



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA OBJEMOVÝCH ZMĚN
MATERIÁLŮ S CEMENTOVÝM POJIVEM**

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE VOLUME CHANGES IN CEMENT-BASED MATERIALS

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. BARBARA KUCHARCZYKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2019

Abstrakt

Práce se zabývá experimentálním stanovením vývoje smrštění malt a betonů v laboratorním prostředí. Hlavním sledovaným aspektem je vliv zkušebních metod a přístrojového vybavení na výsledný tvar křivky a absolutní hodnotu smrštění. V práci je podrobně popsán inovativní způsob stanovení celkového vývoje smrštění a hmotnostních úbytků malt a betonů od jejich uložení do měřicích forem až po dlouhodobé zrání po vyjmutí z forem. Práce obsahuje výsledky vlastní experimentální analýzy, které ukazují hlavní přednosti použitých měřicích technik. Ukázalo se, že zkušební postup má široké uplatnění a to zejména tam, kde je nutné zahájit měření co nejdříve po uložení zkoumaných materiálů do forem, tj. u betonů s nízkým vodním součinitelem (w/c) či betonů obsahujících pórovitá kameniva. Zkušební metoda také umožňuje zachycení počátečního nabývání malt a betonů s vysokým w/c . Jako největší praktický přínos tohoto způsobu měření smrštění lze uvést právě možnost stanovení vývoje smrštění a hmotnostních úbytků malt a betonu na jednom a tomtéž zkušebním tělese po celou dobu jejich zrání (včetně velmi rané fáze tuhnutí a tvrdnutí). Paralelní záznam vývoje smrštění, hmotnostních úbytků a vnitřních teplot pomáhá interpretaci počátečních jevů, souvisejících zejména s hydratačními procesy a transportem vody ve struktuře materiálů v rané fázi zrání, což lze klasifikovat jako hlavní vědecký přínos této práce.

Abstract

The thesis deals with the experimental determination of shrinkage development of mortars and concrete under laboratory conditions. The main studied aspect is the influence of the test methods and test equipment on the resulting shape of the curve and absolute value of the shrinkage. The innovative method for determination of the overall development of shrinkage and mass losses of mortars and concrete is described in detail in this thesis. This method enables measurement of the shrinkage process during the time interval from placement of the fresh-state materials into the measuring mould up to the long-term maturation after removal the hardened material from the moulds. The results of the performed experimental analysis presented herein show the main advantages of the measurement method. The results show that the testing techniques are suitable for a wide range of application, especially if the measurement has to start as soon as possible after placing the fresh state material into the moulds, e.g. in the case of concrete with a low water-cement (w/c) ratio or concrete containing porous aggregate. The testing procedure also enables the monitoring of initial longitudinal expansion of mortars and concrete with a high w/c . The greatest practical contribution of the measurement method presented herein is the potential for the determination of the shrinkage and mass losses process of mortars and concrete on the same test specimen during their entire maturation period (including the very early stage of setting and hardening). The possibility of parallel recording of shrinkage, mass losses and internal temperature, which is beneficial for the interpretation of the initial phenomena related mainly to the early hydration processes and water transport in the internal structure of the material, can be classified as the main scientific contribution of this thesis.

Klíčová slova

Smrštění, nábývání, raná fáze zrání, cement, malta, beton, měřicí žlaby, experimentální analýza, numerická analýza.

Key words

Shrinkage, swelling, expansion, early age, cement, mortar, concrete, test moulds, experimental analysis, numerical analysis.

Bibliografická citace

Kucharczyková, B. *Experimentální analýza objemových změn materiálů s cementovým pojivem*. Habilitační práce, Brno, 2019, 114 s., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem kolegům z Ústavu stavebního zkušebnictví, Ústavu stavební mechaniky, Ústavu chemie a Ústavu fyziky, kteří se podíleli na přípravě, realizaci a vyhodnocení provedených experimentů.

Jmenovitě děkuji Ing. Petru Daňkovi, Ph.D., Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D., Ing. Petru Misákovi, Ph.D., Ing. Haně Šimonové, Ph.D., doc. Ing. Petru Frantíkovi, Ph.D., prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové, CSc. a doc. Mgr. Liboru Topolářovi, Ph.D.

V neposlední řadě děkuji vedení Ústavu stavebního zkušebnictví za vytvoření vhodných podmínek pro studium vybrané problematiky.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že předložená práce s názvem *Experimentální analýza objemových změn materiálů s cementovým pojivem* je mým původním dílem. Veškerá literatura a zdroje, z nichž jsem při vypracování práce čerpala, jsou řádně citovány.

Prohlašuji, že jsem hlavním autorem návrhu experimentů prezentovaných v této práci a hlavním tvůrcem textů souvisejících publikací, vykázaných v rámci řešení vlastních výzkumných projektů.

Výsledky a závěry vlastní vědecko-výzkumné činnosti uvedené v této práci byly publikovány v českých a zahraničních časopisech, či sbornících českých a zahraničních konferencí. Texty a obrázky převzaté z jednotlivých publikací jsou řádně citovány.

V Brně dne 11. 11. 2019

Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.

Obsah

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Úvod..... | 11 |
| 2 | Potřebnost řešení problematiky smršťování malt a betonů | 14 |
| 3 | Druhy smrštění | 15 |
| 3.1 | Chemické smrštění | 15 |
| 3.2 | Autogenní smrštění..... | 15 |
| 3.3 | Plastické sedání a plastické smrštění | 16 |
| 3.4 | Nabývání | 17 |
| 3.5 | Smrštění vlivem teplotních změn | 18 |
| 3.6 | Smrštění vysycháním | 19 |
| 3.7 | Karbonatační smrštění..... | 19 |
| 4 | Normy a předpisy pro stanovení vývoje smrštění..... | 20 |
| 4.1 | Soubor českých a evropských norem..... | 20 |
| 4.2 | Soubor amerických norem..... | 21 |
| 5 | Zkušební metody a přístrojové vybavení..... | 23 |
| 5.1 | Stanovení vývoje chemického smrštění cementu..... | 23 |
| 5.2 | Stanovení vývoje autogenního smrštění cementu | 24 |
| 5.3 | Stanovení vývoje smrštění malt a betonu v rané fázi zrání | 24 |
| 5.4 | Stanovení dlouhodobého vývoje smrštění malt a betonu | 28 |
| 6 | Experimentální stanovení vývoje smrštění | 30 |
| 6.1 | Výběr separační fólie | 31 |
| 6.2 | Měření hmotnostních úbytků | 31 |
| 6.3 | Měření teplot a relativní vlhkosti vzduchu | 32 |
| 6.4 | Ostatní související doprovodná měření..... | 33 |
| 7 | Inovativní způsob stanovení celkového vývoje smršťování | 35 |
| 7.1 | Přídavné vybavení ke smršťovacím žlabům pro dlouhodobá měření..... | 35 |
| 7.2 | Váhový stůl pro měření hmotnostních úbytků v rané fázi zrání | 38 |
| 7.3 | Měřicí žlaby se zmenšeným rozměrem..... | 39 |
| 7.4 | Stanovení dob tuhnutí na základě vývoje teplot a rychlosti šíření ultrazvuku..... | 41 |
| 7.5 | Využití metody akustické emise v rané fázi zrání..... | 42 |
| 7.6 | Výběr separační fólie | 42 |
| 7.7 | Experimentální analýza vs. numerická predikce | 42 |
| 8 | Výsledky vlastní experimentální analýzy | 44 |
| 8.1 | Měření smrštění betonů s různým stupněm nasycení pórovitého kameniva | 44 |
| 8.2 | Měření smrštění obyčejných betonů s různým obsahem cementu a plastifikátoru | 48 |
| 8.3 | Měření smrštění na betonech typu SCC | 58 |
| 8.4 | Měření smrštění na betonech typu SCC HPC s nízkým w/c | 62 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 8.5 | Ověření vlivu typu separační fólie na vývoj smrštění v rané fázi zrání..... | 78 |
| 8.6 | Experimentální vs. numerická analýza | 84 |
| 9 | Shrnutí dosavadních závěrů | 105 |
| 10 | Další postup řešení..... | 107 |
| 11 | Seznam použité literatury | 108 |

Seznam obrázků

| | | |
|----------------|---|----|
| Obr. 1 | Reakce způsobující autogenní a chemické smrštění: C – nehydratovaný cement, W – nehydratovaná voda, H_y – hydratační produkty, V – póry vznikající vlivem hydratace [4]. | 16 |
| Obr. 2 | Trhliny vzniklé vlivem plastického smrštění kopírující polohu výztuže desky [15]. | 17 |
| Obr. 3 | Různé fáze horizontálního smrštění stanoveného metodou „slab test“ v rané fázi zrání, včetně jejich řídicích faktorů [4]. | 17 |
| Obr. 4 | Vývoj koeficientu teplotní roztažnosti pro betony v rané fázi zrání [4]. | 19 |
| Obr. 5 | Metody měření chemického smrštění [28]. | 23 |
| Obr. 6 | Strunový tenzometr se základnou 200 mm. | 25 |
| Obr. 7 | Strunové tenzometry výrobce a dodavatele GEOKON [32] (vlevo), tenzometr připravený k zabetonování (vlastní experiment). | 25 |
| Obr. 8 | Odporové tenzometry pro zabetonování: běžný typ s délkou základny 120 mm (vlevo), speciální typ s velmi nízkou tuhostí pro měření autogenního smrštění se základnou 70 mm (vlastní experiment). | 26 |
| Obr. 9 | Konfigurace testu podle ASTM C827 / C827M – 16 [19], převzato z [34]. | 26 |
| Obr. 10 | Konfigurace testu podle ASTM 1698 [18], převzato z [34]. | 27 |
| Obr. 11 | Měřicí žlab [35]. | 28 |
| Obr. 12 | Dilatometry pro stanovení smrštění vysycháním [36]. | 28 |
| Obr. 13 | Měření smrštění na podélných stranách zkušebních těles (vlastní experiment). | 29 |
| Obr. 14 | Schéma měřicího žlabu a přídavného zařízení [47, 48]: měřicí žlab (a); součásti pomocného rámu (b); měřicí terč určený k zabetonování (c); měřicí terč určený k nalepení (d). | 36 |
| Obr. 15 | Schéma váhového stolu [49]. | 39 |
| Obr. 16 | Měřicí žlab s vnitřními rozměry 50 × 50 × 300 mm; speciální šroubovací kontakty pro účely dlouhodobého měření (vpravo). | 40 |
| Obr. 17 | Ilustrativní foto jedné zkušební sady během měření. | 46 |
| Obr. 18 | Průběh smrštění/nabývání betonu LC1 [60]. | 47 |
| Obr. 19 | Průběh smrštění/nabývání betonu LC2 [60]. | 47 |
| Obr. 20 | Průběh smrštění/nabývání betonu LC3 [60]. | 47 |
| Obr. 21 | Porovnání průběhu smrštění/nabývání betonu LC1, LC2 a LC3 [60]. | 48 |
| Obr. 22 | Ilustrativní foto jedné zkušební sady během měření: váhový stůl (vlevo); žlab osazené na váhovém stole (uprostřed) – 1 – měřicí žlab s indukčním snímačem, 2 – váhový stůl, 3 – zabetonované měřicí terče; měřicí terč pro zabetonování do povrchu zkušebního tělesa (vpravo) [61]. | 51 |
| Obr. 23 | Ilustrativní foto měření dlouhodobého smrštění mechanickým tenzometrem (Hollan) [61]. | 51 |
| Obr. 24 | Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/1, 0/2, a 0/3 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61]. | 53 |
| Obr. 25 | Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/1 a 1/1 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61]. | 54 |
| Obr. 26 | Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/2 a 1/2 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61]. | 55 |
| Obr. 27 | Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/1 a 1/1 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61]. | 56 |

| | | |
|----------------|--|----|
| Obr. 28 | Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 1/1, 1/2 a 1/3 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61]. | 57 |
| Obr. 29 | Závislost smrštění a hmotnostních úbytků zjištěných po celou dobu zrání jednotlivých betonů [61]. | 58 |
| Obr. 30 | Měření smrštění v rané fázi zrání – měřicí žlaby 100 × 60 × 1000 mm (vlevo), měřicí žlaby 50 × 50 × 300 mm (vpravo) [51]. | 59 |
| Obr. 31 | Dlouhodobé měření po odformování – Hollanův příložený tenzometr pro tělesa 100 × 60 × 1000 mm (vlevo), stojatý dilatometr pro tělesa 50 × 50 × 300 mm (vpravo) [51]. | 60 |
| Obr. 32 | Vývoj smrštění stanovený pro beton C1: detail měření během prvních 48 hodin (vlevo), celkový průběh smrštění od počátku do stáří 200 dní (vpravo) [51]. | 60 |
| Obr. 33 | Vývoj smrštění stanovený pro beton C2: detail měření během prvních 48 hodin (vlevo), celkový průběh smrštění od počátku do stáří 200 dní (vpravo) [51]. | 61 |
| Obr. 34 | Vývoj smrštění stanovený pro beton C3: detail měření během prvních 48 hodin (vlevo), celkový průběh smrštění od počátku do stáří 200 dní (vpravo) [51]. | 61 |
| Obr. 35 | Vývoj vnitřních teplot měřených v betonu uloženém ve žlabech 100×60×1000 mm s smrštěním. | 62 |
| Obr. 36 | Měřicí žlaby 100 × 60 × 1000 mm před betonáží: pozice strunových tenzometrů a měřicích terčů určených pro měření mechanickým tenzometrem [50]. | 66 |
| Obr. 37 | Celkový pohled před betonáží (vlevo); váhový stůl pro ShM_100 [50]. | 67 |
| Obr. 38 | Celkový pohled před zahájením měření [50]. | 68 |
| Obr. 39 | Ilustrativní foto dlouhodobého měření smrštění: Celkový pohled (vlevo); M-SG (Hollan) pro tělesa ShM_100 (uprostřed); dilatometr pro tělesa ShM_50 [50]. | 68 |
| Obr. 40 | Vývoj smrštění v rané fázi zrání zaznamenaný indukčností snímačem měřicích žlabů (IS_ShM) a zabudovaným strunovým tenzometrem (W-SG_ShM) pro zkušební tělesa ošetřovaná na vzduchu (černé čáry) a v autogenních podmínkách (šedé čáry). Naměřený vývoj vnitřních teplot (T_{in}) zkušebních těles (barevné čáry) [50]. | 70 |
| Obr. 41 | Celkový vývojsmrštění (ϵ) zaznamenaný během celé doby měření pro zkušební tělesa ošetřovaná na vzduchu a v autogenních podmínkách [50]. | 71 |
| Obr. 42 | Vývoj smrštění v rané fázi zrání zaznamenaný indukčností snímačem měřicích žlabů (IS_ShM) různých rozměrů a vývoj vnitřní teploty (T_{in}) zkušebních těles ošetřovaných na vzduchu [50]. | 72 |
| Obr. 43 | Celkový vývojsmrštění (ϵ) zaznamenaný během celé doby měření pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu [50]. | 73 |
| Obr. 44 | Celkový vývojhmotnostních úbytků (Δm) určených pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu [50]. | 74 |
| Obr. 45 | Vztah mez vývojem smrštění (ϵ) a hmotnostních úbytků (Δm) určený pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu [50]. | 74 |
| Obr. 46 | Vývoj smrštění pro zkušební tělesa 100 × 60 × 1000 mm: měření vynulováno v různých časech t_0 [50]. | 75 |
| Obr. 47 | Vliv velikosti těles: měření vynulováno v různých časech t_0 [50]. | 76 |
| Obr. 48 | Vliv velikosti těles: Relativní hodnoty smrštění v různých t_0 [50]. | 77 |
| Obr. 49 | Celkový pohled na smršťovací žlaby před betonáží (a) – zleva neopren, polyetylen, teflon; po naplnění (b); detail umístění tenzometrů ve žlabech před jejich naplněním betonem (c) [65]. | 80 |
| Obr. 50 | Vývoj smrštění a teplot zaznamenaný ve žlabech opatřených neoprenovou fólií [65]. | 82 |
| Obr. 51 | Vývoj smrštění a teplot zaznamenaný ve žlabech opatřených polyetylenovou fólií [65]. | 82 |
| Obr. 52 | Vývoj smrštění a teplot zaznamenaný ve žlabech opatřených teflonovou fólií [65]. | 83 |
| Obr. 53 | Srovnání výsledků měření indukčností snímači a strunovými tenzometry umístěnými ve žlabech opatřených různou separační fólií: celý záznam od spuštění měření [65]. | 83 |
| Obr. 54 | Srovnání výsledků měření indukčností snímači a strunovými tenzometry umístěnými ve žlabech opatřených různou separační fólií: záznam měření vynulovaný 3 hodiny po spuštění měření [65]. | 84 |
| Obr. 55 | Zkušební tělesa 40 × 40 × 160 mm (vlevo); uspořádání změřených UZ přístrojem [66]. | 88 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Obr. 56 | Uspořádání měření smrštění a hmotnostních úbytků: 1 – měřicí žlaby; 2 – váhový stůl; 3 – terče pro dlouhodobá měření; 4 – zkušební těleso ve žlabu; 5 – váhový člen 1-PW6CMR/3kg-1 [66]. | 89 |
| Obr. 57 | Měření UZ přístrojem: materiál A [66]. | 90 |
| Obr. 58 | Měření UZ přístrojem: materiál B [66]. | 90 |
| Obr. 59 | Měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál A [66]. | 91 |
| Obr. 60 | Měření smrštění a vnitřní teploty: materiál A [66]. | 92 |
| Obr. 61 | Měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál B [66]. | 92 |
| Obr. 62 | Měření smrštění a vnitřní teploty: materiál B [66]. | 93 |
| Obr. 63 | Dlouhodobé měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál A [66]. | 93 |
| Obr. 64 | Dlouhodobé měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál B [66]. | 94 |
| Obr. 65 | Dlouhodobé měření: závislost smrštění a hmotnostních úbytků ($\epsilon_{\Delta m}$) pro materiál A a B [66]. | 94 |
| Obr. 66 | Experimentální vs. numerická analýza: materiál A – vývoj smrštění v rané fázi zrání (nahore) a dlouhodobý vývoj smrštění [66]. | 98 |
| Obr. 67 | Stanovení času t_0 : první a druhé derivace funkce teploty, rychlosti šíření UZ impulsu a délkových změn pro materiál A [66]. | 99 |
| Obr. 68 | Experimentální vs. numerická analýza: různé t_0 – materiál A [66]. | 100 |
| Obr. 69 | Experimentální vs. numerická analýza: materiál B – vývoj smrštění v rané fázi zrání (nahore) a dlouhodobý vývoj smrštění [66]. | 101 |
| Obr. 70 | Stanovení času t_0 : první a druhé derivace funkce teploty, UZ rychlosti šíření impulsu a délkových změn pro materiál B [66]. | 102 |
| Obr. 71 | Experimentální vs. numerická analýza: různé t_0 – materiál B [66]. | 103 |

Seznam tabulek

| | | |
|----------------|--|----|
| Tab. 1 | Koeficient teplotní roztlačnosti pro ztvrdlý beton [4]. | 18 |
| Tab. 2 | Složení lehkých betonů [60]. | 45 |
| Tab. 3 | Specifikace stupně před-nasycení a dávka předmáčecí vody [60]. | 45 |
| Tab. 4 | Základní specifikace vyrobených betonů [61]. | 49 |
| Tab. 5 | Složení obyčejných betonů [61]. | 49 |
| Tab. 6 | Základní vlastnosti čerstvých betonů [61]. | 50 |
| Tab. 7 | Hodnoty smrštění pro všechny tři sledované betony ve stáří 48 hodin a 200 dní: jednotlivá měření, střední hodnoty a výběrové směrodatné odchylky (s.s.d.) pro obě velikosti zkušebních těles [51]. | 62 |
| Tab. 8 | Složení čerstvého HPC betonu: Relativní hmotnostní množství [50]. | 65 |
| Tab. 9 | Hodnoty smrštění pro SCC HPC: Aritmetický průměr (AV), výběrová směrodatná odchylka (SSD) a variační koeficient (CoV) [50]. | 69 |
| Tab. 10 | Hodnoty smrštění pro SCC HPC: Relativní hodnoty aritmetických průměrů hodnot smrštění určených různými měřicími technikami [50]. | 72 |
| Tab. 11 | Hodnoty smrštění pro SCC HPC: Relativní hodnoty aritmetických průměrů hodnot smrštění určených pro tělesa různých velikostí [50]. | 73 |
| Tab. 12 | Základní vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu [65]. | 79 |
| Tab. 13 | Barevné rozlišení měřených veličin v Obr. 2 až 4 [65]. | 81 |
| Tab. 14 | Fyzikální a mechanické vlastnosti zkoumaných materiálů: aritmetický průměr, (výběrová směrodatná odchylka) [66]. | 87 |
| Tab. 15 | Koeficienty pro výpočet ϵ_{au} dle B4 dle [9]. | 96 |
| Tab. 16 | Koeficienty pro výpočet ϵ_{st} dle B4 dle [9]. | 97 |

Motivace

Hlavní motivací pro studium problematiky smršťování je neustálý vývoj nových malt a betonů, což vede i k vývoji měřicích technik a přístrojového vybavení pro měření smršťování jak v laboratoři, tak i přímo v konstrukci. Komplexnost problematiky vyžaduje mezioborovou spolupráci, která vede k jejímu efektivnímu řešení. V současné době existuje celá škála přístrojového vybavení a měřicích postupů, které lze použít pro zahájení měření smrštění v různých fázích zrání materiálů. Vzhledem k odlišnostem jednotlivých měřicích postupů a vlastní měřicí techniky jsou výsledky měření provedených v různých laboratořích a zejména v různých zemích často nesrovnatelné. Především nové zkušební metody určené pro stanovení vývoje smršťování v rané fázi tuhnutí a tvrdnutí materiálu vykazují často zcela odlišné výsledky. Jedním z hlavních důvodů je okamžik zahájení měření a určení tzv. času t_0 , což je doba zahájení vyhodnocení naměřených dat. Výše uvedená fakta mě motivovala k podrobnějšímu zkoumání jednotlivých aspektů ovlivňujících výsledný tvar křivky a absolutní hodnotu smrštění cementových materiálů, přičemž hlavní důraz je kladen na oblast vlivu zkušebních metod a přístrojového vybavení používaných pro stanovení vývoje smršťování v laboratorních podmínkách.

1 Úvod

Experimentální stanovení vývoje smršťování betonu je aktuálním problémem jak pro stavební inženýry, tak pro samotné výrobce malt a betonů. Vzhledem k náročnosti samotného provedení měření a jeho vyhodnocení nespadá tato zkouška mezi rutinní zkoušky používané pro běžnou kontrolu kvality betonu. Požadavek na provedení tohoto měření se tak objevuje zejména v případech výstavby společensky významných konstrukcí, jakými jsou mosty, nádrže či výškové budovy. V některých případech je vyžadováno ověření vývoje smršťování u bílých van či u podlahových stěrek. Nejčastěji se však měření průběhu smršťování objevuje na samotném počátku vývoje nového typu betonu či malty. Tato měření jsou zpravidla prováděna jako interní měření ve vlastních či přidružených laboratořích výrobců cementu, malt a betonů.

Proces smrštění pojiv, malt a betonů lze definovat jako objemovou změnu projevující se změnou absolutního objemu pevné fáze a zdánlivého objemu prvku [1]. Obecně lze tyto objemové změny rozdělit do sedmi kategorií – chemické smrštění, autogenní smrštění, plastické smrštění, smrštění vlivem změny teploty, smrštění vysycháním, karbonatační smrštění a nabývání. Významnost jednotlivých typů objemových změn je silně závislá na složení jednotlivých materiálů, způsobu ošetřování a velikosti finálního prvku [2, 3]. Obecně lze říci, že určité typy/druhy smrštění nelze eliminovat a jsou přítomny vždy, pokud je zahájena hydratace pojivové složky. Jedním z těchto druhů smrštění je chemické smrštění, které je důsledkem hydratačních reakcí. V okamžiku, kdy je cement smíchán s vodou, dochází ke spuštění hydratačních reakcí, přičemž platí, že objem hydratačních produktů je menší než původní objem vstupních surovin [4, 5]. Dalším druhem smrštění, kterému za určitých okolností nelze zabránit, je tzv. autogenní smrštění, jehož hnací silou je chemické smrštění [1, 4]. Tento druh smrštění se objevuje zejména u cementových materiálů, jejichž vodní součinitel je menší než 0,40. Do této skupiny také částečně spadá smrštění a nabývání způsobené vývojem hydratačního tepla. Ostatní druhy smrštění lze částečně či zcela eliminovat vhodným návrhem složení (protismršťovací přísady a příměsi) či vhodným ošetřováním po uložení a během zrání zabudovaného materiálu v konstrukci. Nabývání se obecně nepovažuje za rizikové pro další formování struktury malt a betonů. Pokud je tomuto počátečnímu zvětšování objemu vhodně bráněno, např. výztuží, vzniká v betonu tlaková rezerva, která se vyčerpá ve fázi následného smršťování [4, 6]. Podrobněji jsou jednotlivé druhy smrštění popsány v kapitole 3.

Zkušenosti získané měřeními smrštění prováděnými různými výzkumnými skupinami v posledních 10 letech ukazují, že je nezbytné stanovit vývoj smrštění ve dvou na sebe

navazujících stádiích zrání cementových materiálů – v rané fázi tuhnutí a tvrdnutí (přibližně do stáří 48 hodin po smíchání cementu s vodou) a během dlouhodobého zrání, tzn. ve stáří vyšším než 48 hodin, s měřením do ustálení deformací a hmotnostních úbytků [4]. V posledních letech se výrazně zvýšil zájem o stanovení objemových změn betonu v raném stáří. Důvodem byl poměrně rychlý vývoj vysokohodnotných betonů (HPC), vyznačujících se zejména velmi nízkým vodním součinitelem, vysokým obsahem cementu, jemných příměsí a jemnozrnnou strukturou s maximálním zrnem kameniva 8 mm. Typický je i vysoký poměr pojivové složky vzhledem k množství kameniva. Současné ultra vysokohodnotné betony (UHPC) často obsahují plnivo s maximálním zrnem do 2 mm. U betonů vyrobených na bázi reaktivních prášků (RPC) je maximální zrnem kameniva do 0,6 mm. Výše uvedené faktory významně ovlivňují proces smrštění, kdy se z pohledu vývoje smršťování jeví jako nejvíce riziková právě raná fáze procesu tuhnutí a tvrdnutí výše uvedených materiálů. Existuje zde vysoké riziko vzniku smršťovacích trhlin vlivem plastického či autogenního smrštění. Velmi podstatná je také volba vhodného ošetřování povrchu po uložení betonu do konstrukce a jeho včasná aplikace. Pro snížení negativních účinků rané fáze zrání se v prefabrikaci často objevuje hutnění pod tlakem a vytvrzování za zvýšené teploty (např. RPC) [7].

Vzhledem k odlišnému chování obyčejného a vysokohodnotného betonu zejména v rané fázi zrání nejsou běžné postupy používané pro měření vývoje smrštění u obyčejného betonu zcela vhodné pro stanovení vývoje smrštění u betonů typu HPC. V současné době existuje celá řada zkušebních metod a přístrojového vybavení, které lze použít pro měření vývoje smršťování v různých fázích zrání malt a betonů (viz kapitola 5). Vzhledem ke složení betonů typu HPC jsou tyto betony vystaveny zvýšenému riziku existence autogenního smrštění. V těchto případech je nutné zahájit měření smrštění co nejdříve po uložení betonu do formy. Pro efektivní stanovení vývoje autogenního smrštění v laboratorních podmínkách se v současné době používají dvě zkušební metody. Jednou z nich je metoda vlnovce (corrugated tube method, viz kapitola 5.3), která je zakotvena v souboru norem ASTM International. Její použitelnost je omezena maximálním zrnem kameniva 4,75 mm. Druhá metoda je založena na měření poměrných přetvoření pomocí vhodného typu tenzometrického snímače zabetonovaného dovnitř zkušebního tělesa (viz kapitola 5.3). V tomto případě je nutné zvolit snímač s velmi nízkou tuhostí, aby mohl reagovat i na velmi malá počáteční napětí vyvolaná kapilárním sáním v pórové struktuře betonu. Vzhledem k široké nabídce různých typů tenzometrů se tato metoda jeví jako vhodná pro betony vyrobené ze všech běžně používaných frakcí kameniva. V posledních letech se také objevují různé typy smršťovacích forem s jedním

či dvěma pohyblivými čely, které se také jeví jako velmi vhodné pro rané měření smršťování (viz kapitola 5.3).

2 Potřebnost řešení problematiky smršťování malt a betonů

Je obecně známo, že celkový tvar smršťovací křivky a ve výsledku i absolutní hodnota smrštění jsou ovlivněny použitou měřicí metodou. Jedním z důvodů je odlišné přístrojové vybavení, které se liší jak samotnou konstrukcí snímače, tak i principem měření, což vede k odlišnému počátku zahájení měření. Druhým důvodem je volba různého „nulování“ naměřených dat pro účely jejich vyhodnocení. Nejčastěji jsou naměřené záznamy „vynulovány“ v době zahájení měření, dále pak v době tuhnutí stanovené pro daný typ betonu, v době dosažení maxima hlavního teplotního vrcholu nebo také v době odformování zkušebních těles.

V současné době existuje několik běžně používaných modelů určených pro predikci vývoje a odhad hodnoty smrštění. Tyto modely jsou zpravidla navrženy pro predikci smršťování a dotvarování betonu. Jako nejvíce komplexní se v tomto směru jeví model, vyvinutý výzkumnou skupinou profesora Z. P. Bažanta [8]. V roce 2015 byla skupinou RILEM TC-242 MDC vydána směrnice [9], odrážející nejnovější pokrok v teorii a experimentálním výzkumu v oblasti smršťování a dotvarování cementových kompozitů, zejména betonů. Tato směrnice uvádí nejnovější verzi pokročilého modelu pro predikci smršťování a dotvarování betonu, model B4. Model B4 v současné době umožňuje vylepšenou predikci o více dekadách, rozlišuje smrštění vysycháním a autogenní smršťování, implementovány jsou nové funkce a parametry pro zachycení účinků různých typů přísad, přísad a použitého kameniva. V současné podobě není model B4 uzpůsoben pro predikci velmi raného smršťování (v řádech hodin), které je zpravidla vyvolané exotermickými chemickými reakcemi či chemickými a fyzikálními procesy doprovázejícími přeměnu betonu z čerstvého do tuhajícího stavu [9].

V tomto aspektu se jeví jako vhodné porovnat výsledky experimentálního stanovení smrštění zahájeného co nejdříve po smíchání cementu s vodou s predikovaným vývojem smršťování a posoudit případnou závažnost vzniklé odchylky.

3 Druhy smrštění

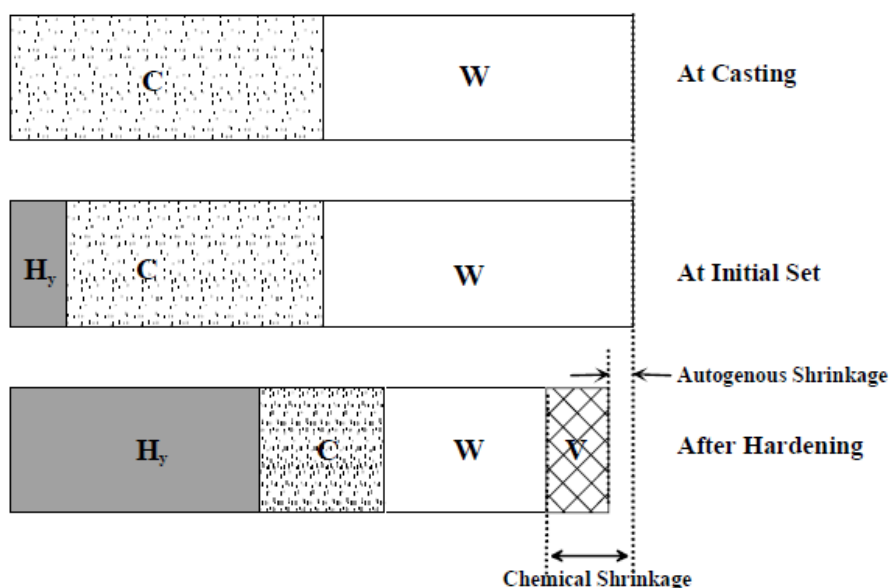
3.1 Chemické smrštění

Chemické smrštění je základní složkou objemových změn cementových materiálů. Je výsledkem hydratačních reakcí, kdy platí, že absolutní objem reaktantů je větší než absolutní objem hydratačních produktů. Projevuje se změnou absolutního objemu pevné fáze, což se odráží na změně pórové struktury materiálů, samo o sobě se však neprojevuje na změně zdánlivého objemu prvku (změna vnějších rozměrů). Velikost a vývoj chemického smrštění je závislý především na chemickém a mineralogickém složení cementu a také na velikosti jeho částic [10], [11]. Vývoj chemického smrštění je také ovlivněn přítomností různých typů přísad a příměsí v betonu [12]. Vzhledem k povaze chemického smrštění lze jeho vývoj předpovídat na základě křivky vývinu hydratačního tepla, přičemž nejstrmější nárůst obecně nastává v době hlavního hydratačního vrcholu, kdy dochází k uvolnění největšího množství hydratačního tepla [13].

3.2 Autogenní smrštění

Autogenní smrštění je definováno jako makroskopická změna zdánlivého objemu betonu zrajícího v prostředí bez možnosti výměny vlhkosti mezi betonem a okolním prostředím – v tzv. autogenních podmínkách. Hnací silou autogenního smrštění je chemické smrštění. V počáteční fázi hydratace je vývoj i hodnota autogenního smrštění stejná jako u chemického smrštění. K odklonu obou křivek zpravidla dochází v okamžiku tvorby pevné kostry materiálu. Velikost autogenního smrštění a dosažení jeho ustálené hodnoty je přímo závislé nejen na stupni hydratace cementu, ale také na velikosti, množství a rozložení pórů ve struktuře materiálu, typu, množství a velikosti kameniva či velikosti zkušební vzorku. Autogenní smrštění probíhá tak dlouho, dokud je v systému přítomný nehydratovaný cement a voda či existuje vysoký parciální tlak v kapilárách, vyvolaný přitahováním vody nehydratovanými zrny cementu [1]. Základní rozdíl mezi chemickým a autogenním smrštěním je vidět na Obr. 1 [4]. O tom, zda nastane či nenastane autogenní smrštění, rozhoduje zejména velikost vodního součinitele (w/c), poměr kameniva a cementu (a/c), poměr celkového objemu pojiva ke kamenivu (b/a), či hutnost cementového kamene [1]. Je obecně známo, že autogenní smrštění nelze eliminovat úpravou procesu ukládání či ošetřování betonu, ale je nutné tento problém řešit během návrhu vlastního složení betonu. Jako hraniční hodnota vodního součinitele pro výskyt autogenního smrštění je uvažována hodnota 0,40 [14]. Autogenní smrštění je zdrojem rizika vzniku trhlin v rané fázi

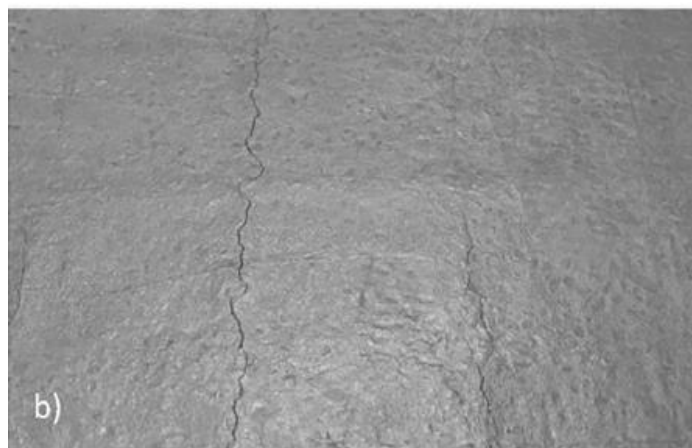
zrání betonu. V některých případech, zejména u betonů s velmi nízkým w/c , může hodnota autogenního smrštění dosahovat či dokonce převýšit hodnotu smrštění vysycháním [4].



Obr. 1 Reakce způsobující autogenní a chemické smrštění: C – nehydratovaný cement, W – nehydratovaná voda, H_y – hydratační produkty, V – póry vznikající vlivem hydratace [4].

3.3 Plastické sedání a plastické smrštění

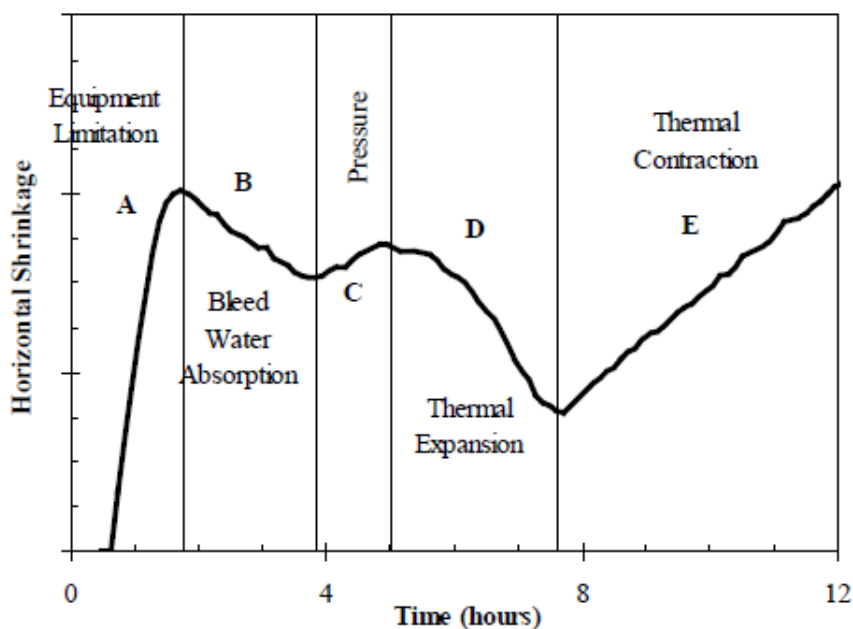
Plastické sedání a plastické smrštění nastává u malt a betonů v plastické fázi zrání (před dosažením dob tuhnutí). Oba výše uvedené typy smrštění jsou zdrojem rizika vzniku trhlin v rané fázi zrání malt a betonu, obzvláště pokud je tomuto smrštění v betonu bráněno. Zatímco plastické sedání je „svislá“ deformace, způsobená gravitačním sedáním tuhých částic v čerstvém betonu, plastické smrštění je trojrozměrná redukce objemu, způsobená kapilárním sáním v pórové struktuře betonu – vlivem odpařování vody z pórů dochází v pórovém systému ke vzniku záporného kapilárního tlaku. Pokud je plastickému smrštění v betonu bráněno, např. přítomností betonářské výztuže, může tento fakt vést ke vzniku trhlin (viz Obr. 2) [15].



Obr. 2 Trhliny vzniklé vlivem plastického smrštění kopírující polohu výztuže desky [15].

3.4 Nabývání

Nabývání v počáteční fázi zrání cementových materiálů není zcela objasněno a je spojováno s několika faktory, přičemž většinou je výsledkem kombinace níže uvedených vlivů. Jedním z faktorů je tvorba expanzivních hydratačních produktů. Dle Puliniho modelu vykazuje dicalcium silikát (C_2S) během prvního dne hydratace nabývání, zatímco ostatní složky smršťují [4]. Důvodem jsou pravděpodobně povrchové reakce C_2S a jeho polymorfní chování. Toto nabývání je také připisováno přítomnosti retardérů, které zpomalují dobu tuhnutí [4].



Obr. 3 Různé fáze horizontálního smrštění stanoveného metodou „slab test“ v rané fázi zrání, včetně jejich řídicích faktorů [4].

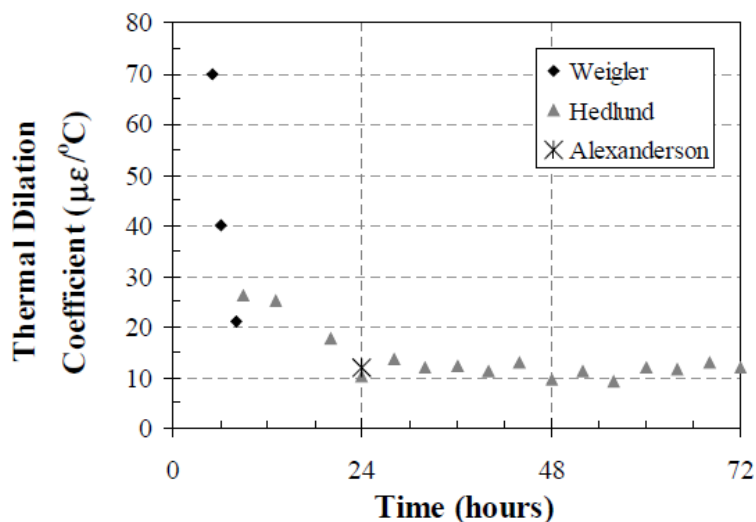
Významnějším faktorem nástupu nabývání je vstřebávání ošetřovací vody, pokud beton zraje pod vodou. Výskyt nabývání v počáteční fázi zrání betonu je také připisován krvácení betonu, kdy voda, která vystoupí na povrch betonu po jeho uložení do formy, je během dalšího postupu hydratace vtahována zpět do pórového systému [4], [16]. Další příčinou jsou teplotní jevy doprovázející hydrataci cementu [4]. Na Obr. 3 jsou zobrazeny výsledky měření E. Holt [4] použitím metody „slab test“. Nabývání se obecně nepovažuje za rizikové pro další formování struktury malt a betonů. Pokud je tomuto počátečnímu zvětšování objemu vhodně bráněno, např. výztuží, vzniká v betonu tlaková rezerva, která se vyčerpá ve fázi následného smršťování [4, 6].

3.5 Smrštění vlivem teplotních změn

Teplotní kontrakce či expanze se objevuje u cementových materiálů, které jsou během jejich zrání vystaveny teplotním změnám. U ztvrdlých malt a betonů dochází k teplotní roztažnosti/kontrakci vlivem změny teploty okolních podmínek. Koeficient teplotní roztažnosti je v tomto případě závislý zejména na složení konkrétního materiálu (w/c, a/c) a jeho hodnota se pohybuje mezi 10 až 12 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (viz Tab. 1). V rané fázi zrání dochází ke změnám teploty materiálu vlivem hydratace cementu, kdy k největšímu nárůstu teploty dochází během vzestupné fáze hlavního hydratačního vrcholu – v tomto období může být zaznamenána expanze. Po dosažení maxima dochází k postupnému snižování vnitřní teploty, což je doprovázeno kontrakcí. Velikost deformace vlivem teplotních změn lze vyjádřit pomocí koeficientu teplotní roztažnosti. V raném stádiu zrání dochází k poměrně rychlým změnám hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti, kdy se u materiálů v čerstvém stavu blíží hodnotě koeficientu teplotní roztažnosti vody a s postupující hydratací a tvorbou pevné kostry postupně klesá až na hodnotu kolem 10 – 12 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (viz Obr. 4) [4].

Tab. 1 Koeficient teplotní roztažnosti pro ztvrdlý beton [4].

| Aggregate-Cement Ratio | Coefficient of Thermal Expansion ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$) |
|------------------------|---|
| Cement Paste | 18.5 |
| 1 | 13.5 |
| 3 | 11.2 |
| 6 | 10.1 |



Obr. 4 Vývoj koeficientu teplotní roztažnosti pro betony v rané fázi zrání [4].

3.6 Smrštění vysycháním

U malt a betonů běžných složení se smrštění vysycháním považuje za nejvýznamnější složku celkového smrštění. Je spjata se ztrátou vody do okolního prostředí. Pokud se na povrchu betonu po jeho uložení do formy objeví vrstva vody vlivem krvácení betonu, je smrštění vysycháním oddáleno až do doby, kdy se povrchová voda odpaří do vnějšího prostředí. Pokud krvácení betonu překročí rychlost vysychání, působí tato přebytečná voda jako voda ošetřovací [4] a v tomto případě nedochází ke smršťování běžných typů betonu. Mechanismus vysychání je závislý na velikosti a rozložení pórů ve struktuře malt a betonů. Rychlost vysychání je pak závislá na relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí, v němž beton zraje, a na poměru objemu k vysychajícímu povrchu prvku, což ovlivňuje trend vývoje i absolutní hodnotu smrštění vysycháním.

3.7 Karbonatační smrštění

Karbonatační smrštění nastává v okamžiku, kdy cementový tmel v maltách a betonech reaguje s vlhkostí a oxidem uhličitým obsaženým ve vzduchu. Tato složka smrštění je vzhledem k celkové hodnotě smrštění zanedbatelná [4].

4 Normy a předpisy pro stanovení vývoje smrštění

Normy a předpisy pro stanovení vývoje smrštění je nutné rozdělit do dvou skupin. Jedna skupina pokrývá postupy pro stanovení vývoje smrštění/nabývání v období od vyjmutí zkušebních těles z forem do okamžiku ustálení deformací a hmotnostních úbytků. Jedná se o stanovení vývoje a hodnoty smrštění vlivem okolních podmínek, jejíž největší složkou je zpravidla smrštění vysycháním. Do druhé skupiny patří postupy pro stanovení smrštění v rané fázi zrání cementových materiálů, tj. stanovení vývoje a hodnoty smrštění v období od uložení materiálu do formy po stáří 24, 48 nebo 72 hodin (v závislosti na složení, typu materiálu a možnosti odformování zkušebních těles). Mezi nejvýznamnější složky smrštění v tomto období patří zejména plastické smrštění a autogenní smrštění, případně smrštění vysycháním, pokud je materiál od počátku vystaven účinkům okolního prostředí. V některých případech se v tomto období může vyskytnout i nabývání (expanze).

Dá se říci, že postupy pro stanovení vývoje smrštění vysycháním betonu v období po odformování zkušebních těles jsou v českých normách dlouhodobě zakotveny, přibližně od 70. let minulého století.

Postupy pro stanovení smršťování v rané fázi zrání cementových materiálů v ČR i v EU postrádají normativní základnu. Jediným existujícím předpisem, platným na národní úrovni, je rakouská norma OENORM B 3329:2009-06-01 z roku 2009 [17], která předepisuje postup stanovení smršťování/nabývání malt s využitím smršťovacích žlabů s jedním posuvným čelem.

V současné době jsou tak postupy pro stanovení raného smršťování zakotveny pouze v řadě norem ASTM. Jedná se o postup pro stanovení chemického smrštění cementu [14], stanovení autogenního smrštění cementových past, malt a betonů se zrnem kameniva do 4,75 mm [18] a stanovení změny výšky v raném stáří u válcového tělesa vyrobeného z cementových materiálů [19, 20]. Kromě jiného jsou v normách ASTM také zakotveny postupy pro stanovení vázaného smrštění/nabývání, např. [21, 22, 23].

V kapitolách 4.1a 4.2 je přehled základních norem a zkušebních těles určených pro stanovení objemových změn malt a betonů s cementovým pojivem.

4.1 Soubor českých a evropských norem

- ČSN 73 1320: Stanovení objemových změn betonu.

Zkušební těleso tvaru hranolu se jmenovitými rozměry $100 \times 100 \times 400$ mm, nebo $150 \times 150 \times 600$ mm.

- ČSN EN 12617-4: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Část 4: Stanovení smršťování a rozpínání.

Zkušební těleso tvaru hranolu se jmenovitými rozměry $40 \times 40 \times 160$ mm nebo $300 \times 300 \times 100$ mm.

- ČSN EN 13872: Metody zkoušení hydraulicky vytvrzovaných podlahových stěrkových hmot - Stanovení rozměrových změn.

Zkušební těleso tvaru hranolu se jmenovitými rozměry $40 \times 10 \times 160$ mm.

- ČSN EN 12808-4: Lepidla a spárovací malty pro keramické obkladové prvky - Část 4: Stanovení smrštění.

Zkušební těleso tvaru hranolu se jmenovitými rozměry $40 \times 10 \times 160$ mm.

- OENORM B 3329:2009-06-01 (2009). Grout - Requirements and test methods, Austria.

Zkušební těleso uložené v měřicím žlabu s jedním posuvným čelem o rozměrech $60 \times 38 \times 1000$ mm, nebo zkušební těleso tvaru hranolu s rozměry $40 \times 40 \times 160$ mm.

4.2 Soubor amerických norem

- ASTM C157 / C157M – 17: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.

Zkušební těleso tvaru hranolu se jmenovitými rozměry $25 \times 25 \times 250$ mm pro pasty a malty, $75 \times 75 \times 250$ mm pro beton s max. zrnem kameniva 25 mm, nebo $100 \times 100 \times 250$ mm pro beton s max. zrnem kameniva 50 mm.

- ASTM C596 – 18: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.

Zkušební těleso tvaru hranolu se jmenovitými rozměry $25 \times 25 \times 250$ mm.

- ASTM C1698 - 09(2014): Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar.

Zkušební těleso uložené ve formě tvořené flexibilní vlnitou trubkou (corrugated tube) s délkou 420 mm, vnějším průměrem 29 mm a tloušťkou stěny 0,2 mm vyrobené z nízko-hustotního polyetylénu (low-density PE).

- ASTM C827 / C827M – 16: Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures.

Zkušební těleso uložené ve formě s vnitřními rozměry - výška 100, 150 nebo 300 mm a průměr 50, 75 nebo 150 mm. Velikost formy se odvíjí od velikosti maximálního zrna kameniva s následujícími limity – 4,75 mm, 12,5 mm a větší než 12,5 mm.

- ASTM C1090/ C1090M – 15: Standard Test Method for Measuring Changes in Height of Cylindrical Specimens of Hydraulic-Cement Grout.

Zkušební těleso uložené ve formě s vnitřními rozměry - výška 150 mm a průměr 75 mm.

- ASTM C1608 – 17: Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste.

Zkušební těleso uložené ve skleněné vialce s výškou 55 mm a průměrem 22 mm. Výška pasty ve vialce je 5 až 10 mm při vodním součiniteli 0,40.

- ASTM C1579-13: Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert).

Zkušební těleso uložené v obdélníkové formě o půdorysných rozměrech 355 × 560 mm s hloubkou 100 mm pro beton s maximálním zrnem kameniva 19 mm. Do formy jsou před uložením čerstvého betonu vloženy tři koncentrátoři napětí trojúhelníkového průřezu.

- ASTM C1581/C1581M-18a: Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage.

Zkušební těleso ve tvaru mezikruží s tloušťkou 75 mm a výškou 150 mm.

- ASTM C878/C878M-14a: Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete.

Zkušební těleso tvaru hranolu s rozměry 76 × 76 × 250 mm s vloženou nerezovou tyčí procházející podélnou osou tělesa.

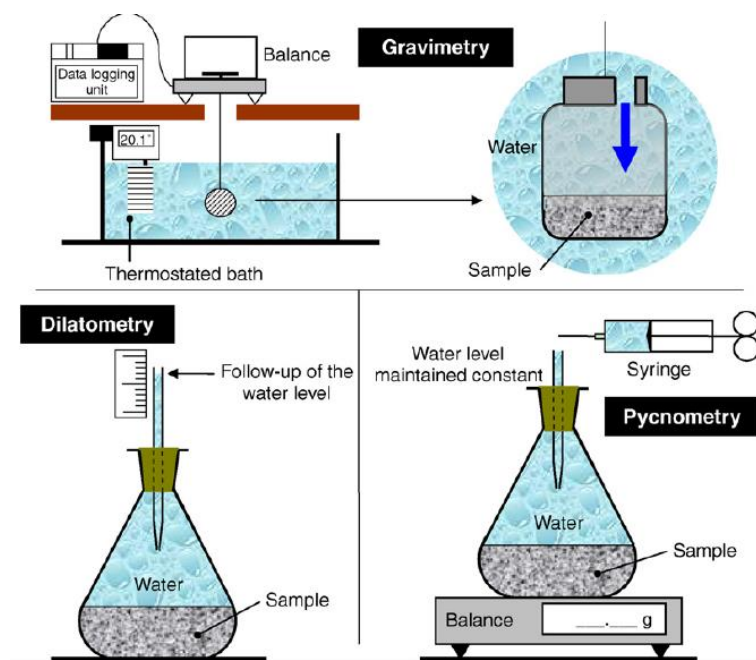
5 Zkušební metody a přístrojové vybavení

V této kapitole jsou uvedeny nejčastěji používané standardizované a nestandardizované metody měření a přístrojové vybavení pro experimentální stanovení vývoje volného smrštění cementových materiálů. Rozděleny jsou do skupin dle jejich primárního použití. Přehled širšího spektra přístrojového vybavení lze nalézt např. v [24, 25, 26, 27].

5.1 Stanovení vývoje chemického smrštění cementu

Pro stanovení vývoje chemického smrštění se používají tři základní zkušební metody, založené na měření Le Chatelierovy kontrakce – dilatometrická, pyknometrická a gravimetrická (viz Obr. 5) [28]. Dilatometrická a pyknometrická metoda zkoušení jsou zakotveny v normě ASTM 1608-17 [14]. Ve všech případech musí být vzorky po dobu měření uloženy v klimatizované lázni.

U dilatometrické a pyknometrické metody je předepsané množství cementové pasty vloženo do skleněné vialky nebo pyknometru. Zbytek objemu zvoleného typu nádoby je doplněn vodou, případně vrstvou vody na povrchu cementové pasty a zbytek objemu je doplněn olejem. V obou případech jsou nádoby uzavřeny gumovou zátkou s otvorem pro vložení kapiláry. Princip měření u dilatometrické metody spočívá v záznamu poklesu hladiny vody/oleje v kapiláře, přičemž chemické smrštění se vyjadřuje jako úbytek objemu vzorku v $[\text{ml}/\text{g}_{\text{cementu}}]$ nebo v $[\text{ml}/\text{ml}_{\text{cementu}}]$, při zohlednění měrné hmotnosti cementu.



Obr. 5 Metody měření chemického smrštění [28].

U pyknometrické metody se v kapiláře udržuje stálá hladina vody a zaznamenávají se změny hmotnosti měřicí sestavy (při poklesu hladiny vody/oleje v kapiláře se kapalina doplní po původní značku. Chemické smrštění se v tomto případě vyjadřuje v $[\text{g}/\text{ml}_{\text{cementu}}]$ [14].

U gravimetrické metody se pro stanovení změny objemu cementové pasty využívá Archimedova zákona. Vzorek pasty se umístí do nádoby s vodou a zavěsí se na váhu tak, aby byl v celém objemu ponořen do vodní lázně. Princip spočívá v záznamu změny hmotnosti vzorku a chemické smrštění se vyjadřuje se v $[\text{ml}/\text{g}_{\text{cementu}}]$ [29].

5.2 Stanovení vývoje autogenního smrštění cementu

Pro stanovení vývoje autogenního smrštění cementu lze adaptovat všechny zkušební postupy uvedené v předchozí kapitole 5.1. Pro stanovení autogenního smrštění je nutné vzorek cementové pasty uložit v autogenních podmínkách ošetřování, tzn. je nutné zamezit výměně vlhkosti mezi vzorkem a okolním prostředím. U gravimetrické metody se pro tyto účely běžně používá latexová membrána. U dilatometrické či pyknometrické metody lze nádobu v celém objemu nad vrstvou cementové pasty vyplnit např. parafinovým olejem [30]. Pro získání vztahu mezi chemickým a autogenním smrštěním je nutné v obou případech použít stejnou konfiguraci testu [31].

5.3 Stanovení vývoje smrštění malt a betonu v rané fázi zrání

Postupy pro stanovení smrštění malt a betonů v rané fázi zrání nejsou zakotveny v českých normách. V Evropě existuje zatím jediná norma, která se této problematice věnuje [17]. Pro experimentální stanovení je pak nutné využít buď normy řady ASTM (viz kapitola 4.2), nebo nestandardizované zkušební postupy, jako je použití různých typů tenzometrů vhodných pro zabetonování do zkušebních těles, či speciálních forem s jedním či dvěma posuvnými čely. Ve všech případech je nutné použít tenzometry s nízkou tuhostí (low stiffness).

Výsledky získané v rané fázi zrání měřením pomocí různých typů tenzometrů mohou poskytovat mírně odlišné výsledky vývoje deformací v závislosti na možnostech daného přístroje zahájit měření. V řadě případů nedovoluje samotná tuhost tenzometru či konfigurace měření záznam deformací před dosažením doby tuhnutí. Pro účely vyhodnocení se tak zpravidla jako nulový čas (t_0) uvažuje právě čas dosažení doby tuhnutí, přičemž plastické deformace probíhající v plastické fázi zrání malt a betonů jsou zanedbány.

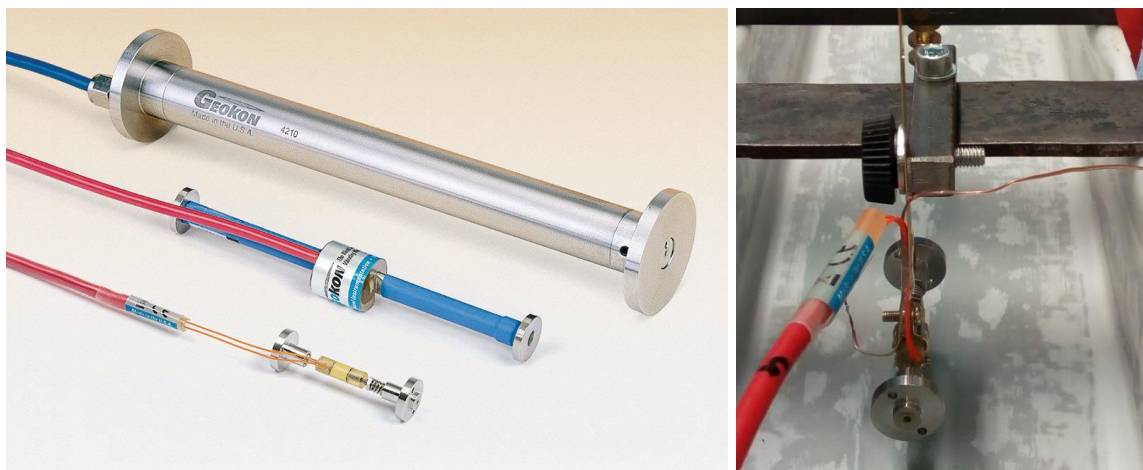
V ČR jsou pro účely laboratorního i in-situ měření nejvíce rozšířeny strunové tenzometry s měřicí základnou 200 mm. Vzhledem k velikosti těchto tenzometrů je pro laboratorní měření nutné vyrobit zkušební těleso s minimálními rozměry $100 \times 100 \times 400$ mm (viz Obr. 6). Tuhost

těchto tenzometrů neumožňuje zaznamenat délkové změny vyvolané smrštěním dřívě než po dosažení doby tuhnutí, v některých případech je to až v období dosažení maxima vnitřní teploty betonu (v závislosti na typu betonu).



Obr. 6 Strunový tenzometr se základnou 200 mm.

Pokud je vyžadováno zaznamenávání smrštění v dřívějších fázích zrání betonu, je nutné zvolit strunový tenzometr s nižší tuhostí. Širší výběr tenzometrů tohoto typu nabízí např. výrobce a dodavatel GEOKON [32] (viz Obr. 7). Tento typ tenzometru není v současné době dostupný na místním ani Evropském trhu, čímž se navyšuje jeho cena.

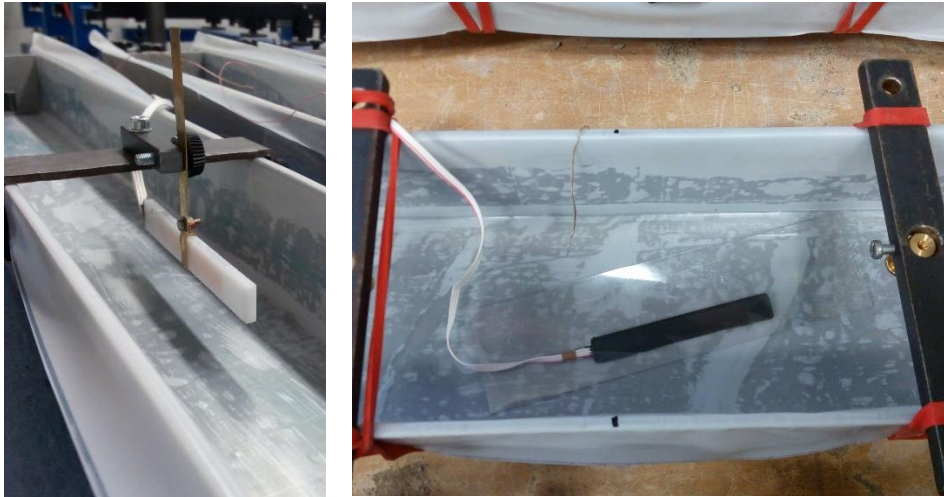


Obr. 7 Strunové tenzometry výrobce a dodavatele GEOKON [32] (vlevo), tenzometr připravený k zabetonování (vlastní experiment).

Výhodou strunových tenzometrů je materiál, z něhož jsou vyrobeny (ocel), a integrované teplotní čidlo, pomocí něhož lze provést u naměřené křivky smrštění kompenzaci teplotních

vlivů. Vzhledem k faktu, že se jedná o měřidla na jedno použití, je jejich hlavní nevýhodou poměrně vysoká pořizovací cena.

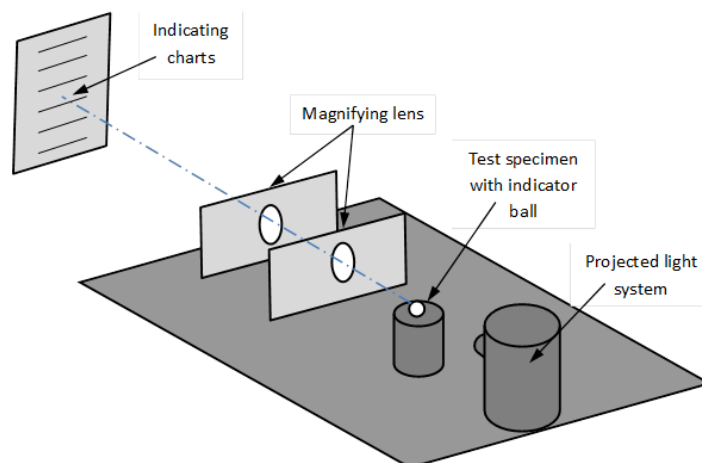
Levnější variantou jsou tenzometry odporové. Jedná se zpravidla o měřicí čidla vyrobená z různých typů kompozitních materiálů na bázi plastů. V současné době je na Evropském trhu dostupná poměrně široká nabídka těchto tenzometrů s různou délkou měřicí základny a tuhostí (viz Obr. 8).



Obr. 8 Odporové tenzometry pro zabetonování: běžný typ s délkou základny 120 mm (vlevo), speciální typ s velmi nízkou tuhostí pro měření autogenního smrštění se základnou 70 mm (vlastní experiment).

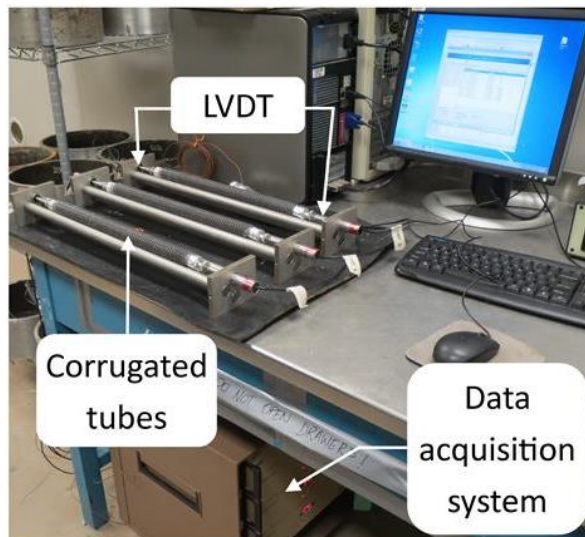
Výrobcem je společnost Kyowa [33]. Kompenzace teplotních vlivů se provádí na základě známého koeficientu teplotní roztažnosti dodaného výrobcem konkrétního tenzometru.

Pro účely stanovení vývoje smrštění v rané fázi zrání jsou v normách ASTM zakotveny dva základní postupy. První postup je založený na měření změny výšky válcového tělesa.



Obr. 9 Konfigurace testu podle ASTM C827 / C827M – 16 [19], převzato z [34].

Metoda hodnotí změnu výšky válcového vzorku umístěného ve formě. Princip měření spočívá ve vyznačení okraje stínu indikátoru ve formě balónku umístěného na horním povrchu vzorku při pohybu nahoru nebo dolů vlivem smrštění či nabývání betonu v rané fázi zrání. Pro tento účel se použije sestava zobrazena na Obr. 9, obsahující lampu projektoru, zvětšovací čočku a indikátorový diagram. Zkouška je pracná a může být zatížena poměrně velkou chybou lidského faktoru (je obtížné jasně definovat okraj balónku na indikátorových diagramech) [34].



Obr. 10 Konfigurace testu podle ASTM 1698 [18], převzato z [34].

Druhý postup je určený pro měření lineárních autogenních deformací, přičemž měření je zahájeno v okamžiku dosažení konce doby tuhnutí. Čerstvý materiál je po celou dobu měření uložen v uzavřené formě tvořené flexibilní vlnitou trubkou (corrugated tube). Postup měření je zakotven v normě ASTM C1698 [18]. Na Obr. 10 je ilustrativní foto měřicí sestavy.

Posledním zkušebním postupem zakotveným v rakouské normě OENORM B 3329 [17] je metoda stanovení smrštění a nabývání zálivkových malt pomocí měřicích žlabů s vnitřními rozměry $60 \times 38 \times 1000$ mm. Zkušební postup vyžaduje zahájení měření co nejdříve po uložení čerstvé malty do žlabu. Tento typ zařízení je komerčně dostupný (výrobce Schleibinger Testing Systems). V současné době je dodáván také s úpravou pro možnost cirkulace vody podél stěn konstrukce žlabu (viz Obr. 11). Délkové změny jsou v tomto případě snímány indukčním snímačem s rozlišením $0,3 \mu\text{m/m}$, zapojeným do datové ústředny a opřeným o posuvné čelo žlabu. Dovnitř žlabu se vkládá separační fólie pro zajištění volné deformace materiálu uloženého ve žlabu.



Obr. 11 Měřicí žlab [35].

5.4 Stanovení dlouhodobého vývoje smrštění malt a betonu

Pro účely stanovení dlouhodobého vývoje smrštění jsou běžně používané postupy měření zakotvené v normách. Zkušební postupy dané evropskými a americkými normami se liší zejména velikostí zkušebních těles (viz kapitola 4). Způsob ošetřování v době od uložení do doby vyjmutí zkušebních těles se může odlišovat v závislosti na typu materiálu. Zpravidla je ale malta či beton ve formě ošetřován překrytím fólií pro zamezení nadměrného odpařování vody z materiálu do okolního prostředí. Jako základní zkušební zařízení se ve všech případech používá stojatý či ležatý dilatometr (viz Obr. 12). Pro účely stanovení délkových změn jsou zkušební tělesa vybavena měřicími kontakty umístěnými zpravidla v jejich čelech.



Obr. 12 Dilatometry pro stanovení smrštění vysycháním [36].

Norma ČSN 73 1320 [37] připouští osazení měřicích základen na dvě protější podélné strany zkušebních těles. V tomto případě lze použít měřicí základny ve formě terčů pro měření

příložným tenzometrem nebo lze na boční strany trámců připevnit strunové tenzometry s vhodnou délkou měřicí základny (viz Obr. 13).



Obr. 13 Měření smrštění na podélných stranách zkušebních těles (vlastní experiment).

6 Experimentální stanovení vývoje smrštění

Strunové tenzometry patří bezesporu mezi elitu, pokud se jedná o přístrojové vybavení pro stanovení vývoje smrštění jak v laboratoři, tak i přímo v konstrukci. Jejich předností je možnost kontinuálního záznamu poměrných přetvoření po celou dobu zrání betonu. Pro dlouhodobá měření v řádech let není nutné, aby byly tenzometry nepřetržitě připojené k datové ústředně – odečítání lze provádět ve zvolených časových intervalech, kdy se přístroje připojí k datové ústředně pouze na dobu potřebnou pro odečet aktuálních hodnot přetvoření. Vzhledem k široké nabídce různých typů je lze použít jak pro zabudování dovnitř, tak pro upevnění na povrchu zkušebního tělesa či prvku. Svými parametry splňují požadavky na přesnost, opakovatelnost a reprodukovatelnost měření. Díky kovové konstrukci měřicího přístroje je během měření smrštění poměrně snadné kompenzovat teplotní vlivy okolního prostředí. Hlavní nevýhodou strunových tenzometrů je jejich pořizovací cena, která je závislá na konkrétním typu tenzometru a pohybuje se v řádech tisíců korun. Strunové tenzometry s nízkou tuhostí, určené zejména pro měření v raných fázích zrání betonu (zachycení autogenního či plastického smrštění), nejsou v současné době na místním trhu dostupné, a tak se jejich cena navyšuje s ohledem na dopravu ze zahraničí (v současné době je lze objednat např. v USA). Je nutno poznamenat, že tenzometry určené pro zabudování dovnitř zkušebního tělesa jsou určeny pouze pro jedno použití, čímž se navyšuje celková cena prováděného měření (více viz kapitoly 5.3 a 5.4).

Jako alternativa k měření smrštění strunovými tenzometry se v posledních letech na trhu objevily odporové tenzometry určené pro zabetonování dovnitř zkušebního tělesa, případně i konstrukce. Stejně jako strunové tenzometry umožňují odporové tenzometry kontinuální záznam měření. Avšak na rozdíl od strunových tenzometrů nejsou zcela vhodné pro dlouhodobá měření trvající v řádech let. Pouzdro tenzometrů je tvořeno zpravidla plastovým kompozitem. Tenzometry určené pro zabetonování jsou kalibrovány pro lineární součinitel teplotní roztažnosti blízký hodnotě lineární teplotní roztažnosti ztvrdlého betonu ($11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Tenzometry mají schopnost samo-kompensace teplotních vlivů v rozsahu teplot daných výrobcem. Cena tenzometrů se pohybuje v řádech stovek korun, přičemž cena tenzometrů s nízkým modulem pružnosti, určených pro měření v rané fázi zrání betonu, je na horní hranici cenového rozpětí. Stejně tak jako strunové tenzometry jsou odporové tenzometry v tomto případě určeny pouze na jedno použití (více viz kapitola 5.3).

Alternativou k výše uvedeným tenzometrům jsou různé typy forem opatřených jedním či dvěma posuvnými čely. Princip měření spočívá v měření změny délky zkušebního tělesa uloženého ve formě pomocí indukčnostního snímače opřené o jedno či obě pohyblivá čela. Výhradním

výrobce a dodavatelem podobných forem/žlabů je v Evropě společnost Schleibinger Testing Systems se sídlem v Německu [35]. Vyrábí a dodává žlaby dvou různých vnitřních průřezů – 60×40 mm a 100×60 mm, s délkami 1000 mm pro standardní typ, 500 a 250 mm na vyžádání. Varianta žlabu s rozměry $60 \times 40 \times 1000$ mm je zakotvena v rakouské normě pro stanovení smršťování injektážních malt [17]. Formy jsou opatřeny jedním posuvným čelem a jsou primárně určeny pro měření vývoje smrštění v rané fázi zrání malt a betonů. Vzhledem k možnosti jejich opakovaného využití pro měření smršťování se tyto formy jeví jako vhodná a cenově příznivá alternativa k výše uvedeným tenzometrům. Velkou výhodou měřicích žlabů je možnost zahájit měření smrštění v řádech desítek minut po smíchání sypkých složek betonu s vodou. Vzhledem ke konstrukci měřicího systému je indukční snímač opřený o čelo žlabu schopen zaznamenávat změny délky zkušebního tělesa mnohem dříve než většina typů běžně dostupných tenzometrů. Hlavní nevýhodou je výhradně laboratorní použití. Stejně tak jako výše uvedené tenzometry, měřicí žlaby splňují požadavky na přesnost, opakovatelnost a reprodukovatelnost měření (více viz kapitola 5.3).

6.1 Výběr separační fólie

Používání separačních fólií pro zajištění volné deformace vzorku podrobeného zkoušce měření smrštění je jedním z horkých témat posledních let. O vhodnosti té či oné fólie se vede vášnivá diskuse. Mezi typické materiály, z nichž jsou fólie vyrobeny, patří teflon, neopren či polyetylen. Základním parametrem pro volbu typu separační fólie je nízký součinitel tření anebo velmi nízký modul pružnosti vybraného materiálu. V zahraničních publikacích se nejčastěji objevuje používání teflonové fólie, a to zejména díky nízkému součiniteli tření teflonu, jehož hodnota je přibližně 0,04 pro kombinaci teflon-ocel za suchých podmínek. Vzhledem k nestlačitelnosti této fólie se předpokládá volné klouzání betonu po povrchu fólie. Zbývající dvě fólie mají součinitel tření až 10 krát větší. V literatuře se pro kombinaci neopren-kov uvádí rozmezí 0,5 – 0,8 a pro polyetylen-ocel přibližně 0,2 (pro oba materiály stanoveno za suchých podmínek). V případě neoprenové či polyetylenové fólie se však pro zajištění volné deformace betonu využívá právě vysoká stlačitelnost obou fólií, daná nízkým modulem pružnosti obou materiálů, pohybujícím se v rozmezí 0,3 – 3 MPa. Výrobce smršťovacích žlabů Schleibinger Testing Systems využívá pro účely měření volného smršťování betonu výhradně neoprenovou separační fólii a zároveň nedoporučuje používání fólie teflonové [35].

6.2 Měření hmotnostních úbytků

Průběh a rychlost vysychání ztvrdlých malt a betonů závisí na dvou základních parametrech, tj. složení materiálu (poměr kameniva k pojivové složce (a/b), vodní součinitel (w/c), velikost

a rozložení pórů) a okolních podmínkách, v nichž daný materiál zraje (teplota, relativní vlhkost vzduchu (RH)). Rychlost vysychání je dále ovlivněna velikostí prvku a šířkou případných trhlin. Pro co nejpřesnější popis procesu vysychání je vhodné zahájit měření hmotnostních úbytků co nejdříve po uložení čerstvého materiálu do formy. Vzhledem ke skutečnosti, že u běžných betonů je největší složkou objemových změn smrštění vysycháním, je vývoj hmotnostních úbytků také důležitý z hlediska predikce smršťování [9, 38].

Stanovení hmotnostních úbytků na ztvrdlém zkušebním tělese je poměrně jednoduchá úloha. Těleso se váží na váze s přesností na minimálně 0,5 g ve vhodně zvolených časových intervalech. Tyto intervaly je vhodné sjednotit s měřením změn délek, pokud je toto měření prováděno manuálně. V ideálním případě je vhodné stanovit hmotnostní úbytky a změny délky na témže tělese. V rané fázi zrání je tato úloha komplikovanější, protože případná manipulace se vzorkem může ovlivnit měření délkových změn. V tomto případě, pokud je to vyžadováno, se hmotnostní úbytky stanovují na doprovodné sadě zkušebních těles, čímž je do jisté míry ovlivněna závislost vývoje smrštění a hmotnostních úbytků.

6.3 Měření teplot a relativní vlhkosti vzduchu

Je obecně známo, že měření teplot uvnitř zkušebního tělesa a okolního prostředí je nezbytné pro celkové vyhodnocení měření smršťování. Kromě toho, že je nezbytné pro provedení korekce deformací vlivem teplotní roztažnosti materiálu, jsou měření vývoje vnitřních teplot materiálu získány podrobné informace o průběhu hydratace. Tyto informace jsou často vodítkem pro stanovení okamžiku pro vyhodnocení naměřeného záznamu. Jedná se o určení vhodného času t_0 , který se uvažuje jako počáteční čas (nulový čas) pro účely vyhodnocení měření. Obecně se v praxi uvažuje, že deformace zaznamenané v době před nástupem hlavního hydratačního vrcholu nejsou pro účely navrhování konstrukcí podstatné, a tak se jako čas t_0 uvažuje např. doba odpovídající počátku nárůstu vnitřní teploty, doba odpovídající polovině vzestupné části teplotní křivky (odpovídá místu inflexního bodu na teplotní křivce) či doba odpovídající maximu hlavního hydratačního vrcholu. Všechny tyto významné body na křivce vývoje vnitřních teplot jsou důležité z hlediska celkového vyhodnocení naměřeného vývoje smršťování.

Vzhledem ke skutečnosti, že proces smrštění malt a betonů je silně ovlivněn okolními podmínkami prostředí, musí být každé měření vztaženo k aktuálním podmínkám prostředí, za kterých je prováděno, tj. k aktuální teplotě a relativní vlhkosti okolního vzduchu. Obecně lze říci, že čím je relativní vlhkost vzduchu okolního prostředí vyšší, tím je absolutní hodnota smrštění menší. Předpokládá se, že beton nesmršťuje, pokud je $RH > 95 \%$ [2]. To ovšem platí

u běžných betonů, kde se jako největší složka objemových změn uvažuje smrštění vysycháním. U betonů s nízkým vodním součinitelem ($w/c < 0,40$) se může objevit autogenní složka smrštění, která nemusí být zcela závislá na aktuálních podmínkách prostředí. Struktura betonů s $w/c < 0,30$ je velmi hutná a neumožňuje pronikání vlhkosti dovnitř prvku. Takovéto typy betonů mohou vykazovat autogenní smrštění i v případě, že je prvek či zkušební těleso uloženo ve vodě [1]. Řešením pro minimalizování hodnoty autogenního smrštění je např. použití pórovitého kameniva pro vnitřní ošetřování betonu [39].

Současné normy a předpisy platné v ČR a EU pro laboratorní stanovení vývoje smršťování nevyžadují kontinuální měření vnitřních teplot betonu. Předepisují pouze měření teplot a relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí po celou dobu trvání zkoušky [37], nebo definují přesné laboratorní podmínky, které se musí během měření udržovat, viz např. [40, 41]. Dokonce ani normy řady ASTM určené pro stanovení smrštění/nabývání v rané fázi zrání nevyžadují měření této veličiny [14, 18, 19].

6.4 Ostatní související doprovodná měření

Pro celkovou interpretaci výsledků měření smrštění v rané fázi zrání je nutné znát co nejvíc informací o průběhu procesu tuhnutí a tvrdnutí zkoumaného materiálu. Jednou ze základních zkoušek je stanovení doby tuhnutí.

Otázka způsobu stanovení doby tuhnutí pojiv, malt a betonů, patří v současné době mezi často diskutované problémy. Zkušební postupy zakotvené v českých a evropských normách jsou založené na invazivních metodách, tj. na stanovení hloubky vniknutí penetrační jehly u pojiv [42] či odporu proti vniknutí penetračního válečku u malt a betonů [43, 44]. Výše uvedené postupy jsou z hlediska současných požadavků kladených na zkoušení vlastností malt a betonů často nedostačující. Vzhledem k invazivní povaze zkušebních postupů jsou výsledky zkoušek ovlivněny lokálními nehomogenitami ve zkušebním vzorku, což zvyšuje variabilitu naměřených výsledků.

Normalizační organizace ASTM International je v tomto směru pokrokovější. Kromě výše uvedených invazivních zkušebních postupů doporučuje stanovení doby tuhnutí na základě vývoje vnitřní teploty materiálu [45], kdy se jako doba tuhnutí uvažuje časový údaj odpovídající době, kdy vnitřní teplota materiálu dosáhne poloviny vzestupné části hlavního hydratačního vrcholu. Jako hlavní výhodu tohoto postupu lze vnímat kontinuální měření veličiny, která je v přímé souvislosti s hydratačním procesem. Další výhodou je použití jednoho typu teplotního čidla pro stanovení doby tuhnutí u pojiv, malt i betonů. I přesto, že tento postup určuje pouze

„jednu dobu tuhnutí“, se tento údaj jeví z praktického hlediska přínosnější, a to vzhledem k nízké pracnosti provedení potřebného měření a jeho využití pro měření přímo v konstrukcích. Mezi další vhodné metody pro stanovení dob tuhnutí patří například elektrochemická impedanční spektroskopie, reologické metody využívající reometry či ultrazvuková metoda [46]. I přesto, že jsou tyto metody intenzivně zkoumány a ověřovány od konce 90. let minulého století, žádná z nich zatím není zakotvena v normách či jiných zkušebních předpisech.

7 Inovativní způsob stanovení celkového vývoje smršťování

Na přelomu roku 2005/2006 bylo na Ústav stavebního zkušebnictví zakoupeno nové přístrojové vybavení pro měření smršťování. Jedná se o výše zmíněné měřicí žlaby výrobce Schleibinger. Konkrétně byly pořízeny žlaby s vnitřními rozměry $100 \times 60 \times 1000$ mm ($\text{š} \times \text{v} \times \text{l}$) vybavené jedním posuvným čelem, přičemž druhé čelo je pevné. Délkové změny jsou snímány indukčnostním snímačem s přesností měření na 0,001 mm zapojeným do datové ústředny. Délka měřicí základny pro stanovení vývoje smrštění je v tomto případě 1000 mm. Pro zajištění volné deformace betonu uloženého ve žlabu se dovnitř žlabu vkládá separační fólie. Dle doporučení výrobce forem byla zpočátku používána neoprenová fólie o délce 1000 mm. Separační fólie pokrývá dno a obě podélné strany vnitřního průřezu žlabů. Vnitřní povrch obou čel je opatřen tenkou vrstvou vazelíny. Vzhledem k tomu, že ve své době bylo toto zařízení novinkou v oboru experimentálního stanovení smršťování malt a betonů, byla nejdříve provedena pilotní měření s cílem ověřit praktický rozsah jeho použitelnosti. Rozsáhlejší testy byly započaty v roce 2009.

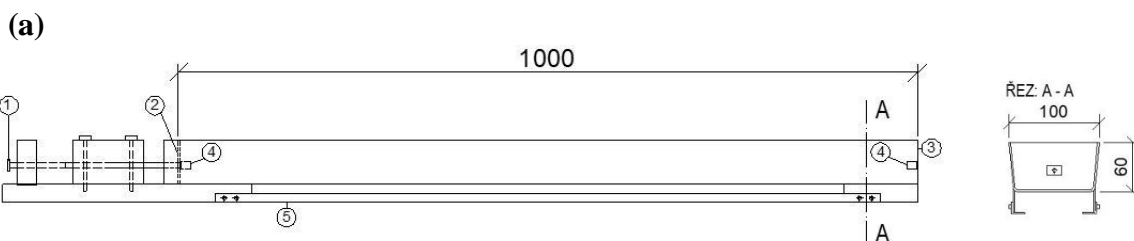
7.1 Přídavné vybavení ke smršťovacím žlabům pro dlouhodobá měření

Již první testy ukazovaly na drobné nedostatky měřicího přístroje. Jedním z nich byl technologický problém při ukládání malt a betonu s konzistencí vyžadující hutnění během plnění do formy. Tento problém byl vyřešen přidáním spodních kovových listů umožňujících upevnění žlabu na magnetickém vibračním stole (viz Obr. 14). Druhý nedostatek vyplynul z potřeby navázání měření smrštění v rané fázi zrání a dlouhodobého vývoje smrštění vlivem vysychání malt a betonu. Zkušební vzorek umístěný ve žlabu vysychá pouze jedním povrchem, což v řadě případů vedlo k ustalování hodnoty smrštění ve stáří 48 hodin.

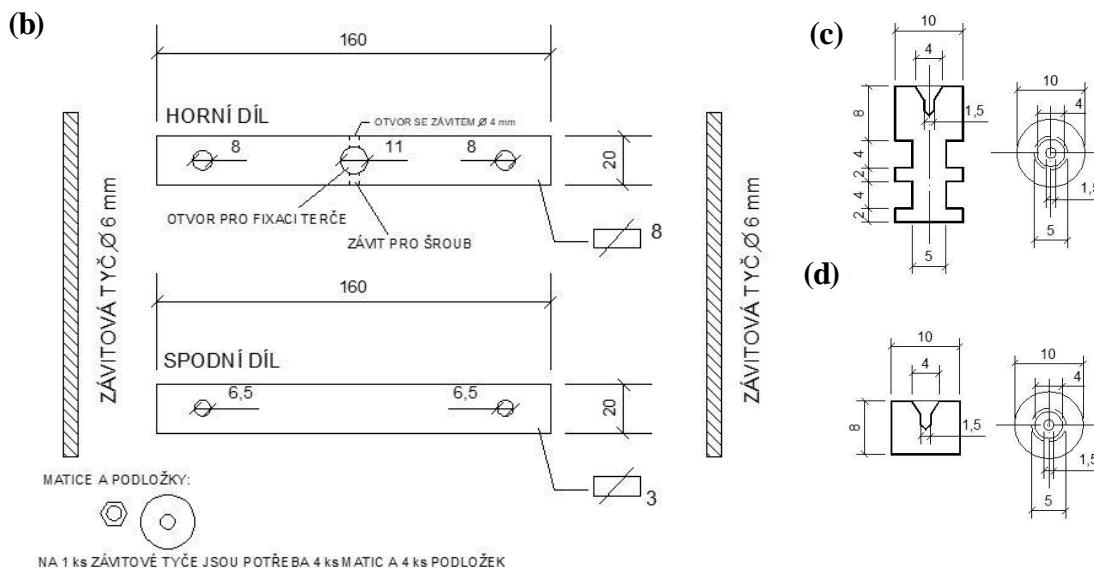
Pro účely možnosti pokračování v měření smrštění na zkušebním tělese i po jeho vyjmutí z měřicího žlabu bylo navrženo odnímatelné přídavné vybavení, které se nainstaluje na měřicí žlab před zahájením plnění. Jedná se o sadu tří pomocných rámců/svorek (viz Obr. 14), které slouží pro uchycení měřicích terčů v předem definované poloze na horním povrchu měřicího žlabu v jeho středové části. Terče byly speciálně navrženy pro účely jejich částečného zabetonování do horního povrchu budoucího zkušebního tělesa (viz Obr. 14). Tímto způsobem se na horním povrchu zkušebního tělesa vytvoří jedna či dvě na sebe navazující základny o nominální délce 200 mm. Pomocné rámy se sejmou ze žlabu těsně před zahájením měření smrštění. Díky svému tvaru jsou terče schopny udržet se ve stanovené poloze ještě před začátkem tuhnutí betonu. Pokud podmínky měření neumožňují zabetonování měřicích terčů

během výroby zkušebních těles, lze použít terče určené k nalepení. V tomto případě se terče nalepí na horní povrch betonu ihned po ukončení počátečního měření ještě před odformováním zkušebních těles. Výše popsané základny, umístěné ve středové části zkušebního tělesa, slouží pro účely dlouhodobého sledování vývoje smrštění betonu vlivem vysychání zkušebního tělesa po jeho odformování. Pro toto měření se obvykle používá mechanický příložený tenzometr, přičemž na Ústavu stavebního zkušebnictví (SZK) se používá Hollanův typ příložného tenzometru.

Obě výše uvedená řešení úpravy/rozšíření měřicích žlabů jsou předmětem užitého vzoru a měřicího postupu vytvořeného na Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně (SZK, FAST VUT v Brně) [47, 48].



1 – kolík pro zajištění polohy; 2 – posuvné čelo; 3 – pevné čelo; 4 – odnímatelné kotvy na obou čelech; 5 – kovové lišty pro připevnění žlabu k hutnicímu stolu



Obr. 14 Schéma měřicího žlabu a přídavného zařízení [47, 48]: měřicí žlab (a); součásti pomocného rámu (b); měřicí terč určený k zabetonování (c); měřicí terč určený k nalepení (d).

Výsledné poměrné přetvoření (smrštění/nabývání) se pak skládá se součtu poměrných přetvoření vypočítaných z dat zaznamenaných indukčností snímačem v rané fázi zrání $\varepsilon_{ea}(t)$ a dat získaných měření pomocí tenzometru $\varepsilon_{lt}(t)$, přikládaného na základny zabudované/nalepené v horním povrchu zkušební tělesa.

Poměrná přetvoření v rané fázi zrání se vypočítají dle vztahu (1):

$$\varepsilon_{ea}(t) = \frac{d(t) - d(t_0)}{l_0} \cdot 1000, \quad (1)$$

kde $\varepsilon_{ea}(t)$ je poměrné přetvoření v rané fázi zrání betonu v $\mu\text{m}/\text{m}$, $d(t)$ je délka zaznamenaná indukčností snímačem v čase t v mm, $d(t_0)$ je délka zaznamenaná indukčností snímačem v čase t_0 v mm (t_0 – čas zahájení měření), l_0 je nominální délka měřicí základny v m (v rané fázi zrání je $l_0 = 1$ m).

Po vyjmutí ze žlabů se poměrná přetvoření stanoví jako aritmetický průměr měření, provedených příložným tenzometrem na dvou na sebe navazujících základnách, dle vztahu (2):

$$\varepsilon_{lt}(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{(d_1(t) - d_1(t_0^*)) + (d_2(t) - d_2(t_0^*))}{l_0^*} \right) \cdot 1000, \quad (2)$$

kde $\varepsilon_{lt}(t)$ je poměrné přetvoření měřené na horním povrchu zkušební tělesa v $\mu\text{m}/\text{m}$, $d_1(t)$ je délka zaznamenaná příložným tenzometrem na první základně s nominální délkou l_0^* v čase t v mm, $d_1(t_0^*)$ je délka zaznamenaná příložným tenzometrem na první základně s nominální délkou l_0^* v čase t_0^* v mm (t_0^* – čas prvního měření před vyjmutím tělesa ze žlabu), $d_2(t)$ je délka zaznamenaná příložným tenzometrem na druhé základně s nominální délkou l_0^* v čase t v mm, $d_2(t_0^*)$ je délka zaznamenaná příložným tenzometrem na druhé základně s nominální délkou l_0^* v čase t_0^* v mm, nominální délka základny $l_0^* = 0,2$ m.

Celkové poměrné přetvoření $\varepsilon_{tot}(t)$ se pak vypočítá dle vztahu (3) jako součet výše uvedených složek přetvoření:

$$\varepsilon_{tot}(t) = \varepsilon_{ea}(t) + \varepsilon_{lt}(t). \quad (3)$$

Vytvoření výše zmíněného postupu měření s názvem „Standardní operační postup – 01/09: Standardní operační postup pro stanovení smrštění a nabývání betonu“, [47] bylo iniciováno spolupracujícími zkušebními laboratořemi z řad praxe. Vzhledem k tomu, že ve své době v ČR ani EU neexistoval žádný normativní předpis pro podobný typ měření, bylo nutné pro účely interního mezilaboratorního porovnávání výsledků měření vytvořit jednotný interní předpis pro postup provádění měření. První verze dokumentu byla připravena na začátku roku 2009.

Vytvoření jednotného zkušební postupu pomohlo k rozšíření měřicích žlabů do praxe a umožnilo vzájemné porovnávání získaných výsledků měření.

7.2 Váhový stůl pro měření hmotnostních úbytků v rané fázi zrání

Nové přístrojové vybavení (měřicí žlaby) přineslo nové otázky v oblasti experimentální analýzy objemových změn. Vzhledem k možnosti zahájit měření v řádu desítek minut po smíchání suchých složek s vodou se získané křivky smrštění poměrně odlišovaly od dosavadně známých průběhů. Jednalo se zejména o počáteční vývoj poměrných deformací zaznamenaný v řádu hodin po zahájení měření. Vzhledem k tomu, že proces smrštění/nabývání je úzce spojen s transportem vody v pórové struktuře zrajícího materiálu, bylo nutné zahájit souběžné měření hmotnostních úbytků a poměrných deformací již v rané fázi zrání. Pro účely interpretace výsledků bylo tedy navrženo a sestrojeno nové zkušební zařízení ve formě váhového stolu, který umožňuje kontinuální zaznamenávání hmotnostních úbytků souběžně s měření poměrných deformací bez nutnosti manipulace se zkušebním tělesem. Váhový stůl je zkonstruován jako váha s vyvažovacími rameny umožňující přesné nastavení vážícího rozsahu. Skládá se ze tří samostatných váhových platform propojených s vyvažovacími rameny vybavených sadou odnímatelných a posuvných závaží a šroubem pro aretaci měřidel. Pod každou jednotlivou platformou je umístěn váhový člen s váživostí do 3 kg s možností připojení k datové ústředně. Váhové platformy jsou osazeny na tuhém rámu, což minimalizuje vliv případných vibrací na průběh měření. Schéma váhového stolu je na Obr. 15.

V současné době je váhový stůl uzpůsoben pro měření smrštění a hmotnostních úbytků malt a betonů uložených v měřicích žlabech. Hmotnost naplněného žlabu se odvíjí od objemové hmotnosti zkoumaného materiálu. U běžných betonů je to cca 24 kg (včetně hmotnosti samotného žlabu). Vyvažovací mechanismus umožňuje vyvážení žlabu uloženého na váhové platformě tak, aby hmotnost přenesená na váhový člen nepřekročila hodnotu 2 kg. Tímto způsobem je možné měřit hmotnostní úbytky vlivem odpařování vody s přesností na 0,1 g.

Pro výpočet hmotnostních úbytků v období uložení betonu ve žlabu se použije vztah (4):

$$\Delta m_{ea}(t) = \frac{m(t) - m(t_0)}{m_0} \cdot 100 (\%), \quad (4)$$

kde $\Delta m_{ea}(t)$ je hmotnostní úbytek betonu uloženého ve žlabu stanovený v čase t v %, $m(t)$ je hmotnost zaznamenaná váhovým členem v čase t v g, $m(t_0)$ je hmotnost zaznamenaná váhovým členem v čase t_0 v g (t_0 – čas zahájení měření), m_0 je hmotnost čerstvého betonu stanovená po naplnění měřícího žlabu v g.

Pro výpočet hmotnostních úbytků v období po odformování zkušebních těles se použije vztah (5):

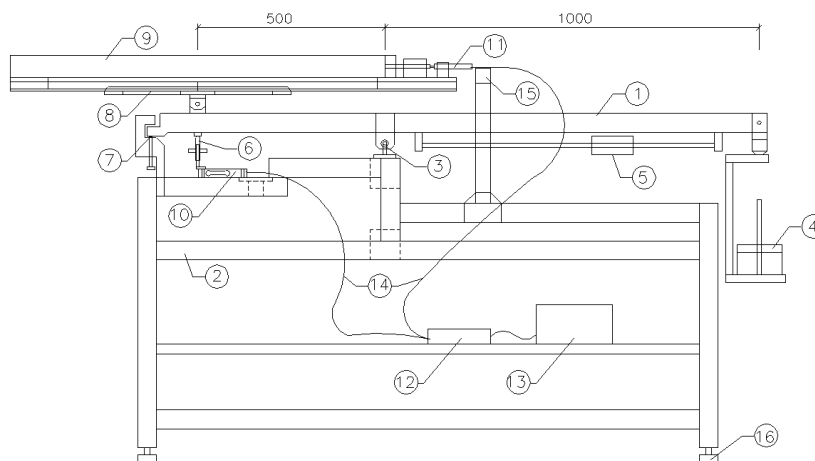
$$\Delta m_{lt}(t) = \frac{m(t) - m(t_0^*)}{m_0^*} \cdot 100 (\%), \quad (5)$$

kde $\Delta m_{lt}(t)$ je hmotnostní úbytek betonu vyjmutého ze žlabu stanovený v čase t v %, $m(t)$ je hmotnost zaznamenaná na laboratorní váze v čase t v g, $m(t_0^*)$ je hmotnost zaznamenaná na laboratorní váze v čase t_0^* v g (t_0^* – čas prvního vážení po vyjmutí tělesa ze žlabu).

Celkový hmotnostní úbytek $\Delta m_{tot}(t)$ v % se stanoví jako součet krátkodobých Δm_{ea} a dlouhodobých Δm_{lt} úbytků hmotnosti:

$$\Delta m_{tot}(t) = \Delta m_{ea}(t) + \Delta m_{lt}(t). \quad (6)$$

Výše popsané zařízení je předmětem patentu vytvořeného na SZK, FAST VUT [49].



- 1 – Vahadlo; 2 – Stolice - pevný, robustní a výškově stavitelný rám, který lze horizontálně natavit do vodorovné polohy ve všech směrech pomocí stavitelných noh (16); 3 – Uložení vahadla na stolici – ložiskové (variantně břitové) s minimálním třením; 4 – Závaží pro vyvážení hmotnosti zkušebních vzorků a zkušebních žlabů; 5 – Posuvné dovažovací závaží pro vyvážení hmotnosti zkušebních vzorků a zkušebních žlabů; 6 – Rektifikační šroub; 7 – Aretační šroub; 8 – Stavitelné lože pro uložení zkušebního žlabu; 9 – Zkušební žlab Schleibinger; 10 – Váhový člen o váživosti 3 000g s přesností na 0,1g; 11 – Indukční snímač deformace (variantně laserový) s přesností nejméně 0,001 mm; 12 – Měřicí ústředna; 13 – Vyhodnocovací jednotka – PC; 14 – Kabeláž ke snímačům; 15 – Pomocný rám pro uchycení kabeláže od snímačů; 16 – Stavitelné nohy

Obr. 15 Schéma váhového stolu [49].

7.3 Měřicí žlaby se zmenšeným rozměrem

V rámci experimentů prováděných na SZK vyvstala potřeba výroby měřicích žlabů menších rozměrů, a to zejména pro stanovení smrštění v rané fázi zrání jemnozrnných materiálů, jakými

jsou pasty, malty či betony se zrnem kameniva do 8 mm. Původní myšlenka byla úspora materiálu pro výrobu zkušebních těles. Pro tyto účely byly v roce 2016 vyrobeny měřicí žlaby s vnitřními rozměry $50 \times 50 \times 300$ mm vybavené jedním posuvným čelem (viz Obr. 16). Rozměr žlabů vychází z jednoho z typických rozměrů zkušebních těles používaných jinými, zejména zahraničními, výzkumnými týmy a splňuje požadavky na minimální příčný rozměr zkušebních těles daný předpisy ASTM pro betony s maximálním zrnem kameniva 16 mm. Tyto žlaby byly také na SZK využity pro vyjádření vlivu velikosti zkušebního tělesa na počáteční a celkový vývoj a hodnotu experimentálně stanoveného smrštění, viz například [50, 51]. Vybrané výsledky jsou prezentovány v kapitole 8 této práce. Pro účely využití zkušebních těles pro dlouhodobá měření po jejich vyjmutí ze žlabů byly navrženy a vyrobeny speciální měřicí kontakty (viz Obr. 16, vpravo) s možností jejich zašroubování do předem zabetonovaných kotevních bloků, které jsou součástí měřicích žlabů.



Obr. 16 Měřicí žlaby s vnitřními rozměry $50 \times 50 \times 300$ mm; speciální šroubovací kontakty pro účely dlouhodobého měření (vpravo).

Poměrná přetvoření v rané fázi zráni $\varepsilon_{ea}(t)$ se vypočítají dle vztahu (1), přičemž délka měřicí základny l_0 je v tomto případě rovna 0,3 m.

Po vyjmutí ze žlabů se poměrná přetvoření stanoví jako změny délky, stanovená pomocí stojanového dilatometru, dle vztahu (7):

$$\varepsilon_{lt}(t) = \frac{d_1(t) - d_1(t_0^*)}{l_0^*} \cdot 1000 \quad (7)$$

kde $\varepsilon_{lt}(t)$ je poměrné přetvoření měřené v podélné ose zkušebního tělesa v $\mu\text{m}/\text{m}$, $d_1(t)$ je délka zaznamenaná stojanovým dilatometrem na základně l_0^* v čase t v mm, $d_1(t_0^*)$ je délka zaznamenaná stojanovým dilatometrem na základně l_0^* v čase t_0^* v mm (t_0^* – čas prvního

měření po vyjmutí tělesa ze žlabu), l_0^* je délka měřicí základny v m, která odpovídá délce zkušebního tělesa (nominální délka základny $l_0^* = 0,3$ m).

Celkové poměrné přetvoření se pak vypočítá jakou součet výše uvedených složek přetvoření dle vztahu (3).

7.4 Stanovení dob tuhnutí na základě vývoje teplot a rychlosti šíření ultrazvuku

Doby tuhnutí jsou určovány z křivek vnitřních teplot měřených uvnitř zkušebních těles uložených ve žlabech. Doba tuhnutí je odhadována dle postupu ASTM [45]. Postup [45] je založen na zjednodušeném nalezení inflexního bodu na vzestupné části hlavního hydratačního vrcholu. Pro přesné určení tohoto bodu je nutné naměřený teplotní záznam proložit spojitou křivkou a provést derivaci funkce teploty, která v místě inflexního bodu vykáže lokální maximum. Tímto postupem lze odhadnout/stanovit pouze „jednu dobu tuhnutí“, jak je zmíněno v kapitole 6.4.

Pro určení doby počátku a konce tuhnutí je použita ultrazvuková impulsová metoda. Pro tento účel byl záměrně zvolen přístroj Vikasonic [52], který pracuje se stejným tvarem a velikostí zkušebního tělesa jako Vicatův přístroj. Přístroj Vikasonic se skládá z uzavřené měřicí komory tvořené Vicatovým prstencem. Ve spodní a horní části měřicí komory jsou zabudovány ultrazvukové (UZ) sondy, přičemž v horní části je osazen vysílač a ve spodní přijímač UZ vlnění. V horní části komory je malý otvor pro zavedení teplotního čidla, které je součástí přístroje. Měřicí komora je připojena k ovládací jednotce, umožňující nastavení měření a kontinuální záznam dat během měření. Základním výstupem z měření je kontinuální záznam doby průchodu UZ impulsu tuhoucím materiálem, doby měření (datum, čas) a teploty měřené uvnitř zkušebního tělesa. Doby tuhnutí jsou stanoveny na základě naměřeného vývoje vnitřní teploty a vypočtené rychlosti šíření UZ impulsu tuhoucím materiálem. Více o způsobu měření přístrojem Vikasonic viz [52, 53]. Experimenty prováděné v rámci výzkumných úkolů řešených na SZK ukázaly, že lokální maximum derivace křivky rychlosti šíření UZ impulsu tuhoucím materiálem odpovídá lokálnímu maximu derivace křivky vnitřní teploty. Ukázalo se také, že se výše uvedený přístroj dá použít i pro odhad vývoje smrštění cementových past zrajících v autogenních podmínkách, viz článek [54]. Dále se jeví jako velmi vhodný pro stanovení dynamického modulu pružnosti a Poissonova čísla [55] a pro odhad vývoje statického modulu pružnosti v rané fázi zrání cementových materiálů. Praktický příklad využití měření přístrojem Vikasonic je uveden v kapitole 8.6.

7.5 Využití metody akustické emise v rané fázi zrání

Metoda akustické emise (AE) se ukázala jako vhodná pro monitorování událostí probíhajících v rané fázi tvorby vnitřní struktury zrajícího materiálu. Pro účely měření byly vyrobeny speciální snímače akustické emise se zabudovaným vlnovodem a integrovaným předzesilovačem. Definování požadavků na výrobu snímačů, stejně tak jako samotné měření probíhalo ve spolupráci se zaměstnanci Ústavu fyziky FAST VUT, který má s využitím metody AE bohaté zkušenosti.

Provedená měření potvrzují složitost procesů probíhajících v rané fázi tuhnutí a tvrdnutí cementových materiálů. Interpretace měření provedených přímo na maltě či betonech je problematická, vzhledem ke složitosti měřeného systému – směs pojiva a plniva. Ukázalo se, že pro účely interpretace výsledků je vhodné provést také doprovodná měření separátně na pojivech. Výše uvedená měření byla prováděna v rámci řešení projektu GAČR 17-14302S a výsledky jsou ve fázi zpracovávání. Ucelený závěr by měl být součástí dizertační práce Ing. et Ing. Michaely Hodulákové, která se jako členka týmu významně podílela na experimentální části projektu. Dílčí výsledky byly již publikovány v časopisech či prezentovány na konferencích [56, 57, 58, 59].

7.6 Výběr separační fólie

Jak je zmíněno na začátku kapitoly 7, zpočátku byla pro měření smrštění ve žlebach používána neoprenová fólie tl. 2mm, jak doporučuje výrobce měřicího přístroje. Vzhledem k ceně a nedostupnosti této fólie na místním trhu se na SZK začala od roku 2011 používat fólie polyetylenová tl. 2 mm (Mirelon). Tato fólie je na místním trhu běžně dostupná a je cenově přijatelná. Obě výše uvedené fólie musí být pro účely měření nařezány na délku 1000 mm a jsou dotaženy k vnitřnímu povrchu obou čel měřicího žlabu. Od roku 2016 se na SZK používá teflonová separační fólie tl. 0,1 mm. Vzhledem k její tloušťce může být fólie podtažena pod posuvným čelem žlabu. V rámci řešení výzkumných úkolů na SZK FAST VUT byly provedeny experimenty s cílem ověřit vliv typu separační fólie na výsledek měření smrštění provedeného pomocí měřicího žlabu. Podrobněji je o výsledcích získaných z provedených měření pojednáno v kapitole 8.

7.7 Experimentální analýza vs. numerická predikce

Vzhledem k možnosti velmi časného spuštění měření ve žlebach obsahuje křivka smrštění také změny délky tělesa před dosažením doby tuhnutí, respektive před nástupem hlavního hydratačního vrcholu. Tyto deformace jsou vyvolány zejména plastickým smrštěním vlivem

kapilárního sání v pórové struktuře materiálu a mohou se objevit i u ošetřovaného tělesa. Jak bylo zmíněno v úvodu této práce, nejkompexnějším modelem pro predikci vývoje smršťování je model vytvořený skupinou kolem profesora Z. P. Bažanta, v současnosti ve verzi B4. Tato verze modelu je značně pokročilá a kromě toho, že umožňuje zohlednit široké spektrum vstupních surovin použitých pro výrobu betonů, má také implementován modul pro predikci autogenního smrštění. V současnosti není model uzpůsoben pro predikci smrštění ve velmi raných stádiích betonu [9]. Jedním z cílů provedených experimentů bylo porovnat výstupy z měření provedených použitím měřicích žlabů s predikcí získanou použitím modelu B4. Více o výsledcích viz kapitola 8.6.

8 Výsledky vlastní experimentální analýzy

V následujících odstavcích jsou prezentovány vybrané výsledky experimentů provedených v rámci výzkumných úkolů řešených na SZK. Cílem je ukázat hlavní přednosti měřicích technik používaných na SZK v rámci experimentálního stanovení vývoje smrštění malt a betonů. Zkoušené materiály jsou specifické právě svým chováním v rané fázi jejich zrání – betony obsahující pórovité kamenivo, betony s vysokým vodním součinitelem či s obsahem plastifikační přísady, vysokohodnotné betony s velmi nízkým vodním součinitelem a rizikem výskytu autogenního smrštění, atp.

Vzhledem k tomu, že některé výsledky prezentované v této kapitole již byly publikovány v českých a zahraničních časopisech či sbornících českých a zahraničních konferencí, nemají grafy a obrázky jednotné formátování – jsou převzaty z publikovaných originálů a jsou u nich uvedené příslušné reference. Texty převzaté z jednotlivých publikací jsou řádně citovány.

8.1 Měření smrštění betonů s různým stupněm nasycení pórovitého kameniva

Proces smrštění betonů obsahujících pórovité kameniva je poměrně komplikovaný problém, zejména z důvodu existence mnoha negativních faktorů, které souvisejí s návrhem jeho složení. Jde například o vysoký obsah jemných částic, nízký vodní součinitel a v neposlední řadě může být jako negativní faktor označováno i pórovité kamenivo za předpokladu, že je dávkováno ve vysušeném stavu. V případě nevhodného návrhu složení lehkého betonu může vysušené kamenivo absorbovat účinnou vodu potřebnou pro hydrataci cementu. Tento fakt může vést ke vzniku a rozvoji trhlin s následným snížením kvality betonu. Volba způsobu kondicionování (před-nasycování) pórovitého kameniva má zásadní vliv nejen na celý proces objemových změn betonu, ale může mít také významný dopad na hodnoty ostatních fyzikálně mechanických vlastností výsledného kompozitu.

Celkový závěr experimentu [60]: Z prezentovaných výsledků lze konstatovat, že měřicí žlaby jsou vhodné pro měření smrštění v počátečním stadiu tuhnutí a tvrdnutí betonu. Konstrukce měřicího zařízení umožnila zachytit smrštění probíhající v řádech jednotek hodin po uložení betonu do žlabů, čímž bylo možno plně zachytit vliv stupně před-nasycení pórovitého kameniva na celkový vývoj smrštění a nabývání vyrobených betonů. Podrobnosti a výsledky provedeného experimentu jsou uvedeny v následujících odstavcích.

Experiment byl zaměřen na zkoumání vývoje smrštění pouze v rané fázi zrání sledovaných betonů. Pro účely experimentu byly vyrobeny tři různé betony LC1, LC2 a LC3, které se lišily výhradně stupněm „před-nasycení“ pórovitého kameniva v okamžiku jeho dávkování do

mísicího zařízení a dávkou tzv. předmáčecí vody, ostatní složky betonu byly stejné. Jako hrubé kamenivo bylo použito pórovité kamenivo Liapor frakce 4-8/600, vyráběné a dodávané společností Lias Vintřov, LSM k.s. Obecné složení betonů je uvedeno v Tab. 2. Specifikace stupně před-nasycení a příslušná dávka předmáčecí vody je uvedena v Tab. 3 Výsledky byly publikovány v českém recenzovaném časopise [60].

Tab. 2 Složení lehkých betonů [60].

| Materiál na 1 m ³ | Jednotka | Množství |
|---|--------------------|----------|
| Liapor 4-8/600 (dávkováno ve vysušeném stavu) | m ³ | 0,36 |
| DTK Zaječí 0-4 mm | kg·m ⁻³ | 700 |
| CEM I – 42,5 R | | 440 |
| popílek Třinec | | 80 |
| Sika Viscocrete 1035 | | 5 |
| voda záměsová | l | 180 |
| stabilizátor | | 1,6 |
| voda předmáčecí (hmotnostní nasákavost 30 min.) | | 52 |

Tab. 3 Specifikace stupně před-nasycení a dávka předmáčecí vody [60].

| Složení | LC1 | LC2 | LC3 |
|--|---------|---------|---------|
| stupeň „před-nasycení“ kameniva [%] | 0 | 13 | 29 |
| předmáčecí voda [l] | 52 | 37 | 0 |
| záměsová voda [l] | 180 | 179 | 184 |
| zpracovatelnost: | | | |
| T ₅₀₀ [s]/rozlití kužele [mm] | 5,8/600 | 3,6/660 | 7,6/480 |
| klasifikace | VS2/SF1 | VS2/SF2 | VS2/– |

Pro měření byly použity měřicí žlaby s vnitřními rozměry 100 × 60 × 1000 mm. Pro zajištění volné deformace betonu ve žlabu byla použita neoprenová fólie tl. 2 mm. Všechny betony byly vyrobeny v laboratorní míchačce s nuceným oběhem, přičemž celková doba míchání byla přibližně 30 minut. Délka míchání byla zvolena záměrně s ohledem na předpokládanou absorpci předmáčecí vody. Přibližně hodinu po uložení betonu do žlabů a po celou dobu měření byl povrch zkušebních těles přikryt plastovou fólií s cílem zamezit nadměrnému vysychání betonu v počáteční fázi tuhnutí a tvrdnutí. Ve stejnou dobu bylo také zahájeno měření smrštění pomocí indukčního snímače s rozsahem měření 2 mm (rozlišovací schopnost 0,0001 mm), opřené o pohyblivé čelo žlabu. Celková doba měření smrštění byla přibližně 48 hodin.

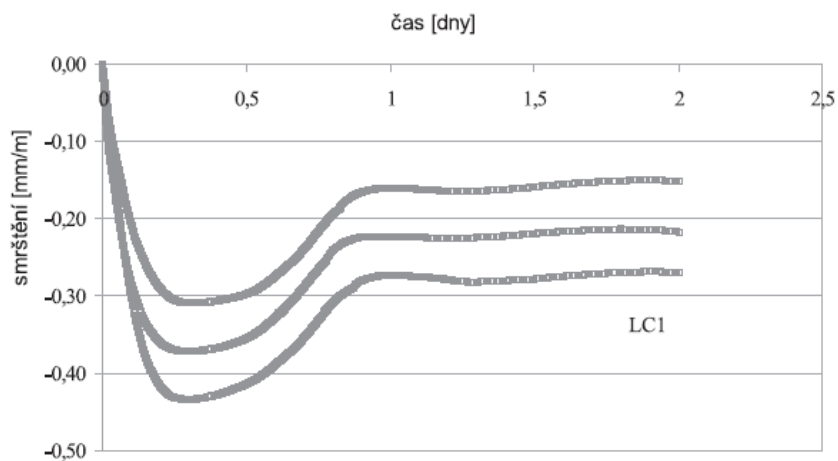
Z každého betonu byla vyrobena 3 zkušební tělesa (viz Obr. 17). Poměrná přetvoření byla stanovena dle vztahu (1) uvedeného v kapitole 7.1.

Výsledky získané ze všech tří měření stanovených pro každý zkoumaný beton jsou zobrazeny na následujících grafech (viz Obr. 18 – Obr. 20). Na Obr. 21 je zobrazeno porovnání všech naměřených průběhů smršťování zjištěných pro betony LC1, LC2 a LC3.

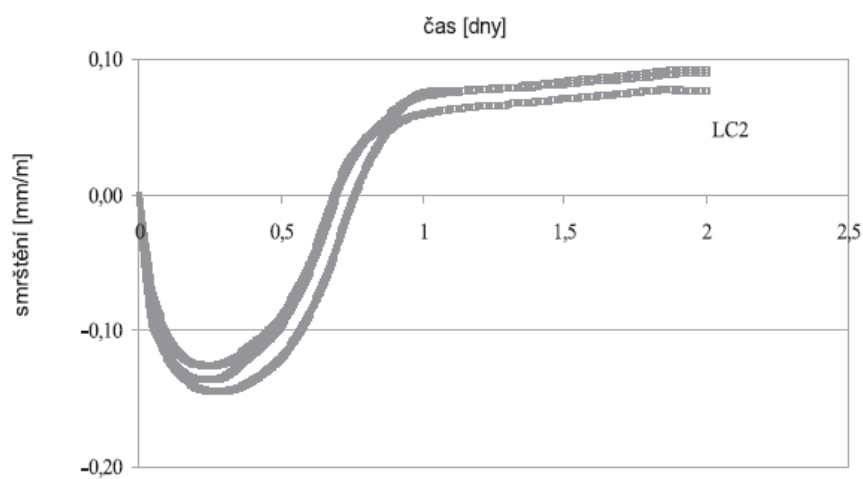


Obr. 17 Ilustrativní foto jedné zkušební sady během měření.

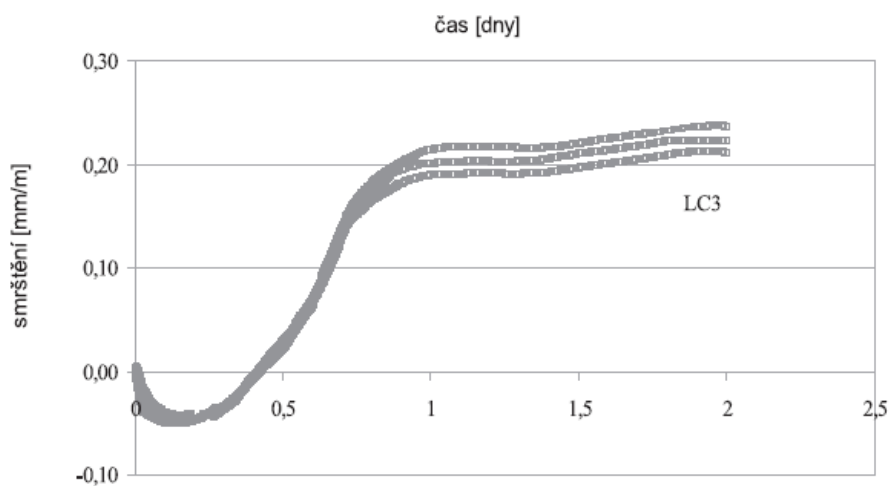
Z grafů je vidět, že všechny betony vykazovaly během měření podobné chování. Ihned po spuštění měření bylo u všech betonů zaznamenáno smršťování. Vzhledem k tomu, že povrch zkušebních těles byl ve všech případech přikrytý fólií, se lze domnívat, že se jedná o kontrakci způsobenou absorpcí vody a pojivové složky do zrn pórovitého kameniva. Svým způsobem lze tuto kontrakci nazvat autogenním smrštěním. Doba trvání a absolutní hodnota smrštění se lišila v závislosti na stupni před-nasycení pórovitého kameniva před jeho dávkováním do mísičeho zařízení. Největší smrštění, s celkovou dobrou trvání 7 hodin (od spuštění měření), bylo zaznamenáno u betonu LC1 (vysušené kamenivo), viz Obr. 18. Naopak nejmenší hodnota smrštění s nejkratší dobou trvání byla zaznamenána u betonu LC3 (kamenivo nasycené na 29 % hmotnostní vlhkosti), viz Obr. 20. Ve všech případech bylo také zaznamenáno prudké zbrzdění smršťování následované nabýváním betonu, trvajícím 14 až 21 hodin, v závislosti na stupni nasycení pórovitého kameniva.



Obr. 18 Průběh smrštění/nabývání betonu LC1 [60].

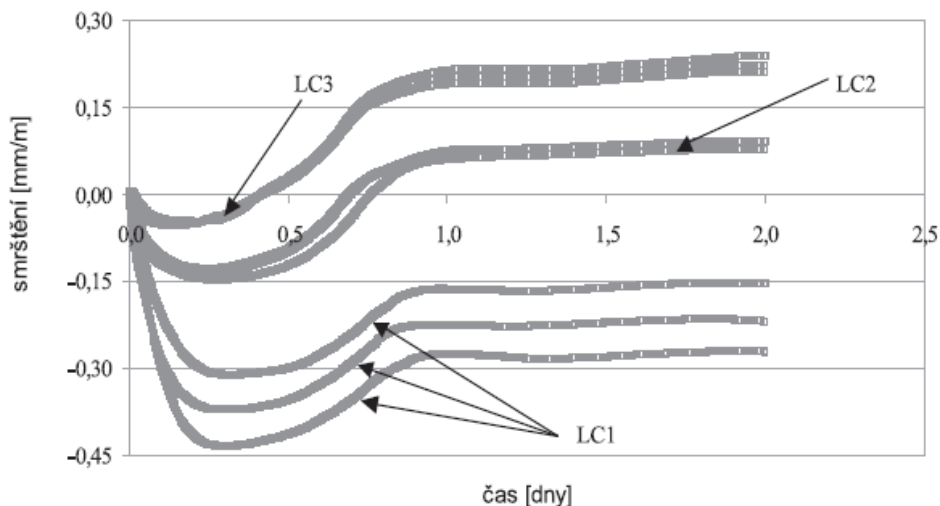


Obr. 19 Průběh smrštění/nabývání betonu LC2 [60].



Obr. 20 Průběh smrštění/nabývání betonu LC3 [60].

Z Obr. 21 je patrné, že ve všech případech bylo po 24 h měření zaznamenáno ustalování deformací. Tento efekt může být částečně ovlivněn konstrukcí měřicích žlabů. Pro zkoumání dalšího vývoje smrštění vysycháním je vhodné použít měřicí terče (viz kapitola 7.1) a pokračovat v dalším měření na zkušebním tělese vyjmutém ze žlabu a vystaveném volnému vysychání.



Obr. 21 Porovnání průběhu smrštění/nabývání betonu LC1, LC2 a LC3 [60].

8.2 Měření smrštění obyčejných betonů s různým obsahem cementu a plastifikátoru

Zkušenosti z posledních let ukazují, že je nezbytné stanovit hodnotu a vývoj smrštění ve dvou na sebe navazujících stádiích zrání betonů – v raném stáří tuhnutí a tvrdnutí (cca do 48 hodin) a v pozdějších stáří (48 hodin a více). Měření provedená v raném stáří zrání ukazují rozdíly ve vývoji objemových změn betonu, které nemohou být zaznamenány pomocí klasických měřicích technik, aplikovaných většinou po odformování zkušebních těles ve stáří 24 hodin.

Celkový závěr experimentu [61]: Měření provedená různými výzkumnými týmy ukázala, že nelze učinit obecné závěry na základě absolutních hodnot zjištěných deformací, ale spíše na základě trendu vývoje objemových změn zaznamenaného během provedeného testu. Provedený experiment tuto domněnku potvrzuje. Přestože deformace naměřené v raném stáří zrání betonu nebyly příliš významné z hlediska jejich absolutních hodnot, výsledky jsou velmi užitečné pro pochopení obecného chování studovaných betonů. Kontinuální měření hmotnostních úbytků vlivem volného vysychání povrchu v rané fázi zrání poskytlo užitečná data pro interpretaci vývoje naměřeného smrštění/nabývání. Měření ukázala, že velikost a průběh počátečního nabývání je ovlivněn množstvím cementu a vody. Dá se říci, že čím větší byla dávka cementu,

tím větší nabývání bylo zaznamenáno (viz Obr. 24). V období zaznamenaného nabývání byl současně zaznamenán úbytek hmotnosti zkušebních těles. Přidáním plastifikátoru došlo ke snížení hodnoty nabývání a ke změně celkového trendu vývoje počátečních délkových změn ve srovnání s referenčními betony bez plastifikátoru (viz Obr. 25 až Obr. 27). Z pohledu celkových deformací provedený experiment ukazuje, že dávka cementu ani plastifikátoru neměla zásadní vliv na absolutní hodnoty celkového smrštění zkoumaných betonů stanoveného ve stáří 300 dní. Rozdíly byly ale zaznamenány v časech ustalování deformací jednotlivých betonů. Naměřený vývoj smrštění velmi dobře koresponduje s naměřeným vývojem hmotnostních úbytků.

V následujících odstavcích jsou prezentovány výsledky dlouhodobého měření vývoje smrštění na obyčejných betonech, lišících se zejména množstvím cementu a plastifikační přísady. Pro experiment byl využit také váhový stůl a měřicí terče určené pro zabetonování do horního povrchu zkušebního tělesa (viz kapitoly 7.1 a 7.2). Výsledky byly publikovány v zahraničním impaktovaném časopise [61].

Základní specifikace zkoumaných betonů je uvedena v Tab. 4, složení jednotlivých betonů je uvedeno v Tab. 5 a základní vlastnosti čerstvých betonů jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 4 Základní specifikace vyrobených betonů [61].

| Assumed cement dosage [kg] | No plasticiser | Plasticiser 0.25% of cement mass |
|----------------------------|----------------|-------------------------------------|
| 300 | 0/1 | 1/1 |
| 350 | 0/2 | 1/2 |
| 400 | 0/3 | 1/3 |

Tab. 5 Složení obyčejných betonů [61].

| Components per 1 m ³ of fresh concrete | Units | Concrete ID | | | | | |
|---|-------|-------------|------|------|------|------|------|
| | | 0/1 | 0/2 | 0/3 | 1/1 | 1/2 | 1/3 |
| CEM I 42.5 R (Mokrá) | [kg] | 300 | 350 | 400 | 300 | 350 | 400 |
| Sand (Bratčice) 0–4 | [kg] | 925 | 875 | 825 | 925 | 875 | 825 |
| Aggregate (Olbramovice) 4–8 | [kg] | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 |
| Aggregate (Olbramovice) 8–16 | [kg] | 695 | 695 | 695 | 695 | 695 | 695 |
| Water | | | | | | | |
| Mixing | [kg] | 190 | 190 | 190 | 165 | 165 | 165 |
| In aggregate | [kg] | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Total | [kg] | 204 | 204 | 204 | 179 | 179 | 179 |
| Sika ViscoCrete 4035 | [kg] | 0 | 0 | 0 | 0.75 | 0.88 | 1.00 |
| w/c ratio ($w_{\text{mixing}}/\text{cement}$) | [—] | 0.63 | 0.54 | 0.48 | 0.55 | 0.47 | 0.41 |

Tab. 6 Základní vlastnosti čerstvých betonů [61].

| Concrete ID | 0/1 | 0/2 | 0/3 | 1/1 | 1/2 | 1/3 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bulk density of fresh concrete [kg/m ³] | 2,320 | 2,320 | 2,290 | 2,280 | 2,300 | 2,300 |
| Flow table [mm] | 410 | 390 | 420 | 360 | 350 | 370 |
| Air content [%] | 2.7 | 2.5 | 2.5 | 2.6 | 2.8 | 3.2 |

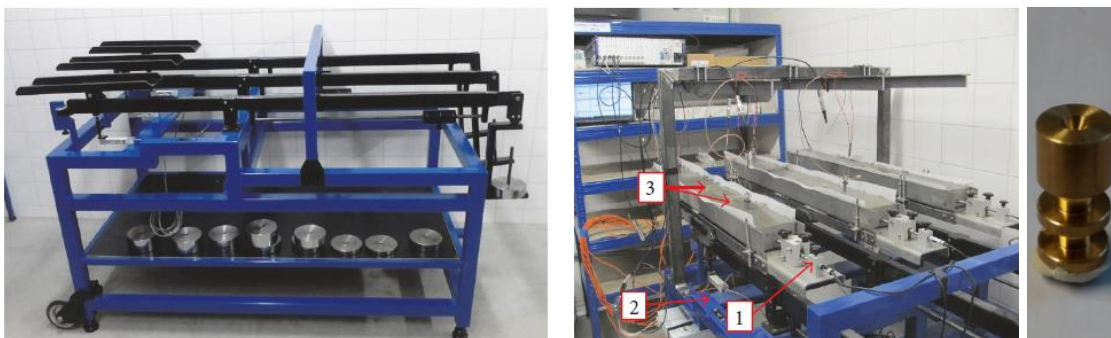
Pro měření byly použity měřicí žlaby s vnitřními rozměry 100 × 60 × 1000 mm. Pro zajištění volné deformace betonu uvnitř žlabu byla v tomto případě použita polyetylenová fólie tl. 2 mm (Mirelon). Podélné deformace byly měřeny po dobu cca 72 hodin v podélné ose zkušebního tělesa pomocí indukčnostního snímače opřené o pohyblivé čelo a zapojeného do datové ústředny (viz Obr. 22). Pro účely dlouhodobého měření bylo použito přídavné vybavení popsané v kapitole 7.1. Měřicí terče určené pro zabetonování do horního povrchu zkušebního tělesa byly před plněním žlabů zafixovány do pomocných rámců tak, aby se uprostřed délky zkušebního tělesa vytvořily dvě na sebe navazující měřicí základny o nominální délce 200 mm. Pomocné rámy byly odstraněny těsně před osazením žlabů na váhový stůl, tj. přibližně hodinu po uložení betonu do žlabů. Na takto připraveném zkušebním tělese bylo možné stanovit celkový vývoj smršťování betonu – od jeho uložení do žlabu až po dlouhodobé vysychání. První měření pomocí mechanického tenzometru (viz Obr. 23) bylo provedeno ihned po ukončení měření pomocí indukčnostního snímače, ještě před vyjmutím zkušebního tělesa ze žlabu. Druhé měření pak bylo provedeno bezprostředně po vyjmutí tělesa ze žlabu. Následující měření byla prováděna příložným tenzometrem v předem naplánovaných intervalech, kdy zpočátku bylo měření častější – jednou denně, poté se interval prodloužil na měření jedenkrát týdně, či měsíčně.

Poměrná přetvoření byla stanovena ve dvou na sebe navazujících fázích měření, a to v rané fázi zrání $\varepsilon_{ea}(t)$ dle vztahu (1) a po vyjmutí těles z měřicích žlabů $\varepsilon_{lt}(t)$ dle vztahu (2). Pro zobrazení celkového vývoje smrštění se použil vztah (3). Výpočetní vztahy jsou uvedeny v kapitole 7.1.

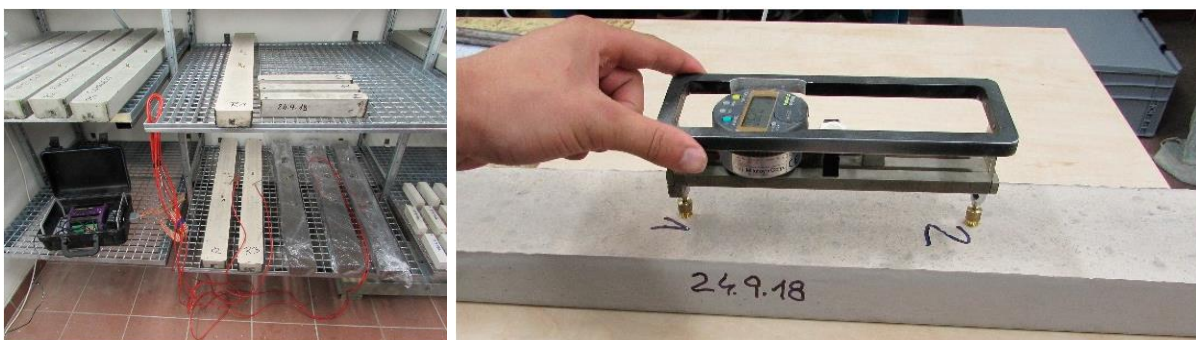
Souběžně s měření délkových změn byly také zaznamenávány úbytky hmotnosti zkušebních těles vlivem odpařování vody. Pro účely stanovení celkového úbytku hmotnosti betonu vlivem vysychání byla nejprve určena hmotnost čerstvého betonu v okamžiku naplnění měřicích žlabů. Pro účely dlouhodobého měření byla po odformování zkušebních těles opět stanovena jejich hmotnost, která byla použita pro navazující výpočet hmotnostních úbytků. Celkový hmotnostní úbytek se tedy stanovil jako součet krátkodobých Δm_{ea} a dlouhodobých Δm_{lt} úbytků hmotnosti. V období přibližně 72 hodin od zahájení měření byly hmotnostní úbytky kontinuálně zaznamenávány váhovými členy osazenými pod úložnými plošinami váhového stolu (viz Obr. 22). Každý váhový člen byl zapojen do datové ústředny a zaznamenával úbytek hmotnosti

samostatně. Podrobněji je o váhovém stole a postupu výpočtu hmotnostních úbytků pojednáno v kapitole 7.2.

Pro účely sledování hmotnostních úbytků nebyla zkušební tělesa po dobu celého měření nijak ošetřována. Během prvních 72 hodin byla uložena v laboratoři s teplotou $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $(83 \pm 3)\%$ a vysychala pouze horním povrchem. Po jejich odformování byla zkušební tělesa přemístěna do laboratoře s teplotou okolního vzduchu $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $(55 \pm 3)\%$ a uložena na porořosty tak, aby vysychala všemi povrchy.



Obr. 22 Ilustrativní foto jedné zkušební sady během měření: váhový stůl (vlevo); žlaby osazené na váhovém stole (uprostřed) – 1 – měřicí žlab s indukčností snímačem, 2 – váhový stůl, 3 – zabetonované měřicí terče; měřicí terč pro zabetonování do povrchu zkušební tělesa (vpravo) [61].

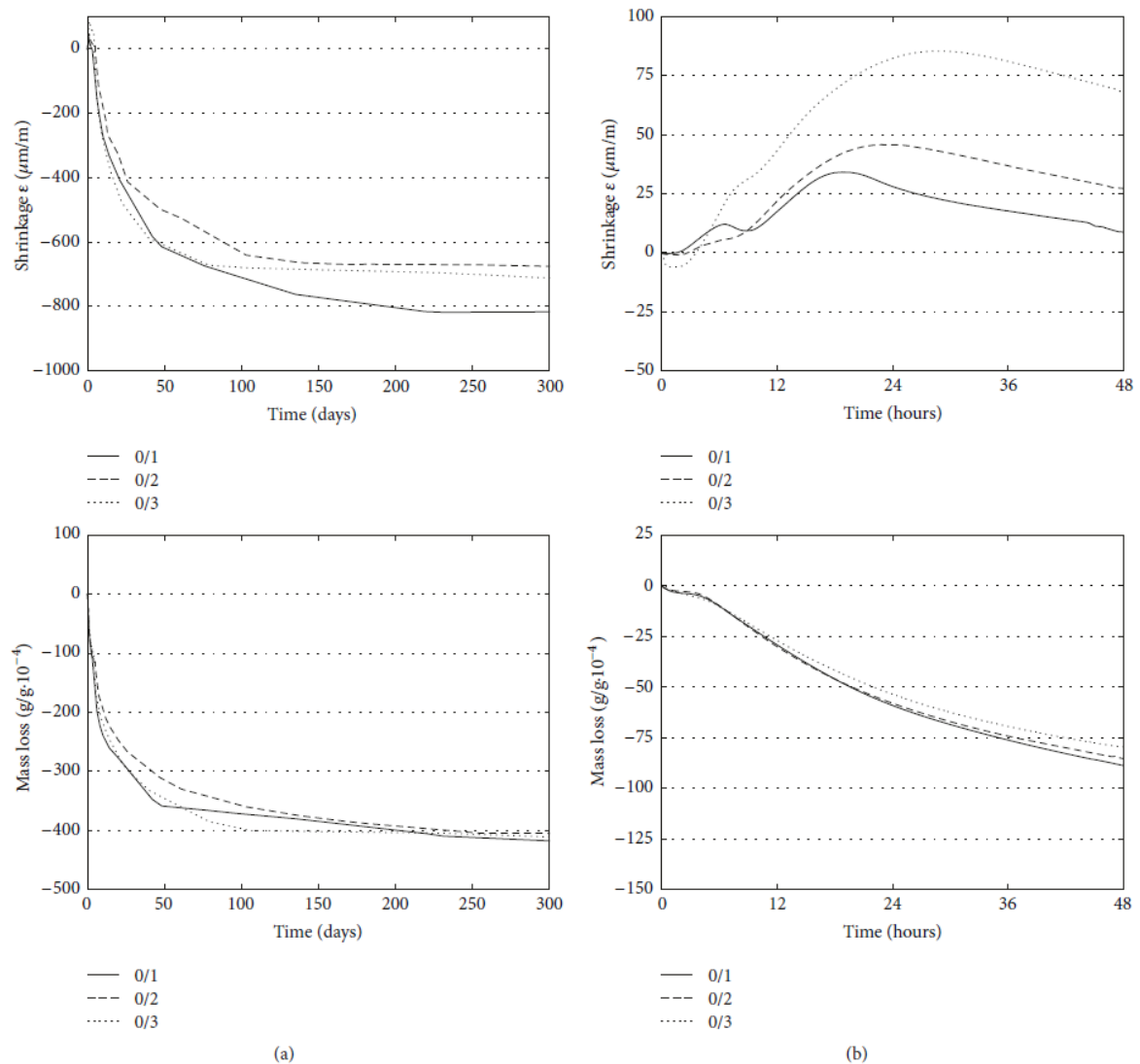


Obr. 23 Ilustrativní foto měření dlouhodobého smrštění mechanickým tenzometrem (Hollan) [61].

Z každého betonu byla vyrobena tři zkušební tělesa. Výsledky provedených měření zobrazené na následujících grafech představují aritmetický průměr dat tří nezávislých měření provedených pro jednotlivé betony. Na každém obrázku je vlevo vykreslen průběh celkových deformací a hmotnostních úbytků, tj. napojení krátkodobého měření ve žlabech a dlouhodobého měření po vyjmutí těles ze žlabů. Vpravo je pak detail záznamu měření deformací a hmotnostních úbytků v raném stáří zrání jednotlivých betonů, tj. data získaná měřením pomocí indukčnostního snímače a získaná vážením na váhovém stole. Obecně řečeno, sledované vlivy

– obsah cementu a plastifikátoru – nejsou příliš významné z hlediska absolutních hodnot celkových deformací. Pokud se jedná o vliv odlišného množství cementu (viz Obr. 24(a) vlevo nahoře), největší hodnota smrštění ve stáří betonu 300 dní byla zaznamenána pro beton 0/1. Nicméně absolutní hodnota smrštění pro beton 0/1 se od zbývajících dvou betonů (0/2 a 0/3) neliší o více než 150 $\mu\text{m/m}$. Vývoj hmotnostních úbytků zaznamenaný v průběhu měření je v podstatě stejný pro všechny tři vyšetřované betony (viz Obr. 24(a) vlevo dole). Poměrně zajímavý je ovšem záznam měření pořízeného v počátečním stádiu zrání sledovaných betonů. Na Obr. 24(b) vpravo nahoře jsou vidět rozdíly v chování jednotlivých betonů s odlišnou dávkou cementu během počátečních 48 hodin jejich zrání. Z obrázku je vidět, že u všech sledovaných betonů dochází krátce po zahájení měření k počáteční délkové expanzi. Doba trvání expanze se prodlužuje s narůstajícím množstvím cementu. U betonu 0/1 (dávka cementu je 300 kg/m^3) trvá období expanze cca 18 hodin, zatímco u betonu 0/2 (350 kg/m^3) je to 24 hodin a u betonu 0/3 (400 kg/m^3) je to 30 hodin. V období expanze současně dochází k úbytkům hmotnosti betonu vlivem odpařování vody z povrchu zkušebních těles (viz Obr. 24(b) vpravo dole). Ve stáří 48 hodin je úbytek hmotnosti vlivem vysychání horního povrchu přibližně 0,9 %, což je téměř $\frac{1}{4}$ hmotnostního úbytku zaznamenaného ve stáří 300 dní (4 %). Velikost počáteční expanze/nabývání je závislá na množství cementu a vody v betonu. Výsledky ukazují, že čím vyšší je dávka cementu, tím větší nabývání je zaznamenáno. Fenomén nabývání je silně závislý na chemickém složení a měrném povrchu použitého cementu a je také ovlivněn rozložením vlhkosti v pórové struktuře betonu. Jak naznačila ve své práci také E. Holt [4], expanze betonu může být také spojena s krvácením betonu, tzn. s množstvím vody, které vystoupí na povrch betonu po jeho uložení do formy (po stabilizaci všech částic disperzního systému čerstvého betonu). Po dokončení procesu plastického sedání je tato přebytečná voda vtahována z povrchu betonu zpět do pórové struktury zrajícího betonu a zaplňuje tak póry vytvořené během hydratace cementu. Tato re-absorpce může způsobit nabývání. Podobné vysvětlení lze nalézt v reportu RILEM Technical Committee [16], kde je tato počáteční expanze nazývána jako autogenní nabývání. Dále může být toto nabývání spojeno s tvorbou některých hydratačních produktů, které mají větší molární objem než je objem původních reaktantů. V neposlední řadě je nutné poznamenat, že teplo generované během hydratace cementu má podstatný vliv na zvětšování objemu vlivem teplotní roztažnosti. Množství uvolněného hydratačního tepla může být přibližně 200 J/g cementu během prvních 24 hodin zrání betonu. Po vyjmutí zkušebních těles ze žlabů a jejich ponechání volnému vysychání všemi povrchy dochází k rychlejšímu odpařování vody z betonu, což vede ke smrštění vysycháním zkušebního

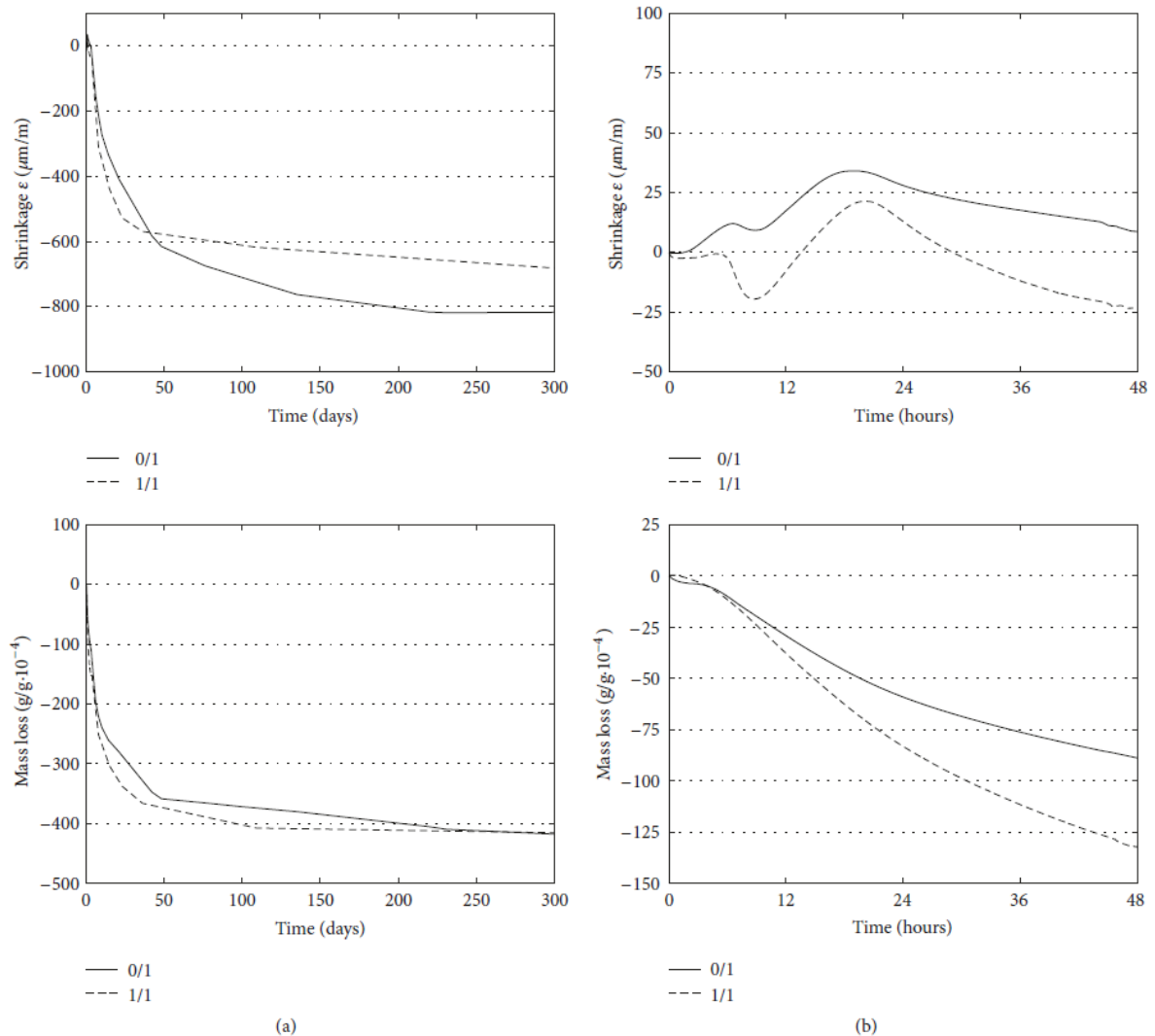
tělesa. Velikost tohoto smrštění je mnohem větší než velikost počátečního nabývání (viz Obr. 24).



Obr. 24 Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/1, 0/2, a 0/3 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61].

Pokud srovnáme vývoj smrštění betonů s a bez přidavku plastifikátoru, lze říci, že přidání plastifikátoru nemělo významný vliv na konečné hodnoty smrštění jednotlivých betonů (viz Obr. 25 – Obr. 27). Z grafů lze ale pozorovat určité odlišnosti v časech, kdy dochází k ustalování deformací. Betony, které neobsahovaly plastifikátor, vykazovaly relativně strmý nárůst smrštění přibližně do stáří 90 dní, poté se deformace začaly ustalovat. U betonů obsahujících plastifikátor se nárůst smrštění zpomalil přibližně ve stáří 30 dní. Největší rozdíl v hodnotách smrštění byl zaznamenán pro betony 0/1 a 1/1 (cca $150 \mu\text{m}/\text{m}$, viz Obr. 25(a) nahore). Hodnoty a vývoj hmotnostních úbytků jsou pro oba betony stejné (viz Obr. 25(a) dole). Podobné výsledky vývoje smrštění byly zaznamenány pro zbývající dvě dvojice betonů 0/2

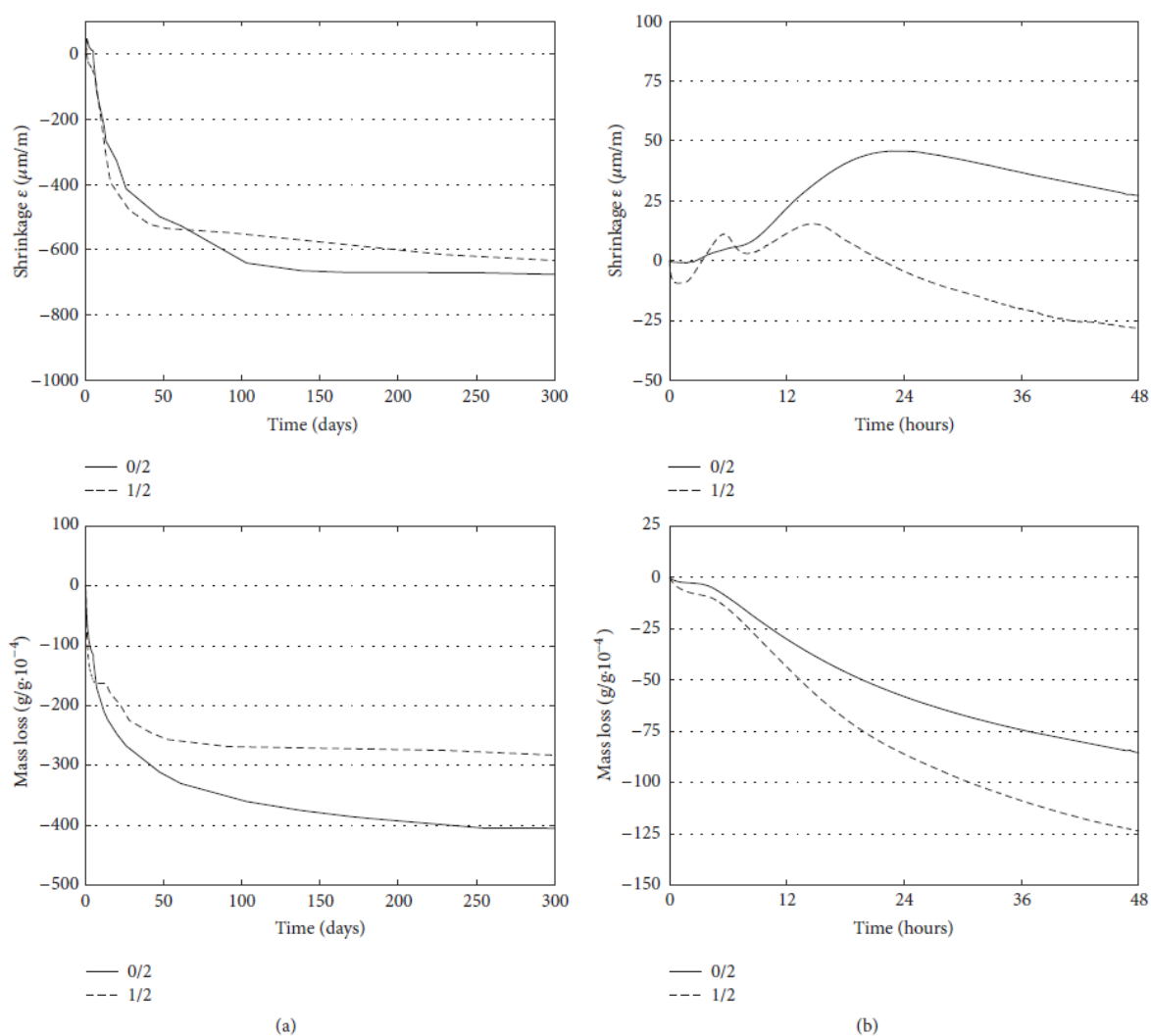
a 1/2 a 0/3 a 1/3 (viz Obr. 26 a Obr. 27). Tyto výsledky dobře korespondují s naměřeným vývojem hmotnostních úbytků souvisejících s dávkou cementu a vody (viz Tab. 5).



Obr. 25 Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/1 a 1/1 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61].

Výsledky zobrazené v dolní části na Obr. 25(b), Obr. 26(b) a Obr. 27(b) ukazují, že v raném stádiu zrání vykazuje úbytek hmotnosti rychlejší nárůst u betonů obsahující plastifikátor (ve srovnání k ekvivalentu betonu bez plastifikátoru). Lze pozorovat, že tento trend se u betonu 1/2 a 1/3 mění přibližně ve stáří 7 dní (viz Obr. 26(b) a Obr. 27(b) dole). Poměrně zajímavé jsou opět výsledky vývoje smrštění získané měřením v rané fázi zrání betonů obsahujících plastifikátor. Všechna provedená měření vykazují podobný trend. Vlivem přídavku plastifikátoru došlo k redukci hodnoty počátečního nabývání. Počáteční vývoj smrštění u betonů obsahujících plastifikátor je odlišný ve srovnání s ekvivalentním betonem bez plastifikátoru. Přídavek plastifikátoru je spojen jednak s redukcí vody, což ovlivňuje proces

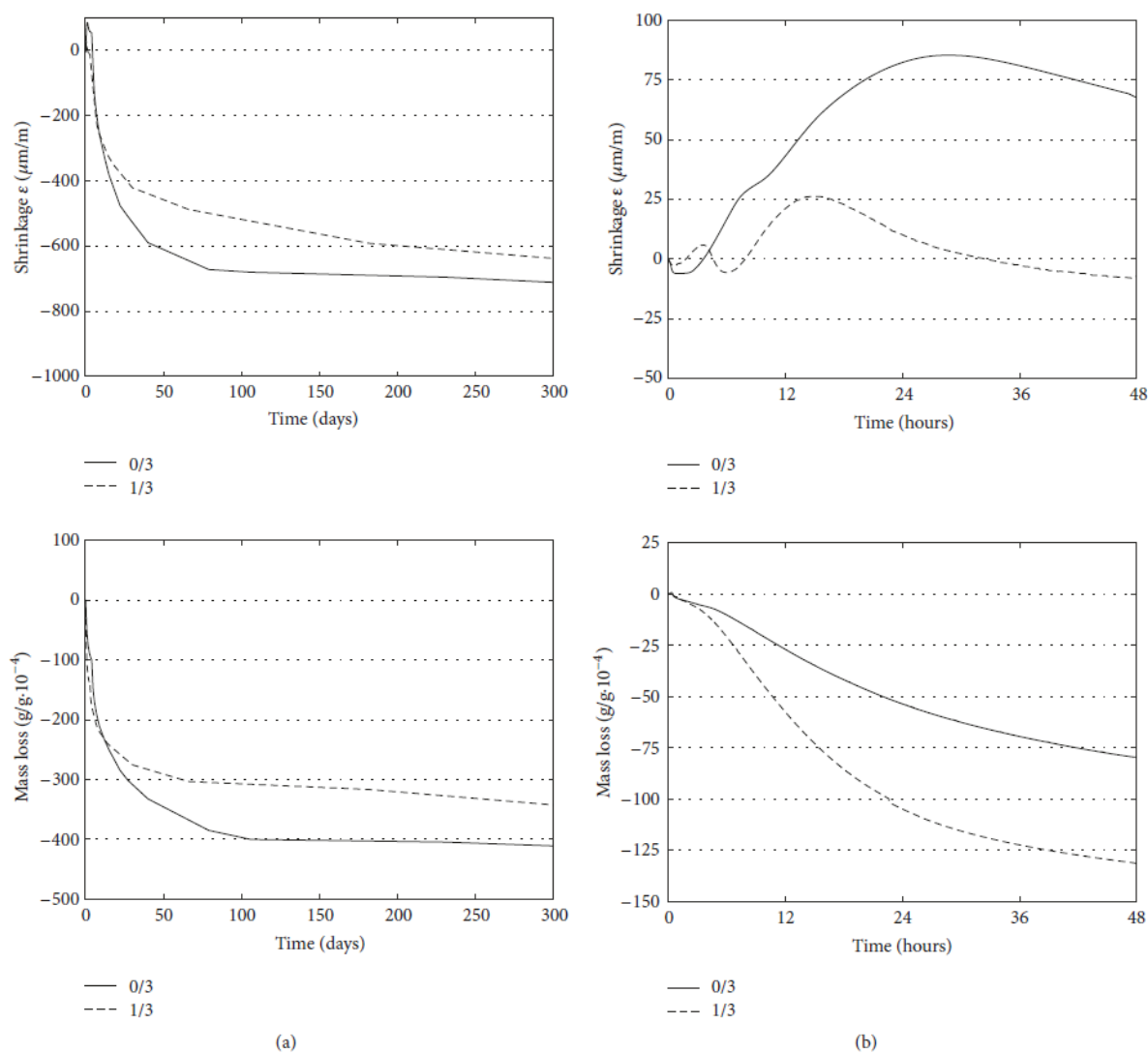
tuhnutí a tvrdnutí, a také s vývojem tepleného toku a uvolňováním hydratačního tepla během prvních 24 hodin zrání betonu. Je obecně známo a také bylo prokázáno, že přídavek plastifikátoru má podstatný vliv na průběh hydratace cementu [62, 63]. Přídavek plastifikátoru zpomaluje hydrataci cementu a má rozhodující vliv na její celkový průběh. Míra retardace hydratace cementu je silně závislá na množství a vlastnostech cementu a plastifikátoru použitých pro výrobu betonu.



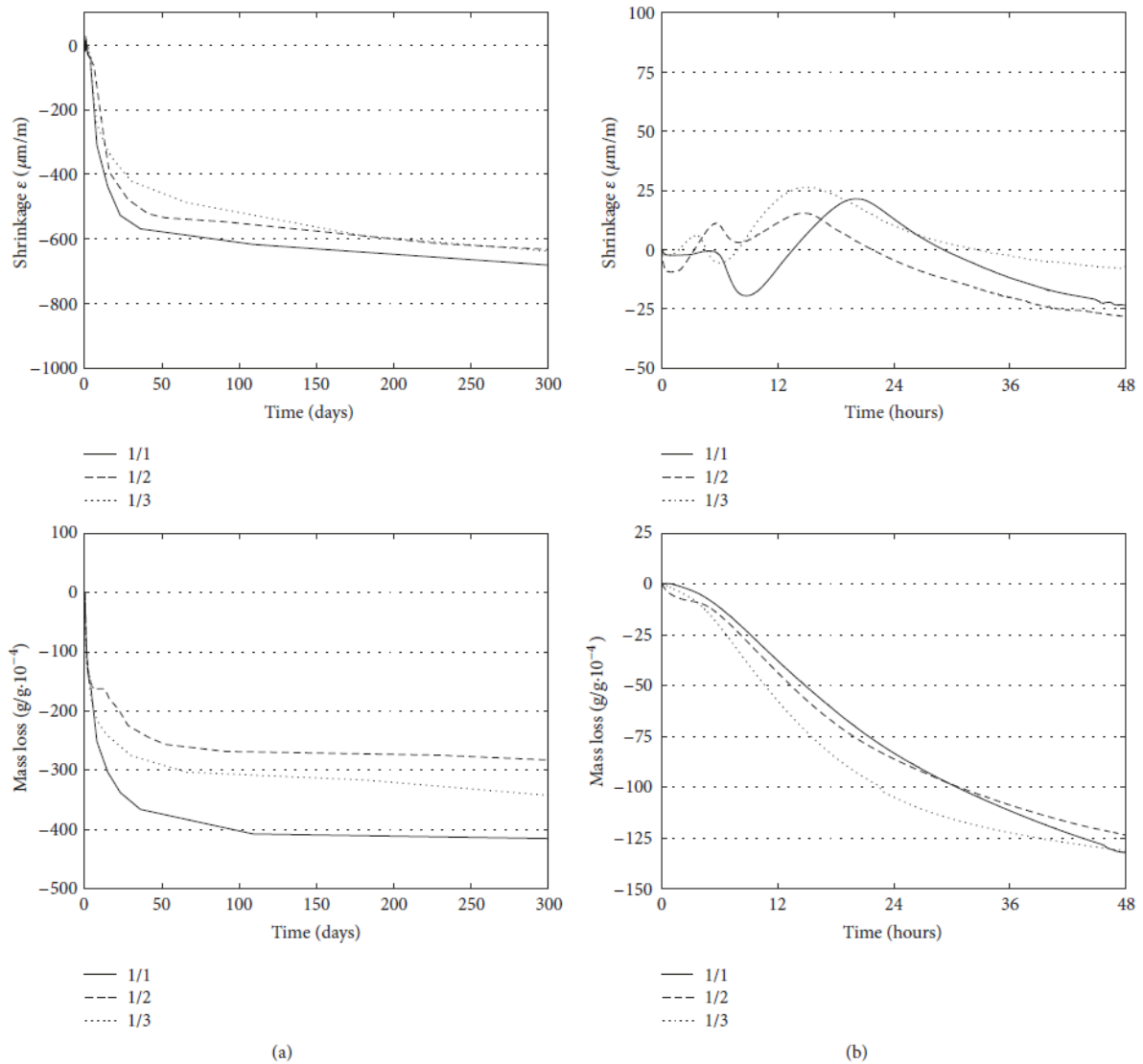
Obr. 26 Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/2 a 1/2 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61].

Naměřené výsledky ukazují odlišný vliv přídavku stejného procenta plastifikátoru (0,25 % z hmotnosti cementu) u betonů s odlišným množstvím cementu. U betonů s obsahem cementu vyšším, tedy 350 a 400 kg/m^3 (1/2 a 1/3) byla zaznamenána výrazná redukce hodnoty a doby trvání počátečního nabývání, což vedlo k výraznému urychlení nástupu fáze smršťování ve srovnání s betony bez plastifikátoru (viz Obr. 26 (b), Obr. 27(b) nahoře). Na druhou stranu,

nezávisle na obsahu cementu, všechny betony obsahující plastifikátor (1/1, 1/2 a 1/3) vykazují podobné chování během celé sledované doby zrání (viz Obr. 28 a Obr. 29). Vývoj objemových změn v rané fázi zrání betonu velmi dobře koresponduje s vývojem tepelného toku stanoveného pro jednotlivé záměsi [62]. Nejmenší vliv přídavku plastifikátoru byl zaznamenán u betonu 0/1 (viz Obr. 25), kdy beton 1/1 obsahoval ve srovnání s ostatními betony nízký obsah cementu a vysoký w/c (viz Tab. 4 a Tab. 5).

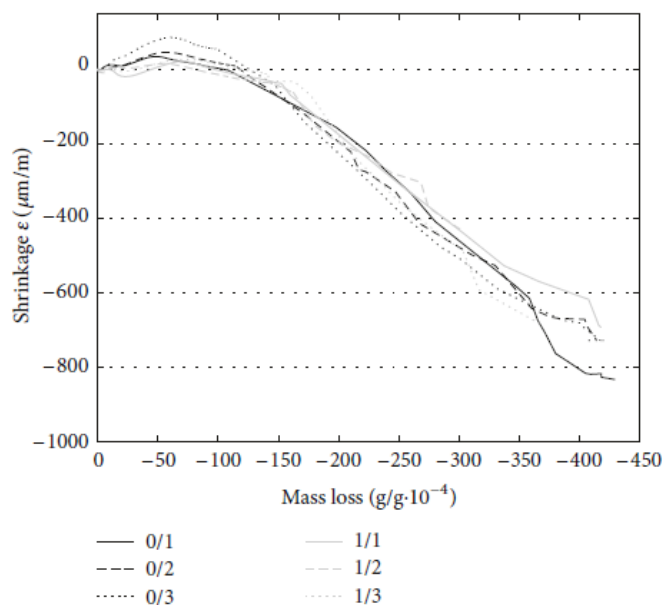


Obr. 27 Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 0/1 a 1/1 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61].



Obr. 28 Vývoj smrštění a nabývání a hmotnostních úbytků pro beton 1/1, 1/2 a 1/3 ((a): celkový vývoj smrštění; (b): měření v raném stádiu zrání) [61].

Poměrně zajímavé výsledky lze pozorovat ze závislosti vývoje smrštění a hmotnostních úbytků (viz Obr. 29). Všechny betony vykazují obdobný trend této závislosti. Drobné odlišnosti lze pozorovat na konci získaných křivek, které ukazují vliv rozdílného času ustalování deformací a hmotnostních úbytků.



Obr. 29 Závislost smrštění a hmotnostních úbytků zjištěných po celou dobu zrání jednotlivých betonů [61].

8.3 Měření smrštění na betonech typu SCC

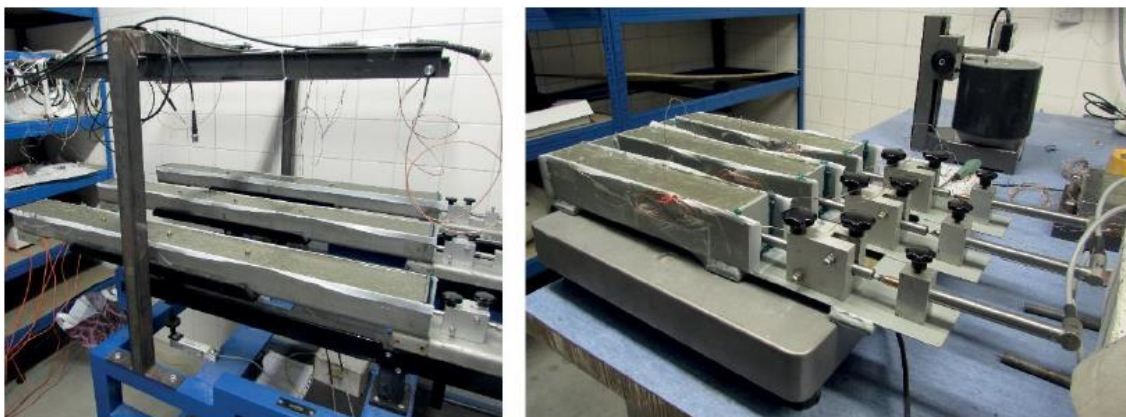
Provedený experiment byl zaměřen na stanovení vlivu velikosti zkušebních těles na počáteční a celkový vývoj smrštění samozhutitelných betonů (SCC) s maximálním zrnem kameniva 16 mm. V tomto případě neodpovídá rozměr zrna kameniva požadavkům na minimální rozměr zkušebních těles, který by měl být 3,5 až 5 krát větší než maximální zrno kameniva. Normy řady ASTM připouští poměr zrna a rozměru vzorku 1:3. U provedeného experimentu odpovídají příčné rozměry zkušebních těles přibližně trojnásobku maximálního zrna kameniva. Pro měření byly použity zkušební žlaby s rozměry 100 × 60 × 1000 mm a 50 × 50 × 300 mm (viz kapitola 7).

Celkový závěr experimentu [51]: I přes nepříliš vhodný poměr zrna kameniva k příčným rozměrům menších žlabů neprokázal provedený experiment vliv velikosti zkušebních těles ani na vývoj smrštění v rané fázi zrání, ani na celkový vývoj a absolutní hodnotu smrštění měřeného do ustálení deformací. Na základě provedené statistické analýzy použitím dvouvýběrového t-testu lze říci, že měření získané z obou velikostí zkušebních žlabů poskytlo srovnatelné výsledky. Jako velmi přínosné se v tomto případě ukázalo měření v rané fázi zrání, kdy byla ve stáří 12 hodin zaznamenána deformace 1000 μm/m u všech sledovaných betonů, což je nezanedbatelná hodnota. Výsledky byly prezentovány na mezinárodní konferenci v Tokiu [51],

plná verze článku prošla recenzním řízením a připravuje se k tisku. Detaily experimentu a výsledky jsou uvedeny v následujících odstavcích.

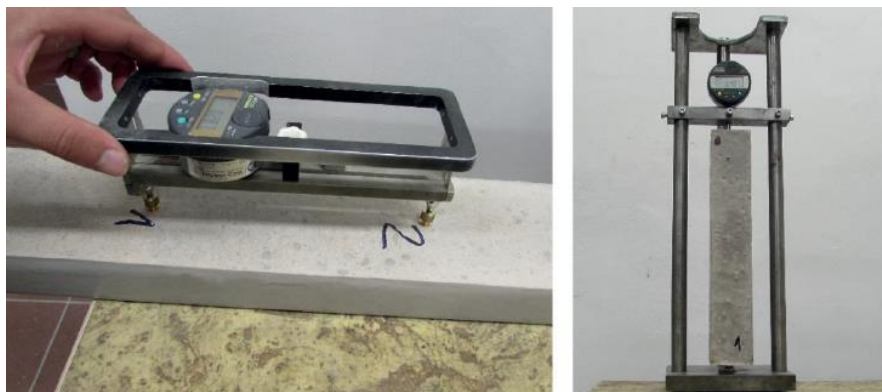
Pro účely experimentu byly vyrobeny tři záměsi SCC betonů. Pro jejich výrobu bylo použito kamenivo tří frakcí, hrubé kamenivo frakce 8/16 a 4/8 a drobné kamenivo frakce 0/4. Betony se odlišovaly dávkou vápence a popílku. Dávka plastifikátoru odpovídala 1,5 % hmotnosti cementu a vodní součinitel pro jednotlivé záměsi odpovídal hodnotám 0,31, 0,32 a 0,33. Vzhledem k ochraně duševního vlastnictví spolupracujícího výrobce betonu není v článku uvedeno přesné složení jednotlivých betonů. Jednotlivé záměsi byly interně označeny jako C1, C2 a C3 s indexem „s“ a „l“ pro účely odlišení malých (s) a velkých zkušebních těles (l). Z každého betonu byly vyrobeny dvě sady zkušebních těles, přičemž jedna sada obsahovala vždy tři zkušební tělesa o rozměrech $100 \times 60 \times 1000$ mm (l) a $50 \times 50 \times 300$ mm (s) s označením A, B a C jednotlivých těles ve zkušební sadě. Všechna zkušební tělesa byla po celou dobu zrání umístěna v laboratoři s teplotou okolního prostředí (21 ± 2) °C a relativní vlhkostí vzduchu (55 ± 10) %. Po celou dobu měření, včetně rané fáze zrání, nebyl povrch betonu nijak chráněn proti vysychání.

Jako separační fólie byla v tomto případě použita teflonová fólie, která u obou typů žlabů pokrývala vnitřní povrch obou podélných stran a dno a byla podtažena pod posuvným čelem žlabů. Pro účely dlouhodobého měření byly do horního povrchu zkušebních těles $100 \times 60 \times 1000$ mm zabetonovány měřicí terče, které sloužily jako základny pro měření příložným tenzometrem typu Hollan. U těles $50 \times 50 \times 300$ mm byly měřicí kontakty našroubovány do protějších čel zkušebních těles ihned po jejich vyjmutí ze žlabů. Podrobněji je měřicí zařízení včetně vybavení popsáno v kapitole 7 nebo u experimentu popsaného v kapitole 8.2.



Obr. 30 Měření smrštění v rané fázi zrání – měřicí žlaby $100 \times 60 \times 1000$ mm (vlevo), měřicí žlaby $50 \times 50 \times 300$ mm (vpravo) [51].

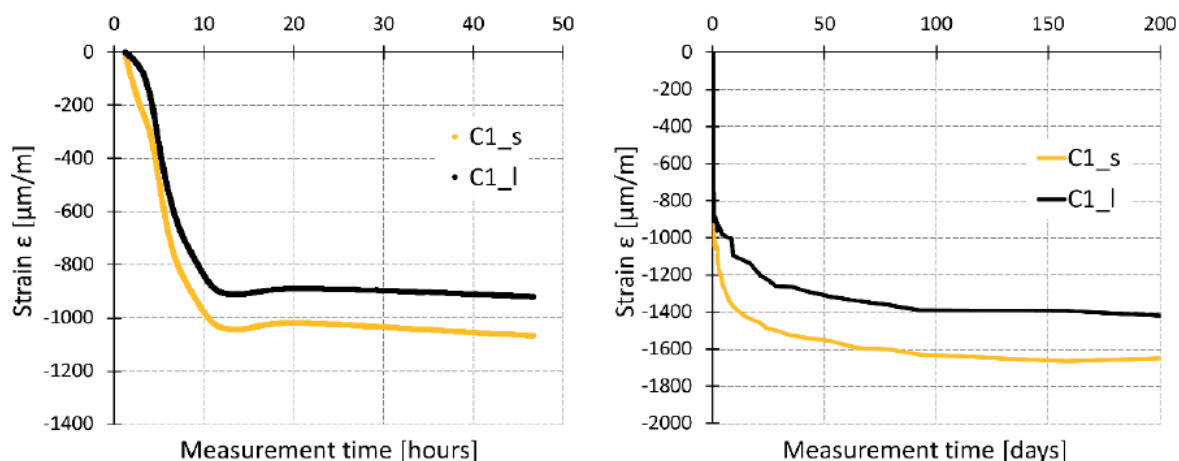
Na Obr. 30 je zobrazena konfigurace měření v raném stáří zrání, na Obr. 31 je znázorněna konfigurace měření pro dlouhodobé sledování vývoje smrštění vysycháním.



Obr. 31 Dlouhodobé měření po odformování – Hollanův přiložný tenzometr pro tělesa $100 \times 60 \times 1000$ mm (vlevo), stojatý dilatometr pro tělesa $50 \times 50 \times 300$ mm (vpravo) [51].

V rané fázi zrání byla také kontinuálně zaznamenávána vnitřní teplota betonu pomocí vloženého teplotního čidla ve formě drátu zapojeného do datové ústředny MS6 (Comet).

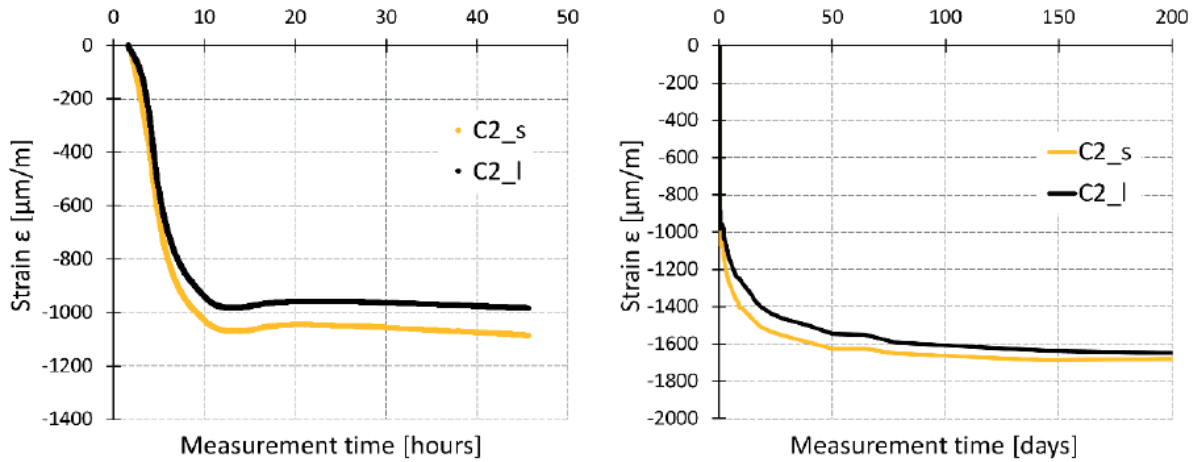
Poměrná přetvoření byla pro obě velikosti zkušebních těles stanovena ve dvou na sebe navazujících fázích měření, a to pro zkušební tělesa $100 \times 60 \times 1000$ mm dle vztahu (1) až (3) a pro tělesa $50 \times 50 \times 300$ mm dle vztahu (1), (7) a (3). Výpočetní vztahy jsou uvedeny v kapitole 7.1 a 7.3.



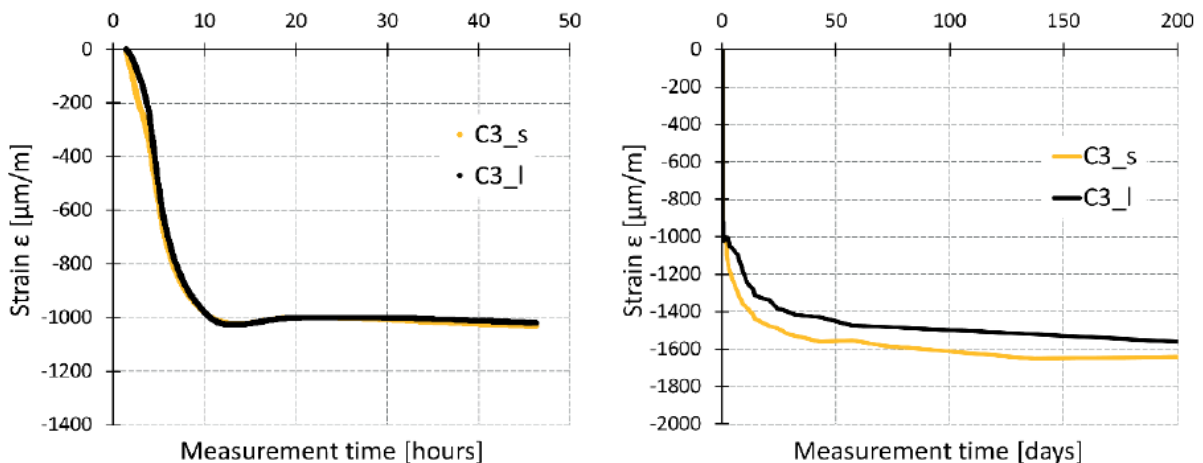
Obr. 32 Vývoj smrštění stanovený pro beton C1: detail měření během prvních 48 hodin (vlevo), celkový průběh smrštění od počátku do stáří 200 dní (vpravo) [51].

Výsledky měření jsou zobrazeny graficky na Obr. 32 až Obr. 34 a v tabulce Tab. 7. Všechny křivky znázorňují průměrný vývoj smrštění stanovený pro jednotlivé betony a zkušební sady

ze tří nezávislých měření. Vývoj smrštění pro tělesa o rozměrech $100 \times 60 \times 1000$ mm je vždy znázorněn černou barvou, pro tělesa o rozměrech $50 \times 50 \times 300$ mm pak žlutou barvou.



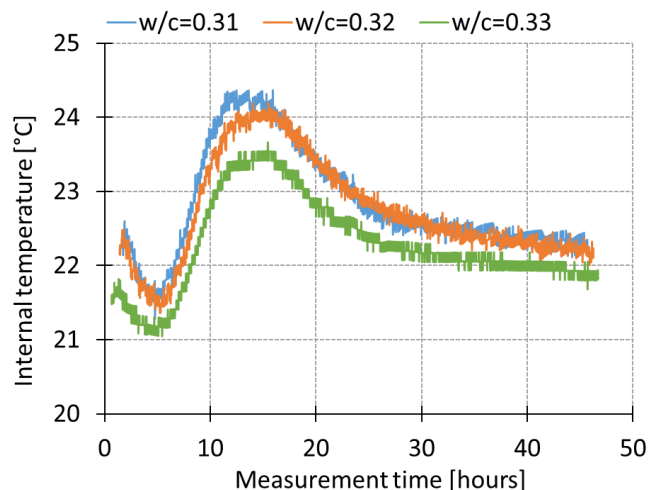
Obr. 33 Vývoj smrštění stanovený pro beton C2: detail měření během prvních 48 hodin (vlevo), celkový průběh smrštění od počátku do stáří 200 dní (vpravo) [51].



Obr. 34 Vývoj smrštění stanovený pro beton C3: detail měření během prvních 48 hodin (vlevo), celkový průběh smrštění od počátku do stáří 200 dní (vpravo) [51].

Ze získaných výsledků je možné pozorovat strmý nárůst smrštění během prvních 12 hodin zrání, po němž následovalo prudké zpomalení smrštění následované mírnou expanzí a následným pozvolným smršťováním. Toto prudké zpomalení odpovídá době dosažení maximální teploty uvnitř zkušebních těles (viz Obr. 35). Vzhledem k tomu, že zkušební tělesa vysychala pouze horním povrchem, byl další vývoj smrštění zaznamenán v období mezi 20 a 46 hodinami zrání velmi pozvolný až zanedbatelný. Ve stáří betonu přibližně 46 hodin byla všechna zkušební tělesa vyjmuta z měřicích žlabů, což vyvolalo další nárůst smrštění vlivem

vysychání zkušebních těles všemi povrchy. Z grafických výstupů je patrné, že velikost tělesa neovlivnila ani vývoj ani absolutní hodnotu smrštění v obou fázích měření. Mírný rozdíl je patrný u betonu C1, u něhož bylo zaznamenáno mírné krvácení po uložení čerstvého betonu do velkých žlabů.



Obr. 35 Vývoj vnitřních teplot měřených v betonu uloženém ve žlabech 100×60×1000 mm smrštění.

Tab. 7 Hodnoty smrštění pro všechny tři sledované betony ve stáří 48 hodin a 200 dní: jednotlivá měření, střední hodnoty a výběrové směrodatné odchylky (s.s.d.) pro obě velikosti zkušebních těles [51].

| Specimen: age | Concrete C1 | | Concrete C2 | | Concrete C3 | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | large | small | large | small | large | small |
| A: 48 hours [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -850 | -996 | -918 | -1207 | -1039 | -1077 |
| B: 48 hours [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1050 | -1137 | -1083 | -1062 | -1070 | -967 |
| C: 48 hours [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -860 | -1070 | -948 | -985 | -946 | -1053 |
| average: 48 hours [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -920 | -1068 | -983 | -1085 | -1018 | -1032 |
| s.s.d.: 48 hours [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 113 | 71 | 88 | 113 | 64 | 58 |
| A: 200 days [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1373 | -1462 | -1595 | -1854 | -1642 | -1672 |
| B: 200 days [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1575 | -1773 | -1753 | -1645 | -1640 | -1448 |
| C: 200 days [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1372 | -1706 | -1591 | -1538 | -1459 | -1801 |
| average: 200 days [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1440 | -1647 | -1646 | -1679 | -1580 | -1641 |
| s.s.d.: 200 days hours [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 117 | 164 | 92 | 160 | 105 | 179 |

8.4 Měření smrštění na betonech typu SCC HPC s nízkým w/c

Proces smršťování patří mezi jednu z nejvíce problematických charakteristik vysokohodnotných betonů (HPC). Vzhledem k vysokému poměru pojivové složky a kameniva (b/a) jsou tyto betony vystaveny zvýšenému vzniku trhlin vlivem účinků smršťování. Navíc se

díky nízkému w/c zvyšuje riziko výskytu autogenního smrštění. Vzhledem k odlišnému chování obyčejného betonu (NSC) a HPC v rané fázi zrání nejsou běžné techniky používané pro měření smrštění pro NSC zcela vhodné pro stanovení celkového vývoje smrštění u HPC. Z důvodu zvýšeného rizika výskytu autogenního smrštění je nutné zahájit měření u HPC co nejdříve po jeho uložení do formy [1], [64]. V tomto případě je tedy nutné využít přístrojové vybavení, které umožní spustit měření a zaznamenávat změny délky co nejdříve po uložení betonu do zkušební formy. Jak je uvedeno v kapitole 6, jednou z možností je použití strunových a odporových tenzometrů nebo využití měřicích žlabů.

V následujících odstavcích jsou uvedeny výsledky poměrně rozsáhlého experimentu, které byly publikovány v zahraničním impaktovaném časopise [50]. Experiment byl zaměřen na stanovení celkového vývoje smrštění HPC betonu, s maximálním zrnem kameniva 8 mm, použitím měřicích žlabů s rozměry $100 \times 60 \times 1000$ mm a $50 \times 50 \times 1000$ mm. Do zkušebních těles uložených ve žlabech s rozměry $100 \times 60 \times 1000$ mm byly navíc zabetonovány speciální typy strunových tenzometrů s nízkou tuhostí. Smrštění bylo měřeno souběžně na dvou základních sadách zkušebních těles, přičemž jedna sada těles byla po celou dobu měření vystavena účinkům volného vysychání (včetně rané fáze zrání) a druhá sada těles zrála v autogenních podmínkách. V rámci experimentu bylo sledováno několik faktorů. Jedním z nich bylo porovnání vývoje smrštění zaznamenaného strunovým tenzometrem s vývojem smrštění pořízeným kombinací indukčnostního snímače a následného měření pomocí příložného tenzometru, což umožnilo zkoumat rozdíl mezi vývojem smrštění v jádru a na povrchu zkušebního tělesa. Pro zdůraznění vlivu okamžiku zahájení měření a okamžiku zahájení vyhodnocení naměřených dat byla získaná data vynulována v okamžiku zahájení měření a v okamžiku doby tuhnutí, stanovené na základě naměřené vnitřní teploty betonu. Dále byl zkoumán vliv velikosti těles na počáteční a celkový vývoj smrštění. Jedním z cílů bylo také ukázat vztah mezi použitým přístrojovým vybavením a zhodnotit možnosti jejich vzájemného zastoupení pro měření celkového vývoje smrštění. Hlavním důvodem pro jejich vzájemnou substituci je snížení nákladů na měření.

Celkový závěr experimentu [50]: Provedený experiment ukázal, že obě použité techniky měření (zabetonovaný strunový tenzometr a měřicí žlab) jsou vhodné pro stanovení celkového vývoje smrštění – od okamžiku uložení čerstvého betonu po dlouhodobé měření délkových změn ztvrdlého betonu (včetně autogenního smrštění). Obě měřicí techniky poskytují stejný trend vývoje smrštění až do stáří betonu 60 dní. Rozdíl středních hodnot autogenního smrštění, zaznamenaných jednotlivými měřicími technikami, byl u zkoumaného betonu v období

12 hodin až 60 dní byl přibližně 20 %. Pro smrštění vysycháním byl zaznamenán největší rozdíl v období nástupu vnitřní teploty betonu (30 %) a zmenšoval se se zráním betonu, kdy ve stáří 60 dní byl rozdíl hodnot smrštění získaných různými měřicími technikami přibližně 10 %. Poté se rozdíly mezi měřicími technikami zvětšovaly, pravděpodobně kvůli odlišné pozici měřicích bodů. Tento poznatek je důležitý z hlediska dlouhodobého měření, protože měření je většinou ukončeno po ustálení hodnoty smrštění. Z pohledu dlouhodobého měření mohou tenzometry zabudované dovnitř zkušebního tělesa poskytnout podhodnocenou nebo nesprávnou hodnotu smrštění pro betonové prvky, jejichž povrch je vystaven vysychání. Důvodem je rozdílná rychlost vysychání jádra a povrchu prvku. Provedený experiment ukázal, že zvolený typ tenzometru byl schopen zaznamenávat smrštění ve stáří betonu větším než 4 hodiny, což odpovídá období kolem dosažení doby tuhnutí zkoumaného betonu. Naopak měřicí žlaby byly schopny zaznamenávat změny délky mnohem dříve, již v době počátečního nárůstu vnitřní teploty betonu. Dále bylo prokázáno, že čas t_0 (nulový čas pro zahájení vyhodnocení dat) má zásadní vliv na výsledné hodnoty smrštění zkoumaného SCC HPC. V rámci experimentu byly zvoleny dva časy t_0 , v prvním případě odpovídající době zahájení měření a ve druhém případě odpovídající době tuhnutí. Rozdíl v absolutních hodnotách smrštění vlivem odlišného přístupu pro volbu času t_0 může být až 50 % v případě vyhodnocení měření smrštění vysycháním a až 20 % v případě vyhodnocení měření autogenního smrštění. Provedené měření také ukázalo, že čas t_0 může mít významný dopad na provedené závěry ohledně vlivu velikosti tělesa, obzvláště pokud je měření zahájeno ihned po uložení betonu do žlabu. Ukázalo se, že vlivem kapilárního sání je velikost deformací zaznamenaných na betonu v plastické fázi zrání ovlivněna velikostí zkušebního tělesa. Z důvodu velmi brzkého zahájení měření zahrnuje křivka smrštění také plastickou a semi-plastickou složku smrštění, které nejsou zcela proporcionální k rychlosti vysychání betonu. V tomto případě je nezbytné vztáhnout závěry plynoucí z provedeného měření k dobám zahájení měření a vyhodnocení dat.

Pokud se jedná o náklady na provedená měření, lze říci, že se budou lišit pro jednotlivé země v závislosti na dostupnosti měřicích zařízení na místním trhu. V tomto konkrétním případě byly náklady na jeden kus strunového tenzometru 160 USD (dovoz z USA), tj. 480 USD na jednu standardní zkušební sadu. Jedná se o jednorázové měřicí zařízení. Na druhou stranu, měřicí žlaby lze použít pro měření smrštění opakovaně, čímž se náklady na měření mohou snížit až o 50 %. Hlavní nevýhodou měřicích žlabů je jejich pořizovací cena, kdy trojice žlabů vybavených indukčnostními snímači je cca 6000 USD, což odpovídá nákladům na 12 zkušebních sad vybavených výše uvedeným strunovým tenzometrem. Pro volbu měřicího

zařízení je tedy nutné zvážit všechny faktory, včetně četnosti prováděných měření smrštění v dané laboratoři.

V následujících odstavcích jsou uvedeny stěžejní detaily provedeního experimentu a komentáře k dosaženým výsledkům, podrobně viz [50].

Pro experiment byl záměrně vybrán speciální samozhutnitelný vysokohodnotný beton (SCC HPC) s maximálním zrnem kameniva 8 mm. Tento typ betonu byl zvolen s ohledem na koncepci plánovaného experimentu, kdy bylo nutné minimalizovat výrobní vlivy na výsledek provedeního měření. Složení betonu bylo primárně navrženo pro výrobu prefabrikovaných prvků s využitím místních zdrojů surovin s cílem minimalizovat cenu výsledných produktů. Jedním z hlavních požadavků bylo také zajištění neměnné zpracovatelnosti po dobu 20 minut po výrobě betonu. Pro jeho výrobu bylo použito kamenivo s oblými zrny poměrně nízké kvality, s poměrem a/c 3,3 (hmotnostní) a b/a 0,65 (objemový). Vodní součinitel zahrnující všechny přísady a příměsi byl 0,28. Detaily složení jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Složení čerstvého HPC betonu: Relativní hmotnostní množství [50].

| Components | Relative Amount |
|--|-----------------|
| CEM I 42.5 R (Mokrá, CZ) | 1.000 |
| Metakaolin "Mefisto K05" (CLUZ a.s. CZ) | 0.156 |
| Finely ground limestone V | 0.200 |
| Total amount of water | 0.366 |
| Multifunctional excellent admixture SST1 | 0.016 |
| Sand 0/4 mm (Zaječí, CZ) | 1.898 |
| Aggregate 4/8 mm (Zaječí, CZ) | 1.397 |

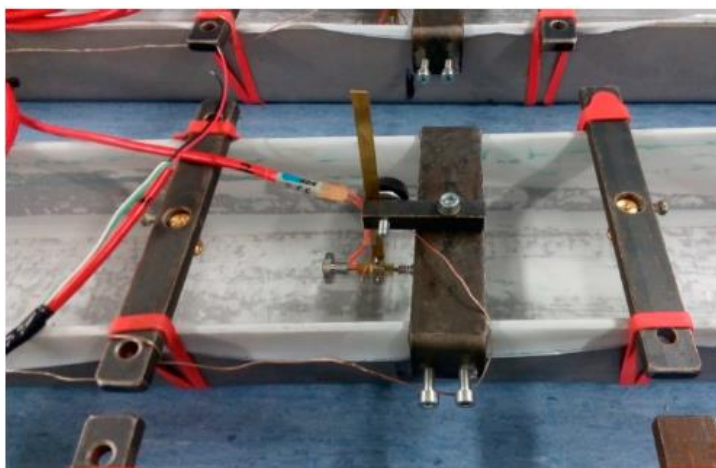
Experimentální analýza byla zaměřena na následující oblasti:

- Stanovení vývoje smrštění zkušebních těles ošetřovaných na vzduchu (D-A) a v autogenních podmínkách (AU).
- Porovnání vývoje smrštění získaného měřením indukčnostním snímačem (IS) opřeným o posuvné čelo měřicího žlabu (ShM) a strunovým tenzometrem (W-SG) zabudovaným uvnitř zkušebních těles.
- Porovnání celkového vývoje smrštění získaného kontinuálním měřením po celou dobu trvání experimentu pomocí zabudovaných strunových tenzometrů a vývoje smrštění získaného z kombinace měření indukčnostním snímačem po dobu cca 46 hodin a následného pokračování v měření, po zbývajících dobu trvání experimentu, pomocí

mechanického tenzometru (M-SG) přikládaného na měřicí základny umístěné na horním povrchu zkušebního tělesa.

- Zkoumání vlivu velikosti těles na celkový vývoj smrštění. Srovnáváno bylo měření pro sady těles s označením ShM_100 pro tělesa o rozměrech $100 \times 60 \times 1000$ mm a ShM_50 pro tělesa $50 \times 50 \times 1000$ mm.
- Pro vyhodnocení měření byly zvoleny dva rozdílné časy t_0 . V prvním případě je to čas odpovídající zahájení měření, ve druhém případě je to čas odpovídající době tuhnutí stanovené na základě naměřeného průběhu vnitřní teploty betonu v rané fázi zrání.

Na Obr. 36 až Obr. 39 jsou zobrazeny fotografie pořízené během experimentu. Na Obr. 36 je zobrazeno umístění strunových tenzometrů, měřicích terčů a teplotních čidel určených k zabetonování do zkušebních těles. Dovnitř obou typů měřicích žlabů byla vložena teflonová separační fólie tl. 0,1 mm, podtažena pod posuvnými čely žlabů. Pro experiment byl použit strunový tenzometr GEOKON, model 4202 s aktivní měřicí délkou 51 mm a rozlišením $0,4 \mu\epsilon$. Průměr koncových bloků byl 15,5 mm. Tyto snímače byly umístěny do osy zkušebních těles uprostřed jejich délky. Symetricky k poloze strunového tenzometru byly umístěny dva měřicí terče s nominální délkou základny 200 mm.



Obr. 36 Měřicí žlaby $100 \times 60 \times 1000$ mm před betonáží: pozice strunových tenzometrů a měřicích terčů určených pro měření mechanickým tenzometrem [50].

Na Obr. 37 je celkový pohled na veškeré měřicí zařízení použité během experimentu. Pro jednotlivé žlaby ShM_100 byl úbytek hmotnosti vlivem vysychání v rané fázi zrání zaznamenáván pomocí váhového stolu (viz kapitola 7.2), pro žlaby ShM_50 byla použita plošinová váha s možností kontinuálního záznamu hmotnosti, přičemž úbytek hmotnosti byl stanoven souhrnně pro všechna tři zkušební tělesa. Pro účely vyhodnocení byl souhrnný

hmotnostní úbytek vydělen počtem zkušebních těles – odhad průměrného hmotnostního úbytku pro jedno těleso. Pro účely dlouhodobého měření hmotnostních úbytků byla všechna tělesa po odformování vážena zvlášť na laboratorní váze s přesností na 0,1 g. Vnitřní teploty betonu byly kontinuálně zaznamenávány pomocí teplotní ústředny MS6 (Comet System) s nastavenou četností záznamu 1/min.



Obr. 37 Celkový pohled před betonáží (vlevo); váhový stůl pro ShM_100 [50].

Na Obr. 38 je zobrazen celkový pohled na zkušební tělesa těsně před zahájením měření. Zkušební tělesa zrající na vzduchu nebyla nijak ošetřována ani v rané fázi zrání, kdy byl účinkům vysychání vystaven horní povrch těchto těles. Pro vytvoření autogenních podmínek byla v rané fázi zrání na horní povrch zkušebních těles nanesa tenká vrstva parafinového oleje, čímž se beton umístěný ve žlabu utěsnil tak, aby nedocházelo k výměně vlhkosti mezi betonem a okolním prostředím. Pro účely dlouhodobého měření autogenního smrštění byla zkušební tělesa těsně zabalena v několika vrstvách do polyetylenové fólie. V místech měřicích základů na horním povrchu těles byla fólie lokálně odstraněna. Zkušební tělesa ošetřovaná na vzduchu byla po odformování uložena bez dalšího ošetřování tak, aby volně vysychala všemi povrchy.

Všechna zkušební tělesa byla po celou dobu měření uložena v laboratoři s teplotou okolního vzduchu (21 ± 1) C a relativní vlhkostí vzduchu (55 ± 10) %. Pro kontinuální záznam dat měřených indukčnostními snímači, plošinovou vahou a váhovými členy váhového stolu byla použita datová ústředna QuantumX s frekvencí záznamu 5 Hz. Pro kontinuální záznam dat měřených strunovými tenzometry byla použita datová ústředna DataTaker s frekvencí záznamu 5 Hz. Pro dlouhodobá měření byly zvoleny vhodné intervaly, které se prodlužovaly s narůstajícím stářím betonu. U zkušebních těles ShM_100 byly dlouhodobé deformace měřeny současně pomocí zabudovaných strunových tenzometrů a pomocí příložného tenzometru

„Hollan“ (viz Obr. 39). Pro tělesa ShM_50 byl použit stojanový dilatometr osazený digitálním úchylkoměrem s rozlišením 0,001 mm (viz Obr. 39, vpravo).

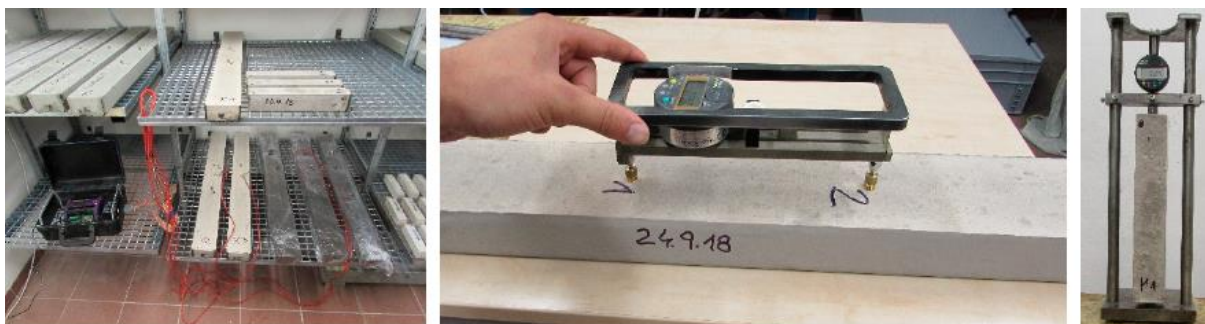


Obr. 38 Celkový pohled před zahájením měření [50].

Poměrná přetvoření získána měřením pomocí indukčního snímače v kombinaci s mechanickým tenzometrem či dilatometrem byla pro obě velikosti zkušebních těles stanovena ve dvou na sebe navazujících fázích měření, a to pro zkušební tělesa $100 \times 60 \times 1000$ mm dle vztahů (1) až (3) a pro tělesa $50 \times 50 \times 300$ mm dle vztahů (1), (7) a (3). Výpočetní vztahy jsou uvedeny v kapitole 7.1 a 7.3. Hmotnostní úbytky pak byly vypočteny dle vztahů (4) – (6). Poměrná přetvoření získána měřením pomocí strunového tenzometru byla stanovena dle (8):

$$\varepsilon(t) = K \cdot (f^2(t) - f_0^2(t_0)) \quad (8)$$

kde $\varepsilon(t)$ je poměrné přetvoření v $\mu\text{m/m}$, K je konstanta tenzometru daná technickým listem tenzometru ($K=3,91 \cdot 10^{-4} \mu\text{m/m} \cdot \text{Hz}^2$), $f(t)$ je frekvence struny zaznamenaná strunovým tenzometrem v čase t v Hz, $f(t_0)$ je frekvence struny zaznamenaná strunovým tenzometrem v čase t_0 v Hz (t_0 – čas zahájení měření).



Obr. 39 Ilustrativní foto dlouhodobého měření smrštění: Celkový pohled (vlevo); M-SG (Hollan) pro tělesa ShM_100 (uprostřed); dilatometr pro tělesa ShM_50 [50].

Výsledky provedeného experimentu jsou zobrazeny v následujících tabulkách a obrázcích. Všechny křivky smrštění zobrazují průměrný vývoj smrštění stanovený ze tří nezávislých měření. Variabilitu výsledků lze vyčíst z hodnot uvedených v Tab. 9.

Tab. 9 Hodnoty smrštění pro SCC HPC: Aritmetický průměr (AV), výběrová směrodatná odchylka (SSD) a variační koeficient (CoV) [50].

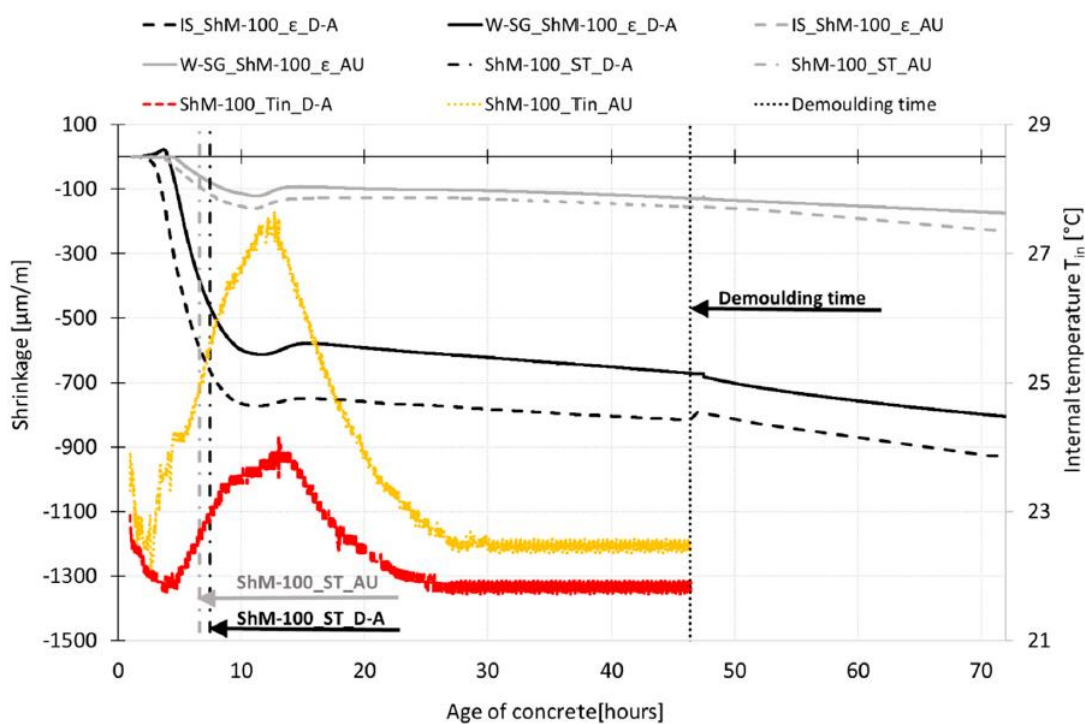
| | | IS+M-SG_ShM-100 | | W-SG_ShM-100_D-A | | IS+M-SG_ShM-50 |
|----------------|--------------------------------|-----------------|------|------------------|------|----------------|
| | | D-A | AU | D-A | AU | D-A |
| 4 h | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -203 | -12 | | | -530 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 71 | 1 | n/a | n/a | 112 |
| | CoV [%] | 35 | 9 | | | 21 |
| Setting time | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -664 | -90 | -465 | -58 | -1072 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 60 | 16 | 30 | 8 | 130 |
| | CoV [%] | 9 | 18 | 6 | 13 | 12 |
| 12 h | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -771 | -149 | -613 | -115 | -1126 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 59 | 15 | 10 | 10 | 131 |
| | CoV [%] | 8 | 10 | 2 | 8 | 12 |
| Demolding time | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -817 | -154 | -682 | -132 | -1163 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 64 | 17 | 9 | 11 | 128 |
| | CoV [%] | 8 | 11 | 1 | 8 | 11 |
| 70 h | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -926 | -227 | -798 | -171 | -1295 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 58 | 20 | 8 | 12 | 105 |
| | CoV [%] | 6 | 9 | 1 | 7 | 8 |
| 60 days | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1323 | -498 | -1147 | -449 | -1611 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 13 | 11 | 1 | 13 | 126 |
| | CoV [%] | 1 | 2 | 0.1 | 3 | 8 |
| 170 days | AV [$\mu\text{m}/\text{m}$] | -1526 | -662 | -1157 | -470 | -1696 |
| | SSD [$\mu\text{m}/\text{m}$] | 13 | 15 | 3 | 13 | 134 |
| | CoV [%] | 1 | 2 | 0.3 | 3 | 8 |

Note: n/a—the wire-type strain gauges are not able to start the measurement at the specimens' age of 4 h due to their stiffness.

V grafech na Obr. 40 až Obr. 45 je pro všechny měřené veličiny jako čas t_0 uvažován okamžik zahájení měření. V grafech na Obr. 40, Obr. 41 a Obr. 46 jsou šedou barvou zobrazeny výsledky měření v autogenních podmínkách a černou barvou je zobrazen vývoj smrštění pro tělesa ošetřovaná na vzduchu. Doba tuhnutí byla stanovena na základě vývoje vnitřních teplot betonu dle postupu ASTM [45] jako doba, kdy teplota dosáhne poloviny vzestupné části teplotní křivky. Pro přehlednost je tato doba vyznačená v grafech svislou čerchovanou čarou.

Na Obr. 40 je zobrazen vývoj smrštění a teplot zaznamenaných v rané fázi zrání betonu pro zkušební tělesa ShM_100 zrající v různých podmínkách ošetřování. Výsledky ukazují, že absolutní hodnota vnitřních teplot je ovlivněna podmínkami ošetřování. Vnitřní teplota u betonu ošetřovaného v autogenních podmínkách vykazuje strmější nárůst s maximální

hodnotou cca 1,2 krát větší než u betonu ošetřovaného na vzduchu, přičemž vrchol teplotní křivky byl zaznamenán v obou případech přibližně ve stejnou dobu. Pokud se jedná o vývoj smrštění, lze říci, že obě sady zkušebních těles začaly smršťovat přibližně ve stejnou dobu. Na základě výsledků měření lze říci, že vývoj smrštění betonu v autogenních podmínkách není příliš ovlivněn použitými měřicími technikami. Podobný závěr lze učinit také pro vývoj smrštění u těles zrajících na vzduchu. Přestože indukčnostní snímač opřený o čela žlabů byl schopen zaznamenat délkové změny o něco dříve než strunový tenzometr, lze říci, že oba snímače poskytují stejný trend vývoje smrštění pro obě sady zkušebních těles, zrajících na vzduchu a v autogenních podmínkách (viz Obr. 40). Rozdíl v časech zahájení měření u jednotlivých snímačů je zřejmě způsoben jednak jejich polohou (vliv vysychání) a jednak tuhostí měřicího systému.

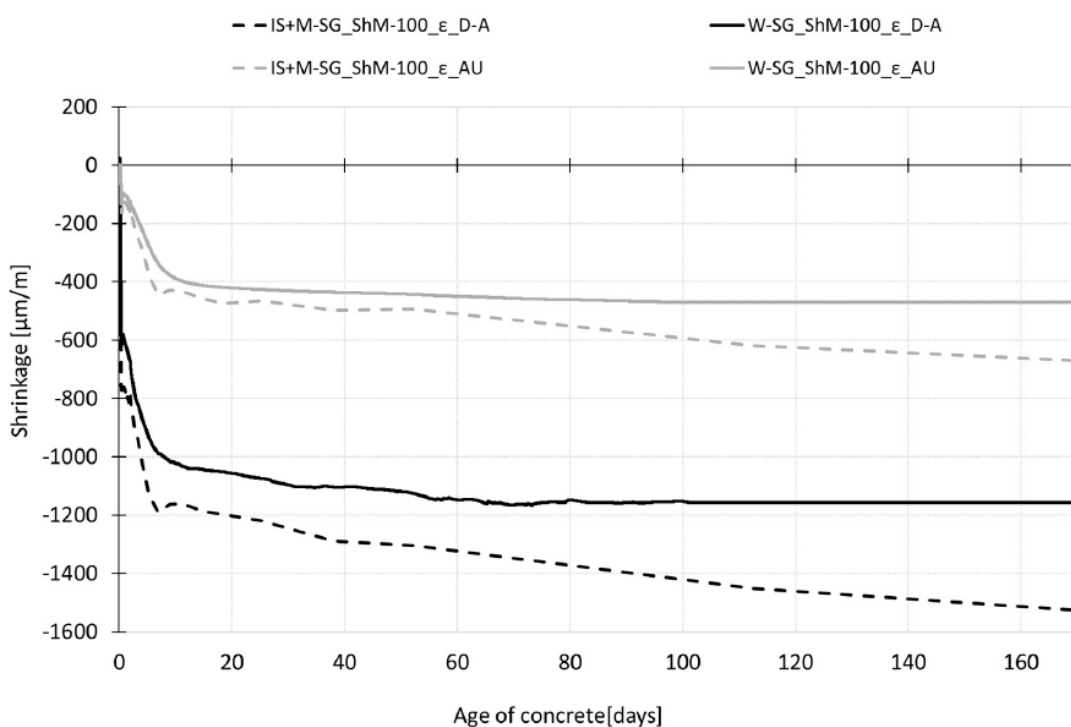


Obr. 40 Vývoj smrštění v rané fázi zrání zaznamenaný indukčnostním snímačem měřících žlabů (IS_ShM) a zabudovaným strunovým tenzometrem (W-SG_ShM) pro zkušební tělesa ošetřovaná na vzduchu (černé čáry) a v autogenních podmínkách (šedé čáry). Naměřený vývoj vnitřních teplot (T_{in}) zkušebních těles (barevné čáry) [50].

Nezávisle na podmínkách ošetřování obě zkušební sady vykázaly v okamžiku dosažení maxima vnitřní teploty betonu náhlé zbrzdění smršťování, po němž následovalo krátké období mírné expanze. Postupný pokles teploty vyvolal další nárůst smrštění. Strmost nárůstu a velikost smrštění jsou ovlivněny podmínkami ošetřování. Všechna zkušební tělesa byla vyjmuta ze

žlabů přibližně ve stáří 46 hodin. Tělesa ošetřována na vzduchu byla vystavena volnému vysychání všemi povrchy, zatímco pro vytvoření autogenních podmínek byla zkušební tělesa zabalena do fólie (viz výše).

Na Obr. 41 je znázorněn celkový vývoj smrštění až do stáří betonu 170 dní. Po vyjmutí zkušebních těles ze žlabů byl zaznamenán další nárůst jak smrštění vysycháním, tak i autogenního smrštění. Pokud se jedná o měření smrštění v autogenních podmínkách, pak lze říci, že obě měřicí techniky poskytují podobný trend vývoje smrštění až do stáří 60 dní, kdy se křivka zaznamenaná pomocí mechanického tenzometru (M-SG) odchyluje od křivky zaznamenané strunovým tenzometrem (W-SG). V případě zkušebních těles ošetřovaných na vzduchu poskytují obě použité měřicí techniky mírně odlišné výsledky, což je pravděpodobně dáno pozicí jednotlivých snímačů – vysychání na povrchu je rychlejší než v jádru průřezu, což se odrazí na záznamu měření pomocí M-SG snímače většími hodnotami naměřeného smrštění. Rozdíl mezi výstupy obou snímačů se zvyšuje se stářím betonu (viz Obr. 41).



Obr. 41 Celkový vývoj smrštění (ϵ) zaznamenaný během celé doby měření pro zkušební tělesa ošetřovaná na vzduchu a v autogenních podmínkách [50].

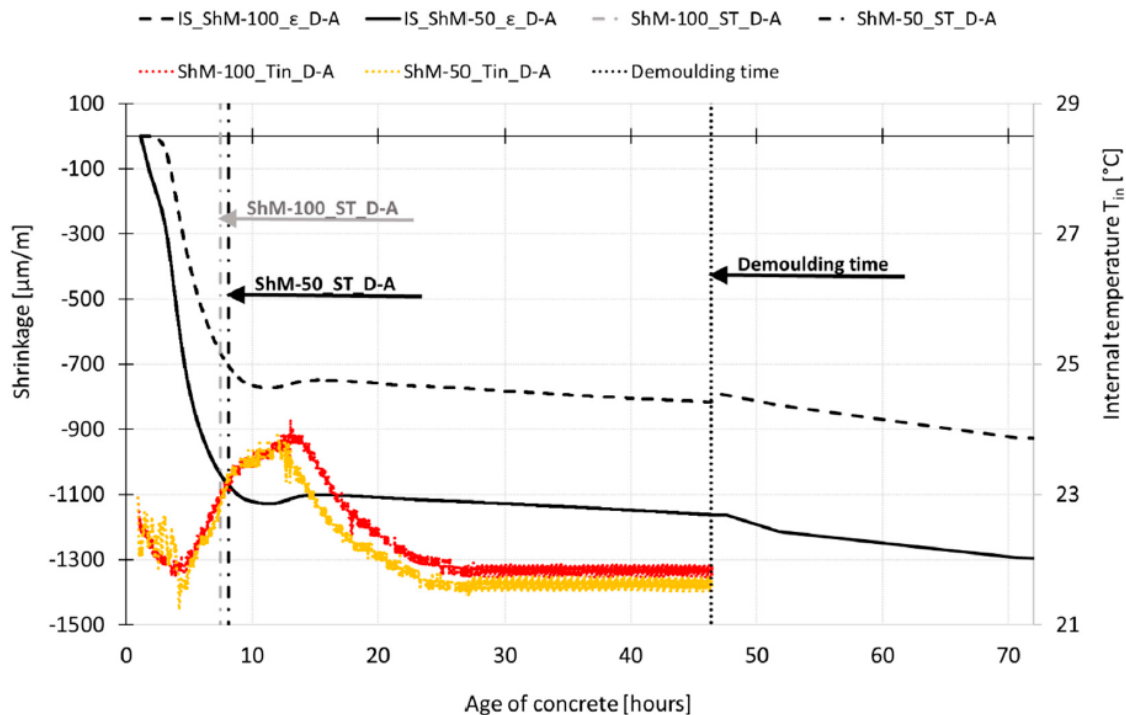
V Tab. 10 jsou uvedeny rozdíly v absolutních hodnotách smrštění zaznamenaných různými měřicími technikami. Relativní hodnoty představují průměrné hodnoty smrštění stanovené pro

specifické stáří betonu uvedené v Tab. 9. Parametr „1“ je uvažován u obou způsobů ošetřování pro měření provedená pomocí IS+M-SG.

Tab. 10 Hodnoty smrštění pro SCC HPC: Relativní hodnoty aritmetických průměrů hodnot smrštění určených různými měřicími technikami [50].

| | IS+M-SG_ShM-100 | | W-SG_ShM-100 | |
|----------------|-----------------|----|--------------|------|
| | D-A | AU | D-A | AU |
| 12 h | 1 | 1 | 0.79 | 0.77 |
| Demolding time | 1 | 1 | 0.84 | 0.85 |
| 60 days | 1 | 1 | 0.87 | 0.90 |
| 170 days | 1 | 1 | 0.76 | 0.71 |

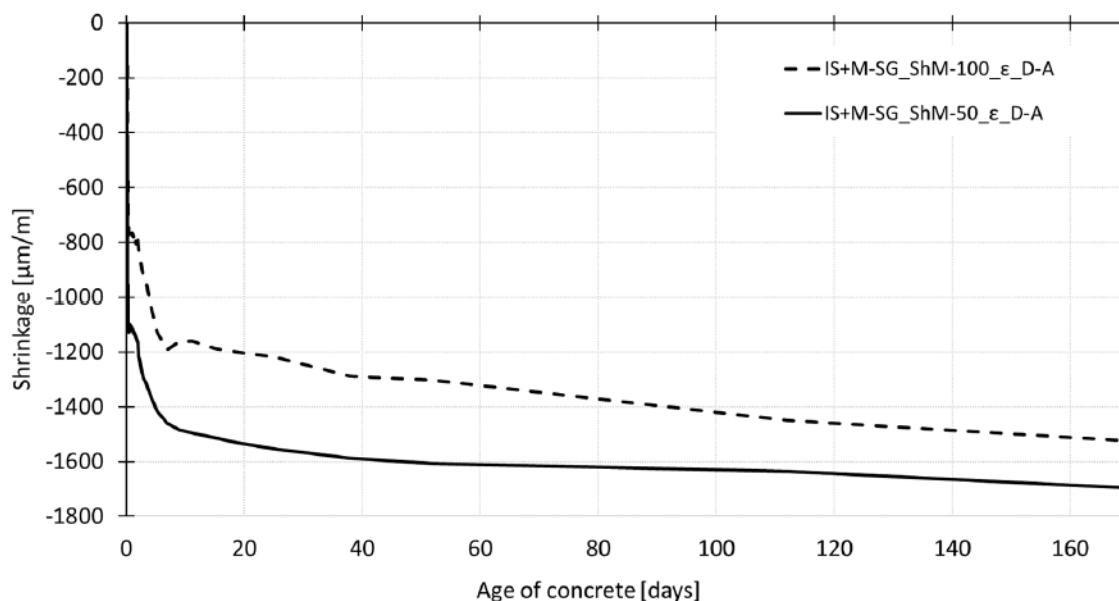
Na Obr. 42 a Obr. 43 je znázorněn vývoj smrštění pro dvě různé velikosti těles. V obou případech byly pro měření v rané fázi zrání použity indukčnostní snímače v kombinaci s mechanickým tenzometrem použitým po odformování zkušebních těles.



Obr. 42 Vývoj smrštění v rané fázi zrání zaznamenaný indukčnostním snímačem měřících žlabů (IS_ShM) různých rozměrů a vývoj vnitřní teploty (T_{in}) zkušebních těles ošetřovaných na vzduchu [50].

Výsledky ukazují, že měření v rané fázi zrání je ovlivněno velikostí zkušebních těles. Hodnoty smrštění zaznamenané pro malá tělesa (ShM_50) jsou 1,5 krát větší než hodnoty smrštění zaznamenané pro velká tělesa (ShM_100) – porovnáno ve stáří 13 hodin, což odpovídá

okamžiku dosažení maximální teploty betonu. Tento rozdíl v hodnotách smrštění přetrvává až do okamžiku jejich vyjmutí ze žlabů.



Obr. 43 Celkový vývoj smrštění (ϵ) zaznamenaný během celé doby měření pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu [50].

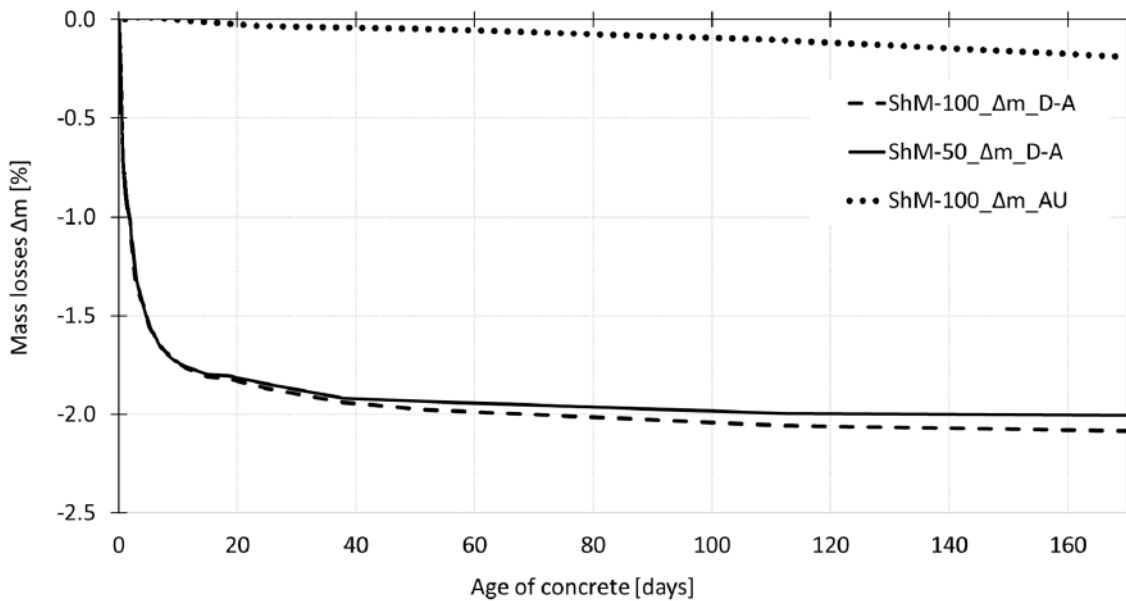
Po odformování zkušebních těles je patrné, že trend vývoje smrštění zaznamenaný pro obě velikosti zkušebních těles směřuje z dlouhodobého hlediska ke stejné absolutní hodnotě. Ve stáří 170 dní je rozdíl mezi hodnotami obou zkušebních sad přibližně 10 %. Rozdíly v absolutních hodnotách smrštění zaznamenaných pro různé velikosti těles jsou shrnuty v Tab. 11. Relativní hodnota představuje průměrné hodnoty smrštění vypočtené pro specifické stáří betonu uvedené v Tab. 9. Parametr „1“ je uvažován pro měření provedená pomocí IS+M-SG_ShM_100.

Tab. 11 Hodnoty smrštění pro SCC HPC: Relativní hodnoty aritmetických průměrů hodnot smrštění určených pro tělesa různých velikostí [50].

| | IS+M-SG_ShM-100 | IS+M-SG_ShM-50 |
|----------------|-----------------|----------------|
| | D-A | D-A |
| 12 h | 1 | 1.46 |
| Demolding time | 1 | 1.42 |
| 60 days | 1 | 1.22 |
| 170 days | 1 | 1.11 |

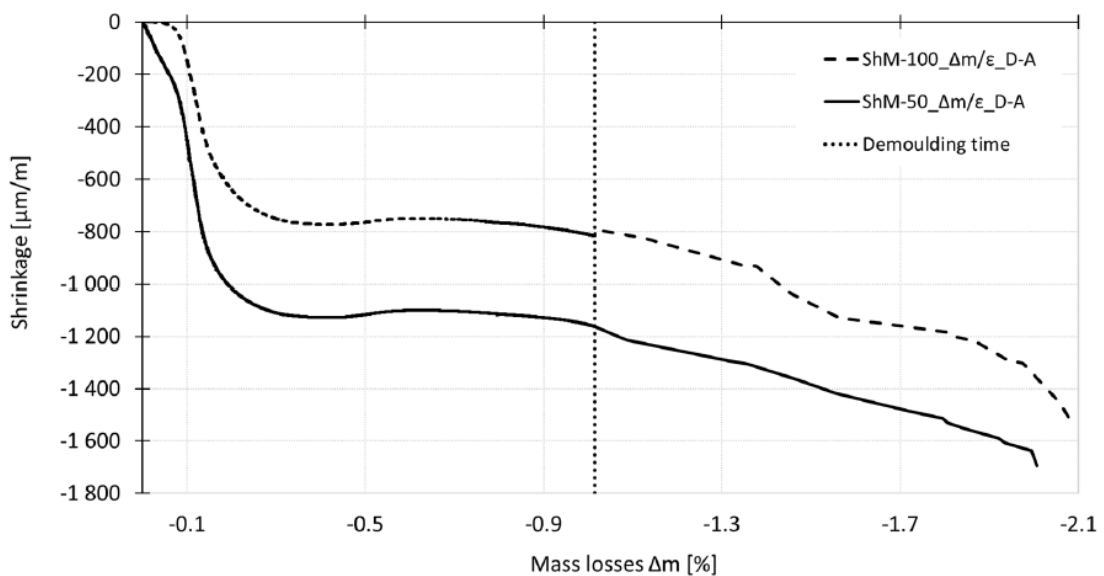
Na Obr. 44 je zobrazen celkový vývoj hmotnostních úbytků zaznamenaných pro jednotlivé zkušební sady. Zkušební tělesa ošetřovaná na vzduchu vykazovala obdobný trend volného vysychání nezávisle na velikosti zkušebních těles. Absolutní hodnota úbytku hmotnosti byla

2 % ve stáří 170 dní. U zkušebních těles zabalených do fólie byl také zaznamenán mírný úbytek hmotnosti s hodnotou 0,2 % stanovenou ve stáří 170 dní.



Obr. 44 Celkový vývoj hmotnostních úbytků (Δm) určených pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu [50].

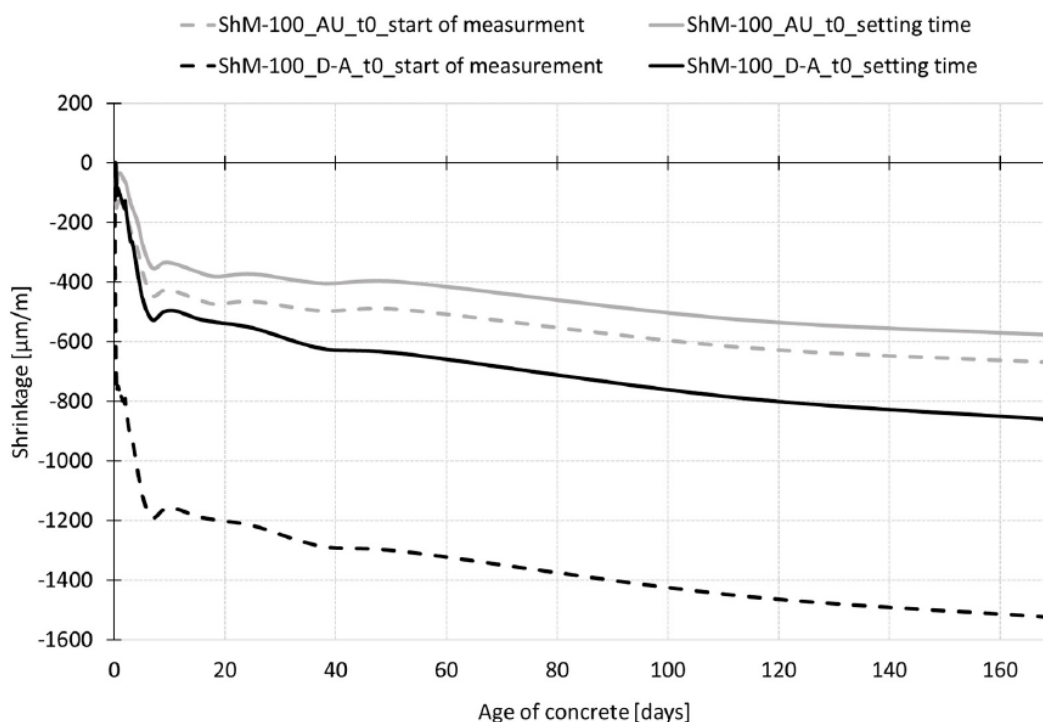
Na Obr. 45 je znázorněna závislost mezi vývojem smrštění a hmotnostními úbytky stanovená pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu. Na začátku obou křivek je zaznamenán strmý nárůst smrštění doprovázený malým úbytkem hmotnosti zkušebních těles.



Obr. 45 Vztah mezi vývojem smrštění (ϵ) a hmotnostními úbytků (Δm) určený pro zkušební tělesa různých velikostí ošetřovaná na vzduchu [50].

Náhlé zbrzdění v trendu obou křivek odpovídá okamžiku dosažení maximální hodnoty vnitřní teploty betonu, po němž následuje postupný nárůst smrštění a hmotnostních úbytků.

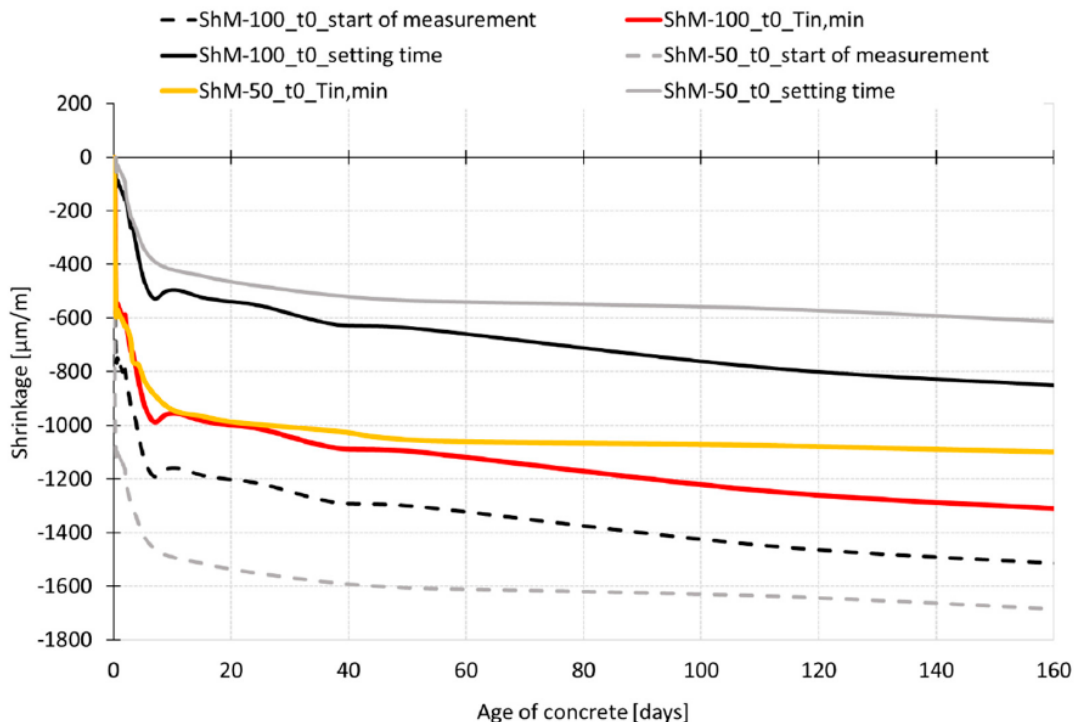
Na Obr. 46 je znázorněn vývoj smrštění při uvažování dvou různých časů t_0 (časů vynulování záznamu měření). V prvním případě t_0 odpovídá době zahájení měření, ve druhém případě t_0 odpovídá okamžiku dosažení doby tuhnutí. Tyto dva časy byly zvoleny záměrně s ohledem na přístup většiny výzkumných týmů zabývajících se experimentálním stanovením smrštění. Pokud se naměřená data, získaná provedeným experimentem, vynulují v okamžiku dosažení doby tuhnutí, pak se absolutní hodnota smrštění v autogenních podmínkách zmenší o $60 \mu\text{m/m}$ (pro W-SG snímač) a o $90 \mu\text{m/m}$ (pro IS a M-SG snímače) ve srovnání s hodnotami získanými z měření vynulovaného v okamžiku zahájení měření. Rozdíl v absolutních hodnotách vlivem odlišného přístupu k vyhodnocování dat je v tomto případě cca 12 %. Mnohem více je v tomto případě ovlivněno vyhodnocení dat smrštění vysycháním. Pokud vezmeme data zaznamenaná W-SG snímačem a vynulujeme je v okamžiku dosažení doby tuhnutí, bude absolutní hodnota smrštění vysycháním menší o cca $460 \mu\text{m/m}$. U dat získaných z měření pomocí IS a M-SG se hodnota smrštění zmenší o $660 \mu\text{m/m}$. V tomto případě je snížení absolutní hodnoty smrštění vysycháním, způsobené odlišným přístupem k vyhodnocení dat, 40 – 50 %.



Obr. 46 Vývoj smrštění pro zkušební tělesa $100 \times 60 \times 1000 \text{ mm}$: měření vynulováno v různých časech t_0 [50].

Pro názornost jsou na Obr. 46 zobrazeny křivky smrštění získané kombinací měření IS a M-SG vyhodnocené ve vybraných časech t_0 . Čárkované čáry představují vývoj smrštění získaný z dat vynulovaných v okamžiku zahájení měření.

Druhý aspekt, hodnocený na základě provedeného měření, je vliv velikosti zkušebních těles a souvisejícího času t_0 na celkový vývoj a absolutní hodnotu smrštění vysycháním. Výsledné křivky smrštění získané vyhodnocením dat v okamžiku zahájení měření a dosažení doby tuhnutí jsou znázorněny na Obr. 47. V grafu jsou zobrazeny křivky smrštění zaznamenané měřením pomocí IS a M-SG pro obě sady zkušebních těles s různými rozměry ošetřovaných na vzduchu. Čárkované čáry zobrazují vývoj smrštění získaný pro data vynulována v okamžiku zahájení měření. Žlutá čára představuje vývoj smrštění pro tělesa s menšími rozměry, přičemž záznam dat byl vynulován v době odpovídající minimu vnitřní teploty betonu ($T_{in, min}$). Šedá čára představuje vývoj smrštění pro tělesa s menšími rozměry, přičemž záznam dat byl vynulován v okamžiku dosažení doby tuhnutí. Podobně jsou data vyhodnocena i pro tělesa větších rozměrů, kdy červená čára odpovídá vývoji smrštění pro data vynulovaná v době $T_{in, min}$ a černá odpovídá vynulování dat v době tuhnutí (viz Obr. 47).

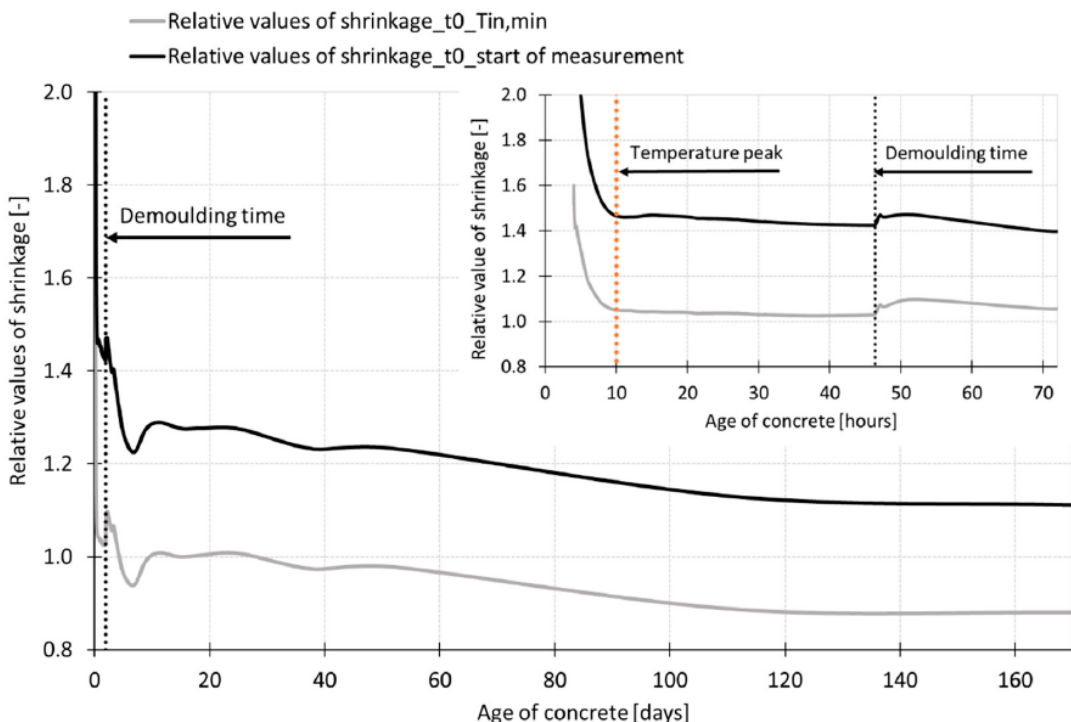


Obr. 47 Vliv velikosti těles: měření vynulováno v různých časech t_0 [50].

Na základě získaných výsledků lze říci, že vliv velikosti těles je silně ovlivněn volbou času t_0 . Z výsledků zobrazených na Obr. 42, Obr. 43 a Obr. 47 je ihned po zahájení měření patrný strmý nárůst smrštění pro zkušební tělesa ShM_50. Tento efekt je pravděpodobně vztážen k vnitřním

silám ve struktuře betonu vyvolaných kapilárním sáním [15], které „táhnou“ masu betonu a způsobují tak kontrakci zkušební tělesa. Vzhledem k tomu, že zkušební tělesa ShM_50 mají 8 krát menší objem než tělesa ShM_100, vnitřní hnací síly byly schopny „táhnout“ masu betonu dříve, což ovlivnilo počáteční část naměřené křivky smrštění. Pokud jsou pro účely vyhodnocení zanedbána data získaná před dosažením doby tuhnutí, pak jsou závěry ohledně vlivu velikosti těles zcela odlišné (viz Obr. 47). V tomto případě lze říci, že vliv velikosti zkušebních těles na vývoj smrštění je zanedbatelný až do stáří 60 dní, kdy se křivky pro obě velikosti těles začínají rozcházet.

Na Obr. 48 je zobrazen vývoj relativních hodnot smrštění (poměr hodnot smrštění zjištěný pro menší a větší tělesa) v průběhu zrání betonu, určený pro data vynulovaná v okamžiku zahájení měření a v době odpovídající minimu vnitřní teploty betonu. Výsledky ukazují, že vývoj smrštění je v obou případech silně ovlivněn velikostí zkušebních těles až do okamžiku dosažení maxima vnitřní teploty betonu. Poté se relativní hodnoty smrštění stabilizují až do okamžiku odformování zkušebních těles (viz Obr. 48). V období od odformování až do stáří 50 dní se relativní hodnoty smrštění pro tělesa různých velikostí a data vynulovaná v době $T_{in, min}$ pohybují kolem hodnoty 1.



Obr. 48 Vliv velikosti těles: Relativní hodnoty smrštění v různých t_0 [50].

V době stáří od 50 až do 170 dní je zaznamenán mírný pokles relativních hodnot z hodnoty 1 na 0,9. U dat vynulovaných v okamžiku zahájení měření je v době od odformování až po stáří

betonu 170 dní viditelný postupný pokles relativních hodnot smrštění od 1,4 do 1,1. Z výsledků je patrné, že plastická a semi-plastická složka smrštění, které jsou zaznamenány díky velmi včasnému zahájení smrštění a nejsou zcela proporcionální k rychlosti vysychání, hrají významnou roli v oblasti zkoumání vlivu velikosti těles na výsledný vývoj smrštění. V tomto případě se jeví jako nezbytné vždy vztáhnout provedené závěry k okamžiku zahájení měření a k době zahájení vyhodnocení dat.

8.5 Ověření vlivu typu separační fólie na vývoj smrštění v rané fázi zrání

Tato problematika je uvedena v kapitole 6.1 a 7.6. Podnětem pro provedení experimentu byly časté výtky recenzentů ohledně součinitele tření neoprenové fólie a pochybnosti odborníků z praxe o vhodnosti té či oné fólie. Motivací bylo také tvrzení výrobce měřicích žlabů (Schleibinger Testing Systems), který doslova uvádí na štítku dodávané fólie: *„Inappropriate sheets of drift are incompressible foils or PTFE (Teflon) surfaces, even if they are multilayered, because they cannot prevent a deformation of the sample during its process of expansion in the drain. However, they can be used in addition to the neoprene sheet to prevent the rubber of wearing out too early“*. Výsledky provedeného experimentu byly prezentovány a publikovány ve sborníku prestižní české konference „26. Betonářské dny“ [65].

Cílem provedeného experimentu bylo porovnání tvaru smršťovacích křivek a absolutních hodnot smrštění získaných měřeními ve žlabech opatřených různým typem separační fólie – neoprenovou (NE), polyetylenovou (PE) a teflonovou (PTFE). Jedná se o běžné typy separačních fólií používaných při měření volného smršťování betonu v rané fázi zrání. Pro účely měření byly vyrobeny vždy dvojice vzorků ve žlabech obsahujících stejný typ separační fólie. Smrštění bylo ve všech případech snímáno indukčním snímačem (IS) opřeným o vodící tyč pohyblivého čela měřicího žlabu. Do jednoho z dvojice žlabů byl navíc před betonáží umístěn strunový tenzometr (ST). Tímto způsobem bylo možno sledovat vliv umístění snímače na výsledný tvar křivky smrštění. Celkem bylo vyrobeno 6 zkušebních těles. Záznam měření byl spuštěn cca 1 hodinu od zahájení míchání betonu. Zkušební žlaby byly po celou dobu měření umístěné v klimatizované místnosti s teplotou okolního vzduchu (21 ± 1) °C a relativní vlhkostí (55 ± 10) %. Povrch zkušebních těles byl po celou dobu měření záměrně vystaven volnému vysychání. Měření smrštění bylo doprovázeno měřením teploty uvnitř zkušebních těles a na vnějším povrchu zkušebního žlabu [65].

Celkový závěr experimentu [65]: Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že nebyl prokázán vliv typu separační fólie na tvar a výslednou hodnotu smrštění v raném stáří zkoumaného betonu. Z výsledků jsou patrné drobné rozdíly ve variabilitě výsledků měření získaných indukčnostními snímači v jednotlivých zkušebních sadách. Největší rozdíl mezi záznamy snímačů byl pozorován ve zkušební sadě obsahující neoprenovou fólii. Vzhledem k počtu zkušebních těles nelze učinit pokročilejší závěry. Provedený experiment nastínil problematiku volby měřicí techniky a možný vliv polohy snímače na výsledek měření – v rámci provedených měření byl pozorován časový posun mezi počátkem měření indukčnostním snímačem a zabetonovaným strunovým tenzometrem. V neposlední řadě je zde naznačena problematika nastavení času t_0 , která může mít na výsledek měření, interpretaci výsledků a učiněné závěry velmi zásadní vliv (viz Obr. 53 a Obr. 54).

V následujících odstavcích jsou uvedeny základní detaily experimentu a komentáře k dosaženým výsledkům, více viz [65].

S ohledem na minimalizování faktorů souvisejících s výrobou zkušebních těles byl pro účely experimentu použit speciální typ samozhutnitelného vysokohodnotného betonu (SCC HPC) s maximálním zrnem kameniva 8 mm. Tento typ betonu umožnil naplnění forem bez použití zhutňovací techniky, čímž se minimalizovalo riziko ovlivnění polohy tenzometrů určených k zabetonování. Zvolený typ betonu také umožnil zahájení měření 1 hodinu od okamžiku zahájení dávkování složek do mísičního zařízení. Beton byl vyroben v míchačce s nuceným oběhem, přičemž celková doba míchání byla asi 20 minut, a to včetně provedení zkoušek konzistence čerstvého betonu. S cílem minimalizovat vlivy výrobního procesu na výsledek zkoušky byly formy plněny ve dvou trojicích, v nichž každý zkušební žlab obsahoval jiný typ separační fólie. Doba plnění nepřesáhla 20 minut. Vzhledem k tomu, že samotný návrh složení čerstvého betonu nebyl předmětem řešení provedeného experimentu, není složení betonu v článku uvedeno. Základní charakteristiky čerstvého a ztvrdlého betonu jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Základní vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu [65].

| | |
|---|-------|
| Zkouška sednutí-rozlitím [mm] | 810 |
| Čas t_{500} [s] | 3,5 |
| Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3] | 2400 |
| Pevnost betonu v tlaku - 7 dní [MPa] | 91,7 |
| Pevnost betonu v tahu ohybem - 7 dní [MPa] | 8,8 |
| Pevnost betonu v tlaku - 28 dní [MPa] | 121,0 |
| Pevnost betonu v tahu ohybem - 28 dní [MPa] | 9,9 |

Pro účely měření byly použity smršťovací žlaby s vnitřními rozměry $100 \times 60 \times 1000$ mm ($b \times h \times l$) výrobce Schleibinger Testing Systems. Princip měření lze nalézt v předchozích kapitolách. Spojení mezi betonem a čely zkušebního žlabu je zajištěno kovovými kotvami připevněnými na vnitřních stranách obou čel. Mezera mezi posuvným čelem a vnitřním průřezem smršťovacího žlabu byla utěsněna vazelínou, čímž se zamezilo vytékání betonu kolem posuvného čela. Pro účely kontinuálního záznamu měření byly indukčnostní snímače zapojeny do měřicí ústředny QuantumX (HBM, Německo) s nastavenou frekvencí záznamu dat 5 Hz.



Obr. 49 Celkový pohled na smršťovací žlaby před betonáží (a) – zleva neopren, polyetylén, teflon; po naplnění (b); detail umístění tenzometrů ve žlabech před jejich naplněním betonem (c) [65].

Kromě indukčnostních snímačů byly do smršťovacích žlabů před betonáží umístěny strunové tenzometry určené k zabetonování do zkušebních těles. Vzhledem k vnitřním rozměrům žlabů byly použity tenzometry GEOKON (USA), model 4202 s aktivní měřicí délkou 51 mm a průměrem kruhových koncovek 15,5 mm. Vybraný typ tenzometru se vyznačuje nízkou tuhostí s možností její regulace. Rozlišovací schopnost tenzometru je $0,4 \mu\epsilon$. Tenzometry byly osazeny v pozici odpovídající ose zkušebních těles, uprostřed měřicí základny smršťovacích žlabů (viz Obr. 49). Pro zajištění volné deformace betonu ve žlabech byly dovnitř žlabů před betonáží vloženy separační fólie. V rámci experimentu byly vyrobeny vždy dvojice žlabů, opatřené stejným typem separační fólií – neoprenovou tl. 2 mm, polyetylenovou tl. 2 mm

(Mirelon) a teflonovou fólii tl. 0,1 mm. Neoprenová a polyetylenová fólie pokrývaly vnitřní podélné strany a dno zkušebního žlabu a jejich délka nepřesahovala délku měřicí základny žlabu (fólie byly dotaženy k vnitřním stranám obou čel). Vzhledem k tloušťce teflonové fólie byla tato fólie podtažena pod posuvným čelem žlabů (viz Obr. 49(a)).

Měření smrštění bylo doprovázeno měřením teplot uvnitř zkušebních těles (T_{in}) a na vnějším povrchu smršťovacích žlabů ($T_{rám}$). Pro tento účel byla použita teplotní čidla ve formě drátů, zapojená do měřicí ústředny MS6 (COMET SYSTEM, s.r.o.) s nastaveným intervalem záznamu dat 1/min.

Poměrná přetvoření získána měřením pomocí indukčnostního snímače byla stanovena dle vztahu (1) (viz kapitola 7.1). Poměrná přetvoření získána měřením pomocí strunového tenzometru byla stanovena dle (10) (viz kapitola 8.4):

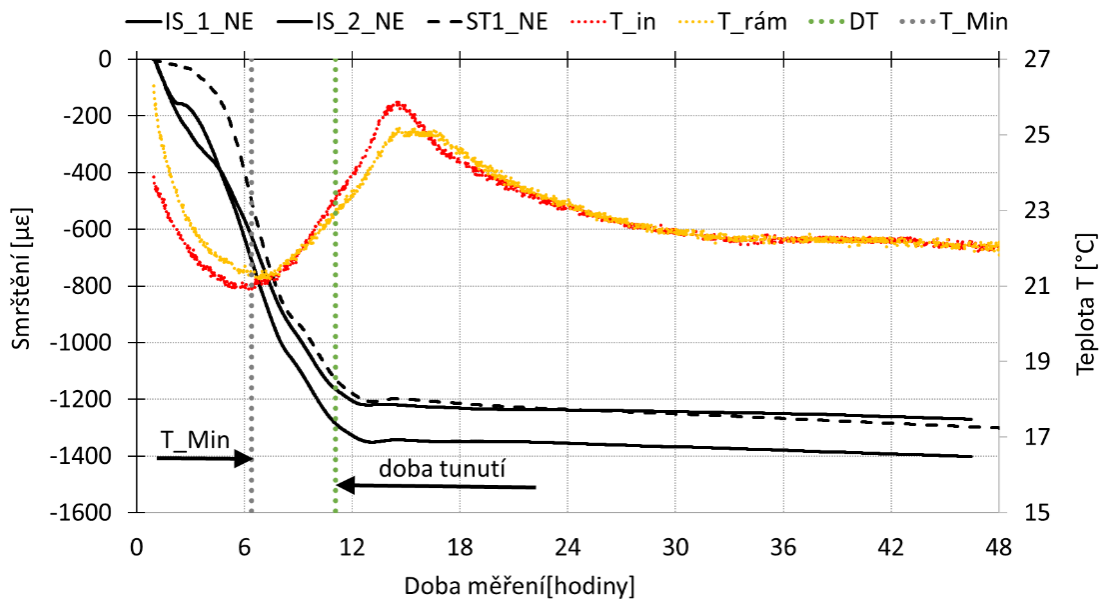
Výsledky provedeného experimentu jsou zobrazeny na Obr. 50 až Obr. 54. Kromě naměřených křivek smrštění a sledovaných teplot jsou v grafech na Obr. 50 až Obr. 52 také vyznačeny časy dosažení minimální teploty (T_{Min}) a doby tuhnutí betonu (DT). Doba tuhnutí byla stanovena dle postupu uvedeného v normě ASTM C1679-14 [45]. V případě provedeného měření se jedná o dobu, kdy vnitřní teplota betonu dosáhla poloviny vzestupné části teplotní křivky, což je 11 hodin od zahájení míchání betonu. Pro lepší přehlednost je v Tab. 13 shrnuto barevné rozlišení měřených veličin v Obr. 50 až Obr. 52. Každá zkušební sada obsahovala dvě zkušební tělesa, na nichž bylo smrštění měřeno dvěma indukčnostními snímači a jedním strunovým tenzometrem. Pro účely interpretace výsledků jsou v grafech zobrazena data naměřená jednotlivými snímači od okamžiku zahájení měření.

Tab. 13 Barevné rozlišení měřených veličin v Obr. 2 až 4 [65].

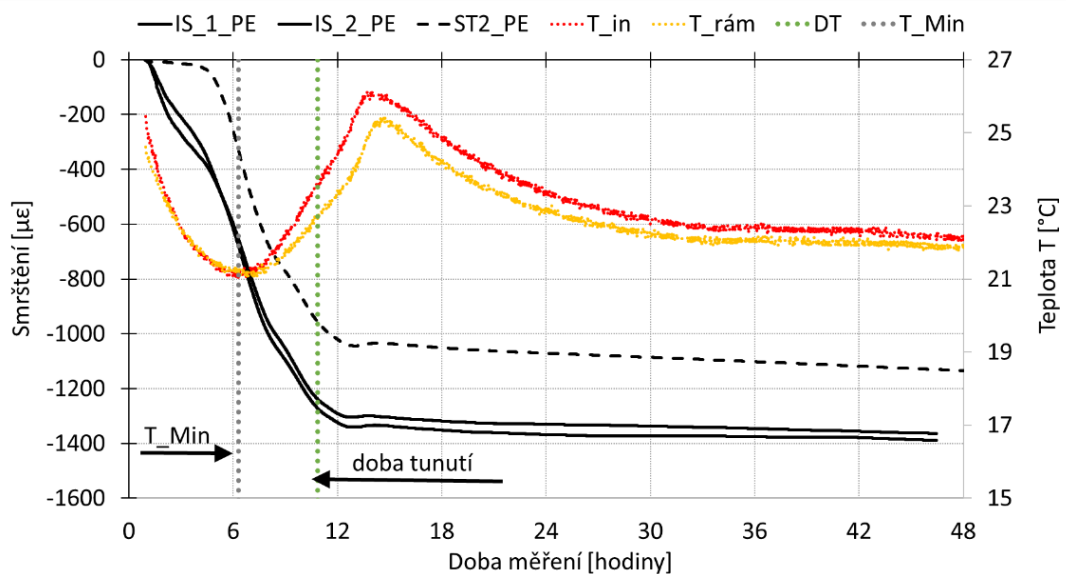
| Označení | Popis | Barevné označení |
|-----------|-------------------------------|------------------------------|
| IS | indukčnostní snímač | černá plná křivka |
| ST | strunový tenzometr | černá čárkovaná křivka |
| T_{in} | vnitřní teplota betonu | červená tečkovaná křivka |
| $T_{rám}$ | teplota na vnější straně rámu | žlutá tečkovaná křivka |
| DT | doba tuhnutí | svislá zelená tečkovaná čára |
| T_{Min} | minimální teplota betonu | svislá šedá tečkovaná čára |

Z grafů na Obr. 50 až Obr. 52 je vidět mírný časový posun mezi počátkem měření indukčnostním snímačem a zabetonovaným strunovým tenzometrem. Jedním z důvodů tohoto posunu je vlastní poloha snímačů. Indukčnostní snímač je opřený o čelo žlabu, což umožňuje zaznamenávat deformace vlivem vysychání povrchu. Vzhledem k nízké tuhosti měřicího

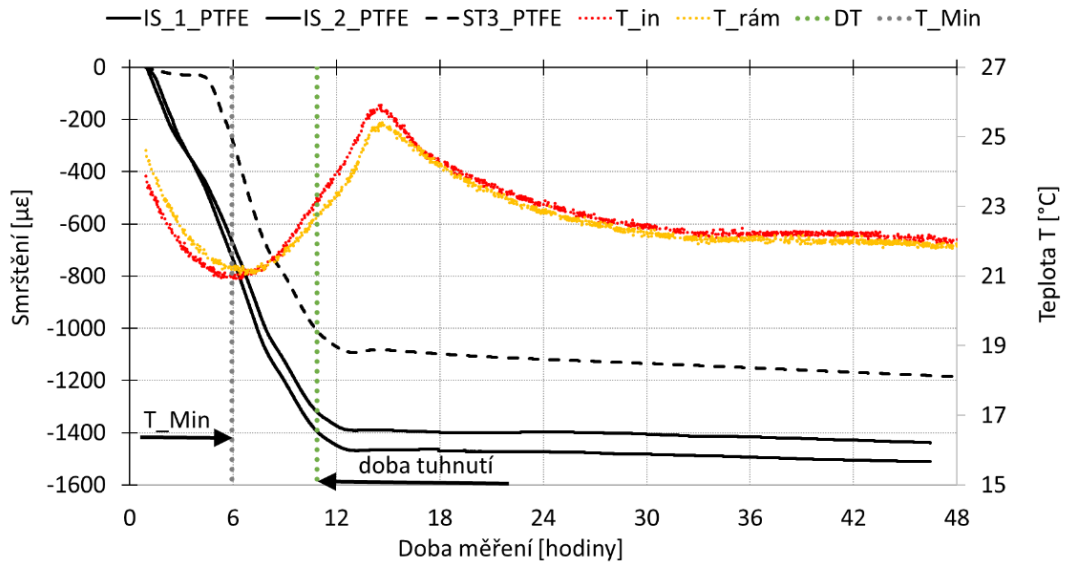
systemu je indukční snímač schopen také velmi citlivě reagovat na deformace vyvolané vysycháním a plastickým smršťováním vlivem kapilárního sání. Měření strunovým tenzometrem je ovlivněno tuhostí jeho konstrukce a pro zahájení měření je potřeba dosáhnout určitého stavu napjatosti v betonu, který překoná vlastní tuhost tenzometru. Z grafů je patrné, že strunové tenzometry zahájily měření cca 3 hodiny od spuštění záznamu, tj. ve stáří betonu cca 4 hodiny.



Obr. 50 Vývoj smrštění a teplot zaznamenaný ve žlebech opatřených neoprenovou fólií [65].

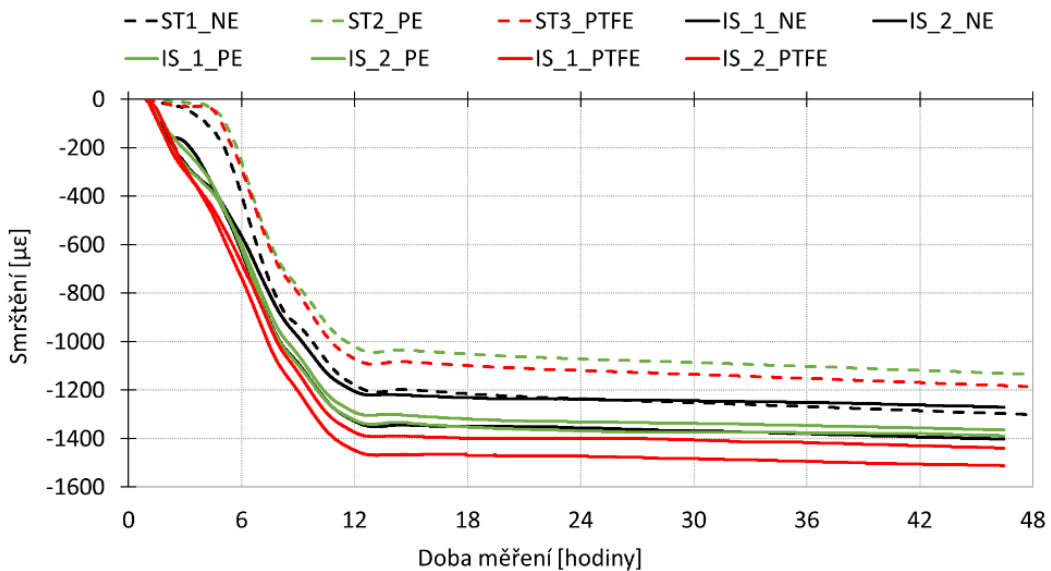


Obr. 51 Vývoj smrštění a teplot zaznamenaný ve žlebech opatřených polyetylenovou fólií [65].



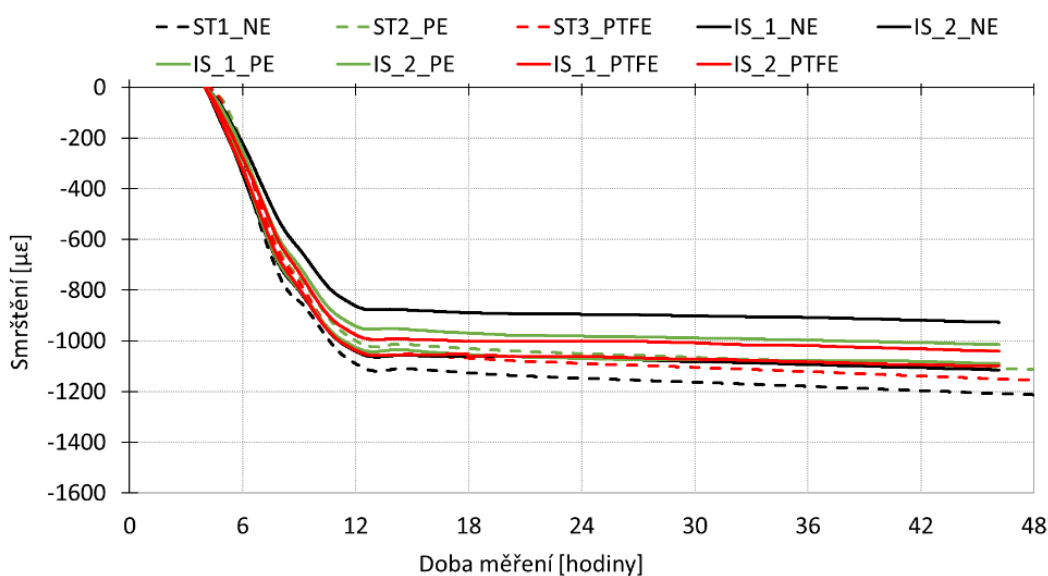
Obr. 52 Vývoj smrštění a teplot zaznamenaný ve žlebech opatřených teflonovou fólií [65].

Na Obr. 53 a Obr. 54 je zobrazen vývoj smrštění zaznamenaný indukčnostními snímači a strunovými tenzometry umístěnými ve žlebech opatřených různou separační fólií. Na Obr. 53 je zobrazen celý záznam měření od okamžiku spuštění záznamu měření, na Obr. 54 jsou pak zobrazeny křivky pro data vynulovaná v okamžiku zahájení měření strunových tenzometrů, což je cca 3 hodiny od spuštění záznamu měření.



Obr. 53 Srovnání výsledků měření indukčnostními snímači a strunovými tenzometry umístěnými ve žlebech opatřených různou separační fólií: celý záznam od spuštění měření [65].

Z výsledků zobrazených na Obr. 53 a Obr. 54 je patrný rozdíl, vyplývající z rozdílného nastavení počátku vyhodnocení naměřených dat. V praxi se pro účely interpretace výsledků měření určuje tzv. čas t_0 , což je doba zvolená jako počátek vyhodnocení pořízeného záznamu měření. Existuje několik přístupů, jak zvolit tuto specifickou dobu. Dá se říci, že nejčastěji čas t_0 odpovídá dobám tuhnutí (počátku či konci) stanoveným různými postupy. V některých případech t_0 odpovídá době dosažení maximální teploty v betonu. S nástupem vysokohodnotných a ultra-vysokohodnotných betonů je doporučeno zahájit měření co nejdříve po vyrobení. V těchto případech se jako čas t_0 často volí doba zahájení měření. Ta je ovšem závislá na typu použitého přístrojového vybavení.



Obr. 54 Srovnání výsledků měření indukčnostními snímači a strunovými tenzometry umístěnými ve žlabech opatřených různou separační fólií: záznam měření vynulovaný 3 hodiny po spuštění měření [65].

8.6 Experimentální vs. numerická analýza

Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, volba měřicího vybavení a celkový návrh, provedení a vyhodnocení experimentu může zásadně ovlivnit celkový výsledek měření. V rámci této práce jsou prezentovány zejména výsledky měření provedených použitím měřicích žlabů, či kombinací žlabů a speciálních tenzometrů s nízkou tuhostí. Výše uvedené vybavení je schopno zaznamenávat deformace vlivem smrštění bezprostředně po uložení čerstvého materiálu do formy, nebo nejpозději v období dosažení dob tuhnutí. Zejména u měření pomocí měřicích žlabů je do celkového vývoje smrštění zahrnuto také plastické smrštění, vyvolané

kapilárním sáním v pórové struktuře tuhajícího materiálu, nebo nabývání, způsobené počátečními teplotními jevy doprovázející hydrataci cementu a množstvím a rozložením vody ve struktuře materiálu. V těchto případech se často výsledek experimentální analýzy odlišuje od výsledku numerické predikce.

Výsledky níže popsaného experimentu byly nabídnuty k publikaci v zahraničním impaktovaném časopise ACI Materials Journal [66], v současné době probíhá recenzní řízení.

Celkový závěr experimentu [66]: Provedený experiment byl zaměřen na porovnání experimentálních dat získaných měření ve žlabech a predikcí vývoje smrštění získanou použitím numerického modelu B4. Pro tyto účely byly vyrobeny dva jemnozrné materiály, materiál *A* s vysokým vodním součinitelem ($w/c = 0,50$) a materiál *B* s nízkým vodním součinitelem ($w/c = 0,33$), jejichž chování se v rané fázi zrání zásadně liší. Složení obou materiálů vychází z návrhu složení normové malty daného normou ČSN EN 196-1 [67]. Pro zvýraznění procesu smrštění byla všechna zkušební tělesa po celou dobu zrání vystavena volnému vysychání, včetně rané fáze zrání. Provedený experiment se také věnuje určení vhodného času t_0 pro vynulování pořízeného záznamu měření. Vzhledem k tomu, že model B4 neobsahuje funkci pro simulaci procesů vyvolávajících smrštění v době před dosažením doby tuhnutí, byly pro účely srovnání výsledků opět zvoleny dva časy t_0 , a to čas odpovídající době zahájení měření a čas odpovídající době tuhnutí obou materiálů, stanovené jako lokální maximum prvních a druhých derivací funkcí teploty, rychlosti šíření UZ impulsu a délkových změn (viz Obr. 67 a Obr. 70). Výsledky ukázaly, že experimentálně zjištěná data a numerická predikce se zásadně odlišuje v případě, že t_0 je uvažován jako doba zahájení měření. Tento fakt byl zaznamenán u obou zkoumaných materiálů. Pokud se t_0 posune a uvažuje se jako čas okamžiku dosažení doby tuhnutí, lze pro materiál *B* ($w/c = 0,33$) dosáhnout lepší shody mezi experimentem a numerickou predikcí (viz Obr. 71). U materiálu *A*, s vysokým vodním součinitelem ($w/c = 0,50$), který v počáteční fázi zrání vykazoval nabývání, posun doby t_0 nepřispěl ke zlepšení shody mezi experimentem a numerickou predikcí, i přestože v numerické predikci bylo období nabývání uvažováno jako ošetřování povrchu materiálu v prostředí s $RH = 100\%$ do stáří 26 hodin a v období mezi 26. a 47. hodinou zrání materiálu byla uvažována lineární změna vlhkosti okolního prostředí z 100% na 55% . Důvodem je zřejmě výskyt krvácení materiálu po jeho uložení do formy, které ovlivnilo rozložení vody ve struktuře betonu, a v kombinaci s počátečními teplotními jevy proto není možné počáteční nabývání u materiálu *A* postihnout jednoduchým způsobem. Na druhou stranu, vývoj smrštění pro materiál *A*, získaný predikcí dle modelu B4, poskytuje bezpečnou předpověď smrštění pro oba

časy t_0 – v obou případech je predikovaná hodnota smrštění vyšší než naměřená. Pro materiál *B* se volba času t_0 ukazuje jako zásadní parametr, který ovlivňuje výslednou hodnotu smrštění. Pokud se t_0 uvažuje jako doba zahájení smrštění, je ve stáří 24 hodin experimentálně zjištěné smrštění 7 krát větší než predikované. Konečná hodnota smrštění ve stáří 300 dnů je v tomto případě přibližně 1,5 krát větší. Na základě výše uvedeného je nutné, aby stavební inženýři posoudili, zda počáteční část křivky smrštění je či není z hlediska návrhu konstrukce důležitá. Získané výsledky ukazují, že experimentální analýza je ovlivněna několika faktory, vyplývajícími ze zkušební metody. Jedním z nejdůležitějších je zkušební zařízení, zejména tuhost tenzometru, která ovlivňuje výstup z měření prováděných v raném stáří zrání. Čím nižší je tuhost tenzometru, tím dříve jsou zaznamenány změny délky. Okamžik zahájení měření ovlivňuje tvar křivky a také absolutní hodnotu naměřeného smrštění. Pro účely srovnávání dat je nutné přesně definovat čas t_0 , tedy okamžik zahájení vyhodnocení dat. Mezi další vlivy patří technologické faktory, které ovlivňují skutečné rozložení pevných částic a vody ve zkušebním tělese, což se následně odráží na tvaru křivky a také na absolutní hodnotě smrštění. U materiálů s vysokým w/c je často během počátečního měření pozorována vrstva vody na povrchu zkušebních těles (krvácení). Tato voda slouží částečně jako ošetřovací voda během prvních hodin zrání a snižuje tak hodnotu smrštění, či oddaluje jeho nástup. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že uvažování času t_0 jako okamžik dosažení doby tuhnutí je dobrým řešením pro oba zkoumané materiály pro získání shody mezi experimentem a numerickou predikcí použitím modelu B4.

V následujících odstavcích jsou popsány detaily provedeného experimentu včetně komentářů k získaným výsledkům, více viz [66].

Pro výrobu zkušebních těles byly připraveny dva jemnozrné materiály s označením *A* a *B*. Pro vyloučení vlivu kameniva byl pro oba materiály použit normový písek dle ČSN EN 196-1 [67] s maximálním zrnem kameniva 2 mm. Jako pojivo byl použit cement CEM I 42,5 R (Mokrá) v poměru 1:3 vzhledem k hmotnosti kameniva. Hodnota vodního součinitele byla u materiálu *A* $w/c = 0,50$ a u materiálu *B* $w/c = 0,33$. Zpracovatelnost materiálu *B* s nízkým w/c byla zajištěna přidáním superplastifikační přísady (Sika Viscocrete-4035) v množství 1 % z hmotnosti cementu. Základní vlastnosti obou materiálů jsou uvedeny v Tab. 14. Všechny fyzikální a mechanické vlastnosti byly stanoveny na zkušebních tělesech ve tvaru hranolu o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm vyrobených v polyetylenových (PE) formách (viz Obr. 55, vlevo). Zkušební hranoly byly po uložení do forem přikryty PE fólií a odformovány po 24 hodinách. První sada zkušebních těles byla podrobena zkouškám ve stáří 1 den, zbytek těles byl

až do doby jejich zkoušení zabalen do PE fólie. Pevnost v tlaku je reprezentována hranolovou pevností, modul pružnosti byl stanoven na hranolech dle normy ISO [68], dynamické Poissonovo číslo bylo stanoveno z dynamických modulů pružnosti získaných měřením rezonanční metodou (viz [69]).

Tab. 14 Fyzikální a mechanické vlastnosti zkoumaných materiálů: aritmetický průměr, (výběrová směrodatná odchylka) [66].

| | <i>A</i> | <i>B</i> |
|---|----------------|----------------|
| Bulk density 1 day [kg/m ³] | 2270 (7) | 2330 (10) |
| Bulk density 3 days [kg/m ³] | 2210 (7) | 2330 (6) |
| Compressive strength 1 day [MPa] | 16.6 (0.6) | 30.7 (0.6) |
| Compressive strength 3 days [MPa] | 32.8 (1.6) | 59.9 (0.8) |
| Compressive strength 28 days [MPa] | 40.0 (2.1) | 70.3 (2.5) |
| Compressive strength 450 days [MPa] | 59.2 (3.0) | 90.3 (3.3) |
| Static modulus of elasticity 1 day [GPa] | 17.0 (2.0) | 26.6 (0.3) |
| Static modulus of elasticity 3 days [GPa] | 27.6 (1.0) | 38.0 (0.6) |
| Static modulus of elasticity 450 days [GPa] | 33.8 (1.0) | 41.1 (0.8) |
| Dynamic Poisson's ratio 1 day [-] | 0.21 (0.02) | 0.16 (0.02) |

Pro získání lepší představy o průběhu zrání obou materiálů byl pro experiment využit UZ přístroj s měřicí komorou pro uložení vyrobených materiálů v čerstvém stavu. UZ přístroj se skládá ze dvou UZ sond, s frekvencí 54 kHz, zabudovaných v horní a dolní části měřicí komory. Středová část měřicí komory je tvořena Vicatovým prstencem (kónický tvar s nominální výškou 40 mm). Pro účely sledování vývoje vnitřní teploty zrajících materiálů byl přístroj vybaven teplotním čidlem zavedeným malým otvorem v horní části měřicí komory. S cílem zajistit průchod signálu tuhoucím materiálem byla, po celou dobu měření, budicí síla signálu nastavena na hodnotu 2000 V. Měření bylo zahájeno ihned po naplnění a utažení měřicí komory. V této konfiguraci nebylo měření ovlivněno výměnou vlhkosti mezi zkoušeným materiálem a okolním prostředím, a materiál tak zrál v autogenních podmínkách (viz Obr. 55, vpravo).



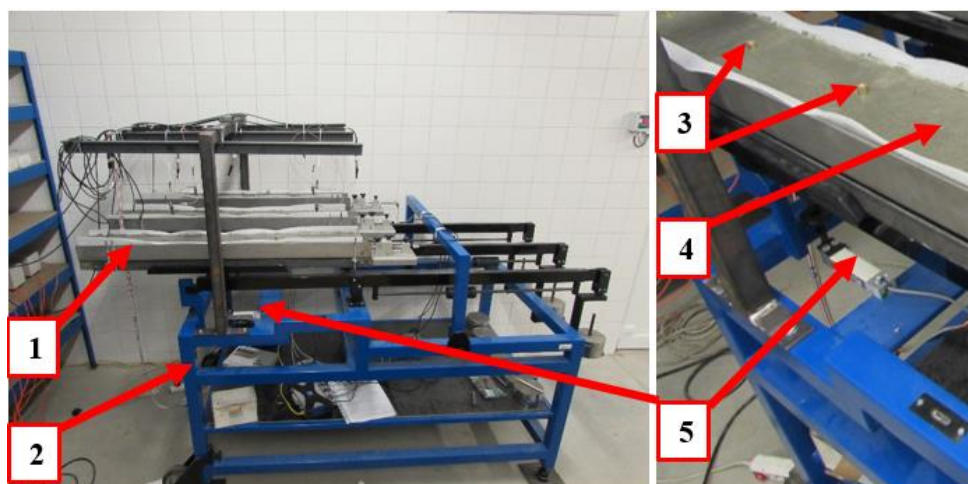
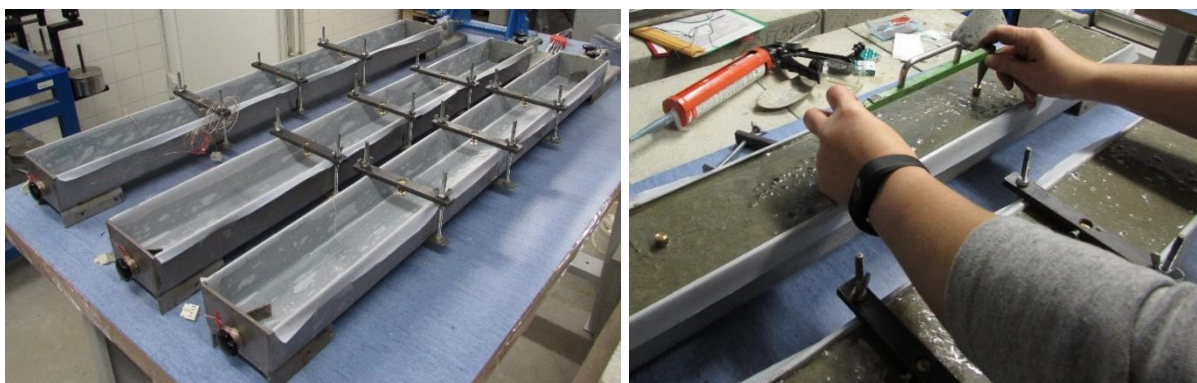
Obr. 55 Zkušební tělesa $40 \times 40 \times 160$ mm (vlevo); uspořádání změření UZ přístrojem [66].

Pro měření smrštění byly použity měřicí žlaby s rozměry $100 \times 60 \times 1000$ mm, vybavené měřicími terči pro zabetonování do horního povrchu zkušebních těles a teflonovou fólií pro zajištění volné deformace betonu ve žlabech (viz Obr. 56). Pro účely měření vnitřní teploty bylo použito teplotní čidlo ve formě drátu, zapojené do datové ústředny MS6 (COMET SYSTEMS).

Měření deformací probíhalo ve dvou fázích – během 72 hodin byly podélné deformace kontinuálně zaznamenávány pomocí indukčního snímače opřeného o pohyblivé čelo formy, pro dlouhodobé měření byla zkušební tělesa vyjmuta ze žlabů, přičemž deformace se měřily pomocí mechanického příložného tenzometru Hollan.

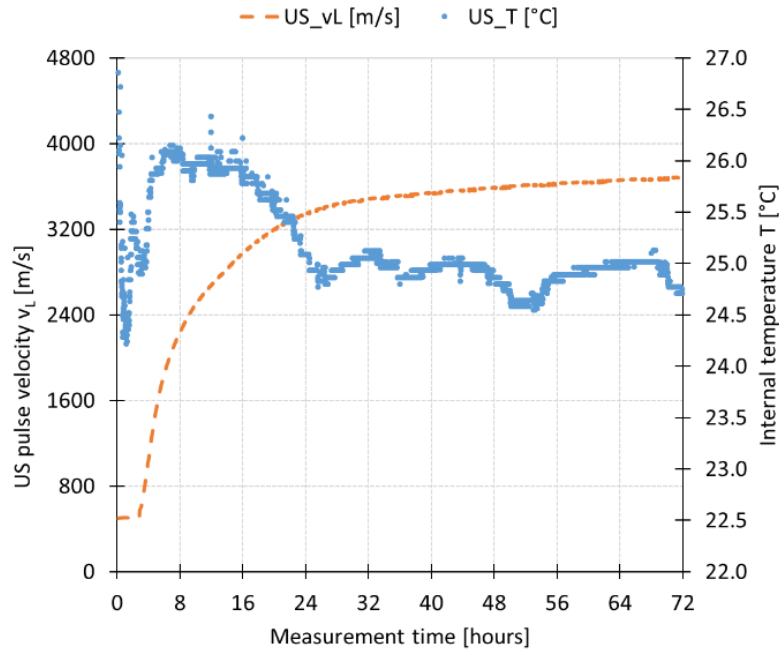
Souběžně s měřením deformací byly zaznamenávány úbytky hmotnosti. V rané fázi zrání pomocí váhového stolu (viz kapitola 7.2), pro dlouhodobá měření byla použita laboratorní váha s citlivostí 0,5 g. Pro získání kontinuálního záznamu měření byly indukční snímače a váhové členy váhového stolu připojeny k měřicí ústředně Quantum X. Všechna zkušební tělesa byla po celou dobu měření (včetně rané fáze zrání) vystavena volnému vysychání v laboratoři s teplotou okolního vzduchu (22 ± 2) °C a relativní vlhkostí vzduchu $RH = (55 \pm 10)$ %.

Poměrná přetvoření byla stanovena ve dvou na sebe navazujících fázích měření dle vztahů (1) až (3). Hmotnostní úbytky pak byly vypočteny dle vztahů (4) až (6). Výpočetní vztahy jsou uvedeny v kapitolách 7.1 až 7.2.

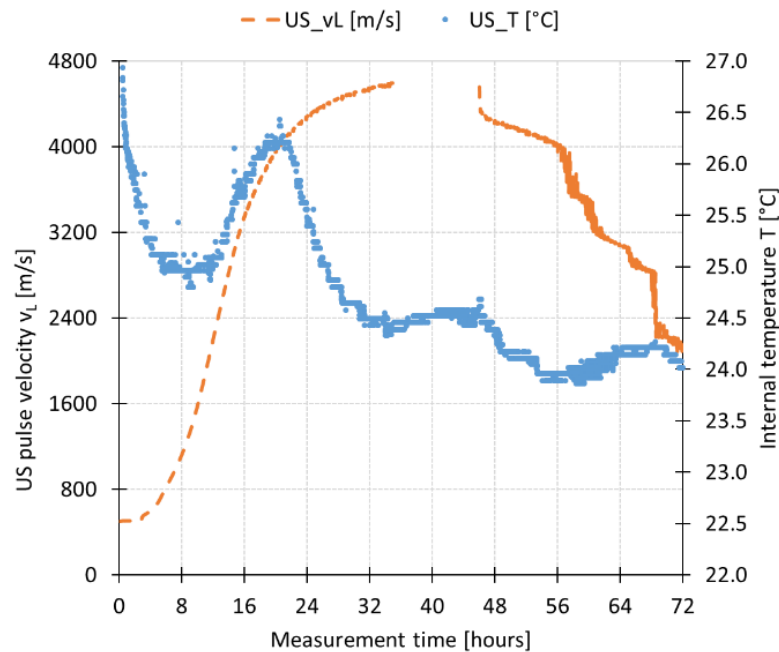


Obr. 56 Uspořádání měření smrštění a hmotnostních úbytků: 1 – měřicí žlaby; 2 – váhový stůl; 3 – terče pro dlouhodobá měření; 4 – zkušební těleso ve žlabu; 5 – váhový člen 1-PW6CMR/3kg-1 [66].

Na Obr. 57 a Obr. 58 jsou znázorněny výsledky měření získané UZ přístrojem Vikasonic pro jednotlivé zkoumané materiály. Doba měření zobrazuje skutečné stáří obou materiálů, počítané od okamžiku zahájení jejich výroby. U materiálu *A* je vidět, že rychlost šíření UZ impulsů zrajícím materiálem začala postupně narůstat 3 hodiny po zahájení měření UZ přístrojem. Ve stejné době začala také narůstat vnitřní teplota materiálu (viz Obr. 57). Podobný vývoj lze pozorovat u materiálu *B* během prvních 35 hodin měření. Poté lze pozorovat přerušení měření – pravděpodobně kvůli existenci autogenního smrštění, což způsobilo přerušení kontaktu mezi zkušebním vzorkem v měřicí komoře a horní UZ sondou (viz Obr. 58). Pro obnovení kontaktu byla měřicí komora pevněji stažena svorkami. Nicméně byla opět zaznamenána postupná ztráta kontaktu, což se projevilo na nárůstu doby průchodu UZ impulsu, což způsobilo pokles hodnoty rychlosti šíření UZ impulsu materiálem (viz Obr. 58). Výsledky získané z UZ měření dobře korespondují s výsledky získanými z měření vývoje smrštění a vnitřních teplot zkoumaných materiálů (viz Obr. 60 a Obr. 62).



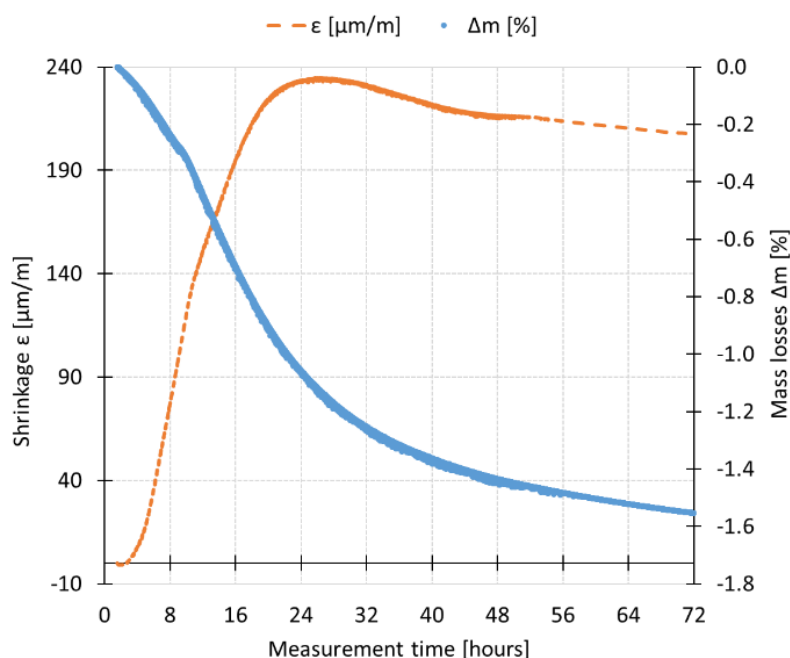
Obr. 57 Měření UZ přístrojem: materiál A [66].



Obr. 58 Měření UZ přístrojem: materiál B [66].

Na Obr. 59 až Obr. 62 jsou zobrazeny výstupy z měření smrštění, hmotnostních úbytků a vnitřních teplot obou materiálů zaznamenané v období od uložení materiálů do forem až do stáří 72 hodiny (doba odformování). Kladné hodnoty na křivce smrštění reprezentují počáteční

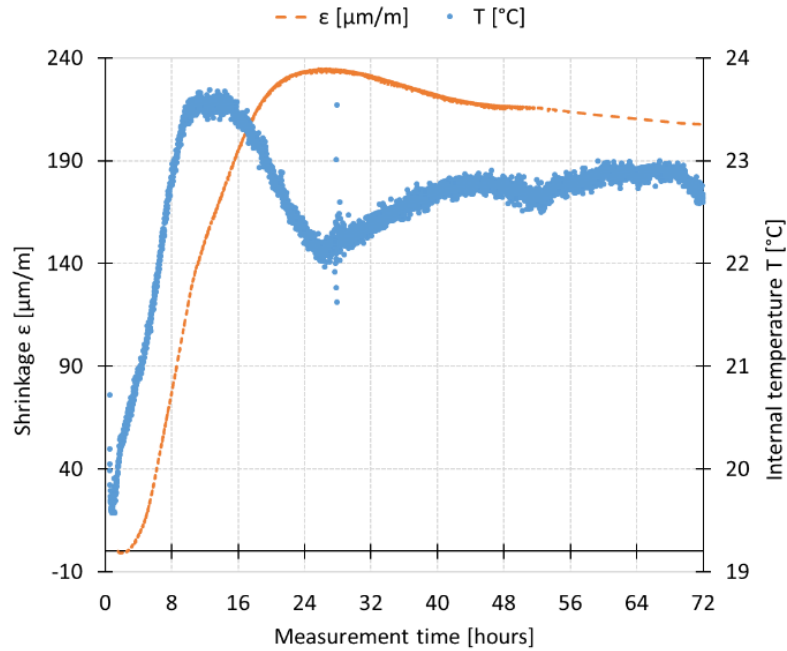
nabývání (podélnou expanzi). Pro přehlednější zobrazení experimentálních dat je ve všech případech vývoj smrštění, hmotnostních úbytků a vnitřních teplot znázorněn průměrnými hodnotami stanovenými ze tří nezávislých měření. Měření pořízená v raném stáří zřetelně ukazují rozdíly mezi zkoumanými materiály. Přestože byl horní povrch zkušebních těles v obou případech vystaven volnému vysychání, u materiálu A ($w/c = 0,50$) byla během počátečních 24 hodin zaznamenána expanze s maximem cca $230 \mu\text{m/m}$ (viz Obr. 59 a Obr. 60). Maximum zaznamenané na křivce smrštění odpovídá inflexnímu bodu na sestupné části teplotní křivky. Současně byl zaznamenán strmý pokles hmotnosti zkušebních těles s hodnotou téměř 1,6 % zaznamenanou ve stáří 72 hodin (viz Obr. 59).



Obr. 59 Měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál A [66].

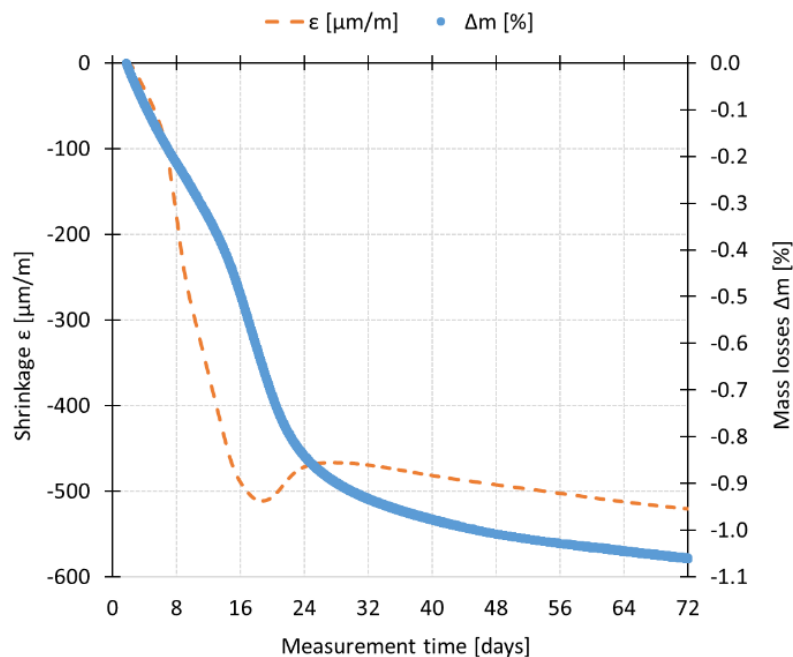
Tato expanze je spojena především s vysokým obsahem vody a teplotními jevy doprovázejícími hydrataci cementu. Vysoký obsah vody způsobil „krvácení malty“, což vedlo k vytvoření vrstvy vody na povrchu zkušebních těles. Tato voda pak dočasně sloužila částečně jako voda ošetřovací. Tento fakt byl také zahrnut do numerické analýzy – po dobu nabývání (do stáří 26 h) bylo uvažováno $RH = 100 \%$ a poté byla uvažována lineární změna RH od 100% do 55% .

U materiálu B bylo ihned po zahájení měření zaznamenáno strmé smršťování (viz Obr. 61 a Obr. 62).

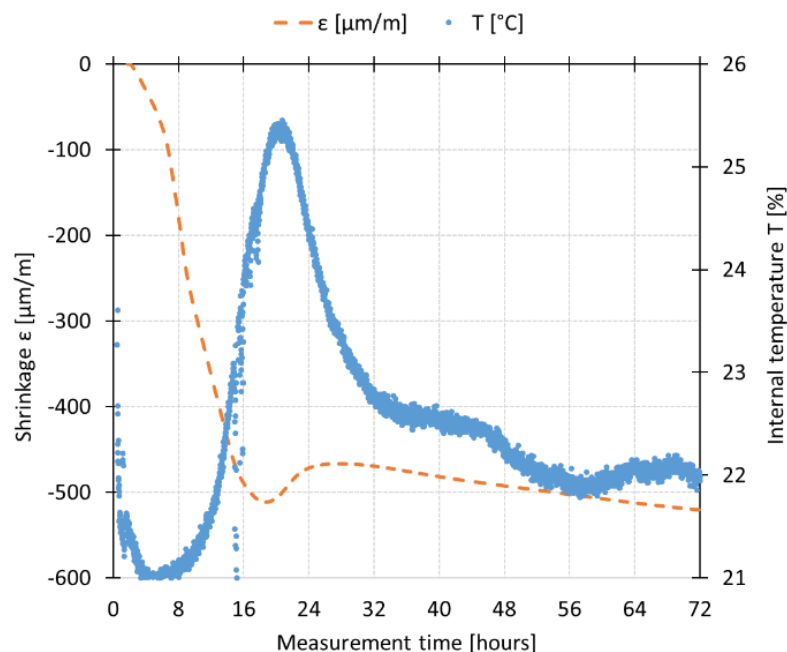


Obr. 60 Měření smrštění a vnitřní teploty: materiál A [66].

Současně se zahájením smrštění byl zaznamenán pokles hmotnosti zkušebních těles s hodnotou cca 1,05 % zaznamenanou ve stáří 72 hodin. V okamžiku dosažení maxima vnitřní teploty materiálu bylo zaznamenáno prudké zpomalení vývoje smrštění následované mírnou expanzí. Další smrštění je pak zaznamenáno v okamžiku dosažení inflexního bodu na sestupné části teplotní křivky.

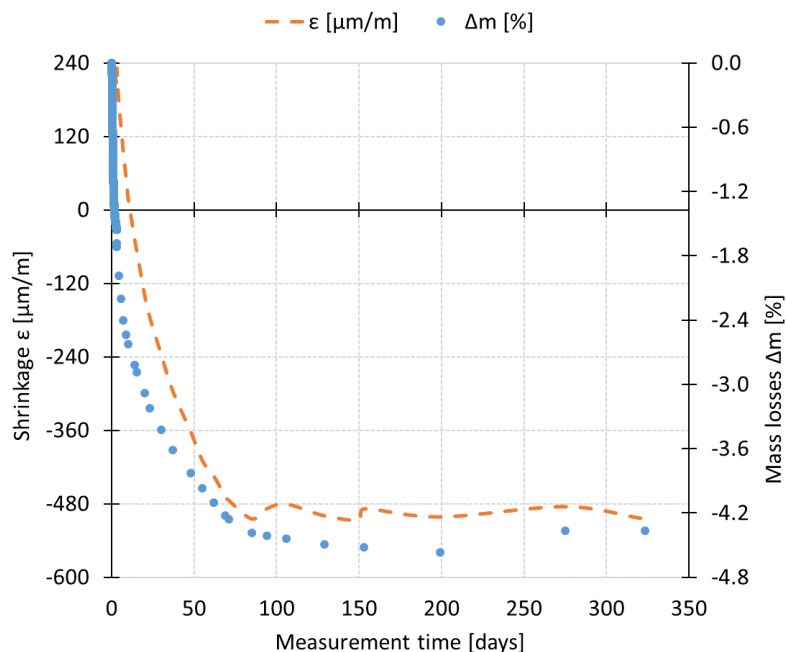


Obr. 61 Měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál B [66].



Obr. 62 Měření smrštění a vnitřní teploty: materiál *B* [66].

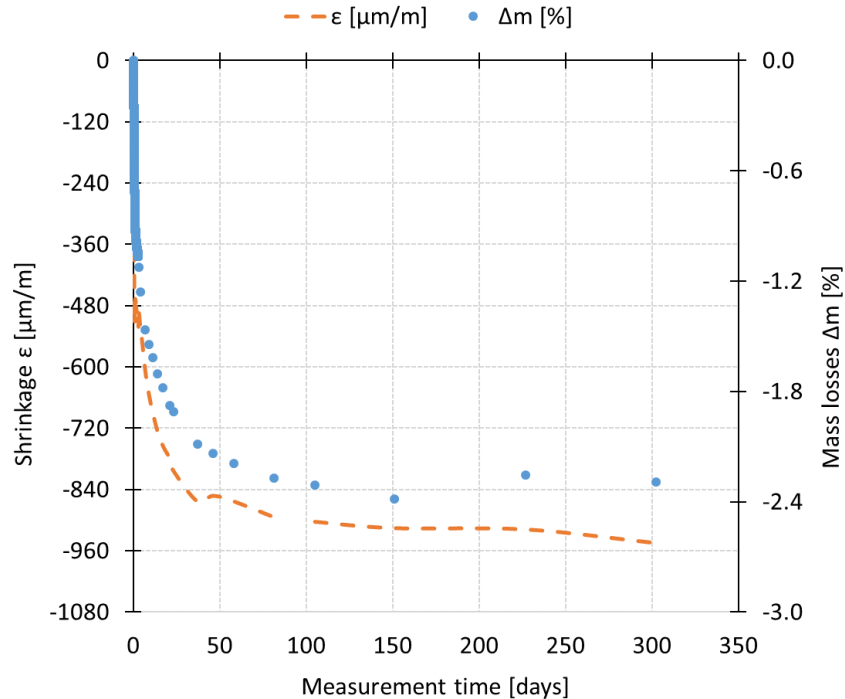
Vývoj smrštění zaznamenaný v rané fázi zrání ovlivnil i celkový dlouhodobý vývoj smrštění, zahrnující také smrštění vlivem vysychání zkušebních těles po jejich vyjmutí z forem. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 63 a Obr. 64.



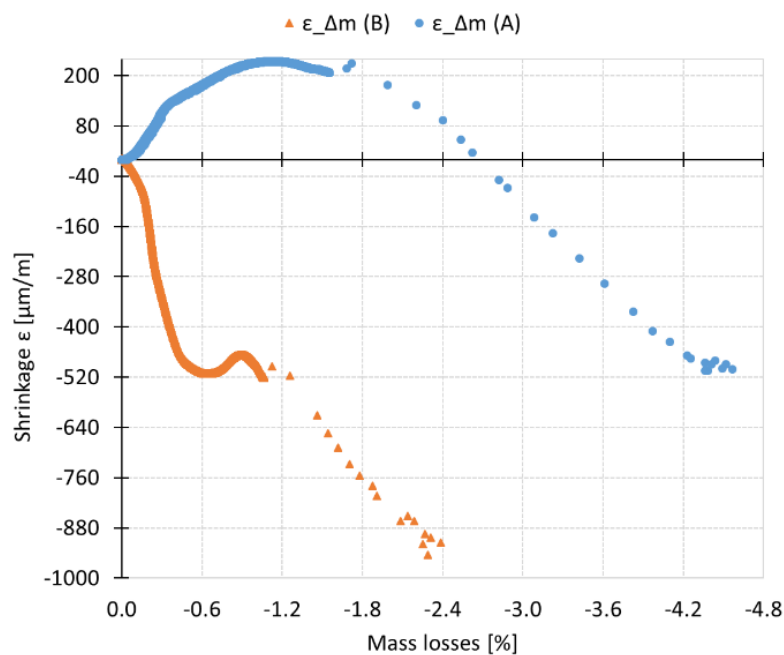
Obr. 63 Dlouhodobé měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál *A* [66].

U materiálu *A* je konečná hodnota smrštění významně ovlivněna počáteční expanzí. Hodnota smrštění v době ustálení deformací je u materiálu *A* cca 500 $\mu\text{m/m}$, zatímco u materiálu *B* je to

téměř 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tato skutečnost v podstatě popírá dosavadní znalosti v oblasti vývoje smršťování. Obecně se předpokládá, že materiály s vysokým w/c vykazují vyšší hodnotu smrštění, než materiály s nízkým w/c, za předpokladu, že počáteční hodnota autogenního smrštění nepřevyšuje následné smrštění vysycháním.



Obr. 64 Dlouhodobé měření smrštění a hmotnostních úbytků: materiál B [66].



Obr. 65 Dlouhodobé měření: závislost smrštění a hmotnostních úbytků ($\epsilon_{\Delta m}$) pro materiál A a B [66].

Poměrně zajímavý je i tvar křivek závislosti smrštění na úbytcích hmotností obou materiálů (viz Obr. 65). V rané fázi zrání je tato závislost silně ovlivněna počátečními jevy doprovázejícími proces zrání obou materiálů. Po vyjmutí zkušebních těles z forem je tato závislost v podstatě lineární.

Numerická analýza byla zpracována ve spolupráci s kolegy z Ústavu stavební mechaniky (doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D. a Ing. Hana Šimonová, Ph.D.).

Pro další zpracování dat bylo nutné provést synchronizaci záznamů všech měřených veličin (vnitřní teploty, délkové změny, rychlost šíření UZ) a data (body) nahradit polynomickými funkcemi. Pro tyto účely byly všechny záznamy zpracovány pomocí software GTDiPS [70]. Následně byly naměřené změny délky zkorigovány o vliv teplotní roztažnosti (v grafech označeno jako „corrected length changes“) pomocí níže uvedené aproximační funkce (9), vycházející z dat publikovaných v [4] (viz kapitola 3.5, Obr. 4), a naměřené vnitřní teploty zkušebního tělesa:

$$\alpha_T(t) = a \cdot e^{bt} + c, \quad (9)$$

kde α_T je teplotní roztažnost ztvrdlého betonu v 10^{-6} K^{-1} ve stáří betonu t v h, $a = 61,28$, $b = -0,1519$ a $c = 11,07$. Tyto zkorigované experimentálně zjištěné změny délky bylo potom možné porovnat s predikovaným vývojem smrštění dle modelu B4.

Model B4 pracuje s úvahou, že smrštění se skládá ze dvou částí – autogenního ε_{au} a smrštění vysycháním ε_{sh} . Předpokládá, že ε_{au} začíná narůstat v době tuhnutí a smrštění vysycháním ε_{sh} začíná narůstat v době, kdy je zkušební těleso vystaveno účinkům okolního prostředí. Celkové smrštění je pak součtem těchto dvou složek. Detaily ohledně modelu B4 včetně modelového příkladu výpočtu celkového smrštění jsou uvedeny v [9]. Z tabulek uvedených v publikaci [9] byly převzaty příslušné koeficienty závislé na typu cementu (CEM I), kameniva (quartzite sand), přísad (superplastifikátor) a podmínkách ošetřování. V Tab. 15 a Tab. 16 jsou uvedeny příslušné koeficienty použité pro predikci vývoje smrštění dle modelu B4 převzaté pro konkrétní materiál dle doporučení daných v literatuře [9].

Model B4 používá pro odhad vývoje modulu pružnosti hodnotu pevnosti stanovenou na válkách ve stáří 28 dní. V rámci provedeného experimentu byla použita hranolová pevnost stanovená ve stáří 28 dní (viz Tab. 14). Pro ověření správnosti odhadu vývoje hodnoty modulu pružnosti dle [9] na základě hranolové pevnosti byla pro oba materiály stanovena hodnota modulu pružnosti ve stáří 450 dní přímou statickou zkouškou. Výsledky ukázaly, že odhad modulu

pružnosti na základě hranolové pevnosti poskytuje korektní hodnotu, která se odlišuje od hodnoty modulu pružnosti stanovené statickou zkouškou o cca 5 %.

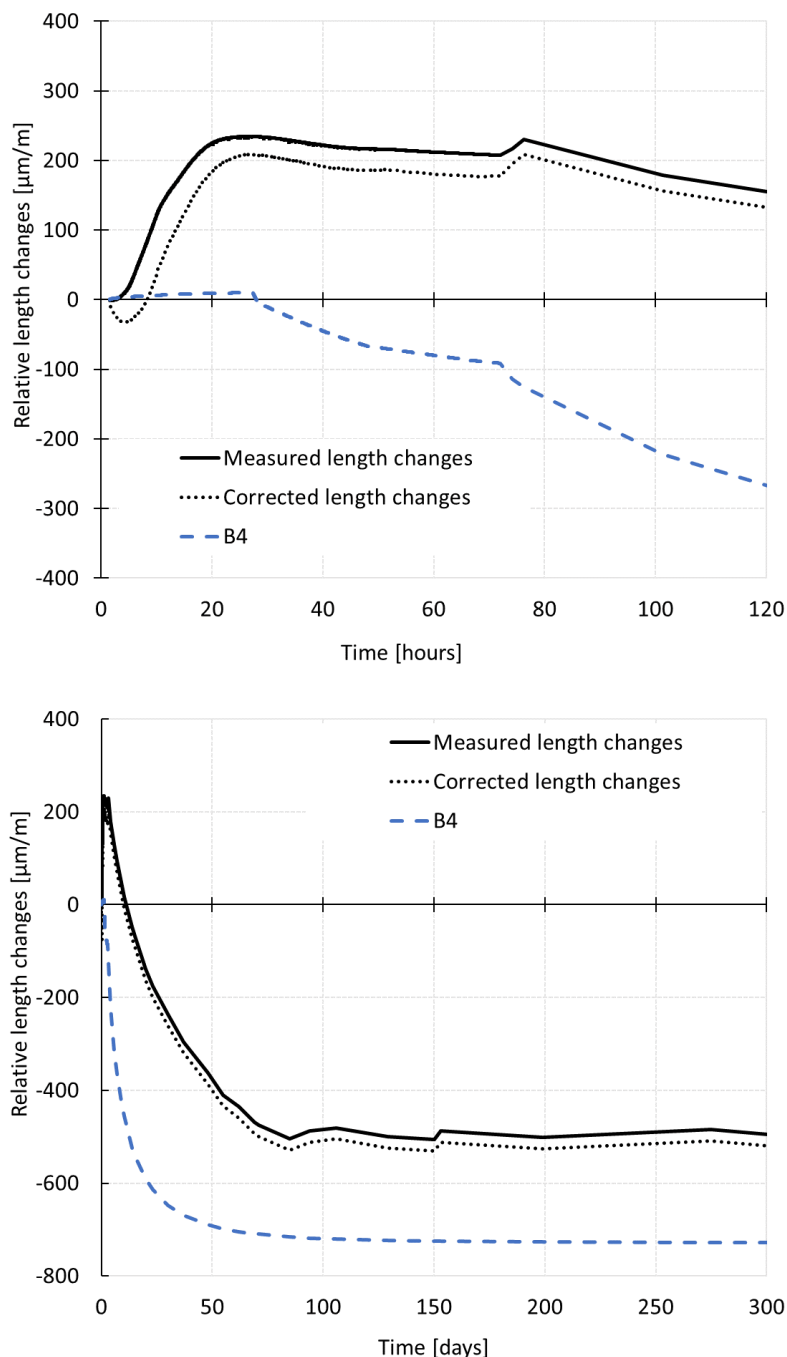
Tab. 15 Koeficienty pro výpočet ε_{au} dle B4 dle [9].

| materiál A | materiál B |
|---|---|
| $T_{cur} = 22 \text{ °C}$ | $T_{cur} = 22 \text{ °C}$ |
| $U_h/R = 4000 \text{ K}$ | $U_h/R = 4000 \text{ K}$ |
| $U_s/R = 4000 \text{ K}$ | $U_s/R = 4000 \text{ K}$ |
| Cement type = R | Cement type = R |
| $\tau_{au,cem} = 1.00$ (dnů) | $\tau_{au,cem} = 1.00$ (dnů) |
| $r_{\tau w} = 3.00$ | $r_{\tau w} = 3.00$ |
| $\varepsilon_{au,cem} = 210 \times 10^{-6}$ | $\varepsilon_{au,cem} = 2.80 \times 210 \times 10^{-6}$ |
| $r_{\varepsilon a} = -0.75$ | $r_{\varepsilon a} = -0.75$ |
| $r_{\varepsilon w} = -3.50$ | $r_{\varepsilon w} = 0.29 \cdot (-3.50)$ |
| $r_t = -4.50$ | $r_t = -4.50$ |
| $r_\alpha = 1.00$ | $r_\alpha = 0.21 \cdot 1.00$ |
| $a/c = 3$ | $a/c = 3$ |
| $w/c = 0.50$ | $w/c = 0.33$ |

Tab. 16 Koeficienty pro výpočet ε_{sh} dle B4 dle [9].

| materiál A | materiál B |
|--|--|
| $h = 1$ (do stáří 26 h) | $h = 0.55$ (po celou dobu zrání) |
| $h =$ lineární změna z 1 do 0.55 (ve stáří 26 až | $k_h = 1-h^3$ pro $h \leq 0.98$ |
| $h = 0.55$ (ve stáří > 47 h) | $f_c = f_{c,hranol}$ |
| $k_h = 1-h^3$ pro $h \leq 0.98$ | $\rho = 2310 \text{ kg/m}^3$ |
| $k_h = 12.94(1-h)-0,2$ pro $0.98 \leq h \leq 1$ | $\varepsilon_{cem} = 360 \times 10^{-6}$ |
| $f_c = f_{c,hranol}$ | $p_{\varepsilon a} = -0.80$ |
| $\rho = 2170 \text{ kg/m}^3$ | $p_{\varepsilon w} = 1.10$ |
| $\varepsilon_{cem} = 360 \times 10^{-6}$ | $p_{\varepsilon c} = 0.11$ |
| $p_{\varepsilon a} = -0.80$ | $D = 2V/S$ |
| $p_{\varepsilon w} = 1.10$ | $V/S = 120$ (do stáří 72 h) |
| $p_{\varepsilon c} = 0.11$ | $V/S = 36.14$ (stáří > 72 h) |
| $k_{\varepsilon a} = 0.71$ | $k_s = 1$ |
| $D = 2V/S$ | $k_{\tau a} = 0.59$ |
| $V/S = 120$ (do stáří 72 h) | $\tau_{cem} = 6 \cdot 0.016$ dnů |
| $V/S = 36.14$ (stáří > 72 h) | $p_{\tau a} = -0.33$ |
| $k_s = 1$ | $p_{\tau w} = -0.06$ |
| $k_{\tau a} = 0.59$ | $p_{\tau c} = -0.10$ |
| $\tau_{cem} = 0.016$ dnů | |
| $p_{\tau a} = -0.33$ | |
| $p_{\tau w} = -0.06$ | |
| $p_{\tau c} = -0.10$ | |

Pokud srovnáme výsledky numerické a experimentální analýzy při uvažování času t_0 jako okamžiku zahájení měření ($t_0 = 1,5$ hodiny od okamžiku zahájení výroby obou materiálů), pak lze pozorovat zásadní rozdíly mezi výsledky experimentu a numerické predikce.

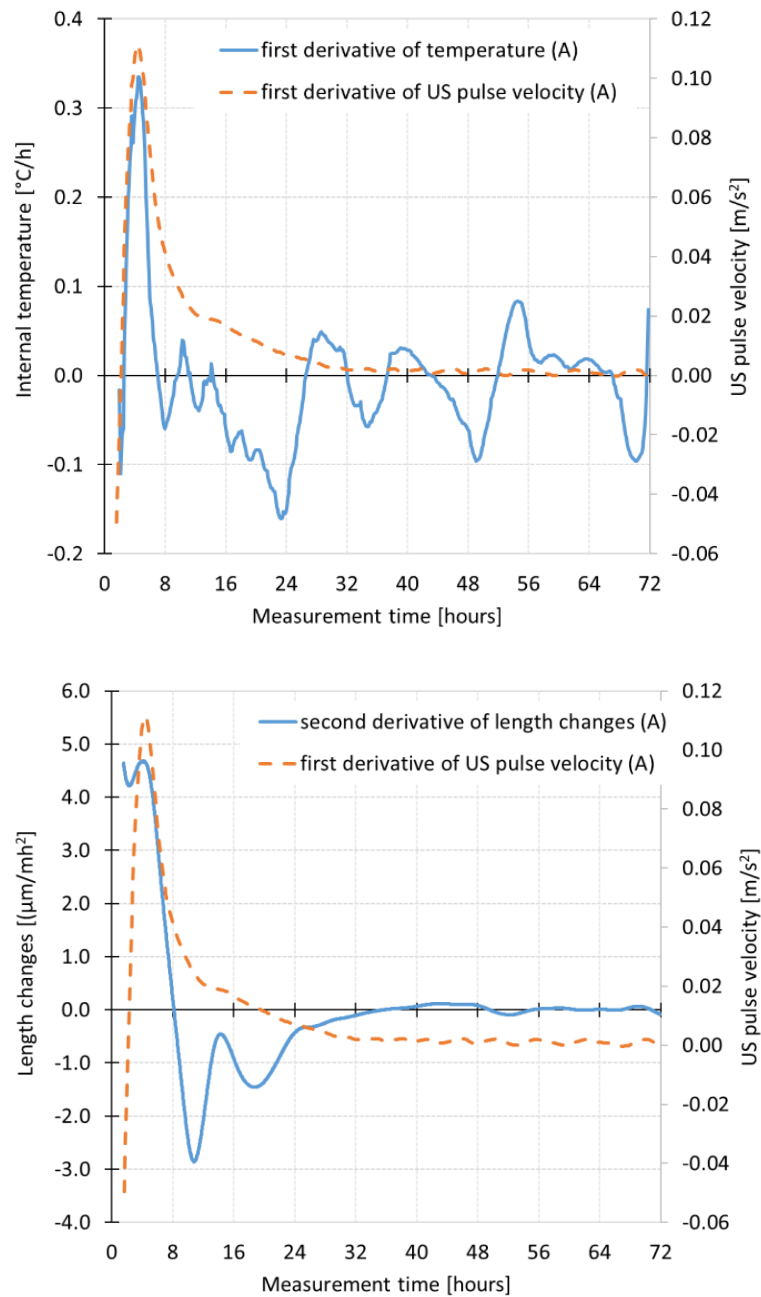


Obr. 66 Experimentální vs. numerická analýza: materiál A – vývoj smrštění v rané fázi zrání (nahore) a dlouhodobý vývoj smrštění [66].

Na Obr. 66 jsou zobrazeny výsledky pro materiál A. Z výsledků je patrné, že model B4 není schopen predikovat počáteční expanzi materiálu vystaveného volnému vysychání i přesto, že pro výpočet byly uvažovány proměnné RH po dobu trvání expanze (viz výše v textu a součinitel

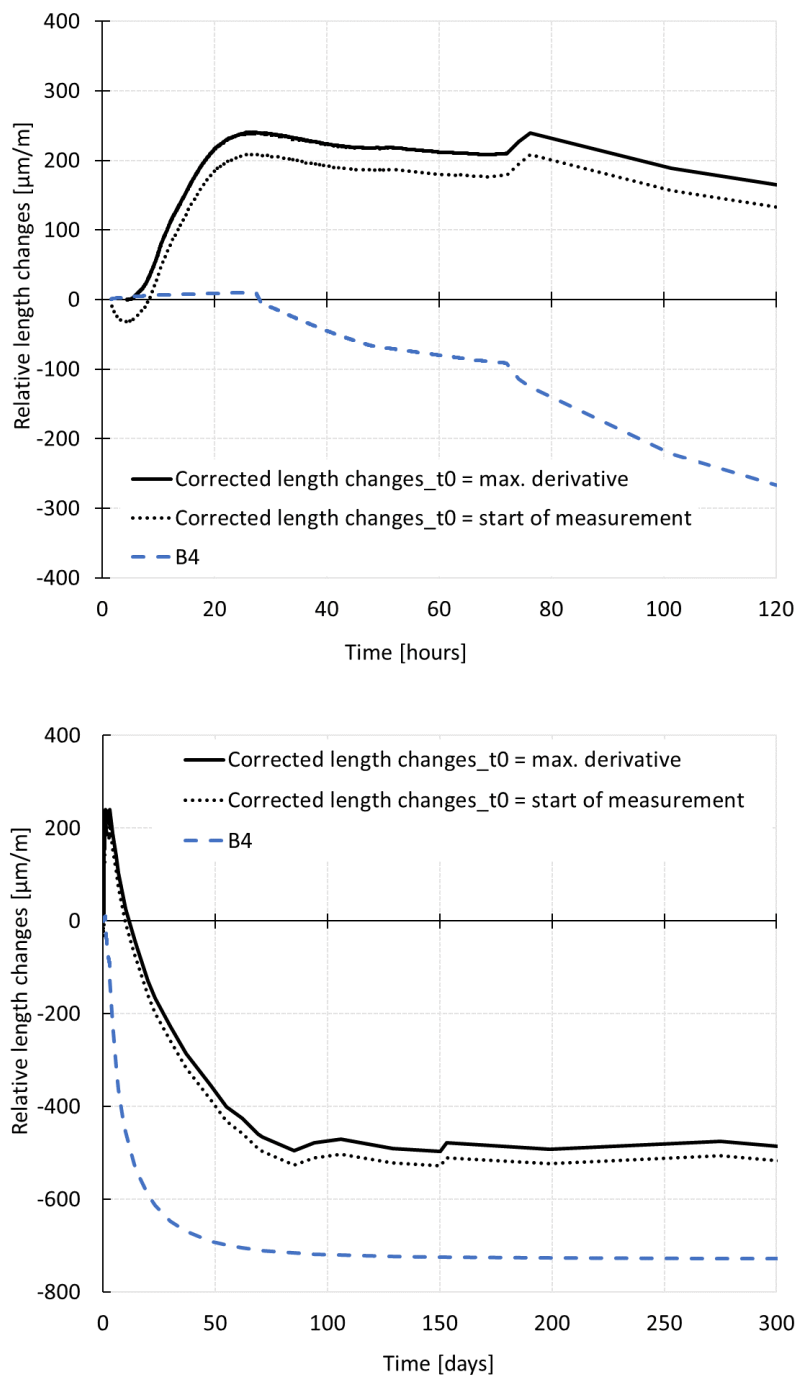
h a k_h v Tab. 16). Tento fakt se pak odrazil v dlouhodobé predikci. Je nutno poznamenat, že v tomto případě je predikovaný vývoj smrštění z hlediska návrhu konstrukce na straně bezpečné.

Vzhledem k faktu, že okamžik zahájení měření je silně závislý na použité měřicí technice, byl pro účely vyhodnocení získaného záznamu stanoven doprovodný čas t_0 , uvažovaný jako doba tuhnutí materiálu. Pro tento účel byly pro oba materiály vypočteny první a druhé derivace funkce teploty, změny délky a rychlosti šíření UZ impulsu.



Obr. 67 Stanovení času t_0 : první a druhé derivace funkce teploty, rychlosti šíření UZ impulsu a délkových změn pro materiál A [66].

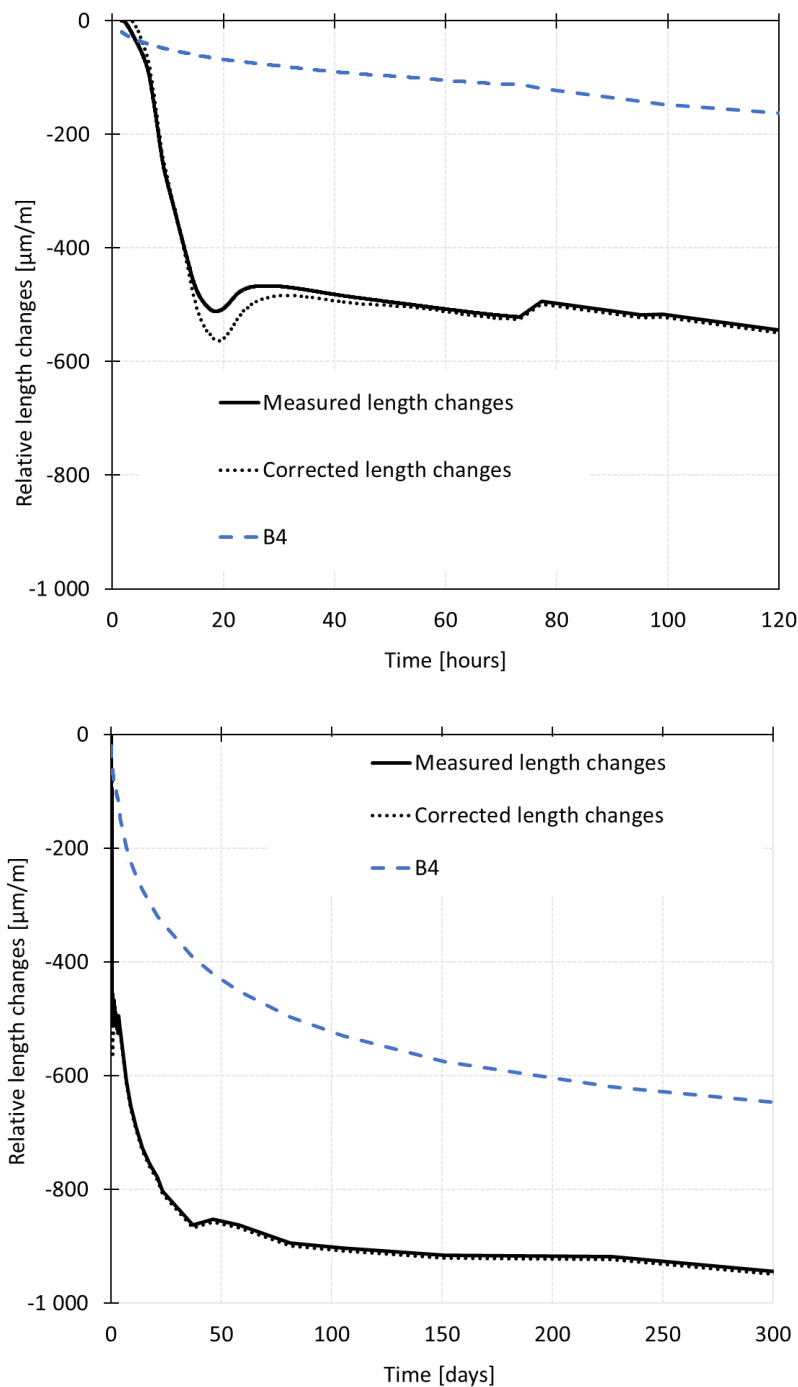
Čas t_0 byl v tomto případě uvažován jako doba dosažení lokálního maxima provedených derivací. Předpokládalo se, že tato maxima odpovídají času dosažení největší pozitivní změny vnitřní teploty materiálu (inflexní bod na vzestupné části teplotní křivky). U materiálu A byla zaznamenána velmi dobrá shoda mezi všemi naměřenými veličinami a doba tuhnutí tak byla stanovena na 4,4 hodiny (viz Obr. 67).



Obr. 68 Experimentální vs. numerická analýza: různé t_0 – materiál A [66].

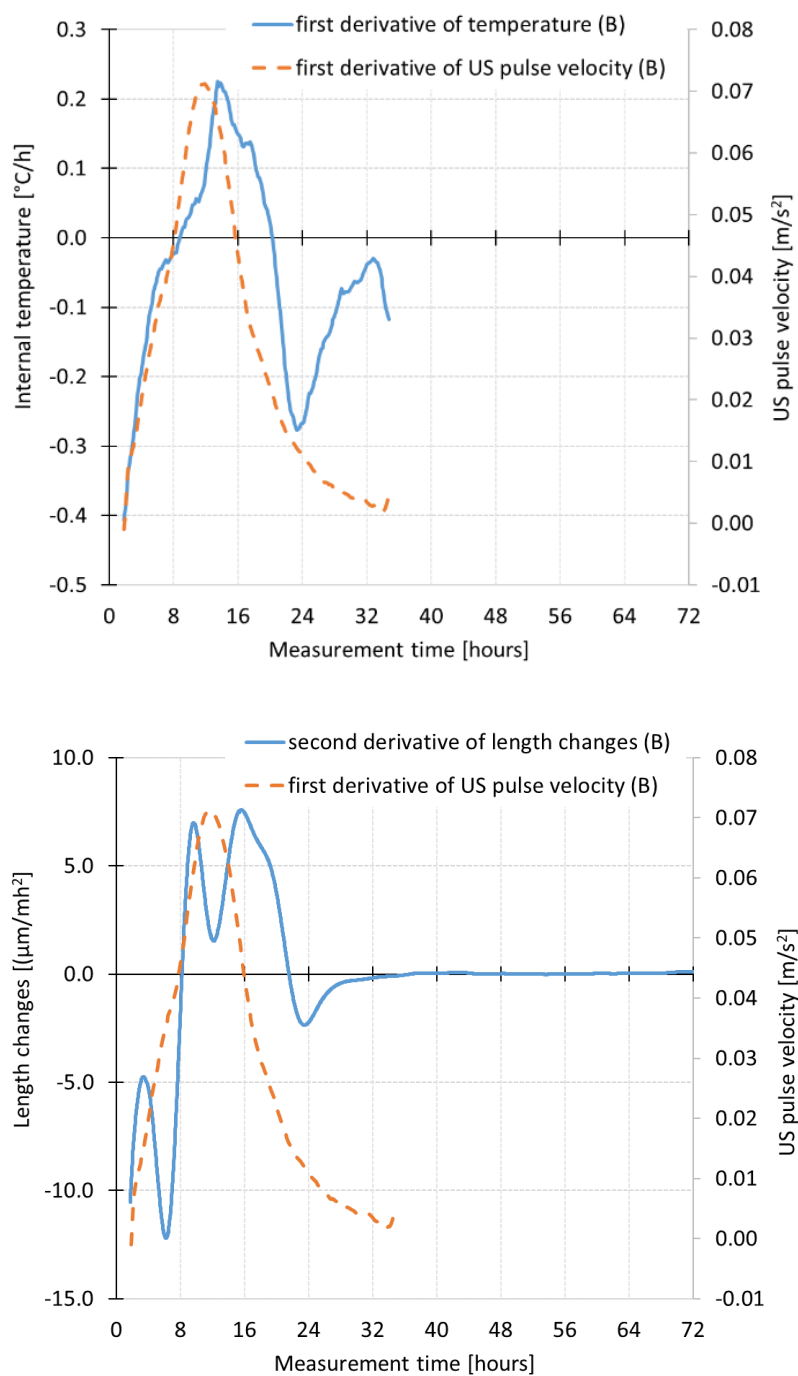
Na Obr. 68 jsou zobrazena experimentální data vynulovaná v obou časech t_0 . Z výsledků je patrné, že posun času t_0 do okamžiku specifikované doby tuhnutí nemá vliv na zlepšení shody mezi predikovaným a experimentálně stanoveným vývojem smrštění.

Obdobná analýza byla provedena i pro materiál *B*. Na Obr. 69 je znázorněn vývoj experimentálně stanoveného smrštění při uvažování času t_0 jako doby zahájení měření.



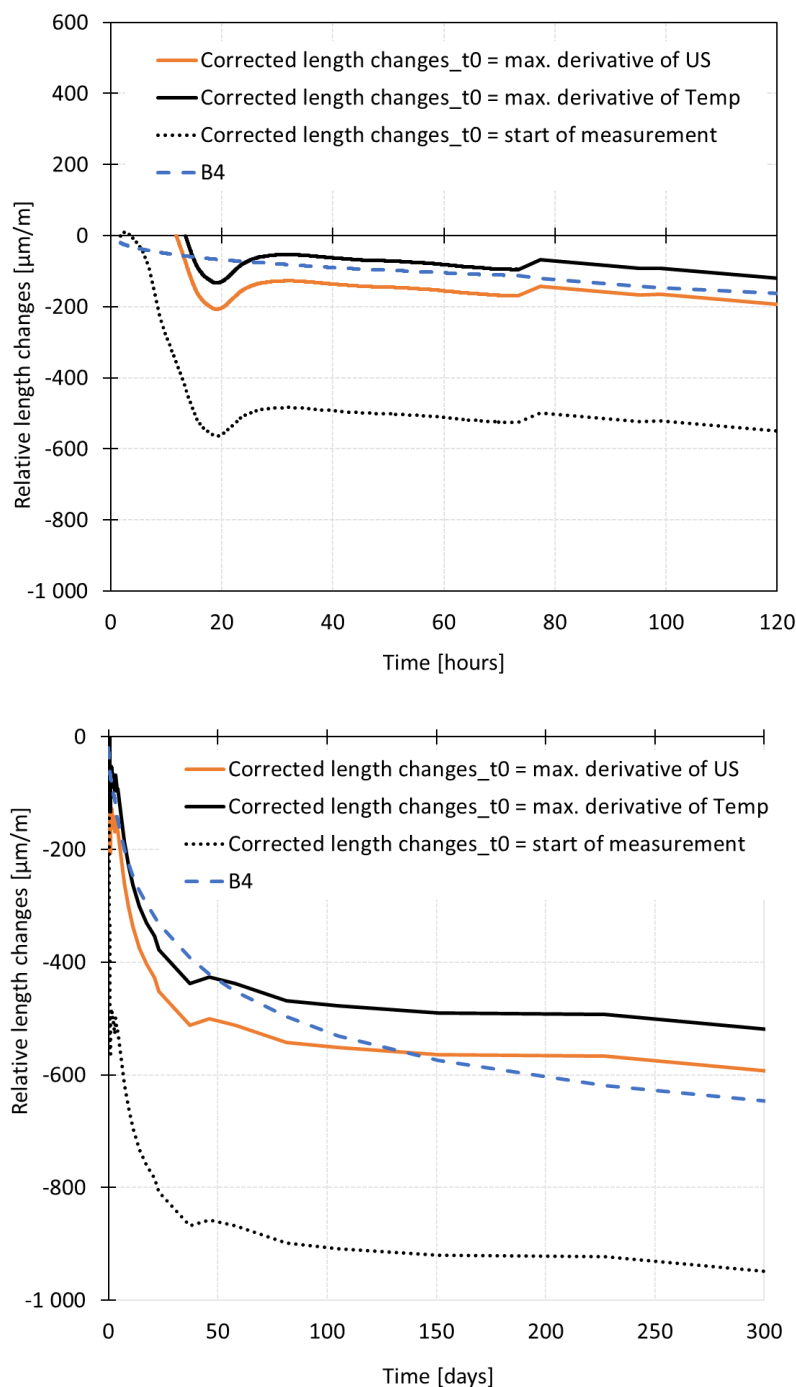
Obr. 69 Experimentální vs. numerická analýza: materiál *B* – vývoj smrštění v rané fázi zrání (nahore) a dlouhodobý vývoj smrštění [66].

Z grafu je patrný významný rozdíl mezi naměřeným a predikovaným vývojem smrštění u materiálu *B*. Na rozdíl od materiálu *A* predikovaný vývoj smrštění u materiálu *B* výrazně podhodnocuje skutečný vývoj smrštění zaznamenaný během celé doby měření (včetně rané fáze zrání). Ve stáří 24 hodin je experimentálně zjištěná hodnota smrštění 7 krát větší a konečná hodnota smrštění, stanovená ve stáří 300 dní, je pak 1,5 krát větší než predikovaná (viz Obr. 69).



Obr. 70 Stanovení času t_0 : první a druhé derivace funkce teploty, rychlosti šíření UZ impulsu a délkových změn pro materiál *B* [66].

Na Obr. 70 jsou znázorněny křivky prvních a druhých derivací funkce teploty, rychlosti šíření UZ impulsu a změn délky. Ve srovnání s materiálem *A* byly u materiálu *B* zaznamenány mírně odlišné časy dosažení maxim provedených derivací, s intervalem od 11,8 do 15,6 hodin. Vzhledem k tomu, že derivace změn délky vykázala v místě maxima dvojitý vrchol, byly pro účely vyhodnocení a určení doby tuhnutí (doprovodný čas t_0) uvažovány doby dosažení lokálního maxima derivace funkce rychlosti (11,8 h) a teploty (13,48 h).



Obr. 71 Experimentální vs. numerická analýza: různé t_0 – materiál *B* [66].

Na Obr. 71 jsou zobrazeny průběhy smrštění při uvažování různých časů t_0 . Z výsledků je patrné, že posunutí počátku zahájení vyhodnocení dat do okamžiku dosažení doby tuhnutí významně zlepšilo shodu mezi experimentálně zjištěnými daty a predikovaným vývojem smrštění. Lze říci, že nejlepší shody bylo dosaženo při uvažování t_0 jako doby tuhnutí stanovené na základě derivace funkce rychlosti šíření UZ impulsu tuhoucím materiálem. Z výsledků je patrná mírná odlišnost ve tvaru křivek experimentálního a predikovaného smrštění. Dále je patrné, že model B4 není schopen postihnout počáteční vývoj plastického smrštění, vyvolaného kapilárním sáním ve struktuře materiálu.

9 Shrnutí dosavadních závěrů

Výsledky měření prezentované v kapitole 8 ukazují hlavní přednosti nového způsobu stanovení objemových změn cementových materiálů. Měřicí žlaby v kombinaci s váhovým stolem a přídatným vybavením pro dlouhodobá měření poskytují ucelené informace o vývoji smrštění po celou dobu zrání zkoumaných materiálů, včetně rané fáze tuhnutí a tvrdnutí. Měřicí žlaby se také ukázaly jako vhodná alternativa pro měření smrštění malt a betonů pomocí strunových tenzometrů zabudovaných dovnitř zkušebních těles. Vzhledem k tomu, že tuhost běžně dostupných tenzometrů je často vyšší než tuhost měřicího systému žlabů, je možné pomocí žlabů zachytit i deformace v plastické a semi-plastické fázi zrání, tzn. před dosažením doby tuhnutí zkoumaných materiálů. Jak bylo ukázáno na několika příkladech provedených měření, měřicí žlaby mají široké uplatnění. Vzhledem k možnosti jejich využití pro opakovaná měření se dají s výhodou uplatnit tam, kde se očekává velká četnost prováděných měření, např. při vývoji nových malt a betonů, ověřování vlivu různých typu přísad a příměsí do betonu atp. Jejich širší využití v praxi brání absence zkušebních postupů zakotvených v normách. V současné době se tak měřicí žlaby používají pouze pro účely interního měření. Pro porovnání měření v rámci spolupracujících laboratoří se používá interní předpis SOP 01/09 [47] zpracovaný na SZK, FAST.

Využití váhového stolu pro měření hmotnostních úbytků v rané fázi zrání zkoumaných materiálů významně napomáhá celkové interpretaci výsledků měření smrštění v počátečních fázích hydratace. Na základě získaných dat je možné vytvořit vztah mezi vývojem smrštění a úbytkem hmotnosti i v rané fázi zrání zkoumaných materiálů, kdy zkušební tělesa vysychají zpravidla jen horním povrchem. V případě potřeby je možné váhový stůl použít i pro kontinuální záznam dlouhodobého vývoje hmotnostních úbytků zkušebních těles po jejich vyjmutí z měřicích forem.

Prezentované výsledky také ukazují na nezbytnost měření vnitřní teploty materiálů v rané fázi jejich zrání. Informace o vývoji vnitřních teplot poskytují ucelenou představu o průběhu hydratace a jsou významné z hlediska celkové interpretace experimentálně získaných výsledků.

V kapitole 8.6 byl také představen komerčně dostupný UZ přístroj, který lze s výhodou použít pro doprovodná měření s cílem získání ucelené představy o celkovém průběhu zrání zkoumaných materiálů. Na základě tohoto měření lze určit mimo jiné také doby tuhnutí či vývoj dynamického modulu pružnosti v raném stádiu zrání. V současné době jsou připraveny k publikování autorské příspěvky, které prezentují pokročilé vyhodnocení měření UZ

přístrojem Vikasonic pro účely stanovení počátku a konce doby tuhnutí [71], a také pro stanovení odhadu vývoje statického modulu pružnosti na základě experimentálně zjištěné rychlosti šíření UZ impulsu tuhoucím materiálem a doprovodného měření vlastních frekvencí materiálu po jeho vyjmutí z formy pomocí rezonanční metody [72]. Provedená měření ukazují, že UZ přístroj Vikasonic se jeví jako vhodná alternativa k Vicatovu přístroji pro stanovení dob tuhnutí.

10 Další postup řešení

S ohledem na přesnější popis počátečních jevů souvisejících s fyzikálními a chemickými procesy spojenými s tvorbou vnitřní struktury materiálů jsou probíhající experimenty zaměřené na stanovení vývoje chemického smrštění na cementových pastách zrajících ve vodě a v autogenních podmínkách. Pro tento účel byl adaptován postup měření daný normou ASTM C1608-17 [14]. Pro doprovodná měření je v tomto případě využít UZ přístroj Vikasonic vybavený teplotním čidlem, přístroj pro analýzu tvaru UZ signálu tuhoucím materiálem a metoda akustické emise. Na řešení této problematiky se podílí Ústav stavební chemie, FAST, který provádí doprovodná měření v kalorimetru, či provádí DTA analýzu a stanovuje velikost pórů v různých stádiích procesu hydratace cementu. Na experimentech se také podílí Ústav fyziky, FAST, který zpracovává a analyzuje výsledky měření použitých akustických metod. V neposlední řadě probíhá spolupráce s kolegy z Ústavu stavební mechaniky, kteří provádí komplexní zpracování naměřených dat pro účely následné numerické analýzy.

Provedené pilotní testy ukázaly vhodnost využití UZ přístroje Vikasonic pro predikci vývoje chemického smrštění past probíhajícího v autogenních podmínkách. Výsledky byly publikovány v rámci Kalorimetrického semináře [73] či na světové konferenci FIB2018 [54]. Autorský příspěvek publikovaný v časopise Beton TKS [30] uvádí příklad využití metody měření dle ASTM [14] pro studium vývoje chemického smrštění probíhajícího ve vodě a v autogenních podmínkách. Výstupy získané z analýzy signálu či ze zaznamenaných událostí AE ukazují na potenciál využití těchto metod pro účely stanovení dob tuhnutí [58, 59].

Další testy by měly směřovat k adaptaci výše uvedených měřicích technik pro studium hydratačních procesů a objemových změn u malt či jemnozrnných betonů. Získaná experimentální data budou pak použita pro upřesnění predikce rané fáze smršťování existujících matematických modelů. Jedná se zejména o upřesnění predikce vývoje smrštění před dosažením doby tuhnutí, tj. v plastické a semi-plastické fázi zrání zkoumaných materiálů.

11 Seznam použité literatury

- [1] AiTCIN, P.-C. *Vysokohodnotný beton: High-Performance Concrete*. 1. české vyd. Prague: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [2] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] HAVLÁSEK, P. *Creep and Shrinkage of Concrete subjected to variable Environmental Conditions*. Prague, 2014. PhD Thesis. CTU, Faculty of Civil Engineering. Vedoucí práce Jirásek Milan.
- [4] HOLT, Erika E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2001, 184 p. + app. 9p. ISBN 95-138-5870-7. VTT Publications 446. Technical Research Centre of Finland.
- [5] TAZAWA, E. a Sh. MIYAZAWA. Estimation of Autogenous Shrinkage of Concrete. *Doboku Gakkai Ronbunshu*. 1997, (571), 211-219. DOI: 10.2208/jscej.1997.571_211.
- [6] KRATOCHVÍL, M., I. TERZIJSKI a L. ZVOLÁNEK. Autogenní smršťování a jeho měření od okamžiku uložení betonu. *Beton TKS*. Beton TKS, s.r.o., 2014, **14**(3), 64-67. ISSN 1213-3116.
- [7] XUN, X., Z. RONGHUA a L. YINGHU. Influence of curing regime on properties of reactive powder concrete containing waste steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2020, **232**. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117129. ISSN 09500618.
- [8] TEJ, P., J. KOLÍSKO a P. POKORNÝ. Porovnání vybraných modelů pro stanovení součinitele dotvarování a poměrného smršťování betonu. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2016, **16**(2), 34-36. ISSN 1213-3116.
- [9] RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete. *Materials and Structures*. 2015, **48**(4), 753-770. DOI: 10.1617/s11527-014-0485-2.
- [10] BENTZ, Dale P., G. SANT a J. WEISS. Early-Age Properties of Cement-Based Materials. I: Influence of Cement Fineness. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2008, **20**(7), 502-508. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:7(502). ISSN 0899-1561.
- [11] YODSUDJAI, W. a K. WANG. Chemical shrinkage behavior of pastes made with different types of cements. *Construction and Building Materials*. 2013, **40**, 854-862. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.053.
- [12] JUSTNES, H., E. J. SELLEVOLD, A. VAN GEMERT, D. VAN GEMERT a F. VERBOVEN. Influence of Plasticizers and Super-plasticizers on Chemical Shrinkage of Cement. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. Nice, France: CANMET/ ACI SP-195, 2000b, pp. 601-614.
- [13] LURA, P., F. WINNEFELD a S. KLEMM. Simultaneous measurements of heat of hydration and chemical shrinkage on hardening cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2010, **101**(3), 925-932. DOI: 10.1007/s10973-009-0586-2. ISSN 1388-6150.

- [14] ASTM C1608-17. *ASTM C1608-17: Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [15] COMBRINCK, R., L. STEYL a W. P. BOSHOFF. Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete. *Construction and Building Materials*. 2018, **185**, 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.028. ISSN 09500618.
- [16] ED. BY A. BENTUR, . *Early age cracking in cementitious systems: report of RILEM Technical Committee 181-EAS 'Early Age Shrinkage Induced Stresses and Cracking in Cementitious Systems'*. Bagnex: RILEM Publ, 2003. ISBN 2912143330.
- [17] OENORM B 3329:2009-06-01. *Grout - Requirements and test methods*. Austria, 2009.
- [18] ASTM C1698-09(2014): *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [19] ASTM C827 / C827M-16: *Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- [20] ASTM C1090 / C1090M - 15: *Standard Test Method for Measuring Changes in Height of Cylindrical Specimens of Hydraulic-Cement Grout*. West Conshohocken, PA, 2015: ASTM International, 2015.
- [21] ASTM C1579-13: *Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
- [22] ASTM C1581 / C1581M-18a: *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- [23] ASTM C878 / C878M-14a: *Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [24] MÁRTONOVÁ, V., P. VESELÝ a J. VAŠKOVÁ. Experimentální metody pro měření smršťování betonu. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2019, **19**(42019), 50-56. ISSN 1213-3116.
- [25] HU, Z., C. SHI, Z.CAO, Z.OU, D. WANG, Z. WU a L. HE. A review on testing methods for autogenous shrinkage measurement of cement-based materials. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2013, **2**(2), 161-171. DOI: 10.1080/21650373.2013.797937.
- [26] REINHARDT, H.W. a C.U. GROSSE. *Advanced testing of cement based materials during setting and hardening*. Bagnex, France: RILEM Publications, 2005, 341 s. ISBN 29-121-4381-0.
- [27] JASICZAK, J., P. SZYMAŃSKI a P. NOWOTARSKI. Wider Perspective of Testing Early Shrinkage of Concrete Modified with Admixtures in Changeable W/C Ratio as Innovative Solution in Civil Engineering. *Procedia Engineering*. 2015, **122**, 310-319. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.10.041.
- [28] BOUASKER, M., P. MOUNANGA, P. TURCRY, A. LOUKILI a A. KHELIDJ. Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. *Cement and Concrete Composites*. 2008, **30**(1), 13-22. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.06.004.
- [29] MOUNANGA, P., A. KHELIDJ, A. LOUKILI a V. BAROGHEL-BOUNY. Predicting Ca(OH)₂ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical

- approach. *Cement and Concrete Research*. 2004, **34**(2), 255-265. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.07.006. ISSN 00088846.
- [30] KUCHARCZYKOVÁ, B., D. KOCÁB, P. ROVNANÍKOVÁ, R. HALAMOVÁ a M. HODULÁKOVÁ. Experimentální stanovení vývoje chemického a autogenního smrštění cementových past. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2019, **19**(5), 58-65. ISSN 1213-3116.
- [31] BÍLEK, V. a P.C. AICTIN. Vysokohodnotný beton – aktualizace v roce 2011. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2012, **12**(7), 11-19. ISSN 1213-3116.
- [32] *GEOKON: Trusted Measurements* [online]. b.r. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://www.geokon.com/4200-Series>
- [33] *KYOWA* [online]. b.r. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/index.html
- [34] *U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration* [online]. b.r. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/16080/index.cfm>
- [35] SCHLEIBINGER TESTING SYSTEM, . *Shrinkage-Drain* [online]. b.r. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage:Shrinkage-Drain>
- [36] *CONTROLS* [online]. b.r. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/mereni-objemovych-zmen/>
- [37] ČSN 731320: *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: ČNI, 1988.
- [38] VINKLER, M. a Jan L. VÍTEK. Vysychání a mršťování betonu. *Beton TKS*. 2016, **16**(2), 40-45. ISSN 1213-3116.
- [39] DAYALAN, J. a M. BUELLAH. Internal Curing of Concrete Using Prewetted Light Weight Aggregates. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2014, **3**(3).
- [40] ČSN EN 12617-4. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Part 4: Determination of shrinkage and expansion*. The Czech version of the European Standard EN 12617-4. Prague: ČNI, 2003.
- [41] ČSN EN 12808-4: *Lepidla a spárovací malty pro keramické obkladové prvky - Část 4: Stanovení smrštění*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [42] ČSN EN 196-3: *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení doby tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: UNMZ, 2017.
- [43] ČSN 73 1332. *Determination of concrete setting time*. Praha: ÚNM, 1986.
- [44] ČSN EN 13294. ČSN EN 13294: *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení doby tuhnutí*. Praha: ČNI, 2003.
- [45] ASTM C1679-14. *ASTM C1679-14: Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry*. 2014. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [46] LAMOND, Joseph F. a J. H. PIELERT. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. [Rev. ed.]. Philadelphia, PA: ASTM, 2006. ASTM special technical publication, 169D. ISBN 08-031-3367-7.

- [47] KUCHARCZYKOVÁ, B., T. VYMAZAL, P. DANĚK, P. MISÁK a O. POSPÍCHAL. *Standardní operační postup 01/09: Standardní operační postup pro stanovení smšřování a nabývání betonu*. Brno, Ústav stavebního zkušebnictví, 2009.
- [48] KUCHARCZYKOVÁ, B., DANĚK, P., MISÁK, P. a T. VYMAZAL. *Zařízení pro měření poměrných přetvoření betonu a cementových kompozitů*. 2011. ČR. CZ 21600 U1 Užitný vzor. Přihlášeno 13.10.2010. Uděleno 12.1.2011. Zapsáno 3.1.2011.
- [49] VYMAZAL, T., DANĚK, P. KUCHARCZYKOVÁ, B. a P. MISÁK. *Způsob kontinuálního měření hmotnostních úbytků cementových kompozitů v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí a zařízení k provádění tohoto způsobu*. 2015. ČR. CZ 304898 B6 Patent. Uděleno 26.11.2014. Zapsáno 7.1.2015.
- [50] KUCHARCZYKOVÁ, B., KOCÁB D., DANĚK, P. a I. TERZIJSKI. Cost-Effective High-Performance Concrete: Experimental Analysis on Shrinkage. *Materials*. 2019, **12**(17). DOI: 10.3390/ma12172730. ISSN 1996-1944.
- [51] ALEXA, M., B. KUCHARCZYKOVÁ, D. KOCÁB a R. HALAMOVÁ. The Measurement of Shrinkage: Influence of Specimen Size. *8th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM 2019)*. Tokyo Denki University, Tokyo, Japan: in print.
- [52] SCHLEIBINGER TESTING SYSTEMS, . *Ultrasonic Setting Measurement* [online]. Germany: Schleibinger Gerate. Dostupné z: http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Setting_and_Maturity:Ultrasonic_Setting_Measurement
- [53] ROZSYPALOVÁ, I., KAREL, O., KUCHARCZYKOVÁ, B., KOCÁB, D. a R. HALAMOVÁ. Monitoring of the Setting and early Hardening with Ultrasonic Waves. *Key Engineering Materials*. 2018, **776**, 51-54. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.776.51.
- [54] KUCHARCZYKOVÁ, B., D. KOCÁB, R. HALAMOVÁ, H. ŠIMONOVÁ a P. ROVNANÍKOVÁ. Experimental Investigation of the Chemical Shrinkage of the Cement Paste Based on the Calorimetric and Ultrasonic Measurement. *In Proceedings for the 2018 fib Congress held in Melbourne, Australia*. Switzerland: Fédération internationale du béton (fib), 2019, pp. 2482-2489.
- [55] HALAMOVÁ, R., D. KOCÁB a B. KUCHARCZYKOVÁ. Možnosti stanovení modulu pružnosti a Poissonova čísla v rané fázi zrání cementových materiálů. *Beton TKS*. 2019, **19**(1), 56–60. ISSN 1213-3116.
- [56] KUCHARCZYKOVÁ, B., L. TOPOLÁŘ, P. DANĚK, D. KOCÁB a P. MISÁK. Comprehensive Testing Techniques for the Measurement of Shrinkage and Structural Changes of Fine-Grained Cement-Based Composites during Ageing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017, **2017**(3832072). DOI: 10.1155/2017/3832072.
- [57] TOPOLÁŘ, L., L. PAZDERA, B. KUCHARCZYKOVÁ, J. SMUTNÝ a K. MIKULÁŠEK. Using Acoustic Emission Methods to Monitor Cement Composites during Setting and Hardening. *Applied Sciences*. 2017, **7**(5), 451. DOI: 10.3390/app7050451.
- [58] HODULÁKOVÁ, M., L. TOPOLÁŘ a B. KUCHARCZYKOVÁ. Pilot study of mechanical waves passing through fine-grained cement composite during the early hydration process. In: *8th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM 2019)*. Tokyo Denki University, Tokyo, Japan, in print.
- [59] HODULÁKOVÁ, M., L. TOPOLÁŘ a B. KUCHARCZYKOVÁ. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes. In:

- International Conference on Building Materials and Materials Engineering (ICBMM 2019)*. Caparica Campus, NOVA Unniversity of Lisbon, Portugal, in print.
- [60] KUCHARCZYKOVÁ, B., O. POSPÍCHAL, P. MISÁK, P. DANĚK a T. VYMAZAL. Smrštění betonů s pórovitým kamenivem – vliv míry nasycení kameniva. *Stavební obzor*. Praha: Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2010, **19**(9), 269-273.
- [61] KUCHARCZYKOVÁ, B., DANĚK, P., KOCÁB, D. a P. MISÁK. Experimental Analysis on Shrinkage and Swelling in Ordinary Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017, **2017**, 1-11. DOI: 10.1155/2017/3027301. ISSN 1687-8434.
- [62] ROVNANÍKOVÁ, P. a O. ŽALUD. Effect of Admixtures and Fine Grain of Aggregate on the Portland Cement Hydration. In: *Trvanlivost 2015*. Brno: Faculty of Civil Engineering, BUT, 2015, p. 123-133. ISBN 978-80-214-5245-9.
- [63] RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications, 1995. ISBN 9780815513735.
- [64] YOO, D.-Y., S.O. KIM a M.-J. KIM. Comparative shrinkage behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under ambient and heat curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2018, **162**, 406-419. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.029. ISSN 09500618.
- [65] KUCHARCZYKOVÁ, B., D. KOCÁB, M. ALEXA, P. DANĚK a T. VYMAZAL. Měření smršťování: vliv typu separační fólie. In: *Sborník příspěvků konference 26. Betonářské dny (2019)*. Hradec Králové: ČBS, 2019. ISBN 978-80-906759-6-4.
- [66] KUCHARCZYKOVÁ, B., H. ŠIMONOVÁ, P. FRANTÍK a D. KOCÁB. Numerical analysis of shrinkage process based on the experimental data. *ACI Materials Journal*. under review, b.r. ISSN 0889325X.
- [67] ČSN EN 196-1:2005. *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength*. Prague: ČNI, 2005.
- [68] ISO 1920-10:2010: *Testing of concrete: Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2010.
- [69] KOCÁB, D., M. KRÁLÍKOVÁ, P. CIKRLÉ, P. MISÁK a B. KUCHARCZYKOVÁ. Experimental analysis of the influence of concrete curing on the development of its elastic modulus over time. *Materiali in tehnologije*. 2017, **51**(4), 657-665. DOI: 10.17222/mit.2016.248. ISSN 15802949.
- [70] FRANTÍK, P. a J. MAŠEK. *GTDiPS software*, <http://gtdips.kitnarf.cz/>. Brno, 2015.
- [71] MISÁK, P., B. KUCHARCZYKOVÁ, D. KOCÁB a T. VYMAZAL. Ultrasonic NDT Determination of Initial and Final Setting Time of Cement Paste. In: *Presented in conference SPACE 2019*. Štrbské Pleso, Slovakia: under review, 2019, 7 p.
- [72] KOCÁB, D., B. KUCHARCZYKOVÁ a R. HALAMOVÁ. Determination of the static modulus of elasticity of cement mortars in the early stage of ageing. In: *Presented in conference SPACE 2019*. Štrbské Pleso, Slovakia: under review, 2019, 6 p.
- [73] KUCHARCZYKOVÁ, B. a P. ROVNANÍKOVÁ. Studium smrštění cementové pasty v počátečních stádiích hydratace. In: 40. Mezinárodní český a slovenský kalorimetrický seminář. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2018, s. 135-138. ISBN 978-80-7560-142-1.

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|--------------------|--|
| SZK | Ústav stavebního zkušebnictví |
| FAST | Fakulta stavební |
| VUT | Vysoké učení technické v Brně |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| RILEM | Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages |
| HPC | Vysokohodnotný beton |
| UHPC | Ultra vysokohodnotný beton |
| RPC | Betony na bázi reaktivních prášků |
| SCC | Samozhutnitelný beton |
| SCC HPC | Vysokohodnotný samozhutnitelný beton |
| NSC | obyčejný beton |
| RH | relativní vlhkost vzduchu |
| AE | akustická emise |
| UZ | ultrazvuk |
| DTA | diferenční termická analýza |
| w/c | vodní součinitel |
| a/c | hmotnostní poměr kameniva a cementu |
| b/a | objemový poměr pojivové složky a cementu |
| C_2S | dikalciium silikát |
| t_0 | nulový čas, uvažovaný pro účely vyhodnocení měření |
| vs. | versus |
| $\alpha_{(t)}$ | součinitel teplotní roztažnosti v závislosti na čase |
| T_{cur} | teplota okolního prostředí dle [9] |
| U_h | aktivační energie hydratace dle [9] |
| R | plynová konstanta dle [9] |
| U_s | aktivační energie difuze vlhkosti dle [9] |
| Δm | úbytek hmotnosti |
| ε_{ea} | smrštění v rané fázi zrání |

| | |
|---------------------|---|
| ϵ_{lt} | dlouhodobé smrštění |
| ϵ_{au} | autogenní smrštění |
| ϵ_{sh} | smrštění vysycháním |
| $\tau_{au,cem}$ | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| $r_{\tau w}$ | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| $\epsilon_{au,cem}$ | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| $r_{\epsilon a}$ | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| $r_{\epsilon w}$ | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| r_t | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| r_a | parametr autogenního smrštění dle [9] závislý na typu cementu |
| h | vlhkost prostředí dle [9] |
| k_h | parametr smrštění vysycháním dle [9], závislý na vlhkosti prostředí h |
| f_c | válcová pevnost v tlaku |
| $f_{c,hranol}$ | hranolová pevnost v tlaku |
| ρ | objemová hmotnost betonu |
| ϵ_{cem} | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $p_{\epsilon a}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $p_{\epsilon w}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $p_{\epsilon c}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $k_{\epsilon a}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| D | efektivní tloušťka průřezu vypočtená z V/S |
| V/S | poměr objemu k vysychající ploše (volume-surface ratio) |
| k_s | koeficient tvaru průřezu dle [9] |
| $k_{\tau a}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| τ_{cem} | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $p_{\tau a}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $p_{\tau w}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |
| $p_{\tau c}$ | parametr smrštění vysycháním dle [9] závislý na typu cementu |