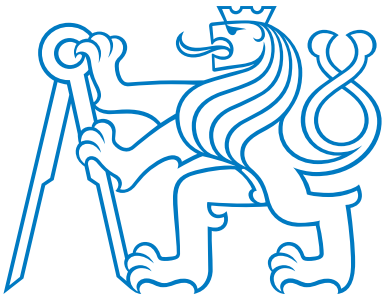
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra mechaniky



Porovnání kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání betonu

Comparison of shrinkage and drying creep kinetics of concrete

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Petr Havlásek, Ph.D.

Lenka Dohnalová

Praha 2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dohnalová Jméno: Lenka Osobní číslo: 313341

Zadávající katedra: Katedra mechaniky K132

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Porovnání kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání betonu

Název bakalářské práce anglicky: Comparison of shrinkage and drying creep kinetics of concrete

Pokyny pro vypracování:
Bude provedeno srovnání vývoje smrštění a dotvarování od vysychání betonu.
Nejprve budou analyzovány vztahy definované v normách a modelech pro popis dlouhodobého chování betonu (ACI, fib MC 2010, EC3, B3/4). Následně budou z databáze vytvořené na Northwestern University vybrány relevantní experimenty, z nichž budou identifikovány a porovnány tzv. charakteristické časy jednotlivých procesů. Získané charakteristicé časy budou porovnány s výsledky výpočtů pomocí metody konečných prvků v programu OOFEM při použití materiálového modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí.

Seznam doporučené literatury:
Bažant Z.P., Jirásek, M.: Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures, 2018
NU Database of Laboratory Creep and Shrinkage Data http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/

Jméno vedoucího bakalářské práce: Petr Havlásek

Datum zadání bakalářské práce: 21. 2. 2018 Termín odevzdání bakalářské práce: 27. 5. 2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

28. 2. 2018 L. Dohnal

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Porovnání kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání betonu“ vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Petra Havláska, Ph.D. a že jsem uvedla veškeré použité zdroje informací.

Lenka Dohnalová

Praha, květen 2018

Poděkování

Chtěla bych poděkovat zejména vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Havláskovi, Ph.D. za množství poskytnutých studijních materiálů, za jeho trpělivost a čas strávený při konzultacích a za cenné připomínky při konečném zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá procesy smršťování a dotvarování betonu spojenými s jeho vysycháním. Nejprve je provedena analýza a vzájemné porovnání základních norem a predikčních modelů z hlediska způsobu výpočtu smršťování a dotvarování od vysychání betonu. Časový vývoj obou dějů uvažovaný v normových výpočtech je dále konfrontován s výsledky, které byly získány zpracováním vybraných experimentálních dat. V poslední části je ukázán vzájemný vývoj smrštění a dotvarování od vysychání betonu získaný zpracováním výsledků z dříve provedených simulací metodou konečných prvků. Tyto simulace probíhají na úrovni materiálového bodu, čímž se odlišují od predikčních modelů, které pracují s průměrnými hodnotami na úrovni průřezu.

Abstract

This thesis deals with drying shrinkage and drying creep of concrete. First of all, the most common design codes and prediction models are analyzed and compared with respect to the description of drying shrinkage and drying creep. Next, the time evolution of both processes specified by the design codes is compared to the processed results of selected experimental data. The last part of the thesis shows the interdependence of drying shrinkage and drying creep obtained by processing results from adopted finite element simulations. On contrary to the prediction models which employ the average cross-sectional approach, the simulations used the material point approach.

Klíčová slova

Dotvarování od vysychání, základní dotvarování, smršťování, poddajnost, beton, poločas vysychání, norma, predikční model.

Keywords

Drying creep, basic creep, shrinkage, compliance, concrete, shrinkage halftime, standard, prediction model.

Obsah

1 Motivace **13**

2 Popis přetvárných vlastností betonu **15**
2.1 Dotvarování . . . 15
2.1.1 Základní dotvarování . . . 17
2.1.2 Dotvarování při vysychání . . . 18
2.2 Smrštění . . . 18
2.2.1 Autogenní smrštění . . . 19
2.2.2 Smršťování při vysychání . . . 20
2.2.3 Celkové smrštění . . . 21

3 Analýza vztahů definovaných v normách a predikčních modelech **23**
3.1 Model B3 . . . 23
3.1.1 Základní popis modelu B3 . . . 24
3.1.2 Výpočet dotvarování podle B3 . . . 25
3.1.3 Výpočet smrštění podle B3 . . . 31
3.1.4 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (B3) . . . 32
3.2 model B4 . . . 33
3.3 Model Code 2010 (*fib)* . . . 36
3.3.1 Výpočet dotvarování podle *fib* Model Code 2010 . . . 37
3.3.2 Výpočet smrštění podle *fib* Model Code 2010 . . . 38
3.3.3 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (*fib*) . . . 38
3.4 Norma ACI 209.2R-08 . . . 40
3.4.1 Výpočet dotvarování podle normy ACI . . . 40
3.4.2 Výpočet smrštění podle normy ACI . . . 41
3.4.3 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (ACI) . . . 42
3.5 Eurokód 2 . . . 43
3.5.1 Výpočet dotvarování podle EC2 . . . 43
3.5.2 Výpočet smrštění podle EC2 . . . 47
3.5.3 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (EC2) . . . 47

4 Data z experimentálních výzkumů **49**
4.1 Databáze experimentálních dat . . . 49
4.2 Způsob zpracování experimentálních dat . . . 52
4.3 Experimentální studie Troxell . . . 54
4.3.1 Porovnání smrštění a dotvarování od vysychání (Troxell) . . . 56
4.3.2 Identifikace poločasu vysychání (Troxell) . . . 58
4.4 Experimentální studie Bryant . . . 62
4.4.1 Porovnání smrštění a dotvarování od vysychání (Bryant) . . . 64
4.4.2 Identifikace poločasu vysychání (Bryant) . . . 68

5 Data z výpočtů metodou konečných prvků **71**

6 Závěr **77**

Použitá literatura **81**

1 Motivace

Jedny ze základních charakteristik betonu jsou i jeho časově závislé přetvárné vlastnosti, konkrétně dotvarování a smršťování. Ačkoliv oba tyto jevy byly poprvé popsány před více než 100 lety, nelze ani v současné době říci, že jejich vývoj v čase lze dobře předpovědět a zahrnout do výpočtu při navrhování konstrukcí. Objemové změny betonu hrají při navrhování důležitou roli, mají velký vliv například na snížení předpětí u předpjatých konstrukcí, nárůst průhybů u vodorovných konstrukcí, vznik trhlin apod.

Zejména nástup technologie předpínaného betonu si vyžádal zásadnější výzkum v oblasti přetvárných změn betonových konstrukcí způsobených dlouhodobým zatížením. Po celém světě bylo postaveno nemalé množství (zejména mostních) konstrukcí, u kterých podcenění vlivu dotvarování způsobilo nutnost náročných oprav nebo zbourání a nahrazení novými konstrukcemi, a to výrazně před koncem jejich plánované životnosti. Bohužel došlo i k několika zřícením mostních konstrukcí, která si vyžádala daň nejvyšší v podobě lidských životů. Jedním z nejznámějších případů je pád mostu v Palau [1, 2] v roce 1996, který byl zapříčiněn právě i nadměrným nárůstem průhybu vlivem dotvarování.

Podobné problémy s podceněním účinku dotvarování se nevyhnuly ani stavbám v ČR. Týká se to zejména prvních velkých mostních konstrukcí z předpjatého betonu (např. mostu Pavla Wonky v Pardubicích [3], mostů přes Vltavu a Otavu na Zvíkovském Podhradí a dalších). Problém nadměrného průhybu u obou zvíkovských mostů byl ještě umocněn přítomností kloubu uprostřed hlavního pole. Všechny tři zmíněné mosty v ČR byly však úspěšně opraveny a slouží dodnes.

Je tedy zřejmé, že zejména u složitějších inženýrských staveb, jako jsou předpjaté mostní konstrukce s velkým rozpětím polí, chladící věže elektráren, obálky jaderných reaktorů apod., je podrobná analýza možných objemových a tvarových změn betonu nezbytná. Stejně tak je nutné neopomenout vliv dotvarování a smrštění u subtilních konstrukcí, které jsou u architektů velmi oblíbené a u nichž jsou právě deformace způsobené poddajností betonu často kritériem, které při návrhu hraje zásadní roli.

Výzkum přetvárných vlastností betonu probíhá již dlouhou dobu a zdaleka není u konce. Tato práce si neklade za cíl zabývat se komplexně celou problematikou dotvarování a smršťování, soustředí se zejména na vzájemné srovnání kinetiky dvou specifických jevů – smršťování a dotvarování betonu spojené s jeho vysycháním. Ačkoliv jsou oba tyto procesy závislé na úbytku vlhkosti z betonu, jejich účinky jsou opačné. Zatímco smrštění ve svém důsledku generuje napětí v betonu, dotvarování se naopak projevuje jeho snižováním. Proto je velmi důležité správně popsat interakci a časový vývoj těchto vzájemně provázaných dějů.

V první části práce je porovnán časový vývoj dotvarování a smršťování od vysychání betonu tak, jak je nyní zakotven v normách a výpočetních modelech pro popis dlouhodobého chování betonu, ve druhé části je zkoumán časový vývoj dotvarování a smršťování od vysychání betonu pro změřená data některých vhodně vybraných experimentů z veřejně dostupné databáze vytvořené na Northwestern University [4]. Poslední část ukazuje

srovnání průběhu smrštění a dotvarování od vysychání na výsledcích dřívějších simulací provedených v programu OOFEM [5]. Výpočty pomocí metody konečných prvků, které jsou pro tuto práci převzaty z [6], jsou dále analyzovány a získané průběhy smršťování a dotvarování od vysychání betonu jsou porovnány s odpovídajícím skutečným experimentem.

2 Popis přetvárných vlastností betonu

Změny deformace betonových prvků mohou mít mnoho různých příčin, které se navzájem kombinují. Podle primární příčiny lze deformace prvku rozdělit do tří hlavních skupin. První skupinu, do které patří i dotvarování, tvoří deformace vyvolané (nejen) vnějším zatížením, druhou skupinou jsou různé formy smrštění, což jsou deformace spojené se změnou relativní vlhkosti betonového prvku, a do třetí skupiny spadají deformace způsobené teplotními změnami. Poslední uvedená oblast není hlavním zájmem této práce, proto bude zmíněna jen okrajově. Společným znakem všech těchto deformací je fakt, že jejich odhad ve fázi návrhu a statického výpočtu konstrukce je velmi komplikovaný a často nepřesný.

U složitějších konstrukcí citlivých na objemové změny a dlouhodobé deformace se často provádí predikce vývoje přetvárného chování v čase z již existujících experimentálních dat nebo z cíleně provedených krátkodobých měření (tento postup je doporučován například modelem B3 [7]).

Nezřídka se setkáme i s případy, kdy se počáteční předpoklad vývoje přetvárného chování, jako je dotvarování a smrštění, kontroluje a případně upravuje podle dat změřených během životního cyklu konstrukce. Při výstavbě se z části betonu vytvoří vhodné vzorky, které jsou ošetřovány a zatíženy tak, aby co nejlépe postihly skutečné chování konstrukce, a následně jsou ponechány ve stejných podmínkách jako vlastní konstrukce (například uvnitř komory mostu). Tyto vzorky jsou doplněny potřebným měřicím zařízením a poskytují tak možnost provádět průběžnou kontrolu předpokladů přetvárného chování v dlouhodobém horizontu. Podobné zkoušení materiálových parametrů betonu je doporučeno například v technických podmínkách [8].

2.1 Dotvarování

Po zatížení betonového prvku dojde nejprve k okamžité pružné deformaci. Při trvajícím zatížení ale deformace pokračuje, její rychlost se sice postupně zpomaluje, ale nikdy se úplně nezastaví. Tato vlastnost, označovaná jako dotvarování (creep), je společná pro všechny materiály na bázi cementu. V případě dotvarování se tedy jedná o opožděnou deformaci vyvolanou dlouhodobě působícím zatížením. Míra odezvy v podobě časového nárůstu přetvoření betonového prvku je závislá na mnoha faktorech, kterými jsou nejen vlastní hodnota a rychlost zatížení a délka jeho působení, ale i celá škála vlastností konkrétního betonového prvku. Mezi nejvýznamnější patří vyzrálost betonu v době zatížení, rozměry betonového prvku, konkrétní složení betonové směsi a typ použitého cementu, relativní vlhkost okolního prostředí i způsob, jakým byl beton v počáteční fázi tvrdnutí ošetřován. V podstatě lze říci, že bychom jen těžko hledali parametr, který na dotvarování betonu nebude mít žádný vliv.

Právě kvůli velkému množství faktorů ovlivňujících dotvarování jsou přesný výpočet a predikce vývoje dotvarování v čase velmi komplikované. Navíc se jedná o parametry

často nejisté nebo těžko měřitelné. Zjednodušené výpočty, které berou v potaz jen výrazně omezený počet vstupních parametrů, mohou být zatíženy značnou chybou, která vede v některých případech ke zbytečně předimenzovaným konstrukcím, v jiných případech naopak k návrhům, které nemusí být na straně bezpečnosti.

Pro popis dotvarování jsou nejčastěji používány dvě veličiny. Většina norem pracuje s tzv. součinitelem dotvarování $\varphi(t,t')$[1], který závisí na aktuálním čase t a na stáří betonu v době zatížení t' a v zásadě dává celkovou opožděnou deformaci do relace s okamžitou pružnou deformací, jak je zřejmé ze vztahu pro poměrné přetvoření v čase t vyvolané dotvarováním

$$\varepsilon_{cc}(t,t') = \varphi(t,t')\,\frac{\sigma_c}{E(t^*)}, \tag{1}$$

který je v obdobné podobě[2] uveden např. v Eurokódu 2 [9]

a kde σ_c je konstantní tlakové napětí,

$E(t^*)$ je modul pružnosti v čase zatížení, případně ve stáří 28 dní (způsob jeho určení závisí na použití konkrétní normy).

V současnosti je trendem vyjadřovat dotvarování spíše pomocí funkce poddajnosti $J(t,t')$, kterou používají zejména pokročilejší predikční modely. Jedním z důvodů je fakt, že při následném výpočtu deformace od dotvarování odpadá při vyhodnocení z funkce poddajnosti problém s tím, jaký modul pružnosti použijeme, čemuž se nevyhneme právě při výpočtu ze součinitele dotvarování podle vztahu (1).

Funkci poddajnosti můžeme v souladu s [10] definovat jako deformaci v čase t vyvolanou jednotkovým napětím, konstantně působícím od času t'. Vztah mezi funkcí poddajnosti a deformací vyvolanou dlouhodobě působícím zatížením je dán jako

$$\varepsilon(t) = J(t,t')\,\sigma\,, \tag{2}$$

kde σ je jednoosé napětí od zatížení (platí standardní znaménková konvence).

Zásadní rozdíl mezi vyjádřením pomocí součinitele dotvarování a pomocí funkce poddajnosti spočívá v tom, že zatímco součinitel dotvarování v sobě skrývá pouze vlastní dotvarování ve smyslu opožděné složky deformace, funkce poddajnosti zahrnuje celkovou deformaci způsobenou vnějším zatížením, tedy i vliv okamžité pružné deformace. Tento rozdíl je zřejmý ze vzájemného vztahu mezi oběma veličinami

$$J(t,t') = \frac{1}{E(t')}\,\left(\varphi(t,t')+1\right)\,, \tag{3}$$

kde $E(t')$ je modul pružnosti v okamžiku zatížení.

[1] Americké normy někdy používají tzv. specifické dotvarování (specific creep), což je celková opožděná deformace normovaná vůči napětí.

[2] V Eurokódu 2 je pro stáří betonu v čase zatížení použit symbol t_0, který bývá častěji spojován s počátkem vysychání. Pro lepší srozumitelnost této práce bylo proto použito rozšířenějšího označení t'

Celkové dotvarování betonu lze rozdělit na dva samostatné procesy - základní dotvarování a dotvarování způsobené vysycháním betonu. Z tohoto rozdělení, většinou považovaného za aditivní, vycházejí výpočty obsažené v normách a základních predikčních modelech, které pracují pouze na úrovni průřezu, tedy s určitými středními hodnotami dotvarování a smrštění, a nepopisují nerovnoměrný průběh vlhkosti, teploty a z nich plynoucí napjatosti po průřezu. Jejich nevýhodou ve srovnání s detailními modely na úrovni materiálového bodu je neschopnost postihnout některé jevy, jako například zpomalení kinetiky při snížení relativní vlhkosti. Na druhou stranu modely pracující na úrovni materiálového bodu, které umí tyto jevy postihnout, jsou mnohem méně prozkoumány a výpočet podle nich je výrazně složitější. Jejich budoucnost nespočívá v běžných výpočtech, ale v konečně-prvkových simulacích náročných konstrukcí. Jedním z těchto materiálových modelů je i model založený na teorii solidifikace a mikropředpětí [11] implementovaný v programu OOFEM [5].

Vliv teploty na reologické procesy není v této práci nijak detailně řešen, nelze však tento jev zcela pominout. Na základě experimentů bylo zjištěno, že vliv teploty na kinetiku dotvarování je nemalý a platí mezi nimi nelineární závislost. Podle Nevilla [12, kap. 9] se rychlost dotvarování výrazně zvyšuje s nárůstem teploty do 70 °C, kdy dosahuje svého maxima (zhruba 3,5 násobku ve srovnání s referenční teplotou 21 °C), mezi teplotou 70 °C a 96 °C postupně klesá až na 1,7 násobek. Toto chování je připisováno částečně desorpci vody z C-S-H gelu a částečně důsledku nižší pevnosti betonu. Při zvýšené teplotě u mladého betonu dochází totiž k rychlejšímu nárůstu pevnosti, ale v důsledku zvýšené pórovitosti je výsledná pevnost betonu nižší [12, kap. 8].

Snížení teploty má obecně za následek zpomalení přetvárných procesů, pokud však dojde k promrzání, rychlost dotvarování nejprve naroste, velmi rychle však dojde k jejímu zastavení a výsledná úroveň dotvarování je ve srovnání s dotvarováním při referenční teplotě nižší.

Ve vztazích obsažených v normách a výpočetních modelech na úrovni průřezu je kromě volné deformace vlivem teplotní roztažnosti řešen vliv rozdílné teploty na dotvarování použitím tzv. ekvivalentního času, který v zásadě zohledňuje zrychlení či zpomalení přetvárných procesů.

2.1.1 Základní dotvarování

Základní dotvarování (v anglicky psané literatuře označované jako basic creep) je možné definovat jako část celkové deformace prvku vyvolané působícím zatížením v situaci, kdy nedochází k výměně vlhkosti mezi betonovým prvkem a okolním prostředím, nenastává tedy proces vysychání.

Pro experimentální měření základního dotvarování musí být zatížený betonový vzorek po celou dobu zapečetěn nebo uchováván v prostředí s relativní vlhkostí zhruba 98 %, případně přímo ponořen ve vodě. Pro určení hodnoty základního dotvarování je navíc nutné změřenou deformaci očistit o část, která je způsobena autogenním smrštěním[3],

případně i změnou teploty. U běžných konstrukčních betonů je při dodržení konstantní teploty během zkoušení možné považovat celkovou opožděnou deformaci změřenou na zapečetěných zatížených vzorcích zjednodušeně přímo za hodnotu základního dotvarování.

2.1.2 Dotvarování při vysychání

Dotvarování spojené s vysycháním (drying creep) můžeme zjednodušeně definovat jako přírůstek k základnímu dotvarování v případě, kdy u betonového prvku dochází k transportu vlhkosti do okolního prostředí, tedy k vysychání. Poprvé byl článek zabývající se podrobnou analýzou vlivu vysychání vzorku na nárůst jeho přetvoření publikován Geraldem Pickettem [13] již v roce 1942.

Větší míra přetvoření vysychajících vzorků byla pozorována již mnohem dříve, ale většinou byl tento jev připisován pouze smršťování a převládal názor, že nelze uvažovat jako samostatný jev nárůst dotvarování způsobeného vysycháním vzorku. G. Pickett se ve své práci [13] zaměřil nejen na srovnání dotvarování a smršťování vysychajících a nevysychajících vzorků, ale zdokumentoval mimo jiné i nezanedbatelný nárůst přetvoření u vzorků podrobených opakovanému vysychání a ponořování do vody. Fakt, že cyklicky vysychající betonový prvek dotvaruje více než prvek ponechaný při konstantní relativní vlhkosti, je označován právě jako tzv. Pickettův jev.

Experimentálně nelze měřit přímo deformaci odpovídající dotvarování od vysychání, je nutné provádět minimálně tři různá měření na shodných vzorcích, a to měření celkové deformace na zatížených vzorcích, u kterých je umožněna výměna vlhkosti s okolním prostředím, dále pak výše zmíněné měření základního dotvarování na zapečetěných vzorcích a nakonec i měření deformace nezatížených vysychajících vzorků, tedy celkové smrštění. Hodnotu dotvarování od vysychání z naměřených dat získáme tak, že od celkové opožděné deformace zatíženého vysychajícího vzorku odečteme část deformace způsobenou základním dotvarováním a část deformace způsobenou smrštěním. Tento postup výpočtu lze použít v případě stejného silového namáhání zapečetěných i vysychajících vzorků pro dotvarování, v opačném případě je nutné provést normování vzhledem k hodnotě zatížení.

2.2 Smrštění

Při smršťování (shrinkage) dochází k objemovým změnám, případně i ke změně tvaru betonového prvku. Je provázeno vznikem trhlin, zejména pokud je přetvoření prvku bráněno způsobem jeho uložení nebo rozdílným napětím mezi vysychající oblastí a jádrem betonového prvku. Velikost a množství trhlin má vliv na další vlastnosti, zejména na trvanlivost konstrukce, proto je snahou jejich vznik co nejvíce omezit. Mikrotrhliny v cementovém tmelu však vznikají vždy, nelze jim nikdy zcela zabránit a jsou v podstatě důvodem

[3] Autogenní smrštění je možné u betonů běžných pevností s vodním součinitelem do 0,4 zanedbat, jeho hodnota je výrazně menší než smrštění spojené s vysycháním vzorku.

výrazně nižší tahové pevnosti ve srovnání s pevností v tlaku, což je společným znakem všech cementových kompozitů.

Při symetrickém vysychání vzorku pozorujeme v zásadě jen objemové změny při minimálních změnách tvarových. Pokud je výměna vlhkosti s okolním prostředím umožněna jen na části povrchu, dochází navíc ke změně tvaru betonového prvku, stejně tak pokud se protilehlé strany prvku nachází v prostředí s odlišnou relativní vlhkostí.

Obecně se jedná o proces zcela nezávislý na vnějším zatížení. Konečná hodnota i kinetika smršťování betonu je opět ovlivněna mnoha faktory, mezi nejpodstatnější patří relativní vlhkost okolního prostředí, velikost prvku a vlastní složení betonové směsi, zejména pak vzájemný poměr jednotlivých složek - pojiva, vody a kameniva. Zjednodušeně (např. podle [9]) se celkové smrštění dělí na dva základní samostatné procesy, na smrštění autogenní a smrštění při vysychání betonového prvku, oba procesy jsou níže popsány podrobněji.

V literatuře detailněji popisující vlastnosti betonu [12, kap. 9] lze nalézt další typy, jako například plastické smrštění, které pozorujeme krátce po uložení ještě před ztuhnutím betonu, a smrštění způsobené karbonatací betonu, které je naopak procesem dlouhodobým a týká se pouze povrchové části prvků do hloubky zhruba 2 cm.

2.2.1 Autogenní smrštění

Autogenní smrštění je vyvoláno objemovými změnami cementové pasty vlivem hydratačních procesů, proto je také někdy označováno (ne zcela správně) jako smrštění chemické. Ve skutečnosti se však jedná o trochu rozdílné jevy. Chemické smrštění je dáno nižším objemem výsledného produktu hydratace než byl původní objem pojiva a vody, jedná se tedy o změnu objemu pouze částic vstupujících a vystupujících z chemické reakce. Oproti tomu autogenní smrštění je už změna objemu prvku jako celku, která je sice vyvolána chemickým smrštěním, ale zahrnuje v sobě i změnu velikosti pórů a schopnost zpevňujícího se materiálu objemové deformaci vzdorovat. Zjednodušeně lze říci, že autogenní smrštění je vnějším (makroskopickým) projevem smrštění chemického.

Čistá cementová pasta má změnu objemu vzorku vyvolanou chemickou reakcí vody s dosud nezhydratovanými zrny cementu celkem významnou (chemické smrštění dosahuje 9 % objemu složek hydratace). U betonu je však hodnota autogenního smrštění menší, než by odpovídalo procentuálnímu zastoupení cementové pasty v celkovém objemu. Zrna kameniva totiž spolu s již zhydratovanou částí cementu vytváří jakýsi pevný skelet, který pomáhá bránit deformacím [12, kap. 9].

U běžných konstrukčních betonů pevností do 70 MPa a s hmotnostním poměrem vody k cementu větším než 0,4 lze autogenní část poměrného smrštění zanedbat, jeho hodnota tvoří většinou jen malou část ze smrštění celkového.

V případě moderních vysokopevnostních betonů s nízkým vodním součinitelem však autogenní smrštění hraje významnou roli, tvoří velkou část celkového smrštění a nelze ho proto opomenout. Jeho hodnota primárně závisí právě na hodnotě

vodního součinitele. Význam autogenního smrštění značně narůstá s klesajícím vodním součinitelem (za hraniční je nejčastěji považována hodnota $w/c = 0{,}4$). To lze vysvětlit tím, že v betonu již není dostatek volné vody pro hydrataci cementových zrn, dochází k poklesu relativní vlhkosti a pro hydrataci je využívána voda fyzikálně vázaná, tedy adsorbovaná na stěnách pórů, čímž vznikají velká kapilární napětí, která mají za následek nárůst autogenního smrštění [14]. Tento jev spojený s poklesem relativní vlhkosti betonového prvku je označován jako samovysychání betonu (self-desiccation). Kvůli nedostatečnému množství vody uvnitř cementové pasty se proces hydratace postupně zpomaluje. Na rozdíl od betonů s vysokým vodním součinitelem, kde většina autogenního smrštění proběhne v relativně krátkém čase, se u betonů s výrazně nízkým vodním součinitelem jedná o proces dlouhodobý [15].

Pro úplnost dodejme, že průběh hydratace a tím i autogenního smrštění je výrazně ovlivněn také jemností mletí cementu.

Objemové změny způsobené autogenním smrštěním je možné měřit na nezatížených vzorcích. Je potřeba zajistit, aby pro hydrataci byla využívána pouze voda obsažená v betonu, čehož lze nejsnáze docílit zapečetěním vzorků. V rámci vyhodnocení experimentálních dat lze u betonů s vyšším vodním součinitelem, u kterých je v betonu vázáno dostatečné množství vody pro plnou hydrataci cementu, tolerovat i využití vzorků skladovaných v prostředí s relativní vlhkostí kolem 98 %. Tento popis je samozřejmě určitým zjednodušením, ve skutečnosti nelze dosáhnout toho, aby u vzorku docházelo pouze k autogennímu smrštění, vždy bude současně docházet přinejmenším ještě k teplotním objemovým změnám, jelikož chemické reakce mezi cementem a vodou jsou provázeny vznikem hydratačního tepla. Bohužel nelze ani uvažovat, že po ustálení teploty na počáteční hodnotě lze změřenou deformaci považovat za deformaci pouze od autogenního smrštění „očištěnou“ o teplotní změny, protože vliv teploty se projevoval v průběhu výrazných změn základních vlastností betonu. Jinými slovy - beton má v době nárůstu teploty od vývinu hydratačního tepla výrazně nižší pevnost a schopnost odolávat objemovým deformacím, než beton v době chladnutí, kdy již velká část cementu zhydratovala a došlo k nárůstu pevnosti a snížení poddajnosti betonu.

2.2.2 Smršťování při vysychání

U betonů běžných pevností tvoří smrštění způsobené vysycháním jednoznačně největší a tedy rozhodující část celkového smrštění. Příčinou tohoto jevu je transport vlhkosti z cementového tmelu do okolního prostředí, čímž dochází k nárůstu kapilárního napětí a ke vzniku tahového namáhání ve vysychající části prvku. Pokud toto napětí překročí aktuální tahovou pevnost betonu, dochází ke vzniku smršťovacích trhlin, které otvírají přístup vzduchu, čímž se další vysychání a smrštění ještě urychlí.

Smrštění způsobené vysycháním a s ním spojené povrchové popraskání betonu lze na rozdíl od smrštění autogenního u konkrétní betonové směsi výrazně ovlivnit, a to zejména způsobem a délkou ošetřování betonu po jeho uložení.

Vývoj smrštění v čase lze popsat pomocí dvou hlavních parametrů, konečné hodnoty (amplitudy smrštění) a charakteristického času (tzv. poločasu vysychání). Konečná hodnota smrštění je v čase konstantní, jedná se o funkci relativní vlhkosti okolního prostředí, množství odpařitelné vody v betonu, složení cementového tmelu, vodního součinitele, typu cementu a dalších parametrů. Velikost prvku má vliv zejména na poločas vysychání, jeho závislost na charakteristickém rozměru konstrukce[4] je zhruba kvadratická. Poločas vysychání udává, jakým způsobem probíhá vývoj smršťování v čase, kromě velikosti a tvaru prvku je ovlivněn i dalšími vlastnostmi, zejména množstvím a strukturou pórů, potažmo difuzivitou konstrukce.

Pro úplnost dodejme, že existuje i opačný jev, tzv. bobtnání, ke kterému dochází v případě, že je beton vystaven prostředí s vyšší relativní vlhkostí. Nejčastěji ho pozorujeme u prvků, které jsou přímo ponořeny ve vodě. Hodnota bobtnání je řádově menší než smrštění od vysychání, ve výpočtech uvedených v některých normách tato situace ani není uvažována.

2.2.3 Celkové smrštění

Výpočetní modely použité v normách uvažují jen základní rozdělení na smrštění autogenní a smrštění při vysychání, navíc ale předpokládají aditivnost obou procesů. Ve skutečnosti však platí, že oba smršťovací procesy jsou na sobě závislé a při výpočtu není vhodné použít prostou superpozici [15, kap. 8.7].

Jak již bylo zmíněno, vlivem samovysychání při autogenním smrštění dochází ke snížení relativní vlhkosti uvnitř vzorku, což má za následek snížení následného smrštění při vysychání, a naopak vlivem výraznějšího snížení vlhkosti u povrchu vzorku díky odpařování vody do okolního prostředí dojde k poklesu stupně hydratace v povrchové oblasti a tedy ke snížení smrštění autogenního.

V závislosti na hodnotě vodního součinitele může být velikost každého z obou smrštění velmi proměnná. Podíváme-li se ale na celkové smrštění, jeho velikost se zásadně měnit nebude, pohybuje se u všech betonů okolo hodnoty 0,05 % (500 microstrain). Zjednodušeně lze říci, že při snižování vodního součinitele dochází k postupnému „přelévání“ v rámci celkového smrštění od složky připadající na smrštění při vysychání ke složce autogenního smrštění.

Co se u obou procesů výrazně liší, je kinetika. Autogenní smrštění probíhá stejným způsobem v celém objemu materiálu (s výjimkou malé povrchové oblasti ovlivněné vysycháním), je tedy v každém místě průřezu přibližně stejné. Naopak smrštění při vysychání se po průřezu výrazně mění v závislosti na gradientu rozložení vlhkosti, tzn. že je navíc i funkcí vzdálenosti od povrchu konstrukce. Z pohledu vzniku mikrotrhlin jsou proto mnohem problematičtější betony s nízkým vodním součinitelem a velkou složkou autogenního smrštění. Tomu je vystavena celá mikrostruktura betonu a dochází při něm ke vzniku

[4] Charakteristický rozměr je definován jako určitý násobek poměru mezi celkovým objemem prvku a povrchem ve styku s okolním prostředím.

velkého množství mikrotrhlin v celém objemu betonového prvku. Naproti tomu vnějšímu vysychání jsou u reálných konstrukcí vystaveny jen povrchové vrstvy a trhliny spojené s vysycháním se proto objeví jen v hloubce řádu jednotek cm. Účinky smršťování při vysychání se totiž projevují postupně od povrchu směrem do vnitřní části konstrukce a ta má tak dostatek času na relaxaci napětí.

Výhody betonů vyšší pevnostní třídy z hlediska projevů smrštění jsou proto velmi problematické a diskutabilní. Vždy je nutné zhodnotit, jestli pro danou konstrukci představuje větší problém samotné smrštění, vznik smršťovacích trhlin v povrchové oblasti nebo množství a velikost mikrotrhlin v celém jejím objemu.

3 Analýza vztahů definovaných v normách a predikčních modelech

Projektanti mají při návrhu betonových konstrukcí k dispozici několik nástrojů, podle kterých mohou postupovat při posouzení časově závislého přetvárného chování betonu. Mohou použít vztahy definované v platných normách příslušného státu nebo pokročilejší modely pro popis dlouhodobého chování betonu, které jsou častěji používány v akademickém prostředí.

Při výpočtu podle různých norem či modelů však dostáváme ne zcela shodné výsledky a pro projektanty vzniká nepřehledná situace v tom, jaký vzor mají pro výpočet použít. Bohužel neexistují jasná pravidla a v České republice ani doporučení, která by definovala, pro jaký typ konstrukcí už je vhodné provést podrobnější analýzu přetvárného chování a pro které postačí zjednodušený výpočet podle platné normy.

V následující části práce je stručné shrnutí hlavních norem a nejčastěji používaných modelů. Snahou je ukázat, jakým způsobem je počítáno smrštění a dotvarování při vysychání betonu, jak je uvažována kinetika obou procesů a ukázat základní odlišnosti jednotlivých přístupů.

Ve všech výpočtech a grafických znázorněních jsou smrštění i dotvarování uvažovány kladnou hodnotou ve smyslu zmenšení velikosti prvku. Záporných hodnot dosahuje deformace od smrštění v případě nabývání (bobtnání), typicky u prvků ponořených ve vodě.

Pro možnost relevantního srovnání výsledků získaných výpočty podle jednotlivých norem byla v celé kapitole 3 při výpočtech uvažována betonová směs jednotné receptury, které je blíže popsána v následující části u modelu B3.

3.1 Model B3

Mnohé vztahy uvedené v modelu B3 [7] jsou v rámci této práce používány pro zpracování a vyhodnocení experimentálních dat, proto bude tento model popsán poněkud podrobněji než ostatní normy a modely uvedené v této práci.

Všechny grafy vytvořené pro ilustraci modelu B3 jsou vykresleny pro beton s následující kompozicí a dalšími parametry:

- hmotnostní zastoupení složek v 1 m^3 betonové směsi:
  - 205 kg vody,
  - 409 kg cementu (CEM I),
  - 2 345 kg kameniva,
- materiálové charakteristiky:
  - $\overline{f}_c = 33{,}3$ MPa (střední hodnota 28denní válcové pevnosti v tlaku),
  - $E_{28} = 28$ MPa (střední hodnota modulu pružnosti v 28 dnech),
- ostatní parametry (pokud pro daný graf není uvedeno jinak!):
  - délka sledovaného období 100 let,

- ošetřování betonu standardním způsobem po dobu 7 dní,
- náhradní tloušťka průřezu 200 mm,
- tvar prvku uvažován jako nekonečná deska,
- počátek vysychání i zatížení ve stáří betonu 7 dní,
- relativní vlhkost okolního prostředí 70 %.

3.1.1 Základní popis modelu B3

Model B3 je i přes některé nedostatky a omezení považován mnohými odborníky za nejlepší komplexní model pro predikci dotvarování a smrštění. Byl vyvinut týmem prof. Bažanta[5] na Northwestern University jako výrazné zjednodušení předchozích modelů BP a BP-KX [17], ze kterých vychází. Jeho finální podoba [7] pochází z roku 2010. Vztahy pro predikci dlouhodobého vývoje dotvarování a smrštění byly kalibrovány na velkém množství dat získaných při experimentech po celém světě.

Výpočet dotvarování a smrštění je u tohoto modelu založen na znalosti konkrétního složení a návrhové pevnosti použité betonové směsi. Právě v těchto parametrech je tedy skryto i riziko možné chyby, proto je součástí modelu i doporučení a postup k úpravě několika parametrů modelu B3 na základě základních krátkodobých měření.

V úvodní části dokumentu [7] popisujícího Model B3 je rozdělení konstrukcí do pěti hlavních skupin podle jejich náročnosti a citlivosti na deformační změny. Pro jednotlivé skupiny je pak uvedeno, v jakých případech postačí jednoduché posouzení podle americké normy ACI 209, kdy je vhodné, případně nezbytné provést podrobnější výpočet pomocí modelu B3 a kdy je žádoucí provést výpočet ještě přesnějším způsobem s využitím diferenciálních rovnic pro vedení tepla a vedení vlhkosti.

Použití modelu je omezeno pouze na betony s portlandským cementem, s délkou ošetřování minimálně jeden den a s následujícími rozsahy parametrů:

$$0{,}35 \leq w/c \leq 0{,}85 \tag{4}$$

$$2{,}5 \leq a/c \leq 13{,}5 \tag{5}$$

$$17\ \text{MPa} \leq \overline{f}_c \leq 70\ \text{MPa} \tag{6}$$

$$160\ \text{kg/m}^3 \leq c \leq 720\ \text{kg/m}^3, \tag{7}$$

kde w je množství vody v betonové směsi [kg/m^3],
c je množství cementu v betonové směsi [kg/m^3],
a je množství kameniva v betonové směsi [kg/m^3],
$\overline{f}_c$ je střední hodnota 28denní válcové pevnosti v tlaku.

[5] **Profesor Zdeněk P. Bažant** je uznáván jako jeden z předních světových odborníků v oblasti mechaniky materiálů a konstrukcí. Narodil se 10. prosince 1937 v Praze, kde také vystudoval stavební inženýrství na ČVUT. V roce 1967 odešel do Ameriky, dodnes působí na Northwestern University v Evanstonu, Illinois. Je členem (mimo jiné) Národní akademie věd USA (National Academy of Science) a Royal Society of London a držitelem mnoha významných ocenění. [16]

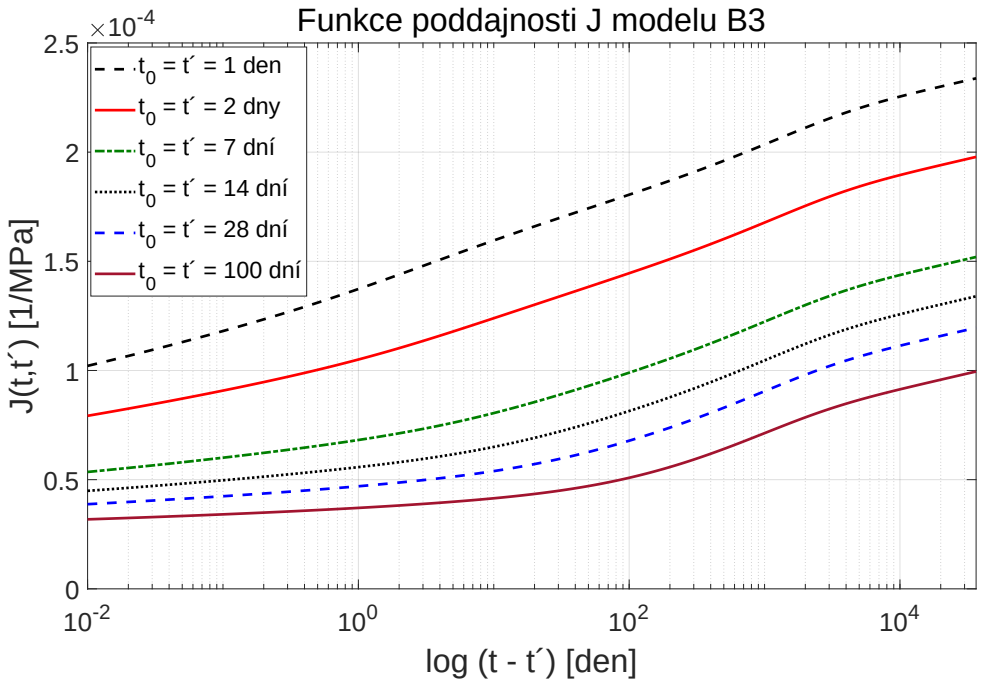
Dále pro výpočet podle modelu B3 platí omezení úrovně zatížení maximální hodnotou vzhledem k pevnosti betonu 0,45 $\overline{f}_c$.

Model B3 definuje celkovou poměrnou deformaci jako součet příspěvku od (ve vzorci v tomto pořadí) silového zatížení, smrštění a teplotních změn

$$\varepsilon(t) = J(t,t')\,\sigma + \varepsilon_{sh}(t) + \alpha\Delta T(t), \tag{8}$$

kde $J(t,t')$ je funkce poddajnosti,
σ je hodnota napětí od jednoosého namáhání,
$\varepsilon_{sh}(t)$ je poměrné smrštění,
α je součinitel teplotní roztažnosti a
$\Delta T(t)$ je rozdíl mezi aktuální a referenční teplotou, za kterou je považována běžná pokojové teplota.

3.1.2 Výpočet dotvarování podle B3



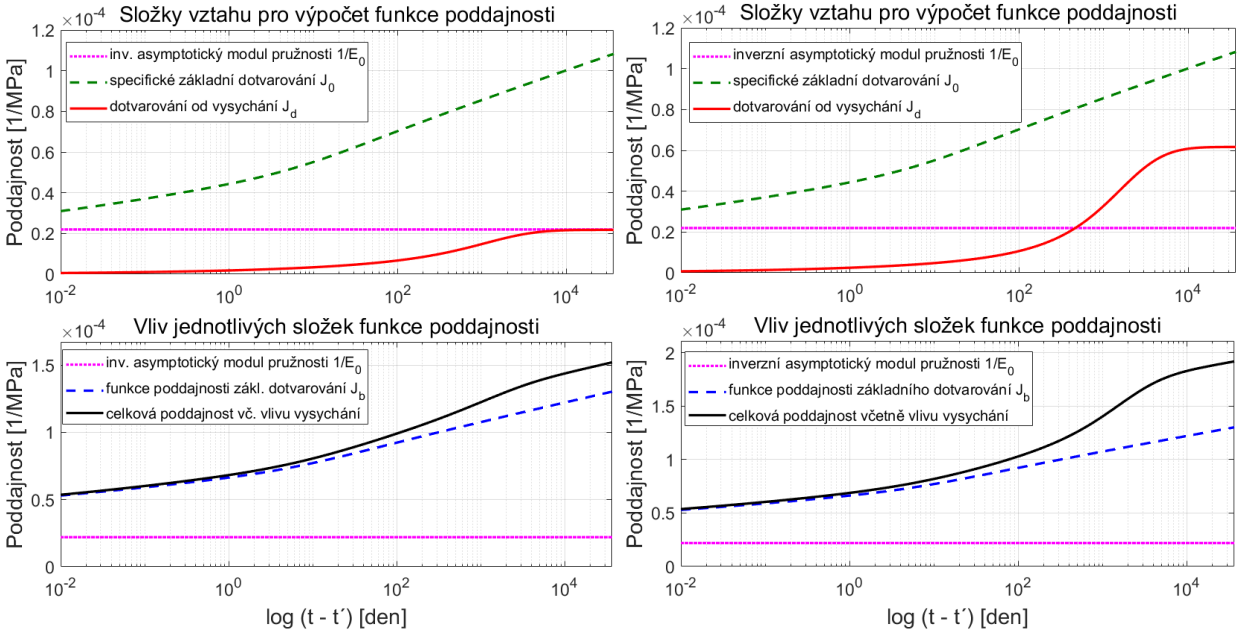
***Obrázek** 1: Tvar funkce poddajnosti podle modelu B3 v semilogaritmickém měřítku pro různé stáří betonu v okamžiku společného počátku zatížení a vysychání.*

Celková hodnota dotvarování je u tohoto modelu uvažována jako v čase neomezená (viz grafy funkce poddajnosti na obrázku 1) a je oddělen výpočet základního dotvarování a dotvarování od vysychání.

Funkce poddajnosti má tvar

$$J(t,t') = q_1 + J_0(t,t') + J_d(t,t',t_0), \tag{9}$$

kde q_1 vyjadřuje inverzní asymptotický modul pružnosti,
$J_0(t,t')$ je specifické základní dotvarování (dotvarování za konstantní vlhkosti),
$J_d(t,t',t_0)$ je přírůstek funkce poddajnosti od dotvarování při vysychání.



***Obrázek** 2: Rozkreslení jednotlivých členů ve vztahu (9) pro výpočet funkce poddajnosti. Horní graf zobrazuje průběh jednotlivých členů samostatně, v dolním je vykreslena konstantní hodnota asymptotického modulu pružnosti, funkce poddajnosti základního dotvarování a celková funkce poddajnosti. Vykreslení je pro $t_0 = t' = 7$ dní: vlevo pro relativní vlhkost prostředí 70 %, vpravo pro 45 %.*

Mezi projektanty je při posuzování přetvárného chování betonu od účinků dlouhodobého zatížení stále nejrozšířenější použití součinitele dotvarování, proto model uvádí vztah pro jeho výpočet z funkce poddajnosti (úpravou vztahu (3))

$$\varphi(t,t') = E(t')\,J(t,t') - 1\,, \tag{10}$$

kde $E(t')$ je modul pružnosti v okamžiku zatížení určený ze vztahu (12).

Součet prvních dvou členů ve vztahu (9) zastupuje funkci poddajnosti základního dotvarování J_b, která je častěji interpretována jako součet pružné deformace od jednotkového zatížení a následného nárůstu deformace od dlouhodobého jednotkového zatížení

za předpokladu, že není umožněna výměna vlhkosti s okolním prostředím. Pokud dotvarování bez vlivu vysychání vyjádříme pomocí dílčího součinitele dotvarování φ_b, můžeme vztah pro funkci poddajnosti základního dotvarování zapsat ve tvaru

$$J_b(t,t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\varphi_b(t,t')}{E(t')}\,. \tag{11}$$

Okamžitá pružná deformace $1/E(t')$ je počítána z hodnoty modulu pružnosti v okamžiku zatížení, který je v modelu B3 uvažován jako převrácená hodnota funkce poddajnosti pro délku trvání zatížení 0,01 dne, tedy zhruba 15 minut

$$E(t') = \frac{1}{J(t'+0.01,\ t')} \tag{12}$$

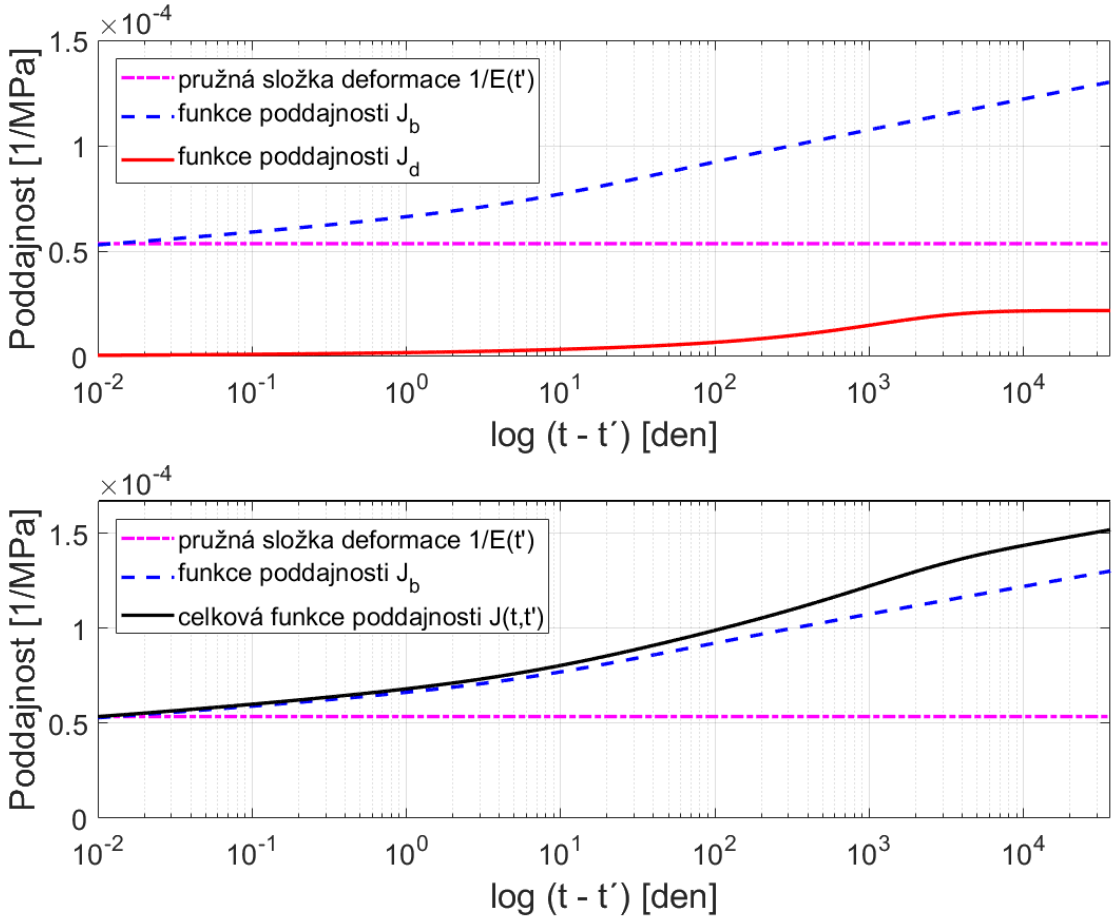
Pro názornější představu toho, co vlastně znamenají jednotlivé složky ve výpočtu funkce poddajnosti podle modelu B3 je na obrázku 2 provedeno rozkreslení průběhů jednotlivých členů tak, jak jsou uvažovány v aditivním vztahu (9). V horním grafu jsou jednotlivé členy vyneseny odděleně, aby bylo možné snadno porovnat jejich velikost a nárůst v čase, ve spodním grafu je pak ukázáno, jak se tyto složky promítají do celkové funkce poddajnosti. Pro ilustraci vlivu snížené vlhkosti je vykreslení provedeno pro vlhkost okolního prostředí 70 % a 45 %.

Naopak vykreslení průběhů okamžité pružné deformace, funkce poddajnosti základního dotvarování a dotvarování od vysychání je provedeno v grafech na obrázcích 3 a 4. V horním grafu jsou průběhy vyneseny odděleně, aby bylo možné snadno porovnat jejich velikost a nárůst v čase, ve spodním grafu je pak ukázáno, jak se do celkové funkce poddajnosti promítají základní poddajnost a poddajnost od vysychání. Toto názorné rozkreslení je provedeno pro relativní vlhkost okolního prostředí 70 % (obrázek 3) a 45 % (obrázek 3). Ze srovnání těchto dvou případů je zcela zjevný vliv snížené vlhkosti na hodnotu dotvarování od vysychání, která ovlivní i tvar celkové funkce poddajnosti.

Do výpočtu **základního dotvarování** (basic creep) značeného jako J_b vstupují aktuální čas (t) a čas počátku zatížení (t'), hmotnostní poměr kameniva a cementu (a/c), vodní součinitel (w/c) a tlaková pevnost betonu ($\overline{f}_c$). Jak bylo v úvodu práce zmíněno, základní dotvarování probíhá bez výměny vlhkosti s okolním prostředím, proto není nijak ovlivněno počátkem vysychání (t_0).

Přesný vztah pro určení funkce poddajnosti základního dotvarování je ve formě první časové derivace. Integrací získaný vztah není možné celý vyjádřit analyticky, problematickou část vzorce je možné vyhodnotit třemi způsoby – výpočtem pomocí numerické integrace, z přibližného analytického vztahu nebo interpolací z poskytnutých tabulkových hodnot. Vzhledem k tomu, že rozbor základního dotvarování není podstatou této práce, neuvádím zde konkrétní vzorce, které model B3 pro jeho výpočet poskytuje.

Hodnota **dotvarování od vysychání** (drying creep) závisí kromě časů t a t' také na stáří betonu v okamžiku počátku vysychání t_0, který obecně nemusí být totožný



***Obrázek** 3: Jednotlivé složky deformací od zatížení pro případ relativní vlhkosti okolního prostředí 70 %. Čerchovanou čarou je v obou grafech vykreslena hodnota okamžité pružné deformace pro délku trvání zatížení 0,01 dne, přerušovaná čára znázorňuje v obou grafech průběh funkce poddajnosti základního dotvarování (J_b). V horním grafu je plnou čarou vykreslen samostatně příspěvek funkce poddajnosti od vlivu vysychání (J_d), ve spodním grafu je plnou čarou vykreslena celková funkce poddajnosti (J), tedy součet poddajnosti pro základní dotvarování a dotvarování od vysychání.*

s okamžikem zatížení.

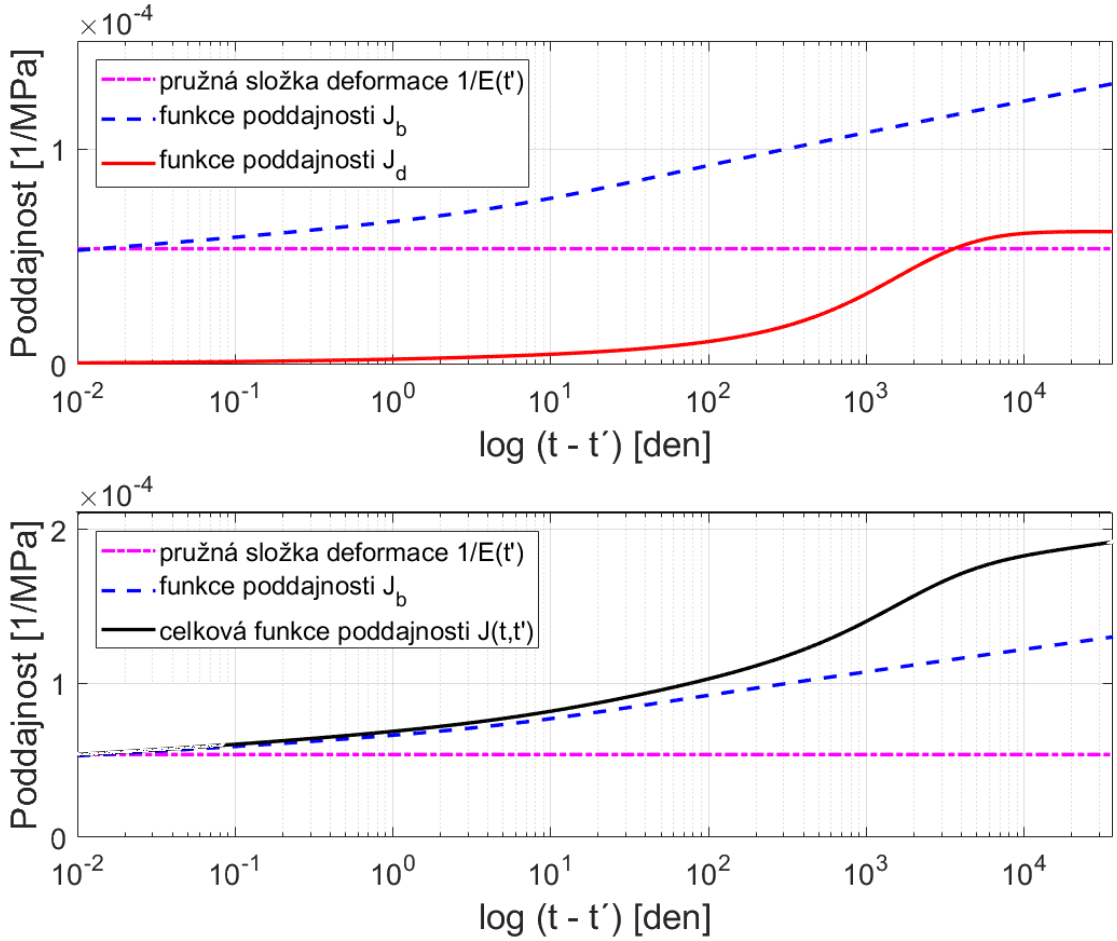
Základní tvar průběhu funkce poddajnosti od vlivu vysychání je znázorněn v lineárním a semilogaritmickém měřítku na obrázku 5. V počáteční fázi je vývoj výrazně rychlejší, proto je vhodnější a názornější vykreslení průběhu pro logaritmickou časovou osu.

Pro výpočet dílčí funkce poddajnosti od vysychání poskytuje model B3 vztah

$$J_d(t,t',t_0) = q_5\left[\exp\{-8\,H(t)\} - \exp\{-8\,H(t'_0)\}\right]^{1/2}, \tag{13}$$

kde t'_0 je čas, od kterého na betonový prvek působí současně jak zatížení, tak i vysychání

$$t'_0 = \max(t', t_0)\,. \tag{14}$$



***Obrázek** 4: Jednotlivé složky deformací od zatížení pro případ relativní vlhkosti okolního prostředí 45 %. Způsob zobrazení jednotlivých složek je stejný jako u obrázku 3 pro relativní vlhkost 70 %. Ze srovnáním obou případů je zřejmý vliv nižší vlhkosti okolního prostředí na poddajnost od vlivu vysychání, potažmo na průběh celkové funkce poddajnosti.*

Vnitřní funkce q_5, $H(t)$ a $H(t'_0)$ ve vztahu (13) jsou popsány následujícími vztahy:

$$q_5 = 7{,}57 \cdot 10^5 \; \overline{f}_c^{\,-1} \, | \, \varepsilon_{sh}^{\infty} \, |^{-0{,}6} \, , \tag{15}$$

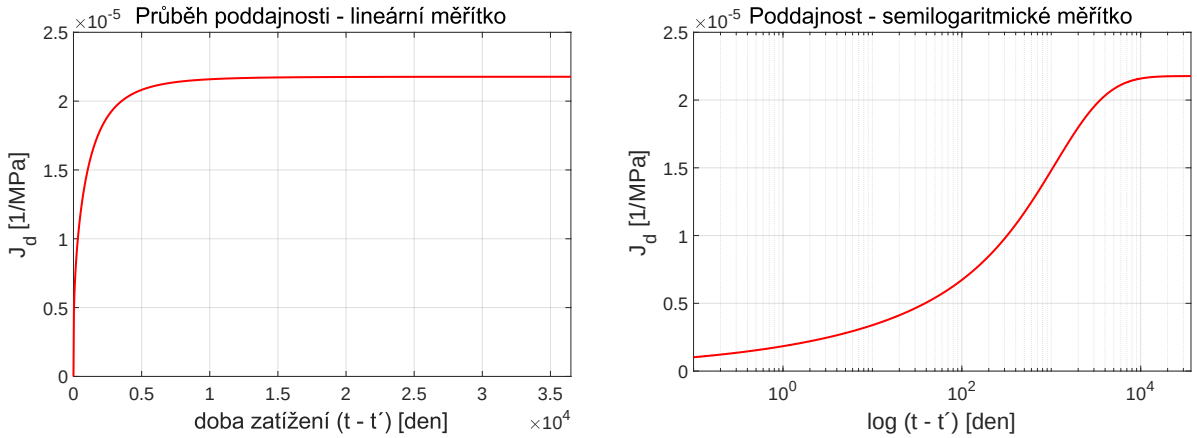
kde $\varepsilon_{sh}^{\infty}$ je konečná hodnota smrštění podle níže uvedeného vztahu (23).

$$H(t) = 1 - (1 - h)\, S(t), \tag{16}$$

kde h je relativní vlhkost prostředí,

$S(t)$ je časově závislá funkce, která vystihuje kinetiku vysychání podle velikosti a tvaru prvku a podle pevnosti použitého betonu. Je dána předpisem

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}, \tag{17}$$



***Obrázek** 5: Průběh funkce poddajnosti od vysychání betonu podle modelu B3 pro $t' = t_0 = 7$ dní: vlevo graf v lineárním měřítku, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*

ve kterém se vyskytuje veličina zvaná poločas vysychání τ_{sh} definovaná jako

$$\tau_{sh} = k_t (k_s D)^2, \tag{18}$$

kde k_t [den/m^2] je součinitel zohledňující vliv pevnosti betonu a jeho stáří v okamžiku počátku vysychání dle vztahu

$$k_t = 85\,000 \cdot {t_0}^{-0{,}08}\ {\overline{f}_c}^{-1/4}, \tag{19}$$

D je náhradní tloušťka průřezu, v případě modelu B3 definovaná jako dvojnásobek poměru celkového objemu prvku k části povrchu, která je v kontaktu s okolním prostředím[6]

$$D = 2\,\frac{V}{S}, \tag{20}$$

k_s je součinitel zohledňující tvar prvku. Pohybuje se v rozmezí od 1,0 do 1,55 a je potřeba správně vyhodnotit, který z nabízených základních tvarů (krychle, koule nebo nekonečná deska, válec či kvádr) nejlépe vystihuje skutečnou konstrukci, případně lze bez velkého rizika použít hodnotu pro nekonečnou desku $k_s = 1{,}0$.

Funkci $H(t_0')$ vyhodnotíme stejným způsobem jako funkci (16), pouze aktuální čas t nahradíme společným časem vysychání a zatížení t_0' podle (14), a to jak v samotném vztahu (16), tak i ve vnitřní funkci $S(t)$ (17).

Podíváme-li se na uvedené vztahy (16) a (17), je zřejmé, že pokud vysychání začne působit později než zatížení, případně budou oba časy totožné, můžeme výraz (13) zjed-

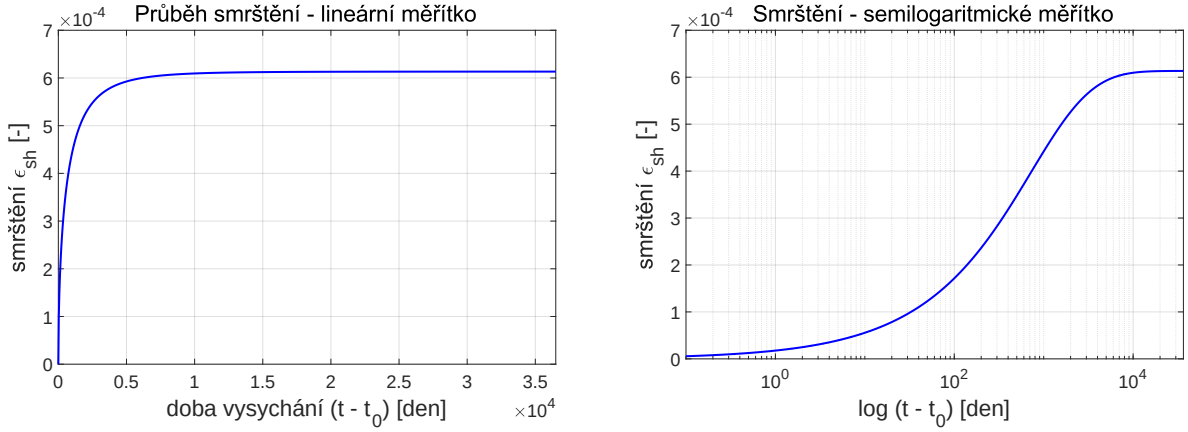
[6] U prvků s výrazně převládající délkou lze D určit jako dvojnásobek plochy průřezu k jeho obvodu ve styku se vzduchem.

nodušit na

$$J_d(t, t', t_0) = q_5 \left[\exp\{-8\, H(t)\} - 1\right]^{1/2} . \tag{21}$$

3.1.3 Výpočet smrštění podle B3

Ve výpočtu smrštění je skryt jeden z nedostatků modelu B3, zanedbává totiž autogenní smrštění a jako celkovou hodnotu smrštění bere pouze složku způsobenou vysycháním betonového prvku. Pro běžné konstrukční betony lze toto zanedbání tolerovat, jelikož obvykle je hodnota autogenního smrštění opravdu relativně malá, u vysokopevnostních betonů s nízkým vodním součinitelem však zanedbání autogenního smrštění není možné. Proto je rozsah platnosti modelu B3 omezen jen pro určité hodnoty těchto parametrů, viz (5) a (7).



Obrázek *6: Průběh smrštění podle modelu B3 pro relativní vlhkost okolního prostředí 70 % a počáteční ošetřování betonu v délce 7 dní: vlevo graf v lineárním měřítku, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*

Celkové smrštění je v modelu B3 počítáno jako součin časové funkce $S(t)$ (17), konečné hodnoty smrštění $\varepsilon_{sh}^{\infty}$ a součinitele k_h zohledňujícího vliv relativní vlhkosti okolního prostředí

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = -\varepsilon_{sh}^{\infty}\, k_h\, S(t) , \tag{22}$$

přičemž konečná hodnota smrštění v čase $t = \infty$ je dána vztahem

$$\varepsilon_{sh}^{\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 \left[0{,}019\; w^{2,1}\; \overline{f}_c{}^{-0{,}28} + 270\right] 10^{-6} \cdot \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})} , \tag{23}$$

kde α_1 je součinitel zohledňující třídu použitého cementu (CEM I, II nebo III),

α_2 je součinitel zohledňující způsob (nikoli délku) počátečního ošetřování betonu,
$E(607)$ je hodnota modulu pružnosti vypočtená pro čas $t = 607$ dní a
$E(t_0 + \tau_{sh})$ je jeho hodnota pro čas rovný součtu počátku vysychání a poločasu smrštění. Obě se určí ze vztahu pro časově závislou hodnotu modulu pružnosti

$$E(t) = E_{28} \sqrt{\left(\frac{t}{4 + 0{,}85\,t}\right)}\,, \tag{24}$$

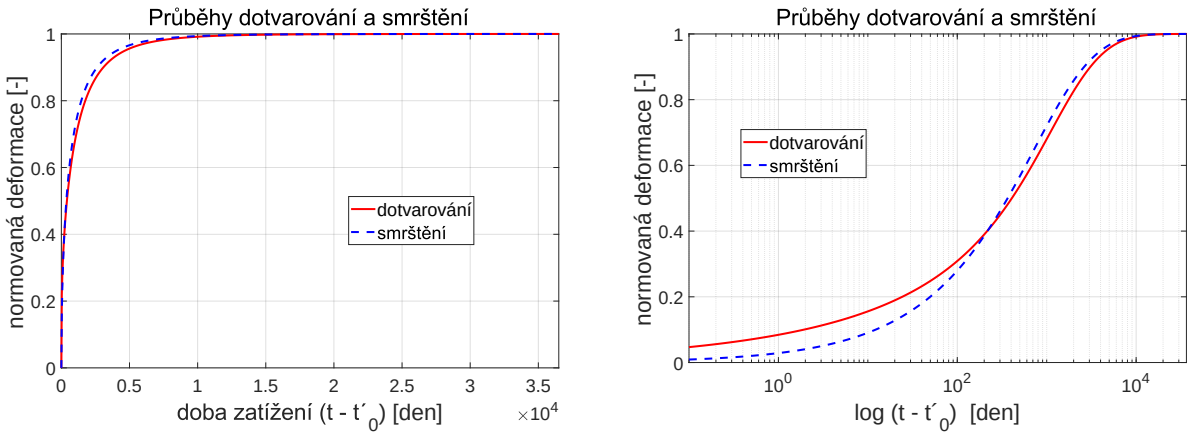
kde E_{28} je modul pružnosti ve stáří 28 dní, v modelu B3 počítaný z 28denní tlakové pevnosti betonu dle vzorce

$$E_{28} = 4\,734\,\sqrt{\overline{f}_c}\,. \tag{25}$$

Součinitel k_h ve vztahu (22) se pohybuje v rozmezí hodnot od $-0{,}2$ do 1,0 v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí. Záporných hodnot nabývá při vlhkosti prostředí nad 98 % a znamená to, že v takovém případě dochází k jevu zvanému bobtnání. Tato situace není u některých výpočetních modelů či norem vůbec uvažována.

Typický tvar křivky popisující průběh smrštění v čase je na obrázku 6, pro ilustraci uvádím opět grafické znázornění v lineárním a semilogaritmickém měřítku.

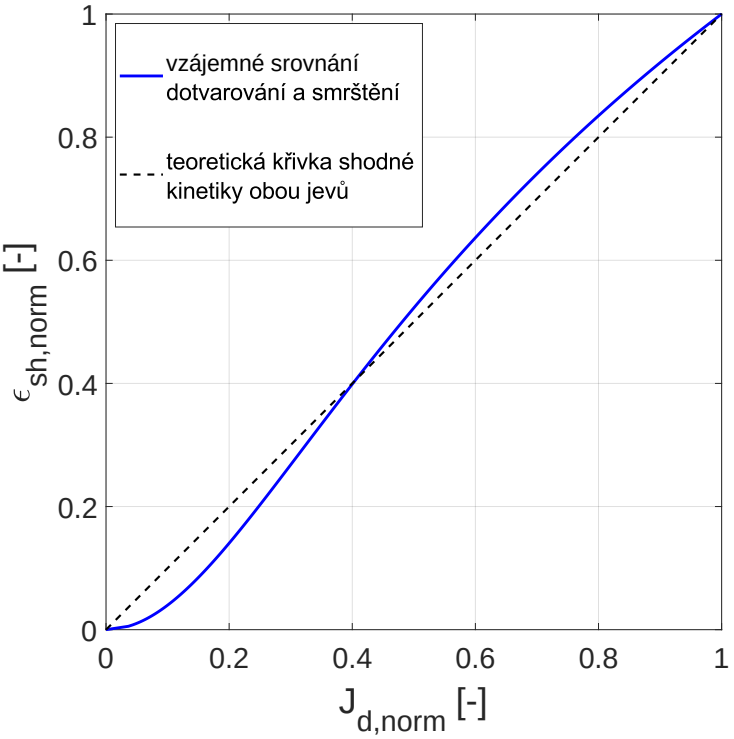
3.1.4 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (B3)



***Obrázek** 7: Normované průběhy funkce poddajnosti a smrštění od vysychání podle modelu B3: vlevo graf s lineárním měřítkem, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*

Oba jevy spojené s vysycháním betonu mají velmi podobný tvar křivky v závislosti na čase, nicméně nelze říci, že je v modelu B3 uvažována zcela stejná kinetika těchto

jevů. Pro vizuální srovnání časového vývoje smrštění a dotvarování byly průběhy znormovány vzhledem ke své hodnotě ve stáří 100 let, tedy ke konečné hodnotě ve sledovaném období. Obrázek 7 ukazuje normované průběhy v čase vykreslené do společného grafu v lineárním i semilogaritmickém měřítku. Z těchto srovnání je zřejmé, že model B3 neuvažuje zásadní rozdíl v kinetice dotvarování a smršťování od vysychání. Na počátku je předpoklad výraznějšího vlivu vysychání na rychlost procesu dotvarování, v pozdějším období je mírně větší dopad na kinetiku smršťování.



***Obrázek** 8: Graficky znázorněné srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání betonu podle modelu B3.*

Jiný způsob srovnání dává obrázek 8, kde je kinetika obou jevů porovnána vynesením normovaných průběhů proti sobě. U tohoto způsobu zobrazení není na vodorovné ose průběh času, ale na osách jsou hodnoty normovaných funkcí J_d a ε_{sh}.

3.2 model B4

Čtvrtý a zatím poslední[7] ze série publikovaných modelů vyvinutých od roku 1978 v dílně profesora Bažanta na Northwestern University nese označení B4 [18]. Pro kalibraci vztahů tohoto modelu sloužila rozsáhlejší databáze než v případě kalibrace modelu B3, která navíc obsahuje i údaje z 69 mostních konstrukcí.

Naprostá většina základních vztahů odpovídá předchozímu modelu B3, model B4 však již uvažuje i autogenní smrštění. Nově je totiž celková deformace od smrštění rozdělena

do dvou složek

$$\varepsilon_{sh,total}(t,t_0) = \varepsilon_{sh}(t,t_0) + \varepsilon_{au}(t,t_0), \tag{26}$$

kde $\varepsilon_{au}(t,t_0)$ je právě nově uvažovaná aditivní složka od autogenního smrštění.

V uvedené podobě platí vztah pouze pro teplotu 20 °C, odlišná teplota je v rámci všech výpočtů v modelu B4 řešena tzv. ekvivalentním časem. Díky zahrnutí vlivu autogenního smrštění je rozsah platnosti modelu B4 širší než u jeho předchůdce:

$$0{,}22 \leq w/c \leq 0{,}87 \tag{27}$$

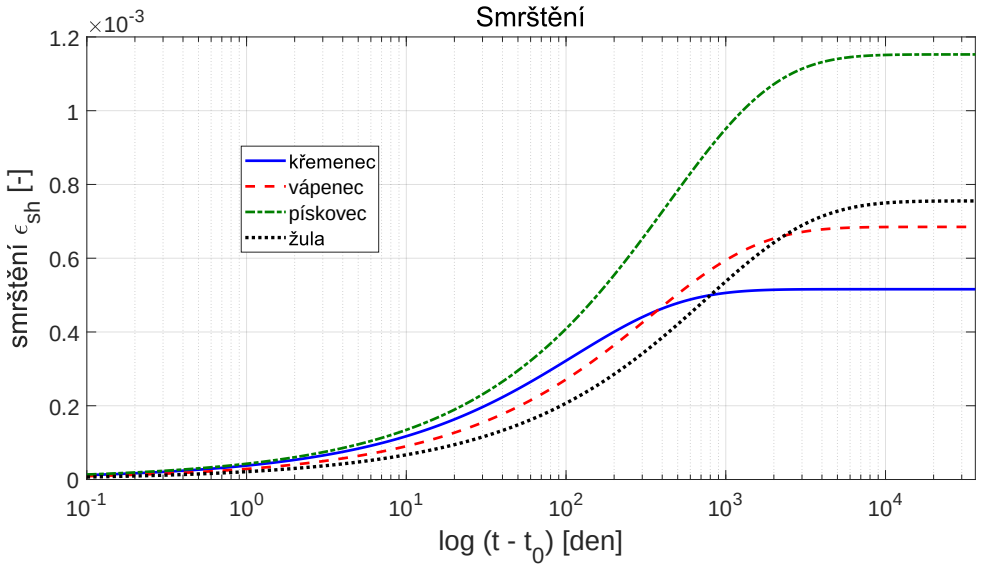
$$1{,}0 \leq a/c \leq 13{,}2 \tag{28}$$

$$15\ \text{MPa} \leq \overline{f}_c \leq 70\ \text{MPa} \tag{29}$$

$$200\ \text{kg/m}^3 \leq c \leq 1\,500\ \text{kg/m}^3. \tag{30}$$

Z hlediska procesů spojených s vysycháním zůstaly v platnosti všechny funkce modelu B3, došlo ale ke kompletnímu přepracování vztahů zohledňujících vliv pevnosti betonu, složení betonové směsi, způsobu ošetřování atd. na predikci dotvarování i smršťování.

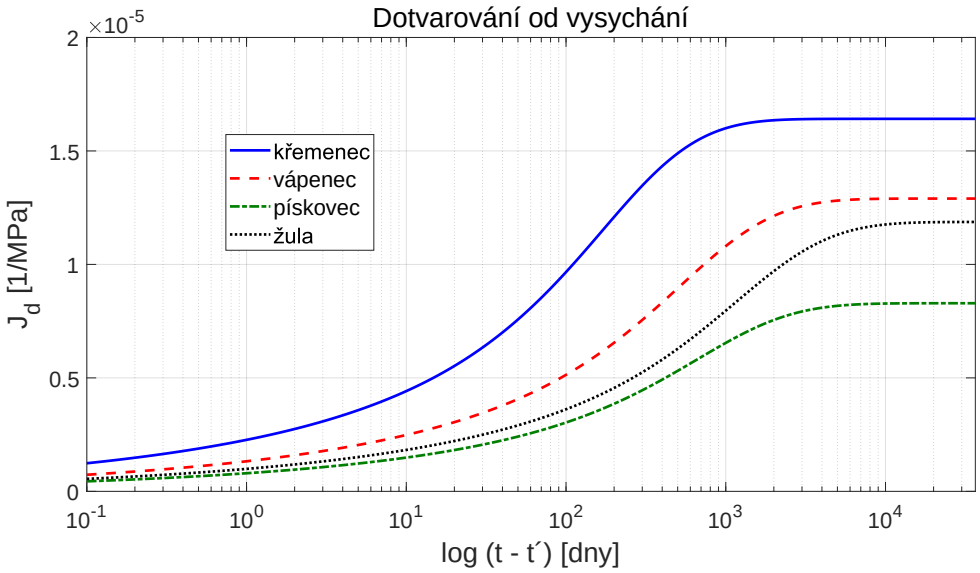
Množství vstupních údajů potřebných pro výpočet podle modelu B4 je výrazně vyšší než u jiných modelů a norem, což může v některých případech velmi komplikovat možnost jeho použití. Navíc je model velmi citlivý na některé vstupní údaje (např. přítomnost siliky, popílku, plastifikátorů apod.).



***Obrázek** 9: Vliv typu použitého kameniva na vývoj smrštění uvažovaný v modelu B4.*

[7] V současnosti je týmem profesora Bažanta připravován nový model s označením B5.

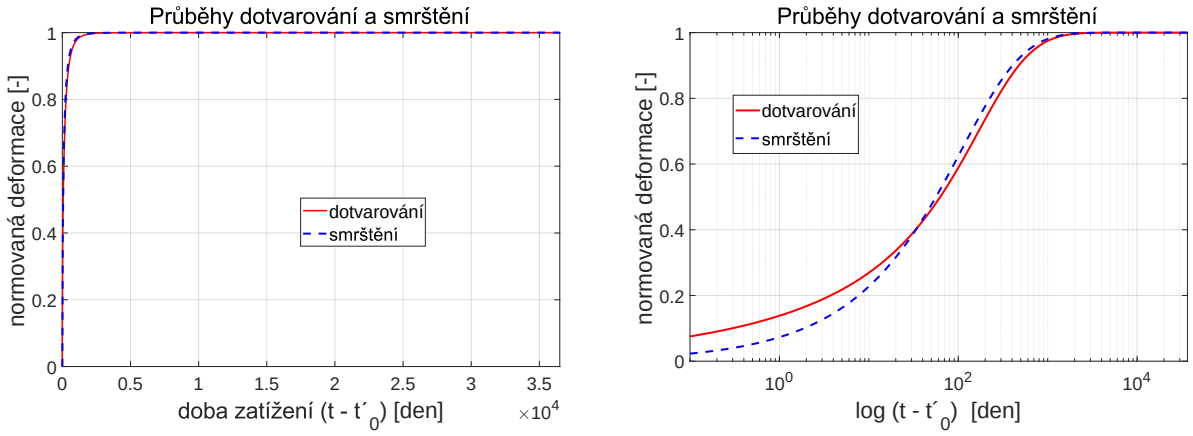
Na obrázku 9, resp. 10 je ukázán průběh smrštění, resp. dotvarování podle modelu B4 pro různé typy použitého kameniva při zachování konstantního hmotnostního poměru složek kamenivo - cement - voda. I přes fakt, že vlivem různé objemové hmotnosti zvolených hornin bude celkové množství složek v 1 m^3 betonové směsi proměnné, je zřejmé, že typ kameniva jakožto nově zahrnutý parametr má na kinetiku a předpokládanou konečnou hodnotu dotvarování a smrštění u modelu B4 nezanedbatelný vliv.



***Obrázek** 10: Vliv typu použitého kameniva na vývoj dotvarování od vysychání uvažovaný v modelu B4.*

Vzájemná kinetika jevů spojených s vysycháním je uvažována podobně jako u modelu B3, nově zahrnuté vstupní údaje totiž ovlivňují součinitele, které vstupují do výpočtu obou typů dlouhodobých deformací od vysychání.

Na obrázku 11 vidíme průběh křivek smrštění a dotvarování od vysychání pro model B4, který je velmi podobný grafu u modelu B3 na obrázku 7. V závislosti na volbě parametrů používaných nově v modelu B4 se kinetika obou jevů zrychlí (zobrazovaný případ) nebo zpomalí, vždy však stejnou měrou jak u smrštění, tak i u dotvarování. Průsečík obou křivek, tedy okamžik, kdy smrštění a dotvarování nabývají stejné procentuální úrovně svých výsledných hodnot, je v případě modelů B3 a B4 z hlediska časového okamžiku různý, ale normovaná hodnota sledovaných veličin zůstává stejná (pro zvolený typ betonu je to zhruba 40 % hodnoty ve stáří 100 let).



***Obrázek** 11: Normované průběhy funkce poddajnosti a smrštění od vysychání podle modelu B4 (kamenivo – křemenec): vlevo graf s lineárním měřítkem, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*

Vynesením normovaných průběhů bychom proto dostali graf zcela odpovídající obrázku 8, jelikož při tomto způsobu srovnání není zohledněn čas, ale pouze vzájemný poměr hodnot dotvarování a smrštění.

3.3 Model Code 2010 (*fib*)

Tento predikční model [19] (zjednodušeně označovaný jako *fib* nebo MC 2010) navazuje na původní model CEB MC90 [20], poprvé prezentovaný v roce 1990, respektive na jeho upravenou verzi z roku 1999 CEB MC90–99 [21], která již zahrnovala i autogenní smrštění. Odlišnost od CEB MC90–99 spočívá zejména ve způsobu výpočtu celkového dotvarování, které je u *fib* modelu nově rozděleno na základní dotvarování a dotvarování od vlivu vysychání.

Při kalibraci modelu byly využívány zejména Evropské betony, což je také důvodem podcenění vlivu smrštění u betonů z některých mimoevropských lokalit, jak je zmiňováno například v ACI [22]. Na rozdíl od dříve představených modelů B3 a B4 uvažuje tento model určitou konečnou hodnotu dotvarování, jejíž velikost závisí na kompozici použitého betonu a podmínkách okolního prostředí.

Rozsah použitelnosti je pro běžné konstrukční betony při splnění těchto omezujících podmínek:

$$20\ \text{MPa} \leq \overline{f}_c \leq 130\ \text{MPa}, \tag{31}$$

$$40 \leq RH \leq 100\,\%, \tag{32}$$

$$5\,^{\circ}\text{C} \leq T_{mean} \leq 30\,^{\circ}\text{C}, \tag{33}$$

kde RH je relativní vlhkost prostředí, kterému je beton vystaven (střední hodnota),

T_{mean} je střední hodnota teploty okolního prostředí.

3.3.1 Výpočet dotvarování podle *fib* Model Code 2010

Lineární závislost dotvarování na zatížení je omezena hodnotou napětí

$$|\sigma_c| \leq 0{,}4 \cdot \overline{f}_c(t'). \tag{34}$$

Hlavní veličinou používanou ve výpočtu je součinitel dotvarování $\varphi(t,t')$[8] , jeho celková hodnota je dána součtem dílčích součinitelů základního dotvarování a dotvarování při vysychání (ve vzorci v tomto pořadí)

$$\varphi(t,t') = \varphi_{bc}(t,t') + \varphi_{dc}(t,t')\,. \tag{35}$$

Vztah pro výpočet součinitele dotvarování od vysychání má podobu

$$\varphi_{dc}(t,t') = \beta_{dc}(\overline{f}_c) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t') \cdot \beta_{dc}(t,t'), \tag{36}$$

kde $\beta_{dc}(\overline{f}_c)$ je součinitel zohledňující vliv 28denní pevnosti betonu,

$\beta(RH)$ je součinitel zohledňující vlivy relativní vlhkosti okolního prostředí a rozměrů prvku,

$\beta_{dc}(t')$ je součinitel zohledňující vlivy teploty a pevnostní třídy cementu,

$\beta_{dc}(t,t')$ je časová funkce, do které vstupují kromě aktuálního času i všechny parametry předchozích součinitelů s výjimkou relativní vlhkosti.

Pro vyjádření funkce poddajnosti je možné využít v modelu uvedený vztah pro časově závislou celkovou deformaci od zatížení

$$\varepsilon_\sigma(t,t') = \sigma_c(t') \left(\frac{1}{E(t')} + \frac{\varphi(t,t')}{E_{c,28}} \right) = \sigma_c(t')\, J(t,t')\,, \tag{37}$$

kde $E(t')$ je sečnový modul pružnosti v okamžiku zatížení, který se vztahuje k okamžitým deformacím. Vypočte se ze vztahu pro hodnotu modulu pružnosti v libovolném čase

$$E(t) = E_{28} \sqrt{\exp\left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]}\,, \tag{38}$$

[8] Pro stáří betonu v okamžiku zatížení je v [19] používáno označení t_0, které bylo z důvodu konzistentního značení v celé práci nahrazeno označením t'. Drobné změny se týkají i značení některých dalších veličin či parametrů, nejedná se ale o významné rozdíly. V případě časových údajů je potřeba striktně rozlišovat, kdy se jedná o počátek zatížení a kdy o počátek vysychání, což bohužel díky používání stejného označení pro dva různé jevy může být napříč jednotlivými normami a modely trochu komplikované.

kde s je součinitel, jehož tabulková hodnota se určí v závislosti na pevnostní třídě použitého cementu.
E_{28} je 28denní hodnota modulu pružnosti, v případě *fib* MC 2010 počítaná (při znalosti 28denní pevnosti v tlaku) ze vztahu

$$E_{28} = 21{,}5 \text{ GPa} \cdot \alpha_E \left(\frac{\overline{f}_c}{10 \text{ MPa}} \right)^{1/3} , \tag{39}$$

kde α_E je tabulkový součinitel závislý na typu kameniva v betonové směsi.

$E_{c,28}$, tedy druhý z modulů pružnosti použitých ve vztahu (37) je 28denní tečnový modul pružnosti, jehož hodnota nezávisí na aktuálním čase t. Pro převod mezi tečnovým (E_c) a sečnovým (E_{cm}) modulem pružnosti platí v MC 2010 vztah

$$E_c = \left(0{,}8 + 0{,}2 \, \frac{\overline{f}_c}{88} \right) E_{cm} \, . \tag{40}$$

S využitím vztahů (35) a (37) vyjádříme funkci poddajnosti od vlivu vysychání

$$J_d(t, t') = \frac{\varphi_{dc}(t, t')}{E_{28}} \, . \tag{41}$$

3.3.2 Výpočet smrštění podle *fib* Model Code 2010

Jak již bylo zmíněno, *fib* Model Code 2010 uvažuje celkové smrštění jako součet smrštění autogenního a smrštění od vysychání, přičemž pro druhé z uvedených platí vztah

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{ds0}(\overline{f}_c) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_0), \tag{42}$$

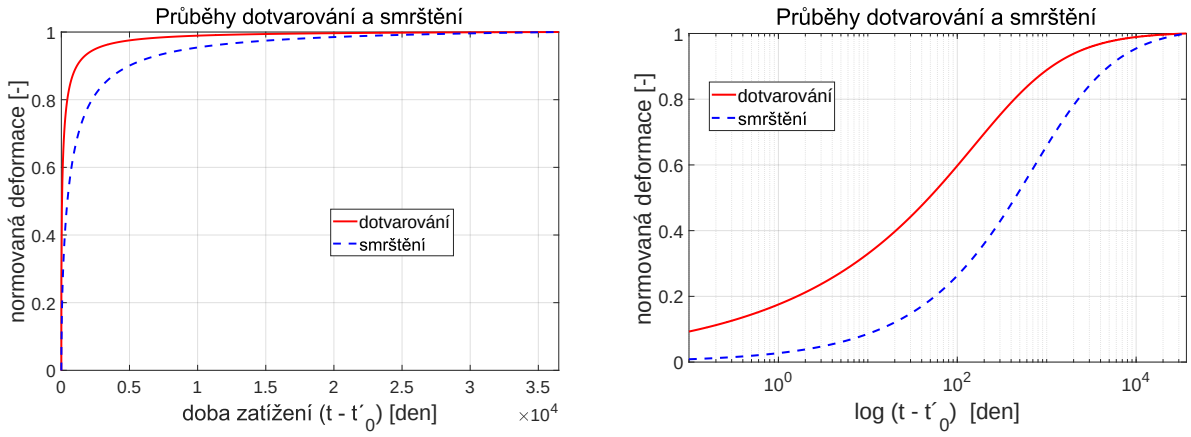
kde $\beta_{ds}(t - t_0)$ je časová funkce délky trvání vysychání $(t - t_0)$,
$\beta_{RH}(RH)$ je součinitel zohledňující vliv relativní vlhkosti okolního prostředí (model uvažuje i možnost bobtnání pro hodnoty $RH \geq 99\%$) a
$\varepsilon_{ds0}(\overline{f}_c)$ je součinitel smrštění definovaný jako

$$\varepsilon_{ds0}(\overline{f}_c) = \left[(220 + 110 \, \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \, \overline{f}_c) \right] \cdot 10^{-6}, \tag{43}$$

kde α_{ds1} a α_{ds2} jsou součinitele, jejichž tabulková hodnota závisí na pevnostní třídě cementu.

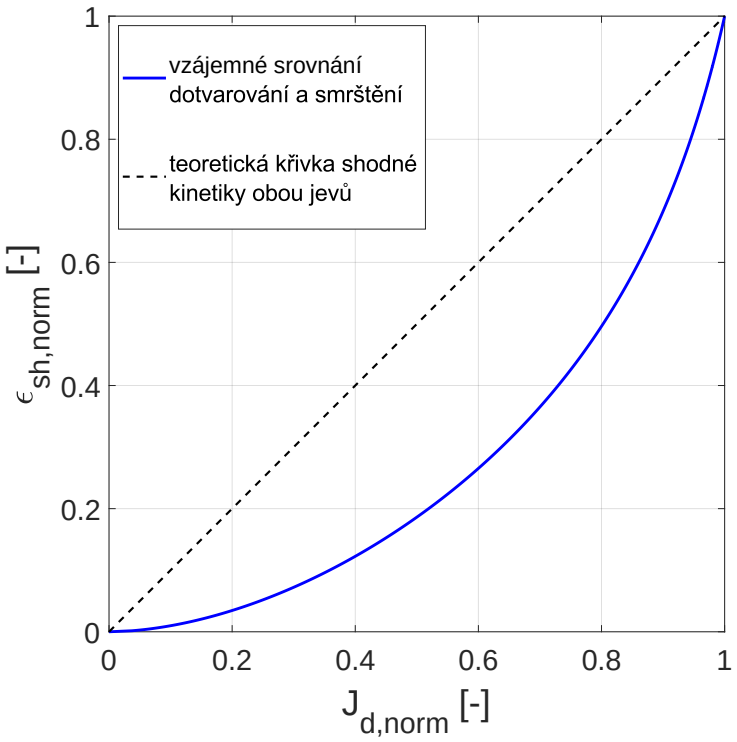
3.3.3 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (*fib*)

Tvary křivek zobrazujících samostatně průběhy smrštění a dotvarování od vysychání se nijak výrazně neodlišují od průběhů zobrazených u modelu B3 na obrázcích 6 a 5, kinetiku obou procesů však tento model uvažuje odlišně. Z grafického srovnání vývoje smrštění



***Obrázek** 12: Normované průběhy funkce poddajnosti a smrštění od vysychání podle fib Model Code 2010: vlevo graf s lineárním měřítkem, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*

a dotvarování spojených s vysycháním na obrázcích 12 a 13 je zřejmé, že *fib* MC 2010 předpovídá znatelně rychlejší průběh dotvarování než průběh smrštění.



***Obrázek** 13: Srovnání kinetiky normovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání betonu podle fib Model Code 2010.*

3.4 Norma ACI 209.2R-08

ACI 209.2R-08 [22] je aktuálně platná americká norma z roku 2008, která nahradila předchozí normu ACI 209R-92 ve verzi z roku 1997 [23]. Kromě základního popisu a vztahů pro výpočet dotvarování a smrštění je v dokumentu [22] uveden i vzorový výpočet provedený nejen pro postup podle normy ACI, ale i pro některé další modely pro predikci dlouhodobého chování betonu. Právě složení betonové směsi použité ve srovnávacích výpočtech v této normě bylo použito i pro většinu výpočtů v této práci. Tím bylo možné části výpočtů kontrolovat a ověřit jejich správnost.

3.4.1 Výpočet dotvarování podle normy ACI

Při výpočtu dotvarování je prioritně používán součinitel dotvarování, nicméně norma uvádí i vztah pro dopočet funkce poddajnosti

$$J(t,t') = \frac{1+\varphi(t,t')}{E_{cm}(t')}, \tag{44}$$

kde $E_{cm}(t')$ je střední hodnota sečnového modulu pružnosti betonu v okamžiku zatížení, která se vypočte ze střední tlakové válcové pevnosti betonu v okamžiku zatížení ($\overline{f}_c(t')$) a z objemové hmotnosti betonu (γ) jako

$$E_{cm}(t') = 0{,}043\,\gamma^{1{,}5}\cdot\sqrt{\overline{f}_c(t')}\,. \tag{45}$$

Časová hodnota tlakové pevnosti $\overline{f}_c(t')$ se určí v závislosti na 28denní pevnosti, typu použitého cementu a způsobu ošetřování betonu po uložení.

Součinitel dotvarování je definován jako součin časově závislé funkce a konečné hodnoty součinitele dotvarování

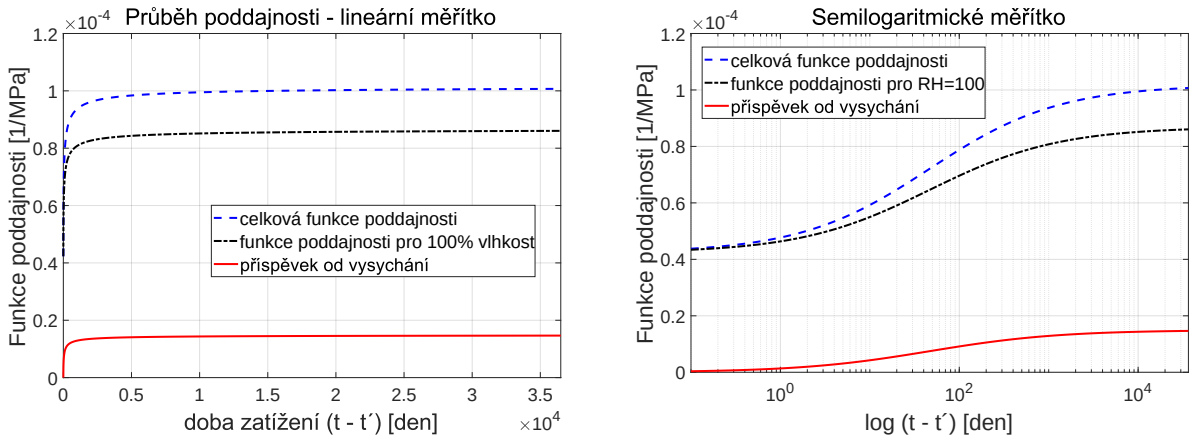
$$\varphi(t,t') = \frac{(t-t')^{\psi}}{d+(t-t')^{\psi}}\cdot\varphi_u, \tag{46}$$

kde $t-t'$ označuje délku trvání zatížení,
d a ψ jsou konstanty s doporučenou hodnotou $d = 10$ dní a $\psi = 0{,}6$ a
φ_u je konečná hodnota součinitele dotvarování daná vztahem

$$\varphi_u = 2{,}35\cdot\gamma_c\,,^{9} \tag{47}$$

kde γ_c je opravný součinitel, který je dán součinem šesti dílčích koeficientů zohledňujících vlivy způsobu ošetřování, relativní vlhkosti okolního prostředí, charakteristického rozměru prvku a konkrétního složení betonové směsi.

[9] Za standardních podmínek je možno vynechat výpočet korekčního součinitele γ_c a uvažovat přímo



***Obrázek** 14: Průběhy funkce poddajnosti podle normy ACI. Horní křivka zobrazuje celkovou funkci poddajnosti $J(t,t')$ pro danou vlhkost okolního prostředí 70 %, pod ní je čerchovanou čarou funkce poddajnosti získaná výpočtem pro 100% vlhkost okolí, která představuje funkci poddajnosti pro základní dotvarování $J_b(t,t')$. Dolní křivka zobrazuje průběh funkce poddajnosti od vlivu vysychání $J_d(t,t')$. Vlevo je zobrazení průběhů v lineárním měřítku, vpravo jsou tytéž průběhy v měřítku semilogaritmickém.*

Ze způsobu výpočtu součinitele dotvarování je zřejmé, že norma ACI neuvažuje odděleně proces základního dotvarování a dotvarování od vysychání. Proto je pro určení dotvarování od vysychání nutné provést dvojí výpočet, pro skutečnou relativní vlhkost okolí a pro teoretický případ 100% relativní vlhkosti. Pro každý z dílčích výpočtů určíme pomocí vztahu (44) hodnotu příslušné funkce poddajnosti a z jejich rozdílu potom potřebnou hodnotu funkce poddajnosti od vysychání. Křivky zobrazující funkce poddajnosti v jednotlivých krocích výpočtu jsou na obrázku 14.

3.4.2 Výpočet smrštění podle normy ACI

Norma ACI neuvažuje odděleně účinky autogenního smrštění a smrštění od vysychání, poskytuje pouze vztah pro celkovou hodnotu smrštění v čase t, který zahrnuje vlivy všech typů smršťování. Výpočet smrštění je založen na podobném principu jako výpočet dotvarování. Hodnota celkového smrštění je opět dána součinem výrazu zohledňujícího časovou závislost a konečné hodnoty smrštění

$$\varepsilon_{sh}(t,t_0) = \frac{(t-t_0)^{\alpha}}{f+(t-t_0)^{\alpha}} \cdot \varepsilon_{shu}\,, \tag{48}$$

kde $t-t_0$ je doba (ve dnech) od okamžiku ukončení počátečního ošetřování,

hodnotu 2,35 jako konečnou hodnotu součinitele dotvarování φ_u.

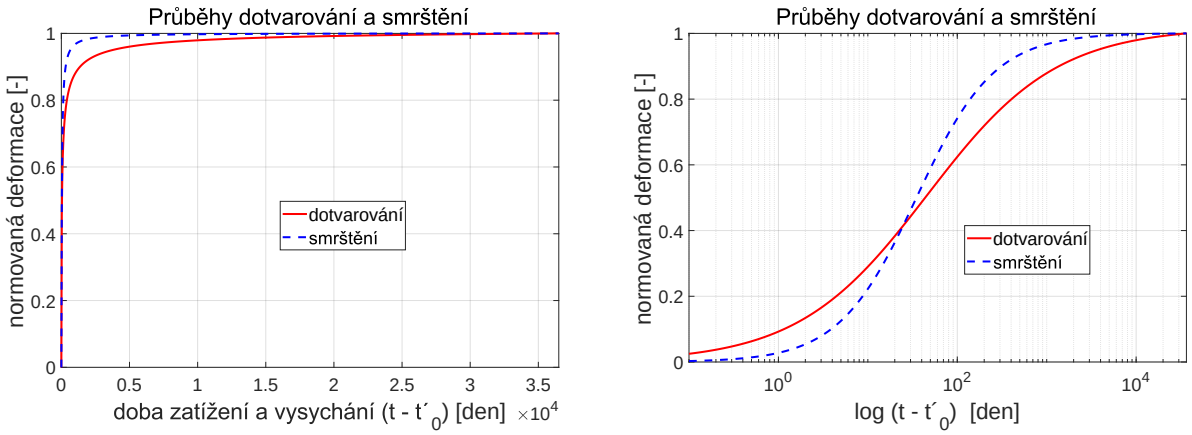
f a α jsou konstantní výrazy zohledňující tvar a velikost prvku,
φ_u je konečná hodnota smrštění daná vztahem

$$\varphi_u = 780 \cdot \gamma_{sh} \cdot 10^{-6}\,, \tag{49}$$

přičemž opravný součinitel γ_c, který je třeba použít při přesnějších výpočtech a při nestandardních podmínkách, je dán součinem sedmi dílčích koeficientů zohledňujících obdobné vlivy jako v případě výpočtu součinitele φ_c u dotvarování (způsob ošetřování, relativní vlhkosti okolního prostředí, charakteristický rozměr prvku a konkrétní složení betonové směsi).

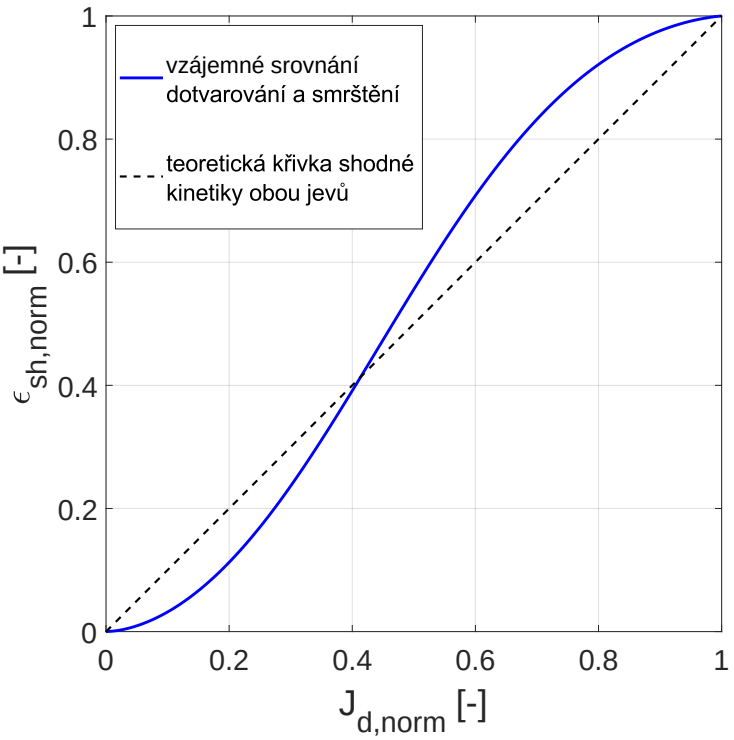
Tvar křivky smrštění se nijak zásadně neliší od křivek u ostatních norem a modelů, samostatný graf proto není uveden. Normovaný tvar průběhu smrštění je možné vidět na společném grafu s poddajností na obrázku 15.

3.4.3 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (ACI)



Obrázek *15: Normované průběhy funkce poddajnosti a smrštění od vysychání podle normy ACI: vlevo graf s lineárním měřítkem, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*

Vzájemné porovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání vypočtené ze vztahů uvedených v normě ACI ukazuje (viz obrázky 15 a 16) podobný trend, který bylo možno pozorovat u modelů B3 a B4. V zásadě platí, že podle normy ACI proběhne smrštění rychleji než dotvarování. Detailnější pohled však ukazuje, že pro velmi krátké časy v řádu jednotek dnů je rychlejší nárůst hodnot dotvarování, v následném období se vliv vysychání projevuje výrazněji u smrštění, které probíhá rychleji a k výraznému zpomalení u něj dochází dříve než u průběhu dotvarování. Ve srovnání se zmiňovaným modelem B3 je odlišnost v kinetice obou jevů výraznější.



***Obrázek** 16: Srovnání kinetiky normovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání betonu vypočtených na základě vztahů uvedených v normě ACI 209.2R-08. Průsečík s osou symetrie ukazuje „okamžik“ (připomeňme, že graf nezobrazuje časovou závislost), kdy oba jevy dosáhnou stejné míry svých konečných hodnot.*

3.5 Eurokód 2

Poslední z norem a modelů, kterými se tato práce blíže zabývá, je ČSN EN 1992-1-1 [9]. Jedná se o aktuálně platnou českou normu, která vstoupila v platnost v prosinci roku 2006. Patří do skupiny Eurokódů, plné označení je Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

Postup pro určení vlivu dotvarování a smrštění je popsán v části 3 (Materiály) a v příloze B. Způsob výpočtu vychází z původního Model Code 1990 [20] publikovaného v roce 1993, kde ještě není výpočetně odděleno základní dotvarování a dotvarování od vysychání.

3.5.1 Výpočet dotvarování podle EC2

Při výpočtu dotvarování používá EC2 (stejně jako *fib* Model Code 2010) veličinu označovanou jako součinitel dotvarování $\varphi(t, t')$. Linearita dotvarování je uvažována pro namáhání do úrovně 45 % aktuální tlakové pevnosti betonu. Tato norma vůbec nezavádí pojem funkce poddajnosti, neposkytuje tedy ani vztah pro její určení ze součinitele dotvarování.

Celkovou deformaci vyvolanou silovým zatížením lze získat jako součet okamžité defor-

mace (výpočet standardním způsobem podle Hookeova zákona) a opožděné deformace při dlouhodobém zatížení. Pro poměrnou deformaci vyvolanou dotvarováním v čase $t = \infty$, která je v této normě uvažována jako omezená, uvádí EC2 vztah

$$\varepsilon_{c\sigma}(\infty, t') = \varphi(\infty, t')\frac{\sigma_c}{E_c}, \tag{50}$$

kde E_c je tečnový modul pružnosti.

Pro výpočty bez požadavku na velkou přesnost mají projektanti možnost velmi snadno stanovit konečnou hodnotu součinitele dotvarování $\varphi(\infty, t')$ graficky z poskytnutých nomogramů.

Přesnější způsob výpočtu dotvarování (který vychází z Model Code 1990) pomocí časového průběhu součinitele dotvarování je popsán v příloze B této normy.

Základní vztah pro určení součinitele dotvarování je

$$\varphi(t, t') = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t')\,, \tag{51}$$

kde φ_0 je základní součinitel dotvarování definovaný jako

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(\overline{f}_c) \cdot \beta(t'), \tag{52}$$

kde φ_{RH} je součinitel zohledňující relativní vlhkost okolního prostředí a náhradní rozměr prvku (dvojnásobek poměru plochy průřezu k jeho obvodu ve styku s okolním prostředím). Je definován dvěma různými vztahy v závislosti na střední hodnotě 28denní tlakové pevnosti betonu $\overline{f}_c$.
$\beta(\overline{f}_c)$ je součinitel vystihující vliv pevnosti betonu a
$\beta(t')$ je součinitel zohledňující stáří betonu v okamžiku zatížení.

$\beta_c(t, t')$ je časově závislý součinitel, do jehož výpočtu kromě délky trvání zatížení vstupuje i relativní vlhkost prostředí a náhradní rozměr betonového prvku.

Vliv druhu cementu v betonové směsi je ve výpočtu zohledněn úpravou stáří betonu v okamžiku zatížení, přičemž beze změny zůstává pro cement třídy N[10].

Součinitel dotvarování se vztahuje k tečnovému modulu pružnosti E_c, který lze uvažovat jako 105 % hodnoty sečnového modulu pružnosti E_{cm}, tedy

$$E_c = 1{,}05 \cdot E_{cm}\,. \tag{53}$$

Hodnota sečnového modulu v čase je definována jako

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{\overline{f}_c(t)}{\overline{f}_c}\right)^{0{,}3} \cdot E_{28}\,, \tag{54}$$

kde $\overline{f}_c(t)$ je časově závislá střední hodnota pevnosti betonu v tlaku vypočtená dle

$$\overline{f}_c(t) = \overline{f}_c \cdot \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right], \tag{55}$$

kde s je součinitel zohledňující druh použitého cementu.

Bohužel výpočet uvedený v EC2 nejen že neposkytuje přímý vztah pro složku dotvarování od vlivu vysychání, ale ve výpočtu celkového dotvarování navíc není ani nijak zohledněn počátek vysychání, pracuje se pouze s časem počátku zatížení a s relativní vlhkostí okolního prostředí.

Dalším nedostatkem této normy je předpoklad, že poměrné přetvoření vyvolané dotvarováním dosáhne za určitý čas konečné hodnoty a dál se nezvyšuje, což je v rozporu s poznatky z dlouhodobých experimentů, které ukazují, že jde o proces, který se nikdy zcela nezastaví.

Jak již bylo zmíněno, Eurokód 2 neposkytuje žádný konkrétní vztah pro výpočet funkce poddajnosti. Pro její vyhodnocení bylo potřeba využít vztah z jiné normy či modelu. Problémem je nejednotný přístup jednotlivých norem či modelů v použití konkrétních modulů pružnosti v rámci převodního vztahu mezi součinitelem dotvarování a funkcí poddajnosti.

Jako nejvhodnější se jeví možnost využít převodní vztah uvedený v Model Code 1990 [20], ze kterého tato česká norma vychází, a který má podobu stejnou jako vztah (37), uvedený u výpočtu podle *fib* Model Code 2010. S ohledem na to, že podle EC2 se součinitel dotvarování vztahuje k tečnovému modulu pružnosti, je vhodné druhý z modulů pružnosti použitých ve zmiňovaném vztahu (37) volit i při výpočtu v rámci EC2 jako tečnový.

Vzájemný vztah mezi tečnovým a sečnovým modulem pružnosti je však u EC2 (viz vztah (53)) uvažován jinak než v MC90, který vztah mezi oběma typy modulů pružnosti definuje jako

$$E_{cm} = 0{,}85 \cdot E_c. \tag{56}$$

S použitím vztahu pro tečnový modul pružnosti definovaný v EC2 pomocí (53) přepíšeme původní vztah (37) do podoby

$$\varepsilon_\sigma(t, t') = \sigma_c(t') \left(\frac{1}{E_{cm}(t')} + \frac{\varphi(t, t')}{1{,}05 \cdot E_{28}}\right) = \sigma_c(t')\, J(t, t')\,, \tag{57}$$

[10] Označení třídy cementu je třeba nezaměňovat s označením rychlosti počátečního nárůstu pevnosti betonu. Norma rozlišuje 3 základní třídy cementu:

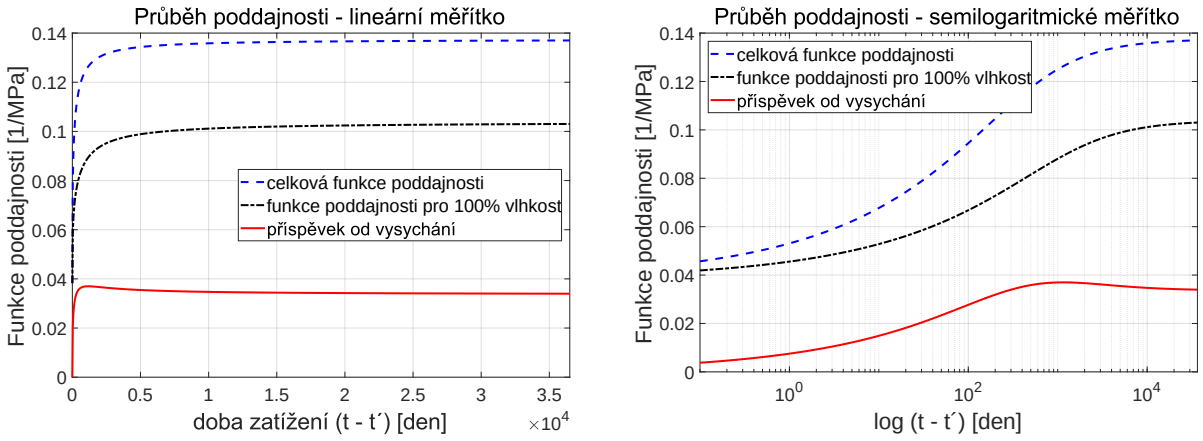
- třída R = cement pevnostní třídy CEM 42,5 R, CEM 52,5 N a CEM 52,5 R;
- třída N = cement pevnostní třídy CEM 32,5 R a CEM 42,5 N;
- třída S = cement pevnostní třídy CEM 32,5 N.

kde $E_{cm}(t')$ je sečnový modul pružnosti, který se váže k okamžité deformaci. Je uvažován jako stárnoucí, proto závisí na aktuální hodnotě času t,
E_{28} je naopak konstantní hodnota modulu pružnosti ve stáří 28 dní.

Ze vztahu (57) vyjádříme funkci poddajnosti jako

$$J(t,t') = \frac{1}{E_{cm}(t')} + \frac{\varphi(t,t')}{1{,}05 \cdot E_{28}}. \tag{58}$$

Průběh dotvarování od vysychání byl získán stejným postupem jako u normy ACI, tedy z rozdílu hodnot získaných dvojím výpočtem pro skutečnou a pro 100% vlhkost[11] s využitím vztahu (58). Průběhy jednotlivých složek funkce poddajnosti jsou vykresleny v grafech na obrázku 17.



***Obrázek** 17: Průběhy funkce poddajnosti podle Eurokódu 2. Horní křivka zobrazuje celkovou funkci poddajnosti $J(t,t')$ pro danou vlhkost okolního prostředí 70 %, pod ní je čerchovanou čarou funkce poddajnosti získaná výpočtem pro 100% vlhkost prostředí, která představuje funkci poddajnosti pro základní dotvarování $J_b(t,t')$. Dolní křivka zobrazuje průběh funkce poddajnosti od vlivu vysychání $J_d(t,t')$. Průběhy jsou vykresleny v lineárním měřítku (graf vlevo) a v měřítku semilogaritmickém (graf vpravo).*

Průběh dotvarování od vysychání (na grafech obrázku 17 plnou červenou čarou) vykazuje jiné chování než tomu bylo u všech předchozích norem i predikčních modelů. S největší pravděpodobností je nestandardní průběh dotvarování od vysychání způsoben chybným předpokladem aditivnosti vztahu pro celkovou poddajnost ve smyslu součtu složky poddajnosti od základního dotvarování a složky od dotvarování způsobeného vysycháním.

Skutečnost, že základní dotvarování nelze uvažovat jako zcela nezávislé na relativní vlhkosti vzorku, je potvrzována i mnohými experimenty, které ukazují, že dotvarování

[11] Eurokód 2 neuvažuje pro 100% relativní vlhkost prostředí u betonového prvku bobtnání, proto byl pro určení základní poddajnosti vybrán právě případ 100% vlhkosti prostředí, kterému je betonový prvek vystaven.

vzorků vysušených na nižší ale konstantní hodnotu relativní vlhkosti probíhá pomaleji než dotvarování saturovaných vzorků. Právě tento fakt by mohl vysvětlovat zdánlivý pokles deformace od vlivu vysychání, získaný výpočtem za předpokladu aditivnosti vztahu pro celkovou poddajnost. Pokles lze tedy přisoudit spíše zpomalení průběhu dotvarování u vzorků se sníženou relativní vlhkostí, zatímco průběh dotvarování od dalšího vysychání lze v této části grafu očekávat téměř konstantní nebo jen mírně rostoucí (v závislosti na již dosažené míře vysušení betonového prvku).

3.5.2 Výpočet smrštění podle EC2

Poměrné smrštění je v Eurokódu 2 určeno součtem složky autogenního smrštění a složky smrštění od vysychání. U autogenního smrštění je uvažována lineární závislost pouze na charakteristické válcové 28denní pevnosti a na čase, ke kterému je výpočet prováděn.

Pro výpočet smršťování od vysychání je uveden vztah

$$\varepsilon_{sh}(t) = \beta_{sh}(t, t') \cdot k_h \cdot \varepsilon_{sh0}, \tag{59}$$

kde $\beta_{sh}(t, t')$ je časová funkce délky vysychání, která dále zohledňuje i náhradní tloušťku průřezu,
k_h je tabulkový součinitel zohledňující náhradní tloušťku průřezu,
ε_{sh0} je teoretická konečná hodnota smrštění, přičemž u nenáročných výpočtů je opět možno využít rychlé určení tohoto parametru podle relativní vlhkosti prostředí a charakteristické pevnosti betonu, tentokrát pomocí poskytnuté tabulky s možností interpolace mezi sloupci.

Přesnější výpočet konečné hodnoty smrštění ε_{sh0} je uveden v příloze B této normy a je definován jako

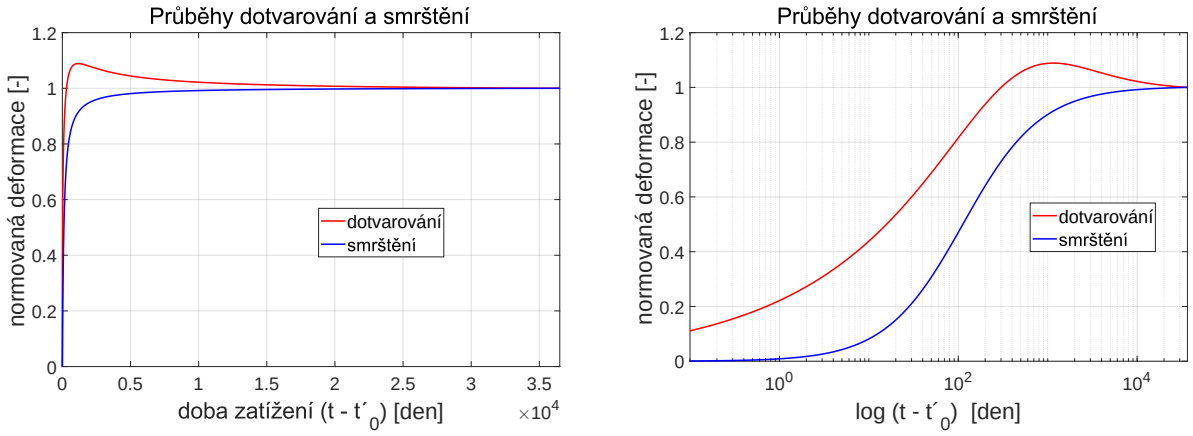
$$\varepsilon_{ds0}(\overline{f}_c) = 0{,}85 \cdot \left[(220 + 110\,\alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2}\,\frac{\overline{f}_c}{10} \right) \right] \cdot 10^{-6}\,. \tag{60}$$

Jednotlivé koeficienty ve vztahu (60) mají podobný význam a způsob určení jako v případě koeficientů ve vztahu (43) použitého při výpočtu podle *fib* Model Code 2010. Do výpočtu vnášejí závislost na druhu cementu a relativní vlhkosti okolního prostředí.

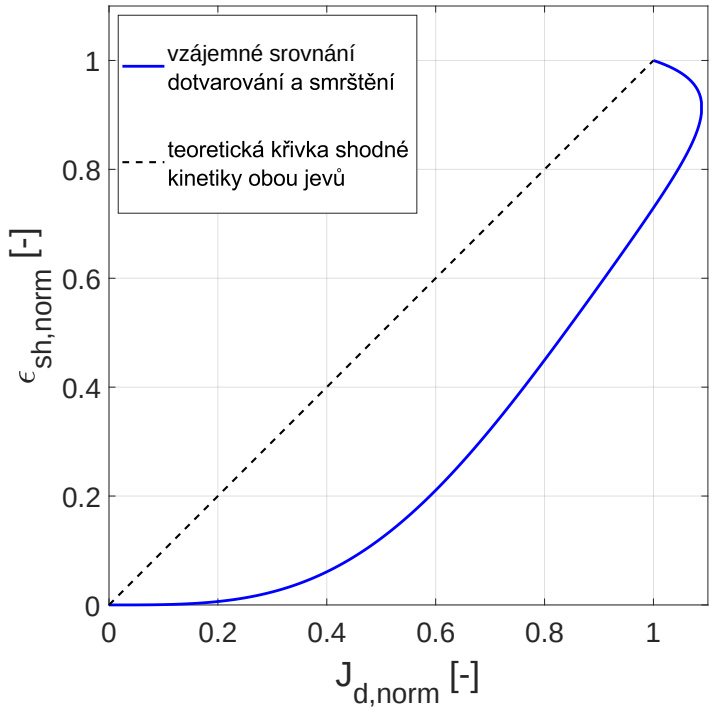
3.5.3 Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání (EC2)

Vzájemné srovnání smrštění a dotvarování od vysychání je ukázáno společným vykreslením normovaných průběhů na obrázku 18 a vzájemným vynesením hodnot normovaných průběhů proti sobě na obrázku 19.

Normování bylo (stejně jako v ostatních případech) provedeno vzhledem k hodnotě na konci sledovaného období, což v případě dotvarování od vysychání není hodnota maximální, proto normovaný průběh této veličiny dosahuje v určité části hodnot větších než 1.



Obrázek *18: Normované průběhy smrštění a dotvarování od vysychání podle Eurokódu 2. Vlevo graf s lineárním měřítkem, vpravo graf s logaritmickou časovou osou.*



Obrázek *19: Srovnání kinetiky normovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání určených pomocí Eurokódu 2. Neobvyklý tvar vzájemného srovnání je dán klesající částí křivky průběhu dotvarování od vysychání (viz grafy na obrázku 18) a normováním vůči hodnotě na konci sledovaného období.*

4 Data z experimentálních výzkumů

4.1 Databáze experimentálních dat

Na Northwestern University je volně dostupná databáze [4] vzorků z mnoha experimentálních studií prováděných po celém světě. Tato databáze sloužila mimo jiné i ke kalibraci některých modelů pro predikci dotvarování a smrštění.

Databáze je vytvořena v Excelu, každý vzorek má své unikátní označení. Pro poddajnost a pro smrštění jsou údaje vždy ve dvou samostatných listech, na prvním listu je pro každý vzorek uvedeno množství parametrů – jméno autora, rok, země a referenční číslo příslušné experimentální studie, dále podrobné údaje o složení betonové směsi včetně přísad a příměsí, tvar a rozměry daného vzorku, údaj o čase a úrovni zatížení, čas počátku vysychání a v neposlední řadě i informace o teplotě a relativní vlhkosti prostředí, ve kterém byl experiment prováděn. Na dalším listu jsou pro tytéž vzorky uvedeny ve dvou sloupcích časy měření a hodnoty získané veličiny. U dotvarování je uváděna přímo hodnota poddajnosti (tedy hodnota okamžité pružné deformace a následného dotvarování), u smrštění je uváděna hodnota poměrné deformace vzorku. Databáze obsahuje i seznam odborných článků, ve kterých byly výsledky jednotlivých experimentálních výzkumů publikovány. Ty bylo vhodné použít pro dohledání informací, které v databázi chyběly nebo pro kontrolu nejasných údajů.

Pro účely této práce bylo nutné celou databázi projít a vybrat pouze vzorky vhodné ke vzájemnému porovnání smrštění a dotvarování od vysychání. Vhodné vzorky musely splňovat několik zásadních kritérií. Na shodných vzorcích vyrobených z jedné betonové záměsi musely být k dispozici údaje o smrštění (optimálně údaje o celkovém smrštění a o smrštění autogenním měřeném na zapečetěných vzorcích [12]), o poddajnosti zatížených vysychajících vzorků a poddajnosti stejně zatížených vzorků, u kterých nedocházelo k vysychání.

Rozsáhlá databáze na Northwestern University obsahuje celkem 61 930 hodnot naměřených na celkovém počtu 3 308 vzorků. Z celkového množství naměřených dat je 29 177 hodnot poddajnosti z měření na 1 439 zatížených vzorcích a 32 753 údajů o smrštění z měření na 1 869 nezatížených vzorcích.

V závislosti na relativní vlhkosti prostředí během experimentu lze konstatovat, že měření základního dotvarování (ve smyslu celkové deformace nevysychajících vzorků od účinku zatížení) bylo prováděno na 585 vzorcích, měření celkové poddajnosti včetně vlivu vysychání na 711 vzorcích. Celkové smrštění bylo měřeno na 1 301 vzorcích, autogenní pak na 400 vzorcích.

Databáze zahrnuje výsledky z 362 experimentálních sad (experimentální sadou je myšlena skupina vzorků dotvarování nebo smrštění v rámci jedné experimentální stu-

[12] Měření autogenního smrštění nebylo nutnou podmínkou u vzorků, které svým složením a vlastnostmi odpovídaly běžným konstrukčním betonům a u nichž bylo díky tomu možné příspěvek autogenního smrštění zanedbat.

die, tedy skupina s jednou referencí případně jiným pojítkem, pokud ref. uvedena není), 172 jich je pro poddajnost a 190 pro smrštění.

V některých případech bylo v rámci jedné experimentální studie použito více receptur betonu, pro poddajnost je to 378 a pro smrštění 652 různých kompozic betonové směsi.

Zaměříme–li se na případy, kdy bylo testováno jak smrštění tak i poddajnost, je experimentálních výzkumů už výrazně méně. Alespoň nějaká poddajnost a smrštění bylo společně zkoumáno v rámci 68 experimentálních studií, pokud ale vybereme z databáze jen ty studie, které zkoumají celkové smrštění a zároveň také základní i celkovou poddajnost, je jich už pouhých 19. Bohužel i z těchto 19 experimentálních studií bylo nutné některé vyřadit kvůli tomu, že si navzájem neodpovídaly parametry vzorků při testování (vlhkost, zatížení, velikost vzorků, počátek vysychání apod.) nebo byla uvedená data natolik neúplná, že je pro tuto práci nebylo možné použít, čímž zůstalo celkem 13 experimentálních studií, ve kterých bylo možné najít vzorky vhodné pro vzájemné srovnání smršťování a dotvarování od vlivu vysychání. Z takto vybraných 13 experimentálních studií je pouze v 10 případech vodní součinitel minimálně 0,4.[13]

Další omezení vhodnosti vzorků přináší fakt, že pro rozumné posouzení vzájemné kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání je potřeba dostatečná délka trvání experimentu. Délka trvání naprosté většiny z nich je bohužel jen kolem jednoho roku, v případě experimentální studie Larrard dokonce jen 88 dní, což znemožnilo využití dat tohoto konkrétního výzkumu (počet vhodných experimentálních studií tím klesl na 9). Jen několik málo výzkumů mělo výrazně delší dobu sledování a měření vzorků.

Stručný přehled devíti experimentálních studií a z nich vybraného počtu vhodných vzorků[14] je uveden v tabulce 1. Z přehledu vyplývá, že výše popsanou základní analýzou bylo vybráno celkem 18 ucelených skupin složených z celkového počtu 108 vzorků. Ucelenou skupinou je myšlena sada vzájemně kompatibilních vzorků, které poskytují informaci o průběhu celkového smrštění, celkové poddajnosti a poddajnosti nevysychajícího vzorku. Z toho je zřejmé, že každá skupina musí obsahovat minimálně tři vzorky, jeden nezatížený vysychající vzorek, který bude vystaven stejné relativní vlhkosti prostředí jako příslušný zatížený vzorek a další zatížený vzorek, u kterého nebude docházet k vysychání. Pokud jsou v rámci jedné experimentální studie vytvořeny dvojice stejně zatížených a nezatížených vzorků, které jsou následně vystaveny různé (pro každou dvojici však stejné a konstantní) relativní vlhkosti, je možné je doplnit jedním společným stejně zatíženým zapečetěným vzorkem, na kterém byla sledována hodnota poddajnosti od základního dotvarování.

Určitým nedostatkem databáze je absence některých údajů u mnoha vzorků nebo

[13]Hodnota vodního součinitele 0,4 byla uvažována jako dolní hranice, od které je možné zanedbat hodnotu autogenního smrštění.

[14] Jedná se o počet vzorků, který vzešel z analýzy dat pouze na základě informací uvedených v databázi, ověření v příslušných publikacích bylo provedeno jen v jednotlivých případech při nalezení určité nesrovnalosti. Při pozdějším zpracování bylo nemalé množství vzorků dodatečně vyhodnoceno jako nevyhovující.

Jméno	Ref. č.	Rok	Lokalita	Počet různých receptur	w/c	Stejné vzorky s měřením J_b, J_{tot} a $\varepsilon_{sh,tot}$						Ucelené skupiny	Přibližná délka trvání experimentu
						Celkem vzorků	Vzorků z jedné záměsi	Počet vzorků s měřením dané veličiny					
								J_b	J_{tot}	$\varepsilon_{sh,au}$	$\varepsilon_{sh,tot}$		
York	106	1970	USA	1	0,43	6	6	2	2	1	1	1	do 1 roku
McDonald	69	1975	USA	3	0,434	10	10	2	2	3	3	1	1 rok
Troxel	101	1958	USA	1	0,59	9	9	1	1	1	2	2	20 až 25 let
					0,59			1	1	1	1		
Brooks	24	1984	UK	18		28						7	10 až 30 let
					0,4		4	1	1	1	1		
					0,45		4	1	1	1	1		
					0,48		4	1	1	1	1		
					0,5		4	1	1	1	1		
					0,54		4	1	1	1	1		
					0,55		4	1	1	1	1		
					0,55		4	1	1	1	1		
Russel	91	1989	USA	2	0,43	3	3	1	1	0	1	1	17 let
Shritharan	95	1989	New Zeland		0,47	14	14	6	6	1	1	1	cca 5 let
Bryant	376	1987	New Zealand	1	0,47	12	12	2	5	0	5	2	cca 5 let
Theiner		2017	Austria	1	0,44	10	10	3	3	1	3	1	1 rok
Keeton	59	1965	USA	1	0,46	16	16	1	3	1	3	2	2,5 roku
					0,46			1	3	1	3		
Celkem						**108 vzorků**						**18 skupin**	

***Tabulka** 1: Přehled vybraných experimentálních studií vhodných pro vzájemné porovnání průběhu smršťování a dotvarování od vysychání včetně uvedení konkrétního počtu vhodných vzorků a počtu ucelených skupin, které je možno ze vzorků vytvořit.*

celých experimentálních studií, což v případě velmi specifického výběru vzorků vhodných pro využití v rámci této práce vyžadovalo časté dohledávání informací v publikovaných článcích.

Z hlediska výběru dat pro tuto práci je zásadním nedostatkem to, že v databázi v naprosté většině případů není uveden čas počátku vysychání zatížených vzorků, na kterých je měřena celková poddajnost, bývá uveden jen čas počátku zatížení. Počátek vysychání je uváděn pouze u vzorků pro celkové smrštění. Po dohledání informací v příslušných článcích bylo mnohdy zjištěno, že počátek vysychání u vzorků pro smrštění a vzorků pro dotvarování není stejný a mnoho vzorků nemohlo být proto podrobeno vzájemnému srovnání kinetiky obou jevů spojených s vysycháním. Ani způsob ošetřování není u mnoha experimentů přímo v databázi dostatečně popsán. Tyto informace bylo opět nutné dohledávat v referenčních článcích.

Z pohledu možnosti kvalitního zhodnocení kinetiky obou zkoumaných jevů je problematická i malá hustota měření v počáteční fázi vysychání a zatížení, což je problém zejména starších experimentálních studií. Naproti tomu starší výzkumy někdy obsahují údaje získané za dlouhé časového období a poskytují tak možnost lépe vyhodnotit konečnou hodnotu smrštění a dotvarování od vysychání i charakteristický čas obou procesů, tzv. poločas vysychání.

4.2 Způsob zpracování experimentálních dat

Vzorky vhodných experimentálních studií (jejichž stručný přehled je v tabulce 1) byla dále zpracovávána a vyhodnocována. Naměřená data vzorků z jednotlivých experimentálních výzkumů byla nejprve vynesena do grafu pro možnost provedení vizuální kontroly vhodnosti jejich použití. Tímto způsobem byly dodatečně vyřazeny vzorky, které zjevně neodpovídaly parametrům uvedeným v databázi (nejspíše v důsledku chyby při vkládání parametrů) a vzorky, které i přes stejné složení betonové směsi vykazovaly výrazně odlišné chování a dalo se předpokládat, že nebyly zhotoveny přímo ze stejné záměsi, ale pouze ze stejné receptury, která nebyla přesně dodržena (tento problém se vyskytl u několika vzorků starších experimentálních studií).

Pro následnou analýzu smršťování a dotvarování od vysychání byly vytvořeny skupiny vzorků obsahující vždy minimálně jeden vzorek s údaji o celkovém smrštění a po jednom vzorky s údaji o celkové poddajnosti a poddajnosti při základním dotvarování.

Hodnoty pro určení průběhu dotvarování od vysychání byly získány jako rozdíl hodnot celkové poddajnosti a poddajnosti nevysychajícího vzorku změřené ve stejných časových okamžicích. U většiny vzorků nebyla jednotlivá měření prováděna ve zcela stejných časech, v takovém případě byla potřebná data u daných vzorků vzájemně doplněna lineární interpolací mezi nejbližšími hodnotami.

Takto získané údaje o dotvarování od vysychání byly spolu s naměřenými údaji smrštění vhodným způsobem znormovány pro možnost vzájemného porovnání jejich kinetiky. U experimentů s dostatečně dlouhou dobou měření bylo možné provést normování vůči hodnotám na konci sledovaného období. Vždy však bylo nutné před použitím tohoto způsobu normování ověřit vykreslením naměřených dat v semilogaritmickém měřítku, zda se vývoj změřené deformace skutečně dostal až do oblasti, kde již dochází k minimálnímu nárůstu.

Znormované tvary průběhů smrštění a dotvarování od vysychání již bylo možné vynést do společných grafů v závislosti na čase a do grafu vzájemného porovnání vývoje jejich hodnot. Jedná se o stejné grafické porovnání, které bylo prováděno v rámci analýzy vztahů uvedených v normách a modelech pro predikci dlouhodobého vývoje dotvarování a smršťování v kapitole 3. Snahou bylo vzájemně porovnat kinetiku smršťování a dotvarování od vysychání betonu získanou zpracováním výsledků experimentálních měření s kinetikou, která je uvažována v jednotlivých normách a modelech.

Dále bylo u vzorků s hodnotami celkového smrštění provedeno fitování s cílem identifikovat dva základní parametry – konečnou hodnotu smrštění $\varepsilon_{sh,\infty}$ a poločas vysychání τ_{sh}, který je charakteristickým časem obou posuzovaných procesů spojených s vysycháním.

Křivka průběhu smršťování získaná fitováním experimentálních dat byla očekávána ve tvaru odmocniny hyperbolického tangentu, proto byla pro fitování použita funkce ve tvaru součinu konstantní hodnoty konečného smrštění a časové funkce odpovídající funkci

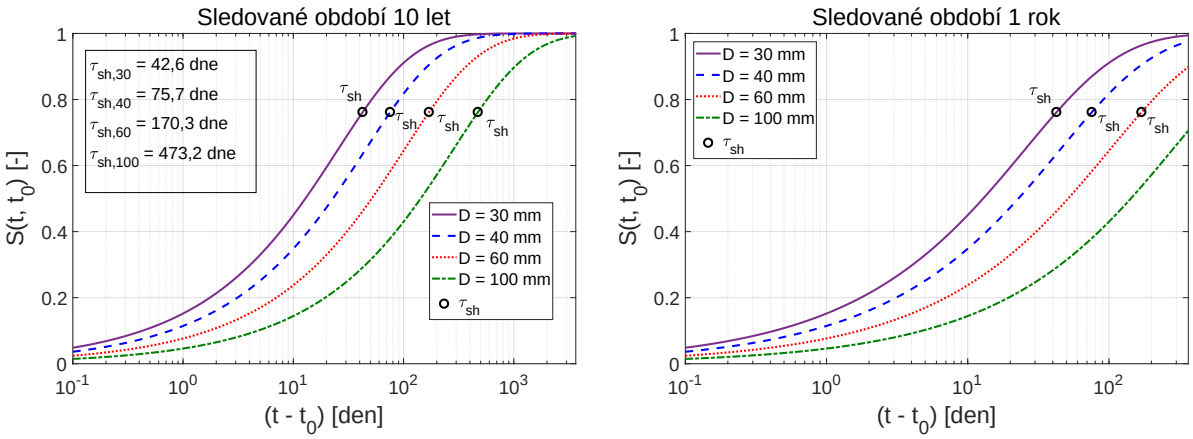
$S(t)$ používané v modelu B3 (viz vztah (17)). Pro připomenutí tato funkce má tvar

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}.$$

Výsledná funkce, kterou byly prokládány naměřené hodnoty smrštění, byla tedy použita ve tvaru

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,\infty} \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}, \tag{61}$$

který vychází ze vztahu (22) pro výpočet celkového smrštění u modelu B3. Parametr označený jako $\varepsilon_{sh,\infty}$ je při fitování chápán přímo jako konečná hodnota smrštění konkrétního vzorku vystaveného prostředí s danou hodnotou relativní vlhkosti, nejedná se tedy přímo o parametr označovaný v modelu B3 jako $\varepsilon_{sh}^{\infty}$.



***Obrázek** 20: Průběh časové funkce smrštění $S(t)$ pro různé náhradní tloušťky průřezu s vyznačením hodnoty charakteristického času τ_{sh}. Graf vlevo zobrazuje vývoj funkce v horizontu deseti let, pravý graf potom za kratší období jednoho roku. Hodnoty τ_{sh} vypsané v levém grafu jsou samozřejmě pro oba grafy stejné.*

Pro představu očekávaného tvaru křivky smrštění je na obrázku 20 vykreslen průběh časově závislé funkce $S(t)$ pro různé náhradní tloušťky průřezu. Složení betonové směsi a ostatní parametry byly uvažovány stejně jako v případě výpočtů v rámci analýzy vztahů modelů a norem v kapitole 3.

Kvalita výsledků fitování je zásadně ovlivněna dvěma faktory. Prvním z nich je komplikovaný odhad konečné hodnoty smrštění, pokud nejsou k dispozici data za dostatečně dlouhé období. Tento problém je zřejmý z průběhů časové funkce smrštění na obrázku 20. Při fitování dat naměřených za dlouhé období je možné průběh velmi dobře odhadnout i v případě objemnějších vzorků. Na levém grafu je vidět, že i vzorek s rozměry

odpovídajícími hodnotě[15] $D = 100$ mm dosáhne okamžiku výrazného zpomalení nárůstu smrštění. Naopak v případě výrazně kratšího období (pro pravý graf obrázku 20 zvolen jeden rok) lze rozumně odhadnout průběh pouze velmi malých vzorků, u větších vzorků je na konci sledovaného období průběh stále v části výrazného nárůstu a odhad konečné hodnoty by byl velice nepřesný. Bohužel v databázi na Northwestern University [4] je mnoho vzorků z měření, která probíhala právě po dobu pouze jednoho roku.

Druhým problémem je nevyvážená závislost metody nejmenších čtverců používané při fitování na obou parametrech $\varepsilon_{sh,\infty}$ a τ_{sh}. Vzájemný poměr derivací obou proměnných ukazuje, že závislost velikosti čtverců na hodnotě τ_{sh} je velmi slabá ve srovnání se závislostí na hodnotě parametru $\varepsilon_{sh,\infty}$. Proto je určení hodnoty parametru τ_{sh} obecně nepřesné a z fitování dostáváme výsledky s velkým rozptylem možných hodnot tohoto parametru. [24]

I přes výše popsané nedostatky je v databázi několik experimentů, které mají dostatečně dlouhou dobu trvání a získaná data poskytují možnost pro relativně kvalitní identifikaci konečné hodnoty smrštění i poločasu vysychání.

4.3 Experimentální studie Troxell

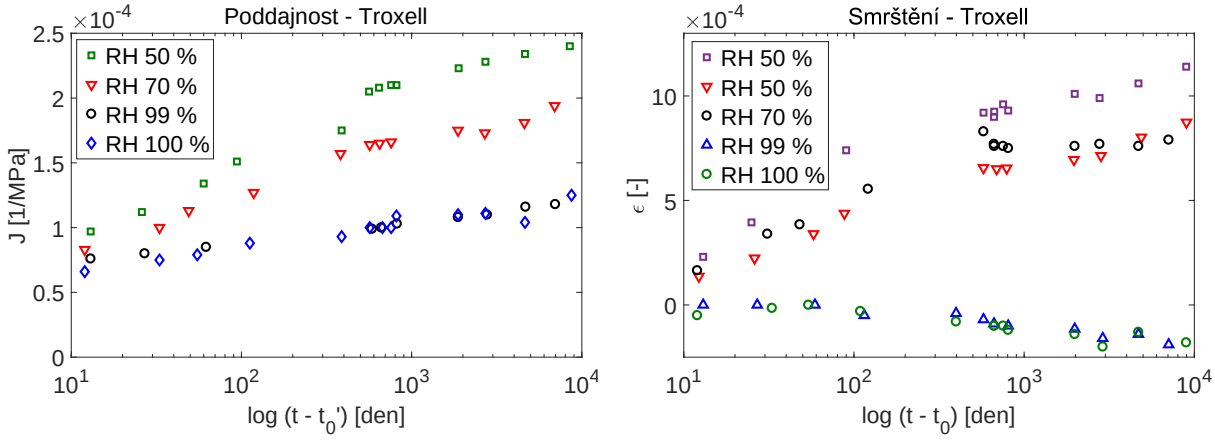
Spolu s experimentální studií Brooks se jedná o výzkum s nejdelší dobou měření. Délka sledování většiny vzorků přesáhla období 20 let, u některých dokonce 30 let. Výzkum probíhal na University of California pod vedením G. E. Troxella, J. M. Raphaela a R. E. Davise. Výsledky výzkumu byly publikovány například v článku [25], který byl použit pro získání potřebných údajů o průběhu této studie.

Množství vzorků pochází už z 20. – 30. let 20. století a jejich cílem bylo ukázat vliv různých aspektů na průběh dotvarování tlakem zatížených vzorků a na průběh smršťování. Mezi zkoumanými vlivy byly mimo jiné i poměr základních složek betonu (cement – kamenivo – voda), typ a jemnost mletí cementu, velikost vzorků i stáří betonu v okamžiku zatížení.

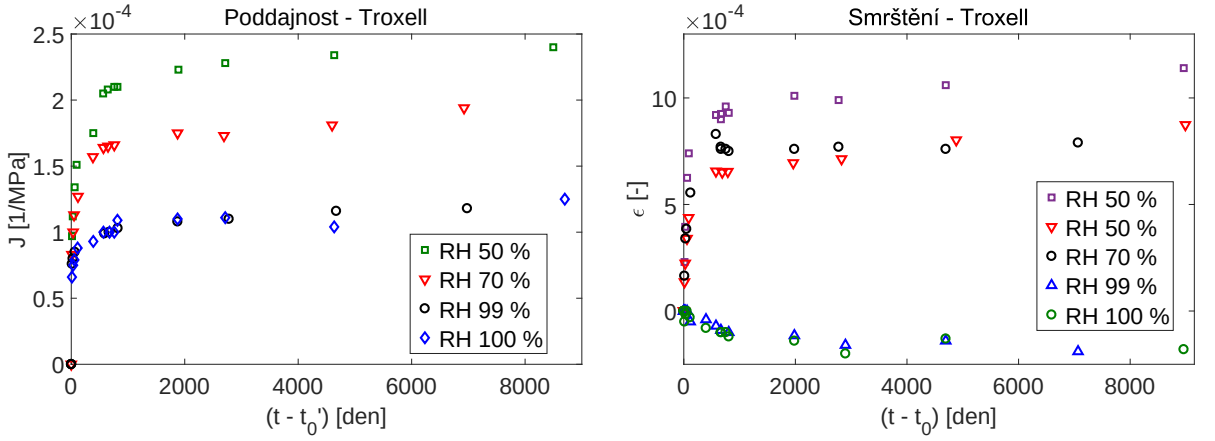
Vzorky vhodné pro účely této práce pochází ze série č. 3, která vznikla v roce 1928 a byla zaměřena na výzkum vlivu vlhkosti při skladování vzorků. Všechny vzorky této série mají jednotné složení betonové směsi, byly ošetřovány stejným způsobem a po stejnou dobu, tj. až do okamžiku zatížení vzorků pro dotvarování. Od okamžiku zatížení ve stáří 28 dní byly některé ze vzorků vystaveny změněné relativní vlhkosti okolního prostředí. Kontrolní nezatížené vzorky byly vystaveny stejným podmínkám a bylo na nich měřeno smršťování, popřípadě bobtnání (nabývání). Hodnota dotvarování byla v rámci experimentu vyhodnocována jako rozdíl (délkové) deformace zatížených a nezatížených vzorků vystavených stejné relativní vlhkosti prostředí.

Všechny vzorky v rámci série č. 3 měly stejný tvar i velikost, jednalo se o válce výšky 356 mm a průměru 102 mm s poměrem $V/S = 22$ mm.

[15] Připomeňme, že u modelu B3 je náhradní (efektivní) tloušťka průřezu D definována jako dvojnásobek poměru objemu vzorku a povrchu v kontaktu se vzduchem, tedy $D = 2 \cdot V/S$.



***Obrázek** 21: Grafické znázornění dat série č. 3 z experimentální studie Troxell. Vlevo jsou vyneseny hodnoty poddajnosti, vpravo hodnoty poměrných deformací od smršťování. Vzorky RH 100 % byly přímo ponořeny ve vodě. Vzorek smrštění (červené trojúhelníčky RH 50 % byl vyhodnocen jako nevhodný.)*



***Obrázek** 22: Grafické znázornění dat série č. 3 z experimentální studie Troxell v lineárním časovém měřítku. Vlevo jsou vyneseny hodnoty poddajnosti, vpravo hodnoty smršťování. Vzorky RH 100 % byly přímo ponořeny ve vodě. Vzorek vyhodnocený v grafu na obrázku 21 jako nevyhovující zde již není zobrazen.*

Betonová směs měla tyto základní parametry: $w/c = 0{,}59$ (hodnota vodního součinitele), $a/c = 5{,}67$ (hmotnostní poměr kameniva a cementu) a $c = 320\ \mathrm{kg/m^3}$ (obsah cementu). Vzhledem k vyšší hodnotě vodního součinitele a nižší tlakové pevnosti betonu (v databázi je uvedena střední hodnota 17 MPa) byl při vyhodnocení smrštění od vysychání zanedbán účinek autogenního smrštění.

4.3.1 Porovnání smrštění a dotvarování od vysychání (Troxell)

Na grafech na obrázku 21 jsou vykreslena naměřená data všech vybraných vzorků z experimentálního výzkumu Troxell, v samostatném grafu jsou vhodné vzorky s měřením smršťování a v dalším grafu vzorky, na kterých bylo posuzováno dotvarování. Uvedená hodnota relativní vlhkosti prostředí 100 % znamená, že tyto vzorky byly přímo ponořeny ve vodě. V databázi byly pro smrštění k dispozici údaje pro dva vzorky vystavené relativní vlhkosti 50 %, z porovnání dat vynesených v pravém grafu obrázku 21 je zřejmé, že jeden ze vzorků pro smrštění vystavený 50% vlhkosti prostředí (data znázorněna červenými trojúhelníky) vykazuje jiné chování, než jaké lze v závislosti na ostatních vzorcích očekávat. Pravděpodobně byl vzorek vystaven jiné vlhkosti než je uvedeno nebo byl do výsledků série č. 3 zařazen omylem. Tento vzorek byl pro další zpracování vyřazen.

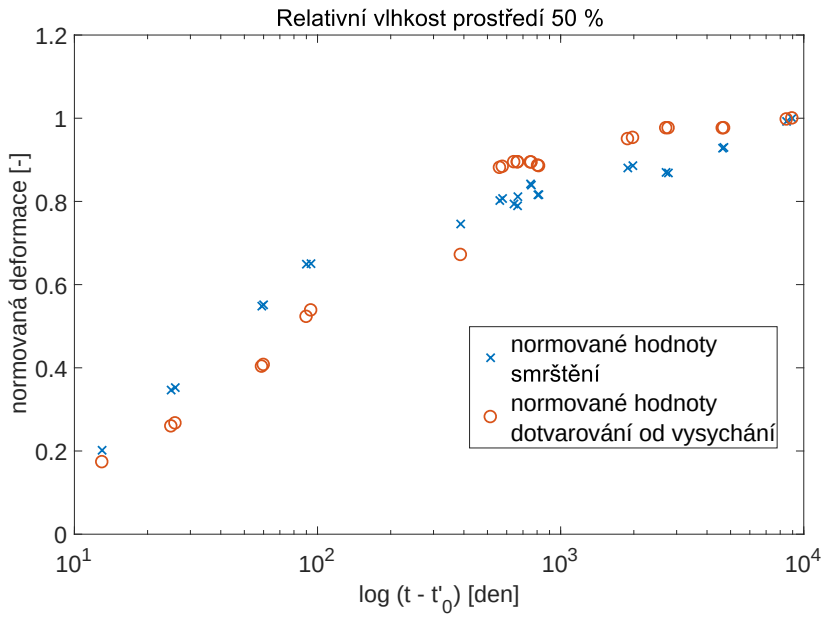
Bohužel, první měření deformací vzorků proběhla až 12. den po společném počátku zatížení i vysychání. Z výsledků proto není možné vyhodnotit chování v počáteční fázi, kdy však většina výpočetních modelů předpokládá rozdíly v kinetice obou jevů spojených s vysycháním.

Nadstandardní délka trvání experimentální studie Troxell je velkou výhodou, v zásadě by měření po dobu více než 20 let mělo poskytovat velmi dobrou možnost predikce asymptotických hodnot smrštění i dotvarování od vysychání, což ostatně ukazuje i vynesení dat v lineárním měřítku na obrázku 22.

Pro porovnání kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání bylo možné vytvořit dvě základní skupiny s odlišnými podmínkami vysychání. U první skupiny byly vysychající vzorky vystaveny prostředí s relativní vlhkostí 50 %, u druhé pak prostředí s relativní vlhkostí 70 %. Pro každou z těchto skupin bylo možné vyhodnotit dotvarování od vysychání ze dvou kombinací zatížených vzorků. Jako hodnoty poddajnosti bez vlivu vysychání bylo totiž možné použít data vzorku ponořeného do vody nebo data vzorku uchovávaného při 99% vlhkosti vzduchu. Bylo tedy možné získat celkem čtyři výsledná srovnání průběhů smršťování a dotvarování od vysychání. Výsledky z obou variant v rámci jedné skupiny se nijak výrazně nelišily, v této práci jsou proto ukázány výsledky s využitím vzorku uchovávaného při vlhkosti okolního prostředí 99 %, který vykazoval o trochu menší výkyvy v hodnotách naměřených deformací.

Výsledky zpracování experimentálních dat skupiny vzorků se sníženou relativní vlhkostí prostředí 50 % jsou na obrázcích 23 a 24. Nejprve jsou porovnány normované hodnoty smrštění a dotvarování od vysychání vynesením do společného grafu v závislosti na délce trvání vysychání (obrázek 23), časová osa je v logaritmickém měřítku. Na dalším grafu (obrázek 24) je již tradiční způsob srovnání vynesením normovaných hodnot obou průběhů proti sobě.

Data neukazují úplně hladký průběh obou procesů, mezi sousedními hodnotami je mírný rozptyl. Vzhledem k období, ve kterém tento výzkum probíhal (započal před 90 lety!), mohou být určité nepřesnosti důsledkem nižší kvality měřicích přístrojů nebo odchylky od deklarovaných hodnot vlhkosti či zatížení. Základní trend vývoje obou procesů



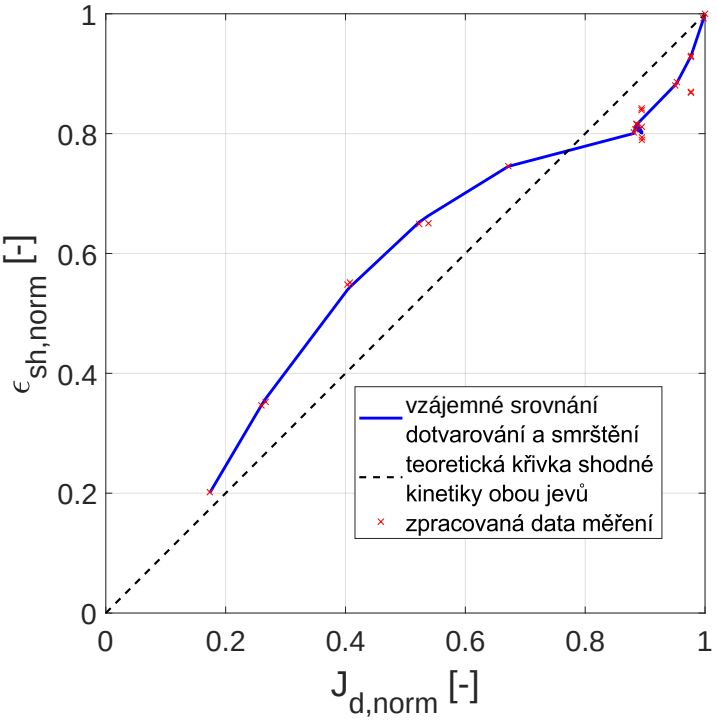
***Obrázek** 23: Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání u vzorků z experimentální studie Troxell (válce, $D = 44$ mm). Průběhy jsou v normovaném tvaru, normování bylo provedeno k poslední hodnotě sledovaného období. Vysychání probíhalo při relativní vlhkosti okolního prostředí 50 %, jako hodnoty poddajnosti při základním dotvarování byla použita data vzorku vystaveného vlhkosti 99 %.*

je ale dostatečně zřejmý.

V tomto konkrétním případě – trojice vzorků jedné skupiny (RH 50 %) z experimentální studie Troxel – pozorujeme na obrázku 23, potažmo 24 vzájemný průběh obou procesů, který je svým způsobem inverzní k vzájemnému průběhu, který byl získán u modelů B3 a B4 (pro srovnání viz například obrázek 7, potažmo 8 u modelu B3.) Toto srovnání samozřejmě není zcela relevantní, slouží pouze k hrubé představě. Skutečné porovnání hodnot získaných z experimentálního měření s předpoklady jednotlivých modelů a norem by muselo být prováděno vůči průběhům, které by byly získány výpočtem pro betonový prvek stejných parametrů jako u posuzovaného experimentálního vzorku.

Druhou skupinu tvořily tři vzorky, z nichž dva byly podrobeny vysychání při relativní vlhkosti okolního prostředí 70 %. Vzájemné srovnání kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání získané z experimentálních dat této skupiny vzorků je znázorněno na obrázcích 25 a 26. Způsob grafického zpracování je stejný jako v případě předešlé skupiny (RH 50 %). Získané vzájemné průběhy kinetiky obou procesů řízených vysycháním jsou velmi odlišné od těch, které byly získány pro vzorky první skupiny (RH 50 %) experimentální studie Troxell.

Body v grafech na obrázcích 23 až 26 znázorňují konkrétní hodnoty získané zpracováním experimentálních dat. Jedná se tedy částečně o body odpovídající přímo hod-



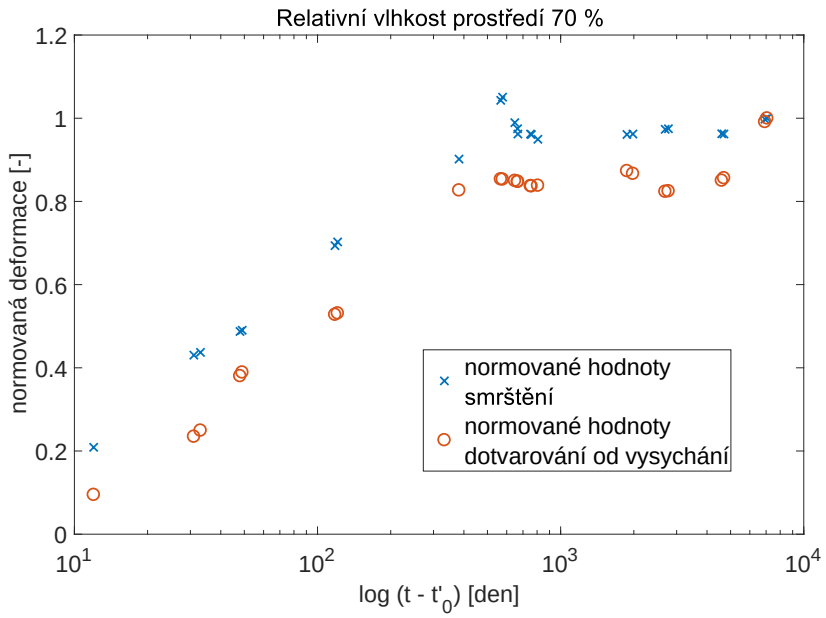
***Obrázek** 24: Srovnání kinetiky normovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání získaných zpracováním dat experimentální studie Troxell. Jedná se o vyhodnocení válcových vzorků (D = 44 mm) vysychajících při 50% relativní vlhkosti prostředí. Jako hodnoty poddajnosti při základním dotvarování (které jsou nutné pro určení dotvarování od vysychání) byla použita data vzorku vystaveného vlhkosti 99 %.*

notám uvedeným v databázi [4] a částečně o body dopočítané pomocí lineární interpolace. Křivka zakreslená v grafech na obrázcích 24 a 25 má sloužit pouze k názornější představě vzájemného srovnání hodnot smrštění a dotvarování od vysychání, její tvar nevychází ze vzájemného průběhu obou jevů uvažovaného konkrétní normou či modelem. Křivka byla vytvořena fitováním vynesených dat pomocí lineární regrese s různou váhou hodnot pro výpočet nejmenších čtverců a s využitím modelu polynomu 1. nebo 2. stupně. Stupeň polynomu byl zvolen v závislosti na kvalitě získané křivky.

4.3.2 Identifikace poločasu vysychání (Troxell)

Metoda nejmenších čtverců byla použita i při fitování dat smrštění. Tentokrát však šlo o nelineární čtverce a data byla prokládána předem definovaným tvarem funkce (61).

Fitování s cílem určení magnitudy smrštění a zejména poločasu vysychání bylo provedeno na dvou vzorcích, na kterých byly měřeny deformace od celkového smrštění. Autogenní smrštění bylo při zpracování dat zanedbáno, ostatně smrštění zapečetěných vzorků nebylo v rámci experimentální studie Troxell měřeno a nezatížené vzorky vystavené vysoké



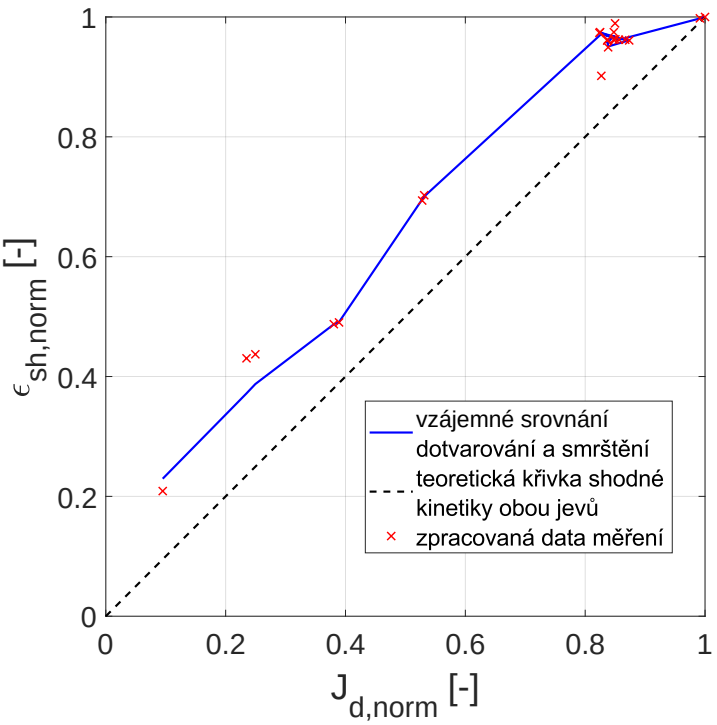
***Obrázek** 25: Srovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání u vzorků z experimentální studie Troxell. Průběhy jsou normovány k poslední hodnotě sledovaného období. Vysychání probíhalo při relativní vlhkosti okolního prostředí 70 %. Počátek vysychání i zatížení byl shodně ve stáří betonu 28 dní.*

relativní vlhkosti vykazovaly naopak nárůst velikosti (bobtnání).

Křivky získané fitováním jsou ukázány na obrázcích 27 a 28. U vzorku vysychajícího v prostředí o relativní vlhkosti 70 % (obrázek 27) se podařilo pomocí zvoleného tvaru funkce (61) dosáhnout dobrého proložení dat z experimentu. Získané hodnoty parametrů (konečná hodnota smrštění a poločas vysychání) jsou uvedeny i přímo v grafu, v závorce je uveden také rozptyl hodnot při dodržení 95% meze spolehlivosti výsledků. Hodnota charakteristického času procesu smršťování, tzv. poločasu vysychání, jehož určení bylo hlavním cílem fitování, byla pro relativní vlhkost prostředí 70 % u vzorku s náhradní tloušťkou průřezu $D = 2 \cdot V/S = 2 \cdot 22 = 44$ mm identifikována jako $\tau_{sh} = 157{,}7$ dne s možným rozptylem hodnot 132,4 až 183 dní.

U vzorku vysychajícího při 50% relativní vlhkosti prostředí se pro předpokládaný tvar funkce ve tvaru podle (61) nepodařilo získat stejně kvalitní výsledky jako v předešlém případě (u vzorku RH 70 %). Z proložení experimentálních dat křivkou v tomto tvaru byla identifikována hodnota poločasu vysychání $\tau_{sh} = 140{,}7$ dne s konfidenčním intervalem 76,3 až 205,2 dne.

Nižší kvalita fitování je zřejmá nejen z grafu na obrázku 28, ale i z výrazně většího rozptylu hodnoty charakteristického času smršťování. Ve snaze dosáhnout lepší kvality získaných výsledků bylo fitování prováděno i pro mírně pozměněný tvar funkce, kterou jsou data prokládána. Na obrázku 28 je přerušovanou čarou znázorněno alternativní fi-



***Obrázek** 26: Srovnání kinetiky normovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání získaných zpracováním dat experimentální studie Troxell. Jedná se o vyhodnocení vzorků vysychajících při 70% relativní vlhkosti prostředí, opět byl využit zatížený vzorek uchovávaný při 99% vlhkosti.*

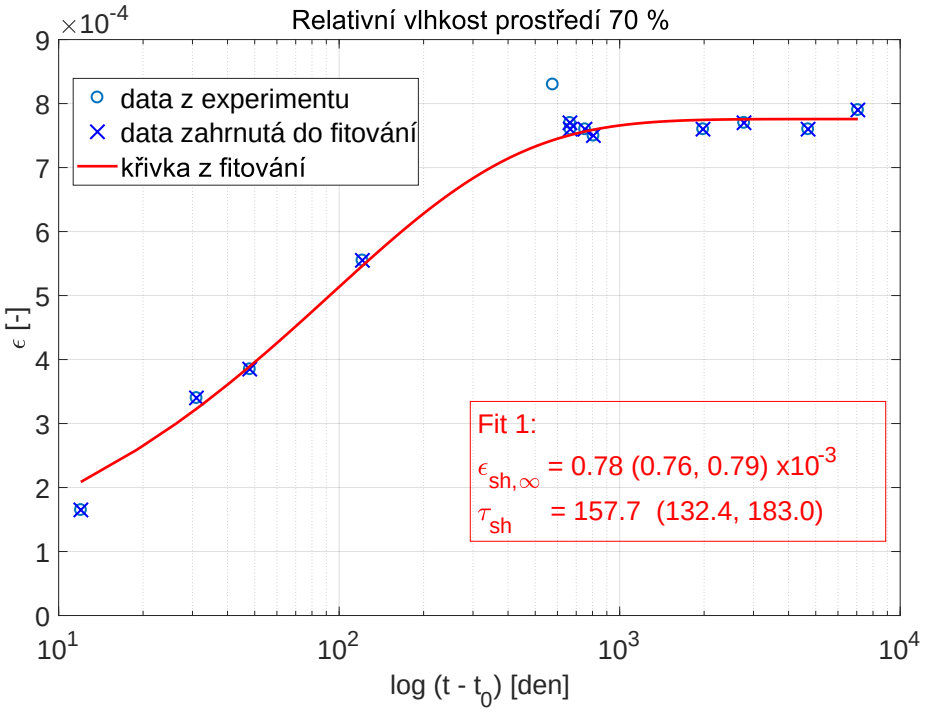
tování funkcí ve tvaru

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,\infty} \tanh\left(\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}\right)^{0.4}, \tag{62}$$

která se od předešlé funkce liší pouze mocninou výrazu uzavřeného v závorkách (u původní funkce byla mocnina 0,5). Tímto způsobem byla získána hodnota $\tau_{sh} = 216{,}3$ dne s rozptylem 96,3 až 336,3 dne. Nevýhodou alternativního fitování je nárůst nejistoty v určení hodnoty τ_{sh}.

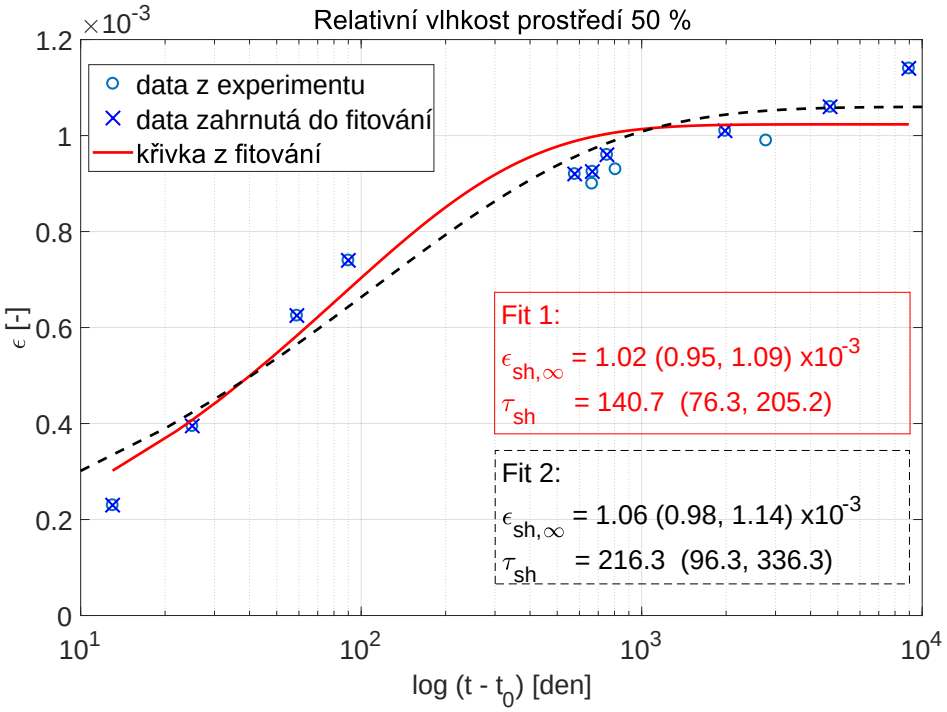
Je těžké rozhodnout, která ze získaných křivek lépe popisuje tvar průběhu smrštění. Bohužel ani v jednom případě nebyly získány výsledky v dostatečné kvalitě, spíše se zdá, že u tohoto vzorku by bylo potřeba použít pro fitování funkci v nějakém odlišném tvaru.

Srovnání výsledků obou fitování vzorku vysychajícího při vlhkosti prostředí 50 % potvrzuje oba problémy, které byly zmíněny v části 4.2. Doba trvání experimentu sice byla velmi dlouhá, přesto však naměřené hodnoty naznačují, že smršťování stále nedosáhlo konečné úrovně. Velikost parametru představujícího konečnou hodnotu smrštění ($\varepsilon_{sh,\infty}$) byla v obou případech fitování tohoto vzorku určena velmi podobnou hodnotou (bohužel obě proložené křivky předpokládají v čase poslední měřené hodnoty výrazně menší úroveň deformace, než jaká byla změřena), rozdíl mezi hodnotami $\varepsilon_{sh,\infty}$ pro oba případy fitování



***Obrázek** 27: Výsledky fitování hodnot smrštění vzorku vysychajícího při relativní vlhkosti prostředí 50 %. Plnou červenou čarou (Fit 1) jsou uvedeny výsledky pro předpokládaný tvar funkce podle (61), přerušovanou čarou (Fit 2) pro mírně upravený tvar funkce. Příslušné hodnoty hledaných parametrů jsou uvedeny včetně konfidenčních mezí.*

je v řádu jednotek procent. Ovšem získané hodnoty druhého parametru τ_{sh} se liší velmi výrazně. Mezi oběma způsoby fitování došlo k nárůstu identifikované hodnoty této veličiny o více než 50 %!



***Obrázek** 28: Výsledky fitování hodnot smrštění vzorku (válec, $D = 44$ mm) vysychajícího při relativní vlhkosti prostředí 50 %. Plnou červenou čarou (Fit 1) jsou uvedeny výsledky pro předpokládaný tvar funkce podle (61), přerušovanou čarou (Fit 2) pro lehce upravený tvar funkce. Příslušné hodnoty hledaných parametrů jsou uvedeny včetně konfidenčních mezí.*

4.4 Experimentální studie Bryant

Experimentální studie Bryant [26] byla původně zaměřena na výzkum dotvarování a smršťování u mostních konstrukcí větších rozpětí. Tvar a rozměry vzorků pro testování byly voleny s cílem co nejlépe reprezentovat tvary skutečných konstrukčních prvků.

V rámci výzkumu byly vyrobeny vzorky v několika různých velikostech, pro porovnání smršťování a dotvarování od vysychání v této práci byly vyhodnoceny jako vyhovující vzorky jediné velikosti, avšak z hlediska studie se jednalo o vzorky dvou typů. V obou případech to byly hranoly výšky 600 mm o průřezu 150 x 150 mm. Pouze u této velikosti byly v rámci studie sledovány deformace plně zapečetěných vzorků, proto vzorky ostatních velikostí bylo nutné vyřadit.

Jedna skupina vzorků, která měla reprezentovat konstrukční prvky typu pilíře či sloupů, měla zapečetěné jen oba konce a výměna vlhkosti s okolním prostředím probíhala na všech čtyřech stěnách. U těchto vzorků byl poměr objemu vůči povrchu s kontaktem se vzduchem (V/S) roven 37,5 mm, což znamená náhradní tloušťku průřezu $D = 75$ mm. Tuto skupinu označme jako „hranoly“.

Druhá skupina vzorků představovala model desky (stěny). Transport vlhkosti byl

umožněn pouze dvěma protilehlými stranami vzorků, zbylé dvě strany i oba konce byly před vysycháním chráněny pečetící fólií. Plocha v kontaktu s okolním prostředím byla ve srovnání se vzorky hranolů poloviční, tedy $V/S = 75$ mm a $D = 150$ mm.

Pro zapečetění byla použita hliníková fólie, bohužel v průběhu experimentu došlo u plně zapečetěných vzorků k porušení fólie, což se samozřejmě projevilo na jejich další deformaci. Tento fakt byl zjištěn až po zhruba třech a půl letech trvání experimentů. Zpětnou analýzou naměřených hodnot byl jako okamžik, kdy došlo ke ztrátě ochrany před vysycháním, označen den 522. Okamžik porušení ochranné fólie je v grafickém zobrazení experimentálně získaných dat dobře patrný, je signalizován výraznějším nárůstem deformací do té doby plně zapečetěných vzorků.

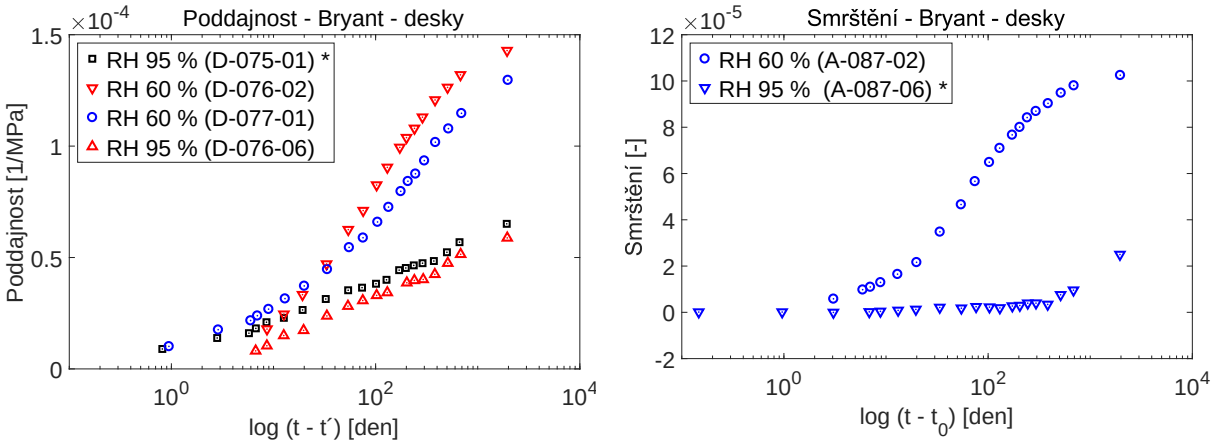
Všechny uvedené vzorky byly vytvořeny ze stejné receptury betonu: $w/c = 0{,}47$ (hodnota vodního součinitele), $a/c = 1{,}367$ (hmotnostní poměr kameniva a cementu) a $c = 390$ kg/m^3 (obsah cementu).

První dva dny byly vzorky ponechány v překližkových formách a ošetřovány standardním způsobem (zakrytí vlhkou tkaninou), dalších 6 dní po vyjmutí z forem byly ponechány při konstantní relativní vlhkosti 95 %. Poté (tedy ve stáří 8 dní) byla vlhkost snížena jednotně pro všechny vzorky na hodnotu 60 % (vzorky pro sledování autogenního smrštění a základního dotvarování byly chráněny zapečetěním).

V rámci experimentální studie Bryant byly testovány vzorky s různým časem počátku zatížení. S ohledem na společný počátek vysychání všech vzorků (8. den) byly pro tuto práci vhodné jako vzorky dotvarování pouze ty, u nichž bylo zatížení realizováno také ve stáří 8 dní. Všechny vzorky pro dotvarování byly namáhány konstantním tlakem 7 MPa.

První odečet hodnot deformací proběhl 8. den krátce po zatížení první části vzorků, avšak ještě před tím, než byla relativní vlhkost prostředí snížena na 60 %.

Podle údajů uvedených v článku [26], publikovaného k této studii, byly u každého ze dvou zmíněných typů vyrobeny vždy 3 vzorky pro dotvarování a 3 pro smrštění, k nim byly vytvořeny dvě trojice zapečetěných vzorků (3 zatížené a 3 bez zatížení). V databázi na Northwestern University [4] jsou k dispozici data z většího množství vzorků experimentální studie Bryant, potřebná kritéria pro využití v této práci však splňovala pouze malá část z nich. U hranolů to byly 3 vzorky pro dotvarování (2 vysychající a 1 zapečetěný) a 3 vzorky pro smrštění (všechny vysychající). U desek byly vyhodnoceny jako vyhovující 4 vzorky pro dotvarování (z toho 1 bez vysychání) a 2 vzorky pro smrštění (oba dle údajů v databázi vysychající, z vykreslení bylo zřejmé, že jeden ze vzorků byl zapečetěný).[16]



***Obrázek** 29: Data poddajnosti (levý graf) a smrštění (pravý graf) z měření na vzorcích, které představovaly model desky (D = 150 mm). Hvězdičkou jsou v legendách označeny vzorky, které byly v databázi chybně uvedeny jako vysychající. Nečekaný nárůst hodnot zapečetěných vzorků u několika posledních měření byl zaviněn porušením pečetící fólie. Později byly některé ze vzorků vyhodnoceny jako nevyhovující.*

4.4.1 Porovnání smrštění a dotvarování od vysychání (Bryant)

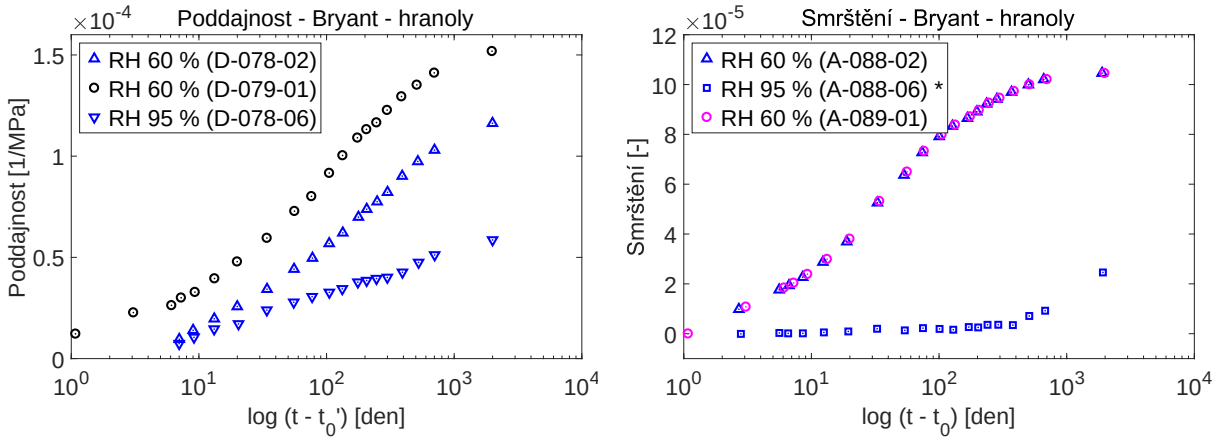
Pro ověření a vyhodnocení vzorků opravdu vhodných pro další zpracování bylo nutné na samém počátku opticky posoudit data všech vybraných vzorků. Na obrázcích 29 a 30 jsou vykresleny hodnoty poddajnosti a smrštění tak, jak jsou uvedeny přímo v databázi [4].

Jak již bylo zmíněno, v databázi jsou uvedeny hodnoty většího množství vzorků z experimentální studie Bryant, proto je pro přehlednost a možnost kontroly u každého vzorku v závorce uvedeno i jedinečné číslo, pod kterým je možné použitý vzorek ve volně přístupné databázi [4] dohledat. V některých případech bylo u vzorků uvedeno, že byly vystaveny vysychání, ačkoliv po vynesení dat bylo zřejmé, že se jednalo o vzorky zapečetěné. Tyto vzorky jsou vždy v legendě grafu označeny hvězdičkou.

Po vykreslení bylo dobře patrné, u kterých vzorků došlo k prokorodování pečetící fólie. Nejvíce byly ztrátou zapečetění znehodnoceny vzorky sledující smršťování bez možnosti výměny vlhkosti s okolím. Pro určení hodnoty smrštění od vlivu vysychání tak nemělo smysl tyto vzorky použít jako hodnoty autogenního smrštění. Z průběhu deformací před porušením fólie je zřejmé, že zanedbání autogenního smrštění v tomto případě nezpůsobí velkou nepřesnost. Pro vyhodnocení smrštění od vysychání proto byly použity přímo vzorky testované na celkové smrštění.

V případě zapečetěných vzorků pro měření základního dotvarování je porušení

[16] Údaje o počtu vhodných vzorků vycházejí pouze z vyhodnocení na základě informací uvedených v databázi experimentálních dat. Jak se později (během jejich zpracování) ukáže, bylo nutné některé vzorky vyřadit a počet skutečně vhodných vzorků z celého výzkumu Bryant se nakonec zredukoval na pouhých pět.



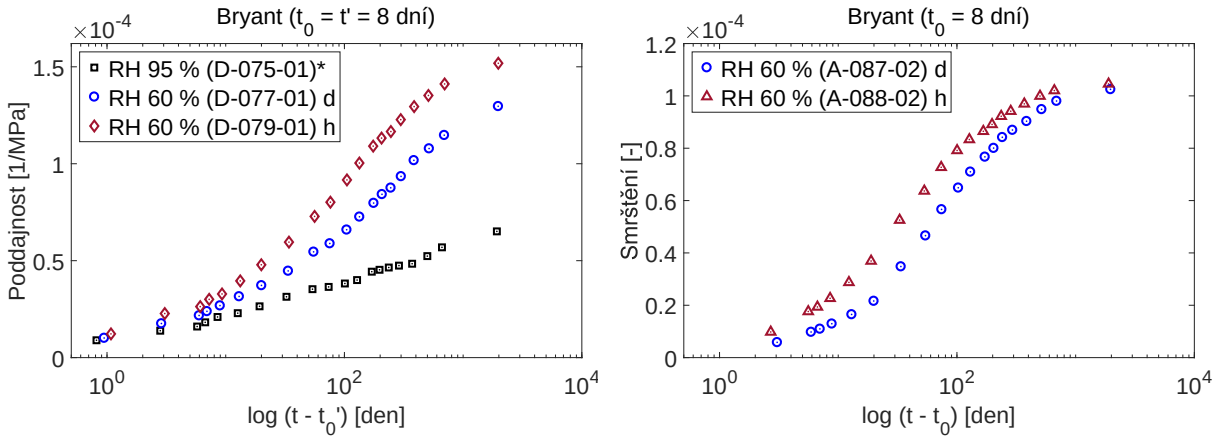
***Obrázek** 30: Data poddajnosti (levý graf) a smrštění (pravý graf) z měření na hranolech (D = 75 mm). Hvězdičkou jsou označeny vzorky, které byly v databázi chybně uvedeny jako vysychající. Nárůst hodnot zapečetěných vzorků byl zaviněn porušením pečetící fólie. Porovnáním s informacemi v článku [26] byly některé z těchto vzorků vyřazeny jako nevyhovující.*

pečetící fólie na grafu méně výrazné, nicméně je zřejmé, že hodnoty dotvarování od vysychání, pro jejichž určení je nutné poddajnost zapečetěných vzorků využít, budou tímto faktem ovlivněny. Pro delší doby zatížení nebudou k dispozici správné hodnoty poddajnosti od základního dotvarování. Rozdíl v nárůstu deformací vysychajícího a původně zapečetěného vzorku bude velmi malý, což zdánlivě sníží vliv dotvarování od vysychání. Experimentálně získané hodnoty nebyly upravovány, je proto potřeba přistupovat k následně získaným průběhům dotvarování od vysychání s určitým respektem a s vědomím této nepřesnosti.

Vizuální kontrolou dat vynesených do grafů na obrázcích 29 a 30 bylo zjištěno, že podle popisu experimentální studie v článku [26] odpovídají případu společného času zatížení a vysychání ve stáří betonu 8 dní pouze některé z uvedených vzorků. V případě desek byly pro další vyhodnocení vyřazeny dva vzorky D–076–02 a D–076–06 (oba vykresleny na obrázku 29 červenou barvou a tvarem trojúhelníčku), z hranolů potom vzorky D–078–02 a D–078–06 (modré trojúhelníčky). Zůstane tak jediný vysychající hranol, který ale lze pro určení dotvarování od vysychání doplnit zapečetěným vzorkem vedeným pod označením „deska“, jelikož se jedná o vzorky zcela stejných rozměrů. Všechny vyřazené vzorky odpovídají spíše skupině, která byla zatížena později než v okamžiku počátku vysychání, pravděpodobně po 6 dnech skladování při snížené relativní vlhkosti, tedy ve stáří betonu 14 dní.

U experimentálních dat smrštění byly vyřazeny všechny zapečetěné vzorky znehodnocené ztrátou ochrany (vliv autogenního smrštění je zanedbán). Na pravém grafu obrázku 30 jsou data vzorků označených A–088–02 a A–89–01, očividně se jedná o hodnoty určené z jednoho a téhož vzorku, pravděpodobně byla data vložena duplicitně ze dvou

různých zdrojů, ve kterých byly výsledky publikovány. Lze předpokládat, že v jednom případě se jedná o hodnoty dopočítané pro jiné časy, než ve kterých probíhalo skutečné měření. Pro srovnání kinetiky smršťování s kinetikou dotvarování od vysychání byl vybrán vzorek A–088–02, pro fitování průběhu smrštění byla využita data z obou vzorků uvedených v databázi, tedy i vzorek označený jako A–089–01.



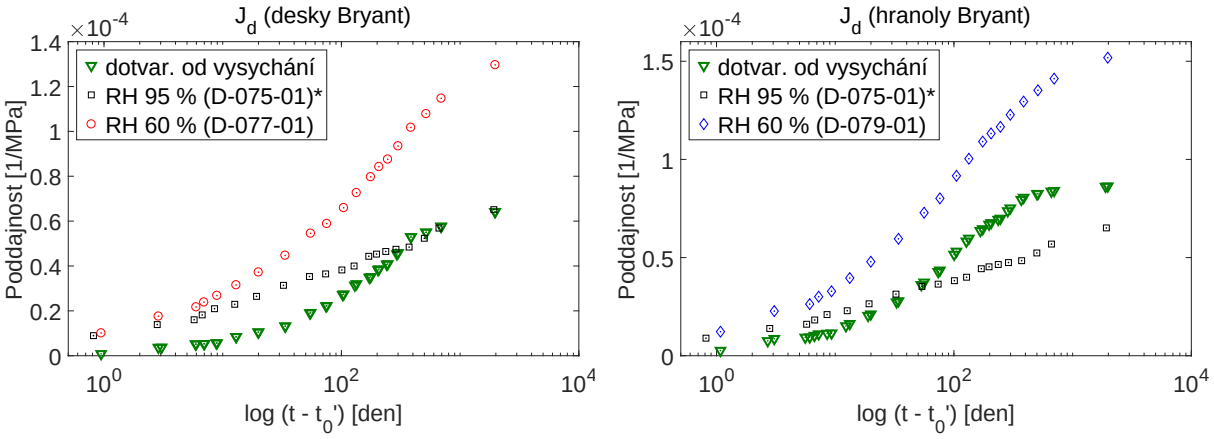
***Obrázek** 31: Vzorky pro další analýzu. Modře vykresleny desky (d), D = 150 mm, červeně hranoly (h), D = 75 mm. Vlevo jsou vzorky poddajnosti, ze kterých bude určen průběh dotvarování od vysychání, černým čtverečkem jsou vykresleny hodnoty společného vzorku představujícího poddajnost pro základní dotvarování. Pravý graf obsahuje data dvou vzorků celkového smrštění.*

Z konečného výběru vhodných vzorků (viz obrázek 31) je zřejmé, že pro každý z testovaných tvarů je k dispozici jedna skupina složená ze tří vzorků, na základě jejichž analýzy lze provést srovnání kinetiky smršťování a dotvarování od vysychání.

Z dat zatížených vzorků byl již standardním postupem určen průběh dotvarování od vysychání (jako rozdíl celkové poddajnosti a poddajnosti pro základní dotvarování). V grafu poddajností na obrázku 31 znázorňuje dotvarování od vysychání část mezi pomyslnou křivkou poddajnosti zapečetěného vzorku (D–079–01) a pomyslnou křivkou poddajnosti vysychajícího vzorku – tedy D-077-01 pro dotvarování od vysychání v případě desky a D–079–01 v případě hranolu.

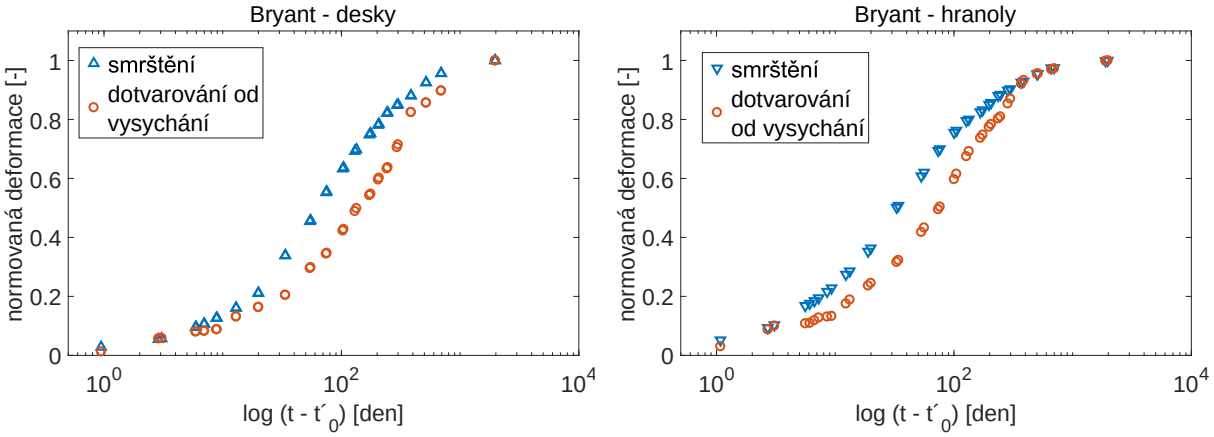
Pro názornost jsou na obrázku 32 vykresleny průběhy poddajností včetně vyhodnocených dat dotvarování od vysychání (J_d). Dojem dosažení konečných hodnot u dotvarování od vysychání je zesílen tím, že jako poddajnost od základního dotvarování jsou ve výpočtu použity vzorky, u nichž došlo v pozdější fázi experimentu k částečnému vysychání v důsledku porušení hliníkové fólie, kterou byly vzorky zapečetěny.

Při zpracování experimentálních dat byla opět použita lineární interpolace, nejprve pro sjednocení časů u vzorků poddajnosti (k vyhodnocení dotvarování od vysychání je nutné navzájem odčítat hodnoty zapečetěného a vysychajícího vzorku připadající shodným



***Obrázek** 32: Grafické znázornění dotvarování od vysychání (zelenou barvou) včetně vykreslení vzorků, které složily pro jeho určení. Vpravo pro vzorky představující model desky (D = 150 mm), vpravo pro hranoly (D = 75 mm). Několik posledních hodnot je částečně znehodnoceno porušením pečetící fólie kompletně zapečetěných vzorků.*

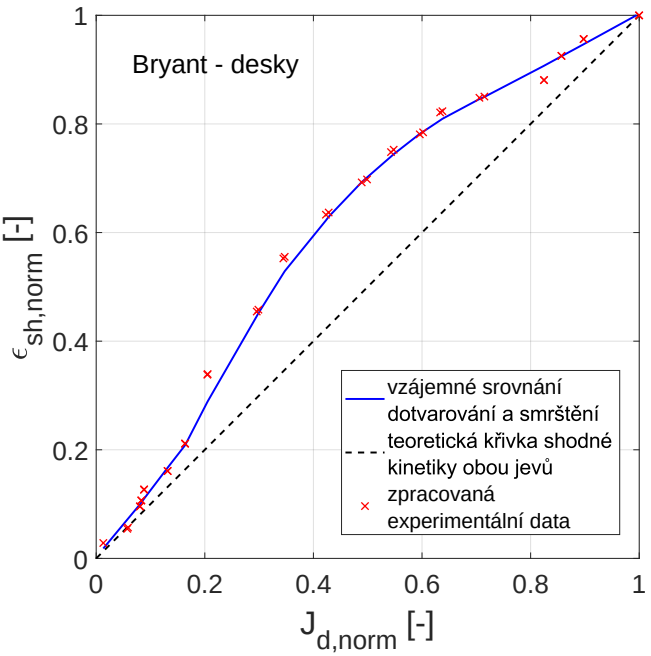
časovým okamžikům). Poté byla lineární interpolace použita pro vzájemné doplnění hodnot dotvarování od vysychání, aby mohly být proti sobě vyneseny hodnoty odpovídající stejnému stáří betonu.



***Obrázek** 33: Normované průběhy smrštění a dotvarování od vysychání získané na vzorcích z experimentální studie Bryant. Vlevo pro vzorky desek: D = 150 mm, vpravo pro hranoly: D = 75 mm.*

Vzhledem k dostatečné délce trvání všech vybraných experimentů z výzkumu Bryant (téměř 2 000 dní, tj. cca 5,5 roku) bylo normování obou výsledných průběhů provedeno k poslední hodnotě měření. Normované hodnoty smrštění a dotvarování od vysychání jsou společně vykresleny na obrázku 33.

Výsledky získané z obou skupin vzorků ukazují podobnou kinetiku procesů



***Obrázek** 34: Desky, D = 150 mm. porovnání kinetiky smrštění a dotvarování od vysychání pomocí vzájemného vynesení normovaných hodnot, kterých procesy dosáhly ve shodných časových okamžicích. Obě osy zobrazují normované hodnoty deformací, nikoliv hodnoty času.*

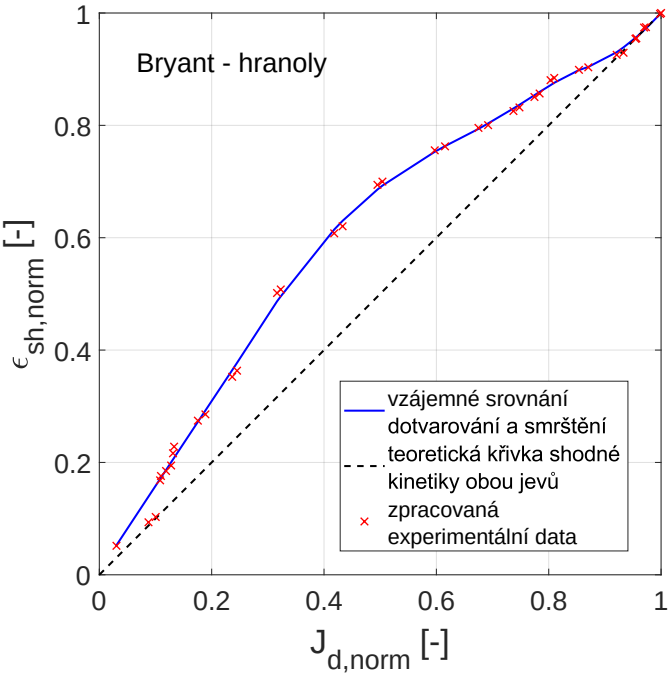
ovlivněných vysycháním betonových vzorků. V obou případech probíhalo rychleji smršťování, vliv vysychání na hodnoty dotvarování se projevoval (ve srovnání se smršťováním) trochu se zpožděním. Tento fakt je zřejmý i ze vzájemného porovnání nárůstu hodnot smrštění a dotvarování od vysychání, které je ukázáno na obrázcích 34 a 35.

4.4.2 Identifikace poločasu vysychání (Bryant)

Na obrázku 36 jsou znázorněny výsledky fitování vzorku představujícího model desky. Nejprve byla data proložena křivkou určenou funkcí (61), takto byla identifikována hodnota poločasu vysychání $\tau_{sh} = 242{,}7$ dne s rozsahem konfidenčního intervalu 174,5 až 311,0 dne.

Bohužel křivka ne zcela správně vystihla tvar průběhu smršťování. Ve snaze zlepšit kvalitu fitování byla data proložena ještě křivkou s lehce pozměněným tvarem funkce. Cílem bylo získat křivku s větším sklonem ve střední části, což lze nejvíce ovlivnit změnou mocniny výrazu v závorce ve vztahu (61). Pro alternativní fitování (v grafu vyznačeno přerušovanou čarou) byla použita hodnota mocniny 0,65. Funkce použitá pro fitování 2 (získaná drobnou úpravou vztahu (61)) měla tedy tvar

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,\infty} \tanh\left(\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}\right)^{0.65} . \tag{63}$$



***Obrázek** 35: Totéž srovnání jako na předchozím grafu, tentokrát pro hranoly, $D = 75$ mm. Proložení křivkou slouží pouze pro zvýraznění vzájemného porovnání průběhu smrštění a dotvarování od vysychání.*

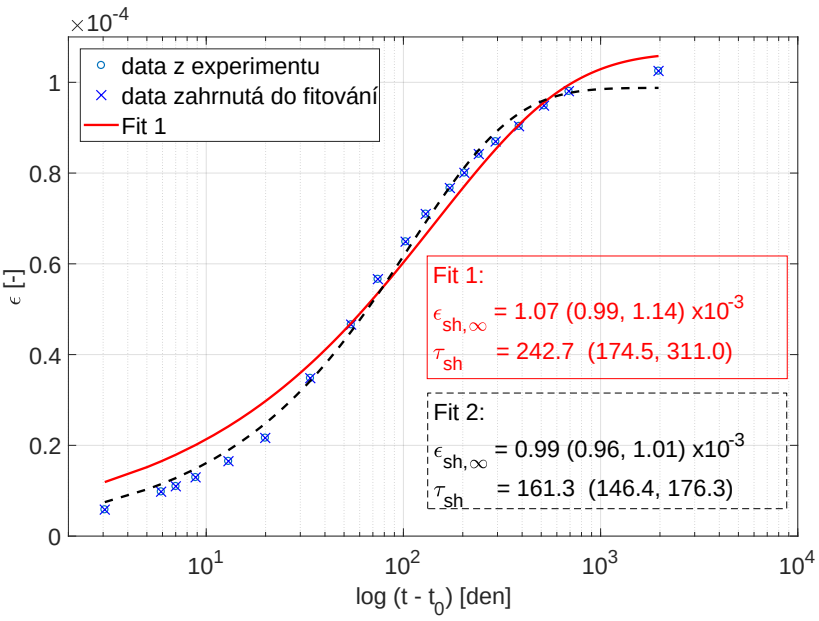
Alternativním fitováním byla získána hodnota poločasu vysychání s výrazně menším rozptylem: $\tau_{sh} = 161{,}3$ (146,4 – 176,3) dne. Nedostatkem druhého fitování je však mírné podcenění konečné hodnoty smrštění.

Pro fitování vzorku ve tvaru hranolu byly využity obě sady hodnot uvedených v databázi [4] pod samostatnými čísly A–088–02 a A–089–01. Fitování bylo opět provedeno pro dvě varianty zvoleného tvaru funkce. Proložením dat křivkou popsanou funkcí v „základním“ tvaru (61) byla získána hodnota charakteristického času smrštění $\tau_{sh} = 120{,}4$ dne s relativně malým rozsahem konfidenčního intervalu 107,4 až 133,3 dne.

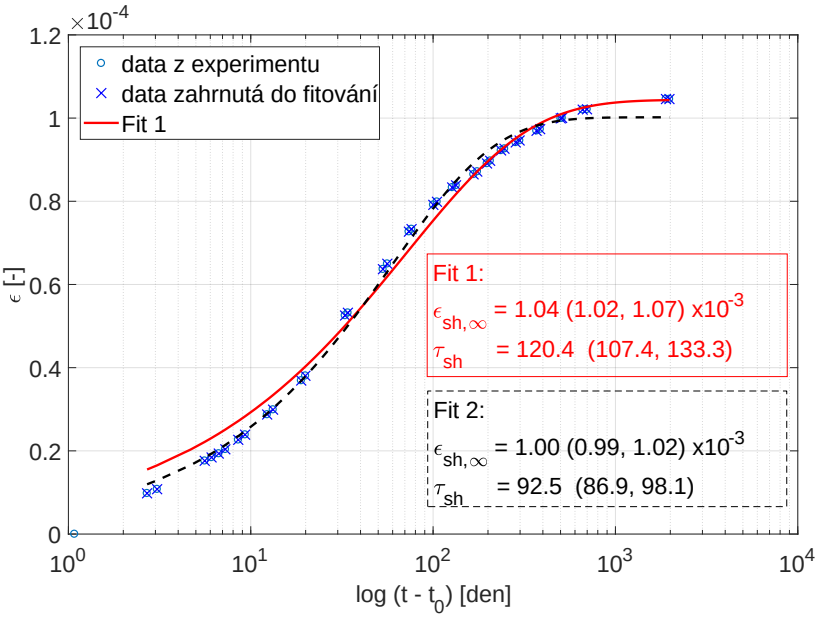
Získaná křivka velmi dobře vystihla zpomalení vývoje hodnot v závěrečné fázi, celkově však byl sklon křivky vyjadřující rychlost procesu smršťování o něco menší než ukazovala naměřená data.

Bylo provedeno ještě alternativní fitování křivkou s větším sklonem střední části. Tentokrát byla použita pro výraz v závorce mocnina 0,6 a výsledkem byla hodnota poločasu vysychání $\tau_{sh} = 92{,}5$ dne s rozptylem 86,9 až 98,1 dne.

Opět se ukazuje, že v závislosti na funkci použité pro fitování se identifikovaná hodnota charakteristického času smršťování může velmi výrazně měnit.



***Obrázek** 36: Fitování hodnot smrštění u vzorku představujícího desku, D = 150 mm, RH = 60 %. Výsledky získané při použití funkce ve tvaru (61) jsou znázorněny plnou červenou čarou (Fit 1), přerušovanou čarou (Fit 2) výsledky s použitím upraveného tvaru funkce (mocnina 0,65).*



***Obrázek** 37: Výsledky fitování hodnot smrštění hranolového vzorku, D = 75 mm, RH = 60 %. Plnou červenou čarou (Fit 1) jsou uvedeny výsledky pro předpokládaný tvar funkce podle (61), přerušovanou čarou (Fit 2) pro lehce upravený tvar funkce (mocnina 0,6). V rámečcích jsou hodnoty parametrů včetně konfidenčních mezí.*

5 Data z výpočtů metodou konečných prvků

V této části práce jsou uvedeny výsledky získané zpracováním již dříve provedených výpočtů pomocí metody konečných prvků publikované například v práci [6]. Tyto numerické simulace byly prováděny v programu OOFEM [5] s využitím materiálového modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí (Microprestress–Solidification Theory). [11]

Teorie solidifikace a mikropředpětí (MPS) představuje velmi sofistikovaný model, který je schopen popsat dotvarování a smršťování betonu na úrovni materiálového bodu. Z numerických výpočtů s využitím tohoto modelu je možné získat realistický průběh napětí a deformace, což dává výrazně lepší možnost detailně popsat chování betonu a postihnout případná rizika vzniku trhlin či jiného poškození, než je tomu v případě modelů pracujících s průměrnými hodnotami veličin na úrovni průřezu (modely B3, B4 apod.).

Jako vstupní hodnoty pro další zpracování sloužily výsledky simulací převzaté z [6]. Jednalo se o numerické výpočty smršťování, základního dotvarování a celkového dotvarování prvků, které byly zatíženy v okamžiku počátku vysychání, konkrétně hranolů a desek použitých v experimentální studii Bryant [26].

Pro oba typy vzorků (desky, hranoly) posuzovaných v části 4.4 byly v rámci této práce zpracovány a vyhodnoceny dvě skupiny výsledků - výsledky z numerické simulace s využitím původní verze modelu solidifikace a mikropředpětí a výsledky numerických výpočtů pro upravenou verzi modelu MPS. Přesné nastavení jednotlivých parametrů pro výpočet pomocí metody konečných prvků včetně detailního popisu obou modelů lze najít přímo v [6].

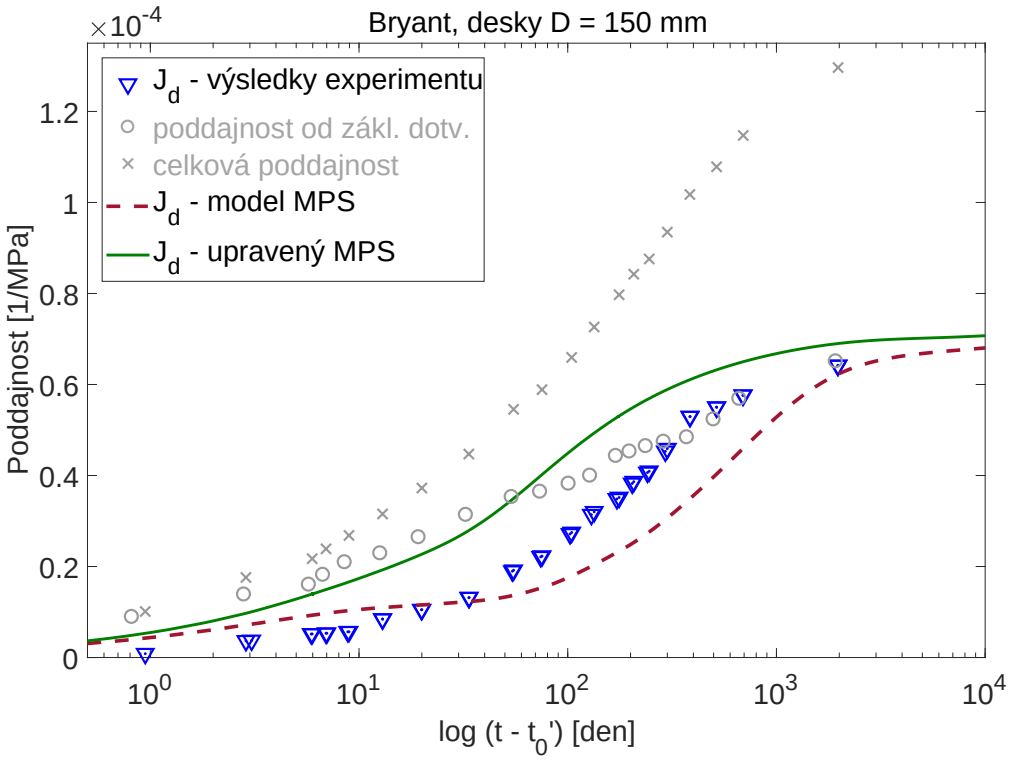
Z výsledků numerických simulací byly dopočítány konkrétní hodnoty smršťování a dotvarování od vysychání v závislosti na čase a následně byly porovnány s výsledky získanými analýzou experimentálních dat v části 4.4 této práce.

Parametry materiálového modelu pro výpočet pomocí metody konečných prvků byly v obou případech kalibrovány tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody pro vzorky rozdílné velikosti.[17] Nelze proto očekávat že výsledky numerických simulací budou odpovídat jedné konkrétní sadě měření, která byla vybrána pro určení dotvarování od vlivu vysychání.

Obrázek 38 ukazuje srovnání tří různých průběhů dotvarování od vysychání betonu pro model stěny. Jednotlivými body jsou vykresleny výsledky odpovídající skutečnému experimentu, plnou a přerušovanou čarou potom předpokládaný vývoj dotvarování od vysychání získaný z výpočtů s využitím modelu MPS [6]. Pro jistotu připomeňme, že pro delší časy je experimentálně zjištěný průběh částečně zkreslen absencí správných údajů o průběhu základního dotvarování.

Zcela analogické porovnání, tentokrát pro hranoly, je na obrázku 39. V tomto případě

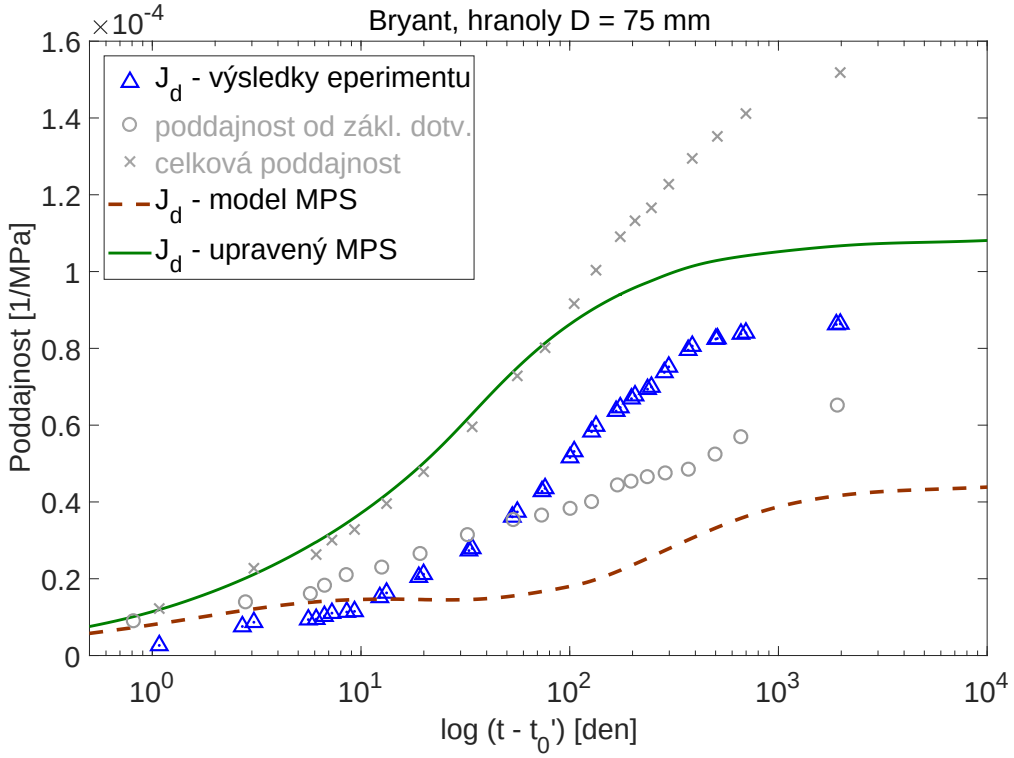
[17] Jak bylo zmíněno v části 4.4, v rámci experimentální studie Bryant bylo prováděno testování na vzorcích různých velikostí. Pro možnost přesného vyhodnocení dotvarování od vysychání mohly být pro tuto práci vybrány pouze vzorky té velikosti, u které byl k dispozici i vzorek stejných rozměrů, na kterém bylo sledováno základní dotvarování.



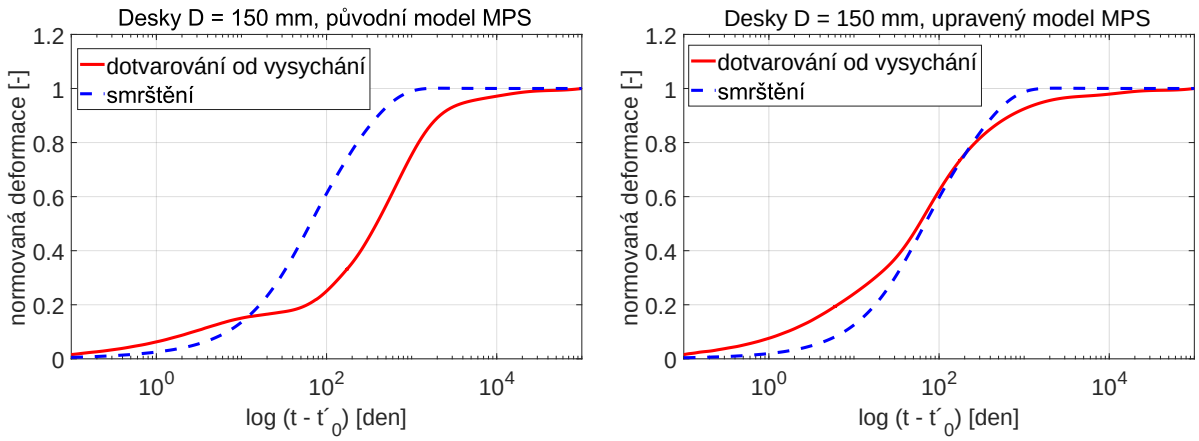
***Obrázek** 38: Porovnání predikce dotvarování od vysychání z numerických simulací s výsledky získanými analýzou experimentálních měření. Plnou čarou jsou zakresleny průběhy získané zpracováním převzatých dat z výpočtu s využitím původního modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS), výsledky pro upravenou verzi MPS jsou znázorněny přerušovanou čarou.*

je mezi jednotlivými průběhy výrazný rozdíl. Zejména předpověď podle původního modelu MPS velmi podhodnocuje dotvarování od vysychání. Upravený model sice předpokládá rychlejší kinetiku procesu dotvarování způsobeného vysycháním betonu (rychlost počátečního vývoje se téměř přesně shoduje s rychlostí vývoje celkové poddajnosti), avšak v určení konečné hodnoty se příliš nemýlí. Pokud si uvědomíme, že experimentálně zjištěný průběh dospěl v okamžiku, kdy došlo k porušení plně zapečetěných vzorků, jen ke zdánlivě konečné hodnotě (vliv této chyby je možné do určité míry odhadnout z vykreslení průběhu poddajnosti pro základní dotvarování), lze usuzovat, že konečná hodnota dotvarování od vysychání během experimentu by ve skutečnosti dosáhla téměř hodnoty získané predikcí upraveným modelem MPS.

Nakonec byly nově získané průběhy smršťování a dotvarování od vysychání porovnány grafickým vykreslením vzájemných poměrů (viz obrázky 41 a 43). Pro snadnější porovnání je v každém z těchto grafů vykreslen i přibližný průběh obou procesů během experimentu Bryant [26].



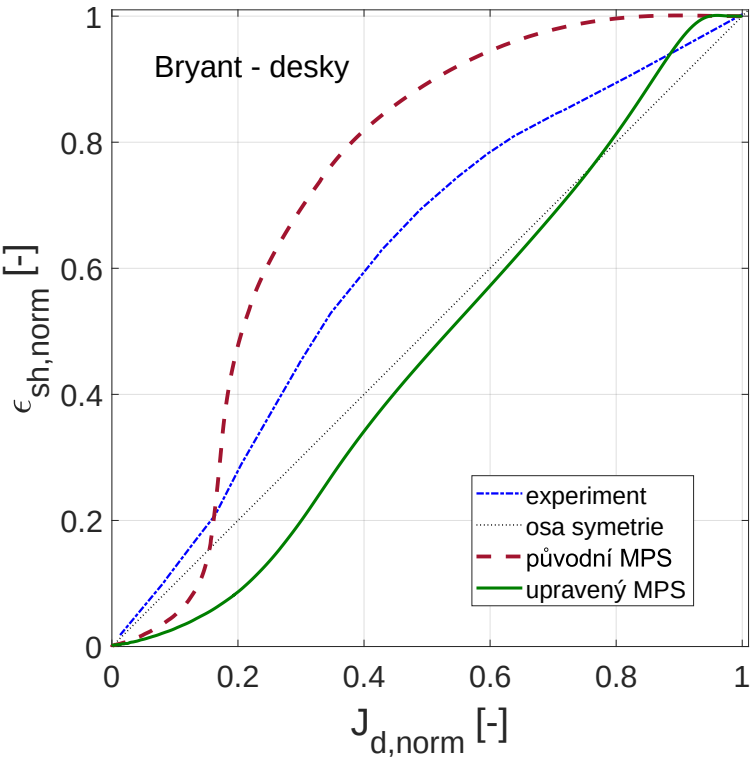
Obrázek *39: Porovnání výsledků numerického výpočtu dotvarování od vysychání s výsledky experimentu. Plnou čarou jsou zakresleny průběhy získané zpracováním dat z výpočtu s využitím původního modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS), výsledky pro upravenou verzi modelu MPS jsou znázorněny přerušovanou čarou.*



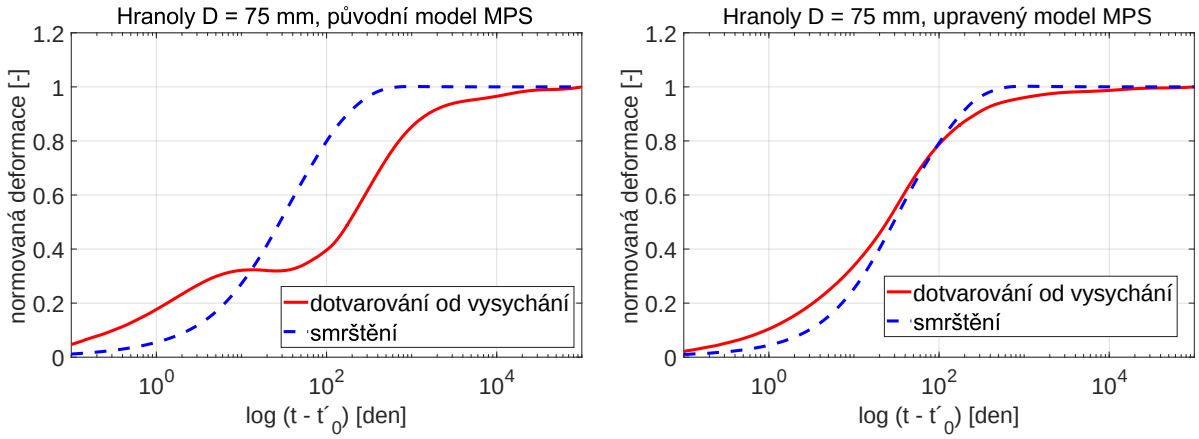
Obrázek *40: Vzájemné porovnání znormovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání získaných zpracováním dat z numerických simulací.*

Na první pohled je zřejmé, že původní model založený na teorii MPS předpokládá velmi výrazné rozdíly v kinetice obou procesů spojených s vysycháním betonu, což je ostatně stejně názorně vidět i ze vzájemného vykreslení normovaných průběhů smršťování a dotvarování od vysychání na obrázcích 40 (pro desky) a 42 (pro hranoly).

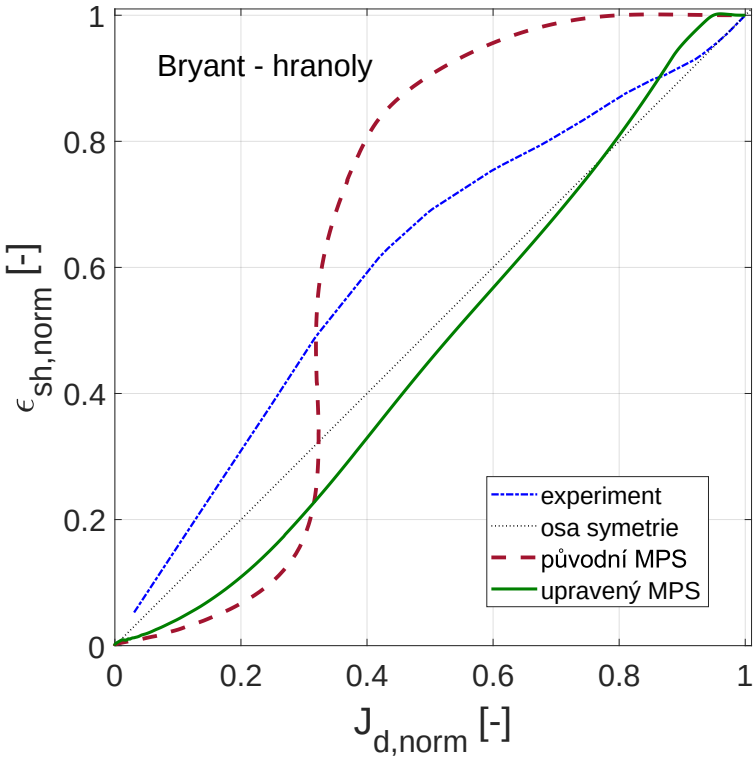
Naproti tomu upravená verze modelu MPS předpovídá velmi podobnou rychlost u průběhu smršťování i průběhu dotvarování od vlivu vysychání betonu.



***Obrázek** 41: Vzájemné porovnání hodnot smrštění a dotvarování od vysychání, které byly získány zpracováním dat z výpočtů metodou konečných prvků při použití modelů MPS. Pro srovnání je vykreslen i výsledek z analýzy dat z experimentu.*



***Obrázek** 42: Vzájemné porovnání znormovaných průběhů smrštění a dotvarování od vysychání získaných zpracováním dat z numerických simulací.*



***Obrázek** 43: Vzájemné porovnání hodnot smrštění a dotvarování od vysychání, které byly získány zpracováním dat z výpočtů metodou konečných prvků při použití modelů MPS. Pro srovnání je vykreslen i výsledek z analýzy dat z experimentu.*

6 Závěr

Cílem této práce bylo podat ucelený přehled o vzájemném časovém průběhu smršťování a dotvarování při vysychání betonu, poukázat na rozdíly mezi předpoklady norem, modelů pro popis dlouhodobého chování betonu a mezi skutečnými průběhy zjištěnými z dlouhodobých experimentů.

Z analýzy výpočetních modelů se však ukazuje, že mezi výsledky získanými postupem podle jednotlivých norem či modelů jsou nemalé rozdíly. Nejednotný je i způsob, jakým jsou přetvárné vlastnosti betonu vyjadřovány. Stále nejrozšířenější způsob výpočtu dotvarování pomocí veličiny zvané součinitel dotvarování, který je zakotven ve většině norem, s sebou přináší nemalé komplikace se správným určením adekvátního modulu pružnosti. Z něho bohužel následně plyne i hodnota okamžité pružné deformace, vůči níž je součinitel dotvarování vyjadřován. Jeho nepřesné určení se tedy negativně promítne do celého výpočtu dlouhodobých deformací od silového namáhání konstrukce.

Taktéž není v některých normách dodnes výpočetně odděleno základní dotvarování a dotvarování od vysychání (aktuálně platný Eurokód 2, americká norma ACI).

Vzájemná kinetika smršťování a dotvarování od vysychání betonu je v definovaných vztazích uvažována rozdílně, normy a modely pro predikci dlouhodobého přetváření betonu lze z tohoto hlediska rozdělit v zásadě do dvou skupin.

Modely B3, B4 a norma ACI předpokládají u smršťování mírně opožděný nástup, zato však celkově rychlejší průběh hlavní části oproti průběhu dotvarování od vysychání, u kterého se vliv změny vlhkosti v betonu projeví v podobě nárůstu hodnot o něco dříve. Vlastní proces je o něco pomalejší a konečné hodnoty dosáhne dotvarování od vysychání později než smrštění. (Pro názornější představu viz např. obrázek 15 zpracovaný pro normu ACI.) U této skupiny však vzájemná kinetika obou jevů není zásadně odlišná.

Druhou skupinu představují Eurokód 2 a *fib* Model Code 2010. Oba výpočty předpokládají výraznější rozdíly mezi průběhem smršťování a dotvarování od vysychání. Po celou dobu je průběh smrštění uvažován s určitým zpožděním za průběhem dotvarování.

V Eurokódu 2 pozorujeme určitou odlišnost od všech ostatních modelů. Zdá se, jako by výpočet obsažený v EC2 zohledňoval fakt, že dotvarování vzorků vysušených na nižší (ale konstantní) hodnotu relativní vlhkosti probíhá pomaleji, než dotvarování vzorků s vyšší relativní vlhkostí. Otázkou zůstává, zda to byl skutečně záměr při tvorbě této normy, jelikož je potom zcela nepochopitelné, proč právě tato norma neposkytuje přímý vztah pro výpočet dotvarování od vlivu vysychání.

Pro přesný popis časového vývoje a vzájemné interakce procesů dotvarování a smršťování spojených se snižováním vlhkosti betonového prvku je nutné mít k dispozici dostatek experimentů, které by byly jednak zaměřeny právě na tento aspekt, ale které by navíc trvaly dostatečně dlouho, až do dosažení konečných hodnot obou dějů. Většina dosavadních výzkumů byla zaměřena obecněji nebo na jiná specifika dotvarování. Jak se ukázalo při bližším prozkoumání databáze na Northwestern University [4] obsahující ob-

rovské množství naměřených hodnot dotvarování a smrštění, lze mezi experimenty najít jen malé množství takových, které by těmto potřebám odpovídaly. Bohužel i ty jsou často ovlivněny nějakým nedostatkem (krátkou dobou trvání, absencí dat z počátečního období, chybou během experimentu, nedostatečně popsaným průběhem experimentu apod.).

Mezi vybranými experimentálními výzkumy v tabulce 1 je jich několik, u kterých by bylo možné pokusit se získat další výsledky, bohužel však většina z těch, které v této práci nejsou zpracovány, byla po vynesení experimentálních dat do grafů shledána jako nevyhovující (například všechny výzkumy s kratší dobou trvání, u kterých je jasně zřetelné, že nebylo dosaženo konečných hodnot; experiment Brooks, kde v určité fázi dojde k nečekanému nárůstu základního dotvarování, atp.).

V rámci další práce by bylo vhodné detailně zpracovat data minimálně z dalších dvou experimentálních výzkumů (Russel a Shritharan), prvotní kontrola dat naznačuje, že nepůjde použít všechny zdánlivě vyhovující vzorky, nicméně je velmi pravděpodobné, že z každého z nich zůstane alespoň nějaká skupina pro konečné vyhodnocení průběhů smršťování a dotvarování od vysychání. U experimentální studie Keeton je v publikovaném článku [27] určitá nesrovnalost mezi uváděným hmotnostním zastoupením jednotlivých složek betonu a deklarovanou hodnotou vodního součinitele. Po dohledání a ověření správných údajů bude vhodné i tyto vzorky použít k podrobnému zpracování.

Důležitým výsledkem této práce je možnost srovnání vzájemných průběhů smršťování a dotvarování od vysychání betonu získaných analýzou experimentálních dat s tím, jak jsou uvažovány ve výpočtech podle norem a predikčních modelů. Na základě výsledků ze zpracovaných sad experimentálních vzorků se zdá, že ve skutečnosti probíhá kinetika jevů spojených s vysycháním betonu trochu odlišně, než jak je uvažována v normách i modelech. Experimenty většinou ukázaly, že snižování relativní vlhkosti vzorků se projevuje o něco rychleji nárůstem hodnot smrštění, zatímco hodnoty dotvarování reagují na vysychání vzorku až s určitým zpožděním. Vzájemný posun kinetiky není nijak zásadní, přesto je to opačný trend, než jaký jsme mohli vidět u první skupiny výpočetních modelů (B3, B4, ACI).

U Eurokódu 2 a *fib* Model Code 2010 je rozpor s výsledky experimentální analýzy ještě výraznější. V zásadě lze říci, že tyto dva modely předpokládají zcela opačný vzájemný vztah mezi kinetikou smršťování a dotvarování od vysychání betonu.

Pro ověření těchto domněnek by však bylo zapotřebí mít k dispozici větší množství vhodných a zejména kvalitně provedených experimentů.

Výsledky výpočtů [6] metodou konečných prvků, které byly dále zpracovány pro určení průběhu smrštění a dotvarování od vysychání, ukazují jiný předpoklad vývoje obou jevů při použití původního a upraveného modelu založeného na teorii solidifikace a mikropředpětí (MPS). I přes to, že parametry obou modelů byly nakalibrovány tak, aby co nejlépe vystihly chování prvků různých velikostí, lze konstatovat, že upravený model předpovídá průběh dotvarování od vysychání výrazně lépe, než model původní. Tento rozdíl je patrný zejména při posouzení konečné hodnoty dotvarování od vysychání

u hranolového vzorku, kde původní neupravený model velmi výrazně podcenil konečnou hodnotu tohoto děje zjištěnou při experimentu.

Původní model MPS navíc předpovídá neobvyklý časový vývoj dotvarování od vysychání. Po počátečním nárůstu hodnot dojde k výraznému zpomalení a po relativně krátké době probíhá nárůst dotvarování srovnatelnou rychlostí jako nárůst smrštění.

Upravený model vykazuje menší rozdíl v kinetice obou jevů a více se přibližuje chování betonových prvků při reálných experimentech. Oproti výsledkům získaným z experimentálních dat (kde se ukazuje určité opoždění průběhu dotvarování od vysychání za průběhem smršťování), předpovídá upravený model MPS naopak mírně rychlejší kinetiku u procesu dotvarování od vysychání.

Z poměrného přetvoření vzorků, na kterých bylo testováno celkové smrštění, byly určeny charakteristické časy smrštění τ_{sh}. (Samostatný průběh smrštění od vysychání nebylo možné získat kvůli chybějícím údajům o autogenním smrštění.) V následující tabulce 2 je uveden přehled poločasů vysychání (smrštění), které byly identifikovány fitováním experimentálních dat funkcí ve tvaru (61). V pravé části tabulky jsou pro tytéž vzorky uvedeny hodnoty τ_{sh} získané výpočtem podle vztahu (18) používaného v modelu B3. Uvedeny jsou i hodnoty parametrů vstupujících do výpočtu.

Mezi hodnotami získanými proložením experimentálních dat zvolenou funkcí a hodnotami určenými výpočtem není příliš dobrá shoda. Tomu ostatně nasvědčovaly i výsledky fitování, které vykazovaly nevyváženou závislost metody nejmenších čtverců na obou parametrech použitých ve fitovací funkci.

Fitování						Výpočet podle B3			
Experiment	RH	D	τ_{sh}	konfidenční meze		k_s	f_c	k_t	τ_{sh}
	[%]	[mm]	[dny]	[dny]			[Mpa]	[den/mm^2]	[dny]
Troxell 1	70	44	157,7	132,4	183,0	1,15	16,5	0,032	85,0
Troxell 2	50	44	140,7	76,3	205,2	1,2	16,5	0,032	85,0
Bryant (d)	60	150	242,7	174,5	311,0	1,0	50,1	0,027	608,7
Bryant (h)	60	75	120,4	107,4	133,3	1,3	50,1	0,027	237,7

***Tabulka** 2: Přehled hodnot charakteristického času smršťování získaných fitováním experimentálních dat (levá část) a hodnot určených výpočtem podle modelu B3 (pravá část).*

Časová funkce $S(t)$ (17) používaná v modelu B3 pro popis kinetiky smrštění v závislosti na velikosti a tvaru prvku a na tlakové pevnosti betonu se nezdá být zcela optimální. Při fitování skutečných průběhů smrštění bylo dosaženo lepších výsledků při použití jiné mocniny než je ve vztahu (17) použita.

Použitá literatura

[1] LI, Guang, BAŽANT, Zdeněk P. a YU Q. Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms. *Journal of Structural Engineering.* 06/2012, vol. 138, p. 676-686.

[2] *Wikipedia: the free encyclopedia.* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Koror%E2%80%93Babeldaob_Bridge>

[3] MAREK, L. a kol. Rekonstrukce mostu Pavla Wonky v Pardubicích *BETON Technologie - Konstrukce - Sanace.* 03/2007, roč. 7, s. 12-19. ISSN 1213-3116

[4] *NU Database of Laboratory Creep and Shrinkage Data.* [online]. US: Northwestern University, 2017. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <www.civil.northwestern.edu/people/bazant/CreepShrinkData_20170123GB.xlsx>

[5] PATZÁK, Bořek. *OOFEM: Object Oriented Finite Element Solver.* [online]. Praha: ČVUT, 2017 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.oofem.org/cz/oofem>

[6] HAVLÁSEK, Petr. *Creep and Shrinkage of Concrete Subjected to Variable Environmental Conditions.* Praha, 2014. Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze.

[7] BAŽANT, Zdeněk P. a BAWEJA S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. *Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage - Structural Design Effects.* 2000, p. 1–83.

[8] Doporučení pro navrhování, posuzování a sledování betonových mostů PK: technické podmínky : TP 144. Vyd. 2. revid a dopl. Praha: Ministerstvo dopravy, 2010.

[9] ČSN EN 1992 1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* Praha: Český normalizační institut, 2006.

[10] JIRÁSEK, Milan a ZEMAN, Jan. *Přetváření a porušování materiálů: dotvarování, plasticita, lom a poškození.* 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012. ISBN 978-80-01-05064-4.

[11] JIRÁSEK, Milan a HAVLÁSEK, Petr. Microprestress–solidification theory of concrete creep: Reformulation and improvement. *Cement and Concrete Research.* 06/2014, vol. 60, p. 51–52.

[12] NEVILLE, Adam M. *Properties of concrete. 5th edition* Harlow: Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.

[13] PICKET, Gerald. The effect of change in moisture-content on the creep of concrete under a sustained load. *Journal of the American Concrete Institute.* 1942, vol. 38, p. 333—355.

[14] VINKLER, Marek. Voda v betonu. *BETON Technologie - Konstrukce - Sanace.* 02/2018, roč. 18, s. 49-53. ISSN 1213-3116

[15] BAŽANT, Zdeněk P. a JIRÁSEK, Milan. *Creep and hygrothermal effects in concrete structures.* Dordrecht: Springer, 2018. ISBN 978-94-024-1136-2.

[16] KŘÍSTEK, Vladimír. Prof. Ing. Zdeněk P. Bažant, Ph.D., dr. h. c., oslavil 80. narozeniny. *BETON Technologie - Konstrukce - Sanace.* 06/2017, roč. 17, s. 85–87. ISSN 1213-3116

[17] BAŽANT, Zdeněk P., XI, Y. a BAWEJA, S. Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 7 – Short form of BP-KX model, statistics and extrapolation of short-time data. *Materials and Structures.* 1993, vol. 26, p. 567–574.

[18] RILEM Technical Committee TC-242-MDC (BAŽANT, Z. P., 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.* 2015, vol. 48, p. 753-–770.

[19] Fédération Internationale du Béton. Model Code 2010. *International Federation for Structural Concrete (fib).* 2012, vol. 65.

[20] CEB–FIP Model Code 1990. *CEB Bulletin d´Information.* Comité Euro-International du Béton (CEB), Lausanne, Switzerland. 1993, No. 213/214, p. 33–41.

[21] Structural Concrete–Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990. *fib Bulletin 2.* Federation Internationale du Beton (*fib*), Lausanne, Switzerland. 1999, vol. 2, p. 37–52.

[22] ACI 209.2R-08. *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete.* American Concrete Institute. 2008.

[23] ACI 209R-92 (Reapproved 1997). *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures.* American Concrete Institute. 1997.

[24] CHLEBOUN, Jan. Závislost metody nejmenších čtverců na parametrech funkce použité pro fitování. *Ústní a mailová komunikace.* České vysoké učení technické v Praze, 2018.

[25] TROXELL, G. E., RAPHAEL, J. E., DAVIS, R. W. Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete. *Proc. ASTM 58, USA*. 1958, p. 1101–1120.

[26] BRYANT, A. H., VADHANAVIKKIT, C. Creep, Shrinkage–Size, and Age at Loading Effects. *ACI Materials Journal.* 1987, vol. 84 (2), p. 117-123.

[27] KEETON, J. R. *Study of Creep in Concrete, Phase 1 (I-Beam).* U. S. Naval Civil Engineering Laboratory. Port Hueneme, California. 1965.