VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV FYZIKY

VYUŽITÍ AKUSTICKÝCH METOD K POPISU CHOVÁNÍ CEMENTOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V RANÉ FÁZI TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ

USE OF ACOUSTIC METHODS TO DESCRIBE THE BEHAVIOUR OF CEMENTITIOUS COMPOSITE MATERIALS IN THE EARLY STAGES OF SETTING AND HARDENING

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

OBOR	Stavební inženýrství
AUTOR PRÁCE	Ing. et Ing. Michaela Hodoláková
VEDOUCÍ PRÁCE	doc. Mgr. Libor Topolář, Ph.D.

Brno 2024

KLÍČOVÁ SLOVA

nedestruktivní metody, průchodová ultrazvuková metoda, metoda akustické emise, mechanické vlnění, kompozitní materiály, tuhnutí a tvrdnutí, cement

KEYWORDS

non-destructive methods, Transmission ultrasound method, acoustic emission method mechanical waves, composite materials, setting and hardening, cement

Obsah

1 Úvod 4
2 Cíle práce 5
3 Teoretická část 6
3.1 Nedestruktivní akustické metody 6
3.2 Ultrazvuková metoda 6
3.2.1 Průchodová ultrazvuková metoda 7
3.3 Metoda akustické emise 9
3.4 Měření teploty 9
3.4.1 NTC Termistor 9
3.5 Rentgenová difraktometrie 10
3.6 Charakteristika zkoumaných materiálů 10
3.6.1 Vodní součinitel 10
3.7 Hydratace cementu 11
4. Metodika práce 11
4.1 Příprava a průběh samotného měření 15
5. Výsledky experimentů 16
5.1 Cementová pasta w/c = 0,33 – ukázka výsledku ze základní sady 17
5.2 Souhrnné výsledky ze základní sady měření 19
6. Možný budoucí vývoj a přínos pro vědní obor a praxi 22
7. Závěry 24

1 Úvod

Před mnoha lety se začaly používat různorodé stavební kompozitní materiály v jednotlivých částech světa. Již od počátku svého vzniku se tyto stavební materiály neustále vyvíjí a v moderní technické době hrají velmi důležitou roli. Ačkoli jejich nejdůležitější použití je ve stavebních činnostech, používají se i v dalších oblastech inženýrství (např. v průmyslu stavebních hmot). Vzhledem k velké rozmanitosti ve využívání stavebních kompozitních materiálů jsou na tyto materiály (vzhledem k jejich účelu) kladeny vysoké požadavky vztahující se k jejich kvalitě, životnosti a v poslední době také vlivu na ekologii. S tímto souvisí i zájem řady renomovaných odborníků po celém světě rozšířit znalosti v oboru stavebních materiálů.

Vzhledem k velice rychlému technologickému růstu a prosperující ekonomice se většina populace snaží maximálně využívat stále novější a vyspělejší techniku. Tento trend se začíná pomalu objevovat také ve stavebnictví. Roste zájem o ekologii a požadavky na výstavbu stále častěji obsahují podmínky, aby stavba co nejméně zatěžovala životní prostředí. Požadavky také směřují k poměru mezi cenou stavebních materiálů a jejich užitných vlastností.

Hledají se nové možnosti pro určení a zdokonalování mechanických a deformačních vlastností jednotlivých stavebních materiálů. Klíčovým procesem pro stanovení většiny charakteristik cementových materiálů je hydratace cementu. Sledují se procesy raného tuhnutí, pozdějšího tvrdnutí a zrání. Tyto děje patří mezi velmi složité a zároveň důležité a v konečném důsledku rozhodují o celkových vlastnostech výsledného kompozitu. Pochopení procesu hydratace cementu je podstatné pro poskytnutí řešení technických problémů pro konkrétní aplikace, pokud jde o trvanlivost a udržitelnost [1].

Stavební materiály či konstrukce ve svém životním cyklu mohou vykazovat různé vady. Správná a včasná identifikace těchto vad je velice důležitá, abychom zajistili mechanickou odolnost a stabilitu, ale i bezpečnost. Již v rané fázi jejich životnosti je možné včasné odstranění a minimalizování budoucích poškození. Správná detekce poškození je klíčovým aspektem při vyhodnocování pravděpodobnosti selhání v různých situacích. V oblasti testování se významně rozvíjí nejen přístrojová technika, ale i využívané zkušební postupy [2] [3] [4].

V oboru nedestruktivního testování (NDT) mají podstatné zastoupení akustické metody. Tyto akustické metody fungují na principu charakteristiky šíření vlnění a jsou určeny fyzikálně-mechanickými vlastnostmi materiálu. Nejznámější a nejrozšířenější je v tomto ohledu metoda ultrazvuková, tedy zkoušení ultrazvukem. V poslední době se do popředí dostává také rezonanční metoda někdy též nazývaná metoda Impact-echo. Dále jsou

vyvíjeny další NDT metody. Ve stavebnictví je známá, zatím jen experimentálně, např. metoda nelineární ultrazvuková spektroskopie či metoda akustické emise.

Tato práce se úzce zaměřuje na využití dvou akustických metod (průchodová ultrazvuková metoda a metoda akustické emise) k popisu chování kompozitních materiálů v rané fázi tuhnutí, pozdějšího tvrdnutí a zrání.

2 Cíle práce

Záměrem této práce bude aplikace akustických metod se zaměřením na průchodovou ultrazvukovou metodu a metodu akustické emise v průběhu tuhnutí a tvrdnutí cementových kompozitů. Cílem bude zejména složení vlastní experimentální sestavy pro měření průchodovou ultrazvukovou metodou. Dalším cílem bude dosažení hlubšího porozumění dějům probíhajících v rané fázi tuhnutí kompozitních materiálů na bázi cementu a jejich vlivu na procházející a generované mechanické vlnění.

Proces tuhnutí a tvrdnutí (např. v cementových kompozitech) závisí na vnitřních (endogenních) a vnějších (exogenních) činitelích. Obecným vnitřním činitelem je složení receptury (např. druh a množství plniv a pojiv, vodní součinitel atd.). Mezi vnější činitele patří klimatické podmínky a technologie zpracování. Díky skutečnosti, že se výše zmíněné vlivy přímo odráží v charakteristikách materiálu čerstvého jako je hutnění, ukládání, reologie, zpracovatelnost (je známo, že časy tuhnutí pojiv jsou odlišné od časů tuhnutí a tvrdnutí betonu nebo malty [5]), ale i vytvrzeného jako je smrštění, pevnost, pružnost, budou k popisu vlastností kompozitů využity i další běžně užívané metody či měření (např. měření vnitřní teploty). Výsledky vyhodnocení měření akustickými metodami budou na základě srovnání s výsledky získaných pomocí standartních postupů a literárních rešerší verifikovány [3] [6].

Přístrojové vybavení pro složení sestavy pro měření průchodovou ultrazvukovou metodou bude zkomponováno z dostupného přístrojového vybavení Ústavu fyziky, Fakulty stavební VUT v Brně. V rámci předložené práce bude v rámci experimentů sledován zejména vývoj amplitudy a změny frekvenčního spektra signálů v průběhu celého měření. Výsledky této práce by měly rozšířit možnosti akustických metod, podpořit snahu o využití měřicích metod v oblasti nedestruktivního zkoušení ve stavebnictví v rané fázi tuhnutí kompozitních materiálů, ale také rozšířit možnost použití stávajícího přístrojového vybavení k neinvazivnímu stanovení počátku doby tuhnutí kompozitních materiálů.

Další důležitou částí, kterou se bude disertační práce věnovat, bude hledání souvislostí mezi mechanickým vlněním a probíhajícími procesy v rané fázi tuhnutí stavebních materiálů. Součástí práce bude také objasnění problematiky (týkající se zejména akustických metod) na základě rešerše

literatury, analýza a prezentování výsledků z provedených experimentů, diskuse rozdílů mezi některými zkoumanými materiály a jednotlivými měřicími metodami.

Cílem experimentální části práce bude sledování hydratačních procesů cementu v cementových pastách průchodovou ultrazvukovou metodou a metodou akustické emise. S tímto měřením budou získána i data ze souběžného měření teploty teplotními čidly. Dále bude (pro správné vyhodnocení chování kompozitům na bázi cementu) měření doplněno o posouzení na základě výsledků z fyzikálně chemických analýz. Pro účely výzkumu bude využita zejména rentgenová difrakční analýza ve spolupráci s Fakultou chemickou VUT v Brně.

V rámci předložené práce bude studium zaměřeno především na jednodušší systémy, které představují cementové pasty, z důvodu snadnější identifikace procesů a následné interpretace získaných informací. Do budoucna výzkum nabízí možnosti zkoumání např. na hrubozrnných kompozitech.

3 Teoretická část

V teoretické části se práce zabývá akustickými NDT metodami s bližším zaměřením na průchodovou ultrazvukovou metodu a metodu akustické emise. Dále je v teoretické části popsána rentgenová difrakční analýza (XRD). Tato metoda byla k měření zvolena a využita jako doplňková. Důvodem je, že výše uvedené akustické metody jsou experimentální a vyžadují korelaci s některou již ověřenou měřicí metodou. Teoretická část práce se také věnuje kompozitním materiálům na bázi cementu. V popředí stojí jemnozrnné cementové pasty. S touto částí souvisí také popis a proces hydratace cementu.

3.1 Nedestruktivní akustické metody

Akustické metody se řadí mezi nedestruktivní metody zkoušení. Principiálně jsou založené na sledování šíření mechanického vlnění v testovaném materiálu či konstrukci. Dle uspořádání měřicího postupu můžeme tyto metody rozdělit na:

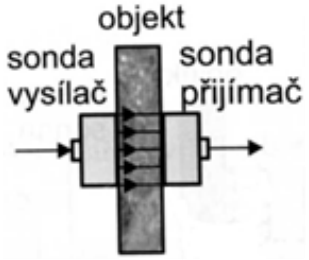
- aktivní – buzení vibrací a jejich snímání,
- pasivní – snímání vibrací vznikajících v materiálu či konstrukci.

3.2 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda je často využívána pro neinvazivní zjišťování vlastností a struktury materiálů v různých průmyslových odvětvích, včetně stavebnictví. Tato metoda využívá vysokofrekvenční zvukové vlny, které jsou vysílány do materiálu a následně se měří jejich odraz a průchodnost. Na základě těchto dat lze určit vlastnosti materiálu, jako je hustota, pružnost, pevnost a porozita.

V průmyslové stavební praxi se ultrazvuková metoda používá především k testování betonu a dalších stavebních materiálů, aby se zjistily jejich vlastnosti a integrity, jako jsou například trhliny, dutiny a vady v materiálu. Tato metoda se také využívá k průzkumu stavebních konstrukcí, jako jsou mosty, tunely a budovy, kde může být testování prováděno zvenčí, bez nutnosti narušení stavebních prvků [7].

Pro zkoušení vlastností materiálů (pomocí šíření ultrazvukového vlnění) se často používá ultrazvukových aparatur se dvěma sondami (vysílací a přijímací), které měří s dostatečnou přesností čas, za který vysílaný impuls (čelo vybuzeného podélného vlnění) projde k přijímací sondě přes měřicí základnu viz Obr. 3.2.

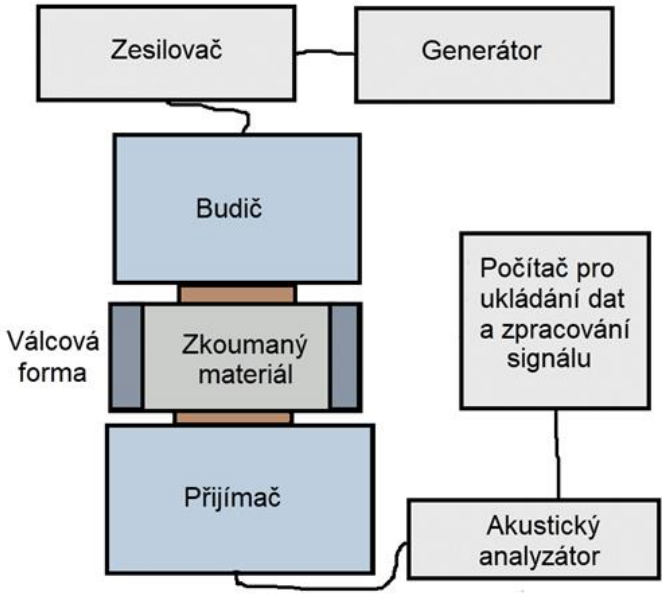


Obr. 3.2 Ultrazvuková impulsová metoda – průchodová [8]

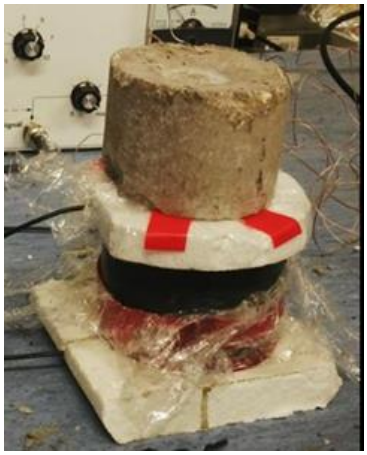
3.2.1 Průchodová ultrazvuková metoda

Průchodová ultrazvuková metoda je v této modifikaci pro použití během tuhnutí stavebních kompozitů momentálně pouze experimentální metodou. Měřicí postup, který jsem pro měření touto metodu vytvořila, využívá předměty a zařízení, které vlastní Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. Tato metoda je určena ke stanovení počátku doby tuhnutí ze změny amplitudy a frekvenčního spektra ultrazvukového signálu, který prochází tuhnoucím materiálem. Jedná se tedy o testování kompozitních materiálů neinvazivním způsobem. V oboru materiálového zkušebnictví momentálně existuje zařízení Vicasonic [9], který za pomocí měření času určuje počátek tuhnutí na základě změny rychlosti šíření ultrazvukových vln.

Principem průchodové ultrazvukové metody je průchod mechanického vlnění materiálem v průběhu hydratace. Když tuhne či tvrdne čerstvá směs, mění se vlastnosti signálu procházejícího mezi dvěma piezoelektrickými snímači, kde první snímač plní funkci budiče a druhý přijímače signálu. Schéma zapojení průchodové ultrazvukové metody je zobrazeno na Obr. 3.3. Po skončení měření lze vzorek odformovat a měřicí sestavu opět použít pro další měření. Odformovaný vzorek a ukázka vzorku při měření je na Obr. 3.4.



Obr. 3.3 Schéma zapojení průchodové ultrazvukové metody
pro analýzu mechanického vlnění



Obr.3.4 Odformovaný vzorek z měření (horní část fotografie)
a ukázka vzorku při měření (spodní část fotografie)

Následně po doměření je možné analyzovat získané signály a určit z nich například:

- amplitudu signálu,
- změnu frekvenčního spektra,
- útlum jednotlivých signálů,
- po úpravě měřící sestavy i čas průchodu ultrazvukového signálu – toto jsem ovšem v disertační práci neřešila, abych nesuplovala již komerčně dostupné zařízení.

Všechna tato naměřená data se dají následně dát do vztahu např. s měřením teploty tuhnoucích vzorků. Existují ovšem různé standardizované postupy, kdy se většinou jedná o invazivní testovací metody. Pro testování pojiv se využívá například měření hloubky vniknutím jehly a v případě testování betonu nebo malty je to většinou odolnost proti vnikání válečku. U těchto postupů jsou výsledky určení počátku tuhnutí a tvrdnutí významně ovlivněny frekvencí jednotlivých vpichů [10] [11] [12] [13].

3.3 Metoda akustické emise

Metoda akustické emise je nedestruktivní zkušební metoda, která se řadí mezi nejcitlivější experimentální metody k monitorování vzniku trhlin (mikrotrhlin) a nových produktů v materiálu či konstrukci. Pracuje s cílem „odposlechu" akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoj porušení, svírání a rozevírání trhlin apod.). Metoda AE je pasivní kontrolní metodou, která detekuje (popř. lokalizuje) a hodnotí aktivitu porušení a defektů právě a pouze v jejich průběhu (monitoruje aktivní poruchy). Její velkou výhodou je, že může monitorovat celou objemovou strukturu konstrukce, konstrukčního prvku či zkušebního tělesa. Další výhodou AE oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objektu a úspora času [8] [14] [15].

Událost akustické emise je přímo spojena s tvorbou trhliny či novotvaru v tuhnoucím materiálu. Vznik a velikost těchto trhlin závisí nejen na typu a podmínkách zatěžování, ale i na složení kompozitu. V rané fázi tuhnutí dokáže tato metoda zachytit i vznik strukturálních změn ve zkoumaném materiálu [4] [8] [15].

3.4 Měření teploty

Snímače/senzory mají za úkol zjistit velikost měřené fyzikální veličiny a přeměnit ji na jinou (většinou elektrickou) veličinu. Takto získané elektrické veličiny se následně zpracovávají v dalších vyhodnocovacích obvodech. Snímače jsou tedy první články měřících řetězců [16].

3.4.1 NTC Termistor

Z názvu je zřejmé, že NTC termistory mají záporný teplotní součinitel odporu, což odpovídá výše zmíněnému jevu. S rostoucí teplotou se zvyšuje koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor klesá. Termistor je zhotovený z polykrystalické keramiky ze směsi oxidů. Nejprve se z různých oxidů kovů (např. Fe_2O_3, TiO_2, CuO, MnO, NiO, CoO, BaO, atd.) a stabilizátorů vyrobí prášek, který se smísí s plastickým pojivem. Tato hmota se potom lisuje do tvaru disku, destičky apod. Speciální elektrické vlastnosti vznikají při spékání, které probíhá při teplotách mezi 1000 °C a 1400 °C. Rozdílné vlastnosti negastorů – NTC a pozistorů – PTC jsou určeny

rozdílnými výchozími materiály a mísícími poměry, jakož i rozdílnými postupy při spékání [16] [17]. Kromě termistorů pro běžné teplotní rozsahy -50 °C až 150 °C se vyrábí i speciální termistory pro nízké (od cca -269,15 °C ≈ 4 K) a vysoké teploty (zhruba do 1000 °C).

3.5 Rentgenová difraktometrie

XRD je univerzální analytická metoda. Umožňuje analyzovat pevnou látku z hlediska její struktury na základě jejího difrakčního projevu získaného při působení monochromatického rentgenového záření na vzorek dané pevné látky. Při vzájemném působení rentgenového paprsku a krystalické mřížky, dochází ke konstruktivní, nebo destruktivní interferenci rozptýleného rentgenového záření. Pro každou krystalickou látku je specifický její difraktogram, podle kterého jsme ji schopni identifikovat nebo určit její stupeň krystalizace [18] [19] [20].

Pro difrakci je podstatný pružný rozptyl. Z jeho povahy vyplývá, že je to záležitost elektronů vnějších slupek. Ze základních kurzů fyziky známá Braggova rovnice vyjadřuje obecné pravidlo pro interferenci dvou paprsků, totiž že jejich dráhový rozdíl musí být celočíselným násobkem vlnové délky:

$$2 \cdot d \cdot sin\theta = n \cdot \lambda \qquad (3.1),$$

kde d je mezirovinná vzdálenost sousedních atomových rovin, λ je vlnová délka dopadajícího a difraktovaného záření, θ je difrakční úhel (tj. úhel mezi difraktovaným svazkem a atomovou rovinou) a n je řád reflexe. Úhel mezi dopadajícím a difraktovaným svazkem je 2θ [21] [22].

3.6 Charakteristika zkoumaných materiálů

Kompozitní materiály (kompozity) je možné charakterizovat jako vícefázové materiály, které jsou složené minimálně ze dvou fází (složek) s rozdílnými vlastnostmi. Jejich složením vzniká materiál s takovými vlastnostmi, které neměla ani jedna z použitých fází sama o sobě, přičemž všechny použité materiály si v rámci kompozitu zachovávají svoji totožnost i přes to, že na své okolí působí v součinnosti. Nedochází ke slučování nebo úplnému rozpouštění a každá z fází může být fyzikálně identifikována. Kompozitní systém vzniká mícháním a spojováním jednotlivých složek různými způsoby a prostředky [23] [24]. Typickými kompozity ve stavebnictví jsou jemnozrnné materiály a betony na bázi cementů či alkalicky aktivované materiály.

3.6.1 Vodní součinitel

Vodní součinitel (w/c) je ukazatelem kvality ztvrdlého cementového kamene. Je definován jako hmotnostní poměr účinného obsahu vody (w) k dávce cementu (c) v čerstvém betonu. Za předpokladu úplného zhutnění cementového tmelu, se zvyšující se hodnotou w/c klesá pevnost cementového

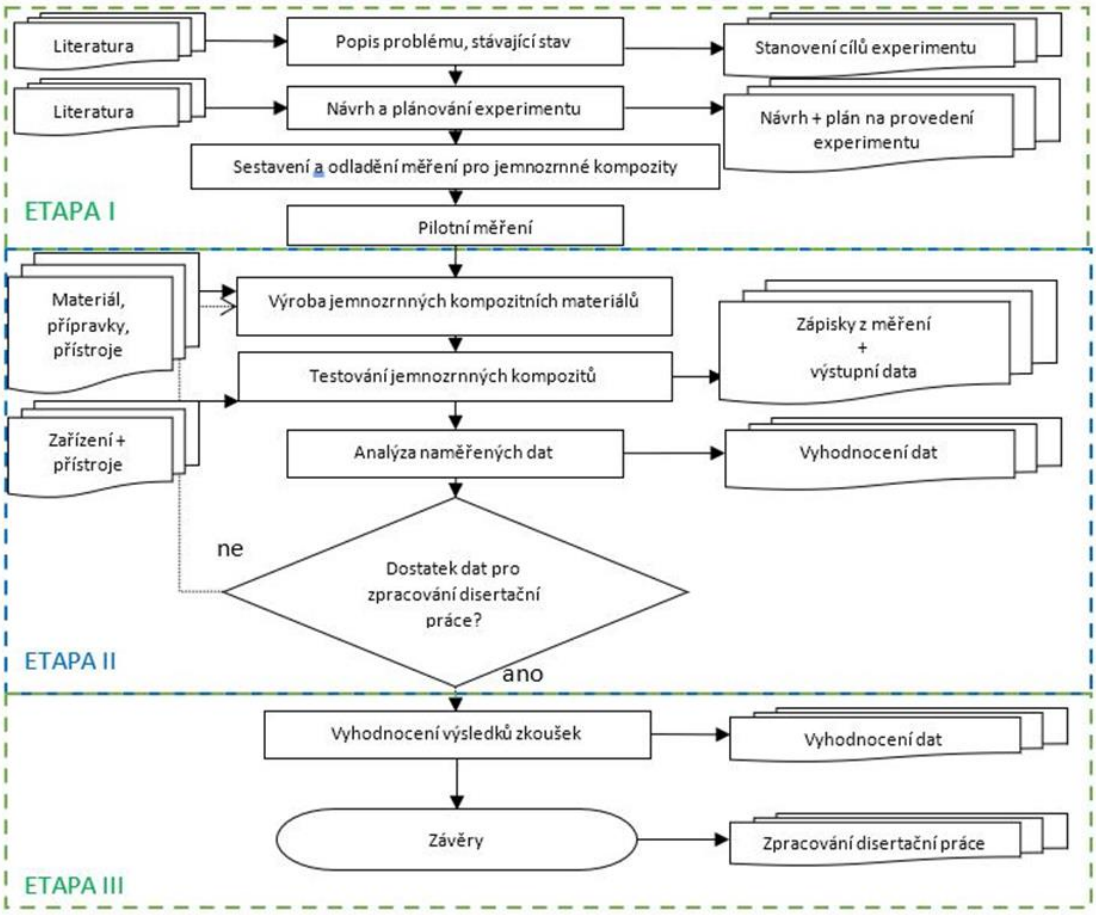
kamene, z důvodu jeho zvyšující se porozity (obsahu pórů). Při praktických aplikacích k úplné hydrataci cementu obvykle nedochází, neboť velká zrna cementu s velikostí nad 50 μm nezhydratují až do jádra v důsledku nerovnoměrného rozptýlení záměsové vody, která se ještě navíc ztrácí předčasným odpařováním. Proto sehrává důležitou úlohu v procesu hydratace cementu a vývoje pevnosti betonu i voda ošetřovací.

3.7 Hydratace cementu

Hydratace je tzv. proces změn dehydratovaného cementu po přidání vody. Průběh hydratační reakce je závislý na mineralogickém složení cementu, na jemnosti mletí, množství vody, teplotě a přítomnosti různých přísad. Hydratační reakce se účastní cca 15 % cementu, zbývající množství cementových zrn slouží jako plnivo, poněvadž se k nim voda přes vzniklé hydratační produkty již nedostane. Při reakci s vodou dochází k přeměně bezvodých fází na sloučeniny obsahující vázanou krystalovou vodu tzv. hydratační produkty. Jedná se o fáze nerozpustné ve vodě a stálé. Vzniklá směs vody a cementu se nazývá cementová pasta. V této směsi probíhá uspořádání částic a tvrdnutí celku. Uspořádání probíhá v prvních několika hodinách od vzniku směsi. Kašovitá hmota ztrácí svoji zpracovatelnost a postupně získává pevnost (tuhnutí). Tvrdnutí je důsledek hydratace vápenatých silikátů a aluminátů. Jedná se o proces, který je pozdější a dlouhodobější. Nově vzniklá pevná látka postupně nabývá vyšší pevnosti [25] [26] [27].

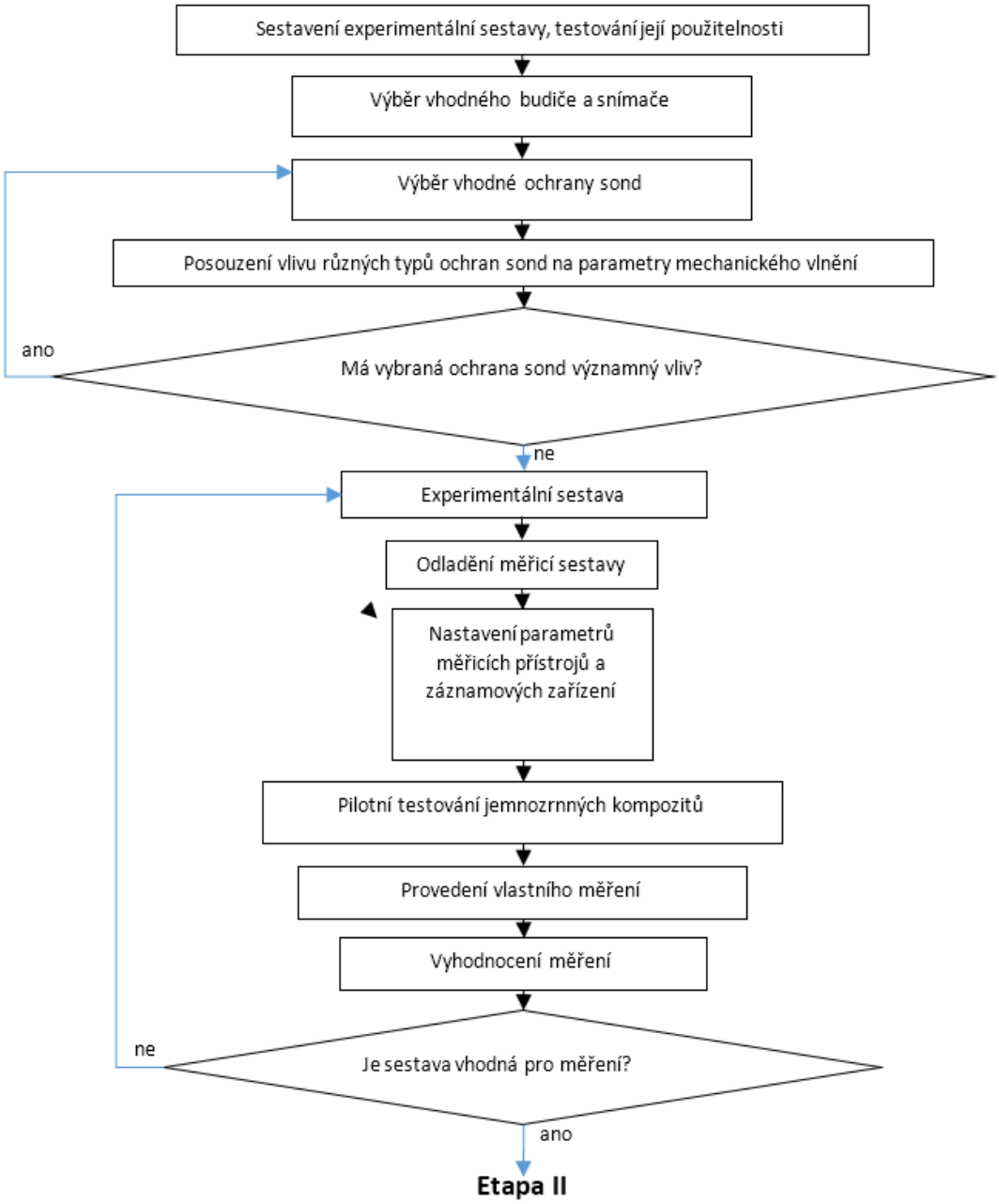
4. Metodika práce

Samotnou práci jsem rozdělila do tří základních etap. Tyto etapy a jejich další rozdělení na dílčí aspekty a problémy jsou pak vidět na následujícím schématu viz. Obr. 4.1. Jednotlivé etapy na sebe logicky i časově navazují.



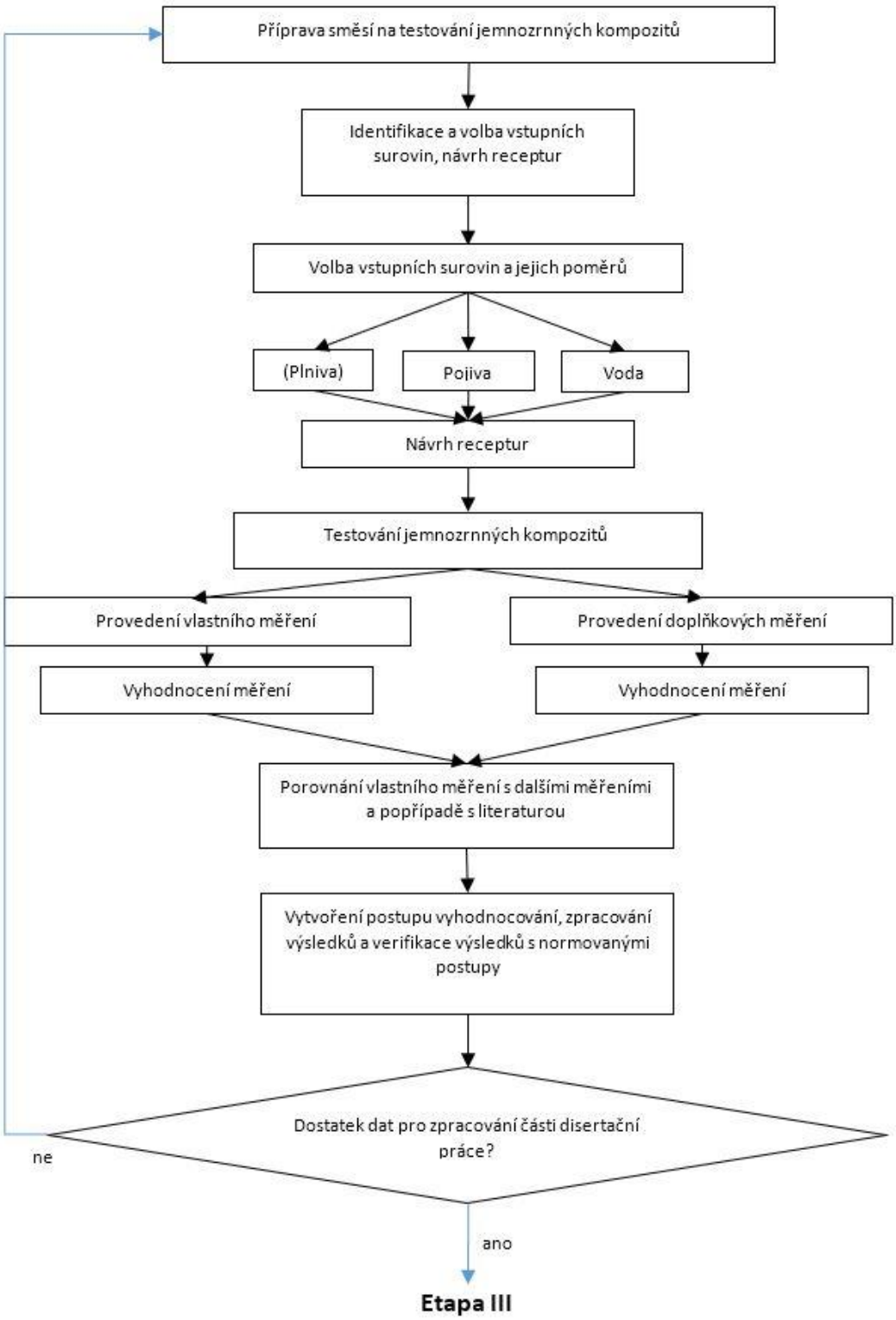
Obr. 4.1 Rozdělení práce na tři základní etapy a dílčí úkoly

V první etapě disertační práce jsem se zaměřila na studium literatury a na sestavení experimentální sestavy. V této etapě jsem se také věnovala kalibraci měření, jeho opakovatelnosti a pilotním měřením jemnozrnných kompozitních materiálů na bázi cementu. Schéma řešení ETAPY I je graficky znázorněno na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Detailní schéma první etapy

Důležitou součástí této etapy byl výběr vhodného budiče, snímače a jejich správná ochrana před poškozením, zejména vlivem vlhkosti. Přístrojové vybavení pro průchodovou ultrazvukovou metodu bylo složeno z dostupného přístrojového vybavení Ústavu fyziky, Fakulty stavební VUT v Brně. Po správném složení přístrojů následovalo pilotní měření jemnozrnných kompozitů s cílem odladění měřící sestavy a nastavení parametrů měření tak, aby byly tyto přístroje pro měření relevantní a pro testování všech jemnozrnných kompozitů stejné. Dále byl kladen důraz na zvolení takových parametrů měření, aby bylo možné následné výsledky měření vyhodnotit. Jednotlivé části měřícího řetězce byly vždy nejdříve jednoduše odzkoušeny a až následně vznikl výsledný výběr.

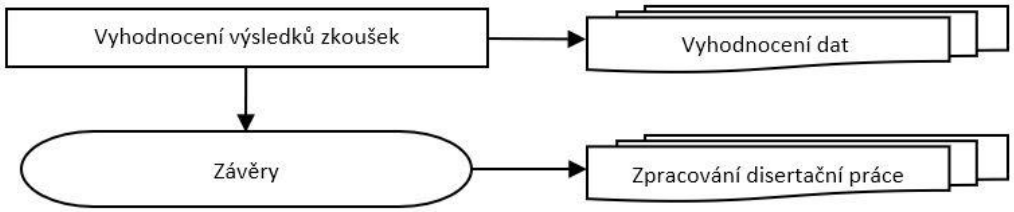


Obr. 4.3 Detailní schéma druhé etapy

V druhé etapě (viz Obr. 4.3) disertační práce jsem provedla volbu vstupních surovin a jejich identifikaci. Provedla jsem návrh receptur s přihlédnutím k hodnotě vodního součinitele a s ohledem na použitý typ cementu. V běžné betonářské praxi se pak volba druhu cementu odvíjí např. od teploty prostředí při výrobě a zpracování cementového kompozitu, účelu konstrukce,

požadované rychlosti tuhnutí a tvrdnutí, vývoje hydratačního tepla a expozičního prostředí, jenž bude působit na stavební konstrukci či vlastní prvek [28]. Provedla jsem měření, při kterých byly sledovány změny amplitudy a současně s měřením mechanického vlnění probíhalo i srovnávací měření teploty v kompozitech. Měřila se i teplota v okolí, protože hydratace cementu je i na této teplotě závislá a touto teplotou je ovlivněna i rychlost zrání cementového kompozitu. Měření teploty bylo provedeno na záznamové ústředně MS6D od firmy Comet System, s.r.o. Záznamové ústředny jsou určeny pro měření, záznam, vyhodnocení a následné zpracování vstupních elektrických veličin, které podléhají relativně pomalým změnám. Ve spojení s patřičnými snímači a převodníky jsou vhodné pro monitoring fyzikálních veličin (teploty, vlhkosti, tlaku, CO_2, napětí, proudu a dalších).

Po získání dostatečného množství dat, jsem začala celkové zpracování dat pro vytvoření disertační práce. Zvolený postup ve formě blokového schéma je pak na Obr. 4.4. Nejdůležitější v této fázi zpracování disertační práce bylo zvolit vhodné softwarové vybavení pro zpracování naměřených dat. Pro základní zpracování jsem využila skriptů v programovacím jazyce MATLAB, pro následné grafické zobrazení, pak kombinaci Microsoft Excel a EasyPlot.



Obr.4.4 Detailní schéma třetí etapy

4.1 Příprava a průběh samotného měření

Před začátkem měření bylo nutné připravit snímače teploty, tedy je napájet na přívodní kabely a tyto „živé“ spoje zaizolovat pomocí ochranného laku na osazené tištěné spoje od firmy ELCHEMCO [29]. Během schnutí ochranného laku, jsem si připravila formu pro měřený materiál. Otevřenou podstavu formy jsem potáhla potravinářskou folií a konce důkladně připevnila, aby byla forma důkladně vodotěsná a žádná voda nevytekla během tuhnutí materiálu. Vnitřek formy jsem vymazala vazelínou, kvůli pozdějšímu snazšímu odformování.

V případě, že již byla forma připravena, upevnila jsem přijímací piezoelektrický snímač do polystyrenové šablony, která tvoří podstavec pod formou. Snímací plochu jsem potřela tenkou vrstvou vazelíny a následně na něj a na polystyrenový podstavec usadila formu. Během usazování jsem odstranila všechny vzduchové bublinky, které mohly vzniknou mezi snímací plochou a potravinářskou fólií na dně formy. Poté jsem připravila budící

piezoelektrický snímač obdobným způsobem do polystyrenového víka. Jeho snímací plochu jsem opět pomazala tenkou vrstvou vazelíny a následně potáhla potravinářskou fólií, abych opět zabránila vniknutí vody k piezoelektrickému snímači. Vazelína v tenké vrstvě umožní lepší akustický vazební kontakt. Do polystyrenového víka jsem upevnila také připravený snímač teploty pro budoucí měření vnitřní teploty hydratujícího materiálu.

Před zahájením míchání měřeného materiálu jsem zapnula všechny přístroje a ověřila jejich funkčnost. Včasné zapnutí jednotlivých přístrojů před samotným měřením jsem provedla i kvůli proudovým špičkám během náběhu elektroniky, které by mohly následně ovlivnit některé měřené parametry. Poté jsem na generátoru Agilent 33220A nastavila parametry generovaného signálu, ale generování signálu zatím jsem v této fázi neaktivovala. Nastavila jsem také řízený výkonový zesilovač. Připravila jsem také počítač na přijímací straně, kdy na počátku měření jsem nastavilo maximální možné zesílení, těsně nad hranici rušivého šumu. Toto maximální zesílení mi umožnilo zachytit signály od téměř samotného počátku po naplnění formy.

Po sestavení formy a nastavení všech elektronických zařízení jsem namíchala konkrétní množství měřeného materiálu. Po namíchání jsem naplnila formu až po okraj. Následně jsem formu zaklopila polystyrenovým víkem a umístila teplotní snímač tak, aby nebyl v přímé cestě mechanickému vlnění, tedy tak, aby byl mimo osu piezoelektrických snímačů. Víko jsem následně přitížila, aby nemělo tendenci měnit svou polohu, zejména na počátku měření a spustila samotné měření. Zbytek namíchané směsi jsem vložila do identické formy (bez snímačů) v blízkosti měřené směsi. Z této formy jsem postupně v určité časy odebírala část hydratující směsi pro zastavení hydratace. Tyto části jsem následně použila na XRD analýzu.

V průběhu měření puls-echo metodou jsem manuálně hlídala zesílení signálu na přijímací straně. Signál byl z přijímacího piezoelektrického snímače rozdělen na tři kanály záznamového zařízení. Tyto kanály měly nastaveny jiné zesílení, které bylo odstupňované po 10 dB. Toto odstupňování je důležité, protože v průběhu hydratace se mění struktura materiálu a tím i množství energie která materiálem projde. V případě měření, kdy není možná manuální kontrola (např. přes noc) je k dispozici 20 dB rezerva, která se v přípravné fázi ukázala jako dostatečná. Při pozdějším vyhodnocení jsem tyto tři signály složila do jednoho výsledného. Slabé nebo přebuzené části signálu jsem ex-post odstranila.

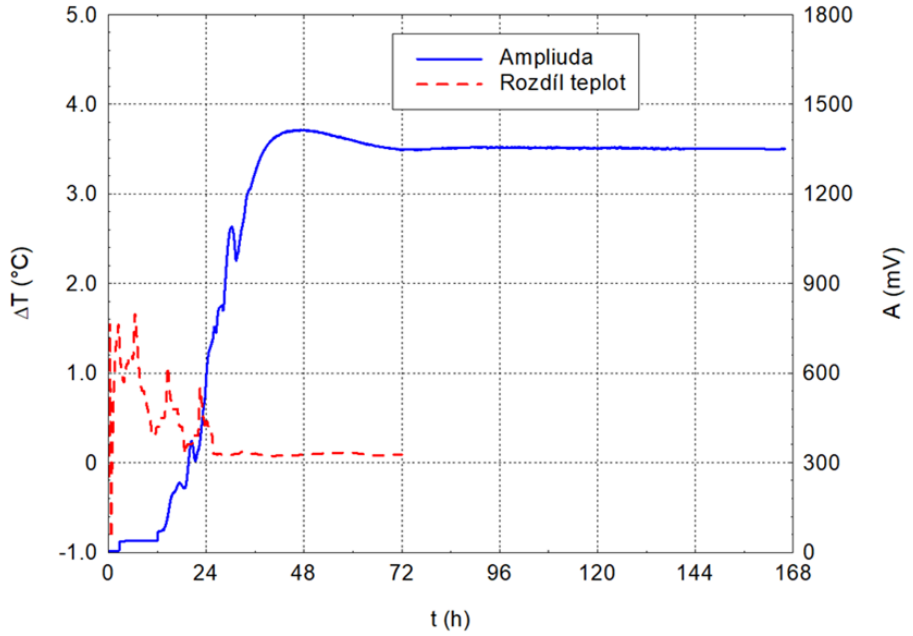
5. Výsledky experimentů

Jako základní sadu měření jsem po dohodě se školitelem zvolila cementové pasty v těchto vodních součinitelích: 0,33; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55 a 0,60. Cílem bylo zjistit chování generovaného mechanického vlnění, které procházelo

skrz tyto tuhnoucí pasty. Jako zkoumané parametry jsem si zvolila změnu amplitudu a dominantní frekvence u pulsního ultrazvukového mechanického vlnění a změnu teploty. Do základní sady měření jsem přibrala i samotnou vodu, a to zejména proto, abych si ověřila vodotěsnost sestaveného měřicího zařízení. Současně jsem také chtěla znát vliv případné změny teploty na sledované parametry mechanického vlnění. Doplňkově byly přidány i rentgenogramy v konkrétních časových okamžicích kvůli zjištění jaké minerály se právě vytvářely.

5.1 Cementová pasta w/c = 0,33 – ukázka výsledku ze základní sady

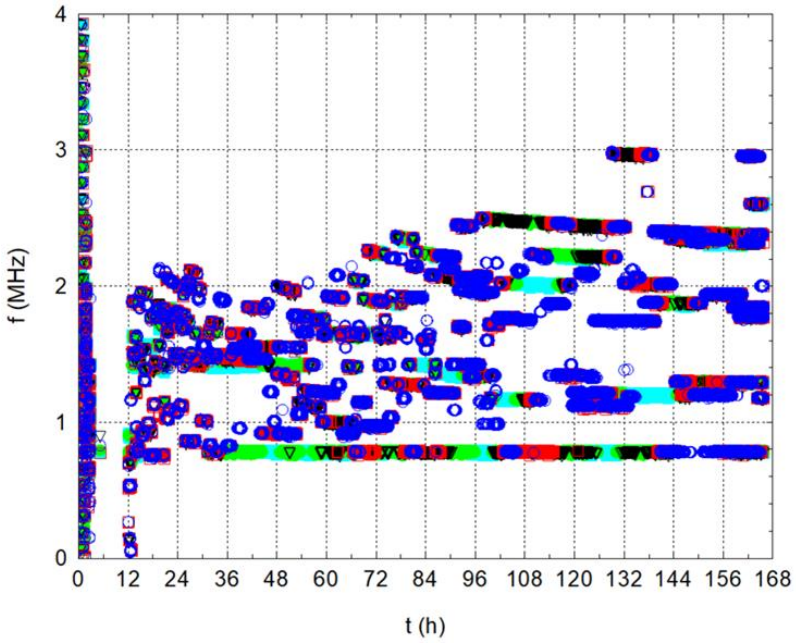
První cementová pasta měla vodní součinitel 0,33. Cementovou pastu s tímto vodním součinitelem je obtížnější rozmíchat bez přidání dalších přísad či příměsí. Pro účely experimentu jsem žádné další látky pro zlepšení zpracovatelnosti nepřidala, což se pravděpodobně projevilo ve výsledcích rentgenogramů viz Obr. 5.3.



Obr. 5.1 Závislosti rozdílu teplot a amplitudy na čase pro cementovou pastu s w/c = 0,33

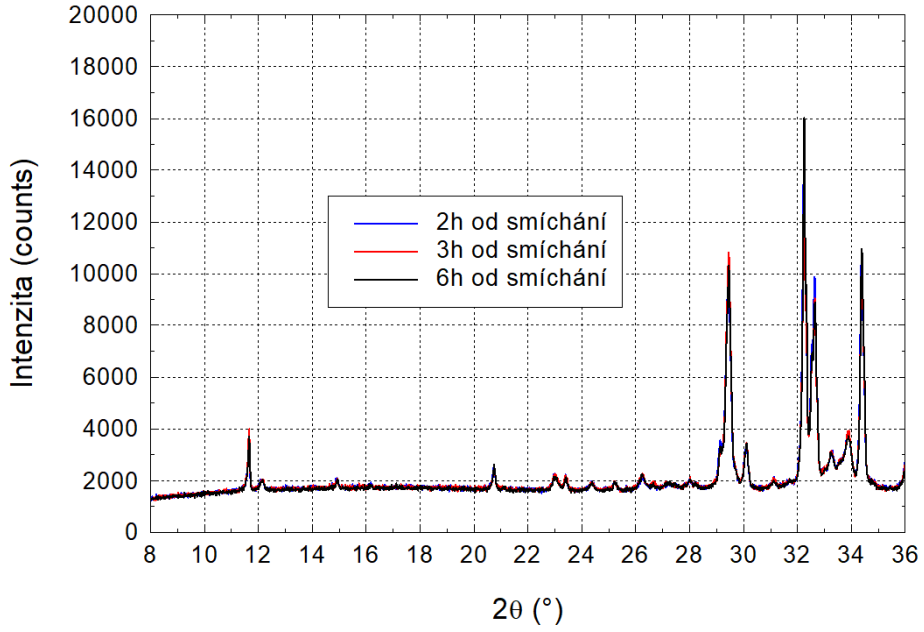
Nicméně na prvním grafu Obr. 5.1 jsou vidět závislosti rozdílu teplot (teplota uvnitř materiálu – teplota laboratorního prostředí) a amplitudy na čase. Na grafu je vidět poměrně strmý růst amplitudy mezi 12-40 h tento růst je způsoben vytvořením vazeb ve struktuře materiálu, které jsou lépe schopny přenášet generované vlnění na povrchu vzorku. K ustálení amplitudy dochází po 72 h od namíchání. Hodnoty vnitřní teploty v hydratujícím vzorku jsou opět ovlivněny ne příliš dobrým rozmícháním směsi. Kdy jsou vidět jednotlivé vrcholy, jak postupně hydratují nerozmíchané cementové shluky. Teplota uvnitř vzorku se ustálí na teplotě okolí po 24 hodinách od namíchání.

V případě vývoje dominantních frekvencí v hydratujícím vzorku je opět vidět nejvýznamnější linie na 850 kHz. Z grafu na Obr. 5.2 je patrné, že dominantní frekvence jsou citlivější na změny ve struktuře než samotná amplituda. Je to dáno především vytvářením vazeb ve struktuře materiálu. Jak postupně hydratují cementová zrna, tak se vytváří různé kmitny a uzly, čímž pádem jsou dominantní frekvence, resp. jejich pozice citlivější než amplituda mechanického vlnění, které prochází sledovanou strukturou. V případě vodního součinitele 0,33 pak dochází k ustálení po přibližně 100 h od namíchání, kdy jsou vidět linie kolem hodnot 1250 kHz, 1750 kHz a 2400 kHz.



Obr. 5.2 Vývoj dominantních frekvencí v čase pro cementovou pastu s w/c = 0,33

Na rentgenogramu Obr. 5.3 nejsou zcela patrná, která by byla očekávatelná. Tato situace pravděpodobně nastala nesprávným, resp. nedokonalým promícháním během přípravy vzorku s vodním součinitelem 0,33. Tedy i po šesti hodinách od smíchání je tu patrný sádrovec, který by se v tomto čase měl již měnit na ettringit a portlandit, ale tento proces nastal až později nebo není zcela patrný.



Obr. 5.3 Rentgenogramy cementové pasty w/c = 0,33 ve vybraných časech

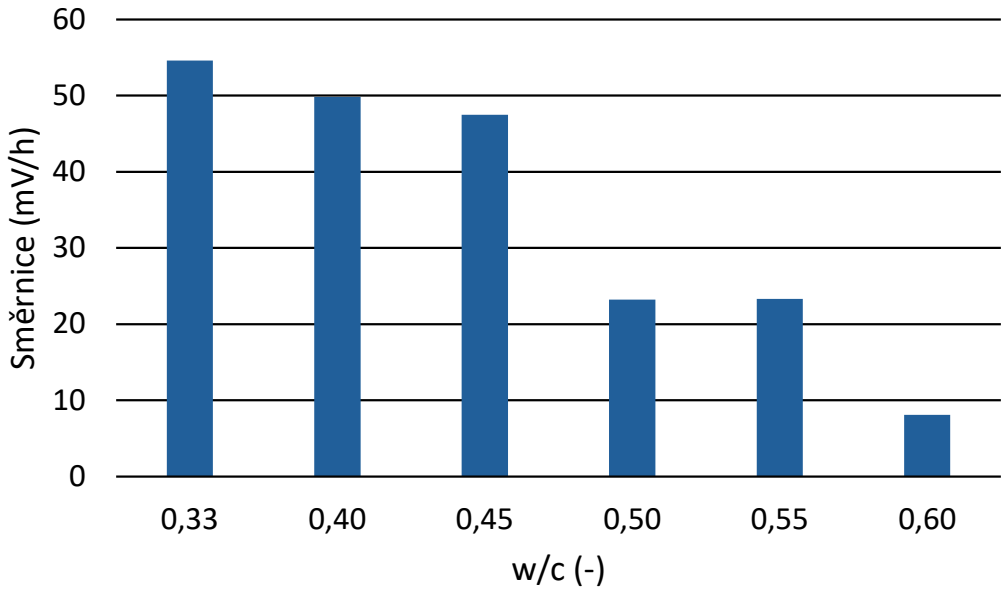
5.2 Souhrnné výsledky ze základní sady měření

V Tab. 5.1 jsou vyčísleny hodnoty směrnic, tedy sklonu nárůstu amplitudy od počátku růstu amplitudy po její prvotní ustálení. Vyšší hodnota ukazuje na strmější růst této amplitudy procházejícího signálu, což ukazuje na rychlejší tvorbu vnitřní struktury cementových past, a tedy její dřívější vytvrzení. Odchylka od linearity ukazuje na míru odklonu naměřeného signálu od přímky, která byla tímto nárustem amplitudy proložena. Větší hodnota poukazuje na „kostrbatější“ nárůst amplitudy tedy poukazuje na méně lineární nárůst amplitudy. Z tabulky je patrné, že maximální odchylka byla v případě většiny vodních součinitelů velice podobná. Nejvíce se ideální přímce přiblížila cementová pasta s vodním součinitelem 0,45, která se mi podařila nejlépe rozmíchat. Naopak nejhoršího odklonu naměřeného signálu od přímky dosáhla cementová pasta s vodním součinitelem 0,60, následována cementovou pastou s vodním součinitelem 0,40.

Tab. 5.1 Směrnice nárustu amplitudy a hodnota jejich odchylky od linearity

w/c	Směrnice (časový interval pro určení směrnice)	Maximální odchylka od linearity
-	mV/h	-
0,33	54,6 (12–40 h)	160
0,40	49,8 (12–43 h)	168
0,45	47,5 (10–37 h)	87,6
0,50	25,2 (12–63 h)	163
0,55	23,3 (13–60 h)	165
0,60	8,1 (24–144 h)	170

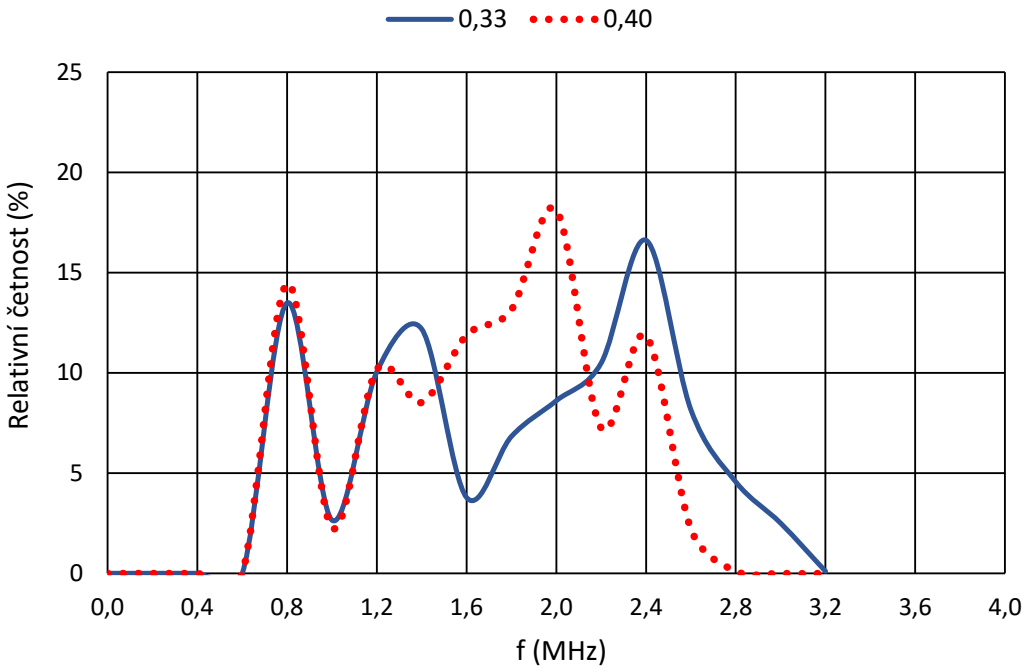
Na Obr. 5.4 jsou pak hodnoty směrnic zobrazeny v závislosti na vodním součiniteli a jsou tady zřetelnější rozdíly mezi jednotlivým cementovými pastami. Na sloupcovém grafu jsou patrné dvě skupiny cementových past jednu tvoří cementové pasty s vodními součiniteli 0,33, 0,40 a 0,45 a druhou pak cementové pasty s vodním součinitelem 0,50, 0,55 a 0,60.



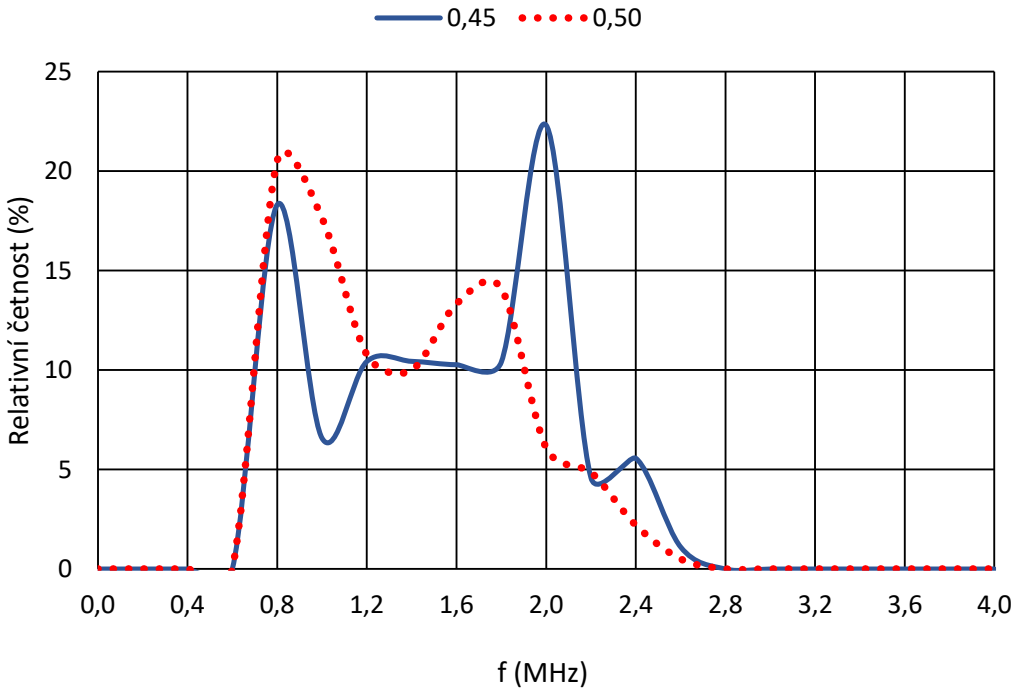
Obr. 5.4 Směrnice nárůstu amplitudy v závislosti na vodním součiniteli

V dalším porovnání jednotlivých směsí jsem se zaměřila na dominantní frekvence, kdy jsem z naměřených dat stanovila relativní četnosti dominantních frekvencí pro jednotlivé cementové pasty. V následujících grafických porovnání jsem kvůli větší přehlednosti vždy srovnávala dvě cementové pasty, které si byly blízké vodním součinitelem. Osy všech grafů jsou totožné na vodorovné ose je vždy frekvence v MHz a na svislé je relativní četnost v procentech. Současně u všech grafů je vidět rezonanční frekvence piezoelektrických prvků a to 850 kHz.

U první srovnávané dvojice na Obr. 5.5 jsou patrné jemné rozdíly v zaznamenaných dominantních frekvencích, kdy u cementové pasty s vodním součinitelem 0,33 jsou jen dvě významné dominantní frekvence u směsi s vodním součinitelem 0,40 jsou patrné tři významné dominantní frekvence. Tyto významné dominantní frekvence pak odpovídají hlavním frekvenčním liniím v předchozích kapitolách. Z následujícího grafu Obr. 5.6 je patrné, že i pro vodní součinitel 0,45 je těchto významných dominantních frekvencí větší množství než pro cementovou pastu s vodním součinitelem 0,50.



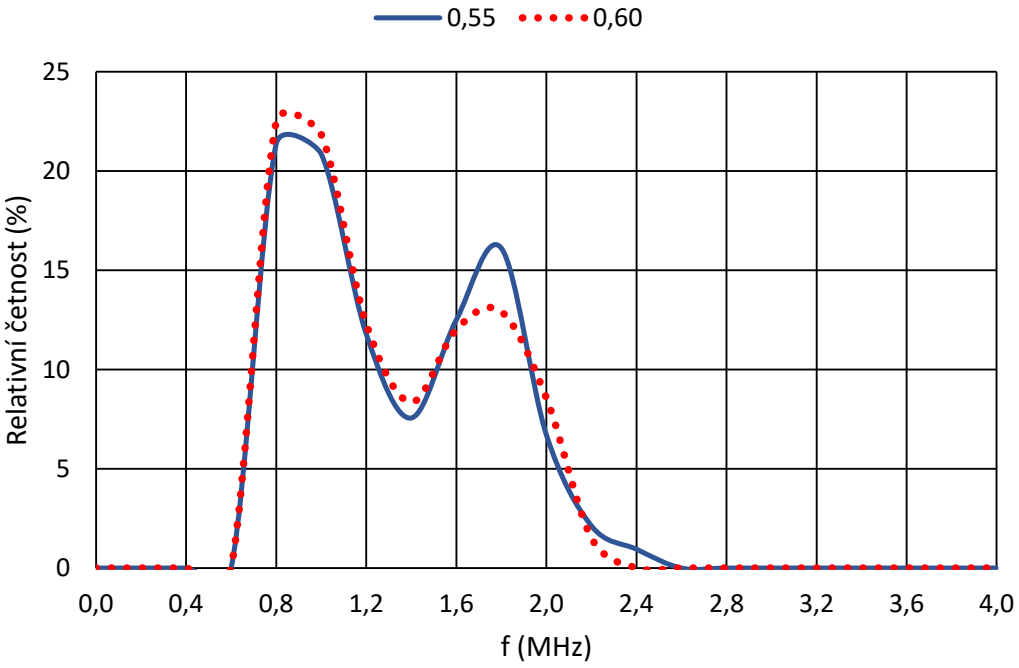
Obr. 5.5 Relativní četnosti frekvencí pro cementové pasty s w/c = 0,33 a w/c = 0,40



Obr. 5.6 Relativní četnosti frekvencí pro cementové pasty s w/c = 0,45 a w/c = 0,50

V případě posledního srovnávacího grafu Obr. 5.7 je tento trend ubývání významných dominantních frekvencí zřejmý, kdy u obou srovnávaných cementových past je pouze jedna významná dominantní frekvence. Z uvedených grafů je také patrné, že pokud má křivka ostrý vrchol je tato

dominantní frekvence jasně určitelná (např. 2 MHz v případě cementové pasty s vodním součinitelem 0,45 na Obr. 5.24). Zatímco na Obr. 5.7 je velmi kulatý vrchol u cementové pasty s vodním součinitelem 0,60 kolem hodnoty 1,7 MHz. Tato „kulatost či „špičatost“ u relativní četnosti dominantních frekvencí ukazuje na kvalitu vazby ve vnitřní struktuře hydratovaného materiálu. Tedy v případě kvalitnější struktury se při měření vyskytují jasně definované dominantní frekvence, na kterých struktura v průběhu hydratace kmitá. U nekvalitních vnitřních vazeb nelze pak jednoznačně určit na jaké frekvenci je vnitřní struktura materiálu rozkmitána.



Obr. 5.7 Relativní četnosti frekvencí pro cementové pasty s w/c = 0,55 a w/c = 0,60

6. Možný budoucí vývoj a přínos pro vědní obor a praxi

V rámci této práce jsem sestavila a odzkoušela laboratorní sestavu pro měření ultrazvukovou pulsní metodou. Tato sestava umožňuje stanovení změny amplitudy mechanického vlnění, které prochází tuhnoucím jemnozrnným kompozitem v mém případě cementovými pastami o různých vodních součinitelích. Současně jsem pomocí rychlé Fourierovy transformace určila i dominantní frekvence procházejícího mechanického vlnění a dala je do souvislosti s časovým vývojem hydratace cementových past. Pro budoucí vývoj a rozvoj aplikace této metody bude nutné provést další experimenty a výzkum na dalších typech kompozitů na bázi cementu nebo na bázi alkalicky aktivovaných materiálů. Pro následné využití zejména v laboratorní praxi může tato neinvazivní metoda být použita jako základní metoda určení stupně hydratace kompozitů. V dalších analýzách a vyhodnoceních by bylo vhodné se zaměřit na změny jednotlivých zaznamenaných signálů vlivem

složení jednotlivých směsí např. na změnu velikosti kameniva. Taktéž by bylo vhodné aplikovat tento postup i na jiné typy stavebních materiálů, např. na alkalicky aktivované kompozity, sádry apod.

Je ovšem nutné provést rekonfiguraci experimentální sestavy pro možnost provedení pilotních měření na hrubozrnných kompozitech. Tato rekonfigurace bude obnášet zejména zvětšení nádoby pro umístění čerstvé směsi, kdy v práci použitý Vicatův prstenec nebude vyhovovat svou velikostí rozměrům použitého kameniva. Pravděpodobně bude i nutné modifikovat piezoelektrický prvek, tak aby byl použitelný pro vyšší generované výkony. Modifikaci bude vhodné provést až po zjištění, jaké stávající piezoelektrické prvky je vhodné nahradit.

Výsledky této práce by měly:

- rozšířit možnosti a povědomí o akustických nedestruktivních metodách;
- podpořit snahu o širší využití měřicích experimentálních metod v oblasti nedestruktivního zkoušení ve stavebnictví v rané fází tuhnutí kompozitních materiálů;
- rozšířit možnost použití stávajícího přístrojového vybavení k neinvazivnímu stanovení počátku doby tuhnutí kompozitních materiálů za pomoci jednoduché sestavy přístrojů.

Provedené pilotní experimenty na základní sadě ukazují, že průchodová ultrazvuková metoda založená zejména na sledování vývoje amplitudy signálu v průběhu celého měření může nedestruktivním způsobem významně přispět k podrobnějšímu poznání chování kompozitních materiálů, zejména k dosažení hlubšího porozumění různým dějům probíhajících v rané fázi tuhnutí kompozitních materiálů a jejich vlivu na procházející mechanické vlnění. Abychom získali komplexní přehled o změnách struktury tuhnoucí směsi doplnili jsme řešení o frekvenční analýzu zaznamenaného mechanické vlnění. Tato analýza může být zejména vhodná pro relativně rychlé a levné určení prvotních vlastností nově vyvíjených směsí v základním výzkumu.

Závěry této práce by mohly v budoucnu dále rozvinout možnosti testování na dalších kompozitních materiálech, které nebylo možné ověřit v rámci této disertační práce, ať již z časových nebo jiných důvodů. Tato práce by měla být základem pro další navazují práce, zaměřené hlouběji na interpretaci výsledků nebo na rozšíření zkoušených materiálů, které nebyly předmětem této práce.

Dále předpokládám, že využitím této metody nebo její modifikace získáme nové poznatky o chování jemnozrnných kompozitních materiálů na bázi cementu v rané fázi tuhnutí. Tato metoda by se dala aplikovat i v řadě dalších

vědních oborů, které nemusí primárně souviset se stavebnictvím. Zajímavá se ukazuje možnost využití průchodové ultrazvukové metody například při testování plasticity zemin.

7. Závěry

Disertační práce se zabývá aplikací vybraných akustických metod s hlavním zaměřením na průchodovou pulsní ultrazvukovou (PPU) metodu a okrajově také metodou akustické emise v průběhu tuhnutí a tvrdnutí jemnozrnných cementových kompozitů. Bylo ověřeno, že procesy, které probíhají uvnitř cementových kompozitů při jejich hydrataci ovlivňují nejen změnu vnitřní teploty, která souvisí s vývojem hydratačního tepla, ale i se změnou amplitudy a frekvencí mechanického vlnění, které prochází tuhnoucí materiálem. Tyto změny souvisí s vnitřní elasticitou vytvářených vazeb. Byl nalezen a na základě experimentů popsán časový vztah mezi vývojem vnitřní teploty a vývojem amplitudy a frekvence mechanického vlnění v průběhu rané fáze tuhnutí cementových past. PPU metoda se jeví jako vhodný doplněk či možná náhrada monitorování procesu tuhnutí a tvrdnutí v raném stádiu stavebních kompozitů Vicatovým přístrojem zejména v laboratorní prostředí.

Hlavní výhodou PPU metody je její nedestruktivní a neinvazivní charakter. Měření mohou být opakovatelná a není nutné k přípravě testovacího vzorku čerstvou směs upravovat. Další výhodou této metody je její využití pro měření nejen cementových past a malt, ale i po drobných úpravách hrubozrnných betonů, což může umožnit prohloubení znalostí ve vztahu mezi chováním samotného pojiva a celého kompozitu. Měřící sestavu je možné použít i pro měření tuhnoucích materiálů, které nejsou na bázi cementu.

Pro analýzu chování mechanického vlnění procházejícího jemnozrnným cementovým kompozitem v průběhu rané fáze hydratace jsem sestavila a odzkoušela funkční sestavu pro aplikaci PPU metody na měření těchto materiálů. Měřicí řetězec jsem poskládala z dostupného vybavení na Ústavu fyziky, Fakulty stavební VUT v Brně. Vysílací budící část měřiciho řetězce je nyní složena z generátoru signálu, výkonového zesilovače tohoto signálu a piezoelektrického budiče. Přijímací část měřicího řetězce je pak složena z piezoelektrického snímače, zesilovače signálu na přijímací části a záznamového zařízení. Vybuzený signál prochází měřeným vzorkem, kde se modifikuje na základě změny struktury uvnitř měřeného vzorku.

Zatím významnou nevýhodou je celková cena přístrojového vybavení a prozatímní nemožnost použití pro reálné konstrukce. Celková cena by mohla být snížena použitím méně složitých přístrojů, zejména pak na přijímací straně, kde byl šlo záznamové zařízení nahradit levnější zařízením postavené např. na mikropočítači Raspberry Pi. Během sestavování měřicí sestavy jsem vyřešila tyto vybrané zásadní komplikace:

- Ochrana piezoelektrických snímačů před vysokou vlhkostí směsi – vyřešila jsem dostatečným zaizolováním pomocí fólie a utěsněním formy pro vzorek.
- Vliv dodatečné proti vlhkostní ochrany na generovaný a přijímaný signál (v případě, že snímače nejsou přímo připevněny k povrchu mohou vznikat na přechodech mezi jednotlivými vrstvami nežádoucí odrazy) – vyřešila jsem nanesením vazebního prostředku mezi jednotlivé vrstvy a odstraněním vzduchový bublinek, které vznikaly při použití fólie na snímacích plochách piezoelektrických prvků.
- Snižování zesílení signálu na přijímací straně v průběhu procesu tuhnutí. Tato komplikace vzniká během toho, jak se postupně vytváří pevná vnitřní struktura, kvůli které se amplituda zvyšuje až do té míry, kdy přesáhne rozsah maximálních hodnot, které je záznamové zařízení schopno detekovat – vyřešila jsem kvalitním plánováním časů míchání směsí a následně hlídáním této úrovně. Pomohla jsem si také rozbočením signálu na tři kanály záznamového zařízení, které měly nastavenou jinou úroveň zesílení (zesílení kanálů bylo odstupňováno po 10 dB), takže vždy minimálně jeden kanál chytl nějakou část měření. Tato komplikace by šla vyřešit jiným typem zesilovacího prvku s logaritmickým charakterem nebo automatickou změnou rozsahů, které současné zařízení neumožňuje.
- Dostatečnou energii budícího pulsu, aby mechanické vlnění prošlo i samotnou vodou – vyřešila jsem postupnou obměnou zařízení a zkoušením, až jsem dosáhla požadovaného výsledku, kdy jsem našla správnou konfiguraci, tak aby i samotná voda byla měřitelná.

Průchodová pulsní ultrazvuková metoda pracuje na principu průchodu elastické vlny materiálem na druhou stranu sledovaného vzorku. Z provedených experimentů na cementových pastách s různým vodním součinitelem, tedy na materiálu, který je úplně tím nejzákladnějším materiálem pro současné stavitelství. Mohu učinit tyto závěry:

- na úplném počátku ihned po smíchání není možné určit dominantní frekvence vzhledem k absenci vazeb, které by byly schopné mechanické vlnění přenést;
- významnější růst amplitudy signálu přichází v okamžiku vzniku tuhé struktury, kdy vzniká dlouhovláknitý C-S-H gel a krystaly portlanditu, taktéž se formují základní mikrostrukturní prvky cementového kamene;
- nárůst amplitudy má různý sklon, podle hodnoty vodního součinitele, jak je vidět na Obr. 5.4 strmější sklon odpovídá rychlejší tvorbě hydratačních produktů – tvorba pevné struktury materiálu;
- k ustálení amplitudy dochází po vytvoření tuhé fáze vnitřní struktury materiálu;

- ihned po začátku měření jsem zaznamenala frekvenční šum, z kterého nebyly patrné žádné významné dominantní frekvence;
- při vyhodnocování frekvenčních spekter jsem zaznamenala určité frekvenční linie tvořené významnými dominantními frekvencemi – poté co vnitřní struktura směsí dosáhla určité fáze pevnosti, kdy, již mohly vnitřní vazby kmitat na určitých frekvencích;
- frekvenční linie byly zřetelnější, tedy jasně rozpoznatelné u směsí s nižšími vodními součiniteli, což naznačuje na tvorbu struktury, které je schopna se rozkmitat na konkrétních frekvencích.

Při řešení projektů jako řešitelka nebo jako spolupracovnice na projektech GA ČR jsem se zaměřila na měření metodou akustické emise v průběhu tuhnutí a tvrdnutí jemnozrnných směsí na bázi cementu. Z těchto experimentů lze vyslovit tyto závěry:

- měření čerstvých směsí je velmi složité, kvůli nemožnosti přichytit snímač akustické emise na povrch vzorku. Proto je nutné použít vlnovod, nebo jako v mém případě vlnovod se snímačem přímo spojit; další komplikací tohoto měření je hmotnost takovéhoto snímače, který se noří do čerstvé směsi, proto je nutné jej zachytit nejlépe pružným mechanismem, aby se při případném bobtnání neobjevovaly falešné signály, které mohou vzniknou mezi vlnovodem a tuhnoucí směsí díky tření;
- vyšší počet událostí akustické emise se objevuje v okamžiku změny objemu nebo struktury dané směsi;
- zatím bylo velmi složité od sebe odlišit signály pocházející z tvorby hydratačních produktů a signály vznikající při tvorbě mikrotrhlin;
- směsi zalité olejem, vykazovaly nižší počet událostí akustické emise než směsi, které byly ponechány volně na vzduchu, a to z důvodu kvalitnější hydratace a později olej bránil vytvoření mikrotrhlin vznikající samovysycháním;
- směsi zalité olejem dosáhly vyšší vnitřní teploty než směsi, které byly ponechány volně na vzduchu, a to z důvodu ochlazování povrchu směsi vlivem odpařováním vody;

Z uvedených závěrů k provedeným experimentům, je zřejmé, že průchodová pulsní ultrazvuková metoda je použitelná pro identifikaci počátku hydratace nedestruktivním a neinvazivním způsobem u sledovaných směsí. Mým cílem bylo poskládat měřící sestavu a stanovit metodiku zkoušení. Podařilo se mi odladit měřící postupy a dovést měření k použitelnosti. Budoucí vývoj by mohl být následující:

- drobné úpravy mohou rozšířit aplikaci metody i na hrubozrnné materiály nejen na bázi cementu;

- bez větších úprav lze uvedenou metodu již nyní použít i pro jemnozrnné materiály, které jsou bez použití cementu ať už se bude jednat o sádry, nebo alkalicky aktivované materiály;
- vývoj měřící sestavy by se teoreticky mohl zaměřit na použití pouze jedné sondy přepínané na budič a snímač, otázkou zůstává komplikovanost „výboje“ tedy generovaného signálu sondy příp. zatížením. Ovšem toto by vyžadovalo další výzkum;
- využít jednouchých mikropočítačů k více automatizovanému měření s minimálním zásahem člověka a tím eliminovat určitou chybovost;
- vytvoření logaritmického zesilovače nebo snímače.

8. POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] ZHAO, Kaiyue, Peng ZHANG, Shanbin XUE et al. Quasi-elastic neutron scattering (QENS) and its application for investigating the hydration of cement-based materials: State-of-the-art. *Materials Characterization*. 2021, **172**(2021), 1-12. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2021.110890

[2] DUGGAL, S. K. *Building Materials*. 1st Edition. London: Taylor & Francis, 2007. ISBN 90-5410-764-2.

[3] NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5th Edition. Pensylvania: Trans-Atlantic Publications, Inc., 2012. ISBN 978-0273755807.

[4] DROUBI, Mohamad G., Nadimul H. FAISAL, Fraser ORR, John A. STEEL a Mohamed EL-SHAIB. Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017, **134**(2017), 28-37. ISSN 0143974X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcsr.2017.03.012

[5] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1st Edition. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

[6] LEE, Chang Hoon, Kenneth CLARK HOVER a Anna LEE. Difference in Setting Behavior between Prepared and Sieved Mortars in the ASTM C403 Time of Setting Test. *Journal of Testing and Evaluation*. 2015, **43**(4), 803-811. ISSN 00903973. Dostupné z: doi:10.1520/JTE20130301

[7] KOPEC, Bernard, Josef NEUGEBAUER a Pavel MAZAL. *Ultrazvukové zkoušení: studijní příručka*. 1st Edition. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, ve spolupráci s Českou společností pro NDT, 2019. ISBN 978-80-214-5722-5.

[8] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1st Edition. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.

[9] Vikasonic - Measuring the Early Setting and Hardening with Ultrasonic Waves. In: *Schleibinger Testing Systems* [online]. web: Schleibinger, 2022 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Setting_and_Maturity:Ultrasonic_Setting_Measurement

[10] *ČSN 73 1332 Stanovení tuhnutí betonu*. Neznámé. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986.

[11] *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance: ASTM C403*. 1st Edition. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

[12] *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle: C191-13*. 1st Edition. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

[13] *ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu: Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Neznámé. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 2007.

[14] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. 1st Edition. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

[15] PAZDERA, Luboš, Jaroslav SMUTNÝ a Pavel MAZAL. *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. 1st Edition. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004. ISBN 80-214-2802-3.

[16] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. 1st Edition. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0123-3.

[17] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. 1st Edition. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.

[18] *Measurement Good Practice Guide No. 52: Determination of residual stresses by X-ray diffraction*. Teddington, Middlesex, United Kingdom: National Physical Laboratory, 2005, . ISSN 1368-6550.

[19] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Jiří BYDŽOVSKÝ, Ámos DUFKA a Martin SEDLMAJER. *Památkový postup: Obnova poškozeného betonu ŽB konstrukcí* [online]. Brno, 2020 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: https://www.npu.cz/cs/e-shop/69599-pamatkovy-postup-obnova-poskozeneho-betonu-zb-konstrukci. Technické a průmyslové památky, Metodiky, Památková péče. VUT v Brně - Fakulta stavební.

[20] SCRIVENER, Karen, Ruben SNELLINGS a Barbara LOTHENBACH, ed. *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. 1st Edition. London: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4987-3865-1.

[21] KRAUS, Ivo. *Úvod do strukturní rentgenografie: Celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické, studijní obor 39-39-8 jaderné inženýrství*. 1st Edition. Praha: Academia, 1985. ISBN 21-014-85.

[22] GIACOVAZZO, Carmelo, ed. *Fundamentals of Crystallography*. 3rd Edition. Oxford: Oxford University Press, 2011. ISBN 978-0-1995-7365-3.

[23] CHUNG, Deborah D. L. *Composite materials: science and applications*. Second edition. London: Springer-Verlag, 2010. Engineering materials and processes. ISBN 978-184-8828-315.

[24] SMRČKOVÁ, Markéta. *Hybridní kompozity kombinující krátká houževnatá vlákna a částicové plnivo v polymerní matrici* [online]. Brno, 2011 [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/6096. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Petr Poláček.

[25] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1st Edition. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-807-6007-1.

[26] TAYLOR, Harry F. W. *Cement chemistry*. 2nd ed. London: Telford, 1997. ISBN 07-277-2592-0.

[27] LI, Zongjin, Xiangming ZHOU, Hongyan MA a Dongshuai HOU. *Advanced Concrete Technology*. 2nd edition. New Jersey: WILEY, 2022. ISBN 978-1-119-80625-7.

[28] NOVÁK, Jaroslav. *Nauka o materiálech 10: stavební materiály I*. 1st Edition. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1619-6.

[29] GM electronic. In: *GM electronic* [online]. web: GM electronic, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: https://www.gme.cz/v/1503515/elchemco-lak-ochranny-na-osazene-desky-spoju-50ml

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá aplikací nedestruktivních metod, zejména pak průchodovou ultrazvukovou metodou a metodou akustické emise, v průběhu tuhnutí a tvrdnutí jemnozrnných cementových kompozitů. V rámci disertační práce byla sestavena a odzkoušena měřicí soustava pro aplikaci průchodové ultrazvukové metody na jemnozrnné cementové kompozity v průběhů rané fáze jejich tuhnutí. Měřicí sestava byla odzkoušena na ucelené základní sadě cementových past s různými vodními součiniteli. Naměřené výsledky pak ukázaly jednoznačné rozdíly mezi jednotlivými měřenými směsmi. V rámci řešených projektů je pak představen vylepšený způsob měření metodu akustické emise v průběhu tuhnutí cementových kompozitů. Kdy je ukázán nový způsob měření během takto složitého procesu, který odstraňuje neduhy předchozích postupů. Výsledky jednotlivých experimentů jsou následně prezentovány grafickou formou. V rámci disertační práce je i nastíněn možný budoucí vývoj průchodové ultrazvukové metody při aplikaci na tuhnoucí kompozity.

ABSTRACT

The dissertation works with the application of non-destructive methods, particularly the pass-through ultrasonic and acoustic emission methods, in the solidification and hardening of fine-grained cement composites. Within the framework of the dissertation, a measurement system for applying the pass-through ultrasonic method to fine-grained cement composites during the early phase of their solidification was built and tested. The measurement set-up was tested on a comprehensive base set of cement pastes with different water coefficients. The measured results then showed apparent differences between the different mixtures measured. An improved method for measuring acoustic emission during the setting of cement composites is then presented in the context of the projects addressed. When a new measurement method during such a complex process is shown, it eliminates the ills of previous procedures. The results of the individual experiments are then presented in graphical form. Possible future developments of the through-hole ultrasonic method in its application to solidifying composites are also outlined within the dissertation.

MICHAELA HODULÁKOVÁ – životopis

Datum narození: 19. 02. 1991

Adresa: Želechovická 1500, 783 91 Uničov

E-mail: hodumich@gmail.com

Tel.: +420 736 402 992

Vzdělání

2017–dosud **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební (obor studia – Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství)**, doktorský studijní program

2015–2018 **Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství (obor studia – Realitní inženýrství)**, magisterský studijní program

- Diplomová práce: "Analýza realitního trhu s hostinskými zařízeními v Olomouci"

2014–2015 **Riga Technical University, Lotyšsko** – studijní pobyt v rámci programu Erasmus+

2010–2017 **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební (obor studia – Konstrukce a dopravní stavby)**, bakalářský a magisterský studijní program

- Diplomová práce: "Experimentální ověření modulu pružnosti v tlaku jemnozrnných kompozitů na bázi silikátových pojiv"
- Bakalářská práce: "Modul pružnosti přírodního kamene"

Pracovní zkušenosti

01. 04. 2024 – dosud **Správa železnic, státní organizace** – Stavební správa vysokorychlostních tratí (Olomouc) - úsek rozvoje, oddělení prostorových dat a architektury – systémový specialista

15. 03. 2022 – 31. 03. 2024 **Správa železnic, státní organizace** – Stavební správa vysokorychlostních tratí (Olomouc) - úsek příprava oblast jih, oddělení vedení přípravy staveb J – přípravář stavební akce

20. 10. 2020 – 28. 02. 2022 **Magistrát města Olomouce**, odbor stavební – oddělení státní správy na úseku pozemních komunikací (Olomouc) - referent

18. 01. 2020 – 05. 08. 2020 Práce v zahraničí (Nový Zéland)

24. 04. 2019 – 31. 12. 2019	**Kareta s. r. o.** (Olomouc), administrativní práce
01. 01. 2018 – 31. 12. 2019	**Vysoké učení technické v Brně** (Brno), technik pro výzkum a vývoj
01. 01. 2016 – 31. 01. 2016	**VARS BRNO a. s.** (Brno), operátor při vytěžování poruch místních komunikací
Letní prázdniny 2012–2017	Práce v zahraničí (Velká Británie, Kanada)

Dobrovolnická činnost

2018, 2019	22. a 23. MFDF Ji.hlava (Jihlava, Česká republika)
2017	Škola San Martín (San Martín, Kostarika) + Hostel a pekařství Vida Sana (Playa Chiquita, Kostarika)

Dovednosti a znalosti

Jazyky:	anglický (B2), německý (začátečník), ruský (začátečník)
Práce na PC:	Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint), Autocad, Railcad, Scia Engineer

Řidičské oprávnění: B

Zkoušky a certifikáty:

Osvědčení o splnění:	ZOZ – obecná + zvláštní část (Územní rozhodování, stavební řád a vyvlastnění)
Certifikát:	čtyřdenní školení projektový manažer – Smluvní podmínky FIDIC

Zájmy

Sport (turistika, lezení, běžkování), čtení, cestování