VYSYCHÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU ▮ DRYING AND SHRINKAGE OF CONCRETE

Marek Vinkler, Jan L. Vítek

Smršťování betonu je příčinou řady problémů betonových konstrukcí zejména v jejich provozním stavu, tedy v mezních stavech použitelnosti. Smršťování betonu má více složek, pro běžné betony je nejpodstatnější smršťování od vysychání. Článek popisuje základní principy vysychání a smršťování, včetně predikce smršťování dle normových předpisů. Dále jsou uvedeny výsledky experimentálního programu probíhajícího na Fakultě stavební ČVUT. ▮ Many problems in performance of concrete structures during their service life (in the serviceability limit states) were observed due to shrinkage of concrete. Shrinkage of concrete has more parts; drying shrinkage is the most important in ordinary concrete. The paper deals with basic principles of drying and shrinkage, and its prediction according to the codes and recommendations. Results of the experimental program carried out at the Faculty of Civil Engineering at the Czech Technical University in Prague are described.

Smršťování betonu je deformace materiálu, která vzniká bez ohledu na působící zatížení. V případě betonových prvků, kde není bráněno jejich volné deformaci, je smršťování příčinou vzniku jednak deformace (ve většině případů zkrácení prvků) a jednak vlastních pnutí, tedy napětí, která jsou vzájemně v rovnováze, ale lokálně mohou dosahovat hodnot překračujících pevnost betonu v tahu, a tedy být důvodem ke vzniku trhlin. V případě prvků, kde není možná volná deformace, vede jejich smršťování opět ke vzniku vlastních pnutí, jejichž výslednice není nulová, ale obvykle tahová, a riziko porušení betonových prvků trhlinami se významně zvětšuje. V provozních stavech, resp. v mezních stavech použitelnosti ve smyslu návrhové normy je proto nutné se deformacemi od smršťování zabývat, neboť mohou ovlivnit užitné vlastnosti betonových konstrukcí a zároveň jejich trvanlivost. V článku budou dále uvedeny příčiny smršťování a možnosti jejich predikce.

Vysychání a následné smršťování je nutné respektovat v mnoha případech. Např. lze uvést následující návrhové situace:

- Tlustá deska nebo stěna bez vázané deformace: vlivem vysychání je smršťování nerovnoměrné po průřezu, vznikají vlastní pnutí a riziko vzniku trhlin na površích desky.
- Deska nebo stěna s vázanou deformací: vlivem postupného vysychání se deska nebo stěna smršťuje, čímž kromě vlastních pnutí po průřezu vznikají další tahová napětí a z toho plynoucí riziko trhlin.
- Vodonepropustné betonové konstrukce: převážně vlivem omezené deformace vznikají tahová namáhání, na která je nutné konstrukce dimenzovat, aby reálná šířka trhlin byla natolik malá, že nebude ohrožena vodonepropustnost, popř. navrhnout jiná opatření k redukci tahových napětí.
- Průhyby betonových trámů a desek: při malé, popř. chybějící horní výztuži v polích spojitých nebo prostě podepřených desek vzniká průhyb od smršťování, který je často srovnatelný s průhybem od užitných zatížení.
- Smršťovací pásy: v technické veřejnosti je povědomí, že u desek nebo stěn pozemních staveb proběhne „velká většina“ deformace od smršťování během cca tří měsíců. U tenkých desek by se takový údaj dal někdy akceptovat. U tlustých (základových) desek je smršťování značně pomalejší a probíhá po dobu v řádu let. Funkce smršťovacího pásu je pak velmi omezená, až zanedbatelná. Zde je třeba též připomenout, že smršťovací pás je pak vystaven omezené deformaci ve směru jeho délky. Pokud jeho vyztužení není dostatečně velké, dochází ke vzniku trhlin ve smršťovacím pásu kolmo na jeho směr. Místo omezení poruch se smršťovací pruh může naopak stát jejich zdrojem.
- Podlahové desky: jde obvykle o poměrně tenké desky (cca do 100 mm), které jsou odseparovány od podkladu. V případě průmyslových podlah jsou jejich tloušťky větší (cca 250 až 350 mm) a jsou nabetonovány většinou na podkladním betonu. V obou případech je z hlediska smršťování betonu třeba navrhnout vhodné dělení pomocí smršťovacích spár, aby se předešlo vzniku náhodných trhlin. Betonové desky bývají od podkladu odděleny nepropustnou vrstvou (často PE fólií) a vysychají tak pouze shora. Horní vrstva betonu se smršťuje, zatímco spodní vrstva vysychat nemůže. Důsledkem je zvedání rohů, popř. okrajů jednotlivých úseků desek (tzv. „curling“). Pokud je zvednutý roh přitížen, může dojít k jeho ulomení, tedy poruše, která je téměř neopravitelná.
- Přímo pojížděné betonové desky (stropní nebo základové desky parkovišť) i jiné podobné konstrukce bývají opatřeny stěrkou nebo jinou podobnou povrchovou úpravou. Výrobci povrchových materiálů předepisují maximální vlhkost betonu, aby mohla být povrchová vrstva spolehlivě aplikována. Často jsou požadovány nereálně vysoké požadavky na vysušení povrchu betonu.

VYSYCHÁNÍ BETONU

V této části je uveden popis základních fyzikálních mechanismů působení vody v betonu: zejména jak beton vodu přijímá, zadržuje a odevzdává.

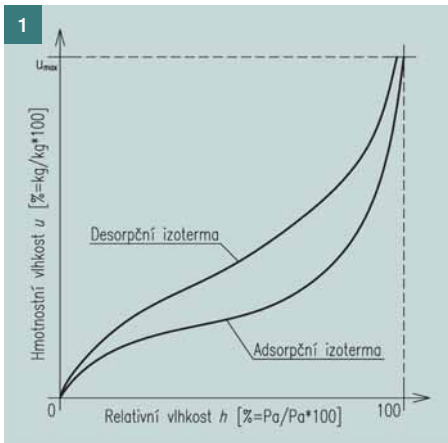
Hygroskopická vlhkost

Vlhkost betonu v běžném prostředí (vzduch s určitou teplotou a relativní vlhkostí) dosáhne po určité době (většinou velmi dlouhé) rovnováhy s prostředím prostřednictvím výměny tepelné energie a vodních par s okolím. Beton tak přijímá nebo odevzdává hygroskopickou vlhkost, která se nachází v pórech betonu a je zde vázána fyzikálními mechanismy jako je adsorpce nebo kapilární kondenzace. V pórech betonu jsou vodní páry v dynamické rovnováze s hygroskopickou vlhkostí při dané teplotě a relativní vlhkosti. Závislost mezi relativní vlhkostí v pórech betonu a hmotnostní vlhkostí betonu je popsána prostřednictvím sorpční izotermy, křivky, která je závislá na teplotě a stáří betonu a je základní charakteristikou vlhkostního chování materiálu. Sorpční izoterma betonu má typický esovitý tvar (obr. 1), který lze rozdělit na úseky, ve kterých se liší mechanismus adsorpce vodní páry.

Hygroskopická vlhkost vykazuje hysterezi, tj. rozlišujeme adsorpční izotermu, pokud materiál vodu přijímá (vlhčení), resp. desorpční izotermu, pokud materiál vodu odevzdává (vysychání). Desorpční izoterma leží vždy nad adsorpční izotermou.

Transport vlhkosti

Základním mechanismem transportu je difuze vlhkosti pórovým systémem betonu. To je způsobeno gradientem (rozdílem) vlhkosti mezi betonem a vnějším prostředím. Vlastnost betonu popisující rychlost vysychání je difusivita a může být popsána součinitelem difuze vlhkos-



Obr. 1 Hystereze sorpční izotermy ▮
Fig. 1 Hysteresis of the sorption isotherm

ti. Rozlišují se tři různé mechanismy difuze vlhkosti: molekulární difuze (běžná difuze), Knudsenova difuze a povrchová difuze [7]. Tyto mechanismy mohou působit všechny současně, nebo jednotlivě v závislosti na pórové struktuře betonu. Pro každý z těchto mechanismů byly již vytvořeny více či méně přesně modely, případně i kombinované modely uvažující všechny procesy dohromady. Nejvýznamnějším parametrem ovlivňujícím difusivitu betonu je struktura pórového systému a ta je nejvíce ovlivněna vodním součinitelem betonu.

Predikce vysychání betonu

Chceme-li znát vývoj vlhkosti betonu v čase, musíme se zabývat její predikcí na základě vhodného modelu. Za vysokých teplot je nutné řešit sdružený transport vlhkosti a tepla, ve většině případů se však stačí zabývat transportem samotné vlhkosti. Dalším omezením je velikost trhlin v betonu. Příliš velké trhliny (> 0,3 mm) mění mechanismus vysychání.

Vysychání betonu může být v nejjednodušším případě popsáno diferenciální rovnicí druhého řádu, která je parabolického typu, kde $h = h(x,t)$ je neznámá funkce popisující rozložení relativní vlhkosti v prostoru a v čase. Předpokládejme 1D problém (vysychání velké desky ve směru její tloušťky) s délkovou souřadnicí x [1], [7]:

$$\frac{\partial u}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[D_h \frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial h_s}{\partial t} + \kappa \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

kde u [kg/kg] je hmotnostní obsah vlhkosti, h [Pa/Pa] relativní vlhkost v pórech, $\partial u/\partial h$ [-] derivace sorpční izotermy (vlhkostní kapacita), D_h [m^2/s] součinitel difuze vlhkosti, h_s [Pa/Pa] funkce popisující spotřebu vody vlivem hydratace, κ [1/K] hygrotermální koeficient, T [K] teplota, t [s] časová proměnná a x [m] prostorová proměnná.

Celkový pokles vlhkosti vlivem spotřeby vody na hydrataci h_s se pohybuje kolem 2 až 5 % pro běžné betony. Pokud se neprovádějí detailní výpočty, lze tento pokles zanedbat. Pro betony s nižším vodním součinitelem je tento pokles výrazně větší, může dosahovat až 20 %, a nelze jej tedy zanedbat. Koeficienty v rovnici (1) jsou funkcí složení betonu a relativní vlhkosti, tzn. jsou závislé na samotném řešení.

Existuje mnoho dalších modelů pro predikci vysychání, nicméně čím složitější jsou, tím víc parametrů je třeba znát, přičemž je velmi obtížné tyto parametry získat z experimentálních dat. Problémem je i to, že experimentálních dat popisujících vysychání je k dispozici podstatně méně než experimentálních dat týkajících se smršťování.

Rychlost vysychání

Rychlost vysychání je parametr, který je často v technické i laické veřejnosti pozorován jako zdánlivé vyschnutí viditelného povrchu betonu. Jaká je rychlost skutečného vysychání a v jaké hloubce pod povrchem, není příliš známo. Vysychání je příčinou smršťování od vysychání, ale je vžita představa, že během cca 3 měsíců proběhne většina deformace od smršťování. To by mohlo platit u tenkých prvků, ale obecně je proces významně pomalejší. Z toho též plyne, že i vysychání je značně pomalejší. Pro orientační odhad doby, za jakou se vysychající fronta v betonu posune až k nejvzdálenějšímu místu, lze použít vztah (2) [2]. Tato doba se označuje jako charakteristický čas $t_{h,char}$ a můžeme ji stejně jako pro vlhkost stanovit i pro teplotu, vztah (3), kdy $t_{T,char}$ označuje dobu, za jakou se teplotní fronta posune k nejvzdálenějšímu místu.

$$t_{h,char} = \frac{h_{D,eff}^2}{12 D_h}, \quad (2)$$

$$t_{T,char} = \frac{h_{D,eff}^2}{12 D_T}, \quad (3)$$

kde $h_{D,eff}$ [m] je efektivní rozměr desky (pro jednostranné vysychání $h_{D,eff} = h_D$, pro oboustranné vysychání $h_{D,eff} = h_D/2$), D_h [m^2/s] je vlhkostní difusivita betonu, D_T [m^2/s] teplotní difusivita betonu = součinitel teplotní vodivosti $D_T = \lambda/(\rho.c)$, $t_{h,char}$ [s] charakteristický čas pro vlhkost a $t_{T,char}$ [s] charakteristický čas pro teplotu.

Ilustrativní příklad výpočtu charakteristických časů pro vlhkost a pro teplotu je uveden v tab. 1, která jasně ukazuje, jak je vysychání betonu extrémně pomalý proces.

Smršťování betonu

Deformace od smršťování má několik příčin. Nejprve vzniká smršťování chemické nebo též nazývané autogenní. Tato deformace je významná zejména u betonů vyšších pevností a pak např. u UHPC (ultra-high-performance concrete). U takových betonů může dosáhnout autogenní smršťování velkých hodnot přesahujících i 500 mikrostrain (0,5 mm/m). U běžných betonů do třídy pevnosti 60 MPa je autogenní smršťování malé, často zůstává skryto v statistickém rozptylu hodnot smršťování od vysychání.

Smršťování plastické se většinou projevuje u tlustých desek, kde vlivem tohoto jevu dochází k snížení tloušťky desky. Je-li deska vyztužena i horní výztuží (což je téměř vždy), horní výztuž brání smršťování a mohou vznikat poruchy na povrchu betonu.

Pro běžné betony je nejzávažnější smršťování od vysychání. Vlivem vysychání dochází k úbytku vody v pórech. Tím jsou generovány kapilární síly, které vyvolávají zmenšení objemu, a tím vzniká smršťování, které má významné dopady na působení konstrukcí. V případě prudkého úbytku vody mohou být tyto síly natolik významné, že může dojít ke vzniku mikrotrhlin, které se mohou, nebo taky nemusí projevit vznikem trhliny. Smršťování je nutné uvažovat při navrhování betonových konstrukcí i při jejich realizaci. Jak již bylo zmíněno výše, je smršťování od vysychání příčinou vlastních pnu-

Tab. 1 Charakteristické časy desek pro vlhkost a pro teplotu ▮
Tab. 1 Characteristic times of boards for humidity and temperature

Tloušťka desky h_D [mm]	Charakteristický čas pro vlhkost $t_{h,char}$ [d] (D_h = 10 mm^2/d)	Odhad doby vysychání [d]	Charakteristický čas pro teplotu $t_{T,char}$ [min] (D_T = 35 mm^2/min)
100	21	100 až 150	6
200	83	400 až 600	24
400	333	1 000 až 1 500	95
800	1 333	4 000 až 6 000	381

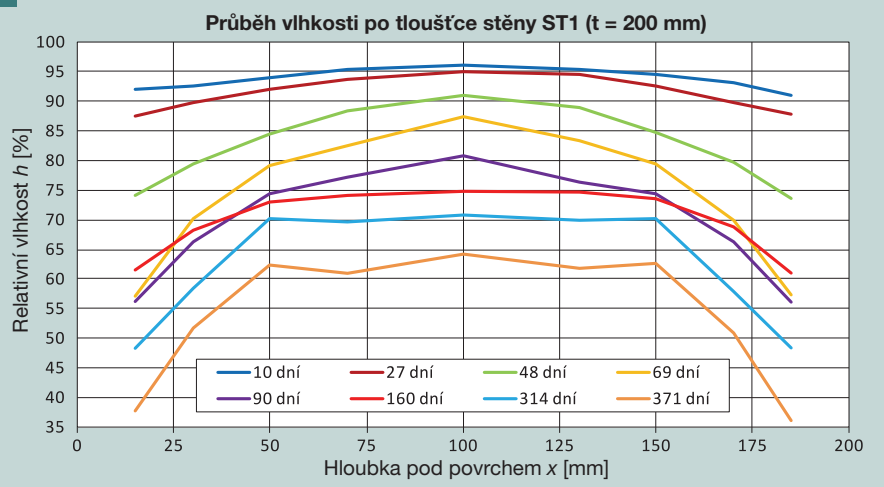
Obr. 2 Průběh relativní vlhkosti po tloušťce stěny tlusté 200 mm ▮ Fig. 2 Variation of relative humidity along the thickness of the wall 200 mm thick

Obr. 3 Časový průběh vysychání stěny tloušťky 200 mm ▮ Fig. 3 Time variation of drying of the wall 200 mm thick

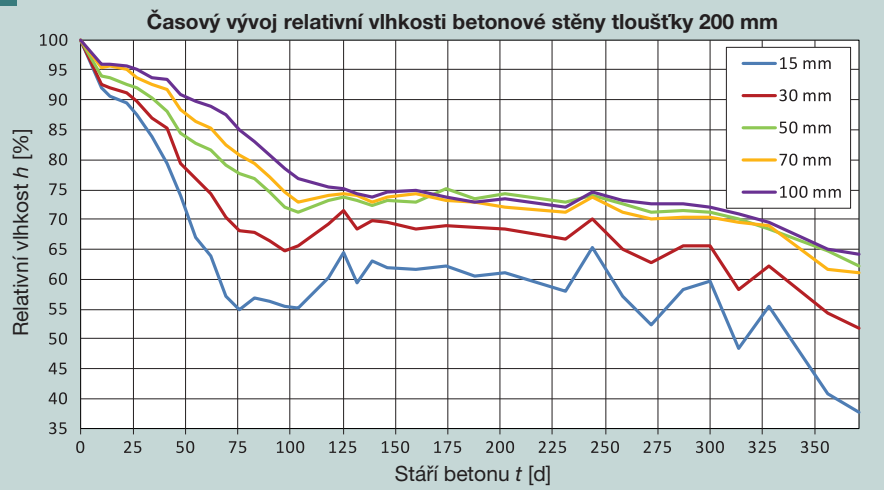
Obr. 4 Průběh relativní vlhkosti po tloušťce stěny tlusté 800 mm ▮ Fig. 4 Variation of relative humidity along the thickness of the wall 800 mm thick

Obr. 5 Časový průběh vysychání stěny tloušťky 800 mm ▮ Fig.5 Time variation of drying of the wall 800 mm thick

2



3



tí, čímž vzniká riziko vzniku trhlin v betonových prvcích, a tím riziko snížení užitných parametrů konstrukce, popř. snížení její životnosti.

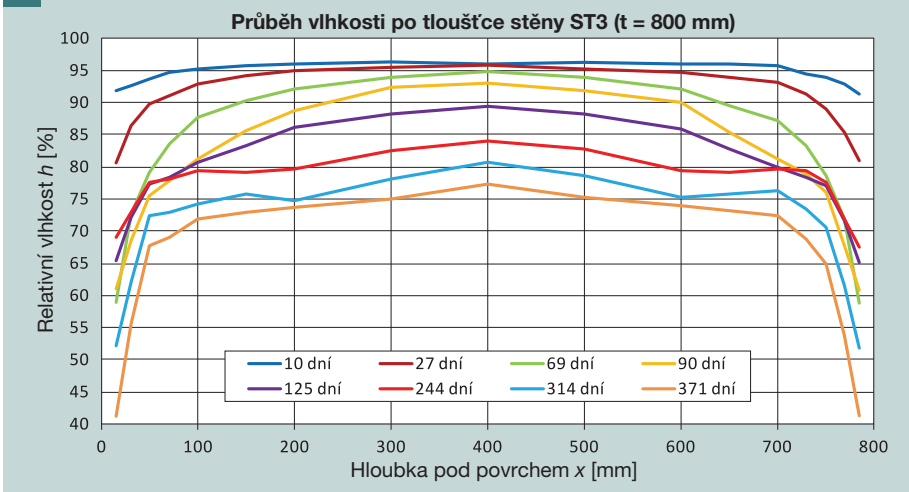
Vysychání betonu probíhá, jak již bylo uvedeno, velmi pomalu. V závislosti na vysychání pak vzniká deformace od smršťování. Konečná hodnota deformace od smršťování není přesně definována. Je známo, že prvky s malým průřezem vysychají rychleji než prvky s velkým průřezem, což jasně potvrzuje, že smršťování je závislé na vysychání. Při konečném vyschnutí je pravděpodobně deformace od smršťování stejná nebo alespoň podobná u tlusté a tenké desky. Rozdíly jsou zejména v rychlosti smršťování, která je závislá na rychlosti vysychání. Zdánlivě menší smršťování u tlusté desky proti tenké desce má patrně příčinu v tom, že tenká deska vysychá rychleji. Konečná hodnota smršťování je známa teprve po dokonalém vyschnutí betonu. Kdy k tomu dojde je obtížně stanovitelné, protože existující měření jsou časově omezená a netrvají tak dlouho, aby k úplnému vyschnutí betonového prvku skutečně došlo. Proto řada výsledků, které jsou v literatuře k dispozici, nemůže konečnou hodnotu smršťování přesně definovat. Experimenty, které by byly zaměřeny na rychlé vyschnutí betonu, kde by byl zaznamenán průběh vlhkosti betonu v čase a současně měřeno smršťování, nejsou autorům známy. Též by bylo stále nejisté, zda rychlé vysychání při laboratorním pokusu by vedlo ke stejné hodnotě smršťování jako reálná situace, kdy vysychání probíhá relativně pomalu, a to zejména pokud je prvek ve venkovním prostředí. Je třeba rozlišit i případy betonových konstrukcí v klimatizovaných budovách se stálou, a přitom nízkou relativní vlhkostí prostředí (cca 30 až 40 %) a konstrukce ve venkovním prostředí, kde vlhkost prostředí kolísá dle počasí. U prvků uložených venku byly naměřeny kolísavé deformace od smršťování. V podzimním období, kdy je prostředí vlhčí, dochází k nabývání (tedy k redukci smršťování), zatímco v jarním období pak deformace od smršťování narůstá rychleji. Podobné trendy byly pozorovány též u dotvarování betonu, kdy např. průhyby měřené na jaře a na podzim vykazují mírně rozdílné hodnoty i v případě, že teplota prostředí je přibližně stejná.

Predikce smršťování betonu

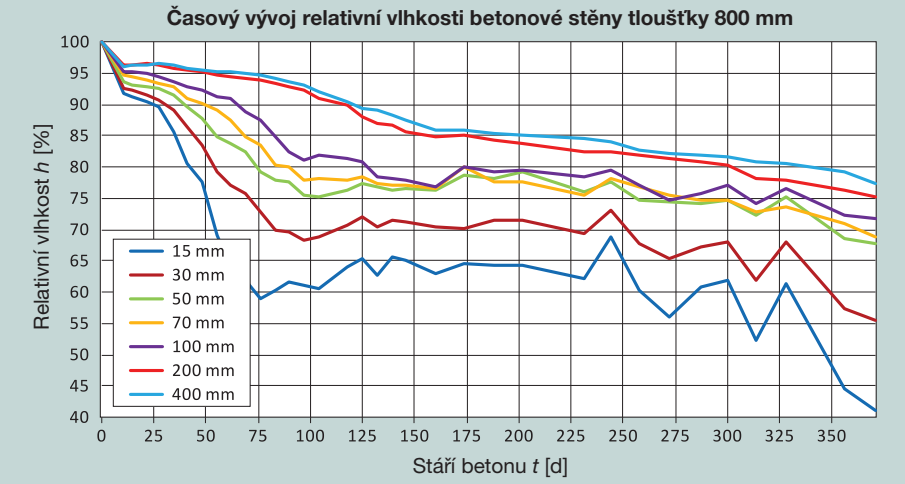
Volné smršťování betonu je určeno poměry v daném bodě konstrukce (průřezu). Smršťování od vysychání tedy závisí především na vlhkosti (stupni vysychání) v sledovaném bodě konstrukce (průřezu). Z toho plyne, že volné smršťování by bylo rozdílné v jednotlivých bodech průřezu. Tyto body jsou však vzájemně spojeny a nemohou se rozdílně deformovat. Vznikají tak vlastní pnutí – tedy napětí. Důsledkem těchto napětí jsou další složky deformace (elastická a dotvarování, popř. vliv mikrotrhlin a trhlin). V reálné konstrukci tedy není možné sledovat volné smršťování, ale deformaci, která je výsledkem volného smršťování a deformací vyvolaných vlastními pnutími.

Numerické modely, které jsou běžně používány pro stanovení deformace od smršťování, vyjadřují celkovou deformaci – přesněji celkové zkrácení prvku od smršťování (včetně účinků vlastních pnutí), která byla určena na základě vyhodnocení experimentálních měření. Většinu vyhodnocovaných měření tvoří malé laboratorní vzorky. Smršťování na větších prvcích je proto určováno pomocí opravných prostředků. Je to buď tzv. náhradní tloušťka průřezu, určená jako poměr průřezové plochy a obvodu vystavené okolnímu prostředí, nebo poměr objemu konstrukčního prvku a jeho povrchu vystaveného okolnímu prostředí.

4



5



Během vývoje betonových konstrukcí byla vytvořena celá řada numerických modelů pro predikci smršťování betonu. Nejjednodušší vznikly již v první polovině 20. století, kdy bylo smršťování seriózně pozorováno, další jsou vyvíjeny dodnes s cílem dosáhnout co nejvýstižnější popis vývoje smršťování i s ohledem na neustále se vyvíjející složení moderních betonů. V současné době se nejvíce používají modely dle Eurokódu 2, modely vyvinuté prof. Bažantem a doporučené RILEM (modely B3 a B4) a model vyvinutý Mezinárodní federací pro konstrukční beton (*fib*) uvedený v Model Codu 2010.

VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU

V lednu 2015 byl na Fakultě stavební ČVUT v Praze zahájen experimentální program současného měření vlhkosti a smršťování betonových vzorků různých rozměrů. Měření stále probíhají a některé počáteční výsledky (do stáří betonu 371 dní) jsou zde uvedeny.

Experimentálními vzorky jsou tři výseky betonových stěn, rozměrů 800 × 800 mm a tlouštěk 200 (ST1), 400 (ST2) a 800 mm (ST3) doplněné o šest standardních válců 150 x 300 mm. Do každé stěny byly zabetonovány utěsněné plastové trubičky do různých hloubek od vysychajícího povrchu (15, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400 mm) a čtyři strunové tenzometry umístěné ve střednicové rovině. Stěny byly částečně ponechány v bednění tak, aby bylo zajištěno oboustranné vysychání ve směru tloušťky stěn (tj. pouze v jednom směru). Do každého válce byl zabetonován strunový tenzometr umístěný v ose válce. Válce byly rozděleny do tří skupin po dvou válcích, každá skupina byla umístěna v prostředí s jinou relativní vlhkostí: ve fakultní laboratoři v prostředí s proměnnou, ale sledovanou vlhkostí a v řízeném prostředí s relativní vlhkostí 65 a 100 %. Podmínky prostředí ve fakultní laboratoři byly pečlivě zaznamenávány v časových odstupech 5 min. Průměrná relativní vlhkost za období 371 dní byla 39 %, průměrná teplota 21,5 °C.

Betonová směs byla dodána betonárnou TBG Metrostav Rohanský ostrov v kvalitativní třídě C30/37. Tato pevnostní třída byla vybrána, protože jde o nejpoužívanější beton v praxi. Základní parametry směsi jsou: vodní součinitel 0,5, množství cementu CEM I/42,5R 360 kg/m^3. Průměrná naměřená 28denní pevnost betonu v tlaku na krychlích byla 55 MPa. Více informací k experimentu je uvedeno v [6].

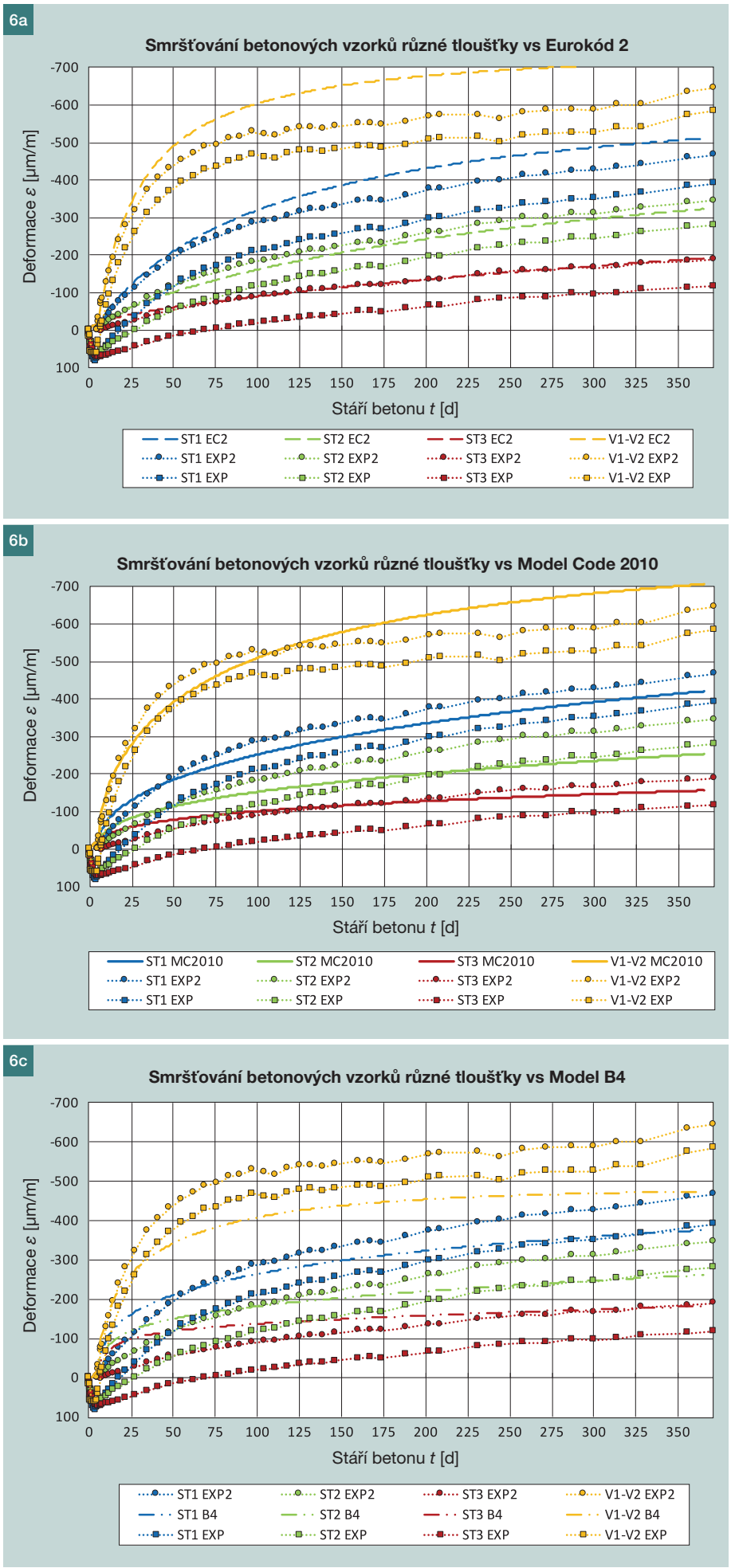
Výsledky měření postupného vysychání

Obr. 2 zobrazuje průběh relativní vlhkosti ve stěně tloušťky 200 mm v různých časech po vybetonování. Po roce dosáhla vlhkost v hloubce 15 mm přibližně průměrnou relativní vlhkost prostředí (cca 40 %), ale ve střední části stále zůstává vlhkost cca 65 %, což znamená, že stěna 200 mm tlustá nevyschla během roku v relativně suchém prostředí na úroveň okolního prostředí.

Na obr. 3 je vykreslen časový vývoj relativní vlhkosti v betonové stěně tloušťky 200 mm v různých hloubkách od vysychajícího povrchu. Zpomalení vysychání ve střední oblasti grafu je způsobeno vyšší relativní vlhkostí prostředí v letním období. Jasně patrný je velmi pomalý vývoj vysychání. U konstrukcí vysychajících v běžném venkovním prostředí by byl vývoj ještě pomalejší.

Obr. 4 zobrazuje průběh relativní vlhkosti ve stěně tloušťky 800 mm v různých časech po vybetonování. Zatímco vlhkost v hloubce 15 mm podobně jako u tenké stěny dosáhla přibližně za rok vlhkosti okolního prostředí, vnitřní část stěny má stále vlhkost přesahující 75 %. V hloubce 100 mm byla naměřena po roce vlhkost cca 72 %.

Obr. 5 ukazuje časový průběh vlhkosti ve stěně tloušťky 800 mm v různých hloubkách od vysychajícího povrchu. Ve srovnání s obr. 3 je vidět u stěny tloušťky 800 mm ještě pomalejší průběh vysychání. Ve střední části stěny (hloubka 400 mm) je též patrná nízká citlivost průběhu vysychání na výkyvy vlhkosti okolního prostředí. Důvodem je, že tlustší stěna obsahuje větší množství vody a zároveň má voda v průměru delší cestu k vysychajícímu povrchu. Příklad ukazuje, jak pomalu vysychají tlusté konstrukce. Například základová deska tloušťky 800 mm ob-



Obr. 6 Smršťování betonových vzorků různé tloušťky: a) porovnání Eurokód 2, b) porovnání Model Code 2010, c) porovnání model B4 ▮ Fig. 6 Shrinkage of elements of variable thickness: a) comparison Eurocode 2, b) comparison Model Code 2010, c) comparison model B4

jektu s hydroizolací bude vysychat pouze z jednoho (horního) povrchu a doba vysychání se proti uvedenému ještě příkladu výrazně prodlouží. Pokud by základová deska tloušťky 800 mm byla součástí vodonepropustné konstrukce (bílé vany) vystavené trvale vodnímu prostředí, pak by spodní povrch patrně nikdy nevyschl. Výsledkem by bylo nulové smrštění od vysychání u spodního povrchu desky.

Poznámky k měření vlhkosti

Měření vlhkosti betonu je nutné provádět vhodnou metodou, která dokáže změřit reprezentativní objem betonu. Použití hrotových (odporových) vlhkoměrů k objektivnímu zjištění vlhkosti podkladu (např. u podlah) má velmi omezený význam. Tímto přístrojem je možné změřit pouze vlhkost v tenké povrchové vrstvičce betonu, která má logicky menší vlhkost než je průměrná vlhkost prvku a výsledek pak neodpovídá skutečnosti. V praxi se hojně používá CM metoda na malých rozdrcených vzorcích, případně gravimetrická metoda na vývrtech. Důležité je, aby odebraný vzorek vhodně reprezentoval průměrnou vlhkost prvku, tj. vývrty a vzorky musí být odebrány skrz celou tloušťku prvku. U zkoušky stanovení zbytkové vlhkosti sušením je dalším problémem sušení vzorku na 105 °C, protože již při teplotě nad 60 °C dochází k částečnému uvolňování krystalické vody z cementového tmele, čímž je výsledek nadhodnocen. Podobnému problému se u potěrů na bázi sádry čelí nastavením zkoušky zbytkové vlhkosti sušením při 40 °C. Revize zkoušek vlhkosti pro betonové vzorky by tedy byla pravděpodobně vhodná.

Výsledky měření smršťování na vzorcích stěn a na válcích

Výsledky naměřených poměrných deformací na vzorcích stěn o tloušťce 200

(ST1), 400 (ST2) a 800 mm (ST3) a výsledky měření na válcích (V1 a V2) uložených ve stejném prostředí jako modely stěn jsou porovnány s výsledky predikce smršťování dle modelu EC2 (Eurokód 2) (obr. 6a), dle Model Codu 2010 (obr. 6b) a dle modelu B4 (obr. 6c). Přímo naměřené hodnoty poměrných deformací jsou označeny EXP. V počátečních fázích tvrdnutí betonu dochází k nabývání (což bylo naměřeno i při jiných experimentech), které však rychle vymizí. Použitá metoda měření tyto deformace zachycuje, protože umožňuje měření prakticky ihned od vybetonování prvků. Běžnější měření využívají různé metody, kdy se měření zahajuje, až beton zatvrdne. Proto jsou uvedeny ještě modifikované experimentální křivky, kde nulové měření odpovídá stáří betonu cca pět dní. Ty jsou označeny EXP2.

Porovnání přesnosti predikce jednotlivých modelů je v tomto případě pouze omezené, neboť experimentální program obsahuje výsledky naměřené pouze na jednom druhu betonu. Lze konstatovat, že model dle EC2 nadhodnocuje deformaci malých vzorků, zatímco model B4 deformaci malých vzorků spíše podhodnocuje. Jako nejvýznamnější výsledek týkající se smršťování lze považovat velký rozdíl mezi deformací od smršťování na malých a velkých vzorcích – tedy jakýsi „size efekt“. Jak již bylo uvedeno dříve, výsledky jsou zatím krátkodobé. Jakých hodnot bude dosaženo po mnoha letech, se zatím nedá usuzovat. Dosažené výsledky jsou využitelné pro vyhodnocení vývoje deformací od smršťování např. v době výstavby konstrukce. Zároveň je z uvedených grafů jasně patrné, že po roce měření nedošlo k ustálení deformací, tedy smršťování dále probíhá.

ZÁVĚR

Vysychání betonu je pomalý proces, který je třeba sledovat, protože je příčinou vzniku podstatné části smršťování betonu a zároveň může ovlivňovat technologické procesy na stavbě a též i kvalitu prostředí uvnitř budov.

Vzhledem k dlouhé době vysychání lze předpokládat, že vysychání a smršťování nebude ukončeno ani po jednom roce i u tenkých prvků (cca 200 mm). U tlustých prvků lze počítat s dosažením ustáleného stavu s okolním prostředím v řádu let, často i desítek let.

Během prvních měsíců proběhne část deformace od smršťování, ale poměrně malá, a to v závislosti na rozměrech prvků. Na základě uvedených měření, ale i dalších zkušeností, lze proto považovat funkci smršťovacích pruhů za velmi diskutabilní, spíše značně omezenou. Navíc při návrhu smršťovacích pruhů vznikají další pracovní spáry a smršťovací pruh sám o sobě je velmi namáhán vlivem jeho smršťování v podélném směru, které je omezeno okolní konstrukcí. Proto lze doporučit i na základě uvedených měření smršťovací pruhy nenavrhovat.

Na základě provedených měření nelze objektivně zhodnotit výstižnost jednotlivých modelů pro predikci smršťování betonu zejména z důvodu omezeného rozsahu experimentů. Lze však konstatovat, že rozvoj v technologii betonu pokračuje velmi rychle, používají se stále nové složky do betonu, vyvíjejí se cementy a přísady. Variabilita betonů se zvyšuje a rostou i mechanické parametry. Lze tedy doporučit navrhovat konstrukce tak, aby jejich citlivost na smršťování byla co nejmenší, protože predikce budou vždy trpět značným statistickým rozptylem. V případě konstrukce citlivé na smršťování by bylo vhodné modely modifikovat dle výsledků alespoň krátkodobých zkoušek provedených na konkrétním betonu použitém v konstrukci.

Výsledky uvedené v článku byly získány za podpory Centra kompetence CESTI (Projekt TAČR č. TE01020168) a projektu GAČR č. 16-04454S „Nejistoty na materiálové úrovni ovlivňující nejistoty na úrovni konstrukce“.

Literatura:

[1] BAŽANT, Z. P., NAJJAR, L. J. Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete. *Materials and Structures.* 1972, Vol. 5, p. 3–20.

[2] BAŽANT, Z. P., KIM, J.-K., JEON, S.-E. Cohesive Fracturing and Stresses Caused by Hydration Heat in Massive Concrete Wall. *Journal of Engineering Mechanics*. 2003, Vol. 129, No. 1, p. 21–30.

[3] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2. *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* Praha: ČNI, 2005.

[4] *fib Model Code for Concrete Structures 2010 – Final Draft. fib* – International Federation for Structural Concrete, 2013.

[5] RILEM Technical Committee TC-242-MDC (chair: Bažant, Z. P.): RILEM Draft Recommendation: TC-242-MDC Multi-decade Creep and Shrinkage of Concrete: Material Model and Structural Analysis. Model B4 for Creep, Drying Shrinkage and Autogenous Shrinkage of Normal and High-strength Concretes with Multi-decade Applicability. *Materials and Structures*. 2015, Vol. 48, p. 753–770.

[6] VINKLER, M., VÍTEK, J. L. Progressive Drying and Shrinkage of Concrete. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures.* CONCREEP 10, Vienna, 2015.

[7] XI, Y., BAŽANT, Z. P., MOLINA, L., JENNINGS, H. M. Moisture Diffusion in Cementitious Materials. *Advanced Cement Based Materials*, 1994, Vol. 1, p. 248–266.

Ing. Marek Vinkler
Fakulta stavební ČVUT v Praze
e-mail: marek.vinkler.1@fsv.cvut.cz

prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.
Metrostav, a. s.
a Fakulta stavební ČVUT v Praze
e-mail: jan.vitek@metrostav.cz

Firemní prezentace

PROFESIONÁLNÍ ŘEŠENÍ
výzkum ▪ vývoj ▪ výroba ▪ obchod ▪ poradenství
pro sanace betonových konstrukcí

Redrock Construction s.r.o.
Újezd 40/450, Michnuv palác
Praha 1, Malá Strana
Telefon: +420 283 893 533
Fax: +420 284 816 112
E-mail: info@redrock-cz.com
www.redrock-cz.com
REDROCK® CONSTRUCTION