

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra mechaniky



**Modelování smrštění symetricky a nesymetricky
vysychajícího betonu**

**Modeling time-dependent deformations of concrete
members subjected to symmetric and asymmetric
drying**

SOUTĚŽ O CENU AKADEMIKA BAŽANTA

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

Konzultant: Ing. Petr Havlásek, Ph.D.

Bc. Pavel Horák
Praha 2020

Obsah

1	Úvod	2
2	Kalibrace a výpočty	3
2.1	Materiálové modely	3
2.2	Postup kalibrace	4
3	Výsledky a diskuze	5
4	Závěr	15

1 Úvod

V porovnání s kovy je beton charakteristické svým časově závislým chováním. Podle jeho příčiny můžeme deformace rozdělit do dvou skupin. V první skupině dochází k nárůstu deformace vlivem působící síly, která se ovšem projevuje až s časovým zpožděním. Tento jev nazýváme dotvarování a jeho hodnota roste v semilogaritmickém měřítku lineárně a nemá konečnou hodnotu. Druhou skupinu tvoří deformace nezávislé na napětí. Jejich původcem je pokles relativní vlhkosti v betonu a označujeme je jako smršťování. Dále do této skupiny patří teplotní roztažnost, ovšem teplota je zde po celou dobu uvažována jako konstantní. Právě na problematiku smršťování je cílena tato práce.

Některé konstrukce mohou být na vývoj dotvarování a smrštění velmi náchylné a je třeba se oprostit od návrhových norem a tyto jevy prozkoumat a popsat přesněji. Těmito konstrukcemi mohou být například velké výškové budovy, mosty velkých rozpětí, rámové konstrukce, přehrady, lité podlahy a podobně.

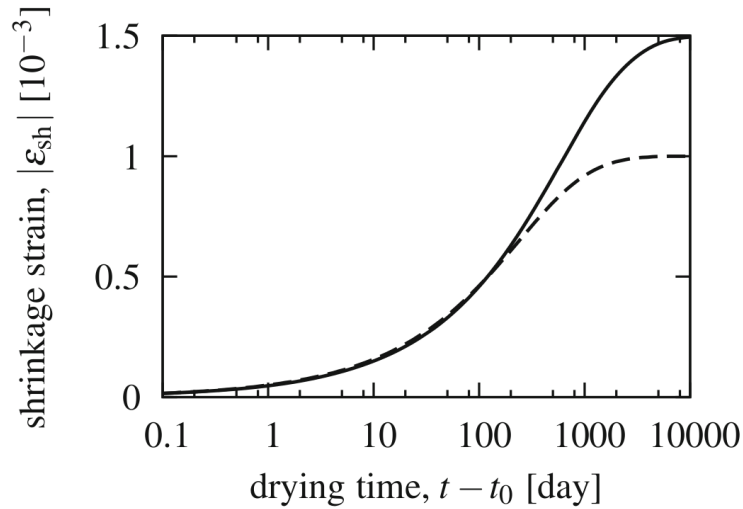
Prvním rizikovým faktorem je vznik trhlin, které umožní průsak vody nebo chloru a může mít tak velký dopad na funkčnost a životnost konstrukce. Dále může smrštěním dojít k přerozdělení vnitřních sil ve staticky neurčitých konstrukcích. V neposlední řadě je třeba upozornit i na jevy plynoucí z nerovnoměrného vysychání a tedy s možným nárůstem křivosti jako například praskání a zvedání průmyslových podlah.

Smrštění lze rozdělit na dvě hlavní složky a to autogenní a smršťování od vysychání. Autogenní smršťování hraje podstatnou roli zejména u betonu s nízkým vodním součinitelem, tedy často u vysokohodnotných betonů. Opomenout ho naopak můžeme při volbě vysokého vodního součinitele, tedy například u litých podlah a podobně. Jedná se v podstatě o smrštění zapečetěného vzorku. Jeho principem je rozdílný, respektive menší objem cementové pasty oproti původním složkám, tedy vodě a nezhydratovanému cementu. Tento jev se nazývá chemické smrštění, které se navenek projevuje méně výrazně i vzhledem ke zvětšování pórů uvnitř betonu. Makroskopicky ho označujeme jako autogenní smršťování.

Druhou složkou smršťování je smršťování od vysychání. Jeho podstatou je úbytek vlhkosti v betonu, kdy vzorek s vyšší relativní vlhkostí má i větší objem. Osove smrštění nabývá typicky hodnot 0,3 až $1,1 \times 10^{-3}$ [1].

Extrapolace smrštění vycházející z krátkodobých experimentů nemusí být vždy dostačující, jak je ukázáno na Obr. 1. Do chvíle, než se v logaritmickém měřítku začne snižovat rychlost smršťování, je predikce její konečné hodnoty spíše subjektivním odhadem [1]. Také se při kalibraci často vychází pouze ze základních makroskopických měření jako jsou osové smrštění nebo úbytek hmotnosti.

Cílem práce je kalibrace modelu pro smrštění na základě těchto měření a ověření jednoznačnosti získané sady parametrů. Ověřena je také kalibrace na základě více vzorků za odlišných podmínek pro vysychání. Výsledky jsou porovnávány pro predikci chování jednostranně vysychající desky poloviční tloušťky, která má stejnou efektivní tloušťku jako deska původní. Zde se také zřetelně projeví důležitost správné identifikace parametrů.



Obrázek 1: Příklad odlišného vývoje smrštění pro téměř identické počáteční hodnoty [1]

2 Kalibrace a výpočty

Pro výpočty a predikci chování byl použit konečněprvkový program OOFEM [2]. Ten používá pro problematiku transportu vlhkosti dva materiálové modely současně. První popisuje transport vlhkosti přes póry v betonu a druhý jeho mechanické chování. Referenční model je kalibrován na základě skutečného experimentu. Ostatní porovnávací simulace jsou vztaženy právě k tomuto modelu. Model pro mechaniku zůstává zachován a je prováděna identifikace parametrů pouze pro model transportu vlhkosti za různých podmínek. Měnit se může například velikost vzorku, stáří betonu při začátku vysychání, okolní vlhkost a podobně.

2.1 Materiálové modely

Pro popis transportu vlhkosti byl použit materiálový model Bažant-Najjar [3]. Sorpční izoterma, což je křivka vztahu mezi relativní vlhkostí v pórech betonu a hmotností této páry, je v tomto případě uvažována jako lineární. Model využívá vztah pro difuzivitu podle Bažanta a Najjara.

$$C(h) = C_1 \left(\alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right) \quad (1)$$

Parametr C_1 reprezentuje difuzivitu při plném nasycení. Parametr α_0 udává poměr mezi minimální a maximální difuzivitou, h_c je relativní vlhkost, které odpovídá střední hodnota difuzivity a n je bezrozměrný exponent.

K popisu mechanické části byl použit model MPS [4]. Tento model je založen na teorii

solidifikace a mikropředpětí [2] s uvážením stárnutí materiálu a zohledněním vlivu okolní vlhkosti a teploty na rychlost dotvarování. Je potlačen vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu dotvarování od vysychání s ohledem na [5], čehož je docíleno nastavením parametru $p = \infty$. Ke kalibraci základního dotvarování jsou použity parametry q_1 až q_4 obdobně jako v modelu B3. Tyto parametry mohou být také odhadnuty na základě složení betonu a válcové pevnosti betonu stáří 28 dní.

Parametr q_1 dává představu o asymptotickém modulu pružnosti, jelikož je jeho inverzí. Základní dotvarování popisují parametry q_2 , q_3 a q_4 . Chování materiálu je uvažováno jako lineárně viskoelastické bez možnosti vzniku trhlin.

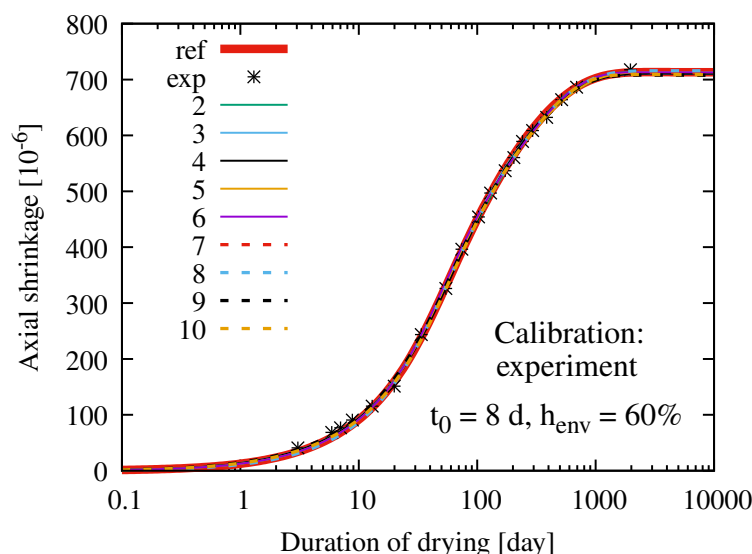
2.2 Postup kalibrace

Pro kalibraci byl vybrán experiment Bryant-Vadhanavikkit [6], který je velmi dobře popsán. Experimentální data, která byla použita pro prvotní kalibraci, popisují desku tloušťky 150 mm při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolního prostředí 60 %. Deska byla udržována vlhká po dobu 8 dní. Měřená data obsahují i vývoj dotvarování zapečetěného vzorku pro různá stáří betonu při vnesení zatížení. Dále obsahují vývoj smrštění částečně zapečetěného vzorku reprezentujícího nekonečnou desku. Hodnoty smrštění a dotvarování jsou zobrazeny v grafech v závislosti na stáří betonu v logaritmickém měřítku. Aby bylo zabráněno vysychání, byly vzorky zcela, nebo jen z části zapečetěny epoxidem a hliníkovou folií tloušťky 0,035 mm.

Kalibrace mechanické části, tedy základního dotvarování, byla provedena na zcela zapečetěném vzorku při zatěžovacím tlaku 7 MPa. Tím byla úloha mechaniky oddělena od problematiky vysychání. Nejlepší set parametrů byl sjednocen s výsledky z [7] s hodnotami $q_1 = 9 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, $q_2 = 75 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, $q_3 = 28 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ a $q_4 = 6,5 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$.

Pro správnou kalibraci problematiky transportu vlhkosti bylo nejprve nutné naměřit parametr k_{sh} , který propojuje vliv ztráty vlhkosti na velikost smrštění. Jeho hodnota byla určena jako 0,0019 a byla kalibrována podle konečné hodnoty smrštění. Ta je dosažena při srovnání relativní vlhkosti v pórech betonu s relativní vlhkostí okolního prostředí. Parametry funkce difuzivity byly kalibrovány automaticky za použití programu, který prošel všechny povolené kombinace parametrů a stanovil odchylku na základe normovaných rozdílů hodnot smrštění v předepsaných časech. Pro každý čas byl uvažován váhový součinitel podle délky intervalu v logaritmickém měřítku. Program dále seřadil kombinace parametru od nejlepší shody po nejhorší.

Následné kalibrace modelu vůči referenčnímu setu parametrů probíhaly pro velikost oboustranně vysychající desky od 75 do 300 mm. Predikce pro jednostranně vysychající desku byla brána vždy pro polovinu původní tloušťky symetricky vysychající desky. Stáří vzorku při začátku vysychání bylo uvažováno 8 nebo 28 dní, relativní vlhkost okolního prostředí 30 až 70 %. Válcová pevnost betonu při experimentu ve 28 dnech byla naměřena 50.1 MPa. To by nejspíše představovalo třídu betonu C 35/45.



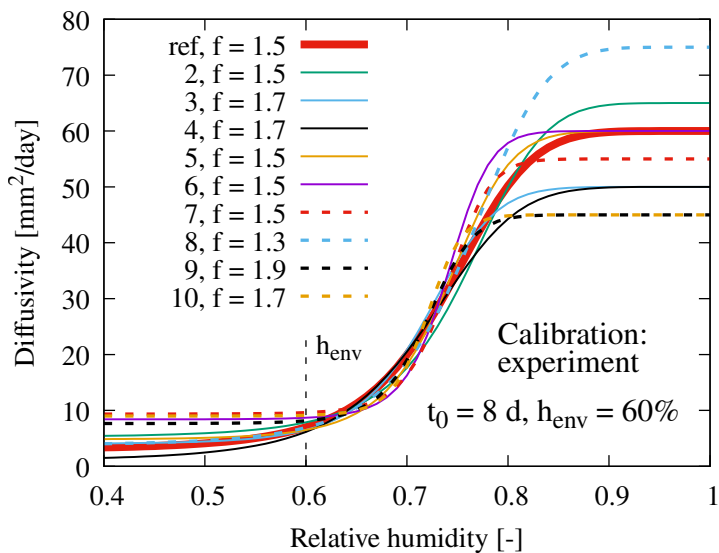
Obrázek 2: Nejlepší shoda pro smrštění vůči experimentu Bryant a Vadhanavikkit [6] na desce tloušťky 150 mm, $t_0 = 8$ dní, $h_{\text{env}} = 60\%$.

Predikce vývoje křivosti byly porovnávány s referenčním setem v 68 časových bodech a jejich rozdělení v logaritickém měřítku bylo až na úvodní fázi vysychání rovnoměrné. Váha odchylky ve srovnávacím čase byla přepočtena na součet polovin intervalů od předešlého po následující srovnávací bod a vydělena celkovou délkou vodorovné osy. Celkem byl výpočet proveden ve 284 časových krocích za použití 60 konečných prvků na vzorek shodně pro transport vlhkosti i pro úlohu mechaniky. Síť konečných prvků byla zahuštěna u vysychajícího okraje.

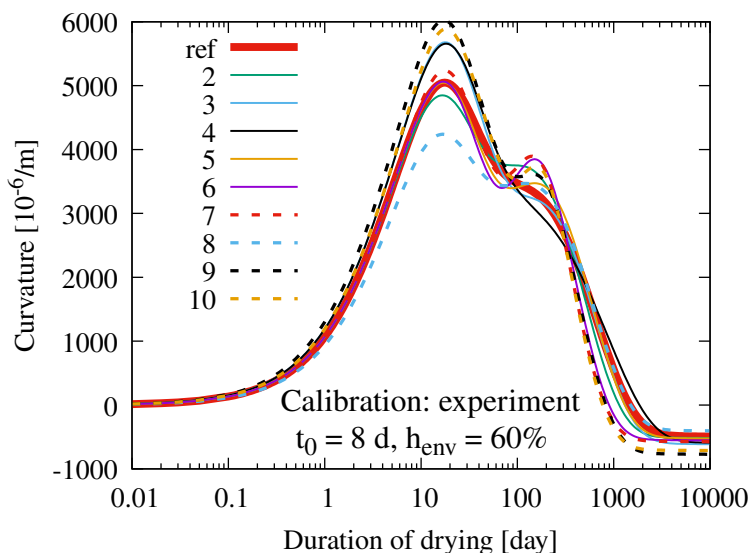
Identifikované parametry byly 4 pro funkci difuzivity a navíc ještě součinitel přestupu. Uvažované hodnoty parametrů při kalibracích jsou: permeabilita C_1 s hodnotami od 35 do 80×10^{-4} a krokem 5×10^{-4} $\text{kg m}^{-1}\text{den}^{-1}$, α_0 s hodnotami od $0,02$ do $0,23$ a krokem $0,3$ [-], h_c s hodnotami od $0,68$ do $0,80$ a krokem $0,02$ [-], n s hodnotami od 6 do 20 a krokem 2 [-] a součinitel přestupu vlhkosti do okolí f s hodnotami od $1,1$ do $2,3$ a krokem $0,2$ mm den^{-1} . Celkový počet uvažovaných kombinací je tak $31\,360$.

3 Výsledky a diskuze

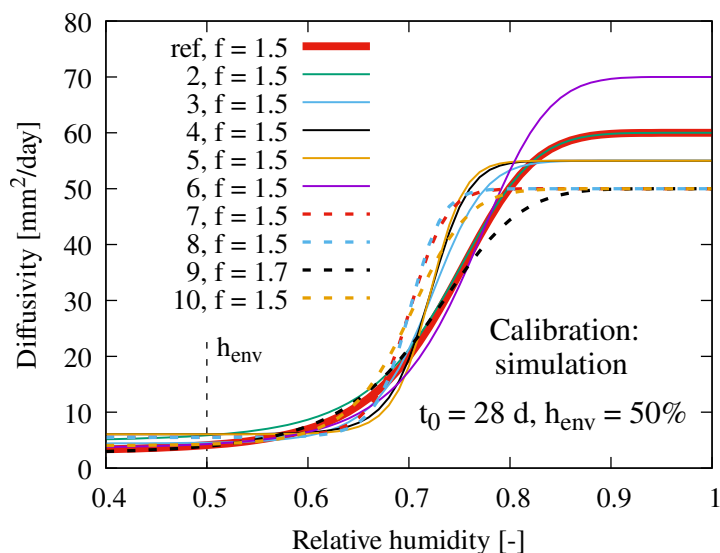
Nejlepší shoda pro smrštění experimentálního vzorku byla dosažena pro sadu parametrů $C_1 = 60 \times 10^{-4}$ $\text{kg m}^{-1}\text{den}^{-1}$, $\alpha_0 = 0,05$, $h_c = 0,74$, $n = 0,06$ a $f = 1,5$ mm den^{-1} . Tato sada byla pro další účely brána jako referenční a nahrazovala experimentální data, která bylo třeba takto doplnit i pro odlišné podmínky pro kalibrace. Na Obr. 2 je zobrazeno deset sad parametrů, které dávají s experimentem nejlepší shodu. Obr. 3 pak ukazuje průběh křivek difuzivity v závislosti na relativní vlhkosti. Pro kompletní celé identifikované sady je vždy v popisku křivky doplněna hodnota součinitele přestupu.



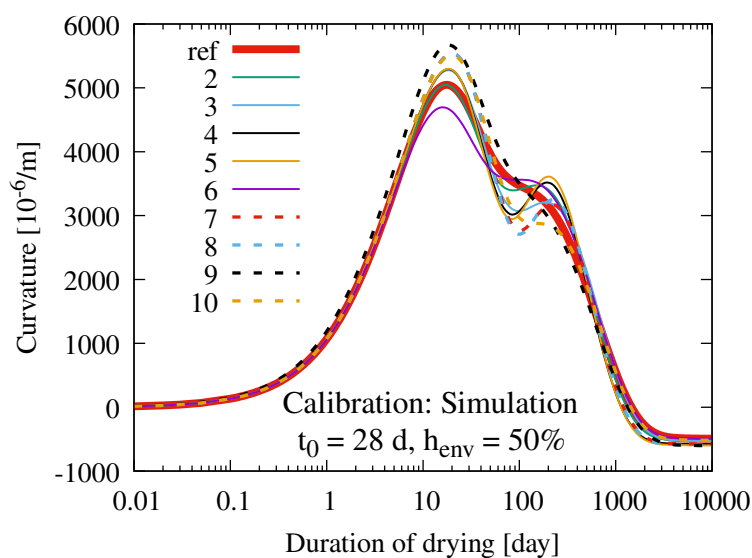
Obrázek 3: Závislost difuzivity na relativní vlhkosti pro 10 nejlepších shod podle Obr. 2. V popisku je doplněn součinitel přestupu f s jednotkami [mm/den].



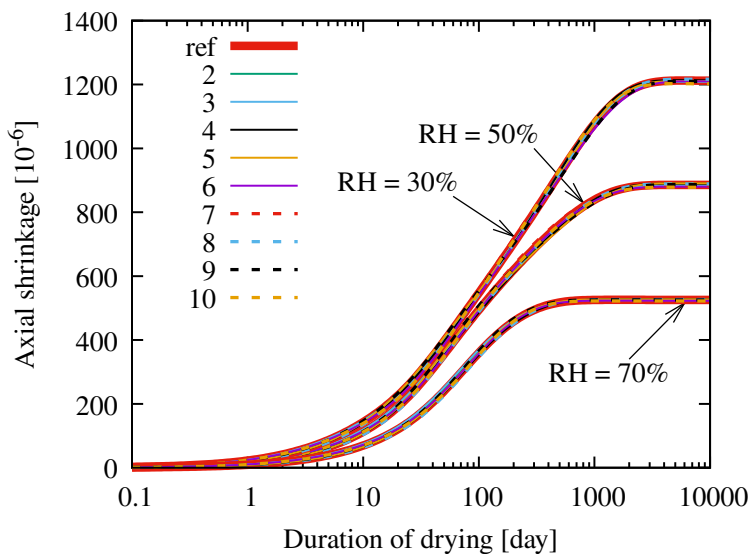
Obrázek 4: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 28$ dní. Typy čar a materiálové parametry korespondují s Obr. 2 a 3.



Obrázek 5: Funkce difuzivity, které dávají nejlepší shodu při simulaci osového smrštění symetricky vysychající desky ($D = 150 \text{ mm}$, $h_{\text{env}} = 50\%$, $t_0 = 28 \text{ dní}$) vůči referenční sadě parametrů.



Obrázek 6: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 28 \text{ dní}$. Typy čar a materiálové parametry korespondují s Obr. 5.



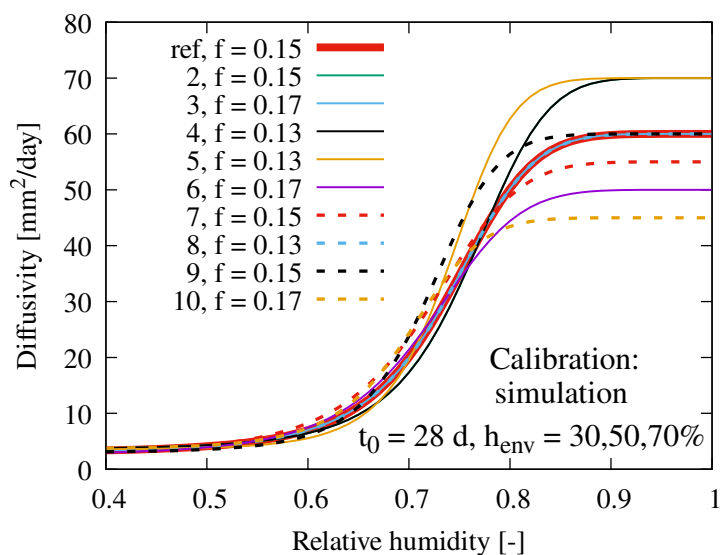
Obrázek 7: Nejlepší shoda pro osové smrštění vůči referenčnímu modelu pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí $h_{\text{env}} = 30, 50, 70\%$ ($D = 150 \text{ mm}$, $t_0 = 28 \text{ dní}$).

Dalším krokem je vytvoření predikce jednostranného vysychání na modelu desky poloviční tloušťky, tedy 75 mm pro každý identifikovaný set parametrů. Výsledkem modelování jednostranného vysychání by měla být predikce pro čas začátku vysychání $t_0 = 28 \text{ dní}$ a okolní relativní vlhkost $h_{\text{env}} = 50\%$. Tím jsou simulovány běžné laboratorní podmínky s uvažovanou konstantní teplotou. Při těchto podmínkách byla opět použita získaná sada parametrů jako referenční pro osové smrštění a vůči ní byly prováděny výpočty odchylky v chování a získání parametrů s nejlepší shodou.

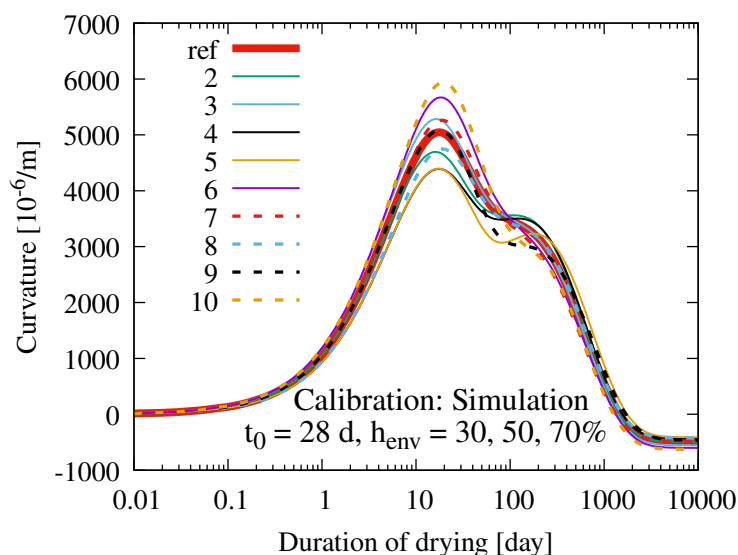
Parametry, které můžeme při vysychání experimentálně měřit, jsou ztráta hmotnosti a vývoj deformace. Jelikož pro ztrátu hmotnosti chyběla experimentální data a nebylo možné ji nijak kalibrovat, byla zvolena obvyklá hodnota koeficientu $k_{\text{kap}} = 100 \text{ kg/m}^3$, který udává sklon desorpční izotermy.

Znalost průběhu osového smrštění a současně ztráty hmotnosti zvýší rozptyl predikce. Grafy difuzivity jsou pro obě tyto kalibrace velmi podobné. V predikci vývoje křivosti dosahuje odchylka větších hodnot a pro většinu z 9 sad dostáváme nadhodnocenou maximální hodnotu vůči referenční sadě. Predikcí křivosti pouze podle vývoje smrštění dostaneme nejmenší rozptyl. Sama predikce podle vývoje hmotnosti, která byla pro referenční sadu parametrů také zaznamenávána, dává citelně větší rozptyl dat pro vývoj křivosti. Kombinací je dosaženo rozptylu, který leží mezi předchozíma dvěma.

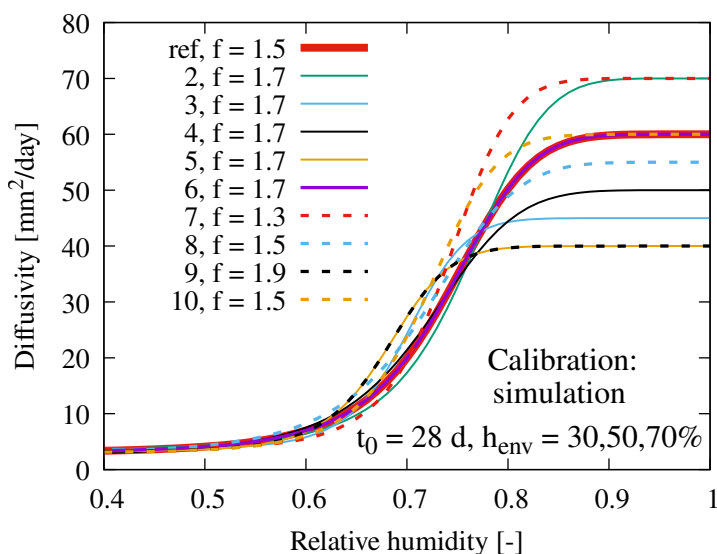
První dvě kalibrace na základě smrštění dosahují velmi dobré shody v jeho průběhu pro nejlepší sady parametrů. Co se týče predikovaného vývoje křivosti při $t_0 = 28 \text{ dní}$ a $h_{\text{env}} = 50\%$, odchylky jsou značné. Při kontrolní kalibraci vůči referenční sadě za podmínek podle experimentu, tedy $t_0 = 8 \text{ dní}$ a $h_{\text{env}} = 60\%$, byla dosažena lepší shoda pro vývoj křivosti. To dává jasný signál, že z kalibrace při odlišných podmínkách, případně kombinací více kalibrací, mohou vzejít přesnější data.



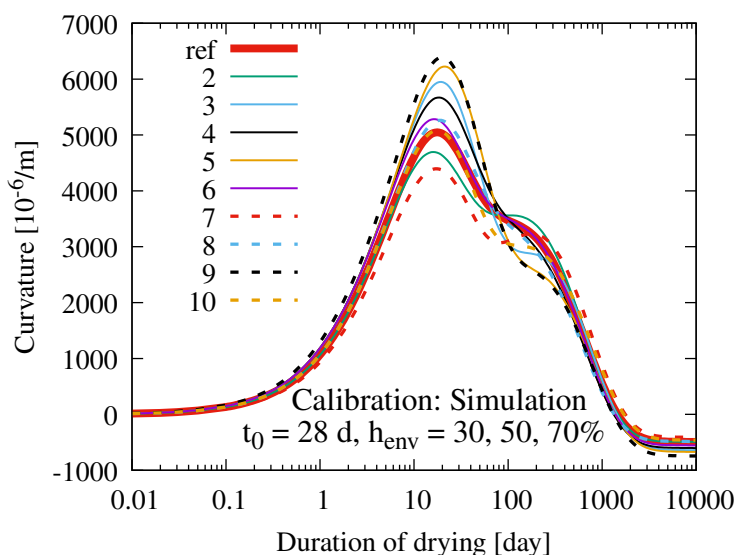
Obrázek 8: Funkce difuzivity, která dává nejlepší shodu při simulaci osového smrštění současně pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí, konkrétně $h_{env} = 30, 50, 70\%$, $D = 150$ mm, $t_0 = 28$ dní).



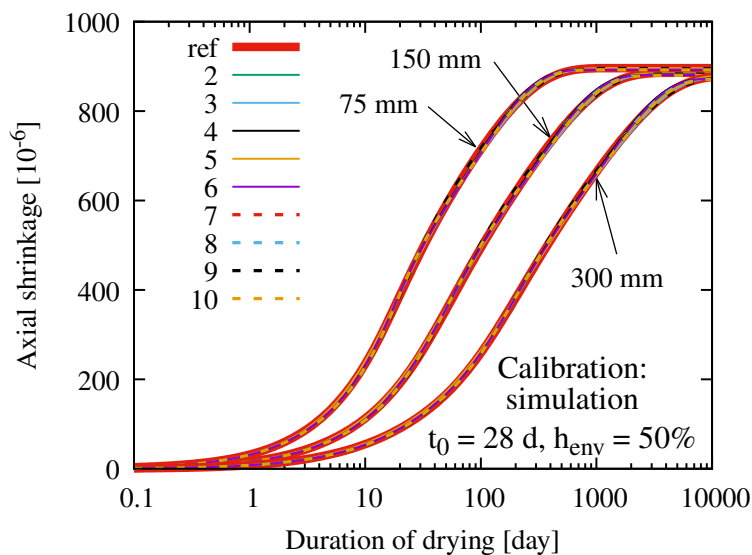
Obrázek 9: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{env} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 28$ dní. Typy čar a materiálové parametry korespondují s identifikací parametrů při 3 různých úrovních h_{env} (Obr. 7 a 8).



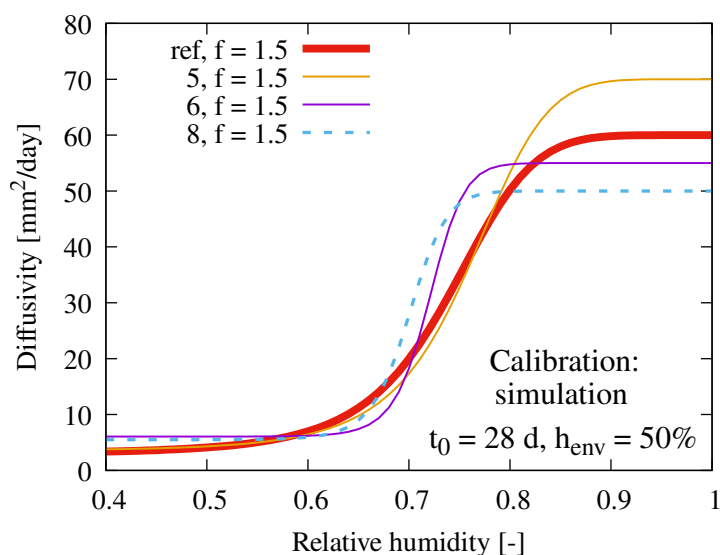
Obrázek 10: Funkce difuzivity, která dává nejlepší shodu při simulaci osového smrštění a zároveň **ztráty hmotnosti** současně pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí, konkrétně $h_{\text{env}} = 30, 50, 70\%$, $D = 150 \text{ mm}$, $t_0 = 28 \text{ dní}$).



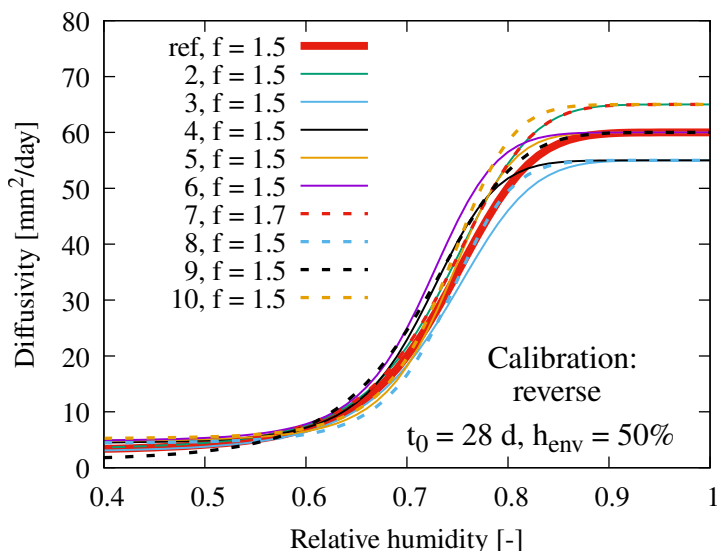
Obrázek 11: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 28 \text{ dní}$. Identifikace byla provedena na základě vývoje smrštění a **ztráty hmotnosti** pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí h_{env} (Obr. 10).



Obrázek 12: Nejlepší shoda pro osové smrštění vůči referenčnímu modelu pro symetricky vysychající desky tloušťky 75 mm, 150 mm a 300 mm při $h_{\text{env}} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dní.



Obrázek 13: Funkce difuzivity, která dává nejlepší shodu při simulaci osového smrštění symetricky vysychajících desek různé tloušťky ($h_{\text{env}} = 50\%$, $t_0 = 28$ dní, Obr. 12). Vykresleny jsou pouze nejvíce odlišné křivky.



Obrázek 14: Funkce difuzivity, které byly kalibrovány *inverzně* a dávají nejlepší shodu pro vývoj křivosti 75 mm tlusté desky jednostranně vysychající ($h_{\text{env}} = 50\%$, $t_0 = 28$ dní) získané ze simulace s referenční sadou parametrů.

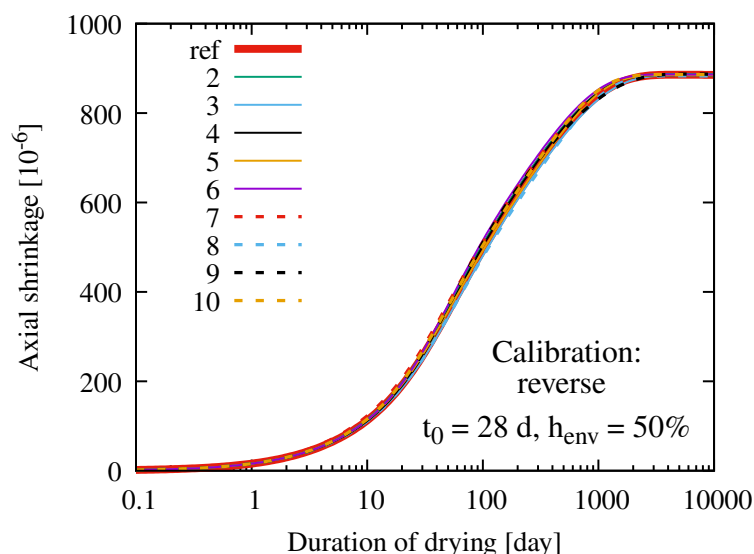
Zde se ukazuje, že identifikace jedné nejlepší sady parametrů za současných podmínek musí vycházet z kombinace výsledku z více kalibrací. Situace by se mohla změnit pokud bychom měli k dispozici další data jako například vývoj vlhkosti v určitých bodech průřezu, nicméně toto není předmětem této práce. Jako první byl prozkoumán vliv vlhkosti okolního prostředí na přesnost kalibrace. Výsledné nejlepší sady parametrů dávají celkově velmi dobrou shodu smrštění současně pro 30 %, referenčních 50 % a 70 %. Jak je vidět na Obr. 9, výsledné křivky mají nižší celkovou odchylku od referenčního řešení oproti předchozím grafům.

Je zde opět pro porovnání zohledněn i vliv kalibrace na základě průběhu smrštění a současně úbytku hmotnosti. Výsledná predikce je zobrazena na Obr. 11. Predikci vycházející pouze ze znalosti osového smrštění je dosaženo lepší shody s referenčními hodnotami.

Další, co můžeme při kalibraci měnit, je velikost vzorku. Proto byla opět provedena kalibrace pro tři různé velikosti vzorků současně. Pro referenční 150 mm tlustou desku tak byly přidány desky tloušťky 75 a 300 mm. Porovnávaná hodnota byla pouze osově smrštění. Nejlepší sady vzorků velikosti 75 a 150 mm byly velmi podobné, zatímco pro vzorek desky tloušťky 300 mm se lišily.

Dále je provedeno ověření pomocí reverzní kalibrace, totiž jestli nejlepší sady při kalibraci podle vývoje křivosti dají dobrou shodu i pro vývoj osového smrštění a úbytek hmotnosti. Jak je vidět na Obr. 15, je pro vývoj smrštění (i úbytek hmotnosti) dosaženo velmi dobré shody. Funkce difuzivity se od předchozích liší a dávají lepší shodu s referenční sadou, jak je patrné z Obr. 14.

Výše zmíněné grafy vývoje křivosti ukazují, že se zde objevuje jistý neintuitivní jev.



Obrázek 15: Predikce vývoje osového smrštění 150 mm tlusté desky vysychající symetricky při $h_{\text{env}} = 50\%$. Parametry byly kalibrovány **inverzně** na základě vývoje křivosti pro 75 mm tlustou desku jednostranně vysychající.

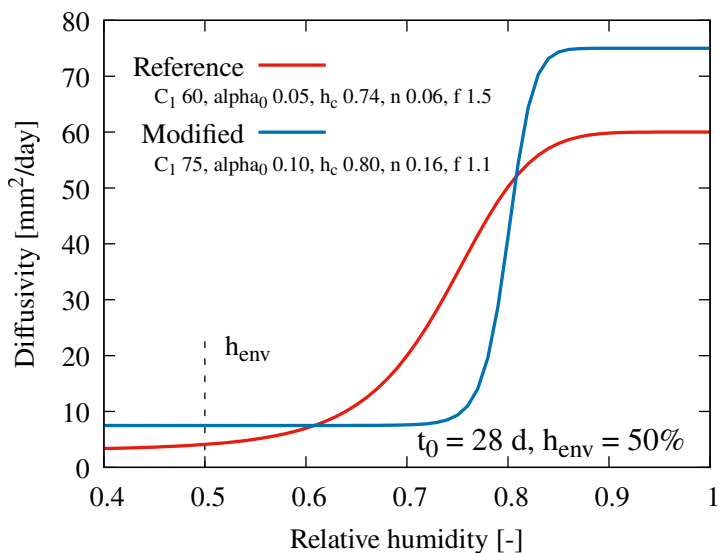
Průběh křivosti u některých grafů obsahuje 2 maxima. Pro lepší pochopení tohoto jevu byl vybrán set, který má druhý extrém křivosti větší než ten první, což je vidět na Obr. 17. Parametry takto zvoleného setu pro model Bažant-Najjar jsou $C_1 = 75 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{ den}^{-1}$, $\alpha_0 = 0,10$, $h_c = 0,80$, $n = 16$ a $f = 1,1 \text{ mm den}^{-1}$.

Co se ve vzorku děje napovídá graf difuzivity, ze kterého je patrné, že její hodnota má v závislosti na relativní vlhkosti velmi razantní nárůst, respektive pokles, při relativní vlhkosti kolem 80 %. Pokud bychom uvažovali difuzivitu téměř nezávislou na relativní vlhkosti, graf vývoje smrštění by byl bez jakéhokoliv náznaku vzniku druhého extrému.

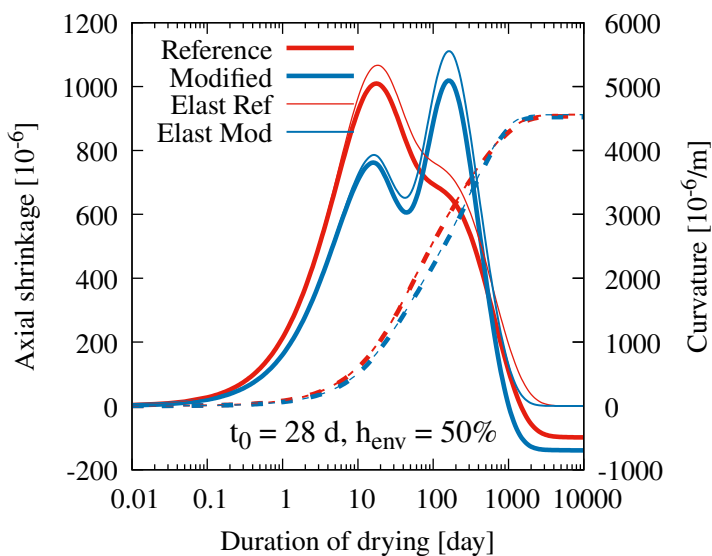
Při změně materiálu na lineárně elastický, vznik druhého extrému přetrvává, jen se finální křivost vrátí zpět na nulovou hodnotu. Konečná hodnota křivosti je záporná díky vzniku plastických deformací nebo trhlin u vysychajícího povrchu. U použitého lineárně viskoelastického modelu je zbytková deformace způsobena pouze plastickými deformacemi.

Z grafu níže je patrné rozložení vlhkosti po průřezu v průběhu času. Na Obr. 18 je vidět rozložení vlhkosti v čase napříč vzorkem. Křivky jsou vykresleny nejdříve pro čas vzniku prvního maxima ve vývoji křivosti v čase vysychání přibližně 10 dní, následuje čas 50 dní a lokální minimum křivosti. Další křivka prezentuje rozložení vlhkosti po průřezu přibližně při druhém extrému vývoje křivosti. Další křivky pouze znázorňují srovnávání vlhkosti vzorku s vlhkostí okolního prostředí.

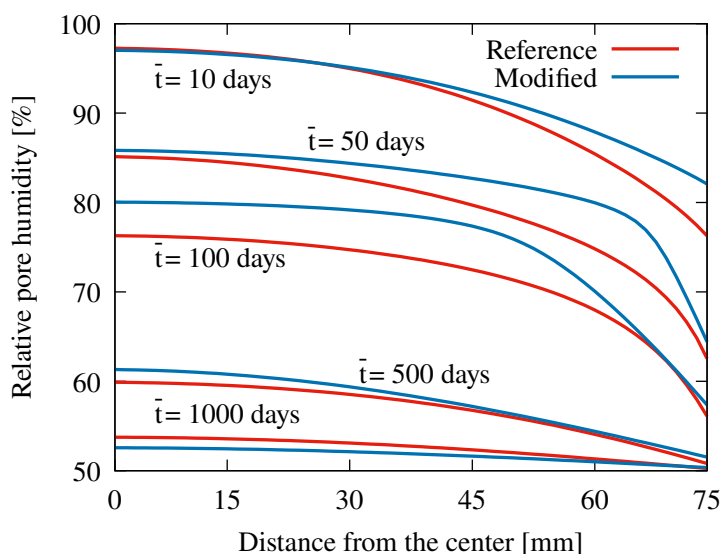
Při dosažení relativní vlhkosti v betonu okolo 80 %, dojde k výraznému poklesu difuzivity. Z tohoto důvodu se začne vlhkost napříč vzorkem vyrovnávat a tím je dosaženo lokálního minima mezi extrémy ve vývoji křivosti.



Obrázek 16: Funkce difuzivity pro “referenční” a “modifikovaný” set parametrů.



Obrázek 17: Vývoj osového smrštění a křivosti získaný pro funkce difuzivity “referenčního” a “modifikovaného” setu parametrů, (Obr. 16) $D = 150$ mm, $t_0 = 28$ dní a $h_{env} = 50\%$. Tenké čáry znázorňují chování elastického materiálu.

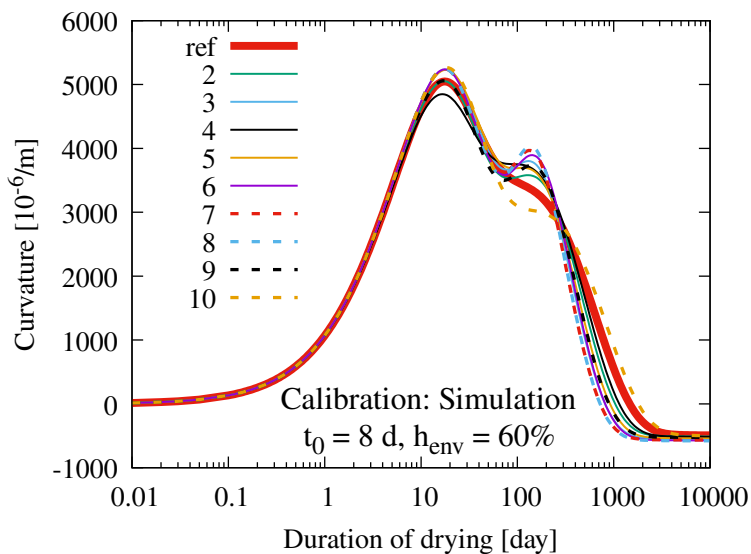


Obrázek 18: Rozdělení relativní vlhkosti po průřezu pro “referenční” a “modifikovaný” set parametrů (Obr. 16), \bar{t} je doba vysychání.

4 Závěr

Tato práce popisuje chování betonové desky s ohledem na symetrické a nesymetrické vysychání při konstantní relativní vlhkosti okolního prostředí. Problematika byla modelována v programu OOFEM, který využívá metodu konečných prvků. Transport vlhkosti byl popsán modelem Bažant-Najjar, zatímco základní dotvarování modifikovaným modelem MPS. Důraz byl kladen na identifikaci sad parametrů, jejich jedinečnost a shodu s referenční sadou při predikci chování pro jednostranné vysychání. Další dílčí závěry vyplývající z analýzy:

- Predikce vývoje křivosti vytvořená na základě znalosti průběhu ztráty hmotnosti a současně vývoje smrštění dávají větší rozptyl a horší shodu s referenčními výsledky. Přesnější predikce je dosaženo bez zohlednění úbytku hmotnosti.
- Sady parametrů identifikované pro určité podmínky mohou dávat pro predikci lepší shodu s referenční sadou než sety identifikované za shodných podmínek jako je následná predikce. Toto tvrzení dokazuje Obr. 19, ze kterého je patrné, že sady identifikované při $t_0 = 8$ dní a $h_{\text{env}} = 60 \%$, dají lepší predikci pro hodnotu maximální křivosti při $t_0 = 28$ dní a $h_{\text{env}} = 50 \%$ než parametry identifikované za podmínek shodných s těmi pro predikci dle Obr. 6.
- Pro dosažení kvalitní predikce bude patrně třeba provést kalibraci při více odlišných podmínkách, případně mít k dispozici i odlišná měření než jen ztrátu hmotnosti a smrštění. Těmito hodnotami by mohla být například vlhkost v určitých bodech průřezu, případně znalost reakcí při staticky určitém podepření vzorku v závislosti



Obrázek 19: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $t_0 = 28$ dní, $h_{\text{env}} = 50\%$, identifikace byla provedena při $h_{\text{env}} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 8$ dní.

na nerovnoměrném úbytku hmotnosti po průřezu. Toto tedy zůstává motivací pro další práci.

- Na základě kontrolní reverzní kalibrace, tedy při identifikaci parametrů na základě vývoje křivosti, je dosaženo velmi dobré shody pro osové smrštění i pro vývoj ztráty hmotnosti při zafixování všech parametrů kromě funkce difuzivity a součinitele přestupu. Křivky difuzivity dávají lepší shodu s referenčním řešením než u předchozích kalibrací.

Reference

- [1] Z. Bažant, M. Jirásek. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures*. Springer Netherlands, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-1138-6> DOI:10.1007/978-94-024-1138-6.
- [2] B. Patzák. OOFEM home page, 2000. [Http://www.oofem.org](http://www.oofem.org).
- [3] Z. P. Bažant, L. J. Najjar. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures* **5**:3–20, 1972. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02479073> DOI:10.1007/BF02479073.
- [4] Z. P. Bažant, A. P. Hauggaard, S. Baweja, F. J. Ulm. Microprestress solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects. *Journal of Engineering Mechanics* **123**:1188–1194, 1997.
- [5] Z. Bažant, P. Havlásek, M. Jirásek. Microprestress-solidification theory: Modeling of size effect on drying creep. In N. Bicanic, H. Mang, G. Meschke, R. de Borst (eds.), *Computational Modelling of Concrete Structures*, pp. 749–758. CRC Press/Balkema, EH Leiden, The Netherlands, 2014.
- [6] A. H. Bryant, C. Vadhanavikkit. Creep, shrinkage-size, and age at loading effects. *ACI Materials Journal* **84**:117–123, 1987.
- [7] P. Havlásek. *Creep and Shrinkage of Concrete Subjected to Variable Environmental Conditions, PhD. Thesis*. Czech Technical University in Prague, 2014.