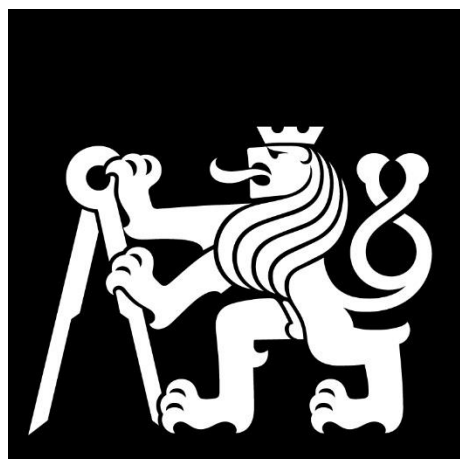


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE



**FAKULTA  
STAVEBNÍ  
ČVUT V PRAZE**

EXPERIMENTÁLNÍ CENTRUM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

BC. VENDULA DAVIDOVÁ



Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce Ing. Pavla Reitermana, Ph.D. Zdroje informací, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 3.1.2019

.....

Bc. Vendula Davidová



Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Ing. Pavlovi Reitermanovi, Ph.D. za vedení celé mé diplomové práce. Další poděkování patří společnosti Skanska Transbeton s.r.o. za poskytnuté materiály potřebné pro její zpracování.



Faktory ovlivňující smrštění kompozitů na  
bázi portlandského cementu

Shrinkage influencing factors of composites on the  
basis of portland







ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Davidová</u>	Jméno: <u>Vendula</u>	Osobní číslo: <u>424380</u>
Zadávací katedra: <u>Experimentální centrum</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Materiálové inženýrství</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Faktory ovlivňující smrštění kompozitů na bázi portlandského cementu</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Shrinkage Influencing Factors of Composites on the Basis of Portland Cement</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracování literární rešerše, která bude zaměřena na jednotlivé faktory ovlivňující smrštění kompozitů na bázi cementu včetně používaných experimentálních metod. Příprava, realizace a vyhodnocení experimentálního programu se zaměřením na podmínky ošetřování a typ pojivového systému. Dosažené výsledky budou diskutovány a porovnány s dostupnou literaturou.	
Seznam doporučené literatury: I. Wu, N. Farzadnia, C. Shi, Z. Zhang, H. Wang, Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review, Construction and Building Materials 149 (2017) 62-75. S. A. Al-Saleh, Comparison of theoretical and experimental shrinkage in concrete, Construction and Building Materials 72 (2014) 326-332.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>3.10. 2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1. 2018</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
<div style="border: 1px dashed black; width: 150px; height: 30px; margin: 0 auto;"></div> Podpis vedoucího práce	<div style="border: 1px dashed black; width: 150px; height: 30px; margin: 0 auto;"></div> Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>3.10.2018</u> Datum převzetí zadání	<div style="border: 1px dashed black; width: 150px; height: 30px; margin: 0 auto;"></div> Podpis studenta(ky)
---	--



## Abstrakt

Pokud chceme prodloužit životní cyklus betonových konstrukcí, je třeba se zaměřit na zvýšení trvanlivosti betonu. Na trvanlivost má vliv mnoho faktorů, jeden z nejdůležitějších je ovšem přítomnost a velikost trhlin. Trhliny mohou vznikat z různých důvodů, obvykle vlivem změny objemu. Tato diplomová práce je zaměřena na porovnání smrštění, především vlivem vysychání, vybraných druhů cementů (CEM I 52,5 R Mokrý, CEM I 42,5 R, CEM II/B-S 32,5 R, CEM III B 35,5 N Prachovice) s různými typy ošetřování. Za účelem snížení energetické náročnosti na výrobu cementu byly dále sledovány vzorky s 25% náhradou cementu struskou. Po dosažení manipulační pevnosti byly vzorky pravidelně přeměřovány digitálním úchylkoměrem a zároveň byla stanovována hmotnost po dobu 35 dnů. Spolu se smrštěním byla sledována i pevnost vzorků. Výzkumem jsme zjistili, že prvotní vývoj pevností má zásadní vliv na velikost smrštění od vysychání. Nejlepších výsledků tedy dosáhly cementy s nejrychlejšími pevnostními náběhy, naopak nejhorších výsledků dosáhly cementy s nejpomalejšími náběhy pevností. Po přidání strusky se smrštění zpravidla zvětšilo, neboť se vzrůstajícím množstvím strusky v kompozitu se zvyšuje i hmotnostní úbytek vody. Těchto výsledků bylo dosaženo metodou, která zanedbává prvotní chování materiálu. Absolutní hodnoty smrštění především rychlovazných cementů by tedy byly vyšší.

## Klíčová slova

Ošetřování, portlandský cement, smrštění, struska, tahová pevnost, tlaková pevnost

## Abstract

If we want to extend the life cycle of concrete structures, it is necessary to focus on increasing the durability of concrete. Several factors can influence the durability, one of the most important are the occurrence and size of cracks. Cracks can develop for different reasons, usually due to the bulk volume changes. This thesis is focused on the comparison of cement shrinkage, mostly as a consequence of drying, between selected types of cement mixtures (CEM I 52,5 R Mokrý, CEM I 42,5 R, CEM II/B-S 32,5 R, CEM III B 35,5 N Prachovice) with varying types of treatment. To reduce energy demand for cement production, samples with 25% substitution of slag cement were also observed. Once the handling strength was reached, sample shrinkage was measured by dial gauge and weighted over the course of 35 days. Additionally, the strength of the samples was also monitored. The analysis of obtained data revealed the importance of initial development of strengths and its major effect on the amount of drying shrinkage. Best results were achieved by the fast-hardening cements, on the other hand, the worst result was achieved by the slow-hardening cement. In the samples with slag additives, the shrinkage was greatly increased. After the addition of the slag, the shrinkage has generally increased, as the increasing amount of slag in the composite also increases the weight loss of water. These results were achieved by a method that neglects the initial behavior of the material. Absolute shrinkage values of fast-hardening cements would be higher.

## Keywords

Compressive strength, portland cement, shrinkage, blast furnace slag, tensile strength, type of treatment

# Obsah

Použité symboly .....	14
Označení v názvu cementu.....	15
Úvod.....	16
Příčiny vzniku trhlin v betonu .....	20
Nesilové působení.....	20
Silové působení .....	28
Volné a vázané smrštění .....	28
Negativní vliv přítomnosti trhlin.....	29
Pevnost.....	29
Agresivní prostředí.....	29
Vodonepropustnost .....	29
Estetika.....	30
Požadavky a doporučení norem .....	31
Měřicí postupy.....	33
Mechanické.....	33
Optické – Digitální fotogrammetrie .....	35
Laserová – Smršťovací kužel .....	35
Tenzometry .....	36
Smršťovací prstence.....	37
Smršťovací žlab .....	38
Ostatní.....	39
Použitá pojiva .....	40
Praktická část.....	44
Účel práce .....	44
Popis experimentu.....	44
Výrobní postup.....	44
Ošetřování.....	45
Pevnost.....	46
Způsob měření smršťování .....	47
Vlivy na výsledky měření.....	48
Vyhodnocení výsledků pevností .....	49
Vyhodnocení výsledků volného smrštění .....	52

Smršťování na vzduchu .....	53
Smršťování s ošetřováním.....	57
Nabývání .....	60
Průběh změny hmotnosti.....	64
Porovnání se zdroji.....	68
Velikost částic .....	71
Příklad z praxe.....	74
Závěr .....	76
Seznam použité literatury.....	77
Seznam tabulek.....	82
Seznam obrázků.....	82

## Použité symboly

Označení	Název	Jednotky
RH	Relativní vlhkost prostředí	%
CaO	Oxid vápenatý	%
SiO <sub>2</sub>	Oxid křemičitý	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid železitý	%
MgO	Oxid hořečnatý	%
SO <sub>3</sub>	Oxid sírový	%
K <sub>2</sub> O	Oxid draselný	%
Na <sub>2</sub> O	Oxid sodný	%
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Sodný ekvivalent	%
Cl <sup>-</sup>	Chloridové ionty	%
C <sub>3</sub> S	alit – trikalciumpilikát	%
C <sub>2</sub> S	belit – dikalciumpilikát	%
C <sub>3</sub> A	trikalciumaluminát	%
C <sub>4</sub> AF	tetrakalciumaluminátferit	%
δ	součinitel difúzní vodivosti	s
κ	součinitele vlhkostní vodivosti	m <sup>2</sup> /s

## Označení v názvu cementu

Označení	Popis
CEM	Cement
R	Cement s vysokými počátečními pevnostmi
N	Cement s normálními počátečními pevnostmi
I II III	Druh cementu podle podílu příměsí
A, B, C	Označení množství příměsí
S	Příměs – struska
SC	Silniční cement
SR	Síranuvzdorný cement
32,5; 42,5; 52,5	Garantovaná pevnost cementu po 28 dnech

## Úvod

Beton je zrnitý kompozitní materiál z kameniva, které tvoří hlavní nosnou kostru, pojiva, kterým je především hydratovaný cement, vody a soustavy pórů. Pevnost kameniva je zpravidla vyšší, běžně se pohybuje od 30 do 150 MPa [1], v extrémních případech až 300 MPa [2] podle konkrétních typů horniny a místa těžby. Pevnost výsledného betonu je ovšem řádově nižší. Kritická část se nachází na rozhraní kameniva a samotného cementového tmelu, takzvaná přechodová oblast, kde jsou struktura a vlastnosti komplikované. Během hydratace cementu dochází k formování vnitřní struktury, tvoří se zároveň póry a souvislé kapiláry. Jejich rozložení a velikost zcela zásadně ovlivňuje konečnou pevnost betonu.

Tento problém lze omezovat správným zhutňováním, kde během tohoto procesu dochází k odstraňování vzduchových bublin. R. Howes a kolektiv [3] zkoumali vliv délky zhutňování na hlavní vlastnosti betonu. Správné zhutnění ve výsledku vede k vyšší objemové hmotnosti, s tím spojenému snížení obsahu vzduchu až ve finální podobě k vyšší pevnosti.

Zásadní vliv na pevnost má také množství vody. Obecně je známo, že vyšší objem vody, vyšší vodní součinitel, vede k nižším pevnostem. Tento jev byl potvrzen od S. Gacela a kolegů [4]. Přítomnost vody je na druhou stranu zcela nezbytným aspektem, neboť cement, jakožto hydraulické pojivo, vyžaduje k započetí hydratace vodu. Dále už může tvrdnout na vzduchu i ve vodě. Maximálního snížení vodního součinitele bez zastavení hydratace využívají návrhy vysokohodnotných betonů. U těchto betonů se vodní součinitel pohybuje pod hodnotou 0,3, což ovšem přináší komplikace se zpracováním a způsobuje vyšší chemické smrštění. Tento problém je více probírán autorem L. Wu v článku [5].

Beton ovšem není žádnou novinkou posledního století. První záznamy o stavbě z umělého kamene sahají přibližně do roku 3 600 let př.n.l. Velmi známé ve středověku bylo také používání sopečného popela smíchaného s vápnem, díky němuž mohlo dosud vzdušné pojivo tuhnout a tvrdnout pod vodou i na vzduchu. Směs tedy vykazovala hydraulické vlastnosti, známé například u dnešních směsných cementů. Zářným příkladem využívání betonu je římský Pantheon na obrázku 1, který byl v letech 120 až 125 vystavěn z lehčeného betonu. Avšak nízké pevnosti betonu v tahu postupně vedly k jeho vývoji do podoby železobetonu. S myšlenkou vyztužovat beton jako první přišel Monier a v roce 1861 byla vydána kniha o železobetonu [2].





**Obrázek 1: Pantheon v Římě [6]**

Tak jakou většiny odvětví průmyslu, i u betonu je společnost zaměřena na ekologickou stránku výroby.

Při těžení písku a lomového kamene dochází k devastaci přírody, při suchém zpracování se znečišťuje okolní prostředí hlukem a prachem z těžby a dopravy. Alternativou přírodní formy je kamenivo recyklované. Tento recyklát je obvykle získán z demolice starých betonových konstrukcí nebo například z hliněných cihel a namísto uložení na skládku se opětovně nadrtí a použije do výroby betonu. Tato problematika byla více studována například v článkách Z. Chaocan [7], RK. Dhir [8] nebo M. Etxeberria [9]. Je zde ovšem problém s kvalitou recyklovaného betonu, neboť přítomnost nežádoucích látek kupříkladu z alkalicko-křemičité reakce nebo jiných degradačních procesů odehraných v betonu při předchozím používání, může být faktor, který použití takového recyklátu zcela vylučuje. Této problematice se zatím věnovalo poměrně málo pozornosti, například ve výzkumu M. Shehata a kolegů [10] se ukázalo, že pnutí v recyklátu způsobené alkalicko-křemičitou reakcí se projevovalo i v novém betonu. Ekonomická náročnost produkce kvalitního recyklátu tedy v současné době v našich podmínkách znemožňuje jeho použití pro běžné betony. Těžba je stále nejlevnějším řešením.

Značnou ekologickou zátěž představuje výroba nejdražší složky betonu – cementu. Se vzrůstající produkcí betonu, celosvětová výroba činí 1,5 až 3 tuny betonu na obyvatele ročně, rostou i emise cementáren, které vypouští do ovzduší 5 až 7 % z celosvětových emisí CO<sub>2</sub> [11]. Takto vysoké číslo je především dané velkou produkcí betonových konstrukcí. Pokud ovšem porovnáme energii, potřebnou k výrobě ocelových konstrukcí nebo nároky na výpal keramických cihel, betonové konstrukce vycházejí nejekeologičtěji [2]. K tomu je nutno si uvědomit, že podíl cementu v betonu tvoří do 20% z celkové hmotnosti použitých složek. Za účelem snížení emisí a využití druhotných surovin se běžně nahrazuje část cementu příměsmi. Jedná se o pucolánové a latentně hydraulické materiály, které v přítomnosti cementu (zásaditého prostředí) tuhnu a tvrdnou. U nás se používá především vysokopecní struska, elektrárenské popílký či křemičitý úlet, výzkum se zabývá i využitím prachu

z broušení cihel. Například J. Juhart a kolektiv [12] označují tyto výrobky jako „EKO filery“, ale již cementárny produkují tyto „ekologičtější“ verze v podobě směsných cementů a portlandských cementů s příměsemi.

Jak již bylo zmíněno, beton je nejpoužívanějším stavebním materiálem vůbec. Při dnešních standardech v oblasti výstavby jej potřebuje každá stavba minimálně v podobě základů a podkladních vrstev.

Beton je především využíván kvůli jeho pevnosti v tlaku, která se běžně pohybuje přes 100 MPa. Současný výzkum i praxe se intenzivně věnuje hledáním technologií a složek, které by tuto vlastnost ještě zvýšily. Ať už přidáním mikroplniva, snížením vodního součinitele, použitím drátků, či využitím nanomateriálů. Dále se beton vyznačuje vysokou trvanlivostí, která zaručuje dlouhou životnost staveb a to až 100 let, při vhodné údržbě i více. Vždy ovšem záleží na prostředí, jakému je beton vystaven, a na jeho kvalitě.

Další z podstatných vlastností je schopnost vzdorovat vodě a neumožnit její transport konstrukcí. Tato vlastnost je stěžejní pro vodonepropustné konstrukce, které ochraňují vnitřní prostory staveb před vniknutím vody z okolního prostředí, ať už se jedná o podzemní vody či vlhkost zemin. Díky tomu voda nemůže vyluhovat cementové pojivo a takovéto konstrukce jsou z pravidla trvanlivější. Používané betony se vyznačují hutnou strukturou s omezeným množstvím pórů a kapilár, často jsou zde používány krystalizační přísady pro případné uzavření vzniklých trhlin, povrchové úpravy a mnoho dalších složek. Například v článku [13] se Nasiru Zakari M. a kolegové zabývali vlastnostmi materiálů, především betonu, po použití nejrůznějších přísad (silany, siloxany, polymery, silikáty,..). Výsledky ukazují snížení nasákavosti až o 98%, čímž se zvýšila celková trvanlivost, například hloubka penetrace chloridy se zastavila na 1 mm, oproti 7 mm na referenčním vzorku.

Betonové konstrukce mají nespornou výhodu v možnosti realizace složitých tvarů, ale i objemných konstrukcí, proto často ani není možnost volby alternativních materiálů. Tyto přednosti jsou s oblibou využívány nejen u nás (obrázek 2 je znázorněním monolitické kupole planetária v Plzni z betonu), ale i světovými architekty.



Obrázek 2: Kupole planetária Techmania Science Center v Plzni [14]

Přednosti betonu jsou značné, ovšem i tento materiál disponuje dalšími podstatnými negativními vlastnostmi.

Je to především nízká pevnost v tahu, která bývá hlavním důvodem, proč je většina betonových konstrukcí vyztužena. Bez přítomnosti prvků pro zachycení tahového namáhání je pevnost betonu v tahu přibližně desetinná oproti pevnosti v tlaku. Po překročení tahové pevnosti se nevyztužený beton poruší tzv. „křehkým lomem“ a dochází k okamžitému kolapsu bez předchozího varování.

Poměrně vysoká je jeho objemová hmotnost, která se u běžných betonů pohybuje okolo  $2\,400\text{ kg/m}^3$ . To určuje nároky na dopravu, omezuje možnosti manipulace na stavbě, velikost forem u prefabrikátů a mnoho dalších fyzikálních vlastností a technických řešení. Pro určité směry je to výhodou, z hlediska tepelné akumulace a vzduchové neprůzvučnosti se beton řadí mezi účinné materiály. Naproti tomu lze vyrábět lehké betony, tenkostěnné prvky nebo vylehčené konstrukce. Vždy záleží, jaký je záměr použití.

Vlastnosti betonu jsou v čase proměnlivé. Na jednu stranu je nutno beton do pár hodin dopravit a uložit na stavbě, na druhou stranu své vlastnosti získává v průběhu času a jsou většinou deklarovány po 28 dnech v normativních podmínkách, které běžně na stavbě nenastávají. Proměnlivé okolní podmínky, nestejnorodost vstupních materiálů, účinky degračních procesů a mnoho dalších má vliv na výsledné vlastnosti betonu, které nikdy nebude možno dopředu určit.

Veškeré vlastnosti, ať kladné či záporné, jsou ale velmi ovlivněny přítomností trhlin. Trhlinám se z podstaty věci nelze vyhnout, lze jim ale částečně předcházet nebo alespoň omezovat jejich velikost. Právě problematice vlivům na tvorbu trhlin, a to především vlivem smršťování, se tato práce věnuje.

## Příčiny vzniku trhlin v betonu

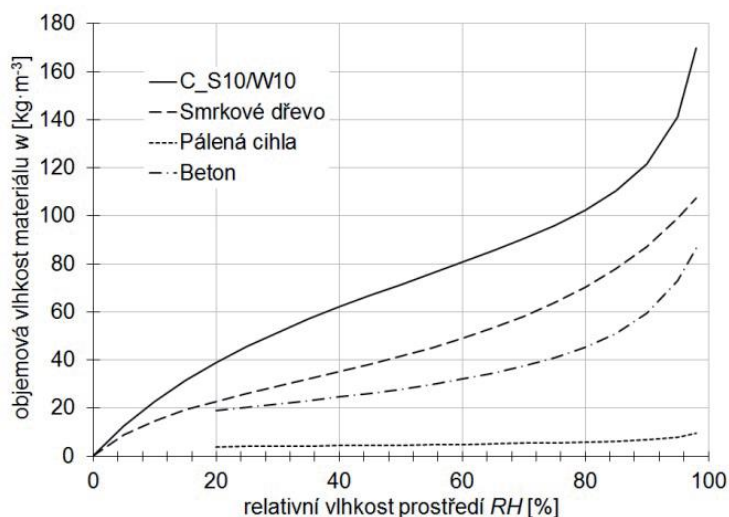
Tak, jak je beton oblíbený kvůli jeho vysokým pevnostem v tlaku, jeho slabou stránkou je tahová pevnost. Po zatížení, ať už vlivem hmotnosti konstrukce, užitého zatížení, provozu dopravy, nebo vlivem chemicko-fyzikálních změn, dochází uvnitř prvku k působení vnitřních sil. Tyto síly ve výsledku způsobí ve struktuře napětí v tahu a tlaku. Pokud toto napětí přesáhne lokální pevnost materiálu, vznikají trhliny. Zde jsou uvedeny nejznámější důvody, proč k tomuto dochází.

### Nesilové působení

#### *Vysychání*

Po zamíchání jednotlivých složek betonu začíná hydratace cementové pasty. Součástí takové směsi je určité množství vzduchových bublinek, které se v průběhu tohoto procesu přemění na póry a kapiláry. Jejich velikost a rozmístění je nepravidelné a běžně se omezuje hutněním. V těchto prostorech se vyskytuje volná voda, která reaguje s okolím. Zmíněná uzavřená vlhkost se snaží dostat do rovnováhy s vlhkostí okolního prostředí, které bývá z pravidla nižší oproti čerstvému betonu. Tímto mechanismem dochází k odevzdávání vlhkosti. Úbytek vlhkosti generuje v kapilárách betonu napětí, které se projevuje smrštěním a v horším případě vznikem trhlin. Pokud je ale vzorek trvale vystaven vodě a relativní vlhkost okolí je tedy 100%, dochází k opačnému jevu. Vzorek přijímá tuto vlhkost z okolí, čímž dochází k zaplnění volných prostorů vodou. S průběhem hydratace se póry částečně zmenšují a nestlačitelná voda se tak uzavírá uvnitř struktury. To vše ve výsledku vede ke zvětšení celkového objemu, což se projevuje mírným nábýváním.

Závislost příjmu vlhkosti je popsána sorpční izotermou. Se vzrůstající relativní vlhkostí vzduchu dochází k nárůstu hmotnosti vlivem akumulace vlhkosti, respektive vody. Z obrázku 3 je patrné, že křivka má pro každý materiál jiný tvar. Závisí totiž na velikosti pórů a na teplotě prostředí. Je odlišná, pokud se jedná o absorpci (přijímání) či desorpci (odevzdávání). J. Richter a kolektiv se v článku [15] zabýval porovnáním sorpčních vlastností hliněných směsí, nicméně zde porovnávaly i vlastnosti napříč běžných stavebních materiálů. Obrázek 3 jasně dokládá rozdíl, mezi chováním našeho betonu a smrkovým dřevem. Dřevo, které je známo pro své objemové změny, přijme při vysoké vlhkosti až 80 kg vody na 1 m<sup>3</sup> materiálu. Oproti tomu beton při stejné relativní vlhkosti dosahuje hodnoty 50 kg na m<sup>3</sup>.



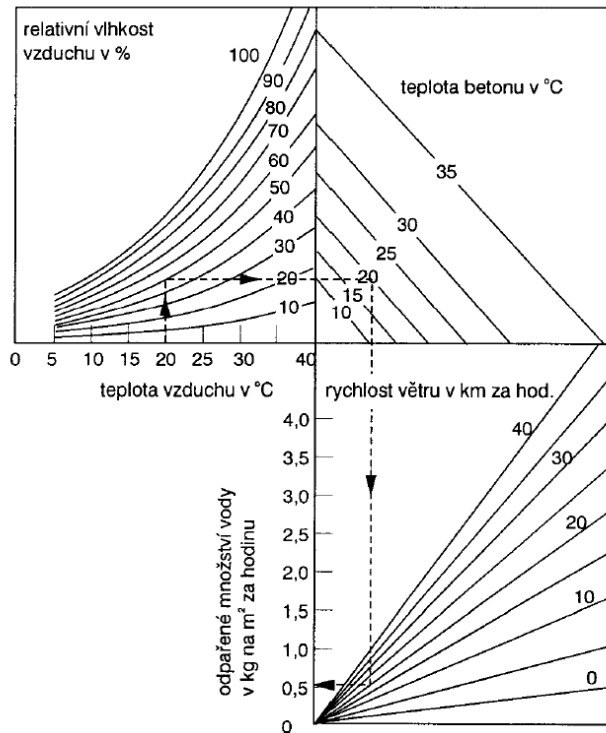
**Obrázek 3: Sorpční izoterma materiálů - absorpce [15]**

Způsob a rychlost vysychání je velmi složitý děj, neboť komplikovaně určíme, jaké děje se v materiálu odehrávají. Je velký rozdíl pokud dochází k transportu vodních par nebo kapalné vody, případně se může jednat o jejich kombinaci. Celou situaci navíc ztěžuje heterogenita betonu a jeho nepravidelné rozmístění pórů.

Pro transport páry se používá fyzikální veličina součinitel difúzní vodivosti  $\delta$ , jehož jednotkou jsou sekundy. Tato veličina vyjadřuje, kolik vodní páry projde daným vzorkem při určitém rozdílu tlaků. Přenos kapalné vlhkosti se vyjadřuje pomocí součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$ , jehož jednotka je  $\text{m}^2/\text{s}$ . Tato fyzikální veličina nám udává, kolik vody se ve vzorku určitého objemu nahromadí v čase.

Pro určení vysychání betonu byly sestaveny výpočetní modely. Například Z. Bažant a kolektiv [16] předepsali funkci, která popisuje rozložení relativní vlhkosti jak v prostoru, tak v čase. M. Vinkler a kol. [17] uvádí, že pokles vlhkosti vlivem hydratace se u běžných betonů pohybuje okolo 2 až 5%, což je celkem zanedbatelné číslo. U vysokohodnotných betonů, kde se vodní součinitel pohybuje na nízké hodnotě, je ale pokles vlhkosti až 20%, neboť tato vnitřní vlhkost je spotřebovávána na hydrataci a její úbytek je výraznější. Vyšší úbytek vlhkosti opět zapříčiňuje vyšší smrštění. Podle výsledků studie H. Mihashi [18] bylo dokázáno, že se vzrůstající rychlostí vysychání vody z betonu na počátku hydratace dochází dříve k tvorbě trhlin. Vlhčí beton má tedy větší tendenci vysychat, má vyšší poměrné přetvoření a tím pádem hrozí i větší šířka a vyšší počet vzniklých trhlin.

Smrštění vlivem vysychání tvoří přibližně 2/3 celkového smrštění cementového kamene (u běžných betonů). Obrázek 4 názorně zobrazuje praktický příklad vlivu prostředí na množství odpařené vody. Při teplotě 20°C, relativní vlhkosti 50% vzduchu, při teplotě betonu 20°C a rychlosti větru 15 km/h se z betonu vypaří asi 0,5 kg/m<sup>3</sup>h.

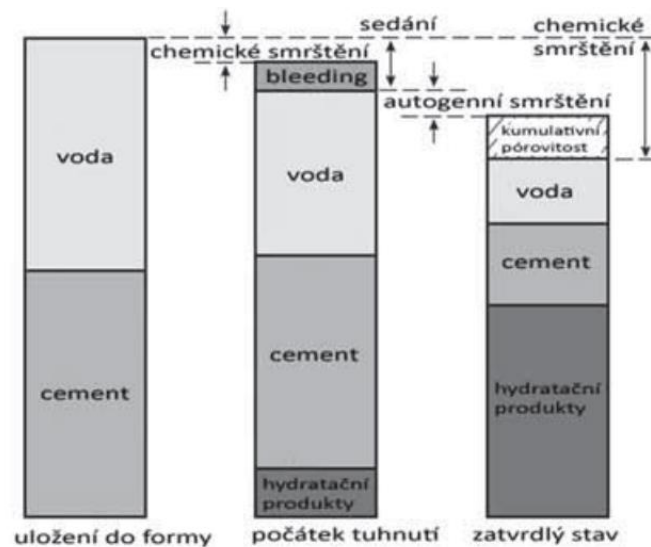


Obrázek 4: Názorný příklad množství odpařené vody [2]

Jediný způsob, jak omezit toto smršťování od vysychání, je vhodné a dostatečné ošetřování. Pokud beton není vystaven okolnímu prostředí, například zůstane uložen v bedně, je opatřen ošetřovací vodou, je přikryt nepropustnou fólií, vysychání je do značné míry omezeno a hrozba smrštění se výrazně zmenšuje.

### Autogenní smršťování

Celý mechanismus je patrný z obrázku 5. Vstupní materiál má určitý objem, ve kterém dochází po kontaktu cementu s vodou k hydrataci. Volná voda reaguje s cementem tak, že dochází k jejímu spotřebování, výsledkem jsou nově vzniklé hydratační produkty, jejichž výsledný objem je menší, nežli byl ten původní. Zároveň zde dochází k sednutí celé směsi vlivem gravitace a částečně k vyloučení cementového mléka u povrchu. Všechny tyto změny se souhrnně označují chemické smrštění.



Obrázek 5: Chemické smrštění betonu [19]

Běžné betony s vyšším vodním součinitelem jsou více náchylné na vysychání, neboť je zde více volné vody, která má tendenci z betonu odcházet a vliv autogenního smrštění je zanedbatelný. L.Wu a kolegové [20] uvádějí, že pokud je vodní součinitel nad hodnotou 0,45 žádné autogenní smrštění nelze naměřit vůbec. U vysokopevnostních betonů, které mají běžně nižší vodní součinitele, je vliv autogenního smrštění větší, naopak vliv vysychání je zanedbatelný. Proto u reálného stanovování smrštění je nemožné oddělit vliv vysychání a autogenního smrštění a nelze tyto hodnoty měřit odděleně.

Trhliny od vysychání lze ovlivnit, nicméně autogenní smrštění je přirozenou součástí hydratace cementu a případné trhliny lze pouze lehce korigovat druhem použitého cementu.

### *Vliv agresivního prostředí*

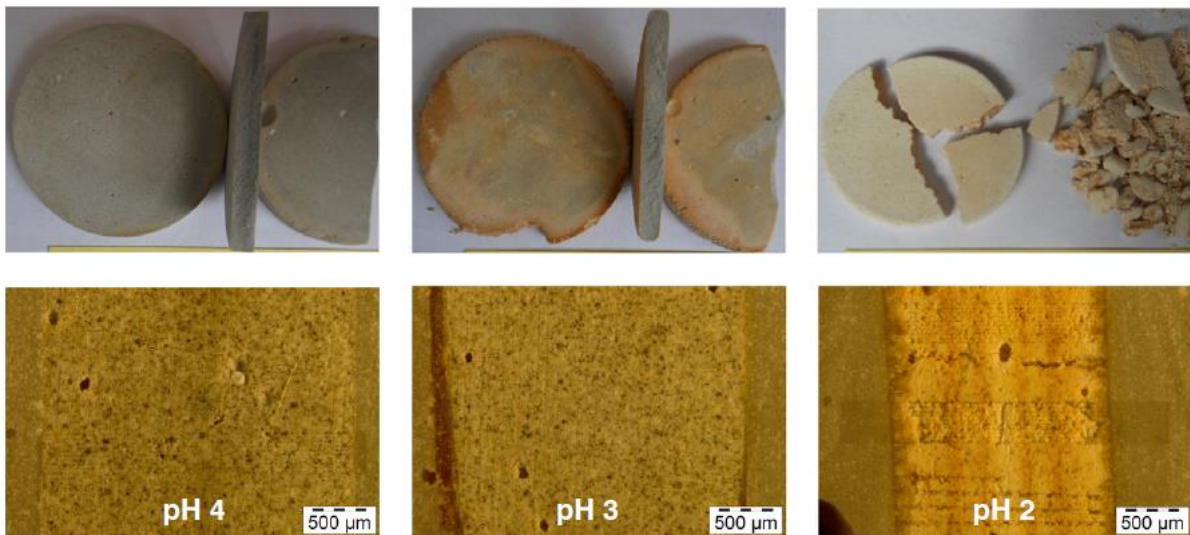
Beton vystavený vnějším podmínkám je běžně v kontaktu s vodou. Voda pronikající betonem vyluhuje portlandit, což má za následek snížení pH betonu. Pokud poklesne pH přibližně pod 9,6, dochází ke korozi ocelové výztuže. Koroze se projevuje tvorbou nových korozních produktů a ve výsledku způsobuje odprýskávání krycí vrstvy. Koroze je nadále intenzivnější, až hrozí úplné znehodnocení výztuže a v extrémních případech vede ke kolapsu konstrukce nebo dokonce i stavby.

Na snížení pH se podílí i další fakt. Zásaditá složka cementového tmelu v podobě  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v kontaktu s  $\text{CO}_2$  (nejvyšší koncentrace je běžně ve vzduchu) vytváří nový materiál v podobě  $\text{CaCO}_3$ . Tvorba uhličitanu vápenatého je spojena s nabýváním objemu 0,7 až 1 mm/m [2]. Tento proces je známý jako karbonatace betonu.

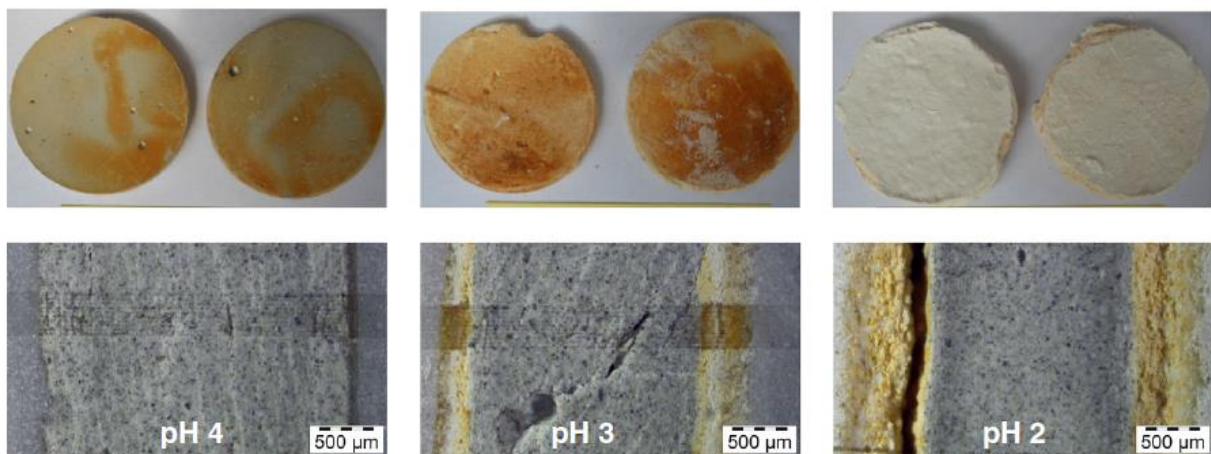
Další negativní vliv přítomnosti vody ve struktuře je riziko změny skupenství z kapalného na pevné. Při skupenské změně se objem zvětší o 9%, což způsobí krystalický tlak až 200 MPa. V některých místech se k tomu přidávají posypové soli, které zpravidla mohou rekrystalizovat na povrchu a vytvářet tlak až 100 MPa. Pro omezení těchto účinků se do betonu přidávají provzdušňovací přísady, které mají za účel vytvořit pórovitou strukturu určitých vlastností. V těchto prostorech je poté místo na případnou rekrystalizaci, čímž se znatelně sníží tlak uvnitř vlastní struktury betonu. Jak je ale známo, póry snižují výslednou pevnost betonu, proto je třeba toto množství kontrolovat a tyto přísady používat pouze tam, kde to je nezbytně nutné. Podle výsledků studií G. Fagerlund [21] a J.J. Valenza [22] je větší problém s mrazem jako takovým, neboť porušuje strukturu v celé své hmotě, čímž rapidně klesá výsledná pevnost, nikoliv přítomnost posypových solí, které se akumulují na povrchu a způsobují spíše estetické odlupování.

Agresivní látky se mohou také vyskytovat v ovzduší nebo jsou konstrukce přímo vystaveny různým chemickým provozům. Silné kyseliny jako například HCl, HF nebo  $\text{H}_2\text{SO}_4$  potom způsobují opět rozpouštění pojiva a snížení pH. T. Gutberlet a kol. [23] se zabývali účinky kyselin (chlorovodíkové a sírové) na vlastnosti cementové pasty z portlandského cementu CEM I. Výsledky ukazují, že největšího poškození dosáhla kyselina chlorovodíková při pH 2. Obrázky 6 a 7 zobrazují míru poškození včetně snímků z mikroskopu. Bílé skvrny na vzorcích vystavených kyselině sírové byly identifikovány jako sádra.





Obrázek 6: Poškození cementové pasty kyselinou chlorovodíkovou po 28 dnech [23]



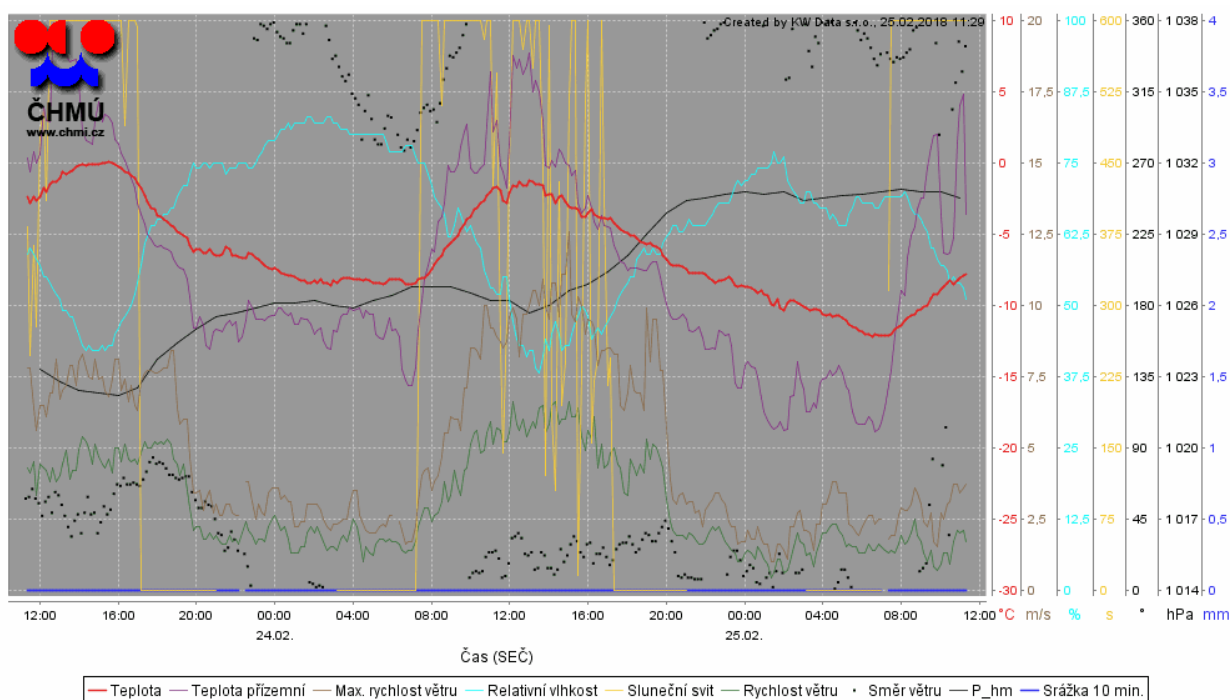
Obrázek 7: Poškození cementové pasty kyselinou sírovou po 28 dnech [23]

Dále je známá alkalicko-křemičitá reakce (jinak označována jako ASR) nebo sekundární hydratace volného  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ . Ve vhodných podmínkách se uvnitř struktury tvoří nové produkty, které zvětšují svůj objem a způsobují tak napětí a ve výsledku vše vede k tvorbě trhlin a k celkové degradaci betonu. Problematiku alkalicko-křemičité reakce v našich podmínkách více přiblížil Z. Pertold [24], neboť u nás byly s tímto spojené problémy například na cementobetonovém krytu na dálnici D11.

Většinu těchto rizik můžeme snížit tím, že zajistíme vhodné vstupní materiály, dostatečnou kvalitu nebo ochranu konstrukce. Jsou zde ovšem vlivy, které nelze ovlivnit a je nutno s touto skutečností počítat dopředu.

## Teplotní vliv

Teplotní roztažnost betonu hraje svou významnou roli. Se vzrůstající teplotou narůstá energie molekul a s tím narůstá jejich objem. Celková změna velikosti prvku pak závisí na součiniteli teplotní roztažnosti materiálu, na celkové délce prvku a na rozdílu teplot. Rozdíly teplot jsou nejčastěji způsobeny výkyvy počasí, a to především noční minima a denní maxima, na obrázku 8 je znázorněn průběh teplot v období dvou dnů. Rozdíl během 24 hodin činil až 20 °C.



Obrázek 8: Teplotní průběh 24.-25.2 2018, Praha-Kbely [25]

Nutno podotknout, že i hydratace cementu je spojena s vývinem tepla. Podle druhu cementu, respektive podle jeho složení a jemnosti mletí částic dochází podle tabulky 1 k různému vývoji hydratačního tepla. Zvýšená teplota má za následek rychlejší tvorbu hydrátů a tím i pevnosti. Vlivem teplotní roztažnosti beton ztvdne v tomto teplém (roztaženém) stavu. V závislosti na objemu dojde dříve či později ke zpětnému ochlazení, a tím i ke smrštění, což generuje napětí ve struktuře.

Hydratační teplo při 20° C					
Pevnostní třída	Vývoj pevnosti a tepla	1 den	3 dny	7 dní	28 dní
32,5	Pomalý	60-175	125-250	150-300	200-375
32,5 R, 42,5	Normální	125-200	200-335	275-375	300-425
42,5 R, 52,5, 52,5 R	Rychlý	200-275	300-350	325-375	375-425

Pro masivní konstrukce doporučeno za 7 dní maximálně 250 kJ/kg  
 Tabulka 1: Vývoj hydratačního tepla cementů, orientační hodnoty [kJ/kg], [2]

Změna velikosti prvku se určí podle vzorce:

$$\Delta l = \alpha_T \cdot l \cdot \Delta T$$

$\Delta l$  = celková změna délky [m]

$\alpha_T$  = součinitel teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ]

$\Delta T$  = změna teploty [K nebo  $^{\circ}C$ ]

Pro představu tabulka 2 znázorňuje vliv složení a stavu nasycenosti betonu na velikost součinitele teplotní roztažnosti  $\alpha_T$ .

Druh kameniva	Stav betonu	Obsah cementu v $kg/m^3$				
		200	300	400	500	600
křemen - kámen	VN	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
	S	12,7	13,0	13,4	13,8	14,2
křemen - písek	VN	11,1	11,1	11,2	11,2	11,3
	S	12,0	12,6	13,0	13,4	13,9
žula, rula, liparit	VN	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8
	S	9,1	9,7	10,2	10,9	11,8
syenit, trachyt, diorit, andezit, gabro, diabas, bazalt	VN	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0
	S	8,5	9,1	9,6	10,4	11,1
hutný vápenec	VN	5,4	5,7	6,0	6,3	6,8
	S	6,6	7,2	7,9	8,7	9,8

Tabulka 2: Součinitel teplotní roztažnosti, VN = vodou nasycený, S = suchý, betony stáří 1 rok [ $\cdot 10^{-6} K^{-1}$ ] [2]

Pokud dojde k extrémním teplotám, například k požáru, teplota betonu může přesáhnout  $1\ 000^{\circ}C$ . Obecně platí, že od  $100^{\circ}C$  dochází k rozkladu hydratovaných sloučenin, neboť dochází k odpařování vody. Nad  $150^{\circ}C$  se projevuje rozdílná teplotní roztažnost dílčích materiálů. Od  $350^{\circ}C$  až do  $600^{\circ}C$  se odstraňuje i chemicky vázaná voda, čímž se zastaví smršťování. Při  $575^{\circ}C$  dochází k modifikaci křemene což je opět doprovázeno objemovými změnami. Pokud teplota začne dosahovat  $900^{\circ}C$  a více, dochází ke kalcinaci. Z uhličitanu vápenatého vzniká spolu s oxidem uhličitým pálené vápno, které následně opět reaguje i se vzdušnou vlhkostí. To vše má za následek masivní expanzi, která vede k vážnému poškození betonu.

Betonové konstrukce obvykle nejsou navrhovány na takto extrémní teploty a jedná se zejména o výjimečné stavy. Pokud hrozí požár uvnitř konstrukce a pravděpodobnost výskytu je vyšší, jako například tunely, lze upravit složení betonu o přidání vláken, což spíše zvyšuje bezpečnost, než ovlivní vlastní teplotu uvnitř konstrukce.

Teplotní roztažnost prvku je z pravidla řešena vhodným umístěním dilatačních spár. Vývin hydratačního tepla korigujeme výběrem cementu. Pro masivní konstrukce a letní dny, kdy hrozí vysoké teploty, volíme cementy s nižším vývinem (označení cementu N). Naopak pro tenkostěnné prvky, zimní období nebo rychlé nárůsty pevností upřednostňujeme cementy s vyšším hydratačním teplem (cementy s označením R).

## Silové působení

### *Zatížení*

Účel betonových konstrukcí je zřejmý, a to přenášet zatížení. Mezi zatížení působící na konstrukci nepatří pouze užité zatížení zařízením, ale nemalou část tvoří vlastní tíha nebo například bednění. Zatížení generuje napětí a podle statického návrhu a způsobu vyztužení se napětí uvnitř struktury přerozděluje. Zcela zásadní na tvorbu trhlin je tedy návrh konstrukčního prvku, stáří betonu a tím pádem i jeho pevnost.

Navrhování železobetonových konstrukcí ovšem předpokládá, že pevnost v tahu betonu je vyčerpána, neboť až poté může dojít k aktivaci výztuže. Z tohoto principu tedy vyplývá, že trhliny v železobetonové konstrukci nelze vyloučit.

Vlivem vnějšího zatížení také dochází k nevratné deformaci, tak zvanému dotvarování. V průběhu času probíhají neustálé změny ve struktuře betonu. Pokud je beton navíc zatížen, dochází k nárůstu přetvoření. Na velikost dotvarování má vliv řada faktorů:

- Složení betonu – jeho pevnost, pórovitost, druh cementu
- Velikost zatížení
- Doba, po kterou byl beton zatížen
- Teplota
- Stáří betonu, ve kterém byl zatížen

Pro zachycení takových napětí běžně beton vyztužujeme, a to nejčastěji běžnou ocelářskou výztuží nebo rozptýlenými drátky.

### Volné a vázané smrštění

Představme si malý prvek, který je v prostoru volně umístěn. Pokud dojde ve struktuře nebo na prvku ke změně, která se projevuje deformací, například vysychání nebo teplotní roztažnost, prvek se volně deformuje. Tomuto jevu se říká volné smrštění a v principu negeneruje tak velká napětí uvnitř struktury, aby došlo ke vzniku trhlin. Tento stav je tedy příznivý, bohužel v reálných konstrukcích k tomuto zpravidla nedochází. Konstrukce jsou běžně masivní, jsou uloženy v bednění nebo spolupůsobí s okolím. Při deformaci tedy dochází k omezení prvku okolním prostředím (nedovoluje prvku volně změnit svou pozici) a generuje se tak napětí ve struktuře, což opět vede k tvorbě trhlin. Tomuto popsanému principu se říká vázané smrštění. Způsob, jakým se tedy mohou prvky přetvářet, hraje velkou roli ve výsledném chování. Tento jev se nevyskytuje jen u reálných konstrukcí, ale potýkáme se s ním již v laboratorních podmínkách, kde nám určuje volbu zkušební metody a tím ovlivňuje i výsledky.

## Negativní vliv přítomnosti trhlin

### Pevnost

Vycházíme-li ze základního principu, že se trhlinka vytvoří ve chvíli, kdy je vyčerpána pevnost betonu, tak se výsledná únosnost materiálu teoreticky snižuje. Při vzniku trhlin dochází k přerozdělení sil, a pokud není v prvku materiál, který by toto namáhání přenesl (například výztuž, ale v heterogenním betonu to může být i kamenivo), dojde k dalšímu výskytu trhlin až do úplného kolapsu. Toto riziko je ale odstraněno vhodným statickým návrhem s dostatečnou pevnostní třídou betonu a optimálním množstvím výztuže.

### Agresivní prostředí

Podle účelu využití se stavby navrhují na určitou životnost, pro budovy a běžné stavby je to 50 let, pro mosty a inženýrské konstrukce 100 let. Po tuto dobu by měly konstrukce při určité údržbě plnit svou funkci a být v dobrém stavu [26]. Hlavním důvodem, proč se o trhliny v betonu zajímat, je především snížení této životnosti. Přítomnost trhlin ve struktuře betonu společně s pórovým systémem urychluje transport kapalin a plynů způsobujících degradaci betonu. Agresivní látky pak snáze pronikají do matrice, kde dochází k rozpadu struktury, ztrátě pevnosti a snížení pH.

### Vodonepropustnost

Vodonepropustné betonové konstrukce fungují na principu zamezení prostupu vody strukturou betonu. Přítomnost trhlin uvnitř takovéto struktury opět umožňuje rychlejší prostup vody a snižuje nebo zcela vylučuje požadovanou vodonepropustnou funkci.

Kvůli náročnému provádění a riziku výskytu poruch povlakových izolací stoupá obliba projektantů navrhovat takzvané „bílé vany“, které tuto vodonepropustnou funkci zaručují. Určitá náročnost při realizaci je ovšem i u těchto betonových konstrukcí, nicméně pravděpodobnost dosažení kvality je vyšší. Je to dáno jednak kvalitou ukládky betonu, dále pak použitím krystalizačních přísad. Tyto přísady fungují tak, že minerální látky uvnitř struktury vytváří nové produkty, které vyplní prostor vzniklých trhlin. Podobný efekt má ovšem i beton sám o sobě. Tím, že hydratace cementu trvá několik let, dochází v průběhu životnosti k vyplňování případných trhlin právě vlivem tvorby nových hydratačních produktů. Na tomto principu fungují také takzvané self-healing technologie, ve kterých dochází při vhodných podmínkách k zaplňování prostoru ve struktuře. N.D. Belie a kol. [27] použili pro tyto účely kapsle obsahující bakterie, které během svého života produkují odpadní látky v podobě  $\text{CaCO}_3$ , což je stejná látka, která vznikne po karbonataci betonu. Díky tomu došlo v závislosti na velikosti trhliny k uzavření struktury do 24 týdnů a zamezení prostupu vody.

## Estetika

Běžné betonové konstrukce fungují z pravidla jako nosná kostra, která je dále opatřena povrchovou úpravou, ať už v podobě nátěrů, obkladů nebo minimálně štuků s malbou, neboť povrch betonu je pórovitý, barevně proměnný, případně nerovný (vtisky prkenného bednění například). V posledních letech ovšem stoupá obliba používání pohledového betonu. Tento beton má mít navíc přidanou hodnotu v podobě estetického prvku, neboť bývá z pravidla bez dalších úprav přiznán lidem na očích. Problém zde nastává ve vnímání toho, co je a co není hezké. Jak je rozebíráno dále, technická pravidla pro pohledové betony nejsou příliš přesná a konkrétní, proto se často při realizaci takových konstrukcí setkáváme s nespokojeností. Přítomnost výrazných trhlin na takto exponovaných místech by v lidech vyvolávaly spíše obavy nežli kladné reakce na krásu betonu, a proto je nutno i zde trhliny omezovat.

## Požadavky a doporučení norem

Tak jako u většiny oblastí stavebnictví, i trhliny řeší normy a technické předpisy, aby jim bylo možno předcházet. Z následujících řádků je patrné, že jsou ale poměrně obecné a kvalitní návrh je dán spíše zkušenostmi statiků a projektantů nežli doporučením norem.

Norma ČSN EN 1992 – 1 – 1 [28] udává výpočetní vztahy pro stanovení velikosti trhliny. Do výpočtu ovšem vstupují koeficienty, které jednak vychází z předpokládaného napětí v materiálu, které je těžko dopředu zjistit, dále pak z experimentálně stanovených hodnot, které většinou vznikají v laboratořích, nikoliv v reálných podmínkách, navíc při současné technologii betonu nejsou dostatečné. Norma dále radí, že trhliny vznikají mohou, nesmí ovšem narušit funkčnost a případně vzhled konstrukce. V tomto ohledu tedy nastává otázka, jakou funkčnost má konstrukce splňovat. Tato norma také stanovuje maximální šířku trhliny podle stupně vlivu prostředí. Z tabulky 3 plyne maximální šířka trhliny pro železobetonové konstrukce v náročnějším prostředí 0,3 mm.

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 <sup>1)</sup>	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 <sup>2)</sup>
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Dekomprese
<sup>1)</sup> Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má zajistit přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit.		
<sup>2)</sup> Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.		

**Tabulka 3: Omezení šířky trhlin dle ČSN EN - Tabulka 7.1 [28], jednotky [mm]**

Pro vodotěsné konstrukce udává norma ČSN EN 1992 – 3 [29] maximální přípustnou šířku 0,05 až 0,2 mm, podle typu konstrukce. Zde je ovšem počítáno s tím, že během času dojde k samovolnému utěsnění. Těžko se ale může predikovat, jestli tato hodnota bude splněna, či nikoliv, případně jestli skutečně k utěsnění dojde. Pro vyšší pravděpodobnost samo-utěsnění ovšem mohou napomáhat krystalizační přísady a jiné technologie.

Žádná ze současných norem nestanovuje požadavky na přítomnost a šířku trhlin z hlediska pohledovosti. Technická pravidla pro pohledový beton [30] řeší pouze otázku pórovitosti, barevnosti, rovinnosti, nikoliv však trhliny. Někdy se můžeme také setkat s tím, že před prováděním pohledového betonu je požadována ukázka referenčního vzorku, pro odsouhlasení dostatečné pohledovosti. I když je vzorek pak odsouhlasen z hlediska pórovitosti, barevnosti a dalších vlastností, na konkrétní stavbě může dojít právě ke vzniku trhlin například nedostatečným ošetřením, případně mohou trhliny vzniknout až v průběhu životnosti. Těžko pak posoudit možné reklamace pohledové stěny z hlediska trhlin tím spíš, když nejsou v předpisech řešeny [31].

V oblasti problematiky trhlin tedy není dostatečná opora v našich normách, často statici či projektanti raději vycházejí z předpisů okolních států. Například vodo-nepropustné konstrukce jsou počítány na základě vývinu hydratačního tepla cementu nebo jiné sofistikovanější metody.



## Měřicí postupy

Pro kvantifikaci smršťování existuje několik metod. Tak jako vždy, každá má své výhody a nevýhody. Je ale třeba uvědomit si, které vlivy zkoumáme. Některé metody umožňují měřit volné smrštění a některé metody měří vázané smrštění. Výsledky mohou být zcela rozdílné a v závěru mohou vést k chybné interpretaci chování materiálu.

Tabulka 4 zobrazuje stručný přehled používaných metod včetně základních informací o odhadované ceně, přesnosti, velikosti měřícího vzorku a stavu vzorku, ve kterém je možno provádět měření.

Skupina	Název metody	Cena [€]	Opakování	Přesnost	Velikost vzorku	Počátek měření
<b>Mechanické</b>	Stojanové	1 000	ANO	$\pm 2 \mu\text{m}$	Do 280 x 75 x 75 mm	Ztvrdlý vzorek
	Příložný	1 500	ANO	$\pm 10 \mu\text{m}$	Dle typu	Ztvrdlý vzorek
<b>Optické</b>	Digitální fotogrammetrie	2 x 222	ANO	$\pm 150 \mu\text{m}$	Do 220 x 40 x 40 mm	Ihned
<b>Laser</b>	Smršťovací kužel	2 000 – 20 000	ANO	$\pm 1 \mu\text{m}$	0,35 l	Ihned
<b>Tenzometry</b>	Strunové	500 - 1000	NE	$\pm 0,5 \mu\text{m}$	Dle typu	Začátek tuhnutí
	Odporové	2 - 300	NE	$\pm 2-10 \mu\text{m}$	Dle typu	Ztvrdlý vzorek
	Smršťovací prstenec	2 x 1000	ANO	$\pm 0,5 \mu\text{m}$	$\varnothing$ 405 mm	Začátek tuhnutí
<b>Žlaby</b>	Smršťovací žlab	1 000	ANO	$\pm 2 \mu\text{m}$	Do 1 000 x 100 mm	Začátek tuhnutí
	Ohýbací žlab	2 x 1000	ANO	$\pm 3 \mu\text{m}$	1 000 x 100 x 50 mm	Začátek tuhnutí

Tabulka 4: Nejrozšířenější metody měření [32]

### Mechanické

Metody jsou založeny na principu přikládání měřícího zařízení ke kontrolním bodům. Tyto body jsou pevně zabetonované nebo přilepené ke sledovanému prvku. V průběhu času dochází k opětovnému přeměřování vzdálenosti pomocí úchylkoměru mezi měřícími značkami. Z rozdílu velikostí je stanoveno smrštění.

Na obrázku 9 a 10 je názorné zobrazení sestavy pro měření menších vzorků s osazením digitálního úchylkoměru. Vzorek se umístí do stojanu, hrot úchylkoměru zapadne do měřícího terče a zobrazí hodnotu. Pro kalibraci se používá etalon z materiálu se zanedbatelnou teplotní roztažností. Na tomto principu funguje například norma ČSN EN 12808 - 4 [33]. Detailnější popis je v praktické části na straně 47 až 48.



**Obrázek 9: Příklad na měření volného smrštění, svislý stojánek [34]**



**Obrázek 10: Příklad na měření volného smrštění, vodorovný stojan [34]**

Pro větší vzorky se používá příložný deformetr, na obrázku 11 je zobrazen spolu s analogovým úchylkoměrem. Tento deformetr má jeden hrot pevný a druhý posuvný, což umožňuje měřit změnu vzdálenosti. V závislosti na způsobu uložení vzorku lze touto metodou měřit volné smrštění.

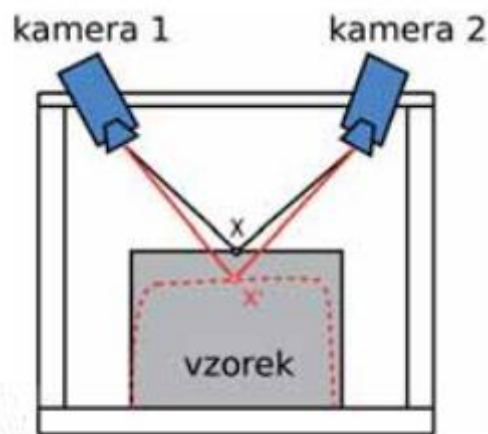


**Obrázek 11: Příložný deformetr [35]**

Výhoda této metody spočívá v tom, že se vzorky můžeme po měření manipulovat, umožňuje nám tedy různé režimy ošetřování, vzorky lze vážit, či podrobovat jiným faktorům. Příložný deformetr je přenosný a měření mimo laboratoře není problémem. Nevýhodou této metody je nutnost dosažení minimální manipulační pevnosti. Tato metoda nám tedy neumožňuje měření od samého počátku změn. B. Kucharczyková a kol. [36] pomocí tohoto zařízení značky Hollan stanovovali objemové změny na polymer-cementových maltách.

## Optické – Digitální fotogrammetrie

Dvojice kamer (podle obrázku 12) snímá vzorek v čase a vytváří tak 3D model. Změnu polohy bodů lze určit ze znalosti umístění dvou kamer pomocí triangulace. Tato metoda se používá například pro snímání polohy během zkoušky tahu za ohybu. Často se s touto metodou můžeme setkat u zaměřování staveb, například R.A. Galantucci a kol. [37] pomocí této metody snímali celou část obvodového pláště historického objektu za účelem stanovování poruch a mapování konstrukcí. Díky 3D modelu je možno sledovat vícero bodů najednou. Nevýhoda spočívá v tom, že kamery a vzorek musí být dokonale připevněny, neboť nechtěná změna polohy by znamenala znehodnocení celého měření.



Obrázek 12: Princip digitální fotogrammetrie [32]

## Laserová – Smršťovací kužel

Tato metoda se používá především pro stanovení změn malt v čerstvém stavu. Tvar je navržen tak, aby při změně objemu došlo k poklesu horního povrchu (obrázek 13). Materiál je naplněn do nádoby tvaru kužele, ke které je připevněn stojan s laserovým dálkoměrem. Pro snímání se umístí na povrch odrazový terč, který mění svou vertikální polohu vlivem objemových změn.



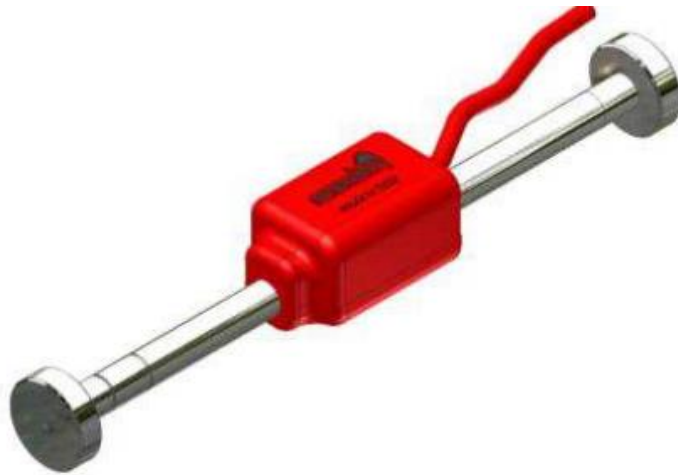
Obrázek 13: Schéma smršťovacího kužele [32]

Zde není možno měnit režim ošetřování a velikost vzorku je dána velikostí zařízení. Dále je nutno počítat s možností, že dojde k sednutí na úplném počátku a velikost celkové deformace bude tímto zkreslena. Pokud velikost sednutí vhodně vyhodnotíme, lze měřit smrštění již od samého počátku.

## Tenzometry

Na trhu je celá řada tenzometrů, které se hojně používají především pro jejich přesnost. Pro naše účely se nejčastěji používají strunové a odporové tenzometry.

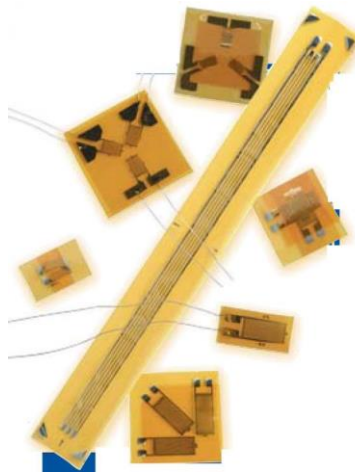
Strunový tenzometr (obrázek 14) má jednu stranu pevnou a druhou posuvnou. Mezi nimi je upevněná struna, která pravidelně osciluje díky elektromagnetickému budiči. Tenzometr s ochranným opatřením se ukotví do betonu/cementu a se změnou poměrné deformace dochází ke změně vlastní frekvence struny. Běžná součást je teplotní čidlo pro kompenzaci teplotních změn. Vše je vysíláno do centrálního přístroje, který umožňuje vyhodnocení dat.



Obrázek 14: Strunový tenzometr [38]

Omezující je zde velikost strunového tenzometru, který musí být zcela obetonován, takže se nevejde do menších vzorků. Vzhledem k principu tohoto měření se jedná o jednorázovou aplikaci a pro velký počet měření je tato metoda poměrně ekonomicky náročná. Výhodou je ovšem zaznamenávání změn již od samého počátku. Vzorky mohou být zároveň váženy nebo různě ošetřovány. Tato metoda umožňuje měřit jak volné, tak vázané smrštění.

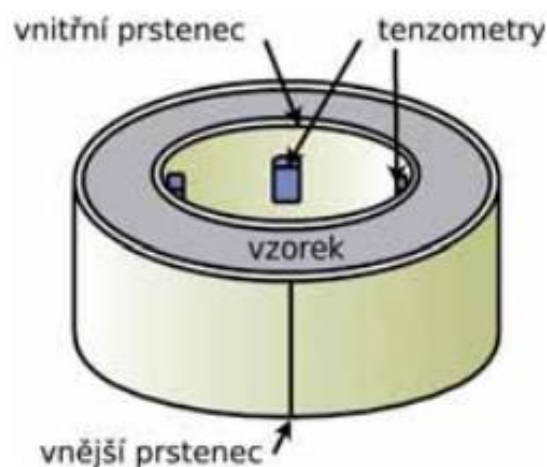
Levnější alternativa je v podobě odporových tenzometrů. Tenzometr je ve formě fólie s elektrickými spoji, která se přilepí k podkladu. Se změnou velikosti podkladu se mění i velikost tenzometru, a s tím i elektrický odpor. Tyto změny jsou zaznamenávány do měřícího přístroje, který dále vyhodnotí deformace. Obrázek 15 zobrazuje tvarovou variabilitu tenzometrů a možnost použití pro menší vzorky. Nevýhodou je opět nutnost minimální pevnosti podkladu pro dostatečné připevnění.



Obrázek 15: Provedení odporových tenzometrů [39]

### Smršťovací prstence

Tato metoda měří vázané smrštění. Jedná se o ocelový kruh, ve kterém je vloženo mezikruží, na které se připevní odporové tenzometry (obrázek 16). Prstence jsou během plnění připevněny šrouby pro stabilizaci. Po naplnění se šrouby povolí a tím je umožněna deformace. Vše měří tenzometry, které opět přenášejí informace do dalšího zařízení. Tato metoda je blíže popsána v normě [40].



Obrázek 16: Smršťovací prsteneček [32]

Při správném provádění je tato metoda jednoduchá a přesná. Měřený vzorek lze umístit do potřebného prostředí, a tudíž lze simulovat různé režimy ošetřování. Velikost vzorků je omezena velikostí prstenců, proto je vždy stejná. Zásadní předností je fakt, že veškeré deformace jsou snímány již v počátcích. L. Zvolánek a kol. [41] využili toto zařízení pro ověření výpočtu vynuceného napětí v betonu. Nevýhodou je zde omezené měření pouze na vnitřní straně vzorku. S postupem hydratace se mění i modul pružnosti, díky němuž se provádí přepočty napětí. Vzhledem k nepřesnostem stanovování modulu pružnosti je poměrně komplikovaná konečná interpretace výsledků.

## Smršťovací žlab

Tento žlab (obrázek 17) slouží k měření vzorků o délce 1 m a průřezu 60 nebo 100 mm. Je vyroben z nerezové oceli a má pevné a posuvné čelo, které je opatřeno digitálním snímačem. Posuvné čelo je přikotveno až do dosažení minimální pevnosti. Poté je čelo uvolněno a nadále dochází ke kontinuálnímu měření, které je zaznamenáváno do počítače. Touto metodou je teoreticky možno určit změnu hmotnosti, vyžadovalo by to ale váhu s vysokou maximální nosností (celková hmotnost včetně vzorku by byla značná) se zároveň velmi přesným odečítáním (pro přesné určování změny na vzorku).

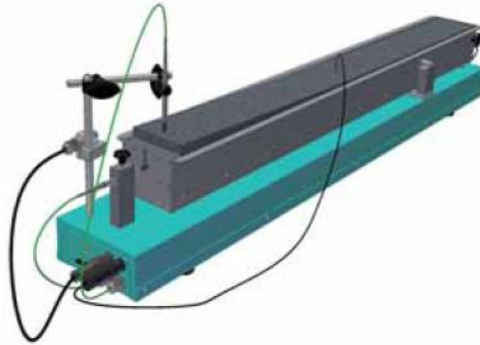


Obrázek 17: Smršťovací žlab [42]

Prvek se nachází po celou dobu uvnitř zařízení a je ovlivňován boky žlabu. Ošetřování nebo vysoušení pak probíhá pouze přes horní povrch, což může přinášet rozdílné výsledky nežli u jiných metod. Další nevýhodou je jeho hmotnost a velikost, která může být pro určité experimenty omezující. Posuvné čelo lze poměrně brzy spustit, takže lze měřit již na čerstvé směsi. Pro měření volného smrštění je žlab vyložen nepřilnavou fólií například z neoprenu, což zaručuje volný pohyb vzorku uvnitř formy. B. Kucharczyková a kol. [36] využili této metody spolu s příložným deformetrem pro stanovení objemových změn na polymer-cementových maltách.

## Ostatní

V současnosti je na celosvětovém trhu mnoho dalších přístrojů pro stanovení smrštění. Jako například ohýbací žlab z obrázku 18, který navíc umožňuje měření ve svislém směru, L. Zvolánek a kol. [41] využívali metody Frame One pro měření volného smrštění, případně Mártová a kol. [32] uvádějí další metody. Většina ovšem pracuje na podobném principu jako již zmíněné, případně využívají jejich kombinace, nebo v současnosti nejsou příliš používány.



**Obrázek 18: Ohýbací žlab [32]**

## Použitá pojiva

Hlavním pojivem, které hydratuje, vytváří zásadité prostředí a stmeluje všechny složky betonu do celku je cement. Existují i příměsi jako struska, elektrárenské popílký či křemičitý úlet, které zastávají taktěž funkci pojiva.

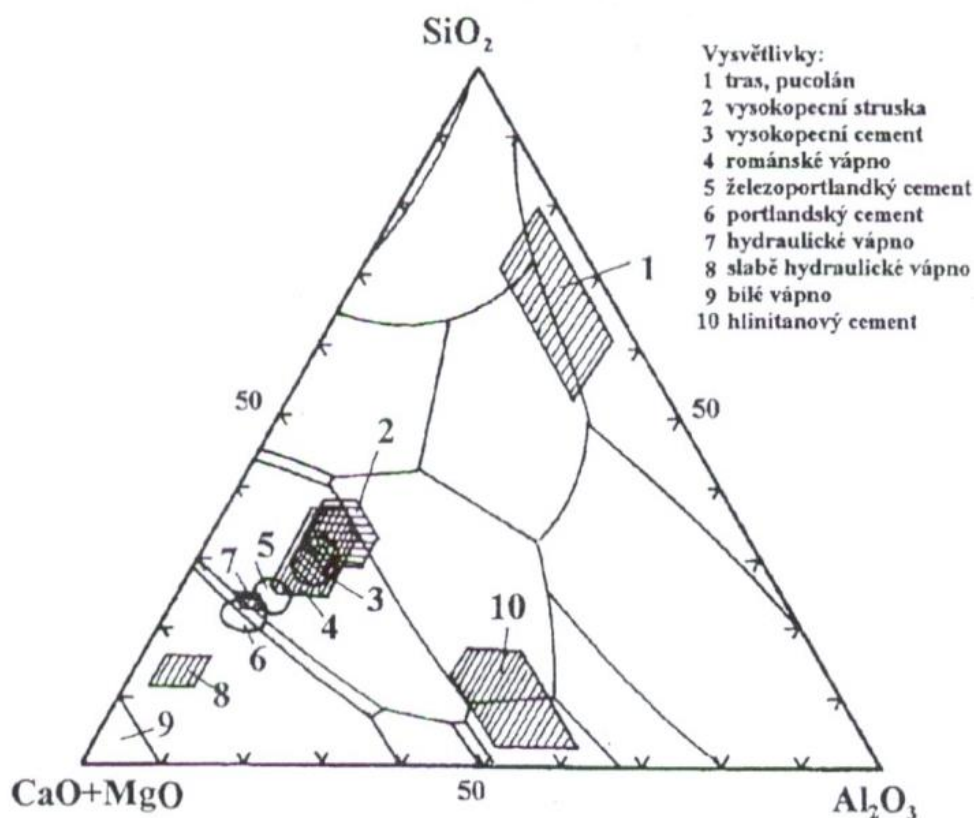
Výroba cementu je poměrně komplikovaný proces, ve kterém dochází ke slinování vstupních materiálů na takzvaný slínek. Ten se dále mele a slučuje s dalšími přísadami až ve výsledný produkt. Kvůli odhadu chování v průběhu hydratace je tedy dobré znát hlavní složky cementu. Tabulka 5 udává hmotnostní procentuální zastoupení slínku a vysokopecní strusky pro vybrané cementy z této práce. Uvedené hraniční hodnoty jsou hlavně důležité pro výrobce, aby definovaly minimální a maximální povolené množství daných složek. Problémem je zde poměrně velký rozdíl mezi krajními hodnotami. Pro cement CEM II/B-S a CEM III/B-S je to až 14%, což už může mít vliv na rozdílný vývoj pevnosti především v prvních dnech hydratace. Ve složení cementu mohou být dále ostatní složky, které ovšem mohou mít libovolný původ. Je proto třeba dbát kontroly kvality cementu, aby tyto složky při hydrataci nevytvářely nechtěné produkty a nezpůsobovaly tak degradaci a rozpad cementového tmele.

Typ cementu	Portlandský slínek	Vysokopecní struska	Ostatní složky
	%	%	%
<b>CEM I 52,5 R</b>	95 - 100	0	0-5
<b>CEM I 42,5 R</b>	95 - 100	0	0-5
<b>CEM I 42,5 R SC</b>	95 - 100	0	0-5
<b>CEM II/B-S 32,5 R</b>	65-79	21-35	0-5
<b>CEM III/B 32,5 N – LH SR</b>	20-34	66-80	0-5

Tabulka 5: Podíl hlavních složek [43] [44] [45] [46] [47]

Zastoupení hlavních oxidů nám udává výsledné chování cementů a vlastně všech anorganických pojiv na bázi těchto oxidů. Na obrázku 19 je zobrazen diagram (takzvaný Rankin – Wrightův diagram), který názorně tuto závislost popisuje. V oblasti 6 se nachází portlandský cement. Jak můžeme z diagramu vyčíst, složení se pohybuje okolo 75% CaO + MgO, 15% SiO<sub>2</sub> a 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Podle chemického složení zvolených cementů (tabulka 6) je u portlandského cementu značná převaha CaO, se zvyšujícím se obsahem strusky se i přerozděluje zastoupení CaO na SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.





Obrázek 19: Rankin – Wright diagram-důsledek zastoupení hlavních oxidů [48]

Typ pojiva	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Cl-	Měrný povrch
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	m <sup>2</sup> /kg - Blaine
CEM I 52,5 R	63,6	20,3	4,8	3,3	1,4	3,1	0,76	0,2	0,7	0,04	515
CEM I 42,5 R	64,1	18,7	5,2	3	2,8	3,2	0,77	0,31	0,82	0,08	344
CEM I 42,5 R SC	63,8	20,6	4,8	3,4	1,4	3,2	0,74	0,2	0,7	0,02	311
CEM II/B-S 32,5 R	52,5	28,1	7,6	2,8	4	2,9	0,77	0,39	0,9	0,09	354
CEM III/B 32,5 N – LH SR	47,6	32,7	6,7	1,4	6,1	2,9	0,57	0,46	0,83	0,09	375
Struska Kotouč	43,5	36,0	9,0	0,3	8,3	0,5	0,5	0,5	-	-	-

Tabulka 6: Chemické složení pojiv [43] [44] [45] [46] [47]

Po přidání vody k cementu nastává hydratace. Tento proces je velmi složitý, neboť při něm dochází k tvorbě nejrůznějších produktů a fází. Chemické rovnice jsou komplikované a výsledné produkty obvykle složitě popsatelné. V tabulce 7 jsou sepsány 4 nejrozšířenější slínkové minerály známé u cementu. Nejreaktivnější je trikalciumaluminát, který reaguje hned v počátku hydratace. Problémem jeho vlastnosti je ale výrazný vývin hydratačního tepla, což s sebou přináší objemové změny a malou odolnost vůči agresivnímu prostředí, jeho procentuální zastoupení (dle tabulky 8) je jedno z nejnižších. Dále reaguje tetrakalciumaluminátferit, ten již vykazuje dobré vlastnosti a nízké hydratační teplo, nicméně jeho podíl je opět nízký. V řádu hodin pak reaguje trikalciumpilíkát a nejpomaleji s vodou reaguje dikalciumsilikát (belit), který dominuje ve speciálních cementech pro masivní konstrukce. Tyto minerály vykazují dobré vlastnosti a zapříčiňují nárůst pevnosti betonu v čase, přičemž spolu tvoří přes 80% z celkového objemu.

Slínkový minerál	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
<b>Počátek reakce</b>	2-4 hodiny	14-16 dnů	ihned	5-10 minut
<b>Objemová stálost</b>	stálý	stálý	nestálý	stálý
<b>Smrštění</b>	střední	malé	výrazné	malé
<b>Chemická odolnost</b>	úměrná	úměrná	malá	dobrá
<b>Hydratační teplo kJ/kg</b>	500	250	1350	420
<b>Pevnost v tlaku v MPa</b>				
<b>28 dní</b>	50	10	5	3
<b>180 dní</b>	65	50	8	5
<b>Stupeň hydratace v %</b>				
<b>3 dny</b>	61	18	56	31
<b>7 dní</b>	69	30	62	44
<b>28 dní</b>	73	48	82	66
<b>180 dní</b>	74	66	96	91

Tabulka 7: Vlastnosti slínkových minerálů [2]

Název	Označení	Průměrný podíl	Rozmezí
<b>alit - trikalciumpilíkát</b>	C <sub>3</sub> S	63 %	45 až 80 %
<b>belit – dikalciumsilikát</b>	C <sub>2</sub> S	20%	5 až 32 %
<b>trikalciumaliminát</b>	C <sub>3</sub> A	8 %	4 až 32 %
<b>kalciumaluminátferit</b>	C <sub>4</sub> AF	7%	3 až 12%

Tabulka 8: Hlavní slínkové minerály a jejich procentuální zastoupení ve slínku [2]

Mletá granulovaná vysokopecní struska byla volena jako alternativní latentně hydraulická složka, která nahrazuje podíl cementu. Díky této náhradě lze ušetřit náklady na výsledný beton, neboť cement je nejdražší z hlavních složek betonu, s čímž souvisí i snížení energetické náročnosti a snížení produkce skleníkových plynů, které vznikají v průběhu výpalu portlandského slínku. Latentně hydraulické složky v zásaditém prostředí (v našem případě v podobě  $\text{Ca(OH)}_2$  z cementu) tuhnou a tvrdnou, tudíž nám zaručují postupné zvyšování pevnosti výsledného betonu v čase.

Tato struska vzniká jako odpadní materiál při zpracování železa, její výsledné vlastnosti a celkové chování záleží na složení. Tak jako u cementu, i zde tvoří hlavní oxidy oxid vápenatý  $\text{CaO}$ , oxid hořečnatý  $\text{MgO}$ , Oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$  a oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Podle ČSN EN 15167 [49] musí být hmotnostní podíl  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2)$  větší než 1,0. Použitá struska pochází z Kotouče – Štramberk a přesné zastoupení jednotlivých oxidů je uvedeno v již zmíněné tabulce 6 spolu s oxidy cementů. Pro naši strusku vychází kritický podíl 1,44, což je větší než 1 a vhodnost obsahu požadovaných oxidů je zaručena. Důležité je i zastoupení ostatních oxidů. Ch. Jiang a kol. [50] studovali vliv podílu  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  na vlastnosti a strukturu vysokopecní strusky. Se vzrůstajícím podílem  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  stupeň depolymerizace systému klesnul, což vedlo ke snížení viskozity. Z výsledků tedy vyplývá, že výsledné vlastnosti strusky s proměnným zastoupením  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lze upravovat přidáním  $\text{MgO}$ .

# Praktická část

## Účel práce

Jak již bylo zmíněno v úvodní části, přítomnost trhlin v betonu snižuje životnost staveb a znehodnocuje tak jejich funkčnost. Pokud se budou produkovat kvalitní a trvanlivé konstrukce, které budou splňovat svou funkci po požadovanou dobu, sníží se tak náklady na případné opravy a odstraní se rizika kolapsů. Tyto podstatné důvody vedou k výzkumu zaměřenému na zvyšování trvanlivosti betonových konstrukcí, v tomto konkrétním případě na omezení přítomnosti trhlin.

Pro omezení tvorby trhlin vlivem smršťování byly zkoumány vybrané vzorky cementů z českých cementáren s různými vlastnostmi. Jako zástupce rychlovazných cementů byl zvolen cement CEM I 52,5 R, pro jeho vysoké počáteční pevnosti v prvotních dnech, naproti tomu byl určen CEM III/B 32,5 N – LH, jakožto cement vyznačující se velmi pomalou hydratací. Velmi oblíbeným cementem v praxi je CEM II/B-S 32,5 R a pro ucelení škály vyráběných cementů byl zvolen CEM I 42,5 R. Vzhledem k aktuálním tématům v oblasti betonu byl pro porovnání vybrán silniční cement CEM I 42,5 R SC.

## Popis experimentu

### Výrobní postup

Každý vzorek se skládal z pojiva vybraného druhu a ze tří frakcí normativních písků CEN dle [51] v poměru 1:1:1:1. Jako pojivo se vždy použil cement bez přidaných příměsí a v další sadě se 25% cementu nahradilo vysokopecní struskou. V tabulce 9 je soupis použitých cementů včetně označení vzorků a původu daného cementu. Všechny cementy jsou vyráběny jako volně ložené, neboť jsou primárně určeny pro transportbeton.

Označení	Druh cementu	Závod	Způsob skladování	Struska
I-5	CEM I 52,5 R	Mokrá	Volně ložený	ne
I-5-S	CEM I 52,5 R	Mokrá		ano
I-4	CEM I 42,5 R	Prachovice		ne
I-4-S	CEM I 42,5 R	Prachovice		ano
I SC	CEM I 42,5 R SC	Mokrá		ne
I SC-S	CEM I 42,5 R SC	Mokrá		ano
II	CEM II/B-S 32,5 R	Prachovice		ne
II-S	CEM II/B-S 32,5 R	Prachovice		ano
III	CEM III B 32,5 N LH SR*	Prachovice		ne
III-S	CEM III B 32,5 N LH SR*	Prachovice		ano

Tabulka 9: Označení vzorků a jejich původ, \*síranovzdorný cement = zvýšená odolnost proti působení síranů, minimální podíl C<sub>3</sub>A (do 3,5%)

Všechny směsi byly zamíchány s vodním součinitelem v/c 0,45. Každá složka byla s dostatečnou přesností odměřena na digitální váze a zamíchána v automatické míchačce na malty značky AUTOMIX Controlo, č. 60010020 (obrázek 20). Směs se dále ukládala do forem vymazaných minerálním olejem pro snadnější odbednění. Nakonec byla směs zhutněna a zakryta paronepropustnou fólií za účelem omezení vypařování vody z trámců.



Obrázek 20: Automatická míchačka na malty

Vždy byly zhotoveny vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu – trámce 160 x 40 x 40 mm a trámečky pro měření volného smrštění 20 x 20 x 100 mm. Druhý den po zhotovení byly vzorky odbedněny a na trámečky pro měření smrštění byly nalepeny kovové terčíky pro měření dilatometrem. Z výrobního postupu vyplývá, že smrštění je měřeno po prvním dni a vzhledem k tomu, že se výsledné hodnoty zjišťují podle porovnání hodnot s předchozím měřením, první výsledná hodnota je tedy 2. den po výrobě. Bohužel touto metodou nelze určit smrštění v prvních hodinách, neboť vzorky musí mít minimální manipulační pevnosti. Proto absolutní výsledná hodnota včetně měření počátku bude o něco větší, než bylo naměřeno (smrštění prvních 24 hodin). Nicméně pro porovnání chování vybraných cementů bylo toto měření dostatečné, neboť doba byla co nejkratší.

### Ošetřování

Trámce pro měření pevnosti byly po celou dobu až do dne zkoušení uloženy ve vodě v laboratorních teplotách při teplotě 20°C. Trámečky pro stanovení smrštění měly různé režimy ošetřování. Jedna sada byla po celou dobu ponechána ve vodě, druhá sada byla do 3. dne od zhotovení uložena ve vodě a poté ponechána na vzduchu a třetí sada byla po celou dobu pouze na vzduchu. Podmínky byly voleny tak, aby simulovaly extrémní situace, střídavý

režim představuje krátkodobé ošetřování v prvotních dnech, případně omezení vysychání díky přítomnosti bednění.

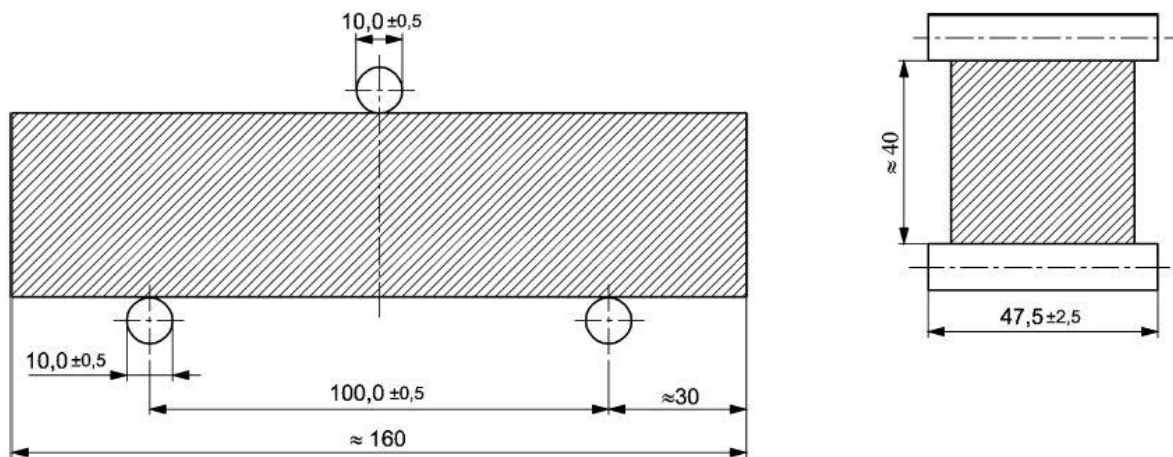
## Pevnost

Pevnost trámců byla stanovena normativním způsobem pomocí hydraulického lisu typu VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig, č. 990.06/57 (obrázek 21) podle ČSN EN 196 – 1, kapitola 9 [51]. Pro získání podrobného průběhu vývoje pevností byla pevnost stanovována ve 3, 7, 28 a 90 dnech.



**Obrázek 21: Hydraulický lis pro stanovení pevností**

Nejprve byla naměřena pevnost v tahu za ohybu pomocí zkoušky tříbodového ohybu. Jedná se o nepřímou metodu, neboť naměřená veličina je dále přepočítávána na veličinu jinou, respektive síla na pevnost. Obrázek 22 zobrazuje uspořádání vzorku v přístroji. Vzorek je podporován dvěma válcovými podporami z oceli o průměru 10 mm ve vzdálenosti 100 mm od sebe. Ve středu se nachází třetí válec, který je stejného průměru i ze stejného materiálu jako dva podporové. Délka středového válce musí být větší než šířka zkoušeného vzorku, norma doporučuje 45 až 50 mm. Osa zkoušeného trámce se osazuje kolmo na zmíněné válcové podpory. Zatěžování středovým válcem probíhá rychlostí  $50 \pm 10$  N/s. Z naměřené síly při porušení se dále vypočítá pevnost v tahu za ohybu.



Obrázek 22: Schéma tříbodového ohybu, rozměry v mm [51]

Po provedení zkoušky v tahu za ohybu se vzniklé zlomky použijí pro stanovení pevnosti v tlaku. Takto vzniklé poloviny se umístí do středu lisu a provede se zatížení rychlostí  $2\,400 \pm 200$  N/s až do porušení zkoušeného vzorku. Z naměřené síly při porušení se vypočte výsledná pevnost v tlaku.

### Způsob měření smršťování

Měření smrštění probíhalo následným způsobem: Po určitém časovém intervalu (ten byl volen podle stáří vzorků a očekávaných změn, ze začátku tedy denně a s přibývajícím časem 2-3 týdně, v konečné fázi 1x týdně) byly vzorky zváženy digitální váhou (obrázek 23) a změřena velikost trámce digitálním dilatometrem (obrázek 24). Vzorek, který je opatřen měřicími terčíky, vždy ve vrcholu a spodní části vzorku, je ustaven na hrot podstavce stojanu. Digitální úchylkoměr je osazen v horní části stojanu a jeho pohyblivá část zapadne do vrcholového terče vzorku. Podle měření se naměřené velikosti pak bylo provedeno přepočítání a následné vyhodnocení výsledků.



**Obrázek 23: VLEVO: Stanovení hmotnosti trámečků pro smrštění**

**Obrázek 24: VPRAVO: Stanovení velikosti vzorku dilatometrem**

### Vlivy na výsledky měření

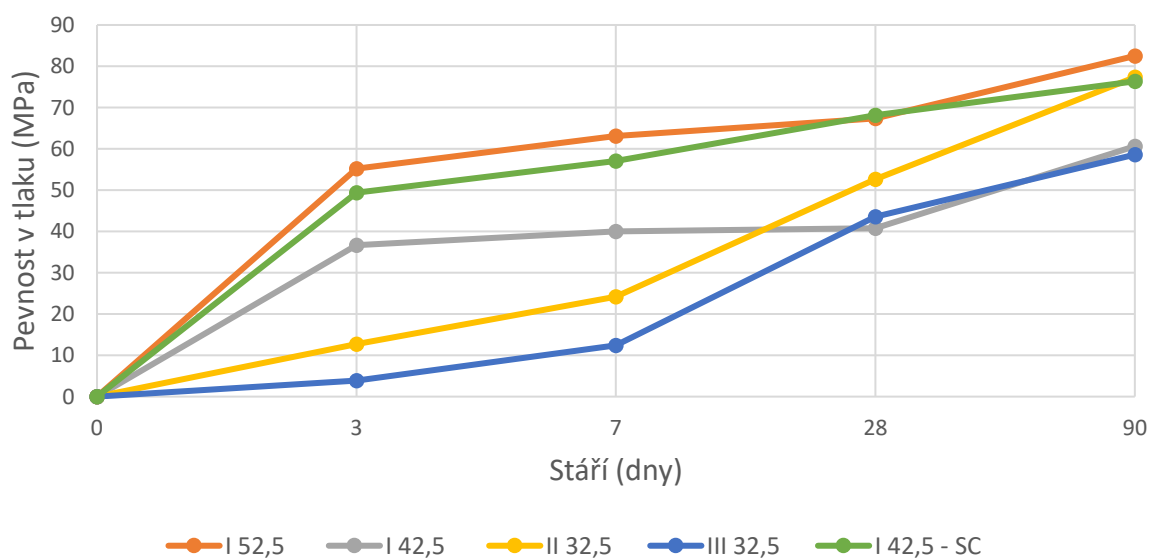
Přesnost dilatometru je na jednotky  $\mu\text{m}$ , tudíž sebemenší nečistota na kterékoliv kontaktní části může způsobovat zkreslení dat. Stojánek pro ukotvení vzorku je vyroben z kovu, který podléhá teplotní roztažnosti. I když v laboratoři jsou přibližně konstantní teploty, může mít na měření vliv například kontakt s rukou laboranta. Pro odstranění některých vlivů byl před měřením měřen etalon z plastu, díky kterému tyto nepřesnosti lze odstranit. Výsledky byly uvažovány jako průměr ze dvou měření.



## Vyhodnocení výsledků pevností

Tvorba trhlin je obecně úzce spjata s pevností betonu, v našem případě s pevností cementu, neboť materiál s dostatečnou pevností je schopen vzdorovat napětím vyvolaným vysycháním. Největší změny jsou z pravidla již v počátku, proto byla pevnost měřena ve 3, 7, 28 a 90 dnech. Z grafů na obrázcích 25 až 26 je patrný vývoj pevností cementů v čase.

Cementy s nejrychlejším nárůstem počátečních pevností, tedy CEM I 52,5 R a CEM I 42,5 R SC, vykazovaly velmi podobné chování. Během prvních dnů došlo k největšímu nárůstu pevností, neboť ve 3. dni dosahovaly hodnoty 50 až 55 MPa, v dalších dnech už se nárůst zpomalil a po 28 dnech dosáhly téměř stejné hodnoty 68 MPa. To znamená, že po 3 dnech dosáhly zhruba 65% své pevnosti (vztaženo k 90 dnům), za dalších 25 dnů došlo k nárůstu pouze o 15 MPa, tedy přibližně 20% a po dalších 62 dnech o dalších 12 MPa (15%). Silniční cement by se měl podle výrobce vyznačovat vysokou pevností v tahu, malými objemovými změnami, nízkým hydratačním teplem a vysokými počátečními pevnostmi. Podle mého názoru se ale tyto vlastnosti navzájem vylučují. Podle tabulky 6 je složení cementu velmi podobné cementu CEM I 52,5 R. Měrný povrch silničního cementu je o 1/3 menší, nežli cement CEM I 52,5 R. Tento rozdíl je více vysvětlen v kapitole Velikost částic (str. 71 až 73). Přesto vysoký podíl jemných částic v silničním cementu má za následek velmi vysoké počáteční pevnosti. Díky těmto podobnostem bych očekávala, že i vývin hydratačního tepla a smrštění bude podobný se zmíněným cementem CEM I 52,5 R. Výsledky smrštění vysycháním ovšem podobnost s CEM I 52,5 R nepotvrdili, vývin hydratačního tepla bohužel nebyl stanoven.

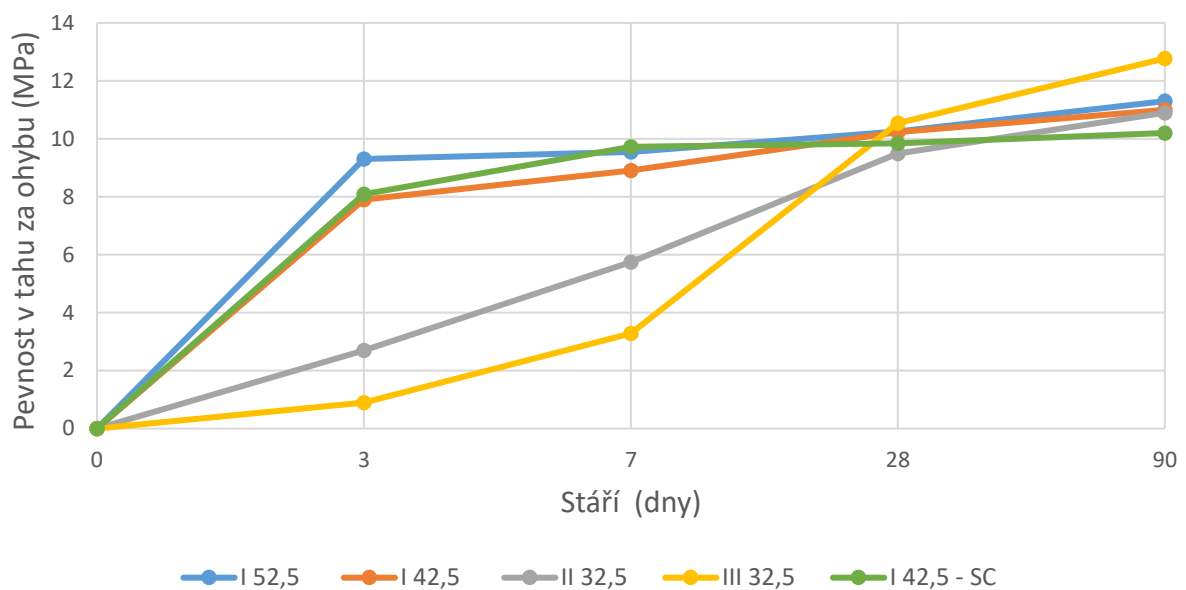


Obrázek 25: Pevnosti v tlaku - cement bez strusky

Portlandský cement CEM I 42,5 kopíruje přibližně chování cementu CEM I 52,5 R, jen absolutní hodnoty jsou přibližně o 20 MPa nižší. Pomalejší cementy se chovaly standardně.

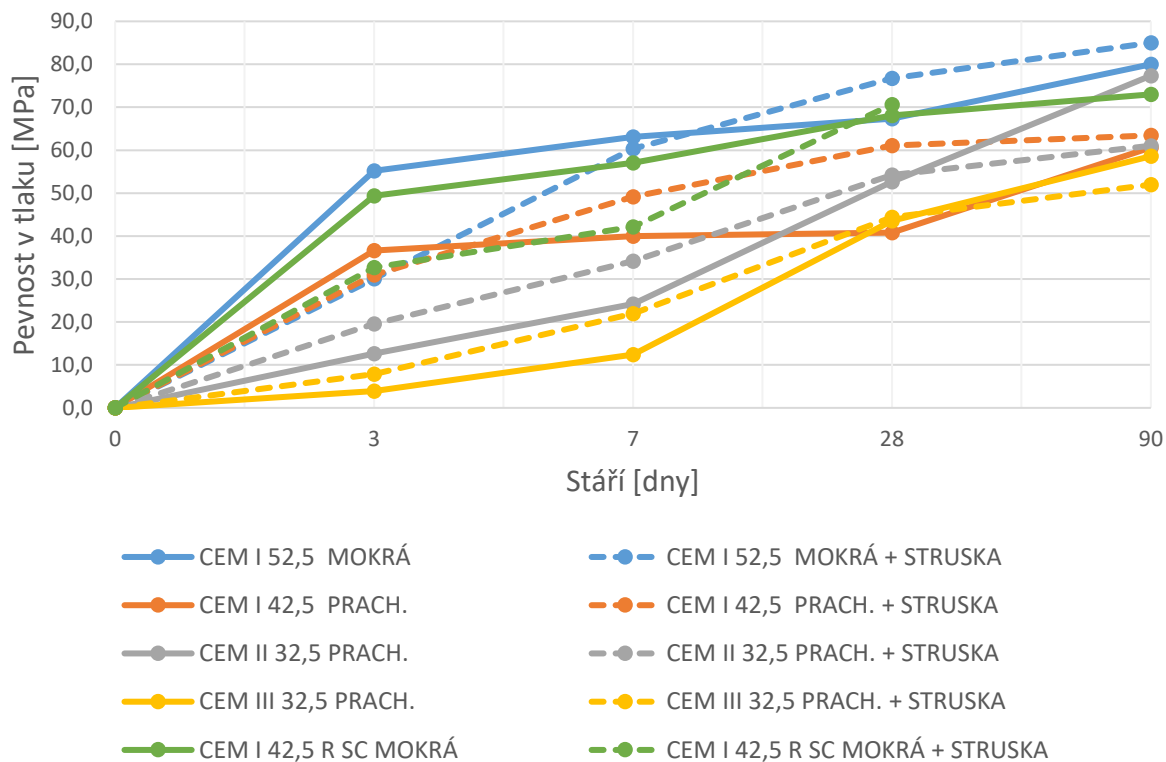
Podle procentuálního zastoupení slínku (tabulka 5) je pomalejší vývin pevností v prvních dnech, dochází zde ovšem k takzvaným doběhům. Struska se pomalu podílí na vývoji struktury, čímž stoupá i celková pevnost v čase. Až 35% zastoupení strusky u CEM II/B-S má za následek dosažení stejné pevnosti, jako je pevnost portlandského cementu CEM I 52,5R ve stáří 90 dnů. Trend nárůstu pevnosti u CEM III je ještě pomalejší, nicméně lze očekávat ještě výraznější pevnosti ve stáří výrazně nad 90 dnů, nežli zde naměřených 60 MPa.

U tahových pevností pozorujeme velmi podobný trend. Zde je nutno si uvědomit, že tahové pevnosti jsou výrazně nižší a nepřesnost výsledků je zde vyšší. Podle obrázku 26 ve 28 dnech dosáhly vzorky přibližně stejné hodnoty 10 MPa.



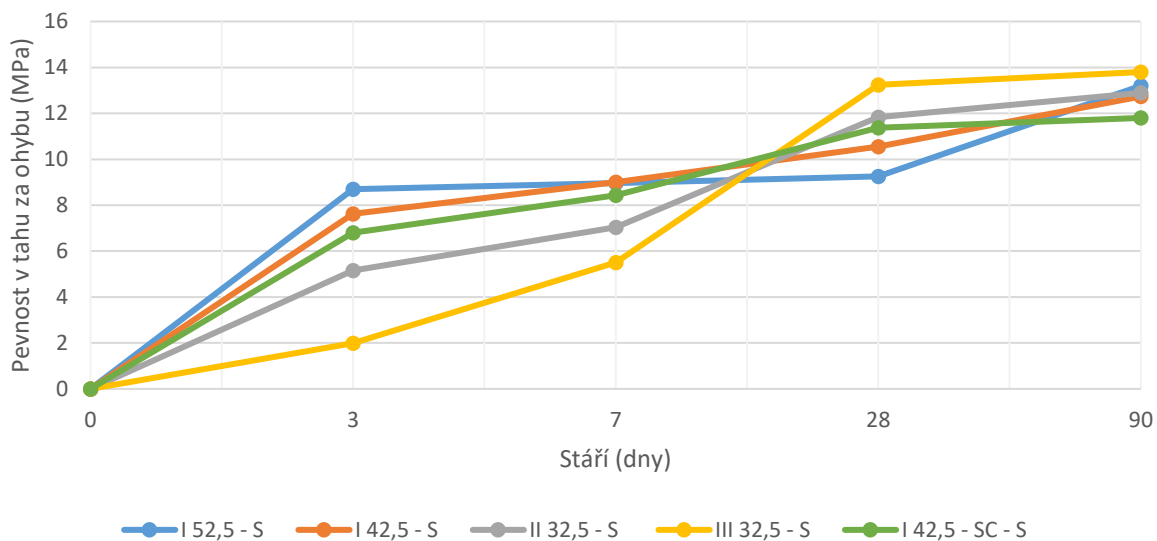
**Obrázek 26: Pevnost v tahu za ohybu - cement bez strusky**

Po přidání strusky se výrazně zpomalily počáteční pevnosti u rychlých cementů (obrázek 27). Opět ale můžeme pozorovat doběhy ve větším stáří vzorků. Opačného chování dosáhly pomalé cementy, neboť čím byl cement pomalejší, tím bylo zpomalení vlivem strusky menší. U velmi pomalých cementů bylo dokonce dosaženo vyšších pevností nežli u vzorků bez náhrady struskou, ale pouze z krátkodobého hlediska. Z dlouhodobého hlediska má tedy náhrada struskou portlandského cementu smysl pouze do omezené hodnoty. Pokud ke směsnému cementu, kde je obsah strusky už tak velmi vysoký, přidáme ještě další strusku, pevnosti se zvýší pouze v počátku, nicméně dlouhodobě je již pevnost nižší.

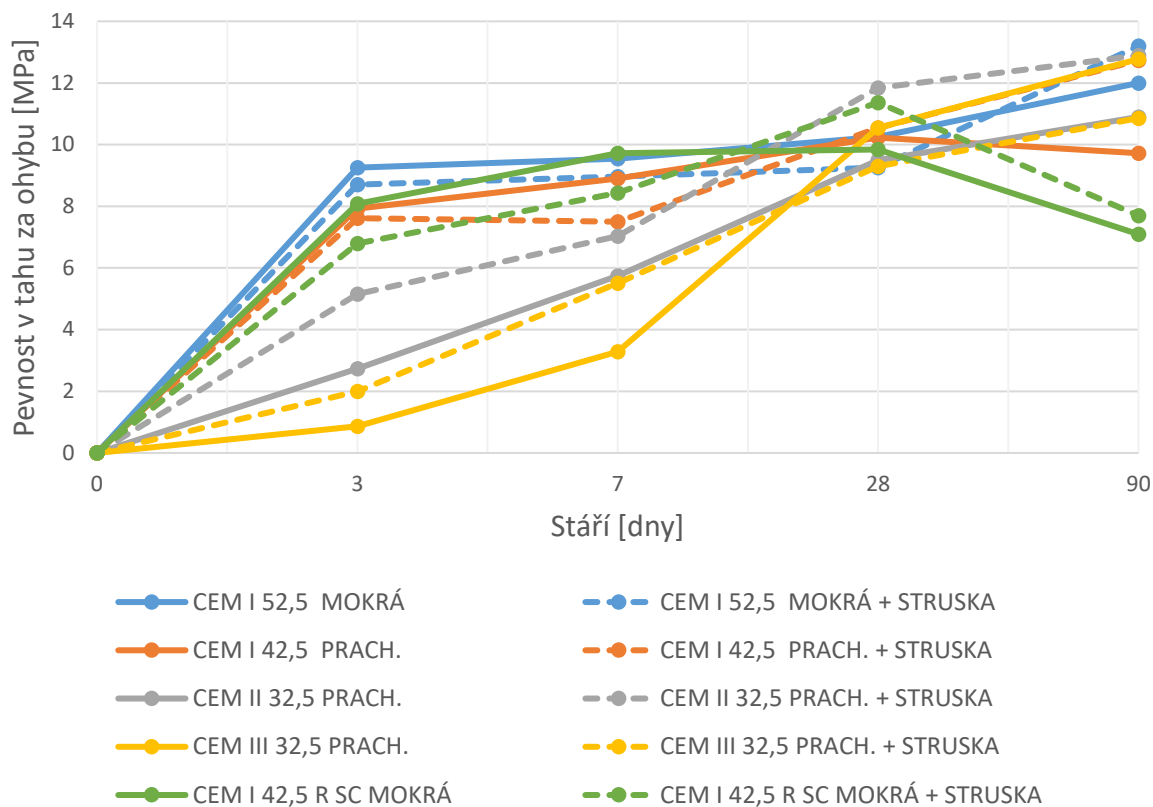


Obrázek 27: Porovnání pevností v tlaku - cement se struskou vs. cement bez strusky

Vliv strusky na pevnost v tahu za ohybu je obdobný jako u tlakového chování. Po 28 dnech bylo opět dosaženo mezi 9 a 13 MPa (obrázek 28). Po dalších 62 nedošlo k příliš velkému navýšení. Obrázek 29 potvrzuje opět snížení počátečních pevností u rychlovazných cementů a vyšší počáteční hodnoty u směsných cementů.



Obrázek 28: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu pro vzorky se struskou



Obrázek 29: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu - cementy bez strusky vs. se struskou

## Vyhodnocení výsledků volného smrštění

V rámci experimentu nebylo možno sledovat dostatečný počet vzorků stejného složení na to, aby bylo možno provést statistické vyhodnocení a určit příslušné statistické veličiny. Proto jsou všechny výsledky uváděny bez nepřesnosti měření.

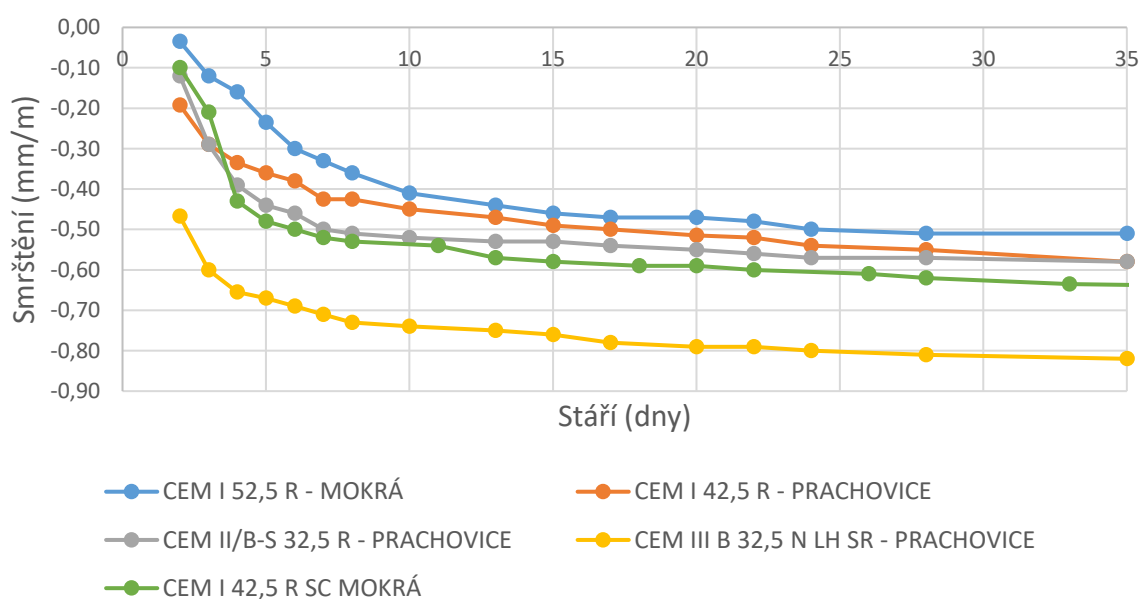
Ještě je nutno podotknout, že výsledky stanovené zvoleným měřením mají vypovídající hodnotu pro menší velikost, vybrané druhy cementu a laboratorní prostředí. Pokud by se jednalo například o větší vzorky, bude pravděpodobně chování rozdílné, neboť vzorek bude jinak vysychat, může zde mít velký vliv vývin hydratačního tepla, bude uložen v jiném prostředí, případně bude ovlivněn dalšími jevy.

Toto jsou výsledky volného smrštění způsobeného především ztrátou, respektive příjmem vlhkosti. Hmotnost byla sledována zejména z toho důvodu, aby byl patrný vliv změny vlhkosti na velikost smrštění.

## Smršťování na vzduchu

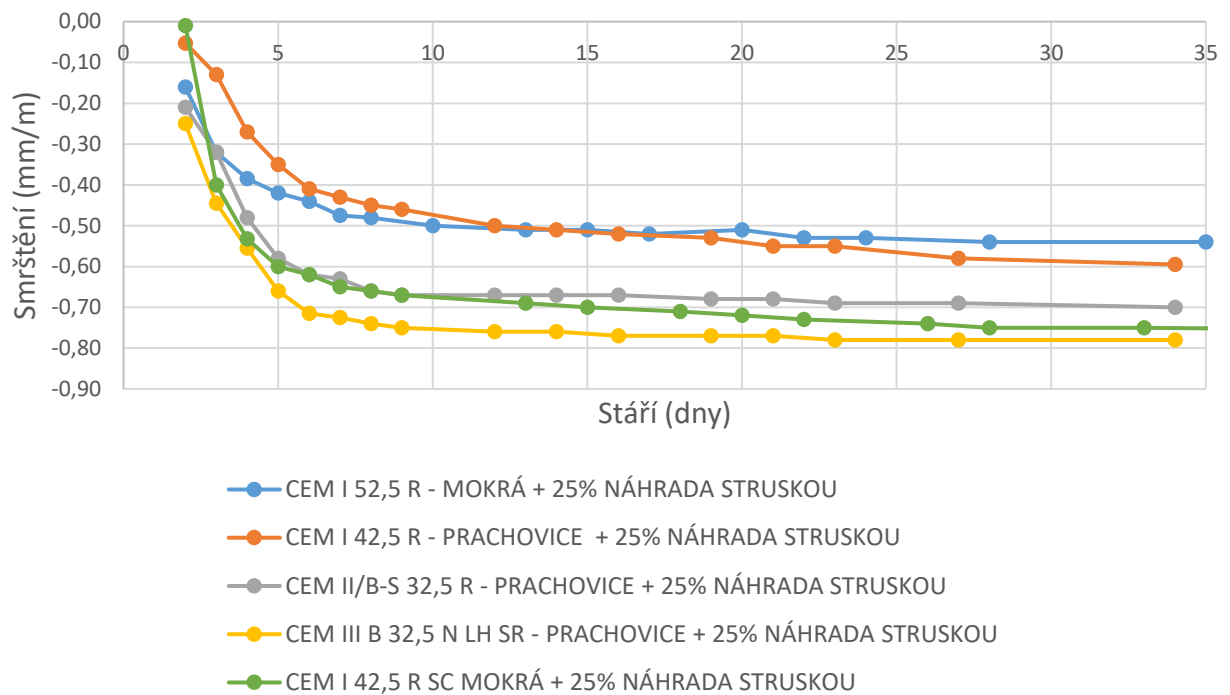
Při odpařování vody ze vzorku dochází k nárůstu napětí uvnitř kapilár. Toto napětí vede k celkovému zmenšení objemu prvku a k výslednému smrštění. Pro smrštění vlivem vysychání je tedy stěžejní pevnost materiálu především v počátečních dnech, kdy je pevnost nejnížší a tím pádem riziko vzniku trhliny nejvyšší.

Pokud budeme pozorovat nejhorší z případů ošetřování, tedy vysychání na vzduchu bez ošetření (obrázek 30), nejlépe můžeme hodnotit CEM I 52,5 R. V prvotních dnech je nejpomalejší nárůst smrštění a celkové smrštění vztažené k 28 dnům se pohybuje okolo 0,5 mm/m. Tento průběh přisuzuji pomalému úbytku vlhkosti ze vzorku (více specifikováno viz. Kapitola: Průběh změny hmotnosti, strana 64) a vysokým počátečním pevnostem tohoto cementu. Pevná struktura lépe odolává napětím, které jsou uvnitř kapilár vyvolány, a tak dochází k menším deformacím. Nutno také zdůraznit, že pevnost, která zde byla měřena, je ze vzorků, které byly uloženy ve vodě. Pokud bychom stanovovali pevnost na vzorcích, uložených na vzduchu bez ošetřování, očekávaná pevnost by byla pravděpodobně nižší, neboť celková hydratace by probíhala pomaleji. Tuto teorii potvrzují i ostatní cementy. Čím nižší byla pevnostní třída, anebo čím více bylo strusky, tím rychlejší byl úbytek hmotnosti a tím hůře se cement celkově choval. Nejhorších výsledků dosáhl cement CEM III B 32,5 N. Jedná se o nejnižší pevnostní třídu, obsahuje největší podíl strusky, nejvýrazněji ztrácí vlhkost a nárůst počátečních pevností je nejnížší (cement třídy N). Navíc se jedná o síranuvzdorný cement, který má nízký obsah  $C_3A$ , což má za následek nízké počáteční pevnosti. Trochu anomálně se chová silniční cement. Podle specifikací silničního cementu by smršťování mělo být nízké. Nicméně i přes pevnostní podobnosti s CEM I 52,5 R, smrštění je vyšší, a to 0,6 mm/m ve 28 dnech, což je o trochu horší než cement CEM II B/S. Vzhledem k rychlým počátečním pevnostem a očekávaným vysokým vývinem hydratačního tepla bych předpokládala i vyšší smršťování na reálných konstrukcích. Na základě těchto poznatků je současný účel používání vhodný k diskuzi.

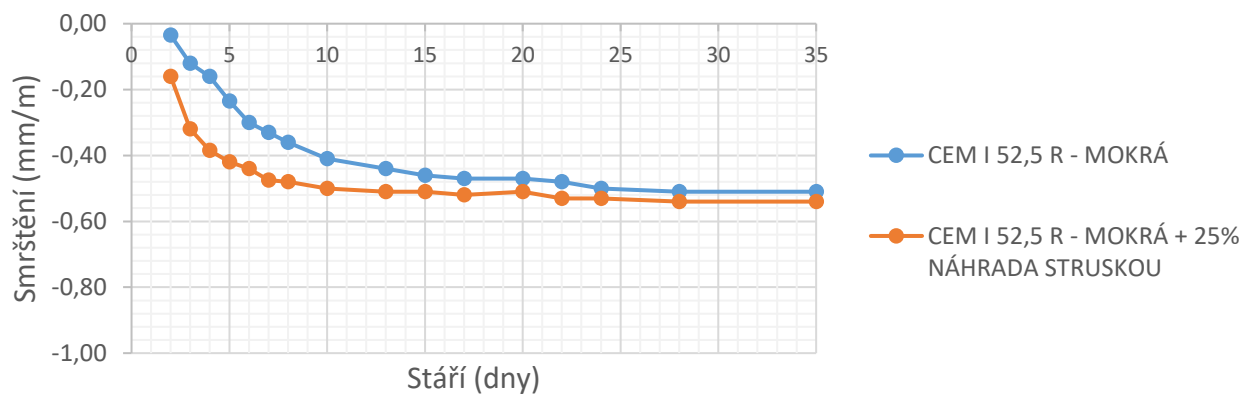


Obrázek 30: Smrštění na vzduchu - cementy bez strusky

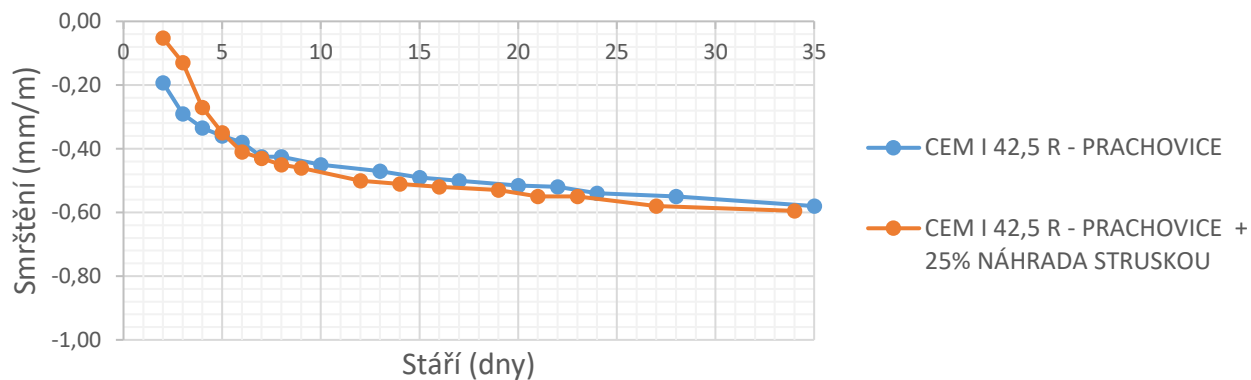
Zpomalení počátečních pevností náhradou strusky způsobilo u rychlých cementů rychlejší nárůst smrštění (strmější křivky do cca 5 dnů) (Obrázek 31 až 36). Nadále byl již trend velmi podobný jako u cementů bez strusky.



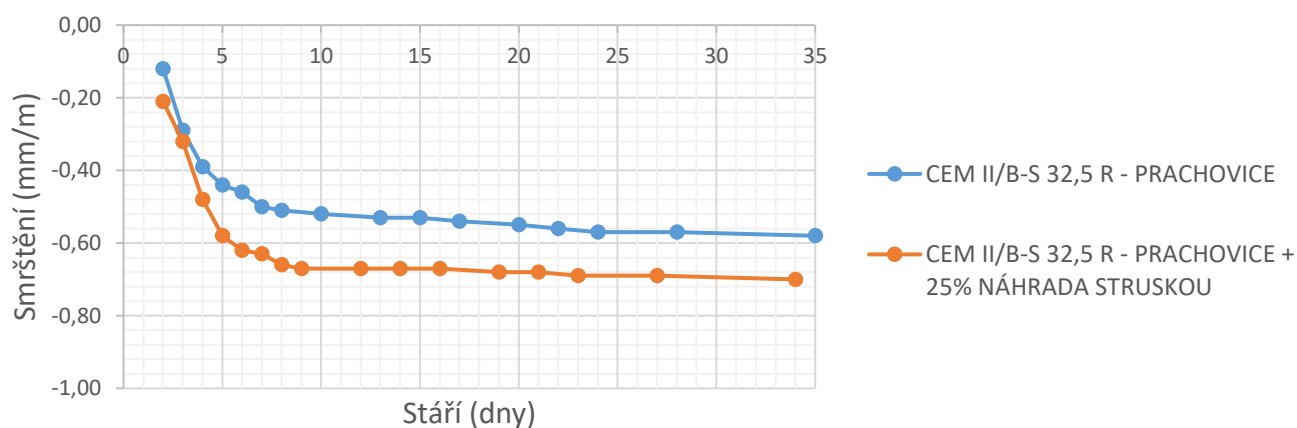
**Obrázek 31: Smrštění na vzduchu - cementy se struskou**



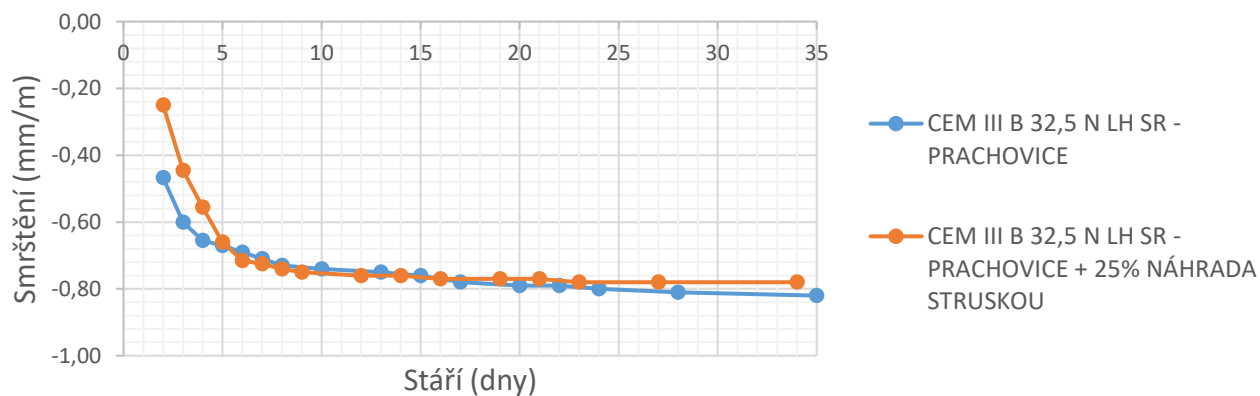
**Obrázek 32: Smrštění na vzduchu - cement CEM I 52,5 R vs. CEM I 52,5 R + struska**



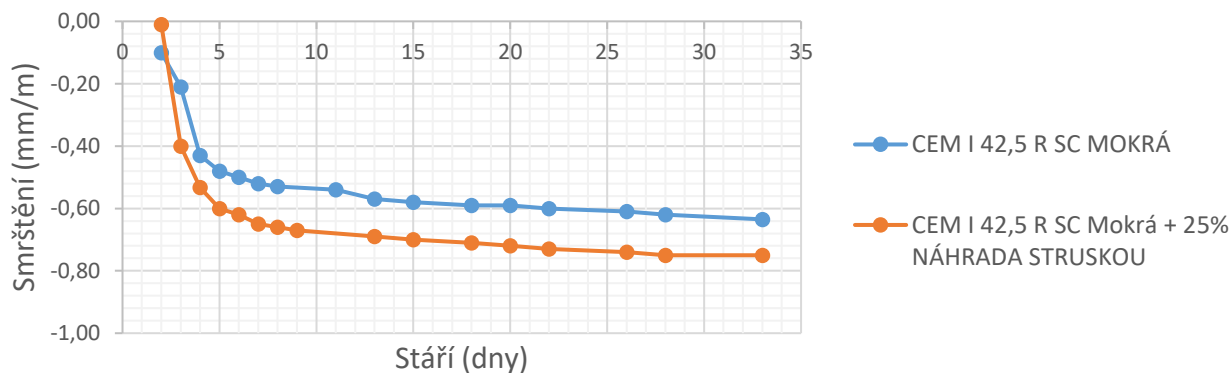
Obrázek 33: Smrštění na vzduchu - cement CEM I 42,5 R vs. CEM I 42,5 R + struska



Obrázek 34: Smrštění na vzduchu - cement CEM II vs. CEM II + struska

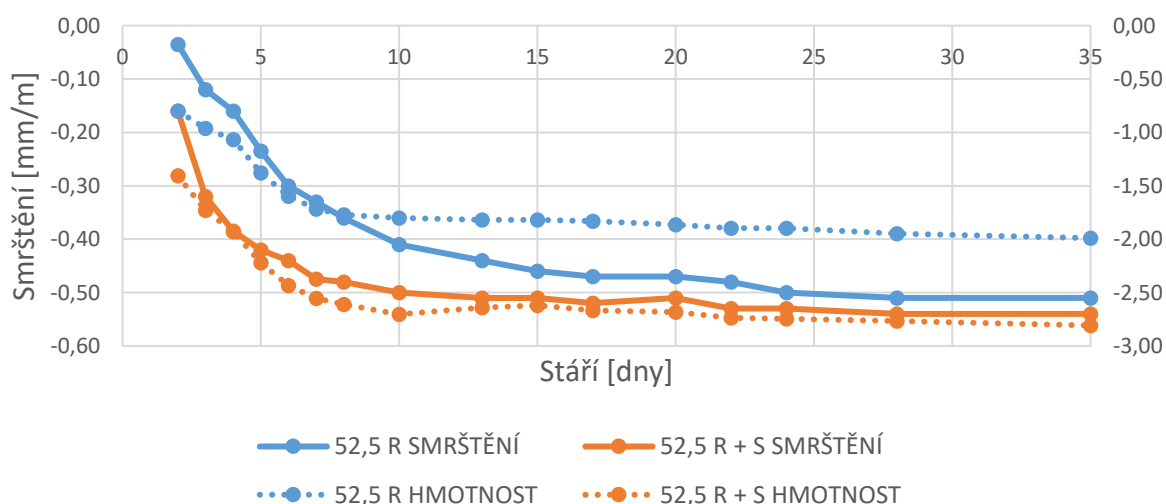


Obrázek 35: Smrštění na vzduchu - cement CEM III vs. CEM III + struska



Obrázek 36: Smrštění na vzduchu - cement CEM I 42,5 R SC vs. CEM I 42,5 R SC + struska

Opět nejlepších výsledků dosáhl cement CEM I 52,5 R, který měl hodnotu smrštění ve stáří 28 dnů přibližně 0,5 mm/m. Nejhůře dopadl opět cement CEM III 32,5 N, se smrštěním 0,8 mm/m. Také je nutno podotknout, že u cementů se struskou je již při zpracování patrný plastičtější stav, oproti portlandským cementům. Tento plastický stav se projevuje částečným odlučováním vody, což opět vede k výraznějšímu odpařování vody z cementové pasty především v prvních dnech (doloženo obrázkem 37), kde cement bez strusky ztratil přibližně 2 % hmotnosti, oproti tomu cement se struskou 2,7%.



Obrázek 37: Smrštění a vysychání na cementu bez strusky a se struskou pro 52,5 R

Na základě naměřených dat lze obecně konstatovat, že cementy s rychlejším nárůstem počátečních pevností bez ošetřování lépe vzdorují smršťování od vysychání. Vlivem použité měřicí metody byly ale zanedbány změny v prvních 24 hodin, které budou právě u těchto cementů vyšší nežli v případě směsných cementů.

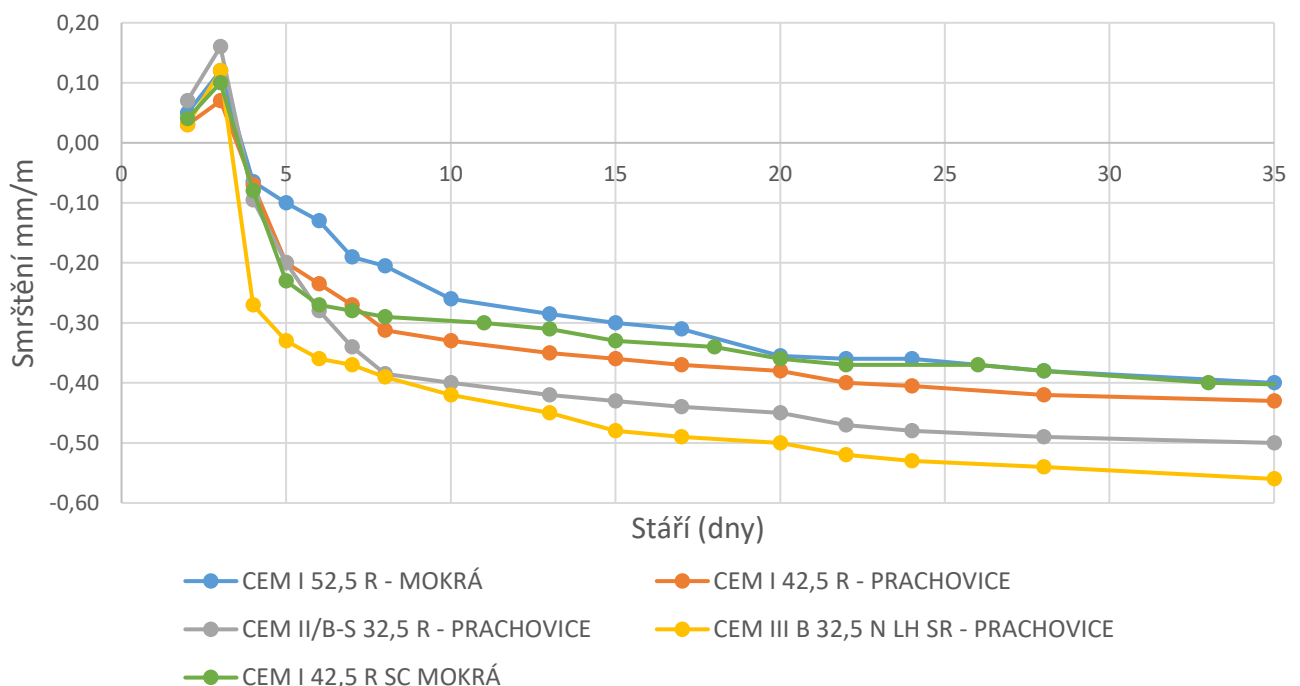


## Smršťování s ošetřováním

Celkově lepších výsledků bylo dosaženo při ošetřování vzorků (obrázek 38). Z počátku vzorky přijímaly vlhkost a s tím je spojené nabývání. Uložení ve vodě taktéž umožňuje lepší hydrataci cementu a znemožňuje vysychání. Po 3. dni, kdy byly vzorky z vody vyjmuty, došlo k razantnímu smrštění vlivem odpaření vody. Dále se vzorky chovaly obdobně jako v předchozím případě, tedy na vzduchu. Toto počáteční ošetření zaručilo nižší výsledné smrštění.

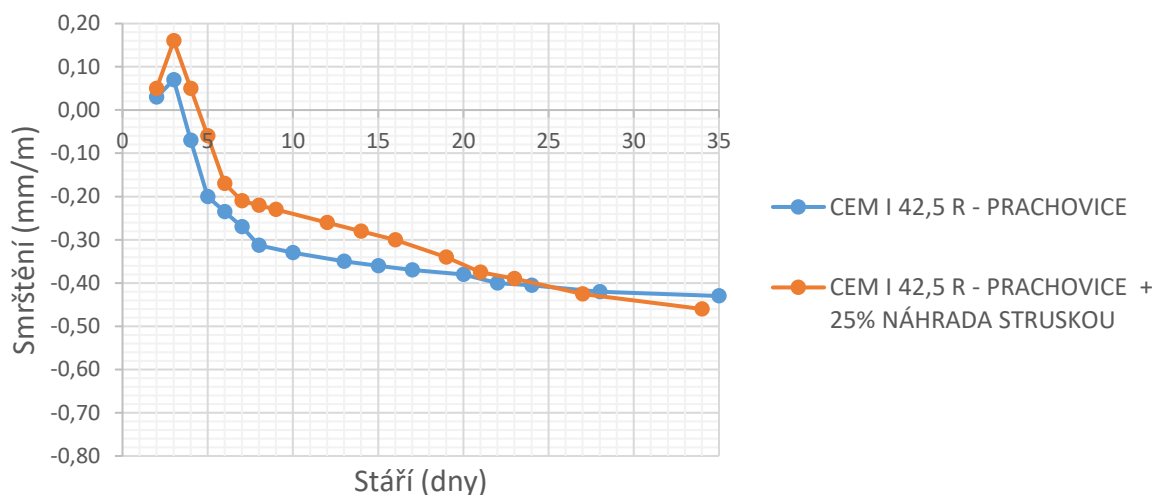
Opět nejlepších výsledků dosahoval cement CEM I 52,5 R. Zde bylo naměřeno smrštění ve 28 dnech 0,4 mm/m, což je o cca 25% lepší nežli bez ošetření. Ostatní cementy se řadily ve stejném pořadí. Nejvyšších hodnot smrštění nabýval CEM III 32,5 N se smrštěním 0,55 mm/m, což je oproti případu bez ošetřování pouze o 10% lepší. Tyto výsledky opět potvrzují teorii, že pro toto smrštění je stěžejní chování v prvních dnech. Pomalejší cementy v počátcích nedostatečné pevnosti více nabývají, ale zároveň se i více smršťují. Překvapivě dobře tentokrát vyšel silniční cement, který dosáhl stejných hodnot jako nejlepší cement CEM I 52,5 R. Dostatečný přísun vody pravděpodobně zapříčinil větší hydrataci a omezil tak smrštění.

Obdobně jako v předchozím případě i zde cementy s rychlejším nárůstem počátečních pevností vzdorují smršťování od vysychání. Nutno opět podotknout, že vlivem použité měřící metody byly zanedbány změny v prvních 24 hodin, které budou právě u těchto cementů vyšší nežli v případě směsných cementů.

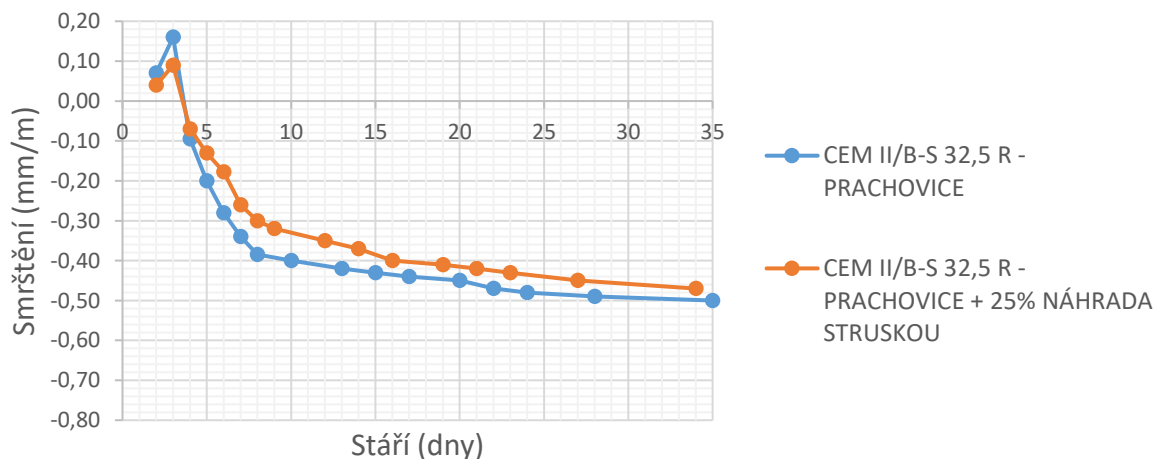


Obrázek 38 Smrštění cementu bez strusky - do 3. dne ve vodě

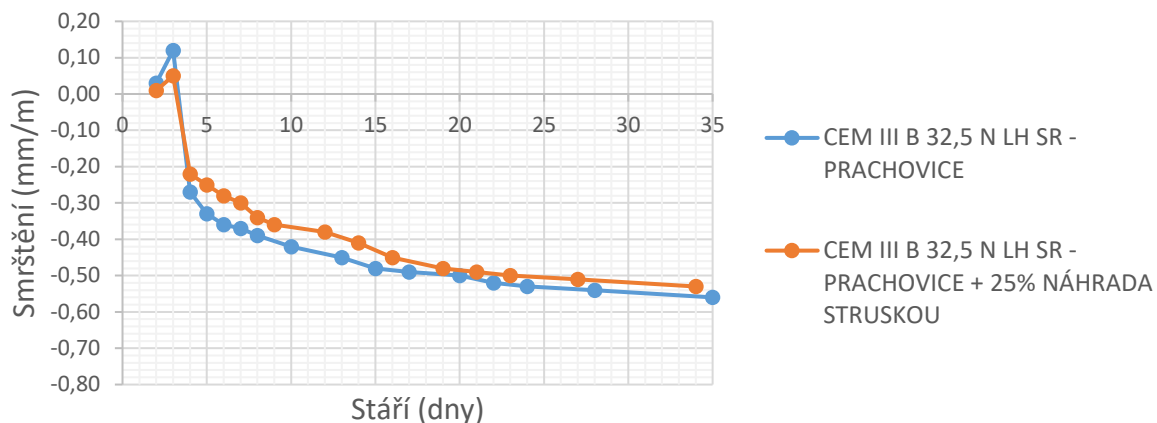
Po přidání strusky bylo dosaženo velmi podobných hodnot u 2 cementů: CEM II 32,5 R a CEM III 32,5 N (obrázky 40,41) . Oba cementy ze zkoumané sady jsou pomalejší a ve svém složení již strusku mají. Podobnost průběhu smrštění je pravděpodobně dána dostatečnou hydratací a vyššími pevnostmi v prvotních dnech. Tato fakta měla za následek velmi podobné chování vzorků a rozdíly ve smrštění se příliš neprojeví. Rozdílnějších hodnot dosáhly rychlejší cementy – CEM I 52,5 R a CEM I 42,5 R SC (obrázek 42 a 39). Zde zpomalení struskou opět způsobilo větší smrštění. Cement CEM I 42,5 R (obrázek 43) v prvních dnech více nabýval a měl tedy rezervu pro další smršťování, proto byla výsledná dlouhodobá hodnota srovnatelná s cementem bez náhrady.



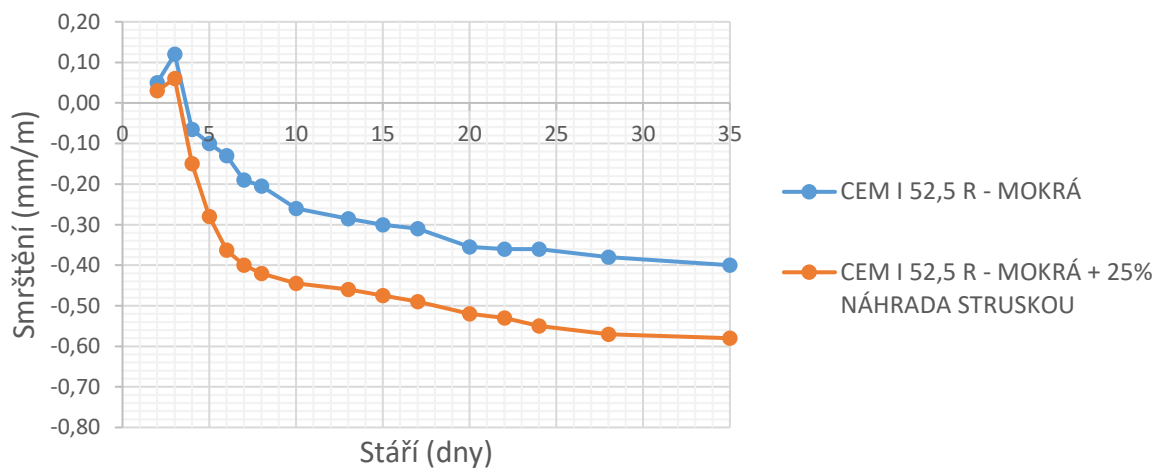
Obrázek 39: Smrštění s ošetřováním - cement CEM I 42,5 R vs. CEM I 42,5 R + struska



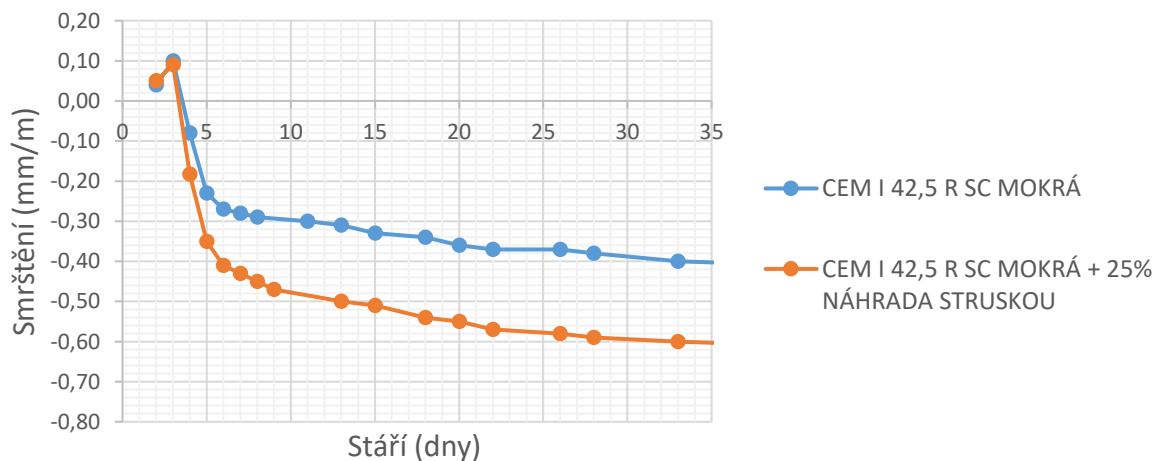
Obrázek 40: Smrštění s ošetřováním - cement CEM II vs. CEM II + struska



Obrázek 41: Smrštění s ošetřováním - cement CEM III vs. CEM III + struska



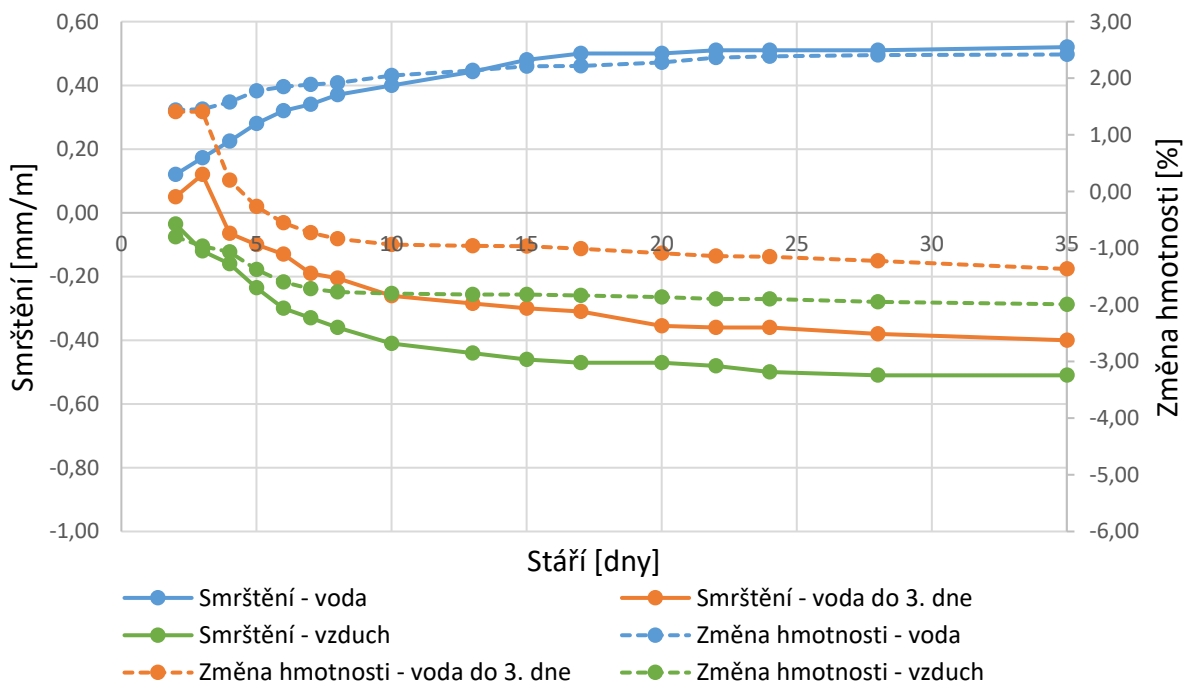
Obrázek 42: Smrštění s ošetřováním - cement CEM I 52,5 R vs. CEM I 52,5 R + struska



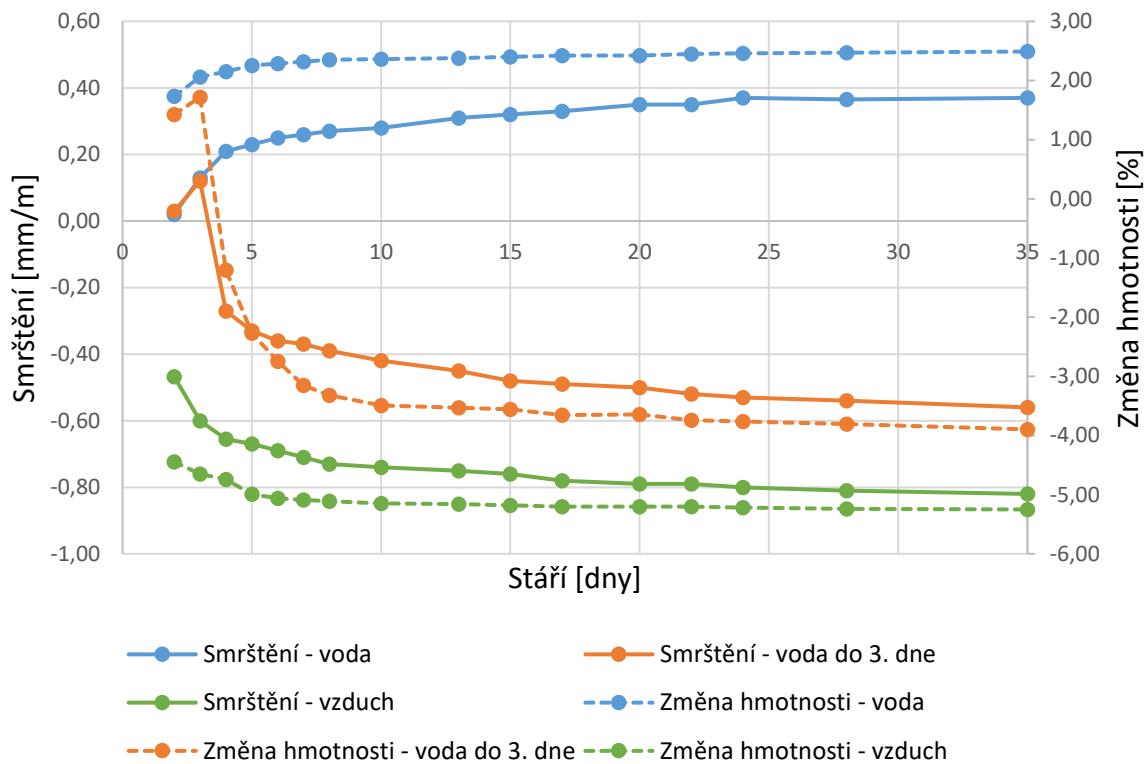
Obrázek 43: Smrštění s ošetřováním - cement CEM I 42,5 R SC vs. CEM I 42,5 R SC + struska

## Nabývání

Případy, kdy jsou betonové konstrukce zcela vystaveny vodnímu prostředí, nejsou příliš časté. Tyto hodnoty jsou zde uvedeny spíše pro informativní účely, zejména z důvodu názornosti chování opačného projevu. Celkový projev nabývání má určité odlišnosti. Při tomto ošetřování je relativně vlhký vzorek (stav po odbednění) uložen do vody, která má 100% relativní vlhkost, rozdíl vlastností vzorku a okolního prostředí je tedy značný a dochází k výraznému příjmu vody (dva různé stavy se snaží dosáhnout rovnováhy). Oproti tomu při vysychání na vzduchu je rozdíl relativní vlhkosti vzorku a okolí menší, proto i úbytek hmotnosti je menší. Toto dokládá i obrázek 44, kde ve vodě bylo dosaženo o 20% vyššího nárůstu hmotnosti oproti stavu na vzduchu. Záleží ale na cementu (již komentování str. 56), neboť každý se chová trochu jinak, obrázek 45 znázorňuje menší příjem vody a větší míru vysychání (vysychání až 5%) u cementu s vysokým obsahem strusky. Na zmíněné chování má stěžejní vliv vlastní rozložení a velikost pórů, dále pak vývin pevností především v prvotních dnech.

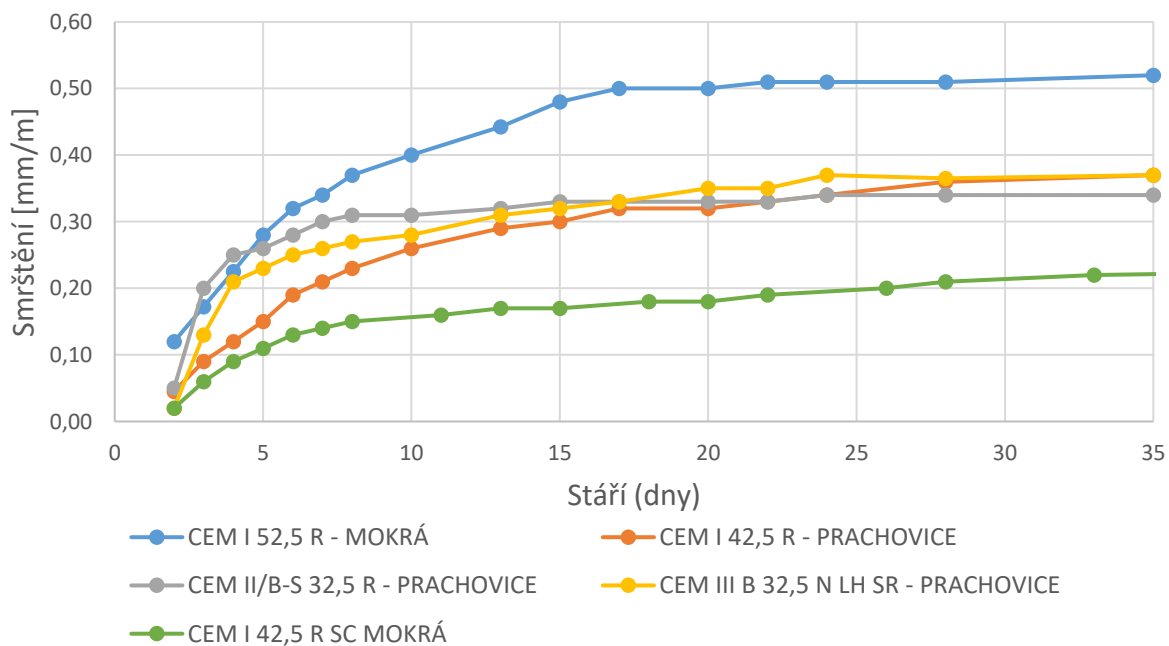


Obrázek 44: Vliv změny hmotnosti na velikost smrštění - CEM I 52,5 R



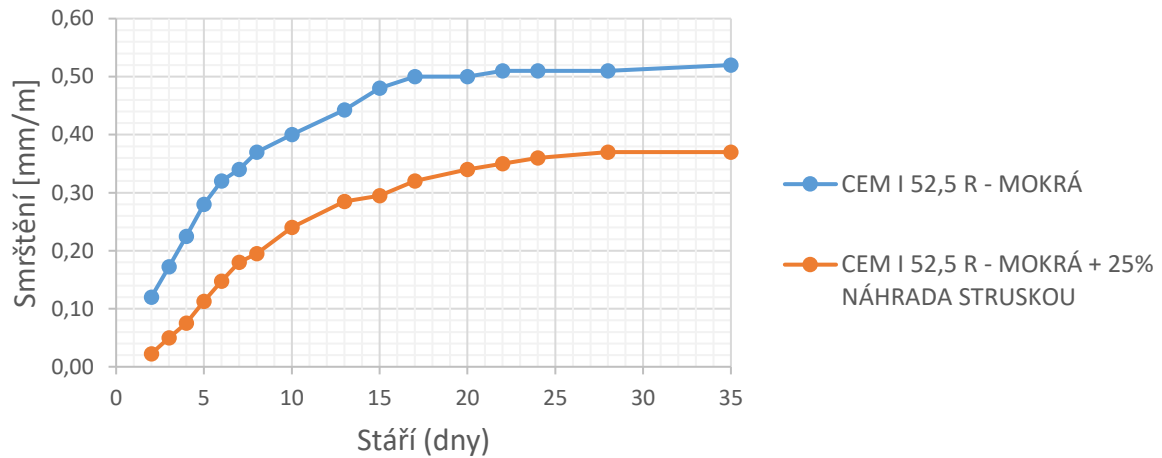
Obrázek 45: Vliv změny hmotnosti na velikost smrštění - CEM III

Na obrázku 46 je znázorněno nabývání zkoumaných cementů. Nejlepších vlastností zde dosáhl silniční cement CEM I 42,5 R SC, s dlouhodobými hodnotami nabývání 0,2%. Nejhůře se jevil cement CEM I 52,5 R s nabýváním 0,5%, tedy o 60% více než nejlepší cement. Zbylé 3 cementy jevíly obdobné vlastnosti pohybující se okolo 0,35%.

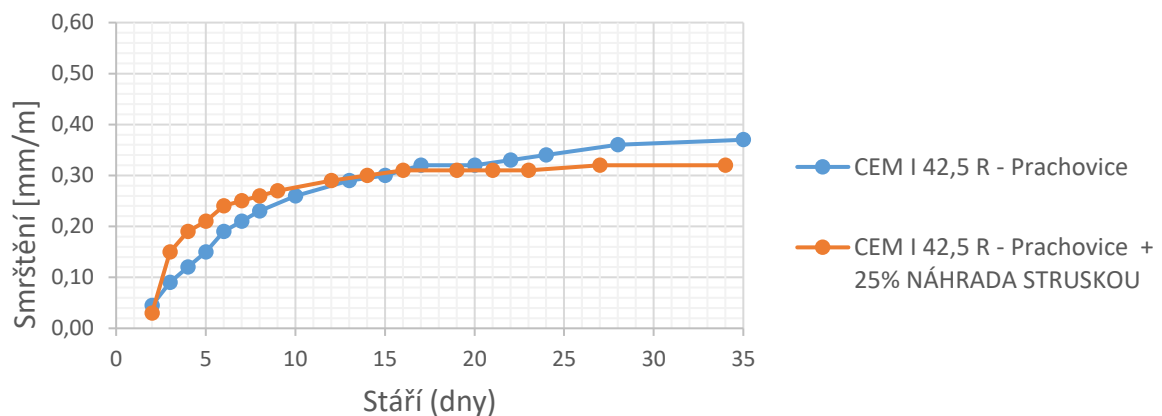


Obrázek 46: Nabývání cementů

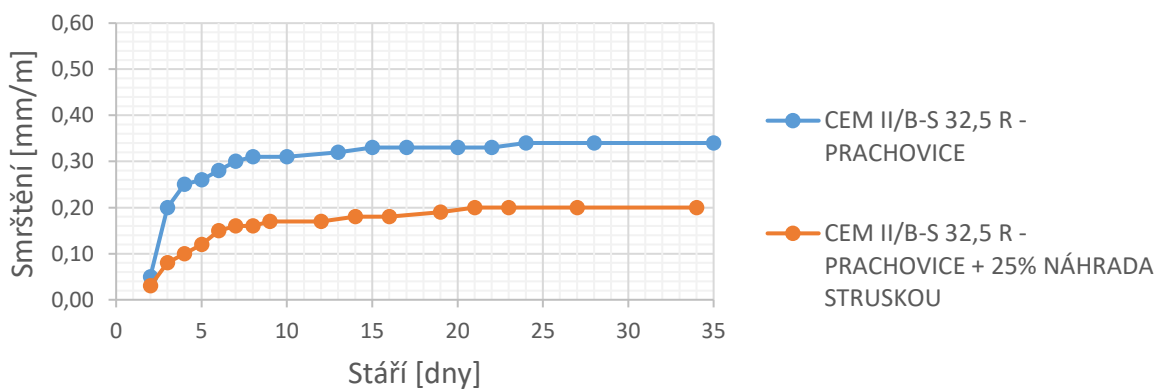
Po nahrazení cementu struskou obecně můžeme konstatovat, že nabývání se struskou je menší než u vzorků bez strusky. U nabývání bude nejdůležitější rozložení a zaplnění pórů ve struktuře. Struska vyplňuje póry, ve kterých se jinak akumuluje voda. Tím, že voda vniká do struktury pomaleji, je i nabývání menší (obrázek 47 až 50).



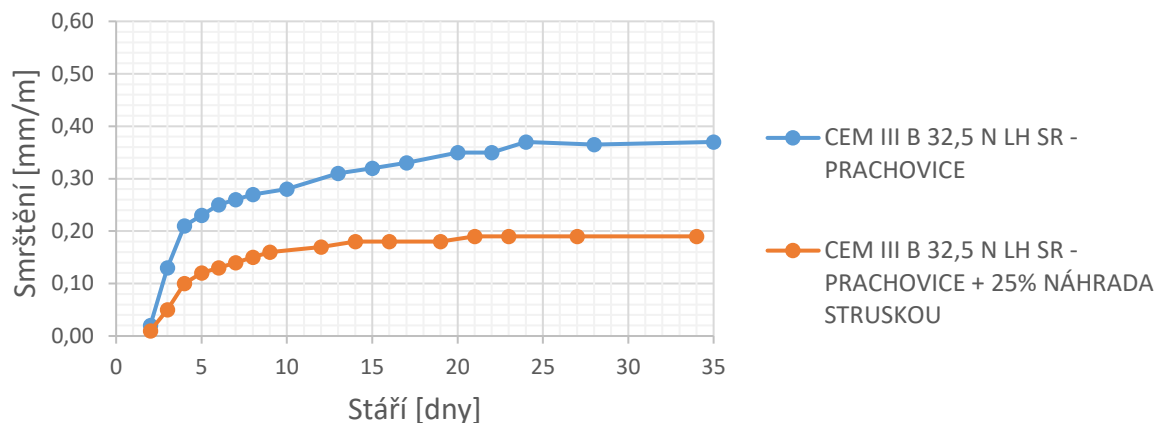
Obrázek 47: Nabývání - CEM I 52,5 R



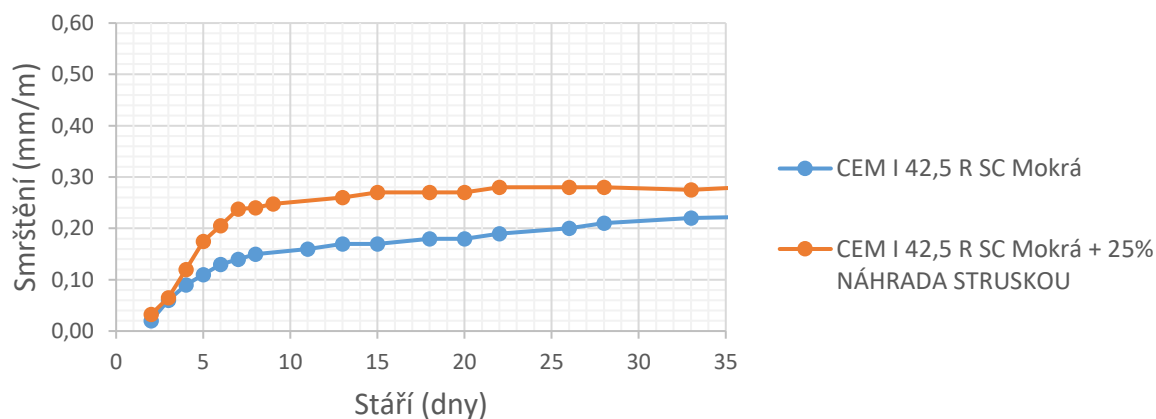
Obrázek 48: Nabývání CEM I 42,5 R



Obrázek 49: Nabývání CEM II



Obrázek 50: Nabývání CEM III



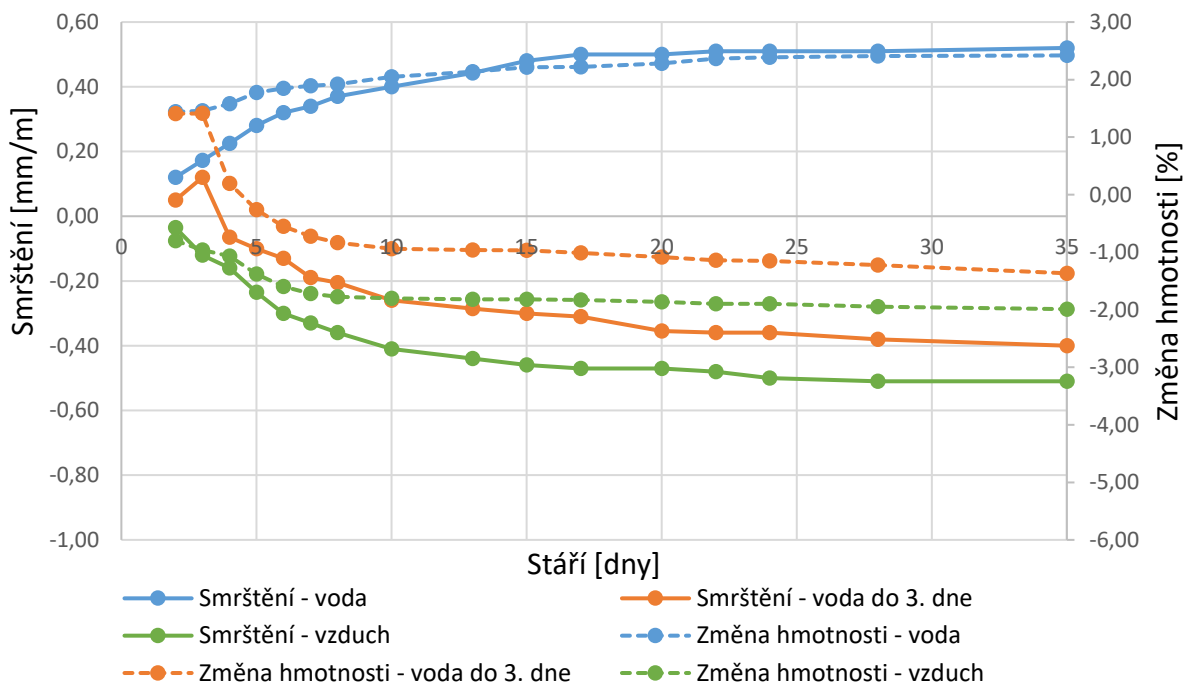
Obrázek 51: Nabývání CEM I 42,5 R SC

Opět anomálně se chová silniční cement (obrázek 51). Oproti ostatním cementům je zde poměrně malý nárůst nabývání v prvních dnech (u cementu bez strusky), po přidání strusky se hodnoty nabývání pohybují okolo 0,2 mm/m ve 28 dnech, což je srovnatelné s chováním ostatních cementů se struskou. Toto chování přisuzují neobvyklému rozdělení velikosti částic (viz kapitola Velikost částic str. 71-73). Vyšší podíl jemných částic tohoto cementu má pravděpodobně dostatečně dobré vlastnosti (pro oblast nabývání) a přidáním jemných částic strusky se tyto vlastnosti nezlepší, ale zhorší. Převládající vliv na zhoršení je pravděpodobně dán nižší pevností v prvních dnech.

## Průběh změny hmotnosti

Při hydrataci cementu se voda částečně chemicky navazuje na cement za tvorby hydrátů a částečně zůstává v pórech a kapilárách uvnitř struktury. Pokud je pak tento prvek vystaven okolnímu prostředí, které má jiné vlastnosti (zpravidla nižší relativní vlhkost), vlhkost ze vzorku přechází do okolí a způsobuje tak napětí uvnitř kapilár. Díky této změně tedy dochází ke smrštění.

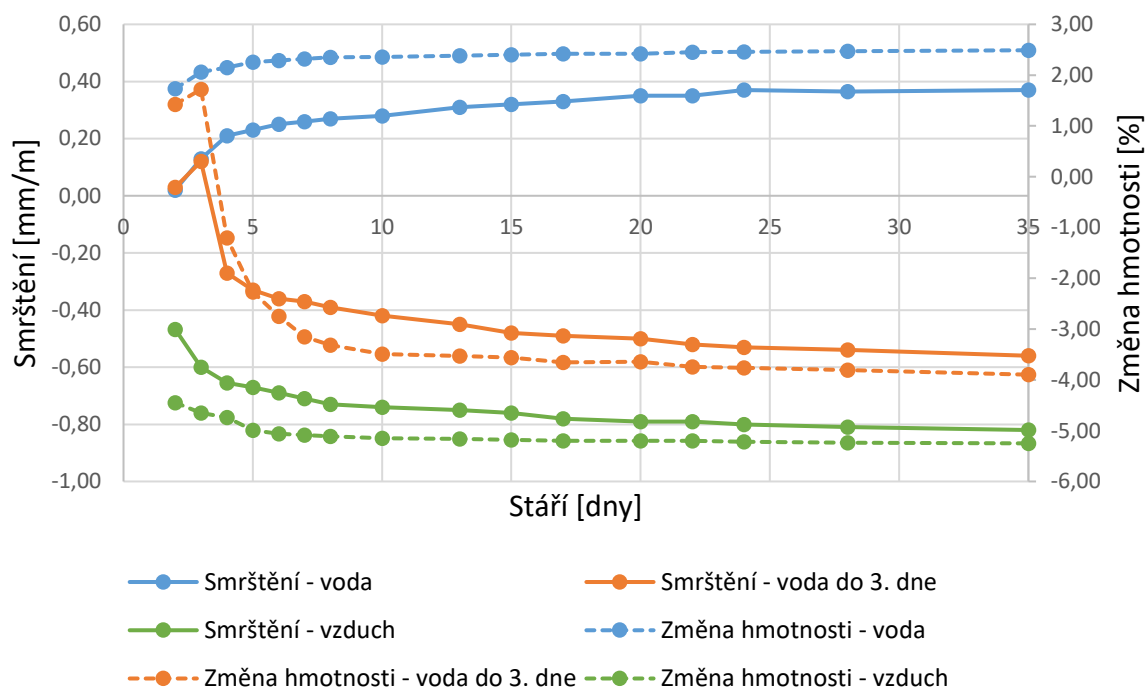
Obrázek 52 poukazuje na tuto závislost u vybraného cementu CEM I 52,5R bez strusky. Po 28 dnech se hodnoty nabývání pohybují okolo 2,5%, pro vysychání bez ošetřování je to okolo -2%.



Obrázek 52: Vliv změny hmotnosti na velikosti smrštění/nabývání CEM I 52,5 R

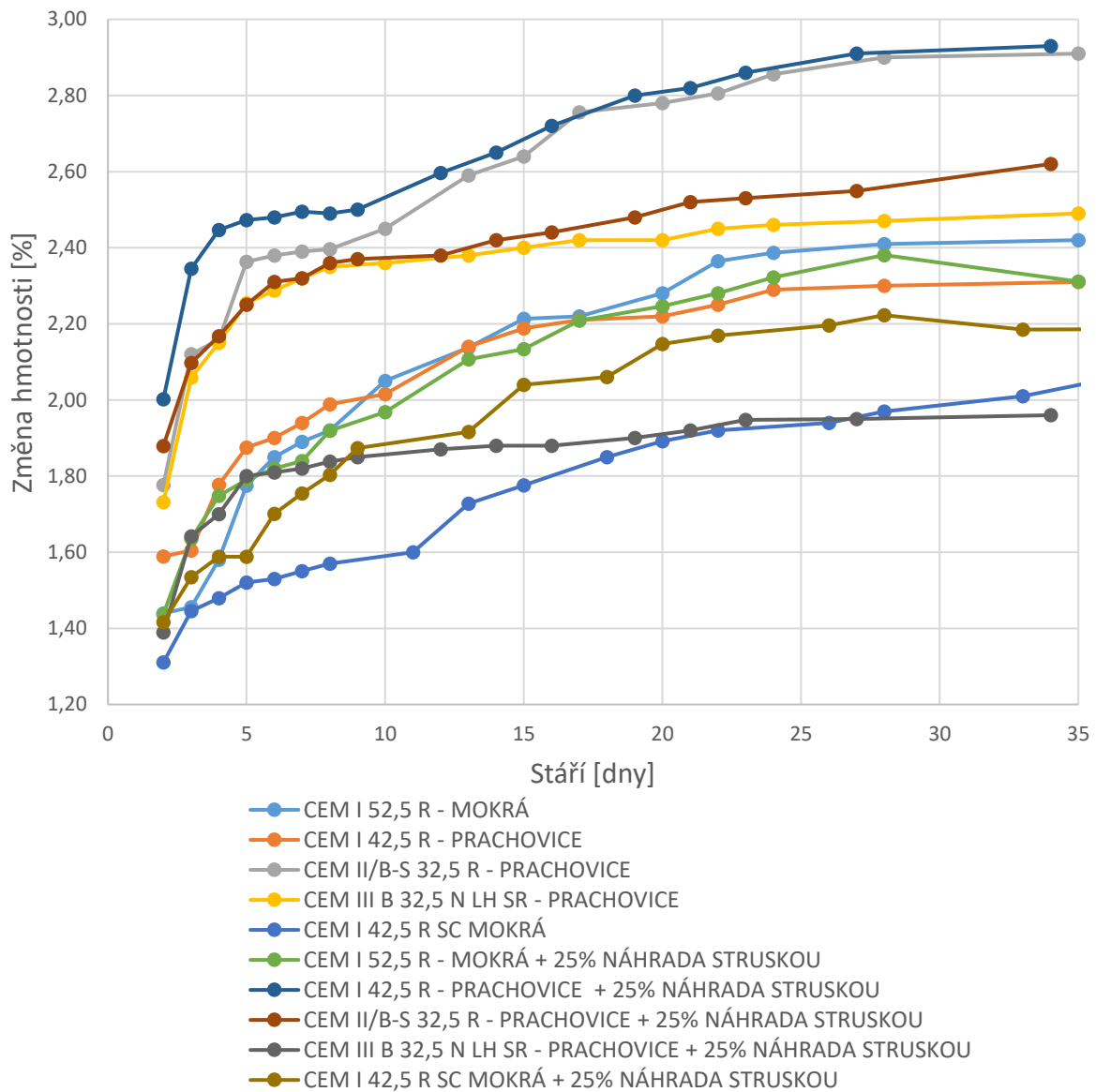
Pro porovnání je zde obrázek 53, který potvrzuje již zmíněné poznatky napsané v kapitole Smršťování na vzduchu. Cementy obsahující vysoký podíl strusky se při zpracování jeví více plasticky a disponují větším podílem volné vody. Tato volná voda způsobuje vysokou ztrátu vlhkosti (až 5% ve stavu bez ošetřování) a s tím spojené smrštění (-0,8 mm/m), naproti tomu cement CEM I 52,5 R ztratil 2% při smrštění 0,5mm/m.





**Obrázek 53: Vliv změny hmotnosti na velikosti smrštění/nabývání CEM III B 32,5 N**

Pro porovnání změny hmotnosti napříč všemi směsmi při ošetřování ve vodě je zde obrázek 54. Rychlost nasycení vodou je závislá na konkrétní pórové struktuře cementu. I když jsou všechny směsi míchány, ukládány i ošetřovány stejně, můžeme pozorovat různorodost již na první pohled (obrázek 55). To je způsobeno náhodným rozmístěním pórů. Zde pozorujeme pouze povrchové póry, ale nepravidelné rozložení můžeme očekávat i uvnitř průřezu. Proto i průběh a velikost změny hmotnosti bez dalšího měření (například rozložení pórů) nelze vyhodnotit. Výsledky poukazují na nejlepší chování u cementu CEM I 42,5 R SC a jeho verzi s náhradou strusky. Zde bylo dosaženo u dlouhodobých výsledků hodnot mezi 2 a 2,2 %. Největších hmotnostních změn dosáhl CEM I 42,5 R s náhradou strusky spolu s CEM II/ B-S 32,5 R, což jsou středně rychlé cementy s obdobným složením. Podobné chování projevovali cementy CEM III/B-S a CEM II/B-S s náhradou strusky, kde je opět obdobné zastoupení strusky. Zbylé cementy se chovali velmi podobně.

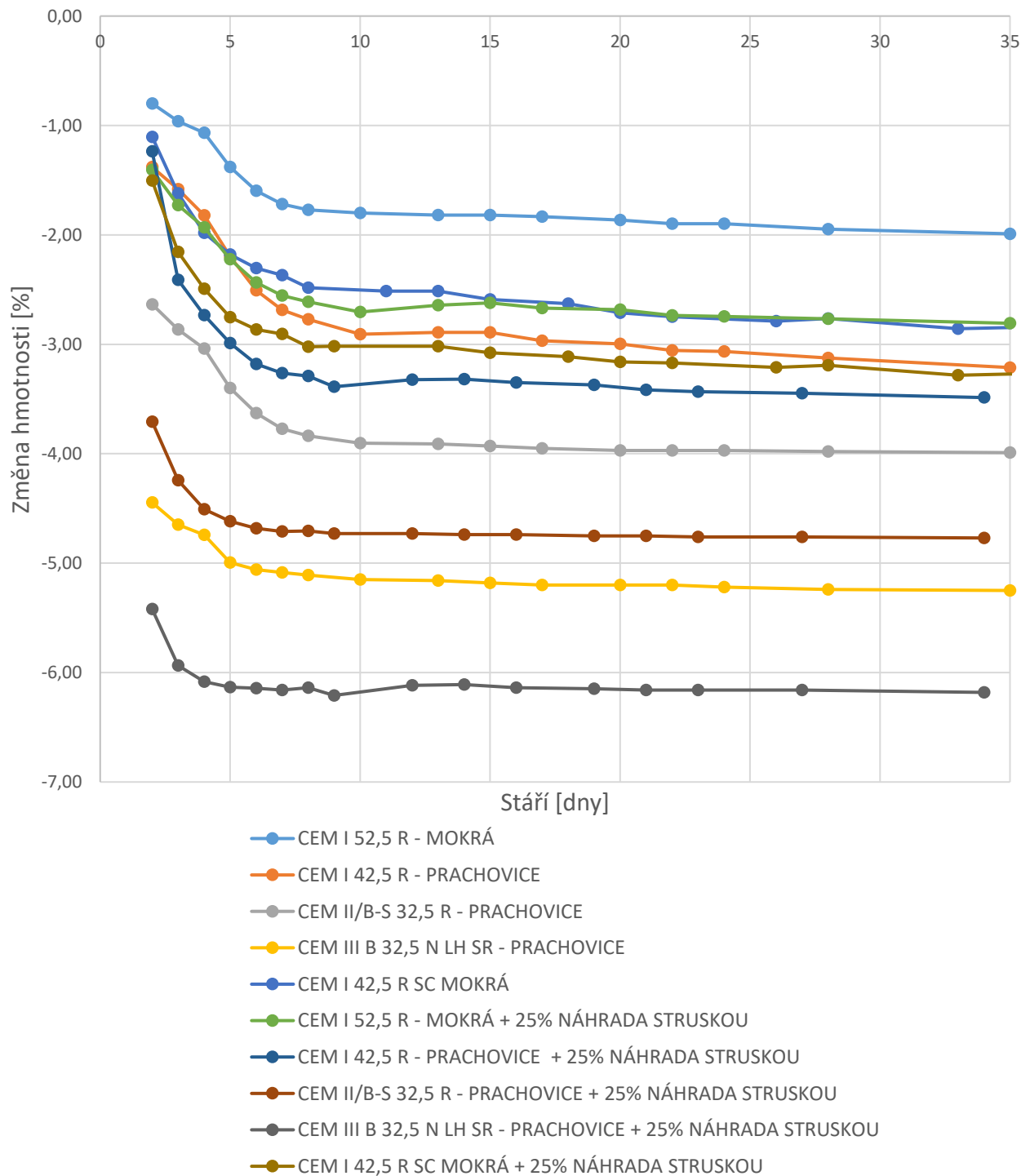


Obrázek 54: Změna hmotnosti u vzorků ve vodě



Obrázek 55: Povrchové póry na vzorcích se shodným ošetřováním

U případu vysychání je zcela zásadní typ cementu, tedy množství strusky a pevnostní třída. V druhé řadě opět velikost a rozložení pórů. Jak můžeme pozorovat na obrázku 56, nejmenšího vysychání dosáhl cement CEM I 52,5 R s nejrychlejším pevnostním náběhem a to s hodnotou 2%. Dále se řadily cementy podle své pevnosti, respektive jejich kombinace se struskou. Největší ztráty vlhkosti dosáhl cement CEM III respektive jeho alternativa s náhradou strusky, kde se dlouhodobá hodnota ustálila lehce přes 6%.

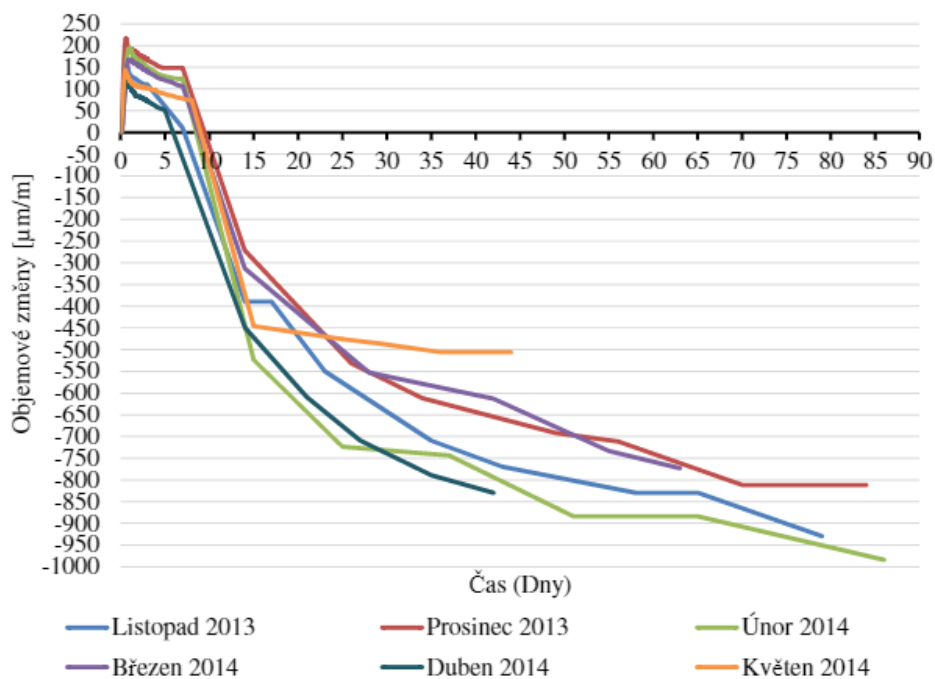


Obrázek 56: Ztráta vlhkosti

## Porovnání se zdroji

Zajímavostí na cementu je to, že jeho vlastnosti se mění s lokalitou výroby, respektive s původem vstupních materiálů. Jen v ČR se stejný cement, se stejným označením, od různých výrobců chová jinak. Obvykle se to projevuje rozdílnými nároky na množství záměsové vody při dodržení stejné zpracovatelnosti, účinností plastifikačních přísad, často i nutností použití jiného složení plastifikátorů. Samotná kvalita cementu jednotlivých výrobců se mění i v průběhu roku.

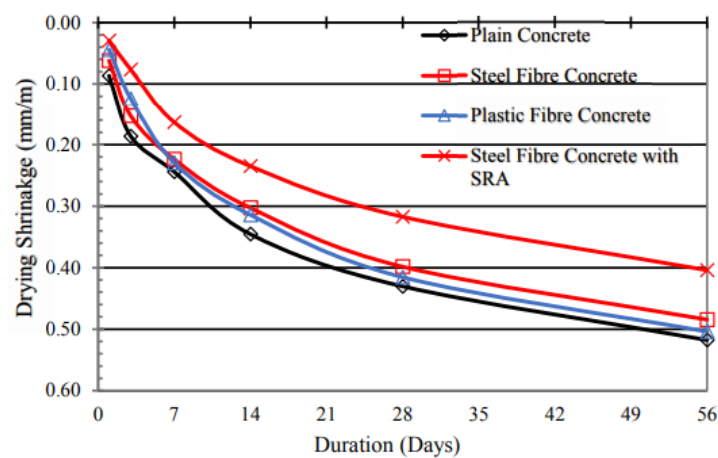
M. Kropáček [52] porovnával cement CEM I 42,5 R z českých cementáren ze závodu Čížkovice, Hranice, Mokrý, Prachovice a Radotín z hlediska vývoje pevností a smrštění. K měření objemových změn byl použit smršťovací žlab, který byl po dobu 7 dnů uložen v prostředí s vysokou relativní vlhkostí (95%), dále bylo měření prováděno příložným deformetrem, velikost vzorku činila 60 x 40 x 100 mm, vodní součinitel byl 0,5. Vzhledem k okrajovým podmínkám, zejména délkou a způsobem ošetřování, dále pak vlivem velikosti vzorku docházelo k ustálení smrštění až po delší době. Pro představu a pro porovnání s našimi výsledky (obrázek 57) ve stáří 35 dnů byl rozptýl naměřených hodnot, v závislosti na měsíci výroby cementu, pro Prachovický CEM I 42,5 R od -0,5 mm/m do -0,8 mm/m. V našem měření tento cement s 3denním ošetřováním vykazoval hodnotu smrštění lehce přes -0,4 mm/m. Tato nižší hodnota je dána pravděpodobně zanedbáním objemových změn v prvních 24 hodinách, nicméně rozdíly v metodách a délce ošetřování zde hrají také podstatnou roli. Řádově jsou si ale výsledky podobné.



Obrázek 57: Smrštění cementu CEM I 42,5 R – Prachovice, 2013-2014 [52]

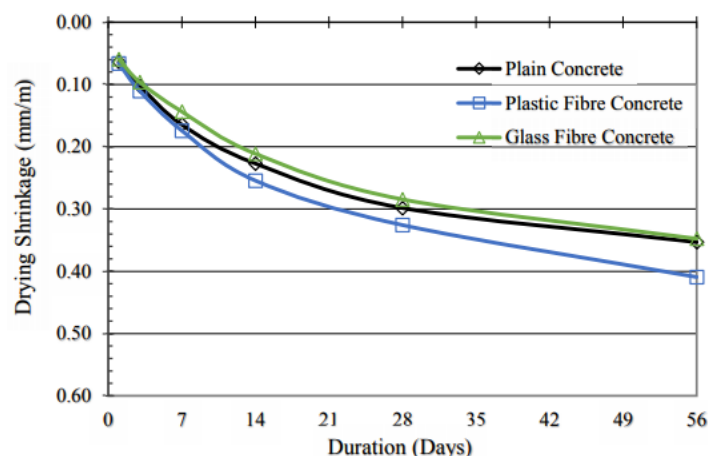
Pro představu zde máme také uvedeny výsledky měření smrštění pro výsledný beton od F. Ullah [53]. Na cementových pastách bylo sledováno chování pouze v prvotních hodinách a dlouhodobé vlastnosti na betonových vzorcích. Jednalo se jak o prostý beton, tak o beton vyztužený. Cementy zde pocházely z Finska a jednalo se o CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N, CEM I 42.5 N – síranovzdorný a CEM I 52.5 R - bílý cement. Směs byla namíchána s vodním součinitelem 0,5 a 0,55, maximální zrno kameniva bylo do 16 mm. Vzorky byly po vyjmutí z formy vystaveny laboratornímu prostředí o teplotě 20°C a relativní vlhkosti 65%. Měření smrštění bylo stanovováno obdobně jako v našem případě, tedy úchylkoměrem v kovovém stojanu po dosažení manipulačních vlastností.

Podle obrázku 58 smrštění prostého betonu s cementem CEM II/B-M (S-LL) ve stáří 35 dnů dosahovalo hodnoty lehce přes -0,4 mm/m, pro porovnání náš cement CEM II/B-S dosahoval hodnoty -0,6 mm/m.



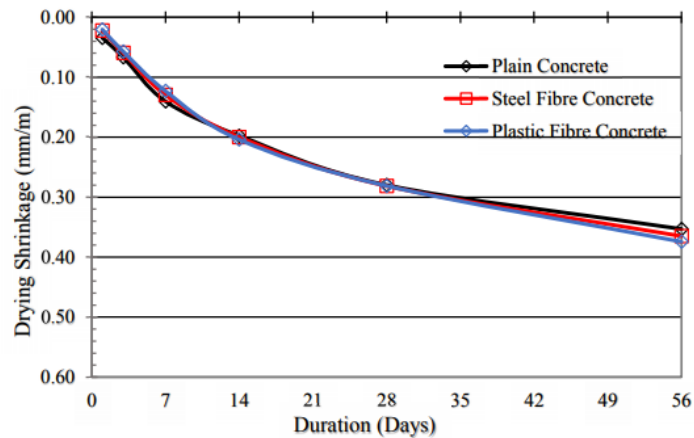
Obrázek 58: Smrštění betonu s cementem CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N v/c 0,5 [53]

Cement CEM I 52,5 R dopadl lépe (obrázek 59), tedy něco málo přes - 0,3 mm/m, cement měřený v této práci obdobného typu dosahoval hodnoty -0,5 mm/m.



Obrázek 59: Smrštění betonu s cementem CEM I 52.5 R v/c 0,55 [53]

A cement CEM I 42,5 N nabýval hodnoty opět okolo  $-0,3$  mm/m (obrázek 60), nejbližší tomuto porovnání je náš cement CEM I 42,5 R, který dosahoval  $-0,6$  mm/m.



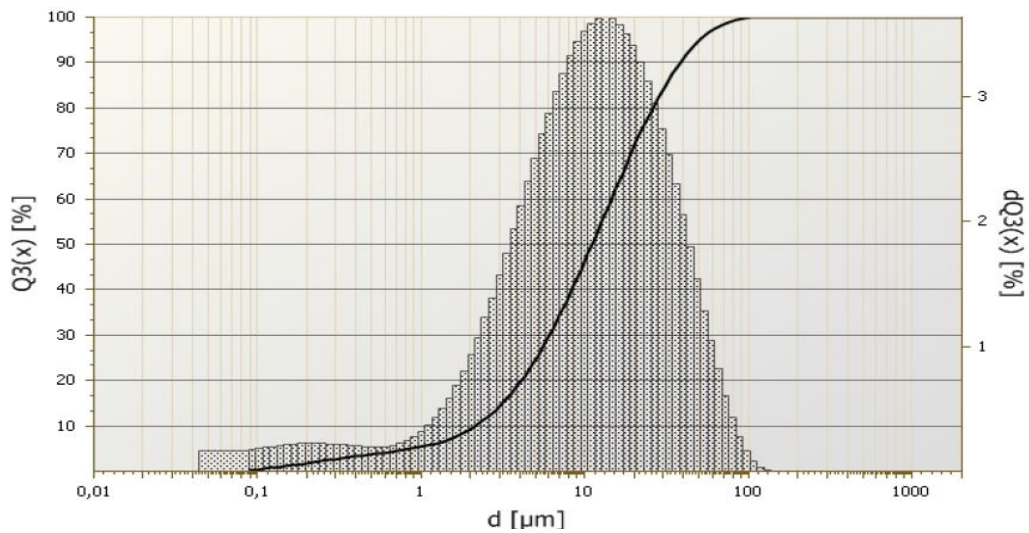
Obrázek 60: Smrštění betonu s cementem CEM I 42.5 N, v/c 0,5 [53]

Tato práce tedy potvrzuje obdobné chování jako námi zjištěné. Pomalejší cementy s vyšším podílem strusky nebo směsi s vyšším vodním součinitelem způsobují vyšší vysychání a vedou tak k většímu smrštění. I v této práci ale byly zanedbány počáteční objemové změny, které mají vliv především na velikost smrštění u rychlovazných cementů.

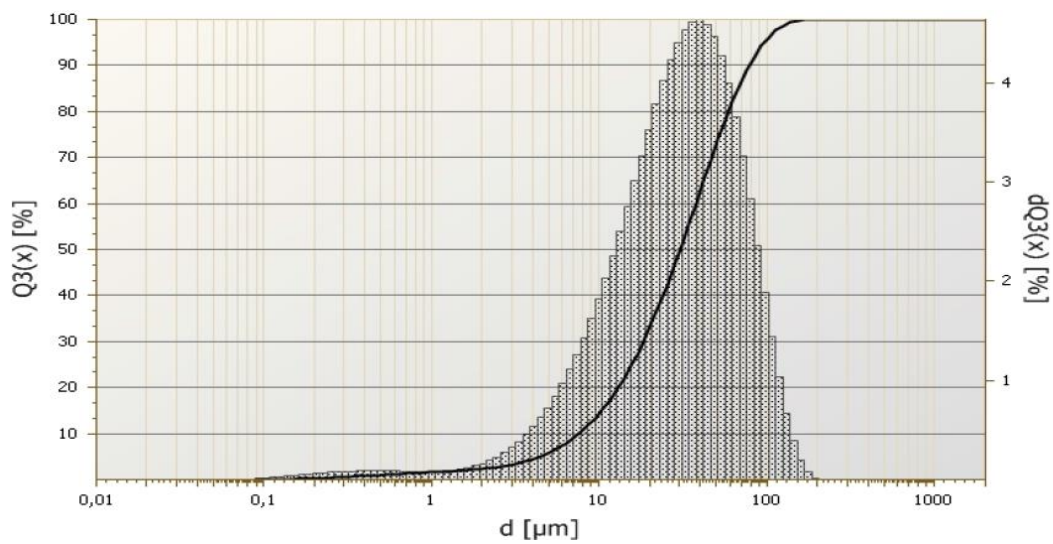
## Velikost částic

Velikost částic byla naměřena pomocí přístroje Analysette 22 Mirco Tec plus, který pracuje na principu laserové difrakce. Rozsah měření tohoto přístroje je od 0,08 do 2 000  $\mu\text{m}$ , což je pro naše účely dostačující. Obrázky 61 až 66 znázorňují procentuální zastoupení dané velikosti částice. K popisu obrázku je vždy doplněn měrný povrch udávaný výrobcem.

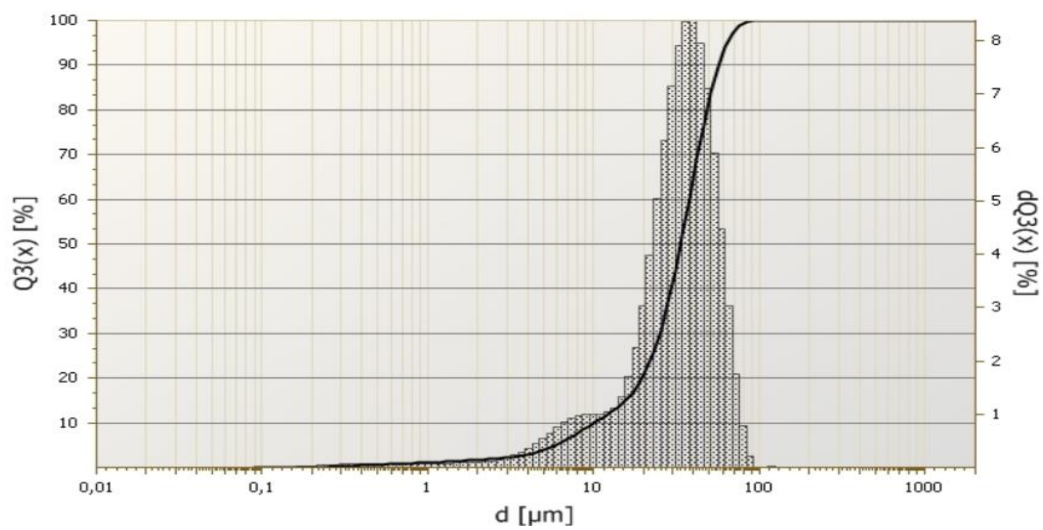
Z obrázku 61 je patrné, že ze všech cementů má tento největší zastoupení částic o velikosti 0,1 až 1  $\mu\text{m}$ , celkem tvoří přibližně 5% z celkového objemu, což má za následek rychlejší prvotní nárůst pevnosti a tím spojený vyšší vývin hydratačního tepla. Měrný povrch je nejvyšší, a to 515  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Podobné viditelné zvýšení množství částic o velikosti 3 až 10  $\mu\text{m}$  má podle obrázku 63 cement určený pro silniční použití. Velikost částic je sice vyšší, nežli u CEM I 52,5 R, ale je ve vyšším zastoupení, neboť tvoří přibližně 10% z celkového objemu. Tato nemalá část má podobný efekt rychlého nárůstu pevnosti jako u předchozího případu cementu, přestože měrný povrch výrobce uvádí 311  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Takto nízká hodnota je dána vysokým zastoupení ostatních částic, a to až 8 % na jeden interval měření. Rozdělení se blíží spíše vlastnostem elektrárenského popílku (obrázek 66).



Obrázek 61: CEM I 52,5 R - rozbor velikosti částic (Blaine 515 m<sup>2</sup>/kg)

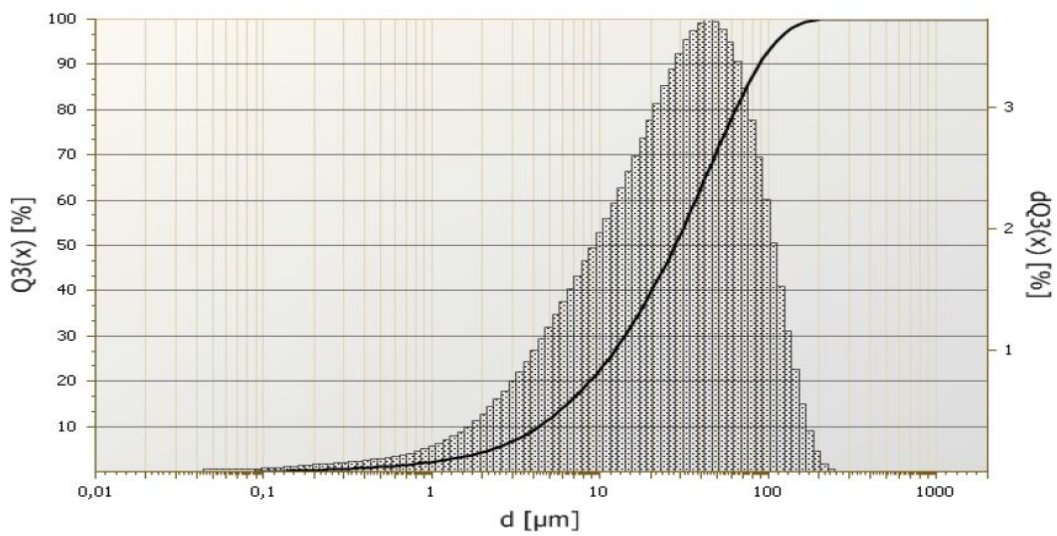


Obrázek 62: CEM 42,5 R - rozbor velikosti částic (Blaine 344 m<sup>2</sup>/kg)

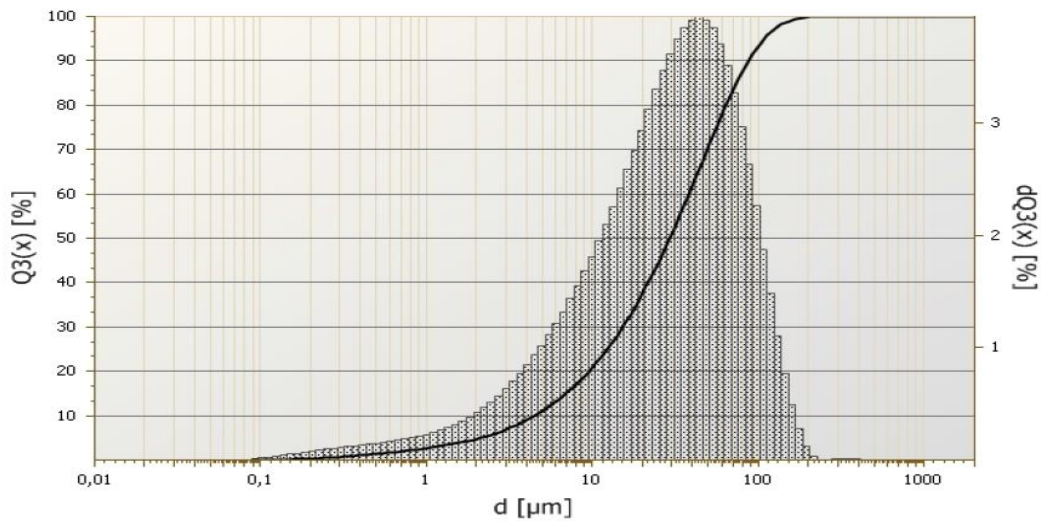


Obrázek 63: CEM I 42,5 R SC – rozbor velikosti částic (Blaine 311 m<sup>2</sup>/kg)

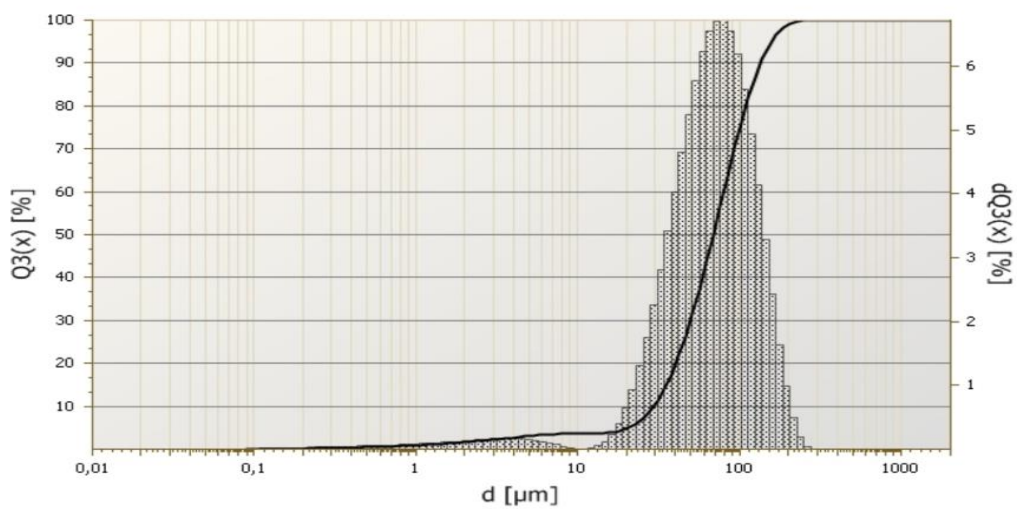




Obrázek 64: CEM II/B-S 32,2 R – rozbor velikosti částic (Blaine 354 m<sup>2</sup>/kg)



Obrázek 65: CEM III 32,5 N SR - rozbor velikosti částic (Blaine 375 m<sup>2</sup>/kg)



Obrázek 66: Popílek - rozbor velikosti částic

## Příklad z praxe

Výhody laboratorních podmínek pro měření takového typu jsou podstatné. Neměnná teplota a poměrně konstantní vlhkost prostředí neovlivňuje vzorky a nezkrsluje tak naměřené výsledky. Naproti tomu reálné prostředí a vlivy působící na materiál během výroby, ukládky a tuhnutí mohou způsobovat určité rozdíly a při stejném měření by bylo pravděpodobně dosaženo jiných výsledků.

Díky spolupráci s firmou Skanska Transbeton s.r.o. bylo možno částečně pozorovat chování dvou různých typů cementů v reálné praxi. Bohužel díky cenovému vývoji cementů byl použit jiný „rychlý“ cement, místo našeho zkoumaného, nicméně určité informace byly i tak získány. Nejedná se o stavby, které by se na tomto projektu nějak podílely, a tak nebylo na konstrukcích smršťování více určováno. Jde čistě o příklad toho, jak se cementy reálně chovají. Díky tomu konstrukcím nebyla věnována žádná zvýšená pozornost či péče, je to tedy reálný stav, se kterým se běžně setkáváme.

Předmětem tohoto pozorování jsou monolitické obvodové stěny o šířce 200 mm, pevnostní třídy C 25/30. Betonáže probíhaly pomocí bádii a po 3 dnech docházelo k jejich odbednění. Realizace byla v zimním období, tedy listopad až prosinec 2018, kdy se venkovní teploty pohybovaly do 5 °C (informace z dodacích listů). V tabulce 10 je stručný přehled složení směsí a venkovní podmínky při jednotlivých betonážích.

Označení	Typ cementu	Plnivo	Dmax	v/c	Teplota
<b>A</b>	CEM III 32,5 N SR-LH	Popílek	22 mm	0,48	0°C
<b>B</b>	CEM II/A-LL 42,5 R	Popílek	16 mm	0,49	0°C
<b>C</b>	CEM II/A-LL 42,5 R	Popílek	16 mm	0,49	5°C

**Tabulka 10: Složení receptur a venkovní teplota při betonážích**

V případě stěny A (obrázek 67) se po odbednění objevovaly u horního líce trhliny. Po ukládce čerstvého betonu do bednění je v kontaktu s okolním prostředím pouze horní část, která není nijak ošetřena. Vlhkost z betonu se tak akumuluje v horní části, kde dochází k odpařování a tím pádem i ke smršťování.



**Obrázek 67: Stěna A**

Kvůli nízkým teplotám a omezení vzniku trhlin byl struskový cement vyměněn za cement s rychlejšími náběhy počátečních pevností, který ve svém složení strusku neobsahuje. Výsledek je patrný z obrázku 68, byť u horního okraje je stále viditelná vlhčí oblast (tmavší zbarvení), trhliny se zde neobjevily.



**Obrázek 68: Stěna B**

Způsob provádění je zcela zásadní na výsledný stav betonu. Obrázek 69 názorně zobrazuje vliv ukládky a kvality nánosů bednicích prostředků. Byť složením stejný beton jako stěna B, výsledek je ale zcela rozdílný. Nedokonalé zhutnění a pravděpodobně příliš vysoká vrstva odbedňovacího prostředku způsobili značnou pórovitost povrchu, což opět urychluje vysychání a další smrštění tudíž může nastat až s dalším vysycháním.



**Obrázek 69: Stěna C**

Vzhledem k typu konstrukce a zimnímu období lze předpokládat, že vývin hydratačního tepla na tvorbu trhlin bude nevýznamný. Při takto nízkých teplotách hydratační teplo slouží k „nastartování“ vlastní hydratace, neboť pokud klesne teplota pod 5 °C, hydratace se zastaví.

## Závěr

Pokud chceme zvyšovat trvanlivost a tím i kvalitu betonu, omezování trhlin je zcela zásadní a na tento problém by se při návrhu konstrukce nemělo zapomínat. Na velikost smrštění betonu má vliv nespočet faktorů. Často je velmi složité, někdy neproveditelné, všechny faktory oddělit a jednotlivě zkoumat, neboť mechanismy probíhají synergicky. Experimenty obvykle přinášejí různé výsledky, neboť se srovnávají data zjištěná rozdílnými metodami. Normy sice poskytují návrhy a výpočetní postupy, jejich účinnost je ovšem rozporuplná a většinou se od reality vzdaluje. Proto je predikce tvorby trhlin zatím neproveditelná.

Pro měření volného smrštění byly zhotoveny trámečky o velikosti 20 x 20 x 100 mm. Zvolené cementy CEM I 52,5 R, CEM I 42,5 R, CEM II/B-S 32,5 R a CEM III/B-S 32,5 N a jejich náhrady se struskou byly pravidelně měřeny pomocí mechanického stojánu s digitálním úchylkoměrem spolu se sledováním hmotnostních změn. Naměřené hodnoty smrštění jsou ovlivněny především vysycháním, neboť velikost sledovaných vzorků neumožňuje projevy vývinů hydratačního tepla. Je tedy třeba říct, že hodnoty jsou spíše pro porovnání daných cementů nežli k vyhodnocení chování cementu z hlediska celé problematiky smršťování. Masivní prvky s výrazným vývinem hydratačního tepla budou mít rozdílné chování a smrštění bude dosahovat jiných hodnot.

Nejlepších výsledků dosáhl cement CEM I 52,5 R. Jeho počáteční nárůst pevnosti a pomalé ztráty vlhkosti zaručil nejmenší přetvoření a výsledné hodnoty po 28 dnech jsou 0,5 mm/m bez ošetřování a 0,4 mm/m po 3denním ošetření. Naproti tomu nejvyšší smrštění bylo naměřeno u cementu CEM III/B-S 32,5 N LH SR, který se vyznačuje pomalým nárůstem pevností a výraznou ztrátou hmotnosti vlivem odpaření vody. Smrštění bez ošetření bylo 0,8 mm/m a v případě s ošetřením 0,55 mm/m. Zajímavostí je silniční cement, který se choval pevnostně obdobně jako CEM I 52,5 R, ale při smršťování vykazoval spíše horší vlastnosti. Náhrada struskou potvrzuje zpomalení počátečních pevností u portlandských cementů bez příměsí a následnou hydrataci spojenou se zvýšením pevností ve vyšším stáří vzorků. Vliv strusky na smrštění je zřejmý. Směsné cementy s vyšším podílem strusky vykazují výraznou ztrátu vlhkosti v průběhu času oproti portlandským cementům. Při nahrazování cementů struskou se tato ztráta umocňuje, což způsobuje větší smrštění.

Vzhledem k použité metodě nebylo možno stanovit chování směsí v prvních 24 hodinách. Toto zanedbání by mělo za následek větší absolutní hodnoty smrštění, a to zejména u rychlovazných cementů, kde je počáteční hydratace intenzivnější.

Z hlediska vysychání je tedy nejefektivnější použití portlandských cementů bez náhrady strusky, neboť rychlá hydratace způsobuje pevnější strukturu v počátečních dnech, vyšší spotřebu volné vody na hydrataci, nízké vysychání a s tím spojené menší celkové smrštění. Pokud je ovšem omezeno vysychání nebo zabezpečeno ošetřování, riziko smrštění směsných cementů je výrazně potlačeno.

Vliv použitého cementu na výsledné vlastnosti betonu a vliv vývinu hydratačního tepla je předmětem dalšího výzkumu.

## Seznam použité literatury

- [1] HODULÁKOVÁ, Michaela. Modul pružnosti přírodního kamene. Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT, Fakulta stavební. Vedoucí práce Dalibor Kocáb.
- [2] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [3] HOWES, Ryan, Muhammad N.S. HADI a Warren SOUTH. Construction and Building Materials: Concrete strength reduction due to over compaction. 2018, 1987, 725-733. DOI: 0950-0618.
- [4] GAVELA, S. a N. NIKOLOUTSOPOULOS. Multifactorial experimental analysis of concrete compressive. 1st International Conference of the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials. Greece, 2018.
- [5] WU, Linmei a Nima FARZADNIA. Construction and Building Materials: Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. College of Civil Engineering, Hunan University, China, 2017, 1987, 62-75. DOI: 0950-0618.
- [6] Thinkstock [online]. Washington: Getty Images Legal Department 605 5th Ave South, Suite 400, 2018 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.thinkstockphotos.com/image/stock-photo-pantheon-in-the-morning-rome-italy/453127565/popup?sq=pantheon/f=CPIHVX/s=DynamicRank>.
- [7] Chaocan Zheng, Cong Lou, Geng Du. Results in Physics: Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. College of Civil Engineering and Architecture, PR China, 2018;(9): 1317-1322.
- [8] Dhir RK, Limbachiya M, Leelawat CT. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. Proc Inst Civ Eng Struct Build 1999;134(3):257–74.
- [9] Etxeberria M, Mari AR, Vazquez E. Recycled aggregate concrete as structural material. Mater Struct 2007;40(5):529–41.
- [10] Shehata M. H.; Christidis Ch.; Waleed M.; Rogers Ch.; Lachemi M.: Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali–silica reaction, Cement and Concrete Research Vol. 40 (2010), pp. 575–582.
- [11] Petr Hájek, Ctislav Fiala. Hodnocení životního cyklu betonových konstrukcí. Beton TKS. Praha 4, 2015, 15(5/2015), 3-7. ISSN 1213-3116.
- [12] Joachim Juhart a kolektiv. Comparison of standard concrete and eco-concrete in respect to functional, environmental and durability performance. Graz University of Technology, Graz, Austria, 2018.

- [13] Nasiru Zakari Muhammad, Ali Keyvanfar, Muhd Zaimi Abd. Majid. Construction and Building Materials: Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. Malaysia, 2015, Vol.101; 80-90.
- [14] PÁNEK, Roman. Kopule plzeňského planetária vytvořily samozhutnitelné betony od skupiny Českomoravský beton. Tzb-info [online]. Praha, 2010, 6/2013 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10081-kopule-plzenskeho-planetaria-vytvorily-samozhutnitelne-betony-od-skupiny-ceskomoravsky-beton>.
- [15] RICHTER, Jan, Kamil STANĚK a Jan RŮŽIČKA. Sorpční vlastnosti dusaných hliněných směsí. Stavební obzor [online]. 2014, 5(6/2014), 105-109 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: [http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so\\_5-6/so\\_56\\_14\\_richter.pdf](http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so_5-6/so_56_14_richter.pdf).
- [16] XI, Y., Bažant, Z.P., Molina, L., Jennings, H.M. Moisture Diffusion in Cementitious Materials. Advanced Cement Based Materials, 1994.
- [17] Marek Vinkler, Jan L. Vítek. Vysychání a smršťování betonu. Beton TKS. Praha 4, 2016, 16 (2/2016), 40-45. ISSN 1213-3116.
- [18] Mihashi H. and Wittmann F. H., Eds., "Control of Cracking in Early Age Concrete", Balkema, Rotterdam 200.
- [19] KROPÁČEK, Michal a Jiří ŠAFRATA. Měření délkových změn cementů v závislosti na čase. Beton TKS. Praha 4, 2016, 16(2/2016), 46-49. ISSN 1213-3116.
- [20] Linmei Wu, Nima Farzadnia, Caijun Shi. Construction and building materials: Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review, Australia, 2017;61-75.
- [21] CONTECVET: Manual for assessing concrete structures affected by frost. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2001.
- [22] Valenza II J. J., Sherer G.W.: A review of salt scaling: Part I. Phenomenology; Part II: Mechanisms, Cement and Concrete Research, 2007.
- [23] T. Gutberlet, H. Hilbig, R.E. Beddoe. Cement and Concrete Research: Acid attack on hydrated cement — Effect of mineral acids on the degradation process, Centre for Building Materials (cbm), Technische Universität München, Baumbachstraße 7, 81245 Munich, Germany. 2015, 74;35-45.
- [24] Zdeněk Pertold, Šárka Šachlová, Aneta Šťastná, Vlastimil Bílek ml., Kateřina Krutilová. Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. Beton TKS. Praha 4, 2014, 14(2/2014), 34-41. ISSN 1213-3116.
- [25] Grafy automatických stanic. Český hydrometeorologický ústav [online]. 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/grafy-automatickych-panic>.
- [26] ČSN EN 1990 ed. 2, Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, ČIN 2015

- [27] Nele De Belie, Maria Araujo, Tim Van Mullem. Demonstration projects with self-healing capsulebased and bacteria-based concrete. Ghent University, Ghent, Belgium. SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Portugal. 2018.
- [28] ČSN EN 1992 – 1- 1, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI 2006.
- [29] ČSN EN 1992-3, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 3: Nádrže na kapaliny a zásobníky, ČNI 2007.
- [30] P.Kasal, R.Hela,P.Finkous Technická pravidla ČBS 03 (2018) Pohledový beton, Česká betonářská společnost ČSSI, 2018.
- [31] Jiří Dohnálek. Diagnostika trhlin v betonových a železobetonových konstrukcích. Beton TSK. Praha 4, 2014, 3(3/2014), 38-43. ISSN 1213-3116.
- [32] MÁRTOVÁ, Veronika, Pavel VESELÝ a Jitka VAŠKOVÁ. Experimentální metody pro měření smršťování betonu. Beton TKS. Praha 4, 2016, 16(2/2016), 50-57. ISSN 1213-3116.
- [33] ČSN EN 12808-4 Lepidla a spárovací malty pro keramické obkladové prvky – část 4: Stanovení smrštění, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [34] Přístroj na měření smrštění cemento - maltových trámečků. Brio Hranice [online]. BRIO Hranice, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://briohranice.cz/pristroj-mereni-smrsteni-cementomaltovych-tramecku>.
- [35] Curvometer / Deformeter. Solexperts [online]. Mönchaltorf · Switzerland, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.solexperts.com/en/geotechnics/products/point-displacements/curvometer-deformeter>.
- [36] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Hana ŠIMONOVÁ, Romana HALAMOVIČOVÁ a Dalibor KOCÁB. Experimentální stanovení dlouhodobého vývoje materiálových vlastností polymer-cementových malt. 15. KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY. SKALSKÝ DVŮR, 2018, 66-71. ISBN: 978-80-86604-78-7.
- [37] Rosella Alessia Galantucci, Fabio Fatiguso. Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis. Department of Civil, Environmental, Land, Building, and Chemical Engineering (DICATECH), Politecnico di Bari, Bari, Italy. 2018.
- [38] Vibrating Wire Strain Gauges. Sisgeo [online]. Masate (MI) - Italy: Sisgeo S.r.l., 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.sisgeo.com/products/strain-gauges-and-thermometers/item/vibrating-wire-strain-gauges.html>.
- [39] Tenzometry a příslušenství. Omega [online]. 1995-2018: OMEGA Engineering, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/subsection/tenzometry-a-prislusenstvi-all.html>.

- [40] ASTM Standard C1581. Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. ASTM International, 2004.
- [41] Lukáš Zvolánek, Ivailo Terzijski, Jaroslav Kadlec. Vliv dotvarování mladého betonu na velikost vynucených napětí. Beton TSK. Praha 4, 2016, 16(3/2016), 62-67. ISSN 1213-3116.
- [42] Měřicí žlab pro stanovení objemových změn. CONTROLS S.r.l. [online]. Brno: LABTECH s.r.o, 2011 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/merici-zlab-pro-stanoveni-objemovych-zmen.html>
- [43] CEM I 52,5 R. HEIDELBERG CEMENT CZECH REPUBLIC [online]. Českomoravský cement [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi525r>.
- [44] Portlandský cement CEM I 42,5 R - Prachovice. CEMEX CZ [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/portlandsky-cement-cem-i-42-5-r>.
- [45] CEM I 42,5 R (SC). HEIDELBERG CEMENT CZECH REPUBLIC [online]. Českomoravský cement [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425rsc>.
- [46] Portlandský struskový cement CEM II/B-S 32,5 R. CEMEX CZ [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/portlandsky-struskovy-cement-cem-ii/b-s-32-5-r>.
- [47] Vysokopecní cement síranovzdorný CEM III/B 32,5 N-LH/SR. CEMEX CZ [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/vysokopecni-cement-siranovzdorny-cem-iii/b-32-5-n-lh/sr>.
- [48] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. ANORGANICKÁ POJIVA. Nerostné suroviny a jejich využití [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1378-3.[cit. 2018-12-14]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html).
- [49] ČSN EN 15167 – 1: Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [50] Chunhe Jiang, Kejiang Li, Jianliang Zhang. Journal of Non-Crystalline Solids: Effect of MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on the structure and properties of blast furnace slags: A molecular dynamics simulation. A School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, PR China.2018.
- [51] ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu Část 1: Stanovení pevnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.



[52] KROPÁČEK, M. Stanovení objemových změn cementů z různých lokalit v závislosti na čase: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb, 2014, 232 s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Šafrata.

[53] Farid Ullah. Early Age Autogenous Shrinkage and Long-term Drying Shrinkage of Fibre Reinforced Concrete: master thesis. Aalto University, Finland. Structural Engineering / Construction Management. 2017. Thesis advisor Professor of Practice: Jouni Punkki.

[54] MIHASHI, Hirozo a Joao Paulo DE B.LEITE. Přehled stavu poznání o tvorbě trhlin v betonu v raných stádiích a možnostech jejího ovlivnění. Beton TSK. Praha 4, 2005, 5(2/2016), 34-38. ISSN 1213-3116.

[55] MIHASHI, Hirozo a Joao Paulo DE B. LEITE. Přehled stavu poznání o tvorbě trhlin v betonu v raných stádiích a možnostech jejího ovlivnění: Dokončení článku z 2. čísla časopisu. Beton TSK. Praha 4, 2005, 5(3/2005), 42-47.

[56] Mihashi H. and Wittmann F. H., Eds., "Control of Cracking in Early Age Concrete", Balkema, Rotterdam 2002.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Vývoj hydratačního tepla cementů, orientační hodnoty [kJ/kg], [2] .....	26
Tabulka 2: Součinitel teplotní roztažnosti, VN = vodou nasycený, S = suchý, betony stáří 1 rok [· 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ] [2] .....	27
Tabulka 3: Omezení šířky trhlin dle ČSN EN - Tabulka 7.1 [28], jednotky [mm] .....	31
Tabulka 4: Nejrozšířenější metody měření [32] .....	33
Tabulka 5: Podíl hlavních složek [43] [44] [45] [46] [47] .....	40
Tabulka 6: Chemické složení pojiv [43] [44] [45] [46] [47] .....	41
Tabulka 7: Vlastnosti slínkových minerálů [2] .....	42
Tabulka 8: Hlavní slínkové minerály a jejich procentuální zastoupení ve slínku [2] .....	42
Tabulka 9: Označení vzorků a jejich původ, *síranovzdorný cement = zvýšená odolnost proti působení síranů, minimální podíl C <sub>3</sub> A (do 3,5%) .....	44
Tabulka 10: Složení receptur a venkovní teplota při betonáži .....	74

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Pantheon v Římě [6] .....	17
Obrázek 2: Kupole planetária Techmania Science Center v Plzni [14] .....	19
Obrázek 3: Sorpční izoterma materiálů - absorbce [15] .....	21
Obrázek 4: Názorný příklad množství odpařené vody [2] .....	22
Obrázek 5: Chemické smrštění betonu [19] .....	23
Obrázek 6: Poškození cementové pasty kyselinou chlorovodíkovou po 28 dnech [23] .....	25
Obrázek 7: Poškození cementové pasty kyselinou sírovou po 28 dnech [23] .....	25
Obrázek 8: Teplotní průběh 24.-25.2 2018, Praha-Kbely [25] .....	26
Obrázek 9: Přístroj na měření volného smrštění, svislý stojánek [34] .....	34
Obrázek 10: Přístroj na měření volného smrštění, vodorovný stojan [34] .....	34
Obrázek 11: Příložný deformetr [35] .....	34
Obrázek 12: Princip digitální fotogrammetrie [32] .....	35
Obrázek 13: Schéma smršťovacího kužele [32] .....	35
Obrázek 15: Strunový tenzometr [38] .....	36
Obrázek 16: Provedení odporových tenzometrů [39] .....	37
Obrázek 17: Smršťovací prstenec [32] .....	37
Obrázek 18: Smršťovací žlab [42] .....	38
Obrázek 19: Ohýbací žlab [32] .....	39
Obrázek 20: Rankin – Wright diagram-důsledek zastoupení hlavních oxidů [48] .....	41
Obrázek 21: Automatická míchačka na malty .....	45
Obrázek 22: Hydraulický lis pro stanovení pevností .....	46
Obrázek 23: Schéma tříbodového ohybu, rozměry v mm [51] .....	47
Obrázek 24: VLEVO: Stanovení hmotnosti trámečků pro smrštění .....	48
Obrázek 25: VPRAVO: Stanovení velikosti vzorku dilatometrem .....	48
Obrázek 26: Pevnosti v tlaku - cement bez strusky .....	49
Obrázek 27: Pevnost v tahu za ohybu - cement bez strusky .....	50
Obrázek 28: Porovnání pevností v tlaku - cement se struskou vs. cement bez strusky .....	51
Obrázek 29: Porovnání pevností v tahu za ohybu pro vzorky se struskou .....	51

Obrázek 30: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu - cementy bez strusky vs. se struskou.....	52
Obrázek 31: Smrštění na vzduchu - cementy bez strusky.....	53
Obrázek 32: Smrštění na vzduchu - cementy se struskou .....	54
Obrázek 33: Smrštění na vzduchu - cement CEM I 52,5 R vs. CEM I 52,5 R + struska .....	54
Obrázek 34: Smrštění na vzduchu - cement CEM I 42,5 R vs. CEM I 42,5 R + struska .....	55
Obrázek 35: Smrštění na vzduchu - cement CEM II vs. CEM II + struska .....	55
Obrázek 36: Smrštění na vzduchu - cement CEM III vs. CEM III + struska .....	55
Obrázek 37: Smrštění na vzduchu - cement CEM I 42,5 R SC vs. CEM I 42,5 R SC + struska ...	56
Obrázek 38: Smrštění a vysychání na cementu bez strusky a se struskou pro 52,5 R.....	56
Obrázek 39 Smrštění cementu bez strusky - do 3. dne ve vodě.....	57
Obrázek 40: Smrštění s ošetřováním - cement CEM I 42,5 R vs. CEM I 42,5 R + struska .....	58
Obrázek 41: Smrštění s ošetřováním - cement CEM II vs. CEM II + struska.....	58
Obrázek 42: Smrštění s ošetřováním - cement CEM III vs. CEM III + struska.....	59
Obrázek 43: Smrštění s ošetřováním - cement CEM I 52,5 R vs. CEM I 52,5 R + struska .....	59
Obrázek 44: Smrštění s ošetřováním - cement CEM I 42,5 R SC vs. CEM I 42,5 R SC + struska .....	59
Obrázek 45: Vliv změny hmotnosti na velikost smrštění - CEM I 52,5 R.....	60
Obrázek 46: Vliv změny hmotnosti na velikost smrštění - CEM III.....	61
Obrázek 47: Nabývání cementů .....	61
Obrázek 48: Nabývání - CEM I 52,5 R.....	62
Obrázek 49: Nabývání CEM I 42,5 R .....	62
Obrázek 50: Nabývání CEM II .....	62
Obrázek 51: Nabývání CEM III .....	63
Obrázek 52: Nabývání CEM I 42,5 R SC .....	63
Obrázek 53: Vliv změny hmotnosti na velikosti smrštění/nabývání CEM I 52,5 R.....	64
Obrázek 54: Vliv změny hmotnosti na velikosti smrštění/nabývání CEM III B 32,5 N .....	65
Obrázek 55: Změna hmotnosti u vzorků ve vodě .....	66
Obrázek 56: Povrchové póry na vzorcích se shodným ošetřováním .....	66
Obrázek 57: Ztráta vlhkosti .....	67
Obrázek 58: Smrštění cementu CEM I 42,5 R – Prachovice, 2013-2014 [52] .....	68
Obrázek 59: Smrštění betonu s cementem CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N v/c 0,5 [53] .....	69
Obrázek 60: Smrštění betonu s cementem CEM I 52.5 R v/c 0,55 [53] .....	69
Obrázek 61: Smrštění betonu s cementem CEM I 42.5 N, v/c 0,5 [53].....	70
Obrázek 62: CEM I 52,5 R - rozbor velikosti částic (Blaine 515 m <sup>2</sup> /kg) .....	72
Obrázek 63: CEM 42,5 R - rozbor velikosti částic (Blaine 344 m <sup>2</sup> /kg) .....	72
Obrázek 64: CEM I 42,5 R SC – rozbor velikosti částic (Blaine 311 m <sup>2</sup> /kg) .....	72
Obrázek 65: CEM II/B-S 32,2 R – rozbor velikosti částic (Blaine 354 m <sup>2</sup> /kg) .....	73
Obrázek 66: CEM III 32,5 N SR - rozbor velikosti částic (Blaine 375 m <sup>2</sup> /kg).....	73
Obrázek 67: Popílek - rozbor velikosti částic.....	73
Obrázek 68: Stěna A .....	74
Obrázek 69: Stěna B .....	75
Obrázek 70: Stěna C .....	75