



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

**Vliv složení betonu a pohybu bednění na vodorovné tlaky na
bednění**

**Effect of concrete composition and movement of formwork on
horizontal pressures on the formwork**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Vojtěch Zacharda

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.

Praha, 2022

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Vojtěch Zacharda

Název disertační práce: Vliv složení betonu a pohybu bednění na vodorovné tlaky na bednění

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Petra Štemberka, Ph.D. a školitelů specialistů prof. Ing. Jiřího Němeččka, Ph.D., DSc. a Mgr. Yulie Khumurovské, Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

SGS16/135/OHK1/2T/11 – Vývoj, modifikace a modelování mikrostruktury stavebních materiálů

SGS17/048/OHK1/1T/11 – Vývoj inovativních metod pro vyšetřování klimatických vlivů na cementové kompozity

SGS18/041/OHK1/1T/11 – Vývoj nových metod pro výzkum vlivu kombinací vnějších účinků na odezvu betonu

SGS18/114/OHK1/2T/11 – Mikrostrukturální popis a modelování degradačních procesů v cementových materiálech

SGS20/107/OHK1/2T/11 – Vývoj pokročilých mikromechanických testů a modelování cementových kompozitů

GA17-05360S – Lomové vlastnosti amorfních a krystalických materiálů stanovené pomocí nanoindentace a FIB v malém měřítku

FW01010521 – Mikrostrukturální modifikace samozhutnitelných betonů pro snížení tlaků na bedněn

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., D.Eng. za jeho odborné vedení, cenné připomínky a užitečné rady při vypracování disertační práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Jiřímu Němečkovi, Ph.D., DSc. za odborné vedení po celou dobu mého studia, Ing. Jiřímu Němečkovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Trávníčkovi, Ph.D. za pomoc při experimentech a Mgr. Yulii Khmurovské, Ph.D. a Ing. Michaele Frantové, Ph.D. za korekturu mé práce.

Dále bych rád poděkoval firmě Skanska a.s. za pomoc s laboratorními zkouškami s SCC a za jejich provozní odzkoušení na betonárně i na monolitických konstrukcích.

Velké poděkování patří mé ženě Zuzaně a celé mé rodině, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia. Za tuto podporu jim moc děkuji.

Abstrakt

S rostoucími náklady na stavební materiály a technologie výstavby budov se v poslední době hledají nové možnosti, jak snížit konečnou cenu za provedení díla. Jednou z možných cest, jak zrychlit výstavbu a zlevnit její provádění, je ve větší míře využívat pro svislé konstrukce samozhutnitelné betony. Tyto betony mají ale jednu zásadní nevýhodu a to, že oproti běžným betonům zvyšují boční tlak na bednění. To s sebou nese druhotné náklady na bednění. Využitím speciálních přísad lze dosáhnout snížení bočního tlaku u samozhutnitelných betonů. Vystávají však otázky typu: Jaké přísady lze použít? Jak účinné tyto přísady jsou? Jaký je rozdíl v bočních tlacích oproti normálnímu samozhutnitelnému betonu? Mají tyto přísady vliv na mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu a jdou modifikované betony použít v reálném provozu? Tato práce si dala za cíl odpovědět na některé z výše vyřčených otázek.

Práce se tedy zabývá zkoumáním mechanického chování betonu od mikroúrovně až po makroúroveň. Provedením několika experimentů v laboratorních podmínkách bylo zjištěno, jaký vliv mají vybrané přísady na mikrostrukturu a mikromechanické vlastnosti cementových past. Dále byly provedeny experimenty zjišťující reologické vlastnosti a chování cementových past. V konečné fázi pak byly měřeny boční tlaky jak na cementových pastách, tak i na betonech na reálných podmínkách na stavbě. Výsledky byly navíc doplněny o jednoduchý numerický model pro porovnání s naměřenými hodnotami ze zkoušky rozlití cementových past.

Klíčová slova:

Boční tlak, viskozita, tixotropie, nanojíl, sepiolit, metakaolin, reologie.

Abstract

With the increasing costs of construction materials and technologies for building construction, new possibilities are recently being sought to reduce the final price for the execution of the construction work. One of the possible ways to speed up construction and make it cheaper is to use self-compacting concrete to a greater extent for vertical structures. However, these concretes have one fundamental disadvantage which is, when compared to ordinary concretes, they increase the lateral pressure on the formwork. This entails secondary costs for formwork. The use of special additives can reduce the lateral pressure in self-compacting concrete. However, other questions arise, such as: what additives can be used, how effective are these additives, what is the difference in lateral pressures compared to normal self-compacting concrete, do these additives affect the mechanical properties of hardened concrete, or can modified concrete be used in real operation? This thesis intends to answer some of the above-mentioned questions.

The work within the scope of this thesis dealt with the investigation of behavior from the micro to the macro level. By carrying out several experiments in laboratory conditions, the influence of selected additives on the microstructure and micromechanical properties of cement pastes was investigated. Furthermore, experiments were conducted to determine the rheological properties and the behavior of cement pastes. In the final phase, lateral pressures were measured both on cement pastes and on concrete in situ under real construction conditions. The results were additionally supplemented with a simple numerical model for comparison with the measured data from the cement paste flow test.

Keywords:

Lateral pressure, viscosity, thixotropy, nanoclay, sepiolite, metacaolin, rheology.

Obsah

1	Úvod.....	13
1.1	Motivace.....	13
2	Problematika bočních tlaků.....	15
2.1	Reologie a reologické vlastnosti	15
2.1.1	Viskozita.....	15
2.1.2	Newtonské kapaliny	16
2.1.3	Nenewtonské kapaliny.....	16
2.2	Reologické modely.....	20
2.3	Fenomén tixotropie	21
2.4	Boční tlaky samozhutnitelných betonů na bednění.....	22
2.5	Numerické metody pro modelování.....	24
2.5.1	Metoda oddělených prvků (DEM).....	24
2.5.2	Metoda Lattice Boltzmann (LBM).....	25
2.5.3	Modelování rozlivu cementových past.....	26
3	Cíle.....	27
4	Experimentální metody	29
4.1	Testované materiály	30
4.1.1	Materiály z první série experimentů.....	30
4.1.2	Materiály z druhé série experimentů	31
4.1.3	Materiály ze třetí série experimentů	34
4.2	Experimenty na mikroúrovni	34
4.2.1	Nanoindentace	35
4.2.2	Mikrostrukturální analýza	37
4.3	Experimenty na makroúrovni.....	41
4.3.1	Mechanické vlastnosti cementových past	41

4.3.2	Rozliv cementových past a malt	43
4.3.3	Viskozita	44
4.3.4	Boční tlak cementových past	47
4.3.5	Boční tlaky betonu in situ	50
5	Výsledky experimentů a diskuse	53
5.1	Výsledky na mikroúrovni	53
5.1.1	Mikromechanické vlastnosti cementových past	53
5.1.2	Mikrostrukturální analýza cementových past	56
5.2	Výsledky na makroúrovni	59
5.2.1	Mechanické vlastnosti cementových past	59
5.2.2	Výsledky rozlivu	61
5.2.3	Výsledky viskozity cementových past	66
5.2.4	Boční tlak cementových past	74
5.2.5	Boční tlaky betonu	78
6	Numerické modelování toku směsi a diskuse	90
6.1	Experimenty	90
6.2	Numerické modelování toku	91
6.3	Výsledky modelování rozlivu a diskuse	92
6.3.1	Výsledky testování reometru	92
6.3.2	Výsledky modelování rozlivu cementové pasty	93
6.4	Zhodnocení numerického modelu	95
7	Závěr	96
	Literatura	102
	Seznam vlastních publikací	108
	Seznam obrázků	112
	Seznam tabulek	116

1 Úvod

Svislé konstrukce jsou na stavbách nejčastěji betonovány do bednění pomocí běžných betonů. Ty je nutné již během betonáže hutnit tak, aby se docílilo homogenní konzistence a nevznikly v konstrukci kaverny. Běžné betony jsou ve svislých konstrukcích nejčastěji hutněny pomocí ponorného vibrátoru. Ten se ponořuje do čerstvého betonu tak, aby se vibrováním překonala vysoká viskozita betonu a dosáhlo se jeho tečení. Betonáž vysokých konstrukcí běžnými betony je nutné provádět v krocích tak, aby bylo možné směs postupně vibrovat a tím zhutnit. Boční tlaky běžných betonů na bednění se po vybetonování stěn brzy snižují, a to vlivem vysoké viskozity těchto betonů a dlouhou dobou betonování. Naopak samozhutnitelné betony (Self Compacting Concrete – SCC) se vyznačují nízkou viskozitou bez nutnosti dodatečného vibrování k vyplnění bednění. Betonáž pomocí SCC nejčastěji probíhá v jednom kroku, kdy se bednění konstrukčního prvku (např. sloup nebo stěnu) vybetonuje na celou výšku najednou. Dlouhotrvající tekutost směsi se obvykle udržuje pomocí přísad (superplastifikátory a zpomalovači tuhnutí a tvrdnutí) a i po odlití se směs chová jako kapalina, která vytváří vysoký boční tlak na bednění. Vývoj vysokých bočních tlaků ve směsích SCC však může být řízen speciálními přísadami, které ovlivňují viskozitu a zpracovatelnost směsi v čerstvém stavu a současně řídí tixotropní chování a vývoj rané pevnosti směsi. Tyto přísady jsou nejčastěji ve formě modifikátorů hydratace nebo nanočástic.

1.1 Motivace

Jedněmi z nejdůležitějších aspektů v současné době ve stavebnictví jsou rychlost výstavby a s ní spojená cena za provedení stavby. Hledají se nové způsoby, jak ušetřit, aniž by to mělo vliv na kvalitu provedených prací (kaverny, pohledovost atd.) a především na bezpečnost staveb. Rychlost výstavby a kvalitu provedených prací lze ovlivnit vhodnou volbou technologie. Jednou z takových úspor je betonáž vysokých prvků samozhutnitelným betonem (Obr. 1.1). Na druhou stranu má betonáž s tímto druhem betonu i svá úskalí. Tím největším je z pohledu provádění nárůst bočního tlaku betonu na bednění. Betony typu SCC se chovají díky nízké viskozitě spíše jako tekutina a mají díky tomu vyšší hydrostatický tlak. To s sebou nese zvýšené nároky na bednění a tím i druhotné náklady a růst ceny za provedení. Reologické

vlastnosti betonů (mez kluzu, viskozitu atd.) lze do jisté míry upravit pomocí vybraných přísady. Se správně nastavenými reologickými vlastnostmi betonové směsi lze následně ovlivnit velikost bočních tlaků v průběhu času.

Hlavními motivacemi k této práci bylo nalézt takovou přísadu, přísady nebo kombinace přísad, které by co nejlépe ovlivnily reologické vlastnosti betonu. S pomocí těchto přísad poté navrhnout beton, který by při betonáži vykazoval konzistencí blížíící se SCC, ale po jeho ustálení v bedně by se u něho projevila jeho zvýšená tixotropie. To by mělo za následek snížení bočních tlaků na bedně. Toto vše by mělo vliv na další aspekty spojené s výstavbou od ceny za provádění, přes cenu za bednění a rychlost výstavby až po pohledovost zhotovených konstrukcí.



Obr. 1.1: Bednění výšky 7,8 m určené pro železobetonovou monolitickou stěnu, která byla betonovaná pomocí upraveného samozhutnitelného betonu

2 Problematika bočních tlaků

Ke zpracování betonové směsi je k dispozici řada technologických metod. Dle zvolené technologie je třeba přizpůsobit zpracovatelnost betonové směsi. Všechny způsoby zpracování mají za cíl nejen odstranit z uloženého betonu vzduchové mezery a póry, ale hlavně vytvořit homogenní strukturu, ve které budou v celém objemu stejnorodé vlastnosti. Použitím samozhutnitelných betonů při betonáži svislých konstrukcí vyvstává problém s bočním tlakem. Aby bylo možné s tím něco udělat, je nutné se zabývat samotnou reologií betonové směsi.

Pomocí reologie lze popsat a určit chování betonu při jeho zpracování, a tím v konečném důsledku ovlivnit i vnitřní strukturu a mechanické vlastnosti betonu. Pro reologii čerstvého betonu jsou nejdůležitější vztahy mezi napětím, viskozitou a jeho smykovou rychlostí. Správně zvolené reologické vlastnosti jsou velmi důležité při volbě způsobu betonáže a zpracování betonu u štíhlých vysokých prvků. Rozhodující částí čerstvého betonu, která nejvíce ovlivňuje chování, je cementový tmel.

2.1 Reologie a reologické vlastnosti

Reologie je vědní obor mechaniky zabývající se deformací a tokem látek v závislosti na čase. Reologie se neomezuje jen na tokové chování kapalné látky, lze s její pomocí určit i deformace tuhých těles, která za určitých okrajových podmínek (dlouhodobé zatížení v čase) také tečou.

Jako základní veličina reologie, jenž charakterizuje tokové chování látek, je viskozita. Její velikost předurčuje vnitřní odpor materiálu proti vnějšímu zatížení a tím i proti toku [35].

2.1.1 Viskozita

Viskozita se řadí mezi základní reologické vlastnosti kapalin. Aby bylo možné viskozitu zjistit, je nutné uvést kapalinu do pohybu.

Charakteristikou viskozity je vnitřní tření, závislé na silách mezi jednotlivými částicemi [36,37].

Kapaliny lze rozdělit na dva druhy, a to na kapaliny s nízkou viskozitou, mezi které se řadí voda a kapaliny, které snadno tečou, a na kapaliny s vysokou viskozitou, které jsou obtížně tekuté a patří mezi ně i právě čerstvý beton [36].

Jednotlivé druhy kapalin lze také rozdělit na kapaliny Newtonské a na kapaliny Nenevtonské.

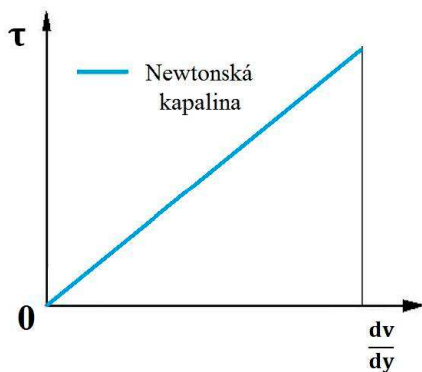
2.1.2 Newtonské kapaliny

U kapalin, u kterých platí laminární proudění, se projevuje lineární závislost mezi smykovým napětím a rychlostním gradientem (Obr. 2.1). U těchto kapalin platí Newtonský zákon viskozity

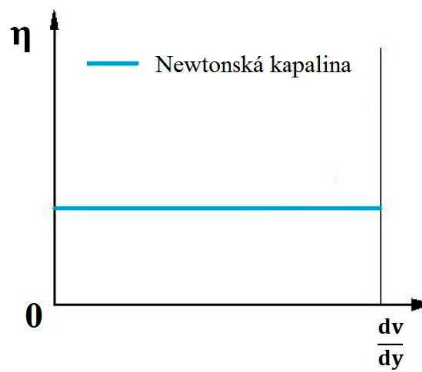
$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (2.1)$$

kde η je dynamická viskozita a $\frac{dv}{dy}$ je gradient rychlosti v .

Newtonské kapaliny mají konstantní dynamickou viskozitu. Ta charakterizuje její závislost na poměru smykového napětí a smykové rychlosti (Obr. 2.2).



Obr. 2.1: Toková křivka Newtonské kapaliny [36]



Obr. 2.2: Závislost viskozity na gradientu rychlosti Newtonské kapaliny [36]

Kapaliny, u nichž viskózní chování není možné popsat pomocí Newtonského zákona viskozity, se označují za Nenevtonské kapaliny.

2.1.3 Nenevtonské kapaliny

U těchto kapalin se projevuje časová závislost reologických vlastností, jako je smykové napětí, v závislosti na gradientu rychlosti. Nenevtonské kapaliny lze zapsat vztahem

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy}, \quad (2.2)$$

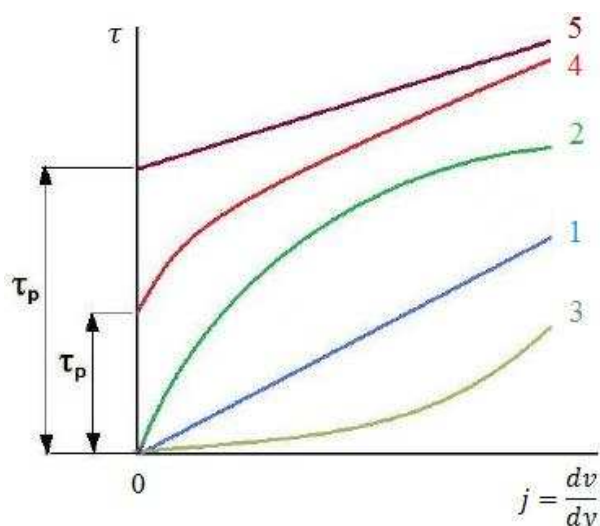
kde $\frac{dv}{dy}$ je gradient rychlosti v a η_a je zdánlivá viskozita. Ta je definovaná

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}}. \quad (2.3)$$

Zdánlivá viskozita není parametrem, ale je proměnnou veličinou. Její hodnota se v čase mění v závislosti na smykovém napětí.

K hodnocení Neneutonských kapalin se uvádí jejich smykové napětí. Pro určení závislosti smykového napětí na gradientu rychlosti jsou důležité reologické modely [36].

Neneutonské kapaliny se dále rozdělují na takzvané pseudoplastické (plastické kapaliny), tixotropní kapaliny, kapaliny dilatantní a reopektické kapaliny (Obr. 2.3).



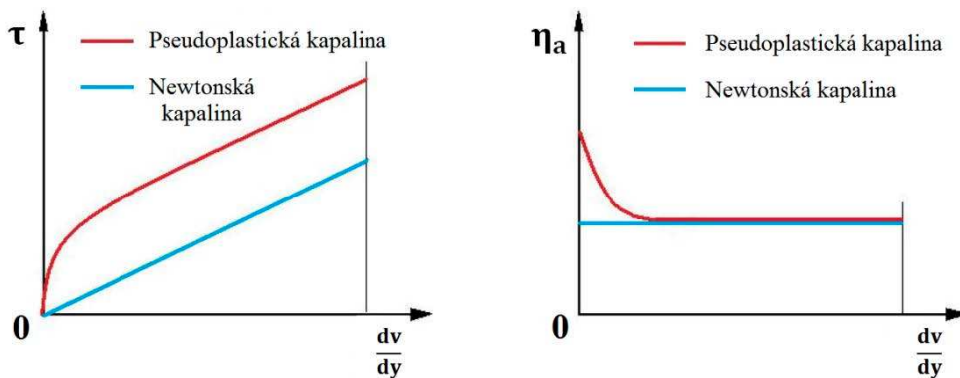
Obr. 2.3: Tokové křivky vybraných Neneutonských kapalin [36]

1- newtonská kapalina, 2 – pseudoplastická kapalina, 3 – dilatantní kapalina

4 – skutečná plastická kapalina, 5 – Binghamova – ideální kapalina

Pseudoplastická kapalina

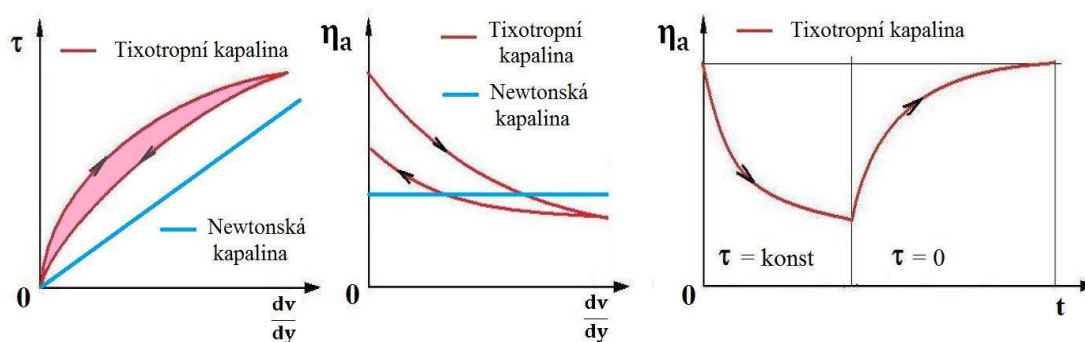
Pseudoplastické kapaliny jsou charakteristické tím, že při rostoucím smykovém napětí klesá zdánlivá viskozita. Na Obr. 2.4 je zobrazeno porovnání pseudoplastické kapaliny s Newtonskou. Mezi pseudoplastické kapaliny se řadí kaly, pasty, kaučuky, latexy apod. Pseudoplastické kapaliny tečou při sebemenším napětí.



Obr. 2.4: Porovnání pseudoplastické a newtonské kapaliny [36]

Tixotropní kapalina

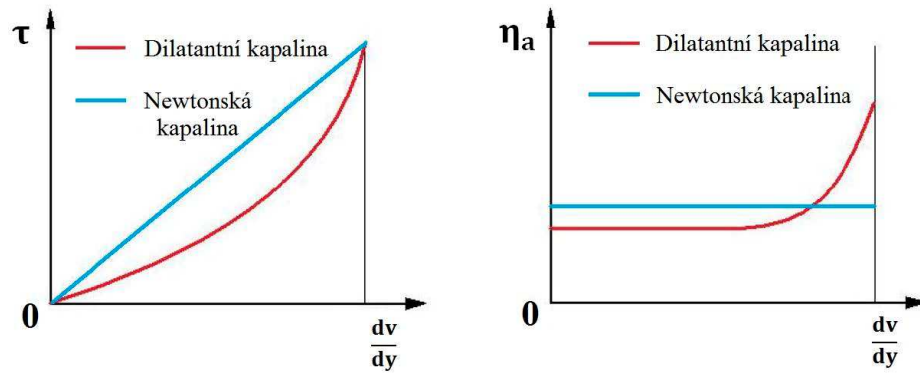
Jsou pseudoplastické nebo plastické kapaliny, u nichž platí, že jsou-li vystaveny zatížení (např. třepání, míchání), je zdánlivá viskozita v počátku vysoká a s rostoucím časem viskozita klesá. Pokud se poté ponechají kapaliny v klidu, obnoví se původní struktura a zdánlivá viskozita se vrátí na původní vysokou hodnotu. Pro tyto kapaliny je typická hysterezní smyčka. To znamená, že se tokové křivky zvyšování a snižování zatížení neshodují (Obr. 2.5). Smyčka probíhá ve směru hodinových ručiček.



Obr. 2.5: Porovnání tixotropní a newtonské kapaliny [36]

Dilatantní kapalina

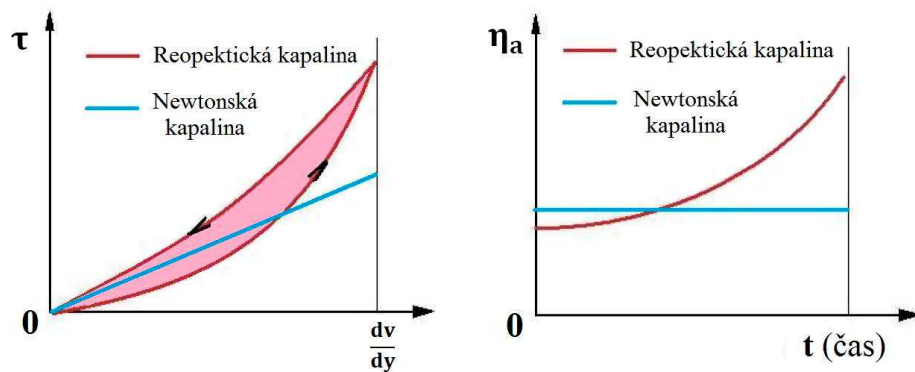
Jsou opakem pseudoplastických (plastických) kapalin. Je pro ně charakteristický růst zdánlivé viskozity s rostoucím smykovým napětím (Obr. 2.6). Mezi tyto látky řadíme jílové kaše, škrobové suspenze apod.



Obr. 2.6: Porovnání dilatantní a newtonské kapaliny [36]

Reopektická kapalina

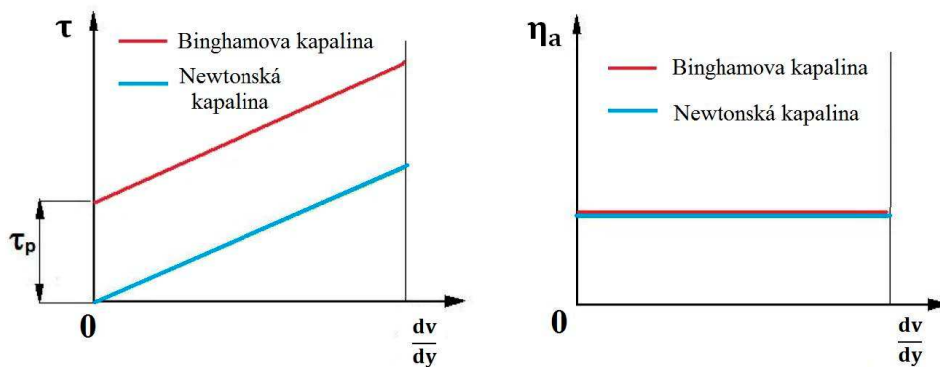
Jako byly tixotropní látky zvláštním případem kapalin pseudoplastických, to samé platí pro reopektické kapaliny, kdy se jedná o zvláštní případ kapalin dilatantních. Pokud jsou vystaveny smykovému namáhání, tak jejich zdánlivá viskozita s dobou roste. Přestane-li na kapalinu působit namáhání, začne se obnovovat jejich původní struktura a zdánlivá viskozita se přiblíží k původní hodnotě. Hysterezní smyčka pro tyto kapaliny probíhá proti směru hodinových ručiček (Obr. 2.7).



Obr. 2.7: Porovnání reopektické a newtonské kapaliny [36]

Binghamova kapalina

Typickým znakem pro tuto kapalinu v klidu je schopnost trojrozměrné struktury vzdorovat napětí, které je menší než mez kluzu. Po jejím překročení se kapalina začne chovat jako newtonská kapalina s možností tečení (Obr. 2.8). Klesne-li napětí pod kritickou hodnotu, obnoví se vnitřní struktura.



Obr. 2.8: Porovnání Binghamovi a newtonské kapaliny [36]

Cementové pasty a beton v tekutém stavu je nejčastěji řazen mezi Binghamovi kapaliny s prvky tixotropie. Jedná se tak o specifický případ pseudoplasticity. Nejdříve se musí překonat mez kluzu, aby tekly. Jejich viskozita přitom s časem a působící silou klesá [2;39;40].

2.2 Reologické modely

K popisu závislosti gradientu rychlosti a smykového napětí u nenewtonských kapalin slouží reologické modely. Existuje celá řada modelů, které toto chování vystihují [36]. Nejjednodušším je

Binghamův model [36]. Tento model je vyjádřen jako

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}, \quad (2)$$

kde τ_0 je mez kluzu, $\dot{\gamma}$ je smyková rychlost, μ je plastická viskozita betonu.

Druhým často používaným reologickým modelem je Herschel–Bulkley model. Tento model je vyjádřen rovnicí

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n, \quad (2)$$

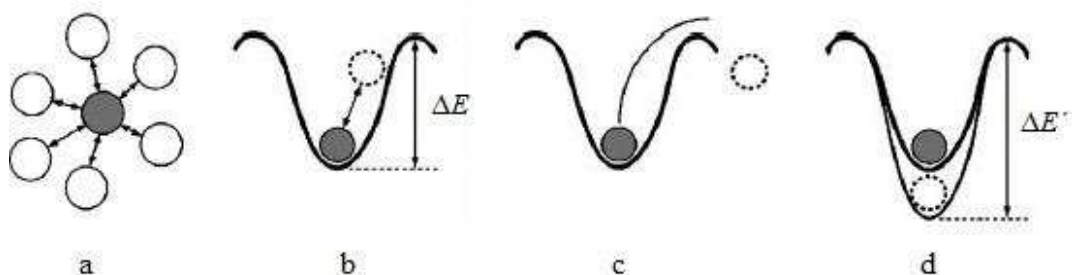
kde τ_0 je mez kluzu, $\dot{\gamma}$ je smyková rychlost, k je index konzistence a n je index toku. Platí-li $\tau < \tau_0$ (tj. smyková rychlost $\dot{\gamma} = 0$), pak beton neteče, protože není překonána mez kluzu. Jejím překonáním pak beton teče pod vlastní tíhou.

Toto chování je například patrné při hutnění obyčejných betonů ponorným vibrátorem. V blízkosti hlavice se vytvoří viditelná zkapalněná oblast, ze které se uvolňují vzduchové bubliny, zatímco se beton ve větší vzdálenosti jeví nedotčeně.

2.3 Fenomén tixotropie

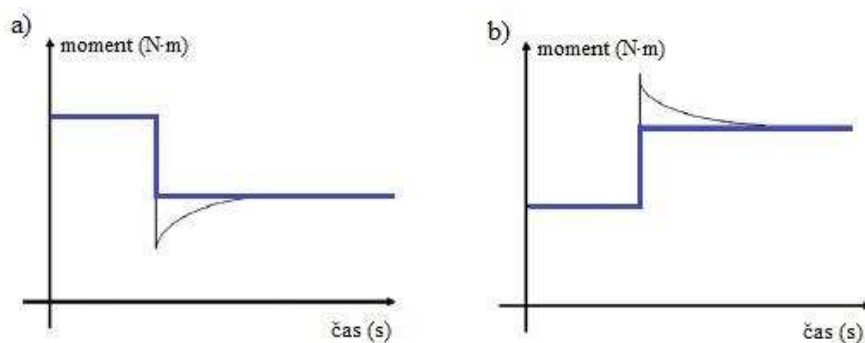
U tixotropní kapaliny platí, že je-li vystavena zatížení, je zdánlivá viskozita v počátku vysoká a s rostoucím časem viskozita klesá. Pokud se poté ponechá kapalina v klidu, obnoví se původní struktura a zdánlivá viskozita se vrátí k původní vysoké hodnotě. Jak tixotropie, tak reopexie se mohou vyskytnout v kombinaci s některým z dříve popsaných tokových chování. [36]. Pro tyto kapaliny je typická hysterezní smyčka. To znamená, že se tokové křivky zvyšování a snižování zatížení neshodují.

K tixotropii dochází u plastických a pseudoplastických kapalin. V betonu je jediným nosičem tixotropie cementová pasta, protože kamenivo je inertní koloidní částice. Tixotropii je možné vysvětlit pomocí Obr. 2.9. Interakční síly mezi částicemi určují potenciální energii každé částice. Tato energie je znázorněna energetickou potenciálovou jámou, kde je každá částice v rovnováze (Obr. 2.9a). Pokud je do systému dodáno méně energie ΔE , než je nutné pro opuštění potenciální jámy, zůstane částice v jámě uvězněna (Obr. 2.9b). Naopak, pokud je do systému dodáno více energie, než je nutné k opuštění jámy, částice ji opustí. Tím ve směsi nastává tok (Obr. 2.9c). Je-li směs v klidu, narůstá hloubka potenciální jámy s časem (Obr. 2.9d). Tím se zvyšuje i potřebná energie pro únik z této nové jámy na hodnotu $\Delta E'$. Hodnota energie se vrátí na původní, pokud částice opustí zvětšenou jámu [18].



Obr. 2.9: Chování tixotropních látek na mezi kluzu [2]

Při ustáleném toku je možné chování betonu popsat pomocí modelu na mezi kluzu. Model toto chování popisuje jako lineární. Při měření na rotačním reometru lze pozorovat při snížení nebo při zvýšení rychlosti otáček rozdíl reálného chování od předpokládaného modelového (Obr. 2.10). Tento rozdíl způsobuje tixotropní chování betonu. To má za následek zpoždění odezvy materiálu [2, 41].



Obr. 2.10: Přechodové chování betonu a) snížení otáček, b) zvýšení otáček [2]

Tixotropního chování lze využít při betonování pomocí samozhutnitelných betonů, kdy se tyto betony v čerstvém stavu chovají jako kapalina. Pokud bude ukládka probíhat pomalu nebo bude přerušena, může dojít ke flokulaci. V betonu vznikne vnitřní struktura, která je schopna přenášet zatížení od dalších vrstev betonu. Této vlastnosti je možno využít při betonování vysokých svislých konstrukcí [2].

Tok cementových past je především ovlivňován velikostí a tvarem částic, jejich chemickým složením a vodním součinitelem. Nejjednodušeji modifikovatelné parametry jsou vodní součinitel a jemnost mletí cementu, kterému odpovídá specifický povrch. Ten má vliv na reologické vlastnosti, které jsou ovlivněny částicemi menšími než 100 μm . To znamená, že u směsí z cementu s vyšším specifickým povrchem dochází k nárůstu smykového napětí a plastické viskozity [42].

S rozvojem měření reologických vlastností by mohlo dojít k jejich uplatnění při návrhu nových cementových směsí a betonů. To by se dalo uplatnit například při návrhu samozhutnitelných betonů nebo směsí pro 3d tisk betonových konstrukcí [43].

2.4 Boční tlaky samozhutnitelných betonů na bednění

S postupujícím rozvojem materiálů se čím dál více začínají uplatňovat ve stavitelství samozhutnitelné betony (SCC), které se vyznačují vysokou tekutostí směsi bez nutnosti vnějšího zhuštění [1;4;44]. Nejčastěji se tyto betony používají při betonáži vysokých prvků (např. stěn, sloupů atd.), které jsou vybetonovány v jednom kroku. Další častou aplikací jsou prvky, u kterých se chce dosáhnout pohledovost. Současně s použitím samozhutnitelných betonů nastává problém se zvýšením bočního tlaku tohoto betonu na bednění. Zohlední-li se pouze

hydrostatický tlak čerstvé betonové směsi, vede to k neefektivnímu a nákladnému návrhu bednění.

V materiálovém provedení lze redukce dosáhnout přidáním vhodných modifikátorů směsi. Výsledky předchozích studií reologie SCC ukázaly, že pevnost betonu v čerstvém stavu a jeho tekutost jsou řízeny především flokulací částic a tixotropií cementové pasty [2-4;42,45].

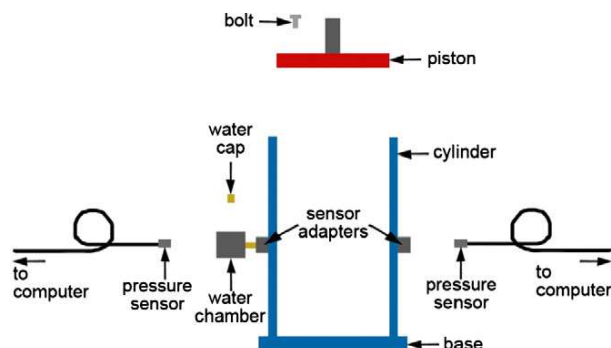
K dispozici je několik způsobů, jak snížit boční tlak samozhutnitelného betonu na bednění. Jedním ze způsobů je změna tixotropie betonu nereaktivními přísadami s cementem. Při výzkumech této problematiky bylo zjištěno, že zvýšením tixotropie lze skutečně dosáhnout snížení bočního tlaku na bednění. K tomuto účelu se nejčastěji využívají nanojílové minerály nebo odvozené materiály [1-6]. Cementové pasty modifikované pomocí nanojílů vykazují zvýšenou tixotropii. Dále u těchto cementových past dochází k přestavbě mikrostruktury vedoucí k vyšší počáteční pevnosti [45]. Dalším možným způsobem, jak snížit boční tlak samozhutnitelného betonu na bednění je modifikace hydratační kinetiky a hydratačních produktů pomocí přísad, jako je metakaolin. Metakaolin v cementové pastě reaguje s rozpuštěnými minerály slínku a vytváří gelový hydrát křemičitanu vápenatého (C-S-H gel) [6]. Některé přísady mohou také zvětšit velikost flokuly anebo mohou zvětšit seskupování částic na mikroúrovni, a to může vést k urychlení hydratace [4, 45].

Čerstvé betonové směsi mají různé reologické vlastnosti v závislosti na jejich složení. Jejich chování může být charakterizováno různými experimentálními metodami, jako je rozliv kužele (Slump flow – SF), L-box, J-ring, V-trychtýř a reometrickým testováním [12].

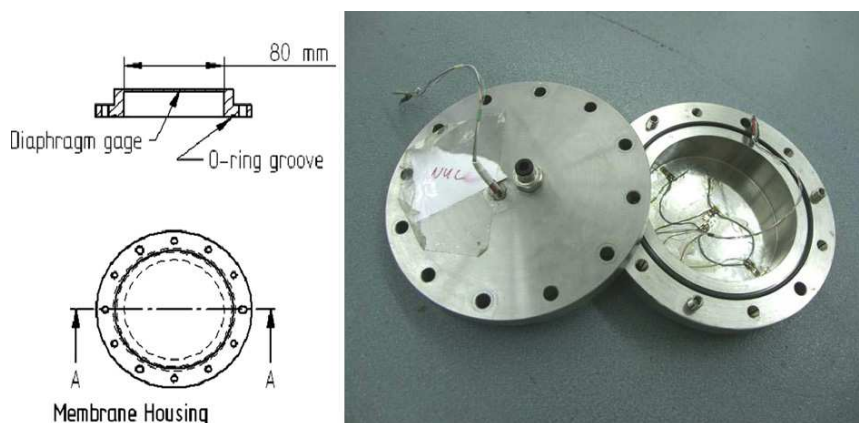
Při návrhu strategie měření bočních tlaků je třeba uvažovat nutnou robustnost měřící metody vzhledem k variabilitě okrajových podmínek, které jsou běžné na staveništi. Tímto se myslí konečná použitelnost výsledků získaných navrženou strategií měření. Významnou roli zde tedy hraje velikost vzorků, na kterých jsou měření prováděna, povrchová úprava forem a tuhost samotného měřícího zařízení, které snímá tlak na bednění.

K měření bočních tlaků betonů na bednění byly vyvinuty měřící komory, jejichž pomocí lze měřit změnu bočního tlaku betonu na bednění jak v laboratorních podmínkách, tak i na stavbách [4;59;60]. Na Obr. 2.11 je příklad měřící komory, jejíž

pomocí se měří boční tlaky na bedněni. Skládá se z hlavního válce o průměru 150 mm, do kterého se vkládá testovaná směs. Ta je zatížena přes horní píst [4]. Na Obr. 2.12 je návrh tlakového senzoru pro měření bočního tlaku na laboratorním zařízení [59].



Obr. 2.11: Zařízení pro tlakovou zkoušku bedněni [4]



Obr. 2.12: Návrh tlakového senzoru [59]

2.5 Numerické metody pro modelování

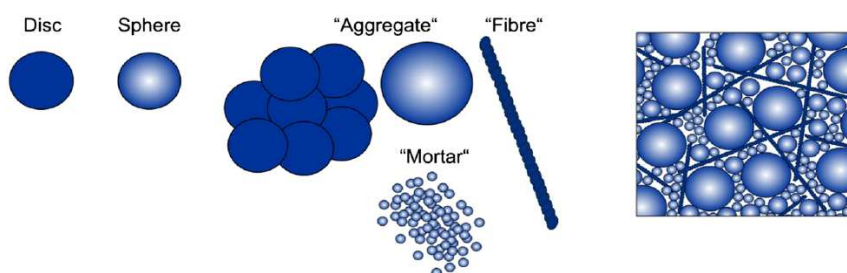
Pomocí různých numerických metod lze v současné době simulovat nepřehledné množství problému spojených s chováním betonu. Tím, že se použije numerické modelování, lze ušetřit čas a náklady na provádění velkého množství testů. Jejich nevýhodou je potřeba výkonnější výpočetní techniky a vstupních dat. To je způsobeno velkým počtem neznámých ve výpočtu. K dispozici je celá řada modelů [24], které lze použít pro numerické simulace.

2.5.1 Metoda oddělených prvků (DEM)

Je to numerická metoda pro modelování velkého množství malých částic. Tato metoda má široké použití v aplikacích sypkých materiálů, mechaniky zemin

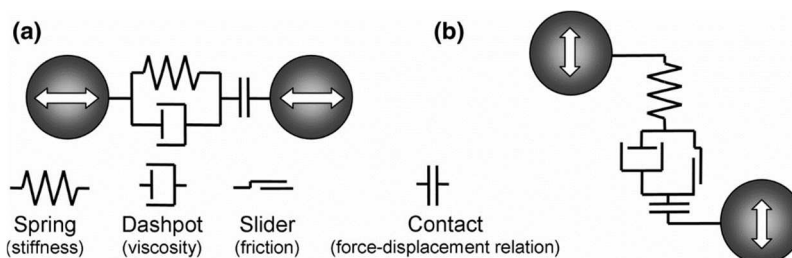
a jiných. Dá se použít pro simulaci čerstvého betonu, ale i v modelování trhlin zatvrdělého betonu od plastického smršťování.

Materiál je popsán jako soustava složená z částic. Základ modelu tvoří kulovité částice, ze kterých lze tvořit složitější tvary jako například drátky. Spojením všech složek se získá výpočtový model zkoumaného problému (Obr. 2.13). Při použití pro beton představují kulovité částice kamenivo a maltu. Reologické vlastnosti jsou připisovány maltě.



Obr. 2.13: Prvky, výpočtové složky a vykreslení v DEM [25]

Samotný výpočet se dělí na cykly, které zahrnují dva kroky: stanovení kontaktních sil mezi pevnými částicemi a výpočet pohybu každé částice. K tomu se použije druhý Newtonův pohybový zákon. Kontaktní bod mezi částicemi je nahrazen v normálovém a tangenciálním směru soustavami, které jsou tvořené pružinou, tlumičem a třením posuvníku (Obr. 2.14).



Obr. 2.14: Model interakcí částic: a) normálový směr; b) tangenciální směr [25]

2.5.2 Metoda Lattice Boltzmann (LBM)

Další možností numerického modelování tečení čerstvého betonu je Lattice Boltzmannova metoda (LBM). Tato numerická metoda se používá zejména pro modelování transportních procesů (proudění tekutin, difúze tepla atd.) na mezoskopické úrovni. V LBM je doména řešení diskretizována do buněk, které tvoří mřížku. Obvykle používané tvary buněk těchto mřížek jsou úsečky, čtverce

nebo krychle, což se řídí počtem dimenzí řešeného problému, tedy jestli se řeší 1D, 2D a 3D úlohy [22]. Každá buňka mřížky má několik uzlů nebo jinými slovy, několik pozic fiktivních částic, spojených s odpovídajícím počtem spojnic nebo vektorů rychlosti, včetně spoje nulové délky (vektor rychlosti nulové rychlosti) na straně, pokud existuje. Každý uzel pak má odpovídající distribuční funkci vyjadřující pravděpodobnost výskytu částice v daném čase [23]. Problém se řeší explicitně po jednotlivých krocích.

2.5.3 Modelování rozlivu cementových past

V současné době se čím dál více využívá numerických modelů k digitální reprodukci experimentů. Důvodem k tomu je náročnost a opakovatelnost reálných experimentů. Modely, které se využívají k reprodukci experimentů zaměřených na reologické vlastnosti, jsou nejčastěji založeny na analýze proudění tekutin pomocí výpočtové dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics – CFD). Tyto modely se skládají ze dvou fází: ze vzduchu a cementové pasty (případně betonu), která se deformuje vlivem gravitačního pole. Překonáním meze kluzu začnou cementové směsi téct.

Ve velkém počtu studií se test rozlivu cementových past počítá s okamžitým zvednutím formy [13–16]. Nicméně, jak poukázala Gaova studie [17], vliv zvednutí formy ovlivňuje výsledky konečného rozlivu. Význam dynamického proudění je prezentována Bouvetem a kol. [18], kteří navrhují nové vyjádření pro konečný průměr rozlivu jako funkci viskozity. Studie citlivosti provedená Bogerem [19] s použitím dobře charakterizovaných minerálních suspenzí, jako je oxid titaničitý, oxid zirkoničitý a zbytky bauxitu, naznačuje, že vliv rychlosti odstraňování komolého kužele na konečnou výšku propadu nemá žádný vliv za předpokladu, že zůstane menší než cca. 10 m/s. Navíc použitím více povrchů materiálů dospěl k závěru, že třecí odpor vůči proudění na základně není důležitý. Viskozitu lze získat z laboratorních měření rotačním reometrem. V závislosti na směsích a nastavení reometru se měří různé průtokové křivky. Průtokové křivky jsou pak použity pro stanovení parametrů pro materiálové modely, kde je cementová pasta většinou modelována pomocí Binghamových nebo Herschel-Bulkleyových modelů.

3 Cíle

Betonáž vysokých prvků pomocí samozhutnitelného betonu (SCC) s sebou přináší úskalí v podobě zvýšeného bočního tlaku, jelikož tento druh betonu vyvíjí na bednění větší hydrostatický tlak než obyčejný beton. Boční tlak tak způsobuje zvýšené nároky na bednění stěny. Úpravou reologických vlastností samozhutnitelného betonu pomocí vhodných přísad lze dosáhnout snížení bočních tlaků v průběhu času. Takto upravený samozhutnitelný beton se bude chovat v první fázi jako SCC, ale po jeho ustálení se u něho začne projevovat zvyšující se tixotropie.

Tato práce si dala za cíl návrh samozhutnitelného betonu, který by na bednění vyvozoval nižší boční tlak než obyčejný samozhutnitelný beton. Práce se zabývá zkoumáním reologických vlastností a návrhem funkční směsi. Aby byl návrh takového betonu možný, bylo nejprve nutné vybrat vhodné materiály na přísady, které dokáží ovlivnit reologické vlastnosti směsi, například zvýšením tixotropie betonu po jeho ustálení. Tyto materiály byly zkoumány od mikroúrovně až po makroúroveň, tak aby se postihnul jejich vliv i na mechanické vlastnosti budoucí betonové směsi.

K posouzení vhodnosti jednotlivých přísad bylo použito všech dostupných přístrojů. Na mikroúrovni byl použit skenovací elektronový mikroskop (SEM), s jehož pomocí byla u jednotlivých přísad zkoumána především velikost částic. Kromě samotných přísad bylo zkoumáno konečné rozložení jednotlivých fází zhydratované cementové pasty. Dále byla provedena analýza mikromechanických vlastností pomocí nanoindentace na cementových pastách obsahujících vybrané přísady. Nanoindentace by měla poskytnout představu o mikromechanických vlastnostech modifikovaných cementových past s obyčejnou pastou. Spolu s ní byly jednotlivé pasty testovány i na mechanické vlastnosti na makroúrovni. Tyto experimenty měly za cíl zvolit vhodné přísady pro úpravu reologického chování cementových past a betonů bez toho, aniž by došlo k výraznějším změnám mechanických vlastností. Vybrané přísady byly dále otestovány dalšími experimenty. Mezi ně například patřilo měření viskozity cementových past s různou dávkou přísad zvyšujících tixotropii nebo měření bočního tlaku cementových past a betonů. Pro účely měření bočních tlaků bylo nutné navrhnout a sestavit měřící zařízení, které by toho bylo schopné. Získané výsledky z viskozity a z bočních tlaků byly následně použity pro úpravu betonové směsi.

Nedílnou součástí práce bylo vytvoření jednoduchého numerického modelu, který slouží k ověřování reologických vlastností, a který by mohl případně sloužit k jejich predikci. Hodnoty změřené na reometru dále sloužily jako vstupní parametry pro numerické modelování. Výsledky byly porovnávány s výsledky změřenými pomocí rozlivu.

4 Experimentální metody

Experimenty byly prováděny v několika na sebe navazujících sériích. Jednotlivé série měly za úkol zvolit nejvhodnější materiály jako přísady splňující předem stanovené cíle, kterými byly především zvýšení viskozity směsi a snížení bočního tlaku na bednění.

V první sérii experimentů byly celkem otestovány 4 různé směsi cementových past s různými variantami přísad. Těmito přísadami byly metakaolin LB05 Mefisto a sepiolit od firmy Sigma-Aldrich. Cementové pasty byly testovány jak na mikroúrovni, tak i na makroúrovni. Pomocí SEM byl zjišťován vliv přísad na mikrostrukturu a pomocí nanoindentace zase vliv na mikromechanické vlastnosti. Makromechanické vlastnosti byly zjišťovány na trámečcích z cementových past. Celá série byla doplněna o fotografie jednotlivých přísad v sypkém stavu na SEM (fotografie velikosti částic).

Druhá série se již zaměřila na vliv přísad na reologické vlastnosti cementových past. K těmto účelům posloužily experimenty zabývající se měřením rozlivu a viskozity. Testovány byly cementové pasty modifikované přísadami z první série. Ty byly doplněny o nové materiály, kterými byly dva sepiolity od firmy Rheoplus a dva typy celulózových vláken Arbocel. Nové materiály byly v sypkém stavu prozkoumány i pomocí SEM.

Pro třetí sérii testů byly k dalšímu testování z výsledků druhé série vybrány dvě finální přísady. Těmito přísadami byly metakaolin LB05 Mefisto a sepiolit Rheoplus TS 3010A. Cementové pasty modifikované těmito přísadami byly zkoušeny na reometru, na válci pro měření bočního tlaku na cementových pastách a v betonech na reálných stěnách, kde byl zkoušen boční tlak modifikovaných betonů na stěnu bednění.

Dále v této kapitole budou blíže popsány jednotlivé materiály přísad a podrobně rozebrány analýzy, experimenty a metody použité při testování a vyhodnocování vlivu přísad. Experimenty byly rozděleny do dvou skupin, a to na mikroúroveň a makroúroveň.

4.1 Testované materiály

Před samotným testováním byla provedena rešerše používaných materiálů a jejich dostupnosti. Materiály lze rozdělit do několika skupin podle různých ukazatelů. Těmi jsou například velikost a tvar jednotlivých částí, chemické složení nebo reaktivita s cementem.

Během celého průběhu výzkumu byly testovány různé přísady. Jednotlivé přísady byly testovány postupně v jednotlivých sériích. Postupem času z těchto materiálů vyplynuly dvě, které byly zkoušeny i v betonu a v reálném provozu na stavbě.

4.1.1 Materiály z první série experimentů

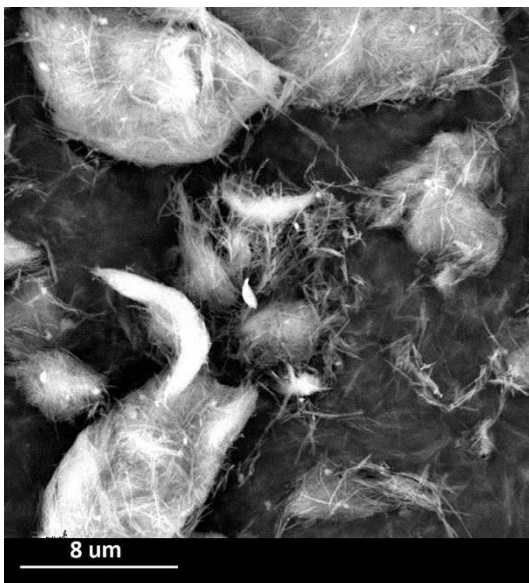
V první fázi testování byly zkoumány přísady:

Sepiolit od firmy Sigma-Aldrich (v práci označován jako Sepiolite Sigma)

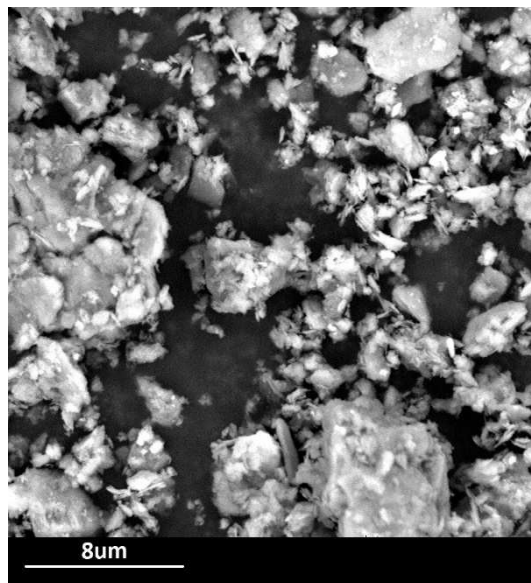
Je to chemicky vyčištěný 100 % sepiolit používaný ve farmacii. Chemický vzorec sepiolitu je $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$. Částice sepiolitu mají drobný protáhlý tvar (Obr. 4.1). Jejich průměrná délka je 1 až 2 μm a šířka je několika desítek nanometrů. Sepiolit se nerozpouští ve vodě ani nereaguje s cementem, ale pracuje na reorganizaci krystalitů v plastickém stádiu směsi. Při míchání navíc na povrchu váže značné množství vody, což snižuje zpracovatelnost.

Metakaolin LB05 – Mefisto

Je kalcinovaný jíl. Je složen převážně z 53,1 % SiO_2 , 41,7 % Al_2O_3 , 1,1 % Fe_2O_3 a dalších minoritních oxidů. Připravuje se jako granulovaný prášek s podobným rozložením zrna jako cement. Zrna metakaolinu mají ostrohranný tvar se střední velikostí částic, která se pohybuje od 1 do 10 μm (Obr. 4.2). Metakaolin reaguje s cementem během hydratace. Při této reakci se snižuje množství portlanditu (CH) v hydratovaném cementu a zvyšuje množství hlavního hydratačního produktu, kterým je gelový hydrát křemičitanu vápenatého (C-S-H gel) [6].



Obr. 4.1: Snímek částic sepiolitu Sigma



Obr. 4.2: Snímek částic metakaolinu

Cementové pasty byly vyráběny z cementu CEM I 42,5R od firmy Českomoravský cement.

Složení jednotlivých cementových past použitých v 1. sérii bylo připraveno podle receptury uvedené v Tab. 4.1.

Vzorky	C	CM	CS	CMS
C – CEM I 42,5 R [g]	1500	1485	1485	1470
M – metakaolin – 1 % z b. [g]	-	15	-	15
S – sepiolit 1 % z b. [g]	-	-	15	15
Voda [g]	675	675	675	675
w/b	0,45	0,45	0,45	0,45

Tab. 4.1: Složení jednotlivých cementových past použitých v první sérii testů

4.1.2 Materiály z druhé série experimentů

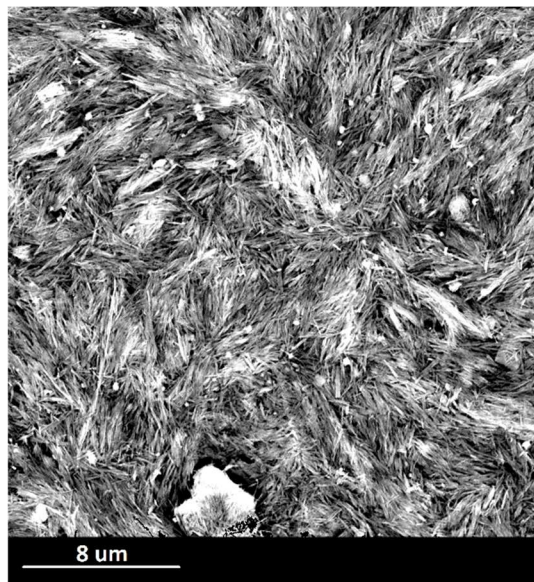
Kromě již testovaných přísad z 1. série metakaolinu LB05 Mefisto a sepiolitu Sigma byly přidány čtyři nové materiály, které splňovaly požadovanou základní vlastnost, a to zvýšit tixotropii cementové pasty, potažmo betonu. Těmito přísadami byly dva sepiolity od firmy Rheoplus a dva typy celulózových vláken Arbocel, které jsou blíže popsány níže.

Rheoplus TS 3010A (v práci označován jako sepiolit TS1A)

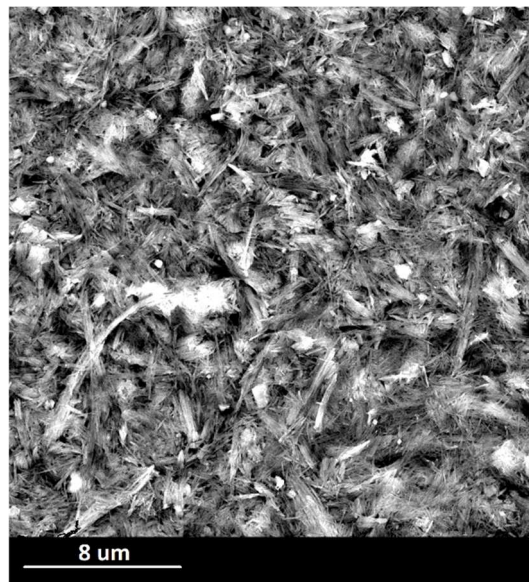
Je snadno dispergovatelná prášková přísada z vysoce čistého sepiolitu, která upravuje reologii vodních systémů v materiálech. Jeho částice mají drobný protáhlý tvar (Obr. 4.3). Jejich průměrná délka je 1 až 2 μm a šířka několik desítek nanometrů. Stejně jako sepiolit Sigma tak i tento se nerozpouští ve vodě, nereaguje s cementem a při míchání navíc váže značné množství vody. Sepiolite Rheoplus TS 3010A se používá například v lepidle na dlaždice, v maltách nebo vláknocementových a stavebních deskách.

Rheoplus TS 2020 (v práci označován jako sepiolit TS2)

Je prášková přísada ze sepiolitu, která upravuje reologii vodních systémů v materiálech. Obsahuje stopové množství dalších látek. Jeho částice mají drobný protáhlý tvar (Obr. 4.4). Jejich průměrná délka je také 1 μm a šířka několik desítek nanometrů. Stejně jako u předchozích sepiolitu tak i tento se nerozpouští ve vodě, nereaguje s cementem a při míchání navíc váže značné množství vody. Sepiolite Rheoplus TS 2020 se používá například v maltách, ve stříkaném betonu nebo v čerpaném betonu.



*Obr. 4.3: Snímek částic sepiolitu
Rheoplus TS 3010A*



*Obr. 4.4: Snímek částic sepiolitu
Rheoplus TS 2020*

Celulózová vlákna Arbocel

Arbocel je připraven jako vláknitý prášek. Používá se jako zahušťovadlo, jako výztužná vlákna, jako absorbent a ředidlo nebo jako nosič a plnivo ve většině oblastí použití. Vláknina Arbocelu se nerozpouští ve vodě a při hydrataci nereaguje s cementem. V experimentech druhé série byly testovány dva typy těchto celulózových vláken Arbocel.

Arbocel BE600-30 PU

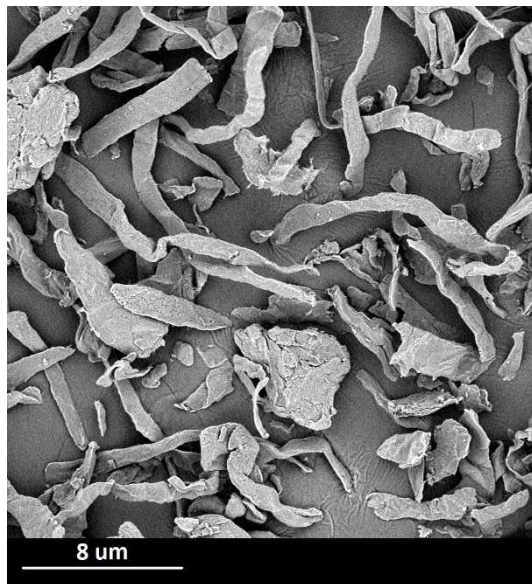
Jedná se přírodní materiál s obsahem 98 % celulózy a s 1,5 % zbytků oxidů. Jeho částice jsou vlákna protáhlého tvaru (Obr. 4.5). Částice mají průměrnou délku 40 μm a šířku 20 μm . Objemová hmotnost Arbocel BE600-30 PU se pohybuje od 190 g/l do 250 g/l.

Arbocel B00

Jedná se přírodní materiál s obsahem 99,5 % celulózy a s 0,5 % zbytků oxidů. Jeho částice jsou vlákna protáhlého tvaru (Obr. 4.6). Jejich průměrná délka je 120 μm a šířku 25 μm . Objemová hmotnost Arbocel B00 se pohybuje od 150 g/l do 185 g/l.



Obr. 4.5: Snímek vláken Arbocelu BE600-30 PU



Obr. 4.6: Snímek vláken Arbocelu B00

Kromě výše zmíněných přísad a příměsí byly při testech použity i tři různé druhy cementů. Těmi byly CEM I 42,5R a CEM I 52,5R od firmy Českomoravský cement a CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement.

Cementové pasty měly vodní součinitel 0,4 a 0,45. Malty byly míchány s vodním součinitelem 0,5 a 0,55.

4.1.3 Materiály ze třetí série experimentů

Z vyhodnocených výsledků druhé série byly dále blíže zkoumány a testovány pouze dvě finální přísady. Tou první byl metakaolin LB05 Mefisto, který se již v betonech běžně užívá. Druhou přísadou byl sepiolit TS1A. Ten se ukázal v rozlivech jako srovnatelný s čistým 100 % sepiolitem Sigma. Pro další testování sepiolitu TS1A rozhodla také jeho pořizovací cena, která je násobně nižší než u sepiolitu Sigma.

4.2 Experimenty na mikroúrovni

Experimenty na mikroúrovni se dají rozdělit na dvě hlavní oblasti, ve kterých byl proveden výzkum. Tou první byla oblast mikrostrukturální, do které jsou zařazeny všechny testy zkoumající velikost částic vybraných přísad až po chemické složení ztvrdlé cementové pasty modifikované těmito přísadami. Druhou oblastí výzkumu byly testy zjišťující mikromechanické vlastnosti ztvrdlé cementové pasty modifikované pomocí vybraných přísad.

Mikrostrukturální analýza a mikromechanické vlastnosti byly testovány na čtyřech směsích cementové pasty. Jejich přesné složení je popsáno v Tab. 4.1. Všechny směsi byly založeny na portlandském cementu CEM I 42,5R a výše popsaných přísadách z kapitoly 4.1.1. Pro všechny vzorky byl použit stejný vodní součinitel 0,45. Množství přísad bylo zvoleno jako 1 % hmotnosti cementu. Vzorky byly odlévány do válcových plastových forem o výšce 65 mm a průměru 30 mm. Po třech dnech od odlévání byly odformovány a uloženy do vody na dobu 28 dnů. Po vytvrzení byly vzorky nařezány na disky a umístěny do acetonové lázně. V té se nacházely po dobu 14 dnů. Důvodem, proč byly vzorky vloženy do acetonové lázně, bylo zastavení další hydratace v cementu. Po vyjmutí vzorků byl jejich povrch zbroušen a následně leštěn metalografickým postupem. Takto připravené vzorky byly postupně testovány nanoindentací. Po nanoindentaci byla na discích provedena mikrostrukturální analýza. Ta byla doplněna i o analýzu na přísadách v sypkém stavu, tak aby bylo možné popsat velikost a tvar jednotlivých částic.

4.2.1 Nanoindentace

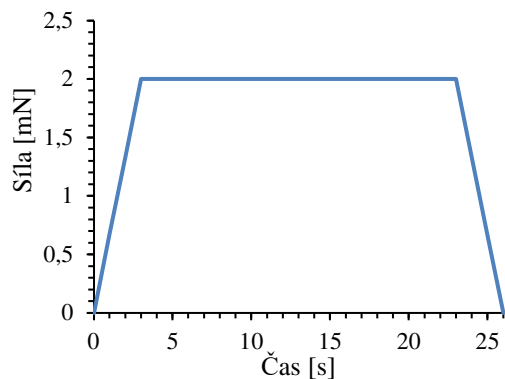
Mikromechanické vlastnosti byly měřeny pomocí nanoindentoru CSM Instruments (Obr. 4.6). Z naměřených hodnot byly sestaveny histogramy jednotlivých testovaných cementových past a následně porovnány mezi sebou.



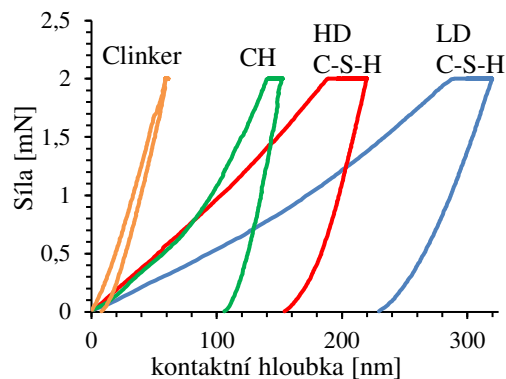
Obr. 4.6: Měřicí soustava nanoindentoru CSM Instruments skládající se z optického světelného mikroskopu a nanoindentačního testeru

Během experimentu bylo pomocí nanoindentoru na každém vzorku provedeno celkem 400 vpichů (indentů) složených z matice 20 x 20. Vzdálenost jednotlivých vpichů byla 10 μm . Každý vpich byl řízen zátěžovou zkouškou se zatěžovací funkcí trvající 26 sekund. Funkce měla lichoběžníkový tvar (Obr. 4.7). První částí funkce bylo lineární zatížení s rychlostí 40 mN/min trvající 3 sekundy. V druhé části bylo konstantní zatížení po dobu 20 sekund a poslední částí funkce bylo lineární odtížení rychlostí 40 mN/min trvající 3 sekundy. Maximální dosažená síla při zatížení byla 2000 μN .

Na Obr. 4.8 jsou vykresleny typické průběhy (zatížení – hloubka) pro různé fáze naměřené v materiálu. Materiálové vlastnosti pro jednotlivé vpichy byly vyhodnoceny metodou Olivera Pharr [11]. Z vyhodnocování byly vyřazeny všechny vadné vpichy, které byly způsobeny pórovitostí a drsností povrchu. Metodou Oliver a Pharr byly pro jednotlivé vpichy získány hodnoty redukovaného modulu pružnosti E_r a tvrdosti H . Výsledky byly navíc doplněny o indentační parametr dotvarování CIT .



Obr. 4.7: Zatěžovací funkce indentů



Obr. 4.8: Indentační křivky pro různé fáze cementové pasty

Redukovaný modul pružnosti je obvykle definován podle rovnice

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A_c}}, \quad (4.1)$$

kde S je odtěžovací tangenciální tuhost, β je korekční koeficient tvaru hrotu, A_c je kontaktní plocha hrotu.

Redukovaný modul pružnosti lze použít k výpočtu Youngova modulu pružnosti izotropních materiálů [11] se známým Poissonovo číslem materiálu (pro všechny fáze bylo v této práci uvažováno Poissonovo číslo rovno $\nu = 0.2$).

Modul pružnosti E_s se pak určí ze vztahu

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s}, \quad (4.2)$$

kde E_i je modul pružnosti indentoru, ν_i je Poissonovo číslo indentoru, E_s je modul pružnosti vzorku, ν_s je Poissonovo číslo vzorku.

Tvrlost materiálu H je definovaná jako střední hodnota kontaktního tlaku při maximálním zatížení. Lze ji zapsat vztahem

$$H = \frac{P_{max}}{A_c}, \quad (4.3)$$

kde P_{max} je maximální síla při indentaci a A_c je kontaktní plocha hrotu.

Indentační parametr dotvarování CIT je definován jako relativní změna mezi hloubkami h_1 v čase t_1 a h_2 v čase t_2 . CIT je závislý na kontaktní síle P a na době držení této síly a je vyjádřen vztahem

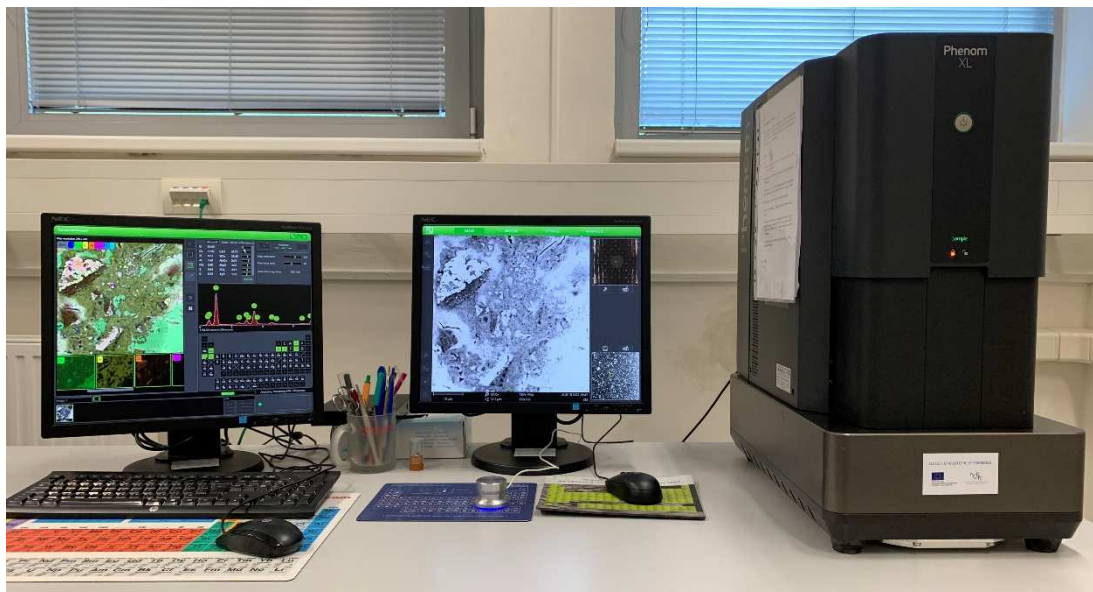
$$CIT_{(P,t_1,t_2)} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100. \quad (4.4)$$

4.2.2 Mikrostrukturální analýza

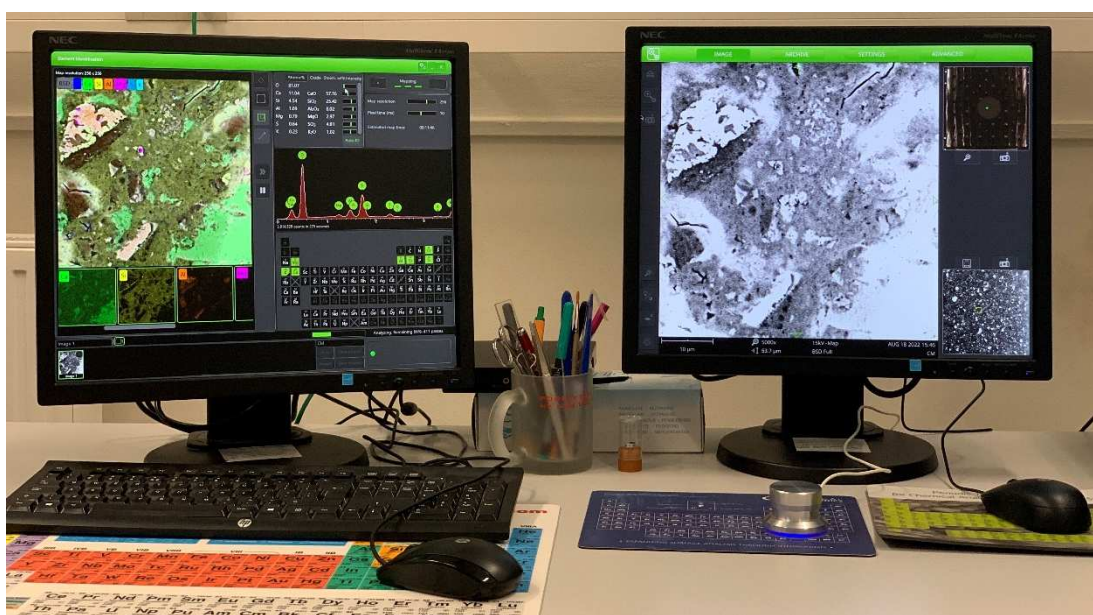
Výsledky mikromechanických vlastností modifikovaných cementových past získaných pomocí nanoindentoru CSM Instruments byly na mikroúrovni navíc doplněny o mikrostrukturální analýzu.

Základní mikrostrukturální analýza byla provedena skenovacím elektronovým mikroskopem (Scanning Electron Microscope – SEM). Analýza mikrostruktury byla provedena na modifikovaných cementových pastách metakaolinem a sepiolitem. Výsledky byly porovnány s kontrolní cementovou pastou. Kromě cementových past byly zkoumány i samotné přísady v sypkém stavu použité v jednotlivých sériích výzkumu.

K analýze byl použit skenovací elektronový mikroskop Phenom XL (Obr. 4.9). Na něm byly pořízeny snímky pomocí zpětně odražených elektronů (Back Scattered Electrons – BSE). Ty byly doplněny o energetickou disperzivní rentgenovou spektroskopii (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy – EDS – Obr. 4.10). Jejich použitím bylo možné zkoumat fázové a chemické složení cementových past a tvar a velikost jednotlivých částic testovaných materiálů na mikroúrovni.



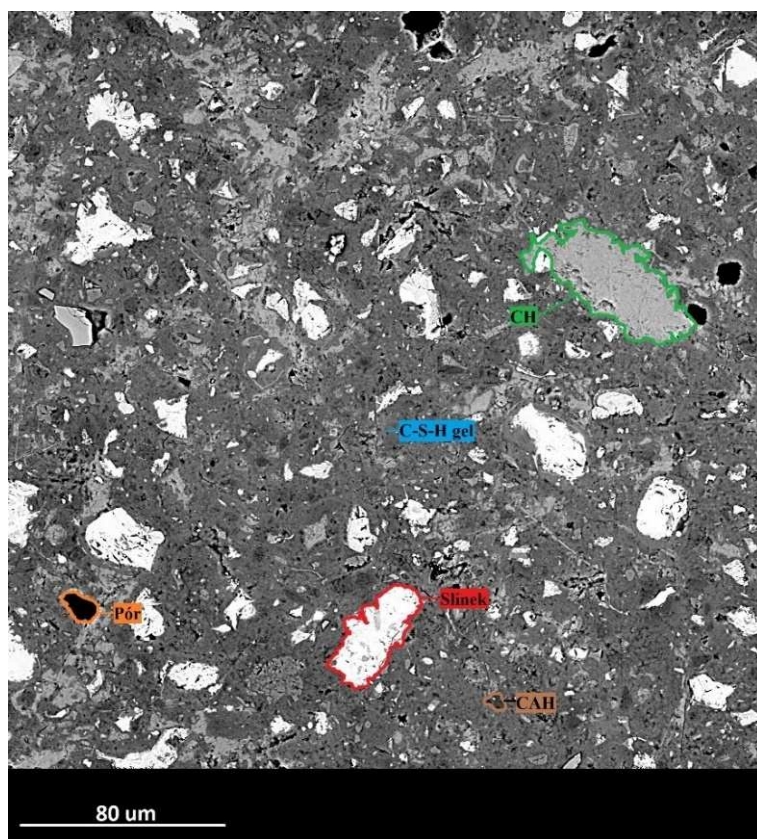
Obr. 4.9: Skenovací elektronový mikroskop Phenom XL



Obr. 4.10: Zkoumání mikrostruktury vzorku – energetická disperzní rentgenová spektroskopie

Mikrostruktura cementových past je heterogenní a tvoří ji několik hydratačních produktů, které ovlivňují mechanické vlastnosti ztvrdlých cementových past. Hlavními produkty, které vznikají při hydrataci, jsou CH, C-S-H gel a CAH. Kromě nich se ve struktuře cementových past objevují nezhydratované slínky, póry a praskliny. Díky rozdílným atomovým číslům u jednotlivých produktů, lze určit fázové složení jednotlivých cementových past.

Fázové složení bylo zkoumáno na snímcích získaných pomocí BSE. Na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) bylo pro každou směs pořízeno celkem 12 snímků s viditelným fázovým složením jednotlivých cementových past (Obr. 4.11). Velikost vyhodnocované plochy na jednom snímku byla 300 x 300 μm . Na snímcích byla následně provedena obrazová analýza fázového složení. Jejím výsledkem bylo procentuální zastoupení jednotlivých fází cementové pasty. Ze získaných procentuálních zastoupení byla vypočtena průměrná hodnota zastoupených fází.

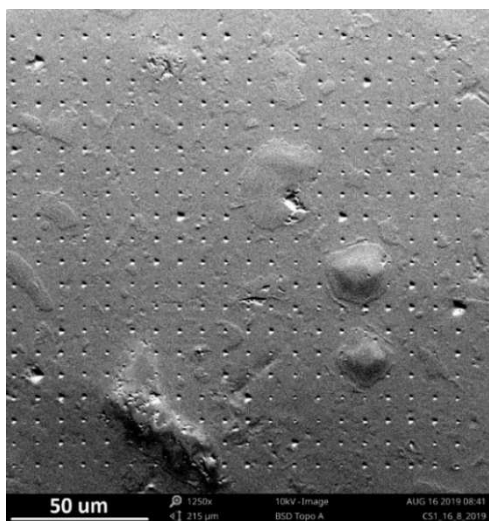


Obr. 4.11: Snímek ze SEM s viditelnými fázemi

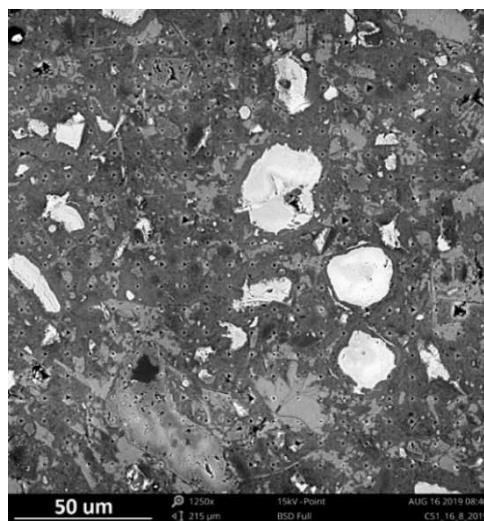
Kromě obrazové analýzy ze snímků BSE byla provedena i EDS analýza. Jejím výsledkem byly 3 mapy chemického složení pro každou cementovou pastu s procentuálním zastoupením jednotlivých chemických prvků obsažených ve vzorku. Mapy byly dále doplněny a procentuální zastoupení jednotlivých oxidů zastoupených v cementových pastách.

Kromě výše zmíněných analýz byly v místech provedené nanoindentace zhotoveny snímky topografie (Obr. 4.12) povrchu a snímky pomocí BSE (Obr. 4.13).

Ty byly následně porovnány s naměřenými hodnotami redukovaného modulu pružnosti získaného z nanoindentace.

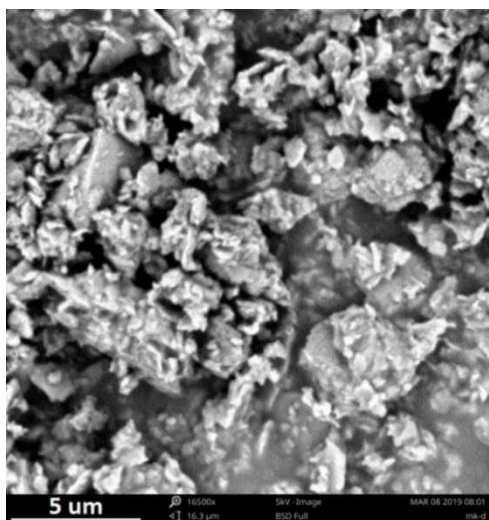


Obr. 4.12: Topografie povrchu s viditelnými vpichy po indentaci

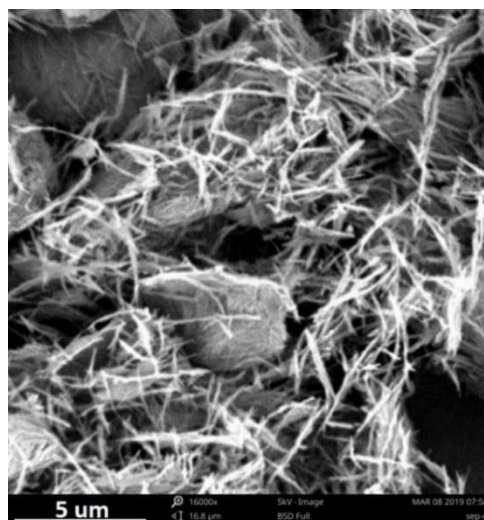


Obr. 4.13: Snímek povrchu zkoumaného vzorku s viditelnými jednotlivými fázemi cementu získaným pomocí BSE

Výzkum mikrostruktury se nezaměřoval pouze na ztvrdlou cementovou pastu, nýbrž i na samotné přísady v sypkém stavu použité v jednotlivých sériích. Celý výzkum byl doplněn o snímky BSE jednotlivých přísad v sypkém stavu (Obr. 4.14 a 4.15). Na snímcích byly zjišťovány velikosti a tvary jednotlivých částic zkoumaných materiálů.



Obr. 4.14: SEM obrázek metakaolinu



Obr. 4.15: SEM obrázek sepiolitu

4.3 Experimenty na makroúrovni

Kromě experimentů na mikroúrovni byla provedena řada experimentů na makroúrovni. Mezi nejdůležitější z těchto experimentů patřily měření viskozity cementových past a bočního tlaku na cementových pastách a betonech. Ty byly dále doplněny o další experimenty popisující například mechanické vlastnosti nebo rozliv cementových past.

4.3.1 Mechanické vlastnosti cementových past

Mechanické vlastnosti betonu jsou ovlivněny z velké části vlastnostmi cementové pasty, která tvoří hlavní nosný spojující prvek mezi jednotlivými zrny kameniva, proto byla první série experimentů na cementových pastách doplněna o mechanické vlastnosti na makroúrovni. Byla zjišťována pevnost v ohybu pomocí tříbodového ohybu (Obr. 4.16) a pevnost v tlaku (Obr. 4.17), které byly provedené ve standardním elektromechanickém lisu.

Celkem byly vyrobeny čtyři směsi, z čehož tři směsi byly modifikované pomocí přísad. Poslední směs byla čistá cementová pasta sloužící jako kontrolní. Přesné složení a označení směsí je uvedeno v Tab. 4.2. Pro tyto testy byly pro každou směs cementové pasty modifikované pomocí přísad vyrobeny tři trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Vyroběné trámečky byly po dvou dnech od zalití odbedněny a po dobu 28 dnů uskladněny ve vodní lázni o teplotě 20 °C. Trámečky byly následně po uplynutí této doby vyjmuty z vodní lázně, osušeny, zváženy a otestovány. Trámečky byly nejdříve zkoušeny na tříbodový ohyb po němž následovala zkouška pevnosti v tlaku na zlomených zbytcích trámečků.

Těmito testy byl zjišťován vliv jednotlivých přísad na konečné mechanické vlastnosti cementových past modifikovaných pomocí metakaolinu a sepiolitu. Výsledky mechanických vlastností modifikovaných cementových past byly následně porovnány s kontrolní cementovou pastou.



Obr. 4.16: Zkouška třibodovým ohybem



Obr. 4.17: Zkouška pevnosti v tlaku na zbytku trámečku

4.3.2 Rozliv cementových past a malt

Dalším experimentem na cementových pastách byl test rozlivu pomocí pokleповého stolku. Kromě cementových past byl rozliv doplněn o testování i na maltách, které vycházely ze složení otestovaných cementových past. Účelem tohoto testu bylo zjistit vliv testovaných přísad na rozliv, a tím i na viskozitu materiálu. U rozlivu byly zachovány stejné vstupní parametry, tedy vodní součinitel a množství a typ přidaného superplastifikátoru.

Testy rozlivu byly prováděny na druhé sérii materiálů. Tato série se liší od první tím, že byly použity tři druhy cementů, kterými byly CEM I 42,5R a CEM I 52,5R od firmy Českomoravský cement a CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement. Podrobnější výpis všech použitých materiálů pro druhou sérii je uveden v kapitole 4.1.

Experiment byl prováděn pomocí Hägermannova pokleповého stolku. K rozlivu byl používán standartní komolý kužel dodávaný se stolkem. Jeho rozměry jsou dolní průměr 100 mm, horní průměr 70 mm a výška 60 mm (Obr. 4.18).



Obr. 4.18: Hägermannův pokleповý stůl spolu s kuželem

Před měřením byly jednotlivé složky testované směsi naváženy a smíchány. Míchání probíhalo po dobu 3 minut, kdy po první minutě od smočení cementu vodou

byla směs ručně promíchána. Tím se dosáhlo odlepení zbylého cementu od povrchu nádoby a vytvoření homogenní struktury. Směs byla po míchání následně vložena do měřicího komolého kuželu. Ten byl naplněn až po okraj testovanou směsí. Komolý kužel byl následně zvednut v páté minutě od zamíchání. Po jeho zvednutí byla změřena výška a průměr. Následně bylo provedeno 15 poklepů a bylo zopakováno měření. Výsledky byly zapsány do tabulky. Celý tento proces byl též zaznamenáván na digitálním fotoaparátém pro další zkoumání.

4.3.3 Viskozita

Velká část této práce se zabývala stanovením viskozity a obecně reologickými vlastnostmi cementových past modifikovaných vybranými přísadami. K měření reologických vlastností jednotlivých cementových past byl použit rotační reometr Thermo Scientific HAAKE Viscotester iQ (Obr. 4.19). Při testech byl reometr osazen lopatkovým rotorem CC38/Ti/SE (Obr. 4.20). Potřebné množství testované směsi bylo vloženo do testovacího válečku CCB43/SS/SE (Obr. 4.21).



Obr. 4.19: Reometr Thermo Scientific HAAKE Viscotester iQ



Obr. 4.20: Lopatkový rotor CC38/Ti/SE



*Obr. 4.21: Testovací váleček
CCB43/SS/SE s odměrkou*

Experimenty viskozimetrie na jednotlivých směsích byly sestaveny tak, aby byl získán časový průběh pro jednotlivé reologické vlastnosti.

Na reometru byly provedeny dvě měření pro danou směs v daném čase s předem nastavenými kroky, které měly za úkol stanovit na měřeném směsi jeho reologické vlastnosti. Těmito vlastnostmi byly statická a dynamická mez kluzu a tixotropie.

Součástí experimentu bylo i stanovení rozlivu na Hägermannově poklepovém stolku. To bylo provedeno před samotným měřením na reometru. Důvodem bylo zajistit, aby testované směsi měly stejný vstupní parametr, kterým byl jejich rozliv po pěti poklepech. Velikost rozlivu byla definována hodnotou $20,0 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$. Rozliv směsi pak byl stanoven v šesté minutě od zamíchání cementu s vodou. Pokud směs splňovala danou velikost rozlivu, byla následně vložena do reometru a změřena. V opačném případě byla směs vyřazena a upravena tak, aby splňovala zmíněnou velikost rozlivu.

Reologické vlastnosti směsi byly měřeny na reometru ve třech časech a to 10, 30 a 60 minut po zamíchání cementu s vodou, kdy čas nula byl počátek míchání. Směs byla vždy před testování promíchána v odměrné kádince a následně vložena do testovací nádoby a poté do reometru. Po provedení obou měření byl váleček vyčištěn. Každá směs byla připravena a změřena celkem třikrát.

4.3.3.1 Statická mez kluzu a tixotropie

Účelem prvního měření bylo změřit tixotropii a statickou mez kluzu. Zkouška v reometru byla řízena pomocí smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ a skládala se ze tří na sobě navazujících částí. Celková doba měření byla 120 sekund. V první části byla směs vystavena konstantnímu lineárnímu zrychlení reometru po dobu 30 sekund ze smykové rychlosti 0 s^{-1} na $10,47 \text{ s}^{-1}$. Ve druhé části byla udržována konstantní smyková rychlost na hodnotě $10,47 \text{ s}^{-1}$ po dobu 60 sekund. V poslední třetí části byla smyková rychlost reometru lineárně snižována z $10,47 \text{ s}^{-1}$ na 0 s^{-1} po dobu 30 sekund. Tixotropii vyhodnotil program reometru automaticky, a to jako hodnotu rovnající se velikosti plochy mezi křivkami při zatěžování a odtěžování. Statická mez kluzu byla dána maximální hodnotou při měření, která byla vždy v prvním kroku měření.

4.3.3.2 Dynamická mez kluzu

Druhé měření mělo za úkol stanovit dynamickou mez kluzu směsi. To následovalo hned po prvním měření. Zkouška se skládala z osmy na sobě navazujících částí. Průběh zkoušky byl řízen v první a třetí až osmé části pomocí smykové rychlosti. Ve druhé části byla zkouška řízena smykovým napětím. V první části byla směs zatížena konstantní smykovou rychlostí rovnou $10,47 \text{ s}^{-1}$ po dobu 30 sekund. Tato část byla provedena z důvodu dostatečného rozmíchání po prvním měření. Ve druhé části byla směs vystavena nulovému smykovému napětí (0 Pa). Důvodem bylo zaručit nulového napětí ve směsi po prvotním rozmíchání. Ve třetí části zkoušky byla směs vystavena postupnému zrychlování smykové rychlosti z hodnoty $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ na $10,47 \text{ s}^{-1}$ v 15 krocích po dobu 30 sekund. Ve čtvrté části došlo k postupnému zpomalení smykové rychlosti z hodnoty $10,47 \text{ s}^{-1}$ na $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ v 15 krocích po dobu 30 sekund. Pro rozdělení jednotlivých kroků byla zvolena logaritmická křivka tak, aby byla co nejvíce zaznamenána první část křivky, ve které dochází k největší změně v napětí. V páté a v sedmé části zkoušky byla směs opět vystavena postupnému zrychlení a v šesté a osmé části zkoušky byla směs opět vystavena zpomalení. Hodnoty pro zrychlení a zpomalení byly shodné s hodnotami ze třetí potažmo čtvrté části. Hodnota pro dynamickou mez kluzu se odečítala z osmé části měření.

4.3.4 Boční tlak cementových past

Mezi hlavní cíle této práce bylo určit vhodnou přísadu či její kombinace, které by účinně snížily boční tlak na bednění a zároveň by během betonáže nesnižovala tečení betonu. Proto bylo rozhodnuto, jako mezikrok mezi měřením reologických vlastností na cementových pastách a měřením bočního tlaku betonu na bednění, provést řadu testů zaměřených na boční tlak na cementových pastách modifikovaných pomocí přísad. K tomuto účel byla navržena a vyrobena komora pro měření bočního tlaku. Měřicí komora byla osazena tlakovými senzory, které zaznamenávaly tlaky v komoře. Tlak byl přenášen přes membrány do sekundárních komor a dále do tlakových senzorů. Byly vyrobeny dvě verze měřících komor, která se od sebe lišili v použitém materiálu.

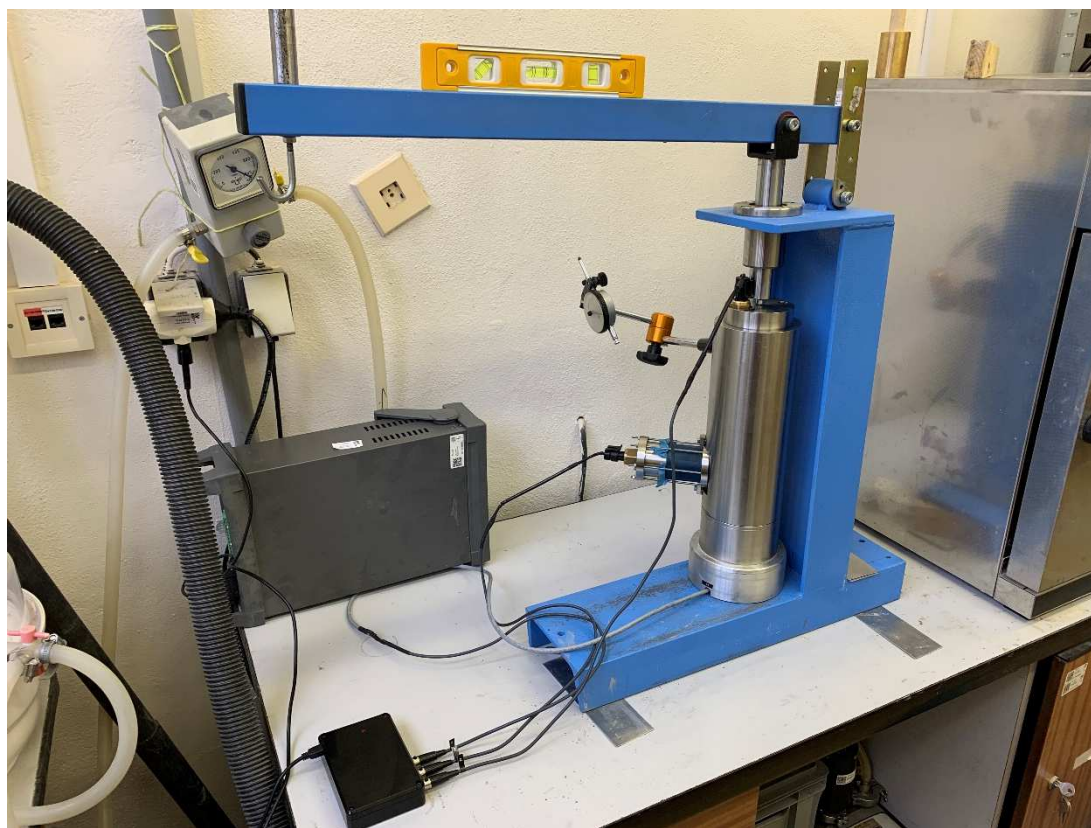
První verze byla vyrobena z hliníku (Obr. 4.22) a byla osazena dvěma tlakovými senzory. Plnicí komora byla navíc opatřena nástřikem, tak aby nedocházelo k reakci cementu s hliníkem. Přes veškerou snahu, této reakci zabránit, se toto řešení ukázalo jako nedostatečné.



Obr. 4.22: První verze měřící komory z hliníku pro měření bočního tlak cementu

Vzhledem k problémům s hliníkovou komorou bylo rozhodnuto o výrobě druhé měřicí komory z nerezové oceli (Obr. 4.23). Při jejím návrhu byly uplatněny poznatky z výroby a obsluhy první komory. Přistoupilo se k několika úpravám a vylepšením tak, aby byly tyto nedostatky eliminovány. K zatěžování byl použit jednoduchý pákový lis.

Na Obr. 4.24 jsou popsány jednotlivé části druhé měřicí komory. Oproti původní komoře byl ke dvěma tlakovým sensorům přidán třetí. Ten byl umístěn do pístního válce. Díky tomu bylo možné odečíst tlak přímo pod pístovým válcem. Dále bylo víko osazena dvěma těsnícími kroužky (Obr. 4.25), které měly za úkol utěsnit mezeru mezi válcem a stěnou komory. Kromě přidaného třetího senzoru byly kompletně předělány sekundární komory pro dva spodní senzory (Obr. 4.26).

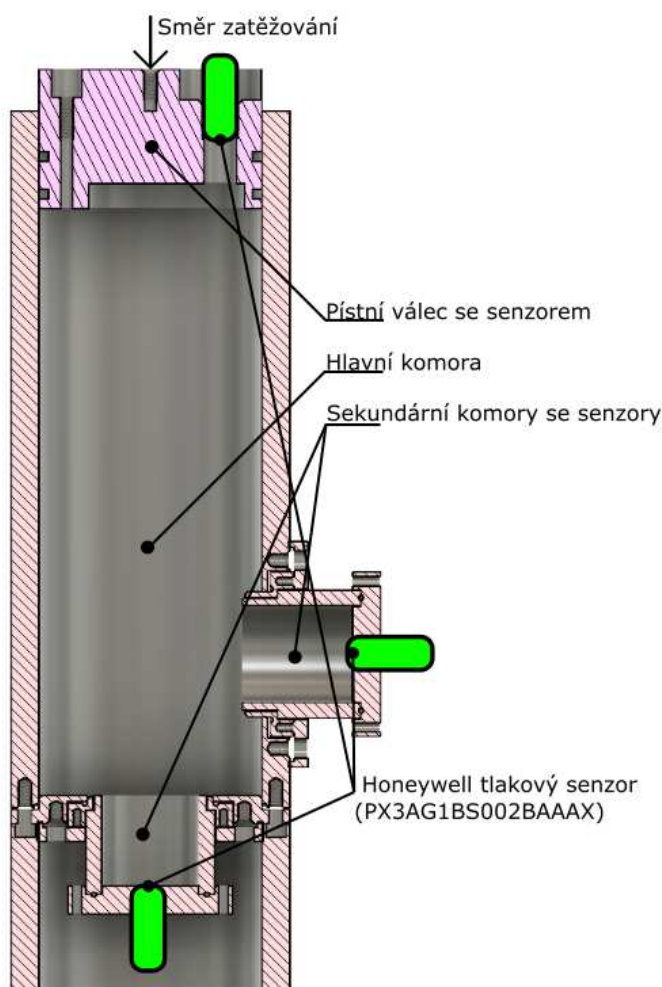


Obr. 4.23: Druhá verze měřicí komory vyrobená z nerezů osazena v pákovém lisu s připojenou měřicí aparaturou

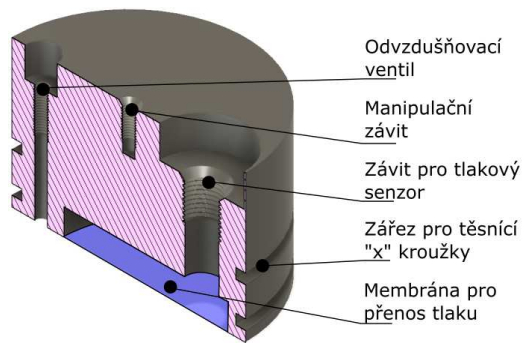
Test bočního tlaku probíhal po dobu dvou hodin a lze ho rozdělit na dvě části. V první části, která trvala jednu hodinu, byly smíchány navážené složky. Míchání probíhalo po dobu 50 minut. Touto délkou se simulovala doba výroby a dopravy betonu na stavbu. Po přibližně 45 minutách byly připojeny tlakové senzory k měřicí

aparatuře tak, aby byl získán atmosférický tlak a ten mohl být následně odečten od naměřených hodnot. Po uplynutí 50 minut se přikročilo k naplnění hlavní komory cementovou pastou. Komora byla naplněna po vyznačený bod. Následně byla na cementovou pastu nalita vrstva oleje, která zaručovala rovnoměrné zatížení od pístu na cementovou pastu. Po naplnění byla komora osazena pístovým válcem se třetím senzorem. Následně byla komora vložena do pákového lisu. Ve druhé části testu byla měřicí komora zatěžována. Po jedné hodině od zamíchání cementu s vodou byla komora zatížena 1 kg. Poté byla soustava každých 10 minut přitížena o další kilogram. Na konci experimentu viselo na pákovém lisu 6 kg. Test končil po dvou hodinách od smočení cementu vodou.

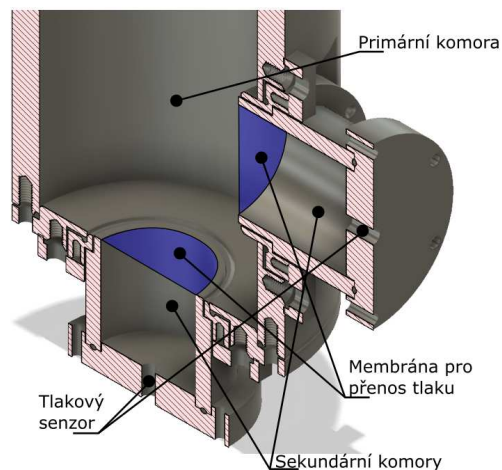
Naměřené hodnoty tlaků byly následně vyhodnoceny. Z výsledků byl sestaven graf zobrazující průběh tlaků.



Obr. 4.24: Popis jednotlivých částí měřicí komory



Obr. 4.25: Detail pístního válce se senzorem



Obr. 4.26: Detail spodní části komory

4.3.5 Boční tlaky betonu in situ

Kromě bočního tlaku cementových past v měřící komoře byl zjišťován i boční tlak na referenčních stěnách přímo na vyrobeném betonu na stavbách. Pro tato měření byla vytvořena měřící komora (Obr. 4.27), na které bylo možné měřit boční tlak betonu. Komora byla zabudovaná do jednoho dílu běžně dostupného bednění od firmy Peri. Bednění bylo před každou betonáží jeden den dopředu osazeno na místo. Po jeho osazení byla komora překontrolována (Obr. 4.28) a následně stěna zabeďněna i z druhé strany.



Obr. 4.27: Měřící komora pro měření bočního tlaku betonu na bednění



Obr. 4.28: Zabudovaná komora v bednění stěny – pohled zvnitřku stěny

K plnění byla používána bádie s rukávem. Vzhledem k rozdílným výškám stěn na stavbách probíhala betonáž stěny v několika taktech, které byly provedeny s desetiminutovou přestávkou mezi sebou. Počet taktů se pohyboval nejčastěji mezi v pěti až šesti. Výška jednoho taktu se pohybovala okolo 0,5 m. Přesná výška jednotlivých vrstev byla měřena pomocí pásma a v průběhu ukládání betonové směsi orientačně pomocí měřicích latí nebo laserového dálkoměru. Před každou ukládkou byla měřena konzistence pomocí rozlití kužele. Výška komory od paty stěny byla 0,17 m.

S přibývajícími testy na skutečných konstrukcích bylo zjištěno, že pouhé měření bočního tlaku není dostačující. Došlo tedy k postupnému rozvoji celé měřicí soustavy. Postupem času přibylo k měření bočního tlaku i měření tlaku svislého (Obr. 4.29), který byl měřen ve stejné výšce jako boční tlak. Důvodem pro umístění do stejné výšky bylo porovnání rozdílu mezi bočním a svislým tlakem. Při provádění experimentů byl vyzorován posun bednění. To znamená, že nelze bednění uvažovat jako tuze pevnou podporu, ale je nutné brát v potaz i jeho deformaci v průběhu betonáže. To si vyžádalo potřebu měřit deformace bednění v průběhu betonáže (Obr. 4.30). Nakonec bylo měření upraveno tak, aby bylo možné měřit boční tlaky a deformace při betonáži po výšce (Obr. 4.31 a 4.32). Takto rozšířené měření poskytuje představu o působení betonu a jeho bočního tlaku na konstrukci bednění.



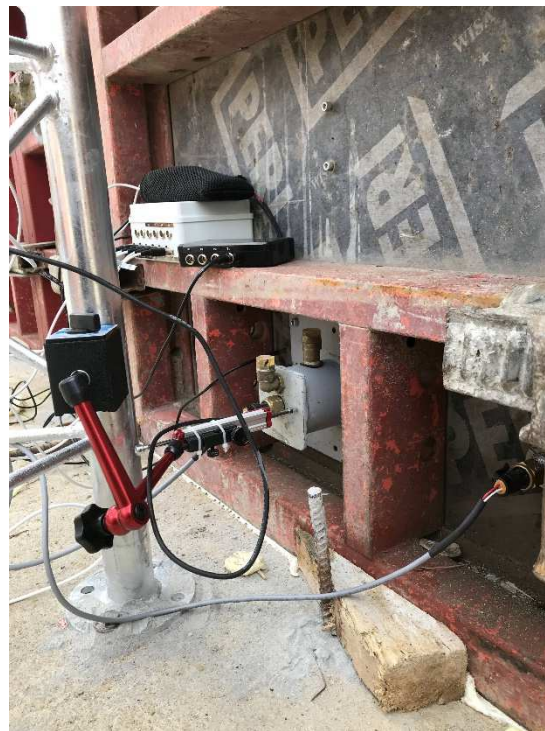
Obr. 4.29: Měřicí komora pro svislý tlak



Obr. 4.30: Analogové měření boční deformace v místě měření bočního tlaku



Obr. 4.31: Konstrukce pro osazení přístrojů pro měření tlaků a deformace



Obr. 4.32: Měřicí soustava pro měření bočního a vertikálního tlaku a boční deformace pomocí lineárních potenciometrů

5 Výsledky experimentů a diskuse

5.1 Výsledky na mikroúrovni

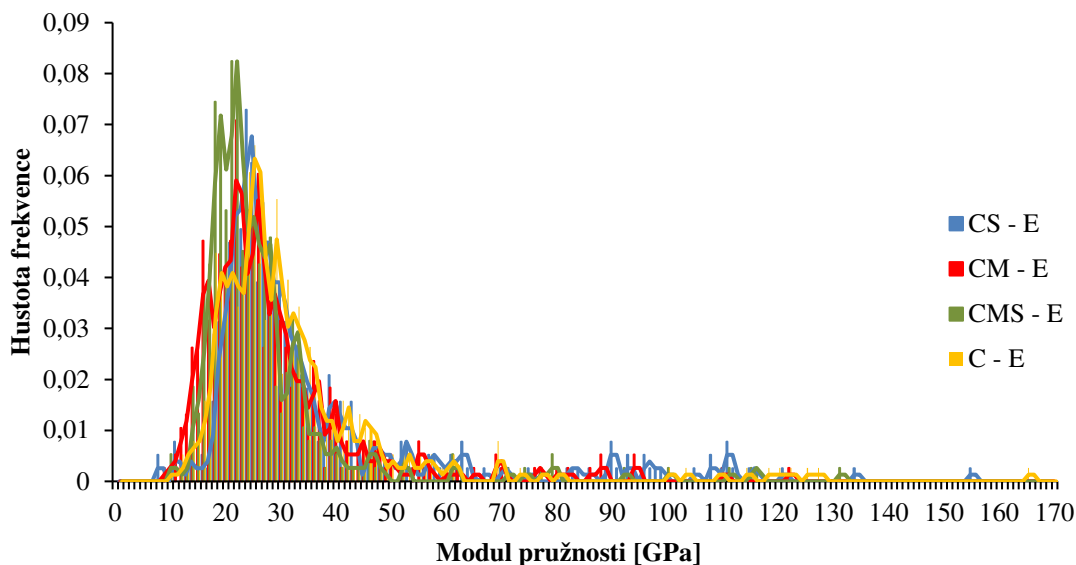
5.1.1 Mikromechanické vlastnosti cementových past

Z naměřených hodnot z nanoindentace byly sestaveny histogramy jednotlivých testovaných cementových past a následně porovnány mezi sebou. Z vyhodnocení byly vyřazeny všechny vadné vpichy, které byly způsobeny pórovitostí a drsností povrchu. Materiálové vlastnosti pro jednotlivé vpichy byly vyhodnoceny metodou Olivera Pharr [11]. Byly vyhodnoceny hodnoty redukovaného modulu pružnosti E_r a tvrdosti H . Výsledky byly navíc doplněny o indentační parametr dotvarování CIT .

5.1.1.1 Modul pružnosti

Na Obr. 5.1 jsou porovnány histogramy modulu pružnosti pro jednotlivé směsi cementových past. Hodnoty byly vypočteny ze sloučených výsledků nanoindentace. Porovnáním histogramů jednotlivých cementových past lze říct, že všechny směsi vykazují podobný trend. Hlavní vrchol u vzorku CM byl mezi 12,9 až 42,9 GPa. U směsi CS se vrchol pohyboval mezi 12,6 až 57,4 GPa. Hlavní vrchol u směsi CMS byl mezi 12,5 až 41,3 GPa. U kontrolní směsi se hodnoty modulu pružnosti nejčastěji pohybovaly v rozmezí od 12,7 do 49,5 GPa. Přičemž průměrná hodnota modulu pružnosti byla pro CM 27,9 GPa, pro směs CS 35 GPa, pro směs C 31,1 GPa a pro směs CMS byla průměrná hodnota rovna 26,9 GPa.

Výsledky ukazují, že obalové křivky modulů pružnosti pro směsi CM a CMS se posunuly doleva v porovnání s kontrolní směsí C. To potvrzuje předpoklad, že množství portlanditu v hydratovaném cementu se snížilo a obsah gelového hydrátu křemičitanu vápenatého (C-S-H) se zvýšil. Výsledky směsi CS vykazují podobné hodnoty v porovnání s kontrolní směsí C.

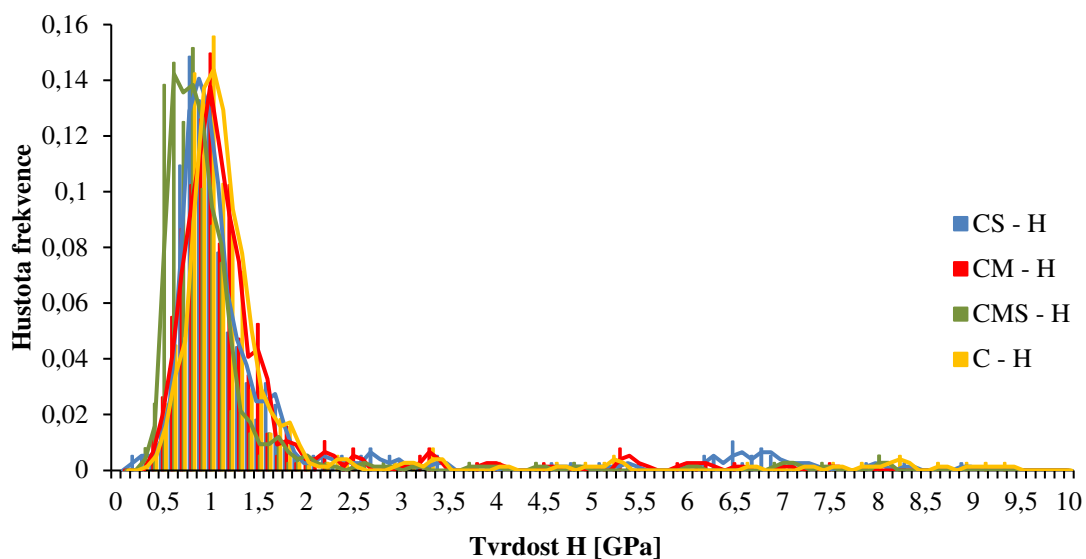


Obr. 5.1: Histogram modulu pružnosti s trendovou čarou – CS, CM, CMS a C.

5.1.1.2 Tvrdost

Mezi další získané a vyhodnocené materiálové vlastnosti patřila tvrdost. Z naměřených výsledků nanoindentace byly sestaveny histogramy tvrdosti pro jednotlivé testované cementové pasty a z nich byl sestaven celkový histogram (Obr. 5.2). Hodnoty byly vypočteny ze sloučených výsledků nanoindentace. Podobně, jako výsledky modulu pružnosti E , tak i histogramy tvrdosti vykazují podobný trend pro všechny směsi. Hlavní vrcholy tvrdosti naměřené pro směsi CM a C byly kolem 1,0 GPa. Ve směsi CS měla tvrdost hlavní vrchol kolem 0,9 GPa. U směsi CMS byl hlavní vrchol mezi hodnotami 0,6 až 0,8 GPa. Průměrná hodnota tvrdosti pro kontrolní směs C byla 1,31 GPa se směrodatnou odchylkou 1,38 GPa. Pro směs CS byla průměrná hodnota a směrodatná odchylka $1,46 \pm 1,58$ GPa. Průměrná hodnota tvrdosti směsi CM byla 1,22 GPa a směrodatná odchylka $\pm 1,02$ GPa. U poslední testované směsi byla průměrná hodnota a směrodatná odchylka tvrdosti $0,98 \pm 1,10$ GPa.

Z výsledků je patrné, že výsledky jsou u směsí CS, CM a C kvalitativně i kvantitativně rovnocenné. U směsi CMS došlo k posunu obalové křivky doleva v porovnání s ostatními cementovými pastami.

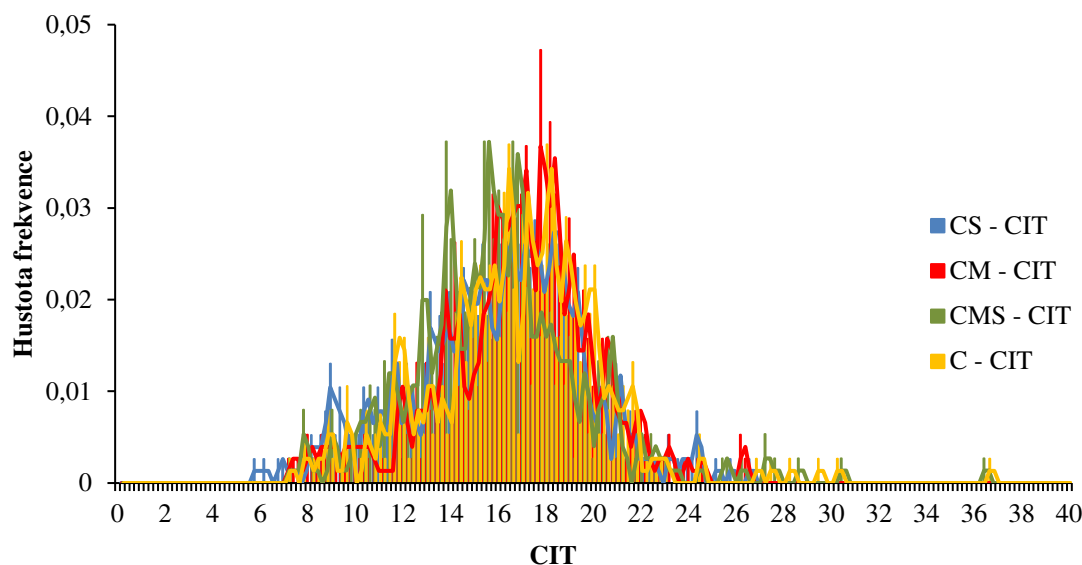


Obr. 5.2: Histogram tvrdosti s trendovou čarou – CS, CM, CMS a C.

5.1.1.3 Indentační parametr dotvarování CIT

Posledním vyhodnoceným údajem z nanoindentace byl indentační parametr dotvarování *CIT*. Ten nám poskytuje představu o možném dotvarování betonu. Pro jednotlivé testované cementové pasty byly sestaveny histogramy *CIT* a z nich byl opět sestaven celkový histogram (Obr. 5.3). Hodnoty byly jako u předchozích materiálových vlastností vypočteny ze sloučených výsledků nanoindentace. Opět byl u všech cementových past zjištěn podobný trend. Hlavní vrchol u vzorku CM byl mezi 11,8 až 22,2. U směsi CS se vrchol pohyboval mezi 8,4 až 21,6. Hlavní vrchol u směsi CMS byl mezi 9,8 až 21,0. U kontrolní směsi C se hodnoty *CIT* nejčastěji pohybovaly v rozmezí od 8,8 do 21,6. Přičemž průměrná hodnota a směrodatná odchylka indentačního parametru dotvarování *CIT* byla pro CM $16,6 \pm 3,3$, pro směs CS $15,9 \pm 3,9$, pro směs C $16,5 \pm 3,6$ a pro směs CMS byla průměrná hodnota a směrodatná odchylka rovna $15,8 \pm 3,7$.

Nejvyšší průměrná hodnota *CIT* je prokázána směsí CM, což naznačuje roli zvýšeného obsahu C-S-H při zvýšeném dotvarování. Rozdíly mezi vzorky však nejsou velké a směsi lze považovat za ekvivalentní při dotvarování.



Obr. 5.3: Histogram CIT s trendovou linií – CS, CM, CMS a C.

5.1.2 Mikrostrukturální analýza cementových past

5.1.2.1 Obrazová analýza cementových past

Na 12 snímcích pořízených na SEM pro jednotlivé směsi byla provedena obrazová analýza. Její výsledky jsou ukázány v Tab. 5.1. Průměrné procentuální zastoupení bylo doplněno o směrodatnou odchylku.

směs	Zastoupení fází				
	slínek	CH	C-S-H gel	CAH	Póry a praskliny
C	11,30 ± 0,47	22,21 ± 1,65	55,10 ± 0,95	8,25 ± 1,19	3,14 ± 0,66
CM	8,35 ± 0,86	17,72 ± 1,75	57,50 ± 1,92	11,82 ± 1,20	4,62 ± 0,95
CS	10,54 ± 0,91	16,27 ± 0,70	59,59 ± 1,14	11,51 ± 1,33	2,10 ± 0,41
CMS	8,74 ± 1,31	15,76 ± 1,34	59,70 ± 2,01	12,99 ± 0,84	2,82 ± 0,43

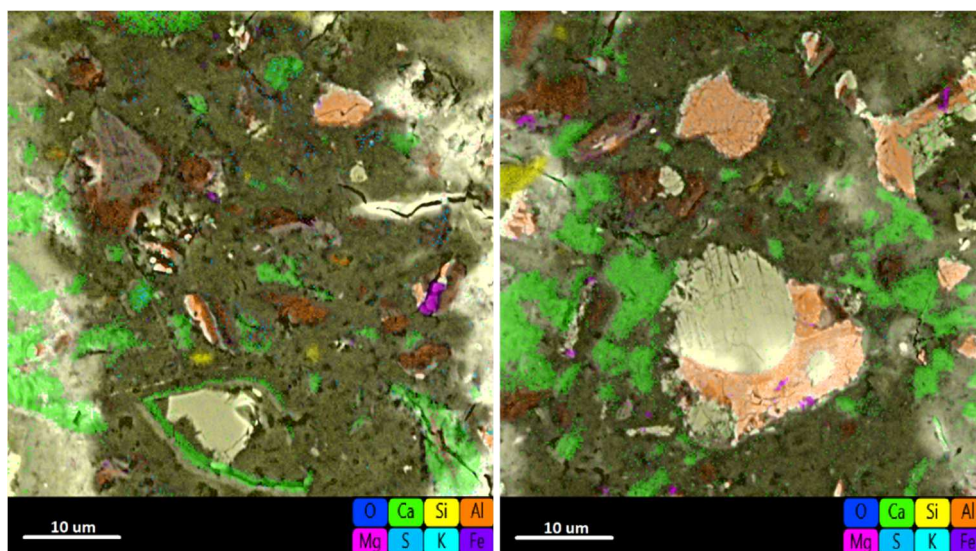
Tab. 5.1: Procentuální složení jednotlivých fází se směrodatnou odchylkou

Z výsledků je patrné snížení zbytkového slínku u modifikovaných cementových past. Procentuální zastoupení slínku u těchto směsí se pohybovalo od 8,35 % do 10,54 % a dosahovalo 75 % až 93 % hodnoty kontrolní směsi C, která byla 11,30 %. Stejný trend byl pozorován i u CH (portlanditu). I zde došlo k poklesu procentuálního zastoupení fáze ve struktuře modifikovaných cementových past a pohybovalo se mezi 15,76 % a 17,72 %. U kontrolní směsi C dosahovalo

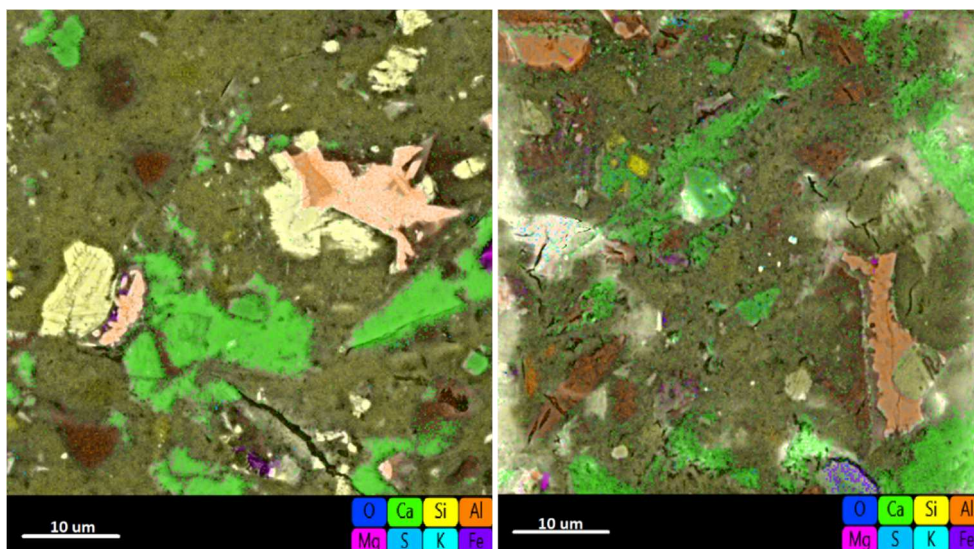
procentuální zastoupení portlanditu 22,21 %. U modifikovaných cementových past byl pozorován nárůst C-S-H gelu oproti kontrolní směsi C. U směsi CM bylo procentuální zastoupení C-S-H gelu 57,50 %, což představuje nárůst přibližně o 5 %. U směsi CS a CMS byl nárůst ještě větší. Hodnoty C-S-H gelu dosáhly hodnoty 59,59 % a 59,70 %, což představuje 10% nárůst oproti kontrolní směsi C. Tyto hodnoty potvrzují u směsí obsahujících metakaolin předpoklad nárůstu C-S-H gelu díky jeho reakci s cementem. U směsi obsahující sepiolit způsobila navázaná voda hydrataci většího množství slínku. To mělo za následek zvýšení C-S-H gelu v cementové pastě. U modifikovaných cementů došlo k nárůstu hydrátu křemičitanu vápenatého (CAH) přibližně o 50 % oproti kontrolní cementové pastě C. Naměřené hodnoty procentuálního zastoupení byly u směsí CM, CS a CMS od 11,82 % do 12,99 %. U kontrolní směsi dosáhla fáze CAH 8,25 % zastoupení.

5.1.2.2 EDS analýza

Pomocí energetické disperzivní rentgenové spektroskopie (EDS) byly na vzorcích vytvořeny mapy chemických prvků. Tyto mapy jsou zobrazeny na Obr. 5.4 a 5.5. Výsledkem z EDS analýzy jsou hmotnostní koncentrace jednotlivých chemických prvků. Tyto výsledky jsou uvedeny v Tab. 5.2. Dále nám EDS analýza poskytuje stechiometrické hmotnostní koncentrace pro jednotlivé oxidy obsažené v cementových pastách. Pro tyto výsledky byla sestavena Tab. 5.3.



Obr. 5.4.: Mapy chemických fází z analýzy EDS: a) C, b) CM,



Obr. 5.5: Mapy chemických fází z analýzy EDS c) CS a d) CMS.

V Tab. 5.2 jsou zobrazeny výsledky hmotnostních koncentrací jednotlivých chemických prvků. Z těch je patrný pokles množství kyslíku obsaženého ve směsích CM, CS a CMS. Tento pokles se pohyboval od 2 % do 23 %. Naopak u vápníku (Ca) je vidět nárůst hmotnostní koncentrace u všech tří modifikovaných cementových past. Tento nárůst byl u směsí CM a CMS 10 % až 20 %. U směsi CS došlo k nárůstu vápníku o přibližně 75 %. U ostatních prvků změřených pomocí EDS analýzy nedošlo k výraznější změně v jejich hmotnostní koncentraci.

Prvek	C	CM	CS	CMS
	Hmotnostní koncentrace [%]	Hmotnostní koncentrace [%]	Hmotnostní koncentrace [%]	Hmotnostní koncentrace [%]
O	71,05 ± 1,31	66,21 ± 0,37	54,71 ± 0,12	69,87 ± 1,19
Ca	17,57 ± 0,30	20,91 ± 0,36	31,20 ± 1,38	19,09 ± 1,65
Si	6,45 ± 0,50	6,83 ± 0,36	7,12 ± 0,84	6,66 ± 0,25
Al	2,07 ± 0,28	2,40 ± 0,26	2,71 ± 0,47	1,81 ± 0,36
Mg	0,96 ± 0,09	0,98 ± 0,04	1,24 ± 0,02	1,00 ± 0,10
S	1,02 ± 0,09	1,01 ± 0,00	1,24 ± 0,26	0,83 ± 0,10
K	0,41 ± 0,12	0,48 ± 0,02	0,35 ± 0,05	0,31 ± 0,09
Fe	0,46 ± 0,10	0,73 ± 0,04	1,42 ± 0,06	0,42 ± 0,04

Tab. 5.2: Hmotnostní koncentrace prvků v měřeních vzorcích

Kromě hmotnostní koncentrace chemických prvků byla získána během EDS analýzy i stechiometrická hmotnostní koncentrace oxidů. Její výsledky jsou uvedeny

v Tab. 5.3. Z porovnání jednotlivých výsledků je patrný nárůst oxidu vápenatého (CaO) u modifikovaných cementových past oproti kontrolní směsi C. Tento nárůst se pohyboval od 5 % do 20 %. Nejvyšší hodnotu měla směs se sepiolitem, u kterého tvořil oxid vápenatý až 60,93 % hmotnostní koncentrace. U oxidu křemičitého (SiO₂) došlo u směsí CM a CS k poklesu hmotnostní koncentrace v porovnání s kontrolní směsí C. Pokles se pohyboval od 10 % do 25 %. Modifikovaná cementová pasta CMS měla srovnatelnou hmotnostní koncentraci oxidu křemičitého.

Oxid	C	CM	CS	CMS
	Stechiometrická hm. konc. [%]	Stechiometrická hm. konc. [%]	Stechiometrická hm. konc. [%]	Stechiometrická hm. konc. [%]
CaO	51,77 ± 1,74	53,57 ± 1,01	60,93 ± 3,59	54,29 ± 2,98
SiO ₂	28,96 ± 0,86	26,73 ± 1,40	21,19 ± 2,23	29,05 ± 1,24
Al ₂ O ₃	8,22 ± 0,81	8,31 ± 0,88	7,11 ± 1,16	7,02 ± 1,58
MgO	3,32 ± 0,26	2,98 ± 0,11	3,37 ± 0,72	3,41 ± 0,43
SO ₃	5,34 ± 0,24	4,62 ± 0,02	3,97 ± 1,31	4,21 ± 0,64
K ₂ O	1,02 ± 0,26	1,05 ± 0,05	0,59 ± 0,08	0,78 ± 0,24
Fe ₂ O ₃	1,36 ± 0,24	1,92 ± 0,10	2,84 ± 0,16	1,24 ± 0,15

Tab. 5.3: Stechiometrická hmotnostní koncentrace oxidů v měřeních vzorcích

5.2 Výsledky na makroúrovni

5.2.1 Mechanické vlastnosti cementových past

Hlavním cílem tohoto šetření bylo zjistit vliv jednotlivých přísad na konečné mechanické vlastnosti modifikovaných cementových past pomocí metakaolinu nebo sepiolitu. Celkem byly vyrobeny čtyři směsi, z čehož tři směsi byly modifikované pomocí přísad. Poslední směs byla čistá cementová pasta sloužící jako referenční vzorek. Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku jsou uvedeny v Tab. 5.4. Hodnoty pevností jsou doplněny o směrodatné odchylky.

5.2.1.1 Pevnost v tahu za ohybu

Výsledky pevnosti v tahu za ohybu byly měřeny pomocí tříbodového ohybu na třech vzorcích tvaru trámečků pro každou směs. Z výsledků byla vypočtena průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu a byla doplněna o směrodatnou odchylku.

Průměrná pevnost v tahu za ohybu kontrolní směsi (C) byla $2,80 \pm 1,14$ MPa. Pro směs se sepiolitem (CS) byla průměrná pevnost v tahu za ohybu $2,30 \pm 0,22$ MPa. Průměrná pevnost v tahu za ohybu směsi s metakaolinem (CM) byla $2,43 \pm 0,65$ MPa. Pro směs (CMS) kombinující obě testované přísady byla pevnost v tahu za ohybu $3,20 \pm 0,65$ MPa. Z výsledků je patrné snížení pevnosti v tahu za ohybu u směsí CM a CS. Pevnost dosahovala přibližně 85% kontrolní směsi C. V případě směsi CMS došlo ke zvýšení pevnosti a to na 115% kontrolní směsi C. To mohlo být pravděpodobně způsobeno nižší dávkou cementu, která měla za následek nižší hydratační teplo a tím i celistvější vnitřní strukturu bez trhlin.

5.2.1.2 Pevnost v tlaku

Výsledky pevnosti v tlaku byly měřeny pro každou směs na šesti rozlomených polovinách, které zbyly po testování trámečků na pevnost v tahu za ohybu. Následně byla pro každou směs vypočtena průměrná hodnota pevnosti v tlaku, která byla doplněna směrodatnou odchylkou. Průměrná pevnost v tlaku kontrolní směsi (C) byla $65,9 \pm 5,7$ MPa. Pro směs se sepiolitem (CS) byla průměrná pevnost v tlaku $63,6 \pm 1,1$ MPa. Průměrná pevnost v tlaku směsi s metakaolinem (CM) byla $63,1 \pm 3,4$ MPa. Pro směs (CMS) kombinující obě testované přísady byla pevnost v tlaku rovna $58,1 \pm 1,9$ MPa. Lze konstatovat, že průměrná pevnost v tlaku byla u směsí CM a CS přibližně 95% kontrolní směsi C. Pevnost v tlaku u směsi CMS dosahovala přibližně 90% kontrolní směsi C.

Směs	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
C	$2,80 \pm 1,14$	$65,87 \pm 5,8$
CM	$2,43 \pm 0,65$	$63,11 \pm 3,4$
CS	$2,30 \pm 0,22$	$63,58 \pm 1,1$
CMS	$3,20 \pm 0,65$	$58,12 \pm 1,9$

Tab. 5.4: Tabulka pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Z výsledků pevnosti v tahu za ohybu na cementových pastách je patrný vliv přísad. Průměrná hodnota pevnosti se pohybovala mezi 85-115 % kontrolní směsi. V případě pevnosti v tlaku se průměrná hodnota modifikovaných cementových past pohybovala mezi 90-95 % kontrolní směsi.

Dá se říct, že přísady metakaolinu a sepiolitu nemají zásadní vliv na makromechanické vlastnosti cementové pasty, a tím ani na vlastnosti betonu.

5.2.2 Výsledky rozlivu

Rozliv byl testován jak na cementových pastách, tak i na maltách. V experimentech byly vyzkoušeny tři druhy cementů, a to CEM I 42,5R, CEM I 52,5R, oba od firmy Českomoravský cement, a CEM II/A-M (S-LL) 42,5R od firmy Lafarge Cement. Vodní součinitel u cementových past byl zvolen byly $w/c = 0,40$ a $0,45$. U malt byl vodní součinitel $w/c = 0,5$ a $0,55$. Z přísad byl kromě metakaolinu LB05 Mefisto a sepiolitu Sigma použity sepiolity Rheoplus a celulózy Arbocel. Z chemických přísad byl použit superplastifikátor Stachema S33.

5.2.2.1 Rozliv cementových past

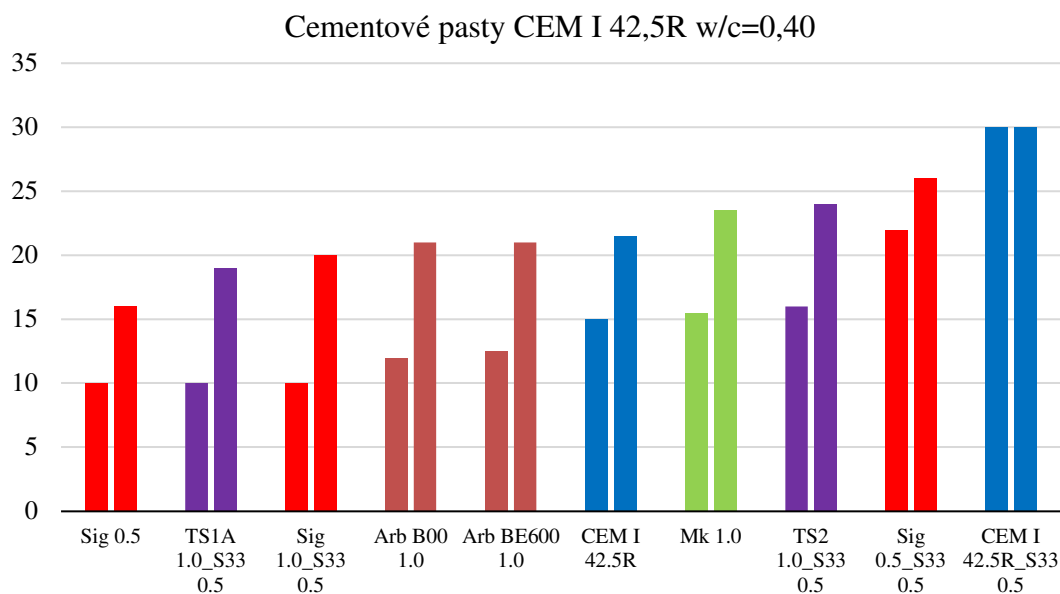
Na Obr. 5.6 až 5.11 jsou zobrazeny výsledky rozlivů cementových past. Rozlivy jsou seřazeny vzestupně od nejmenšího po největší. První hodnota u dané směsi je hodnota rozlivu a druhá je rozlivu po patnácti poklepech na Hägermannově poklepovém stolku. Nejmenší rozliv mohl být 10 cm, což je spodní průměr komolého kužele, a největší 30 cm, což je naopak průměr stolku.

Z výsledků je patrný vliv jednotlivých přísad na viskozitu a tím na rozliv cementových past. Největší změny způsobují přísady na bázi sepiolitu. Ty byly následovány přísadami na bázi celulózových vláken. Minimální a spíše zvětšující efekt na rozliv měl metakaolin.

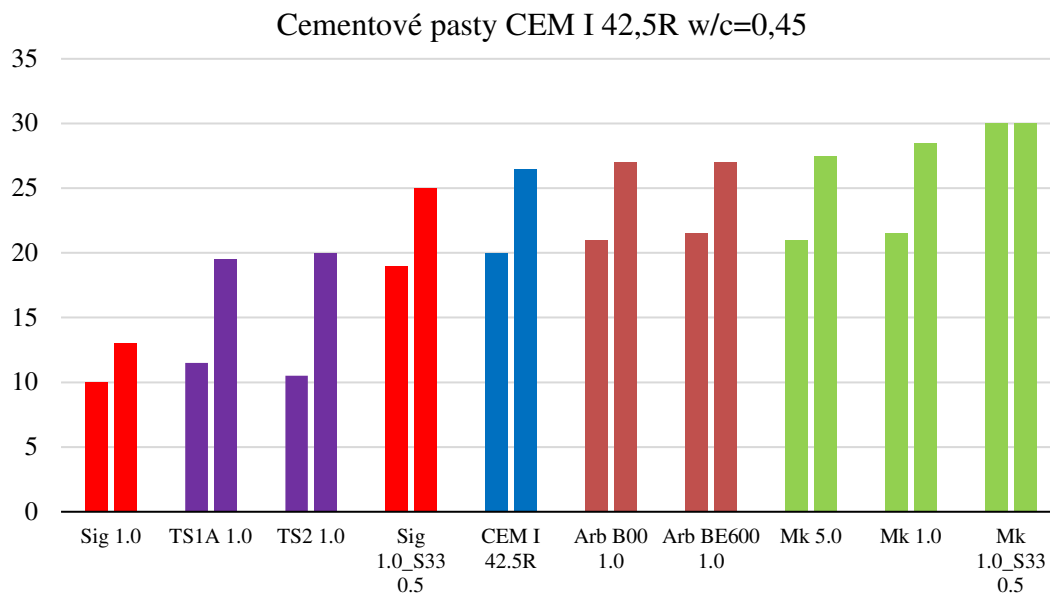
Dále se dá říct, že přidáním pouze 0,5 % sepiolitu lze ovlivnit rozliv cementové pasty o 30 %. Se zvyšující dávkou je tento efekt ještě výraznější. V některých případech nebylo možné směs zhotovit. Sepiolity Sigma a Rheoplus (označeny TS1 a TS2) jsou srovnatelné. Větší vliv na rozliv, než jejich složení má správné rozmísení a postup při rozmísení. Tento vliv je patrný z výsledků na Obr. 5.9 a 5.11, kde byly provedeny dvě záměsi stejné směsi. Vliv celulózových přísad Arbocel byl daleko menší než u sepiolitu a byl v některých případech srovnatelný s čistou cementovou pastou. Pro regulaci viskozity by byla nutná větší dávka celulózy. To samé lze říct i o metakaolinu. I zde se 1 % dávka ukázala jako nedostatečná a bylo by nutné použít větší dávku metakaolinu. Z porovnání výsledků rozdílných cementů lze konstatovat, že rozlivy u cementů CEM I 42,5R a CEM II 42,5R jsou srovnatelné. Rozlivy

u cementových past obsahujících cement CEM I 52,5R jsou výrazně nižší než u zbylých cementů. Projevuje se zde větší specifický povrch a rychlejší nástup hydratace tohoto cementu.

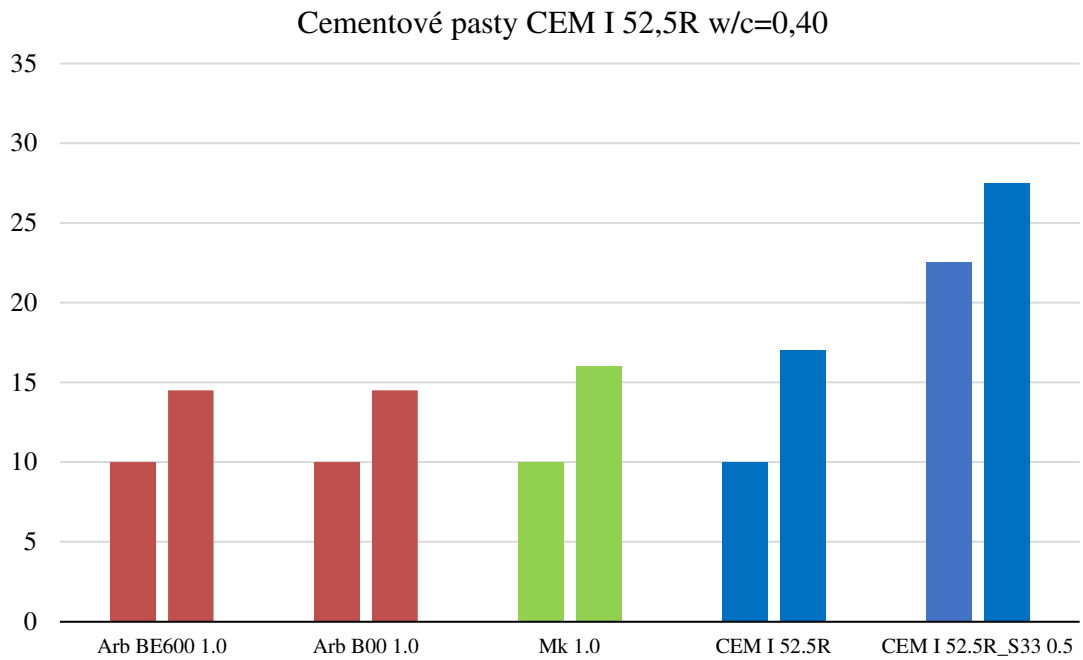
Plastifikátor jasně zvyšuje rozlivy u všech cementových past a všech vodních součinitelů.



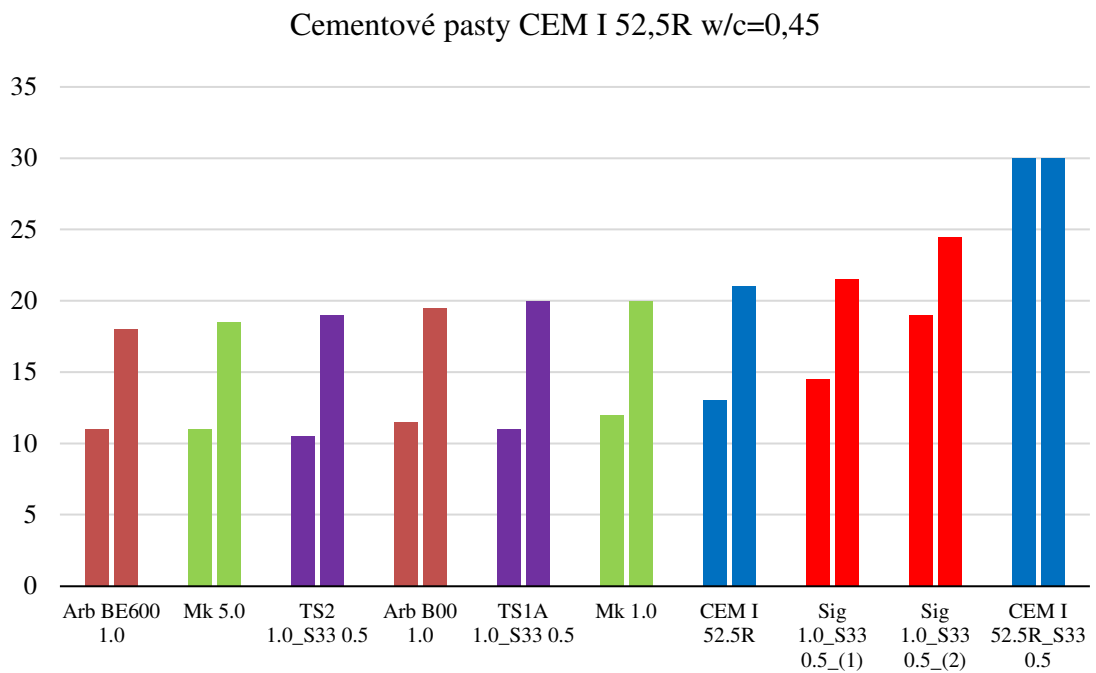
Obr. 5.6: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 42,5R a w/c = 0,40



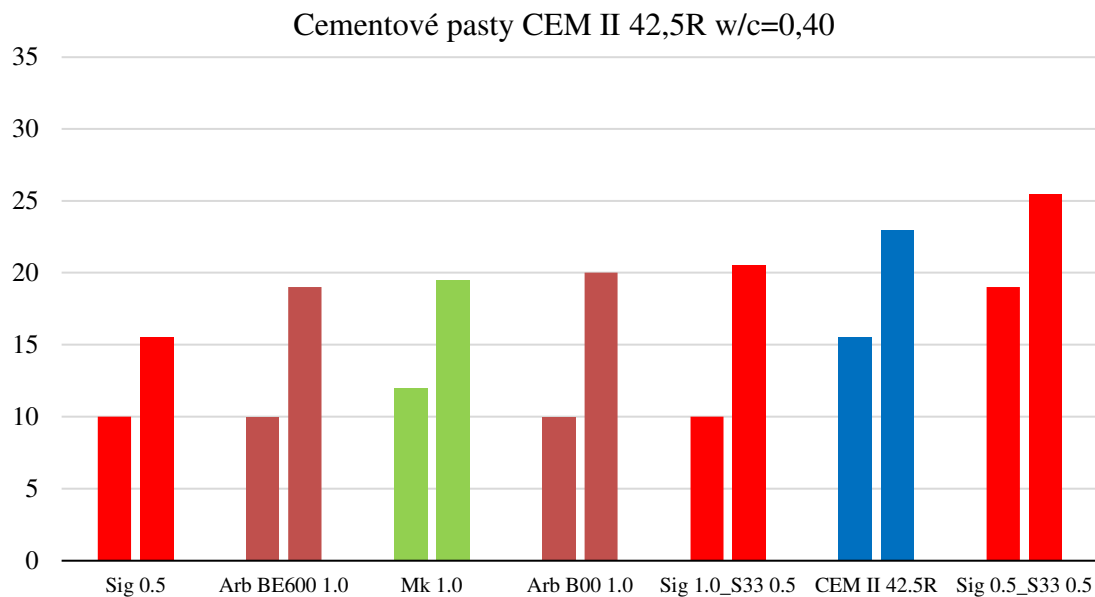
Obr. 5.7: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 42,5R a w/c = 0,45



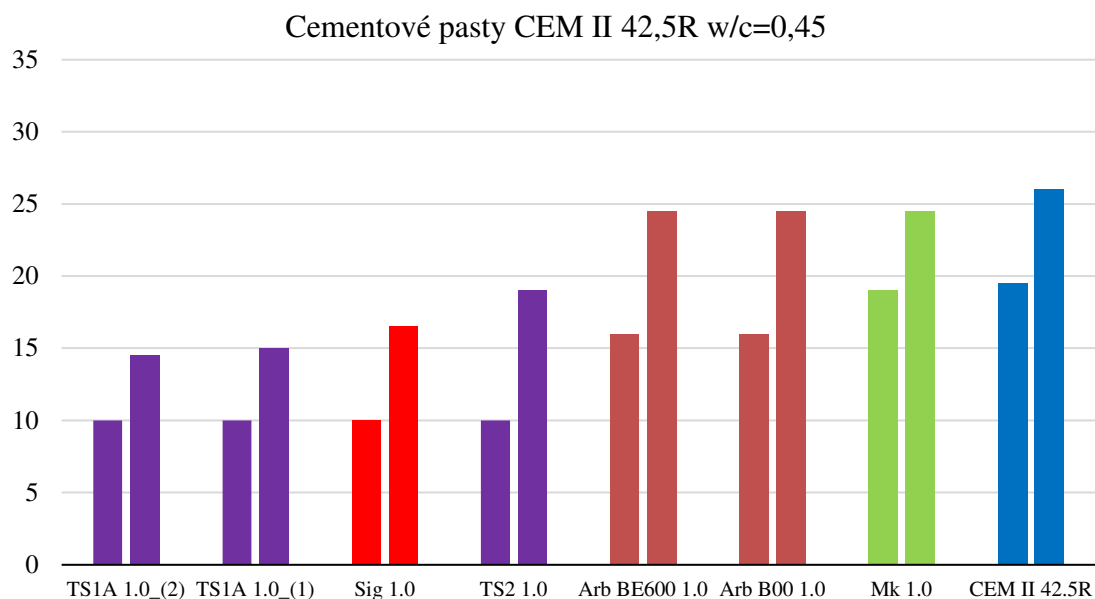
Obr. 5.8: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 52,5R a w/c = 0,40



Obr. 5.9: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 52,5R a w/c = 0,45



Obr. 5.10: Rozlivy cementových past z cementu CEM II 42,5R a w/c = 0,40



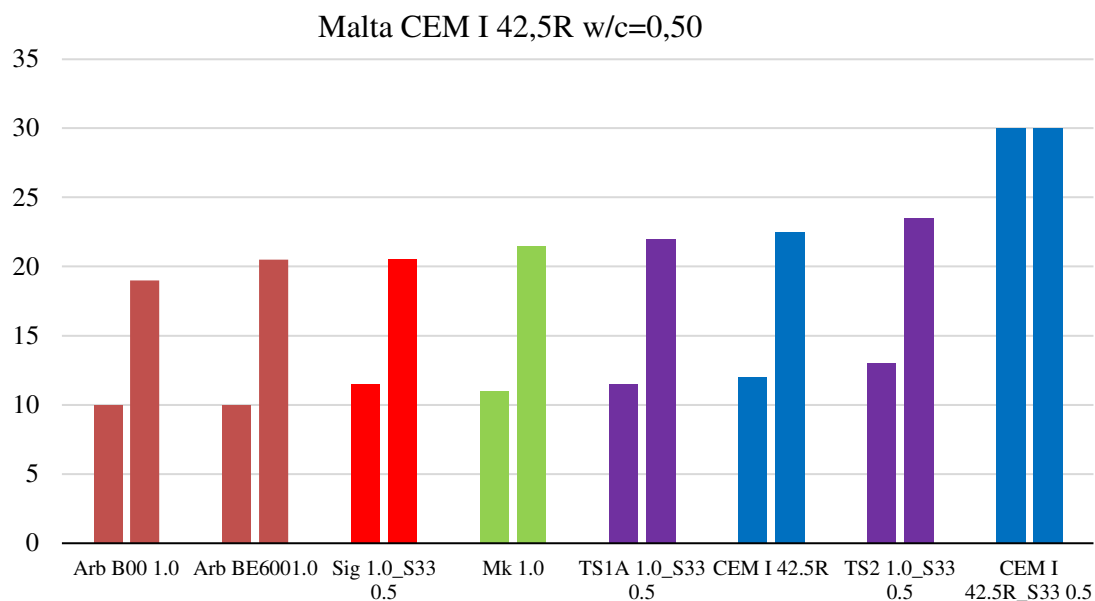
Obr. 5.11: Rozlivy cementových past z cementu CEM II 42,5R a w/c = 0,45

5.2.2.2 Rozliv malt

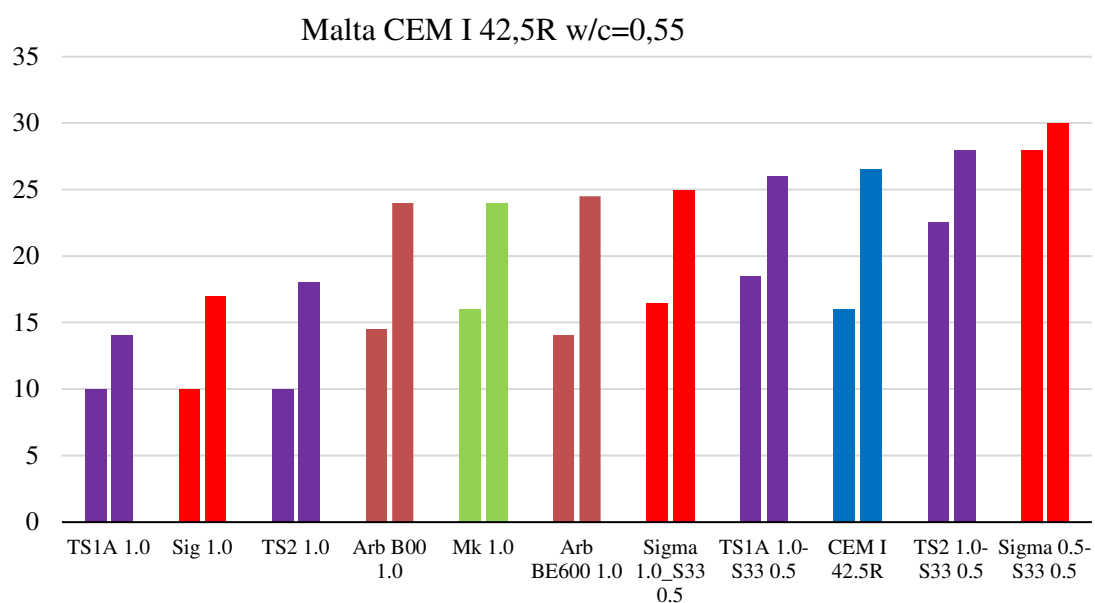
Na Obr. 5.12 až 5.15 jsou zobrazeny výsledky rozlivů malt. Rozlivy jsou seřazeny vzestupně od nejmenšího po největší. První hodnota u dané směsi je hodnota rozlivu a druhá je rozlivu po patnácti poklepech na Hägermannově poklepovém stolku. Nejmenší rozliv mohl být 10 cm, což je spodní průměr komolého kužele, a největší 30 cm, což je naopak průměr stolku.

Z výsledků je patrný vliv jednotlivých přísad na viskozitu a tím na rozliv malt. Stejně jako u cementových past dosáhli největší změny viskozity přísady na bázi sepiolitu. Ty byly následovány přísadami na bázi celulózových vláken. Minimální a spíše zvětšující efekt na rozliv měl metakaolin.

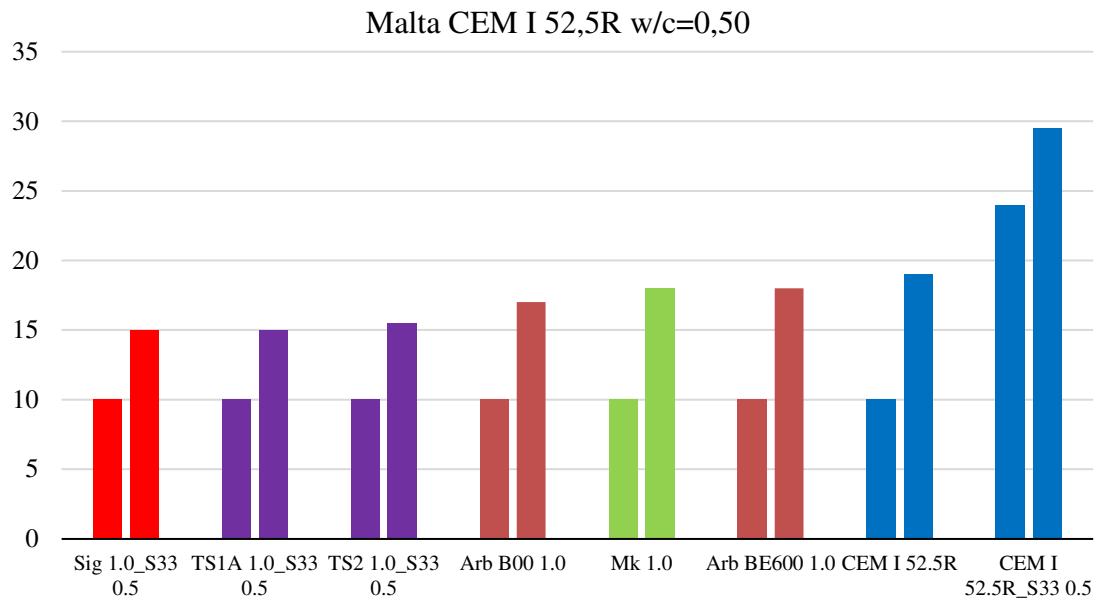
Výsledky na maltách potvrdily stejné chování jako na cementových pastách. Tyto poznatky jsou sepsány v předchozí kapitole 5.2.2.1.



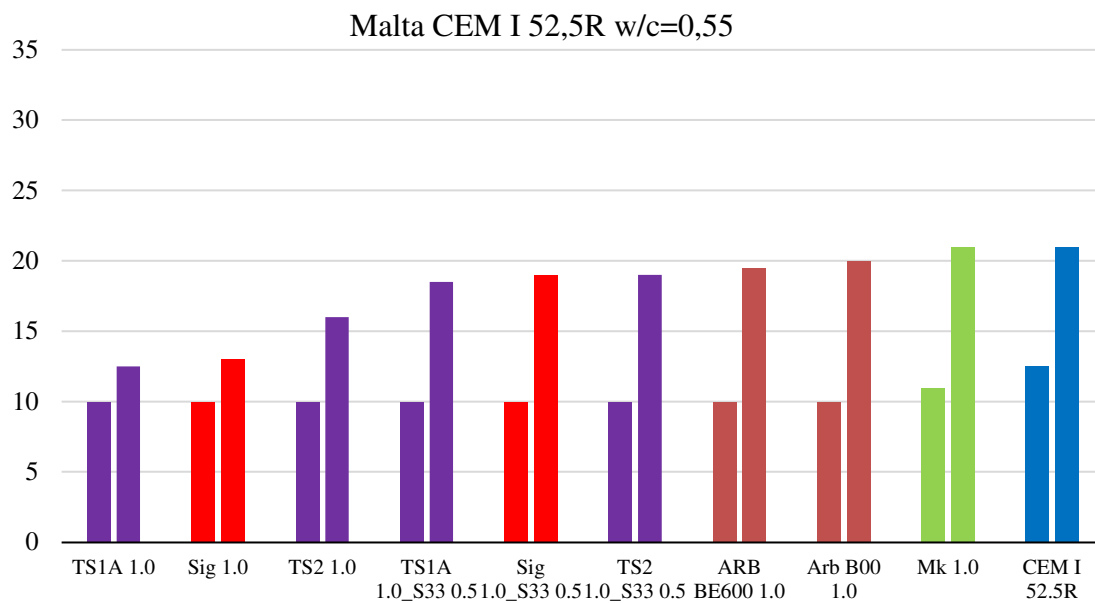
Obr. 5.12: Rozlivy malt z cementu CEM I 42,5R a w/c = 0,50



Obr. 5.13: Rozlivy malt z cementu CEM I 42,5R a w/c = 0,55



Obr. 5.14: Rozlivy malt z cementu CEM I 52,5R a w/c = 0,50



Obr. 5.15: Rozlivy malt z cementu CEM I 52,5R a w/c = 0,55

5.2.3 Výsledky viskozity cementových past

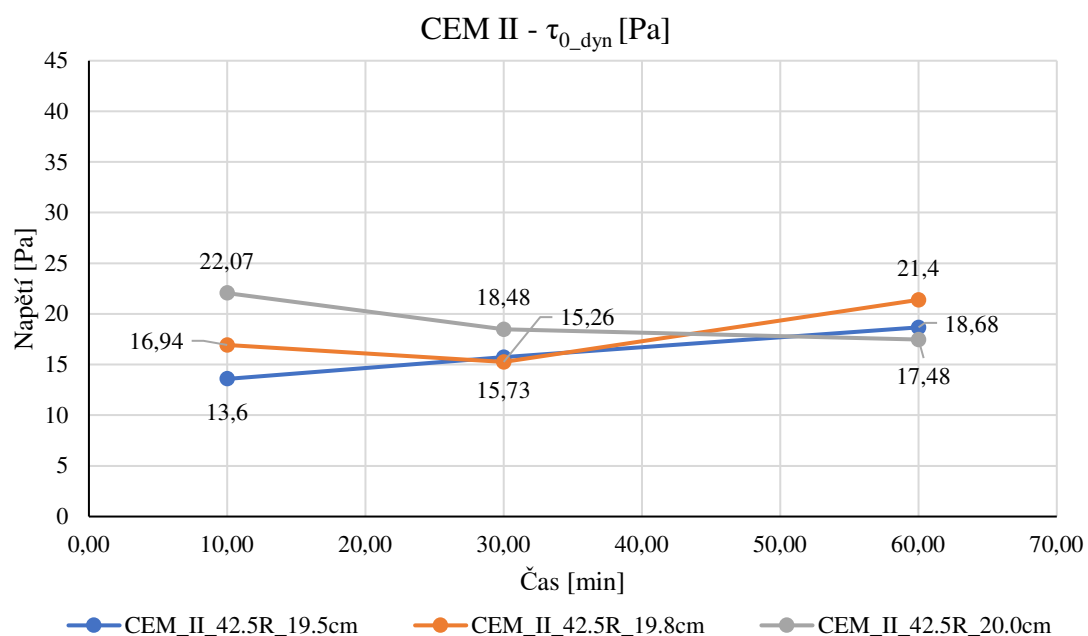
Hlavním cílem experimentů na rotačním reometru Thermo Scientific HAAKE Viscotester iQ bylo pomocí dvou předem definovaných měření stanovit reologické vlastnosti modifikovaných cementových past pomocí metakaolinu LB05 Mefisto nebo sepiolitu TS1A a porovnat je s kontrolní cementovou pastou.

Dalším cílem experimentů bylo vybrat z vyhodnocených výsledků nejvhodnější kombinace poměru cement vs. metakaolin a cement vs. sepiolit. Tyto kombinace by byly dále otestovány na boční tlak cementových past a betonů. Pro každou přísadu bylo zhotoveno vícero variant cementových past, které se lišily v množství použité přísady.

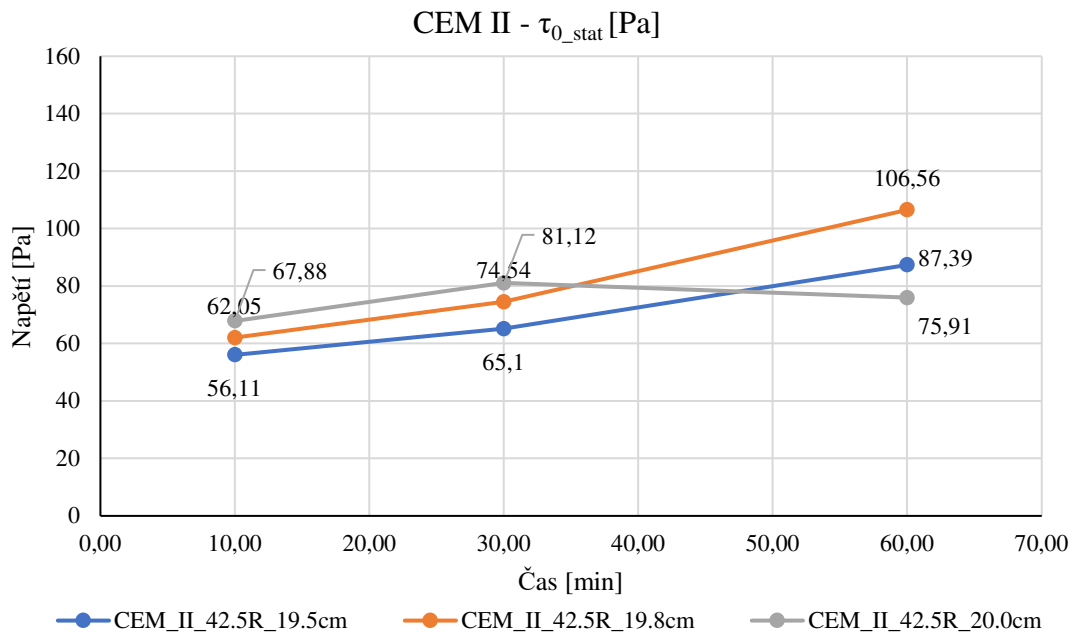
5.2.3.1 Výsledky viskozity čisté cementové pasty

Před samotnými modifikovanými cementovými pastami byla zkoumána viskozita čisté cementové pasty. Při testech byl použit cement CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement. Vodní součinitel cementových past byl zvolen $w/c = 0,40$.

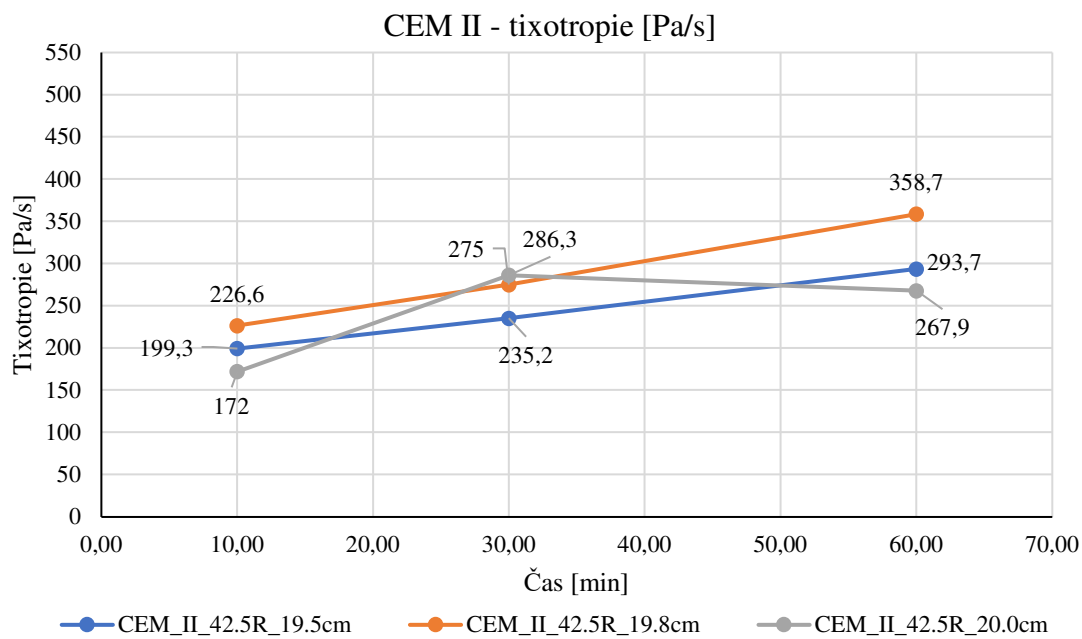
Níže jsou uvedeny graficky výsledky (Obr. 5.16 až 5.18) dynamické meze kluzu, statické meze kluzu a tixotropie čisté cementové pasty. Dále byly výsledky zprůměrovány a zaneseny do společných grafů s výsledky s modifikovanými cementovými pastami pro jednotlivé měřené veličiny.



Obr. 5.16: Dynamická mez kluzu čisté cementové pasty



Obr. 5.17: Statická mez kluzu čisté cementové pasty



Obr. 5.18: Tixotropie čisté cementové pasty

Z výsledků samotné cementové pasty jsou patrné zvyšující se hodnoty meze kluzu a tixotropie. Průměrná hodnota dynamické meze kluzu vzrostla v čase přibližně o 10 %. Průměrné hodnoty statické meze kluzu a tixotropie vzrostly v čase přibližně o 50 %.

5.2.3.2 Výsledky viskozity cementové pasty s metakaolinem

V této kapitole jsou uvedeny výsledky viskozity cementových past modifikovaných pomocí metakaolinu LB05 Mefisto. Vzhledem k zjištěnému chování metakaolinu byla zvýšena jeho dávka. Při testech byla použita 10 % náhrada cementu metakaolinem. Kromě samotného metakaolinu byla také odzkoušena přísada Master X-Seed 100 urychlující tuhnutí a tvrdnutí.

Při testech byl použit cement CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement. Z přísad byl kromě metakaolinu a Master X-Seed 100 použit superplastifikátor MS6035. Vodní součinitel cementových past byl zvolen $w/c = 0,4$.

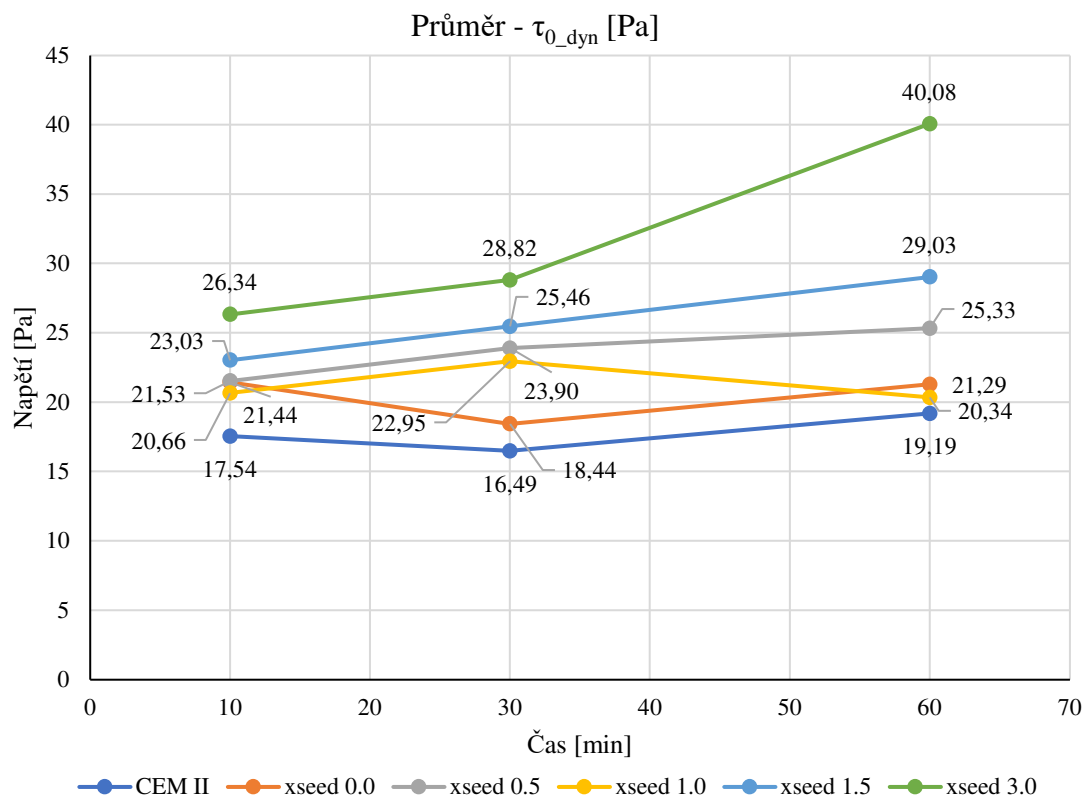
Během testování metakaolinu bylo zhotoveno celkem pět směsí s metakaolinem a s různou procentní dávkou Master X-Seed 100. Dávkování bylo 0 %, 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % a 3,0 %. Každá směs byla zhotovena v počtu tří záměsí.

Výsledky byly pro lepší porovnání jednotlivých směsí zprůměrovány a zaneseny do společných grafů (Obr. 5.19 až 5.21) pro jednotlivé měřené veličiny. Graf byl doplněn o průměrné hodnoty čisté cementové pasty.

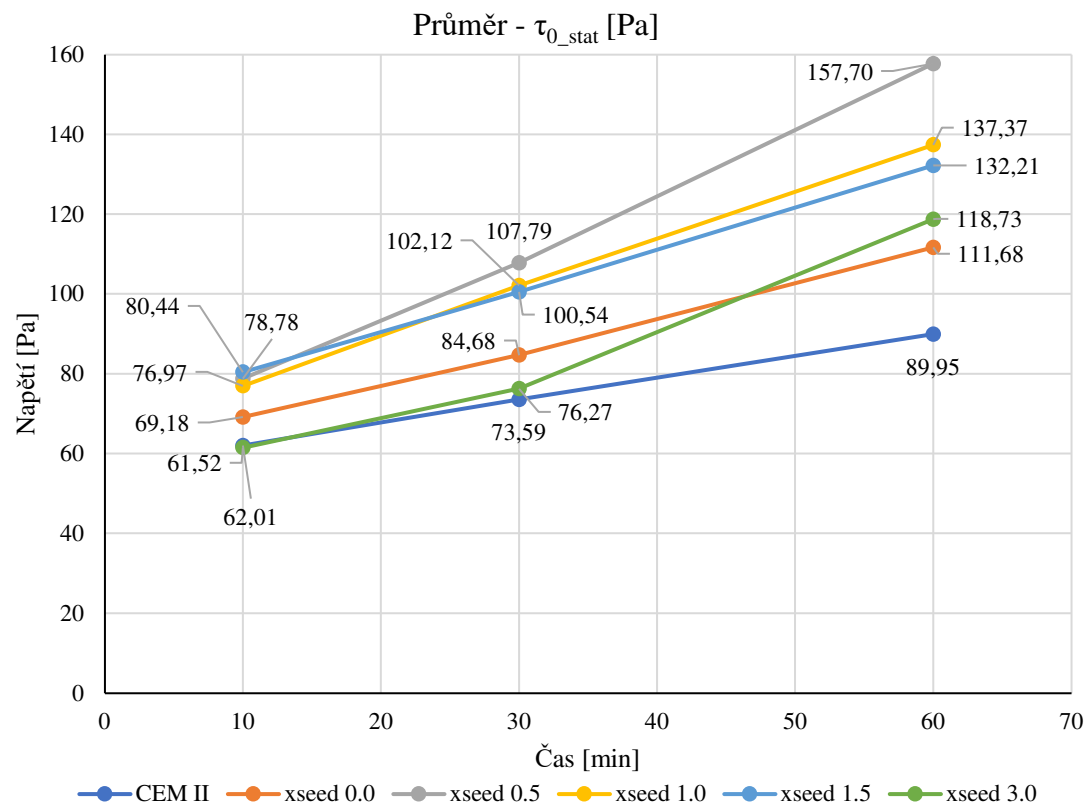
Z výsledků dynamické meze kluzu (Obr. 5.19) je patrné, že největšího nárustu dynamické meze kluzu dosáhla směs s dávkou X-Seedu 3,0 %. Její nárůst na konci měření byl přibližně 50 %. Následují směsi s dávkou X-Seedu 1,5 % a 0,5 %. U těchto směsí došlo k nárustu o 26 % potažmo 18 %. U směsí bez přísady X-Seed a s 1,0 % dávkou byl výsledek po 60 minutách totožný jako na začátku. Dynamická mez kluzu čisté cementové pasty byla v porovnání s modifikovanými pastami nejnižší. Dosahovala 90 % hodnoty směsi s 1,0 % dávkou X-Seedu.

Na Obr. 5.20 jsou zobrazeny výsledky statické meze kluzu. U všech směsí došlo k jejímu nárustu. Ten se pohybuje od 65 % do 100 % proti první naměřené hodnotě. Počáteční hodnoty směsí 0,5 % až 1,5 % byly okolo 79 Pa. Počáteční hodnoty pro směs bez Xseedu byly okolo 69 Pa a pro směs s dávkou Xseedu 3,0 % byly 61,5 Pa. Směsi se na konci měření seřadili v tomto pořadí Xseed 0,5 %, Xseed 1,0 %, Xseed 1,5 %, Xseed 3,0 % a bez Xseedu. Výsledná statická mez kluzu dosahovala hodnot od 111 do 157,7 Pa. Nárůst u čisté cementové pasty byl 50 %.

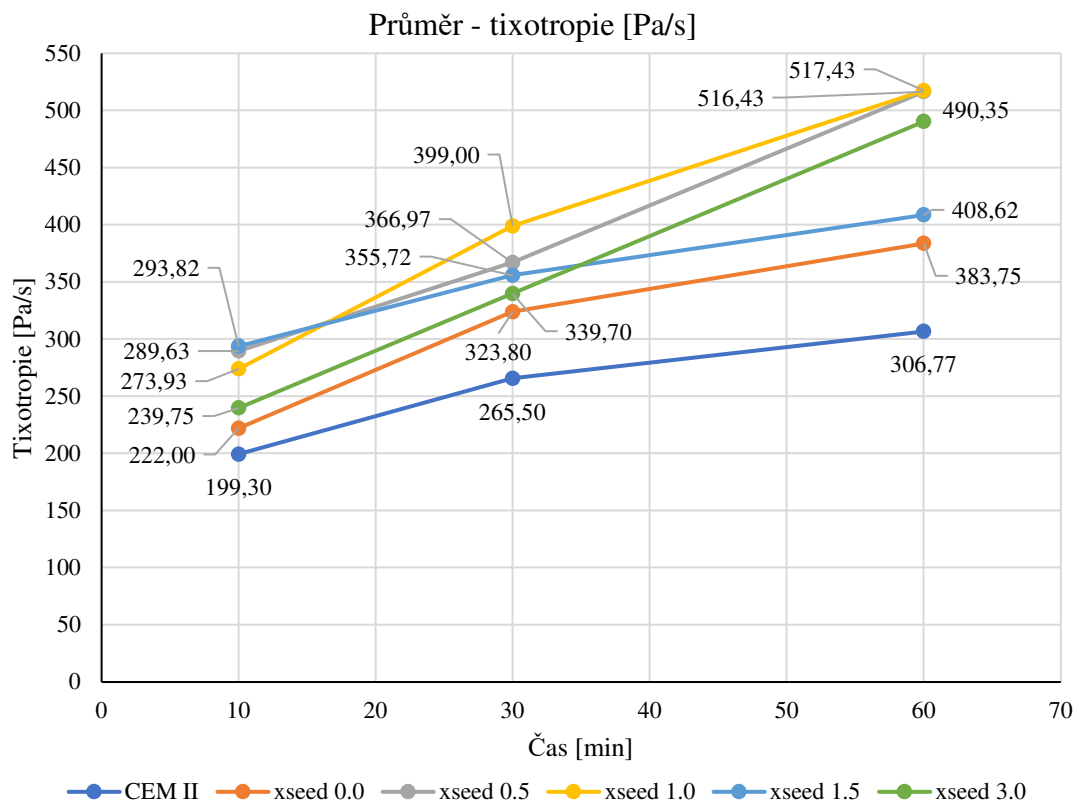
Z výsledků tixotropie (Obr. 5.21) lze říct, že odpovídají výsledkům statické meze kluzu. U modifikovaných cementových past pomocí metakaolinu došlo k nárustu od 40 % do 90 %.



Obr.5.19: Dynamická mez kluzu cementových past s metakaolinem LB05 Mefisto



Obr. 5.20: Statická mez kluzu cementových past s metakaolinem LB05 Mefisto



Obr. 5.21: Tixotropie cementových past s metakaolinem LB05 Mefisto

Z celkových výsledků modifikovaných cementových past pomocí metakaolinu lze říct, že nejlepších výsledků dosahují směsi s nižší dávkou Xseedu a to konkrétně 0,5 % a 1,0 %. Vyšší dávka urychlující přísady Master X-Seed 100 neznamená násobné zvýšení viskózních vlastností směsi.

5.2.3.3 Výsledky viskozity cementových past se sepiolitem TS1A

V této kapitole jsou uvedeny výsledky viskozity cementových past modifikovaných pomocí sepiolitu. Při testech byl použit cement CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement. Jako modifikační přísada byl použit sepiolit TS1A. Z dalších přísad byl použit superplastifikátor MS6035. Vodní součinitel cementových past byl jako u směsi s metakaolinem $w/c = 0,4$.

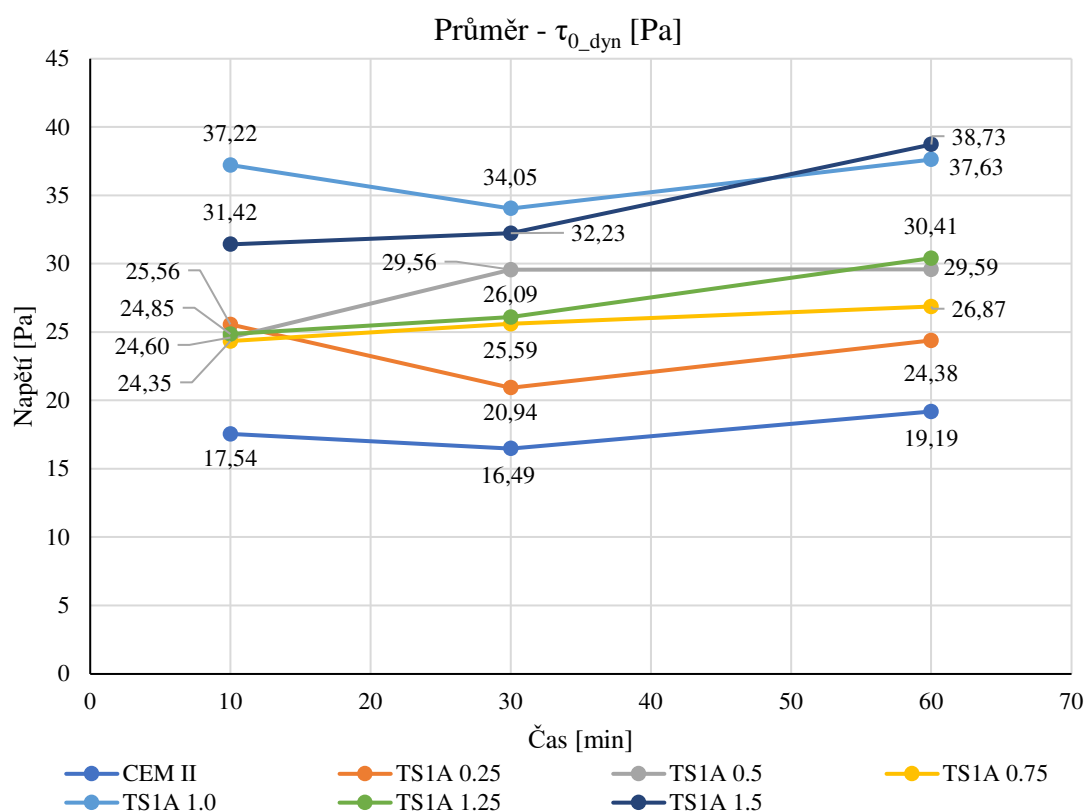
Během testování sepiolitu bylo zhotoveno celkem šest směsí s různou procentní dávkou sepiolitu. Dávkování sepiolitu bylo 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,0 %, 1,25 % a 1,50 %. Pro jednotlivé směsi byly zhotoveny celkem tři záměsi.

Výsledky byly pro lepší porovnání jednotlivých směsí zprůměrovány a zaneseny do společných grafů (Obr.5.22 až 5.24) pro jednotlivé měřené veličiny. Do grafů byly doplněny pro srovnání průměrné hodnoty čisté cementové pasty.

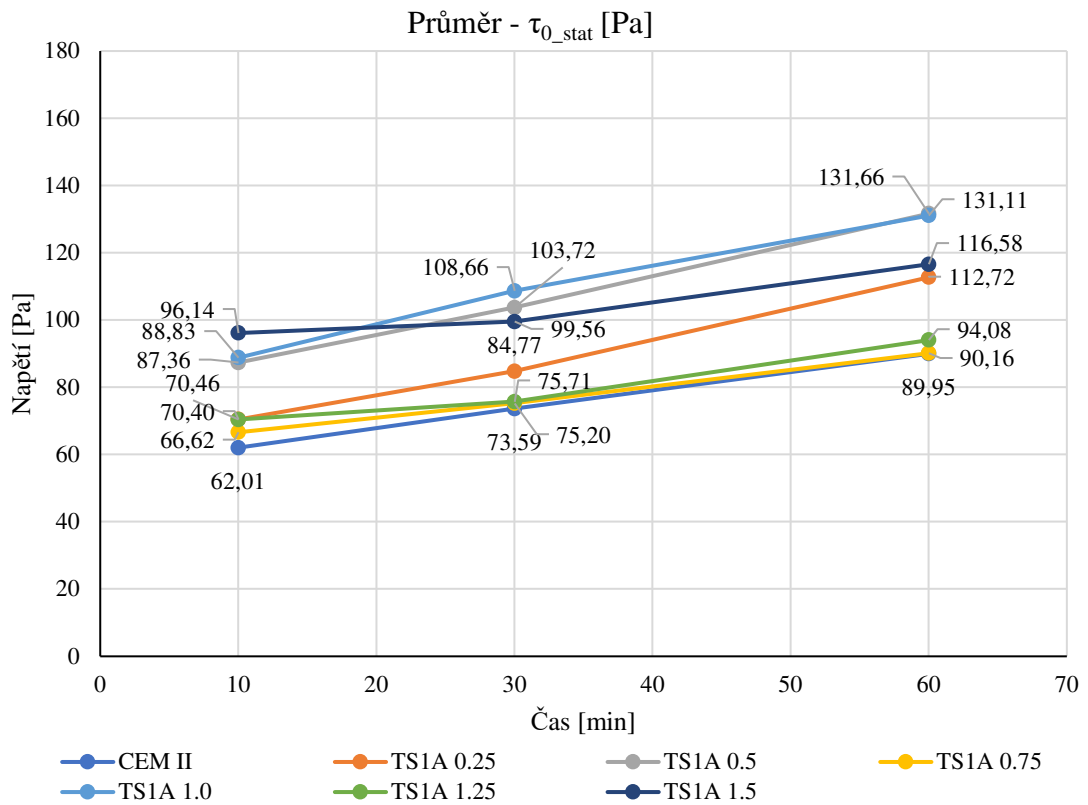
Z výsledků dynamické meze kluzu (Obr. 5.22) je patrné, že maximální nárůst dynamické meze kluzu byl přibližně 30 % a to u směsi s dávkou sepiolitu 1,5 %. U ostatních směsí byl nárůst do 20 %. Dynamická mez kluzu čisté cementové pasty byla v porovnání s modifikovanými pastami nejnižší. Dosahovala 80 % hodnoty směsi s 0,25 % dávkou sepiolitu.

Na Obr. 5.23 jsou zobrazeny výsledky statické meze kluzu. U všech směsí došlo k nárůstu statické meze kluzu. Nárůst se pohyboval mezi 20 % a 35 %.

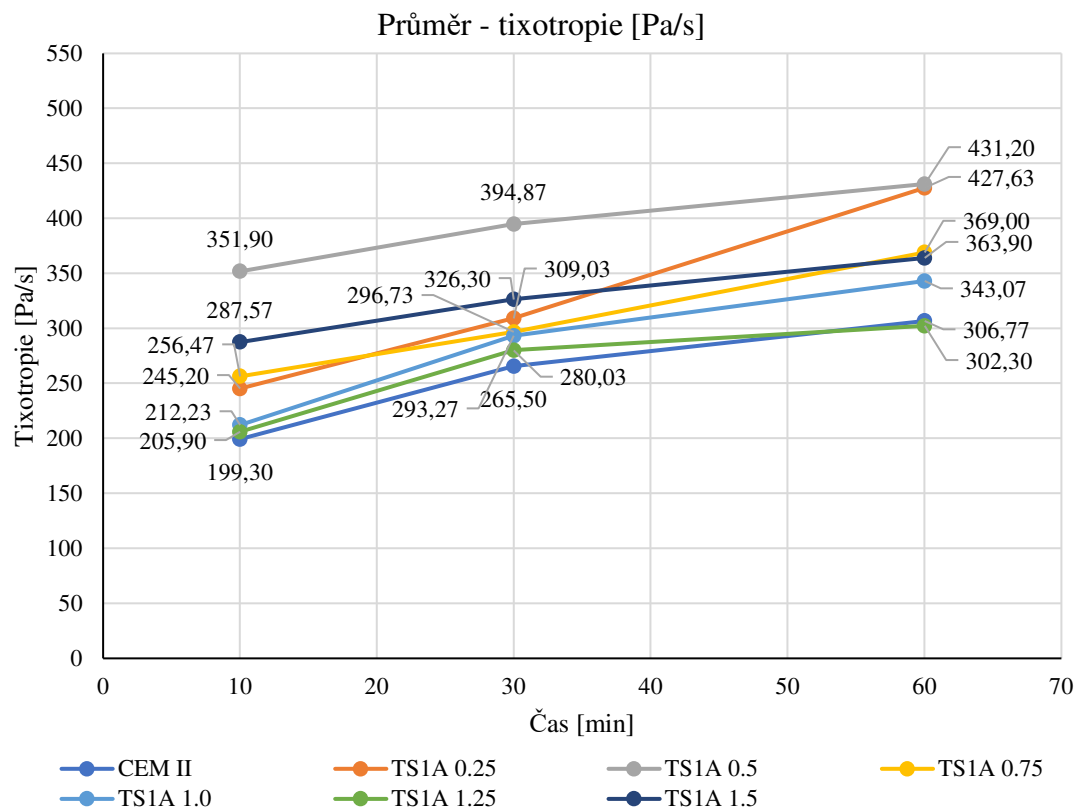
Z výsledků tixotropie (Obr. 5.24) lze říct, že odpovídají výsledkům statické meze kluzu. U modifikovaných cementových past došlo k nárůstu od 50 % do 100 %



Obr. 5.22: Dynamická mez kluzu cementových past se sepiolitem TS1A



Obr. 5.23: Statická mez kluzu cementových past se sepiolitem TS1A



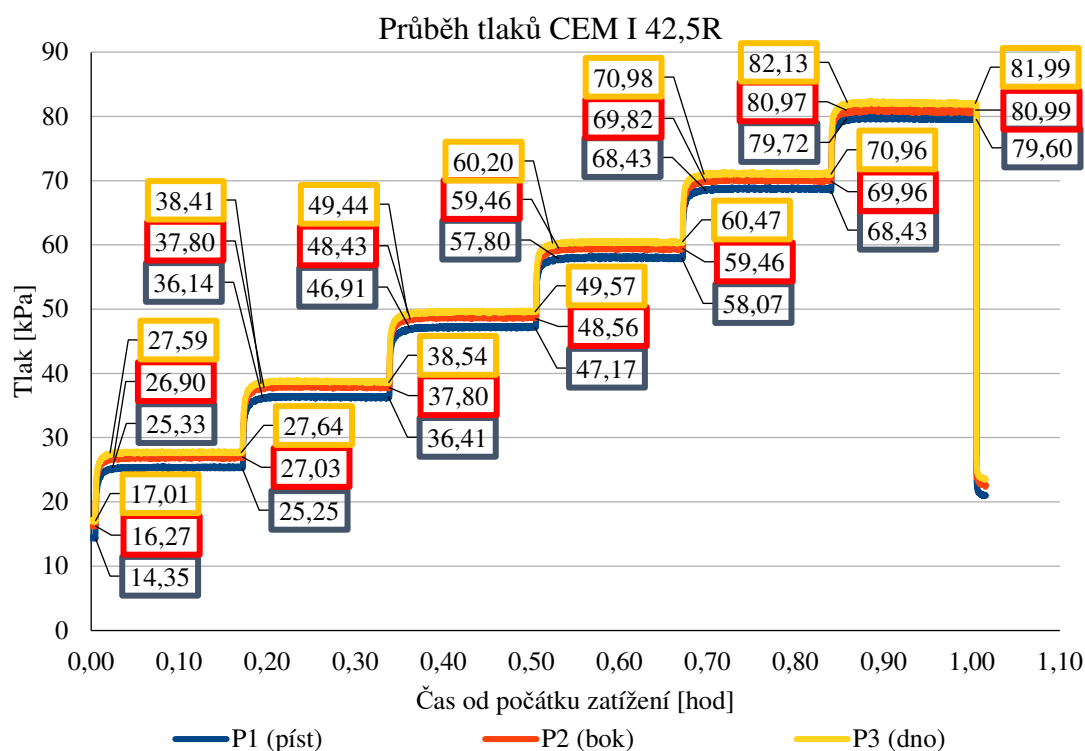
Obr. 5.24: Tixotropie cementových past se sepiolitem TS1A

Z celkových výsledků modifikovaných cementových past pomocí sepiolitu lze říct, že nejlepších výsledků dosahují směsi s nižší dávkou sepiolitu, a to konkrétně 1,00 %, 0,50 % a 0,25 %. Vyšší dávka sepiolitu neznamená násobné zvýšení viskózních vlastností směsi.

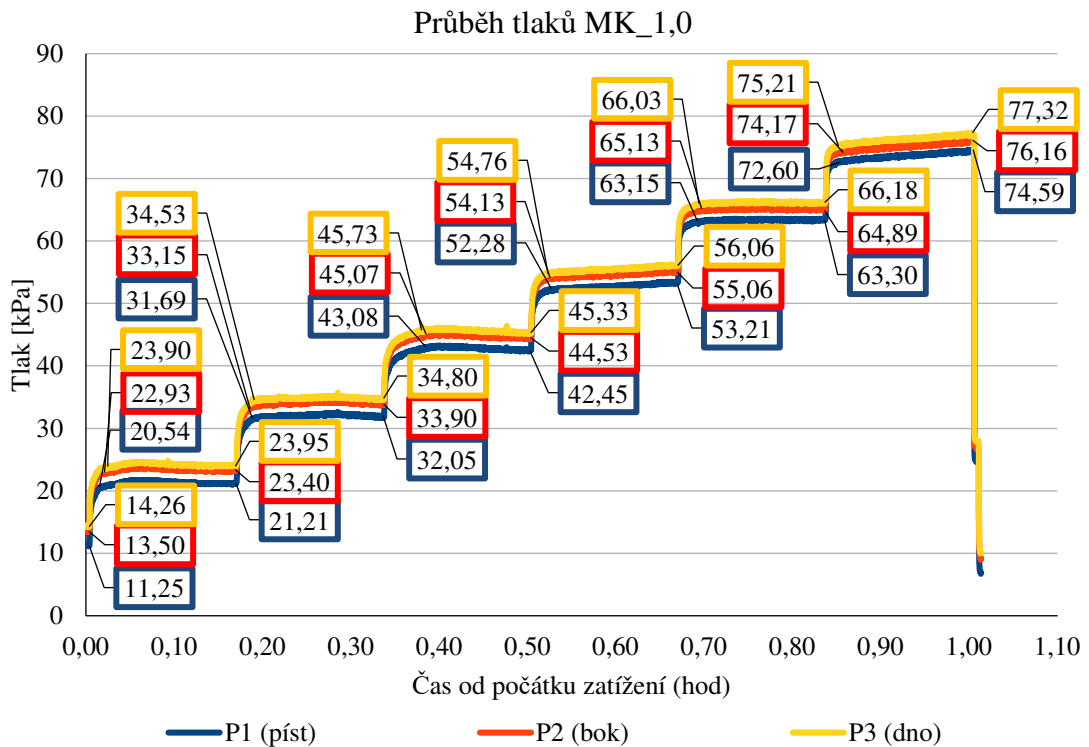
5.2.4 Boční tlak cementových past

Pomocí vyrobené nerezové měřicí komory byly měřeny boční tlaky na cementových pastách. Při testech byl opět použit cement CEM I 42.5R od firmy Českomoravský cement. Jako modifikační přísady byly použity sepiolit TS1A a metakaolin LB05 Mefisto. Z dalších přísad byl použit superplastifikátor MS6035. Vodní součinitel cementových past byl jako u směsi s metakaolinem $w/c = 0,45$.

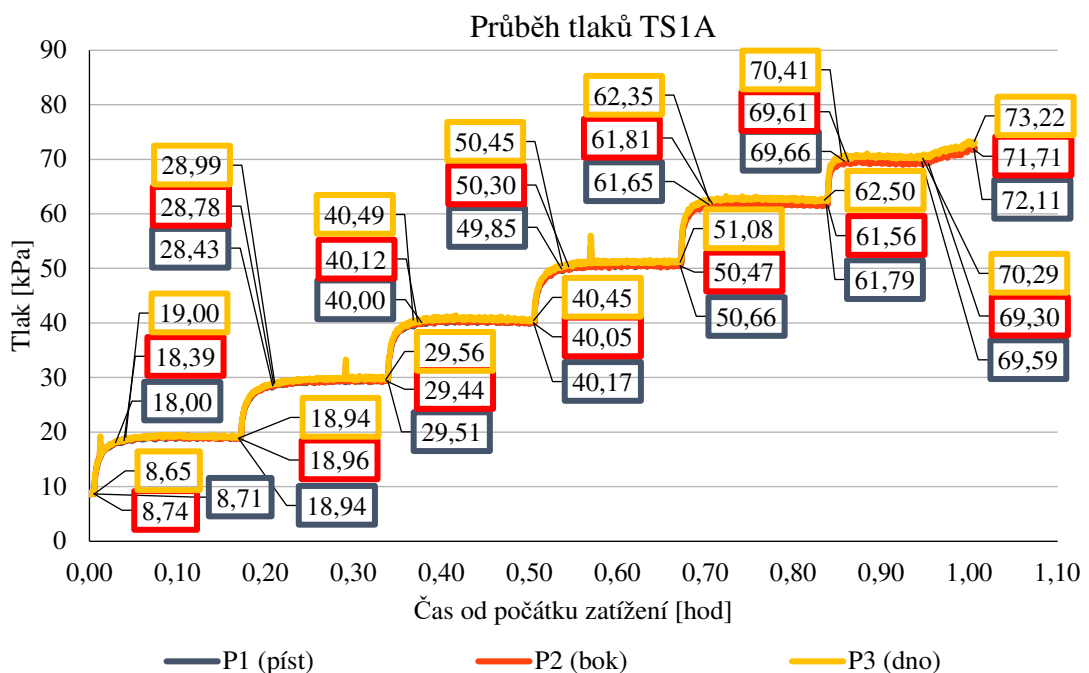
Na Obr. 5.25 až 5.27 jsou vykresleny naměřené průběhy tlaků na čisté cementové pastě a modifikovaných cementových pastách pomocí metakaolinu a sepiolitu. Všechny tři směsi vykazovaly při přitížení pozvolné ustálení tlaků, které probíhalo přibližně po dobu 1,5 až 2 minut. Tlaky se v průběhu jednoho zatěžovacího kroku výrazněji nesnižovaly, ba naopak u některých docházelo k pomalému nárůstu.



Obr. 5.25: Průběh tlaků čisté cementové pasty CEM I 42,5R



Obr. 5.26: Průběh tlaků modifikované cementové pasty pomocí metakaolinu LB05 Mefisto



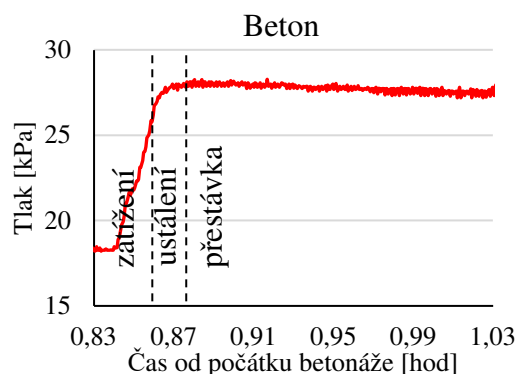
Obr. 5.27: Průběh tlaků modifikované cementové pasty pomocí sepiolitu TS1A

V průběhu měření bočních tlaků na cementových pastách bylo zahájeno i měření bočních tlaků na betonech. Z prvních vyhodnocených tlaků a porovnání jejich průběhu s průběhy tlaků na cementových pastách se mezi nimi projevil rozdíl v jejich

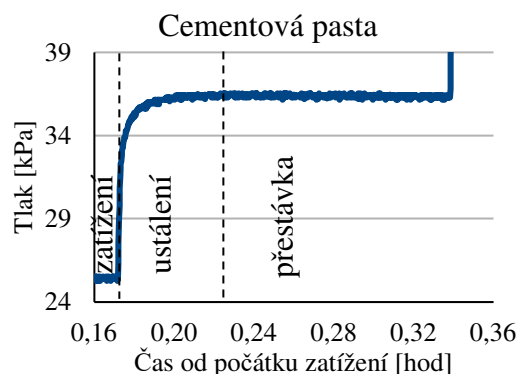
rychlosti ustálení tlaků. U experimentů na betonech bylo toto ustálení po skončení přitěžování téměř okamžité (Obr. 5.28). Na rozdíl od experimentů v měřící komoře zde docházelo, jak již bylo jednou napsáno, k pozvolnému ustálení (Obr. 5.29), v některých případech i po celou dobu jednoho zatěžovacího kroku (Obr. 5.26). V ideálním případě by mělo být i u cementových past ustálení okamžité stejně jako u experimentů na betonech.

Na Obr. 5.28 a 5.29 jsou zobrazeny průběhy tlaků při jednom zatěžovacím kroku na betonu a na cementové pastě. Křivku jednoho kroku lze rozdělit na tři části. V první části dochází k samotnému zatížení. Sklon této části křivky je dán rychlostí zatěžování. V případě cementových past bylo zatížení provedeno v rámci jednotek sekund oproti experimentům na betonech, kde zatěžování probíhalo nejčastěji v rozmezí 1 až 2 minuty. To se také projevilo na sklonu první části křivky u betonu. Druhá část se vyznačuje ustálením tlaků. To je oproti první části rychlejší u betonů než u cementových past, kde je tato doba ovlivněna třením těsnících kroužků. V poslední části křivky jsou cementová pasta a beton vystaveny přestávce mezi jednotlivými kroky zatížení tak, aby se mohly projevit změny v tlacích. Na obrázcích je patrný rozdíl, kdy v betonu dochází k poklesu tlaku a v cementové pastě je tlak konstantní.

Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že pozvolné ustálení u cementových past bylo způsobeno velikostí těsnících kroužků osazených v pístu a jejich těsnost. Kroužky způsobovaly nadměrné tření mezi stěnou komory a pístem. Tření ovlivňovalo citlivost při zatěžování, a tím i konečné výsledky. Kvůli tomuto problému bylo přistoupeno ke změně těsnících kroužku za menší.

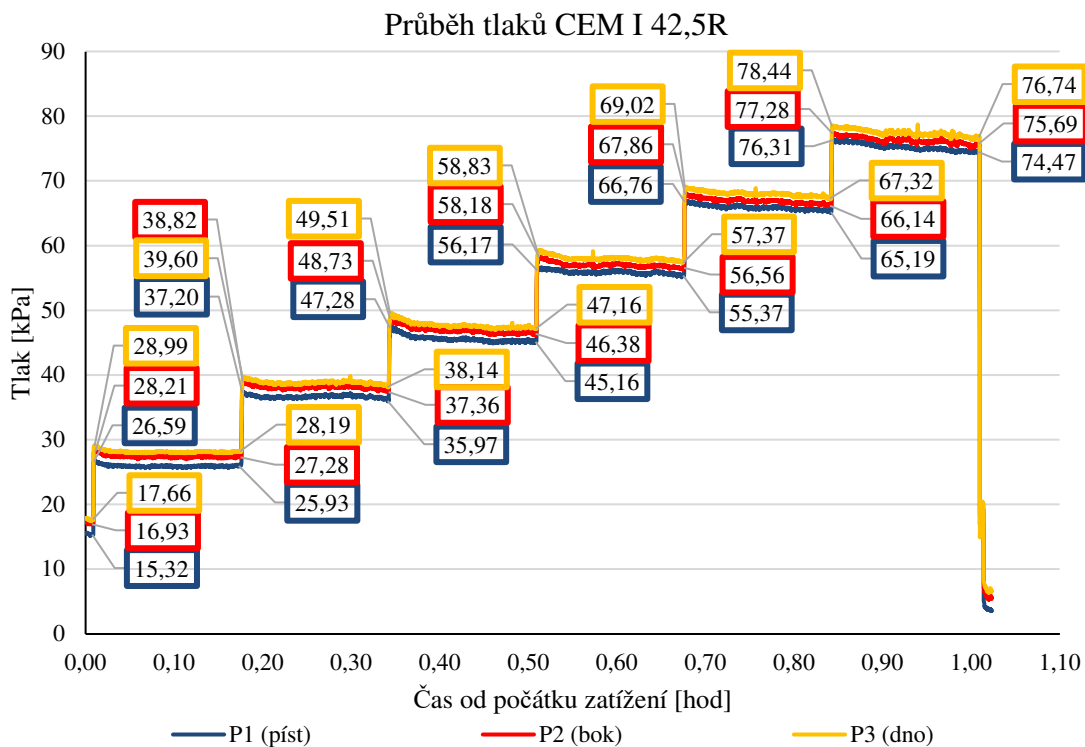


Obr. 5.28: Průběh jednoho kroku přitížení
betonu



Obr. 5.29: Průběh jednoho kroku přitížení
cementové pasty

Na Obr. 5.30 jsou zobrazeny průběhy bočního a svislých tlaků po změně těsnících kroužků. Jejich změnou došlo k okamžitému ustálení tlaků. Nová kombinace kroužků se projevila jako citlivá na jakoukoliv změnu vnesenou na píst. Na jednotlivých větvích mezi zatěžovacími kroky je patrný i pokles napětí.



Obr. 5.30: Průběh tlaků čisté cementové pasty CEM I 42,5R po změně těsnění

Po změně těsnících kroužků byly průběhy bočního a svislých tlaků cementové pasty po přitížení okamžitě ustálené. Změna těsnění s sebou však přinesla jiný problém, a to v podobě snížené těsnosti. Ta se projevila ve čtvrtém kroku přitížení tím, že začal v okolí pístu vytékat olej (Obr.5.31), který měla sloužit jako vrstva pro rovnoměrné přenesení zatížení od pístu na cementovou pastu.

Problém s těsností se do této doby nepodařilo vyřešit vhodným způsobem, a tak se od testů na cementových pastách prozatím ustoupilo. Vše se dále soustředilo pouze na experimenty s viskozitou a na měření bočních tlaků na betonech.



Obr. 5.31: Problém s těsností pístu po změně těsnících kroužků

5.2.5 Boční tlaky betonu

Hlavním cílem experimentů bylo určit boční tlaky betonu v reálné konstrukci a zhotovit takovou betonovou směs SCC, která by měla v počátku vyhovující konzistenci a následně by u směsi vzrostla tixotropie. Se vzrůstem tixotropie by došlo ke zpevnění vnitřní struktury betonu. To by mělo za následek snížení bočních tlaků betonu na bednění.

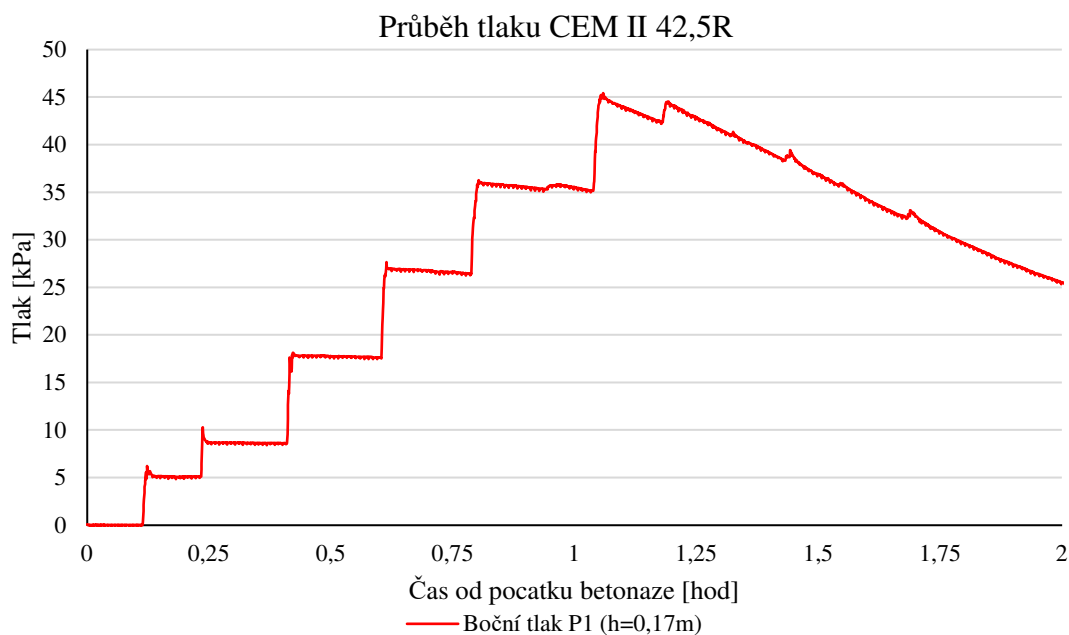
V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření bočních tlaků betonů na bednění na reálné konstrukci. Během experimentů bylo na reálných konstrukcích zhotoveno 14 betonových směsí, který se lišily především v obsažené modifikační přísadě, v jejím množství a dále výškou a tloušťkou betonovaných stěn. V Tab. 5.5 jsou kromě výsledků naměřených tlaků také uvedeny i hlavní suroviny, které byly při testech použity.

Při testech byl použit cement CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement. Jako modifikační přísada byly použity metakaolin LB05 Mefisto a sepiolit TS1A. Z dalších přísad byl použit superplastifikátor MS6035 nebo Master X-Seed 100 urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu.

Na Obr. 5.32 až 5.36 jsou zobrazeny vyhodnocené tlaky a deformace po výšce pro vybrané tři různé betonové směsi.

Z obrázků je patrné, že během celé doby, po kterou byly prováděny experimenty, došlo k vylepšování měřící soustavy. Na začátku byl měřen pouze boční tlak v patě stěny. K měření tlaku se postupně přidávala měření svislého tlaku, deformací a měření tlaků a deformací po výšce. Takto rozšířené měření poskytuje představu o působení betonu a jeho bočního tlaku na konstrukci bednění.

Na Obr. 5.32 je ukázán průběh bočního tlaku na bednění od referenční čisté cementové pasty. Směs byla testována na stěně výšky 2,76 m a tloušťky 0,2 m. Stěna byla vybetonovaná v 6 taktech. Rozliv betonové směsi byl na stavbě průměrně 74,8 cm. Jak je patrné, tak u směsi dochází k nepatrnému poklesu tlaku ve všech zatěžovacích krocích. Po ukončení betonáže 6. taktu došlo k poklesu bočního tlaku v patě za necelou hodinu přibližně o 50 % napětí na bednění. Maximální hodnota bočního tlaku dosáhla hodnoty 45,42 kPa. Maximálního tlaku bylo dosaženo při betonování 5. taktu ze 7 taktů.



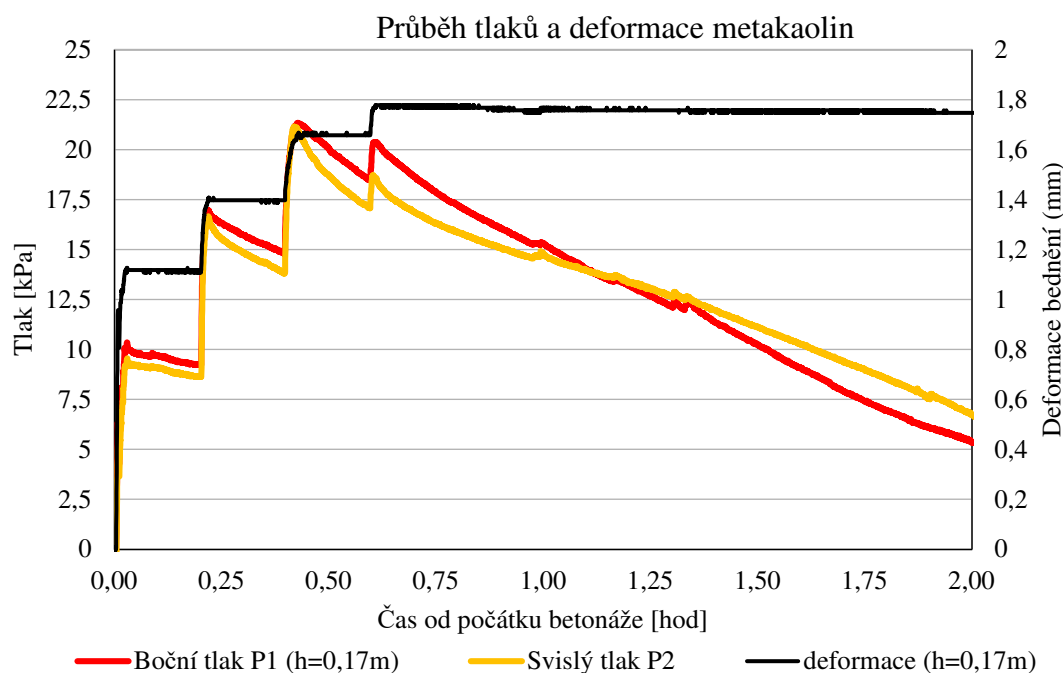
Obr. 5.32: Průběh bočního tlaku na referenční směsi

Na dalších Obr. 5.33 a 5.34 jsou vykresleny výsledky betonové směsi obsahující modifikační přísadu v podobě metakaolinu. Směs obsahovala 10% náhradu cementu metakaolinem LB05 Mefisto a 1,0 % dávku Master X-Seed 100 z hmotnosti cementu. Měření bylo provedeno na stěně výšky 2,83 m a tloušťky 0,2 m. Stěna byla vybetonovaná v 7 taktech. Rozliv betonové směsi byl na stavbě průměrně 61,6 cm. Z obrázků je viditelný progres v měření. Samotné měření bočního tlaku bylo rozvíjeno

a doplněno o další měřené hodnoty na čerstvé betonové směsi v bednění. Těmito hodnotami byly svislý tlak a deformace bednění po výšce stěny.

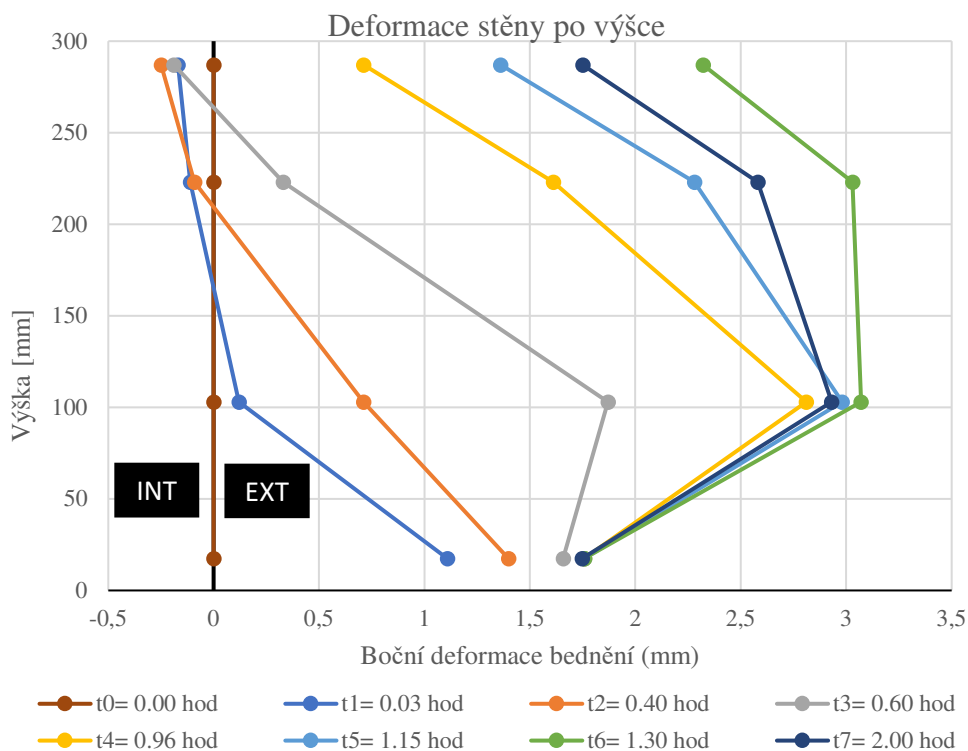
Na Obr. 5.33 jsou vykresleny boční a svislý tlak spolu s deformací bednění v místě paty betonované stěny. Všechny hodnoty byly měřeny současně v jedné výšce, a to 0,17 m od stropní konstrukce. Na křivkách tlaků je patrný pokles mezi jednotlivými zatěžovacími takty. S přibývajícím takty se tento pokles zvyrazňuje. Dále dochází i k nepatrnému poklesu narůstajících tlaků při zatěžování. Výrazného poklesu nárůstu tlaků dochází při betonáži 4. taktu. 5. a 6. takt se téměř neprojevily na křivkách. Po ukončení betonáže 4. taktu došlo k poklesu bočního tlaku v patě za hodinu přibližně o 60% napětí na bednění. Maximální hodnota bočního tlaku byla 21,36 kPa a hodnota svislého tlaku 21,51 kPa. Tyto maximální tlaky byly dosaženy při betonování 3. taktu ze 6 taktů.

Z křivky deformace je patrný nárůst boční deformace s nárůstem vybetonované výšky stěny. Maximální deformace v patě stěny dosáhla hodnoty 1,77 mm, která byla dosažena ve 4. taktu. S přibývajícím výškou stěny se rozdíl mezi jednotlivými nárůsty deformace zmenšoval. Z průběhu křivek tlaků a deformace je patrná spojitost mezi tlaky a deformací.



Obr. 5.33: Průběh tlaků a deformace v patě stěny – 10 % metakaolinu

Na Obr. 5.34 je vykreslena deformace bednění po výšce a v čase. Z výsledků je patrné, že největší deformace bylo dosaženo v 1,0 m od stropní konstrukce. Maximální deformace dosáhla hodnoty 3,1 mm. Vzhledem k patrné souvislosti mezi tlakem a deformací bednění lze předpokládat, že maximální tlak od betonové směsi nemusí být v nejnižším bodě betonované stěny. K ověření této hypotézy bylo rozhodnuto rozšířit měření i o boční tlaky po výšce a potvrdit tuto hypotézu nebo vyvrátit.



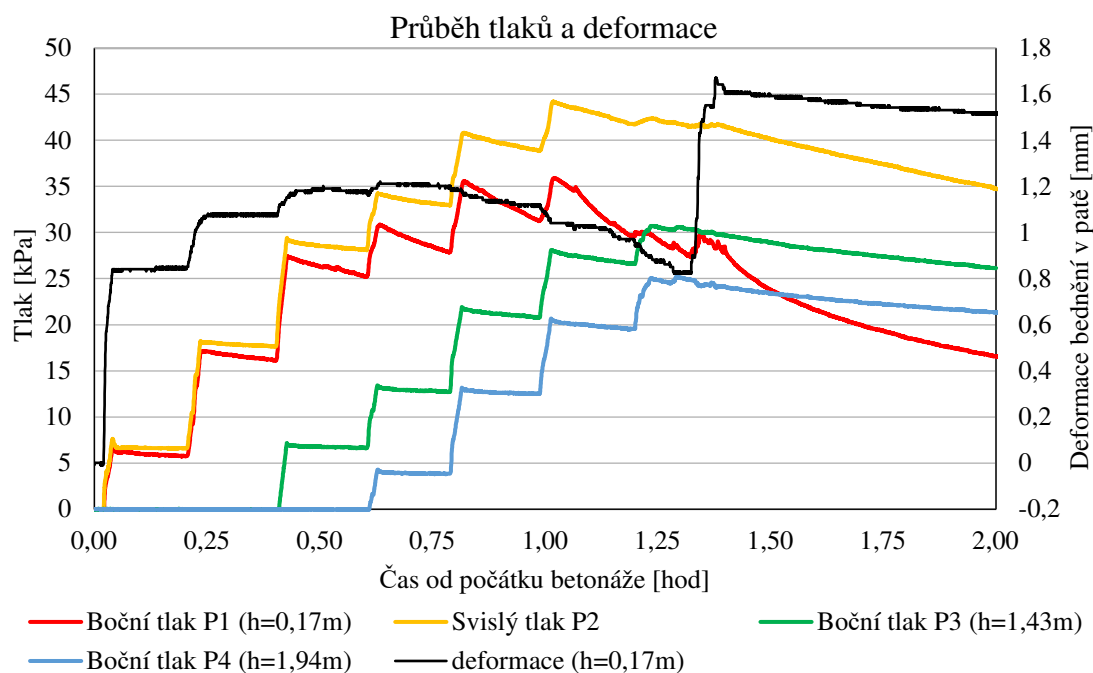
Obr. 5.34: Deformace stěny po výšce – 10 % metakaolinu

Na Obr. 5.35 a 5.36 jsou vykresleny výsledky betonové směsi obsahující modifikační přísadu v podobě sepiolitu. Směs obsahovala 1% náhradu cementu sepiolitem TS1A. Měření bylo provedeno na stěně výšky 3,9 m a tloušťky 0,25 m. Stěna byla vybetonována v 8 taktech. Rozliv betonové směsi byl na stavbě průměrně 66,4 cm. Měření bočního a svislého tlaku s deformací po výšce stěny bylo doplněno o dvě další místa, kde byl měřen boční tlak. Tato místa byla ve výšce 1,43 m a 1,94 m.

Na Obr. 5.35 jsou vykresleny boční tlaky po výšce a svislý tlak spolu s deformací bednění v místě paty betonované stěny ve výšce 0,17 m od stropní konstrukce. Všechny hodnoty byly měřeny současně. Na křivkách tlaků je patrný pokles mezi jednotlivými zatěžovacími takty. S přibývajícím takty se tento pokles zvyrazňuje. Dále dochází i k poklesu narůstajících tlaků při zatěžování. Výrazného

poklesu nárůstu tlaků došlo při betonáži 4., 5. a 6. taktu. Poslední 7. takt se téměř neprojevil na křivkách. Po ukončení betonáže 6. taktu došlo k poklesu bočního tlaku v patě za hodinu přibližně o 50% napětí na bednění. Maximální hodnota bočního tlaku v patě byla 35,89 kPa a svislého tlaku 44,23 kPa. Tyto maximální tlaky byly dosaženy při betonování 6. taktu z 8 taktů. Maximální hodnota bočního tlaku ve výšce 1,43 m byla 30,73 kPa a bočního tlaku ve výšce 1,94 m 25,23 kPa. Tyto maximální tlaky byly dosaženy při betonování posledního 7. taktu. Po 1,25 hodině od počátku betonáže se maximální tlak přesouvá na úroveň 1,43 m.

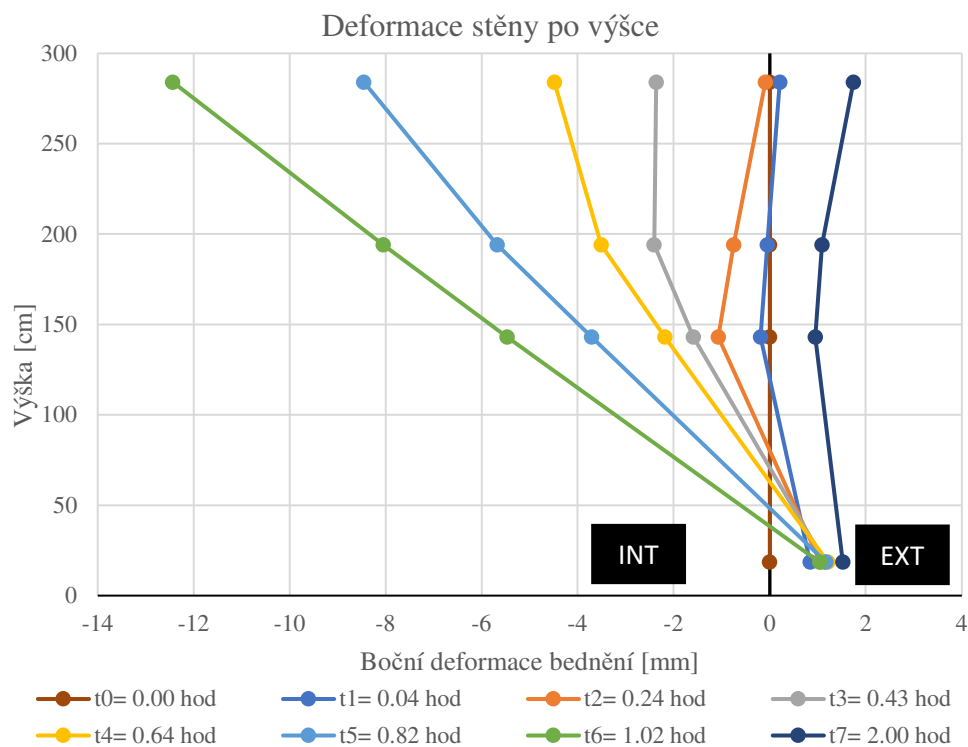
Z křivky deformace je patrný nárůst boční deformace s nárůstem vybetonované výšky stěny. Maximální deformace v patě stěny dosáhla hodnoty 1,67 mm, která byla dosažena ve 8. taktu. Deformace v patě stěny narůstala do 4. taktu. Poté dochází k poklesu deformace až do okamžiku vybetonování posledního taktu. Během něho dochází k narovnání bednění. To je lépe patrné na Obr. 5.36. Toto vyrovnání způsobilo krátkodobé zvýšení tlaku v patě a nárůst deformace bednění.



Obr. 5.35: Průběh tlaků a deformace v patě stěny – 1 % sepiolitu

Na Obr. 5.36 je vykreslena deformace bednění po výšce a v čase. Boční deformace se zvyšovala s nárůstem vybetonované výšky stěny. Z porízeného a vyhodnoceného záznamu je dobře patrné chování bednění stěny. Deformace byla měřena ve výšce 0,17 m, 1,43 m, 1,94 m a 2,84 m. Maximální deformace dosahuje

téměř 14,52 mm, a to v nejvyšší monitorované úrovni 2,84 m nad patou stěny v čase 1,02 hodiny. Oproti předchozím záznamům se zde bednění stěny deformovalo opačným směrem, tj. z pohledu umístěných senzorů směrem do vnitřku stěny. Poté, co byla dosažena maximální hodnota deformace, došlo k narovnání bednění vlivem vybetonování posledních tří taktů. Konečná deformace je maximální ve výšce 2,84 m a má hodnotu 1,74 mm, a to směrem vně.



Obr. 5.36: Deformace stěny po výšce – 1 % sepiolitu

Během experimentů na konstrukcích bylo provedeno měření 14 betonových směsí. Pro naměřené hodnoty byly zhotoveny grafy s celkovými výsledky všech směsí.

Na Obr. 5.37 a 5.38 jsou vyhodnoceny a mezi sebou porovnány naměřené hodnoty pro jednotlivé boční a svislé tlaky v patě stěny v prvních hodinách. Kromě grafů pro boční a svislý tlak byly spočteny normalizované boční tlaky. Důvodem byla rozdílná výška jednotlivých stěn, na kterých bylo provedeno měření. Na Obr. 5.39 jsou zobrazeny vypočtené hodnoty pro normalizovaný boční tlak. Ze všech naměřených hodnot byla na závěr sestavena Tab. 5.5.

Obr. 5.37 zobrazuje celkové průběhy svislých tlaků pro změřené betonové směsi. Svislé tlaky nebyly měřeny u všech testovaných směsí. Měření bylo provedeno celkem u 10 betonových směsí. Z vykreslených výsledků je patrné, že nejnižšího svislého tlaku dosahovaly betony, které měly rozliv pod 70 cm. Nejnižšího svislého tlaku bylo dosaženo u betonové směsi obsahující 10 % metakaolinu a 1 % Xseedu s průměrným rozlivem 61,6 cm. Svislý tlak pro tuto směs dosáhl hodnoty 21,51 kPa. Největšího svislého tlaku bylo dosaženo u směsi s přísadou 0,5 % sepiolitu a xypexem s průměrným rozlivem 70,7 cm. Svislý tlak dosáhl hodnoty 52,37 kPa.

Na Obr. 5.38 jsou zobrazeny celkové průběhy bočních tlaků pro změřené betonové směsi. Boční tlaky na bednění byly měřeny u všech testovaných směsí, ale u dvou směsí došlo k problému. U jedné směsi došlo k selhání měřicí techniky, a proto nebyl boční tlak změřen. Byl zaznamenán pouze svislý tlak. U druhé směsi nastala chyba při měření. U této směsi byla zaznamenána pouze sestupující větev. Celkově bylo tedy vyhodnoceno 13 betonových směsí. Z vykreslených výsledků je patrné, že nejnižšího bočního tlaku dosahovaly betony, které měly rozliv pod 70 cm. Nejnižšího bočního tlaku bylo dosaženo u betonové směsi obsahující 1 % sepiolitu s průměrným rozlivem 74 cm. Boční tlak pro tuto směs dosáhl hodnoty 18,39 kPa. Dále se ukázala jako vhodná betonová směs obsahující 10 % metakaolinu a 1 % Xseedu s průměrným rozlivem 61,6 cm. Boční tlak byl vyšší než u směsi se sepiolitem, ale na rozdíl od směsi se sepiolitem její boční tlak klesal rychleji. Boční tlak této směsi dosáhl hodnoty 21,36 kPa. Největšího bočního tlaku bylo dosaženo u směsi s přísadou 0,5 % sepiolitu a xypexem s průměrným rozlivem 70,7 cm. Boční tlak dosáhl hodnoty 46,00 kPa.

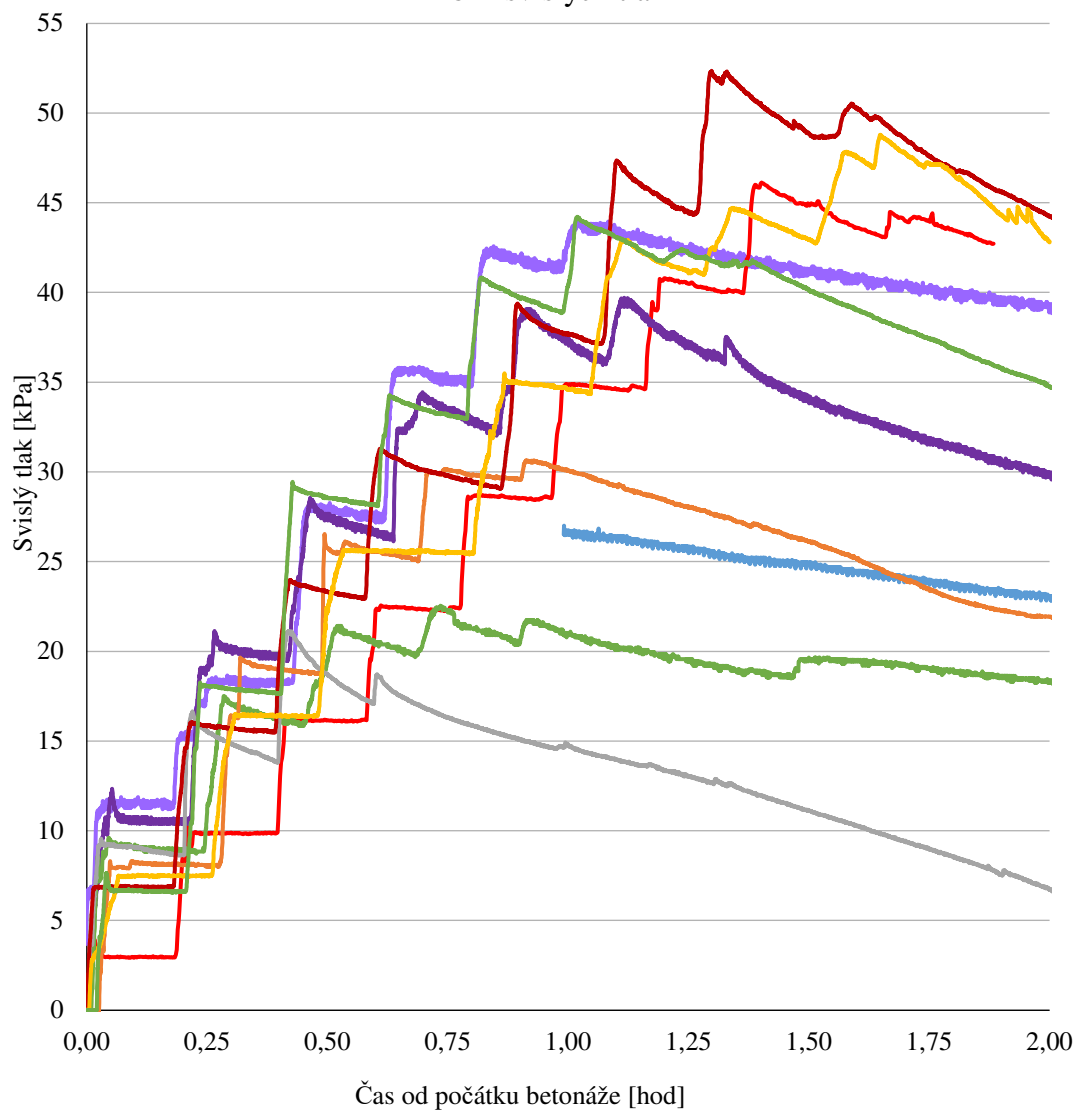
Na Obr. 5.39 je souhrnný přehled všech směsí a jejich průběh normalizovaného bočního tlaku. Ten je vypočten jako rozdíl mezi tlakem působícím na boční senzor v patě stěny a normalizovanou výškou hladiny betonu nad senzorem. Důvodem k tomuto zhodnocení je primárně rozdílná výška některých stěn, proto pouhé vyjádření maximálního bočního tlaku a křivky jeho průběhu nemusí stačit pro hodnocení různě vysokých stěn. Ze záznamů je patrné, že směs s nižší hodnotou rozlivu dosahuje nižších bočních tlaků. To potvrzuje i praxe, kdy jsou pro stěny používány nejčastěji konzistence betonu S3 a S4 a následně jsou hutněny pomocí vibrátoru. Směs s tekutostí blízké vodě se v grafu projevuje plochou křivkou. Z výsledku normalizovaného

bočního tlaku dále vyplývá, že nejlépe si v tomto ohledu vedla betonová směs obsahující 10 % metakaolinu a 1 % Xseedu s průměrným rozlivem 61,6 cm, jejichž křivka i přes počáteční vysoké hodnoty rychle klesala. Dále se jako vhodná směs ukázala, i přes svůj vyšší rozliv, betonová směs obsahující 1 % sepiolitu s průměrným rozlivem 74 cm. Nejvyšších hodnot normalizovaného bočního tlaku dosahovala referenční směs. Pokles tlaku/výšky stěny je dán kromě samotné viskozity betonové směsi i dalšími faktory, kterými jsou v první řadě stáří směsi a výška směsi – nově ukládaná vrstva nerozpohybuje spodní vrstvy.

V Tab. 5.5 jsou uvedeny naměřené maximální boční tlaky pro jednotlivé betonové směsi. Kromě maximální hodnoty bočního tlaku se v tabulce nachází i hodnoty pro svislý tlak. Jelikož stěny měly různé výšky, byly pro jednotlivé směsi dopočítány hodnoty bočního a svislého tlaku ve výšce 2,8 m od paty. Dále byly dopočteny jak procentuálními poklesy mezi referenční směsí a testovanými betony ve výšce 2,8 m, tak i procentuální pokles mezi bočním a svislým tlakem z maximálních hodnot. Tabulka je také doplněna o maximální boční deformaci v patě stěny. Pro přehlednost je u každé betonové směsi uveden rozliv a výška betonované stěny. Z vyhodnocených procentuálních poklesů mezi referenční směsí a testovanými směsmi došlo k největšímu poklesu u betonové směsi obsahující 1 % sepiolitu s průměrným rozlivem 74 cm. Maximální pokles dosáhl hodnoty 63,28 %. Dále se ukázaly jako vhodné betonové směsi obsahující 10 % metakaolinu a 1 % a 1,5 % Xseedu. U těchto směsí došlo k poklesu o 52,98 % potažmo 55,97 %. U ostatních směsí se pokles nejčastěji pohyboval mezi 15-30 %. Největší relativní pokles mezi bočním a svislým tlakem byl dosažen u betonové směsi obsahující 10 % metakaolinu a 1,5 % Xseedu. Pokles dosáhl hodnoty 28,57 %. U ostatních směsí se pokles nejčastěji pohyboval mezi 10-20 %.

Závěrem lze říct, že jednotlivé navržené betonové směsi splnily lépe či hůře problém snížení bočního tlaku. Nejlépe si v tomto ohledu vedly betonové směsi s nižším rozlivem. Jako ideální směsi se ukázaly betonové směsi obsahující 10 % metakaolinu a 1,0 % a 1,5 % Xseedu a betonová směs obsahující 1,0 % sepiolitu TS1A s průměrným rozlivem 74 cm.

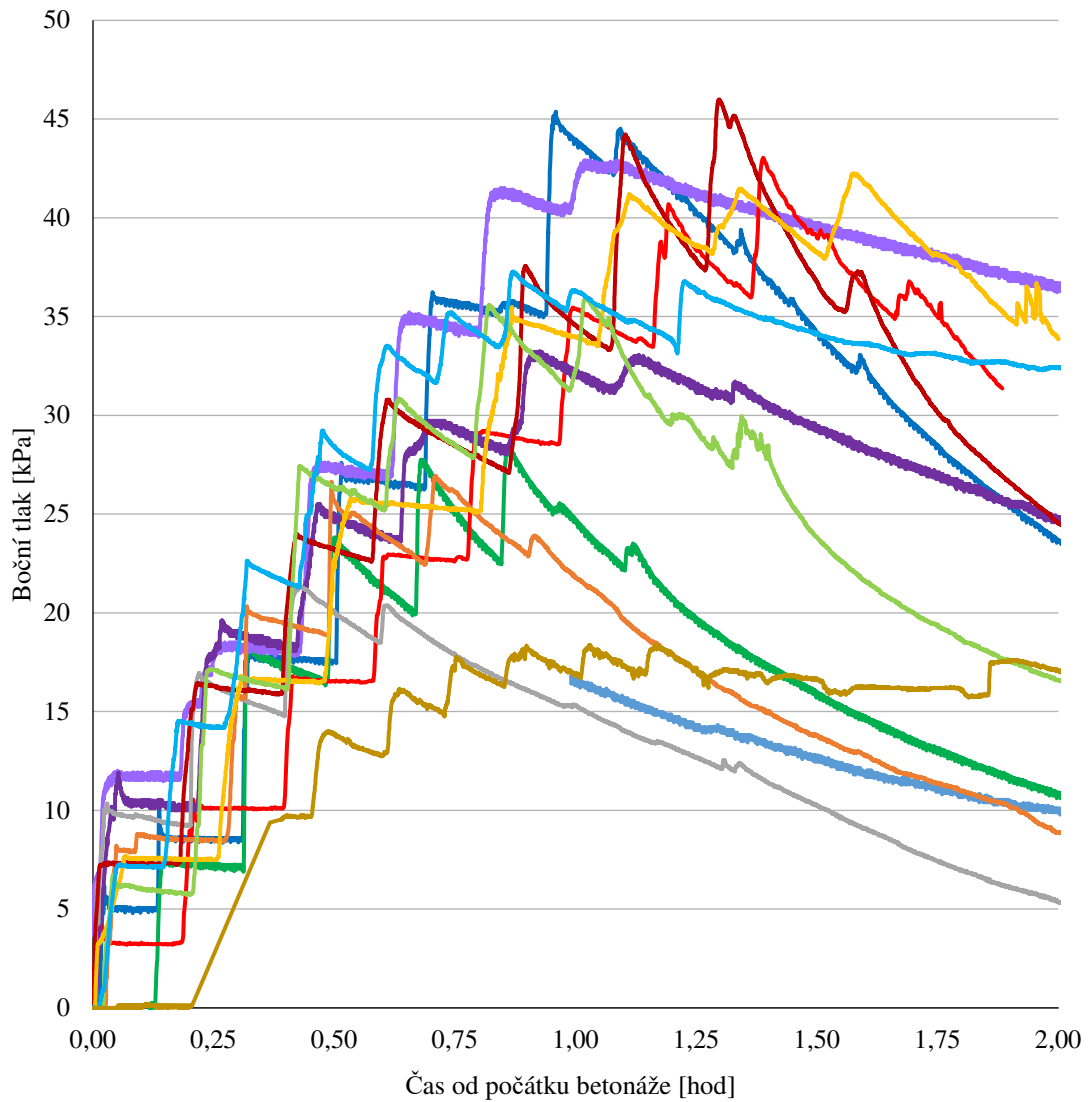
Průběh svislých tlaků



- Nanojíl 1% (rozliv prům. 71,1 cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 78,4cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 69,5 cm)
- Metakaolin 10% (rozliv prům. 66,9 cm)
- Metakaolin 10%, Xseed 1.5% (rozliv prům. 67,6 cm)
- Metakaolin 10%, Xseed 1.0% (rozliv prům. 61,6 cm)
- Nanojíl TS1A 0.5% (rozliv prům. 65 cm)
- Nanojíl 0.5%, Xypex 5.11.2021 (rozliv prům. 70,7 cm)
- Nanojíl 0.5% (rozliv prům. 75,2 cm)
- Nanojíl 1% (rozliv prům. 66,4 cm)

Obr. 5.37: Porovnání průběh svislých tlaků v prvních 2 hodinách

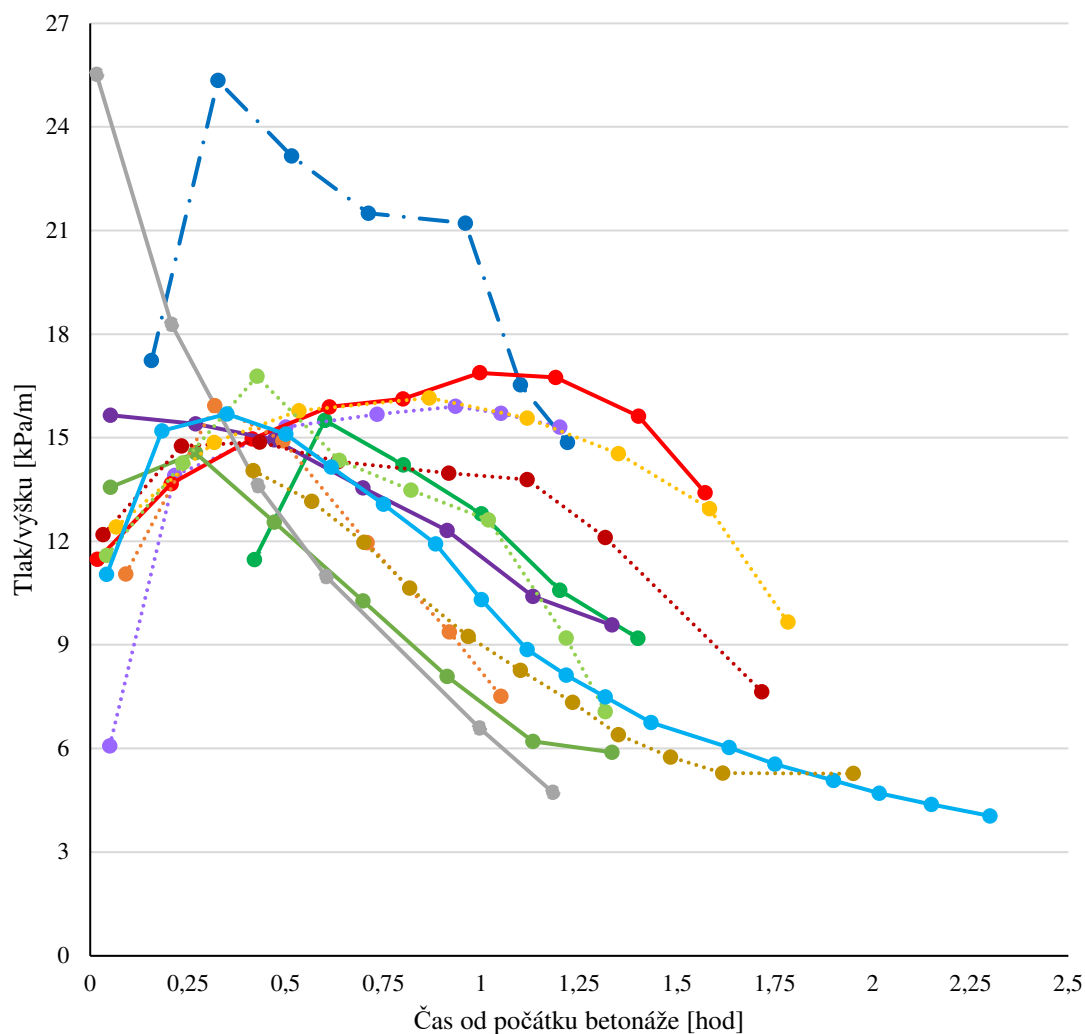
Průběh bočních tlaků



- Referenční směs (rozliv prům. 74.8cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 65,2cm)
- Nanojíl 1% (rozliv prům. 71,1 cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 78,4cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 69,5 cm)
- Metakaolin 10%, Xseed 1.5% (rozliv prům. 67,6 cm)
- Metakaolin 10%, Xseed 1.0% (rozliv prům. 61,6 cm)
- Nanojíl TS1A 0.5% (rozliv prům. 65 cm)
- Nanojíl 0.5%, Xypex 5.11.2021 (rozliv prům. 70,7 cm)
- Nanojíl 0.5% (rozliv prům. 75,2 cm)
- Nanojíl 1% (rozliv prům. 66,4 cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 73,5 cm)
- Nanojíl 1% (rozliv prům. 74,4 cm)

Obr. 5.38: Porovnání průběhů bočních tlaků v prvních 2 hodinách

Průběh normalizovaného bočního tlaku



- Referenční směs (rozliv prům. 74,8cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 65,2cm)
- ...●... Nanojíl 1% (rozliv prům. 71,1 cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 78,4cm)
- Metakaolin 5% (rozliv prům. 69,5 cm)
- Metakaolin 10% (rozliv prům. 66,9 cm) - svislý tlak
- Metakaolin 10%, Xseed 1.0% (rozliv prům. 61,6 cm)
- ...●... Nanojíl 0.5% (rozliv prům. 65 cm)
- ...●... Nanojíl 0.5%, Xypex (rozliv prům. 70,7 cm)
- ...●... Nanojíl 0.5%, (rozliv prům. 75,2 cm)
- ...●... Nanojíl 1.0%, (rozliv prům. 66,4 cm)
- Metakaolin 5%, (rozliv prům. 73,5 cm)
- ...●... Nanojíl 1,0%, (rozliv prům. 74,4 cm)

Obr. 5.39: Porovnání průběhu normalizovaných bočních tlaků pomocí výšky

Tab. 5.5: Porovnání jednotlivých betonových směsí a jejich naměřených hodnot

Hlavní složky	Průměrný rozliv během betonáže	Výška konstrukce	Boční tlak v patě při výšce betonu 2,8m	Svislý tlak v patě při výšce betonu 2,8m	Maximální pokles bočního tlaku oproti referenci	Maximální boční tlak v patě	Maximální svislý tlak v patě	Maximální relativní pokles (boční/svislý)	Maximální deformace v patě
	cm	m	kPa		%	kPa	kPa	%	mm
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R	74,8	2,76	45,42	-	-	45,42	-	-	-
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, metakaolin 5 %	65,2	2,75	28,28	-	37,74 %	28,28	-	-	-
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, TS1A 1 %	71,1	2,8	42,9	44	5,55 %	42,9	44	2,50 %	-
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, metakaolin 5 %	78,4	2,8	43,05	46,15	5,22 %	43,05	46,15	6,72 %	-
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, metakaolin 5 %	69,5	3,3	31,52	36,38	30,60 %	33,27	39,72	16,24 %	-
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, metakaolin 10 %	66,9	3,3	-	20,47	-	-	22,56	-	2,17
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, metakaolin 10 %, Xseed 1.5 %	67,6	2,75	20	28	55,97 %	20	28	28,57 %	1,95
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, metakaolin 10 %, Xseed 1.0 %	61,6	2,83	21,36	21,51	52,98 %	21,36	21,51	0,72 %	1,77
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, TS1A 0.5 %	65	2,79	26,94	30,66	40,69 %	26,94	30,66	12,13 %	5,54
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, TS1A 0.5 %, Xypex	70,7	4,1	38,04	41,79	16,25 %	46	52,37	12,16 %	8,61
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, TS1A 0.5 %	75,2	3,9	41,29	44,61	9,09 %	42,26	48,79	13,38 %	2,2
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, TS1A 1.0 %	66,4	3,9	32,35	40,42	28,78 %	35,89	44,23	18,87 %	1,67
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, MK 5 %	73,5	7,8	34,74	-	23,51 %	37,3	-	-	5,32
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R, TS1A 1 %	74,4	3,2	16,68	-	63,28 %	18,39	-	-	1,06

6 Numerické modelování toku směsi a diskuse

6.1 Experimenty

K reprodukci experimentálního měření rozlivu cementových past byl v této práci použit numerický model založený na CFD. Data změřená na rotačním reometru sloužila jako vstupní data pro materiálový model. Hlavní důraz byl kladen na korelaci materiálových dat z reometru a experimentálních dat rozlivu čerstvé cementové pasty.

Pro srovnání s numerickým modelem byly vybrány tři směsi cementových past s různými viskózními vlastnostmi. Tyto směsi byly vybrány na základě provedených experimentů s rozlivy. První zvolenou směsí byla čistá cementová pasta z cementu CEM II/A-M (S-LL) 42.5R od firmy Lafarge Cement a s vodním součinitelem 0,45. Jako druhá byla zvolena opět čistá cementová pasta, ale tentokrát s vodním součinitelem 0,4. Jako poslední třetí směs byla vybrána modifikovaná cementová pasta pomocí 1 % sepiolitu TS1A. Přesný postup přípravy a měření viskozity cementových past je popsán v kapitole 4.3.3. Všechny pasty byly po přidání vody k cementu míchány po dobu 5 minut. Poté byla provedena zkouška rozlivu pomocí Hägermannova pokleповého stolku. K rozlivu byl používán standardní komolý kužel dodávaný se stolkem. Jeho rozměry jsou dolní průměr 100 mm, horní průměr 70 mm a výška 60 mm. Následně byl měřen rozliv a výška kužele ve středu. Viskozita a mez kluzu čerstvé cementové pasty byly měřeny pomocí rotačního reometru Thermo Scientific HAAKE Viscotester iQ s lopatkovým rotorem FL22 4B/SS (Obr. 6.1).



Obr. 6.1: Lopatkový rotor FL22 4B/SS

Mez kluzu τ_0 lze vypočítat podle Bogera [9] jako

$$\tau_0 = \frac{M_{max}}{K}, \quad (6.1)$$

kde M je maximální točivý moment a K je parametr lopatky popisující geometrii lopatky.

6.2 Numerické modelování toku

Simulace rozlivu kužele byla modelovaná pomocí metody objemu tekutiny (the Volume of Fluid – VOF). K simulaci byl použit program Ansys Fluent. Model VOF je vhodný pro řešení kontinuální a spojitě fázové interakce nemísitelných fází. Model byl složen ze dvou fází, a to z cementové pasty a vzduchu. Při výpočtu model kontroluje každý zlomek objemu fáze a zároveň řeší rovnice spojitosti a hybnosti [10]. Momentová rovnice je definována jako:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\eta(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (6.2)$$

kde \vec{v} je rychlost, p je statický tlak, ρ je hustota kapaliny, η je zdánlivá viskozita, \vec{g} je gravitační zrychlení a \vec{F} je síla vyplývající z napětí na rozhraní. Rovnice kontinuity se zapisuje jako

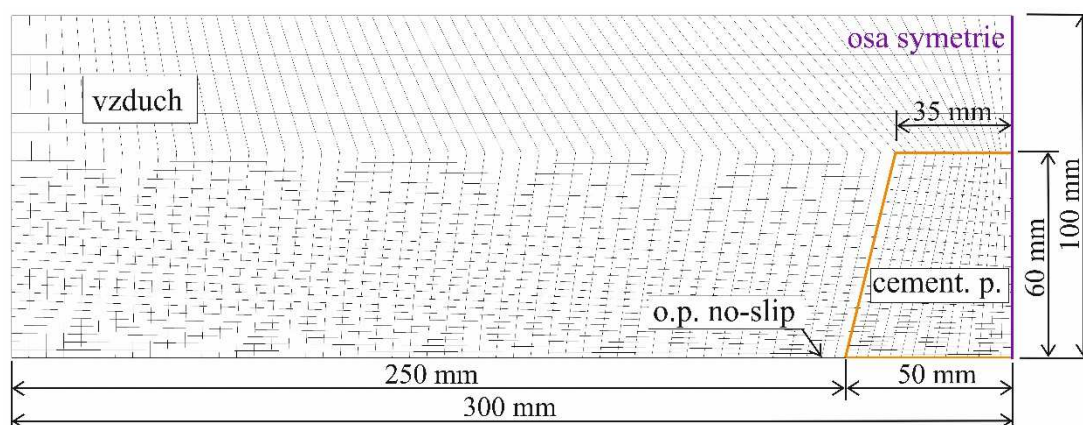
$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (6.3)$$

Numerický model byl řešen jako 2D osově symetrický s laminárním prouděním. Síť modelu byla stacionární (Obr. 6.2) se čtyřúhelníkovými buňkami. Cementová pasta byla uvažována jako okamžitě odformovaná. Pevným částem modelu byly předepsány bezskluzné okrajové podmínky. Vzduch byl modelován jako Newtonská kapalina s hustotou $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ a s viskozitou $= 1,7894\text{e-}05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Hustota cementových past byla předpokládána jako 1800 kg/m^3 a chování toku cementu bylo simulováno pomocí Herschel-Bulkley modelu, který je definovaný rovnicí

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (6.4)$$

kde τ_0 je mez kluzu, $\dot{\gamma}$ je smyková rychlost, k je index konzistence a n je index toku. Pomocí reometru byly získány reologické vlastnosti testovaných cementových past. Materiálové parametry použité v modelu byly získány proložením křivek získaných z reometrické zkoušky. V Tab. 6.1 jsou shrnuty jednotlivé vypočtené

parametry. Celkem byly sestaveny tři modely, které se lišily vstupními parametry. Model 1 se vypočítal z parametrů získaných proložením sestupné křivky 3. cyklu. Model 2 používal parametry získané proložením sestupné křivky 1. cyklu. Poslední model 3 přebíral parametry k a n z 1. cyklu a hodnota dynamické meze kluzu τ_0 byla nahrazena hodnotou meze kluzu získanou ze statické zkoušky. Hodnoty statické meze kluzu τ_0 jsou pro jednotlivé cementové pasty následující: 36 Pa (cem. pasta A), 55 Pa (cem. pasta B) a 216 Pa (cem. pasta C).



Obr. 6.2: Detaily sítě se zobrazenými rozměry a okrajovými podmínkami

6.3 Výsledky modelování rozlivu a diskuse

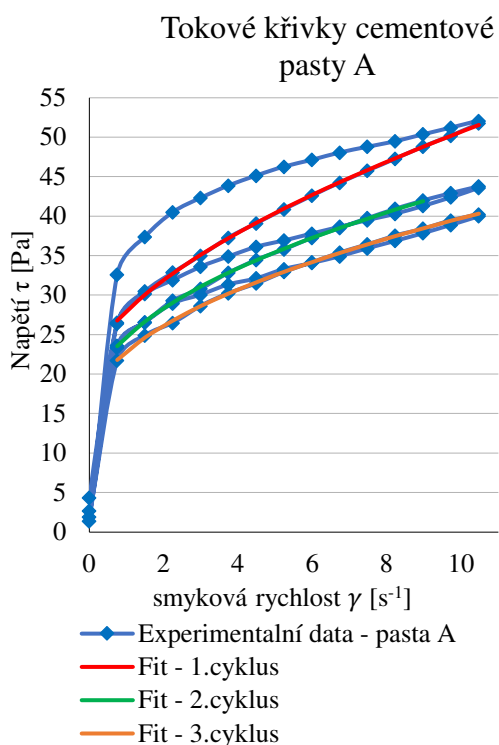
6.3.1 Výsledky testování reometru

Experimentální tokové křivky pro cementové pasty A a C z dynamické zkoušky na reometru jsou zobrazeny na Obr. 6.3 a 6.4. Výsledky cementové pasty B jsou velmi podobné cementové pastě A. Každá sestupná křivka byla numericky proložena modelem Herschel-Bulkley, podle rovnice 6.4. V tabulce 6.1 jsou shrnuty odvozené parametry. Z vypočtených hodnot bylo zjištěno, že mez kluzu τ_0 je nejvyšší v prvním cyklu a s každým dalším cyklem jeho hodnota klesá. Mez kluzu τ_0 je počáteční napětí, které musí cementová pasta překonat, aby začala téct. Mez kluzu má největší vliv na konečné rozpětí napětí. Parametr k i n ovlivňují sklon křivky proložení. Pro tyto hodnoty nebyl pozorován žádný trend. Rozptyl mezi jednotlivými cykly cementových past A a B je malý v porovnání s cementovou pastou C, kde se chování toku výrazně mění v každém cyklu. Rozdíl ve velikosti meze kluzu τ_0 byl mezi prvním a třetím cyklem pro cementovou pastu A – 36 %, pro pastu B – 38 %

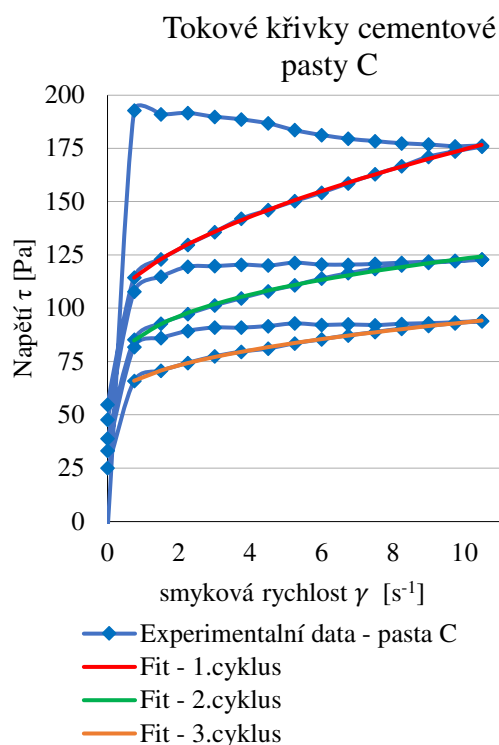
a pro pastu C – 89 %. Důvodem tak vysokého rozdílu mezi jednotlivými cykly u cementové pasty C byla přísada v podobě sepiolitu a tím zvýšené tixotropní chování.

	Cem. pasta A			Cem. pasta B			Cem. pasta C		
	τ_0 [Pa]	k [Pa.s ⁿ]	n [-]	τ_0 [Pa]	k [Pa.s ⁿ]	n [-]	τ_0 [Pa]	k [Pa.s ⁿ]	n [-]
1. cyklus	20,32	7,68	0,59	32,88	11,40	0,47	96,37	21,27	0,57
2. cyklus	15,69	9,05	0,49	28,85	10,59	0,46	51,11	36,97	0,29
3. cyklus	14,92	7,95	0,49	23,87	12,35	0,39	50,92	16,88	0,40

Tab. 6.1: Materiálové parametry z reometru pro model Herschel-Bulkley



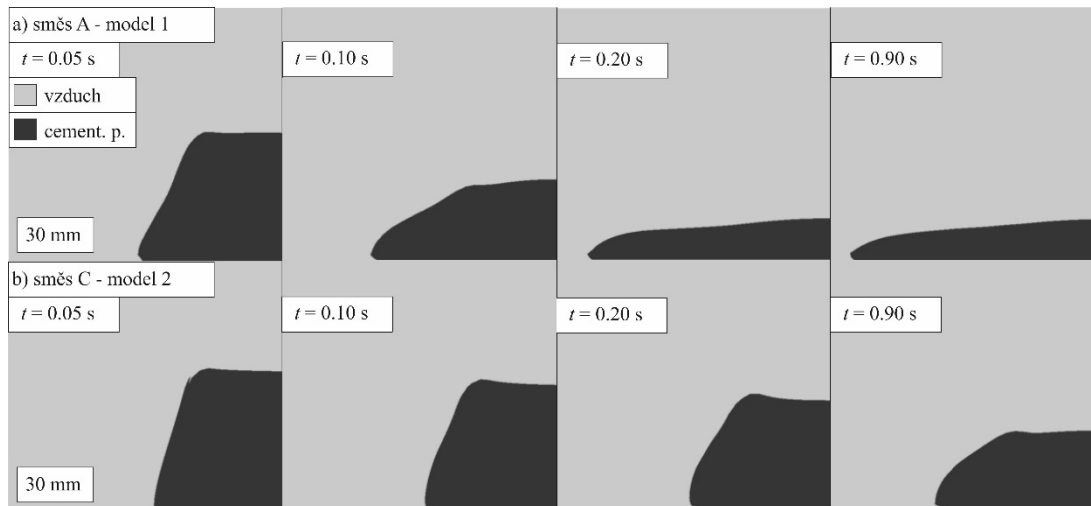
Obr. 6.3: Tokové křivky změřené pomocí reometru s vyznačenými proloženými sestupnými křivkami cyklů 1, 2, 3 pro cementovou pastu A



Obr. 6.4: Tokové křivky změřené pomocí reometru s vyznačenými proloženými sestupnými křivkami cyklů 1, 2, 3 pro cementovou pastu C

6.3.2 Výsledky modelování rozlivu cementové pasty

Obr. 6.5 jsou zobrazeny výsledky pro 2 cementové pasty. V prvním řádku jsou zobrazeny výsledky pro cementovou pastu A, s jejím největším spočteným rozlivem a poklesem. Ten byl spočten pomocí modelu 1. Druhý řádek zobrazuje výsledky pro cementovou pastu C, s jejím nejnižším rozlivem a poklesem. Ten byl spočítán v modelu 2.



Obr. 6.5: Výsledky výpočtu rozlivu cementových past A a C ve čtyřech různých časech.

Výsledky z numerického modelování rozlivu jsou shrnuty společně s experimentálními výsledky v Tab. 6.2. Model 1 má největší rozliv a nejvyšší pokles ze všech tří modelů pro všechny pasty. Je to způsobeno hodnotou meze kluzu τ_0 , která je převzata z posledního cyklu měření na reometru, a je u jednotlivých past nejmenší. V modelu 2 se hodnoty pro parametry meze kluzu τ_0 a n zvyšují u všech cementových past. Konečný rozliv se snižuje. Parametr k je však vyšší pouze u cementové pasty C. Pro pastu A a B je tento parametr nižší. Model 3 bere v úvahu místo dynamické meze kluzu statickou meze kluzu τ_0 . Jedná se o jediný parametr, který byl změněn oproti modelu 2. Výsledkem jsou výrazně nižší konečné rozlivy u všech cementových past. To potvrzuje předpoklad, že meze kluzu τ_0 má zásadní vliv na konečný rozliv.

Získané výsledky byly dále porovnány s experimentálními výsledky. Bylo zjištěno, že žádný z modelů neposkytuje uspokojivé výsledky. Modely 1 a 2 nadhodnocují konečný rozliv. Oba modely používají dynamickou meze kluzu získanou z reologických měření. V modelu 3 byla dynamická meze kluzu nahrazena statickou meze kluzu, aby se snížily hodnoty rozlivů. Tato změna v meze kluzu se projevila shodou s experimentálními výsledky pouze u cementové pasty A. Cementová pasta B vykazovala vyšší rozliv, i když byla uvažována statická meze kluzu. Cementová pasta C má tak vysokou statickou meze kluzu, že se směs nezačala pohybovat.

Vzorek	Experiment		Model 1		Model 2		Model 3	
	Rozliv	Pokles	Rozliv	Pokles	Rozliv	Pokles	Rozliv	Pokles
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
A	20,0	4,3	22,8	4,7	21,2	4,5	19,8	4,3
B	15,0	3,3	21,7	4,6	200	4,3	18,3	4,0
C	11,5	2,5	15,2	3,5	12,5	3,2	9,7	2,0

Tab. 6.2: Výsledky rozlivu vypočtené pomocí různých numerických modelů.

6.4 Zhodnocení numerického modelu

V této kapitole bylo představeno numerické modelování cementové pasty simulující rozliv na Hägermannově poklepovém stolku. Cementové pasty byly modelovány pomocí modelu Herschel-Bulkley. Materiálové parametry τ_0 , k a n používané v modelu Herschel–Bulkley byly získány numerickým proložením sestupných částí křivky z dynamické zkoušky na reometru. Při testech se potvrdilo, že velikost meze kluzu má dominantní vliv na konečný rozliv a pokles cementové pasty. Hodnota meze kluzu získaná z reometrického měření se významně mění v závislosti na zkušebním cyklu. Rozdíl meze kluzu τ_0 mezi prvním a posledním cyklem je u čistých cementových past bez přísady 36-38 % a 89 % cementové pasty modifikované pomocí sepiolitu TS1A. Tento rozdíl významně ovlivňuje výsledky.

Výsledky rozlivu a poklesu cementových past z numerických modelů 1 a 2 byly vyšší než u experimentů. V modelech byly uvažovány materiálové parametry z dynamické zkoušky na reometru. Při uvažování statické meze kluzu v numerickém modelu 3 bylo dosaženo výsledků, které se nejvíce přiblížily k rozlivům z experimentů. Výsledky srovnatelné experimentálními hodnotami byly pouze u cementové pasty A v modelu 3. Z výsledků je patrné, že současné zjednodušené modely neposkytují uspokojivé výsledky pro všechny varianty past. Tento problém by vyřešil model, který by bral v úvahu historii proudění a experimentální varianty jako je tixotropie pasty C.

7 Závěr

Předkládaná práce poskytuje přehled k problematice bočních tlaků a způsob jejich snížení. Hlavním cílem práce tak byl návrh samozhutnitelného betonu, který by na bednění vyvozoval nižší boční tlak než obyčejný samozhutnitelný beton.

Práce se zabývá zkoumáním reologických vlastností a návrhem funkční směsi. Aby byl návrh takového betonu možný, bylo nejprve nutné vybrat vhodné materiály pro přísady. Experimenty byly prováděny v několika na sebe navazujících sériích, kdy jednotlivé série měly za úkol zvolit nejvhodnější materiály na přísady splňující předem stanovené cíle, kterými byly především zvýšení viskozity směsi a následné snížení bočního tlaku na bednění.

Materiály zkoušené v první sérii experimentů byly zkoumány od mikroúrovně až po makroúroveň. Důvodem k tak podrobnému studiu bylo určit vliv těchto přísad na mikrostrukturu a mikromechanické vlastnosti, a tím i na konečné mechanické vlastnosti budoucích betonů. V první sérii byly zkoumány materiály: metakaolin LB05 Mefisto a sepiolit Sigma.

- K získání mikromechanických vlastností cementových past byla použita nanoindentace. Její pomocí byly získány: modul pružnosti, tvrdost a indentační parametr dotvarování CIT. Výsledky modulu pružnosti naznačují statisticky významný posun směrem k nižším hodnotám na vzorcích CM a CMS. To je důsledek hydratačního procesu, kdy se snižuje množství portlanditu (CH) v hydratovaném cementu a zvyšuje se hlavní hydratační produkt, kterým je gelový hydrát křemičitanu vápenatého (C-S-H gel). Naproti tomu se nezdá, že by sepiolit na mikroúrovni ovlivňoval modul pružnosti vzorků CS. Výsledky tvrdosti všech vzorků byly shledány jako statisticky ekvivalentní. Rozdíly indentačního parametru dotvarování CIT mezi vzorky nejsou velké a směsi lze považovat za ekvivalentní při dotvarování.

- Z výsledků obrazové analýzy je patrné snížení zbytkového slínku u modifikovaných cementových past. Procentuální zastoupení slínku u těchto směsí dosahovalo 75 % až 93 % hodnoty kontrolní směsi C. Stejný trend byl pozorován i u CH (portlanditu). I zde došlo k poklesu procentuálního zastoupení fáze ve struktuře modifikovaných cementových past. U modifikovaných cementových past byl pozorován nárůst C-S-H gelu oproti kontrolní směsi C. U směsi CM bylo procentuální zastoupení C-S-H gelu 57,50 %, což představuje nárůst přibližně o 5 %. U směsi CS a CMS byl nárůst ještě větší. Hodnoty C-S-H gelu dosáhly hodnoty 59,59 % a 59,70 %, což představuje 10% nárůst oproti kontrolní směsi C. Tyto hodnoty potvrzují u směsí obsahujících metakaolin předpoklad nárůstu C-S-H gelu díky jeho reakci s cementem. U směsí obsahující sepiolit způsobila navázaná voda hydrataci většího množství slínku. To mělo za následek zvýšení C-S-H gelu v cementové pastě. U modifikovaných cementů došlo k nárůstu hydrátu křemičitanu vápenatého (CAH) přibližně o 50 % oproti kontrolní cementové pastě C.
- Analýza EDS ukazuje malou změnu koncentrací chemických prvků.
- Na cementových pastách byla provedena EDS analýza. Z jejích výsledků je patrný pokles množství kyslíku obsaženého ve směsích CM, CS a CMS. Naopak u vápníku je vidět nárůst hmotnostní koncentrace u všech tří modifikovaných cementových past. U ostatních prvků změřených pomocí EDS analýzy nedošlo k výraznější změně v jejich hmotnostní koncentraci.
- Kromě hmotnostní koncentrace chemických prvků byla získána během EDS analýzy i stechiometrická hmotnostní koncentrace oxidů. Z porovnání jednotlivých výsledků je patrný nárůst oxidu vápenatého (CaO) u modifikovaných cementových past oproti kontrolní směsi C. U oxidu křemičitého (SiO₂) došlo u směsí CM a CS k poklesu hmotnostní koncentrace v porovnání s kontrolní směsí C. Modifikovaná cementová pasta CMS měla srovnatelnou hmotnostní koncentraci oxidu křemičitého.

- Z výsledků pevnosti v tahu za ohybu na cementových pastách je patrný vliv přísad. Průměrná hodnota pevnosti se pohybovala mezi 85-115% kontrolní směsi. V případě pevnosti v tlaku se průměrná hodnota modifikovaných cementových past pohybovala mezi 90-95% kontrolní směsi. Dá se říct, že přísady metakaolinu a sepiolitu nemají zásadní vliv na makromechanické vlastnosti cementové pasty, a tím ani na konečné vlastnosti betonu.

V druhé sérii experimentů byly ke stávajícím dvěma materiálům přidány dva materiály na bázi sepiolitu a dva na bázi celulóзовých vláken. Všechny materiály byly následně otestovány na rozliv. Z výsledků byly následně vybrány dva materiály, které byly otestovány v poslední sérii experimentů.

- Z výsledků je patrný vliv jednotlivých přísad na viskozitu a tím na rozliv cementových past a malt. Největší změny způsobují přísady na bázi sepiolitu. Dále se dá říct, že přidáním pouze 0,5 % sepiolitu lze ovlivnit rozliv cementové pasty o 30 %. Se zvyšující se dávkou je tento efekt ještě výraznější. V některých případech nešla směs zhotovit. Sepiolity Sigma a Rheoplus (označeny TS1 a TS2) jsou srovnatelné. Větší vliv na rozliv, než jejich složení má správné rozmísení a postup při rozmísení.
- Vliv celulóзовých přísad Arbocel byl daleko menší než u sepiolitu a byl v některých případech srovnatelný s čistou cementovou pastou nebo maltou. Pro regulaci viskozity by byla nutná větší dávka celulózy. To samé lze říct i o metakaolinu. I zde se dávka 1 % ukázala jako nedostatečná a bylo by nutné použít větší dávku metakaolinu. Z porovnání výsledků rozdílných cementů lze konstatovat, že rozlivy u cementů CEM I 42,5R a CEM II 42,5R jsou srovnatelné. Rozlivy u cementových past obsahujících cement CEM I 52,5R jsou výrazně nižší než u zbylých cementů. Projevuje se zde větší specifický povrch a rychlejší nástup hydratace tohoto cementu.

V poslední třetí sérii experimentů byly otestovány pouze dva vybrané materiály. Těmito materiály byly metakaolin LB05 Mefisto a sepiolit TS1A. Na nich bylo provedeno měření v reometru, měření bočního tlaku cementových past v měřící komoře a v konečné fázi měření bočního tlaku betonů na reálných konstrukcích.

- Z výsledků měření viskozity modifikovaných cementových past pomocí metakaolinu lze říct, že nejlepších výsledků dosahují směsi s nižší dávkou Master X-Seedu 100 a to konkrétně 0,5 % a 1 %. Viskózní vlastnosti vzrostly v průměru o 50 % oproti čisté cementové pastě. Vyšší dávka této přísady neznamena násobné zvýšení viskózních vlastností směsi.
- Z výsledků měření viskozity modifikovaných cementových past pomocí sepiolitu lze říct, že nejlepších výsledků dosahují směsi s nižší dávkou sepiolitu, a to konkrétně 1 %, 0,5 % a 0,25 %. Viskózní vlastnosti vzrostly v průměru o 50 až 75 % oproti čisté cementové pastě. Vyšší dávka sepiolitu neznamena násobné zvýšení viskózních vlastností směsi.
- Pro měření bočních tlaků na cementových pastách byla sestrojena měřicí komora.
- Po vyhodnocení prvních měření na betonech a jejich porovnání s průběhy tlaků na cementových pastách se projevil rozdíl rychlosti ustálení tlaků. U betonů bylo toto ustálení po skončení přitěžování téměř okamžité. U cementových past bylo toto ustálení pozvolné. V ideálním případě by mělo být i u cementových past ustálení téměř okamžité jako u betonů.
- Pozvolné ustálení u cementových past bylo způsobeno velikostí těsnících kroužků osazených v pístu a jejich těsnost. Kroužky způsobovaly nadměrné tření mezi stěnou komory a pístem. Tření ovlivňovalo citlivost při zatěžování a tím i konečné výsledky.
- Problém s těsností měřicí komory se nepodařilo vyřešit a od testů na cementových pastách se ustoupilo. Vše se soustředilo na experimenty s viskozitou a na měření bočních tlaků na betonech.
- Na reálných konstrukcích bylo provedeno měření 14 různých betonových směsí, které se lišily mezi sebou především v obsažené modifikační přísadě, v jejím množství a dále výškou a tloušťkou betonovaných stěn.
- Měřicí soustava se postupně rozšířila z původního měření bočního tlaku o možnost měřit svislý tlak, o měření deformace bednění a bočního tlaku po výšce.

- Jako ideální se ukázaly betonové směsi s konzistencí rozlití kužele v rozmezí 650 až 700 mm.
- Měření potvrdila, že zvýšená viskozita směsi redukuje maximální boční tlak již od prvních vrstev a že i přes sníženou viskozitu později ukládaných vrstev je dále schopná odolávat vnášenému přetížení.
- Jako ideální k porovnání jednotlivých směsí se ukázal normalizovaný boční tlak. Jeho použitím se odstraní vliv výšky ve výsledcích obyčejných tlaků.
- Se směsí s 5 % náhradou cementu metakaolinem bylo možné vybetonovat 7,8 m vysokou stěnu. Maximální boční tlak betonu na bednění nepřesáhnul 40 kPa a nepřekonal ani boční tlak vyvinutý referenční směsí na bednění stěny vysoké 2,76 m.
- Jednotlivé navržené betonové směsi splnily lépe či hůře problém o snížení bočního tlaku. Nejlépe si v tomto ohledu vedly betonové směsi s nižším rozlivem. Jako ideální směsi se ukázaly betonové směsi obsahující 10 % metakaolinu a 1 % a 1,5 % Xseedu a betonová směs obsahující 1 % sepiolitu TS1A s průměrným rozlivem 74 cm.
- Celý experimentální výzkum byl doplněn o jednoduchý numerický model, kdy pomocí výsledků z jednoduše opakovatelných testů by bylo možné zjišťovat materiálové parametry pro použití v reologických modelech. Tento přístup byl zkoušen na rozlivech cementových past.
- Výsledky rozlivu a poklesu cementových past z numerických modelů 1 a 2 byly vyšší než u experimentů. V modelu 3 bylo dosaženo výsledků, které se nejvíce přiblížily k rozlivům z experimentů. Srovnatelných hodnot bylo dosaženo pouze u cementové pasty A. Z výsledků je patrné, že zjednodušené modely neposkytují uspokojivé výsledky pro všechny varianty past. Tento problém by vyřešil model, který by bral v úvahu historii proudění.

Experimenty umožňují dobře popsat chování a reologické vlastnosti cementových past a samozhutnitelných betonu. Vyvinutá měřicí soustava navíc poskytuje neocenitelné informace a představu o chování bednění při betonování svislých konstrukcí. Jejich provedením lze získat velmi cenná data, která mohou sloužit k dalšímu výzkumu dané problematiky, a nejenom jí. Data mohou sloužit i k návrhu nových betonových směsí, k rozvoji nových bednění pro architektonicky složité konstrukce nebo k rozvoji 3d tisku a robotizaci ve stavebnictví.

Výhodou experimentů je snadná zaměnitelnost různých druhů materiálů, volba měřených vlastností a provádění na různých typech svislých konstrukcích. Nevýhodou experimentů je jejich časová náročnost a pracnost. Tomu by se dalo částečně předejít pomocí složitějších numerických modelů, které by zastaly část práce na experimentech.

Literatura

- [1] J. H. Kim, N. Noemi, S. P. Surendra. *Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Composites 34 (2012) 746-753
- [2] N. Roussel. *A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications*. Cement and Concrete Research (2006) 1797-1806
- [3] S. Kawashima, J. H. Kim, D. J. Corr, S. P. Shah. *Study of the mechanisms underlying the fresh-state response of cementitious materials modified with nanoclays*. Construc. and Building Materials (2012) 749-757
- [4] J. H. Kim, M. Beacraft, S. P. Surendra. *Effect of mineral admixtures on formwork pressure of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Composites 34 (2010) 665-671
- [5] J. P. Melo, A. S. Aguilar, F. H. Olivares. *Rheological properties of aerated cement pastes with fly ash, metakaolin and sepiolite addition*. Construction and Building Materials 65 (2014) 566-573
- [6] R. Siddique, J. Klaus. *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review*. Applied Clay Science 43 (2009) 392-400
- [7] V. Nežerka, J. Němeček, Z. Sližkova, P. Tesárek. *Investigation of crushed brick-matrix interface in lime-based ancient mortar by microscopy and nanoindentation*. Cement & Concrete Composites 55 (2015) 122–128
- [8] J. Němeček, V. Králík, V. Šmilauer, L. Polívka, A. Jäger. *Tensile strength of hydrated cement paste phases assessed by microbending tests and nanoindentation*. Cement & Concrete Composites 73 (2016) 164-173
- [9] S. Diamond, J. Huang. *The ITZ in concrete – a different view based on image analysis and SEM observations*. Cement and Concrete Composites 23 (2001) 179-188
- [10] J. Němeček, V. Kralík, J. Vondřejc. *Micromechanical analysis of heterogeneous structural materials*. Cement & Concrete Composites 36 (2013) 85–92

- [11] W.C. Oliver, G.M. Pharr. *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. J. Mat. Res. 7 (1992) 1564-1583
- [12] C. Ferraris et al.. *Fresh concrete rheology: recent developments*. Mater. Sci. Concrete VI (2001) 215-241
- [13] F. Dufour and G. Pijaudier-Cabot. *Numerical modelling of concrete flow: homogeneous approach*. J. Num. Anal. Meth. Geom. 29 (2005) 395-416
- [14] N. Roussel, P. Coussot. *Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: from slump to spreading flow*. J. Rheol. 49 (2005)
- [15] A. Bouvet et al.. *The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study*. Cem. Concr. Res. 40 (2010) 1517-1523
- [16] N. Pashias and D. V. Boger. *A fifty cent rheometer for yield stress measurement*. J. of Rheol. 40 (1996) 1179-1189
- [17] J. Gao and A. Fourie. *Spread is better: An investigation of the mini-slump test*. Miner. Engin. 71 (2015) 120-132
- [18] N. Roussel. *Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulation and concrete rheometer results*. Mater. Struct. Constr. 39 (2006) 501-509
- [19] A. Bouvet, E. Ghorbel, R. Bennacer. *The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study*. Cement and Concrete Research 40 (2010) 1517-1523
- [20] N. Q. Dzuy and D.V. Boger. *Direct yield stress measurement with the vane method*. J. Rheol. 29 (1985) 335-347
- [21] Ansys. *Ansys fluent theory guide*. (2011).
- [22] A. A. Mohamad. *Lattice Boltzmann method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes*. Springer, London (2019)
- [23] X. He, L.S. Luo. *Lattice Boltzmann Model for the Incompressible Navier-Stokes Equation*. Journal of Statistical Physics 88 (1997) 927-944

- [24] N. Roussel, M.R. Geiker, F. Dufour, L.N. Thrane, P. Szabo. *Computational modeling of concrete flow: General overview*. Cement & Concrete Research 37 (2007) 1298–1307
- [25] V. Mechtcherine, S. Shyshko. *Simulating of fresh concrete flow using Discrete Element Method (DEM): theory and applications*. Materials and Structures 47 (2014) 615–630
- [26] O. Švec, J. Skoček. *Fibre reinforced self-compacting concrete flow simulations in comparison with L-box experiments using Carbopol*. BEFIB2012 – Fibre reinforced concrete (2012)
- [27] P.F.G. Banfill. *Rheology of fresh cement and concrete*. Rheology Reviews (2006), str. 61-130
- [28] P.F.G Banfill, M.A.O.M. Teixeira, R.J.M. Craik. *Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation*. Cement and Concrete Research 41 (2011) 932–941
- [29] S. Remond, P. Pizette. *A DEM hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow*. Cement and Concrete Research 58 (2014) 169–178
- [30] V. Mechtcherine, S. Shyshko. *Simulating the behaviour of fresh concrete with the Distinct Element Method – Deriving model parameters related to the yield stress*. Cement & Concrete Composites 55 (2015) 81–90
- [31] F. Kolařík, B. Patzák. *Modeling of fresh concrete flow using XFEM*, 18th International Conference Engineering mechanics (5/2012) 631-637
- [32] F. Dufour, G. Pijaudier-Cabot. *Numerical modeling of material flow with an internal length*, 17th ASCE Engineering Mechanics Conference (6/2004)
- [33] O. Švec, J. Skoček, H. Stang, J. F. Olesen, & P. N. Poulsen.. *Flow simulation of fiber reinforced self compacting concrete using Lattice Boltzmann method*. (2011) In Dissemination <http://icccmadrid2011.org>
- [34] O.Wallevik. *Rheology – a scientific approach to develop self-compacting concrete*. Proc. of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Aug. 2003, Reykjavik, Iceland, RILEM, Publ. S.A.R.L. PRO 33 (2003) 23-31

- [35] *Reologie*. Ústav Fyziky a Materiálového Inženýrství, Fakulta Technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. Dostupné také z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [36] J. Janalík. *Viskozita tekutin a její měření*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava (2010) 66 s.
- [37] J. Janalík. *Potrubní hydraulická a pneumatická doprava*, Skripta Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava (1999) 194 s.
- [38] Trachenko K., a Brazhkin V. V. *Minimal quantum viscosity from fundamental physical constants*. Science Advances (2020), 6(17). ISSN 2375-2548.
- [39] C. Hu, F. De Larrard. *The rheology of fresh high-performance concrete*. Cement and Concrete Research [online]. 1996 26(2) 283-294
- [40] R. Hela. *Problematika čerstvých samozhutnitelných betonů: Problems of fresh selfcompacting concrete - Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství*. VUTIUM, (2010)
- [41] J. Mewis, N.J. Wagner. *Thixotropy*. Advances in Colloid and Interface Science (2009) 147-148, 214-227. ISSN 00018686
- [42] R. Lapasin, V. Longo, S. Rajgelj. *Thixotropic behaviour of cement pastes*. Cement and Concrete Research 9(3) (1979) 309-318. ISSN 00088846
- [43] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel. *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders*. Materials & Design (2016), 100, 102-109. ISSN 0264-1275
- [44] H. Okamura, M. Ouchi. *Self-compacting concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology 1(1) (2003) 5-15
- [45] S. Kawashima et al.. *Rate of thixotropic rebuilding of cement pastes modified with highly purified attapulgite clays*. Cement and Concrete Research 53 (2013) 112-118.

- [46] J. Němeček, V. Zacharda, P. Trávníček. *Reduction of formwork pressures in self-compacting concrete*. eds. PROCEEDINGS IRF2020. 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure., Funchal, online, 2020-09-06/2020-09-10. INEGI-FEUP (2020) 545-546. ISBN 978-989-54756-1-2.
- [47] J. Němeček, et al.. *Correlation of viscosimetry and practical tests of fresh cement paste consistency*. ed. SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2020: 17th International Conference. Special Concrete and Composites 2020, Skalský Dvůr, 2020-10-14/2020-10-15. Melville, NY: AIP Publishing, 2021. AIP Conference Proceedings. sv. 2322. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4066-1.
- [48] J. TICHÝ, et al.. *Vliv písků na vlastnosti samozhutnitelných betonů*. 17. Konference speciální betony - betony v extrémních podmínkách vysokohodnotné betony ostatní speciální betony. 17. konference SPECIÁLNÍ BETONY, Lísek, Bystřice nad Pernštejnem, 2020-10-14/2020-10-15. Ostrava - Zábřeh: SEKURKON (2020) 31-36 ISBN 978-80-86604-83-1.
- [49] V. Zacharda, J. Němeček. *Micromechanical characterization of cement paste modified by nanoclays*. 14th International Conference on Local Mechanical Properties, CIIRC, Praha, České vysoké učení technické v Praze (2020) 101-106
- [50] V. ZACHARDA, et al.. *Influence of Interfacial Transition Zone on Local and Overall Fracture Response of Cementitious Composites*. eds. Local Mechanical Properties XIII. 13th International Conference on Local Mechanical Properties, Košice, 2017-11-06/2017-11-08. Curich: Trans Tech Publications, (2018) 97-102. Key Engineering Materials. sv. 784. ISSN 1662-9795. ISBN 978-3-0357-1242-1.
- [51] V. Zacharda, P. Štemberk, J. Němeček. comparison of micromechanical properties of interfacial transition zone in fiber-reinforced cement paste samples of different age. In: Mechanika 2018 Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. 23rd International Scientific Conference Mechanika 2018, Druskininkai, 2018-05-18. Kaunas: Kaunas University of Technology (2018) 183-187. ISSN 1822-2951.

- [52] V. Zacharda, P. Štemberk, J. Němeček. *Nanomechanical Performance of Interfacial Transition Zone in Fiber Reinforced Cement Matrix*. ed. Special Concrete and Composites 2017. 14th International Conference on Special Concrete and Composites, Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Zürich: Transtech Publications, (2018) 251-256. Key Engineering Materials. sv. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7
- [53] V. Zacharda, , J. Němeček, P. Štemberk. *Micromechanical performance of interfacial transition zone in fiber-reinforced cement matrix*. eds. Fibre Concrete 2017. Praha, 2017-09-13/2017-09-16. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 246. ISSN 1757-899X
- [54] J. Assaad, K.H. Khayat. *Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete*. ACI Mater. J. 102(3) (2005)145–53
- [55] J. Assaad, K.H. Khayat. *Kinetics of formwork pressure drop of self-consolidating concrete containing various types and contents of binder*. Cement Concrete Res. 35 (2005) 1522–1530
- [56] J. Assaad, K.H. Khayat. *Formwork pressure of self-consolidating concrete made with various binder types and contents*. ACI Mater. J. 102(4) (2005) 215–23
- [57] K.H. Khayat, J. Assaad. *Measureable systems for determining formwork pressure of highly-flowable concrete*. Mater. Struct. 41 (2008) 37–46
- [58] S. Amziane. *Setting time determination of cementitious materials based on measurements of the hydraulic pressure variations*. Cement Concrete Res. 36 (2006) 295–304.
- [59] M. Talesnick, A. Katz. *Measuring lateral pressure of concrete: From casting through hardening*. Construction and Building Materials 34 (2012) 211-217
- [60] S.H. Kwon, Q.T. Phung, H.Y. Park, J.H. Kim, S.P. Surendra. *Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete*

Seznam vlastních publikací

NĚMEČEK, J., V. ZACHARDA a P. TRÁVNÍČEK. REDUCTION OF FORMWORK PRESSURES IN SELF-COMPACTING CONCRETE. In: GOMES, J.F.S. a S.A. MEGUID, eds. *PROCEEDINGS IRF2020*. 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure., Funchal, online, 2020-09-06/2020-09-10. INEGI-FEUP, 2020. s. 545-546. ISBN 978-989-54756-1-2.

NĚMEČEK, J. et al. Correlation of viscosimetry and practical tests of fresh cement paste consistency. In: REITERMAN, P., ed. *SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2020: 17th International Conference*. Special Concrete and Composites 2020, Skalský Dvůr, 2020-10-14/2020-10-15. Melville, NY: AIP Publishing, 2021. AIP Conference Proceedings. sv. 2322. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4066-1. DOI [10.1063/5.0042721](https://doi.org/10.1063/5.0042721). Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0042721>

TICHÝ, J. et al. Vliv písků na vlastnosti samozhutnitelných betonů. In: *17. KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY - BETONY V EXTRÉMNÍCH PODMÍNKÁCH VYSOKOHODNOTNÉ BETONY OSTATNÍ SPECIÁLNÍ BETONY*. 17. konference SPECIÁLNÍ BETONY, Lísek, Bystřice nad Pernštejnem, 2020-10-14/2020-10-15. Ostrava - Zábřeh: SEKURKON, 2020. s. 31-36. ISBN 978-80-86604-83-1.

ZACHARDA, V. Mikromechanické vlastnosti cementové pasty modifikované metakaolinem a nanojílem. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. *Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2020*. 9th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures 2020, Praha, 2020-11-13. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2020. s. 124-129. ISBN 978-80-01-06774-1.

ZACHARDA, V. a J. NĚMEČEK. MICROMECHANICAL CHARACTERIZATION OF CEMENT PASTE MODIFIED BY NANOCCLAYS. In: NĚMEČEK, J., P. HAUŠILD a R. ČTVRTLÍK, eds. *14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOCAL MECHANICAL PROPERTIES - LMP 2019*. 14th International Conference on

Local Mechanical Properties, CIIRC, Praha, 2019-11-06/2019-11-08. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. s. 101-106. ACTA POLYTECHNICA CTU PROCEEDINGS. sv. 27. ISSN 2336-5382. ISBN 978-80-01-06735-2. DOI [10.14311/APP.2020.27.0101](https://doi.org/10.14311/APP.2020.27.0101).

ZACHARDA, V. a J. NĚMEČEK. Experimental Studies of Accelerated Chloride Transport in Concrete. In: *SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2018*. Hotel Skalsky Dvur, Lisek, 2018-10-11/2018-10-12. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. s. 139-144. ACTA POLYTECHNICA CTU PROCEEDINGS. sv. 22. ISSN 2336-5382. ISBN 978-80-01-06594-5.

ZACHARDA, V. Experimentální studie účinnosti elektromigrace na extrakci chloridů. In: PETŘÍK, M. a A. HORÁKOVÁ, eds. *Proceedings of the 8th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures*. 8th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures 2019, Praha, 2019-05-31. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2019. s. 28. ISBN 978-80-01-06574-7.

KHMUROVSKA, Y. et al. Equipment for Concrete Irradiation Experiments. In: *Mechanika 2019 Proceedings of the 24th International Scientific Conference*. 24th International Scientific Conference MECHANIKA 2019, Kaunas, 2019-05-17. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019. s. 80-83. ISSN 1822-2951.

ZACHARDA, V. et al. Influence of Interfacial Transition Zone on Local and Overall Fracture Response of Cementitious Composites. In: LOFAJ, F. a P. ZUBKO, eds. *Local Mechanical Properties XIII*. 13th International Conference on Local Mechanical Properties, Košice, 2017-11-06/2017-11-08. Curich: Trans Tech Publications, 2018. s. 97-102. Key Engineering Materials. sv. 784. ISSN 1662-9795. ISBN 978-3-0357-1242-1. DOI [10.4028/www.scientific.net/KEM.784.97](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.784.97).

ZACHARDA, V. Betonová závodní loď Stingray. *TecniCall*. 2017,(podzim 2017), 38. ISSN 1805-1030.

ZACHARDA, V., P. ŠTEMBERK a J. NĚMEČEK. Comparison of Micromechanical Properties of Interfacial Transition Zone in Fiber-Reinforced Cement Paste Samples of Different Age. In: *Mechanika 2018 Proceedings of the 23rd International Scientific Conference*. 23rd International Scientific Conference Mechanika 2018, Druskininkai, 2018-05-18. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018. s. 183-187. ISSN 1822-2951.

ZACHARDA, V. Studie mikromechanických vlastností vzorků různého stáří vláknocementové pasty. In: DVORSKÝ, T. a M. PETŘÍK, eds. *PhD Workshop 2018 - CD*. PhD Workshop 2018, Praha, 2018-05-25. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2018. s. 165-169. ISBN 978-80-01-06417-7.

ZACHARDA, V., P. ŠTEMBERK a J. NĚMEČEK. Nanomechanical Performance of Interfacial Transition Zone in Fiber Reinforced Cement Matrix. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2017*. 14th International Conference on Special Concrete and Composites, Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Zürich: Transtech Publications, 2018. s. 251-256. Key Engineering Materials. sv. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7. DOI [10.4028/www.scientific.net/KEM.760.251](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.760.251).

ZACHARDA, V., J. NĚMEČEK a P. ŠTEMBERK. Micromechanical performance of interfacial transition zone in fiber-reinforced cement matrix. In: BROUKALOVÁ, I. et al., eds. *Fibre Concrete 2017*. Praha, 2017-09-13/2017-09-16. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 246. ISSN 1757-899X. DOI [10.1088/1757-899X/246/1/012018](https://doi.org/10.1088/1757-899X/246/1/012018).

ZACHARDA, V., P. ŠTEMBERK a Y. KHMUROVSKA. Оборудование, обеспечивающее теплоты для созревания бетонных образцов в соответствии с заданными температурными кривыми. In: *Сборник научных трудов «Актуальные вопросы машиноведения»*. Выпуск 6. Инновации в машиностроении - 2017, Minsk, 2017-09-21/2017-09-22. Объединенный институт машиностроения национальной академии наук Беларуси, 2017. s. 305-310. ISSN 2306-3084.

ZACHARDA, V. Microstructure Performance of Interfacial Transition Zone in Fiber Reinforced Cement Matrix. In: DVORSKÝ, T. a M. PETŘÍK, eds. *PhD Workshop 2017. Collection of Abstracts*. PhD Workshop 2017, Praha, 2017-05-26. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2017. s. 50-51. ISBN 978-80-01-06132-9.

ZACHARDA, V. Microstructure Performance of Interfacial Transition Zone in Fiber Reinforced Cement Matrix. In: DVORSKÝ, T. a M. PETŘÍK, eds. *PhD Workshop - Full Texts*. PhD Workshop 2017, Praha, 2017-05-26. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2017. ISBN 978-80-01-06132-9.

BOROVKOV, D. et al. Betonová kánoi Stingray. *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2016, šestnáctý(2), 8-13. ISSN 1213-3116.

ŠTEMBERK, P. a V. ZACHARDA. Investigation of Effect of Vibration on Fibre Concrete. In: *Mechanika 2015 - Proceedings of the 20th International Scientific Conference*. Mechanika 2015, Kaunas, 2015-04-23/2015-04-24. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2015. s. 240-243. ISSN 1822-2951.

ZACHARDA, V. *Simulace chování drátkobetonu zhutněného vibracemi a experimentální ověření*. Praha: Datum obhajoby 2015-01-26. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Bednění výšky 7,8 m určené pro železobetonovou monolitickou stěnu, která byla betonovaná pomocí upraveného samozhutnitelného betonu	14
Obr. 2.1: Toková křivka Newtonské kapaliny [36].....	16
Obr. 2.2: Závislost viskozity na gradientu rychlosti Newtonské kapaliny [36].....	16
Obr. 2.3: Tokové křivky vybraných Neneutonských kapalin [36].....	17
1- newtonská kapalina, 2 – pseudoplastická kapalina, 3 – dilatantní kapalina	17
4 – skutečná plastická kapalina, 5 – Binghamova – ideální kapalina	17
Obr. 2.4: Porovnání pseudoplastické a newtonské kapaliny [36]	18
Obr. 2.5: Porovnání tixotropní a newtonské kapaliny [36].....	18
Obr. 2.6: Porovnání dilatantní a newtonské kapaliny [36].....	19
Obr. 2.7: Porovnání reopektické a newtonské kapaliny [36]	19
Obr. 2.9: Chování tixotropních látek na mezi kluzu [2].....	21
Obr. 2.10: Přechodové chování betonu a) snížení otáček, b) zvýšení otáček [2].....	22
Obr. 2.11: Zařízení pro tlakovou zkoušku bednění [4]	24
Obr. 2.12: Návrh tlakového senzoru [59].....	24
Obr. 2.13: Prvky, výpočtové složky a vykreslení v DEM [25].....	25
Obr. 2.14: Model interakcí částic: a) normálový směr; b) tangenciální směr [25]	25
Obr. 4.1: Snímek částic sepiolitu Sigma	31
Obr. 4.2: Snímek částic metakaolinu	31
Obr. 4.3: Snímek částic sepiolitu Rheoplus TS 3010A.....	32
Obr. 4.4: Snímek částic sepiolitu Rheoplus TS 2020.....	32
Obr. 4.5: Snímek vláken Arbocelu BE600-30 PU	33
Obr. 4.6: Snímek vláken Arbocelu B00	33
Obr. 4.6: Měřicí soustava nanoindentoru CSM Instruments skládající se z optického světelného mikroskopu a nanoindentačního testeru.....	35
Obr. 4.7: Zatěžovací funkce indentů	36
Obr. 4.8: Indentační křivky pro různé fáze cementové pasty.....	36
Obr. 4.9: Skenovací elektronový mikroskop Phenom XL	38
Obr. 4.10: Zkoumání mikrostruktury vzorku – energetická disperzní rentgenová spektroskopie.....	38
Obr. 4.11: Snímek ze SEM s viditelnými fázemi.....	39

Obr. 4.12: Topografie povrchu s viditelnými vpichy po indentaci	40
Obr. 4.13: Snímek povrchu zkoumaného vzorku s viditelnými jednotlivými fázemi cementu získaným pomocí BSE	40
Obr. 4.14: SEM obrázek metakaolinu.....	40
Obr. 4.15: SEM obrázek sepiolitu.....	40
Obr. 4.16: Zkouška třibodovým ohybem	42
Obr. 4.17: Zkouška pevnosti v tlaku na zbytku trámečku	42
Obr. 4.18: Hägermannův pokleповý stolec spolu s kuželem	43
Obr. 4.19: Reometr Thermo Scientific HAAKE Viscotester iQ.....	44
Obr. 4.20: Lopatkový rotor CC38/Ti/SE	45
Obr. 4.21: Testovací váleček CCB43/SS/SE s odměrkou	45
Obr. 4.22: První verze měřící komory z hliníku pro měření bočního tlaku cementu ..	47
Obr. 4.23: Druhá verze měřící komory vyrobená z nerezů osazena v pákovém lisu s připojenou měřící aparaturou	48
Obr. 4.24: Popis jednotlivých částí měřící komory.....	49
Obr. 4.25: Detail pístního válce se senzorem.....	50
Obr. 4.26: Detail spodní části komory	50
Obr. 4.27: Měřící komora pro měření bočního tlaku betonu na bednění.....	50
Obr. 4.28: Zabudovaná komora v bednění stěny – pohled zvnitřku stěny.....	51
Obr. 4.29: Měřící komora pro svislý tlak.....	52
Obr. 4.30: Analogové měření boční deformace v místě měření bočního tlaku	52
Obr. 4.31: Konstrukce pro osazení přístrojů pro měření tlaků a deformace	52
Obr. 4.32: Měřící soustava pro měření bočního a vertikálního tlaku a boční deformace pomocí lineárních potenciometrů.....	52
Obr. 5.1: Histogram modulu pružnosti s trendovou čarou – CS, CM, CMS a C.....	54
Obr. 5.2: Histogram tvrdosti s trendovou čarou – CS, CM, CMS a C.....	55
Obr. 5.3: Histogram CIT s trendovou linií – CS, CM, CMS a C.....	56
Obr. 5.4.: Mapy chemických fází z analýzy EDS: a) C, b) CM,.....	57
Obr. 5.5: Mapy chemických fází z analýzy EDS c) CS a d) CMS.	58
Obr. 5.6: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 42,5R a w/c = 0,40	62
Obr. 5.7: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 42,5R a w/c = 0,45	62
Obr. 5.8: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 52,5R a w/c = 0,40	63
Obr. 5.9: Rozlivy cementových past z cementu CEM I 52,5R a w/c = 0,45	63

Obr. 5.10: Rozlivy cementových past z cementu CEM II 42,5R a $w/c = 0,40$	64
Obr. 5.11: Rozlivy cementových past z cementu CEM II 42,5R a $w/c = 0,45$	64
Obr. 5.12: Rozlivy malt z cementu CEM I 42,5R a $w/c = 0,50$	65
Obr. 5.13: Rozlivy malt z cementu CEM I 42,5R a $w/c = 0,55$	65
Obr. 5.14: Rozlivy malt z cementu CEM I 52,5R a $w/c = 0,50$	66
Obr. 5.15: Rozlivy malt z cementu CEM I 52,5R a $w/c = 0,55$	66
Obr. 5.16: Dynamická mez kluzu čisté cementové pasty	67
Obr. 5.17: Statická mez kluzu čisté cementové pasty	68
Obr. 5.18: Tixotropie čisté cementové pasty	68
Obr.5.19: Dynamická mez kluzu cementových past s metakaolinem LB05 Mefisto	70
Obr. 5.20: Statická mez kluzu cementových past s metakaolinem LB05 Mefisto.....	70
Obr. 5.21: Tixotropie cementových past s metakaolinem LB05 Mefisto	71
Obr. 5.22: Dynamická mez kluzu cementových past se sepiolitem TS1A	72
Obr. 5.23: Statická mez kluzu cementových past se sepiolitem TS1A.....	73
Obr. 5.24: Tixotropie cementových past se sepiolitem TS1A	73
Obr. 5.25: Průběh tlaků čisté cementové pasty CEM I 42,5R	74
Obr. 5.27: Průběh tlaků modifikované cementové pasty pomocí sepiolitu TS1A.....	75
Obr. 5.28: Průběh jednoho kroku přitížení betonu	76
Obr. 5.29: Průběh jednoho kroku přitížení cementové pasty	76
Obr. 5.30: Průběh tlaků čisté cementové pasty CEM I 42,5R po změně těsnění.....	77
Obr. 5.31: Problém s těsností pístu po změně těsnících kroužků.....	78
Obr. 5.32: Průběh bočního tlaku na referenční směsi	79
Obr. 5.33: Průběh tlaků a deformace v patě stěny – 10 % metakaolinu	80
Obr. 5.34: Deformace stěny po výšce – 10 % metakaolinu	81
Obr. 5.35: Průběh tlaků a deformace v patě stěny – 1 % sepiolitu	82
Obr. 5.36: Deformace stěny po výšce – 1 % sepiolitu	83
Obr. 5.37: Porovnání průběhů svislých tlaků v prvních 2 hodinách	86
Obr. 5.38: Porovnání průběhů bočních tlaků v prvních 2 hodinách	87
Obr. 5.39: Porovnání průběhu normalizovaných bočních tlaků pomocí výšky	88
Obr. 6.1: Lopatkový rotor FL22 4B/SS.....	90
Obr. 6.2: Detaily sítě se zobrazenými rozměry a okrajovými podmínkami	92
Obr. 6.3: Tokové křivky změřené pomocí reometru s vyznačenými proloženými sestupnými křivkami cyklů 1, 2, 3 pro cementovou pastu A	93

Obr. 6.4: Tokové křivky změřené pomocí reometru s vyznačenými proloženými sestupnými křivkami cyklů 1, 2, 3 pro cementovou pastu C	93
Obr. 6.5: Výsledky výpočtu rozlivu cementových past A a C ve čtyřech různých časech.	94

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Složení jednotlivých cementových past použitých v první sérii testů	31
Tab. 5.1: Procentuální složení jednotlivých fází se směrodatnou odchylkou	56
Tab. 5.2: Hmotnostní koncentrace prvků v měřeních vzorcích	58
Tab. 5.3: Stechiometrická hmotnostní koncentrace oxidů v měřeních vzorcích	59
Tab. 5.4: Tabulka pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku.....	60
Tab. 5.5: Porovnání jednotlivých betonových směsí a jejich naměřených hodnot	89
Tab. 6.1: Materiálové parametry z reometru pro model Herschel-Bulkley	93
Tab. 6.2: Výsledky rozlivu vypočtené pomocí různých numerických modelů.....	95