

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra mechaniky



**Vliv velikosti vzorku na konečnou
hodnotu smrštění betonu**

SOUTĚŽ O CENU AKADEMIKA BAŽANTA

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
Odborné vedení: Ing. Petr Havlásek, Ph.D.

Lenka Dohnalová
Praha 2020

Abstrakt

Určení konečné hodnoty smrštění betonu při vysychání je velmi obtížný úkol. Způsoby výpočtu nabízené v normách a predikčních modelech se velmi liší, stejně jako výsledky, ke kterým tyto výpočty vedou. Velmi problematická je i predikce konečné hodnoty na základě krátkodobých měření, která postihnou pouze počáteční vývoj smršťování. Nabízí se možnost využití velmi malých vzorků, u nichž je proces smršťování ukončen v rozumném časovém horizontu. K tomu je však nezbytná znalost vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění.

Z tohoto pohledu jsou v práci analyzovány nejrozšířenější normy a predikční modely pro popis dlouhodobého chování betonu, experimentální data a pokročilé numerické simulace s různými alternativami materiálového modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí.

Abstract

To determine the ultimate value of drying shrinkage of concrete is a very difficult task. The calculation procedures as well as their results are very different among the most widely used design codes and prediction models for the long-term behavior of concrete. Extrapolation of the ultimate value of drying shrinkage from short term measurements which capture only its initial evolution is also very problematic.

An unexplored option is to use the measurements on very small specimens where the drying process is terminated within a reasonable time period. In order to be able to do that, it is essential to know the size-effect on drying shrinkage.

From this perspective, this thesis analyzes and compares the most widely used design codes and prediction models, the experimental data, and the results of the advanced finite element simulations employing different alternatives of the constitutive model based on the Microprestress-Solidification theory.

Klíčová slova

Smršťování, beton, rozměrový efekt, norma, predikční model, experiment, numerická simulace, materiálový model.

Keywords

Shrinkage, concrete, size effect, design code, prediction model, experiment, numerical simulation, material model.

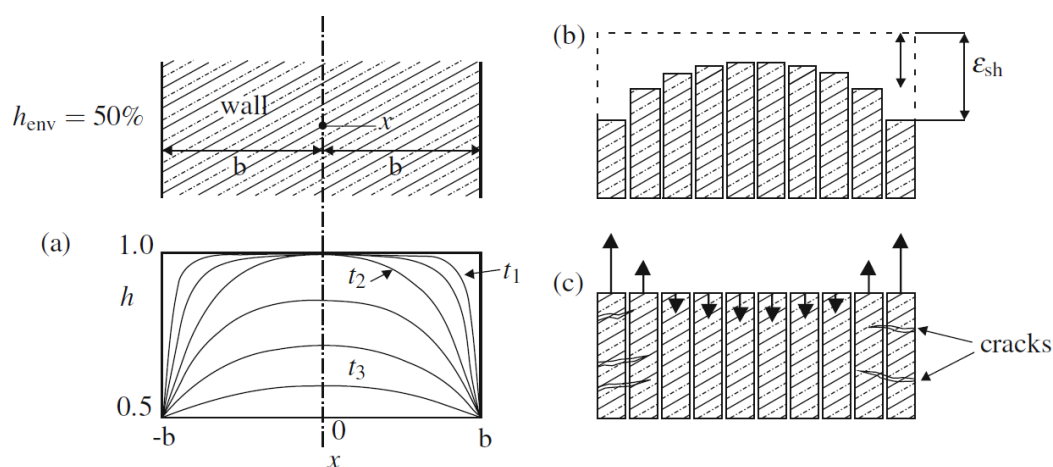
Obsah

1	Úvod	5
2	Normy a predikční modely	9
2.1	Model B3 a B4	9
2.2	Eurokód 2	12
2.3	<i>fib</i> Model Code 2010	15
2.4	ACI 209.R-08	16
2.5	Vzájemné srovnání	18
3	Experimentální data z literatury	21
3.1	Databáze na Northwestern University	22
3.2	Experimentální data z publikovaných článků	27
3.3	Vyhodnocení experimentálních dat	28
4	Srovnání výpočetních modelů s experimenty	31
5	Měření smrštění hranolů z cementové malty	33
5.1	Popis experimentu	33
5.2	Vyhodnocení experimentu	37
5.3	Vliv velikosti vzorku na dosaženou hodnotu smrštění	45
6	Materiálový model MPS	47
6.1	Kalibrace parametrů základního dotvarování	49
6.2	Model MPS s potlačeným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání	53
6.3	Původní model MPS	58
6.4	Model MPS se správným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání	61
6.5	Modely MPS s modifikovaným součinitelem smrštění	64
6.5.1	Časově závislý součinitel smrštění	64
6.5.2	Součinitel smrštění závislý na vlhkosti	70
6.6	Model MPS s možností vzniku tahových trhlin	75
7	Závěr	79

1 Úvod

Smršťování betonu při vysychání je dlouhodobý proces, který ani dnes není zcela přesně popsán a prozkoumán. Jedná se o časově závislé chování betonu vznikající bez vlivu vnějšího zatížení. Průběh smršťování betonu je ovlivněn mnoha vstupními parametry, mezi něž patří relativní vlhkost prostředí, kterému je betonový prvek vystaven, pevnostní charakteristiky, způsob a délka ošetřování v raném stádiu, vodní součinitel i konkrétní složení betonové směsi a mnoho dalších. Jeho vývoj je však ovlivňován i dalšími procesy v betonu, zejména dotvarováním, které je naopak vyvoláno působícím napětím. Provázanost všech časově závislých přetvárných procesů v betonu činí z určení konečné hodnoty smrštění vskutku nelehký úkol.

Vysychání betonu a jím vyvolané smršťování neprobíhá v celém objemu vzorku současně, jako je tomu například u autogenního smrštění. To způsobuje vznik nerovnoměrného napětí v průřezu prvku. Smrštění vysychající oblasti u povrchu je bráněno vnitřní částí průřezu. Dochází ke vzniku tlacené střední části a tahových napětí u povrchu, která při překročení tahové pevnosti betonu vedou ke vzniku povrchových trhlin.



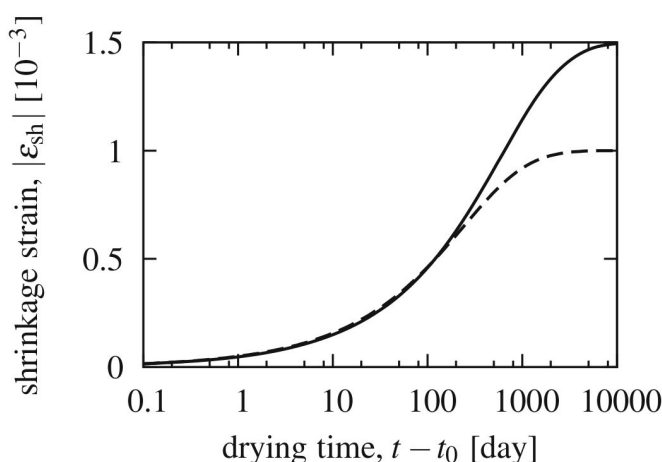
Obrázek 1: Ilustrace vzniku nerovnoměrného napětí během smršťování při vysychání. Vlevo (a) je zakresleno rozložení vlhkosti v prvku během vysychání, pravý horní obrázek (b) znázorňuje volné smrštění na teoretickém příkladu prvku s tenkými vrstvami, mezi kterými není bráněno vzájemným posunům. Dolní pravý obrázek (c) ilustruje vznik tahových a tlakových napětí ve vrstvách, pokud je deformacím mezi nimi bráněno a následnou možnost vzniku tahových trhlin u povrchu. Obrázek byl převzat z [4].

Je zřejmé, že popsat tento proces jednoduchým matematickým vztahem není možné. Způsoby výpočtu nabízené jednotlivými normami a predikčními průřezovými modely se velmi liší, zohledňují různé vstupní parametry a mnohdy vedou k velmi rozdílným výsledkům.

Vzhledem k nepřesnosti výpočtu časově závislých procesů v betonu je v případě konstrukcí citlivých na dotvarování a smršťování doporučeno provádět krátkodobá měření na laboratorních vzorcích a následně, v případě potřeby, upravit parametry výpočtu na základě výsledků měření. Účelem těchto krátkodobých zkoušek je zachytit vliv parametrů, které významně ovlivňují chování betonu.

Známary průběh smrštění je možné velmi přesně zachytit s použitím relativně jednoduchého vztahu se dvěma parametry, kterými jsou konečná hodnota smrštění ε_s^∞ v teoretickém čase $t = \infty$ a tzv. poločas smrštění τ_{sh} , který je charakteristickým časem obou hlavních procesů spojených s vysycháním – smršťování a dotvarování od vysychání.

Ovšem zejména v případě smrštění od vysychání je predikce konečné hodnoty extrapolací dat počátečního vývoje špatně podmíněný problém [4], což znamená, že i drobná změna v krátkodobém měření může mít za následek velmi významnou změnu v extrapolaci. Tento problém je ilustrován na Obrázku 2, kde jsou znázorněny dva průběhy smrštění pro různé hodnoty obou parametrů. Křivka vykreslená plnou čarou byla získána pro hodnoty $\varepsilon_s^\infty = 1,5 \cdot 10^{-3}$ a $\tau_{sh} = 1\,000$ dní, křivka vykreslená přerušovanou čarou odpovídá hodnotám $\varepsilon_s^\infty = 1,0 \cdot 10^{-3}$ a $\tau_{sh} = 400$ dní. Pro stejně kvalitní vystižení počátečního vývoje byly získány dvě velmi odlišné hodnoty konečného smrštění.



Obrázek 2: Ukázka špatné podmíněnosti úlohy predikce konečné hodnoty smrštění extrapolací dat počátečního vývoje, převzato z [4].

Pro správný a hlavně jednoznačný matematický popis konkrétního průběhu smrštění by bylo nutné mít k dispozici známý vývoj až do okamžiku blízkého dosažení konečné hodnoty, což je (vzhledem k pomalému procesu vysychání) u standardních velikostí vzorků nereálné a v případě skutečných konstrukčních prvků zcela nemožné. S narůstající velikostí vzorku se délka potřebná pro úplné vyschnutí výrazně prodlužuje. Jak délka, tak i rychlost vysychání jsou totiž úměrné druhé mocnině charakteristického rozměru průřezu. Dosáhnout úplného vyschnutí vzorků během laboratorního sledování je možné

pouze v případě použití velmi malých vzorků (s tloušťkou v řádu jednotek centimetrů).

Zde ovšem vyvstává další problém. Experimenty ukazují, že konečná hodnota poměrného smrštění je na velikosti prvku závislá. Bez znalosti vztahu mezi velikostí vzorku a konečnou hodnotou smrštění proto nelze výsledky měření na malých laboratorních vzorcích přímo přenést na prvky běžných konstrukčních velikostí.

Právě vztah mezi velikostí vzorku a konečnou hodnotou smrštění je hlavním tématem této práce.

Této problematice se v užší míře věnují i dvě relativně nedávné studie. První z nich [20] porovnává výsledky dvou experimentálních výzkumů (Hansen [10] a L'Hermite – výsledky obou jsou použity i v této práci) s předpoklady Eurokódu 2 [21]. Druhá, novější studie z roku 2017 [19] zkoumá smrštění tří typů samozhutnitelných betonů, věnuje se ale spíše problematice způsobu extrapolace dat smrštění. Součástí publikovaného článku byl však i soubor původních experimentálních dat, která jsou v této práci použita pro vyhodnocení vlivu velikosti prvku na konečné smrštění (experimentální studie Samouh).

Snahou této práce je zhodnocení zkoumaného tématu v širším pohledu. Práci lze rozdělit v zásadě do tří hlavních částí, které lze stručně shrnout jako

- normy a průřezové modely
- experimentální data
- výpočty metodou konečných prvků s konstitutivním modelem založeným na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS) [13]

Jako první je v Kapitole 2 provedena analýza nejrozšířenějších norem (Eurokód 2 [21], americká norma ACI 209.2R-08 [1]) a modelů pro predikci dlouhodobého chování betonových konstrukcí (model B3 [5], model B4 [18], *fib* Model Code 2010 [9]), které patří do skupiny modelů pracujících s průměrnými hodnotami na úrovni průřezu. Je shrnut způsob, jakým je v jednotlivých modelech velikost prvku zohledněna ve výpočtu smrštění a na závěr je provedeno i vzájemné grafické porovnání rozměrového efektu všech zkoumaných výpočetních modelů.

Jelikož normy a predikční modely používají různé parametry pro vyjádření velikosti prvku, bylo pro vzájemné srovnání nutné tento způsob sjednotit. Jako vhodné a jednotné vyjádření velikosti prvku byl vybrán parametr D označovaný jako náhradní tloušťka průřezu, který je použit například v modelu B3 a který je definován jako dvojnásobek poměru objemu prvku vůči vysychající části povrchu. Pro případ desky vysychající oběma protilehlými povrchy odpovídá hodnota náhradní tloušťky průřezu D přímo tloušťce desky.

Kapitola 3 se věnuje podrobné analýze vhodných experimentálních dat převzatých z literatury a z volně dostupné databáze experimentálních výzkumů na Northwestern University [12]. Z obrovského množství výsledků mnoha experimentálních studií různých zaměření byly vybrány ty, které splňovaly základní předpoklady pro možnost vyhodnocení

vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění. Výsledné vyhodnocení je provedeno porovnáním všech použitých experimentů ve společném grafu.

V další části (Kapitola 4) je porovnání experimentálních dat rozšířeno o konfrontaci s předpoklady norem a predikčních modelů analyzovaných v Kapitole 2 této práce.

Experimentální vyhodnocení bylo rozšířeno i o výsledky experimentu, který probíhá od poloviny roku 2019 na Fakultě stavební ČVUT v Praze ve spolupráci s Experimentálním centrem ČVUT. Tento experiment je zaměřen přímo na problematiku vlivu různé velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění při vysychání. Testovány jsou hranolové vzorky různých velikých průřezů s jednotnou délkou 400 mm vyrobené z jedné záměsi cementové malty. Kromě údajů o deformacích, teplotě a vlhkosti vzduchu jsou u části vzorků pravidelně zaznamenávány i váhové úbytky, což poskytuje možnost vyhodnocení vzájemné závislosti mezi procesem vysychání a smršťování. Sledování vzorků tohoto experimentu pokračuje i v roce 2020 a bude sloužit pro další výzkum problematiky smršťování při vysychání.

Poslední část práce (Kapitola 6) se věnuje jednomu z nejpokročilejších materiálových modelů pro popis časově závislého chování betonu, který již pracuje na úrovni materiálového bodu. Jedná se o model založený na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS) [13]. Vyhodnocení rozměrového efektu bylo provedeno na výsledcích výpočtů metodou konečných prvků v programu OOFEM [17] s modelem MPS ve více modifikacích. Kromě základní verze modelu MPS bylo použito i šest dalších variant tohoto modelu a na závěr i rozšířená verze modelu MPS, která při výpočtu zohledňuje i možnost vzniku tahových trhlin.

Poznámka:

V celé práci je smrštění, tedy zmenšení prvku, uvažováno kladným znaménkem. Některé normy uvažují znaménko deformace prvku kladné pro zvětšení a záporné pro případ zkrácení prvku. V takovém případě byly příslušné vztahy upraveny tak, aby v celé práci jednotně odpovídalo kladné znaménko případu, kdy dochází ke smršťování a záporné znaménko případnému bobtnání.

2 Normy a predikční modely

V této kapitole je ukázáno, jakým způsobem je velikost prvku uvažována při výpočtu smrštění podle základních norem a modelů pro predikci dlouhodobého chování betonových konstrukcí od silových i nesilových účinků. Obecně platí, že výpočet smrštění napříč jednotlivými predikčními modely a normami není jednotný, jsou zohledňovány různé vstupní parametry a není tak snadné rozhodnout, který z výpočetních modelů nejlépe odpovídá skutečnému chování konstrukce.

Tato práce se zaměřuje především na to, jakou měrou velikost konstrukčního prvku ovlivňuje konečnou hodnotu smrštění od vysychání. Konkrétní představa o zohlednění tohoto faktu ve výpočetních modelech je velmi důležitá v situaci, kdy je potřeba na základě znalosti počátečního průběhu smrštění na laboratorních vzorcích správně odhadnout konečné smrštění na skutečné konstrukci či její části. Tato situace není nijak nereálná, u výpočtů složitějších konstrukcí je podobný postup mnohdy doporučován [5] [8]. Provedené výpočty smrštění a dotvarování mají být ověřeny na výsledcích krátkodobých experimentů na menších vzorcích shodného složení betonové směsi, které jsou vystaveny podmínkách odpovídajícím skutečné konstrukci. Na základě takto získaných výsledků měření mají být v případě potřeby upraveny některé parametry výpočetního modelu, aby výsledky výpočtů odpovídaly skutečnosti.

Snahou nebylo posuzovat konkrétní hodnoty výsledného smrštění, ale pouze to, jakým způsobem se tato hodnota mění v závislosti na velikosti konstrukčního prvku. Aby bylo možné jednotlivé výpočetní modely graficky porovnat ve společném grafu s výsledky experimentů, bylo nutné provádět určité normování zobrazovaných hodnot. V Kapitole 4 jsou proto výsledky získané z výpočetních modelů normovány vůči hodnotě odpovídající prvku s velikostí $D = 60 \text{ mm}$ ¹. Stejným způsobem byly normovány i výsledky získané z převzatých experimentů.

Ačkoli se tato práce zaměřuje především na výslednou hodnotu smrštění v teoretickém čase $t = \infty$, je pro úplnost u každého modelu zmíněno i to, zda je vliv velikosti prvku nějak zohledněn i v uvažované kinetice procesu smršťování.

2.1 Model B3 a B4

Oba modely B3 [5] a B4 [18] patří do skupiny predikčních modelů vyvinutých týmem prof. Bažanta na Northwestern University. Model B3 je asi nejrozšířenějším a v současnosti nejpoužívanějším modelem pro predikci dotvarování a smršťování u významnějších konstrukcí. Rozdíl mezi oběma modely je zejména v oddělení složky autogenního smrštění a zohlednění více parametrů složení betonové směsi u novějšího modelu B4. Jeho předchůdce, model B3 uvažuje pouze smrštění od vysychání a složku autogenního smrštění

¹ Vysvětlení volby vzorku s $D = 60 \text{ mm}$ při normování je uvedeno v části 3.3 této práce.

zanedbává. Zároveň je ale jeho použití omezeno na konstrukční betony běžných pevností s vodním součinitelem minimálně 0,4, kde autogenní smrštění netvoří významnou část smrštění celkového.

Z hlediska uvažování vlivu velikosti konstrukčního prvku na výslednou hodnotu smrštění není mezi oběma modely rozdíl, proto jsou v této práci prezentovány společně.

Při výpočtu smrštění podle modelů B3 a B4 je uvažován nejen vliv velikosti prvku, ale i jeho tvar. Oba tyto parametry ovlivňují jak konečnou hodnotu smrštění, tak i průběh smrštění v čase, figurují totiž i v časové funkci popisující kinetiku procesu smršťování.

Velikost konstrukčního prvku je ve výpočtech zastoupena pomocí náhradní tloušťky průřezu

$$D = 2 \frac{V}{S}, \quad (1)$$

kde V je celkový objem prvku,

S je část povrchu, která je v kontaktu s okolním prostředím.

K zohlednění tvaru konstrukčního prvku slouží součinitel k_s , který je pro základní geometrické tvary definován konkrétními hodnotami:

pro nekonečnou desku	$k_s = 1,00$
pro nekonečný válec	$k_s = 1,15$
pro nekonečný čtvercový hranol	$k_s = 1,25$
pro kouli	$k_s = 1,30$
pro krychli	$k_s = 1,55$

Konečná hodnota smrštění, které je dosaženo v teoretickém čase $t = \infty$ je v modelech B3 a B4 definována vztahem

$$\varepsilon_{sh}^{\infty} = \varepsilon_s^{\infty} \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})}, \quad (2)$$

kde ε_s^{∞} je na velikosti prvku nezávislý parametr definovaný níže uvedeným vztahem (7),

t_0 je stáří betonu v okamžiku počátku vysychání,

$E(t)$ je modul pružnosti v požadovaném čase t , vztah (5)

τ_{sh} je poločas smrštění daný vztahem (3).

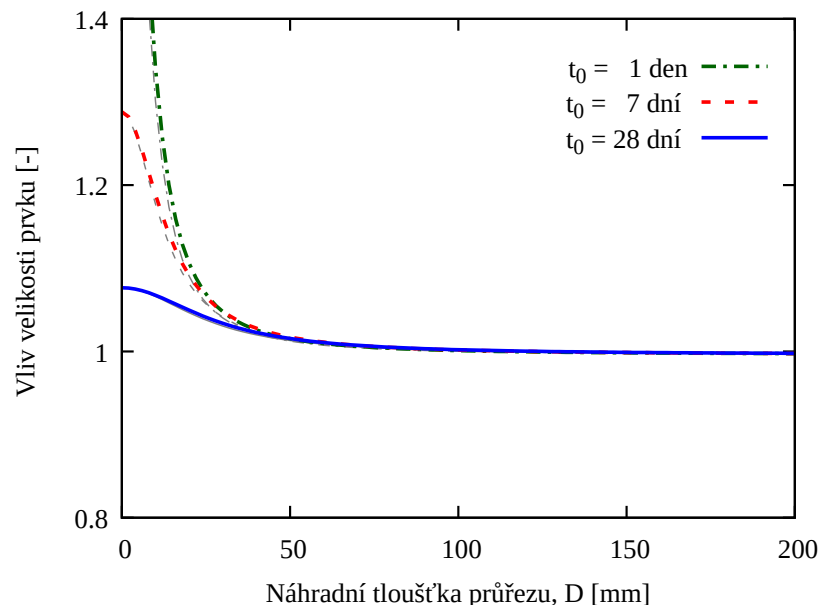
Právě poločas smrštění je parametr, který do výpočtu vnáší závislost na velikosti prvku a jeho tvaru

$$\tau_{sh} = k_t (k_s \cdot D)^2, \quad (3)$$

kde k_t je součinitel smrštění uváděný v jednotkách $[\text{den}/\text{cm}^2]$, který je definován jako

$$k_t = 8,5 \cdot t_0^{-0,08} \bar{f}_c^{-1/4} \quad (4)$$

a závisí pouze na stáří betonu při počátku vysychání t_0 a na jeho tlakové pevnosti ve stáří 28 dní $\bar{f}_c$ [MPa].



Obrázek 3: Vliv velikosti prvku na výslednou hodnotu smrštění podle modelu B3/B4. Vykreslena je hodnota výrazu $\frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})}$ ze vztahu (7). Výpočet byl proveden pro tři různá stáří betonu v okamžiku počátku vysychání. Tvar prvku byl zvolen jako válec (hodnota součinitele $k_s = 1,15$). Zvolený tvar prvku má však na průběh křivek jen minimální dopad, pro představu jsou v grafu tenkou šedou čarou zakresleny i adekvátní křivky pro případ hranolu ($k_s = 1,25$).

Hodnota modulu pružnosti v konkrétním čase se určí pomocí vztahu převzatého z ACI 209 [1] jako

$$E(t) = E_{28} \sqrt{\left(\frac{t}{4 + 0,85 t} \right)}, \quad (5)$$

kde E_{28} je modul pružnosti ve stáří 28 dní, který lze dopočítat z tlakové pevnosti betonu

$$E_{28} = 4734 \sqrt{\bar{f}_c}. \quad (6)$$

Na velikosti prvku nezávislý parametr ε_s^∞ ve vztahu (2) se určí dle vztahu

$$\varepsilon_s^\infty = -\alpha_1 \alpha_2 \left[0,019 w^{2,1} \bar{f}_c^{-0,28} + 270 \right] 10^{-6}, \quad (7)$$

kde w je hodnota vodního součinitele,

α_1 je součinitel zohledňující typ použitého cementu

$$\alpha_1 = 1,00 \quad \text{pro CEM I}$$

$$\alpha_1 = 0,85 \quad \text{pro CEM II}$$

$$\alpha_1 = 1,10 \quad \text{pro CEM III}$$

α_2 je součinitel, který zohledňuje způsob ošetřování betonu před počátkem vysychání. Jsou definovány tyto hodnoty:

$$\alpha_2 = 1,00 \quad \text{pro ošetřování vodou nebo pro 100% relativní vlhkost prostředí}$$

$$\alpha_2 = 0,75 \quad \text{pro parní ošetřování}$$

$$\alpha_2 = 1,20 \quad \text{pro běžný způsob ošetřování nebo pro zapečetěné² vzorky}$$

Ačkoliv modely B3 a B4 zahrnují do výpočtu konečné hodnoty smrštění od vysychání velikost i tvar konstrukčního prvku, vliv těchto parametrů je velmi malý. Jak je zřejmé z grafického znázornění na Obrázku 6, vliv velikosti prvku se projevuje jen u velmi malých vzorků, které svými rozměry neodpovídají skutečným konstrukcím. U prvků s náhradní tloušťkou průřezu $D > 100$ mm je tento efekt téměř nulový. Tvar křivky vyjadřující závislost celkového smrštění na velikosti prvku je ovlivněn ještě dalšími parametry. V zásadě jde o veličiny, které mají vliv na rychlost smršťování v počáteční fázi vysychání. Jedná se zejména o stáří betonu v okamžiku počátku vysychání t_0 a o tlakovou pevnost $\bar{f}_c$. I tyto parametry se však projevují pouze u velmi malých vzorků s velikostí do $D = 50$ mm.

2.2 Eurokód 2

Česká norma pro navrhování betonových konstrukcí ČSN EN 1992-1-1 [21] s plným označením Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby je v platnosti již od roku 2006.

Při výpočtu celkového poměrného smrštění je oddělena složka autogenního smrštění a složka smrštění od vysychání. Stejně jako tomu bylo v případě modelů B3 a B4, je i v této normě uvažován vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění i na vývoj smršťování v čase.

Tvar prvku není ve výpočtu nijak zohledněn, velikost prvku je vyjádřena pomocí náhradního rozměru průřezu definovaného vztahem

$$h_0 = 2 \frac{A_c}{u}, \quad (8)$$

² Zapečetěné vzorky jsou opatřeny speciální vrstvou, která je chrání před vysycháním.

kde A_c je plocha průřezu,

u je obvod části průřezu v kontaktu s okolním prostředím.

Toto vyjádření velikosti zohledňuje pouze velikost příčného řezu prvku, nikoli jeho délku. Není tedy bráno v potaz ani to, zda má vzorek zapečetěné konce nebo je vysychání umožněno celým povrchem. Nicméně u prvků s převládající délkou je hodnota tohoto parametru srovnatelná s náhradní tloušťkou průřezu určenou dle vztahu (1). V případě vzorků se zapečetěnými konci jsou hodnoty parametrů h_0 a D identické.

Při výpočtu konečné hodnoty smrštění je základní poměrné smrštění ε_{sh}^∞ násobeno koeficientem, který závisí pouze na velikosti betonového prvku.

$$\varepsilon_{sh}^\infty = k_h \cdot \varepsilon_{sh0}, \quad (9)$$

Hodnoty součinitele k_h jsou v závislosti na náhradní tloušťce průřezu definovány po částech lineární funkcí s hodnotami uvedenými v Tabulce 1.

h_0 [mm]	100	200	300	≥ 500
k_h [-]	1,00	0,85	0,75	0,70

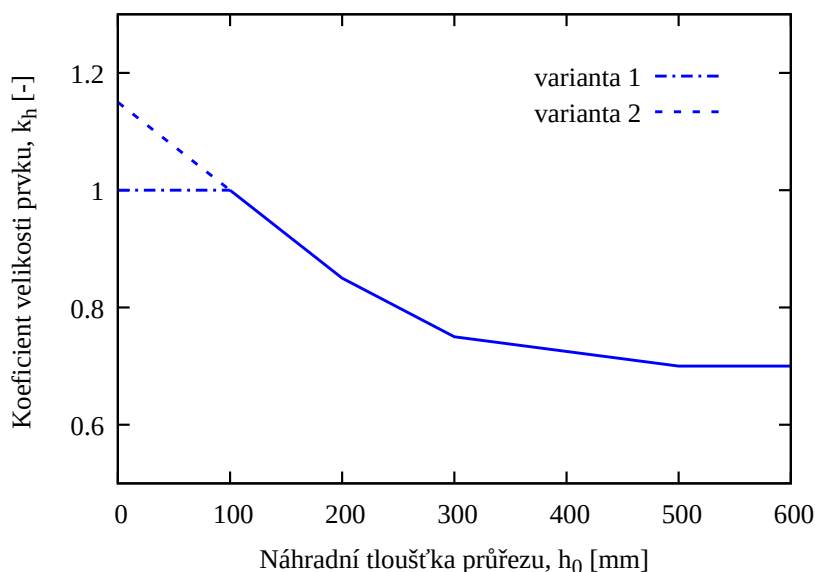
Tabulka 1: Hodnoty velikostního součinitele k_h pro výpočet konečné hodnoty smrštění podle Eurokódu 2.

Pro prvky s $h_0 \leq 100$ mm není hodnota součinitele definována a není ani upřesněno, zda se má u těchto prvků použít hodnota $k_h = 1,0$ (v grafu na Obrázku 4 označeno jako varianta 1 a znázorněno čerchovanou čarou) nebo se má například lineárně extrapolovat z hodnot pro velikost $h_0 = 100 - 200$ mm (varianta 2, vykresleno čárkovanou čarou).

Absenci hodnot součinitele k_h pro velmi malé prvky lze pochopit s ohledem na velikost běžných konstrukčních prvků, k jejichž navrhování norma slouží. Avšak v případě, kdy je snahou předpovědět hodnotu smrštění na základě její znalosti z měření na malých vzorcích, je nutno hodnotu koeficientu k_h odhadnout i mimo definovaný rozsah. Proto jsou v grafu na Obrázku 4 zakresleny i hodnoty pro oba zmíněné způsoby určení koeficientu pro vzorky s velikostí $h_0 < 100$ mm.

Ve společném grafu na Obrázku 6, kde jsou porovnány všechny posuzované normy a predikční modely, je součinitel k_h používán při výpočtu dle Eurokódu 2 zakreslen modrou přerušovanou čarou a to pouze v oblasti, ve které je přímo definován.

Základní poměrné smrštění od vysychání ve vztahu (9) je veličina na velikosti prvku zcela nezávislá. Jeho hodnotu lze pro velmi zjednodušené výpočty přímo odečíst z tabulky v normě, kde jsou pro beton s cementem CEM třídy N uvedeny jmenovité hodnoty v závislosti na pevnostní třídě betonu a relativní vlhkosti okolního prostředí. V příloze B Eurokódu 2 je uveden vztah pro přesnější výpočet základního poměrného smrštění od



Obrázek 4: Grafické znázornění součinitele k_h v závislosti na velikosti prvku. Plná čára odpovídá hodnotám, které jsou přímo definovány normou. Čárkovaná a čerchovaná čára ukazuje dvě vybrané možnosti určení hodnoty součinitele v oblasti, ve které není jeho hodnota Eurokódem 2 definována.

vysychání

$$\varepsilon_{sh0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left(-\alpha_{ds2} \frac{\bar{f}_c}{10} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,55 (1 - h_{env}^3), \quad (10)$$

kde h_{env} je relativní vlhkost prostředí vyjádřená jako desetinné číslo,
 $\bar{f}_c$ je průměrná hodnota 28denní pevnosti betonu v tlaku [MPa],
 α_{ds1} a α_{ds2} jsou součinitele závislé na druhu použitého cementu.

$\alpha_{ds1} = 3,$	$\alpha_{ds2} = 0,13$	pro cement třídy S
$\alpha_{ds1} = 4,$	$\alpha_{ds2} = 0,12$	pro cement třídy N
$\alpha_{ds1} = 6,$	$\alpha_{ds2} = 0,11$	pro cement třídy R

V současnosti připravovaná nová verze Eurokódu 2 [8] již při výpočtu konečné hodnoty smrštění nepoužívá koeficient k_h . Vyjádření velikosti prvku pomocí náhradního rozměru průřezu h_0 v nové normě sice zůstává, tento parametr se uplatní při výpočtu smršťování pouze v časové funkci popisující vývoj smrštění (toto zohlednění zůstává stejné jako v případě aktuálně platného Eurokódu 2). Velmi pravděpodobně tedy bude v nové verzi evropské normy pro navrhování betonových konstrukcí vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění při podrobnějším výpočtu zcela zanedbán. Paradoxně, pro zjednodušené

výpočty připravovaná norma obsahuje tabulku, kde jsou konečné hodnoty smrštění definovány mimo jiné na základě velikosti prvku. Z hodnot v tabulce je zřejmé celkem výrazné zohlednění rozměrového efektu. Proč má být u přesnějších výpočtů tento efekt zcela zanedbán zůstává otázkou.

2.3 *fib* Model Code 2010

Výpočet smrštění podle Model Code 2010 [9] je velmi podobný výpočtu uvedenému v Eurokódu 2. Podobnost není náhodná, starší verze tohoto modelu označovaná jako Model Code 1990 [7] totiž sloužila jako podklad při tvorbě evropské normy.

Při výpočtu celkového smrštění je v Model Code 2010 oddělena složka autogenního smrštění a smrštění od vysychání.

Shodně s Eurokódem 2 používá tento predikční model pro vyjádření velikosti prvku náhradní tloušťku průřezu h vyjádřenou vztahem (8). V případě Model Code 2010 však tento parametr ovlivňuje pouze časový vývoj smrštění – u menších vzorků je uvažován rychlejší proces smršťování, s rostoucí velikostí dochází k jeho zpomalení.

Výsledná hodnota smrštění od vysychání je však na velikosti prvku zcela nezávislá, určí se ze vztahu

$$\varepsilon_{sh}^{\infty} = \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \bar{f}_c) \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,55 \left(1 - h_{env}^3 \right), \quad (11)$$

jehož platnost je omezena pouze na vysychání při relativní vlhkosti $0,4 \leq h_{env} \leq 0,99$. Pro vlhkost prostředí $h_{env} > 0,99$ model uvažuje bobtnání betonu a místo vztahu (11) se použije upravená verze

$$\varepsilon_{sh}^{\infty} = \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \bar{f}_c) \right] \cdot 10^{-6} \cdot (-0,25). \quad (12)$$

Pro případ relativní vlhkosti $h_{env} < 0,4$ není v Model Code 2010 žádný alternativní vztah uveden.

Součinitele α_{ds1} a α_{ds2} jsou v Model Code 2010 určeny následujícími hodnotami:

$\alpha_{ds1} = 3,$	$\alpha_{ds2} = 0,013$	pro cement třídy S
$\alpha_{ds1} = 4,$	$\alpha_{ds2} = 0,012$	pro cement třídy N
$\alpha_{ds1} = 6,$	$\alpha_{ds2} = 0,012$	pro cement třídy R

Z porovnání vztahů (10) a (11) je patrné, že kromě malého rozdílu v hodnotě α_{ds2} pro cement třídy R se obě rovnice liší pouze koeficientem 0,85, kterým je v případě Eurokódu celá rovnice násobena³.

³ Posun desetinné čárky u koeficientu α_{ds2} je jen zdánlivým rozdílem. V případě Eurokódu je ve

Výpočet smrštění podle Model Code 2010 je ve srovnání s Eurokódem velmi konzervativní. Výsledné hodnoty smrštění od vysychání spočtené podle Model Code 2010 budou s ohledem na absenci součinitele 0,85 větší než v případě výpočtu podle Eurokódu 2. Navíc nedochází ani k redukci hodnoty smrštění u větších vzorků pomocí koeficientu k_h .

Jak bylo zmíněno výše, Model Code 2010 zcela zanedbává vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání, proto není zakreslen ani na společném grafu na Obrázku 6.

2.4 ACI 209.R–08

Americká norma ACI 209.R–08 [1], která vstoupila v platnost roku 2008, používá pro vyjádření velikosti prvku buď přímo poměr V/S nebo parametr zvaný střední tloušťka prvku definovaný jako

$$d = 4 \frac{V}{S}, \quad (13)$$

což odpovídá dvojnásobku náhradní tloušťky průřezu D (1) používané v modelu B3. Z důvodu zjednocení a pro lepší možnost srovnání byly vztahy z této normy mírně upraveny pro použití náhradní tloušťky průřezu D .

Při výpočtu smrštění dle normy ACI 209 není oddělena složka autogenního smrštění. Konečná hodnota celkového smrštění se určí z pevně dané konstanty 780×10^{-6} , která se násobí až sedmi opravnými součiniteli.

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6} \cdot \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (14)$$

Jednotlivé součinitele γ vyjadřují vliv těchto vstupních parametrů (v pořadí jak jsou uvedeny ve vztahu (14)):

- délky počátečního ošetřování betonu,
- relativní vlhkosti prostředí,
- velikosti prvku,
- sednutí kužele,
- procentuálního zastoupení jemného kameniva,
- hmotnostního obsahu cementu,
- obsahu vzduchu v betonové směsi.

Norma ACI nabízí dvě možnosti, jak do výpočtu konečné hodnoty smrštění vliv velikosti prvku zahrnout. První variantou je použití **opravného koeficientu** $\gamma_{sh,vs}$ uvedeného ve vztahu (14). Ten je definován předpisem

$$\gamma_{sh,vs} = 1,2 \exp(-0,00236 D). \quad (15)$$

vztahu (10) hodnota tlakové pevnosti $\bar{f}_c$ dělena číslem 10, čímž je tento rozdíl kompenzován.

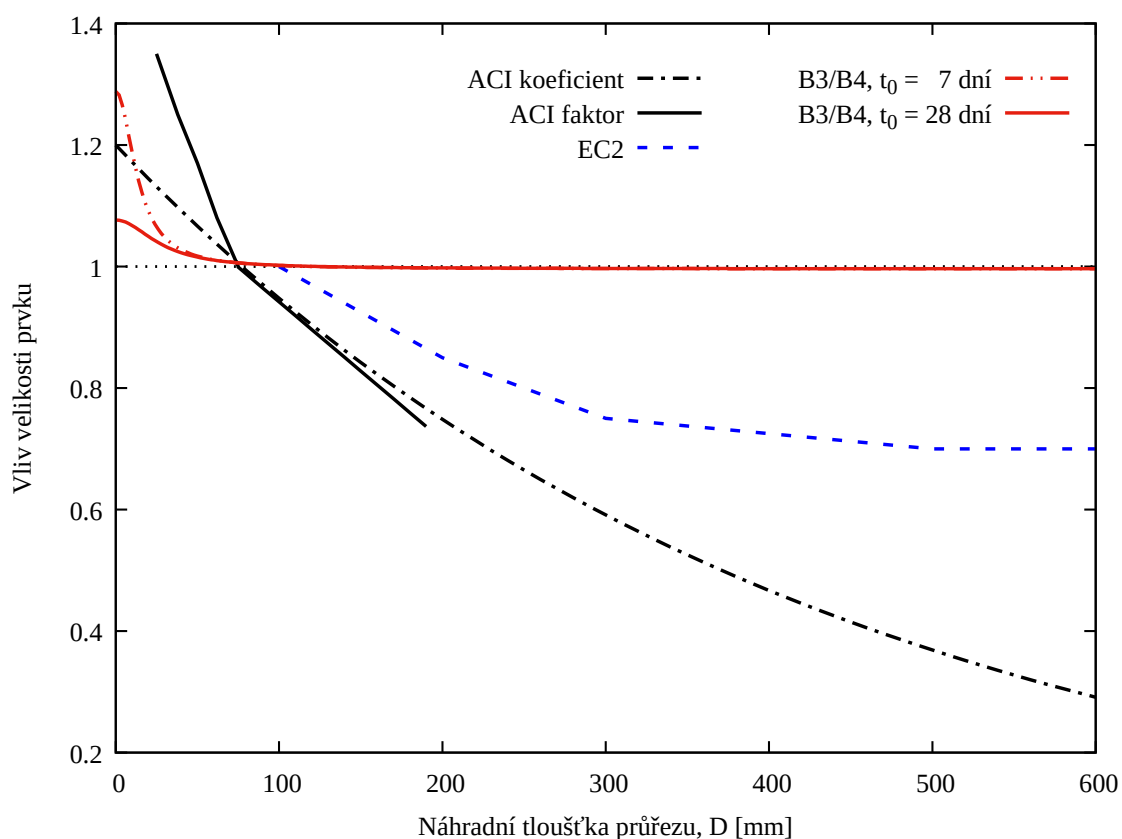
Hodnoty opravného součinitele i faktoru v závislosti na náhradní tloušťce prvku jsou zakresleny na Obrázku 5. Při použití opravného faktoru (modrá plná čára) je hodnota smrštění u větších prvků redukována vůči hodnotám malých prvků výrazněji, jeho použití je však omezeno na maximální velikost $D = 190$ mm. Použití koeficientu není velikostí prvku nijak omezeno, nicméně hodnota získaná ze všech opravných součinitelů, kterou se násobí konstanta ve vztahu (14), nesmí být menší než 0,2.

Za zmínku stojí i to, jakým způsobem je vliv velikosti prvku zohledněn ve funkci popisující vývoj smrštění v čase. Z tohoto hlediska se totiž norma ACI lehce odlišuje do všech ostatních. Pro určení parametrů časové funkce popisující kinetiku procesu smršťování nabízí ACI opět dva způsoby. Jeden ze způsobů používá pro parametry časové funkce vztahy, do kterých vstupuje mimo jiné i velikost prvku (ve formě poměru V/S). Tento způsob tedy odpovídá tomu, jak je vliv velikosti prvku na kinetiku smršťování uvažován u ostatních výpočetních modelů. Druhý způsob však umožňuje použití konstantních hodnot parametrů nezávisle na velikosti a tvaru prvku. Při použití tohoto postupu není vliv velikosti prvku na časový průběh smrštění vůbec uvažován a časová funkce je pouze funkcí délky vysychání.

2.5 Vzájemné srovnání

Graf na Obrázku 6 vzájemně porovnává jednotlivé normy a predikční modely z hlediska zohlednění velikosti prvku při výpočtu konečné hodnoty smrštění. Vykresleny jsou výsledky výrazů či součinitelů, jimiž je ve výpočetních modelech násobena konečná hodnota smrštění. V tomto grafu jsou použity hodnoty bez jakéhokoli normování, díky tomu je možné vidět, že různé modely uvažují jinou velikost prvku jako „referenční“ – velikost, které odpovídá na svislé ose hodnota 1,0, což znamená, že výsledné smrštění není velikostí prvku nijak ovlivněno. Součinitel k_h používaný Eurokódem 2 je vykreslen pouze v oblasti, pro kterou je přímo definován, tedy pro prvky s velikostí $D \geq 100$ mm.

Pro porovnání norem s výsledky experimentů v Kapitole 4 byly hodnoty těchto koeficientů normovány vůči hodnotě odpovídající prvku s $D = 60$ mm. Stejným způsobem byly totiž normovány i výsledky získané z jednotlivých experimentů v Kapitole 3.



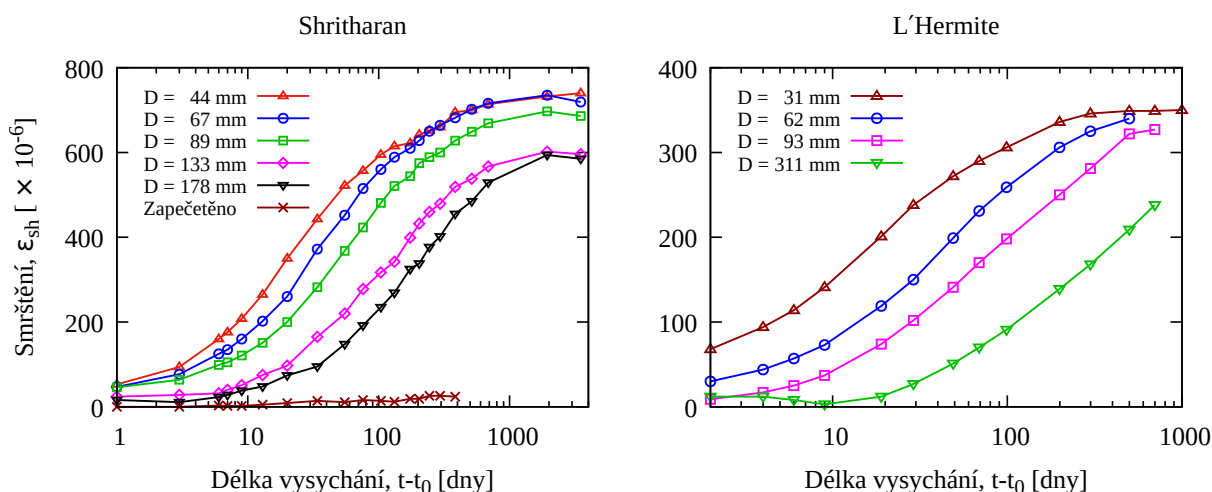
Obrázek 6: Porovnání vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění u vybraných norem a predikčních modelů. Jedná se o hodnoty výrazů či součinitelů závislých na velikosti prvku, kterými je při výpočtu násobena hodnota smrštění. Model Code 2010 vliv prvku při výpočtu konečné hodnoty nijak nezohledňuje, proto tento predikční model není na grafu zakreslen. Tvar prvku pro výpočet podle Eurokódu 2 byl zvolen jako nekonečný válec. Hodnoty v tomto grafu nejsou nijak normovány.

3 Experimentální data z literatury

Pro dostatečné experimentální ověření vlivu velikosti betonového prvku na konečnou hodnotu smrštění je potřeba vyhodnotit co největší počet skutečných experimentů. Nejen s ohledem na pomalou rychlost procesu smršťování od vysychání betonu bylo nereálné získat potřebná data pouze z nově provedených vlastních měření.

Vhodná data bylo nutné vyhledat mezi již existujícími výzkumy zabývajícími se smršťováním betonu během vysychání, v rámci kterých byly testovány vzorky alespoň dvou různých velikostí. Vzorky musely být vyrobeny z betonové směsi shodné receptury a shodné musely být i všechny důležité parametry, které ovlivňují proces smršťování, tzn. zejména způsob a délka ošetřování, počátek vysychání a teplota a vlhkost okolního prostředí. Dále bylo nutné zhodnotit, u kterých vzorků byla délka sledování dostatečně dlouhá, aby bylo možné hovořit alespoň o přibližném dosažení konečné hodnoty smrštění.

Příliš krátká doba trvání experimentu byla nejčastějším důvodem k následnému vyřazení vzorků, případně i celých výzkumů. Levý graf na Obrázku 7 ilustruje příklad experimentu s dostatečnou délkou trvání, kdy všechny vzorky dosáhly svých konečných hodnot smrštění a poskytují tak dobrou možnost vyhodnocení vlivu velikosti betonového vzorku na výslednou hodnotu smrštění od vysychání. Na pravém grafu Obrázku 7 je zobrazen vývoj smrštění u experimentu, kde konečných hodnot dosáhly pouze menší vzorky.



Obrázek 7: Grafy vybraných experimentálních výzkumů z NU databáze [12] ilustrující vliv délky trvání experimentu na dosažení konečné hodnoty smrštění betonových vzorků. Graf vlevo zobrazuje průběh smrštění vzorků z experimentálního výzkumu Shritharan. Je zřejmé, že všechny vzorky této série dosáhly svých konečných hodnot smrštění. Pravý graf zobrazuje vývoj smrštění vzorků z experimentálního výzkumu L'Hermite, kde největší ze vzorků (vyznačen zelenou barvou) je ukázkou případu, kdy proces smršťování ještě nebyl ukončen a poslední hodnotu měření nelze považovat za konečnou.

U největšího ze vzorků (hranol průřezu 700×700 mm) nelze poslední změřenou hodnotu v žádném případě považovat za konečnou.

3.1 Databáze na Northwestern University

Jedná se o velmi rozsáhlou, volně přístupnou databázi [12], ve které jsou uchovávána data z mnoha experimentálních výzkumů zaměřených na smrštění a dotvarování betonu. Díky velkému množství shromážděných výsledků byla tato databáze vhodným a základním zdrojem pro nalezení potřebných experimentálních dat pro tuto práci.

Databáze obsahuje celkem 62 512 hodnot změřených na 3 308 různých vzorcích. Část databáze věnovaná smršťování obsahuje celkem 32 318 výsledků získaných v rámci měření 1 869 betonových či maltových vzorků. Tato data pocházejí ze 197 různých experimentálních výzkumů. Z nich byly vybrány ty, kde byly testovány vzorky více než jedné velikosti za splnění základních podmínek uvedených v úvodu této kapitoly.

Základní kritéria splnilo celkem 19 experimentálních studií (viz Tabulku 3).

Údaje o smrštění jednotlivých vzorků byly následně zpracovány a na základě grafů zobrazujících časový vývoj smrštění od vysychání bylo rozhodnuto, u kterých vzorků lze poslední změřenou hodnotu považovat za konečnou hodnotu smrštění.

U experimentálních výzkumů, k nimž se podařilo dohledat publikovaný článek, bylo možné informace uvedené v NU databázi ověřit, případně doplnit chybějící údaje. U ostatních výzkumů musela být použita přímo data uvedená v databázi. Tři ze zdánlivě vyhovujících experimentálních výzkumů musely být kvůli nedostatku nezbytných informací vyřazeny.

Dva z výzkumů (Bryant a Keeton) měly uvedeny odlišné údaje v NU databázi a v publikovaném článku. V obou případech byly pro vyhodnocení upřednostněny hodnoty smrštění uvedené přímo v článku, nikoli data z databáze. V případě studie Bryant [6] obsahovala databáze zcela špatné hodnoty smrštění, pravděpodobně byly výsledky měření během zápisu do databáze omylem vyděleny hodnotou napětí zatížených vzorků, což je postup pro vyhodnocení funkce poddajnosti ze zatížených vzorků určených pro měření dotvarování. U studie Keeton [14] byly v databázi uvedeny hodnoty smrštění od vlivu vysychání již očištěné o složku autogenního smrštění, nebyl však zřejmý způsob, jakým byly tyto údaje z publikovaných dat celkového smrštění dopočteny. Problémem tohoto výzkumu byl fakt, že referenční vzorky pro eliminaci autogenního smrštění byly uchovávány ponořené ve vodě a docházelo u nich k bobtnání. Z uvedených důvodů byly u studie Keeton preferovány hodnoty celkového smrštění uvedené v článku [14].

Přehled všech experimentálních studií z NU databáze, které testovaly smrštění u vzorků různých velikostí při zachování shodných podmínek, je uveden v Tabulce 3. Ve sloupci „Poznámka“ je zmíněn důvod, proč některé vzorky příp. celé studie pro vyhodnocení vlivu velikosti betonového prvku na konečnou hodnotu smrštění nebyly vhodné.

Ke každé ze studií, jejíž výsledky byly využity v této práci, je v následující části uveden stručný popis.

Název studie	Vhodná data	Vzorků celk./použ.	Poznámka
Alexander	ne	4 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Asanuma	ne	8 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Bryant	ano	13 / 10	ukončené smrštění pouze u menších vzorků
Burg	ne	10 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Eguchi	ne	6 / 0	chybějící informace o experimentu
Hansen	ano	10 / 7	u největších vzorků smrštění neukončeno
Hilsdorf	ne	6 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Holt	ne	6 / 0	chybějící informace o experimentu
KasselProc	ne	9 / 0	vzorky stejného průřezu, různá jen délka
Keeton	ano	16 / 9	údaje převzaty z [14], v databázi jiné hodnoty
L'Hermite	ano	6 / 3	některé vzorky nevhodný poměr délky a šířky
Mamillan	ne	14 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Mazloom	ano	12 / 8	vyřazeny pouze zapečetěné vzorky
Nagataki	ne	14 / 0	vzorky ošetřovány autoklávováním
Numao	ne	4 / 0	chybějící informace o experimentu
Shritharan	ano	6 / 5	vyřazen pouze zapečetěný vzorek
Wallo 1	ne	26 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Wallo 2	ne	15 / 0	nedostatečná délka trvání experimentu
Wittmann	ano	3 / 3	největší vzorek nedokončené smrštění

Tabulka 3: Přehled experimentálních výzkumů z databáze na Northwestern University [12], které testovaly smrštění u vzorků více velikostí. Pro vyhodnocení závislosti konečné hodnoty smrštění na velikosti betonového vzorku byly použity pouze ty, které mají ve druhém sloupci uvedeno ano, ostatní musely být vyřazeny jako nevyhovující. Důvod, proč výsledky některých výzkumů nebylo možné použít, je uveden v posledním sloupci tabulky.

Bryant [6] (1987)

Výsledky Bryantova výzkumu byly kromě vyhodnocení vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění použity také v Kapitole 6 pro ověření a správné nastavení parametrů pokročilých materiálových modelů pro výpočet dotvarování a smršťování použitých při numerických simulacích v programu OOFEM.

Experimentální studie Bryant byla zaměřena především na dotvarování a smršťování u konstrukcí betonových mostů větších rozpětí. Použité vzorky reprezentovaly dva základní prvky mostních konstrukcí – desky a pilíře. Toho bylo dosaženo aplikací materiálu zabraňujícího úniku vlhkosti na různé stěny čtvercových hranolů - tzv. pečetěním. To bylo prováděno tak, aby vysychání probíhalo stejným způsobem jako u skutečných konstrukčních prvků. Model desky (používáno též značení S – slab) představovaly vzorky, u nichž byly pečetěny oba konce a dvě protilehlé stěny, výměna vlhkosti s okolním prostředím probíhala pouze dvěma zbývajících protilehlými stěnami. Model pilíře tvořily vzorky, u nichž byly proti vysychání chráněny pouze oba konce. V práci jsou označovány jako hranoly nebo pomocí písmene P (prism).

Všechny vzorky z této studie byly po vybetonování ponechány po dobu tří dní ve formách a zakryty vlhkou textilií. Následně byly odformovány, potřebné části zapečetěny a přemístěny do kontrolované komory s teplotou 20 °C a s vlhkostí vzduchu 95 %. Osmý den byla vlhkost jednotně snížena na hodnotu 60 %. Zatěžování vzorků pro měření dotvarování pak probíhalo v různém stádiu, první série byla zatížena hned 8. den společně s počátkem vysychání.

Pečetění vybraných stěn vzorků desek a hranolů, stejně jako celých vzorků určených pro měření autogenního smrštění a základního dotvarování, bylo provedeno pomocí hliníkové folie tl. 0,035 mm. Bohužel však v průběhu experimentu došlo u plně zapečetěných vzorků k prokorodování izolační fólie. Změřená data smrštění zapečetěných vzorků tedy nebylo možné považovat pouze za složku způsobenou autogenním smrštěním a nebylo vhodné je využít pro dopočet smrštění pouze od vlivu vysychání. Pro vyhodnocení proto byly použity raději údaje o celkovém smrštění. S ohledem na použitou recepturu betonové směsi se nejedná o velké zkreslení, jelikož u betonů běžných pevností s vodním součinitelem minimálně 0,4 tvoří smrštění od vysychání zcela dominantní složku smrštění celkového.

Hansen [10] (1966)

Tento výzkum byl přímo zaměřen na vliv velikosti prvku a jeho tvaru na hodnoty smrštění a dotvarování během vysychání. Potřebám této práce vyhovovaly válcové vzorky sedmi různých průměrů, přičemž hodnoty smrštění byly měřeny vždy na délce odpovídající dvojnásobku průměru daného vzorku. Válcové vzorky shodné velikosti byly umístovány nad sebe do sestav po třech kusech. Všechny vzorky byly 8. den vystaveny vysychání při relativní vlhkosti prostředí 50 %. Výměna vlhkosti s okolním prostředím probíhala u všech vzorků pouze pláštěm, koncové průřezy sestav byly chráněny pečetěním. Doprovodné vzorky pro měření velikosti autogenního smrštění a základního dotvarování byly

Název studie	Rok	Zdroj dat	Tvar	Pečet. konců	$D = 2V/S$ [mm]	t_0 [den]	a/c [-]	c [kg/m ³]	w/c [-]	$\bar{f}_c$ [MPa]	E_{28} [GPa]	RH [%]	t_{end} [den]
Bryant S	1987	[6, 12]	deska	ano	100 - 400	8	5,09	390	0,47	50,0	29,8	60	1 950
Bryant P	1987	[6, 12]	hranol	ano	50 - 200	8	5,09	390	0,47	50,0	29,8	60	1 880
Hansen	1966	[12]	válec	ne	46 - 252	8	6,00	303	0,71	41,3	27,7	50	1 750
Keeton 20	1965	[14]	válec	ne	33 / 44 / 65	8	3,74	452	0,46	46,5	24,5	20	897
Keeton 50	1965	[14]	válec	ne	33 / 44 / 65	8	3,74	452	0,46	47,5	25,5	50	897
Keeton 75	1965	[14]	válec	ne	33 / 44 / 65	8	3,74	452	0,46	46,8	25,9	75	897
L'Hermite	1970	[12]	hranol	ne	31 - 311	1	5,06	350	0,51	NA	NA	55	699
Mazloom A	2004	[12]	válec	ne	35 / 60	7	3,70	500	0,35	58,0	34,4	50	586
Mazloom B	2004	[12]	válec	ne	35 / 60	7	3,94	470	0,37	65,0	35,5	50	586
Mazloom C	2004	[12]	válec	ne	35 / 60	7	4,11	450	0,39	67,5	37,0	50	586
Mazloom D	2004	[12]	válec	ne	35 / 60	7	4,35	425	0,41	70,0	38,1	50	586
Samouh I	2017	[19]	válec	ano	39 / 57 / 82	1	4,89	320	0,59	49,6	38,2	50	300
Samouh II	2017	[19]	válec	ano	39 / 57 / 82	1	6,03	258	0,74	32,6	33,6	50	300
Shritharan	1989	[12]	hranol	ne	44 - 178	8	5,09	393	0,47	50,1	29,8	60	3 492
Wittmann	1991	[12]	válec	ne	33 / 64 / 120	7	5,43	350	0,48	33,2	36,3	65	1 105

Tabulka 4: Základní parametry experimentů použitých pro vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění. Každý řádek tabulky představuje jednu skupinu (minimálně dvou) vzorků různých velikostí, ale stejných parametrů. Informace o pečeti konců proti vysychání u experimentů, jejichž výsledky byly převzaty pouze z NU databáze [12], byla určena na základě vztahu mezi uvedenou velikostí vzorku a hodnotou D . V databázi tato informace přímo uváděna není.

pečetěny pomocí vosku a kovové folie. Stejným způsobem byly pečetěny i zmíněné konce vzorků v sestavách. Pro vyhodnocení bylo v případě tohoto výzkumu možné použít přímo údaje o smrštění od vlivu vysychání, použity byly hodnoty uvedené v NU databázi [12].

Keeton [14] (1965)

Jedná se o nejstarší z výzkumů prezentovaných v této práci, výsledky byly publikovány již v roce 1965. Experimentální studie Keeton testovala v několika fázích různé typy vzorků. Pro tuto práci byla vhodná pouze část výzkumu, v rámci které bylo měřeno dotvarování a smršťování na válcových vzorcích tří velikostí vystavených vysychání při relativní vlhkosti okolního prostředí 20, 50 a 75 %. Vzorky byly po vybetonování ponechány 24 hodin ve formách, následně byly po dobu 7 dní skladovány při relativní vlhkosti 100 %. Vysychání vzorků započalo ve stáří 8 dní.

Pečetění konců vzorků nebylo provedeno, vysychání bylo umožněno celým povrchem. Ani doprovodné nevysychající vzorky u této studie nebyly pečetěny, byly přímo ponořeny ve vodě, díky čemuž docházelo k jejich bobtnání a získané údaje nebyly vhodné pro dopočet hodnot smrštění od vlivu vysychání. Stejně jako u experimentální studie Bryant byly proto i v tomto případě jako hodnoty smrštění od vysychání použity hodnoty celkového smrštění uvedené v publikovaném článku.

L'Hermite (1970)

Vzorky z této studie byly pro účely této práce vybrány a vyhodnoceny pouze na základě informací uvedených v NU databázi. Pro vhodnou část výzkumu se nepodařilo dohledat publikovaný článek, ve kterém by bylo možné údaje ověřit, databáze však v tomto případě poskytla všechny nezbytné údaje.

Smrštění bylo měřeno na hranolových vzorcích různých velikostí s počátkem vysychání ve stáří již jednoho dne. Pro tuto práci byly vhodné vzorky čtyř různých velikostí vyrobené ze stejné záměsi. Výměna vlhkosti s okolním prostředím o relativní vlhkosti 55 % probíhala celým povrchem vzorků, konce nebyly pečetěny.

Nebyly k dispozici údaje z nevysychajících vzorků, proto byly opět použity hodnoty celkového smrštění.

Mazloom (2004)

I v případě tohoto experimentu byly k dispozici pouze údaje uvedené v NU databázi. Ta obsahovala hodnoty smrštění vzorků s různým složením betonové směsi. Pro každou recepturu se vždy jednalo o dvojici válcových vzorků s průměrem 80 a 150 mm.

Z údajů v databázi nebylo zřejmé, jakým způsobem byly vytvořeny a uchovávány vzorky pro zjištění velikosti autogenního smrštění, proto byly použity raději hodnoty celkového smrštění bez očištění o složku smrštění autogenního. Vysychání vzorků při vlhkosti 50 % začalo ve stáří 7 dní, délka trvání experimentu byla jednotně zhruba 590 dní.

Shritharan (1989)

Jedná se o další z výzkumů, u nichž bylo nutné vycházet pouze ze základních údajů uvedených v NU databázi. Pro vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění byly k dispozici údaje o celkovém smrštění hranolů pěti různých velikostí se stejnou recepturou betonové směsi. Od stáří 8 dní byly vzorky vystaveny prostředí s relativní vlhkostí 60 %, vysychání bylo umožněno celým povrchem.

Informace o autogenním smrštění byly k dispozici pouze pro jednu velikost hranolu, změřené hodnoty však byly ve srovnání s celkovým smrštěním zanedbatelné (viz průběhy smrštění zapečetěného vzorku na levém grafu Obrázku 7). Délka sledování nevysychajícího vzorku byla navíc kratší než u vzorků na celkové smrštění. Opět nebyly k dispozici žádné upřesňující informace o způsobu pečetění či uchovávání vzorku pro autogenní smrštění, proto byly pro vyhodnocení použity raději hodnoty celkového smrštění.

Velkou výhodou tohoto experimentu byla dostatečná délka trvání, měření probíhala po dobu téměř 10 let, díky čemuž bylo u všech vzorků dosaženo konečných hodnot smrštění.

Wittmann (1991)

Tento výzkum uvedený v NU databázi poskytl možnost vyhodnocení vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění u válcových vzorků tří různých velikostí. Vysychání při 65% relativní vlhkosti probíhalo od stáří 7 dní celým povrchem, délka sledování všech vzorků byla 1 105 dní.

Ani v tomto případě se nepodařilo dohledat publikovaný článek, proto bylo opět nutné vycházet pouze z informací obsažených v NU databázi. K dispozici byly pouze hodnoty celkového smrštění.

3.2 Experimentální data z publikovaných článků

Skupina vhodných experimentů vybraných z NU databáze byla rozšířena ještě o výsledky studie Samouh [19] publikované v roce 2017.

Samouh [19] (2017)

Experimentální výzkum Samouh testoval vliv velikosti vzorku na hodnotu smrštění od vysychání u tří receptur samozhutnitelného betonu. Jednotlivé receptury se lišily množstvím vápence, který nahrazoval část portlandského slínku. Ve všech případech byly testovány válcové vzorky o průměru 78, 113 a 163 mm.

Měření probíhala pouze po dobu 300 dní, přesto však v případě dvou receptur dospěly vzorky do fáze výrazného zpomalení nárůstu hodnot smrštění a výsledky bylo možné použít pro zhodnocení vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání v této práci.

Článek neuvádí konkrétní hodnoty smrštění získané během experimentu, poskytuje pouze grafické vyjádření časového průběhu smrštění a dotvarování. Potřebná data proto byla získána digitalizací prezentovaných grafů.

3.3 Vyhodnocení experimentálních dat

Experimentální vyhodnocení závislosti konečné hodnoty smrštění na velikosti betonového vzorku bylo provedeno na základě 51 vzorků z celkem 8 výše popsaných experimentálních výzkumů. Z těchto vzorků bylo možné vytvořit celkem 15 skupin. V každé skupině se vzorky odlišovaly pouze svou velikostí, případně tvarem, všechny ostatní parametry byly shodné. Jednotlivé skupiny jsou na Obrázku 8 odlišeny barevně. Základní parametry vyhodnocovaných skupin vzorků jsou shrnuty v Tabulce 4.

U většiny vzorků bylo možno poslední změřenou hodnotu považovat skutečně za konečnou hodnotu smrštění. V grafech jsou tyto vzorky vyznačeny plnou značkou. Ve vyhodnocení bylo ponecháno i několik vzorků, u kterých konečné hodnoty smrštění během sledovaného období dosaženo nebylo, ale došlo alespoň ke znatelnému zpomalení nárůstu hodnot smrštění. Těmto vzorkům odpovídají v grafech nevyplněné značky.

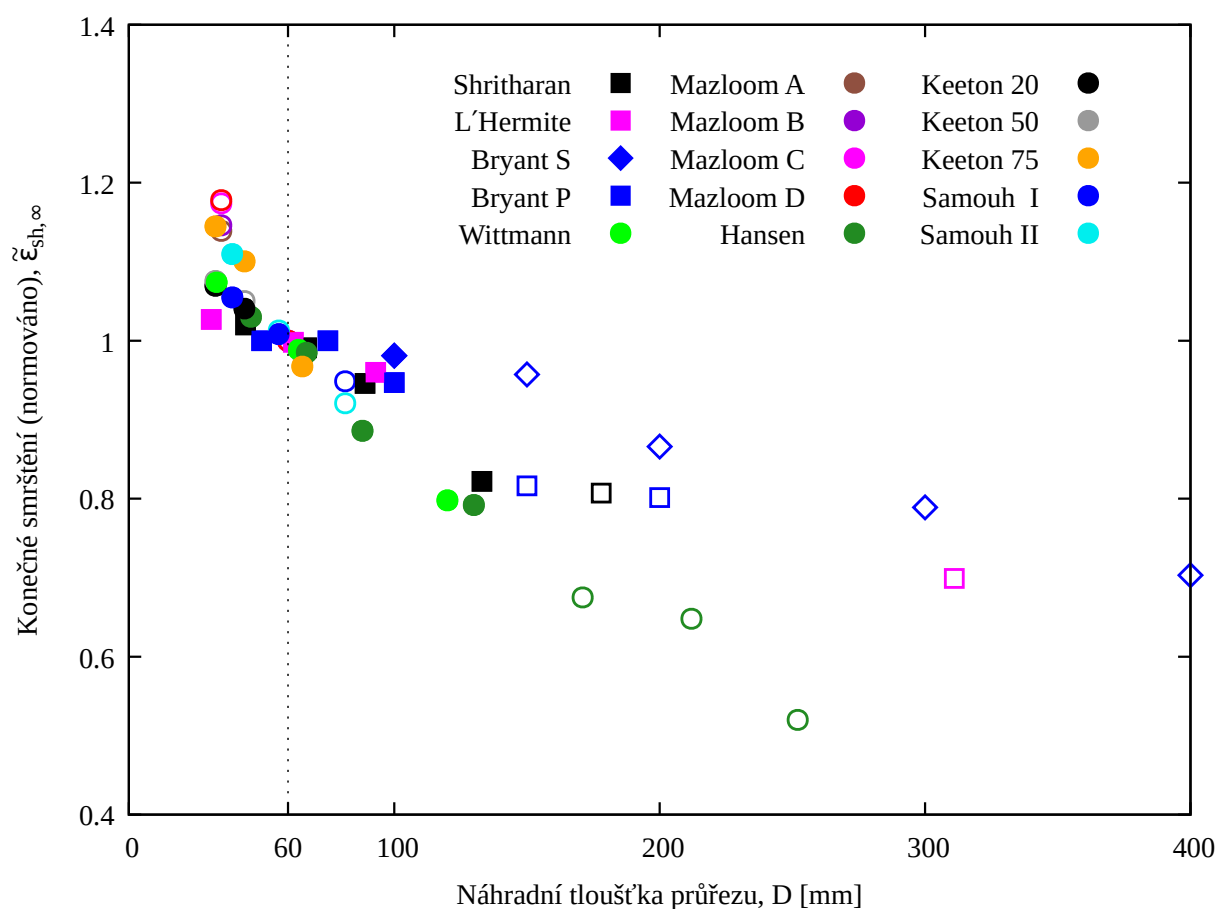
Vzorky s ne zcela ukončeným vývojem smrštění byly ve vyhodnocení ponechány, aby poskytly alespoň částečnou představu o výsledcích pro prvky větších velikostí. Pro vzorky s $D \geq 100$ mm je totiž k dispozici jen velmi malé množství plnohodnotných experimentálních dat.

Nakolik se poslední změřený údaj přiblížil konečné hodnotě smrštění bylo posuzováno pouze vizuálně z vykreslených průběhů smrštění. Lépe by bylo možné míru dosažení konečného smrštění posoudit, pokud by u jednotlivých vzorků byly k dispozici kromě údajů o průběhu smrštění i informace o ztrátě vody nebo rozložení relativní vlhkosti. Tyto informace však u žádného z experimentálních výzkumů shromážděných v NU databázi [12] nejsou k dispozici.

Pro možnost vzájemného porovnání byly konečné hodnoty smrštění jednotně normovány vůči hodnotě odpovídající prvku s velikostí $D = 60$ mm. Vzorek této nebo blízké velikosti byl až na jedinou výjimku (desky experimentu Bryant) použit ve všech experimentálních výzkumech. U výzkumů, v nichž nebyl zastoupen přímo vzorek velikosti $D = 60$ mm, byla příslušná hodnota určena lineární interpolací mezi dvěma nejbližšími daty.

Pouze v případě modelů desek u Bryantova výzkumu bylo nutné hodnotu smrštění vzorku velikosti $D = 60$ mm určit extrapolací dat z větších vzorků, jelikož nejmenší z této skupiny byla deska tloušťky 100 mm ($D = 100$ mm). To mohlo způsobit mírné zkreslení výsledků tohoto experimentu. Trend patrný z ostatních výsledků ukazuje, že u větších vzorků je míra ovlivnění konečné hodnoty smrštění velikostí prvku o něco slabší než u velmi malých vzorků s velikostí $D < 100$ mm. Extrapolace byla provedena z dat vzorků o velikosti $D = 100$ mm a $D = 150$ mm, navíc u většího z nich bylo dosaženo smrštění o něco větší, než by se dalo očekávat s ohledem na ostatní vzorky v této skupině. To může být jednou z příčin, proč výsledky tohoto experimentu leží v grafu na Obrázku 8 ve srovnání s ostatními experimentálními daty o něco výš.

U experimentu L'Hermite se zdá být redukce smrštění v závislosti na velikosti vzorku o něco slabší, pomyslná křivka spojující body (ružové čtverečky) tohoto experimentu je

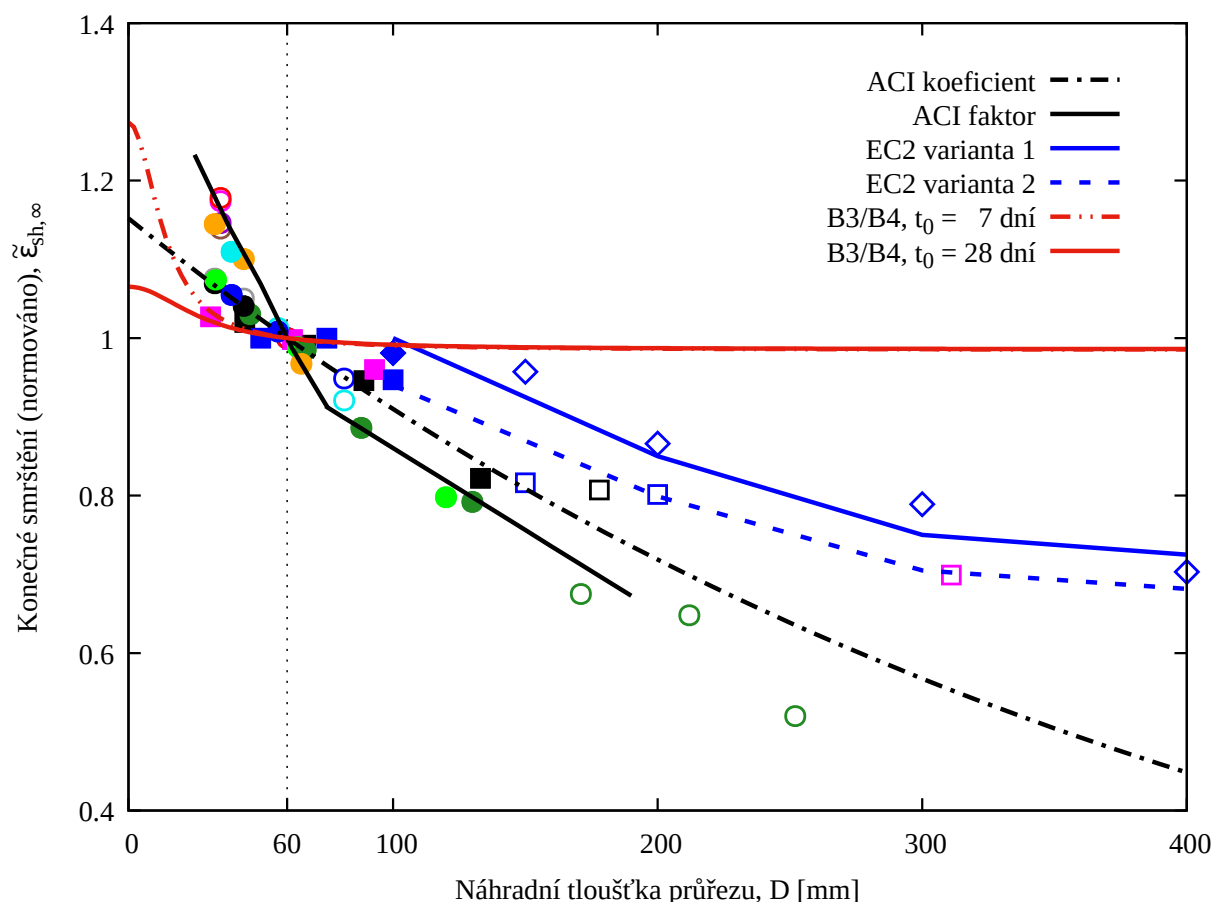


Obrázek 8: Vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění vyhodnocený na základě dat z převzatých experimentálních výzkumů. Velikost vzorků je vyjádřena pomocí náhradní tloušťky průřezu D . V grafu jsou vyneseny společně výsledky všech experimentů shrnutých v Tabulce 4. Poslední změřené hodnoty smrštění byly jednotně normovány vůči hodnotě pro $D = 60$ mm. Plné značky zobrazují vzorky, u kterých lze poslední změřenou hodnotu smrštění považovat za konečnou, prázdné značky náleží vzorkům, u kterých konečných hodnot smrštění během trvání experimentu dosaženo nebylo. Použité značky zároveň označují tvar vzorků použitých při experimentu, kolečko pro válcové vzorky, čtvereček pro hranoly.

při srovnání s ostatními méně strmá. Není zřejmé, čím mohl být tento jev způsoben. Jedno z možných vysvětlení je raný počátek vysychání spolu s tím, že k dispozici byly pouze údaje o celkovém smrštění. Počátek vysychání byl u tohoto experimentu již ve stáří 1 dne, naměřené hodnoty mohly být proto více ovlivněny složkou autogenního smrštění.

4 Srovnání výpočetních modelů s experimenty

Ze vzájemného porovnání teoretických výpočtů s výsledky experimentů na Obrázku 9 je zřejmé, že pouze v případě Eurokódu 2 [21] a americké normy ACI 209.2R-08 [1] je ve výpočtu uvažován správný trend, jakým se narůstající velikost prvku projevuje na redukci konečné hodnoty poměrného smrštění.



Obrázek 9: Srovnání norem a predikčních modelů s výsledky experimentálních výzkumů. Výsledné hodnoty smrštění byly normovány vůči hodnotě, která odpovídá vzorku s velikostí $D = 60$ mm. U Eurokódu 2 odpovídá varianta 1 případu, kdy je na intervalu $0 \text{ mm} < D < 100 \text{ mm}$ uvažována hodnota součinitele $k_h = 1,0$, u varianty 2 byla hodnota tohoto součinitele určena extrapolací z hodnot definovaných pro interval $100 \text{ mm} < D < 200 \text{ mm}$.

Naopak oba predikční modely tento fakt zcela (*fib* Model Code 2010 [9]) nebo téměř zcela (modely B3 [5] a B4 [18]) zanedbávají. Přitom právě predikční modely jsou považovány za vhodnější a přesnější nástroj pro predikci smrštění a dotvarování. Navíc při jejich použití je mnohdy ověření výpočtu na výsledcích krátkodobých měření do-

poručováno.

Redukce hodnot smrštění podle normy **ACI 209** [1] se u velkých prvků jeví výraznější, než jak ukazují výsledky experimentů. Pro malé vzorky vymezují křivky ACI určené podle obou možných přístupů pomyslnou oblast, ve které leží výsledky téměř všech vyhodnocených experimentů.

V případě **Eurokódu 2** [21] je značnou komplikací fakt, že pro vzorky s velikostí $D < 100$ mm není nijak definována hodnota součinitele k_h , kterým je při výpočtu smrštění velikost prvku zohledňována. Kvůli normování však bylo nutné tuto hodnotu uměle dopočítat. Byly použity dva způsoby pro určení teoretické hodnoty součinitele k_h odpovídající velikosti vzorku $D = 60$ mm, žádný z těchto způsobů však není v normě doporučen. Plnou modrou čarou je zakreslen případ, který sice méně odpovídá realitě, ale jeví se jako správnější. Velikost součinitele je pro prvky s $D < 100$ mm uvažována hodnotou 1,0, což je totéž, jako kdyby byl tento součinitel ze vztahu (9) pro prvky, pro něž není definován, zcela odebrán.

Při druhém způsobu byla hodnota součinitele k_h určena extrapolací z nejbližšího intervalu. Tato varianta mnohem lépe odpovídá tomu, jak se velikost prvku ve skutečnosti na výsledném smrštění projevuje, je tím však do výpočtu vnášen větší vliv, než jaký mohl být tvůrci normy zamýšlen.

Hodnotit správný předpoklad této normy pouze na vzorcích větších rozměrů je velmi diskutabilní, jelikož experimentů, u nichž by byla délka sledování natolik dlouhá, aby došlo k dosažení konečné hodnoty smrštění, je naprosté minimum (pouze vzorky zakreslené plnou značkou). Obecně však lze konstatovat, že základní princip, jakým současná evropská norma alespoň u větších vzorků vnáší do výpočtu vliv velikosti vzorku na výslednou hodnotu smrštění, je správný. Není proto jasné, proč v plánované nové verzi Eurokódu 2 [8] má být tento vliv při výpočtu konečné hodnoty smrštění zanedbán.

5 Měření smrštění hranolů z cementové malty

V této kapitole jsou ukázány výsledky experimentu provedeného ve spolupráci s Experimentálním centrem ČVUT, v rámci něhož bylo měřeno smrštění na maltových vzorcích různých velikostí.

V době dokončení této práce nebyl probíhající experiment ukončen, sledování vzorků stále pokračuje, prezentovány jsou výsledky vyhodnocené z údajů naměřených v období od 23. 8. 2019 do 5. 1. 2020 (135 dní).

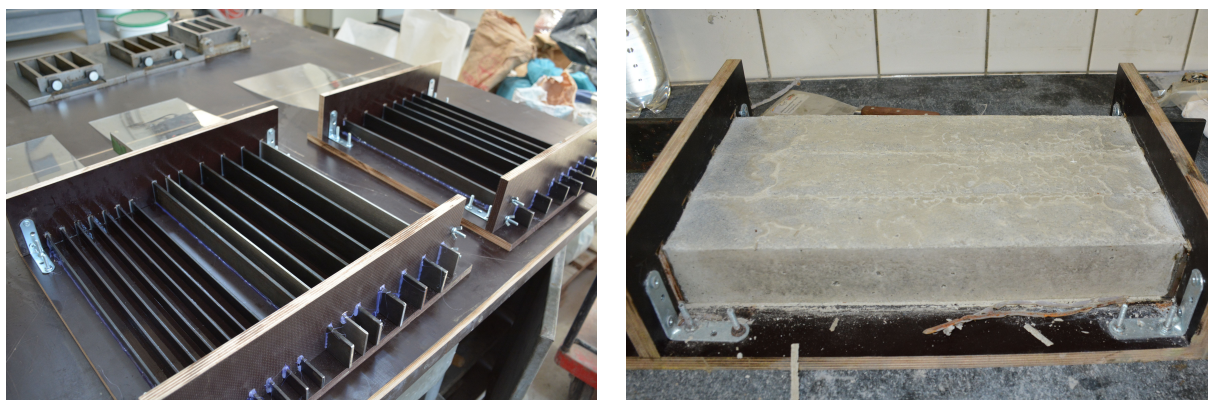
5.1 Popis experimentu

Pro přípravu cementové malty s vodním součinitelem 0,45 byl použit cement CEM II 32,5 B-S (portlandský směsný cement s obsahem vysokopecní strusky v množství 21 – 35 %), drobné kamenivo (písek) s frakcemi 0,08–0,5, 0,5–1 a 1–2 v poměru 1 : 1 : 1. Celkové zastoupení kameniva vůči cementu činilo 3 : 1.

Bylo vyrobeno 26 hranolových vzorků osmi různých průřezů s jednotnou délkou 400 mm, na kterých bylo prováděno měření smrštění. Pro vyjádření velikosti těchto vzorků byla použita náhradní tloušťka průřezu tak, jak ji definuje model B3 (vztah (1)). V případě hranolů čtvercového průřezu se zapečetěnými konci je náhradní tloušťka průřezu rovna polovině tloušťky příčného řezu.

Kromě vzorků pro sledování deformací bylo vytvořeno ještě 15 dalších doprovodných těles určených pro stanovení pevnostních charakteristik.

Celkem bylo vyrobeno 41 vzorků blíže specifikovaných v Tabulce 5.



Obrázek 10: Pro účely experimentu bylo vyrobeno bednění pro vzorky různých velikostí s jednotnou délkou 400 mm (vlevo). Odbednění vzorků ve stáří 31 dní (vpravo).

Po vybetonování (23. 7. 2019) byly všechny vzorky chráněny proti vysychání igelitovou folií a vlhkou textilií. Druhý den po ztuhnutí byly standardním způsobem ošetřeny vodou, textilie byla na vzorcích ponechána a vzorky, stále ještě ve formách, byly pečlivě zabaleny do několika vrstev igelitové folie. Takto byly přemístěny do uzavřené kádě s téměř

Rozměry vzorku [mm]	D [mm]	Celkem [ks]	Měření v rámu [ks]	Ruční měření [ks]	Pevnostní char. [ks]
20 × 20 × 400	10	6	2	4	-
20 × 40 × 400	13,3	2	1	1	-
30 × 30 × 400	15	4	1	3	-
30 × 60 × 400	20	2	1	1	-
40 × 40 × 400	20	4	3	1	-
50 × 50 × 400	25	3	1	2	-
60 × 60 × 400	30	3	1	2	-
100 × 100 × 400	50	5	1	1	3
40 × 40 × 160	-	9	-	-	9
Válce 100 × 200	-	3	-	-	3
Celkem	-	41	11	15	15

Tabulka 5: Přehled vzorků provedeného experimentu. Náhradní tloušťka průřezu D byla určena dle vztahu (1) používaného v modelu B3. V případě hranolů čtvercového průřezu se zapečetěnými konci je náhradní tloušťka průřezu rovna polovině tloušťky příčného řezu.

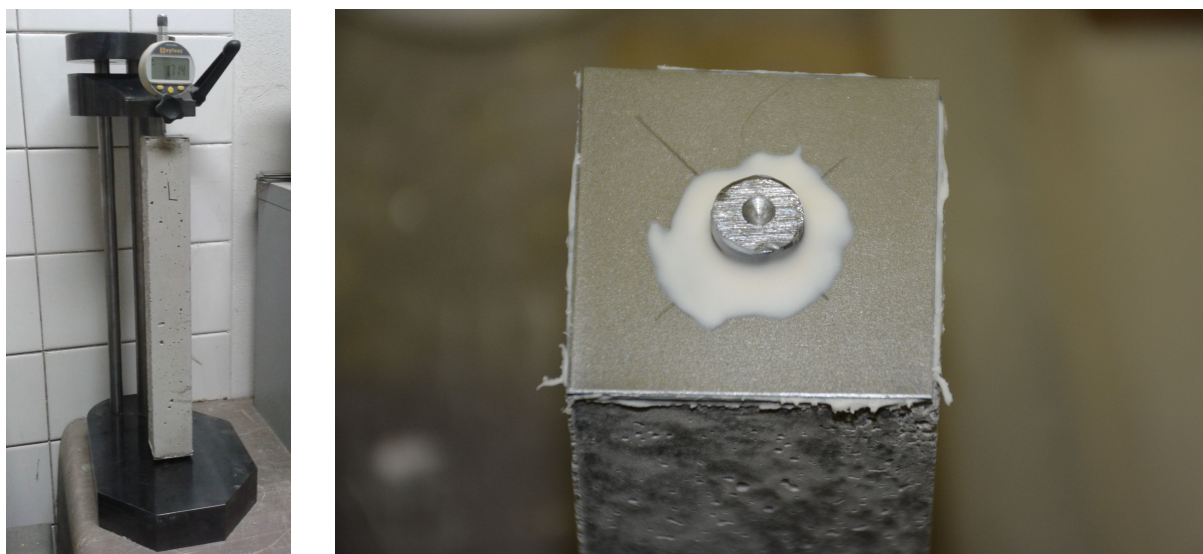
konstantními podmínkami, kde byly uchovávány dalších 30 dní. Při uložení vzorků byla v kádi vlhkost vzduchu 96% a teplota 21 °C, rozptyl hodnot během skladování vzorků byl zanedbatelný.

Všechny vzorky byly vyjmuty z forem ve stáří 31 dní (23. 8. 2019). Povrch hranolů byl jen mírně zavlhlý. Vzorky v krajních pozicích forem se zdály být o něco sušší než vzorky ve střední části, jejich povrch byl mírně světlejší. U hranolů určených k měření smrštění byly pomocí speciálního lepidla a ocelových plíšků zapečetěny konce proti vysychání a upraveny pro možnost správného umístění do měřicích zařízení (Obrázek 11 vpravo). S výjimkou zapečetěných konců bylo vysychání umožněno celým zbývajícím povrchem.

Časová prodleva mezi vyjmutím vzorků z formy a prvním měřením délky se pohybovala v rozmezí 1 až 2 hodin. Snahou bylo minimalizovat tuto dobu zejména u nejmenších vzorků.

U každého vzorku byla zaznamenána i hmotnost. První vážení proběhlo po vyjmutí z forem, další po potřebné úpravě konců před prvním ručním měřením či usazením do měřicího rámu.

Celkem 15 vzorků bylo určeno k ručnímu měření. Délka těchto vzorků byla pravidelně měřena na ocelovém měřicím stojanu s polohovatelným ramenem (viz Obrázek 11,



Obrázek 11: Ruční měření vzorku na stojanu s digitálním úchylkoměrem (vlevo), detail koncování vzorku pro ruční měření (vpravo), prohlubeň zajišťovala přesnou polohu při opakovaném usazování vzorku do stojanu.

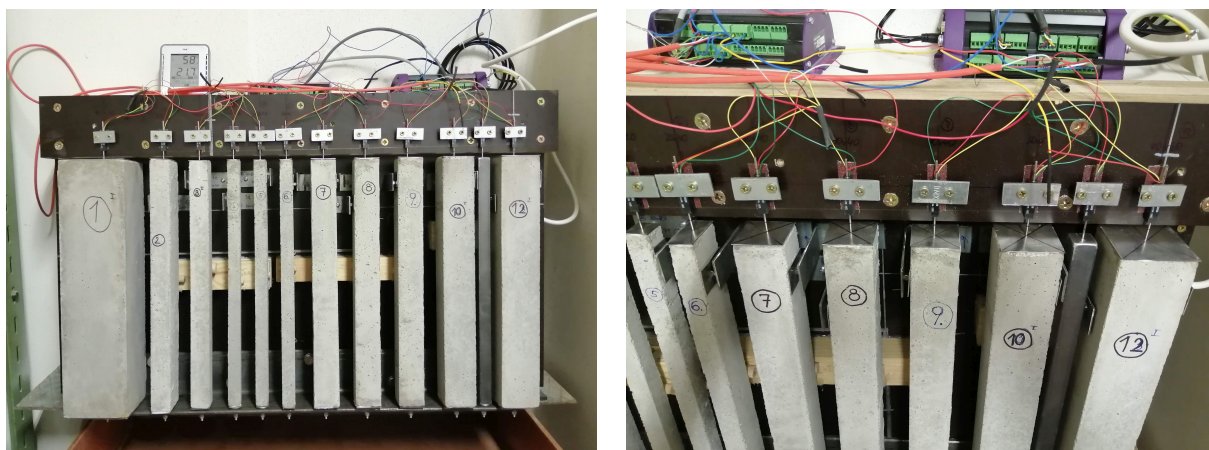
snímek vlevo), do kterého byl uchycen digitální úchylkoměr Sylvac s rozlišením 0,001 mm a pracovním rozsahem 12 mm. Kromě vlastních vzorků bylo prováděno i měření kovového a dřevěného etalonu. Díky tomu, že byla zvolena jednotná délka vzorků i etalonů 400 mm, bylo možné ponechat rameno měřicího stojanu po celou dobu v jedné pevné poloze a eliminovat riziko možných chyb způsobených jeho manipulací.

Dalších 11 vzorků bylo po vyjmutí z forem a úpravě konců umístěno do předem připraveného rámu a osazeno lineárními potenciometrickými snímači MEGATRON – MMR10-12 s měřicím rozsahem 12 mm. Snímače byly připojeny na měřicí ústřednu dataTaker® DT80G Series 4 Data Logger doplněnou o expanzní modul dataTaker® CEM20, který umožnil zvýšení počtu vstupních kanálů. Deformace těchto vzorků byly měřeny automaticky, po prvotním osazení hranolů do měřicího rámu (viz Obrázek 12) již nebylo potřeba s nimi jakkoli manipulovat. Ukládání dat ze snímačů bylo prováděno s intervalem 15 minut, data byla zaznamenávána s přesností 0,1 μm .

Kromě maltových vzorků různých velikostí byl na rámu umístěn i ocelový etalon, který poskytl kontrolní měření a zároveň sloužil pro kompenzaci teplotních změn či chyb způsobených případnou deformací rámu.

Měření etalonu na měřicím rámu probíhalo již před počátkem umisťování maltových vzorků, cílem bylo postihnout drobné deformace rámu způsobené zatížením od jednotlivých vzorků. U každého z hranolů kontinuálního měření byla data zaznamenávána ihned po umístění do měřicího rámu. Přesto však muselo být první čtení pro všechny vzorky vztaženo až k okamžiku po usazení posledního vzorku. Během manipulace při postupném

usazování hranolů totiž nebylo možné zamezit kontaktu a drobnému posunu již usazených vzorků či samotného etalonu.



Obrázek 12: Měřicí rám vyrobený pro automatické měření deformací vzorků během jejich vysychání. Vzorky byly odsazeny od zadní stěny rámu, aby byl umožněn dostatečný přístup vzduchu ke všem jejich stěnám, podepřeny byly pomocí dřevěných válečků, aby nebylo žádným způsobem bráněno jejich deformaci při vysychání. Na boční stěnu v horní části každého vzorku byl nalepen plíšek, který spolu s malým válcovým magnetem zajišťoval boční vedení při smršťování.

Pro tento experiment, který probíhal na půdě Fakulty stavební ČVUT v Praze, nebyla k dispozici žádná speciální komora, kde by bylo možné pro vzorky zajistit konstantní vlhkostní a teplotní podmínky, proto byly údaje o teplotě a vlhkosti vzduchu pravidelně zaznamenávány.

Teplota vzduchu byla během experimentu zaznamenávána kontinuálně, pohybovala se v rozmezí $13 - 25^{\circ}\text{C}$ s průměrem $19,2^{\circ}\text{C}$. Deformaci vzorků vlivem teplotní roztažnosti bylo možné při vyhodnocení kompenzovat buď počteně z údajů o teplotě nebo přímo pomocí naměřených hodnot deformace kovového etalonu, což byla nakonec preferovaná metoda. Zcela záměrně byla jako materiál zvolena ocel, která má součinitel teplotní roztažnosti téměř shodný s betonem.

Údaje o relativní vlhkosti vzduchu nebyly zapisovány kontinuálně, ale pouze spolu s prováděním ručního měření vzorků. V okamžiku počátku vysychání byla relativní vlhkost prostředí rovna 58 %. Během prvních 100 dní se pohybovala v rozmezí 51 – 73 %, později došlo k jejímu poklesu, posledních 30 dní se pohybovala kolem hodnoty 40 %. Průměr za dobu trvání experimentu činil 61 %.

Kromě deformací byla u ručně měřených vzorků pravidelně (vždy spolu s měřením deformací) zaznamenávána i jejich hmotnost. Vzorky umístěné v rámu nebylo možné vážit pravidelně, hmotnost každého z nich byla zaznamenána před usazením do rámu a celkový úbytek hmotnosti bude vyhodnocen až po skončení experimentu.

Z měření na doprovodných tělesech byla ve stáří 33 dní stanovena válcová tlaková pevnost betonu 33,9 MPa a modul pružnosti 40,9 GPa. Uvedené hodnoty byly určeny jako průměr z výsledků všech provedených zkoušek.

5.2 Vyhodnocení experimentu

Výsledky, které jsou zde prezentovány, byly vyhodnoceny na základě experimentálních dat získaných v období od 23. 8. 2019 (počátek vysychání) do 5. 1. 2020.

Kompenzace teplotních vlivů nebyla prováděna početně podle známého průběhu teploty, ale pomocí etalonů, které byly součástí jak ručního, tak i automatického měření. U obou způsobů měření byl k dispozici ocelový hranol délky 400 mm, u ručně měřených vzorků navíc ještě dřevěný hranol stejné délky. Tento způsob kompenzace teploty byl zvolen zejména proto, že ani u ocelového, ani u dřevěného etalonu neodpovídaly změřené deformace těm, které byly spočteny pouze od vlivu teploty. Lze předpokládat, že kromě vlastní teplotní roztažnosti etalonu jsou v jeho deformaci obsaženy i další vlivy, jako například vliv teploty na měřicí zařízení, chyby vzniklé při manipulaci se stojanem pro ruční měření, apod.

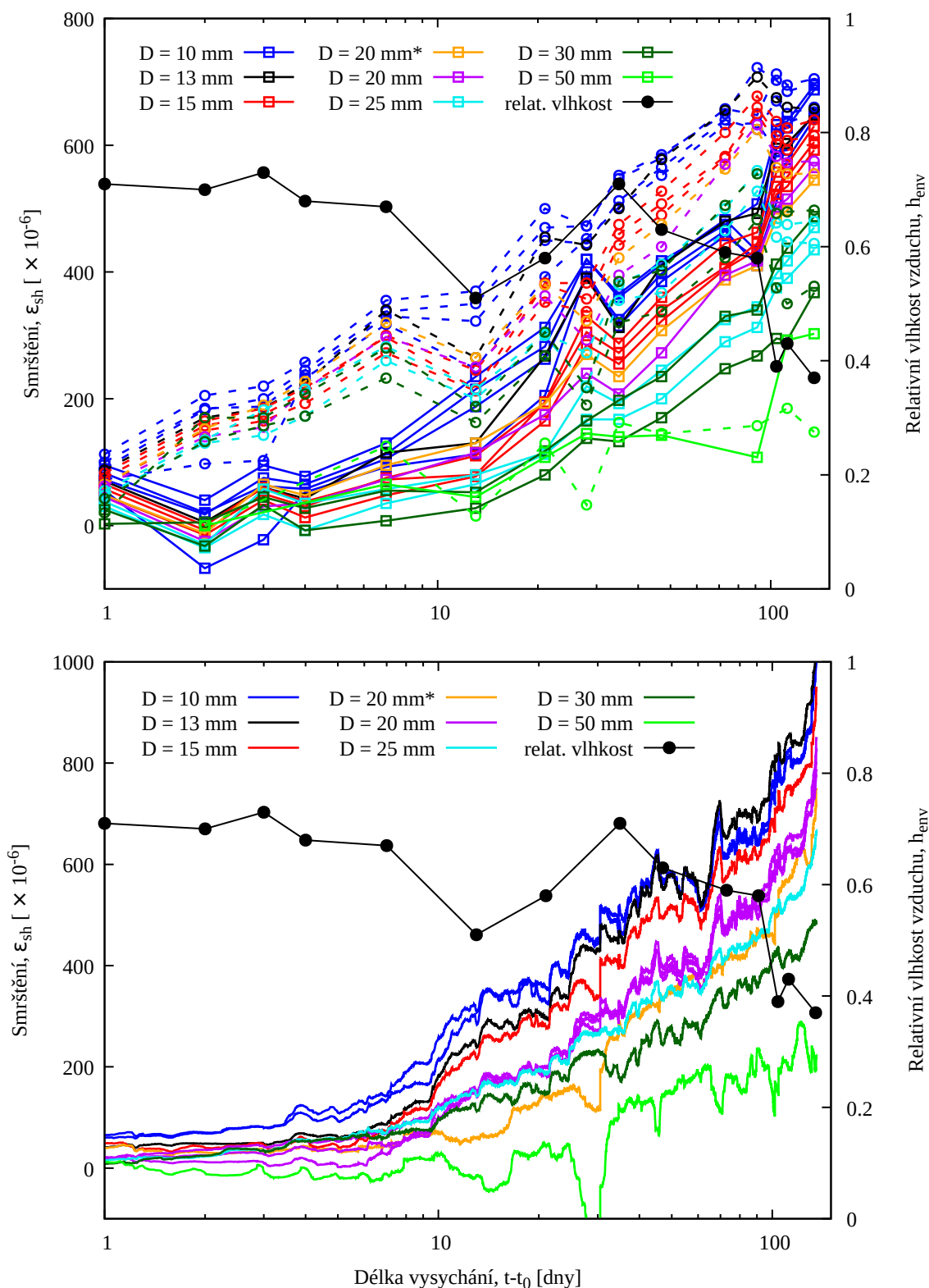
Grafy na Obrázku 13 ukazují vývoj smrštění všech sledovaných vzorků. V horním grafu jsou zakresleny výsledky ručně měřených hranolů, dolní graf patří hranolům kontinuálně měřeným v rámu. Pro vyhodnocení ručně naměřených dat byly použity (samostatně) oba etalony. Symbol kolečka v horním grafu odpovídá případu použití dřevěného etalonu, body jsou spojeny přerušovanou čarou. S použitím plné čáry a symbolu čtverečku jsou zobrazeny výsledky získané s použitím ocelového etalonu.

Více vzorků shodného průřezu je vykresleno vždy jednou barvou. Zvolené barvy odpovídají jednotlivým velikostem vzorků konzistentně ve všech společných grafech této kapitoly.

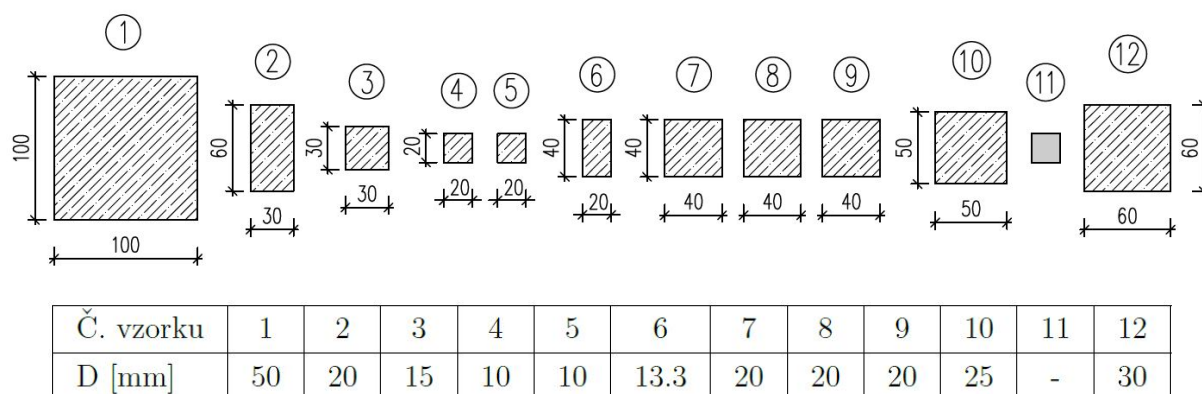
Náhradní tloušťce průřezu $D = 20$ mm odpovídaly dva typy vzorků, které bylo vhodné v grafech odlišit. Pro obdélníkový průřez 30×60 mm (v legendách označen hvězdičkou) byla použita oranžová barva, pro čtvercový průřez 40×40 mm barva fialová.

V průbězích smrštění **kontinuálně měřených vzorků** (viz dolní graf na Obrázku 13) jsou patrné krátkodobé výkyvy. Nejvýraznější jsou u největšího vzorku 100×100 mm. Není zřejmé, čím byly způsobeny, lze však vysledovat určitou závislost mezi polohou vzorku na rámu a zjištěnou výchylkou. Rozmístění hranolů v měřicím rámu je ukázáno na Obrázku 14. Zdá se, že umístění jednotlivých vzorků ve vztahu k poloze největšího z nich, mělo pravděpodobně dopad na velikost a orientaci krátkodobých výchylek zaznamenaných během měření.

Při vyhodnocení **ručně měřených vzorků** byly získány mírně odlišné průběhy smrštění v závislosti na tom, ke kterému etalonu byla naměřená data vztažena. Mezi oběma systémy křivek na horním grafu Obrázku 13 je zřejmý určitý posun, více patrný v počáteční fázi.



Obrázek 13: Vývoj smrštění ručně měřených vzorků (horní graf) a vzorků kontinuálně měřených v rámu (dolní graf). V horním grafu patří čtvercové značky spojené plnou čarou, resp. kulaté značky spojené přerušovanou čarou hodnotám vyhodnoceným vůči ocelovému, resp. dřevěnému etalonu. Symbol * označuje hranol s průřezem 30×60 mm. Vzorky shodných rozměrů jsou vykresleny vždy jednotnou barvou.

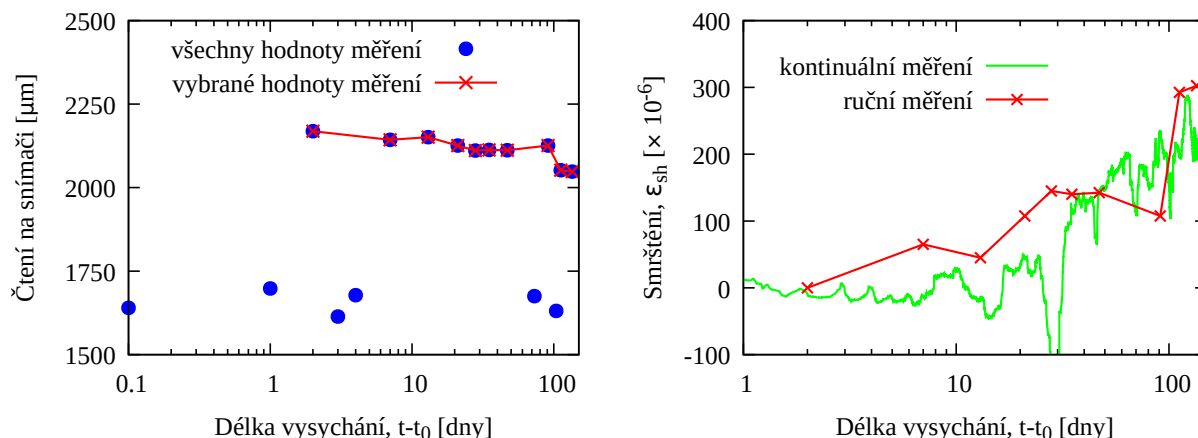


Obrázek 14: Náskres rozmístění vzorků v měřicím rámu. Tabulka pod nákresem pro přehlednost uvádí i velikost náhradní tloušťky průřezu. Vzorek č. 11 je ocelový etalon, který sloužil pro eliminaci vlivu teploty. (Vzdálenosti mezi vzorky na tomto nákrese jsou pouze ilustrativní, neodpovídají přesně skutečnosti.)

U největšího vzorku s průřezem 100×100 mm ($D = 50$ mm) byl velký rozptyl hodnot z ručního měření. Vzhledem k velikosti a vysoké hmotnosti vzorku mohl být tento problém zapříčiněn nepřesností při usazování do měřicího stojanu. Od této velikosti byl ručně měřen pouze jediný vzorek, snahou proto bylo získaná data i přes nepřesnosti analyzovat, aby nemuselo dojít k jeho vyřazení. Z vykreslení naměřených dat bylo možné odhadnout, které z hodnot lze ponechat a které body měření je nutné vyloučit. Výběr vhodných dat a prvotní ověření hodnot smrštění porovnáním se vzorkem automaticky měřeným na rámu je ilustrován na Obrázku 15. Hodnoty smrštění na pravém grafu byly vyhodnoceny vzhledem ke kovovému etalonu.

Redukcí dat získané průběhy smrštění vzorku 100×100 mm (viz horní graf Obrázku 13) nejsou zdaleka ideální. Kromě většího rozptylu hodnot je navíc jiný vzájemný vztah mezi výsledky při použití obou etalonů. Tento problém je způsoben tím, že po vyloučení chybných údajů měření je počáteční, tedy nulové čtení vztaženo k hodnotám získaným až při třetím měření, u kterého byly pro oba etalony zjištěny zcela opačné deformace proti prvnímu čtení. Názorněji je tento fakt osvětlen na Obrázku 16. Vlevo je vykreslen celý průběh deformace etalonů, tedy hodnoty, které byly použity pro vyhodnocení všech ostatních vzorků ručního měření, nulové čtení odpovídá první změřené hodnotě v okamžiku počátku vysychání vzorků. Plnou značkou jsou zvýrazněny hodnoty třetího čtení, které v případě vzorku 100×100 mm tvoří počáteční, tedy nulový stav. Graf vpravo ukazuje už redukované průběhy deformací vztažených k novému počátečnímu stavu. Je zřejmé, že vzájemný posun obou etalonů viditelný v levém grafu je touto úpravou eliminován.

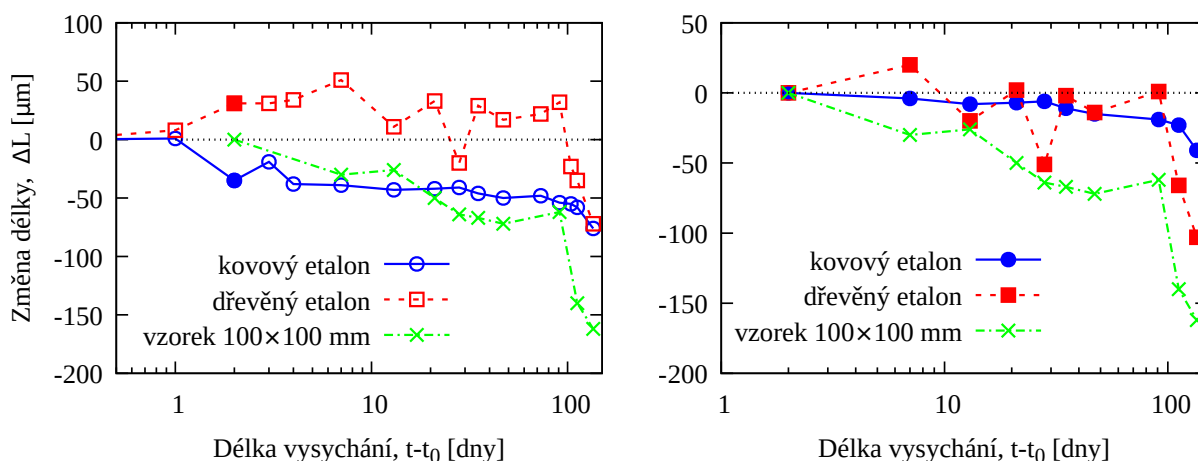
Pro úplnost jsou na Obrázku 17 vykresleny deformace vzorku 100×100 mm po odečtení deformací jednotlivých etalonů. Vzájemný posun získaných křivek zde není a chybí tedy i posun mezi oběma průběhy smrštění největšího vzorku na horním grafu Obrázku 13.



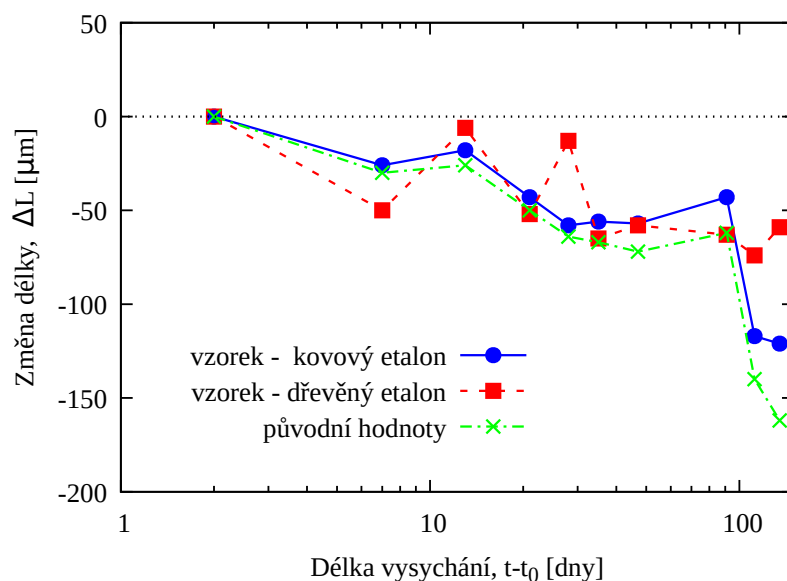
Obrázek 15: Obrázek vlevo ukazuje výběr vhodných dat ručního měření u největšího vzorku 100×100 mm. Vykresleny jsou odečtené údaje ze snímače bez jakékoli úpravy či teplotní kompenzace. Vpravo je porovnáno smrštění vyhodnocené pouze z vybraných dat ručního měření se smrštěním získaným pro stejný vzorek na měřicím rámu.

(Pozn.: Grafy na Obrázcích 16 a 17 zobrazují absolutní deformace, tedy odchylky od hodnoty nulového čtení včetně znaménka.)

Na základě získaných průběhů smrštění (viz horní graf na Obrázku 13) nebylo možné rozhodnout, který z etalonů poskytuje lepší výsledky. Z vykreslení změřených defor-



Obrázek 16: Ukázka odlišného nulového čtení etalonů pro vyhodnocení vzorku 100×100 mm ($D = 50$ mm). Na levém grafu jsou vykresleny změny délky etalonů za celé sledované období a také hodnoty největšího vzorku, které byly vyhodnoceny jako vyhovující. Plně jsou zvýrazněny body, které přísluší okamžiku prvního použitého měření vzorku. Graf vpravo má již nulové čtení pro etalony nastaveno shodně se vzorkem a vykresleny jsou jen redukované hodnoty potřebné pro dopočet smrštění vzorku.



Obrázek 17: Průběh absolutní deformace vzorku 100×100 mm po odečtení deformace ocelového (vykresleno modře), resp. dřevěného (znázorněno červeně) etalonu. Zeleně je zakreslena původní deformace vzorku bez zahrnutí vlivu etalonů.

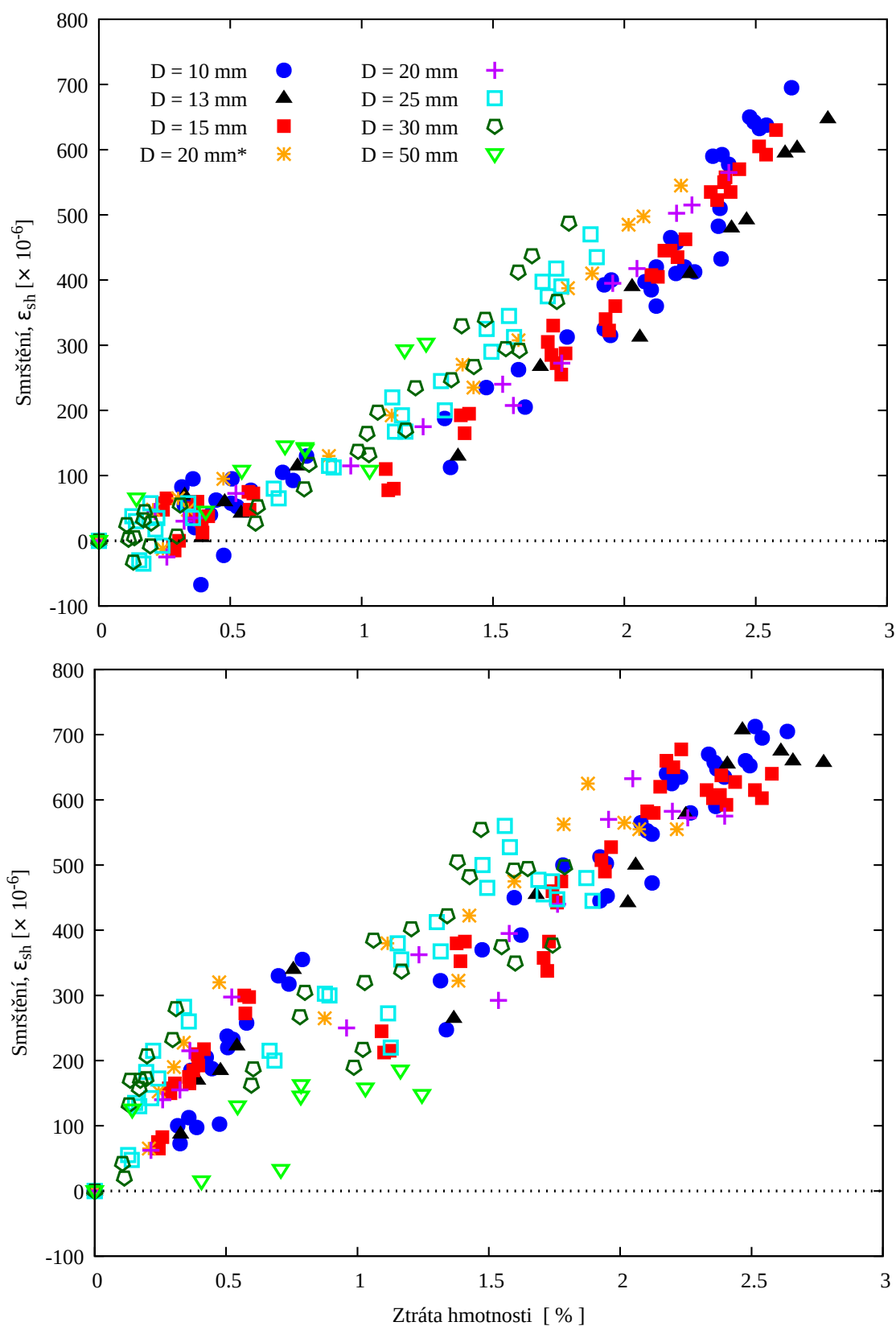
mací etalonů na Obrázku 16 je zřejmé, že ocelový etalon vykazoval stabilnější chování, u dřevěného je větší rozptyl hodnot. Nicméně výrazný pokles zaznamenaný v závěru posuzovaného období lze pozorovat i u největšího vzorku, nelze proto vyloučit, že nedocházelo například k určitým deformacím stojanu během měření vzorků.

Možností, jak kvalitu obou etalonů ověřit, bylo porovnat získané časové průběhy smrštění jednotlivých vzorků s průběhy poměrného hmotnostního úbytku. Toto srovnání je ukázáno na Obrázku 18. Na vodorovnou osu byly vynášeny hodnoty smrštění, v horním grafu určené s použitím kovového etalonu, v dolním grafu s etalonem dřevěným. Na vodorovnou osu byla vynášena procentuální ztráta hmotnosti vzorků.

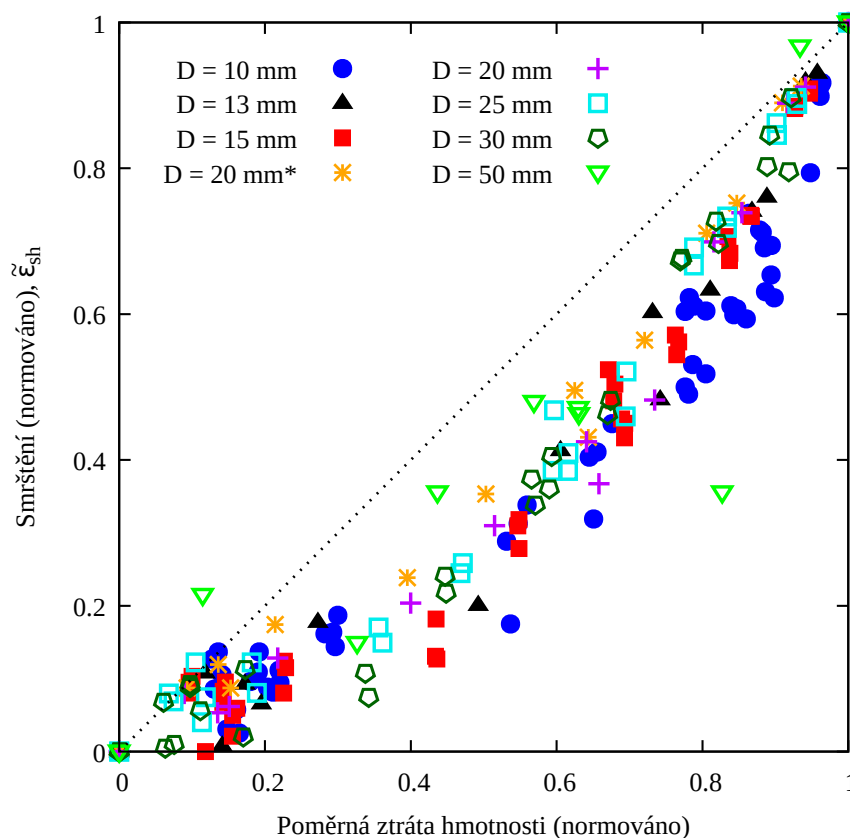
Horní graf ukazuje relativně přímou závislost smršťování vzorků na hmotnostním úbytku, tedy na vysychání. Naopak u dolního grafu je tato závislost velmi nepřesná, obecný trend je sice zachován, ale pomyslné spojnice bodů jednotlivých barev nevykazují tvar hladké linie.

Na základě tohoto porovnání lze ocelový etalon vyhodnotit jako kvalitnější a tedy vhodnější pro vyhodnocení průběhu smrštění u ručně měřených vzorků.

Důležité je zde zmínit, že z hlediska hlavního cíle tohoto experimentu, kterým je vyhodnocení vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění není problém s přesností etalonu nijak zásadní. I v případě drobných chyb v naměřených deformacích etalonu se tato chyba projeví ve vyhodnocení všech vzorků téměř stejně. Dojde v podstatě k jednotnému posunu hodnot smrštění, což (za předpokladu drobné chyby) způsobí téměř zanedbatelný rozdíl v jejich vzájemném poměru.



Obrázek 18: Vývoj smrštění v závislosti na poměrné ztrátě hmotnosti ručně měřených vzorků. Na horním grafu je smrštění vyhodnoceno vůči ocelovému etalonu, na dolním vůči etalonu dřevěnému.

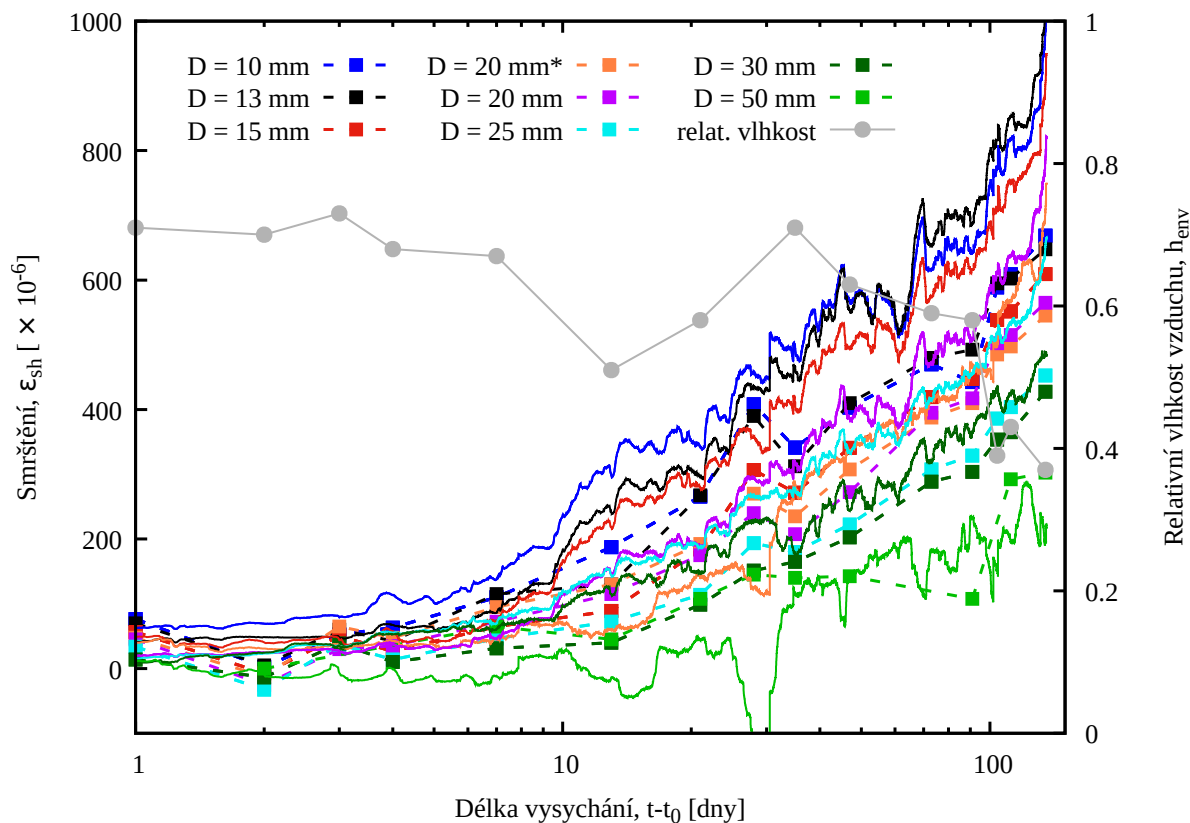


Obrázek 19: Vzájemné porovnání rychlosti smršťování a úbytku hmotnosti u ručně měřených vzorků. Smrštění je vyhodnoceno s použitím ocelového etalonu. Hodnoty každého vzorku byly normovány vždy vůči poslední hodnotě. Normování bylo provedeno i přes to, že proces vysychání, potažmo smršťování ještě nebyl ukončen, cílem grafu bylo ověřit a ukázat, že ke smršťování dochází s určitým časovým odstupem za poklesem vlhkosti vzorku.

Na horním grafu Obrázku 18 je patrné očekávané chování v podobě mírného zpoždění procesu smršťování za postupným vysycháním vzorku. Pro ověření tohoto trendu a lepší znázornění je na Obrázku 19 provedeno vzájemné porovnání závislosti smrštění na úbytku hmotnosti pomocí normovaných hodnot. Normování bylo provedeno vždy k poslední změřené hodnotě. Správnější by bylo porovnávat normované hodnoty více vzorků ve společném grafu až po dokončení procesu vysychání, potažmo smršťování, čehož u vzorků tohoto experimentu ještě dosaženo nebylo. Smyslem grafu je pouze lépe ukázat zmíněné zpoždění mezi úbytkem hmotnosti a smršťováním.

Na Obrázku 20 jsou do společného grafu zakresleny průběhy smrštění vyhodnocené z údajů ručního i kontinuálního měření. V tomto grafu už nejsou vynášeny hodnoty pro každý vzorek samostatně, ale průměry určené ze vzorků shodné velikosti. V obou případech se jedná o průběhy získané vzhledem k ocelovému etalonu, který byl vyhodno-

cen jako vhodnější. Hodnoty ručně měřených vzorků vyhodnocené vůči dřevěnému etalonu zde zakresleny nejsou.



Obrázek 20: V tomto grafu jsou společně zobrazeny průběhy smrštění získané ručním měřením a kontinuálním měřením na rámu. Vykresleny jsou průměrné hodnoty pro každou velikost a měřicí metodu. Plné čáry zobrazují průběhy smrštění získané z měření na rámu. Body spojené přerušovanou čarou odpovídají průměrným hodnotám získaným z ručního měření vzorků. Shodné barvy odpovídají vždy stejné velikosti vzorku.

Hodnoty smrštění jsou u vzorků z měřicího rámu obecně o něco vyšší než u vzorků měřených ručně. Není zcela zřejmé, čím by tento fakt mohl být způsoben. Jedním z důvodů by mohla být nepřesná kalibrace odporových snímačů, která byla provedena manuálně a jednotně pro všechny vzorky. Vliv mohl mít také odlišný způsob uchovávání vzorků ručního měření. Ty byly skladovány v horizontální poloze a je možné, že prostor mezi spodní stěnou vzorků a podložkou neposkytl dostatečný přístup vzduchu a vysychání tím mohlo být mírně omezeno. Z hlediska rozdílů mezi hodnotami smrštění u vzorků různých velikostí však obě metody ukazují podobný trend, lépe patrný z vyhodnocení na Obrázku 21.

5.3 Vliv velikosti vzorku na dosaženou hodnotu smrštění

Pokles relativní vlhkosti prostředí v závěru sledovaného období pravděpodobně vyvolal další nárůst smrštění. V důsledku snížení vlhkosti začaly i nejmenší vzorky, u nichž by při konstantních vlhkostních podmínkách bylo vysychání v podstatě ukončeno, opět vysychat a působí dojmem neukončeného procesu smršťování.

Pro vyhodnocení vlivu velikosti prvku na hodnotu smrštění byly použity všechny vzorky tohoto experimentu i přesto, že konečných hodnot smrštění u žádného z nich dosaženo nebylo. Časový horizont pro vypracování této práce neumožnil dostatečnou délku sledování experimentu. Lze předpokládat, že zejména u větších vzorků ještě dojde k významnějšímu nárůstu smrštění.

Výsledky prezentované v této kapitole proto s vysokou pravděpodobností vykazují větší vliv velikosti vzorku na hodnotu dosaženého smrštění, než by tomu bylo po delší době vysychání, kdy by smrštění všech vzorků dosáhlo konečných hodnot. Ve vyhodnocení pro délku vysychání pouhých 135 dní je totiž zahrnut i vliv rychlejšího průběhu smrštění u menších vzorků. Tento fakt je třeba mít na paměti při interpretaci prezentovaných výsledků.

Měření všech vzorků stále pokračuje, v budoucnu budou data znovu analyzována a po dosažení konečných hodnot smrštění budou zde prezentované závěry plynoucí z tohoto experimentu ověřeny a zpřesněny.

Vyhodnocení závislosti dosaženého smrštění na velikosti vzorku ukazují grafy na Obrázku 21. Vlevo jsou vykresleny hodnoty všech vzorků měřených v rámci tohoto experimentu. U automaticky měřených vzorků byla provedena korekce vlivu teploty vůči ocelovému etalonu umístěnému na rámu.

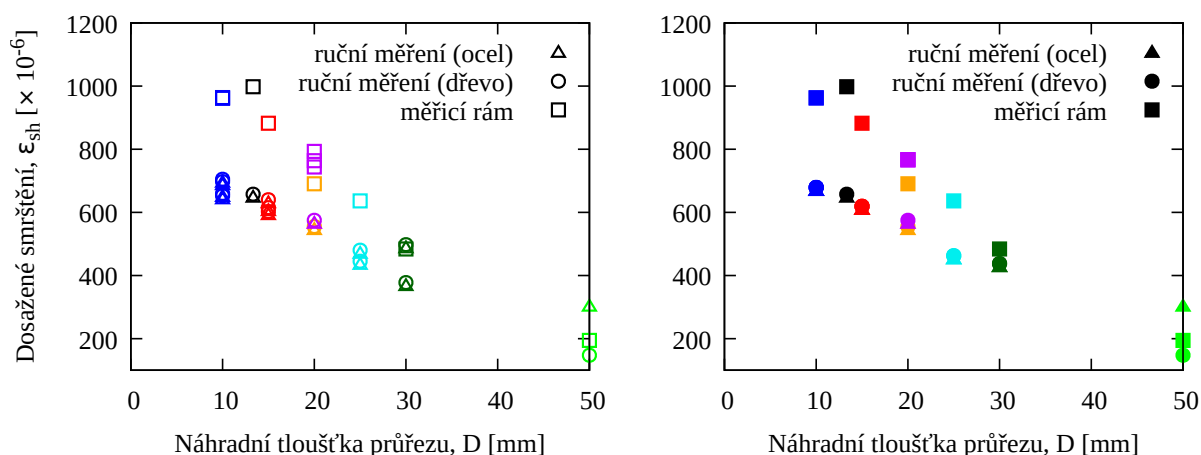
Navzdory vyhodnocení ocelového etalonu u ručně měřených vzorků jako vhodnějšího jsou v grafech na Obrázku 21 vykresleny výsledky získané i s použitím etalonu dřevěného. Je tím ilustrován minimální vliv chyby etalonu, případně jiné chyby způsobené drobnou deformací měřicího zařízení, na tato vyhodnocení. Mezi dosaženými hodnotami smrštění podle ocelového a dřevěného etalonu je v zásadě jen konstantní posun daný rozdílnou změnou délky obou etalonů mezi prvním a posledním čtením⁴. Jak je vidět na grafu časového vývoje smrštění na Obrázku 13, hodnoty získané s použitím různých etalonů se nejprve odlišují výrazněji, v závěru sledovaného období však došlo k jejich přiblížení.

U vzorků kontinuálního měření v rámu byly k dispozici údaje za období zhruba o 1 den delší. Pro grafy na Obrázku 21 proto nebyla u vzorků měřených v rámu použita úplně poslední zaznamenaná hodnota, ale hodnota, která odpovídala okamžiku posledního ručního měření vzorků. Tím bylo zajištěno porovnání odpovídajících hodnot u obou me-

⁴ Výjimku tvoří největší vzorek s $D = 50$ mm, u něhož byla použita jen vybraná data měření. Počáteční nulové čtení je vztaženo až ke 3. naměřené hodnotě. Proto rozdíl mezi oběma světle zelenými body ručního měření na levém grafu Obrázku 21 odpovídá vzájemnému rozdílu poměrných změn délky obou etalonů mezi 3. a posledním čtením.

tod měření. V závěru sledovaného období došlo k výraznému zrychlení nárůstu hodnot smrštění, vyhodnocení k odlišným okamžikům by mohlo uměle zvětšit rozdíl mezi hodnotami získanými kontinuálním a ruční měřením.

Není zde prezentován graf, kde by byla dosažená smrštění v závislosti na velikosti vzorku znormována a porovnána s ostatními experimenty, případně s výpočty podle norem a predikčních modelů. Tato srovnání a vyhodnocení budou provedena s údaji o konečných hodnotách smrštění v rámci podrobné analýzy po skončení experimentu.



Obrázek 21: Graf vlevo ukazuje poslední změřenou hodnotu smrštění (vysychání trvalo 135 dní) u všech sledovaných vzorků. Na grafu vpravo jsou vykresleny průměrné hodnoty - vždy pro shodnou velikost vzorku, způsob měření a etalon použitý pro vyhodnocení. Způsob měření a použitý etalon je odlišen tvarem značky tak, jak je uvedeno v legendě. Barevně jsou odlišeny jednotlivé velikosti vzorků, toto rozlišení koresponduje s barvami použitými v grafech na Obrázcích 13 – 20.

6 Materiálový model MPS

Všechny výpočetní modely prezentované v Kapitole 4 patří do skupiny modelů, které pracují s průměrnými hodnotami na úrovni průřezu. Z výsledků tedy není možné získat představu o rozložení napětí po průřezu ani o vývoji vlhkosti vzorku během vysychání. Výsledkem jsou pouze průměrné deformace a napětí.

Pokročilejší skupinou jsou modely, které pracují na úrovni materiálového bodu. Při jejich použití je možné získat mnohem víc informací a lépe postihnout skutečné chování betonového prvku. Z hlediska vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění byl analyzován materiálový model založený na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS) [13]. Jedná se o jeden z nejvyspělejších modelů pro popis časově závislého chování betonových prvků a konstrukcí. Jedním z nedostatků původní varianty tohoto modelu je však opačný vliv velikosti vzorku na dotvarování od vysychání [11].

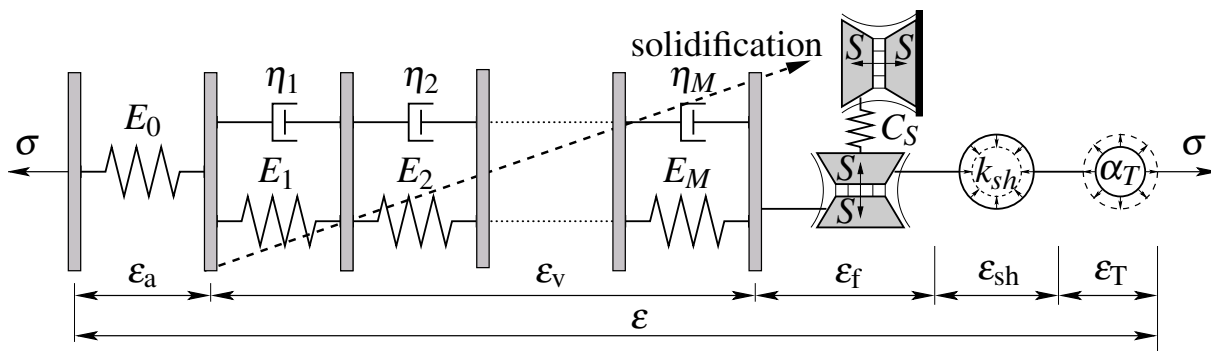
Numerické simulace, jejichž výsledky jsou prezentovány v této části práce, byly prováděny v programu OOFEM [17] (Object Oriented Finite Element Solver). Jedná se o volně šiřitelný program pro výpočty metodou konečných prvků vyvíjený od roku 1997 na Fakultě stavební ČVUT týmem prof. Bořka Patzáka. Slouží k řešení úloh mechaniky pevné fáze, transportních jevů a mechaniky tekutin.

OOFEM neobsahuje vlastní preprocessor, komunikace s programem probíhá z příkazové řádky, kde se při spuštění programu zadá i cesta ke vstupnímu souboru. Během výpočtu v OOFEMu jsou dílčí výsledky pravidelně zobrazovány v okně terminálu, odkud byl výpočet spuštěn, zároveň mohou být požadované výsledky (dle specifikace ve vstupním souboru) zapisovány do výstupního souboru, který slouží pro následné vyhodnocení v postprocesoru. Vstupním souborem pro OOFEM je textový soubor s přesně definovanou strukturou, který obsahuje kompletní zadání úlohy, kterou chce uživatel řešit. K extrakci potřebných výsledků z výstupního souboru je následně použit vhodný program pro postprocessing. Konkrétně byl pro získání informací o posunech použit program Extractor, program ParaView [2] posloužil pro veškerá grafická zobrazení výsledků.

V programu OOFEM je implementováno několik materiálových modelů pro výpočet časově závislého chování betonu, z nichž nejnovější jsou modely založené na teorii solidifikace a mikropředpětí.

Reologický model MPS teorie [4] [13], zakreslený na Obrázku 22, tvoří pět sériově spojených částí:

- nestárnoucí pružina pro vyjádření okamžité pružné deformace, její tuhost odpovídá asymptotickému modulu E_0
- solidifikující Kelvinův řetězec pro krátkodobé dotvarování,
- viskózní tlumič, který zastupuje dlouhodobé nevratné dotvarování a dotvarování při proměnlivé vlhkosti a teplotě, jeho viskozita souvisí s tzv. mikropředpětím,
- článek smrštění, který vyjadřuje objemové změny během volného vysychání,
- článek představující teplotní roztažnost.



Obrázek 22: Schéma reologického modelu MPS teorie, převzato z [4]

Pro výpočty v této kapitole byl použit materiálový model, jehož implementace v programu OOFEM [17] nese označení „MPS“. Kromě původní verze modelu a několika jejích modifikací byla použita i verze rozšířená o možnost vzniku tahových trhlinek v betonu. K tomu slouží materiálový model s označením „ConcreteFcmViscoelastic“.

Úloha s modelem MPS může být spuštěna ve čtyřech různých režimech v závislosti na hodnotě klíčového slova „CoupledAnalysisType“ v definici materiálu:

- $CoupledAnalysisType = 0$ výpočet funkce poddajnosti bez vlivu vysychání,
- $CoupledAnalysisType = 1$ úloha mechaniky navázaná na pole teploty a vlhkosti,
- $CoupledAnalysisType = 2$ úloha mechaniky navázaná pouze na pole vlhkosti,
- $CoupledAnalysisType = 3$ úloha mechaniky navázaná pouze na pole teploty.

Kromě základního dotvarování ($CoupledAnalysisType = 0$) musely být všechny úlohy, tedy i výpočet smrštění, řešeny jako sdružený problém, který spojuje úlohu mechaniky s transportní úlohou. Vliv proměnné teploty není v této práci posuzován, transportní úlohou bylo pouze vedení vlhkosti ($CoupledAnalysisType = 2$).

Ve všech výpočtech byl pro úlohu vedení vlhkosti použit materiálový model pro nelineární transport vlhkosti v izotropním materiálu „BazantNajjarMoistureMat“ [3] se smíšenou okrajovou podmínkou pro přestup vlhkosti.

Dříve než bylo možné provést numerickou simulaci predikce smrštění vzorků různých velikostí, bylo nutné správně nakalibrovat parametry materiálových modelů transportní i mechanické úlohy. Pro tyto účely posloužily výsledky experimentální studie Bryant, která je stručně popsána v Kapitole 3. Tento experimentální výzkum poskytl dostatek různých výsledků, na základě kterých bylo možné parametry modelu kalibrovat. Kromě smrštění na vzorcích různých velikostí, byly k dispozici pro různou velikost zatížených vzorků i informace o celkovém dotvarování. Navíc byly v rámci experimentálního výzkumu Bryant testovány i zapečetěné vzorky zatížené⁵ v různém stáří, na kterých bylo měřeno

základní dotvarování.

Připomeňme, že v rámci Bryantova výzkumu byly vyrobeny 2 typy vzorků, prvním byly hranoly, u kterých bylo vysychání umožněno celým povrchem s výjimkou zapečetěných konců. Druhým typem byly desky, tedy vzorky, které měly kromě konců zapečetěny i dvě protilehlé stěny.

Kalibrace parametrů pro numerické výpočty byla prováděna na hranolových vzorcích. Tam, kde to bylo možné, bylo cílem při fitování dosáhnout shody se vzorky všech velikostí použitých při experimentu. V opačném případě byl jako referenční vzorek pro dosažení shody vybrán hranol s průřezem 150×150 mm. Důraz byl kladen zejména na správné vystižení konečné hodnoty. Nakalibrované řešení pro referenční vzorek je v grafech této kapitoly zvýrazněno silnější plnou červenou čarou.

Následně byl proveden výpočet s nakalibrovanými parametry pro model desek a výsledky byly opět porovnány s Bryantovým experimentem.

Teprve poté, kdy se podařilo určit hodnoty všech potřebných parametrů tak, aby numerická simulace byla v co nejlepší shodě s výsledky experimentů pro základní dotvarování, smrštění i dotvarování od vysychání, byl proveden výpočet pro vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění.

Tento postup kalibrace a následného výpočtu smrštění na škále vzorků různých velikostí byl proveden pro původní verzi modelu MPS, dvě jeho základní modifikace a čtyři další varianty s upravenou závislostí součinitele smrštění k_{sh} . Na závěr byla provedena ještě numerická simulace smrštění s modelem MPS rozšířeným o možnost vzniku tahových trhlin.

Pro predikci smrštění bylo pro hranoly i pro desky zvoleno celkem 15 velikostí vzorků s průřezem v rozmezí od 20 mm až do 1 m. V případě úlohy se zohledněním vzniku tahových trhlin byl kvůli časové náročnosti numerické simulace počet vzorků redukován na 7 velikostí od každého typu.

6.1 Kalibrace parametrů základního dotvarování

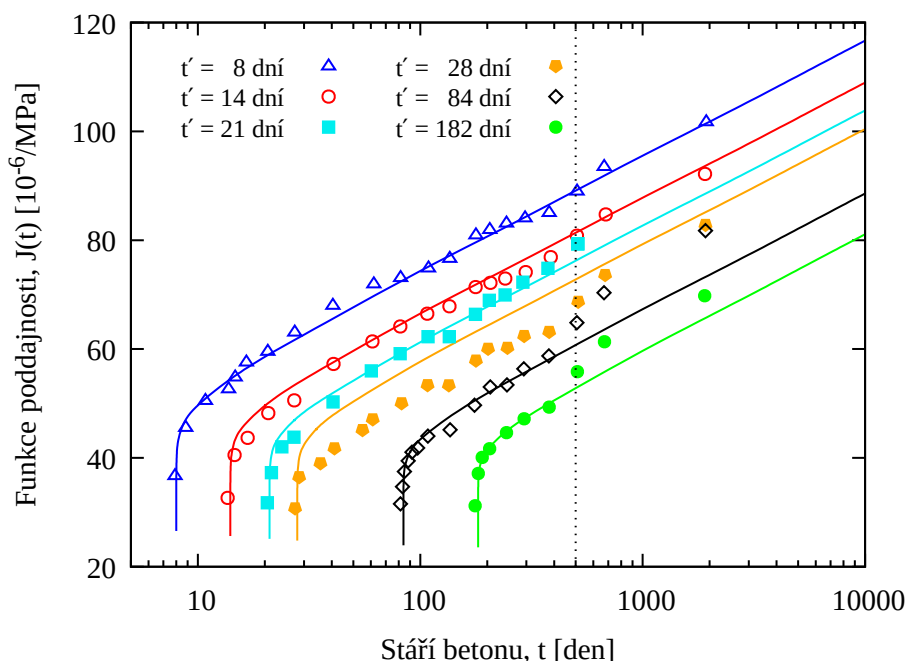
Údaje o základním dotvarování nevysychajících vzorků z Bryantova experimentu, které byly zatíženy v různém stádiu, posloužily pro kalibraci parametrů $q_1 - q_4$ modelu B3, který odpovídá funkci poddajnosti modelu MPS pro $h_{env} = 98\%$ a konstantní teplotu. Jedná se o parametry, které lze přibližně stanovit empirickými vzorci uvedenými v modelu B3 [5] z hodnoty tlakové pevnosti a ze složení betonové směsi. Stejný způsob jejich výpočtu je možné zvolit i při použití materiálového modelu MPS, nebylo však dosaženo dobré shody s výsledky experimentu. Proto byla zvolena varianta výpočtu, kdy jsou hodnoty těchto

⁵ Byly testovány i zapečetěné nezatížené vzorky pro určení autogenního smrštění. Naměřené hodnoty však byly výrazně menší než chyba způsobená prokorodováním hliníkové fólie chránící vzorky před vysycháním. Údaje z těchto vzorků proto nebyly použity, byly upřednostněny hodnoty celkového smrštění bez odečtu složky smrštění autogenního.

čtyř parametrů přímo zadávány ve vstupním souboru a je možné provádět jejich ruční kalibraci.

Vzhledem k rovnoměrné jednoosé napjatosti v případě základního dotvarování nebylo pro tuto dílčí úlohu nutné vytvářet žádnou složitou síť prvků, výpočet pro každý ze vzorků byl proveden na modelu jednoho plošného prvku. Odlišné stáří v okamžiku zatížení bylo definováno pomocí klíčového slova „*relMatAge*“ (relativní stáří materiálu). Jedinými okrajovými podmínkami bylo omezení posunů odpovídající prostému podepření a zatížení, které v prvku vyvolá tlakové jednoosé namáhání velikosti 7 MPa, což je velikost, jakou byly zatíženy vzorky pro měření dotvarování v rámci Bryantova výzkumu.

Jak již bylo zmíněno v Kapitole 3, došlo během Bryantova experimentu k prokorodování ochranné fólie u plně zapečetěných vzorků. Ze zpětné analýzy naměřených dat bylo určeno, že první hodnoty ovlivněné ztrátou plné ochrany před vysycháním byly naměřeny zhruba ve stáří 500 dní. Po tomto okamžiku lze v průbězích základního dotvarování většiny vzorků pozorovat výraznější nárůst hodnot. Při kalibraci parametrů základního dotvarování byl proto kladen důraz na dosažení shody numerických výpočtů s experimentálními daty zejména v období před porušením ochranné fólie.



Obrázek 23: Fitování základního dotvarování, které sloužilo pro kalibraci parametrů $q_1 - q_4$ materiálového modelu B3. Plnou čarou jsou vykresleny průběhy získané numerickou simulací, body odpovídají výsledkům Bryantova experimentu. Veličina t' označuje stáří v okamžiku zatížení vzorku. Tečkovanou čarou je naznačen přibližný okamžik prokorodování pečetící fólie.

Výsledné průběhy základního dotvarování získané numerickou simulací spolu s vykreslením experimentálních dat použitých ke kalibraci jsou na Obrázku 23. V grafu je na-

značena i přibližná linie pro čas, od kterého jsou data ovlivněna prokorodováním pečetící hliníkové fólie. Získané hodnoty parametrů $q_1 - q_4$ jsou uvedeny v Tabulce 6. Tyto čtyři parametry byly použity v nezměněné podobě pro výpočty se všemi modifikacemi materiálového modelu MPS.

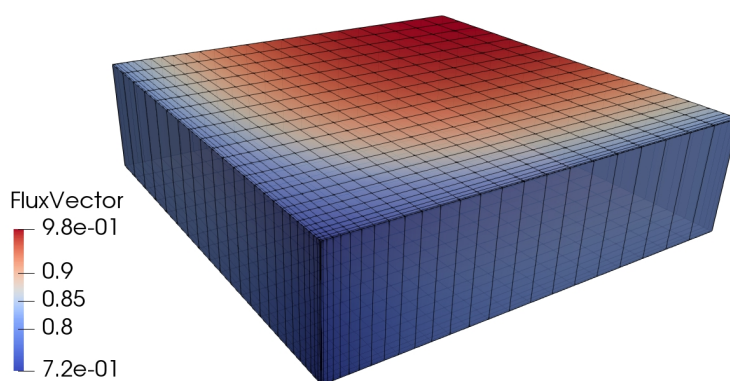
q_1	q_2	q_3	q_4
$[\times 10^{-6}/\text{MPa}]$	$[\times 10^{-6}/\text{MPa}]$	$[\times 10^{-6}/\text{MPa}]$	$[\times 10^{-6}/\text{MPa}]$
18,0	52,0	23,0	7,5

Tabulka 6: Hodnoty parametrů $q_1 - q_4$ modelu B3, které byly nakalibrovány pro shodu numerického výpočtu s výsledky Bryantova experimentu, konkrétně průběhů základního dotvarování vzorků zatížených v různém stáří.

Kromě výpočtu základního dotvarování bylo nutné všechny další výpočty řešit jako sdruženou úlohu. Nadřazenou byla úloha vedení vlhkosti, která pro úlohu mechaniky poskytovala v každém časovém kroku informaci o poli vlhkosti.

Síť konečných prvků i všechny vstupní soubory pro sdruženou úlohu byly vytvářeny v programu Matlab [15]. Základní program pro tvorbu strukturované sítě poskytnutý vedoucím práce byl mírně upraven a rozšířen tak, aby bylo možné vytvářet kompletní vstupní soubory pro vzorky různých velikostí bez nutnosti jakékoli další úpravy.

Pro varianty modelu MPS bez zohlednění tahových trhlin byly vzorky hranolů i desek modelovány jako vrstva tloušťky 20 mm pro symetrickou čtvrtinu průřezu. Model



Obrázek 24: Ukázka rozložení vlhkosti ve vzorku hranolu 150×150 mm. Modelována byla symetrická čtvrtina průřezu v tloušťce jednoho konečného prvku. Zobrazený stav rozložení vlhkosti v betonovém vzorku odpovídá délce vysychání 10,5 dne (100. krok výpočtu). Vykresleny jsou i hrany konečných prvků pro ilustraci struktury použité sítě.

byl tvořen jen jednou vrstvou konečných prvků. Podél vysychající stěny bylo použito rovnoměrné dělení prvků, kolmo na směr vysychání byla velikost prvků proměnná s nejjemnějším dělením u vysychajícího povrchu. Průřez byl pro oba typy vzorků shodný, rozdíl byl ve způsobu vysychání a tedy i ve struktuře sítě konečných prvků. Pro průřez velikosti 150×150 mm je síť konečných prvků obou modelovaných případů vykreslena na Obrázcích 24 a 25. Počet použitých konečných prvků sítě se samozřejmě lišil v závislosti na velikosti modelovaného vzorku.

Smíšená okrajová podmínka pro přestup vlhkosti byla předepsána na jedné stěně u modelu desky, na dvou sousedních stěnách v případě modelu hranolu. (Připomeňme, že byla modelována jedna čtvrtina průřezu skutečného prvku.)

Okrajové podmínky úlohy mechaniky byly zvoleny tak, aby odpovídaly modelům hranolu a desky experimentu Bryant, tedy v případě desky mírně odlišně, než by odpovídalo teoretické nekonečné desce. Rozdíl byl v umožnění deformace vysychající stěny i ve směru kolmém na směr vysychání, což by u výseku ze skutečné stěny vzhledem ke spojitosti geometrie nebylo možné.

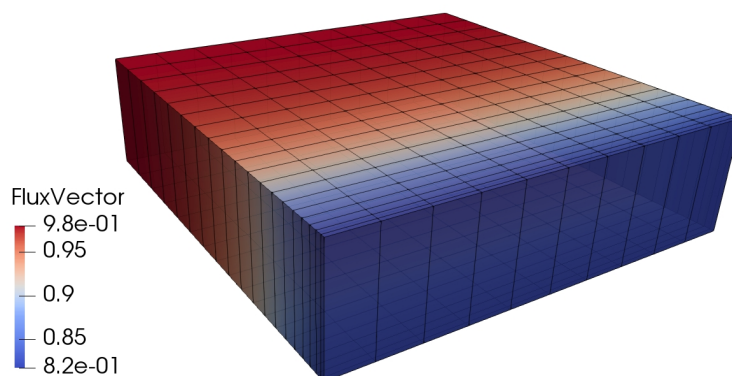
Časový interval, pro který byl výpočet prováděn, byl v případě fitování a porovnání s výsledky experimentů studie Bryant zvolen jako 10 000 dní. U predikce pro vyhodnocení vlivu velikosti vzorku byla tato hodnota volena tak, aby bylo dosaženo konečné hodnoty smrštění i u největšího ze vzorků. U časově méně náročných výpočtů byla zvolena jednotně délka vysychání 100 let pro hranoly a 200 let pro desky (kvůli desce tl. 1 000 mm, jejíž vysychání nebylo ukončeno ani po 100 letech).

Pro numerické výpočty s materiálovým modelem MPS rozšířeným o možnost vzniku tahových trhlin, které byly časově velmi náročné, byla simulovaná délka vysychání pro různě velké vzorky volena individuálně podle času potřebného pro dosažení konečné hodnoty smrštění. Velikost časových kroků byla volena nerovnoměrně s ohledem na rychlejší průběh smršťování na počátku vysychání.

Pomocí zobrazení průběhů vlhkosti, deformací a napětí v průřezu v programu ParaView [2] bylo kontrolováno správné nastavení okrajových podmínek úlohy vedení vlhkosti i úlohy mechaniky u vytvořeného prvkového modelu, dostatečná jemnost sítě konečných prvků i vhodná volba velikosti časových kroků.

V následující části jsou ukázány výsledky numerických simulací provedených v programu OOFEM [17] pro různé varianty materiálových modelů založených na teorii solidifikace a mikropředpětí. Grafické výstupy jsou doplněny stručným popisem jednotlivých variant modelů.

Cílem této práce není poskytnout detailní popis všech parametrů materiálových modelů použitých pro výpočty v této kapitole, snahou je spíše ukázat, jak se při použití různých variant mění schopnost daného modelu správně vystihnout skutečné chování prvků, které je zde reprezentováno souborem experimentů z Bryantova výzkumu. Největší důraz je samozřejmě kladen na výsledné vyhodnocení vzájemného vztahu mezi velikostí prvku a konečnou hodnotou smrštění, kvůli kterému byly veškeré výpočty prováděny. De-



Obrázek 25: Ukázka rozložení vlhkosti ve vzorku desky tl. 150 mm. Model představuje symetrickou čtvrtinu průřezu v tloušťce jednoho konečného prvku. Vykresleny jsou i hrany konečných prvků pro ilustraci struktury použité sítě. Zobrazený stav odpovídá délce vysychání 10,5 dne (100. krok výpočtu).

tailnější popis a vysvětlení všech parametrů materiálových modelů je v případě potřeby možné najít v dokumentaci programu OOFEM [16], ve kterém jsou tyto modely implementovány a ve kterém byly prováděny veškeré numerické simulace, jejichž výsledky jsou v této práci prezentovány.

6.2 Model MPS s potlačeným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání

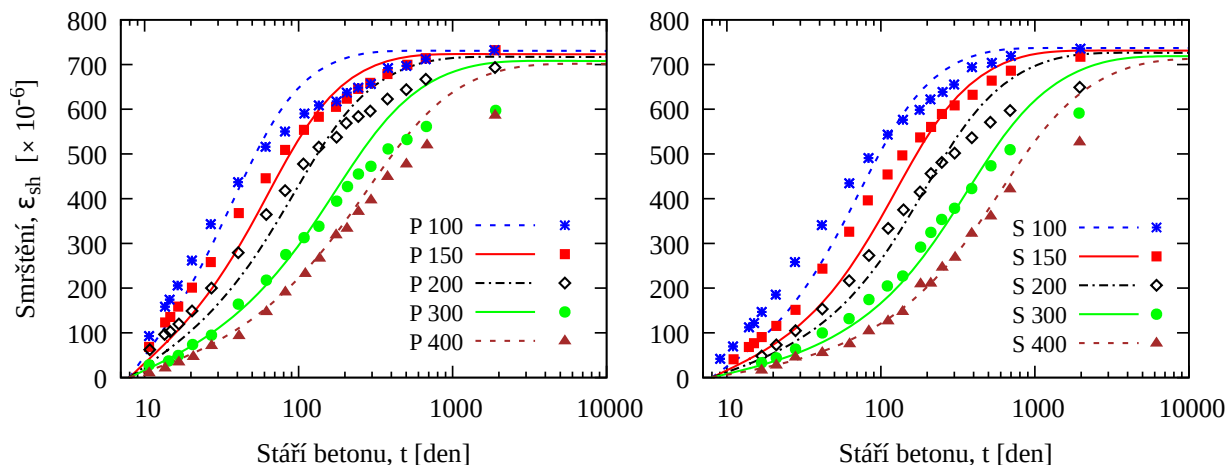
Jedním z nedostatků původního modelu MPS je opačný vliv velikosti vzorku na dotvarování od vysychání. Proto byl jako referenční použit model MPS, u kterého je tento vliv potlačen použitím hodnoty parametru $p = \infty$.

S touto variantou modelu byla provedena základní kalibrace parametrů materiálového modelu MPS v úloze stavební mechaniky i parametrů materiálového modelu „BazantNajjarMoistureMat“ v úloze vedení vlhkosti.

Pro kalibraci byly využity Bryantovy experimentální údaje o průbězích smrštění a dotvarování od vysychání – to bylo vyjádřeno pomocí průběhu funkce poddajnosti včetně počáteční pružné deformace. Při kalibraci parametrů musely být průběhy smrštění i průběhy funkce poddajnosti od vysychání fitovány současně. Tyto jevy jsou vzájemně provázané a oba jsou ovlivněny hodnotou většiny parametrů použitých materiálových modelů.

Pro vyhodnocení funkce poddajnosti od vysychání (J_d) z výpočtů metodou konečných prvků bylo nutné provést tři různé simulace – výpočet základního dotvarování zatíženého nevysychajícího vzorku (J_b), výpočet smrštění nezatíženého vzorku při vysychání (ε_{sh})

a nakonec výpočet celkové deformace zatíženého vysychajícího vzorku, která zahrnuje celkové dotvarování (součet základního dotvarování a dotvarování od vysychání) a smrštění ($J_b + J_d + \varepsilon_{sh}$). Teprve z rozdílu těchto simulací a po vydělení napětím předepsaným u dotvarovací zkoušky bylo možné stanovit složku dotvarování od vysychání a získat průběhy funkce poddajnosti vykreslené na grafech Obrázku 27.



Obrázek 26: Fitování experimentálních dat smrštění hranolů různých velikostí (Bryant) pomocí modelu MPS s potlačeným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání (hodnota parametru $p = \infty$) – graf vlevo. Přehled parametrů určených touto kalibrací (spolu s kalibrací dotvarování od vysychání) je uveden v Tabulkách 7 a 8. Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění desek získané numerickou simulací a jejich porovnání s výsledky experimentu Bryant. Počátek vysychání byl u všech vzorků ve stáří 8 dní. Body v grafech odpovídají experimentálním datům.

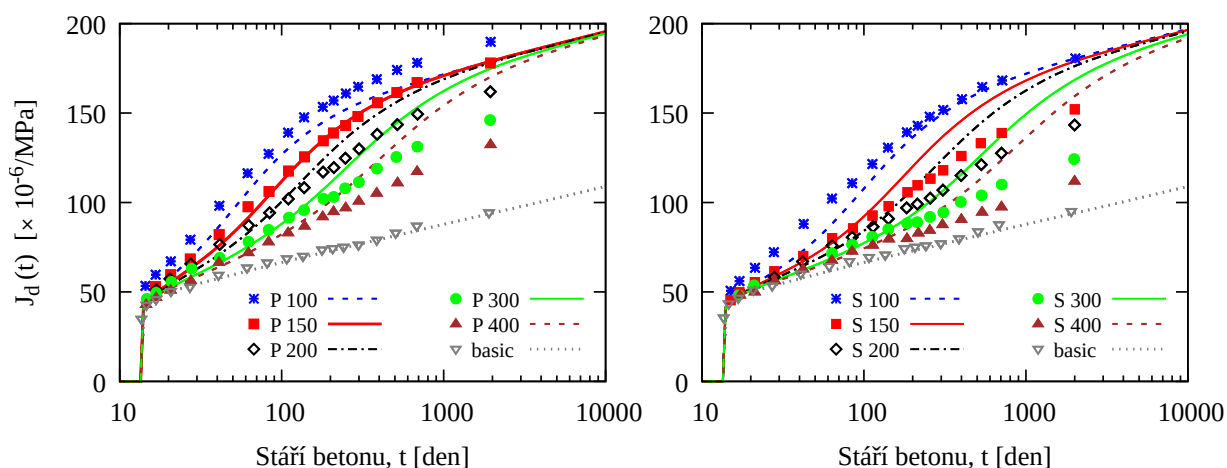
Vzhledem k tomu, že tato varianta modelu MPS neuvažuje vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu dotvarování od vysychání, nebylo možné dosáhnout shody numerické simulace s výsledky experimentu u vzorků více velikostí. Proto bylo při kalibraci parametrů modelu provedeno fitování průběhu funkce poddajnosti od vysychání s ohledem na dosažení shody zejména u referenčního hranolu velikosti 150×150 mm (viz levý graf na Obrázku 27). Průběh pro tento vzorek, který má náhradní tloušťku průřezu $D = 75$ mm, je v grafu zvýrazněn silnější červenou čarou.

Následně byly s modelem nakalibrovaným dle hranolů provedeny stejné simulace pro desky. Získané průběhy smrštění a funkce poddajnosti od vysychání byly opět porovnány s experimentem Bryant (grafy vpravo na Obrázcích 26 a 27).

V případě desek se průběh dotvarování od vysychání získaný numerickou simulací přiblížil experimentu nejvíce u desky tl. 100 mm. Ta má hodnotu náhradní tloušťky průřezu $D = 100$ mm, je tedy z testovaných desek nejbližší referenčnímu hranolu ($D = 75$ mm).

Připomeňme, že v případě desek se jednalo pouze o výpočet metodou konečných prvků

a následné porovnání s experimentem, parametry modelu nebyly na základě výsledků desek nijak upravovány, pro kalibraci sloužily pouze hranoly.



Obrázek 27: Funkce poddajnosti od vysychání pro parametry hranolů (vlevo) a desek (vpravo) Bryantova experimentu. Na hranolových vzorcích (vlevo) byly nakalibrovány parametry materiálového modelu MPS ($p = \infty$), které jsou uvedeny v Tabulkách 7 a 8. Referenční vzorek P 150 × 150 mm ($D = 75$ mm), u kterého bylo dosažení shody numerického výpočtu s experimentem prioritní, je zvýrazněn silnější červenou čarou. Vykrešlena je funkce poddajnosti od vysychání včetně počáteční okamžité deformace. Pro názornost je v grafech zakreslen i průběh základního dotvarování (šedá barva). Vzorky vysychaly jednotně od stáří 8 dní, zatíženy byly ve stáří 14 dní. Body v grafech odpovídají experimentálním datům.

Získané parametry materiálového modelu „BazantNajjarMoistureMat“ použitého v transportní úloze jsou uvedeny v Tabulce 7. Úloha vedení vlhkosti s takto nakalibrovaným materiálovým model tvořila řídicí úlohu při řešení srduženého problému se všemi variantami modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí. Parametry úlohy mechaniky pro model MPS s potlačeným vlivem velikosti prvku na dotvarování od vysychání jsou uvedeny v Tabulce 8.

Predikce průběhů smrštění spočítaná metodou konečných prvků s modelem MPS ($p = \infty$) pro vzorky hranolů a desek⁷ různých velikostí je znázorněna na Obrázku 28 – levý graf patří hranolům, pravý deskám. Výpočet byl proveden pro celkem 15 různých velikostí vzorků hranolů i desek, v grafech zobrazujících průběh smrštění jsou pro lepší přehlednost zakresleny jen vybrané vzorky z použité škály velikostí. Pro možné srovnání je u obou grafů zvolen stejný rozsah časové osy. U hranolů (vlevo) byla dostatečná délka vy-

⁶ Ve vstupním souboru pro OOFEM byla použita hodnota $p = 1000$. Pokud je u materiálového modelu MPS zadána hodnota $p > 100$, je hodnota parametru p automaticky brána jako ∞ .

<i>BazantNajjarMoistureMat</i>			
C_1	α_0	h_c	n
$[\text{m}^2 \cdot \text{den}^{-1}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
$30 \cdot 10^{-6}$	0,15	0,65	12

Tabulka 7: Hodnoty parametrů materiálového modelu pro vedení vlhkosti „BazantNajjarMoistureMat“, který byl použit pro transportní úlohu. Hodnoty parametrů byly určeny fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 26) a dotvarování od vysychání (levý graf na Obrázku 27) hranolů Bryantova experimentu. Materiálový model s těmito parametry byl použit v úloze vedení vlhkosti při řešení sdruženého problému u všech variant modelu MPS.

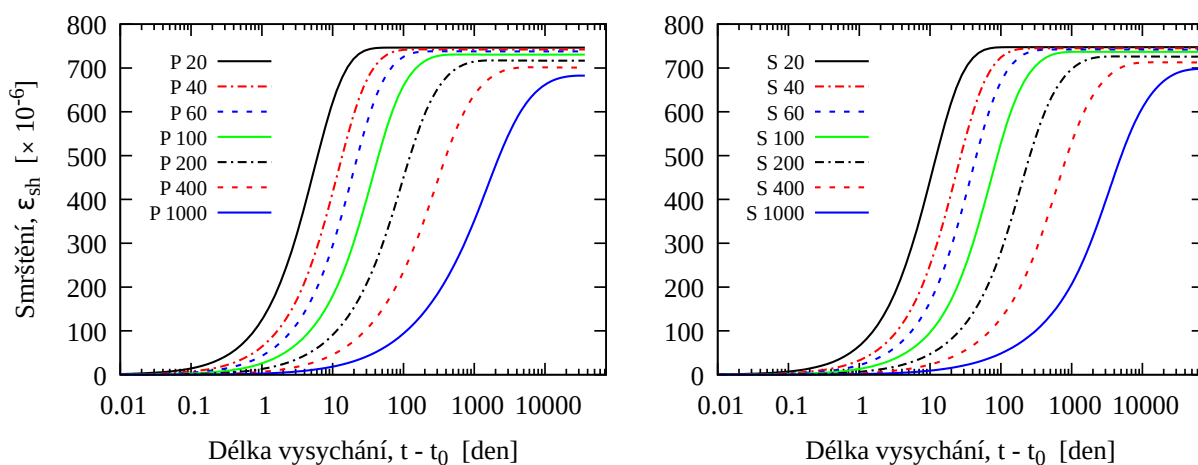
<i>MPS</i>		
p	k_{sh}	k_3
$[-]$	$[-]$	$[-]$
∞^6	$19,7 \cdot 10^{-4}$	26

Tabulka 8: Hodnoty parametrů modelu MPS s potlačeným vlivem velikosti prvku na smrštění od vysychání ($p = \infty$). Kalibrace byla provedena pro shodu numerického výpočtu s výsledky smrštění a dotvarování od vysychání hranolů Bryantova experimentu. Největší důraz byl kladen na shodu s hranolem velikosti 150×150 mm.

sychání pro dosažení konečných hodnot smrštění u všech velikostí vzorků 100 let, u desek (vpravo) byl kvůli desce tl. 1 000 mm výpočet rozšířen na délku vysychání 200 let.

Konečné hodnoty smrštění od vysychání získané výpočty metodou konečných prvků byly následně vyneseny do grafu v závislosti na velikosti náhradní tloušťky průřezu D (levý graf na Obrázku 29). Tento způsob vyhodnocení vlivu velikosti vzorku umožnil porovnání s výsledky experimentů Bryantova výzkumu ve společném grafu. Zakresleny jsou všechny velikosti vzorků, pro které byla numerická simulace provedena, nejen ty, které jsou použity na grafech zobrazujících predikci průběhu smrštění. U experimentálních dat zakreslených zelenou barvou označují plné značky výsledky vzorků, u nichž bylo dosaženo konečné hodnoty smrštění, prázdné značky odpovídají vzorkům, u kterých během sledo-

⁷ Okrajové podmínky desek byly modelovány v souladu se vzorky z experimentálního výzkumu Bryant, tedy jako hranoly, u kterých je vysychání umožněno na dvou protilehlých stěnách. Deformace proto byly umožněny i ve směru kolmém na směr vysychání (deformaci není bráněno geometrickou spojitostí jako u skutečné desky).

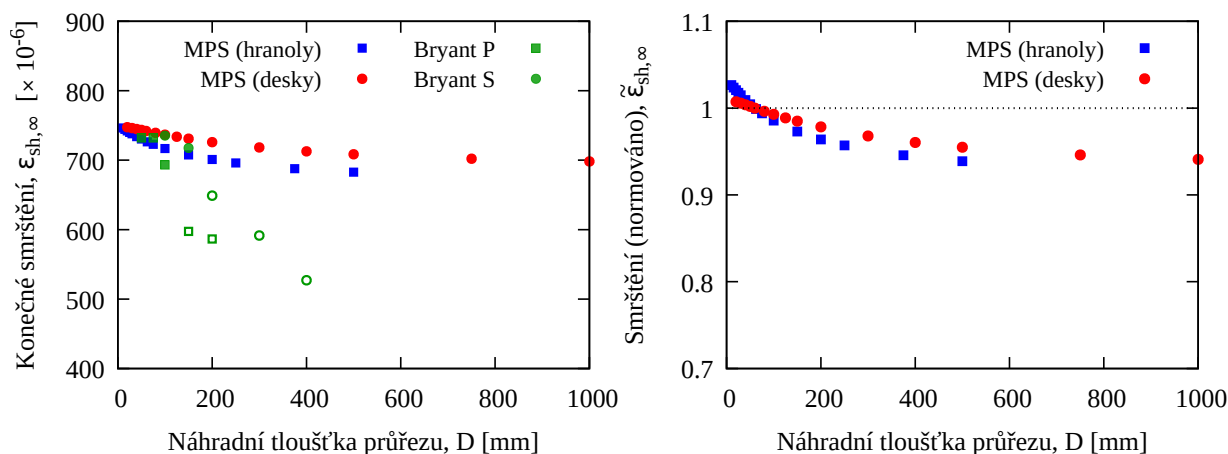


Obrázek 28: Predikce průběhu smrštění pro hranoly (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí podle modelu MPS ($p = \infty$) s parametry uvedenými v Tabulkách 7 a 8. Počátek vysychání při relativní vlhkosti prostředí 60 % byl ve stáří 8 dní.

vaného období nebyl proces smršťování ještě zcela ukončen. U prázdných značek lze tedy předpokládat, že po skutečném dosažení konečné hodnoty smrštění, by jejich výsledná poloha v levém grafu na Obrázku 29 byla o něco výš.

Další grafické vyhodnocení rozměrového efektu znázorněné na pravém grafu Obrázku 29 ukazuje porovnání normovaných hodnot konečného smrštění, opět v závislosti na velikosti náhradní tloušťky průřezu D . Normování bylo provedeno vůči hodnotě smrštění prvku s velikostí odpovídající $D = 60$ mm, tedy shodným způsobem, jakým byly normovány výsledky experimentů v Kapitole 3 i výsledky norem a predikčních modelů v Kapitole 4.

Tento způsob umožňuje lepší srovnání vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění jak mezi hranoly a deskami, tak mezi různými variantami modelů MPS použitých pro numerické simulace v této kapitole. Právě kvůli možnosti vzájemného porovnání jednotlivých modifikací modelu MPS jsou u grafů znázorňujících vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění použity jednotné rozsahy obou os. Jedná se o grafy na Obrázku 29 a odpovídající grafy u všech ostatních variant modelu MPS.



Obrázek 29: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS s potlačeným vlivem velikosti prvku na dotvarování od vysychání ($p = \infty$). Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm. Na levém grafu jsou zelenou barvou zakresleny i výsledky experimentů Bryant, nevyplněné značky odpovídají vzorkům s ne zcela ukončeným procesem smršťování.

6.3 Původní model MPS

Původní model MPS, u kterého je použita default hodnota parametru $p = 2$, vykazuje opačný vliv velikosti prvku na dotvarování od vysychání než jaký ukazují výsledky experimentálních měření. Bylo proto zřejmé, že zejména u tohoto modelu nebude možné při fitování průběhů funkce poddajnosti od vysychání dosáhnout shody numerického výpočtu s experimentálními daty.

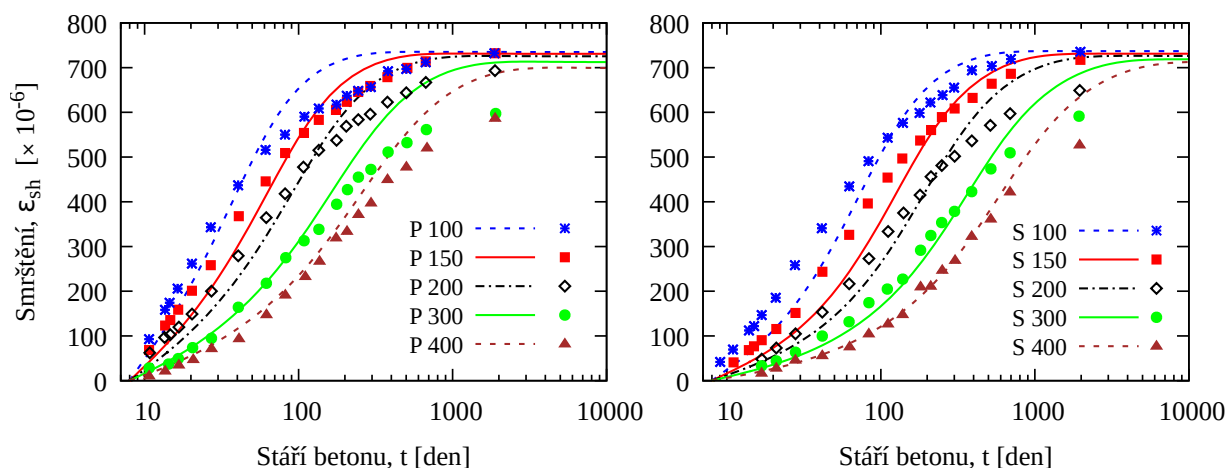
S použitím tohoto modelu nebylo možné správně postihnout celý vývoj ani u jednoho vybraného referenčního vzorku. Pokud bylo dosaženo shody v počátečním vývoji, získaná konečná hodnota dotvarování od vysychání vůbec neodpovídala realitě. O něco lepších výsledků bylo dosaženo při snaze správně vystihnout především poslední hodnotu ze série experimentálních dat referenčního vzorku.

Kromě nedostatku v nepřesném zachycení počátečního vývoje referenčního vzorku je na Obrázku 31 dobře patrný zmiňovaný opačný rozměrový efekt v případě dotvarování od vysychání, který je hlavním nedostatkem tohoto modelu.

Při fitování průběhů smrštění (Obrázek 30) nebylo možné správně postihnout rozdíly v konečných hodnotách změřených u jednotlivých vzorků experimentu. V případě smrštění však tento model nevykazuje opačný rozměrový efekt jako v případě dotvarování od vysychání.

Predikce smrštění pro vzorky více velikostí získaná s nakalibrovanou variantou tohoto modelu MPS je znázorněna na grafech Obrázku 32. Již z těchto grafů a zejména

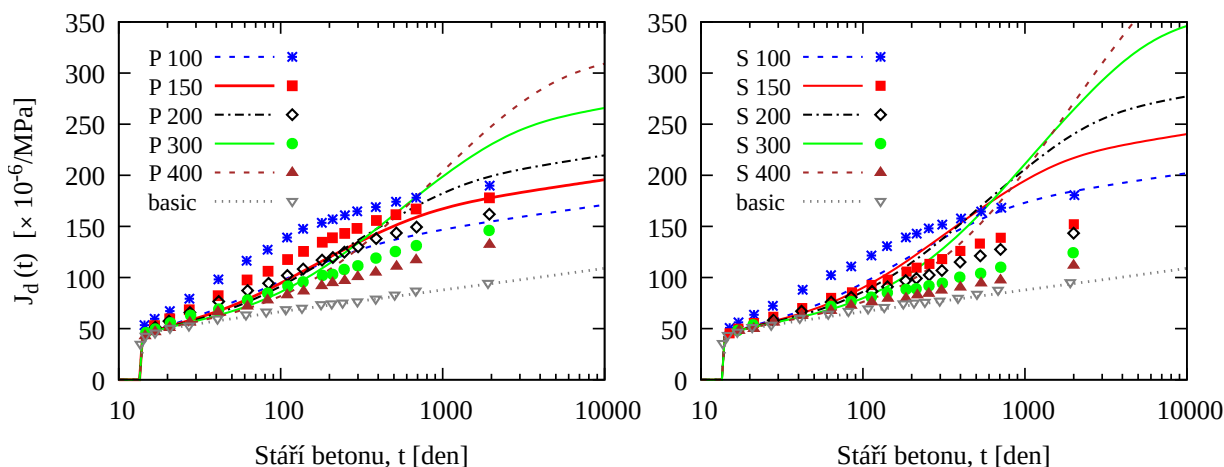
z výsledného vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění na obou grafech Obrázku 33 je zřejmé, že v případě konečných hodnot smrštění vykazuje tento model správný trend, nicméně rozměrový efekt je zejména u malých vzorků výrazně slabší, než jaký můžeme pozorovat u experimentálních dat.



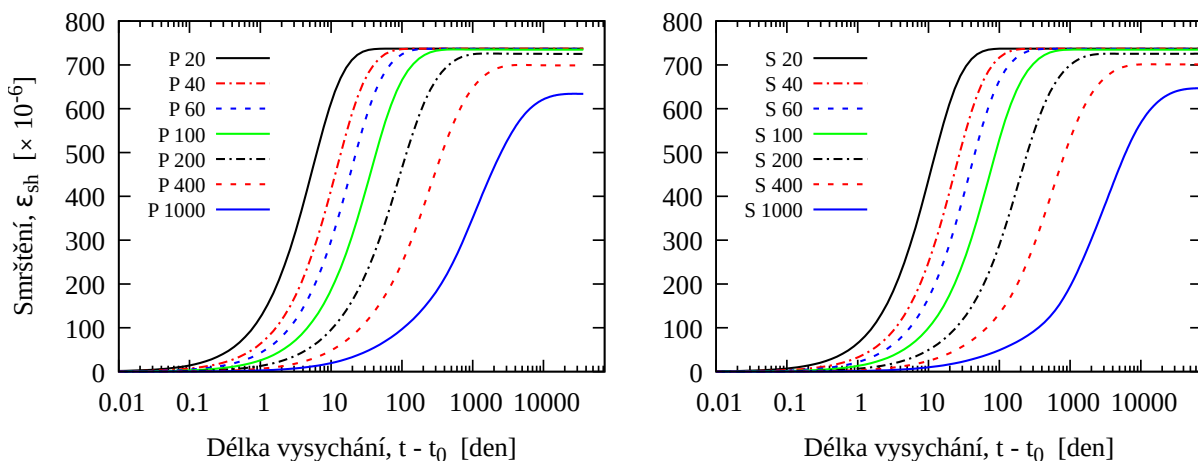
Obrázek 30: Fitování experimentálních dat smrštění hranolů různých velikostí (graf vlevo) pomocí původního modelu MPS (hodnota parametru $p = 2$). Přehled parametrů určených touto kalibrací (spolu s kalibrací dotvarování od vysychání) je uveden v Tabulce 9. Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění desek získané numerickou simulací doplněné o porovnání s výsledky experimentu Bryant. Počátek vysychání byl u všech vzorků ve stáří 8 dní. Body v grafech odpovídají experimentálním datům.

MPS		
p	k_{sh}	μ_s
[–]	[–]	[MPa ⁻¹ · den ⁻¹]
2	$19,4 \cdot 10^{-4}$	$14,0 \cdot 10^{-6}$

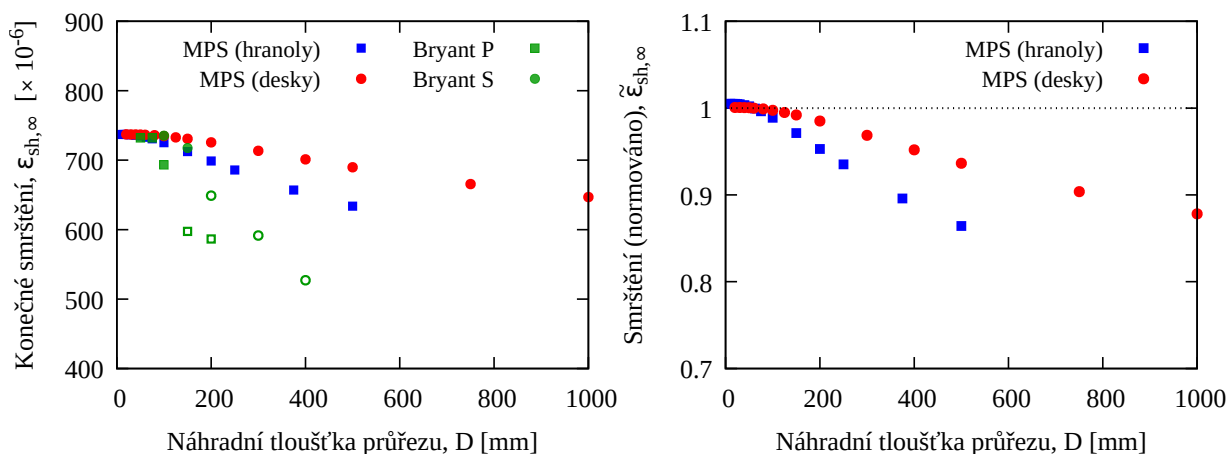
Tabulka 9: Hodnoty parametrů původního modelu MPS ($p = 2$). Kalibrace parametrů byla provedena fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 30) a dotvarování od vysychání (levý graf na Obrázku 31) na výsledky hranolů různých velikostí Bryantova experimentu. Největší důraz byl kladen na shodu s hranolem velikosti 150×150 mm.



Obrázek 31: Kalibrace parametrů původního materiálového modelu MPS ($p = 2$) provedená pomocí fitování průběhů funkce poddajnosti od vysychání hranolových vzorků experimentu Bryant (graf vlevo). Získané parametry modelu jsou uvedeny v Tabulce 9. Hlavním kritériem při fitování bylo dosažení shody numerické simulace s experimentem v případě poslední změřené hodnoty u referenčního vzorku P 150 $\times$ 150 mm ($D = 75$ mm). Průběh funkce poddajnosti pro tento vzorek je zvýrazněn silnější červenou čarou. Vpravo jsou vykresleny spočítané průběhy pro desky a jejich porovnání s experimentem. Pro názornost je v grafech zakreslen i průběh základního dotvarování (šedá barva). Vzorky vysychaly jednotně od stáří 8 dní, zatíženy byly ve stáří 14 dní.



Obrázek 32: Predikce průběhu smrštění pro modely hranolů (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí podle původního modelu MPS ($p = 2$) s parametry uvedenými v Tabulkách 7 a 9. Vysychání probíhalo při relativní vlhkosti prostředí 60 %, stáří betonu při počátku vysychání bylo 8 dní.



Obrázek 33: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s původním modelem MPS ($p = 2$). Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm.

6.4 Model MPS se správným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání

Tento model vychází ze základní verze modelu MPS, ve kterém byla default hodnota parametru p nahrazena konstantní hodnotou $p = -1,5$. V případě použití hodnoty $p < 0$ vykazuje model správný vliv velikosti vzorku na dotvarování od vysychání, je to však vykoupeno nedostatkem v podobě příliš velké poddajnosti při změně relativní vlhkosti. Díky tomu napětí vznikající v průřezu během vysychání velmi rychle relaxují. V důsledku toho jsou tahová napětí ve vysychající části průřezu řádově nižší, než je tahová pevnost betonu a nemůže proto dojít ke vzniku povrchových trhlin, což je v rozporu s reálným chováním betonových konstrukcí. Zároveň je díky relaxaci vnitřního napětí v průřezu menší i hodnota smrštění.

Jako jediný z modifikací základního modelu MPS umožnil tento model dosažení shody výsledků numerických simulací a experimentálních dat u dotvarování od vysychání pro vzorky různých velikostí. Fitování průběhů pro hranoly a následně vypočtené průběhy pro desky jsou vykresleny na grafech Obrázku 35.

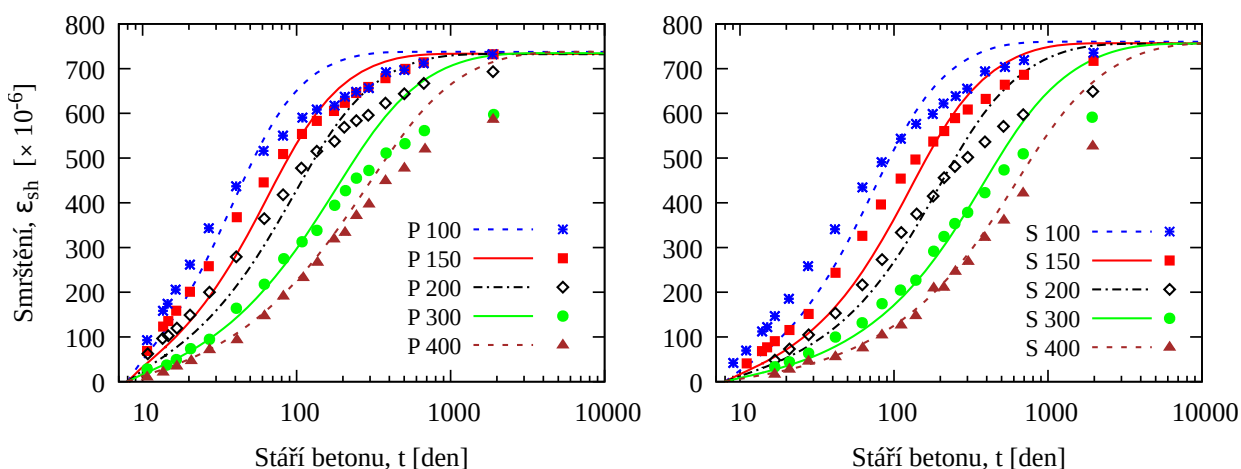
I přes velmi dobrý popis dotvarování od vysychání nedává tento model správné výsledky v případě průběhu smrštění u prvků různých velikostí, což je zřejmé z grafů na Obrázku 34 i na Obrázku 36.

V grafickém vyhodnocení závislosti mezi velikostí vzorku a konečnou hodnotou smrštění na grafech Obrázku 37 je vidět velmi neobvyklý, dokonce nemonotónní rozměrový

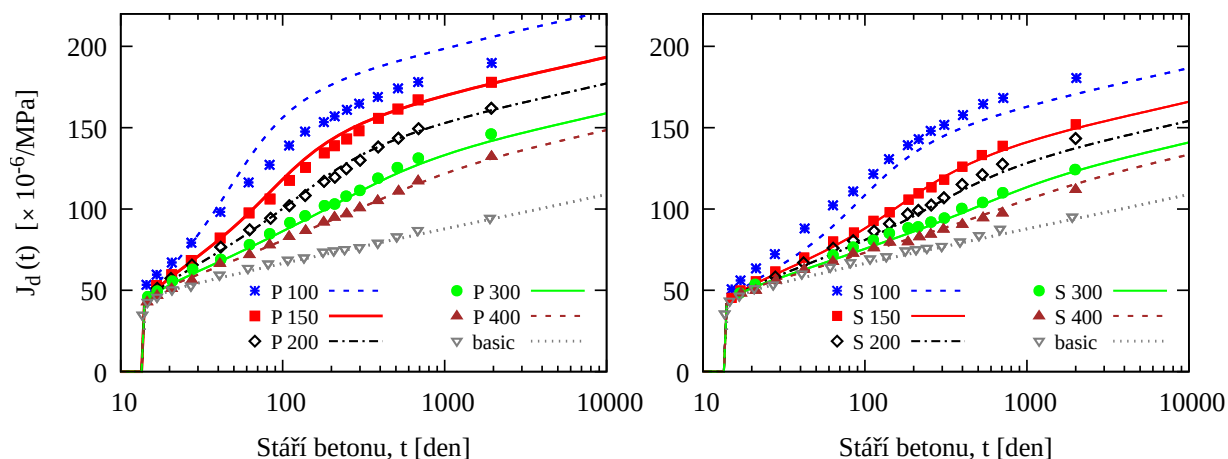
efekt. V případě velmi malých vzorků je sice vliv velikosti vzorku uvažován správným způsobem, z hlediska možné predikce smrštění vzorků větších rozměrů na základě znalosti smrštění u malých vzorků je tento model zcela nepoužitelný.

<i>MPS</i>		
p	k_{sh}	μ_s
[-]	[-]	[MPa ⁻¹ · den ⁻¹]
-1,5	$20,6 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-10}$

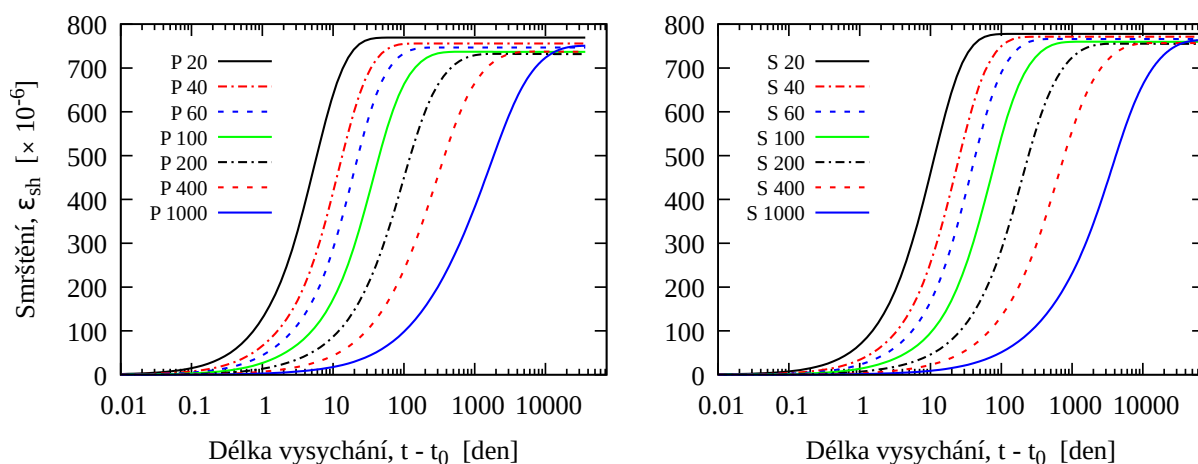
Tabulka 10: Hodnoty parametrů modelu MPS se správným zohledněním vlivu velikosti vzorku na dotvarování od vysychání ($p = -1,5$). Kalibrace parametrů byla provedena současným fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 34) a dotvarování od vysychání (levý graf na Obrázku 35) na experimentálních datech hranolů různých velikostí Bryantova experimentu.



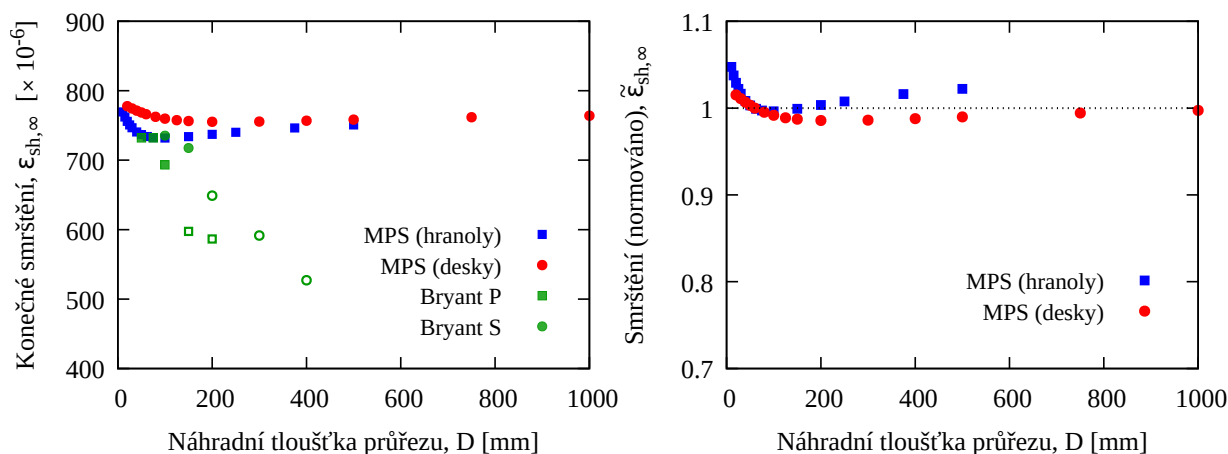
Obrázek 34: Fitování experimentálních dat smrštění hranolů různých velikostí (graf vlevo) pomocí modelu MPS ($p = -1,5$). Přehled parametrů určených touto kalibrací (spolu s kalibrací dotvarování od vysychání) je uveden v Tabulce 10. Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění desek získané numerickou simulací a jejich porovnání s výsledky experimentu Bryant. Počátek vysychání byl u všech vzorků ve stáří 8 dní.



Obrázek 35: Kalibrace parametrů upraveného materiálového modelu MPS ($p = -1,5$) provedená pomocí fitování průběhů funkce poddajnosti od vysychání hranolových vzorků experimentu Bryant (graf vlevo). Získané parametry modelu jsou uvedeny v Tabulce 10. Vpravo jsou vykresleny spočítané průběhy pro desky a jejich porovnání s experimentem. Pro názornost je v grafech zakreslen i průběh základního dotvarování (šedá barva). Vzorky vysychaly jednotně od stáří 8 dní, zatíženy byly ve stáří 14 dní.



Obrázek 36: Predikce průběhu smrštění pro hranoly (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí podle modelu MPS ($p = -1,5$). Parametry modelu použité při výpočtu jsou uvedeny v Tabulkách 7 a 10. Počátek vysychání byl ve stáří 8 dní, relativní vlhkost prostředí činila 60 %.



Obrázek 37: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS se správným zohledněním vlivu velikosti vzorku na dotvarování od vysychání ($p = -1,5$). Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm.

6.5 Modely MPS s modifikovaným součinitelem smrštění

Následující čtyři modifikace materiálového modelu MPS se liší od základní verze o něco více. Hodnota součinitele smrštění k_{sh} , který ovlivňuje přibližně lineárně velikost smrštění, byla ve všech předchozích variantách modelu uvažována sice různou, ale vždy konstantní hodnotou. V následujících modelech je hodnota součinitele smrštění k_{sh} uvažována jako funkce jedné proměnné. První dva z dále popsanych a vyhodnocených modelů uvažují hodnotu koeficientu k_{sh} jako funkci času, další dva jako funkci relativní vlhkosti v daném materiálovém bodě.

6.5.1 Časově závislý součinitel smrštění

Pro časovou závislost koeficientu smrštění k_{sh} byly použity dvě verze modelu MPS. Jedna uvažuje závislost na tzv. ekvivalentním čase t_e , což je čas závislý na vývoji vlhkosti a teploty v daném bodě, druhá varianta uvažuje závislost na reálném čase t .

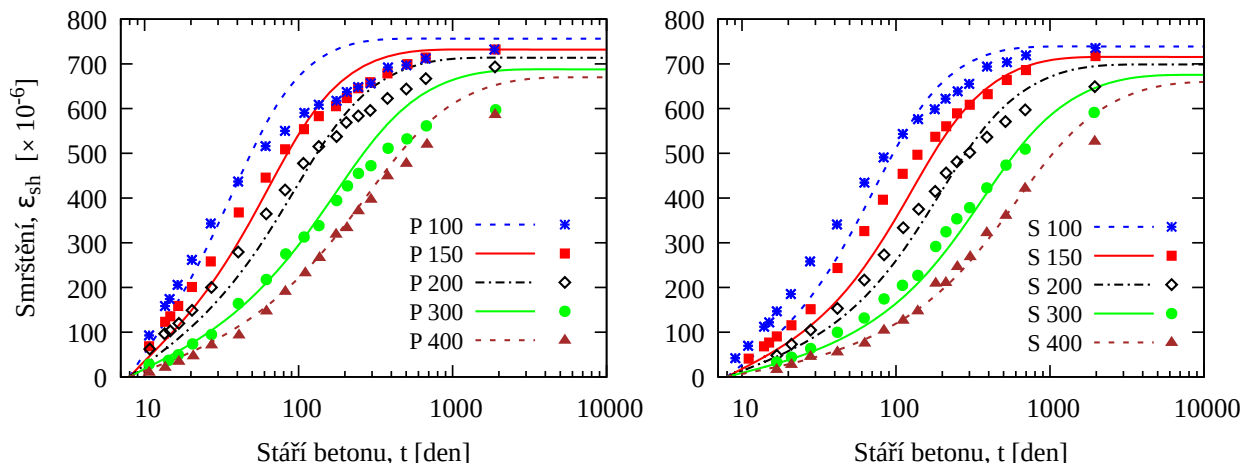
U obou modelů s časově závislým součinitelem smrštění byla prováděna pouze kalibrace základní hodnoty tohoto součinitele na průbězích smrštění hranolových vzorků Bryant. Ostatní parametry byly převzaty z modelu MPS s potlačeným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání ($p = \infty$), který je analyzován v části 6.2. Fitování funkce poddajnosti od vysychání proto nebylo nutné provádět.

Součinitel smrštění závislý na efektivním čase

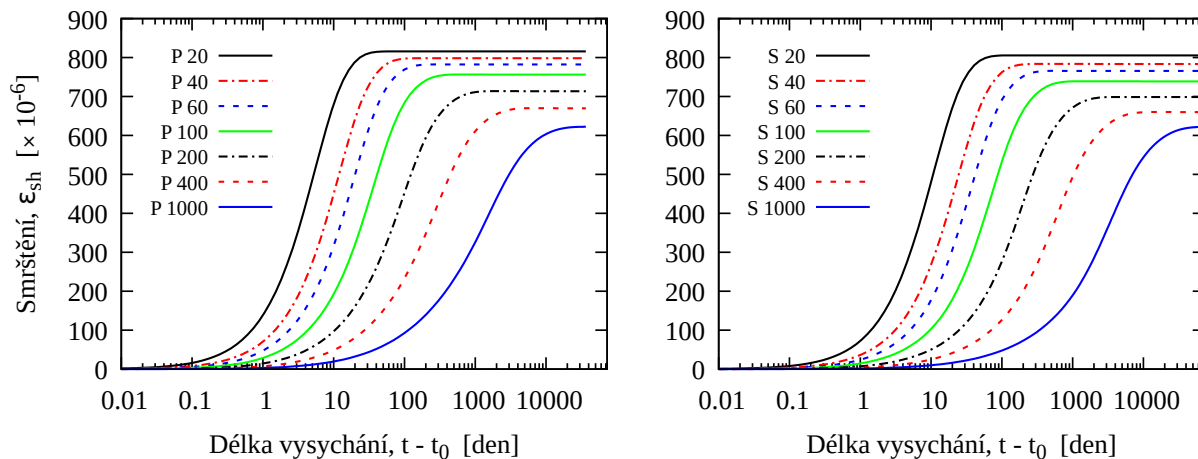
U této verze časové závislosti součinitele smrštění k_{sh} je během výpočtu dáván do poměru součinitel základního dotvarování pro délku zatížení 0.01 dne vyhodnocený v ekvivalentním čase t_e a v referenčním čase 28 dní. Vzájemným poměrem těchto hodnot je v každém časovém kroku násobena základní hodnota součinitele smrštění, která byla opět získána fitováním experimentálních dat, tentokrát však pouze průběhů smrštění (viz levý graf na Obrázku 38).

Vzhledem k výraznější závislosti smrštění na čase a tedy na stáří betonu byla u tohoto modelu MPS predikce smrštění hranolů a desek s počátkem vysychání ve stáří 8 dní (grafy na Obrázku 39) doplněna ještě o simulaci smrštění hranolů vysychajících až od stáří 28 dní (graf na Obrázku 40). Výsledky této simulace byly přidány i do grafu normovaných hodnot na Obrázku 41, kde je zakreslen světle modrou barvou. Podle očekávání vykazuje vzorek s pozdějším počátkem vysychání slabší vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění.

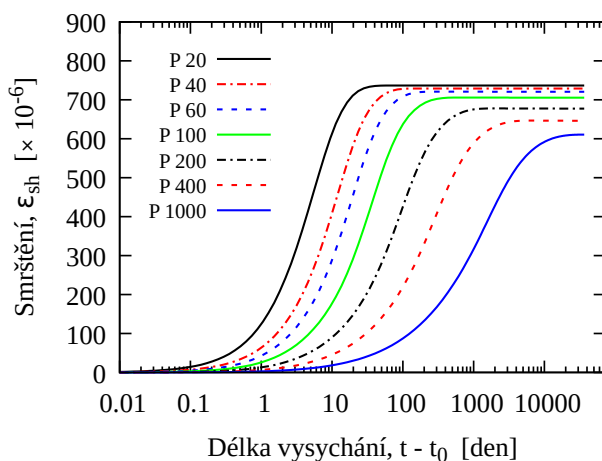
Z vyhodnocení je zřejmé, že tento model uvažuje vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání mnohem lépe, než všechny předchozí varianty modelu MPS. Správně vystihuje i klesající trend rozměrového efektu v závislosti na vzrůstající velikosti prvku.



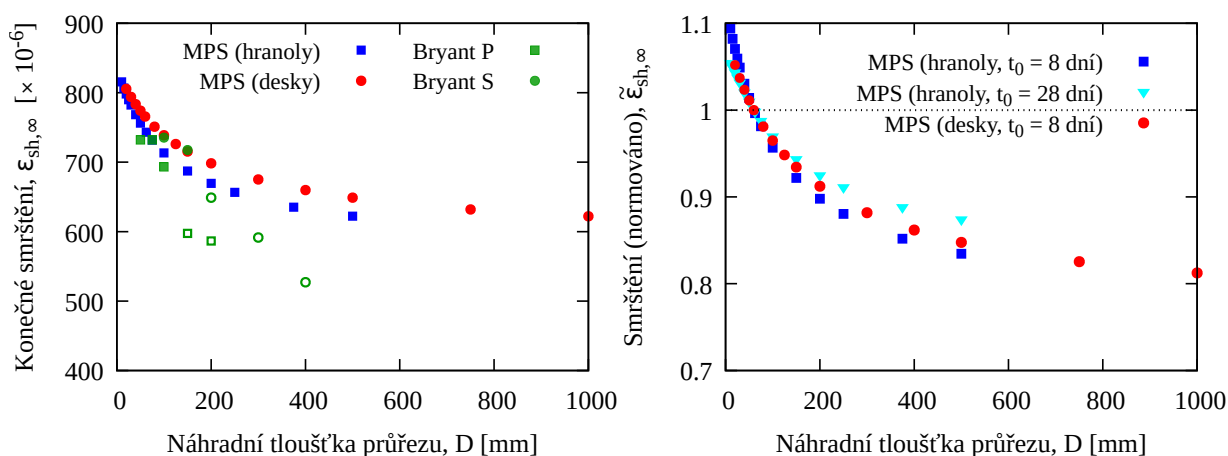
Obrázek 38: Kalibrace parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na ekvivalentním čase fitováním experimentálních dat smrštění hranolů Bryant (graf vlevo). Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění získané pro desky a jejich porovnání s experimentem. Přehled nakalibrovaných parametrů je uveden v Tabulce 11. Počátek vysychání byl u všech vzorků ve stáří 8 dní, relativní vlhkost prostředí byla 60 %.



Obrázek 39: Predikce průběhu smrštění pro hranoly (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí podle materiálového modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na ekvivalentním čase t_e . Parametry použité při numerických simulacích s tímto modelem jsou uvedeny v Tabulkách 7 a 11. Počátek vysychání byl ve stáří 8 dní, relativní vlhkost prostředí činila 60 %.



Obrázek 40: Predikce průběhu smrštění pro hranoly různých velikostí s počátkem vysychání ve stáří 28 dní. Výpočet byl proveden podle materiálového modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na ekvivalentním čase t_e . Z porovnání s levým grafem na Obrázku 39 je zřejmý vliv pozdějšího počátku vysychání na redukci rozměrového efektu.



Obrázek 41: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na ekvivalentním čase t_e . Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm. Světle modrou barvou jsou v normovaném grafu zakresleny vzorky s počátkem vysychání ve stáří 28 dní pro ilustraci vlivu pozdějšího počátku vysychání na redukcí rozměrového efektu.

MPS			
p	k_{sh}	k_3	α_E
$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
∞	$f(t_e) \cdot 19,5 \cdot 10^{-4}$	26	10

Tabulka 11: Hodnoty parametrů materiálového modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na ekvivalentním čase t_e . Kalibrace parametrů byla provedena fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 38) na výsledky hranolů různých velikostí Bryantova experimentu.

Součinitel smrštění závislý na reálném čase

U této varianty je určení hodnoty součinitele smrštění k_{sh} v každém kroku výpočtu analogické k předchozímu modelu pouze s tím rozdílem, že vyhodnocení součinitele základního dotvarování v každém časovém kroku je prováděno kromě referenčního času 28 dní pro skutečný čas, nikoli čas ekvivalentní.

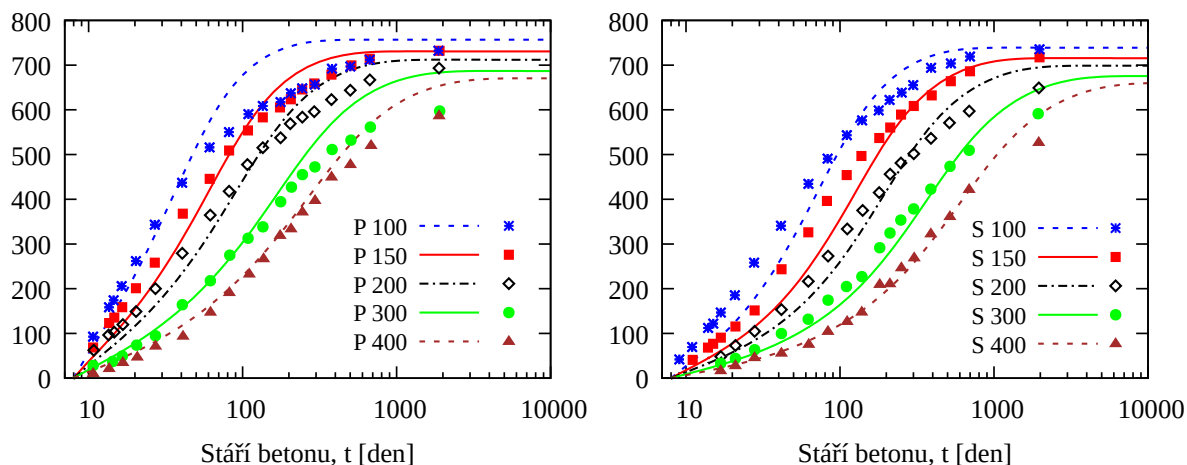
Použití materiálového modelu se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na skutečném čase vede k mírně menšímu rozptylu ve výsledných hodnotách smrštění pro vzorky různých velikostí (viz grafy na Obrázcích 43 a 44), než tomu bylo u varianty se závislostí na ekvivalentním čase t_e . Na základě vyhodnocení lze u tohoto modelu konstatovat správný

způsob zohlednění velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění, což nejlépe ilustruje srovnání s výsledky Bryantova experimentu na levém grafu Obrázku 45.

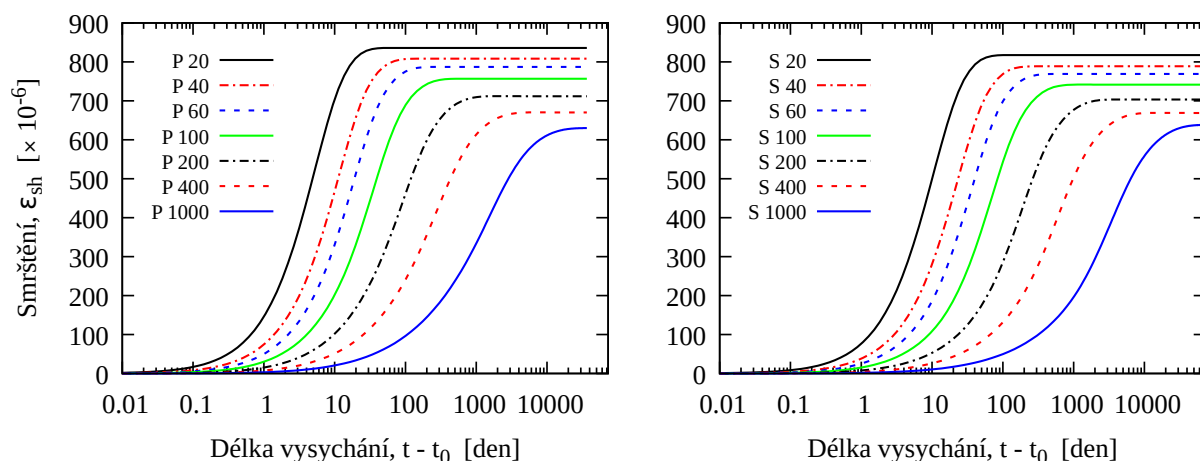
I u tohoto materiálového modelu byly numerické simulace hranolů a desek vysychajících od stáří 8 dní doplněny o simulaci smrštění hranolů s počátkem vysychání ve stáří 28 dní. V případě závislosti součinitele smrštění k_{sh} na reálném čase je redukce rozměrového efektu vlivem pozdějšího počátku vysychání slabší než v případě závislosti součinitele k_{sh} na ekvivalentním čase t_e .

<i>MPS</i>			
p	k_{sh}	k_3	α_E
[–]	[–]	[–]	[–]
∞	$f(t) \cdot 20,6 \cdot 10^{-4}$	26	0

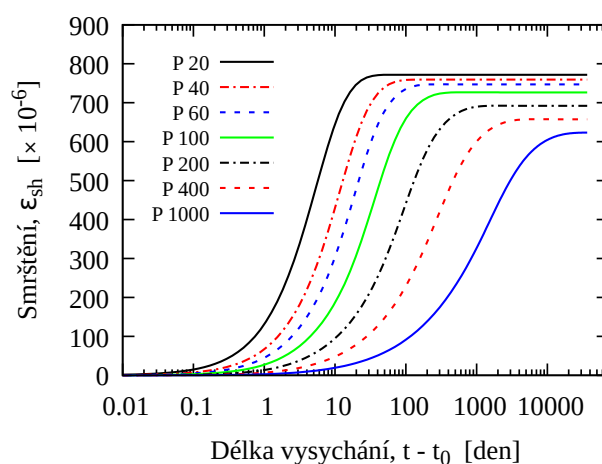
Tabulka 12: Hodnoty parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění závislým na skutečném čase t . Kalibrace parametrů byla provedena fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 38) na výsledky hranolů různých velikostí Bryantova experimentu.



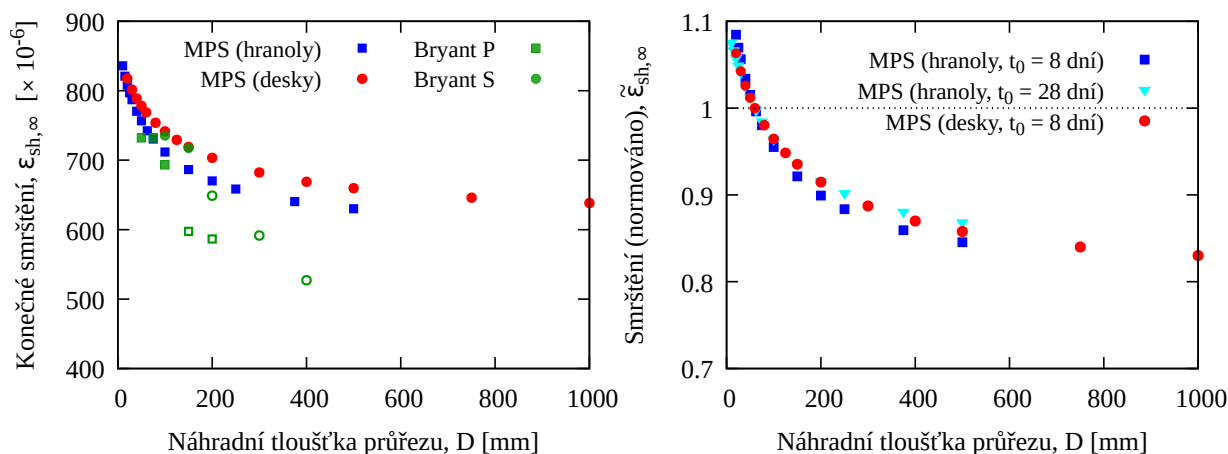
Obrázek 42: Kalibrace parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na reálném čase provedená fitováním experimentálních dat smrštění hranolů Bryant (graf vlevo). Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění získané pro desky a jejich porovnání s experimentem. Přehled nakalibrovaných parametrů je uveden v Tabulce 12. Počátek vysychání byl u všech vzorků ve stáří 8 dní.



Obrázek 43: Predikce průběhů smrštění pro vzorky hranolů (vlevo) a desek (vpravo) různých velikostí podle modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na reálném čase t . Parametry použité při numerických simulacích s tímto modelem jsou uvedeny v Tabulkách 7 a 12. Počátek vysychání při relativní vlhkosti prostředí 60 % byl ve stáří 8 dní.



Obrázek 44: Predikce průběhu smrštění pro desky různých velikostí s počátkem vysychání ve stáří 28 dní. Výpočet byl proveden podle materiálového modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na skutečném čase t . Z porovnání s levým grafem na Obrázku 43 je patrný mírný vliv pozdějšího počátku vysychání na redukci rozměrového efektu. V případě modelu se závislostí na ekvivalentním čase je však tato redukce o poznání výraznější.



Obrázek 45: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na reálném čase t . Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm. Světle modrou barvou jsou v normovaném grafu zakresleny vzorky s počátkem vysychání ve stáří 28 dní pro ilustraci vlivu pozdějšího počátku vysychání na redukci rozměrového efektu.

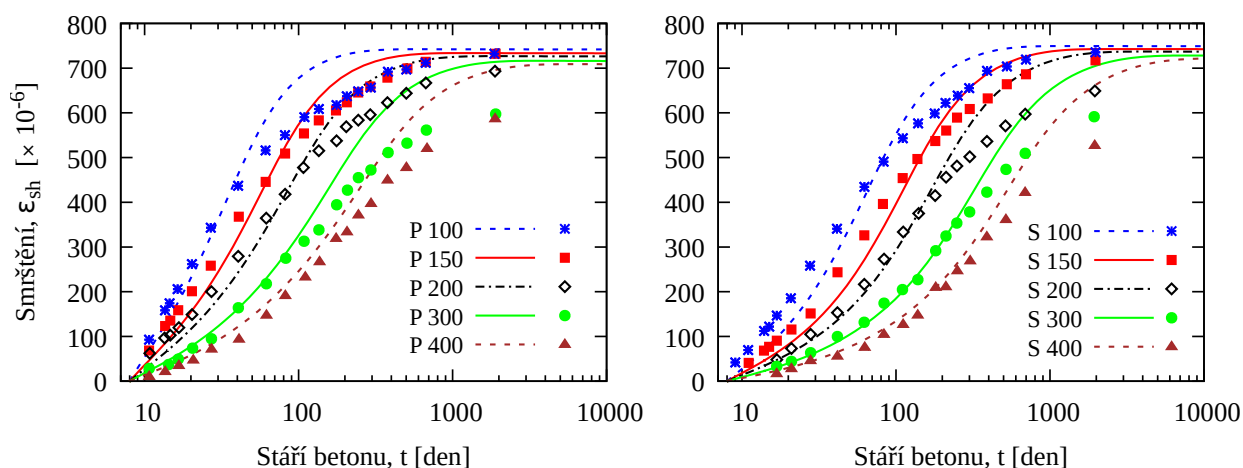
6.5.2 Součinitel smrštění závislý na vlhkosti

Následující dva modely uvažují součinitel smrštění k_{sh} jako funkci aktuální vlhkosti v daném materiálovém bodě. Základní hodnota součinitele k_{sh} je při výpočtu násobena faktorem, který je v každé ze dvou následujících modifikací modelu MPS popsán mírně odlišnou funkcí.

Lineární změna závislosti součinitele smrštění na vlhkosti

Faktor, kterým je násobena základní hodnota součinitele smrštění je v tomto případě popsán jednoduchou funkcí s lineárním přechodem mezi dvěma konstantními částmi. Pro relativní vlhkost v rozmezí 0,8 – 1,0 je hodnota faktoru $f(h) = 1,0$, pro rozmezí vlhkosti 0 – 0,5 je konstantně $f(h) = 0,5$ a pro rozsah vlhkosti 0,5 – 0,8 je uvažován lineární přechod hodnoty faktoru mezi hodnotami 0,5 a 1,0.

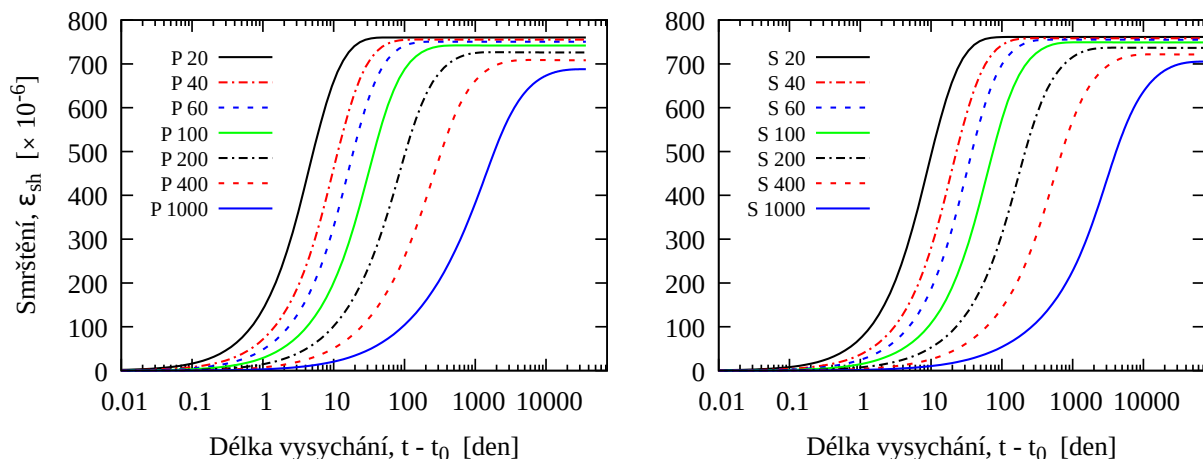
U tohoto modelu byla kalibrace základní hodnoty součinitele smrštění k_{sh} provedena opět pouze fitováním průběhů smrštění (viz levý graf na Obrázku 46 fitování průběhu funkce poddajnosti od vysychání nebylo nutné provádět, hodnoty ostatních parametrů byly převzaty z modelu MPS s potlačeným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání popsaného v části 6.2 této práce.



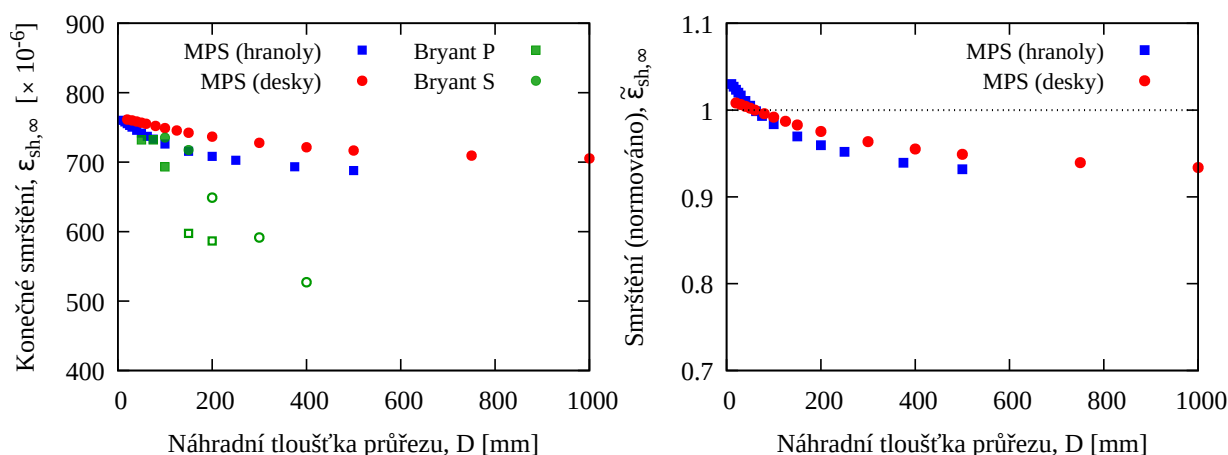
Obrázek 46: Fitováním experimentálních dat smrštění hranolů Bryant (graf vlevo), které sloužilo pro kalibraci parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na vlhkosti (faktor s lineárním přechodem). Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění získané pro desky a jejich porovnání s experimentem. Přehled nakalibrovaných parametrů je uveden v Tabulce 13. Počátek vysychání vzorků byl ve stáří 8 dní.

<i>MPS</i>		
p	k_{sh}	k_3
$[-]$	$[-]$	$[-]$
∞	$f(h) \cdot 22,0 \cdot 10^{-4}$	26

Tabulka 13: Hodnoty parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění závislým na vlhkosti (lineární změna hodnoty faktoru). Kalibrace byla provedena fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 46) na výsledky hranolů různých velikostí Bryantova experimentu.



Obrázek 47: Predikce průběhu smrštění pro hranoly (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí podle modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na aktuální vlhkosti (faktor s lineárním přechodem). Parametry použité při numerických simulacích s tímto modelem jsou uvedeny v Tabulkách 7 a 13. Počátek vysychání byl ve stáří 8 dní, relativní vlhkost prostředí činila 60 %.



Obrázek 48: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na aktuální vlhkosti (faktor s lineárním přechodem). Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm.

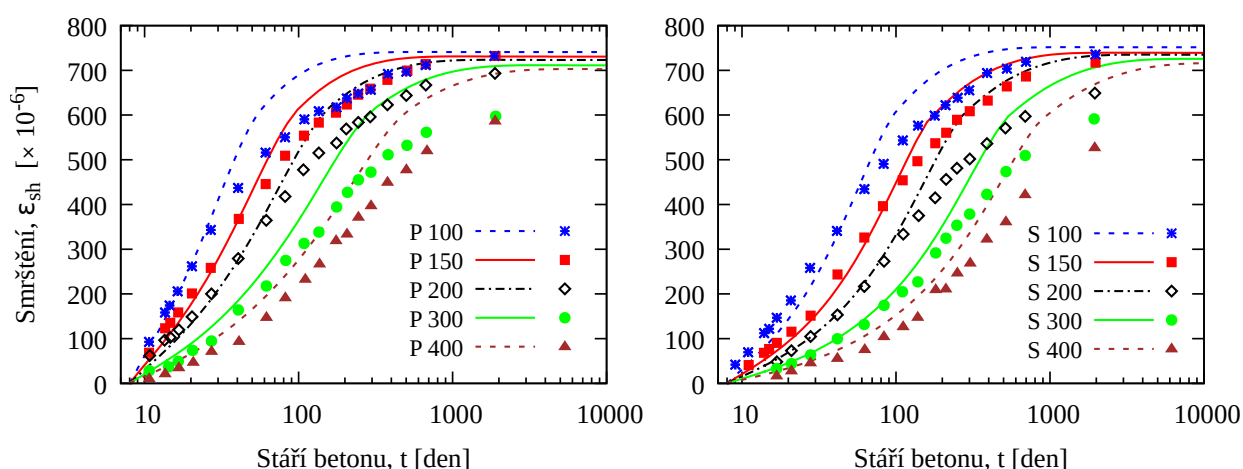
Vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění na základě výsledků numerických simulací s provedených s touto variantou materiálového modelu MPS na grafech Obrázku 48 ukazuje sice správný základní trend, avšak slabší než v případě experimentálních dat výzkumu Bryant.

Okamžitá změna závislosti součinitele smrštění na vlhkosti

Funkce vyjadřující hodnotu faktoru $f(h)$ je v tomto případě složena ze dvou konstantních částí s okamžitým přechodem při poklesu relativní vlhkosti v daném materiálovém bodě pod hranici 0,75. Konkrétně je tedy pro $0 \leq h < 0,75$ hodnota faktoru $f(h) = 0,5$ a pro $0,75 \leq h \leq 1,0$ hodnota faktoru $f(h) = 1,0$.

Stejně jako u třech předchozích modelů, i zde byla provedena pouze kalibrace základní hodnoty součinitele smrštění k_{sh} podle průběhů smrštění hranolových vzorků Bryant. Ostatní parametry byly převzaty z modelu MPS ($p = \infty$).

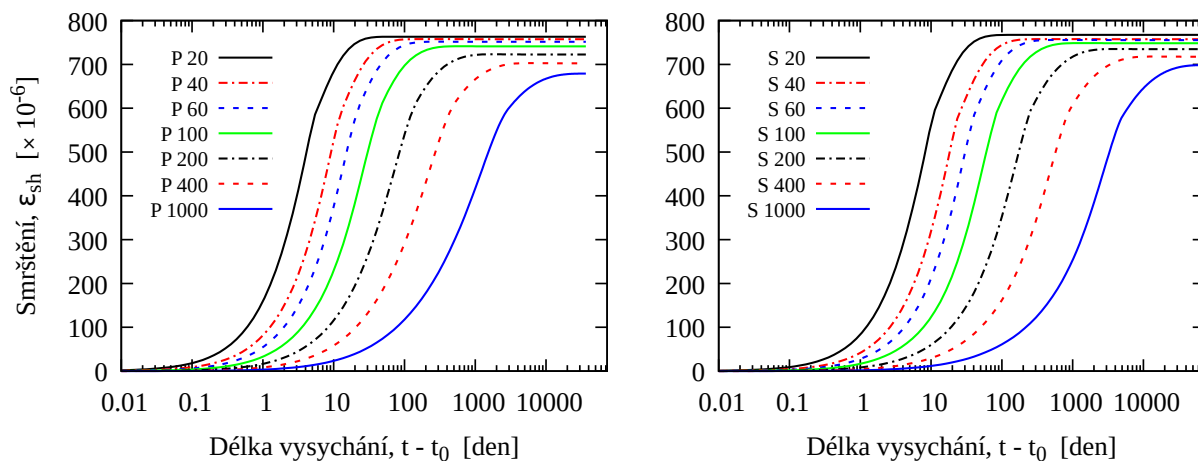
Vyhodnocení rozměrového efektu v případě této varianty modelu MPS ukazuje sice o něco silnější závislost než u předešlého modelu s lineární změnou faktoru, stále je ale výrazně menší než jak ukazují výsledky experimentálního výzkumu Bryant.



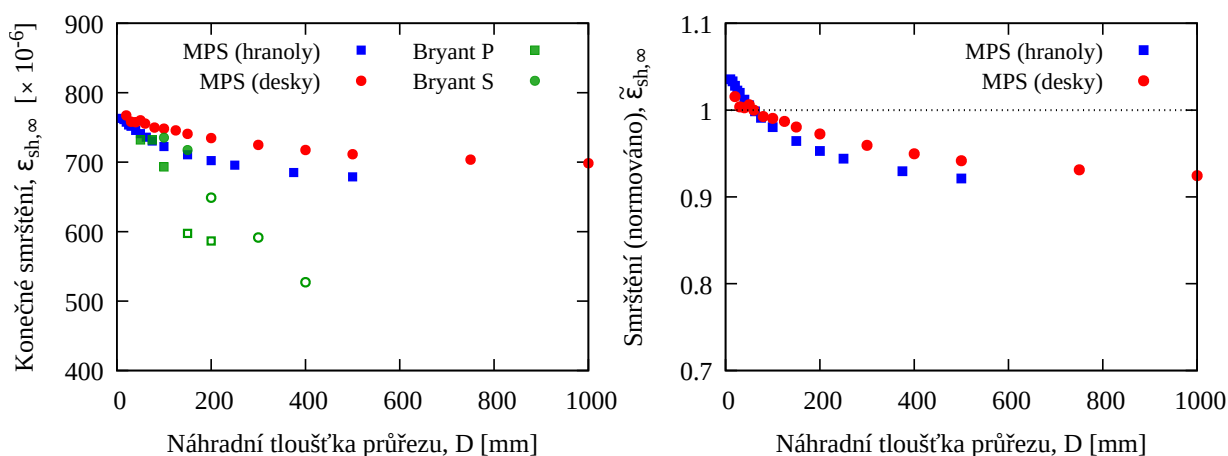
Obrázek 49: Fitováním experimentálních dat smrštění hranolů Bryant (graf vlevo), které sloužilo pro kalibraci parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na vlhkosti (faktor s okamžitým přechodem). Vpravo jsou vykresleny průběhy smrštění získané pro desky a jejich porovnání s experimentem. Přehled nakalibrovaných parametrů je uveden v Tabulce 14. Počátek vysychání vzorků byl ve stáří 8 dní.

<i>MPS</i>		
p	k_{sh}	k_3
$[-]$	$[-]$	$[-]$
∞	$f(h) \cdot 25,1 \cdot 10^{-4}$	26

Tabulka 14: Hodnoty parametrů modelu MPS se součinitelem smrštění závislým na vlhkosti (okamžitá změna hodnoty faktoru při $h_{env} = 0,75$). Kalibrace byla provedena fitováním průběhu smrštění (levý graf na Obrázku 49) na výsledky hranolů různých velikostí Bryantova experimentu.



Obrázek 50: Predikce průběhu smrštění pro hranoly (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí podle modelu MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na aktuální vlhkosti (faktor s okamžitým přechodem). Parametry použité při numerických simulacích s tímto modelem jsou uvedeny v Tabulkách 7 a 14. Počátek vysychání byl ve stáří 8 dní, relativní vlhkost prostředí činila 60 %.



Obrázek 51: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS se součinitelem smrštění k_{sh} závislým na aktuální vlhkosti (faktor s okamžitým přechodem). Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění, graf vpravo hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm.

6.6 Model MPS s možností vzniku tahových trhlin

Tento model vychází z varianty materiálového modelu MPS s potlačeným vlivem velikosti vzorku na dotvarování od vysychání. Pro úlohu vedení vlhkosti i pro materiál MPS v úloze mechaniky jsou převzaty veškeré hodnoty parametrů uvedené v Tabulkách 7 a 8.

Model byl rozšířen přidáním dalšího materiálu „ConcreteFcmViscoelastic“, který výpočet obohacuje o možnost vzniku tahových trhlin. Dva základní nově přidávané parametry tohoto materiálového modelu jsou tahová pevnost betonu, která byla v čase uvažována konstantní hodnotou velikosti 3 MPa a lomová energie, jejíž hodnota byla brána taktéž konstantně hodnotou 100 J/m².

Prvkový model pro tuto úlohu již nemohl obsahovat pouze jedinou vrstvu konečných prvků, tento typ modelu bylo i nadále možné použít pro úlohu vedení vlhkosti, úloha mechaniky již musela mít jemnější dělení prvků i po výšce průřezu. Pro každý ze vzorků byly proto vytvořeny dvě vhodné sítě konečných prvků na stejně velkém modelu.

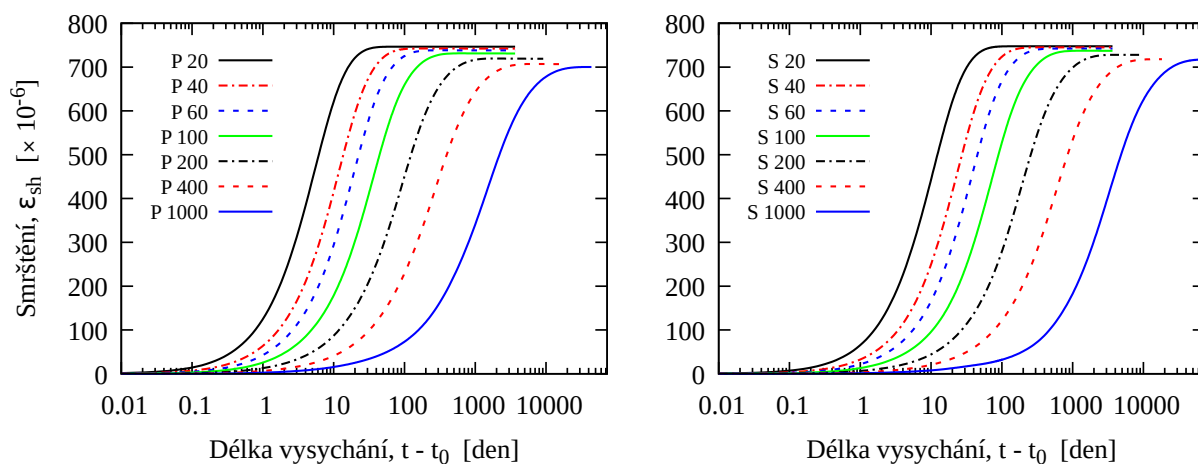
Numerické simulace smršťování s použitím tohoto modelu byly časově velmi náročné, proto bylo vybráno jen 7 různých velikostí vzorků pro hranoly i desky a navíc by vhodně zkrácena délka časového intervalu pro simulaci vysychání u menších vzorků. Predikce smrštění hranolů i desek je na Obrázku 52.

Vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění vyhodnocený z výsledků nu-

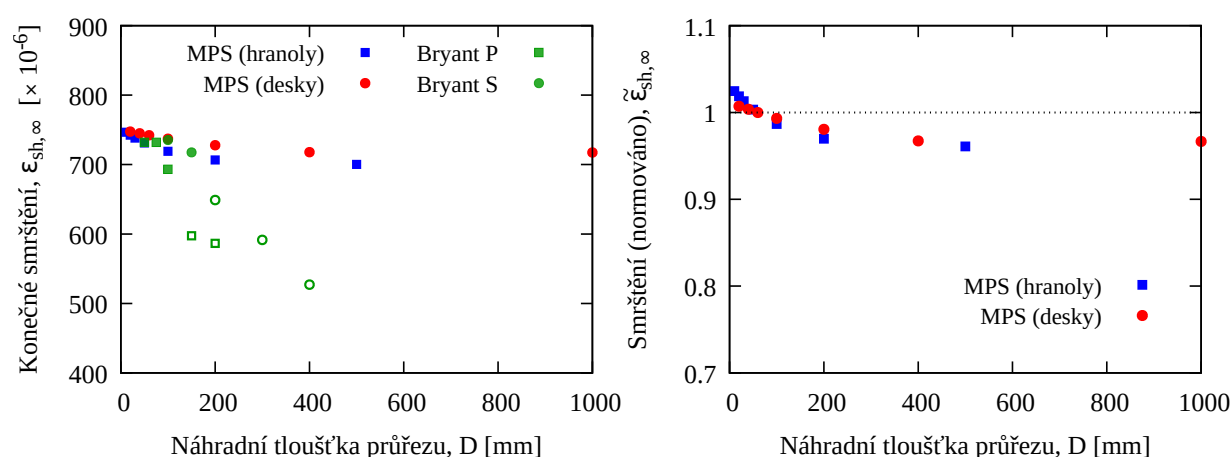
merických simulací s modelem s tahovými trhlinkami je graficky znázorněn na grafech Obrázku 53.

Při porovnání s výsledky modelu MPS ($p = \infty$), ze kterého tento model vychází (oba mají stejný viskoelastický materiál) je v případě trhlinkového modelu rozměrový efekt o něco slabší. Menší jsou i absolutní hodnoty konečného smrštění, tento rozdíl ale není významný.

Menší hodnoty výsledného smrštění lze vysvětlit snížením napětí uvnitř průřezu. Na druhou stranu vznik trhlin umožňuje přístup vzduchu a urychluje proces vysychání, to může být důvodem, proč je mezi modelem bez trhlin a modelem s trhlinami jen velmi malý rozdíl.



Obrázek 52: Predikce průběhu smrštění pro hranoly (vlevo) a desky (vpravo) různých velikostí získaná výpočtem metodou konečných prvků pro model MPS rozšířený o možnost vzniku tahových trhlin. Simulovaná délka vysychání byla volena individuálně pro každou velikost vzorku. Počátek vysychání byl ve stáří 8 dní, relativní vlhkost prostředí činila 60 %.



Obrázek 53: Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění od vysychání betonu vyhodnocený z výsledků numerických simulací s modelem MPS rozšířeným o možnost vzniku tahových trhlin. Graf vlevo ukazuje absolutní hodnoty poměrného smrštění a porovnává je s výsledky Bryantových experimentů. Nevyplněné značky odpovídají experimentálním vzorkům, u kterých nebyl proces smršťování ve sledovaném období zcela ukončen. Graf vpravo zobrazuje hodnoty normované vůči smrštění vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 60$ mm.

7 Závěr

Snaha o minimalizaci finančních nákladů při výstavbě moderních konstrukcí vede k potřebě kvalitních návrhů, u nichž není bezpečnost zajištěna zbytečnou konzervativností a tím vyššími náklady. Ani požadavky na rychlost výstavby nejsou v souladu s představou provádění dlouhodobých laboratorních měření na reprezentativních betonových vzorcích, která by ověřila chování konkrétní betonové konstrukce. Řešením může být, a v budoucnu určitě bude, využití numerických simulací s vhodným materiálovým modelem. Zejména v kombinaci se známým rozměrovým efektem u malých vzorků, který umožní kalibraci materiálového modelu. Správně navržený sofistikovaný materiálový model by v budoucnu mohl posloužit i k odvození vztahů do návrhových norem.

Cílem této práce bylo podat komplexnější pohled na problematiku vztahu mezi velikostí vzorku a konečnou hodnotou smrštění při vysychání. Analyzovány byly běžně používané normy a predikční modely, nemalé množství experimentálních dat i několik variant pokročilého materiálového modelu pro výpočet metodou konečných prvků.

Předpoklady jednotlivých výpočetních modelů příliš neobstály při konfrontaci s experimentálními výsledky. Problémy se však nevyhnuly ani snaze vyhodnotit vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění na základě experimentálních dat. Pokročilé modely se často potýkají s problémem správně popsat smrštění i dotvarování pro vzorky různých velikostí.

V následující části jsou stručně shrnuty závěry, ke kterým tato práce dospěla:

Experimentální data

- Výsledky experimentů jednoznačně ukazují existující závislost mezi velikostí vzorku a hodnotou konečného smrštění. S nárůstem velikosti vzorku dochází k redukci konečné hodnoty poměrného smrštění, výrazněji se tento vliv projevuje zejména u menších vzorků.
- Na základě experimentů je možné vyhodnotit rozměrový efekt pouze pro omezený rozsah velikosti vzorků. Pro prvky s náhradní tloušťkou průřezu $D > 100$ mm je k dispozici jen velmi malé množství experimentů s ukončeným procesem smršťování. Kvalitní experimentální data pro prvky s náhradní tloušťkou průřezu $D > 150$ mm zcela chybí.
- Chybějící experimentální data pro vzorky větších rozměrů není možné ani v budoucnu doplnit skutečnými experimenty. Proces smrštění u prvků s velikostí $D > 150$ mm probíhá v řádu desítek let. K ověření výpočetních modelů je proto nutné využít výsledky numerických simulací s materiálovým modelem, který dokáže správně zohlednit vliv velikosti prvku, případně lze známou závislost mezi konečnou hodnotou smrštění a velikostí v případě malých vzorků využít při kalibraci velkých vzorků na základě časového průběhu.

Normy a predikční modely

- Analýza vztahů v normách a predikčních modelech v Kapitole 2 a následné porovnání s experimentálními výsledky v Kapitole 4 ukázaly nejednotnost ve způsobu výpočtu a u některých modelů i nesprávné uvažování vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění.
- Relativně dobré shody s výsledky experimentů je dosaženo při použití obou posuzovaných norem (aktuálně platný Eurokód 2 [21] a americká norma ACI 209.2R-08 [1]). U Eurokódu 2 je však k dispozici vztah pouze pro prvky velikosti $D \geq 100$ mm, což nezahrnuje laboratorní vzorky standardní velikosti.
- Predikční model *fib* Model Code 2010 [9] vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění vůbec neuvažuje, v případě modelů B3 [5] a B4 [18] je tento vliv výrazný pouze u prvků s velikostí $D < 50$ mm.
- Některé výpočetní modely, konkrétně modely B3 a B4 a nově i připravovaná verze Eurokódu 2 [8] doporučují u konstrukcí citlivých na dotvarování a smršťování provádět krátkodobá laboratorní měření a na jejich základě v případě potřeby upravit parametry výpočtu. Tento postup však v případě standardní velikosti laboratorních vzorků naráží na problém špatné podmíněnosti úlohy extrapolace průběhu smrštění na základě experimentálních dat, u kterých nebylo dosaženo konečné hodnoty. V případě použití výrazně menších vzorků je problémem právě neznalost správného zohlednění vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění.

Probíhající experiment na vzorcích z cementové malty

Množství komplikací s sebou přinesla i realizace experimentu, který byl zahájen v polovině roku 2019 ve spolupráci s Experimentálním centrem ČVUT v Praze.

- Provedení podobného experimentu není jednoduchou, ani krátkodobou záležitostí. Realizace podobných laboratorních měření pro posouzení vývoje smršťování a dotvarování pro konkrétní konstrukci je navíc ztíženo potřebou zajistit pro laboratorní vzorky stejné podmínky, jakým je vystavena skutečná konstrukce ve venkovním prostředí.
- Velkou komplikací při provádění stávajícího experimentu byla absence kontrolované komory, kde by bylo možné pro vzorky zajistit konstantní teplotní a zejména vlhkostní podmínky. Bez možnosti využití podobného zařízení není možné přesně vyhodnotit okamžik dosažení konečné hodnoty smrštění od vysychání pro konkrétní hodnotu relativní vlhkosti prostředí.
- Vlivem výraznějšího poklesu relativní vlhkosti prostředí během experimentu došlo k novému nárůstu hodnot smrštění i u vzorků, u kterých mohl být proces vysychání při původní relativní vlhkosti téměř ukončen.

Automatické měření v rámu:

- Ačkoli se rám pro měření vzorků jevil jako dostatečně robustní, z naměřených deformací jednotlivých vzorků lze vysledovat určitou závislost na poloze vůči největšímu vzorku. Během sledovaného období došlo několikrát k neočekávanému výkyvu hodnot. Nejvíce je toto patrné právě u největšího hranolu 100×100 mm. U vzorků umístěných v jeho blízkosti byl zaznamenán podobný výkyv, s narůstající vzdáleností tento jev postupně slábne, až u vzorků umístěných na opačném konci rámu vidíme vychýlení hodnot v opačném směru. Nepodařilo se určit, co tyto náhlé změny způsobilo. Vzorky byly uloženy v části budovy, která slouží Experimentálnímu centru, jsou zde prováděny různé zkoušky a je možné že se jedná o odezvu na nějaké otřesy v přilehlých prostorech budovy.
- Vhodnější by bylo největší vzorek, jehož hmotnost byla téměř 10 kg, umístit do samostatného rámu, aby se předešlo riziku možné deformace společného rámu vlivem výrazného zatížení. Nicméně, tento nedostatek v naměřených hodnotách není zásadním problémem z hlediska vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění, jelikož po určité době došlo k vyrovnání nečekaného nárůstu či poklesu deformace. Jako zásadnější problém z hlediska zkoumaného tématu se jeví již zmiňovaná nemožnost zajištění konstantní vlhkosti prostředí po celou dobu trvání experimentu.

Ruční měření vzorků:

- U některých vzorků shodné velikosti se naměřené hodnoty výrazněji odlišovaly. S ohledem na malý počet vzorků shodné velikosti měřených stejnou metodou nebylo možné žádný z nich vyřadit z důvodu odlišnosti naměřených hodnot, pro takový postup by bylo nutné mít k dispozici mnohem větší počet vzorků v každé skupině.
- Při ručním měření byly jednotlivé vzorky postupně umísťovány do měřicího stojanu, kde byla odečtena aktuální hodnota deformace. Důležité mohlo být právě pořadí, v jakém se vzorky ve stojanu měřily. Zejména ve vztahu k měření největšího z nich, který svoji vahou mohl způsobit drobnou (možná jen krátkodobou) deformaci některé části měřicího stojanu. Toto podezření potvrzuje porovnání deformací etalonů s deformací změřenou na největším vzorku (viz Obrázek 16, graf vlevo), kde je mezi dřevěným etalonem a vzorkem u několika posledních měření nápadná shoda.

Pokročilý model založený na teorii solidifikace a mikropředpětí

Na základě analýzy několika variant materiálového modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS) [13] lze shrnout tyto závěry:

- Model se správným zohledněním velikosti prvku na dotvarování od vysychání bohužel nedává správný rozměrový efekt v případě smrštění od vysychání. Výsledky získané tímto modelem ani v nejmenším neodrážejí redukci konečných hodnot smrštění u vzorků větších rozměrů.

- Naopak relativně správný vliv velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění byl získán u modelu, který uvažuje zcela opačný vliv velikosti v případě dotvarování od vysychání.
- Nejlepších výsledků z hlediska správného vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění bylo dosaženo při použití obou variant materiálového modelu s časově závislou hodnotou součinitele smrštění.
- Cílem při úpravě pokročilého materiálového modelu musí být správný popis průběhů smrštění, základního dotvarování i dotvarování od vysychání u vzorků různých velikostí.

Téma, kterému se tato práce věnuje rozhodně nelze považovat za uzavřené. V návaznosti na výsledky, které jsou v této práci prezentovány jsou níže shrnuty základní možnosti a cíle dalšího výzkumu:

- Vyhodnocení vlivu velikosti prvku na konečnou hodnotu smrštění ne v teoretickém čase $t = \infty$, ale v nějakém, sice dlouhém, leč smysluplném časovém horizontu s ohledem na skutečnou životnost betonových konstrukcí. Je možné, že určitá forma rozměrového efektu je skryta v časové funkci popisující vývoj smrštění, díky které konstrukce reálných rozměrů v čase návrhové životnosti své konečné hodnoty nedosáhne. Z tohoto pohledu může i zohlednění velikosti formou koeficientu, kterým se násobí konečná hodnota smrštění pouze v případě malých prvků, dávat určitý smysl.
- Další zpracování a podrobnější vyhodnocení si zaslouží i data probíhajícího experimentu. Kromě nového vyhodnocení vlivu velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění po jeho ukončení by bylo vhodné provést i srovnávací výpočet dle jednotlivých norem a predikčních modelů pro konkrétní podmínky experimentu. Výpočet však bude potřeba provést pro proměnnou hodnotu relativní vlhkosti tak, jak byla naměřena během trvání experimentu.
- Kromě deformací je u probíhajícího experimentu pravidelně zaznamenávána i hmotnost vzorků určených pro ruční měření. Do budoucna by bylo vhodné získaná data podrobněji vyhodnotit i z hlediska vztahu mezi naměřenými hodnotami smrštění a úbytkem hmotnosti.
- Ověření vhodnosti použití malých vzorků z cementové malty místo vzorků vyrobených ze stejné betonové směsi jako skutečný konstrukční prvek. Cementová malta obsahuje větší procentní zastoupení cementu než běžný beton, což vede k větším hodnotám smrštění od vysychání. Toto ověření by mohlo být provedeno na výsledcích numerických simulací s vhodně připraveným modelem a sítí konečných prvků, kde by malta tvořila základní matici a inkluze by zastupovala hrubou frakci kameniva.

- Posouzení, zda je při výpočtu dobré kromě velikosti prvku zohledňovat i jeho tvar. Tento fakt je u většiny výpočetních modelů zanedbán, z analyzovaných modelů tento parametr zohledňují pouze modely B3 a B4. Výsledky experimentu Bryant však vliv tvaru prvku na konečnou hodnotu smrštění jednoznačně prokazují. V rámci experimentu probíhajícího na Fakultě stavební ČVUT byly záměrně vyrobeny prvky dvou různých průřezů (40×40 mm a 30×60), které mají stejnou hodnotu náhradní tloušťky průřezu $D = 20$ mm. I tyto vzorky mohou poskytnout možnost posouzení vlivu tvaru prvku na konečnou hodnotu smrštění.
- Úprava stávajícího materiálového modelu MPS tak, aby výsledky simulací smrštění a dotvarování souhlasily s výsledky experimentů pro celou škálu velikostí vzorků. Pomocí správně nastaveného pokročilého modelu by bylo v budoucnu možné doplnit chybějící experimentální data pro vzorky větších rozměrů. Po ověření by vylepšený model MPS mohl posloužit k odvození vztahů do návrhových norem.
- Porovnání jednotlivých variant materiálového modelu MPS s výsledky většího množství vhodných experimentů.
- Provéřit u modelů MPS s modifikovanou závislostí součinitele smrštění k_{sh} rozměrové efekty i pro celkové dotvarování a dotvarování od vysychání.

Reference

- [1] ACI Committee 209. *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*. ACI, 2008.
- [2] U. Ayachit. *The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application*. Kitware, 1. edition, 2015.
- [3] Z. P. Bažant and L. J. Najjar. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 5(25):3–20, 1972.
- [4] Zdeněk Bažant and Milan Jirásek. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures*. Springer Netherlands, 01 2018.
- [5] Z.P. Bažant and S. Baweja. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3. *Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage - Structural Design Effects*, 2000.
- [6] A. H. Bryant and C. Vadhanavikkit. Creep, shrinkage-size, and age at loading effects. *ACI Materials Journal*, 84:117–123, 1987.
- [7] Comité Euro–International du Béton (CEB). *CEB–FIP Model Code 1990: Design Code*. T. Telford, London, 1993.
- [8] European Committee for Standardization. *Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures, Final Version of PT1-draft prEN 1992-1-1 2018 D3*. 2018.
- [9] Fédération Internationale du Béton. *Model Code 2010*. Number vol. 65 in fib Bulletin. International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [10] T.C. Hansen and A.H. Mattock. Influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 63-10:267–290, 1966.
- [11] P. Havlásek. *Creep and Shrinkage of Concrete Subjected to Variable Environmental Conditions, PhD. Thesis*. Czech Technical University in Prague, 2014.
- [12] M.H. Hubler, R. Wendner, and Z.P. Bažant. Comprehensive database for concrete creep and shrinkage: analysis and recommendations for testing and recording. *ACI*, 112:547–558, 2015.
- [13] M. Jirásek and P. Havlásek. Microprestress–solidification theory of concrete creep: Reformulation and improvement. *Cement and Concrete Research*, 60:51–62, 2014.
- [14] Keeton. *Study of Creep in Concrete, Phase 1 (I-beam)*. U. S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1965.

-
- [15] MATLAB. *Version 9.3.0 (R2017b)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2017.
- [16] B. Patzák. OOFEM home page. <http://www.oofem.org>, 2000.
- [17] B. Patzák. OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures. *Acta Polytechnica*, 52(6):59–66, 2012.
- [18] RILEM Technical Committee TC-242-MDC (Z.P. Bažant, chair). Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability (RILEM Technical Committee TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis). *Materials and Structures*, 48:753–770, 2015.
- [19] H. Samouh, E. Rozière, and A. Loukili. Influence of specimen size and measurements duration on the long-term extrapolation of drying shrinkage. *Construction and Building Materials*, 150:276 – 286, 2017.
- [20] Jean Michel Torrenti and Farid Benboudjema. Desiccation shrinkage of large structures: Is there a size effect? pages 404–411, 09 2013.
- [21] Český normalizační institut. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 1996.