



**České vysoké učení technické v Praze
Stavební fakulta**

Soutěž o Cenu akademika Bažanta
Akademický rok 2011/2012

Aktualizace predikce dotvarování betonu na základě měřených dat

Jméno a příjmení, ročník a obor :

Svatopluk Dobruský, 6. Ročník, obor C

Konzultant :

Prof. Ing. Milan Jirásek, DrSc.

Katedra :

Mechaniky

Obsah

Anotace	3
1. Úvod	3
2. Predikční modely.....	4
Model B3	4
<i>Fib</i> Model 2010	4
ACI 209 Model	5
GL Model	5
3. Vstupní data.....	5
4. Základní princip aktualizace modelů a jeho modifikovaná podoba	6
5. Přesnost aktualizované predikce	9
6. Určení vhodné doby měření	10
7. Určení minimální doby měření	11
8. Závěr.....	12
Použité zdroje.....	14

Anotace

V práci je popsán princip aktualizaci predikčních modelů dotvarování na základě měřených dat. Užívaná metoda lineární regrese byla rozšířena o váhové funkce, které pomohly zlepšit predikční schopnosti modelů. Práce dále popisuje minimální a optimální dobu průběžného měření viskoelastických vlastností betonu.

This article describes principles of updating creep prediction from short-time measurements. Basic method of linear regression was modified of weight function which helped to improved predictive capacities. The article also describes minimal and optimal time of continuous measurements of viscoelasticity characteristic.

1. Úvod

Dotvarování betonu se řadí mezi dlouhodobé deformace vyvolané napětím a je způsobeno viskoelastickými vlastnostmi betonu. Tato dlouhodobá deformace může velmi negativně ovlivnit odezvu konstrukce na zatížení, u níž pak způsobuje nárůst deformací a redistribuci vnitřních sil. Tyto vlivy se do výpočtu zavádějí pomocí predikčního modelu resp. součinitele dotvarování. Predikční modely pracují s funkcí poddajnosti, která představuje deformaci vyvolanou jednotkovým napětím. Vztah mezi funkcí poddajnosti a součinitelem dotvarování, který je při návrhu běžně užíván, je:

$$\varphi(t, t') = J(t, t')E(t) - 1 \quad (1)$$

Kde $\varphi(t, t')$ představuje součinitel dotvarování, $J(t, t')$ funkci poddajnosti, $E(t')$ modul pružnosti v čase zatížení, t sledovaný okamžik a t' čas vnesení zatížení. Jednotlivé predikční modely aproximují budoucí vývoj dotvarování na základě mnoha vstupních údajů (složení betonové směsi, způsob ošetřování a okolního prostředí). Avšak přesnost jednotlivých predikcí se může výrazně lišit od skutečného chování. V grafu 1 je znázorněn průběh dotvarování podle predikčního modelu B3 (Water Tower Place Concrete, Russel & Burg, 1996), který se výrazně liší od skutečných (měřených) hodnot. Vylepšení přesnosti (pro libovolný predikční model) může být dosaženo aktualizací průběhu dotvarování na základě měřených dat. Tento postup je dokonce vyžadován u významných staveb, kde by vliv dotvarování mohl omezit možnost užívání či dokonce způsobit ohrožení bezpečnosti.

Práce ukazuje možnost, jak efektivně zahrnout data získaná z měření na vzorcích k aktualizaci predikce dotvarování. Dále je práce zaměřena na ideální dobu měření vzorků, po kterou se významně projevuje vliv aktualizace predikčního modelu na celkové přesnosti (po určité době není již další aktualizace třeba z důvodu dostatečné přesnosti nového aktualizovaného modelu).

2. Predikční modely

Práce se zabývá čtyřmi modely popisující predikci dotvarování:

- Model B3
- *Fib* Model 2010
- ACI 209 Model
- GL2000 Model

Tyto modely dotvarování jsou nejčastěji užívány při návrhu konstrukcí u nás i ve světě. Modely v sobě zahrnují vlivy dotvarování i smršťování a mají přibližně shodné vstupní parametry, a tedy je možné vyhodnotit vzorek dle různých modelů bez nutnosti měření dalších dat. V modelech *Fib*, ACI 209 a GL2000 vystupuje parametr E_c , který představuje elastický modul pružnosti měřený ve stáří 28 dnů. Další parametry jsou stručně popsány u jednotlivých modelů.

Model B3

Predikční model navržený profesorem Bažantem v roce 2000. Jedná se pravděpodobně o nejoslovanější model popisující viskoelastické vlastnosti betonu zahrnující vlivy dotvarování a smršťování a jejich kombinaci. Funkce poddajnosti má tvar:

$$J(t, t') = q_1 + q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t - t')^{0.1}] + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right) + J_d(t, t') \quad (2)$$

Kde parametr q_1 představuje inverzní asymptotický elastický modul pružnosti, členy obsahující konstanty q_2 , q_3 , a q_4 popisují viskoelastické vlastnosti betonu, kde hodnoty konstant mohou být určeny z empirických vzorců. Funkce Q nemá přesnou formou a její hodnota lze určit z její integrální podoby či z přibližného vzorce. Funkce J_d představuje vlivy tykající se vysychání, avšak v této práci zaměřené na základní dotvarování betonu, je možné tento parametr vynechat.

Fib Model 2010

Model byl přijat v roce 2011 mezinárodní federací pro konstrukční beton (ve francouzštině „*fédération internationale du béton*“ *fib*). Model vychází z jeho předchůdce CEB Model, který se stal základem pro model užitý v EC 2, a tedy je možné usuzovat, že při další aktualizaci EC 2 bude tento model užit jako předloha. Funkce poddajnosti má tvar:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_c} e^{-\frac{s}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t'}}\right)} + \frac{\varphi_{RH} \beta_f}{E_c} \frac{1}{0.1 + t'^{0.2}} \left(\frac{t - t'}{\beta_H \beta_T + t - t'}\right)^{0.3} \quad (3)$$

Kde parametr s závisí na třídě cementu a parametry β_f , β_H , β_T a φ_{RH} vyjadřují vlivy závislé na vlhkosti a teplotě okolního prostředí, střední tlakové pevnosti betonu a rozměrech betonového prvku.

ACI 209 Model

ACI 209 Model je metodika uváděná v normách v USA (American Concrete Institute). Model byl prvně představen v roce 1971 a jeho poslední formulace byla uveřejněna v roce 1992 pod označení 209R-92. Funkce poddajnosti má tvar:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_c} \sqrt{b + \frac{a}{t'}} \left[1 + \frac{2.35\gamma}{(t')^m} \frac{(t - t')^{0.6}}{10 + (t - t')^{0.6}} \right] \quad (4)$$

Kde parametry a , b a m závisí na typu cementu a způsobu ošetřování. Parametr γ se získá součinem šesti různých parametrů závisících na typu ošetřování, vlhkosti okolního prostředí, V-S poměru, sednutí kužele, frakci kameniva a objemu vzduchu.

GL Model

GL2000 Model (Gardner a Lockman) byl představen v roce 2001. Tento model vychází z modelu Atlanta97 (Gardner a Zhao). GL2000 Model je v amerických normách uváděn jako ekvivalentní možnost k ACI Modelu. Funkce poddajnosti má tvar:

$$J(t, t') = \frac{1}{3.5 + (E_c - 3.5)e^{\frac{s}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t'}}\right)}} + \frac{\varphi}{E_c} \left[\frac{2(t - t')^{0.3}}{(t - t')^{0.3} + 14} + \sqrt{\frac{7(t - t')}{t'(t - t' + 7)}} + c_h \sqrt{\frac{t - t'}{t - t' + 0.12(V/S)^2}} \right] \quad (5)$$

Kde parametr s závisí na třídě cementu, c_h na vlhkosti okolního prostředí a parametr φ na době zatížení a ošetřování betonového prvku.

3. Vstupní data

Práce byla zpracována na měřených datech, které jsou uvedeny v databázi [3]. Tato rozsáhlá databáze obsahuje přes 1100 vzorků z celé světa popisující dotvarování a smršťování betonu při rozdílných okrajových podmínkách z různých betonových směsí. Vzorky v databázi obsahují údaje o složení betonové směsi, charakteristikách okolního prostředí, staří v době zatížení a měřené hodnoty poddajnosti v časových intervalech, tak jak byly při konkrétním experimentu měřeny. Z této databáze byly vybrány testované vzorky dle níže zmíněných výběrových kritérií, které byly dále zpracovány. Práce je zaměřena na aktualizaci predikčních modelů vzhledem k dotvarování betonu, a proto byly z obsáhlé databáze vybrány ty testy, které se týkaly základního dotvarování oproštěného od vlivu smršťování. Další výběrové kritérium byla úroveň napětí, při které docházelo k dotvarování, kde byl limit stanoven na 45% předpokládané únosnosti betonového vzorku, tak aby bylo zajištěno lineární dotvarování. Další výběrové předpoklady měly spíše formální charakter a jsou uvedeny níže.

- Střední pevnost v tlaku po 28 dnech menší než 82 MPa
- Průměrná teplota okolního prostředí byla mezi 5°C a 50°C

Je nutné zmínit, že z takto vybraných vzorků bylo nutné vybrat ty, které představovaly dlouhodobý charakter, a tedy trvání experimentu bylo větší než 1000 dní. Z takto nastavených předpokladů bylo nakonec vybráno 40 vzorků z 12 různých laboratoří, na kterých byla celá práce zpracována.

4. Základní princip aktualizace modelů a jeho modifikovaná podoba

Pro aktualizaci model B3 je v literatuře [1,2] navrhován princip lineární regrese, tedy metoda nejmenších čtverců. Tato metoda uváděná ve zmíněných publikacích lze mírně modifikovat do podoby (6), tak aby byla vhodně použitelná na všechny predikční modely. Predikční modely se transformují do lineární podoby a poté princip jejich opravy závisí na koeficientech p_1 a p_2 (posun ve svislém směru a úprava původní funkce):

$$J_u(t, t') = p_1 + p_2 J_o(t, t') \quad (6)$$

Kde $J_o(t, t')$ představuje původní (libovolnou) predikci dotvarování, p_1 a p_2 jsou koeficienty opravy a $J_u(t, t')$ je nová aktualizovaná predikce dotvarování. Nalezení koeficientů p_1 a p_2 vychází z metody nejmenších čtverců, kde se minimalizuje rozdíl mezi měřenými daty a daty získanými z predikčního modelu (7). Z minimalizace funkce (7) lze již snadno získat koeficienty p_1 a p_2 ,

$$f(p_1, p_2) = \sum_{i=1}^m [p_1 + p_2 J_o(t_i, t') - J_e(t_i)]^2 \quad (7)$$

Kde $J_e(t_i)$ představuje měřená data v čas t_i a m počet měření zahrnutých do aktualizace.

Tento princip byl užit na aktualizaci dat výše zmíněného vzorku (Russel & Burg, 1996), kde je průběh aktualizace zobrazen v grafu 1. Je zajímavé si povšimnout, že aktualizovaná predikce dotvarování založená na prvních 7 měření (po 14 dnech) je horší než slepá predikce bez vlivu měření. Tento jev se objevil u řady měření a je zejména způsoben tím, že data naměřená krátce po vnesení zatížení, mohou rozladit predikční schopnosti modelu do budoucna. Tento jev velmi často vedl k tomu, že v případě sady měření na jedné betonové směsi byla přesnější ta predikce, která neuvažovala raná data měření, než ta, která uvažovala všechna měření (podrobněji popsáno níže). Dále je zřejmé, že z hlediska budoucí predikce má pro nás významnější vliv měření uskutečněné v nedávné době, než měření starší, která se de facto snaží aktualizovat funkci tak, aby se shodovala s průběhem v minulosti, což může v jistých případech negativně ovlivnit budoucí predikci. Na základě těchto poznatků byla vytvořena modifikovaná verze lineární regrese (8), která jednotlivým měřením dává určitou váhu. Jako efektivní váhový ukazatel se ve všech případech (40 vzorků) ukázal čas od doby vnesení zatížení do doby měření vzorku (tedy dobu trvání zatížení). Takto zvolená váha zajistila, že starším vzorkům (s malým časovým intervalem) byla v každé další aktualizaci přisouzena menší váha a tím se výrazně eliminoval vliv raných měření. Formulace zahrnující vliv váhy modifikuje formulaci (7) na formulaci (8), z které jsou vypočteny koeficienty p_1 a p_2 , shodně jako pro původní formulaci.

$$f(p_1, p_2) = \sum_{i=1}^m (t_i - t') [p_1 + p_2 J_o(t_i, t') - J_e(t_i)]^2 \quad (8)$$

kde $(t_i - t')$ představuje dobu trvání zatížení (váhový faktor). Po provedení parciálních derivací a nalezení minima funkce (8) je možné vyčíslit jednotlivé koeficienty (9) a (10):

Pro zjednodušený zápis: $w_i = (t_i - t')$; $w = \sum_{i=1}^m w_i$; $J_i^o = J_o(t_i, t')$; $J_i^e = J_e(t_i)$

$$p_2 = \frac{w \sum_{i=1}^m (J_i^o J_i^e w_i) - \sum_{i=1}^m (J_i^o w_i) \sum_{i=1}^m (J_i^e w_i)}{w \sum_{i=1}^m (J_i^o w_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^m (J_i^o w_i) \right)^2} \quad (9)$$

$$p_1 = \frac{\sum_{i=1}^m (J_i^e w_i)}{w} + p_2 \frac{\sum_{i=1}^m (J_i^o w_i)}{w} \quad (10)$$

Takto modifikovaná metoda lineární regrese představuje výrazné zlepšení budoucí predikce.

Jako ukázkový případ byl vyhodnocen vzorek C_078_05 z databáze [3], kde se jedná o Water Tower Place (Russel & Burg, 1996). Složení betonové směsi obsahovalo 501,7 kg/m³ cementu typu R (c), 195,7 kg/m³ vody (w), 1676 kg/m³ kameniva (a) a střední pevnost v tlaku po 28 dnech dosáhla 63 MPa (\bar{f}_c). Celý experiment byl prováděn na válcích o průměru 152mm a výšce 305mm při teplotě 23°C se 100% vlhkostí. Tyto prvky byly vystaveny tlakovému napětí 15,5 MPa (25% střední pevnosti v tlaku) ve stáří 28 dnů. Experiment byl prováděn po dobu 6768dnů od vnesení zatížení, kdy byly zaznamenávány hodnoty poddajnosti v příslušných časových intervalech.

Tento vzorek byl vyhodnocen dle modelu B3, kde z dostupných dat byly vypočteny koeficienty charakterizující křivku modelu:

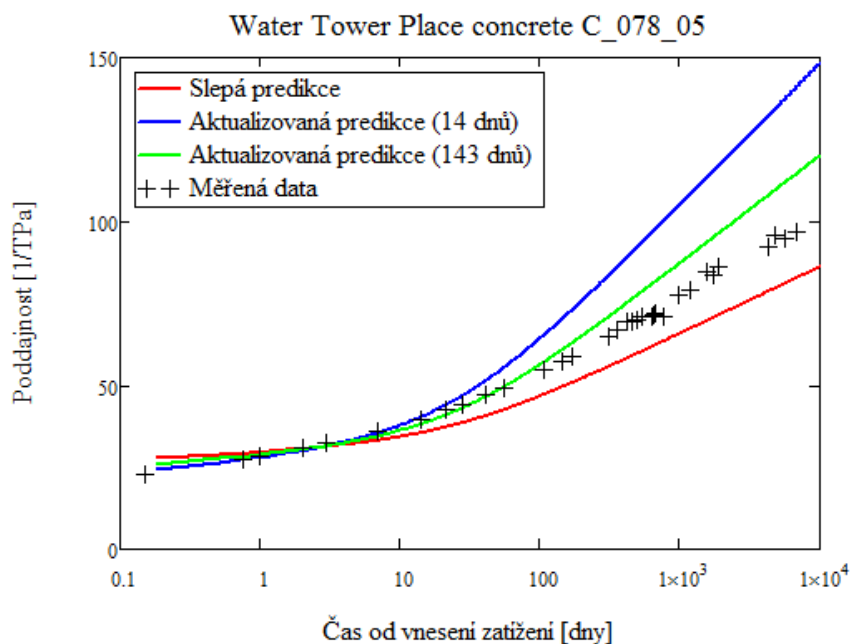
$$q_1 = 126.77 \bar{f}_c^{-0.5} = 15.97 \quad [10^{-6}/MPa] \quad (11)$$

$$q_2 = 185.4c^{0.5} \bar{f}_c^{-0.9} = 99.75 \quad [10^{-6}/MPa] \quad (12)$$

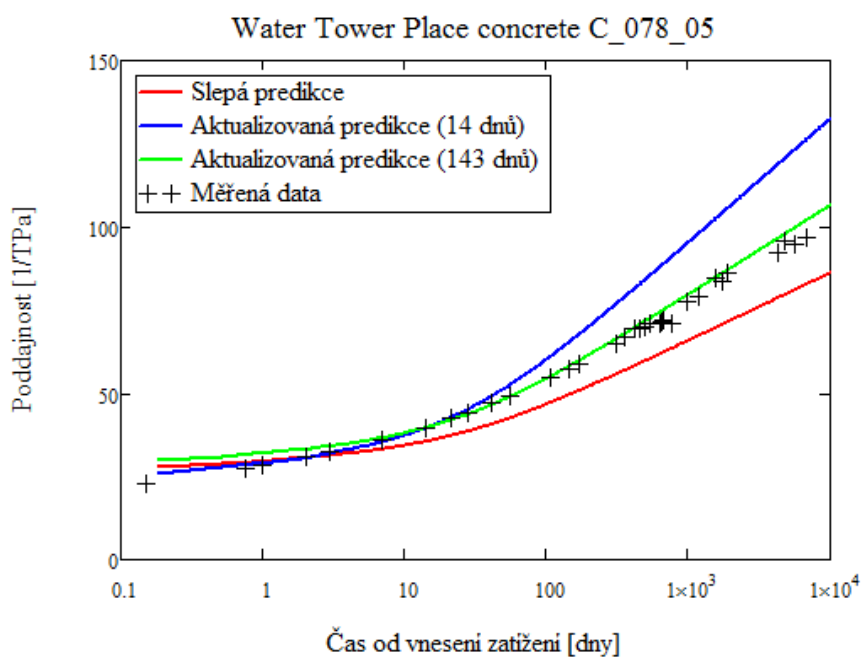
$$q_3 = 0.29(w/c)^4 q_2 = 0.669 \quad [10^{-6}/MPa] \quad (13)$$

$$q_4 = 20.3(a/c)^{-0.7} = 8.727 \quad [10^{-6}/MPa] \quad (14)$$

Z údajů (11) - (12) je možné vyhodnotit slepou predikci funkce poddajnosti, která je zobrazena v grafech 1 a 2. V grafu 1 je též zobrazena aktualizovaná predikce dle klasické metody kde aktualizace po 143 dnech představuje nadhodnocení poddajnosti po 18,5 letech o 14,7%, což je zhruba stejná absolutní hodnota jako u slepé predikce, která však poddajnost podhodnocuje. Lze však říct, že 143 dní je nejnižší možný čas, kdy aktualizovaná predikce je lepší než původní „slepá“ predikce. Je zajímavé si povšimnout, že v případě uvažování aktualizované predikce po 14 dnech dostáváme výrazně horší predikci, než byla predikce neaktualizovaná slepá (blíže popsáno v dalším textu). V následujícím grafu 2 jsou zobrazena stejná data, avšak s uvažováním modifikované predikce, kde je patrné výrazné zlepšení, kdy aktualizovaná predikce (po 143 dnech) koresponduje s měřenými daty a po 18,5 letech nadhodnocuje poslední měření o 3,6%.



Graf 1 – Aktualizované funkce poddajnosti pomocí klasické metody pro model B3 po 14 a 143 dnech, doplněné o neaktualizovanou funkci poddajnosti a skutečné (měřené) hodnoty poddajnosti



Graf 2 – Aktualizované funkce poddajnosti pomocí modifikované metody pro model B3 po 14 a 143 dnech, doplněné o neaktualizovanou funkci poddajnosti a skutečné (měřené) hodnoty poddajnosti

Z grafů je jasně patrný významný přínos modifikované aktualizace na tomto vzorku. Je však nutné podotknout, že aktualizováním predikce dotvarování běžně nezískáváme větší hodnoty dotvarování a nelze tedy uvažovat, že se pomocí prvních aktualizací dostaneme na stranu bezpečnou.

V dalším textu práce je užitá modifikovaná verze aktualizace predikčního modelu (není-li uvedeno jinak, pro případ porovnání)

5. Přesnost aktualizované predikce

Pro porovnání slepé a aktualizované predikce slouží absolutní reziduální chyba (11), která představuje průměrnou chybu od času posledního měření (aktualizace) do konce vyhodnocovaného času a je udávána ve stejných jednotkách jako poddajnost:

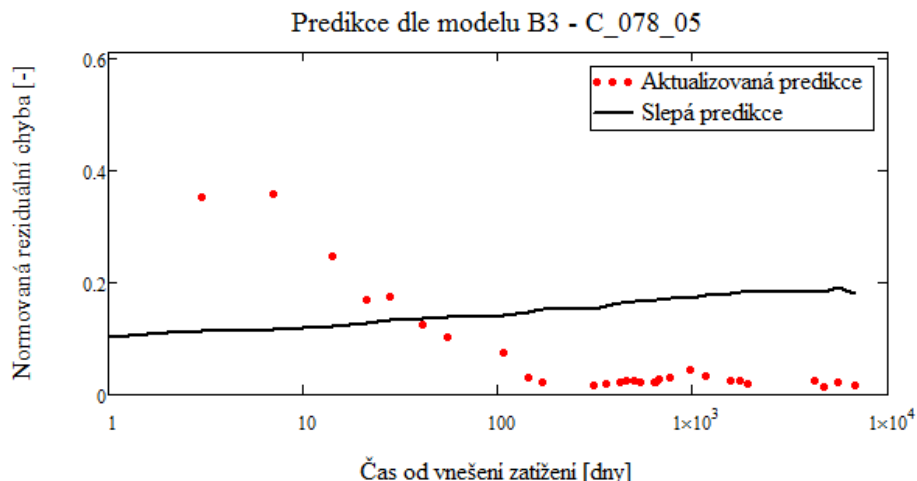
$$e_u^{(m)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=m+1}^n \ln \frac{t_{i+1} - t'}{t_{i-1} - t'} [J_u(t_i, t') - J_e(t_i)]^2}{\sum_{i=m+1}^n \ln \frac{t_{i+1} - t'}{t_{i-1} - t'}}} \quad (15)$$

Kde m představuje poslední zahrnuté měření v aktualizaci, n je počet zbylých vzorků do konce vyhodnocovaného času, $\ln \frac{t_{i+1} - t'}{t_{i-1} - t'}$ časový interval jednoho měření, $\sum_{i=m+1}^n \ln \frac{t_{i+1} - t'}{t_{i-1} - t'}$ celkový interval pro příslušnou normovanou reziduální chybu.

Tato chyba představuje ideální kritérium pro porovnání jednotlivých modelů na jednom vzorku. Metoda nejmenších čtverců intuitivně vyplynula z důvodu aktualizace dat pomocí lineární regrese. Samotná metoda by bohužel vyžadovala rovnoměrné měření z hlediska času, aby nevznikal problém akumulace chyby z důvodu dvou měření ve velmi blízkém čase. Tak byl tento efekt eliminován uvážením příslušného časového intervalu, které dané měření představovalo. Dále byla celá metoda vyhodnocena v logaritmickém měřítku, aby byl zachycen vliv nekonvergujícího charakteru dotvarování, a také z důvodu zachování citlivosti v rané době po vnesení zatížení. Takto nastavené kritérium (11) šlo jednoduše použít pro porovnání různých modelů na jedné sadě měření, ale nebylo bohužel možné použít pro posouzení mezi jednotlivými sadami měření (vzorky různých poddajností, a tedy i různě velkých chyb). Pro posouzení mezi jednotlivými vzorky byla zvolena tzv. normovaná reziduální chyba, která představuje výše zmíněnou absolutní chybu (11), která je dále normována pomocí celkové poddajnosti v čase 1000 dní po vnesení zatížení. Tato normovaná chyba je již bez jednotek a lze jí vhodně použít k porovnání jednotlivých modelů na všech sadách měření.

Vzhledem k omezeným možnostem databáze a k různě dlouhým dobám testů v databázi bylo nutné zvolit stejný časový interval, v kterém budou vzorky vyhodnoceny, aby nedošlo k ovlivnění výsledků z důvodu různých časových intervalů. Časový interval, v kterém byly vzorky vyhodnoceny, byl zvolen jako 1000 dní měřený od vnesení zatížení. Tento čas byl zvolen, tak aby bylo možné vyhodnotit co největší počet měřených sad a zároveň byl zajištěn dlouhodobý charakter testu.

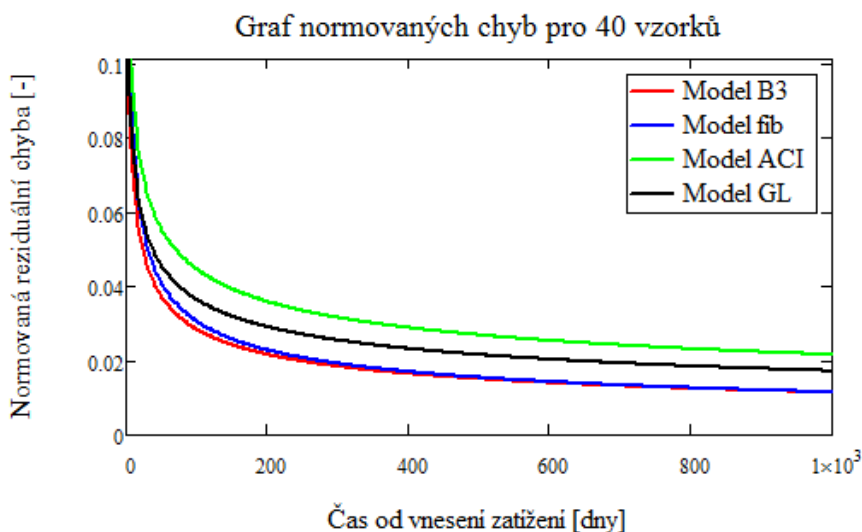
Takto zvolená normovaná reziduální chyba, lze vyčíslit i pro slepou predikci a pak ji porovnat s aktualizovanými chybami. Průběh slepé a aktualizované chyby je zobrazena na grafu 2 (Russel & Burg, 1996, vyhodnocený modelem B3).



Graf 3 – Průběh normované reziduální chyby v porovnání vůči slepé predikce na vzorku C_078_05 (Russel & Burg, 1996)

6. Určení vhodné doby měření

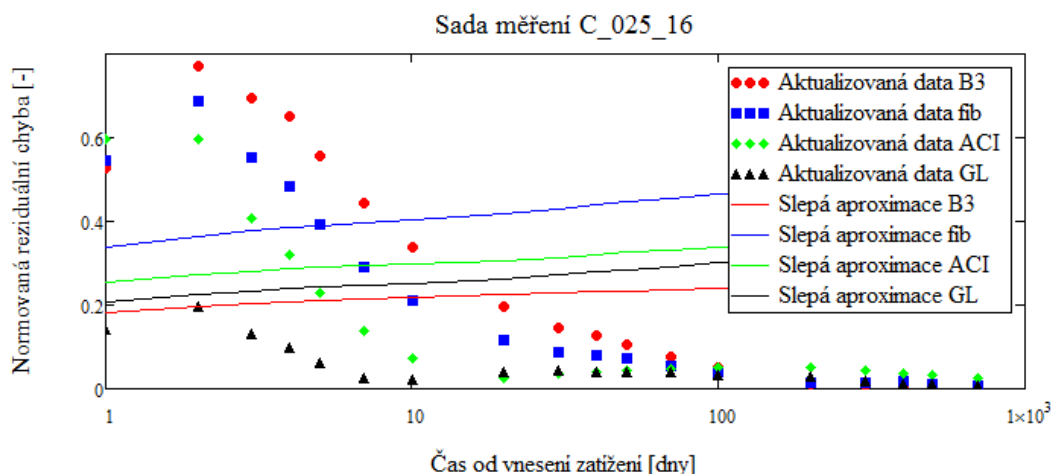
Dle výše zmíněných předpokladů byly vyhodnoceny všechny sady měření, pro jednotlivé predikční modely, které byly dále porovnány mezi sebou. Typický průběh normované reziduální chyby pro jeden predikční model je zobrazen v grafu 3, kde je možné pozorovat postupnou minimalizaci normované reziduální chyby v čase. Každý bod grafu představuje vyhodnocení normované reziduální chyby aktualizované o vliv měření, kde vždy následující vyhodnocení má o jeden vliv měření více než vyhodnocení předcházející. Z grafu je patrné, že po určitém čase se již chyba přestává zmenšovat a její další měření je již zbytečné (tj. predikční model je dostatečně přesný). Po provedení vyhodnocení na všech měřených sadách, dle jednotlivých predikčních modelů, byla získanými daty proložena exponenciální křivka zachycující vývoj jednotlivých modelů. V grafu 4 je tento vývoj zachycen. Graf přibližně koresponduje s průběhem normované reziduální chyby pro jednu sadu měření (graf 3) a je z něj možné vyčíst podobné závěry.



Graf 4 – Porovnání průběhů normovaných reziduálních chyb jednotlivých modelů s vlivem všech vzorků

7. Určení minimální doby měření

Z grafu 4 lze odhadnout vhodnou dobu měření, která je zhruba stejná bez ohledu na užitý predikční model. Je však zajímavé se zastavit nad minimální dobou měření, která se ukázala jako zajímavý poznatek k jednotlivým modelům. Dle logického uvažování by člověk intuitivně tíhnul k tomu, že jakákoliv aktualizovaná predikce je lepší než predikce slepá. Tato úvaha se ovšem ukázala jako chybná a v grafu 5 je například zachycen průběh aktualizované normované reziduální chyby na jedné sadě měření (Brooks J.J., 1989, C_025_16), který je doplněn o stejně vyhodnocený průběh neaktualizované slepé předpovědi. Z grafu je patrné, že pro modely B3, *fib* a ACI je nutné uvážit jistý počet dat, abychom se vůbec zlepšili na hodnoty ze slepých predikcí. Tento jev byl statisticky vyhodnocen a je zobrazen v tabulce 1, kde je uveden nutný průměrný čas měření k dosažení lepších hodnot než při slepých predikcích a též je zde doplněn o počet měření, který byl k tomu zapotřebí (jako prioritní hodnota je uváděn nutný čas, jelikož počet vzorků přímo neodpovídá požadovanému času, různé vzorky - různé intervaly měření). Výše zmíněnou intuitivní úvahu o aktualizované predikce naplňuje jen GL2000 model, který k dosažení reziduální chyby stejné jako u slepé predikce potřeboval v průměru pouze 2,38 měření, kde je nutné uvést, že 2 měření jsou minimální počet k užití lineární regrese. Tedy ve většině případů byla první aktualizovaná predikce lepší než predikce slepá.



Graf 5 – Porovnání průběhu aktualizovaných normovaných reziduálních chyb se slepými predikcemi pro různé modely na vzorku C_025_16 (Brooks J.J., 1989)

Tabulka 1 – Vyhodnocení minimálních dob měření pro užití aktualizovaných predikcí

Model	Nutný počet dnů	Počet měření
B3 Model	48,7	4,65
Fib Model	59,1	4,25
ACI Model	58,0	5,48
GL Model	18,6	2,38

8. Závěr

Z grafu 1 je patrný významný vliv časové váhy k urychlení konvergence normované reziduální chyby. Při statistickém vyhodnocení všech měřených sad se ukázalo, že vliv časové váhy může dávat až o 50% lepší výsledky než bez uvažování jejího vlivu. Tento efekt výrazně zlepšil budoucí predikci dotvarování.

Z grafu 4 lze usoudit, že zhruba po 1 roce se průměrná normovaná reziduální chyba již výrazně nemění a tedy dalším měřením již nedosáhneme výrazného zpřesnění predikčního modelu. V tabulce 2 je zobrazeno statistické vyhodnocení celého průběhu aktualizace predikčních modelů, kde uváděná procenta představují zlepšení daného modelu vůči celkové možné změně (tj. 90% říká, že jakákoliv další aktualizace pomůže zlepšit model jen o zbylých 10%). Na základě tohoto vyhodnocení lze zhruba říci, že po 300 dnech všechny modely dosáhli více jak 80% zlepšení a další aktualizování bude mít jen malý vliv na celkové vylepšení predikčního modelu. Dále bylo statisticky vyhodnoceno, že po této době (300 dní) mají modely *fib*, ACI a GL průměrnou reziduální chybu menší jak 10% chyby neaktualizované „slepé“. Tedy nepřesnost predikčních modelů je zmenšena na jednu desetinu původní nepřesnosti (např. v EC2 je uváděna nepřesnost predikčního modelu $\pm 30\%$, což s uvažováním aktualizování po dobu 300 dní, znamená nepřesnost $\pm 3\%$). Model B3 dosáhne 10% chyby až po 400 dnech, ale tento jev není způsoben špatnou schopností být aktualizován, ale naopak velmi dobrou schopností modelu popsat dotvarování na slepo bez aktualizovaných dat, a tedy je poté těžší tuto reziduální chybu snížit.

Tabulka 2 – Vyhodnocení zlepšení predikčních modelů vůči celkové možné změně v závislosti na čase

Model	Zlepšení o 50% [dny]	Zlepšení o 80% [dny]	Zlepšení o 90% [dny]
B3 Model	143	277	358
Fib Model	185	298	408
ACI Model	111	180	223
GL Model	183	301	377

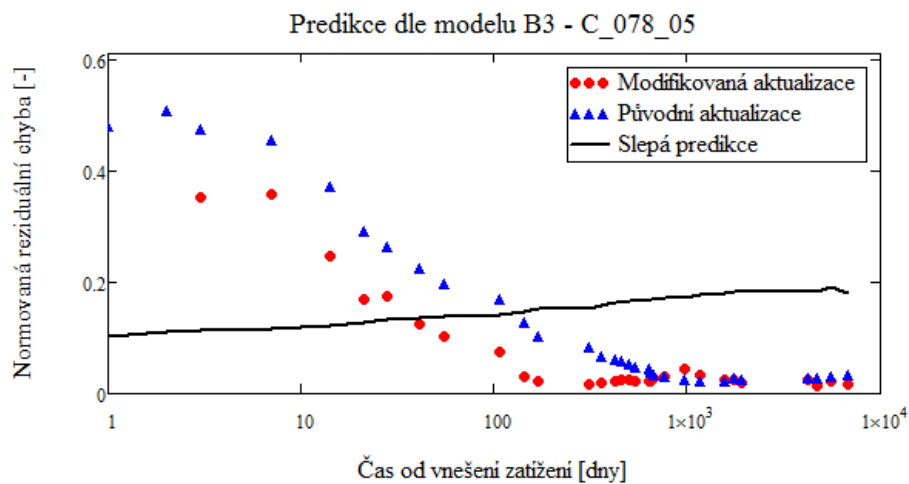
Minimální doba měření byla již zmíněna v předchozí kapitole, a tedy je zde navázáno na tabulku 1, z které je možné usoudit závěr, že minimální doba, po které je možné vzít v úvahu aktualizované predikční modely je 60 dní pro modely B3, *fib* a ACI. U modelu GL lze tuto dobu snížit na polovinu.

Z výsledků je možné usoudit dvě doporučení, které pomůžou urychlit konvergenci chyby k minimu a optimalizují počet vzorků pro ideální dobu měření.

- U modelů B3, *fib* a ACI neuvažovat měření na vzorcích do 24hodin po vnesení zatížení.
- Dodržovat konstantní časový interval měření vzorků, avšak v logaritmickém měřítku (např. 1. den, 3. den, 10. den, 30. den, 100. den a 300 den, popřípadě rozšířit o měření v 60. dnu pro posouzení po minimální nutné době měření)

Porovnání modelů ukázalo, že v případě dlouhodobých měření je nejvhodnější model B3, který z dlouhodobého pohledu dává nejmenší reziduální chybu, avšak je nutné s aktualizací predikčního modelu počkat 60 dní, což může být v případech rychlé výstavby až příliš pozdě na zajištění dodatečných opatření. A právě v těchto případech se nabízí užití modelu GL2000, který aktualizaci predikčního modelu poskytne výrazně dříve. Kombinací těchto dvou modelů můžeme odbourat nevýhody minimální doby měření u modelu B3.

Dle závěrů uváděných v této práci byl vyhodnocen výše zmíněný dlouhodobý vzorek (Russel, USA, 1996), kde byla doba měření 6768dní. Graf 6 ukazuje rozdíl mezi nyní používanou metodou aktualizace predikčního modelu a nově navrhanou metodou. Vzorek byl vyhodnocen dle modelu B3 s využitím časové váhy a se zanedbáním vlivu měření menší než 24hod (první dvě měření). V grafu je dále zobrazena slepá predikce, která byla získána dle výše zmíněných předpokladů. Z grafu lze jednoduše vyčíst přínos navrhané metody, kde je zajímavé si všimnout přínosu zkrácení nutné minimální doby měření a také optimální doby měření, která by v případě užití modifikované aktualizace mohla být až o 80% kratší než v případě původní aktualizace.



Graf 6 – Rozdíl mezi klasickou a modifikovanou metodou aktualizace predikčních modelů na základě měřených dat vyhodnocený na vzorku C_078_05 (Russel & Burg, 1996). Graf je rozšířen o průběh slepé predikce bez uvažování vlivu měření.

Použité zdroje

- [1] BAŽANT, Zdeněk P. a JIRÁSEK, Milan. Nevydaná publikace: Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures. Předpokládané vydání 2012, Springer
- [2] Zdeněk P. Bažant. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. Adam Neville Symposium [cit. 2012-01-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/S39.pdf>>.
- [3] Zdeněk P. Bažant a Guang-Hua Li. Comprehensive Database on Concrete Creep and Shrinkage. Dostupné z WWW: <<http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/479.pdf>>.
- [4] JARUŠKOVÁ, Daniela. Pravděpodobnost a matematická statistika. Vyd. 2. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006, 138 s. ISBN 80-010-3427-5.
- [5] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady, ČSNI 5/2007.