

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra mechaniky



**Modelování smrštění symetricky a nesymetricky
vysychajícího betonu**

**Modeling drying shrinkage of concrete subjected to
symmetric and asymmetric drying**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

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

Bc. Pavel Horák

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Horák Jméno: Pavel Osobní číslo: 460420

Zadávací katedra: K132 - Katedra mechaniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování smrštění symetricky a nesymetricky vysychajícího betonu

Název diplomové práce anglicky: Modeling drying shrinkage of concrete subjected to symmetric and asymmetric drying

Pokyny pro vypracování:

- 1) Literární rešerše dokumentující současný stav poznání.
- 2) Vytvoření a kalibrace výpočetního modelu v programu OOFEM symetricky vysychajících betonových vzorků dle experimentu Bryant & Vadhanavikkitt (1987). Beton bude popsán modelem MPS a vysychání dle článku Bažant-Najjar (1972).
- 3) Identifikace materiálových parametrů modelu pro transport vlhkosti. Predikce chování při jednostranném vysychání. Diskuze výsledků, analýza vhodného uspořádní experimentu pro identifikaci materiálových parametrů.
- 4) Aplikace metody dle 3) na analýzu chování jednostranně vysychající betonové desky.

Seznam doporučené literatury:

Bažant Z.P., Jirásek, M.: Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures, 2018

Bažant Z.P., Jirásek, M.: Inelastic Analysis of Structures, 2002

Comprehensive Database for Concrete Creep and Shrinkage (Northwestern University)

Dokumentace k programu OOFEM.org

Vědecké články a normy týkající se problematiky

Jméno vedoucího diplomové práce: Petr Havlásek

Datum zadání diplomové práce: 21. 9. 2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3. 1. 2021

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

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Modelování smrštění symetricky a nesymetricky vysychajícího betonu“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Petra Havláška, Ph.D. a že jsem uvedl veškeré použité zdroje informací.

Bc. Pavel Horák

Praha, leden 2021

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Petru Havláskovi, Ph.D. za cenné rady a podněty při zpracování této diplomové práce. Za finanční podporu děkuji Grantové agentuře České republiky (GA ČR), projekt číslo 19-20666S a Studentské grantové soutěži ČVUT, grant číslo SGS20/038/OHK1/1T/11.

Abstrakt

Běžné experimenty, u kterých je měřeno pouze osové smrštění a úbytek hmotnosti, neposkytují vždy spolehlivá data pro jednoznačnou kalibraci modelu transportu vlhkosti. Proto se tato práce zabývá zejména vhodným uspořádáním experimentu pro identifikaci parametrů modelu transportu vlhkosti podle článku Bažanta a Najjara. Sady parametrů jsou porovnávány na základě predikce vývoje křivosti nesymetricky vysychajícího betonu. K tomu je využita sdružená konečněprvková simulace transportu vlhkosti a mechanické odezvy v programu OOFEM. Z modelovaných přístupů se zdá být výhodné experimentální měření křivosti, která je způsobena nerovnoměrným vysycháním betonu.

Dále je provedena simulace chování typického konstrukčního prvku, kterým je betonová deska, konkrétně průmyslová podlaha. Ukazují se zde důsledky různě zvolených sad parametrů.

Abstract

Commonly performed experiments where only axial shrinkage and weight loss are measured do not always provide reliable data for unique calibration of the moisture transport model. The objective of this thesis is to develop a suitable experimental setup to identify parameters of the moisture transport model proposed by Bažant and Najjar. The comparison of the obtained sets of parameters is based on the prediction of curvature of asymmetrically drying concrete. For this, a combined finite element simulation of moisture transport and structural response in the OOFEM program is used. From the modeled approaches, experimental measurement of the curvature caused by asymmetrically drying concrete seems to be advantageous.

Furthermore, the simulation of behaviour of a typical structural element, which is an industrial floor, is performed. The consequences of differently selected sets of parameters are shown.

Klíčová slova

Beton, smrštění od vysychání, predikce, transport vlhkosti, metoda konečných prvků, identifikace parametrů.

Keywords

Concrete, drying shrinkage, prediction, moisture transport, finite element method, parameter identification.

Obsah

1	Motivace	12
2	Základní časově závislé jevy v betonu	13
2.1	Dotvarování	13
2.2	Vysychání a smršťování	14
2.3	Úskalí predikce smrštění	16
3	Související výzkum a experimenty	19
4	Numerické modely	27
4.1	Materiálový model MPS a teorie mikropředpětí	27
4.2	Materiálový model pro transport vlhkosti	30
5	Kalibrace modelů a analýza jednostranného vysychání	32
5.1	Kalibrace modelu pro dotvarování	32
5.2	Kalibrace modelu pro smrštění	35
5.3	Identifikace parametrů podle smrštění a úbytku hmotnosti	36
5.4	Identifikace parametrů podle vývoje křivosti	47
5.5	Dvě maxima křivosti	51
5.6	Identifikace parametrů s využitím senzoru vlhkosti	55
5.7	Identifikace parametrů pro částečně chybějící data	60
6	Aplikace nakalibrovaného modelu	63
7	Závěr	70
	Literatura	72

1 Motivace

Beton je v dnešní době jeden ze základních stavebních materiálů a oproti kovům jej charakterizuje jeho časově závislé chování. To například znamená, že deformace není závislá pouze na velikosti působící síly, ale také na stáří betonu a historii zatěžování. Pokud je příčinou deformace síla, jedná se o dotvarování. Stejně tak ale existují deformace nezávislé na napětí. V betonu může hrát významnou roli časově závislá deformace způsobená vysycháním betonu. Této deformaci se říká smrštění. Pokud je vysychání symetrické, dochází u betonového vzorku ke symetrickému zmenšení rozměrů. Na druhou stranu u nesymetricky vysychajícího vzorku může být pozorováno i zakřivení. To se může například projevit zvedáním rohů a hran průmyslových podlah.

Některé konstrukce mohou být na vývoj dotvarování a smrštění velmi citlivé, obzvlášť pokud je bráněno deformacím, a je třeba se oprostít od návrhových norem a tyto jevy prozkoumat a popsat přesněji. Předejde se tak neefektivnímu využití materiálu nebo naopak vzniku vad. Těmito konstrukcemi mohou být například výškové budovy, mosty velkých rozpětí, přehrady, rámové konstrukce, lité podlahy a podobně.

Prvním rizikovým důsledkem vysychání je vznik trhlin, které umožní průsak vody nebo chloru a to pak může mít významný dopad na funkčnost a životnost konstrukce. Dále může smrštěním dojít k přerozdělení vnitřních sil ve staticky neurčitých konstrukcích.

Aby se předešlo nežádoucím jevům v konstrukci, bývají využity nejrůznější materiálové modely s doporučenými parametry. Pro přesnější predikci chování betonové konstrukce se numerické modely kalibrují podle experimentů. Vzhledem k tomu, že doba jejich trvání nemusí být dostatečná, je často potřeba extrapolovat. To ale bývá zatíženo několika nejistotami. Základním problémem je správný odhad skutečných okrajových podmínek pro konstrukci, zejména okolní vlhkost a teplota, délka ošetřování a geometrické odlišnosti konstrukce s matematickým modelem. Pro dosažení co nejlepší shody experimentu a numerického modelu bývá žádoucí vzorek sledovat již v době vnesení zatížení, respektive co nejdříve po vnesení zatížení tak, aby byla ideálně postihnuta i elastická deformace. To může výrazně přispět k přesnosti kalibrace dotvarování. Bude tím zaznamenána typická část křivky deformace zejména při vykreslení v semilogaritmickém měřítku. Problém extrapolace v oblasti smrštění bývá citelně náročnější.

Běžný přístup pro identifikaci parametrů modelu transportu vlhkosti, kdy je měřeno smrštění symetricky vysychajícího vzorku, nemusí dávat spolehlivá data pro nesymetricky vysychající konstrukci. Proto si tato práce klade mimo jiné za cíl určení nejvýhodnějšího uspořádání experimentu a vhodného měření pro identifikaci materiálových parametrů pro transport vlhkosti. Předpokládá se, že doba trvání experimentu není omezena, a je tak známá i konečná hodnota smrštění. Různé přístupy jsou porovnávány právě při predikci vývoje křivosti nesymetricky vysychajícího betonu. Rozebrán je i vliv chybějících měření nebo nepřesností při měření na výsledný predikční model. K tomu je použit konečněprvkový program OOFEM [1] vyvíjený na akademické půdě fakulty stavební ČVUT týmem prof. Bořka Patzáka.

2 Základní časově závislé jevy v betonu

Z hlediska času odezvy můžeme chování materiálu rozdělit na okamžité a opožděné. U betonu může velikost opožděné deformace několikanásobně převýšit deformaci okamžitou. Základními časově závislými deformacemi v betonu jsou smrštění a dotvarování. Smrštění souvisí se snižováním relativní vlhkosti v betonu ať už vlivem vysychání nebo chemické reakce uvnitř betonu. Dotvarování je naproti tomu důsledkem silového působení. Míra deformace je také ovlivněna změnou vlhkosti v betonu. Okolní vlhkost je stejně jako teplota uvažována v této práci konstantní. Při konkrétním pojmenování je beton charakteristický čtyřmi hlavními složkami časově závislé deformace, kterými jsou základní dotvarování, dotvarování od vysychání, smrštění od vysychání a autogenní smršťování.

2.1 Dotvarování

Základní opožděnou deformací, která je pro beton charakteristická, je základní dotvarování. Jeho typickou vlastností je v čase narůstající deformace vlivem působícího zatížení. Ve své podstatě se jedná o zpožděnou pružnou reakci na působící sílu nebo napětí.

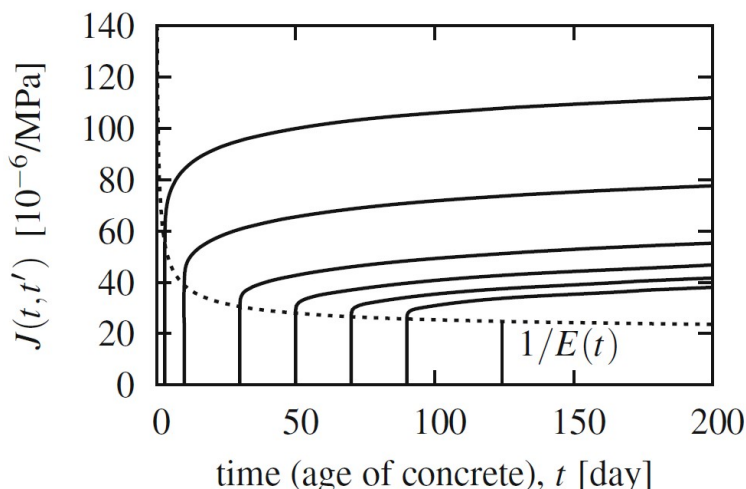
Pro přesnější popis časového vývoje dotvarování je výhodné vynášet poddajnost v závislosti na logaritmu stáří betonu nebo doby zatížení. Vývoj poddajnosti se pak v semi-logaritmickém měřítku po čase ustálí na přibližně lineární průběh. Z toho vyplývá, že dotvarování, na rozdíl od smrštění od vysychání, nemá konečnou hodnotu. Jako lineární lze podle Eurokódu 2 [2] uvažovat průběh funkce poddajnosti, pouze pokud bude hodnota napětí pro stálou (kvazistálou) kombinaci zatížení nižší než $0,45 \times f_{ck}$. Omezení napětí je tedy vztaženo vůči charakteristické pevnosti betonu f_{ck} .

Dotvarování se týká jak tlačeného, tak taženého betonu. Poddajnost se ovšem nijak znatelně nemění při přechodu mezi taženým a tlačeným betonem [3, s. 54]. Číselným zástupcem míry dotvarování je bezrozměrný součinitel dotvarování $\varphi(t, t')$. Jeho hodnota vyjadřuje poměrný přírůstek přetvoření v čase t k původní elastické deformaci v čase t' .

Další částí dotvarování je dotvarování od vysychání, tedy takzvaný Pickettův jev. Jde o deformaci způsobenou změnou vlhkosti při působícím zatížení. Mnoho modelů a norem tuto deformaci zanedbává nebo ji přiřazuje celkovému dotvarování jako například Eurokód 2. Ten vychází z Model Code 1990 [4], který složky celkového dotvarování na rozdíl od Model Code 2010 [5] neodděloval.

Vlastnosti reálného betonu se ale v čase mění. Jak se patrně z Obr. 1, u stejně zatížených vzorků mladší beton dotvaruje více. Mladší beton má také větší elastickou deformaci při stejném zatížení. V tomto grafu je vykreslena závislost poddajnosti $J(t, t')$ na čase. Ta má fyzikální význam převrácené hodnoty modulu pružnosti.

Při popisu časově závislého chování betonu jsou odlišovány tři časy. První je t_0 , což je čas počátku vysychání (ukončení ošetřování). Čas vnesení zatížení je označován jako t' a aktuální čas jako t .



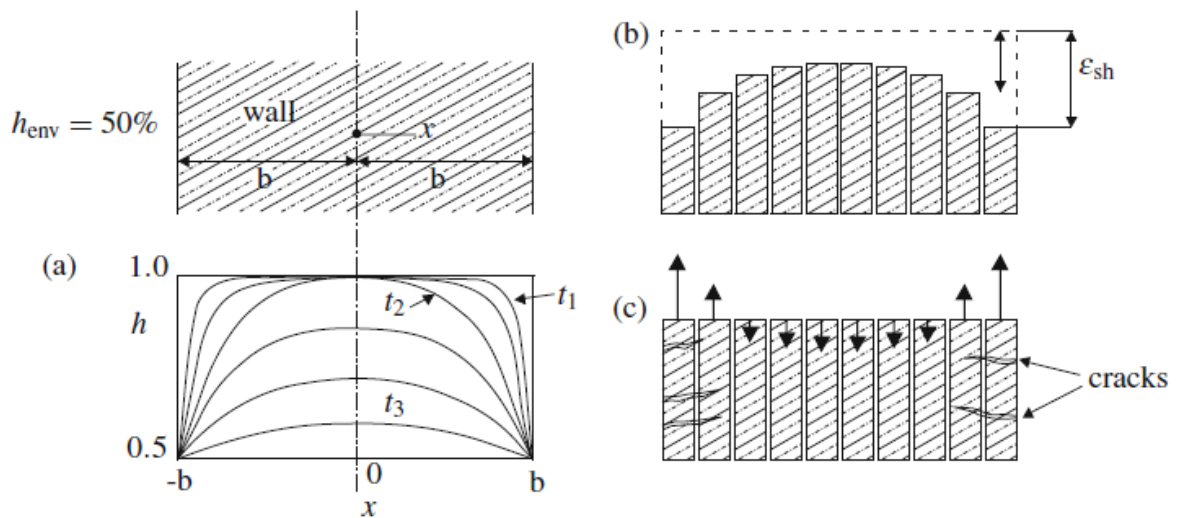
Obrázek 1: Funkce poddajnosti v čase podle stáří betonu v době vnesení zatížení. Tečkovaně je vyznačena elastická deformace podle stáří betonu v době vnesení zatížení [3, s. 38].

2.2 Vysychání a smršťování

Druhá popisovaná skupina časově závislých deformací je nezávislá na napětí v betonu. Jejich příčinou je voda, respektive snižování relativní vlhkosti v pórech betonu. Hlavní funkce vody v betonu je funkce hydratační. Tím se rozumí podíl na dostatečné hydrataci cementu nejen v čerstvé směsi, ale i ve ztvrdlém betonu. Fyzikálními a chemickými procesy tak dochází k tuhnutí a tvrdnutí cementu. Hodnota vodního součinitele, který by v ideálním případě zajistil hydrataci veškerého cementu ve vzorku, se pohybuje okolo 0,2 [6, s. 444]. Ovšem z hlediska praktického se vodní součinitel volí vyšší, aby byla umožněna zpracovatelnost a fakticky se zajistila hydratace cementu ve směsi. Jeho hodnota se tak běžně pohybuje mezi 0,3 a 0,5. Snižit vodní součinitel lze například využitím plastifikátoru. Pokud je okolní vlhkost nižší než vlhkost v betonu, tak se chemicky nevázaná voda následně z betonu dostává přes systém pórů a tento proces nazýváme vysychání.

Deformace, která závisí na vnějším vysychání, je smrštění od vysychání. Snižováním relativní vlhkosti v pórech zmenšuje beton svůj objem. Vlhkost klesá nejrychleji u vysychajícího povrchu. Přibližné rozložení vlhkosti v průběhu vysychání po tloušťce průřezu zobrazuje Obr. 2. V případě rozdělení průřezu na proužky by povrchové vrstvy smršťovaly nejrychleji. Tomu je u reálného průřezu zabráněno a výsledná deformace závisí na dílčích deformacích a silách v pomyslných proužcích. Střední část průřezu je zde tlačena, zatímco v povrchových vrstvách se objevuje tahové napětí, které někdy způsobuje i tahové trhliny.

Vnitřním sesycháním betonu vzniká deformace, která se nazývá autogenní smršťování, což je proces nezávislý na vnějším vysychání. Zapříčiňuje ho větší objem vody a cementu před jejich chemickou reakcí, kdy výsledný produkt má objem menší. Takto popsámu

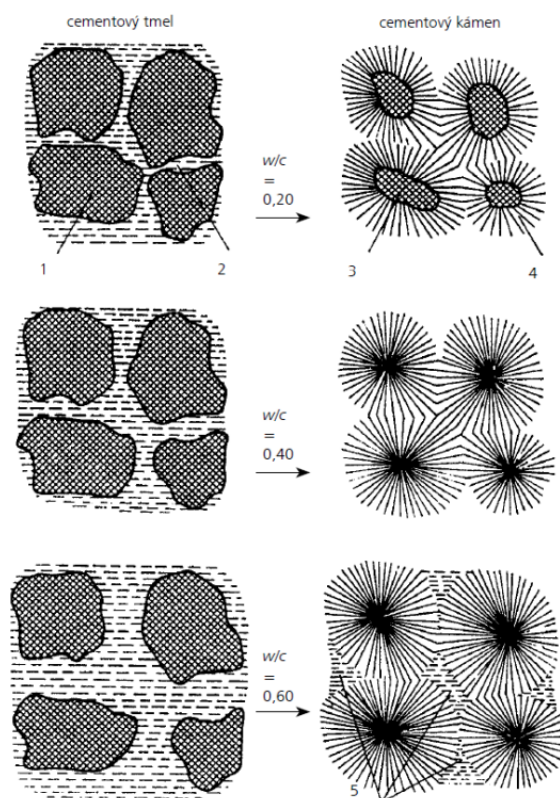


Obrázek 2: Vliv vysychání (a) Rozdělení relativní vlhkosti v pórech, (b) Teoretické smrštění jednotlivých proužků betonu, (c) Napětí od smrštění [3, s. 47].

jevu se říká chemické smrštění, které v kombinaci se zvětšujícími se póry uvnitř betonu tvoří celkový efekt autogenního smrštění [3, s. 405]. U běžných betonů je zanedbatelné a jeho poměrná hodnota vůči smrštění od vysychání dosahuje jednotek procent. Významnější roli začíná hrát u betonů s velmi nízkým vodním součinitelem, kdy může dokonce předčít smršťování od vysychání [3, s. 55]. Vliv vodního součinitele na hydrataci cementu je znázorněn na Obr. 3. Vysoký vodní součinitel zaručí hydrataci veškerého cementu, ale snižuje výslednou pevnost betonu, což je patrné z Obr. 4. Pokud je snaha postihnout tento typ smršťování co nejlépe, je třeba měření deformace zahájit co nejdříve po uložení směsi do formy a ideálně zabránit ostatním typům deformací. Průběh autogenního smrštění může být přímo měřen, pokud je vyloučeno silové působení a vliv smrštění od vysychání. Toho je možné dosáhnout například zapečetěním vzorku hliníkovou folií tak, aby ze vzorku neunikala žádná vlhkost. Použit lze také pružné nepropustné formy, které se po betonáži neoddělí, jako například gumové vlnovce.

Kromě těchto základních dvou typů smrštění se ještě rozlišuje plastické smrštění a smrštění způsobené karbonatací. Plastickému smrštění lze zabránit kvalitním ošetřováním povrchu při betonáži, čímž se předejde odpaření nadměrného množství vody. Druhý typ smrštění je způsoben reakcí plynného CO_2 s portlandidem za vzniku $CaCO_3$, který následně tvoří krystaly v pórech betonu. Tento proces ovšem probíhá velmi pomalu.

Aby byly správně nakalibrovány všechny 4 hlavní složky časově závislé deformace, je potřeba provést 4 experimenty. Autogenní smrštění odpovídá přímo deformaci nezátíženého zapečetěného vzorku. Tento typ časově závislé deformace se v betonu vyskytuje vždy. Nezátížený vzorek volně vysychající spojuje obě složky smrštění, tedy autogenní a smrštění od vysychání. Pro kalibraci složek dotvarování je třeba zatížený vzorek. Deform-



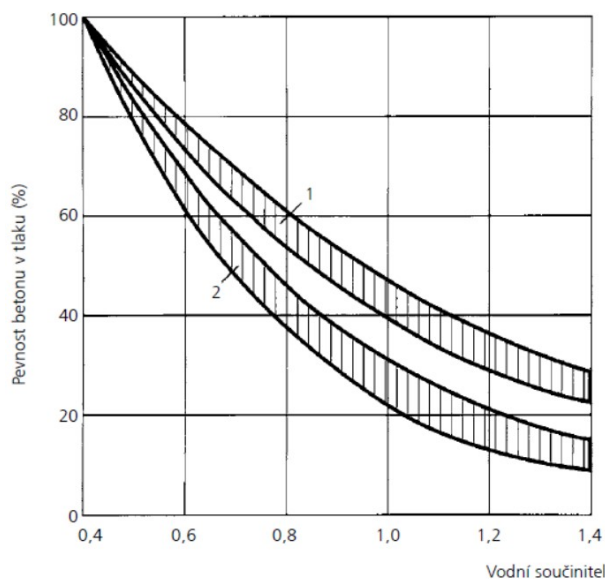
Obrázek 3: Vliv vodního součinitele na hydrataci cementu 1–cementové zrno (slínek), 2–voda, 3–nezhidratovaný cement, 4–zhidratovaný cement, 5–kapilární póry [6, s. 449].

mace zapečetěného vzorku, který je vystaven silovému působení, je součtem autogenního smrštění a základního dotvarování. Volně vysychající zatížený vzorek spojuje všechny 4 základní složky časově závislé deformace.

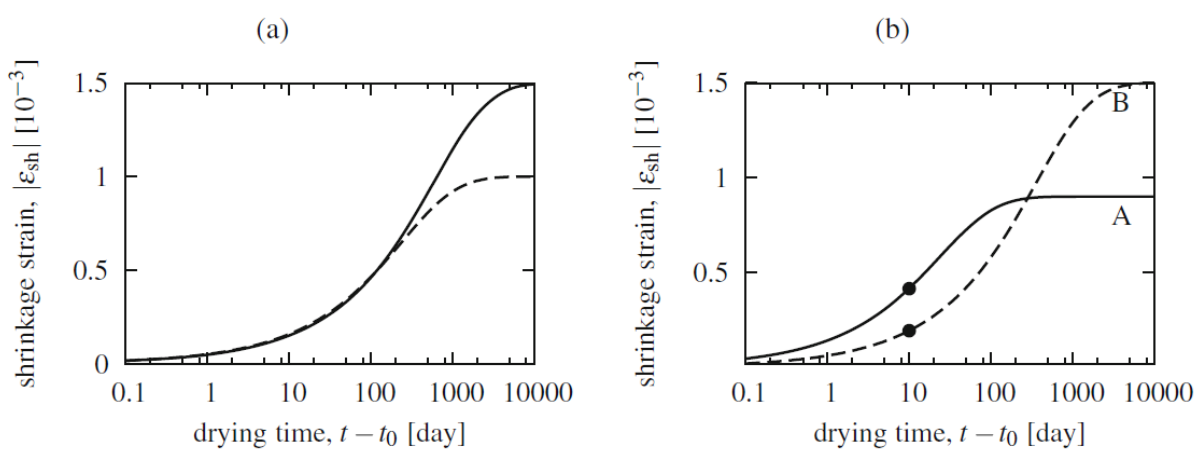
2.3 Úskalí predikce smrštění

Z hlediska matematického popisu jsou transport vlhkosti a následná mechanická odezva ve formě smrštění složitými procesy, které reagují na mnoho proměnných a ani v dnešní době nejsou zcela prozkoumány a popsány. Proto je doporučeno u konstrukcí, kde vysychání hraje znatelnou roli, vytvořit zkušební vzorek v laboratoři. Ten se využije při kalibraci predikčního modelu. Zde je důležité dodat, že výsledky pokusu v laboratorních podmínkách se mohou znatelně lišit od výsledků neměřených in-situ, což není žádoucí.

Jak je vidět na Obr. 5, krátkodobé experimenty nemusí dávat dobrou představu o konečné hodnotě smrštění. Stejně tak vzorek s vyšším počátečním nárůstem deformace oproti jinému vzorku může vykazovat znatelně nižší konečnou hodnotu smrštění. Ta by se měla pro případ nulové vlhkosti okolního prostředí pohybovat mezi 0,3 až 1,1 ‰ u běžných betonů s vyšším vodním součinitelem [3, s. 43].



Obrázek 4: Vliv vodního součinitele na pevnost betonu, (1) pevnost v tahu za ohybu, (2) pevnost v tlaku [6, s. 448].



Obrázek 5: Vývoj smrštění, (a) podobný vývoj smrštění v počáteční fázi s velmi odlišnými konečnými hodnotami, (b) jiný možný průběh smrštění [3, s. 61].

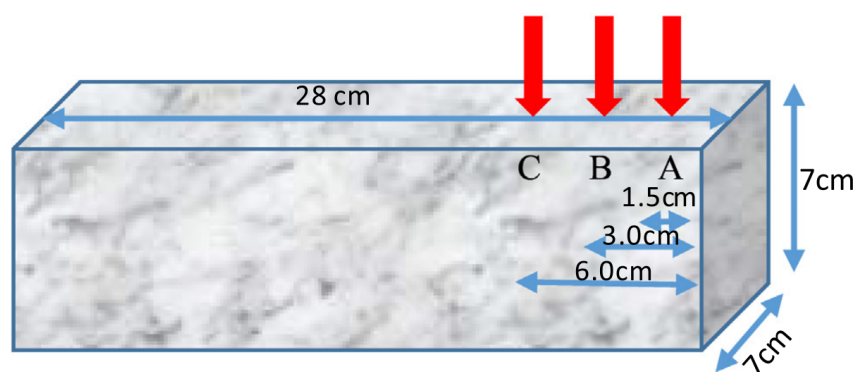
Pro získání celkové představy o průběhu smrštění je třeba nechat vzorek zcela vyschnout a dosáhnout tak v pórech vlhkosti okolního prostředí. To je ovšem proces velmi zdoluhavý a málokdy aplikovaný. Časová náročnost takového experimentu bývá v řádu let. Volí se proto jen kratší experiment a parametry modelu se kalibrují pouze na existující data a různá doporučení. Je zde tedy riziko, že se hodnota konečného smrštění bude od reality znatelně lišit.

Je také nutné mít na paměti, že reálné podmínky při experimentu a betonáži skutečné

konstrukce nikdy nejsou zcela shodné. Numerický model je sestavován jako jakýsi odhad s určitou přesností. Kromě teploty, vlhkosti a dalších může mít na reálnou konstrukci velký vliv i lidský faktor.

3 Související výzkum a experimenty

Jedna z prací, která řeší problematiku predikce a kalibrace parametrů pro transport vlhkosti v betonu, je článek od X. Ma a kol. [7] a zabývá se obtížností správného určení relativní vlhkosti ve vzorku. V rámci pokusu, o kterém tento článek pojednává, byl měřen hmotnostní úbytek vzorku a relativní vlhkost betonu v profilech podle Obr. 6. Vzorek měl zapečetěny 4 největší stěny, takže senzory byly umístěny ve vzdálenosti od vysychajícího okraje podle obrázku. Relativní vlhkost okolního prostředí byla udržována na hodnotě 32 %. Test trval 160 dnů a cílem bylo zjistit, jak moc při identifikaci parametrů pro transport vlhkosti pomůže znalost vlhkosti v různých profilech. Zde byl do numerického modelu započítán transport kapalného i plynného skupenství vody.



Obrázek 6: Pozice umístění senzorů vlhkosti ve vzorku [7].

Vlhkost by se ještě mohla alternativně měřit pomocí elektromagnetické metody, rentgenového paprsku nebo ultrazvuku [8]. V případě zapečetěného vzorku je použití těchto metod velmi omezené. Proto je za jedinou přijatelnou metodu měření vlhkosti ve vzorku považován vlhkostní senzor.



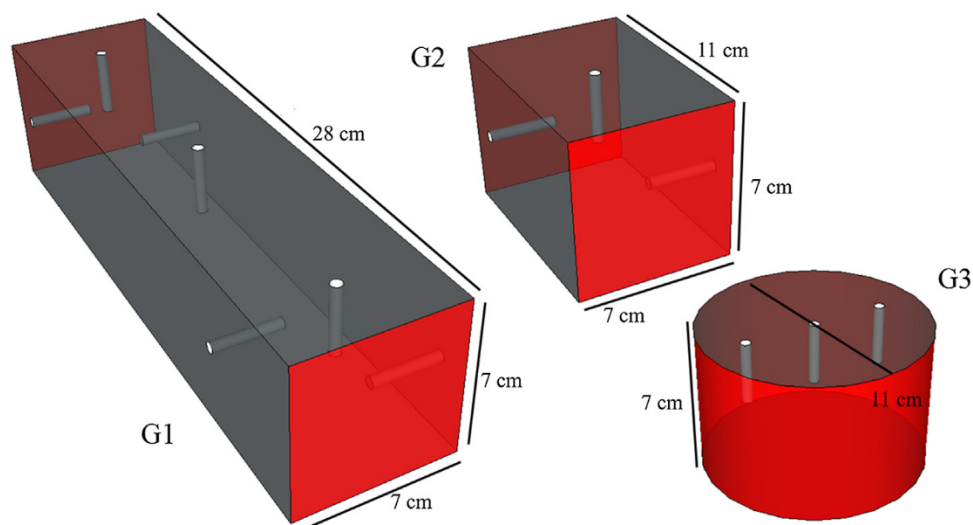
Obrázek 7: Použitý senzor vlhkosti [7].

Z článku vyplývá, že pouhé měření úbytku hmotnosti obecně dává neuspokojivé vstupy

pro matematický model. Pro získání výrazně lepší představy o rozložení vlhkosti po délce vzorku je nutné mít k dispozici informace o relativní vlhkosti v některém z průřezů A, B nebo C podle obrázku. Také je zde doloženo, že nejcennější data ohledně relativní vlhkosti v betonu lze získat přiblížením sondy co nejbližší k vysychajícímu povrchu. Zde by ale nemělo docházet k poškození povrchu a narušení transportního procesu. Z výsledků experimentu také vyplývá, že data z průřezu A jsou cennější než data z průřezu B a C dohromady.

Podobně zaměřený experiment a následné numerické modelování, které ale více cílí na přesnost a spolehlivost numerického modelu, je článek od J. Carette a kol. [9]. Tématicky tak navazuje na předchozí článek. Ve výpočtech je zde uvažován opět transport jak kapalně, tak plynné fáze vody. Článek upozorňuje na možný vnik nepřesností při experimentu, měření a vyhodnocení dat.

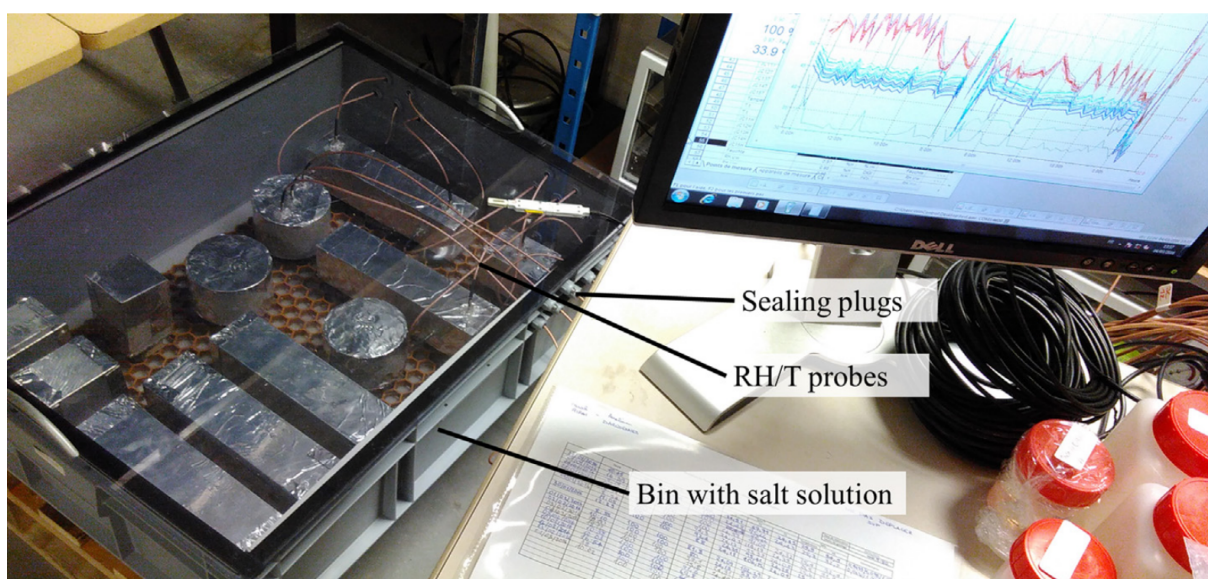
V rané fázi experimentu je třeba, aby byla správně vybrána technologie měření. Jisté nepřesnosti mohou vzniknout už při zapečetění vzorku vlivem tvorby a rozvoje smršťovacích trhlin. Vzorky s těmito trhlinami pak vykazují vyšší permeabilitu.



Obrázek 8: Zkoumané vzorky včetně rozměrů a přibližného umístění senzorů vlhkosti. Šedivě znázorněné strany jsou zapečetěné a neumožňují vysychání, zatímco červeně označené umožňují [9].

Experiment začal vytvořením betonových vzorků přesných rozměrů, do kterých byly následně vyvrtány otvory o průměru 6 mm pro osazení senzorů relativní vlhkosti s průměrem 5 mm. Vzdálenost od vysychajícího okraje je zvolena stejná jako v předchozím experimentu, tedy 15 mm, 30 mm a 60 mm. Záměrně byly použity takto malé senzory pro minimalizaci nepřesnosti měření, kdy relativní vlhkost může mít, zejména u povrchu, velmi strmý nárůst znatelný i na délce odpovídající průměru senzoru. Při měření rela-

tivní vlhkosti pomocí těchto senzorů je výhodná znalost průběhu sorpční izotermy, aby nevznikaly chyby plynoucí z nepřesné aproximace jejího průběhu. Sorpční izoterma popisuje závislost relativní vlhkosti na skutečném množství chemicky nevázané vody v betonu. V rámci experimentu byly také zaznamenávány údaje o úbytku hmotnosti. Relativní vlhkost okolního prostředí byla 45 % a teplota byla udržována na hodnotě 25 °C. Na Obr. 8 je vidět schéma tvarů a velikostí experimentálních vzorků. Zapečetění bylo opět provedeno pomocí hliníkové folie, jak je vidět na Obr. 9.



Obrázek 9: Průběh experimentu s kontinuálním měřením relativní vlhkosti a teploty [9].

Vybetonované vzorky byly udržovány bez možnosti vysychání po dobu 2 měsíců. Po tuto dobu docházelo k autogennímu smršťování a tak mohla být tato složka smrštění zcela zanedbána při numerické simulaci. Tuto teorii potvrzuje mimo jiné i experiment [10]. Následně bylo zapečetění na patřičných plochách uvolněno. Měření relativní vlhkosti probíhalo od dosažení hodnoty relativní vlhkosti 95 % pro všechny senzory ve vzorku. V dřívějších fázích hrozila kondenzace vody na senzorech a tím i vytvoření chyby.

Výsledky prokazují, že lepší identifikace parametrů je dosaženo při rychlejším vysychání. Nejlepší sada parametrů potvrzuje, že použitím správné metody může být dosaženo výsledků, které vystihují všechny vzorky s minimální citlivostí parametrů na jejich rozdílné velikosti, tvar a poloměr vysychání. Podle většiny identifikovaných sad parametrů převládá v numerických modelech transport vlhkosti v kapalném skupenství.

Jeden z nejzásadnějších požadavků na experiment je zkrácení doby jeho trvání na minimum. Ve většině případů to znamená postižení pouze prvotní fáze vysychání. Podle [11] lze vysychání urychlit několika způsoby, které ovšem vždy vedou k menšímu nebo většímu poškození vzorku ať už po fyzické nebo chemické stránce. Pro zjištění celkového obsahu nevázané vody v krátkém čase lze použít dva základní způsoby [3, s. 810]. Prvně

lze vysychání urychlit zvýšením teploty až na 105 °C [12] a nechat vyschnout na úroveň nulové relativní vlhkosti. Hledaná ztráta vlhkosti by se určila za pomoci interpolace pro předpokládané okolní podmínky skutečné konstrukce. Při této interpolaci by byl zohledněn zejména tvar sorpční izotermy. Ovšem pro predikci smrštění od vysychání je tato metoda s ohledem na značné poškození betonové mikrostruktury nevhodná [11]. Druhá metoda vychází pouze ze znalosti vodního součinitele a je zcela teoretická. Množství nevázané vody odpovídá celkovému rozdílu vody v čerstvé směsi a vody potřebné na hydrataci cementu. S ohledem na velkou podobnost průběhu grafu úbytku hmotnosti a grafu smrštění od vysychání, lze s určitou přesností predikci průběhu smrštění takto vytvořit [12].

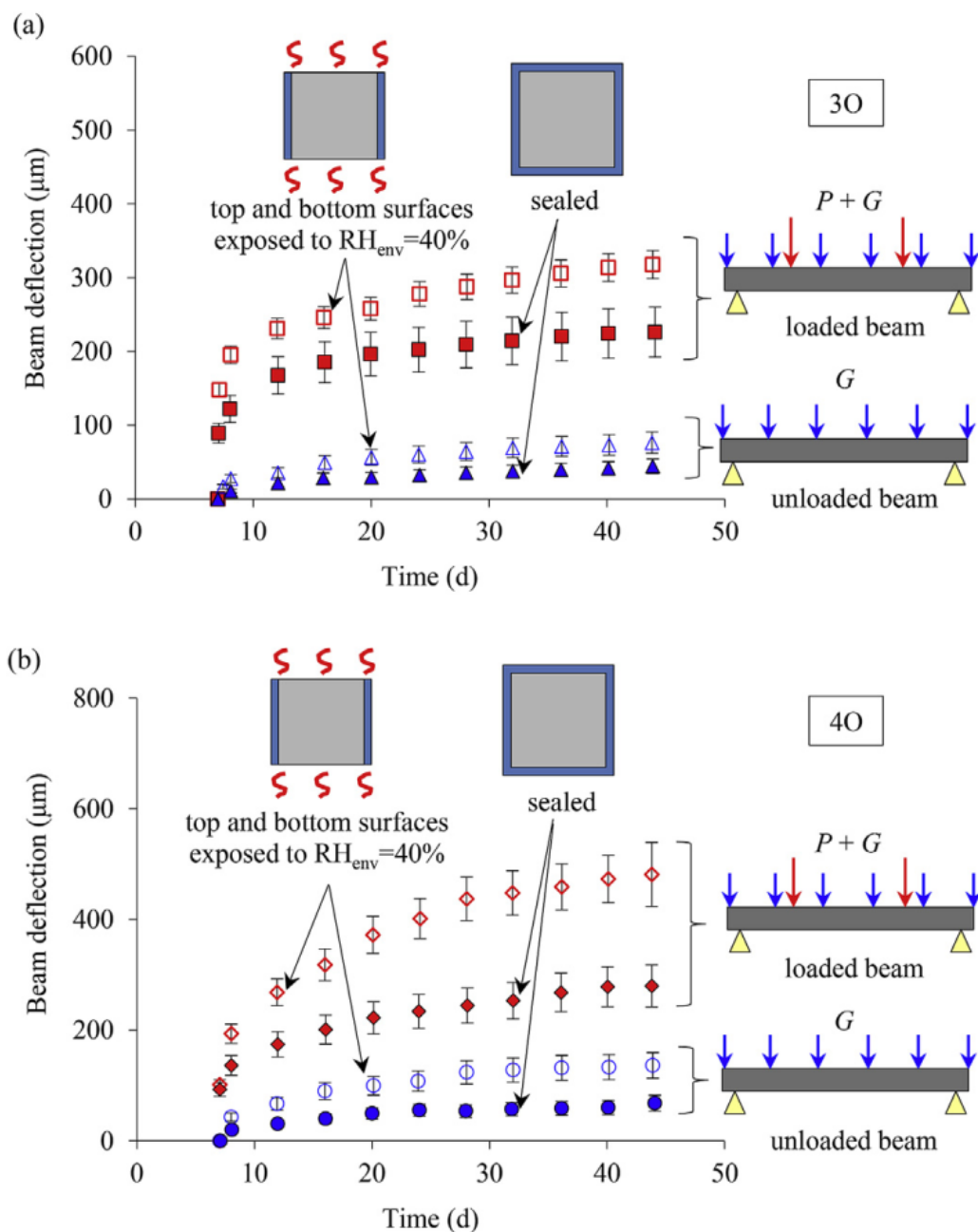
Článek [11] ještě přidává další alternativu pro zrychlení vysychání a to vymrazování. Jedná se o proces, kdy dojde ke zmrazení vzorku, ze kterého se voda ztrácí sublimací. Je zde ovšem riziko narůstání krystalů vody a vzniku deformací v mikrostruktuře, čemuž se ale dá do jisté míry předejít. Zde je tato metoda popisována jako nejúčinnější pro zrychlení procesu vysychání, ale vyžaduje delší dobu trvání než je tomu u vysychání za vysokých teplot.

Další možností zkrácení experimentu, je zmenšení velikosti vzorku. Může zde ale nastat problém s maximální velikostí zrna kameniva v poměru k velikosti vzorku. V tom případě se vzorek požadovaných rozměrů pro vysychání připraví odříznutím nebo rozřezáním vzorku většího [3, s. 60]. Vliv velikosti a tvaru není ale ve všech modelech uvažován zcela správně. V numerickém modelu MPS [13] je dokonce vliv velikosti na dotvarování od vysychání podle odvození uvažován s opačnou tendencí, než ukazují experimenty [14, 15]. Klíčový je zde parametr p , který standardně nabývá hodnoty 2. Pro zajištění správného zohlednění velikosti ale parametr musí nabývat hodnot záporných. Tím ztrácí původní odvození svůj význam. Vliv velikosti na dotvarování od vysychání může být zanedbán při uvažování $p = \infty$.

Experiment [16] se zabývá vysycháním a dotvarováním betonu. Ke kalibraci 4 hlavních složek časově závislé deformace, tedy smrštění od vysychání, autogenní smrštění, základní dotvarování a dotvarování od vysychání, jsou provedeny čtyři oddělené experimenty. Ty se liší podle toho, zda je beton zatížen nebo nikoliv a zda mu je umožněno vysychání.

Experiment byl proveden na trámku čtvercového průřezu s hranou délky 50 mm a rozpětím mezi podporami 1150 mm. Trámek byl zatížen dvěma symetricky uloženými závažími o hmotnosti 10 kg ve vzdálenosti od místa podepření 200 mm. Některé trámkové vzorky byly zcela zapečetěné, jiné vysychaly symetricky a některé nesymetricky. Obr. 10 ukazuje přibližný poměr jednotlivých složek časově závislé deformace, byť některé nepřímé. Z pokusů vyplývá, že na průhyb trámku téměř nemá vliv, zda trámek nevysychá nebo vysychá symetricky.

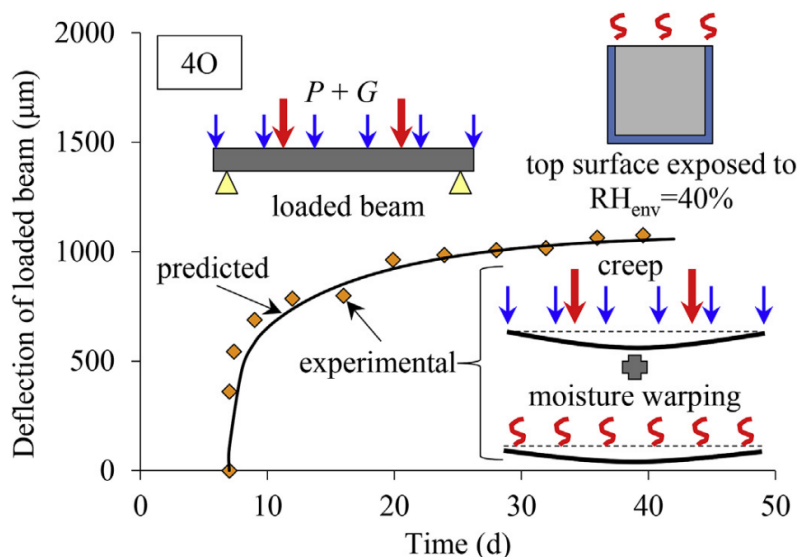
Bylo také měřeno osové smrštění a vlhkost uvnitř zapečetěných i vysychajících vzorků v různých profilech. Rozložení vlhkosti bylo v závislosti na vzdálenosti od vysychajícího povrchu značně nelineární a rychlost snižování relativní vlhkosti ve vzorku závisela na zvoleném vodním součiniteli (0,3 nebo 0,4). Tento článek obecně potvrzuje vhodnost použití modelů MPS a Bažant-Najjar a jejich aplikaci na vytvoření predikce chování betonu.



Obrázek 10: Deformace vzorku v závislosti na zatížení a vysychání. Spodní graf ukazuje chování vzorku s vyšším vodním součinitelem. Beton charakterizovaný grafem (a) má hodnotu vodního součinitele 0,3, zatímco beton podle grafu (b) 0,4. Měřenou veličinou je průhyb uprostřed rozpětí v závislosti na čase [16].

Ze znalosti osového smrštění, vývoje vlhkosti v průřezu a dotvarování byla vytvořena predikce vývoje průhybu nesymetricky vysychajícího zatíženého trámku pro prvních 50 dnů (42 dnů vysychání). Predikovaná křivka poměrně dobře koresponduje s experi-

mentálně zjištěnými daty, což je patrné z Obr. 11.



Obrázek 11: Porovnání predikce vývoje průhybu jednostranně vysychajícího trámku s experimentálními daty [16].

Jednou z možností, jak experimentálně ověřit míru smrštění od vysychání i s ohledem na vznik trhlin, je takzvaný ring test. Jedná se o experiment, při kterém je obetonován ocelový trubkový profil vrstvou betonu stejné výšky. Betonovou část lze zapečetit proti vysychání z libovolné strany. Výhoda této metody spočívá v měření, které je provedeno na základě elastické deformace ocelového prstence ve střední části. První ring test byl proveden již kolem roku 1940 [17] a byl mnohokrát opakován i při upravených rozměrech.

Výhoda experimentu spočívá ve velmi přesné odezvě relativní deformace ocelového prstence vůči působícímu napětí. Při experimentu [18] byl zapečetěn vnější povrch prstence a beton také nemohl vysychat směrem k ocelovému profilu. Před samotným ring testem bylo provedeno několik dílčích pokusů a měření jako zjištění tahové a tlakové pevnosti betonu, celkový úbytek hmotnosti vlivem vysychání nebo velikost autogenního smrštění. Bylo zjištěno, že autogenní smrštění hraje oproti smrštění od vysychání nepatrnou až zanedbatelnou roli, kde byl poměr těchto dvou typů smrštění zjištěn přibližně 1 : 10. Celý experiment trval 111 dnů a deformace byly zaznamenávány na ocelovém prstenci pomocí 4 tenzometrů. V průběhu času napětí v prstenci rostlo, ale po nějaké době začalo klesat bez vzniku makroskopických trhlin v betonu.

Řešení sdružené úlohy smrštění a dotvarování bylo podle tohoto článku rozděleno na 6 nezávislých skupin a každá k problematice a predikci chování přistupovala jiným způsobem. Bylo zjištěno, že i jednodušší 2D model dává srovnatelné výsledky se sofistikovanými 3D modely. Dále zde došlo k porovnání modelů pro vysychání Bažant-Najjar [19] a Künzel [20], které dávaly podobnou predikci. Takto bylo ověřeno, že možných přístupů



Obrázek 12: Experimentální vzorek zapečetěný po vnějším obvodě proti vysychání [18].

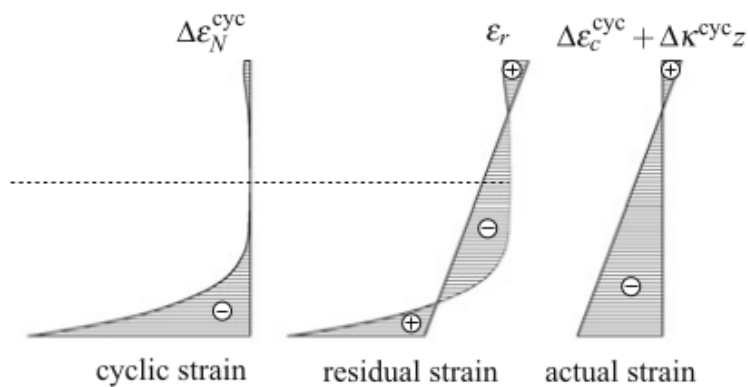
k problematice dotvarování a smršťování může být více a ne vždy jde vybrat nejlepší a nejhorší z nich. Každý z použitých modelů může mít své přednosti jinde, ať už se jedná třeba o časovou náročnost nebo přesnost výpočtu.

Problematikou nárůstu křivosti v čase se také zabývá [3, s. 255–258]. Deformace se zde nezvětšuje vlivem vysychání, ale díky cyklickému zatěžování. Pokud by bylo známé teoretické volné smrštění betonu po výšce průřezu (Obr. 2), což na Obr. 13 odpovídá volnému přetvoření vlivem cyklického zatěžování („cyclic strain“), může být vypočtena i celková deformace průřezu při zachování jeho rovinnosti podle vztahů níže. „Residual strain“ je výsledkem rozdílu „cyclic strain“ a výsledného přetvoření průřezu. Tím je jak osově smrštění $\varepsilon(t)$, tak i křivost $\kappa(t)$. Index „sh“ symbolizuje smrštění.

$$\Delta\kappa(t) = \frac{1}{I} \int_A z \Delta\varepsilon_{sh}(z, t) dA \quad (1)$$

$$\Delta\varepsilon(t) = \frac{1}{A} \int_A \Delta\varepsilon_{sh}(z, t) dA \quad (2)$$

Tyto vztahy jsou podrobněji odvozeny v [3, s. 256] a umožňují tak predikovat vývoj deformace průřezu podle teoretického smrštění betonu po výšce průřezu.



Obrázek 13: Přetvoření po výšce průřezu; zleva: rozložení volného přetvoření od cyklického zatěžování ($\Delta\epsilon_N^{\text{cyc}}$), rozdíl oproti reálnému přetvoření (ϵ_r) a výsledné přetvoření jako součet osového smrštění a natočení průřezu [3, s. 255].

4 Numerické modely

Pro účely této práce je třeba se na problematiku smršťování a dotvarování podívat podrobněji a k tomu může být použita například metoda konečných prvků, zde konkrétně s využitím programu OOFEM [1]. Jedná se o objektově orientovaný program, který umožňuje řešení mechanických problémů včetně transportu vlhkosti a šíření tepla. Jeho výhodou je možnost použití mnoha materiálových modelů a numerických postupů včetně implementace svých vlastních. Problematika sdružené úlohy mechanické odezvy a transportu vlhkosti je v této práci řešena využitím dvou propojených numerických modelů. Problematiku mechaniky řeší model MPS [13] a transport vlhkosti je popsán modelem Bažant-Najjar [19].

Model pro základní dotvarování je možné efektivně nakalibrovat již po několika týdnech [3, s. 57–58]. Funkci poddajnosti vycházející ze základního dotvarování modelu B3 lze formulovat jako

$$J_b(t, t') = q_1 + J_v(t, t') + J_f(t, t'), \quad (3)$$

kde $J_v(t, t')$ zohledňuje parametry q_2 až q_3 a popisuje zejména krátkodobou část dotvarování. $J_f(t, t')$ pracuje s parametrem q_4 a nejvíce vystihuje dlouhodobé chování betonu.

Náročnějším úkolem je kalibrace smrštění. Dva zdánlivě stejné vzorky ve stejných podmínkách mohou mít vývoj smrštění odlišný. Jak je vidět na Obr. 5, dvojice modelů s prakticky stejným průběhem smrštění do určité doby, vykazuje zcela odlišné konečné hodnoty. Měnit se může nejen poločas smrštění τ_{sh} , ale i konečná hodnota smrštění ε_{sh}^∞ . Tyto dvě hodnoty spojuje rovnice níže, kde $E(607)$ značí modul pružnosti v čase 607 dnů a ε_s^∞ je parametr závislý na pevnosti betonu, způsobu ošetřování, typu použitého cementu a hodnotě vodního součinitele.

$$\varepsilon_{sh}^\infty = \varepsilon_s^\infty \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})} \quad (4)$$

Pokud měření nepostihne část smrštění, kdy rychlost nárůstu deformace začne v semi-logaritmickeém měřítku klesat, je finální predikovaná hodnota smrštění pouze subjektivním odhadem. Potřebný čas běhu experimentu tak může být i v řádu let. Smrštění od vysychání může být predikováno na základě rovnice

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}^\infty k_h S(t), \quad (5)$$

v níž figuruje $S(t)$ jako funkce času a k_h zohledňuje vliv okolní vlhkosti.

4.1 Materiálový model MPS a teorie mikropředpětí

Model MPS je solidifikující materiálový model [21] založený na modifikované [13, 22] teorii solidifikace a mikropředpětí [23]. Oproti původní teorii [23] zohledňuje i vliv teploty a vlhkosti na dotvarování. Vstupním předpokladem jsou izotropní materiál, v čase

přibližně konstantní Poissonovo číslo a sčítání jednotlivých složek přetvoření od různých (i nesilových) zatížení pomocí principu superpozice.

Tento materiálový model vychází z modelu B3 s využitím jeho parametrů q_1 až q_4 . Následující rovnice popisují odhad hodnot těchto parametrů na základě znalosti složení čerstvé směsi a válcové pevnosti ztvrdlého betonu ve 28 dnech [12].

$$q_1 = 126,77f_c^{-0,5} \quad [10^{-6}/\text{MPa}] \quad (6)$$

$$q_2 = 185,4c^{0,5}f_c^{-0,9} \quad [10^{-6}/\text{MPa}] \quad (7)$$

$$q_3 = 0,29(w/c)^4 q_2 \quad [10^{-6}/\text{MPa}] \quad (8)$$

$$q_4 = 20,3(a/c)^{-0,7} \quad [10^{-6}/\text{MPa}] \quad (9)$$

Tyto rovnice jsou ovšem pouze slepým odhadem. Hlavní síla modelu spočívá v možnosti kalibrace těchto parametrů na základě experimentu, kde i pro relativně krátkou dobu trvání měření může být docíleno vynikající shody se skutečným chováním konstrukce.

Solidifikační teorie nahrazuje vliv stárnutí na poddajnost a namísto toho pracuje s funkcí poddajnosti přímo závislé na délce zatížení $\Phi(t - t')$ a se členem $v(t)$, který je přímo závislý na stáří betonu [23].

$$J(t, t') = \frac{1}{v(t)} \dot{\Phi}(t - t') \quad (10)$$

Konkrétně využívaná funkce $v(t)$ je závislá na konstantních parametrech a jediné proměnné, kterou je čas, a má tvar

$$v(t) = \frac{1}{\frac{q_3}{q_2} + \left(\frac{\lambda_0}{t}\right)^m}. \quad (11)$$

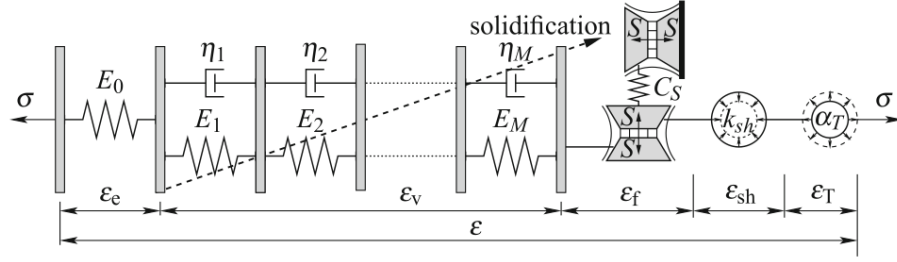
Přetvoření pak lze spočítat podle rovnice

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t, t') d\sigma(t'). \quad (12)$$

Numerická implementace do výpočetního modelu je podrobněji popsána v [3, s. 477].

Podle teorie mikropředpětí se v betonu objevuje další napětí, které není spojeno s vnějším zatížením. Jeho hodnota dosahuje výrazně vyšších hodnot než je pevnost betonu. V mikrostruktuře betonu se vyskytuje velké množství mikropórů a kapilár a molekuly vody nebo rostoucí produkty hydratace vytváří v mikropórech tlak a působí na stěny těchto mikropórů. Vzniklá síla musí být vykompenzována tahovou silou v okolní struktuře betonu nebo přímo můstky, které spojují stěny jednoho mikropóru.

Samotný model potom využívá upravený solidifikující Kelvinův řetězec. Pro působící napětí je efektivní viskozita funkcí mikropředpětí S podle vztahu (13). Viskozita časem



Obrázek 14: Reologické schéma modelu MPS s elastickým prvkem, solidifikujícím kelvinovým řetězcem, prvkem zohledňujícím mikropředpětí, vlivem smrštění od vysychání a vlivem změny teploty [22].

klesá a tím dochází k nárůstu deformace od dotvarování.

$$\dot{\varepsilon}_f = \frac{\sigma}{\eta(S)} \quad (13)$$

$\eta(S)$ je viskozita závislá na mikropředpětí a lze ji vyjádřit pomocí rovnice

$$\frac{1}{\eta(S)} = cpS^{p-1}, \quad (14)$$

kde jsou c i p kladné konstanty a zároveň $p > 1$, protože $\eta(S)$ je funkcí klesající. Stěžejní vlastností této teorie je relaxace mikropředpětí, což definuje rovnice

$$\dot{S} + c_0 S^p = -c_1 \frac{\dot{h}}{h} \quad (15)$$

v závislosti na vlhkosti a její změně, kde parametr c_0 odpovídá součinu parametrů c a p s parametrem C_s , který odpovídá tuhosti pružiny dle Obr. 14.

$$c_0 = C_s cp \quad (16)$$

Podle rovnice (10) lze za pomoci parametrů q vyjádřit derivaci poddajnosti podle [23] jako

$$\dot{j}(t, t') = \frac{n(q_2 \lambda_0^m t^{-m} + q_3)}{(t - t') + \lambda_0^n (t - t')^{1-n}} + (p - 1)c_0 q_4 S^{p-1}(t) \quad (17)$$

s využitím parametrů λ_0 , m a n , což jsou empirické konstanty. Následnou integrací je získáno vyjádření poddajnosti s příspěvkem integrační konstanty q_1 , která tvoří v obecné rovnici samostatný člen. Zajišťuje tak konstantní složku poddajnosti odpovídající okamžitě deformaci.

Mikropředpětí S lze vyjádřit v závislosti na parametru q_4 jako

$$S = [(p - 1)c_0 q_4 \eta]^{-1/(p-1)} \quad (18)$$

a jeho derivaci jako

$$\dot{S} = -(c_0 q_4)^{-1/(p-1)} [(p-1)\eta]^{-1/(p-1)} \dot{\eta}. \quad (19)$$

Rychlost smrštění a změnu vlhkosti spojuje v čase konstantního parametru k_{sh} podle rovnice

$$\dot{\epsilon}_{sh} = k_{sh} \dot{h}. \quad (20)$$

4.2 Materiálový model pro transport vlhkosti

Pro numerický popis problému transportu vlhkosti byl použit model Bažant-Najjar. Tento model pracuje s nelineární závislostí difuzivity na relativní vlhkosti. Řídící rovnice pro transport vlhkosti má tvar

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (C(h)\nabla h), \quad (21)$$

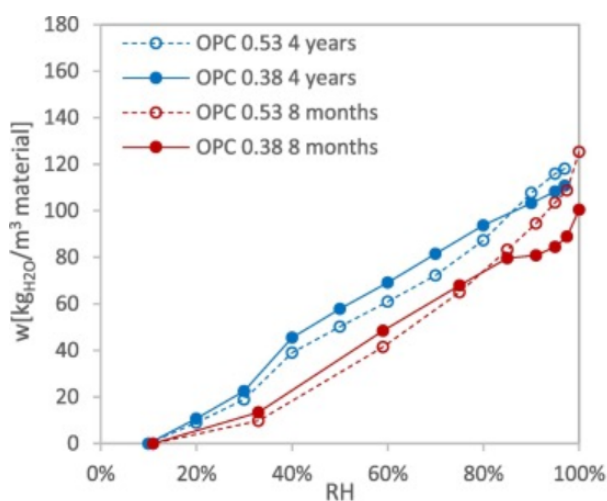
kde je ∇h gradient relativní vlhkosti a $C(h)$ je difuzivita v závislosti na relativní vlhkosti. Tato závislost je vyjádřena rovnicí níže a je charakterizována čtyřmi parametry. Dobře vystihuje zejména chování materiálů na bázi cementu. Zde je tato závislost značně nelineární a lze ji vyjádřit jako

$$C(h) = C_1 \left(\alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^n} \right), \quad (22)$$

kde C_1 je difuzivita při plném nasycení, h_c je relativní vlhkost při které dosahuje difuzivita své střední hodnoty, α_0 je poměr mezi minimální a maximální difuzivitou, n je bezrozměrný exponent a h je relativní vlhkost v pórech. Podle fib Model Code 2010 [5] lze přibližně volit parametry $\alpha_0 = 0,05$, $h_c = 0,8$, $n = 15$ a C_1 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] podle rovnice

$$C_1 = \frac{10^{-8}}{f_{cm} - 8}, \quad (23)$$

kde f_{cm} [MPa] značí válcovou pevnost betonu v tlaku. Difuzivita je do dalších výpočtů použita v jednotkách [$\text{mm}^2 \text{den}^{-1}$]. V modelu transportu vlhkosti se dále definuje parametr *IsothermType* upravující průběh sorpční izotermy, tedy závislosti mezi relativní vlhkostí v pórech betonu a obsahem vody v materiálu. Desorpční izoterma popisuje vysychání, zatímco adsorpční izoterma popisuje opačný proces. V tomto případě je uvažována lineární desorpční izoterma, čímž je vytvořena pouze zanedbatelná nepřesnost [3, s. 292]. To vyplývá i z výzkumu N. Olsson a kol. [24] podle Obr. 15. V tomto článku je prezentován průběh desorpční izotermy v závislosti na složení pojiva, vodního součinitele a stáří vzorku. Při opačném jevu, tedy zvyšování relativní vlhkosti v betonu, by se adsorpční izoterma od lineární aproximace vzdalovala značně [3, s. 292] a nebylo by ji tak možné použít.



Obrázek 15: Desorpční izoterma v závislosti na stáří betonu a vodním součiniteli při použití běžného portlandského cementu (zkratka OPC) [24].

Okolní podmínky jsou pro tuto práci idealizovány a mají při simulacích konstantní průběh. Vnější teplota je uvažována 20 °C a relativní vlhkost nejčastěji 50 %. Pro přestup vlhkosti do okolí je použita smíšená okrajová podmínka

$$J_h = f \cdot (h_{env} - h), \quad (24)$$

kde J_h [mm den⁻¹] značí tok přes hranici, f [mm den⁻¹] je součinitel přestupu a také pátý a poslední kalibrovaný parametr pro model transportu vlhkosti. h je relativní vlhkost a index env značí okolní prostředí. Parametr k_{sh} , který spojuje ztrátu relativní vlhkosti vzorku a tomu odpovídající deformaci, byl určen podle konečné hodnoty smrštění. Závislost je zde lineární a spojuje změnu poměrné deformace se změnou relativní vlhkosti. Propojuje tak numerický model MPS s modelem Bažant-Najjar.

Posledním zásadním parametrem je kapacita k , která odpovídá sklonu desorpční izotermy. Propojuje tak relativní vlhkost a množství vodní páry v pórech betonu.

5 Kalibrace modelů a analýza jednostranného vysychání

Jako referenční jsou pro modelování vývoje smrštění a dotvarování použity výsledky pokusu publikovaného v článku od Anthony H. Bryanta a Chayatita Vadhanavikkita z roku 1987 [25]. Tento článek ukazuje znatelné nepřesnosti mezi skutečným vývojem smrštění a predikčním modelem ACI 209 [26], kdy je skutečné chování konstrukce odchýleno od tohoto modelu na stranu nebezpečnou. Tímto byl také osvětlen důvod nadměrného prohýbání některých mostů na Novém Zélandu.

5.1 Kalibrace modelu pro dotvarování

Pokus jako takový simuloval nekonečnou desku tloušťky od 100 mm do 400 mm a nekonečně dlouhý trám čtvercového průřezu o délce strany od 100 mm do 400 mm. Toho bylo docíleno zapečetěním kvádrových vzorků buď se dvěma protějšími vysychajícími povrchy jako model desky, nebo čtyřmi vysychajícími a dvěma protějšími zapečetěnými povrchy představující z pohledu vysychání nekonečný trám. Jako nepropustná vrstva byly použity hliníkové folie, které se ke vzorku přilepily pomocí epoxidu.

Experiment byl rozdělen na dvě skupiny vzorků. Na prvních se měřil vliv vysychání na smrštění. Ve druhé skupině byly všechny vzorky zatíženy rovnoměrným napětím 7 MPa. Některé byly i zapečetěny, aby došlo k omezení vlivu vysychání na celkovou deformaci. Stáří vzorků při zatížení se lišilo a bylo 8, 14, 21, 28, 84 nebo 182 dnů. Vzorky byly uloženy v místnosti s konstantní teplotou a vlhkostí. Teplota byla po celou dobu udržována na hodnotě 20 °C. Vzorky byly odbedněny 3. den a okolní vlhkost byla dále udržována na hodnotě 95 %. Ve stáří betonu 8 dnů byla okolní vlhkost snížena na hodnotu 60 %. Následně byly některé vzorky postupně zatěžovány a jejich osová smrštění pečlivě zaznamenávána. Autogenní smrštění bylo při tomto experimentu také měřeno.

Čerstvá směs betonu byla v přepočtu na 1 m³ složena z 1985 kg kameniva, 390 kg portlandského cementu a 183 kg vody bez dalších aditiv. Válcová pevnost ve 28 dnech byla naměřena 50,1 MPa a modul pružnosti 29,8 GPa.

Následující rovnice dávají slepou predikci parametrů q modelu B3 a pomocí nich lze predikovat i chování betonu tohoto složení.

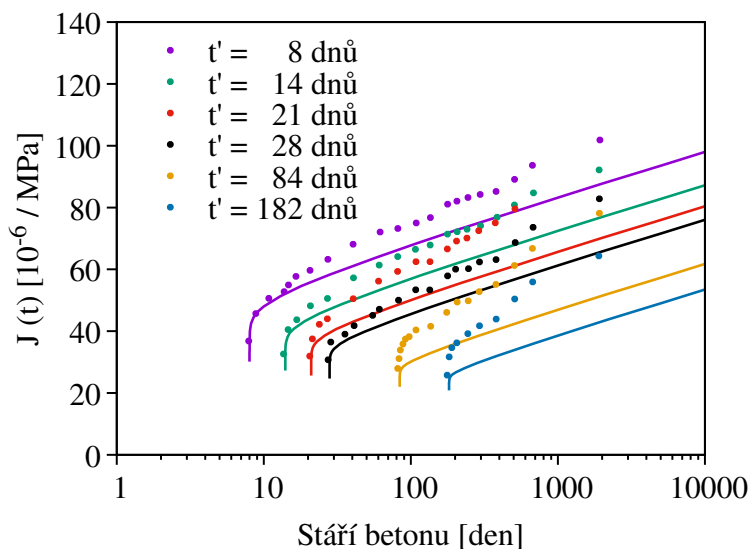
$$q_1 = 126,77 \times 50,1^{-0,5} = 17,9 \times 10^{-6}/\text{MPa} \quad (25)$$

$$q_2 = 185,4 \times 390^{0,5} \times 50,1^{-0,9} = 108,1 \times 10^{-6}/\text{MPa} \quad (26)$$

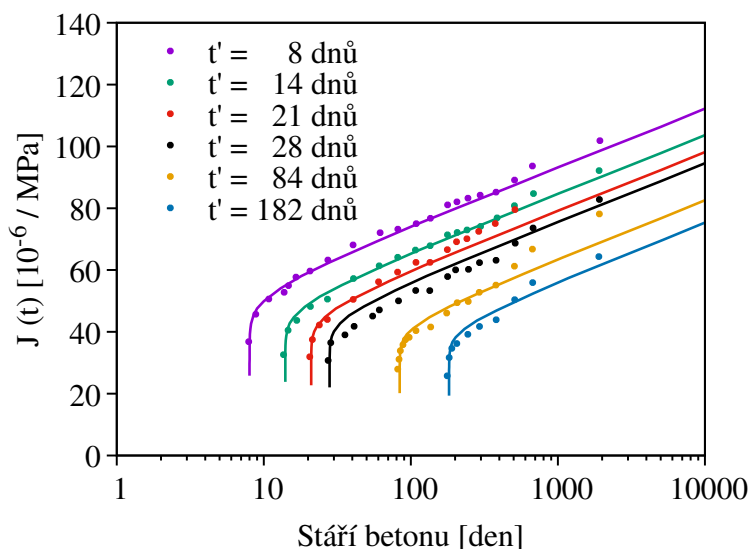
$$q_3 = 0,29 \times (183/390)^4 \times 108,1 = 1,5 \times 10^{-6}/\text{MPa} \quad (27)$$

$$q_4 = 20,3 \times (1985/390)^{-0,7} = 6,5 \times 10^{-6}/\text{MPa} \quad (28)$$

Model s těmito parametry s ohledem na experiment nejlépe postihuje dotvarování vzorku zatíženého ve stáří 8 dnů a dotvarování všech vzorků podceňuje. U vzorku zatíže-



Obrázek 16: Vývoj funkce poddajnosti dle slepé predikce na základě složení čerstvé betonové směsi a válcové pevnosti ve 28 dnech.



Obrázek 17: Vývoj funkce poddajnosti podle kalibrovaného modelu a shoda s experimentem.

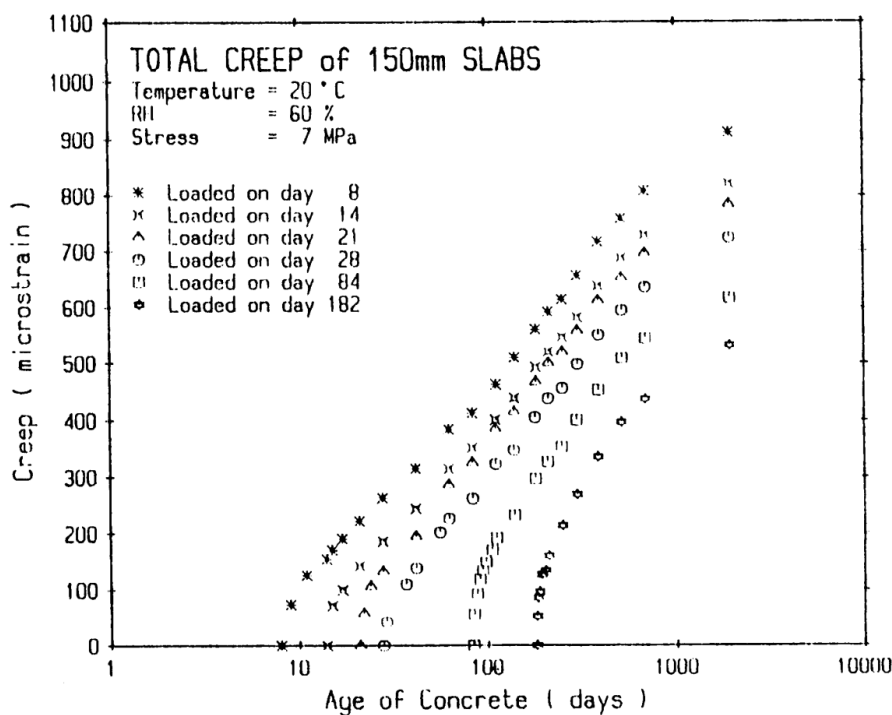
ného ve stáří 182 se model liší od skutečného dotvarování vzorku o více než 50 %, což je patrné z Obr. 16.

Na Obr. 17 je zobrazena shoda experimentálních dat s výstupy z numerického modelu po nakalibrování parametrů q . Sad parametrů, které vedou k podobnému vývoji základního dotvarování, je hned několik. Nejvýraznější rozdíly v modelech tak tvoří

elastická deformace a vývoj v prvních dnech. Parametry byly převzaty z [27] 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 $q_4 = 6,5 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$.

Druhou část dotvarování, tedy dotvarování od vysychání, charakterizuje parametr k_3 . Jeho hodnota byla určena jako $k_3 = 25$. Parametry modelu pro dotvarování zůstávají v celé práci stejné.

Relativní přetvoření vzorku vysychajícího jako deska zatíženého tlakem 7 MPa při relativní vlhkosti okolního prostředí 60 % znázorňuje originální graf zobrazený na Obr. 18. Od přetvoření je zde odečtena elastická deformace, a tak popisuje pouze dlouhodobé děje v betonu. Při porovnání s Obr. 21 je vidět, že část deformace nezávislá na působícím napětí představuje v pozorovaném čase v zásadě dominantní složku časově závislé deformace. V rámci experimentu bylo také publikováno smrštění nezatížených vzorků simulujících desky různých tloušťek. Jako referenční byla vybrána deska tloušťky 150 mm.



Obrázek 18: Originální graf poměrné deformace vzorku zatíženého tlakem 7 MPa, který reprezentuje nekonečnou desku tloušťky 150 mm. Elastická deformace byla odečtena [25].

5.2 Kalibrace modelu pro smrštění

Výchozí hodnotou pro kalibraci modelu smrštění od vysychání byla osová deformace nezatížených vysychajících betonových vzorků. Při experimentu je standardně měřena vzdálenost horního povrchu vysychajícího vzorku od pevného bodu. Tato vzdálenost v čase vlivem smrštění narůstá a k jejímu měření mohou být použity například laserové, ultrazvukové i mechanické přístroje. Přetvoření může být také měřeno tenzometry nebo jinými integrovanými metodami.

Členění sítě konečných prvků výpočetního modelu je po tloušťce desky shodné jak pro model mechaniky, tak pro transport vlhkosti s 60 prvky různých velikostí. U povrchu je síť zahuštěna a v kolmém směru je uvažován pouze 1 konečný prvek. Rozložení konečných prvků je znázorněno na Obr. 19. Časově je výpočet rozdělen na 284 časových kroků. Rozdíl smrštění modelu a experimentu byl porovnáván v 19 časových bodech se zohledněním váhových součinitelů pro dané časy měření. Rozdíl hodnoty smrštění byl do celkové odchylky přičten vždy ve druhé mocnině.



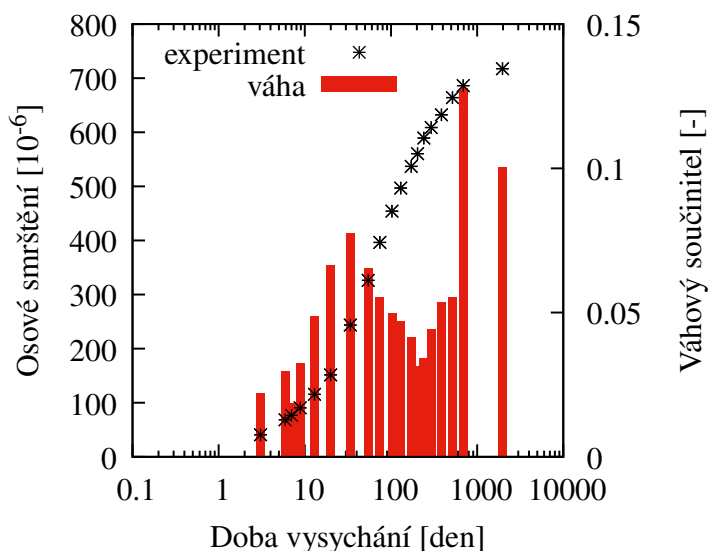
Obrázek 19: Síť konečných prvků modelu délky 150 mm a výšky 5 mm oboustranně vysychajícího. Dominantní rozměr reprezentuje tloušťku desky.

Hodnota váhového součinitele pro zohlednění odchylek byla uvažována podle délky polovin intervalů od předešlého po následující srovnávací čas na logaritmické stupnici a vydělena byla celkovou délkou vodorovné osy. Konkrétní hodnoty jsou znázorněny na Obr. 20. Při jemnějším časovém rozdělení výpočtu jsou jednotlivé hodnoty druhé mocniny odchylky smrštění do porovnání brány s menším součinitelem. Porovnávaná oblast začíná v čase první a končí v čase poslední porovnávané hodnoty. Celkový součet součinitelů je roven 1,0.

Pro správnou kalibraci problematiky transportu vlhkosti bylo nejprve nutné určit parametr k_{sh} , který propojuje vliv ztráty vlhkosti a velikost smrštění. Jeho hodnota byla identifikována jako 0,0019 a to podle konečné hodnoty smrštění. Ta je dosažena při vyrovnání relativní vlhkosti v pórech betonu s relativní vlhkostí okolního prostředí.

Parametry funkce difuzivity byly kalibrovány automaticky za použití programu psaného v jazyce Python 3, který prošel všechny povolené kombinace parametrů podle tabulky níže a stanovil odchylku na základě normované druhé mocniny rozdílu hodnot smrštění v předepsaných časech. Program dále seřadil kombinace parametrů od nejlepší shody po nejhorší. Délka analýzy se pohybovala přibližně okolo 10 hodin.

Vzhledem k tomu, že bylo k dispozici pouze omezené množství dat, pro účely další identifikace byla jako referenční přejata sada parametrů s nejlepší shodou s experimentem označovaná na obrázcích jako „ref“. Není tak možné dále potvrzovat správnost nebo chybu predikce, jen odchylku od referenčního řešení. To má vypovídající hodnotu zejména



Obrázek 20: Hodnota součinitele zohledňující různé časové kroky experimentu.

Tabulka 1: Parametry pro model transportu vlhkosti.

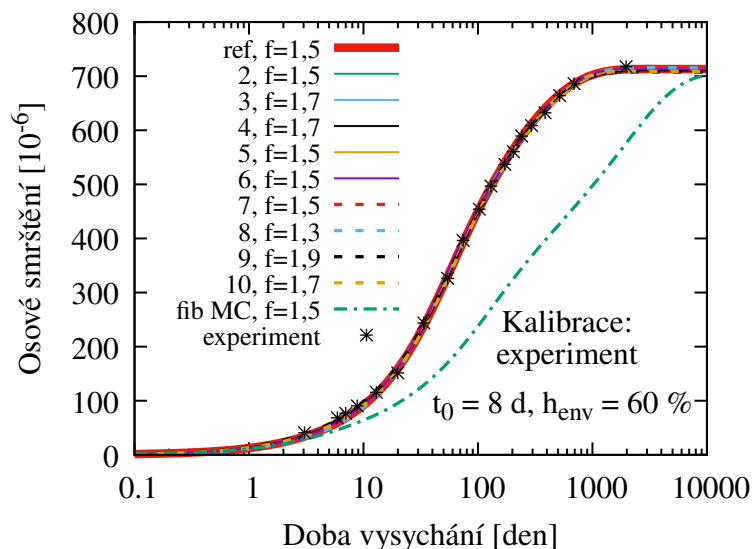
	C_1 [mm ² /den]	α_0 [-]	h_c [-]	n [-]	f [mm/den]
min.	35	0,02	0,68	6	1,1
max.	80	0,23	0,80	20	2,3
krok	5	0,03	0,02	2	0,2
ref.	60	0,05	0,74	6	1,5
MC 2010 [5]	20,5	0,05	0,8	15	—

určením smysluplnosti případných experimentů. V následujících kapitolách je modelován vliv různých okrajových podmínek a stáří betonu při začátku vysychání na shodu predikčních dat.

Teoretické podmínky experimentu je ale nutné přizpůsobit možnostem laboratoří. Ideálních podmínek pro experiment může být dosaženo v klimatických komorách, boxech nebo místnostech s přesnou konstantní teplotou a relativní vlhkostí. Pokud toto není možné, vzorky mohou být ovlivněny výkyvy z předepsaných hodnot.

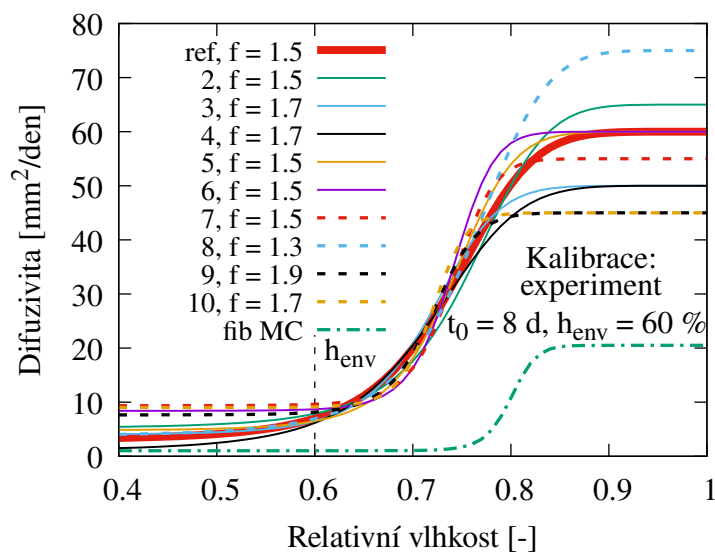
5.3 Identifikace parametrů podle smrštění a úbytku hmotnosti

Identifikace parametrů modelu podle výsledků získaných pro referenční sadu parametrů probíhaly pro velikost oboustranně vysychající desky od 75 do 300 mm. Uvažovaná vlhkost okolního prostředí byla volena mezi 30 % a 70 % a stáří betonu při začátku vysychání odpovídalo 8 nebo 28 dnům. Identifikované sady parametrů byly zobrazeny pomocí funkce difuzivity a na jejich základě byla provedena predikce chování 75 mm tlusté jed-

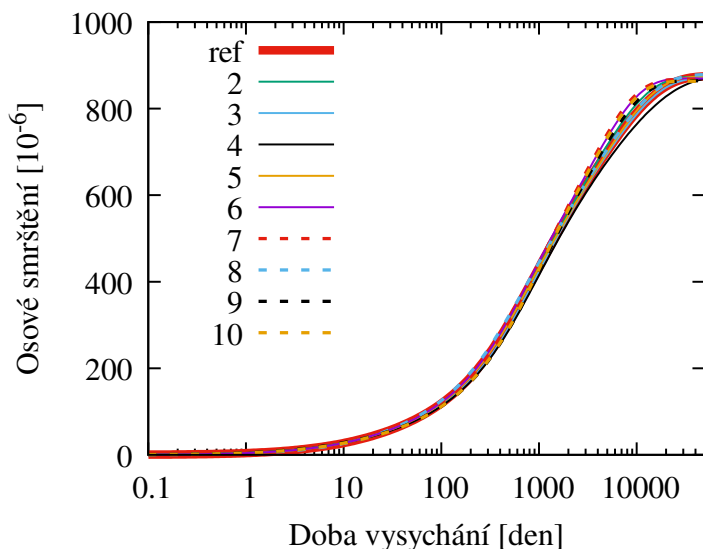


Obrázek 21: Smrštění podle experimentu a shoda s nejlepšími sadami parametrů podle kalibrace, $t_0 = 8$ dnů a $h_{env} = 60\%$. Graf je doplněn o smrštění model s doporučenou sadou parametrů podle fib Model Code 2010. Tato sada parametrů využívá hodnotu součinitele přestupu f [mm/den] shodnou s referenční sadou.

nostranně vysychající desky, která je modelována obdobně jako na Obr. 19. Pomocí bodů *slavenode* je zaručeno zachování rovinnosti průřezu. Tloušťka 75 mm fakticky vystihuje polovinu původní 150 mm tlusté desky.



Obrázek 22: Závislost difuzivity na relativní vlhkosti v pórech betonu pro sady parametrů zobrazené na Obr. 21. V legendě je uveden součinitel přestupu f [mm/den]. Graf doplňuje funkce difuzivity podle doporučení fib Model Code 2010.



Obrázek 23: Predikce smrštění pro sady parametrů s nejlepší shodou vůči experimentu na modelu 600 mm tlusté symetricky vysychající desky. Čas zahájení vysychání je 28 dnů a relativní vlhkost okolního prostředí 50 %.

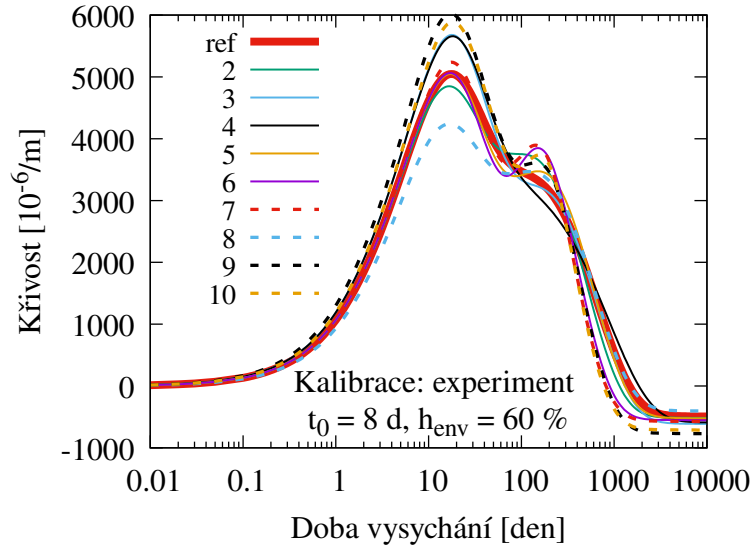
Identifikované sady parametrů mohou být zobrazeny několika způsoby. Nejvhodnější se zdá být vykreslení funkce difuzivity v závislosti na relativní vlhkosti v pórech betonu. Kalibrované 4 parametry byly pro funkci difuzivity doplněné o součinitel přestupu f dle rovnice (24). Celkový počet povolených kombinací parametrů dosahuje 31 360.

Pro ověření shody chování modelu pro sady získané identifikací přímo z experimentu, byla vytvořena predikce smrštění symetricky vysychající desky výrazně větší tloušťky, konkrétně 600 mm. Jak je vidět na Obr. 23, sady s nejlepší shodou pro vývoj smrštění 150 mm tlusté desky z experimentu dávají přijatelnou shodu predikovaného vývoje smrštění i pro 600 mm tlustou symetricky vysychající desku. Výraznější odchylky se začínají objevovat až po čase vysychání 5000 dnů.

Údaje o chování vzorku, ze kterých je možno v tuto chvíli vycházet, jsou známá ztráta hmotnosti a vývoj deformace. Jelikož pro ztrátu hmotnosti chyběla experimentální data a nebylo možné ji nijak kalibrovat, byla zvolena obvyklá hodnota koeficientu $k_{apa} = 100 \text{ kg/m}^3$ [3], který udává sklon desorpční izotermy.

Pro sady parametrů s nejlepší shodou při identifikaci je vždy vytvořena predikce chování jednostranně vysychající desky a na základě shody chování s referenčním modelem je hodnocena smysluplnost metody kalibrace.

Obr. 21 ukazuje smrštění sad parametrů s nejlepší shodou s referenční sadou. Doplněn je vývoj smrštění podle doporučení MC 2010. Získané funkce difuzivity jsou zobrazeny na Obr. 22 a Obr. 24 ukazuje vývoj křivosti, který je predikován na základě těchto sad



Obrázek 24: Predikce vývoje křivosti desky tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a začátku vysychání $t_0 = 28$ dnů. Vzhled a označení křivek koresponduje s Obr. 21 a 22.

parametrů. Křivost lze vypočítat podle vztahu

$$\kappa = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}. \quad (29)$$

Predikce je ale vytvořena za odlišných podmínek než experiment. Jak je z grafu patrné, průběh křivosti pro jednotlivé sady parametrů má značné odchylky oproti referenční sadě nejen pro maximální hodnotu, ale v celém svém průběhu. Následující kalibrace si dávají za cíl tuto odchylku snížit a získat lepší shodu s referenční sadou.

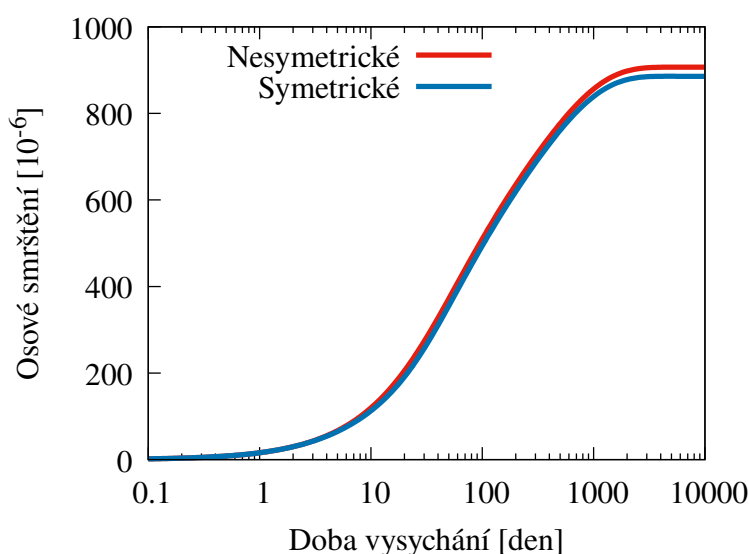
Pro odlišné podmínky už identifikace parametrů z experimentu nevychází, ale váže se pouze na referenční sadu parametrů. Fakticky se tak úloha identifikace mnoho nemění, jen jsou k dispozici data ze širší škály podmínek, při kterých by mohl být experiment teoreticky proveden. Taktéž jsou zde k dispozici hodnoty smršťení od okamžiku zahájení vysychání, což u experimentů s mnoha vzorky také nemusí být pravidlo. První data pak mohou být reálně k dispozici až po několika dnech jako například [25].

V modelu může být zohledněn i vliv vzniku tahových trhlin. Válcová pevnost v tlaku byla ve 28 dnech naměřena 50,1 MPa a podle obecného pravidla, že tahová pevnost odpovídá přibližně 1/10 tlakové pevnosti, může být tahová pevnost v tomto případě odhadnuta na 5 MPa. Následující tabulka ukazuje, jak moc ovlivní hodnota tahové pevnosti betonu odchylku v predikci vývoje křivosti pro referenční sadu parametrů. Měřena je maximální absolutní odchylka křivosti při začátku vysychání v čase 28 dnů a relativní vlhkosti okolního prostředí 50 %. Hodnota lomové energie G_f je zvolena jako 100 N/m.

Jak je z tabulky patrné, tahová pevnost betonu nemá na odchylku predikce v tomto případě žádný vliv. Dále je tedy počítáno s modelem, který neumožňuje vznik trhlin a

Tabulka 2: Vliv tahové pevnosti betonu na velikost maximální odchyly v predikci vývoje křivosti.

Tahová pevnost betonu [MPa]	Maximální odchylna křivosti [$\times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$]
1,0	440,10444
2,0	78,020560
3,0	1,0881867
4,0	0,0000000
5,0	0,0000000

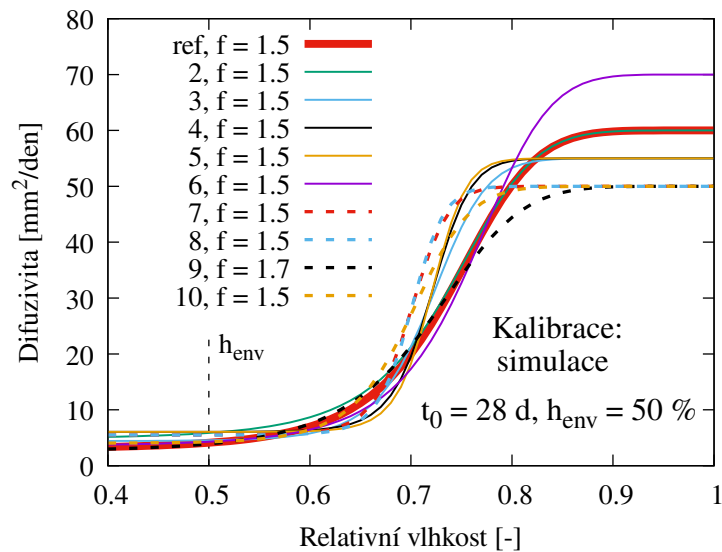


Obrázek 25: Rozdílné smrštění symetricky a nesymetricky vysychajícího vzorku vlivem odlišné historie napětí v průřezu. Čas zahájení vysychání je 28 dnů a relativní vlhkost okolního prostředí 50 %.

uvažuje pouze viskoelastické chování betonu.

Smrštění oboustranně vysychajícího betonu a jednostranně vysychajícího betonu poloviční tloušťky vykazuje drobnou odchylnu, jak je vidět na Obr. 25. Deformace nesymetricky vysychajícího vzorku dosahuje vyšší konečné hodnoty. Důvodem je to, že u nesymetricky vysychajícího vzorku dochází k natočení (změně křivosti) a v tlačené části betonu s vyšší relativní vlhkostí nedosahuje tlakové napětí takových hodnot jako v případě symetrického vysychání. Beton v čase zvyšuje svůj modul pružnosti a právě spojením těchto dvou vlastností dojde k vytvoření zmíněného rozdílu.

Základní podmínky pro predikci vysychání byly nastaveny tak, aby se blížily laboratorním. Začátek vysychání je volen při stáří betonu 28 dnů, teplota okolního prostředí 20°C a relativní vlhkost 50 %. Při těchto podmínkách byla opět provedena srovnávací identifikace parametrů. Funkce difuzivity pro získané nejlepší sady parametrů jsou vykresleny na Obr. 26. Ty dávají oproti sadám parametrů z předchozí kalibrace horší shodu



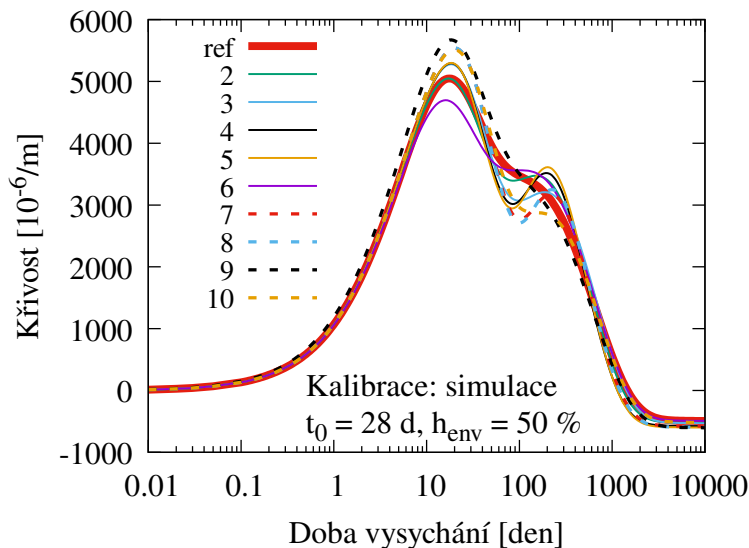
Obrázek 26: Funkce difuzivity, které dávají nejlepší shodu při simulaci osového smrštění symetricky vysychající desky ($D = 150 \text{ mm}$, $h_{\text{env}} = 50 \%$, $t_0 = 28 \text{ dnů}$) vůči referenční sadě parametrů.

pro úroveň relativní vlhkosti mezi 60 % a 75 %, ale zmenšují odchylku od referenčního průběhu pro vyšší úroveň relativní vlhkosti. Graf predikce vývoje křivosti znázorněný na Obr. 27 pak dává odchylky citelně menší.

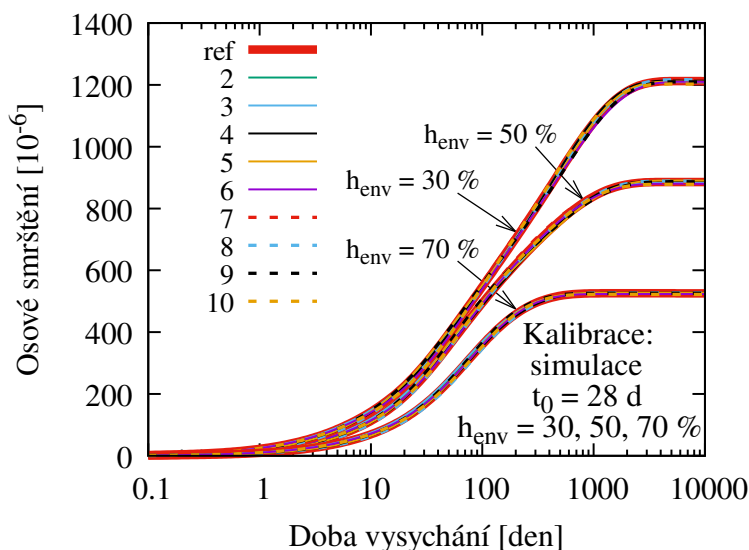
Vytvořené predikce vývoje křivosti ukazují, že identifikace nejlepších sad parametrů, při možnosti porovnání pouze úbytku hmotnosti a osově deformace, musí vycházet z kombinace výsledku z více kalibrací. Přesnost predikce na základě identifikovaných sad parametrů by také mohly zlepšit doplňující měření jako například měření vlhkosti v určitém bodě průřezu. Jako první byl prozkoumán vliv vlhkosti okolního prostředí na kalibraci. Byly tak vytvořeny simulace s odlišnou okolní vlhkostí a pro každou vlhkost byla provedena identifikace parametrů. Výsledné nejlepší sady parametrů byly získány jako ty s nejmenším součtem normovaných odchylek pro všechny tři tyto modely. Normování bylo provedeno vždy vůči druhé mocnině konečné hodnoty smrštění pro každou vlhkost okolního prostředí zvlášť.

Nejlepší sady parametrů dávají dobrou shodu smrštění pro úroveň relativní vlhkosti okolního prostředí 30 %, referenčních 50 % i 70 %. Jak je vidět na Obr. 30, křivky predikovaného vývoje křivosti mají nižší celkovou odchylku od referenčního řešení oproti předchozím grafům. Celkově tak kromě maximální hodnoty křivosti dobře vystihují vzorek v čase do 5. dne a poté od 100. dne od začátku vysychání až po ukončení procesu vysychání. Referenční sada zde po celou dobu kopíruje jakýsi střed mezi predikčními křivkami.

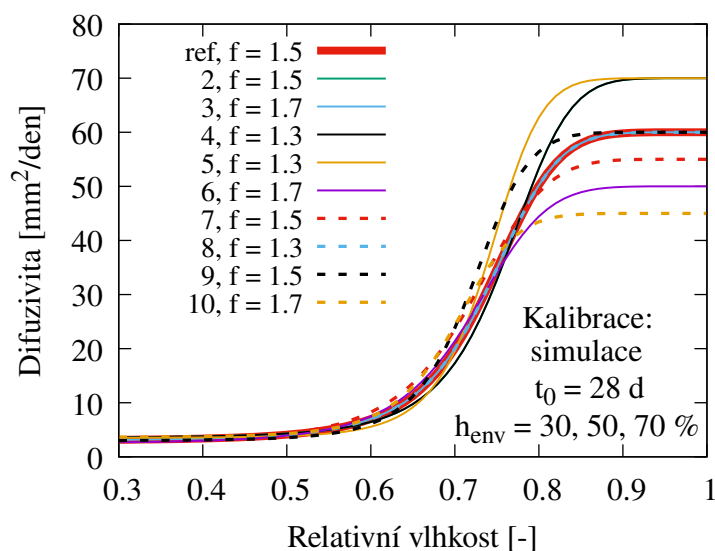
Co se týče funkce difuzivity, která je zobrazena na Obr. 29, ta vykazuje větší odlišnosti pro vyšší relativní vlhkost, ale při relativní vlhkosti pod úrovní 75 % mají všechny funkce velmi podobný průběh. Součinitel přestupu se zde pohybuje mezi 1,3 a 1,7 mm den^{-1} . U předchozí kalibrace byla jen 1 ze zmíněných hodnot tohoto součinitele



Obrázek 27: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a stáří betonu $t_0 = 28$ dnů. Typy čar a hodnoty materiálových parametrů korespondují s Obr. 26.



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



Obrázek 29: Funkce difuzivity, které dávají nejlepší shodu při simulaci osového smrštění současně pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí, konkrétně $h_{\text{env}} = 30, 50, 70 \%$, $D = 150 \text{ mm}$ a $t_0 = 28 \text{ dnů}$.

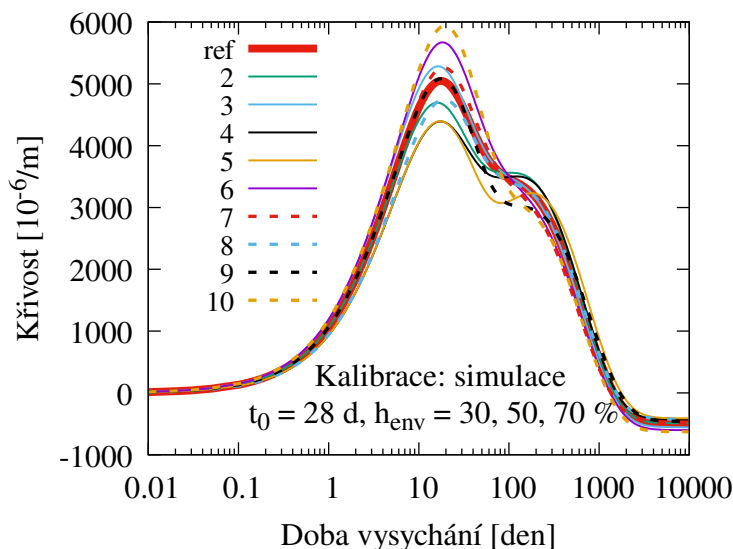
jiná než $1,5 \text{ mm den}^{-1}$.

Je zde pro porovnání zobrazen i vliv kalibrace na základě průběhu smrštění a současně úbytku hmotnosti. Normovaná odchylka pro průběh smrštění i ztráty hmotnosti je brána se stejnou váhou. Výsledná predikce je zobrazena na Obr. 32. Predikce vycházející pouze ze znalosti osového smrštění dosahují lepší shody s referenčními hodnotami.

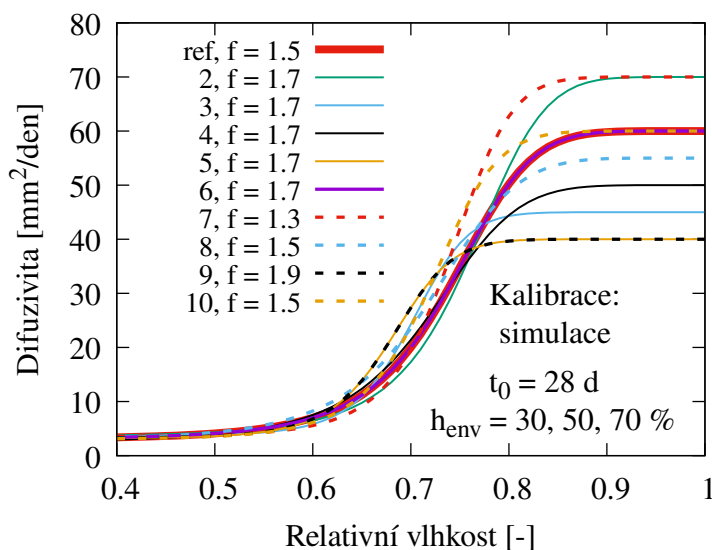
Zohlednění průběhu osového smrštění a současně ztráty hmotnosti tedy zhoršuje shodu v predikci. Grafy difuzivity jsou pro obě tyto kalibrace velmi podobné. V predikci vývoje křivosti dosahuje odchylka větších hodnot a pro většinu z 9 sad je nadhodnocena maximální hodnota křivosti vůči referenční sadě.

Sady parametrů vzešlé z prvních dvou kalibrací na základě smrštění, vykazují velmi dobrou shodu v jeho průběhu. Co se týče predikovaného vývoje křivosti při $t_0 = 28 \text{ dnů}$ a $h_{\text{env}} = 50 \%$, odchylky jsou značné. Při kontrolní identifikaci parametrů vůči referenční sadě za podmínek podle experimentu, tedy $t_0 = 8 \text{ dnů}$ a $h_{\text{env}} = 60 \%$, byla dosažena výrazně lepší shoda pro vývoj křivosti, zejména v oblasti maximální křivosti. To dává jasný signál, že z identifikace při odlišných podmínkách, případně kombinací více identifikací, mohou vzejít přesnější data.

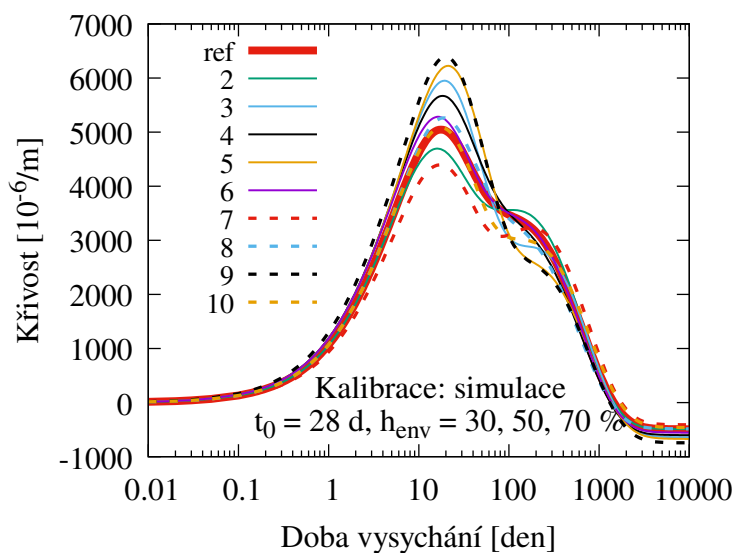
Další, co může být při kalibraci pozměněno, je velikost vzorku. Proto byla provedena identifikace parametrů pro tři různé velikosti vzorků současně obdobně, jako tomu bylo u různých vlhkostí okolního prostředí v předchozí kalibraci. K referenční 150 mm tlusté desce byly přidány desky tloušťky 75 a 300 mm. Porovnávaná hodnota byla s ohledem na předchozí zjištění pouze osově smrštění. Nejlepší sady parametrů u vzorků velikosti 75 a 150 mm byly velmi podobné, zatímco pro vzorek desky tloušťky 300 mm se lišily. Výsledné sady parametrů jsou zobrazeny pomocí funkce difuzivity na Obr. 34. Ty nevy-



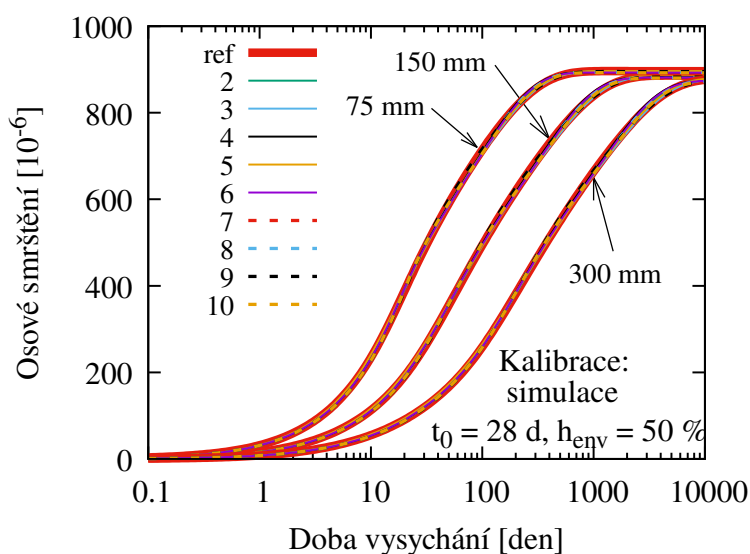
Obrázek 30: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 28$ dnů. Typy čar a materiálové parametry korespondují s identifikací parametrů při 3 různých úrovních h_{env} (Obr. 28 a 29).



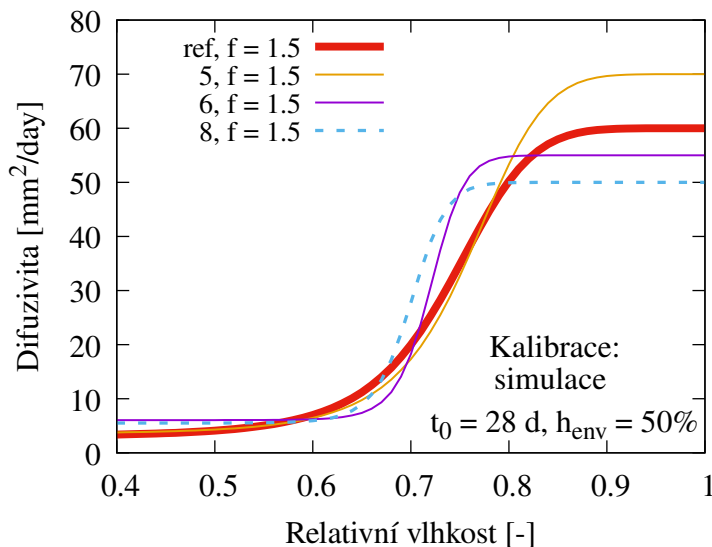
Obrázek 31: Funkce difuzivity, které dávají nejlepší shodu při simulaci osového smrštění a zároveň **ztráty hmotnosti** současně pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí, konkrétně $h_{\text{env}} = 30, 50, 70\%$, $D = 150$ mm, $t_0 = 28$ dnů.



Obrázek 32: Predikce vývoje křivosti pro desku tloušťky 75 mm vysychající pouze z jedné strany při $h_{\text{env}} = 50\%$ a stáří betonu $t_0 = 28$ dnů. Identifikace byla provedena na základě vývoje smrštění a **ztráty hmotnosti** pro 3 různé úrovně relativní vlhkosti okolního prostředí h_{env} (Obr. 31).



Obrázek 33: Nejlepší shoda pro osově smrštění vůči referenčnímu modelu pro symetricky vysychající desky tloušťky 75 mm, 150 mm a 300 mm při $h_{\text{env}} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dnů.



Obrázek 34: Funkce difuzivity, které dávají nejlepší shodu při simulaci osového smrštění symetricky vysychajících desek různé tloušťky ($h_{\text{env}} = 50\%$, $t_0 = 28$ dnů, Obr. 33). Vykrešleny jsou pouze nejvíce odlišné křivky.

kazují podobný nebo shodný průběh s referenčním grafem pro žádnou úroveň relativní vlhkosti.

U predikčního modelu tento způsob identifikace lépe vystihuje extrém křivosti, nicméně pouze jedna sada z 9 nejlepších podhodnocuje její chování, což zde není doloženo graficky. Zbylé sady dávají predikci extrému vyššího. Od doby vysychání kolem 50 dnů dává nižší odchylky od referenčního řešení kalibrace pro více relativních vlhkostí okolního prostředí. Pokud je pro predikční modely použita kalibrace s různou velikostí vzorků a současně různou okolní vlhkostí, výsledné sady dávají celkově horší shodu než při kalibraci na základě rozdílných vlhkostí okolního prostředí.

Z této kapitoly tedy vyplývá, že pokud je v experimentu měřeno osové smrštění a úbytek hmotnosti, tak predikce s lepší shodou je dosaženo bez zohlednění úbytku hmotnosti. Také je výhodné využít několika experimentů současně, zejména se v modelech ukázala být přínosná identifikace parametrů podle smrštění 3 stejně velkých vzorků, každý s jinou relativní vlhkostí okolního prostředí.

5.4 Identifikace parametrů podle vývoje křivosti

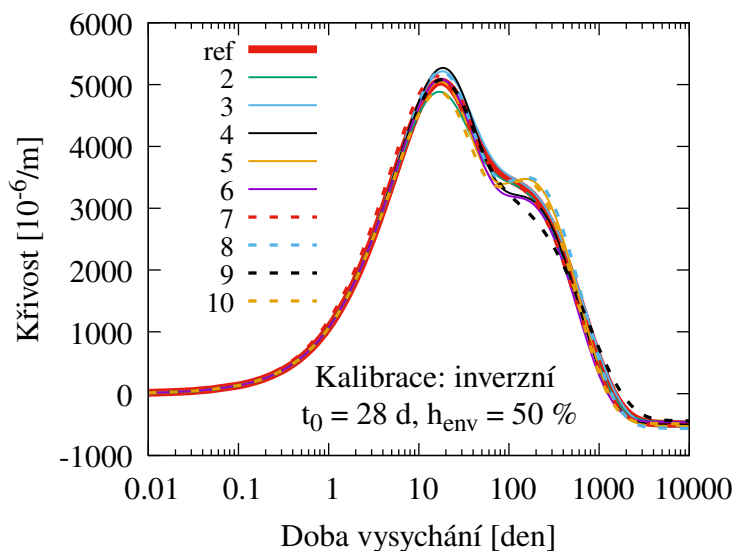
Parametry pro model vysychání mohou být identifikovány nejen za základě smrštění a ztráty hmotnosti, ale také například na základě vývoje křivosti. Experimentálně se křivost měří na prostě podepřených trámciích, kde délkový rozměr výrazně převyšuje rozměry příčné (např. $100 \times 100 \times 2000$ mm). Podíl na celkovém průhybu tak může mít nejen elastická deformace a dotvarování, ale také smrštění způsobené nerovnoměrným vysycháním a tím vzniklá křivost. Ta je na rozdíl od předchozích dvou deformací konstantní po celé délce nosníku. Získat ji lze po odečtení ostatních složek deformace, k čemuž mohou posloužit pomocné experimenty, což bylo popsáno dříve.

Na trámek mohou být osazena závaží nebo může být zatížen pouze vlastní tíhou. Dimenzován je tak, aby byl ve spodních vláknech zajištěn tah výrazně nižší než je tahová pevnost betonu. V případě trámku výše vypsanych rozměrů s podepřením v zanedbatelné vzdálenosti od konce trámku, tedy při rozpětí 2000 mm, a s objemovou hmotností betonu 23 KNm^{-3} se tahové napětí uprostřed rozpětí ve spodních vláknech pohybuje okolo 0,7 MPa. Se zvětšujícím se čtvercovým průřezem maximální napětí ve spodních a horních vláknech v absolutní hodnotě klesá.

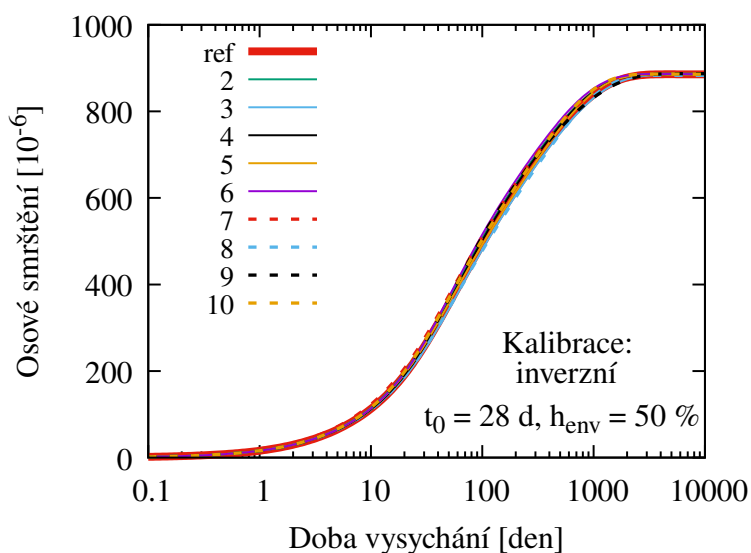
Tyto trámy mohou být zcela odkryté nebo částečně nebo úplně zapečetěné, aby se případně omezilo vysychání. Porovnává se potom průhyb uprostřed trámku v čase a také může být zaznamenáváno osově smrštění. Trámy tak mohou simulovat trámy při různých podmínkách nebo jednostranně a oboustranně vysychající desku v závislosti na množství a uspořádání vysychajících stran. V tomto případě by trámek měl vysychající stěnu pouze vrchní nebo spodní. Tím by se křivost způsobená jednostranným vysycháním mohla k deformaci vlivem elastického přetvoření a dotvarování přičítat nebo odečítat. V experimentu [16] byl vysychající povrch ten vrchní. Touto volbou se předejde nežádoucímu úniku vlhkosti tahovými trhlinami, které by mohly vzniknout u taženého povrchu. Stejně tak není dotvarování ovlivněno případnými trhlinami způsobenými smrštěním.

V rámci této kapitoly byly nejprve identifikovány sady parametrů s nejnižší normovanou odchylkou ve vývoji křivosti. Vývoj křivosti pro tyto sady parametrů je zobrazen na Obr. 35. Nižší normované odchylky nemůže být dosaženo kvůli předepsanému rozdílu dvou po sobě následujících hodnot pro každý parametr. Lepší shodu by zaručovalo jemnější rozložení hodnot parametrů. Pro tyto parametry je provedena kontrola smysluplnosti předchozí kalibrace, totiž zda sady parametrů s nejlepší shodou pro vývoj křivosti vykazují inverzně i dobrou shodu ve vývoji smrštění a úbytku hmotnosti. Při této kalibraci jsou zachovány hodnoty všech ostatních parametrů z předchozí kalibrace.

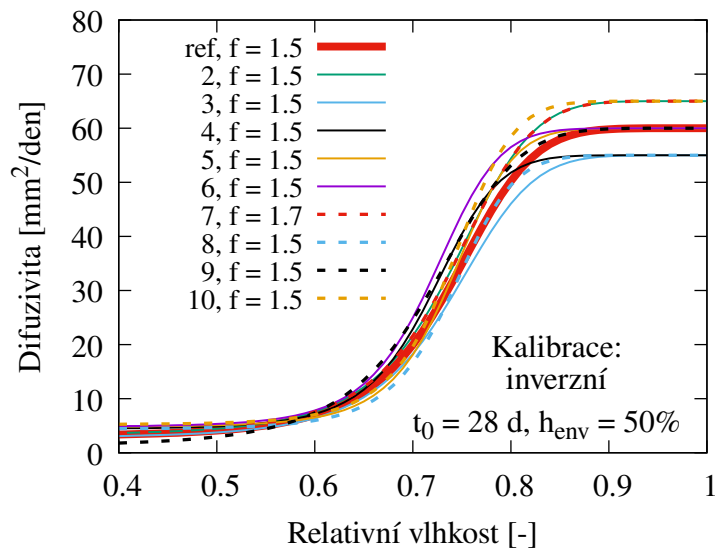
Shoda při této inverzní kalibraci je potvrzena na Obr. 36, kde je porovnáváno smrštění. Pro úbytek hmotnosti je taktéž dosaženo dobré shody. Funkce difuzivity podle Obr. 37 jsou velmi podobné a dávají velmi dobrou shodu s referenční sadou. Koreponduje jak sklon křivek, tak hodnota difuzivity pro vlhkost nad úroveň 90 %. Maximální hodnota difuzivity se oproti referenční sadě liší maximálně o 1 povolený krok ($5 \text{ mm}^2 \text{ den}^{-1}$) na obě strany.



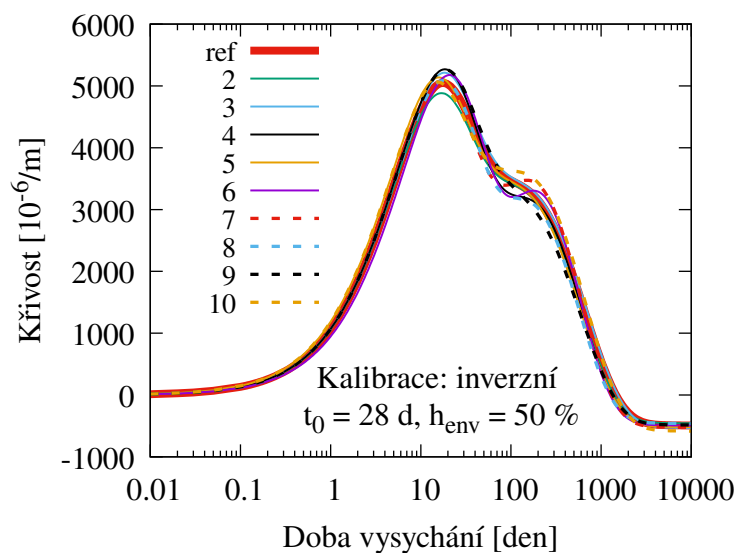
Obrázek 35: Vývoj křivosti pro sady parametrů, které vykazují nejmenší normovanou odchylku ve vývoji křivosti jednostranně vysychající desky tloušťky 75 mm při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů.



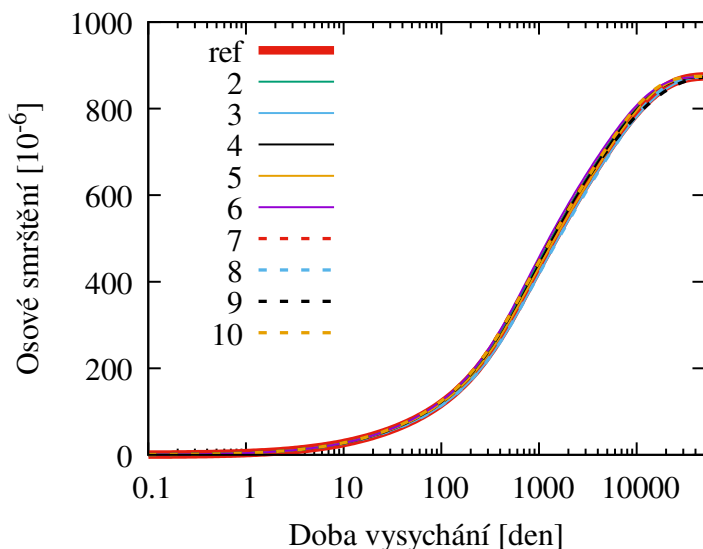
Obrázek 36: Predikce vývoje osového smrštění 150 mm tlusté desky vysychající symetricky při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů. Parametry byly kalibrovány inverzně na základě vývoje křivosti pro 75 mm tlustou desku jednostranně vysychající podle Obr. 35.



Obrázek 37: Funkce difuzivity, které byly kalibrovány inverzně a dávají nejlepší shodu pro vývoj křivosti 75 mm tlusté desky jednostranně vysychající ($h_{\text{env}} = 50\%$, $t_0 = 28$ dnů) získané ze simulace s referenční sadou parametrů.



Obrázek 38: Vývoj křivosti pro nejlepší sady parametrů získané podle kriteria maximální odchylky v porovnávaných časech při $h_{\text{env}} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dnů.



Obrázek 39: Predikce smrštění pro sady parametrů s nejlepší shodou ve vývoji křivosti na základě normované odchylky. Smrštění je modelováno pro 600 mm tlustou symetricky vysychající desku. Čas zahájení vysychání je 28 dnů a relativní vlhkost okolního prostředí 50 %.

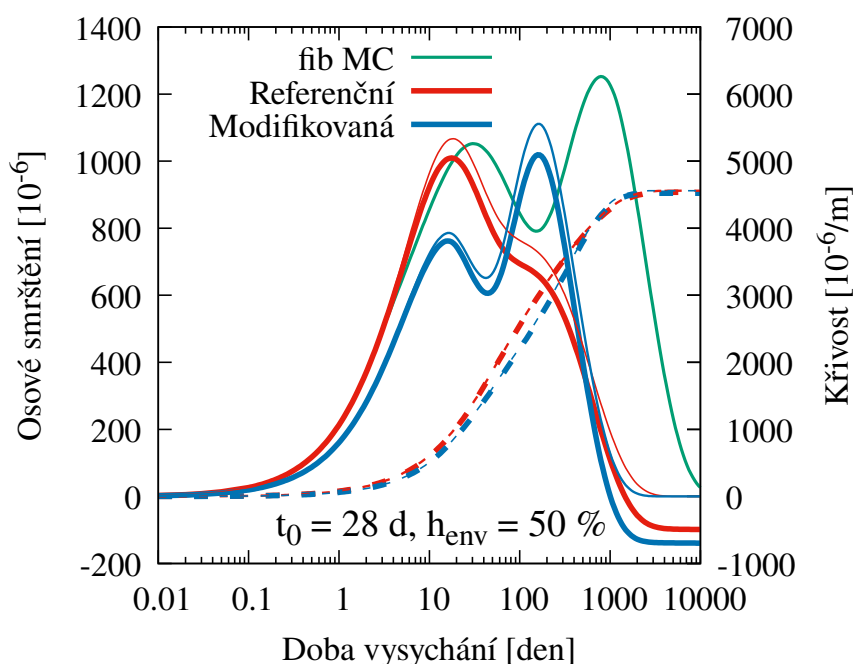
Sady parametrů nejlépe vystihující vývoj křivosti v čase mohou být porovnávány nejen podle normované odchylky, ale také podle kritéria maximální odchylky ve vývoji křivosti. Pro všechny sady parametrů je tato maximální odchylka ve vývoji křivosti v modelu vypočtena. Na Obr. 38 je zobrazen vývoj křivosti pro sady parametrů s nejnižší maximální odchylkou od referenčního průběhu křivosti.

Získané křivky vykazují vyšší odchylku zejména v počáteční fázi vysychání, tedy mezi počátkem vysychání a časem 10 dnů. Naopak v oblasti po překonání extrému je dosaženo lepší shody. Zde také bývá pozorována maximální odchylka křivosti oproti referenční sadě. Takto je dosaženo maximální odchylky $289 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ pro nejlepších 10 sad parametrů. V případě předchozího způsobu hledání nejlepší sady parametrů podle minimální normované odchylky, je tento rozdíl maximálně $381 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Bylo ověřeno, zda sady parametrů s nejnižší normovanou odchylkou vývoje křivosti dají dobrou predikci vývoje smrštění i pro symetricky vysychající desku tloušťky 600 mm. Na rozdíl od Obr. 23 je nyní na Obr. 39 dosaženo lepší shody ve vývoji smrštění s referenční sadou. To dokládá, že chování symetricky i nesymetricky vysychajícího betonu je predikováno s menší odchylkou, pokud identifikace parametrů vychází z chování nesymetricky vysychajícího vzorku.

5.5 Dvě maxima křivosti

Některé z výše zmíněných grafů vývoje křivosti ukazují, že se zde objevuje jistý neintuitivní jev. Průběh křivosti u některých grafů obsahuje 2 maxima. Pro lepší pochopení tohoto jevu byla vybrána sada parametrů, která má druhé maximum křivosti větší než to první, což je vidět na Obr. 40. Parametry takto zvolené sady pro model Bažant-Najjar jsou $C_1 = 75 \text{ mm}^2 \text{ den}^{-1}$; $\alpha_0 = 0,10$; $h_c = 0,80$; $n = 16$ a $f = 1,1 \text{ mm den}^{-1}$.

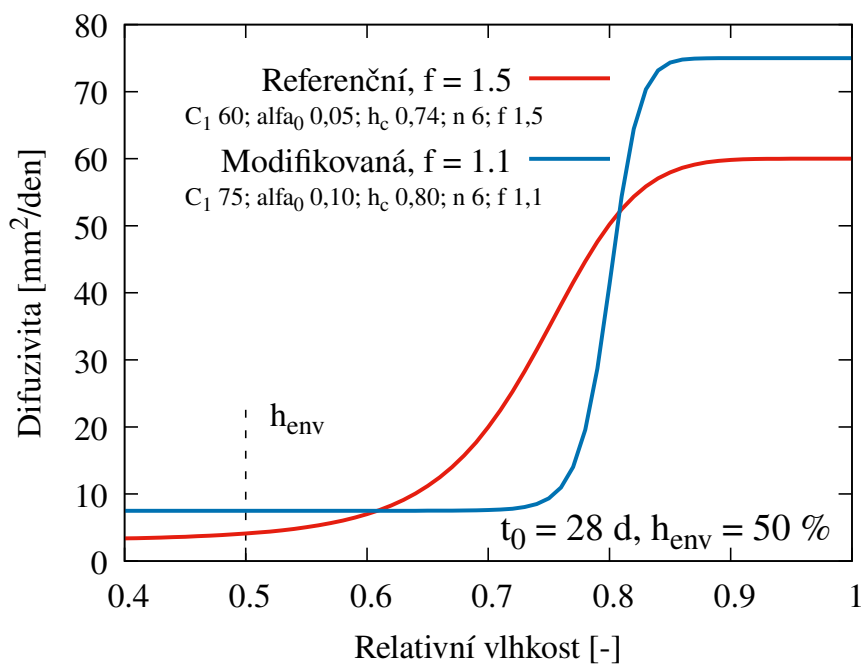


Obrázek 40: Vývoj osového smrštění a křivosti jednostranně vysychající desky získaný pro parametry podle funkce difuzivity referenční a modifikované sady parametrů (Obr. 41), $D = 75 \text{ mm}$, $t_0 = 28 \text{ dnů}$ a $h_{\text{env}} = 50 \%$. Plné čáry popisují vývoj křivosti, čárkovaně je znázorněn vývoj smrštění. Tenké čáry popisují chování elastického materiálu. Připojena je predikce vývoje křivosti na základě fib Model Code 2010 dle Tabulky 1.

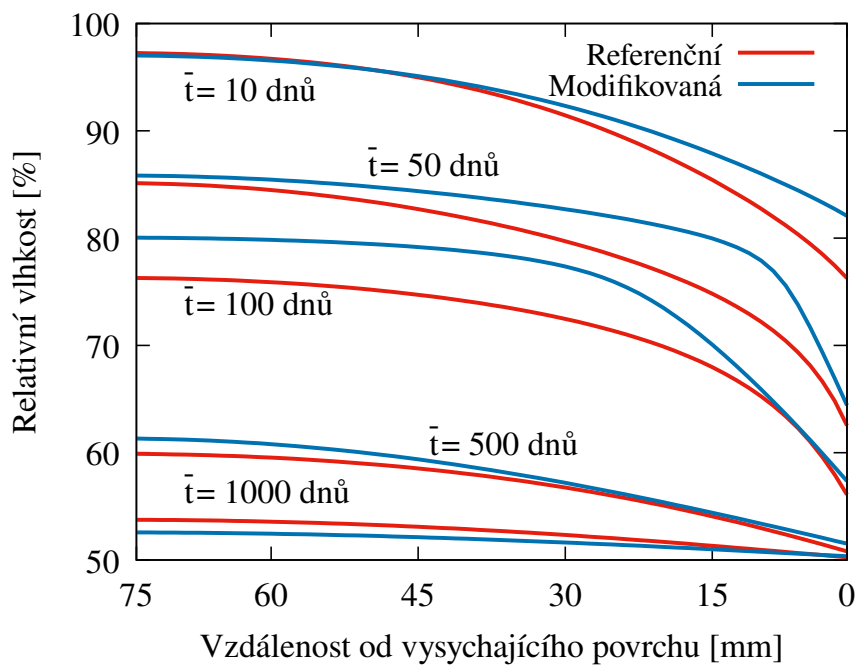
Co se ve vzorku děje napovídá graf difuzivity, ze kterého je patrné, že její hodnota má v závislosti na relativní vlhkosti velmi razantní nárůst, respektive pokles při relativní vlhkosti kolem 80 %. Pokud by byla difuzivita uvažována téměř nezávislá na relativní vlhkosti, graf vývoje smrštění by byl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

Konečná hodnota křivosti je záporná díky odlišné poddajnosti během času vysychání. Při změně materiálu na lineárně elastický vznik druhého extrému přetrvává, jen se finální křivost vrátí zpět na nulovou hodnotu.

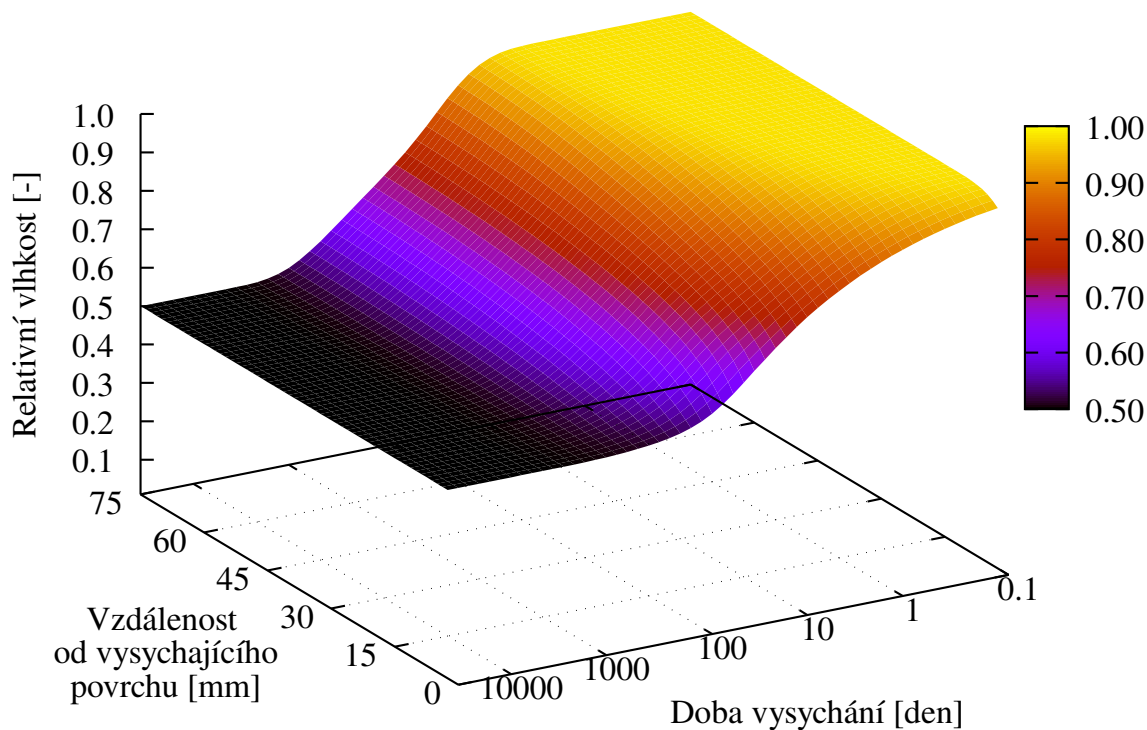
Na Obr. 42 je vidět rozložení vlhkosti napříč vzorkem v čase. Křivky jsou vykresleny nejdříve pro čas vzniku prvního maxima ve vývoji křivosti v čase vysychání přibližně 10 dnů, následuje čas 50 dnů a lokální minimum křivosti. Další křivka prezentuje rozložení vlhkosti po průřezu přibližně při dosažení druhého maxima křivosti. Následující křivky



Obrázek 41: Funkce difuzivity pro referenční a modifikovanou sadu parametrů.



Obrázek 42: Rozdělení relativní vlhkosti po průřezu pro referenční a modifikovanou sadu parametrů (Obr. 41), \bar{t} je doba vysychání.



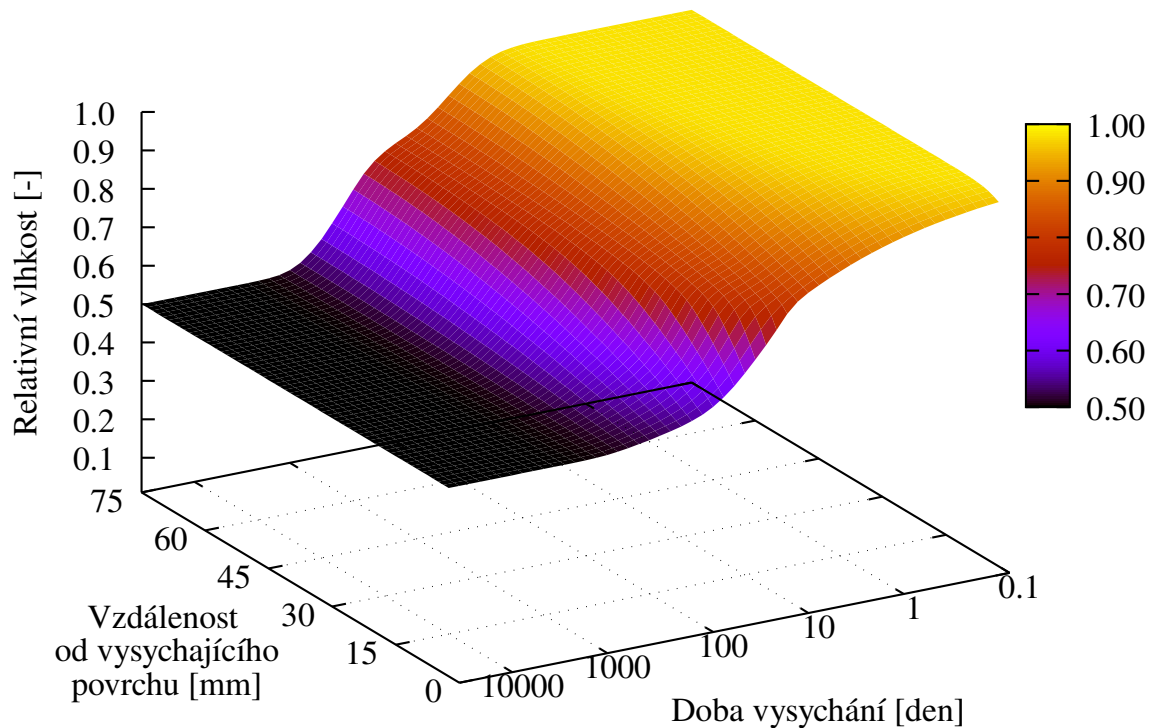
Obrázek 43: Vývoj vlhkosti v desce tloušťky 75 mm jednostranně vysychající v závislosti na čase pro referenční sadu parametrů při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů.

pouze znázorňují srovnávání vlhkosti ve 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.

Pro názornost je rozložení vlhkosti pro referenční i modifikovanou sadu parametrů vykresleno v závislosti na čase vysychání i ve 3D. Podstatný je zejména graf pro modifikovanou sadu parametrů, kde je vidět nejprve vysychání okrajové části vzorku, které se chová podle očekávání. Následuje část, kdy se začne relativní vlhkost ve vzorku vyrovnávat, čímž vytvoří v grafu průběhu křivosti lokální minimum. Tato část grafu koresponduje s prudkou změnou difuzivity pro relativní vlhkost kolem 80 %. Za povšimnutí stojí také křivka průběhu vlhkosti ve středovém průřezu patrná z Obr. 44. Pro srovnání je zde vykreslen i graf vývoje vlhkosti pro referenční sadu parametrů.

Fib Model Code 2010 dává predikci vývoje křivosti ztlačenou oproti referenční sadě podle Obr. 40. První extrém vystihuje poměrně dobře, nicméně od doby vysychání 30 dnů se model chová velmi odlišně. Funkce difuzivity má v případě tohoto modelu výrazně nižší maximální hodnotu. Proto dochází k pomalejšímu vysychání. Konečná hodnota



Obrázek 44: Vývoj vlhkosti v desce tloušťky 75 mm jednostranně vysychající v závislosti na čase pro modifikovanou sadu parametrů při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů.

křivosti zde není doložena.

5.6 Identifikace parametrů s využitím senzoru vlhkosti

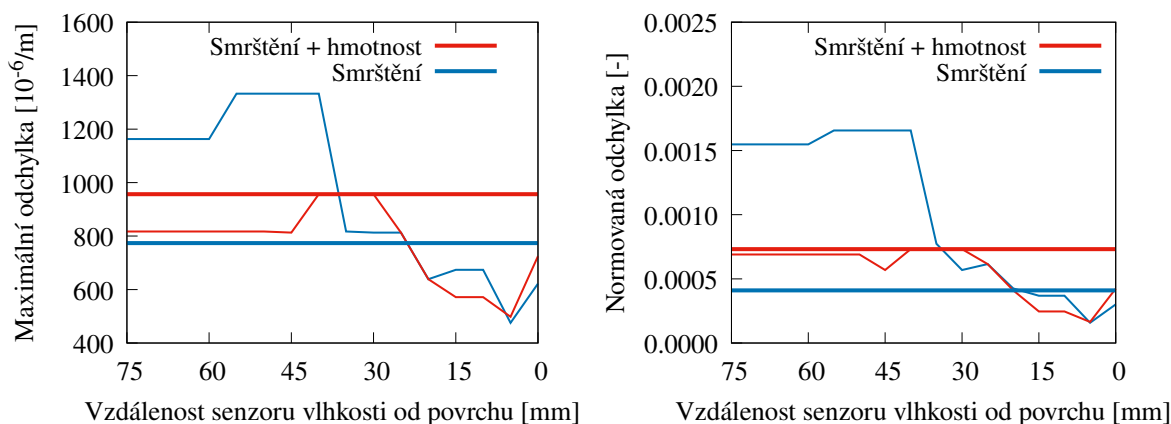
V předchozích kapitolách je rozebrána identifikace parametrů numerického modelu transportu vlhkosti a predikce vývoje křivosti pouze na základě znalosti vývoje úbytku hmotnosti, vývoje smrštění a křivosti. Bylo prokázáno, že některé přístupy mohou vést k citelně lepší shodě s referenční sadou. Tato kapitola se zabývá vlivem znalosti vývoje relativní vlhkosti v určitém bodě vzorku na velikost odchylky získaných funkcí difuzivity oproti referenční a také jsou popsány odchylky predikce vývoje křivosti. Tím je reprezentován přínos dat senzoru vlhkosti ve skutečném experimentu. V této kapitole se opět pracuje pouze s virtuálním experimentem.

Zvolený senzor FHA646R (Obr. 7) má velikost 5 mm [28] a je vhodné ho umístit do otvoru průměru 6 mm [9]. Tento otvor může být připraven z betonáže například vložením trubičky do bednění nebo opatrně vyvrtán ve ztvrdlém vzorku. U vrtů v těsné blízkosti povrchu hrozí poškození betonu.

Jako první je ověřen přínos přesné znalosti vývoje vlhkosti v určitém bodě. Jedná se o ideální případ zcela přesného senzoru. Ten je v modelu desky tloušťky 150 mm symetricky vysychající umístován od středu po vysychající okraj s krokem 5 mm. Hledána je optimální pozice tohoto senzoru. V grafech je pak zobrazena pouze symetrická polovina vzorku. Výpočet křivosti je proveden pro nesymetricky vysychající vzorek poloviční tloušťky. Je zde identifikováno 10 sad parametrů s nejlepší shodou na základě vývoje vlhkosti a osového smrštění (v grafu označeno jako „Smrštění“) a 10 sad na základě vývoje vlhkosti, osového smrštění a úbytku hmotnosti (grafu jako „Smrštění + hmotnost“) pro identifikaci nejlepší polohy senzoru vlhkosti. Pro tyto sady parametrů je vytvořena predikce vývoje křivosti, která je porovnávána s vývojem křivosti referenční sady. Je zjištěna normovaná a maximální odchylka predikovaného vývoje křivosti od referenčního v předepsaných časech.

Normovaná odchylka zohledňuje rozdílnou délku intervalů při porovnávání a odchylky jsou v předepsaných časech násobeny odpovídajícími součiniteli podle délky časového kroku na logaritmické stupnici. Celková normovaná odchylka je výsledkem součtu těchto dílčích. V grafu je pak vykresleno maximum absolutní odchylky a maximum normované odchylky, které je dosaženo pro některou ze zmiňovaných 10 nejlepších sad. Maxima obou hodnot je dosaženo většinou pro stejnou sadu parametrů, což ale není obecné pravidlo. Normovaná odchylka vlhkosti je uvažována se stejnou vahou jako normovaná odchylka smrštění nebo úbytku hmotnosti.

Přínos volby polohy jednoho senzoru vlhkosti je zobrazen na Obr. 45. Je zde patrné, že senzor má největší význam u vysychajícího povrchu. Podle tohoto modelu je ideální pozice 5 mm od něj. Umístit ho zde ale není možné vzhledem k jeho velikosti a možnému poškození okrajové vrstvy betonu. Podle [7] a [9] a je třeba osu senzoru umístit minimálně 15 mm od okraje, aby povrchová vrstva betonu dosahovala tloušťky alespoň 10 mm a nedošlo tak k jejímu poškození nebo ovlivnění vnějšího vysychání. Nejlepší umístění jednoho senzoru bude tedy v této poloze, což tyto články také potvrzují.



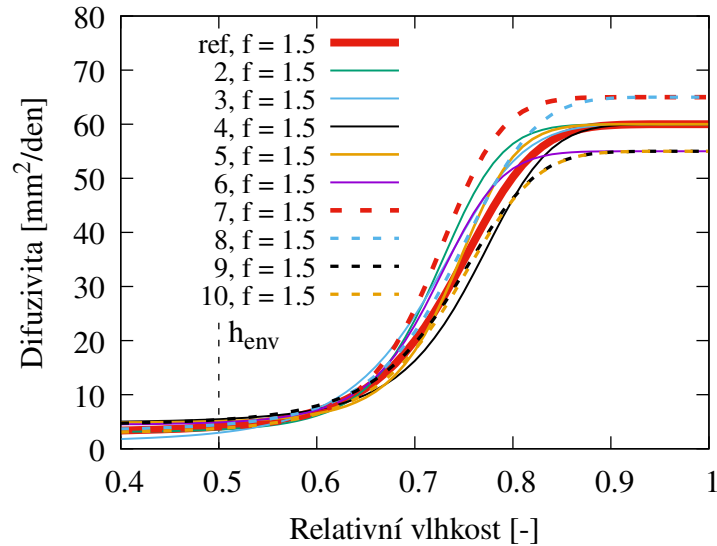
Obrázek 45: Maximální odchylka predikované křivosti (vlevo) a normované odchylky křivosti (vpravo) v závislosti na vzdálenosti umístění senzoru vlhkosti od povrchu ve vzorku tloušťky 150 mm oboustranně vysychajícím při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů. Predikce je vytvořena za stejných podmínek pro jednostranně vysychající desku tloušťky 75 mm. Vykreslena je pouze polovina tohoto vzorku, která je s druhou polovinou symetrická. Tlustou čarou je znázorněna odchylka predikce bez znalosti vývoje relativní vlhkosti. Při ideální kalibraci by byla dosažena hodnota maximální odchylky křivosti $381 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

U predikce s využitím vývoje vlhkosti (Obr. 45), kde je zohledněn i vývoj úbytku hmotnosti, dojde obecně k vylepšení predikce. To ale neplatí pro predikci bez uvážení vývoje hmotnosti. Pro senzor vzdálený od okraje 20 mm a více dojde ke zvýšení odchylky od referenční sady. Fakticky to znamená, že vývoj vlhkosti v této oblasti vystihují více sady parametrů s horší shodou v predikci křivosti.

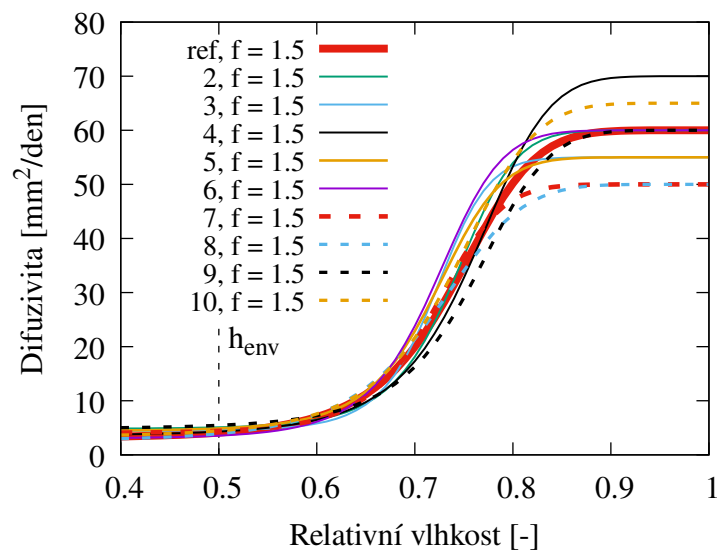
Obr. 46 a 47 ukazují velmi dobrou shodu funkce difuzivity včetně dodržení sklonu. Funkce difuzivity jsou vykresleny pro nejlepší shodu, tedy pro senzor ve vzdálenosti 5 mm od vysychajícího okraje. Pokud je zohledněn vývoj hmotnosti, křivky difuzivity mají ve svém průběhu větší rozdíly nad úrovní 80 % relativní vlhkosti v betonu. Pod touto hodnotou je shoda oproti druhému grafu lepší. Součinitel přestupu, který je u obou grafů doplněn v legendě, je pro všechny sady parametrů shodný s hodnotou $1,5 \text{ mm den}^{-1}$.

Modelována byla i situace při použití druhého senzoru vlhkosti při zachování polohy prvního senzoru. Normovaná odchylka obou senzorů je průměrována, tedy odchylka v obou bodech má stejnou váhu. Nejvýhodnější poloha druhého senzoru vychází opět v blízkosti povrchu, kde ale senzor být umístěn nemůže. Proto doporučená poloha druhého ideálně přesného senzoru vlhkosti bude u protějšího zapečetěného okraje, případně vprostřed symetricky vysychajícího vzorku, což dokumentuje Obr. 48.

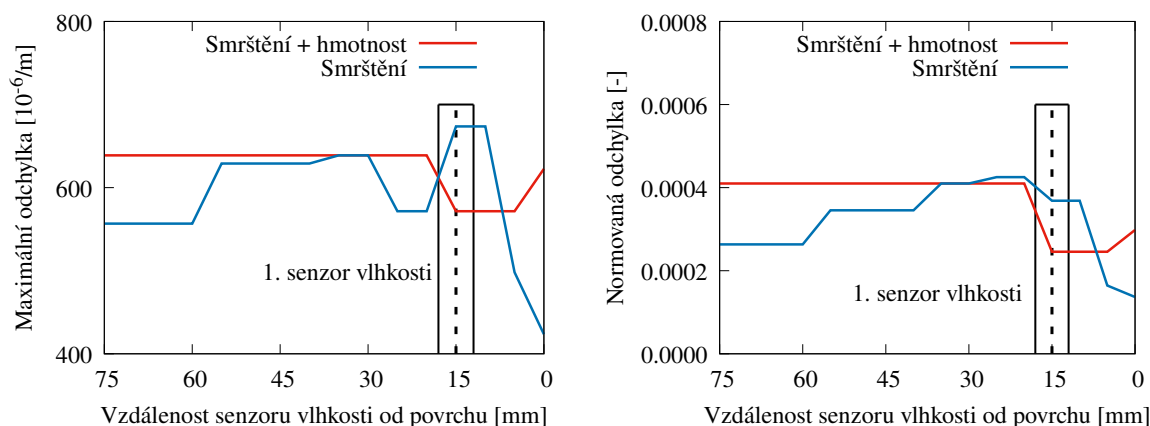
Žádný senzor ale neměří ideálně přesně. Po délce senzoru ve vzdálenosti 12,5 mm až 17,5 mm od vysychajícího okraje může být rozdíl hodnot relativní vlhkosti podle dat vykreslených na Obr. 42 a 43 až 2,5 %. Oproti přesné hodnotě vlhkosti se tak vlhkost v otvoru může lišit o více než 1 % jen vlivem velikosti otvoru. Přesnost měření kapacitního senzoru vlhkosti FHA646R, který byl použit v popisovaných experimentech [7] a [9], má



Obrázek 46: Difuzivita sad parametrů s nejnižší odchylkou získané bez zohlednění úbytku hmotnosti. Vychází z Obr. 45 pro vzdálenost senzoru vlhkosti 5 mm od vysychajícího povrchu.



Obrázek 47: Difuzivita sad parametrů s nejnižší odchylkou získané se zohlednění úbytku hmotnosti. Vychází z Obr. 45 pro vzdálenost 5 mm od vysychajícího povrchu.



Obrázek 48: Maximální odchylka křivosti (vlevo) a normovaná odchylka křivosti (vpravo) podle teoretického umístění 2. senzoru vlhkosti ve vzorku tloušťky 150 mm oboustranně vysychajícím při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů. Predikce je vytvořena za stejných podmínek pro jednostranně vysychající desku tloušťky 75 mm. V grafu je naznačeno umístění a přibližný průměr 1. senzoru vlhkosti.

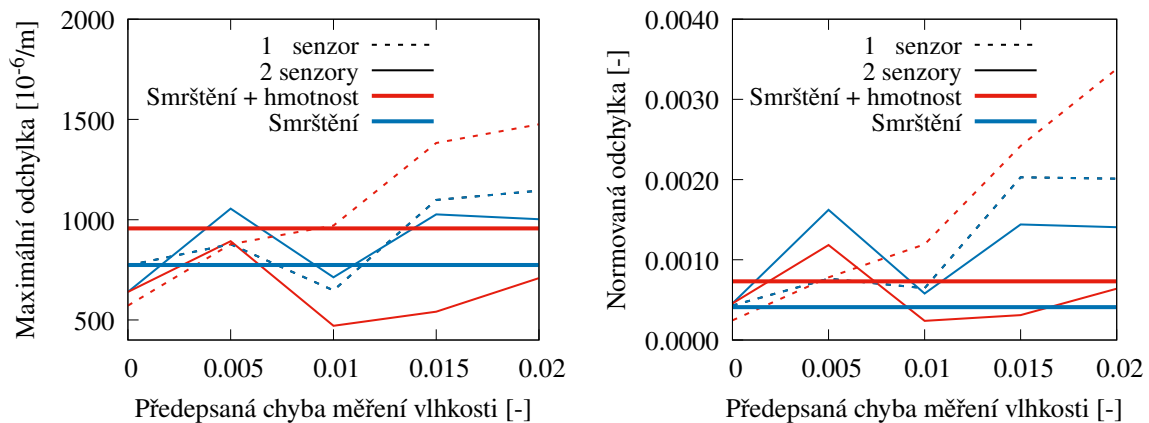
deklarovanou přesnost měření $\pm 2,0 \%$ [28]. Celková chyba naměřené hodnoty se tedy oproti ideálnímu případu může lišit až o 3,25 %.

Další výpočty ověřují velikost chyby predikce vývoje křivosti při předepsané chybě měření vlhkosti od 0,0 do 2,0 %, což odpovídá přesnosti senzoru vlhkosti. Pro každou sadu parametrů je uvažována kladná i záporná hodnota odchylky vlhkosti a v úvahu je brána ta, která dává vůči referenční sadě menší normovanou odchylku. Aby měl výpočet smysl ve své počáteční a konečné fázi, k porovnávání dochází od dosažení relativní vlhkosti v místě senzoru 95 % a je ukončeno při dosažení relativní vlhkosti 55 %. Tím je porovnávání počet hodnot podle času značně zredukován. Tento počet se také liší v závislosti na použití jednoho nebo dvou senzorů vlhkosti.

Maximální a normovaná odchylka nově kalibrovaných sad parametrů nemusí být v souladu s předchozími grafy, kde byl senzor uvažován jako zcela přesný a k porovnávání vývoje vlhkosti docházelo v podstatě rovnoměrně po celou dobu vysychání.

Výsledky modelování jsou zobrazeny na Obr. 49. Již malá odchylka při měření relativní vlhkosti má velký vliv na shodu predikce vývoje křivosti. Jeden senzor vlhkosti je velmi náchylný na chybu měření a už při chybě měření 0,5 % se dostávají jak normovaná odchylka, tak i maximální odchylka nad hodnotu, která by byla dosažena bez uvážení senzoru vlhkosti.

Jediné, co se z modelovaných situací zdá být smysluplné, je využití dvou senzorů vlhkosti umístěných jeden ve prostřed symetricky vysychající desky a druhý co nejblíže vysychajícímu povrchu (osa senzoru 15 mm od vysychajícího povrchu). Predikce musí vycházet také ze znalosti vývoje smrštění a úbytku hmotnosti. Maximální odchylka křivosti i normovaná odchylka může být tímto způsobem snížena až téměř na 60 %. Jak je ale z grafu patrné, predikce je zatížena velkou nejistotou a ke zlepšení predikce dojít nemusí



Obrázek 49: Maximální odchylka křivosti (vlevo) a normovaná odchylka křivosti (vpravo) podle předepsané chyby měření vlhkosti ve vzorku tloušťky 150 mm oboustranně vysychajícím při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů. Predikce je vytvořena za stejných podmínek pro jednostranně vysychající desku tloušťky 75 mm. Čárkovaně je znázorněn výsledek pro 1 senzor vlhkosti (15 mm od povrchu), plnou čarou pro dva senzory (15 a 75 mm od povrchu). Barevně je odlišeno, zda je při identifikaci parametrů brán ohled na vývoj úbytku hmotnosti. Tlustá vodorovná čára reprezentuje odchylku predikce bez použití senzoru vlhkosti.

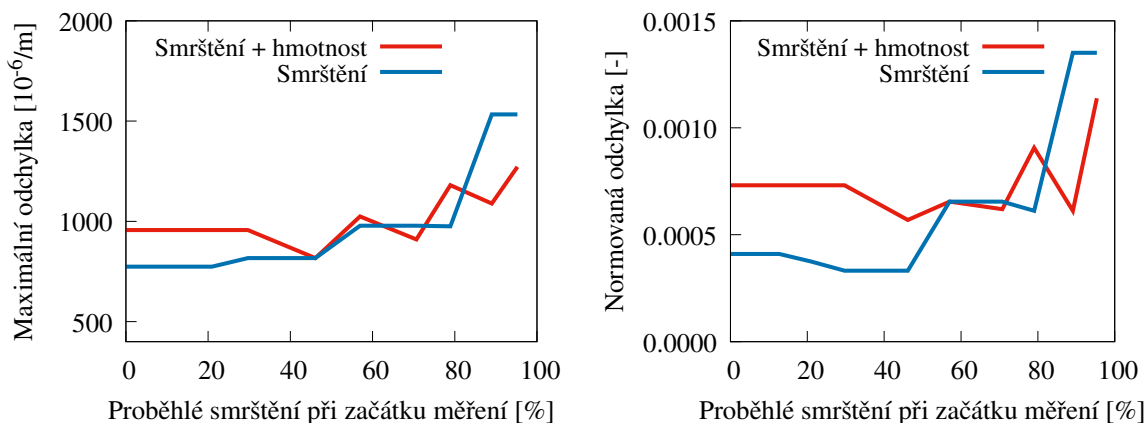
vůbec.

Celkově lze výsledky modelování senzoru vlhkosti shrnout tak, že přesná znalost relativní vlhkosti v určitých bodech průřezu má zcela jistě smysl. Bohužel je praktické získání této informace limitováno měřicími metodami, které mohou podávat zkreslené údaje, což vede ke zhoršení shody predikce. Pro predikci vývoje křivosti se nezdá být využití senzoru vlhkosti vzhledem k jeho reálné přesnosti přínosné.

5.7 Identifikace parametrů pro částečně chybějící data

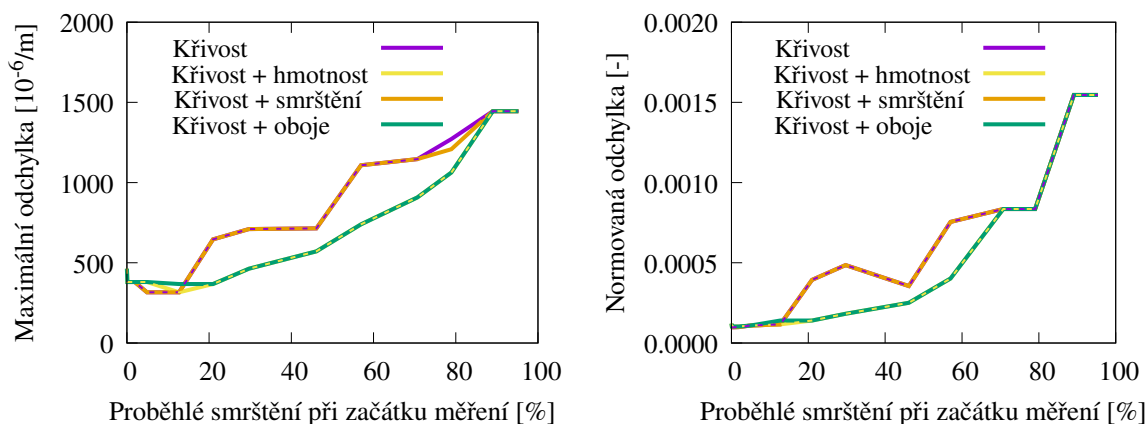
Tato kapitola se zabývá přínosem dat z počátku experimentu na odchylky v predikci vývoje křivosti. Předpokládá se, že jsou k dispozici data od určitého okamžiku až po dosažení konečné hodnoty smrštění. Vývoj křivosti je predikován na základě vývoje osového smrštění, úbytku hmotnosti, vývoje křivosti a jejich kombinacemi. Při reálném experimentu měření začíná až s určitým časovým odstupem od začátku vysychání. Proto je zde modelována délka tohoto intervalu v závislosti na odchylce predikce oproti referenční sadě parametrů. Smrštění a úbytek hmotnosti je modelován na symetricky vysychajícím vzorku, zatímco pokud je využita i znalost vývoje křivosti, modelováno je nesymetrické vysychání.

Smyslem simulací je rozhodnout, zda měření smrštění, úbytku hmotnosti a křivosti musí být zahájeno bezprostředně po začátku vysychání, případně s jakým maximálním odstupem pro získání co nejlepší shody v predikci křivosti. Modelované vývoje smrštění a křivosti zobrazené výše mají jako první čas uvedený v grafu 0,01 dne (cca 15 minut) nebo 0,1 dne (2,4 hodiny). Oproti tomu reálná experimentální data mohou poskytovat první informaci o smrštění až několikátý den po začátku vysychání. Vliv této odlišnosti na výslednou predikci vývoje křivosti je dále rozebrán. Porovnávané časy měření jsou rozloženy téměř rovnoměrně v logaritmickém měřítku.



Obrázek 50: Maximální a normovaná odchylka křivosti nejlepších 10 sad parametrů v závislosti na míře proběhlého smrštění při začátku měření úbytku hmotnosti nebo smrštění ve vzorku tloušťky 150 mm oboustranně vysychajícím při $h_{env} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dnů. Predikce je vytvořena za stejných podmínek pro jednostranně vysychající desku tloušťky 75 mm. Předpokládá se známá konečná hodnota jak smrštění, tak celkového úbytku hmotnosti.

Na Obr. 50 je zobrazena odchylka predikce křivosti získaných sad parametrů vůči referenční sadě. Parametry byly v tomto případě identifikovány na základě známého vývoje smrštění a úbytku hmotnosti. Jak je z těchto grafů patrné, nižší odchylky je dosaženo z počátku pro predikci s využitím pouze vývoje smrštění. Pokud chybí data z prvních



Obrázek 51: Maximální a normovaná odchylka křivosti nejlepších 10 sad parametrů v závislosti na míře proběhlého smrštění při začátku měření ve vzorku tloušťky 75 mm jednostranně vysychajícím při $h_{\text{env}} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dnů. Predikce je vytvořena za stejných podmínek. Sady parametrů jsou kalibrovány podle vývoje křivosti, smrštění a úbytku hmotnosti, což je specifikováno v popisku pro každou křivku. „Oboje“ je souhrnné označení pro smrštění a hmotnost. Předpokládá se známá konečná hodnota smrštění.

přibližně 20 dnů, čemuž odpovídá smrštění asi 20 % z jeho konečné hodnoty, odchylka predikované křivosti je téměř stejná. Pro chybějící data až do času vysychání přibližně 60 dnů, čemuž odpovídá proběhlé smrštění asi 50 %, dojde dokonce k vylepšení predikce z hlediska normované odchylky. Důvodem zmenšení odchylky predikovaných dat může být přiřazení vyššího významu časům měření, které lépe charakterizují sady parametrů s nižší odchylkou ve vývoji křivosti. Další možností může být i prvek náhody podpořený velikostí kroku hodnot parametrů při jejich identifikaci.

Predikce provedená na základě vývoje smrštění a současně úbytku hmotnosti vykazuje výraznější zhoršení až v případě, že je známý průběh těchto hodnot v rozsahu menším než posledních 30 % hodnoty smrštění. Pokud bude známá konečná hodnota smrštění a ztráty hmotnosti, je odchylka predikce vytvořená v tomto případě při známém celém průběhu nebo při známém průběhu pouze pro posledních 30 % hodnoty smrštění a úbytku hmotnosti stejná. Rozhodně se ale nedá tvrdit, že by tato predikce dávala spolehlivá data.

Pro predikci na základě vývoje smrštění je trend grafu více podle očekávání. Závislost maximální odchylky na velikosti proběhlého smrštění je s rostoucím časem konstantní nebo rostoucí. Data z grafu ukazují, že pokud bude zaznamenána nulová hodnota smrštění, tak data z prvních několika dnů nehrají v predikci téměř žádnou roli. Identifikované funkce difuzivity se začnou měnit až při absenci dat z prvních 10 dnů vysychání.

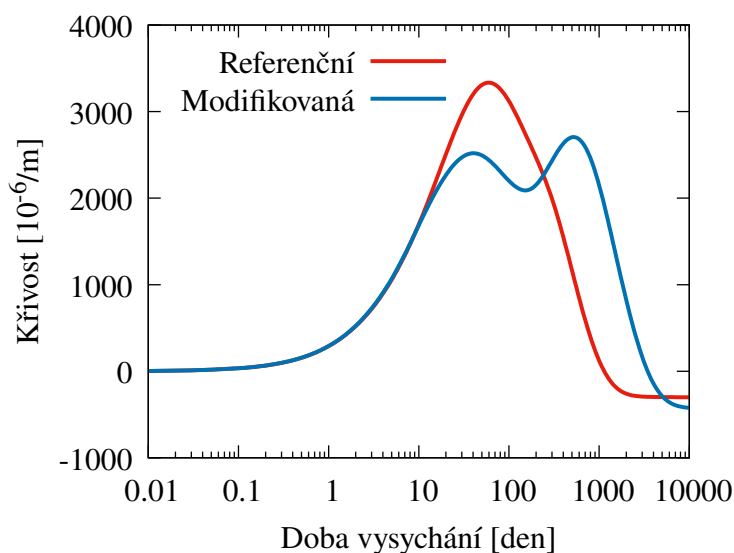
Při využití znalosti vývoje křivosti (Obr. 51) dojde obecně ke zmenšení odchylky predikce. Její hodnota je ale více závislá na porovnávání hodnot z prvních dnů vývoje křivosti, smrštění a úbytku hmotnosti. Funkce difuzivity se začínají odlišovat při zahájení měření až 3. den po začátku vysychání. Tomu odpovídá smrštění přibližně 5 % z jeho konečné hodnoty. Při zahájení měření do času vysychání přibližně 10 dnů (10 % proběhlého smrš-

tění) vykazují menší odchylku sady parametrů kalibrované na základě známého vývoje smrštění a současně křivosti a sady získané pouze na základě vývoje křivosti. Při zohlednění vývoje úbytku hmotnosti je dosaženo lepší shody, pokud chybí měření z více než 15 dnů (15 % proběhlého smrštění). Pro výraznější zvýšení odchylky predikovaného vývoje křivosti by podle tohoto modelu muselo dojít k začátku měření nejdříve 15. den po začátku vysychání.

Bylo zjištěno, že absence dat z prvních 3 dnů vysychání nemají na identifikované funkce difuzivity téměř žádný vliv. Pokud není měřena křivost, prodlužuje se tento čas na hodnotu přibližně 10 dnů. Bez využití vývoje křivosti nemají data z prvních 60 dnů (50 % proběhlého smrštění) větší vliv na hodnotu odchylky predikce. S využitím vývoje křivosti se tato doba snižuje na 15 dnů (15 % proběhlého smrštění). Z grafů lze dedukovat, že během experimentu by mělo postačit zahájení měření během prvních několika málo dnů. To platí pouze pro deformace způsobené vnějším vysycháním.

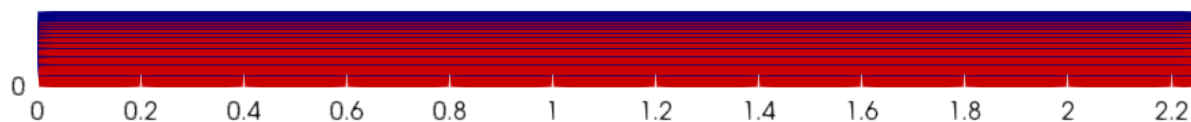
6 Aplikace nakalibrovaného modelu

Aplikace získaného numerického modelu je provedena na predikci chování jednostranně vysychající betonové desky tloušťky 150 mm, která může simulovat například průmyslovou podlahu. Predikováno je zvedání a vývoj napětí v podélném směru σ_x v řezu desky délky 4,5 m, což odpovídá vzdálenosti spár u běžných průmyslových podlah. Simulace je provedena pouze pro rovinnou napjatost a nezohledňuje tak kroucení a zvedání rohů desky. Oproti předchozím výpočtům je nyní uvažována i vlastní tíha betonu. Modelována je celá délka desky, ale na obrázcích níže je pro přehlednost vykreslována pouze symetrická polovina.



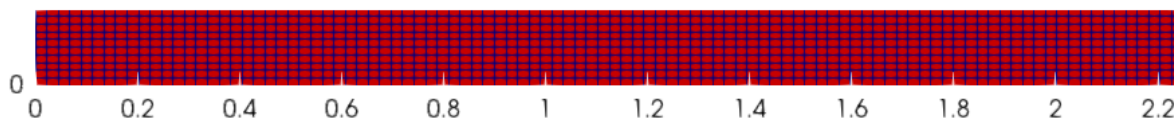
Obrázek 52: Vývoj křivosti jednostranně vysychající desky tloušťky 150 mm bez uvažování vlastní tíhy při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů. Zobrazena je křivost pro referenční a modifikovanou sada parametrů podle Obr. 41.

V samotném modelu je vysychání umožněno pouze vzhůru a to při použití 30 konečných prvků v modelu pro transport vlhkosti. Síť konečných prvků má na délku desky, tedy 4,5 m, 2 uzly a na výšku 31 uzlů, což je znázorněno na Obr. 53.



Obrázek 53: Síť konečných prvků pro model vysychání. Velikost prvků je zmenšována směrem k vysychajícímu okraji. Zobrazena je pouze symetrická polovina modelu.

V modelu pro mechanickou část je použita obdélníková síť konečných prvků s 201 uzly



Obrázek 54: Rovnoměrně rozložená síť konečných prvků pro model mechaniky. Zobrazena je pouze symetrická polovina modelu.

v podélném směru a 11 po výšce, jak je vidět na Obr. 54. V modelu jsou použity prvky *planeStress2d*.

Deska je uvažována jako volně položená na podkladu. V modelu je pod touto deskou vytvořena ještě podkladní deska se shodným rozdělením uzlů sítě v podélném směru. Souřadnice bodů obou desek v místě dotyku jsou téměř identické. Mezi těmito body je modelován dotyk za použití materiálu *CohInt* s parametry k_n , což je tuhost v tlaku, k_s , značící smykovou tuhost, a parametr *stiffCoeffKn*, který je podílem tuhosti v tahu a v tlaku. Konkrétní parametry jsou vypsány v Tabulce 3. Na délku řezu desky, tedy 4,5 m, je použito 201 těchto bodů dotyku.

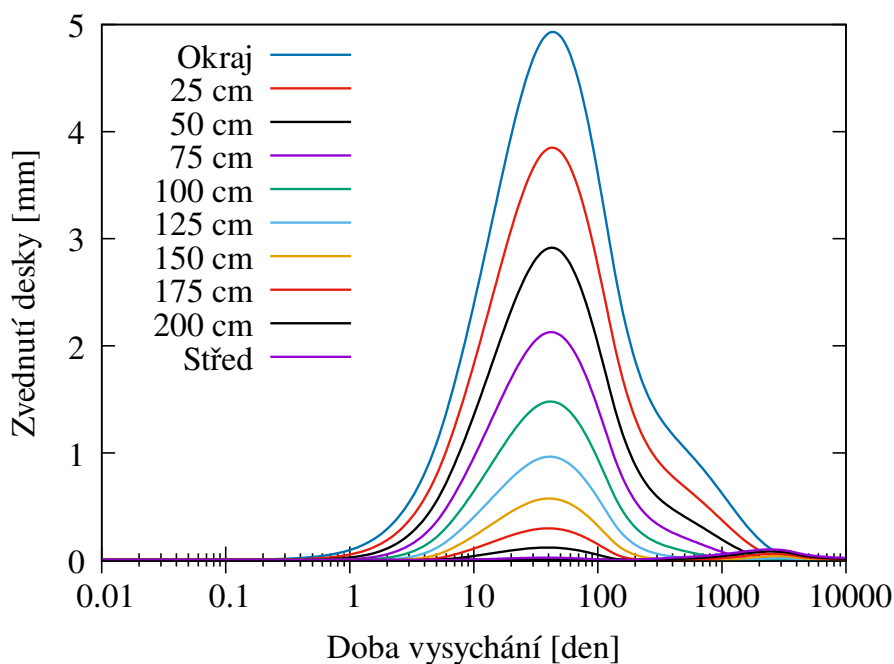
Tabulka 3: Parametry modelu dotyku vztažené na plochu $0,0225 \text{ m}^2$, což odpovídá vzdálenosti bodů dotyku násobené tloušťkou 1 m.

Sada parametrů	Tuhost v tlaku [MN/m]	tuhost v tahu [N/m]	tuhost ve smyku [N/m]
Referenční	40	100	100
Modifikovaná	200	100	100
Ref. s trhlinami	9	100	100

U referenční sady dojde po začátku vysychání k vytvoření tahových napětí u vysychajícího okraje. V čase přibližně 0,5 dne po začátku vysychání dojde k symetrickému zvedání obou okrajů desky, což dokládá Obr. 55. Postupně se tak zvedá velká část desky. Uvažované silové zatížení je pouze vlastní tíha desky. Maximálního zvednutí okraje je dosaženo v čase vysychání přibližně 40 dnů. V tento čas je v řezu délka dotyku podkladní a vysychající desky menší než 0,5 m oproti původním 4,5 m. Svislý posun bodů ve vzdálenosti 0,25 m od středu symetrie desky ale dosahuje jen zanedbatelné hodnoty a to přibližně 0,1 mm.

Po čase vysychání 40 dnů dochází ke snižování deformace. Rychlost poklesu okrajů desky se v závislosti na logaritmu doby vysychání v čase přibližně 200 dnů sníží a u některých sad parametrů by zde při menší tloušťce desky mohlo dojít opět k nárůstu deformace a výskytu druhého maxima. Náznak tohoto chování je vidět na Obr. 56.

Následně se ohraj desky klesá, až se opět dostane do kontaktu s podložkou. Mezitím ale dochází ke zvednutí střední části desky kolem osy symetrie. Že se může začít zvedat i střední část desky naznačuje Obr. 52, kde po ukončení procesu vysychání zůstává záporná hodnota křivosti. Tato deformace je opět zanedbatelné velikosti. Narovnění desky



Obrázek 55: Predikce zvedání desky délky 4,5 m a tloušťky 150 mm s referenční sadou parametrů při $h_{\text{env}} = 50 \%$ a $t_0 = 28$ dnů. Vykreslená hodnota odpovídá absolutnímu svislému posunu bodů na spodní straně desky. Hodnota v popisku udává vzdálenost bodu od okraje desky. „Střed“ označuje střed symetrie desky.

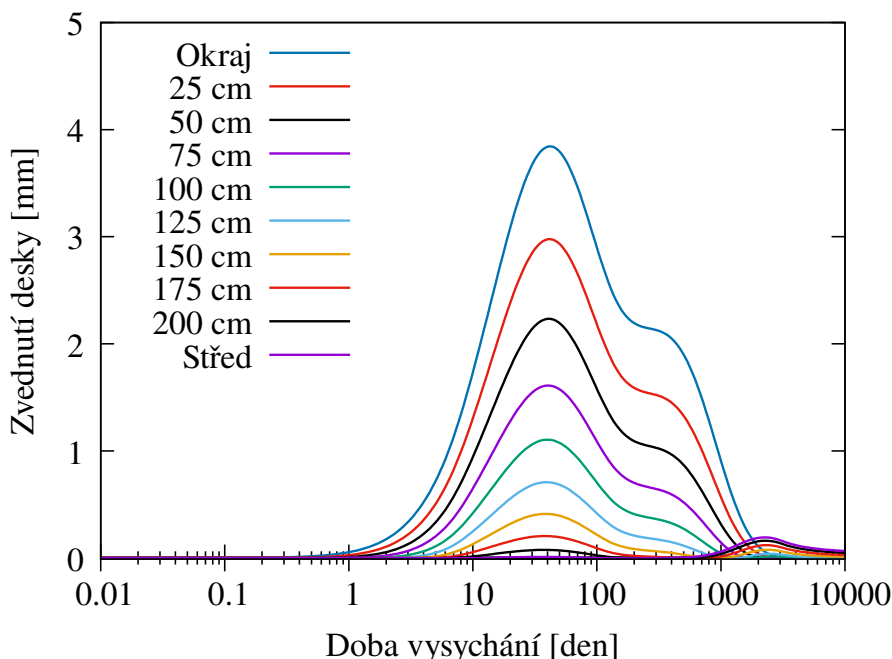
a ustálení deformací vlivem nesymetrického vysychání nastane v čase vysychání přibližně 30 let.

Chování modelu s modifikovanou sadou parametrů je patrné z Obr. 56. Maximální zvednutí okraje desky dosahuje hodnoty přibližně 4 mm. To je asi o 20 % méně než v modelu pro referenční sadu parametrů. V tomto modelu dochází k pomalejšímu pokládání okraje desky a deformace po čase vysychání 300 dnů zůstávají větší oproti referenčnímu modelu až do času vysychání přibližně 1500 dnů. Také v oblasti středu symetrie dochází k výraznějšímu zvednutí a to téměř o 100 %.

Chování modelu, ve kterém je umožněn vznik trhlin (Obr. 57), se od referenčního prakticky neliší, což dříve potvrdilo i srovnání podle Tabulky 2. Tahové trhliny vznikají pouze u horních vláken v oblasti osy symetrie.

Vývoj σ_x pro referenční sadu parametrů a současně zvedání desky dokumentují obrázky 58 až 63. Posun bodů konečněprvkové sítě je ve vykreslení 50× zvětšen. Červená barva značí kladné, tahové napětí, zatímco modrá barva znamená záporné, tedy tlakové napětí.

Na prvním z obrázků je vidět začátek vysychání a vznik tahových napětí u vysychajícího povrchu a v oblasti zvednutí desky i u spodního povrchu. Zároveň s tím se objevuje tlakové napětí ve střední části průřezu. Toto rozložení napětí odpovídá času vysychání 1,5 dne.

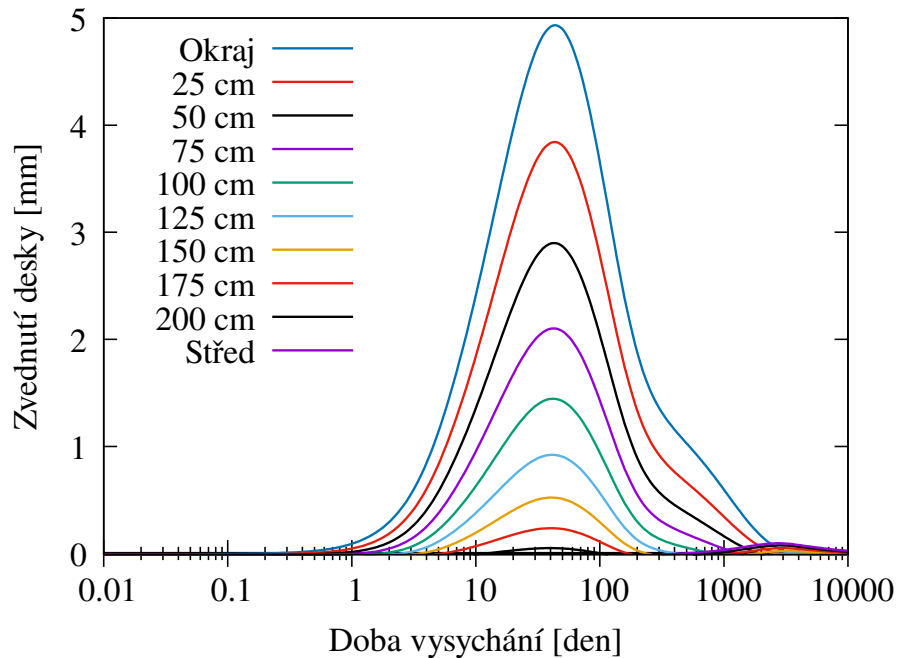


Obrázek 56: Predikce zvedání desky délky 4,5 m a tloušťky 150 mm s modifikovanou sadou parametrů při $h_{\text{env}} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dnů. Vykreslená hodnota odpovídá absolutnímu svislému posunu bodů na spodní straně desky. Hodnota v popisku udává vzdálenost bodu od okraje desky. „Střed“ označuje střed symetrie desky.

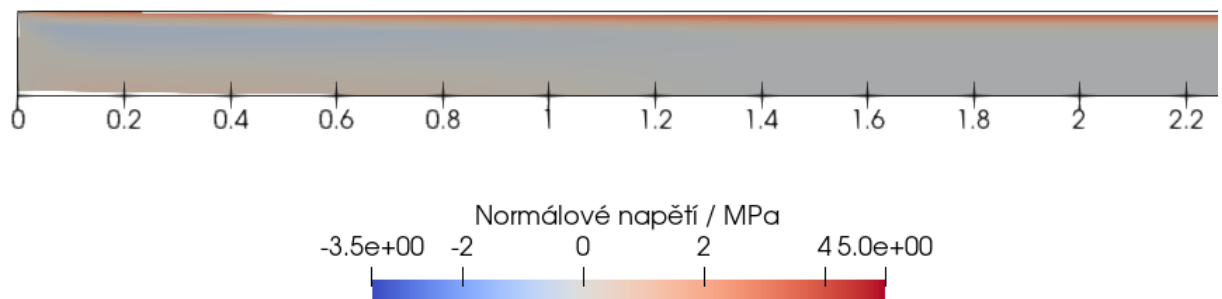
Další obrázky dokládají, že nejvyšší hodnota tahového napětí se objevuje u horních vláken v místě středu symetrie v čase vysychání přibližně 10 dnů a to přibližně 4,5 MPa. V čase vysychání přibližně 300 dnů se začne zvedat deska v oblasti středu symetrie, což pro čas vysychání přibližně 4 roky dokládá i Obr. 61. Oproti rozložení napětí v prvotní fázi vysychání je v čase vysychání 4 roky rozložení tahového a tlakového napětí opačné. U vysychajícího povrchu a současně u spodního povrchu v místě zvednutí desky se objevuje tlakové napětí, zatímco střed tloušťky desky vykazuje tahové napětí.

Na Obr. 62 je již okraj desky položený, ale v oblasti osy symetrie je deska stále nadzvednutá. Největší tahové napětí se objevuje na ose symetrie u spodních vláken a maximum tlakového napětí u horních vláken. Následně dojde k položení desky v celém rozsahu a poklesu napětí vlivem relaxace.

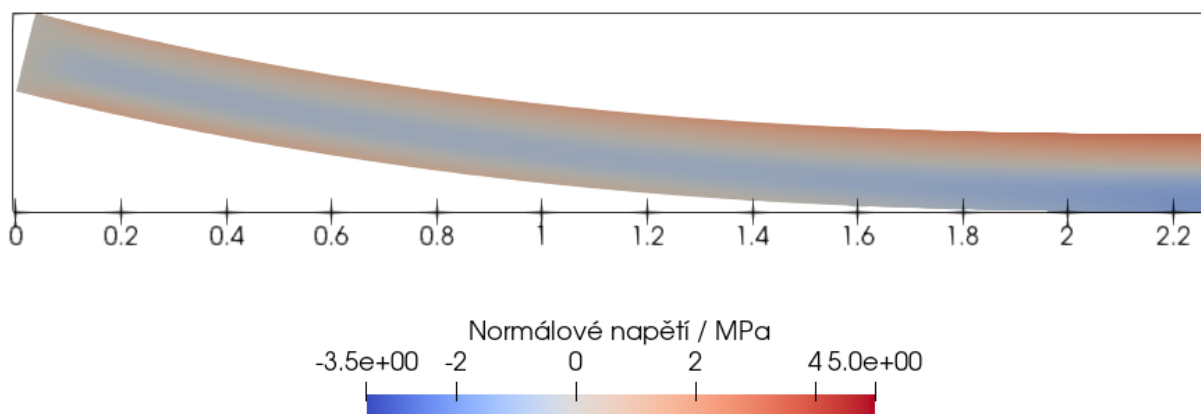
Osové smrštění v podélném směru desky dosahuje hodnoty přibližně 9×10^{-4} . To odpovídá zkrácení poloviny desky (2,25 m) přibližně o 2 mm.



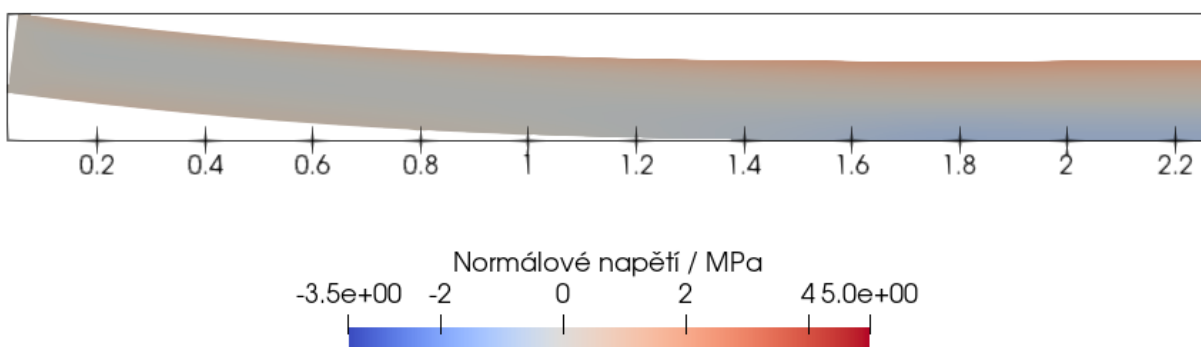
Obrázek 57: Predikce zvedání desky délky 4,5 m a tloušťky 150 mm s referenční sadou parametrů a možností vzniku trhlin při $h_{env} = 50\%$ a $t_0 = 28$ dnů. Tahová pevnost betonu je uvažována 5 MPa. Vykreslená hodnota odpovídá absolutnímu svislému posunu bodů na spodní straně desky. Hodnota v popisku udává vzdálenost bodu od okraje desky. „Střed“ označuje střed symetrie desky.



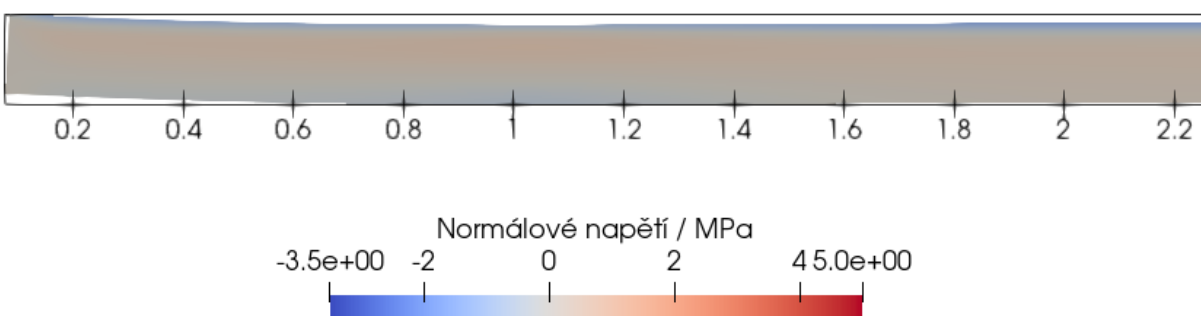
Obrázek 58: Zvedání desky a rozdělení normálového napětí po průřezu odpovídající Obr. 55 v čase vysychání přibližně 1,5 dne. Posuny jsou v obou směrech zvětšeny 50×.



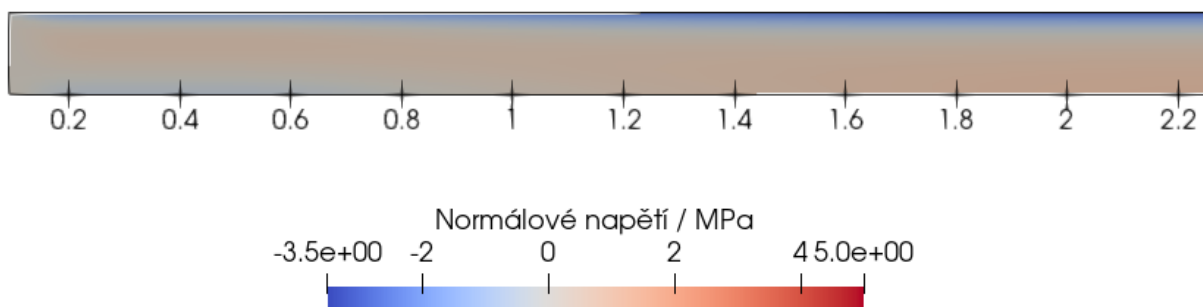
Obrázek 59: Zvedání desky a rozdělení normálového napětí po průřezu odpovídající Obr. 55 v čase vysychání přibližně 44 dnů. Posuny jsou v obou směrech zvětšeny 50×.



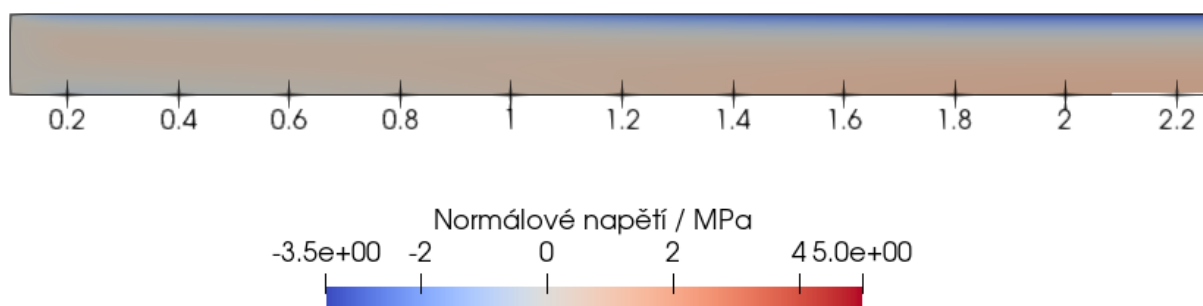
Obrázek 60: Zvedání desky a rozdělení normálového napětí po průřezu odpovídající Obr. 55 v čase vysychání přibližně 192 dnů. Posuny jsou v obou směrech zvětšeny 50×.



Obrázek 61: Zvedání desky a rozdělení normálového napětí po průřezu odpovídající Obr. 55 v čase vysychání přibližně 4 roky. Posuny jsou v obou směrech zvětšeny 50×.



Obrázek 62: Zvedání desky a rozdělení normálového napětí po průřezu odpovídající Obr. 55 v čase vysychání přibližně 10 let. Posuny jsou v obou směrech zvětšeny 50×.



Obrázek 63: Zvedání desky a rozdělení normálového napětí po průřezu odpovídající Obr. 55 v čase vysychání přibližně 20 let. Posuny jsou v obou směrech zvětšeny 50×.

7 Závěr

Hlavním cílem práce bylo zjištění nejvhodnějšího uspořádání experimentu pro kalibraci parametrů modelu transportu vlhkosti, čemuž se věnuje většina této práce. Chování numerických modelů s odlišnými sadami parametrů bylo porovnáváno na základě predikce vývoje křivosti nesymetricky vysychající betonové desky.

V úvodní části práce byly popsány základní časově závislé jevy v betonu, tedy smrštění a dotvarování, a byla nastíněna problematika predikce smrštění. V kapitole 3 byly popsány experimenty a různé publikace související s tematikou této práce. Následovalo stručné seznámení s numerickými modely pro transport vlhkosti Bažant-Najjar a pro mechaniku model MPS založený na teorii solidifikace a mikropředpětí.

V kapitole 5 byly kalibrovány parametry materiálových modelů podle reálných experimentálních dat. Na základě takto získané nejlepší sady parametrů byly modelovány různé podmínky při virtuálním experimentu a byly hledány sady parametrů s podobnou odezvou. Data z modelování ukazují, že při určitém uspořádání experimentu se mohou nepřesnosti predikčních dat významně snížit.

Nejprve bylo simulováno symetrické vysychání a zaznamenáván byl úbytek hmotnosti a osově smrštění. Další kapitola se zabývala identifikací parametrů modelu transportu vlhkosti podle vývoje křivosti nerovnoměrně vysychajícího betonu. Tento přístup se jevil jako velmi smysluplný. Experimentálně by se jednalo zejména o trámký s výrazně dominantním podélným rozměrem a jednou ze složek deformace by tak bylo zakřivení vlivem nerovnoměrného vysychání.

Podrobněji byl také rozebrán vliv chybějících dat v oblasti začátku experimentu. Bylo zjištěno, že absence dat z určité doby po začátku experimentu nemusí mít na přesnost predikce téměř žádný vliv. Tato doba se liší v závislosti na uspořádání experimentu.

Práce se zabývá i jevem, kdy se ve vývoji křivosti objevuje druhé maximum. Jeho hodnota může být dokonce vyšší než hodnota prvního maxima. Opětovný nárůst křivosti je způsoben rozdělením relativní vlhkosti po průřezu.

Poslední část práce se zabývá predikcí chování betonové desky konkrétních rozměrů. Deska je zatížena pouze vlastní tíhou a je modelována jako položená na podkladní desce. Zde je aplikována sada parametrů nejlépe vystihující experimentální data. Výstupem z tohoto modelu je předpověď zvedání desky a rozložení napětí v desce v průběhu času.

Hlavní poznatky při kalibraci parametrů modelu pro transport vlhkosti Bažant-Najjar jsou shrnuty v následujících bodech:

- Při identifikaci parametrů na základě úbytku hmotnosti a vývoje smrštění je lepší shody predikce a referenčního řešení dosaženo bez zohlednění úbytku hmotnosti.
- Nejvhodnější se pro predikci vývoje smrštění a křivosti z porovnávaných variant zdá být identifikace parametrů modelu na základě experimentu jednostranně vysychajícího trámu, kde může být křivost pozorována jako složka celkové deformace.

-
- Znalost vlhkosti v určitých bodech desky pro predikci vývoje křivosti může být přínosná. Se zohledněním reálných nepřesností vzniklých při měření vlhkosti se použití skutečně zjištěné vlhkosti v betonu nezdá být přínosem pro predikci vývoje křivosti.
 - Pro potvrzení modelované problematiky v plném rozsahu je nutné vytvořit větší experimentální základnu s nesymetricky vysychajícími vzorky.

Literatura

1. PATZÁK, B. *OOFEM home page* [online]. 2000 [cit. 2020-10-10]. Dostupné z: <http://www.oofem.org>.
2. ČSN EN 1992-2 (736208) *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí–Část 2: Betonové mosty–Navrhování a konstrukční zásady*. Český normalizační institut, 2007. Česká technická norma.
3. BAŽANT, Z. P.; JIRÁSEK, M. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures*. Springer Netherlands, 2018.
4. *CEB–FIP Model Code 1990: Design Code*. London: T. Telford, 1993.
5. *CEB–FIP Model Code 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib), 2012. fib Bulletin, č. 65.
6. SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty*. Jaga Group, 2013.
7. MA, X.; CARETTE, J.; BENBOUDJEMA, F.; BANNACER, R. Optimization of experiment methodology based on identification of parameters in concrete drying. *Construction and Building Material*. 2020, roč. 256, s. 119421–119429.
8. WORMALD, R.; BRITCH, A. L. Methods of Measuring Moisture Content Applicable to Building Materials. *Building Science*. 1969, roč. 3, č. 3, s. 135–145.
9. CARETTE, J.; SOLEILHET, F.; BEMBOUDJEMA, F.; MA, X.; NAHAS, G.; ABAHRI, K.; DERQUENNES, A.; BENNACER, R. Identifying the mechanisms of concrete drying: An experimental-numerical approach. *Construction and Building Material*. 2020, roč. 230, s. 117001–117013.
10. BRIFFAUT, M.; BENNOUDJEMA, F.; TORRENTI, J.M.; NAHAS, G. Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures. *Engineering Structures*. 2011, roč. 33, č. 4, s. 1390–1401.
11. ZHANG, J.; SCHERER, G. W. Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and Concrete Research*. 2011, roč. 41, č. 10, s. 1024–1036.
12. BAŽANT, Z. P.; 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, roč. 194, s. 1–84.
13. BAŽANT, Z. P.; HAVLÁSEK, P.; JIRÁSEK, M. Microprestress-solidification theory: Modeling of size effect on drying creep. In: *EURO-C 2014 Conference*. 2014, s. 749–758.
14. DOHNALOVÁ, L. *Vliv velikosti vzorku na konečnou hodnotu smrštění betonu, diplomová práce*. ČVUT Praha, 2020.

15. PATZÁK, B. *Material model library manual* [online]. 2019 [cit. 2020-10-10]. Dostupné z: <http://www.oofem.org/resources/doc/matlibmanual/matlibmanual.pdf>.
16. LIANG, S.; WEI, Y. Methodology of obtaining intrinsic creep property of concrete by flexural deflection test. *Cement and Concrete Composites*. 2019, roč. 97, s. 288–299.
17. BURROWS, R. W. M-11: The Visible & Invisible Cracking of Concrete. In: *American Concrete Institute*. 1998.
18. ŠMILAUER, V.; HAVLÁSEK, P.; GASCH, T.; DELAPLACE, A.; BOUHJITI, D. E.-M.; BENBOUDJEMA, F.; BRIFFAUT, M.; KANAVARIS, F.; AZENHA, M. Hygro-mechanical modeling of restrained ring test: COST TU1404 benchmark. *Construction and Building Materials*. 2019, roč. 229, s. 116543–116555.
19. BAŽANT, Z. P.; NAJJAR, L. J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Matériaux et Construction*. 1972, roč. 5, č. 25, s. 3–20.
20. KÜNZEL, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. *Fraunhofer Institute of building physics, Allemagne*. 1995, roč. 65.
21. BAŽANT, Z. P.; PRASANAN, S. Solidification Theory for Concrete Creep. *Journal of Engineering Mechanics*. 1989, roč. 115, č. 8, s. 1691–1725.
22. JIRÁSEK, M.; HAVLÁSEK, P. Microprestress–solidification theory of concrete creep: Reformulation and improvement. *Cement and Concrete Research*. 2014, roč. 60, s. 51–61.
23. BAŽANT, Z. P.; HAUGGAARD, A. P.; BAWEJA, S.; ULM, F. J. Microprestress solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997, roč. 123, č. 11, s. 1188–1194.
24. OLSSON, N.; NILSSON, L.-O.; AHS, M.; BAROGHEL-BOUNTY, V. Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume. *Cement and Concrete Research*. 2018, roč. 106, s. 23–32.
25. BRYANT, A. H.; VADHANAVIKKIT, C. Creep, Shrinkage-size, and Age at Loading Effects. *ACI Materials Journal*. 1987, roč. 84, č. 2, s. 117–123.
26. ACI-209R. *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*. American Concrete Institute ACI Detroit, USA, 1998.
27. HAVLÁSEK, P. *Creep and Shrinkage of Concrete Subjected to Variable Environmental Conditions, doktorská práce*. ČVUT Praha, 2014.
28. *Capacitive Humidity Sensor FHA646R* [online]. Copyright ©Instruments Direct Services Limited [cit. 2020-11-10] Dostupné z: <https://www.indes.co.uk/product/capacitive-humidity-sensor-fha646r/>.