden pro betony v literatuře [9].



Obr. 5.1: Vlivu pórovitosti na rychlost šíření ultrazvukového impulzu, na dynamický modul pružnosti a na pevnost v tlaku [9]

f) Trhliny, póry, dutiny a kaverny [3]

Ve struktuře materiálu se mohou vyskytovat vzduchové prostory, ve kterých je energie prozvučení prakticky zanedbatelná. Jakýkoliv vzduchový prostor nebo vzduchová mezera v trhlíně nacházející se mezi budičem a snímačem vytváří akustickou překážku. A v takovém případě se impulz bude snažit překážku obejít a tím se prodlouží doba průchodu impulzu, což ve svém důsledku vede ke snížení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu.

Lze využít tohoto jevu, v závislosti na délce mezi sondami, k identifikaci míst s vyskytujícími se trhlinami či vzduchovými dutinami, které jsou větší než 100 mm v průměru nebo hloubce. Malé poruchy, které nemají vliv na funkčnost konstrukce, ovlivňují měření v malé míře nebo vůbec.

Jestliže je dutina zaplněna například tekutinou nebo pevnými částicemi, pak nelze tuto trhlinu lokalizovat průchodovou metodou. Pro toto měření se hodí spíše metoda útlumu vlny.

g) Degradace

Pokud se provádí zkoušení na vzorku poškozeného materiálu, který byl například vystaven mrazu, žáru nebo chemickému působení, pak v důsledku porušení vnitřní struktury mikrotrhlinkami či trhlinkami dochází k poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulzu ve srovnání s hodnotami rychlosti v neporušeném materiálu [11]. Postupy pro hodnocení degradace materiálu jsou kodifikovány v normách nejen pro beton, ale například i pro stavební kámen.

h) Tvar a rozměr zkušebních těles [8]

Velikost vzorku a tvar ve většině případů nemá vliv na rychlost šíření ultrazvukového impulzu. Ačkoliv pro nekonečný rozsah rozměru platí:

$$V = k \cdot \sqrt{\frac{E}{D}} \quad (3)$$

- V rychlost šíření ultrazvukového impulzu materiálem [km/s];
 k koeficient rozměrnosti prostředí [-];
 E dynamický modul pružnosti [GPa];
 D objemová hmotnost [kg/m³].

a pro konečný rozměr vzorku platí, že nejmenší příčný rozměr vzorku by měl být větší než je vlnová délka impulzu. Vlnová délka impulzu je vyjádřena nadcházející rovnicí:

$$W = V/f \quad (4)$$

- W vlnová délka [mm];
 V rychlost šíření ultrazvukového impulzu [m/s];
 f frekvence impulzu [kHz].

V normě ČSN EN 12504-4 se uvádí, že rychlost šíření krátkého ultrazvukového impulzu je nezávislá na velikosti a tvaru těles v takovém případě, pokud jejich boční rozměr není menší než určitá minimální hodnota – viz tabulka 5.3.

Tab. 5.3: Nejmenší přípustné rozměry tělesa dle kmitočtu a rychlosti šíření ultrazvukového impulzu [3]

Kmitočet budiče [kHz]	Rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s]		
	$V = 3,50$	$V = 4,00$	$V = 4,50$
	Nejmenší přípustný boční rozměr tělesa [mm]		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Pokud je ovšem boční rozměr menší než daná minimální velikost, pak se rychlost šíření ultrazvukového impulzu může snížit. Rozsah tohoto snížení rychlosti především závisí na poměru vlnové délky impulzu a nejmenší boční vzdálenosti tělesa. Zpomalení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu je nepatrné při poměru menším než jedna [3].

Co se týče měřicí základny, na které je měření prováděno, musí být dostatečně dlouhá, aby nestejnorodý materiál neovlivňoval výsledky měření. Doporučená nejmenší základna, se jmenovitým maximálním zrnem kameniva 20 mm, je rovna 100 mm a 150 mm pro materiál s maximálním zrnem kameniva mezi 20 – 40 mm. V praxi menší měřicí základny vykazují mírně vyšší rychlost šíření ultrazvukového impulsu než základny delší. V podstatě však měřicí základna razantně měření neovlivňuje. Na tento vliv je třeba brát ohled při prozvučování na velké měřicí základně [3].

i) Akustická vazba [8]

Nevhodná akustická vazba může způsobit velké chyby měření, proto je velice důležité zvolit správné navázání kontaktu s materiálem. Při výběru se musíme zaměřit na typ materiálu a za jakých podmínek probíhá měření. Druhy jednotlivých vazeb byly sepsány v kapitole 4.2.2.

j) Drsnost povrchu [11]

Jestliže má povrch materiálu jakékoliv hrubé nerovnosti, je třeba je před měřením odstranit. Jakékoliv výstupky mohou zapříčinit vyšší dávku vazebného prostředku, který sníží rychlost průchodu ultrazvukového impulsu.

Nerovný povrch je třeba zbrousit a zajistit tak dokonalou přilnavost sondy k povrchu prostřednictvím vazby.

k) Teplota materiálu

Vliv teploty materiálu na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou je popsán pro betony v [8]. Při teplotách zkušebního tělesa mezi 5 – 30 °C se podstatně nemění vlastnosti daného materiálu, tedy pevnosti a pružné vlastnosti. Pokud je teplota materiálu mimo tento rozsah, mohou se tyto vlastnosti měnit a zároveň ovlivnit rychlost šíření ultrazvukového impulsu při měření.

Na základě výzkumu byly zpracovány korekce pro měření ultrazvukem při teplotách mimo uvedený rozsah (5 – 30 °C). Korekční hodnoty pro obvyčejné betony jsou uvedeny tabulce 5.4.

Tab. 5.4: Procentuální korekce pro měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých teplotách zkoušeného materiálu [13]

Teplota [°C]	Korekce [%]	
	Vysušený	Vodou nasycený
60	+5,0	+4,0
40	+2,0	+1,7
20	0,0	0,0
0	-0,5	-1,0
-4 a méně	-1,5	-7,5

6 Vliv vlhkosti a vnitřního napětí na výsledky měření nedestruktivními zkouškami

6.1 Vliv vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Velice významným faktorem, který ovlivňuje výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou je vlhkost materiálu. Vlhkost má vliv na rychlost šíření ultrazvukového impulsu dvěma účinky, chemickým a mechanickým [3]. Množství vody při výrobě vápenopískových cihel je velice důležité a musí být upraveno tak, aby veškeré vzdušné vápno bylo zhašeno. Pokud je vody nedostatek, ve struktuře zůstane určité množství CaO. Toto množství později ve styku s vodou (respektive vzdušnou vlhkostí) opožděně reaguje a dodatečně se hasí, čímž může způsobit vznik trhlin a další destrukce ve struktuře. Při měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu se tyto nehomogenity vnitřní struktury projeví, zpomalením rychlosti.

Mechanická vlhkost, tj. voda v pórech, dutinách a kapilárách, zaplňuje volná místa ve struktuře materiálu a ovlivňuje tak výsledky měření, poněvadž póry nezaplňené vodou obsahují vzduch a rychlost šíření ultrazvukového impulsu ve vzduchu je cca 4,5 krát nižší než ve vodě [9].

Většina odborných prací zabývajících se především vlivem vlhkosti na rychlost šíření ultrazvukového impulsu v betonu. Tyto poznatky se v obecné poloze dají uplatnit i pro jiné materiály podobné svojí strukturou výrobkům betonovým, jako jsou v našem případě vápenopískové cihly.

Například v literatuře [9] se uvádí, že na rychlost ultrazvukového impulsu má mechanická vlhkost stejný vliv jako větší hmotnost materiálu, tudíž hutnost. Pavlík uvádí vztahy (5) a (6) vyjadřující změnu rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v závislosti na změně hutnosti a vlhkosti daného materiálu:

$$\Delta v_L = 12000 \cdot \Delta \rho_b \quad (5)$$

Δv_L změna rychlosti ultrazvukového impulsu [m/s];

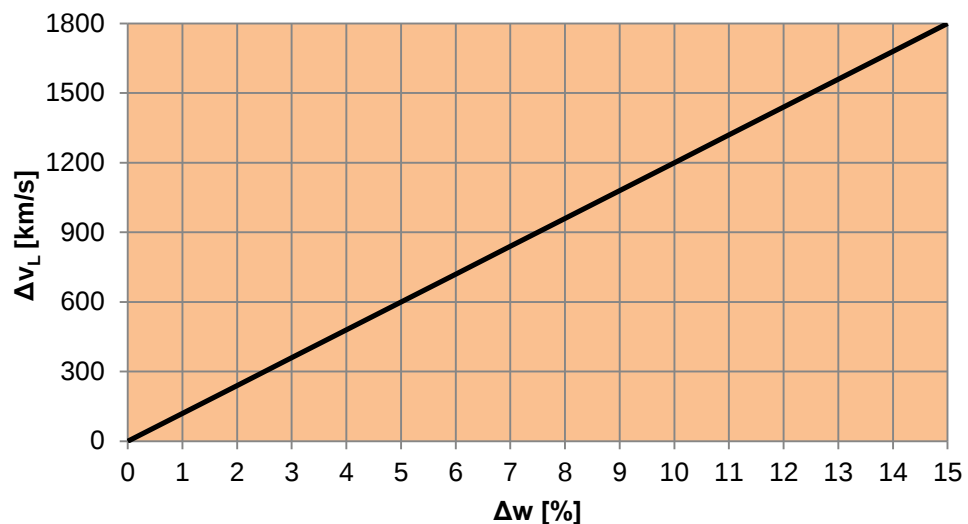
$\Delta \rho_b$ změna hutnosti materiálu [kg/m³];

$$\Delta v_L = 120 \cdot \Delta w_b$$

(6)

Δw_b změna vlhkosti materiálu [%].

To znamená, že při změně hmotnostní vlhkosti o 1 % se zvyšuje rychlost šíření ultrazvukového impulzu o 120 m/s. Pro vlhkost v rozsahu 0 až 15 % je změna rychlosti ultrazvukového impulzu na vlhkosti znázorněna na obrázku 6.1.



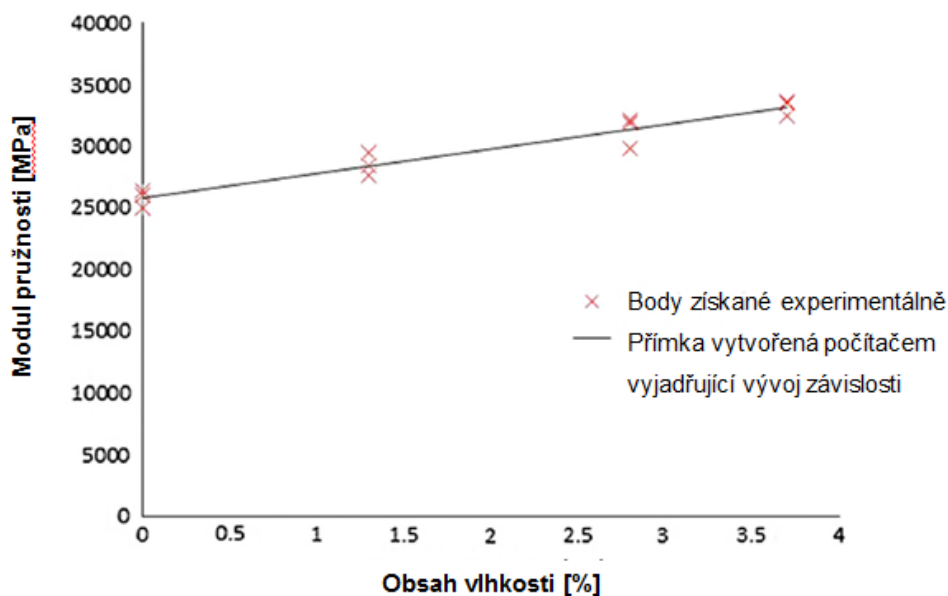
Obr. 6.1: Vliv vlhkosti na rychlost šíření ultrazvukového impulzu v materiálu [9]

V literatuře [12] se uvádí, že vlhkost ovlivňuje měření ultrazvukovou impulzovou metodou přímo a nepřímo:

- přímý vliv - Vlhkost je schopna zvyšovat rychlost šíření ultrazvukového impulzu zaplněním vnitřních pórů vodou a tedy záměnou vzduchu s nízkou rychlostí šíření ultrazvukového impulzu na vodu s vyšší rychlostí.;
- nepřímým vliv – Pomocí vlhkosti dochází ke zlepšení některých elastických vlastností materiálu, jako je například modul pružnosti, a tím nepřímo ke zrychlení šíření ultrazvukového impulzu.

Ovšem záleží i na způsobu dosažení maximálního stupně nasycení. Jestliže je povrch pórů postupně pokryt vrstvou kapaliny, kde tloušťka filmu odpovídá stupni nasycení pórů, pak dle dřívějšího měření nebyly pozorovány žádné změny při postupném sycení, nýbrž až po absolutním nasycení. Oproti

tomu, pokud dochází ke zvyšování počtu pórů zcela zaplněných vodou, potom modul pružnosti vykazuje pravidelný růst, viz obrázek 6.2.

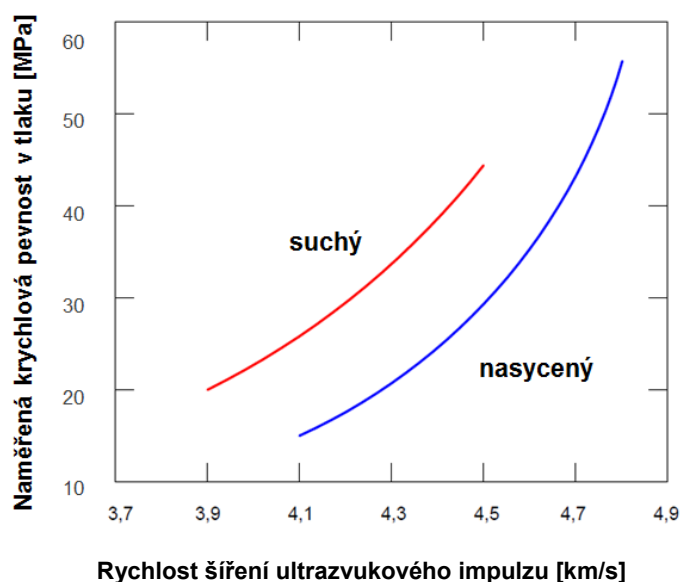


Obr. 6.2: Závislost mezi modulem pružnosti a obsahem vlhkosti [19]

V tomto případě při nárůstu vlhkosti o 1 % se zvýší v průměru modul pružnosti o téměř 2 GPa [19].

6.1.1 Vliv vlhkosti na pevnosti odvozené z ultrazvukového měření

Z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v betonu lze odvodit i pevnost v tlaku za pomoci příslušných kalibračních vztahů. Vlhkost betonu tedy ve svém důsledku ovlivňuje nejen rychlost šíření ultrazvukového impulzu, ale i vypočítanou pevnost v tlaku. To například znamená, že dva vzorky vytvořené z materiálu stejného složení v závislosti na jejich vlhkosti mohou při stejné hodnotě rychlosti šíření ultrazvukového impulzu vykazovat různé pevnosti v tlaku – viz obrázek 6.3 z literatury [14].



Obr. 6.3: Vliv vlhkosti při stanovení pevnosti v tlaku ultrazvukovou impulzovou metodou [14]

Z grafu na obrázku 6.3 je patrné, že pro určení správné pevnosti je třeba hodnotu korigovat. Tomsett [14] zpracoval postup pro korekci naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu s cílem určit co nejpřesnější výsledné pevnosti. Tato metoda, tzv. metoda vysoušecí přímky (Desiccation line method), je určena pro měření v terénu, tedy in situ a je založena na stejném sklonu přímek vyjadřujících závislost krychelné pevnosti na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu ve vzorku in situ a ve standardním vzorku. Metodu lze využít pro získání poměru pevnost v tlaku / rychlosti šíření ultrazvukového impulsu u jakýchkoliv vzorků s různými podmínkami pro zrání. Následující rovnice (7) ukazuje tento vztah:

$$\ln \frac{f_1}{f_2} = k \cdot f_1 \cdot (V_1 - V_2)$$

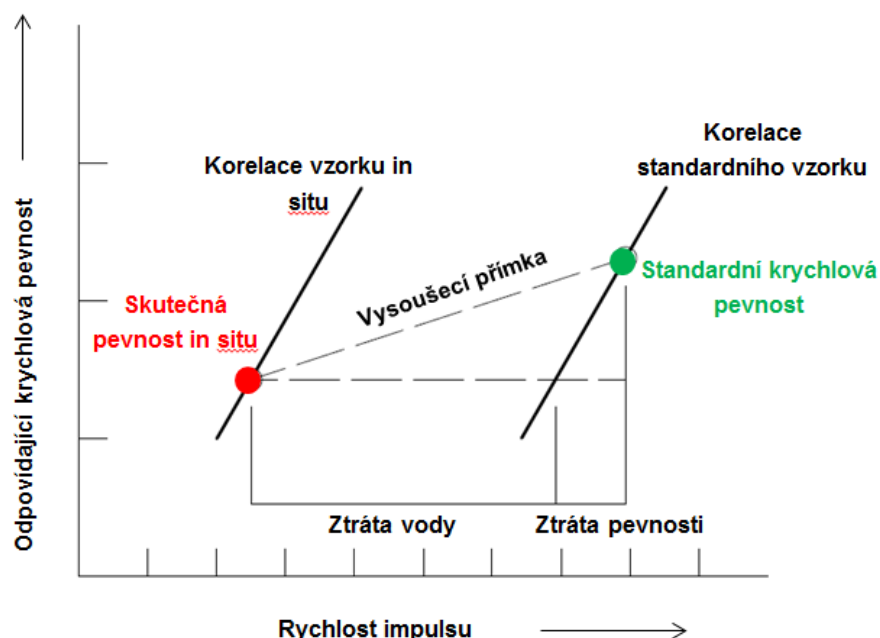
(7)

- f_1 standardní krychelná pevnost [MPa];
- f_2 skutečná krychelná pevnost v in situ [MPa];
- V_1 rychlost šíření ultrazvukového impulsu naměřená na standardním vzorku [km/s];

V_2 rychlost šíření ultrazvukového impulsu naměřená na in situ vzorku [km/s];

k konstanta zhutnění (pro dobře zhutněné betony 0,015; pro špatně zhutněné betony 0,025) [-].

Graficky je metoda zpracována na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Znázornění metody vysoušecí přímky (Desiccation line method) [14]

6.2 Vliv vnitřních napětí na výsledky měření nedestruktivními metodami

Vliv zatížení materiálu tzn. vnitřního napětí, zabudovaného v konstrukci může ovlivňovat výsledky měření nedestruktivními metodami. Tato skutečnost je zohledňována především pro měření odrazovým tvrdoměrem na betonu, kdy při zpracování kalibračních vztahů nebo zkoušení betonových zkušebních těles pro jejich upřesnění jsou zkušební vzorky zatěžovány určitou silou. Míra zatížení je uvedena v řadě norem pro zkoušení odrazovými tvrdoměry, např. ČSN 73 1373, BS 1881-202, NBR NM 78, v předpisu RILEM NDT 3. Pro měření ultrazvukovou impulzovou metodou tento požadavek není kodifikován v technických normách, ale poznatky o vlivu vnitřního napětí na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při zkoušení betonu jsou uvedeny v řadě odborných publikací.

6.2.1 Vliv napětí na měření ultrazvukovou impulzovou metodou

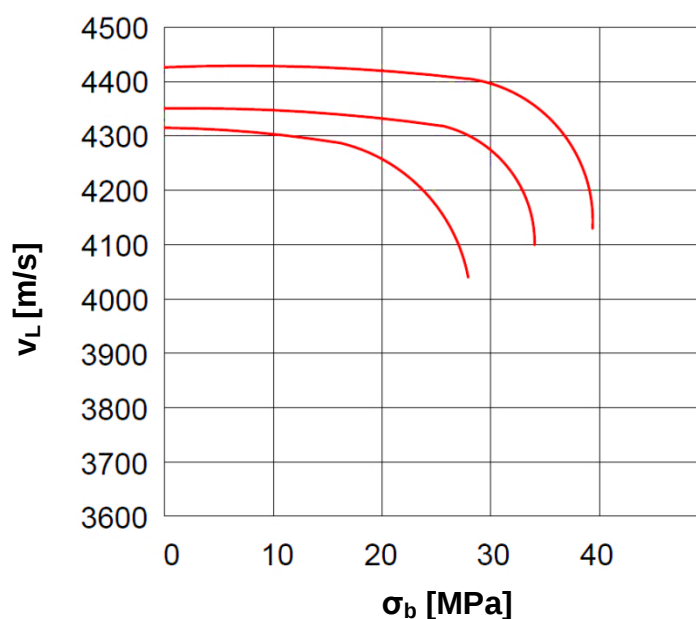
Pokud napětí v materiálu nezpůsobuje strukturální změny, ale jsou v přítomnosti pouze mikrotrhlíky, vytvořené již při výrobě nebo způsobené jinými faktory, pak takové zatížení neovlivňuje rychlost šíření ultrazvukového impulzu v měřitelném rozsahu. To znamená, že při působení běžného nedestruktivního zatížení, které způsobuje jen nepatrné deformace, ale nemění hutnost materiálu, se rychlost šíření ultrazvukového impulzu ve zkoušeném vzorku prakticky nemění nebo ve velmi malé míře [9]. Změna může být tak malá, že ji lze považovat i za chybu měření.

Jakmile zatížení dosáhne takové velikosti, že způsobuje změny ve vnitřní struktuře a vznikají strukturální mikrotrhlíky, pak se rychlost šíření ultrazvukového impulzu začíná snižovat. Pokles rychlosti nastane pouze v takovém případě, jestliže je průchod ultrazvukového impulzu kolmý na směr budoucího rozvoje mikrotrhlíky [9].

V literatuře [2] jsou uvedeny poznatky ze sledování vlivu zvětšování tlakového nebo tahového napětí na betonových vzorcích různého tvaru na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou. Bylo zde zjištěno, že ke snížení rychlosti dochází se vznikem prvních strukturálních mikrotrhlín. Tyto poměry jsou ale velice odlišné pro různé druhy materiálu. Dále jsou výsledky měření ovlivněny rychlostí zatěžování a také různým uspořádáním zkoušky, tím se rozumí měření ultrazvukem ve směru působícího tlaku nebo kolmo na něj.

Martinček [2] také uvádí že, někdy se může při zvyšování tlakového napětí rychlost šíření ultrazvukového impulzu zpočátku mírně zvětšovat. Tato skutečnost se vysvětluje existencí mikrotrhlín již před zkouškou, jejichž vliv na rychlost šíření ultrazvukového impulzu se zvyšováním napětí eliminuje. Mírné počáteční zvyšování rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při působení tlakového napětí se zejména velice zřetelně projevuje u některých druhů kameniva a tento jev se dříve využíval pro kvalitativní stanovení rozdělení tlaků okolo otvoru.

Na základě výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou Pavlík [9] zpracoval závislost mezi velikostí působícího napětí a rychlostí šíření ultrazvukového impulzu v betonových vzorcích (hranolech), která je zobrazena na obrázku 6.5.

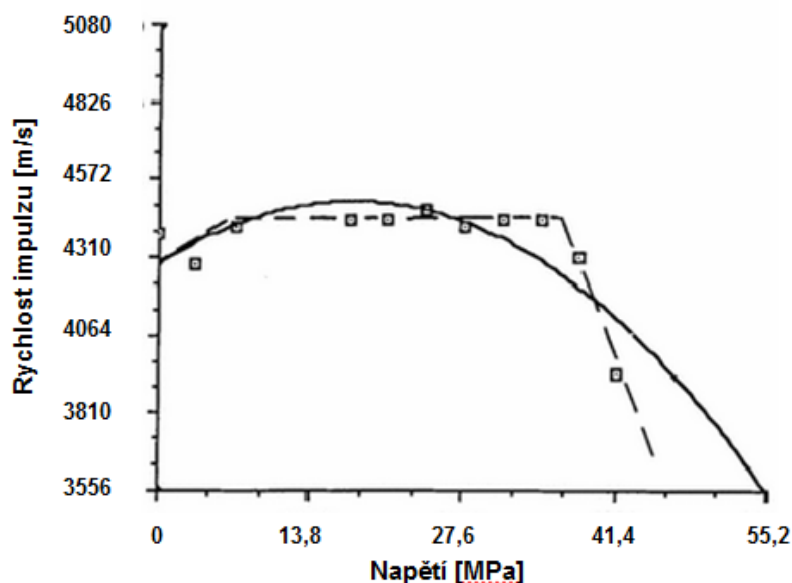


Obr. 6.5: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při postupném osovém zatěžování hranolů [9]

Závislost zpracovaná Pavlíkem (viz obr. 6.5) potvrzuje teorii Martinčeka, že při počátečním zatěžování zkušebních vzorků se změna rychlosti téměř neprojevuje nebo jen nepatrně. Avšak při dalším zvyšování zatížení, které je vyšší než 50 % pevnosti v tlaku zkušebního tělesa, dochází ke značnému snížení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

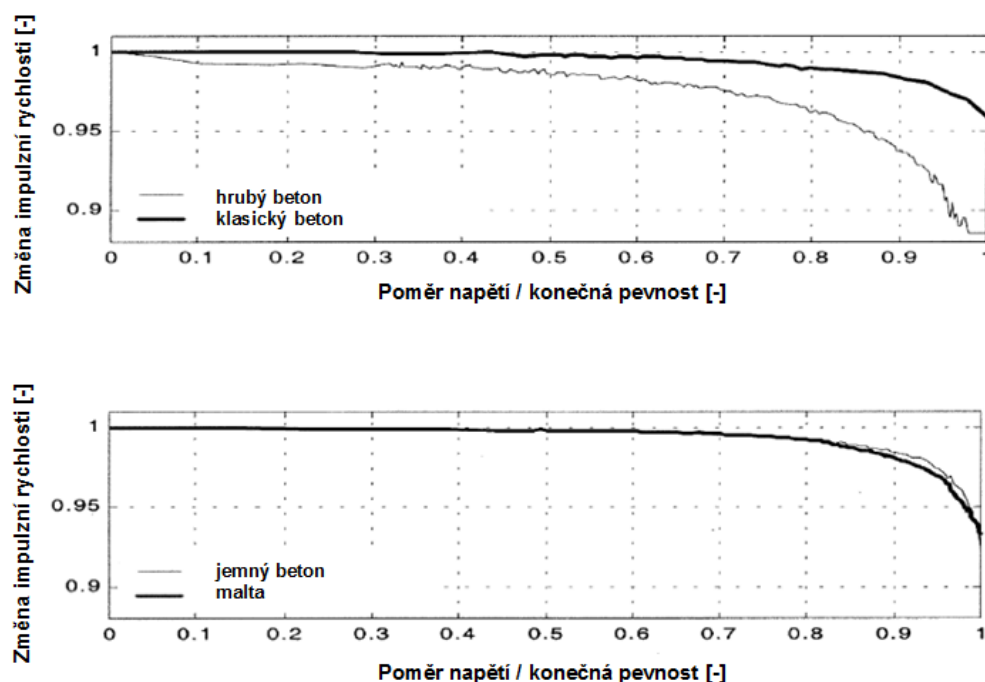
Podle Yengovy teorie [15] v betonu již před zatěžováním existuje určité množství mikrotrhlinek také v místě rozhraní hrubého kameniva a pojivové složky. Tyto trhlinky vznikají během výroby a vysušování v důsledku diferenciálních objemových změn matrice a kameniva. Složení materiálu, poměr kameniva, množství vody a podmínky uložení – to vše určuje četnost trhlin na rozhraní. Oslabení spojení pojivové složky a kameniva bylo prokázáno zkouškou, kde při zatížení tlakem cca 30 % z konečné pevnosti materiálu se začíná zvyšovat nejen šířka a délka trhlinek ve spojení, ale také jejich počet. Přitom výskyt mikrotrhlinek v pojivu je zanedbatelný. To znamená, že při nadměrném zatížení konstrukce dochází k selhání právě v tomto místě spojení, a proto je důležité tuto skutečnost zohlednit při měření ultrazvukovou impulzovou metodou.

Podle Popovicse [15] při vyšším zatížení než 25 % z celkové pevnosti betonu se v důsledku rozvoje mezních trhlin mírně zpomaluje průchod ultrazvukového impulzu. A při zatížení kolem 70 – 90 % z konečné pevnost v tlaku začínají destrukce vnitřní struktury betonu, což se projevuje prudkým snížením rychlosti šíření ultrazvukového impulzu. Průběh změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na hodnotě vnitřního napětí je znázorněn v obrázku 6.6.



Obr. 6.6: Typická tlaková napětí ovlivňující rychlost šíření ultrazvukového impulzu: přerušovaná čára značí spojení mezi experimentálně zjištěnými hodnotami; plná čára – teoretická křivka na základě výpočtu pro přiblížení se skutečnému procesu [15]

Jinou teorii nalézáme také v [15], kde Carnot a Kaspar uvádí poznatky o pružnostních charakteristikách betonu. Podle této teorie dochází ke ztrátě pružnostních vlastností při 75% zatížení z konečné pevnosti. Přičemž napětí při tomto zatížení dosahuje takové hodnoty, kdy materiál přechází z lineární části křivky napětí – deformace do nelineární části. Na vrcholu této křivky se rychlost šíření ultrazvukového impulzu obtížně měří z důvodu velkého snížení amplitudy signálu.



Obr. 6.7: Snížení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v závislosti na hodnotě vnitřního napětí pro jednotlivé druhy betonu [15]

Z grafů na obrázku 6.7 z literatury [15] (Carnot a Kaspar) je zřejmé, že již při 30% zatížení dochází k mírnému poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Výrazný pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu však nastává, až vnitřní napětí dosahuje hodnoty 75 – 90 % z konečné pevnosti v tlaku; při tomto vnitřním napětí dochází ke ztrátě pružnostních vlastností. Tato teorie potvrzuje uvedené poznatky Popovicse [15].

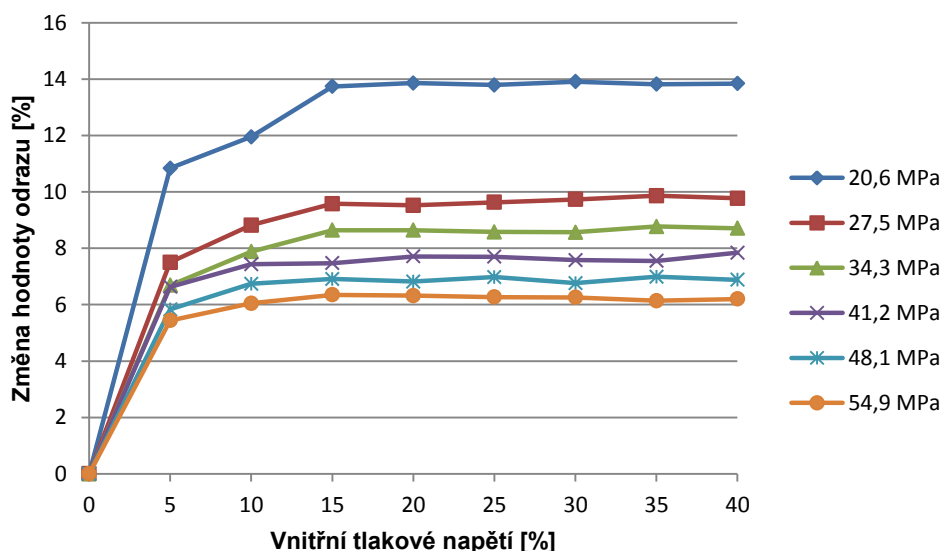
Podle výsledků výzkumu thajského vědeckého týmu [16] při působení vnitřního napětí do 40 % z konečné pevnosti v tlaku jeho vliv na rychlost šíření ultrazvukového impulsu je málo významný.

6.2.2 Vliv napětí na měření odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt

Nedestruktivní metoda odrazového tvrdoměru se využívá pro odhad pevnosti v tlaku vyšetřovaného materiálu, především však betonu [17]. Stejně jako rychlost šíření ultrazvukového impulsu, tak i hodnota odrazu tvrdoměru může být ovlivněna vnitřním napětím materiálu.

Při zkoušení betonu v konstrukcích je uvažován stav, který odpovídá stavu při jejím užívání, tedy jsou uvažovány podstatně nižší hodnoty vnitřního napětí, zpravidla 30 - 50% z mezního zatížení [9].

Dle poznatků uvedených v literatuře [16] vyplývá, že hodnota odrazu se zvyšuje s nárůstem vnitřního napětí v betonu a při 15% zatížení z konečné pevnosti v tlaku není vliv zvyšujícího se napětí ve vzorcích na hodnoty odrazu významný. Pro ilustraci je v obrázku 6.8 uveden vliv vnitřního napětí na hodnotu odrazu betonů o různých pevnostech.



Obr. 6.8: Vliv hodnoty vnitřního napětí na hodnoty odrazu u jednotlivých betonů s různou pevností v tlaku [16]

Proto pro zkoušení betonu v konstrukci i pro zpracování kalibračních vztahů sloužících k určení pevnosti v tlaku ze zkoušení odrazovými tvrdoměry jsou v normativních dokumentech pro obyčejný beton uvedeny požadavky na zkoušenou konstrukci respektive na zatěžování vzorků.

V normě ČSN EN 12504-2 [25] se uvádí, že betonové prvky musí mít tloušťku nejméně 100 mm a musí být spojeny s konstrukcí, zkušební tělesa menších rozměrů musí být při zkoušení pevně podepřena.

Podle ČSN 73 1373 [26] se zkušební krychle zatíží ve zkušebním lise silou, která odpovídá napětí cca 10 % z předpokládané pevnosti v tlaku.

Dle BS 1881-202 [21] se při zkoušení Schmidtovým tvrdoměrem typu N ve zkušebním lisu vyvozuje zatížení od 7 do 10 MPa.

V předpisu RILEM NDT 3 [24] se uvádí, že zkušební vzorky se zatěžují napětím 1 MPa nebo musí být zapřeny velmi tuhou základnou.

Podle dokumentu ACI 228.1R [22] se zkušební válcová tělesa zatěžují silou, která vyvodí napětí 3 MPa. V brazilské normě NBR NM 78 [23] se válcová zkušební tělesa zatěžují silou, která odpovídá 15 % z očekávané síly při porušení.

Z výše uvedeného je zřejmé, že neexistuje jednotný požadavek na hodnotu zatížení (vnitřního napětí) při zpracování kalibračních vztahů resp. upřesňujících součinitelů z nedestruktivních zkoušek odrazovými tvrdoměry a destruktivních zkoušek zkušebních těles. Rozdílné hodnoty vnitřního napětí v betonu konstrukce nebo ve zkušebním vzorku se mohou projevit na hodnotě odrazu.

7 Metodika měření a vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou na vápenopískových cihlách

7.1 Metodika zkoušení

Protože pro nedestruktivní zkoušení ultrazvukovou impulzovou metodu neexistují vlastní technické normy, tak se při jejich měření a vyhodnocení výsledků zkoušek se vycházelo z ustanovení ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1371.

7.1.1 Zkušební vzorky

- Druh cihel: vápenopískové cihly plné o rozměru 290 x 140 x 65 mm.
- Vlhkostní stav vzorků: vysušené, kondicionované na vlhkost 2 a 6 %, nasycené vodou.

7.1.2 Postup měření ultrazvukovou impulzovou metodou

- Zkušební zařízení: ultrazvukový přístroj TICO PROCEQ s přesností 0,1 μ s, se sondami o vlastním pracovním kmitočtu 54 kHz.



Obr. 7.1: Ultrazvukový přístroj TICO PROCEQ [20]

- Vazební prostředek: trvale plastický tmel LUBRIPLATE.
- Způsob prozvučování: přímé prozvučování po délce cihly.
- Měřící body: Doba průchodu ultrazvukového impulzu byla měřena na každé cihle ve třech měřících bodech.
- Měřící základna: Doba průchodu ultrazvukového impulzu byla měřena po délce cihly. Délka měřící základny byla měřena na desetinu milimetru.

- Měření doby průchodu ultrazvukového impulzu: Doba průchodu ultrazvukového impulzu byla měřena ve 3 měřících bodech na nezatížených vzorcích a na vzorcích zatížených silou, která odpovídala 10 %, 20 %, 50 % a 60 % z předpokládané celkové pevnosti v tlaku. Měření bylo prováděno na vysušených cihlách a na cihlách s různým obsahem vody. (Pro stanovení síly odpovídající uvedenému zatížení bylo provedeno před měřením ultrazvukovou impulzovou metodou stanovení pevnosti v tlaku na souboru 5 cihel – výsledky viz tabulka 8.1.) Doba průchodu ultrazvukového impulzu byla měřena na 0,1 μs.

7.1.3 Ostatní zkoušky

- Vlhkost a nasákavost: Byly zjišťovány před měřením ultrazvukovou impulzovou metodou postupy dle ČSN EN 772-10 – Zkušební metody pro zdící prvky – Část 10: Stanovení vlhkosti vápenopískových zdících prvků a pórobetonových tvárníc a ČSN EN 772-21 – Zkušební metody pro zdící prvky – Část 21: Stanovení nasákavosti pálených a vápenopískových zdících prvků ve studené vodě.
- Objemová hmotnost: Byla zjišťována před měřením ultrazvukovou impulzovou metodou; při zjišťování objemové hmotnosti se vycházelo z ustanovení ČSN EN 772-13 – Zkušební metody pro zdící prvky – Část 13: Stanovení objemové hmotnosti materiálu zdících prvků za sucha a objemové hmotnosti zdících prvků za sucha (kromě zdících prvků z přírodního kamene).
- Pevnost v tlaku: Byla zjišťována po měření ultrazvukovou impulzovou metodou postupem dle ČSN EN 772-1+A1 - Zkušební metody pro zdící prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku.

7.2 Vyhodnocení výsledků měření a zkoušek

7.2.1 Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou

- Rychlost šíření ultrazvukového impulzu (ČSN EN 12504-4): byla vypočítána dle vztahu (1)

$$V = \frac{L}{T}$$

(1)

V - rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s];

L - délka měřicí základny [mm];

T - čas, který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou [μs].

Výsledky měření jsou uváděny na nejbližších 0,001 km/s.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu (ČSN 73 1371): byl vypočítán dle vztahu (8)

$$E_{cu} = \rho \cdot V^2 \cdot \frac{1}{k^2}$$

(8)

E_u - Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [GPa];

V - rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s];

ρ - objemová hmotnost vápenopískových cihel [kg/m³];

k - součinitel rozměrnosti prostředí [-].

(Součinitel rozměrnosti prostředí nebyl uvažován, protože nebyla k dispozici konkrétní hodnota Poissonova dynamického čísla.)

Výsledky měření jsou uváděny na nejbližších 0,01 GPa.

7.2.2 Vyhodnocení zkoušek vlhkosti, nasákavosti, objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku

- Vlhkost (ČSN EN 772-10): byla vypočítána dle vztahu (9)

$$w_s = \frac{m_{0,s} - m_{dry,s}}{m_{dry,s}} \cdot 100$$

(9)

w_s - vlhkost vzorku [%];

$m_{0,s}$ - hmotnost vzorku před vysušením [g];

$m_{dry,s}$ - hmotnost vzorku po vysušení [g].

Výsledky měření jsou zaokrouhleny s přesností na 1 %.

- Nasákavost (ČSN EN 772-21): byla vypočítána dle vztahu (10)

$$W_s = \frac{M_s - M_d}{M_d} \cdot 100$$

(10)

W_s – nasákavost vzorku [%];

M_d – hmotnost vzorku po vysušení [g];

M_s – hmotnost vzorku po ukončení nasycování [g].

Výsledky měření jsou uváděny s přesností na 0,1 %.

- Objemová hmotnost (ČSN EN 772-13): byla vypočítána dle vztahu (11)

$$\rho = \frac{m_u}{l_u \cdot w_u \cdot h_u} \quad (11)$$

$\rho_{g,u}$ – objemová hmotnost materiálu zdícího prvku ve vysušeném stavu [kg/m³];

$\rho_{w,u}$ – objemová hmotnost materiálu zdícího prvku při dané vlhkosti [kg/m³];

m_u – hmotnost zdícího prvku [kg];

l_u – délka zdícího prvku [m];

w_u – šířka zdícího prvku [m];

h_u – výška zdícího prvku [m].

Výsledky měření jsou zaokrouhleny na nejbližších 10 kg/m³.

- Pevnost v tlaku (ČSN EN 772-1+A1): byla vypočítána dle vztahu (12)

$$f = \frac{F_{max}}{A} \quad (12)$$

f – pevnost v tlaku [MPa];

F_{max} – maximální zatěžovací síla [N];

A – tlačná plocha [mm].

Hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na nejbližší 0,1MPa.

8 Experimentální část

V kapitole 8.1 jsou v tabulkách uvedeny výsledky měření vápenopískových cihel ultrazvukovou impulzovou metodou při různém zatížení a při různém vlhkostním stavu. Dále jsou zde uvedeny hodnoty objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku.

V kapitole 8.2 jsou uvedeny rozdíly rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu pro různé zatížení vzorků (vnitřní napětí ve vzorcích) a pro různý vlhkostní stav vápenopískových cihel. Postup pro výpočet rozdílů je uveden v kapitole 8.2.1. Jako srovnávací hodnoty byly uvažovány hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu zjištěné na nezatížených vzorcích.

8.1 Výsledky měření

Tab. 8.1: Stanovení pevností v tlaku u souboru cihel pro určení síly odpovídajícího stupně zatížení

Číslo vzorku	m [g]	l_u [mm]	w_u [mm]	h_u [mm]	$F_{\max}$ [kN]	ρ [kg/m ³]	f [MPa]
1	4639	289,6	139,1	64,2	1365	1790	33,9
2	4618	289,2	139,4	64,2	1425	1780	35,3
3	4688	288,7	139,6	64,3	1465	1810	36,4
4	4711	288,9	139,5	64,3	1359	1820	33,7
5	4675	289,2	138,4	63,4	1465	1840	36,6
Ø					1416	1810	35,2

Tab. 8.2: Hodnoty zatěžovací síly pro jednotlivé stupně zatížení

f [%]	10	20	50	60	100
F [kN]	142	283	708	849	1416

Tab. 8.3: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Číslo vzorku	ρ	f	w
	[kg/m ³]	[MPa]	[%]
1	1800	34,4	0
2	1810	37,4	0
3	1790	37,3	0
4	1800	37,4	0
5	1810	37,1	0
6	1800	35,6	0
7	1800	35,6	0
Ø	1800	36,4	0

Tab. 8.4: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
0%									
1	1377	0	0	2,670	2,722	2,700	2,728	2,705	13,17
2	1496	0	0	2,777	2,694	2,712		2,728	13,47
3	1500	0	0	2,578	2,673	2,773		2,675	12,81
4	1498	0	0	2,784	2,728	2,721	2,721	2,738	13,50
5	1488	0	0	2,720	2,700	2,718		2,713	13,32
6	1430	0	0	2,707	2,695	2,712		2,705	13,17
7	1431	0	0	2,882	2,911	2,853	2,879	2,881	14,94
Ø								2,735	13,48
10%									
1	1377	150	10,9	2,694	2,662	2,697		2,685	12,97
2	1496	140	9,4	2,642	2,740	2,642		2,675	12,95
3	1500	140	9,3	2,747	2,776	2,681		2,735	13,39
4	1498	150	10,0	2,718	2,721	2,721		2,720	13,31
5	1488	150	10,1	2,700	2,695	2,715		2,703	13,23
6	1430	150	10,5	2,707	2,690	2,733		2,710	13,22
7	1431	150	10,5	2,908	2,831	2,941	2,823	2,875	14,88
Ø								2,729	13,42

Tab. 8.4: Pokračování

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
20%									
1	1377	300	21,8	2,670	2,631	2,647		2,649	12,63
2	1496	280	18,7	2,618	2,697	2,604		2,640	12,61
3	1500	280	18,7	2,668	2,721	2,646		2,679	12,84
4	1498	300	20,0	2,668	2,685	2,680		2,678	12,91
5	1488	300	20,2	2,665	2,680	2,655		2,667	12,87
6	1430	300	21,0	2,653	2,641	2,682		2,659	12,72
7	1431	300	21,0	2,876	2,809	2,896		2,860	14,73
Ø								2,690	13,04
50%									
1	1377	760	55,2	2,230	2,242	2,259		2,244	9,06
2	1496	700	46,8	2,222	2,239	2,180		2,214	8,87
3	1500	700	46,7	2,265	2,244	2,268		2,259	9,13
4	1498	760	50,7	2,265	2,255	2,236		2,252	9,13
5	1488	760	51,1	2,235	2,251	2,253		2,246	9,13
6	1430	760	53,1	2,230	2,203	2,197		2,210	8,79
7	1431	760	53,1	2,339	2,347	2,390		2,358	10,01
Ø								2,255	9,16
60%									
1	1377	840	61,0	2,197	2,208	2,178		2,194	8,67
2	1496	840	56,1	2,175	2,130	2,226		2,177	8,58
3	1500	840	56,0	2,301	2,281	2,251		2,277	9,28
4	1498	900	60,1	2,150	2,150	2,149	2,135	2,146	8,29
5	1488	900	60,5	2,230	2,242	2,253		2,242	9,10
6	1430	910	63,6	2,195	2,149	2,164	2,180	2,172	8,49
7	1431	910	63,6	2,300	2,285	2,320		2,302	9,54
Ø								2,216	8,85

Tab. 8.5: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Číslo vzorku	ρ [kg/m ³]	f [MPa]	w [%]
8	1790	34,7	2,2
9	1830	34,7	1,9
10	1800	33,7	2,1
11	1790	34,6	1,7
12	1760	35,0	1,9
13	1800	36,9	1,9
14	1810	36,5	1,6
Ø	1800	35,2	2

Tab. 8.6: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
0%									
8	1395	0	0	2,538	2,533	2,518	2,522	2,528	11,44
9	1395	0	0	2,709	2,689	2,691		2,696	13,30
10	1372	0	0	2,564	2,522	2,542		2,543	11,64
11	1389	0	0	2,601	2,580	2,601	2,573	2,589	12,00
12	1412	0	0	2,455	2,453	2,432		2,447	10,54
13	1483	0	0	2,545	2,534	2,543		2,541	11,62
14	1481	0	0	2,731	2,683	2,691	2,711	2,704	13,23
Ø								2,578	11,97
10%									
8	1395	160	11,5	2,558	2,516	2,567		2,547	11,61
9	1395	150	10,8	2,712	2,689	2,632		2,678	13,12
10	1372	140	10,2	2,615	2,630	2,611		2,619	12,34
11	1389	140	10,1	2,719	2,649	2,642		2,670	12,76
12	1412	150	10,6	2,336	2,355	2,373		2,355	9,76
13	1483	150	10,1	2,584	2,579	2,622		2,595	12,12
14	1481	150	10,1	2,696	2,678	2,706		2,693	13,13
Ø								2,594	12,12
20%									
8	1395	280	20,1	2,531	2,490	2,542		2,521	11,38
9	1395	280	20,1	2,659	2,666	2,601		2,642	12,78
10	1372	280	20,4	2,601	2,608	2,587		2,599	12,16
11	1389	280	20,2	2,691	2,620	2,608		2,640	12,47
12	1412	280	19,8	2,307	2,333	2,351		2,330	9,56
13	1483	280	18,9	2,572	2,532	2,570		2,558	11,78
14	1481	280	18,9	2,678	2,647	2,683		2,669	12,90
Ø								2,566	11,86
50%									
8	1395	750	53,8	2,220	2,198	2,182		2,200	8,66
9	1395	750	53,8	2,210	2,223	2,203		2,212	8,95
10	1372	700	51,0	2,205	2,204	2,185		2,198	8,70
11	1389	700	50,4	2,108	2,142	2,148		2,133	8,14
12	1412	700	49,6	2,152	2,135	2,152		2,146	8,11
13	1483	700	47,2	2,140	2,123	2,124		2,129	8,16
14	1481	700	47,3	2,070	1,981	1,984		2,012	7,33
Ø								2,147	8,29

Tab. 8.6: Pokračování

Číslo vzorku	F _{max}	F _{skut}	F _{skut}	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V	E
	[kN]	[kN]	[%]	[km/s]	[km/s]	[km/s]	[km/s]	[km/s]	[GPa]
60%									
8	1395	900	64,5	1,981	1,961	1,961		1,968	6,93
9	1395	900	64,5	1,981	2,012	1,998		1,997	7,30
10	1372	840	61,2	2,067	2,095	2,106		2,089	7,86
11	1389	880	63,4	2,005	2,002	1,961		1,990	7,09
12	1412	800	56,7	2,012	2,015	2,008		2,011	7,12
13	1483	850	57,3	2,156	2,072	2,064		2,097	7,92
14	1481	850	57,4	2,019	2,056	2,041		2,038	7,52
Ø								2,027	7,39

Tab. 8.7: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vápenopískové cihly s vlhkostí w = 6 %

Číslo vzorku	ρ [kg/m ³]	f [MPa]	w [%]
15	1870	33,6	6,3
16	1870	34,4	6,2
17	1880	36,3	5,3
18	1860	35,3	6,0
19	1860	36,8	6,3
20	1850	36,0	6,1
21	1880	35,6	5,2
Ø	1870	35,4	6

Tab. 8.8: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vápenopískové cihly s vlhkostí w = 6 %

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
0%									
15	1348	0	0	2,708	2,698	2,698		2,702	13,65
16	1382	0	0	2,679	2,679	2,694		2,684	13,47
17	1475	0	0	2,602	2,585	2,585		2,591	12,62
18	1427	0	0	2,541	2,476	2,501		2,506	11,68
19	1484	0	0	2,519	2,521	2,543		2,527	11,88
20	1456	0	0	2,510	2,474	2,519		2,501	11,57
21	1442	0	0	2,676	2,676	2,630		2,661	13,31
Ø								2,596	12,60

Tab. 8.8: Pokračování

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
10%									
15	1348	150	11,1	2,716	2,671	2,691		2,692	13,56
16	1382	150	10,9	2,704	2,727	2,780		2,737	14,01
17	1475	150	10,2	2,542	2,571	2,538		2,550	12,23
18	1427	150	10,5	2,484	2,517	2,495		2,499	11,61
19	1484	150	10,1	2,480	2,471	2,465		2,472	11,37
20	1456	150	10,3	2,461	2,469	2,478		2,469	11,28
21	1442	150	10,4	2,679	2,727	2,657		2,687	13,58
Ø								2,587	12,52
20%									
15	1348	280	20,8	2,658	2,641	2,620		2,640	13,03
16	1382	280	20,3	2,635	2,689	2,748		2,691	13,54
17	1475	280	19,0	2,526	2,526	2,553		2,535	12,08
18	1427	280	19,6	2,454	2,463	2,497		2,471	11,36
19	1484	280	18,9	2,430	2,471	2,482		2,461	11,27
20	1456	280	19,2	2,442	2,414	2,398		2,418	10,81
21	1442	280	19,4	2,628	2,602	2,623		2,617	12,88
Ø								2,548	12,14
50%									
15	1348	700	51,9	2,216	2,245	2,236		2,232	9,32
16	1382	700	50,7	2,156	2,128	2,176		2,153	8,67
17	1475	700	47,5	2,025	2,032	2,029		2,029	7,74
18	1427	700	49,1	2,002	2,005	2,002		2,003	7,46
19	1484	700	47,2	2,040	2,066	2,034		2,047	7,79
20	1456	700	48,1	1,988	1,991	2,000		1,993	7,35
21	1442	700	48,5	2,224	2,204	2,150		2,193	9,04
Ø								2,093	8,20
60%									
15	1348	840	62,3	2,151	2,129	2,132		2,138	8,54
16	1382	840	60,8	2,109	2,124	2,094		2,109	8,32
17	1475	840	56,9	2,003	1,974	1,981		1,986	7,41
18	1427	840	58,9	1,966	1,954	1,946		1,956	7,11
19	1484	840	56,6	2,003	1,996	2,009		2,003	7,46
20	1456	840	57,7	1,961	1,947	1,932		1,947	7,01
21	1442	840	58,3	2,025	2,028	2,008		2,020	7,67
Ø								2,023	7,65

Tab. 8.9: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15\%$)

Číslo vzorku	ρ [kg/m ³]	f [MPa]	w [%]
22	2070	33,4	15,5
23	2060	36,4	15,8
24	2020	29,2	15,1
25	2070	33,9	13,7
26	2080	32,3	14,4
27	2070	33,9	14,0
28	2060	34,8	14,1
Ø	2060	33,4	15

Tab. 8.10: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15\%$)

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
0%									
22	1344	0	0	2,804	2,780	2,804	2,837	2,806	16,30
23	1458	0	0	2,829	2,832	2,846	2,846	2,838	16,59
24	1181	0	0	2,731	2,701	2,781	2,781	2,748	15,26
25	1367	0	0	2,804	2,672	2,777	2,775	2,757	15,73
26	1306	0	0	2,924	2,951	2,954	2,954	2,946	18,05
27	1357	0	0	3,003	3,006	3,003	3,000	3,003	18,67
28	1405	0	0	3,138	3,134	3,084	3,168	3,131	20,19
Ø								2,890	17,26
10%									
22	1344	140	10,4	2,891	2,832	2,834		2,852	16,84
23	1458	150	10,3	2,793	2,799	2,769		2,787	16,00
24	1181	150	12,7	2,781	2,781	2,752		2,771	15,51
25	1367	140	10,2	2,829	2,832	2,823		2,828	16,55
26	1306	150	11,5	2,936	2,889	2,892		2,906	17,56
27	1357	150	11,1	2,975	2,963	2,972		2,970	18,26
28	1405	140	10,0	3,172	3,175	3,134		3,161	20,58
Ø								2,896	17,33

Tab. 8.10: Pokračování

Číslo vzorku	F _{max} [kN]	F _{skut} [kN]	F _{skut} [%]	V ₁ [km/s]	V ₂ [km/s]	V ₃ [km/s]	V ₄ [km/s]	V [km/s]	E [GPa]
20%									
22	1344	280	20,8	2,829	2,843	2,802		2,824	16,51
23	1458	300	20,6	2,756	2,782	2,772		2,770	15,81
24	1181	300	25,4	2,726	2,755	2,747		2,742	15,19
25	1367	280	20,5	2,799	2,775	2,788		2,787	16,08
26	1306	300	23,0	2,901	2,844	2,838		2,861	17,03
27	1357	300	22,1	2,921	2,941	2,900		2,921	17,66
28	1405	280	19,9	3,097	3,110	3,064		3,091	19,68
Ø								2,857	16,85
50%									
22	1344	700	52,1	2,238	2,250	2,268		2,252	10,50
23	1458	700	48,0	2,229	2,246	2,186		2,220	10,15
24	1181	700	59,3	2,269	2,248	2,272		2,263	10,34
25	1367	680	49,7	2,269	2,258	2,239		2,255	10,53
26	1306	700	53,6	2,244	2,260	2,262		2,255	10,58
27	1357	700	51,6	2,215	2,188	2,182		2,195	9,97
28	1405	700	49,8	2,343	2,351	2,393		2,362	11,50
Ø								2,258	10,51
60%									
22	1344	840	62,5	2,206	2,216	2,186		2,203	10,04
23	1458	840	57,6	2,181	2,136	2,232		2,183	9,82
24	1181	850	72,0	2,305	2,285	2,255		2,282	10,51
25	1367	840	61,4	2,154	2,154	2,152		2,153	9,60
26	1306	850	65,1	2,239	2,251	2,262		2,251	10,54
27	1357	840	61,9	2,180	2,135	2,149		2,155	9,61
28	1405	830	59,1	2,304	2,289	2,324		2,306	10,95
Ø								2,219	10,15

8.2 Diskuze k výsledkům experimentálních prací

V této části jsou shrnuty poznatky o vlivu vnitřního napětí a vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou (rychlost šíření ultrazvukového impulzu a dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu).

8.2.1 Změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v závislosti na vnitřním napětí a vlhkosti

Pro posouzení vlivu vnitřního napětí při různých vlhkostech cihel na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou byly vypočítány rozdíly mezi hodnotou sledovaného parametru srovnávacího tělesa (nevystaveného

působení silového zatížení) a hodnotou parametru při daném silovém zatížení. Změny sledovaných parametrů jsou uváděny jako rozdíl v km/s (pro rychlost šíření ultrazvukového impulsu) a GPa (pro dynamický modul pružnosti) a také byly vyjádřeny v procentech (srovnávací hodnotou je hodnota sledovaného parametru při nulovém zatížení).

- Změny rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu: byly vypočítány ze vztahů (13) a (14)

$$\Delta y = y_i - y_0 \quad (13)$$

$$\delta y = \frac{y_i - y_0}{y_0} \cdot 100 \quad (14)$$

Δy (ΔV ; ΔE) – změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [km/s];
změna dynamického modulu pružnosti [GPa];

y_i (V_i ; E_i) – rychlost šíření ultrazvukového impulsu při daném zatížení [km/s]; dynamický modul pružnosti při daném zatížení ($i = 10 - 60$ %) [GPa];

y_0 (V_0 ; E_0) – rychlost šíření ultrazvukového impulsu v nezatíženém stavu [km/s]; dynamický modul pružnosti v nezatíženém stavu [GPa];

δy (δV ; δE) – procentuální změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [%]; procentuální změna dynamického modulu pružnosti [%].

Hodnoty rozdílů Δy jsou zaokrouhleny s přesností na 0,001 km/s (0,01 GPa).

Výsledky δy jsou uváděny s přesností na 0,1 %.

V tabulce 8.11 až 8.14 jsou uvedeny rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulech pružnosti pro jednotlivé vlhkostní stavy vápenopískových cihel.

Tab. 8.11: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Číslo vzorku	$V_{10}-V_0$	$V_{10}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{60}-V_0$	$V_{60}-V_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
1	-0,020	-0,7	-0,056	-2,1	-0,461	-17,0	-0,511	-18,9
2	-0,053	-1,9	-0,088	-3,2	-0,514	-18,8	-0,551	-20,2
3	0,060	2,2	0,004	0,1	-0,416	-15,6	-0,397	-14,9
4	-0,019	-0,7	-0,061	-2,2	-0,486	-17,8	-0,592	-21,6
5	-0,009	-0,3	-0,046	-1,7	-0,466	-17,2	-0,471	-17,4
6	0,005	0,2	-0,046	-1,7	-0,495	-18,3	-0,533	-19,7
7	-0,006	-0,2	-0,021	-0,7	-0,523	-18,1	-0,579	-20,1
Ø	-0,006	-0,2	-0,045	-1,6	-0,480	-17,5	-0,519	-19,0
Číslo vzorku	$E_{10}-E_0$	$E_{10}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{60}-E_0$	$E_{60}-E_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
1	-0,20	-1,5	-0,54	-4,1	-4,11	-31,2	-4,50	-34,2
2	-0,52	-3,8	-0,86	-6,4	-4,60	-34,1	-4,89	-36,3
3	0,58	4,5	0,04	0,3	-3,67	-28,7	-3,52	-27,5
4	-0,18	-1,3	-0,59	-4,4	-4,37	-32,4	-5,21	-38,6
5	-0,09	-0,7	-0,45	-3,4	-4,19	-31,4	-4,22	-31,7
6	0,05	0,4	-0,45	-3,4	-4,38	-33,2	-4,68	-35,5
7	-0,06	-0,4	-0,22	-1,4	-4,93	-33,0	-5,41	-36,2
Ø	-0,06	-0,4	-0,44	-3,2	-4,32	-32,0	-4,63	-34,3

Tab. 8.12: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Číslo vzorku	$V_{10}-V_0$	$V_{10}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{60}-V_0$	$V_{60}-V_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
8	0,019	0,8	-0,007	-0,3	-0,328	-13,0	-0,560	-22,1
9	-0,019	-0,7	-0,054	-2,0	-0,484	-18,0	-0,699	-25,9
10	0,076	3,0	0,056	2,2	-0,345	-13,6	-0,453	-17,8
11	0,081	3,1	0,051	2,0	-0,456	-17,6	-0,599	-23,2
12	-0,092	-3,8	-0,117	-4,8	-0,300	-12,3	-0,435	-17,8
13	0,054	2,1	0,017	0,7	-0,412	-16,2	-0,444	-17,5
14	-0,011	-0,4	-0,035	-1,3	-0,692	-25,6	-0,666	-24,6
Ø	0,015	0,6	-0,013	-0,5	-0,431	-16,6	-0,551	-21,3

Tab. 8.12: Pokračování

Číslo vzorku	$E_{10}-E_0$	$E_{10}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{60}-E_0$	$E_{60}-E_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
8	0,17	1,5	-0,06	-0,5	-2,77	-24,2	-4,50	-39,4
9	-0,19	-1,4	-0,53	-4,0	-4,35	-32,7	-6,01	-45,1
10	0,70	6,0	0,52	4,5	-2,94	-25,3	-3,78	-32,5
11	0,76	6,3	0,47	4,0	-3,86	-32,2	-4,91	-40,9
12	-0,78	-7,4	-0,98	-9,3	-2,43	-23,0	-3,42	-32,4
13	0,50	4,3	0,16	1,4	-3,46	-29,8	-3,70	-31,9
14	-0,11	-0,8	-0,34	-2,5	-5,91	-44,6	-5,71	-43,2
Ø	0,15	1,2	-0,11	-0,9	-3,67	-30,3	-4,58	-37,9

Tab. 8.13: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$

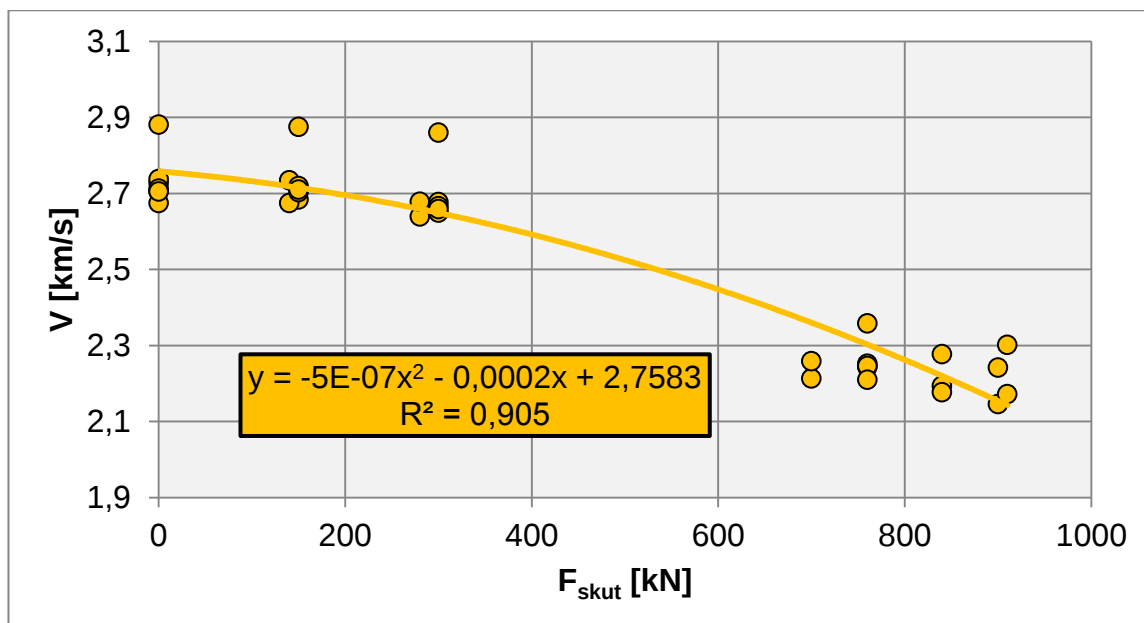
Číslo vzorku	$V_{10}-V_0$	$V_{10}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{60}-V_0$	$V_{60}-V_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
15	-0,009	-0,3	-0,062	-2,3	-0,469	-17,4	-0,564	-20,9
16	0,053	2,0	0,007	0,2	-0,531	-19,8	-0,575	-21,4
17	-0,040	-1,6	-0,055	-2,1	-0,562	-21,7	-0,605	-23,4
18	-0,007	-0,3	-0,035	-1,4	-0,503	-20,1	-0,550	-22,0
19	-0,055	-2,2	-0,066	-2,6	-0,481	-19,0	-0,524	-20,8
20	-0,032	-1,3	-0,083	-3,3	-0,508	-20,3	-0,554	-22,2
21	0,026	1,0	-0,043	-1,6	-0,468	-17,6	-0,641	-24,1
Ø	-0,009	-0,4	-0,048	-1,9	-0,503	-19,4	-0,573	-22,1
Číslo vzorku	$E_{10}-E_0$	$E_{10}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{60}-E_0$	$E_{60}-E_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
15	-0,09	-0,7	-0,62	-4,5	-4,33	-31,7	-5,10	-37,4
16	0,54	4,0	0,07	0,5	-4,80	-35,7	-5,15	-38,3
17	-0,39	-3,1	-0,53	-4,2	-4,88	-38,7	-5,21	-41,3
18	-0,07	-0,6	-0,32	-2,7	-4,22	-36,1	-4,57	-39,1
19	-0,51	-4,3	-0,62	-5,2	-4,09	-34,4	-4,42	-37,2
20	-0,29	-2,5	-0,76	-6,5	-4,22	-36,5	-4,56	-39,4
21	0,27	2,0	-0,43	-3,2	-4,27	-32,1	-5,64	-42,4
Ø	-0,08	-0,7	-0,46	-3,7	-4,40	-35,0	-4,95	-39,3

Tab. 8.14: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

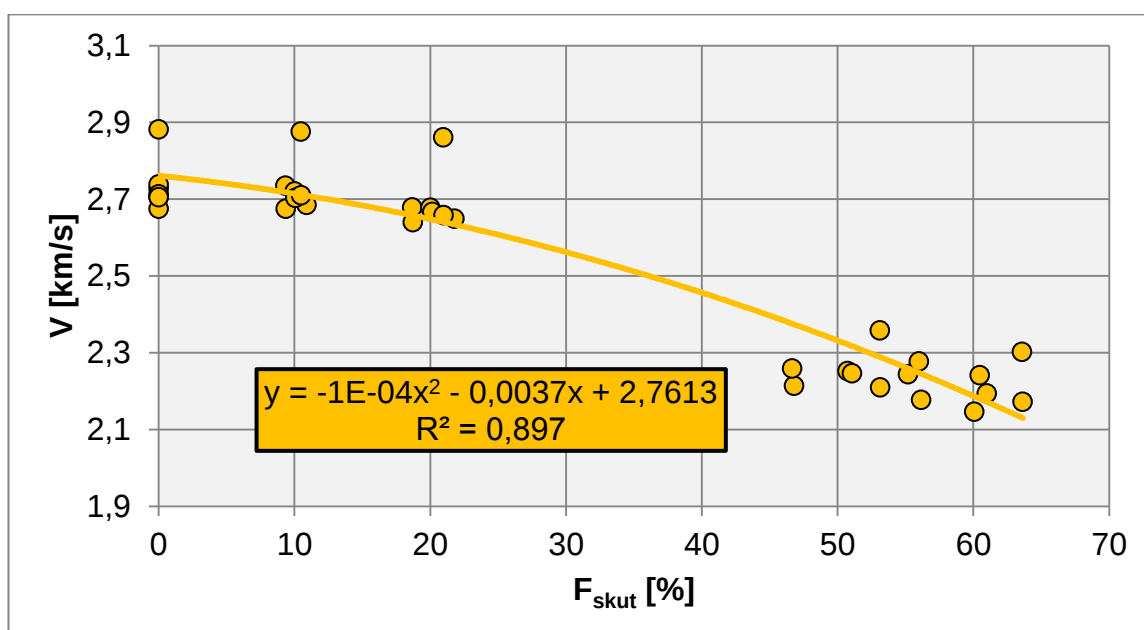
Číslo vzorku	$V_{10}-V_0$	$V_{10}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{20}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{50}-V_0$	$V_{60}-V_0$	$V_{60}-V_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
22	0,046	1,6	0,018	0,6	-0,554	-19,7	-0,604	-21,5
23	-0,051	-1,8	-0,068	-2,4	-0,618	-21,8	-0,655	-23,1
24	0,023	0,8	-0,006	-0,2	-0,485	-17,7	-0,467	-17,0
25	0,071	2,6	0,030	1,1	-0,502	-18,2	-0,604	-21,9
26	-0,040	-1,4	-0,085	-2,9	-0,691	-23,4	-0,695	-23,6
27	-0,033	-1,1	-0,082	-2,7	-0,808	-26,9	-0,848	-28,2
28	0,030	0,9	-0,040	-1,3	-0,769	-24,6	-0,825	-26,4
Ø	0,006	0,2	-0,033	-1,1	-0,632	-21,8	-0,671	-23,1
Číslo vzorku	$E_{10}-E_0$	$E_{10}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{20}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{50}-E_0$	$E_{60}-E_0$	$E_{60}-E_0$
	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
22	0,54	3,3	0,21	1,3	-5,80	-35,6	-6,26	-38,4
23	-0,59	-3,6	-0,78	-4,7	-6,44	-38,8	-6,77	-40,8
24	0,26	1,7	-0,07	-0,4	-4,91	-32,2	-4,74	-31,1
25	0,82	5,2	0,35	2,2	-5,20	-33,1	-6,14	-39,0
26	-0,49	-2,7	-1,03	-5,7	-7,47	-41,4	-7,52	-41,6
27	-0,41	-2,2	-1,01	-5,4	-8,69	-46,6	-9,06	-48,5
28	0,38	1,9	-0,52	-2,6	-8,70	-43,1	-9,24	-45,8
Ø	0,07	0,5	-0,41	-2,2	-6,75	-38,7	-7,10	-40,7

8.2.2 Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou

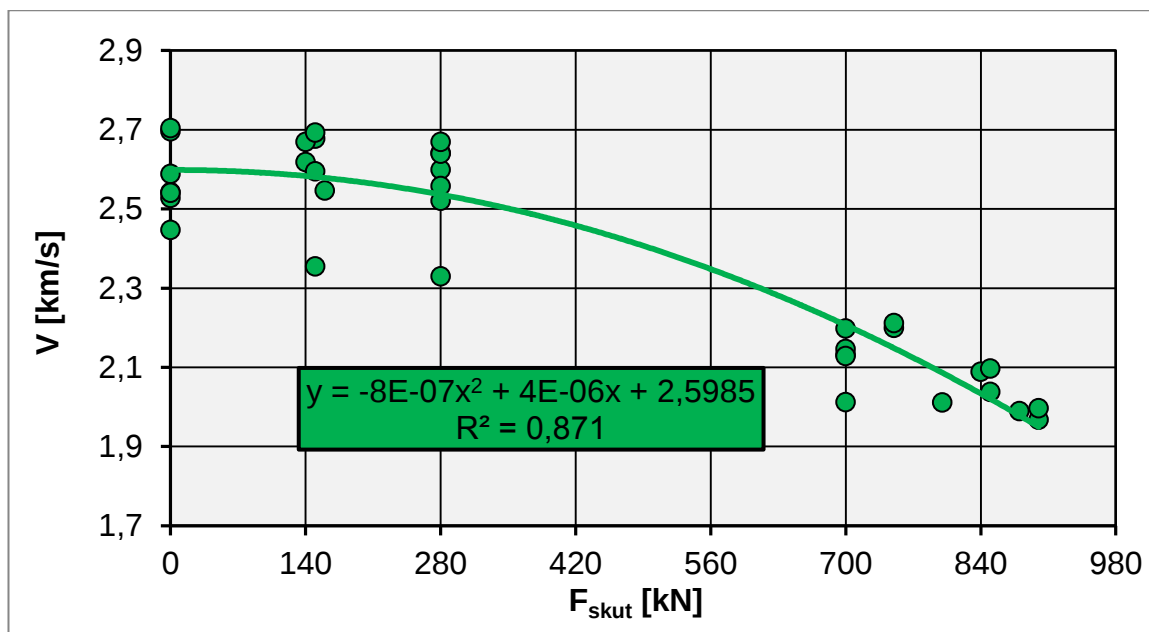
V grafech 8.1 až 8.8 jsou znázorněny závislosti mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a vnitřním napětím ve vzorku při daném vlhkostním stavu. Vnitřní napětí je vyjádřeno hodnotou zatížení v kilonewtonech kN nebo skutečnou hodnotou zatížení v procentech. Skutečná hodnota zatížení vyjádřená v % odpovídá procentuálnímu vyjádření zatěžovací síly vztažené k pevnosti v tlaku zkoušené vápenopískové cihly.



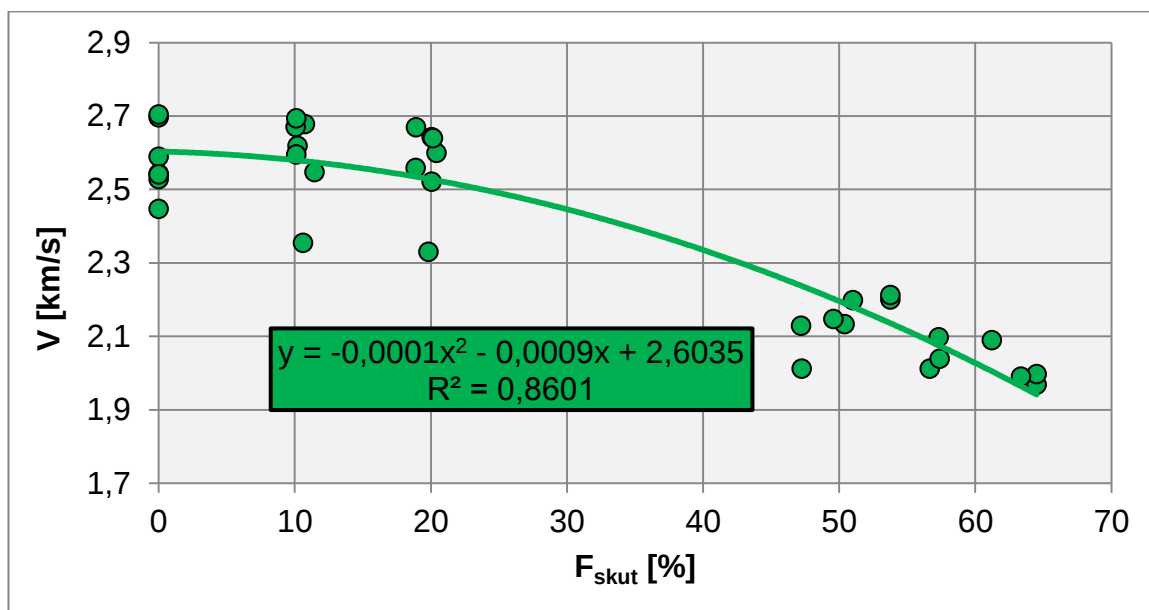
Graf 8.1: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vysušené vápenopískové cihly ($w = 0\%$)



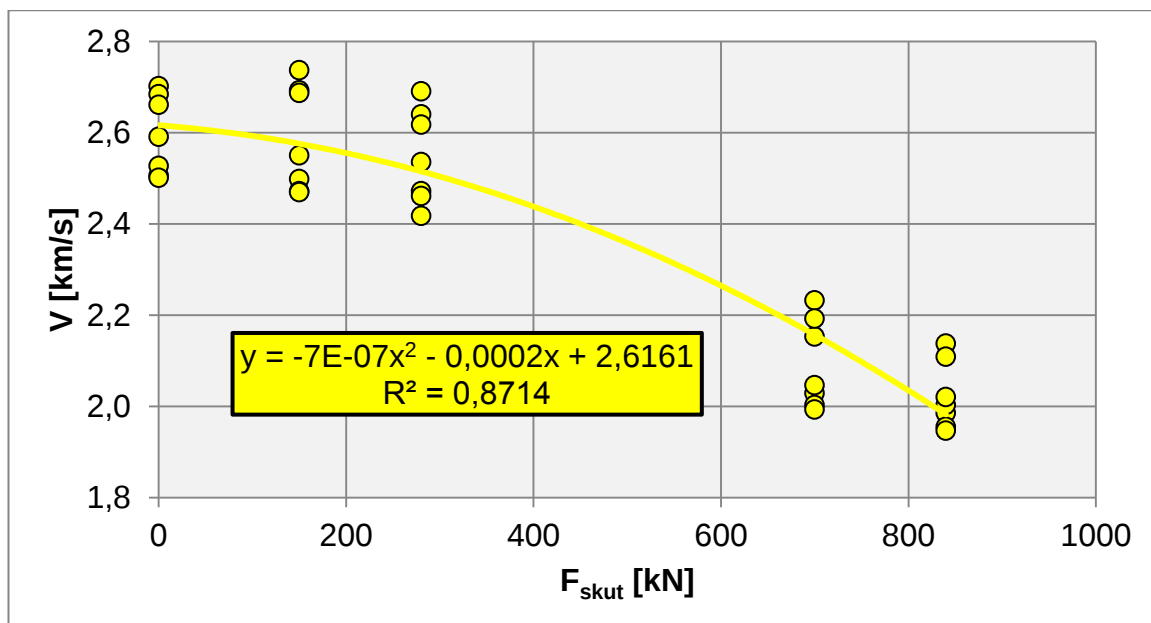
Graf 8.2: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vysušené vápenopískové cihly ($w = 0\%$)



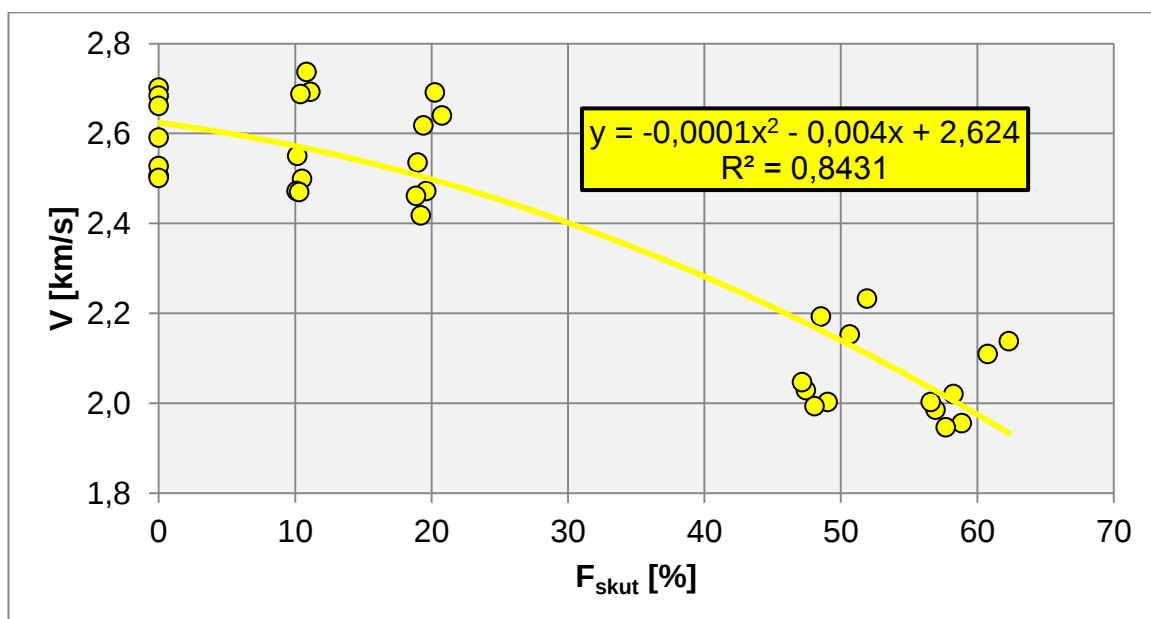
Graf 8.3: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v závislosti na velikosti zatížení – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$



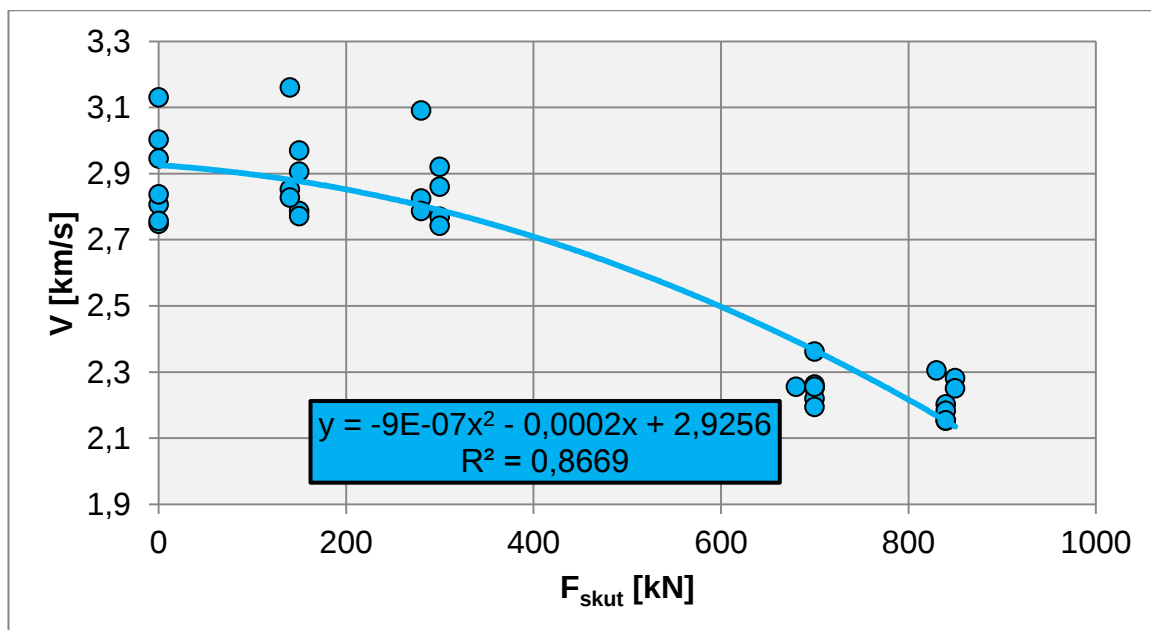
Graf 8.4: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$



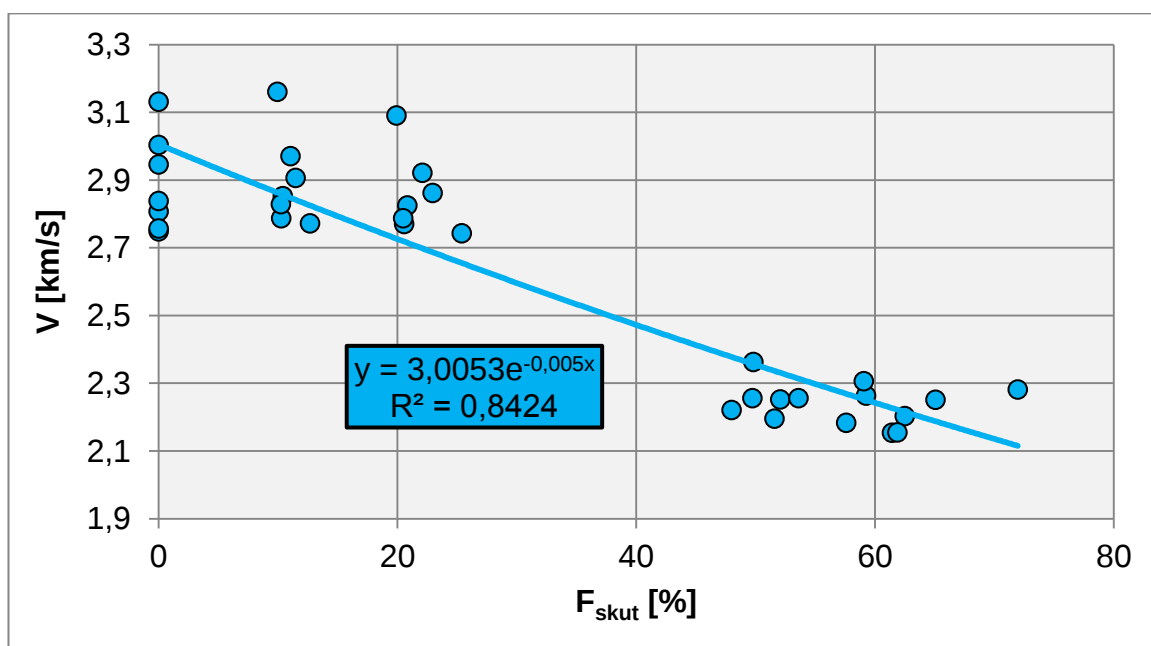
Graf 8.5: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$



Graf 8.6: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$



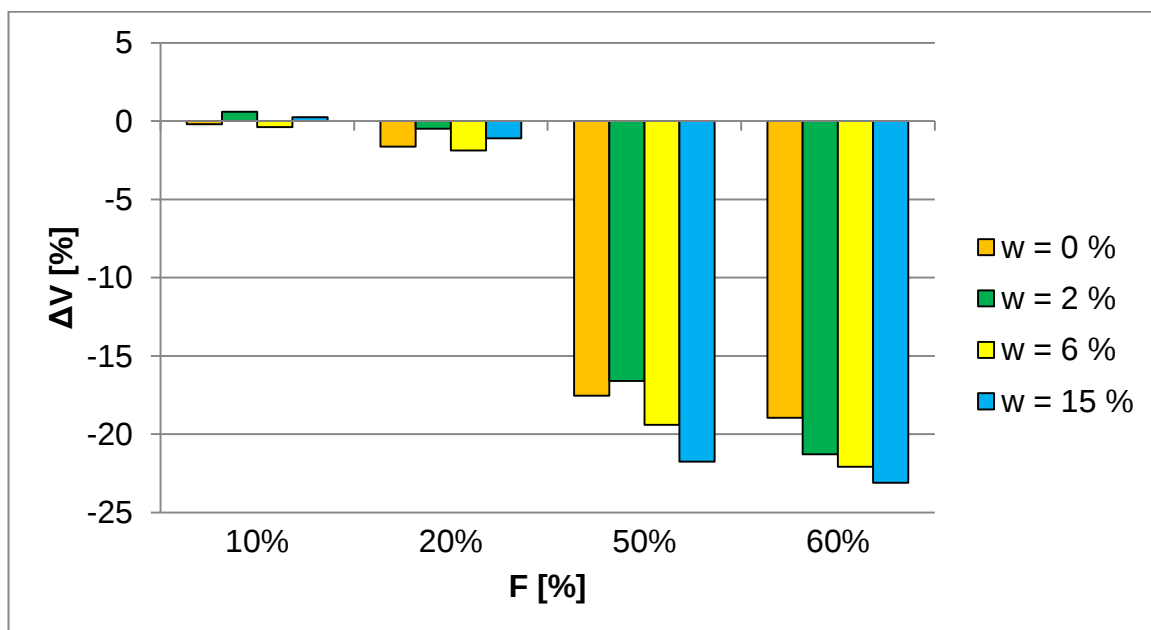
Graf 8.7: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)



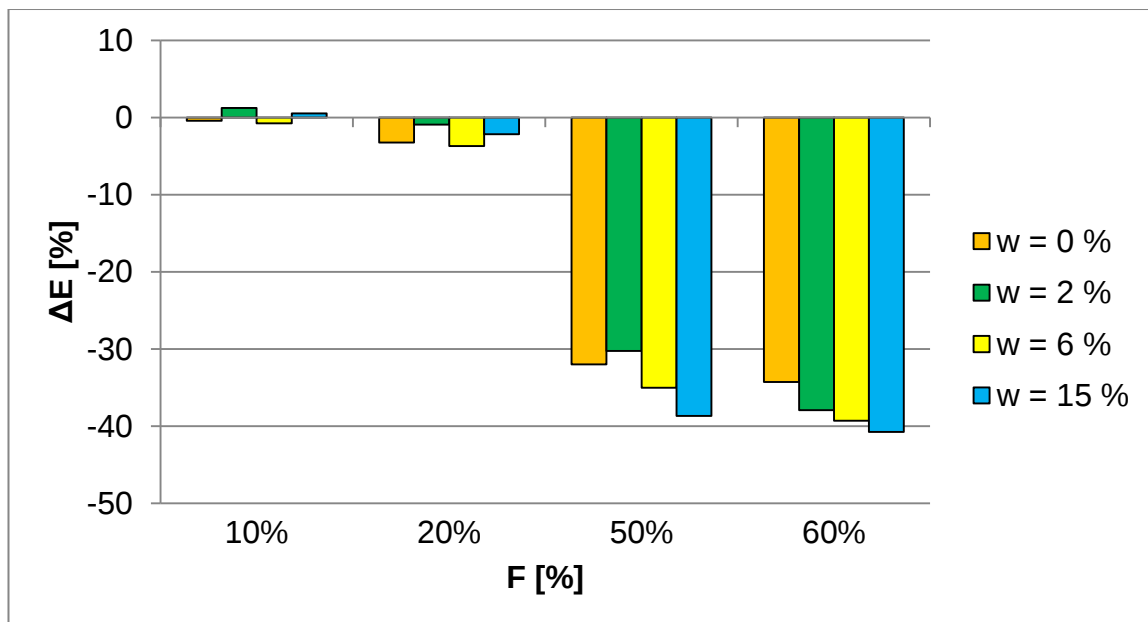
Graf 8.8: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

V grafech 8.9 a 8.10 jsou znázorněny rozdíly mezi rychlostmi šíření ultrazvukového impulzu respektive dynamického modulu pružnosti při nulovém

zatížení a při zatížení 10 %, 20 %, 50 % a 60 % z konečné pevnosti v tlaku vápenopískových cihel.



Graf 8.9: Průměrné rozdíly rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v závislosti na působícím zatížení (vnitřním napětí) při různém vlhkostním stavu vápenopískových cihel



Graf 8.10: Průměrné rozdíly dynamického modulu pružnosti v závislosti na působícím zatížení (vnitřním napětí) při různém vlhkostním stavu vápenopískových cihel

8.2.3 Zhodnocení výsledků experimentálních prací

Měření byla prováděna na vápenopískových cihlách formátu 290 x 140 x 65 mm při čtyřech vlhkostních stavech – vysušené vzorky, $w = 2 \%$, $w = 6 \%$ a vzorky nasycené vodou ($w = 15 \%$).

Pro zjištění vlivu vnitřního napětí byly cihly zatěžovány silou odpovídající 0 % (nezatížené vzorky), 10 %, 20 %, 50 %, 60 % z konečné pevnosti v tlaku.

Na základě experimentálních prací zaměřených na sledování vlivu vnitřního napětí a vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při zkoušení plných vápenopískových cihel byly získány následující poznatky:

a) Vliv míry zatížení na rychlost šíření ultrazvukového impulzu:

- Bylo prokázáno, že se zvyšujícím se vnitřním napětím se rychlost šíření ultrazvukového impulzu mění, většinou nastává její pokles.
- Při zatížení vnitřním napětím 10 % z konečné pevnosti jsou rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulzu zanedbatelné, na úrovni chyby měření; průměrné hodnoty se pohybují v rozmezí -0,4 až 0,6 % v závislosti na vlhkostním stavu. V některých případech došlo k nevýznamnému zvýšení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu ve srovnání s nezatíženými vzorky. Nárůst může být považován za chybu měření nebo mohl vzniknout právě pomocí zatížení. Pokud ve struktuře existovaly trhliny nebo dutiny již před zatěžováním, pak vlivem síly bylo jejich působení na rychlost šíření ultrazvukového impulzu eliminováno.
- Při vnitřním napětí 20 % z konečné pevnosti v tlaku dochází již k poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulzu, ale rozdíly v rychlostech mezi nezatíženými a zatíženými vzorky jsou nízké a pohybují se v rozmezí -1,9 až -0,5 % v závislosti na vlhkostním stavu vzorků. I v tomto případě lze považovat poklesy v rychlostech především jako důsledek chyby v měření.
- Při zatížení vzorků silou, která odpovídá 50 % napětí z konečné pevnosti v tlaku vápenopískových cihel, již dochází k výraznému poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulzu; průměrné hodnoty

se pohybují v rozmezí -21,8 až -16,6 % v závislosti na vlhkostním stavu.

- Zatížení vzorků silou, která odpovídá 60% napětí z konečné pevnosti v tlaku vápenopískových cihel – při tomto zatížení dochází ještě k většímu poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulzu; průměrné hodnoty se pohybují v rozmezí -23,1 až -19,0 % v závislosti na vlhkostním stavu.
- Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při zatížení silou 50 % a 60 % z pevnosti cihel je způsoben již vznikajícími defekty ve vnitřní struktuře vápenopískové hmoty.
- Analýza výsledků experimentálních prací potvrdila poznatky o vlivu vnitřního napětí na měření ultrazvukovou impulzovou metodou (na rychlost šíření ultrazvukového impulzu) uváděné v pracích [2] a [9], které se zabývají aplikací ultrazvukové impulzové metody na beton. I v případě vápenopískových cihel platí že, napětí přesahující 50 % z konečné pevnosti v tlaku výrazně snižuje rychlost šíření ultrazvukového impulzu; odlišnosti jsou však v konkrétních hodnotách poklesu této rychlosti.

b) Vliv míry zatížení na dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu:

- Bylo prokázáno, že se zvyšujícím se vnitřním napětím dochází ke změně dynamického modulu pružnosti, převážně k jeho poklesu.
- Při vnitřním napětí 10 % a 20 % je pokles dynamického modulu pružnosti v rozmezí -3,7 až -0,4% v závislosti na vlhkostním stavu.
- Při zatížení vzorků silou, která odpovídá 50 % a 60 % napětí z konečné pevnosti v tlaku vápenopískových cihel již dochází k výraznému poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulzu; průměrné hodnoty se pohybují v rozmezí -40,8 až -30,3 % v závislosti na vlhkostním stavu.
- Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu se samozřejmě projeví i na poklesu dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu, protože do jeho výpočtu vstupuje druhá mocnina tohoto parametru.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu je ve svém důsledku ovlivňován parametry, které působí na rychlost šíření ultrazvukového impulsu.

c) Vliv vlhkosti na rychlost šíření ultrazvukového impulsu

- Vliv vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou není tak výrazný ve srovnání s vlivem vnitřního napětí, které je vyšší než 50 % z konečné pevnosti v tlaku.
- Při změně vlhkosti vápenopískové hmoty o 1 % se rychlost šíření ultrazvukového impulsu změní v průměru o 0,330 km/s.
- Synergické působení zatížení a vlhkosti se projevuje na výsledcích měření ultrazvukové impulzové metody, konkrétně se zvyšující se vlhkostí vápenopískové hmoty a se vzrůstající hodnotou vnitřního napětí (viz bod a)) se rychlost šíření ultrazvukového impulsu snižuje.

Ze získaných poznatků vyplývá, že v případě měření ultrazvukovou metodou na zdících vápenopískových prvcích, zejména při měření na konstrukci nebo při zpracování kalibračních vztahů, je nezbytné při vyhodnocování výsledků měření zohlednit jak působící zatížení, tak i jejich vlhkostní stav.

9 Závěr

V rámci bakalářské práce byl sledován vliv vnitřního napětí a vlhkosti na výsledky měření vápenopískových cihel ultrazvukovou impulzovou metodou.

Měření byla prováděna na vápenopískových cihlách formátu 290 x 140 x 65 mm při čtyřech vlhkostrních stavech – vysušené vzorky, $w = 2 \%$, $w = 6 \%$ a vzorky nasycené vodou ($w = 15 \%$).

Pro zjištění vlivu vnitřního napětí byly cihly zatěžovány silou odpovídající 0 % (nezatížené vzorky), 10 %, 20 %, 50 %, 60 % z konečné pevnosti v tlaku.

Pro naplnění cílů práce byla provedena v rámci teoretické části rešerše odborné literatury a norem se zaměřením na faktory, které ovlivňují měření ultrazvukovou impulzovou metodou. Vliv těchto faktorů je v odborné literatuře i normách sledován především pro betony. Podrobně byly analyzovány poznatky vztahující se k vlivu vliv vnitřního napětí a vlhkosti.

V rámci experimentální části byly provedeny měření ultrazvukovou impulzovou metodou a zkoušky pro stanovení pevností v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti vápenopískových cihel. Z měření ultrazvukovou impulzovou metodou byla zjišťována rychlost šíření ultrazvukového impulsu a vypočítán dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu.

Z analýzy výsledků experimentálních prací bylo stanoveno, že se zvyšující se vlhkostí se rychlost šíření ultrazvukového impulsu zvyšuje, a naopak se zvyšujícím se vnitřním napětím dochází k poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Dále bylo zjištěno, že při 10% a 20% zatížení z celkové pevnosti cihel rychlost šíření ultrazvukového impulsu není výrazně ovlivněna. Při zatížení 50 % a 60 % z konečné pevnosti v tlaku dochází již k významnému poklesu rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Výsledky experimentálních prací potvrdily většinu teoretických předpokladů z odborné literatury uváděné pro betony, které byly zmíněny v této práci. Avšak konkrétní hodnoty se liší z důvodu odlišnosti betonu a vápenopískové hmoty.

Vzhledem k tomu, že experimentální práce byly prováděny na omezeném souboru vzorků, který odpovídal požadavkům rozsahu bakalářské práce, se doporučuje v další výzkumu zaměřeném na využití ultrazvukové impulzové metody zvýšit jednak četnost vzorků a jednat provést měření i při dalších zatěžovacích stavech a vlhkostech.

Předložená bakalářská práce splnila stanovené cíle. V práci jsou uvedeny poznatky o vlivu vliv vnitřního napětí a vlhkosti na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při zkoušení vápenopískových cihel.

10 Použitá literatura

- [1] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLÉ a Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: Přednášky* [online]. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BI52-Diagnostika%20stavebnich%20konstrukci/diagnostika_stavebnich_konstrukc_-_diagnostika_stavebnich_konstrukci.pdf.
- [2] MARTINČEK, Gustáv. *Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií*. Bratislava: VSAV, 1962.
- [3] ČSN EN 12504-4 – *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 16 str.
- [4] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem: celostátní vysokoškolská příručka pro skupinu studijních oborů Strojnictví a ostatní kovodělná výroba*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Vyd. 2. Opr. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2584-9.
- [6] ASTM C597-09, „Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete“, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [7] DVORSKÝ, Petr. *Využití ultrazvukové impulsové metody – nástroj pro stanovení pevností cementů: diplomová práce*. Brno, 2012. 72 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [8] CRAWFORD, G. I. *Guide to Nondestructive Testing of Concrete* [online]. Washington: Federal Highway Administration, 1997 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/006641.pdf>.
- [9] PAVLÍK, Adolf a Jaroslav DOLEŽAL. *Nedeštruktivní vyšetřování betonových konstrukcí*. Praha: SNTL, 1977.
- [10] GALAN, Andrej. *Kombinované ultrazvukové metódy skúšania betónu*. 1. Bratislava: VEDA, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1984.

- [11] PROCHÁZKA, David. *Vytvoření předpokladů hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Brno, 2013. 239 s. Vedoucí dizertační práce: doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [12] KORJAKINS, Aleksandr. *Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature* [online]. Riga Technical University, 2013 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/16677/fulltext>.
- [13] MALHOTRA, V. M. a Nicholas J. CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0.
- [14] BUNGEY, J. H., S. G. MILLARD a Mike GRANTHAM. *Testing of concrete in structures*. 4th ed. New York: Taylor, 2006 [cit. 2016-05-14]. ISBN 978-041-5263-016. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj3rdCShdrMAhVlvRQKHVF2BUUQFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fcvi.aaku.ac.ir%2Fdownload%2Ftesting-of-concrete-in-structures&usq=AFQjCNHFhkKts24RwUgszrF83i04XzMlq&sig2=PD34ksipUvDuegFZyYUigw&bvm=bv.122129774,d.bGg&cad=rja>.
- [15] YENG, Chong Chooi. *Effect of compressive stress in concrete on ultrasonic pulse velocity* [online]. Sarawak, 2010 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://ir.unimas.my/7747/1/Effect%20of%20compressive%20stress%20in%20concrete%20on%20ultrasonic%20pulse%20velocity%2024pgs.pdf>. Bakalářská práce. Universiti Malaysia Sarawak. Vedoucí práce Ng Chee Khoo.
- [16] VIVITHKEYOONVONG, Sompothi a Suwatchai PUWAPATTANACHAT. *Effect of internal compressive stress and direction of Schmidt Hammer on compressive strength concrete estimated by combined ultrasonic pulse velocity and rebound hammer methods* [online]. Bangkok: Kasetsart University, 2012 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: [http://kukr.lib.ku.ac.th/db/BKN_ENG/search_detail/download_digital_file/192843/25165"](http://kukr.lib.ku.ac.th/db/BKN_ENG/search_detail/download_digital_file/192843/25165)

- [17] ANTON, Ondřej. *Zkušebnictví a technologie - Modul BI02 M04: Laboratorní cvičení* [online]. Brno: CERM, 2000 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fast/m04-m35998-p1.html>.
- [18] ŠVEC, J.; *Modifikace suchých omítkových směsí vápencovými odkaly*. Brno, 2009. 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Ptáček, Ph.D.
- [19] LIU, Bao Dong, Wen Juan LV, Lin LI a Peng Fei LI. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **69**(69), 133-142 [cit. 2016-05-19]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.094. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814007132>.
- [20] POSPÍŠIL, Ondřej. *Diagnostika stavebních konstrukcí při hodnocení aktuálního stavu*. Brno, 2012. 57 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
- [21] BS 1881-202 „*Testing Concrete. Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer*“, British Standards Institution, London, 1986.
- [22] ACI 228.1R-03 „*In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*“, American Concrete Institute, Detroit, 2003.
- [23] NBR NM 78 „*Concreto Endurecido - Avaliação Da Dureza Superficial Pelo Esclerometro De Reflexao*“, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR, 1996.
- [24] RILEM NDT 3 „*Recommendations for Testing Concrete by Hardness Methods*“, RILEM, 1984.
- [25] ČSN EN 12504-2 – *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Český normalizační institut, 2013, 9 str.
- [26] ČSN 73 1373 – *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2011, 18 str.

11 Seznam použitých obrázků

Obr. 4.1: Schématické zobrazení aparatury pro měření ultrazvukem [6]

Obr. 4.2: Způsoby prozvučování dle přiložení sond na povrch materiálu [8]

Obr. 5.1: Vlivu pórovitosti na rychlost šíření ultrazvukového impulsu, na dynamický modul pružnosti a na pevnost v tlaku [9]

Obr. 6.1: Vliv vlhkosti na rychlost šíření ultrazvukového impulsu v materiálu [9]

Obr. 6.2: Závislost mezi modulem pružnosti a obsahem vlhkosti [19]

Obr. 6.3: Vliv vlhkosti při stanovení pevnosti v tlaku ultrazvukovou impulzovou metodou [14]

Obr. 6.4: Znázornění metody vysoušecí přímky (Desiccation line method) [14]

Obr. 6.5: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při postupném osovém zatěžování hranolů [9]

Obr. 6.6: Typická tlaková napětí ovlivňující rychlost šíření ultrazvukového impulsu: přerušovaná čára značí spojení mezi experimentálně zjištěnými hodnotami; plná čára – teoretická křivka na základě výpočtu pro přiblížení se skutečnému procesu [15]

Obr. 6.7: Snížení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v závislosti na hodnotě vnitřního napětí pro jednotlivé druhy betonu [15]

Obr. 6.8: Vliv hodnoty vnitřního napětí na hodnoty odrazu u jednotlivých betonů s různou pevností v tlaku [16]

Obr. 7.1: Ultrazvukový přístroj TICO PROCEQ [20]

12 Seznam tabulek

Tab. 5.1: Rychlost šíření ultrazvukového impulsu ve vybraných materiálech [9] [10]

Tab. 5.2: Rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v různých druzích hornin [9]

Tab. 5.3: Nejmenší přípustné rozměry tělesa dle kmitočtu a rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [3]

Tab. 5.4: Procentuální korekce pro měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých teplotách zkoušeného materiálu [13]

Tab. 8.1: Stanovení pevností v tlaku u souboru cihel pro určení síly odpovídajícího stupně zatížení

Tab. 8.2: Hodnoty zatěžovací síly pro jednotlivé stupně zatížení

Tab. 8.3: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Tab. 8.4: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Tab. 8.5: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Tab. 8.6: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Tab. 8.7: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$

Tab. 8.8: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$

Tab. 8.9: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti a vlhkosti - vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

Tab. 8.10: Výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou při různých zatěžovacích stupních - vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

Tab. 8.11: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Tab. 8.12: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Tab. 8.13: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$

Tab. 8.14: Rozdíly v rychlostech šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulech pružnosti při různých zatěžovacích stavech - vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

13 Seznam grafů

Graf 8.1: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Graf 8.2: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vysušené vápenopískové cihly ($w = 0 \%$)

Graf 8.3: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Graf 8.4: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 2 \%$

Graf 8.5: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$

Graf 8.6: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vápenopískové cihly s vlhkostí $w = 6 \%$

Graf 8.7: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení – vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

Graf 8.8: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na velikosti zatížení (vnitřní napětí vyjádřené v procentech) – vápenopískové cihly nasycené vodou ($w = 15 \%$)

Graf 8.9: Průměrné rozdíly rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na působícím zatížení (vnitřním napětí) při různém vlhkostním stavu vápenopískových cihel

Graf 8.10: Průměrné rozdíly dynamického modulu pružnosti v závislosti na působícím zatížení (vnitřním napětí) při různém vlhkostním stavu vápenopískových cihel

14 Použité symboly a zkratky

$V = v_L$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s]
L	délka měřicí základny [mm]
T	čas, který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou [μ s]
h	velikost překážky [m]
λ	vlnová délka [m]
ρ	objemová hmotnost [kg/m^3]
$E = E_u$	dynamický modul pružnosti v tlaku – tahu [GPa]

k	koeficient rozměrnosti prostředí [-]
D	objemová hmotnost [kg/m ³]
W	vlnová délka [mm]
f	frekvence impulzů [kHz]
Δv_L	změna rychlosti ultrazvukového impulzu [m/s]
$\Delta \rho_b$	změna hutnosti betonu [kg/m ³]
Δw_b	změna vlhkosti betonu [%]
f_1	standardní krychelná pevnost [MPa]
f_2	skutečná krychelná pevnost v in situ [MPa]
V_1	rychlost šíření ultrazvukového impulzu naměřená na standardním vzorku [km/s]
V_2	rychlost šíření ultrazvukového impulzu naměřená na in situ vzorku [km/s]
k	konstanta zhutnění (pro dobře zhutněné betony 0,015; pro špatně zhutněné betony 0,025) [-]
σ_b	osově působící napětí [MPa]
w_s	vlhkost vzorku [%]
$m_{0,s}$	hmotnost vzorku před vysušením [g]
$m_{dry,s}$	hmotnost vzorku po vysušení [g]
W_s	nasákavost vzorku [%]
M_d	hmotnost vzorku po vysušení [g]
M_s	hmotnost vzorku po ukončení nasycování [g]
$\rho_{g,u}$	objemová hmotnost materiálu zdícího prvku ve vysušeném stavu [kg/m ³]
$\rho_{w,u}$	objemová hmotnost materiálu zdícího prvku při dané vlhkosti [kg/m ³]
m_u	hmotnost zdícího prvku [kg]
l_u	délka zdícího prvku [m]
w_u	šířka zdícího prvku [m]
h_u	výška zdícího prvku [m]
f	pevnost v tlaku [MPa]
F_{max}	maximální zatěžovací síla [N]
A	tlačená plocha [mm]

$\Delta y (\Delta V; \Delta E)$	změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu [km/s]; změna dynamického modulu pružnosti [GPa]
$y_i (V_i; E_i)$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu při daném zatížení [km/s]; dynamický modul pružnosti při daném zatížení ($i = 10 - 60 \%$) [GPa]
$y_0 (V_0; E_0)$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu v nezatíženém stavu [km/s]; dynamický modul pružnosti v nezatíženém stavu [GPa]
$\delta y (\delta V; \delta E)$	procentuální změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu [%]; procentuální změna dynamického modulu pružnosti [%]