

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

MAREK JAN

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

**Porovnání praktických modelů pro výpočet
dotvarování a smršťování betonu**

Vypracoval: Jan Marek

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Praha 2024



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Marek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **486116**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Porovnání praktických modelů pro výpočet dotvarování a smršťování betonu

Název diplomové práce anglicky:

Comparison of practical calculation models for creep and shrinkage of concrete

Pokyny pro vypracování:

- Úvod do problematiky dotvarování a smršťování betonu - vysvětlení podstaty a členění jevů
- Modely pro výpočet účinků dotvarování a smršťování používané v praxi - přehled, základní popis výpočtu, rozdíly mezi předpisy
- Představení modelu podle nové generace Eurokódu 2
- Srovnávací studie výpočtu součinitele dotvarování a hodnoty celkového poměrného smrštění podle jednotlivých modelů
- Příklad aplikace na konkrétní zvolenou konstrukci

Seznam doporučené literatury:

- ČSN EN 1992-1-1:2019
- prEN 1992-1-1:2023
- Background documents to prEN 1992-1-1:2023
- Acker, P. a Ulm, F.J.: Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. Nuclear Engineering and Design 203 (2001), s. 143–158.
- Bažant, Z.P. and 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, ACI SP-194, A.Al-Manaseer, ed., Am. Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, s. 1–83.
- Samostatně vyhledejte další vhodnou literaturu.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.09.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Lukáš Vráblik, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis odborníka(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným dohledem doc. Ing. Petra Bílého, Ph.D. Všechny použité prameny jsou uvedeny v seznamu citované literatury na konci práce.

Jsem si vědom a plně respektuji, že se na mou práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č.81/2005 Sb. (autorský zákon)

V Praze dne

.....

Jan Marek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petrovi Bílému, Ph.D. za jeho ochotu, věcné poznámky a připomínky, a především za čas, který byl ochotný mně a této práci věnovat

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním praktických modelů určených pro výpočet dotvarování a smršťování betonu se zaměřením na připravovanou novou verzi Eurokódu EN 1992-1-1:2023. Nejdříve jsou vysvětleny pojmy související s touto tematikou, následně jsou představeny jednotlivé modely.

V další části je provedena citlivostní analýza jednotlivých modelů a porovnání výsledků pro různé návrhové situace. Nakonec je na konstrukci lokálně podepřené stropní desky proveden výpočet a porovnání průhybu stropní desky podle jednotlivých modelů.

Klíčová slova

Dotvarování od vysychání, základní dotvarování, smršťování při vysychání, základní smršťování, model, beton

Abstract

This thesis deals with the comparison of practical models for the calculation of concrete creep and shrinkage with a focus on the upcoming new version of Eurocode EN 1992-1-1:2023. First, the concepts related to this topic are explained, then the models are presented.

In the next section, the sensitivity analysis of individual models performed and the results are compared for different design situations. Finally, the calculation and comparison of the deflection of the floor slab according to the different models is performed on a locally supported floor slab structure.

Keywords

Drying creep, basic creep, drying shrinkage, basic shrinkage, model, concrete

Obsah

1	Úvod.....	16
2	Přetvárné vlastnosti betonu	17
2.1	Smrštění – fyzikální původ	17
2.2	Youngův modul pružnosti E	19
2.3	Hydratační teplo cementu	20
2.4	Smrštění.....	22
2.4.1	Základní smršťování	23
2.4.2	Smršťování při vysychání	25
2.4.3	Plastické smršťování.....	27
2.4.4	Smršťování způsobené karbonatací betonu	28
2.5	Dotvarování.....	28
3	Představení použitých předpisů	32
3.1	Možnosti popisu dotvarování.....	32
3.1.1	Obecný popis dotvarování	32
3.1.2	Obecný popis smršťování	33
3.2	Výpočet v předpisech – dotvarování.....	33
3.3	Výpočet v předpisech – smršťování.....	34
3.3.1	ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-2	35
3.3.2	Model B3	35
3.4	EN 1992-1-1:2023 (EN 2).....	39

3.4.1	Představení EN 2	39
3.4.2	Vzorový výpočet dotvarování a smršťování dle EN 2.....	48
4	Srovnávací studie	54
4.1	Analýza dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování – úvodní příklad 54	
4.1.1	Výsledky – dotvarování	56
4.1.2	Diskuse výsledků – dotvarování	58
4.2	Porovnání dotvarování u průvlaků	63
4.3	Vliv pevnosti betonu na velikost dotvarování.....	65
4.4	Vliv relativní vlhkosti na velikost dotvarování.....	71
4.5	Vliv třídy cementu a třídy vývoje pevnosti na velikost součinitele dotvarování 74	
4.6	Porovnání vlivu doby vnesení zatížení na velikost dotvarování.....	76
5	Poměrné přetvoření od smršťování.....	79
5.1	Úvodní příklad	79
5.2	Porovnání přetvoření od smršťování u průvlaků.....	83
5.3	Vliv pevnosti betonu na velikost přetvoření od smršťování	84
5.4	Vliv velikosti relativní vlhkosti na poměrné přetvoření od smršťování	88
5.5	Vliv třídy cementu na velikost přetvoření od smršťování.....	91
5.6	Shrnutí analýzy.....	93
5.6.1	Dotvarování	94

5.6.2	Poměrné přetvoření od smršťování.....	96
6	Praktický příklad.....	98
6.1	Návrh výztuže	101
6.1.1	Spodní povrch.....	102
6.1.2	Horní povrch.....	103
6.2	Průhyb	107
6.2.1	Ověření průhybu	108
7	Závěr	112
8	Literatura.....	114

1 Úvod

Hlavní cíl této diplomové práce je provedení srovnávací studie výpočtu součinitele dotvarování a hodnoty celkového poměrného přetvoření od smršťování dle modelů nyní platných Eurokódů EN 1992-1-1 (dále EN 1), EN 1992-2 (dále jen EN 1m), modelu B3 od prof. Z. P. Bažanta z Northwestern University a nové generace Eurokódu 2 (dále EN 2). Právě nová generace Eurokódu 2 prošla jistými změnami a vzhledem k brzkému zavedení této normy (předpoklad od dubna 2028) je cílem této práce provést zhodnocení změn této normy a porovnat výsledky s ostatními používanými předpisy pro stanovení součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování.

Nejdříve je shrnut úvod do problematiky přetvárných vlastností betonu s hlavním cílem představit a vysvětlit pojmy související s touto problematikou. Následuje představení jednotlivých modelů použitých ve srovnávací studii s podrobnějším představením EN 2 včetně vzorového výpočtu součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování. Tato práce pokračuje podrobnou srovnávací studií, ve které je postupně zkoumán vliv jednotlivých vstupů do výpočtu na časový průběh a konečný výsledek součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování v čase 50 let. Nejdříve je provedena zvlášť analýza pro dotvarování a následně pro poměrné přetvoření od smršťování. Na závěr této diplomové práce je provedeno porovnání průhybů na zvolené reálné konstrukci s cílem zjistit, jak moc velký vliv mají změny v hodnotách součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování na konečný celkový průhyb zvolené konstrukce.

2 Přetvárné vlastnosti betonu

Tato práce se specializuje na přetvárné vlastnosti betonu, a to konkrétně na procesy dotvarování a smršťování (popř. bobtnání). Dotvarování závisí především na silovém působení, avšak vliv má i vlhkostní vývoj, zatímco u smršťování (bobtnání) hraje roli pouze vývoj vlhkosti. V obou případech je přirozeně důležitým faktorem složení materiálu.

Přetvárné vlastnosti betonu můžeme přirovnat k chování stárnoucího viskoelastického materiálu, jehož přetvoření je částečně vratné. Dotvarování a smršťování jsou procesy opožděné a zajímá nás vývoj přetvoření – jeho závislost velikosti na čase.

Beton je nejpoužívanější materiál na světě a vše nasvědčuje, že tomu tak bude i nadále. Rozsah jeho vlastností se neustále vyvíjí a rozšiřuje. Projektant si v dnešní době může zvolit soubor funkčních vlastností materiálu tak, aby co nejvíce vyhovoval dané stavbě a s tím souvisí rozvoj výpočetních modelů. Modely, které byly platné pro materiály používané ve druhé polovině 20. století, je v dnešní době třeba validovat pro nové receptury složení betonu a případně aktualizovat.

V dnešní době již není mechanická pevnost jediným kritériem pro výběr materiálu, ale roli hrají také environmentální parametry, estetika a další vlastnosti materiálu, které by mohly být kritické pro mechanické chování dané konstrukce, jako např. vývoj hydratačního tepla cementu v betonových přehradách, nebo propustnost plynů u kontejnmentů jaderných elektráren.

2.1 Smrštění – fyzikální původ

Beton je porézní materiál a deformuje se vlivem různých fyzikálních jevů, mechanického, tepelného či vlhkostního charakteru.

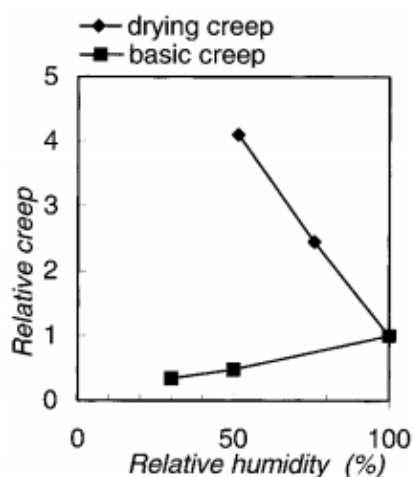
Mechanické působení představují vnější síly působící na povrchu či v objemu tělesa (vlastní tíha), popř. předepsané posuny okrajových podmínek (sedání ložisek). Na smrštění nemají vliv.

Teplotní působení může být přirozeného původu (klimatické podmínky), nebo antropogenního původu (např. způsob ošetřování betonu, provozní teploty aj.). V případě velkých tloušťek betonového prvku hraje významnou roli i vliv hydratačního tepla, které vzniká ve hmotě betonu při hydrataci cementu. U masivních prvků je rychlost uvolňování hydratačního tepla velká vzhledem k rychlosti vedení tepla směrem do okolního prostředí.

Vlhkostní působení – beton je porézní materiál s póry o velikosti 10^{-6} až 10^{-9} m, ve kterých se při úbytku vody (vyprázdnění) významně zvyšuje kapilární napětí, což má za následek působení napětí v betonu, což může být zapříčiněno např. výkyvy vnější vlhkosti. Dochází k němu například při odstraňování forem, ošetřování betonu párou, dešti, či změně vnitřní vlhkosti v důsledku samovysychání díky hydrataci cementu.

Účinky tepelného či vlhkostního původu mohou ve velkých stavbách být těmi hlavními, které mohou převažovat nad účinky čistě mechanickými, převážně v počáteční fázi stavby.

Tepelné působení související s klimatem je cyklické, dlouhodobé mechanické účinky souvisejí převážně s rozdílem teploty počáteční a průměrné teploty pro dané místo. Vlhkostní účinky jsou také cyklické, avšak vysychání je 1 000 až 10 000krát pomalejší než ochlazování, z tohoto důvodu je konstrukce méně citlivá na krátké cykly a záleží převážně na průměrně nejsušším období v roce pro dané místo.



Obrázek 2.1: Závislost dotvarování na relativní vlhkosti [1]

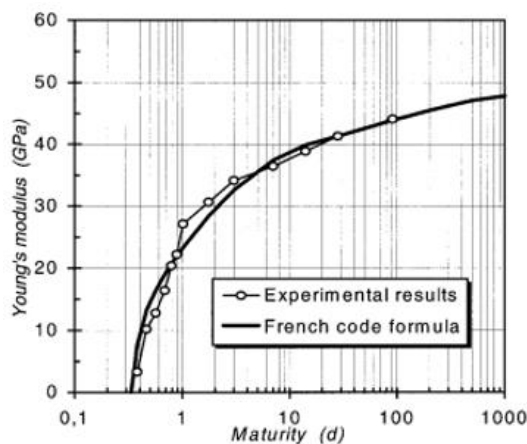
Obrázek 2.1 ukazuje dlouhodobé dotvarování v závislosti na relativní vlhkosti. Můžeme vidět, že pokud relativní vlhkost stoupá, tak se nám zvyšuje základní dotvarování, zatímco klesá složka dotvarování při vysychání (při 100% vlhkosti nemá v materiálu co vysychat), která má u běžných betonů výraznější vliv na absolutní hodnotu dotvarování.

Aby byl inženýr schopen analyzovat a pochopit tyto účinky, musí znát tyto informace.

- Pro mechanické účinky teplotních změn: hodnoty součinitelů přestupu a výměny tepla, součinitele tepelné roztažnosti a vývoj modulu pružnosti v čase.
- Pro analýzu vývoje hydratačního tepla zákon, který tento jev spolehlivě popisuje.
- V případě vlhkostního působení je často nutné pracovat s empirickými daty, jelikož proces smršťování při vysychání je hůře modelovatelný než tepelné účinky. Velký problém představuje experimentální stanovení koeficientu vlhkostního smrštění, jelikož je nemožné vysušit betonový vzorek tak, aby nijak nepopraskal. [1]

2.2 Youngův modul pružnosti E

Youngův modul pružnosti nám udává vlastnost materiálu, a to jaké napětí musíme vyvinout, abychom dosáhli jednotkové deformace prvku. Modul pružnosti se vyvíjí spolu s tvrdnutím materiálu a stejně jako mechanická pevnost roste od nuly ke konečné hodnotě. Typickou křivku vývoje modulu pružnosti v závislosti na čase ukazuje Obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Typický vývoj modulu pružnosti v čase [1]

Rychlost tohoto tvrdnutí velmi závisí na teplotě a jde dobře popsat pomocí Arrheniovy rovnice. Modul pružnosti zde můžeme uvažovat stejně jako pevnost v tlaku betonu jako monotónně rostoucí spojitou funkci zralosti betonu. Tato zralost je definována jako teoretický věk, při kterém by modul, pokud by byl materiál ponechán při konstantní teplotě T_0 , dosáhl stejné hodnoty, které dosáhl za skutečných proměnlivých podmínek s časově proměnnou teplotou $T(t)$. [1]

Zralost betonu se pomocí této rovnice zapíše takto:

$$\mu = \int_0^t \exp \left[\frac{k}{T_0} - \frac{k}{T(t)} \right] dt \quad (2.1)$$

kde T je teplota v Kelvinech,

μ je množství hydratovaného cementu v materiálu (Ulm and Coussy, 1996)

k představuje konstantu udávající násobnou aktivační energii hydratace cementu, kdy se pohybuje u běžného portlandského cementu v řádu 4 000 až 5 000 K.

Největší vliv na modul pružnosti betonu má volba kameniva. Poměrně podstatný je také podíl cementového kamene vůči množství kameniva, Tepelné vlastnosti betonu

Součinitel teplotní roztažnosti a ovlivňuje stejně jako modul pružnosti volba kameniva. Dosahuje hodnot od $6-7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pro betony s vápencovým kamenivem do $12-13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pro betony s křemičitým kamenivem. Na rozdíl od E je však hodnota a od prvních hodin tvrdnutí betonu prakticky konstantní.

2.3 Hydratační teplo cementu

Hydratační teplo hraje významnou roli u masivních staveb (např. přehrady), ale také v konstrukcích s menší tloušťkou, pokud je jedna strana tepelně izolovaná. V těchto typech konstrukcí se účinky tepelného smrštění doplňují s autogenním smrštěním.

Betony, které vyvíjejí vysoké hydratační teplo jsou také často betony s vysokým autogenním smrštěním, ve velkém množství se jedná o betony s vysokou pevností. Velikost hydratačního tepla závisí na chemickém složení cementu. Vyrůstá s použitým množstvím C3A (trikalcium aluminátu) a s jemností mletí.

V závislosti na cementu, je množství uvolněného hydratačního tepla mezi 150 až 450 J.g⁻¹. Toto teplo se neuvolní okamžitě, ale v řádu několika hodin s jedním až dvěma vrcholy, následně s dlouhým trváním postupného snižování uvolňovaného tepla (z důvodu stále silnější a kompaktnější vrstvy hydrátů, které pokrývají zrna ještě nezhydratovaného cementu).

V dnešní době již existují spolehlivé modely pro předpověď vývoje tepla v betonové konstrukci. Poměrně jednoduše se zjistilo, že teplo uniká z betonu velmi rychle, a proto nehraje důležitou roli u průřezů s tloušťkou menší než 30 cm. Naopak pokud je ochlazované místo vzdálené více než 50 cm od jádra prvku, teplota betonu v jádře může vzrůst až o 55 °C (dle typu použitého cementu). V tomto případě je praskání v průběhu chlazení prakticky nevyhnutelné. U staveb, kde byl použit vysokopevnostní beton (dále jen HPC), byly tepelné účinky nezanedbatelné i při tloušťce menší než 30 cm. Většinou HPC vykazují větší hydratační teplo, ale také jeho rychlejší vývoj oproti běžným betonům. Velikost tepelného smrštění může dosáhnout hodnoty až 500×10^{-6} .

Existují dva typy trhlin v důsledku tepelného účinku. Povrchové trhliny vznikají v důsledku lokálních teplotních spádů, tyto trhliny bývají málo otevřené. Druhým typem jsou trhliny lokalizované, které se vyskytují v případě betonáže spár, koncového upevnění např. u přehrad. Tyto trhliny mohou být mnohem více otevřeny. Mezera mezi trhlínami je velmi proměnná, byla pozorována okolo jednotek cm až několika desítek metrů. Velký rozsah těchto trhlin proto spíše souvisí s okrajovými podmínkami konstrukce, než s mechanickými a tepelnými charakteristikami daného materiálu.

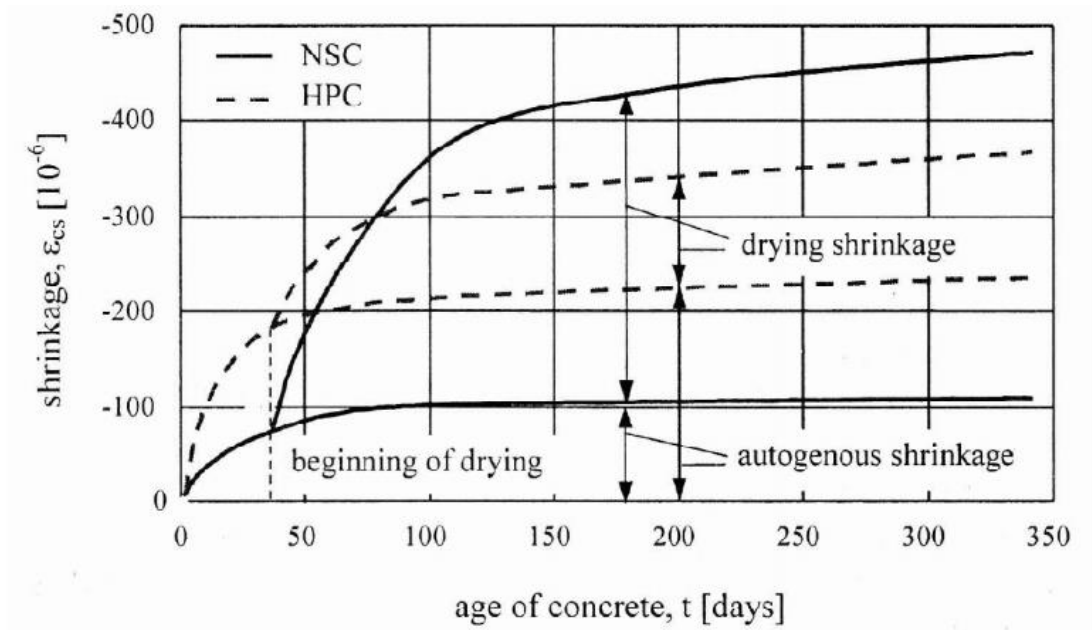
2.4 Smrštění

Při procesu smršťování (shrinkage) dochází k objemovým změnám betonového prvku, při nerovnoměrném vysychání prvku dochází také ke změně tvaru. Smršťování není závislé na velikosti vnějšího zatížení. Následkem tohoto procesu je vznik trhlin, který může být podpořený způsobem uložení či rozdílným napětím mezi vysychající oblastí a jádrem betonového prvku.

Z důvodu zvýšení trvanlivosti konstrukce se snažíme o omezení trhlin, které mají na trvanlivost konstrukce významný vliv. Mikrotrhliny vznikají v cementovém tmelu vždy a jsou důvodem nízké únosnosti betonu v tahu. Mezi nejdůležitější jevy ovlivňující smršťování náleží velikost relativní vlhkosti vzduchu (čím je nižší, tím je velikost smrštění větší), velikost prvku a hodnota vodního součinitele (množství odpařitelné vody v prvku). Vyšší hodnotu smrštění způsobuje také jemnější mletí cementu a nižší hodnota modulu pružnosti kameniva.

Předpisy rozlišují dva základní procesy při smršťování. Autogenní (v novějších předpisech základní) smršťování a smršťování při vysychání. Existují také další typy smršťování, jako plastické smršťování a smrštění způsobené karbonatací betonu.

Obrázek 2.3 zobrazuje časový vývoj a orientační rozdělení dvou základních složek smršťování podle typu betonu. UHPC má významnější vliv základní smršťování zejména kvůli vyššímu obsahu cementu; naopak vliv smršťování od vysychání je menší, jelikož vysokopevnostní betony obvykle mají nižší vodní součinitel a také jsou hutnější, což odpařování vody znesnadňuje.



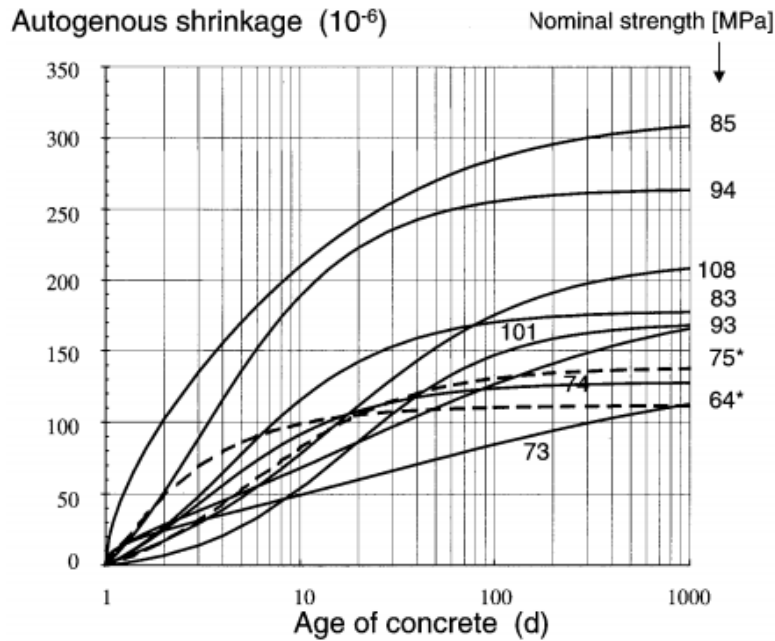
Obrázek 2.3: Rozdělení složek smršťování dle typu betonu [2]

2.4.1 Základní smršťování

Základní smršťování je vyvoláno objemovými změnami cementové pasty vlivem hydratačních procesů. Podstatné je, že probíhá bez výměny vlhkosti s okolním prostředím. Hydratace cementu spotřebovává přibližně 15–20 l vody na 100 kg cementu, což je menší množství než polovina obsahu vody v běžném betonu (zbylé množství zajišťuje zpracovatelnost). Hydratační produkty (zejména hydráty křemičitanu vápenatého: CaSiO_3 a hydroxidu vápenatého: Ca(OH)_2) mají menší objem než složky vstupující do této chemické reakce. To má za následek zmenšení objemu, který se označuje jako chemické smrštění.

Vlivem tvrdnutí betonu narůstá schopnost materiálu deformacím vzdorovat a díky pokračující hydrataci cementu dochází k tzv. samovysychání (self-desiccation) a k vyprazdňování pórů. V důsledku samovysychání dochází k poklesu relativní vlhkosti uzavřených pórů u běžných betonů a současně probíhá nárůst kapilárních tahových sil, které způsobují objemové smršťování pojmenované jako autogenní smršťování. Rozdíl mezi chemickým smrštěním a autogenním je ten, že chemické se týká změny objemu částic vstupujících a vystupujících z chemické reakce, zatímco autogenní smrštění je změna objemu prvku jako celku, včetně změn v oblasti pórů. Oba tyto jevy se navenek projevují současně a souhrnně je označujeme jako základní smršťování. Základní smršťování probíhá v prvku rovnoměrně – dosahuje stejných velikostí na povrchu a v jádru průřezu, u masivních prvků může probíhat odlišně v důsledku vývoje hydratačního tepla.

U betonů, kde vodní součinitel je vyšší než 0,45, je velikost základního smršťování malá – dosahuje hodnoty přibližně 40×10^{-6} . Pokles relativní vlhkosti pórů v důsledku samovysychání uzavřených vzorků běžných betonů je obvykle malý, výsledná vlhkost se pohybuje obvykle mezi 92–98 %. Nicméně u vysokohodnotných betonů, kde poměr w/c klesá pod 0,4, tvoří základní smršťování významnou složku celkového smrštění. Zde je pokles relativní vlhkosti pórů výraznější na cca 70 %. Obecně základní smršťování nemůže být zanedbáno, pokud w/c klesne pod hodnotu 0,4. V tomto případě může hodnota tohoto smrštění dosahovat hodnoty až 3×10^{-4} , viz Obrázek 2.4.



Obrázek 2.4: Graf závislosti velikosti základního (autogenního) smršťování na čase [1]

Kinetika základního smrštění úzce souvisí s vývojem hydratace cementu, tedy s růstem pevnosti materiálu. Zpočátku je nárůst velmi rychlý, po 28 dnech dosahuje zhruba 60–90 % teoretické konečné hodnoty. V dřívější době byla tato část smrštění přehlížena a nevyskytovala se v národních normách, zatímco v dnešní době i z důvodu vysokého využití HPC musí být uvažováno odděleně.

2.4.2 Smršťování při vysychání

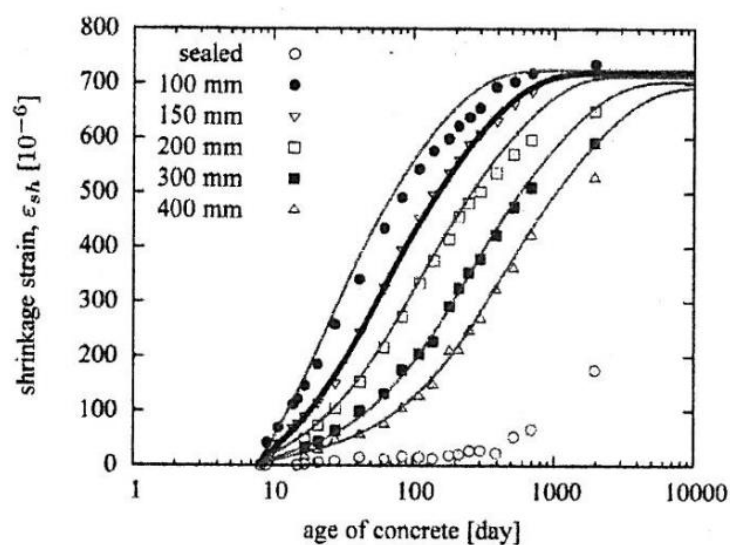
U betonů běžných pevností tvoří smršťování při vysychání zásadní část celkového smrštění. Rozdílná relativní vlhkost v betonové konstrukci a okolním prostředím způsobuje výměnu vlhkosti (od místa s vyšší relativní vlhkostí k nižší). Tento proces začíná v momentě odstranění bednění a obecně trvá velmi dlouho – pro prvek o tloušťce 1 m v řádech stovek let. Doba v mnoha případech tudíž přesahuje stanovenou životnost konstrukce a pro návrh je důležitější znát rychlost vývoje, než maximální teoretickou hodnotu smrštění. Nejdříve dochází k úniku volné vody z dutin a pórů. Tato fáze vede k výraznému úbytku hmotnosti, ale k malým deformacím.

Následně dochází k odstraňování vody vázané v kapilárních pórech, to vede ke smršťování cementového tmelu a ke vzniku tahového namáhání ve vysychající části prvku. V momentě překročení tahové pevnosti betonu dojde ke vzniku trhlin, díky čemuž se vzduch dostane hlouběji do prvku a tento proces následně zrychluje vysychání.

Tuto část smrštění lze na rozdíl od základního smrštění výrazně ovlivnit, především délkou a způsobem ošetřování betonu. Oproti smrštění základnímu toto smrštění neprobíhá rovnoměrně v celém prvku, ale jeho hodnota se velmi liší s ohledem na vzdálenost od povrchu konstrukce – v jádru je nejmenší, na povrchu největší. Smrštění při vysychání je tedy vztaženo ke zdánlivé střední hodnotě, která zastupuje pouze jeho konečnou hodnotu. V případech, kdy je jedna strana prvku chráněna před vysycháním, dochází k nerovnoměrnému namáhání prvku a deformace střednice.

Smrštění od vysychání dosahuje hodnot až 7×10^{-4} a závisí na mnoha faktorech. Především na velikosti a tloušťce prvku, viz Obrázek 2.5, pórovitosti (na množství volné vody), množství cementu a přísad (strusky aj.). Příměsi (superplastifikátory) do jisté míry zvyšují smrštění při vysychání, když eliminují povrchové náboje v pórech a usnadňují odpařování vody. Způsob ošetřování betonu – například vysokotlaké ošetření betonu parou může výrazně snížit smrštění. Kinetika úzce souvisí s kinetikou difúze vlhkosti (tzv. poločas smrštění je přímo úměrný kvadrátu efektivní tloušťky).

Z pohledu vlivu mikrotrhlin na mechanické vlastnosti prvku je důležitější hodnota základního smršťování, při kterém dochází ke vzniku mikrotrhlin v celém objemu prvku, zatímco účinky smršťování při vysychání jsou patrné do hloubky několika cm, mají tedy významný vliv na trvanlivost konstrukce.



Obrázek 2.5: Velikost smrštění dle tloušťky prvku a porovnání velikostí se zapečetěným vzorkem [3]

2.4.3 Plastické smršťování

Plastické smršťování betonu probíhá ve fázi, když je beton v plastickém stavu. Jedná se o ztrátu povrchové vody v důsledku nevhodných klimatických podmínek při betonování (vítr, nízká vlhkost, vysoké teploty) či přesunu vlhkosti do sousedního suššího materiálu (beton, zemina). Důsledkem může být značné množství náhodně orientovaných povrchových trhlin. Tomuto jevu jde zabránit vhodným ošetřováním po uložení betonu a zabráněním ztráty vlhkosti. Čím je vyšší obsah cementu a nižší poměr vody k cementu, tím je plastické smršťování vyšší.

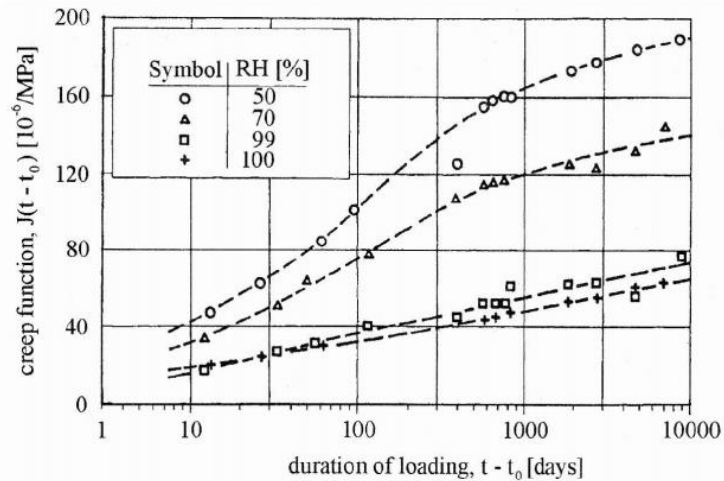
2.4.4 Smršťování způsobené karbonatací betonu

Jedná se o dvě chemické reakce, nejdříve reaguje oxid uhličitý s vodou za vzniku kyseliny uhličitě: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$, následně kyselina uhličitá rozpouští krystaly hydroxidu vápenatého a vzniká uhličitan vápenatý: $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$. Tento proces zvyšuje stlačitelnost a považuje se za druh smrštění, ovšem žádné předpisy pro navrhování s ním neuvažují (to je dáno tím, že u správně navrženého prvku by karbonatace měla probíhat pouze v tenké krycí vrstvě). Největší hodnoty tato reakce dosahuje při 50% relativní vlhkosti, naopak při plném nebo nulovém nasycení se téměř zastaví. Tato reakce vede na rozdíl od smršťování od vysychání k nárůstu hmotnosti, jelikož je CO_2 (oxid uhličitý) absorbován betonovým prvkem. [4]

2.5 Dotvarování

Beton se chová jako viskoelastický materiál a projevem této vlastnosti je právě dotvarování. Jedná se o zpožděnou deformaci materiálů na bázi cementu vyvolanou dlouhodobě působícím zatížením – na konci zatěžování prvku může být celková deformace vlivem dotvarování až desetkrát větší než deformace elastická. Velikost dotvarování ovlivňuje podobně jako smršťování celá řada faktorů, mezi ty nejvýznamnější náleží: stáří betonu v momentě zatížení betonového prvku, množství vody v betonu, druh cementu a jeho jemnost, poměr napětí a pevnosti betonu, obsah kameniva (čím je vyšší, tím beton méně dotvaruje), velikost vlhkosti okolního prostředí viz Obrázek 2.6, způsob ošetřování. Například při ošetřování parou po dobu 13 h při teplotě 65 °C dojde ke snížení dotvarování v rozmezí 30–50 % [5].

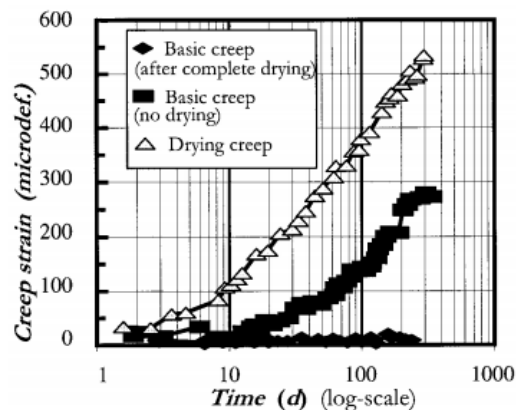
Tato vlastnost může ovlivňovat materiál příznivě – např. omezení napětí vznikajícího vlivem rozdílného smršťování nebo teploty, u staticky neurčitých konstrukcí snižuje napětí vyvolané vlivem sedání podpor. Na druhou stranu dotvarování zvyšuje výrazně průhyb, je příčinou ztrát předpětí v předpjatých konstrukcích a v neposlední řadě u štíhlých konstrukcí zvyšuje účinky II. řádu, což může zavinit kolaps konstrukce. Dotvarování může být považováno za lineární, pokud tlakové napětí nepřekročí hranici 45 % střední pevnosti betonu v tlaku.



Obrázek 2.6: Vliv vlhkosti okolního prostředí na velikost dotvarování betonu [2]

Celkové dotvarování betonu lze rozdělit obdobně jako u smršťování na dva samostatné procesy. Na dotvarování základní (basic creep) a dotvarování při vysychání (drying creep).

Obrázek 2.7 představuje tzv. Pickettův paradox, na kterém je vidět, že pokud je beton před vnesením zatížení předem zcela vysušený, nevykazuje prakticky žádné dotvarování. Beton, kterému je zamezena jakákoliv výměna vlhkosti s okolím během zatěžování, již vykazuje významnou složku deformace – základní dotvarování (basic creep). Čím více obsahuje odpařitelné vody, tím více dotvaruje. Beton, kterému není nijak bráněno ve výměně vlhkosti s okolím (probíhá jeho vysychání), dotvaruje nejvíce – dochází k dotvarování při vysychání (drying creep), přičemž rychlost nárůstu deformací se v čase snižuje.



Obrázek 2.7: Pickettův paradox [1]

Toto chování výrazně ztěžuje návrh komplikovaných konstrukcí, jako jsou například mosty velkých rozpětí nebo kontejnmenty jaderných reaktorů, kde Pickettův paradox hraje významnou roli při návrhu.

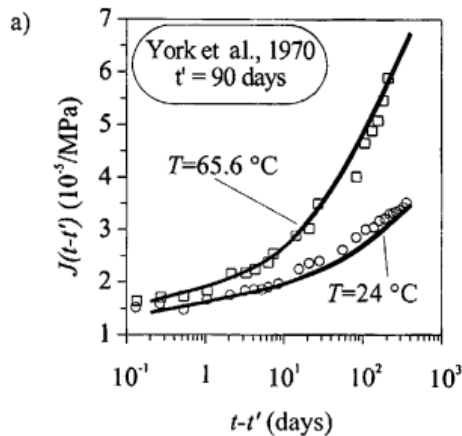
Pro přesnou analýzu mechanismů vývoje deformace betonu je třeba vzít vlhkost (obsah odpařitelné vody) jako proměnnou (měnící se v prostoru a času), nikoliv jako parametr.

Základní dotvarování lze tedy definovat jako část celkové deformace prvku vyvolané působícím zatížením v situaci, kdy nedochází k výměně vlhkosti mezi betonovým prvkem a okolním prostředím. Základní dotvarování se tedy měří na dokonale zaizolovaných vzorcích, kde je zamezeno výměně vlhkosti s okolím, a navíc musí být od celkové deformace odečtena složka základního smrštění stanovená na doprovodných zkušebních tělesech.

Z analýzy základního dotvarování pro betonové prvky, které byly zcela chráněny před vysycháním byly patrné dva mechanismy dotvarování, oba souvisely s pohybem vody uvnitř prvku. Charakteristická doba prvního mechanismu v řádu 10 dní naznačuje pohyb vody vyvolaný napětím směrem k pórům vyššího průměru. Vznik lze přisoudit ke změně vlhkostní rovnováhy v plynně vyplněném prostoru, která vytváří deformace a napětí vedoucí k dotvarování. Aktivační energie tohoto procesu by mohla odpovídat energii prostupu v nasycených pórech. Toto by mohlo vysvětlovat, proč je dotvarování vysušeného vzorku téměř nulové. Druhý mechanismus odpovídá nevratnému viskóznímu chování materiálu a nejspíše s viskózním tokem v hydrátech (posunem mezi vrstvami, který je vlivem ztráty vody postupně potlačován).

Dotvarování při vysychání probíhá, jak je již z názvu patrné, z důvodu ztráty vody vlivem vysychání betonového prvku do okolního prostředí. Na Obrázek 2.1 můžeme vidět, že čím je nižší vlhkost okolního prostředí, tím je přírůstek dotvarování od vysychání k dotvarování základnímu větší. Rychlost vysychání závisí na velikosti a tvaru betonového prvku (čím je prvek subtilnější, tím rychleji vysychá) a na difuzivitě betonu. Velikost této složky dotvarování může dosahovat až pětinasobné hodnoty složky základního dotvarování. Je tedy zřejmé, že množství vody hraje rozhodující roli. Pokud beton vyschl do stavu, kdy je veškerá odpařitelná voda zcela vyloučena, dotvarování neprobíhá.

Dotvarování výrazně ovlivňuje také okolní teplota. Čím je teplota vyšší, tím dotvarování probíhá rychleji viz Obrázek 2.8. Náhlé změny teploty v čase vedou také k rychlejšímu nárůstu dotvarování. Tyto jevy však při praktickém navrhování kromě speciálních případů (např. energetické stavby) obvykle nemusíme brát v úvahu. Průměrná okolní teplota konstrukcí bývá nižší než teplota, pro kterou jsou kalibrovány výpočetní model, a zároveň bývá z dlouhodobého hlediska stálá.



Obrázek 2.8: Vliv teploty na rychlost a velikost základního dotvarování [6]

3 Představení použitých předpisů

V této kapitole budou představeny použité předpisy pro analýzu výsledků dotvarování a smršťování. Jedná se o předpisy ČSN EN 1992-1-1 (dále jen EN 1), ČSN EN 1992-2 (dále jen EN 1m), model B3, a především novou verzi Eurokódu EN 1992-1-1:2023 (dále jen EN 2), která je popsána podrobně v kapitole 3.4. U ostatních předpisů nebude popsán podrobně postup výpočtu, ale popsány budou především základní rozdíly výpočtu a limity jejich použití.

3.1 Možnosti popisu dotvarování

3.1.1 Obecný popis dotvarování

Pokud je betonový prvek zatížen konstantním napětím σ od času vnesení zatížení t_0 do času t , lze historii deformace popsat funkcí $\varepsilon(t, t_0)$. Tuto deformaci lze dále rozložit na okamžitou deformaci ε_e a deformaci vyvozenou dotvarováním ε_c , kterou lze zapsat více způsoby [5].

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_e * \varphi(t, t_0) = C(t, t_0) * \sigma \quad (3.1)$$

kde

$\varphi(t, t_0)$ je součinitel dotvarování, tato funkce vyjadřuje poměr dotvarování k elastické deformaci.

$C(t, t_0)$ je funkce nazývaná se jako specifické dotvarování (specific creep) a slouží k výpočtu velikosti dotvarování z konstantního napětí. Nyní je tato funkce nahrazována funkcí poddajnosti $J(t, t_0)$ [1/Pa]. Tato funkce spojuje celkovou deformaci s konstantním napětím.

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_e(t_0) + \varepsilon_c(t, t_0) = J(t, t_0) * \sigma \quad (3.2)$$

V běžné praxi zůstává pro popis dotvarování nejpoužívanější součinitel dotvarování $\varphi(t, t_0)$. V normách bývá nahrazen časově nezávislou konstantou, která má vystihovat násobek elastické deformace v čase životnosti konstrukce. Celkovou deformaci lze následně vyjádřit jako:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_e * \varphi = \varepsilon_e * (1 + \varphi) = \frac{\sigma}{E} (1 + \varphi) \quad (3.3)$$

3.1.2 Obecný popis smršťování

Nedílnou součástí celkového průhybu konstrukce je průhyb od smršťování. Smršťování se rozděluje stejně jako dotvarování na dvě hlavní složky, a to základní smršťování (dříve označováno jako autogenní) a smršťování při vysychání. Celkové smršťování se tedy vypočte jako součet těchto dvou složek stanovených dle daného předpisu.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t - t_s) \quad (3.4)$$

kde

$\varepsilon_{cbs}(t)$ je základní složka smršťování (označení dle EN 2, nahrazuje označení pro autogenní smršťování)

$\varepsilon_{cds}(t - t_s)$ je složka smršťování při vysychání (označení dle EN 2)

3.2 Výpočet v předpisech – dotvarování

Výpočet dotvarování a smršťování v uvedených předpisech závisí na více proměnných, viz Obrázek 3.1. Ve všech předpisech je třeba zadat tyto parametry:

- Čas, pro který počítáme součinitel dotvarování
- stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení jako t_0 (v B3 jako t')
- dobu po kterou je beton ošetřován jako t_s (v B3 jako t_0)
- průměrnou válcovou pevnost betonu v tlaku v čase 28 dnů f_{cm} (v případě nové verze EN 2 je nově zaveden referenční čas t_{ref} , podrobněji viz str. 36). Zde je nutné dodat, že pevnost betonu nám přímo nevystihuje podstatu velikosti dotvarování, ale zahrnuje v sobě několik příčin, které mají na velikost vliv. Udávaná pevnost ve 28 dnech slouží tedy jako substituční parametr pro určení velikosti dotvarování, který je projektantovi při návrhu konstrukce známý.
- plocha průřezu A_c (v B3 je označena jako ν)
- relativní vlhkost prostředí RH (B3 jako h).

ČSN EN 1992-1-1

VSTUPNÍ ÚDAJE:			
čas - sledovaný okamžik:	t	=	70000 [den]
stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení:	t_0	=	28 [den]
doba ošetřování betonu:	t_s	=	7 [den]
prům. válcová pevnost v tlaku ve 28 dnech:	f_{cm}	=	38,0 [MPa]
plocha průřezu:	A_c	=	1,80E+05 [mm ²]
obvod prvku vystavený okolnímu prostředí:	u	=	1800 [mm]
relativní vlhkost okolního prostředí:	RH	=	80 [%]
typ kameniva:			křemenec ▼ 2
třída cementu:			třída N ▼ 2
zahrnout vliv zvýšení nebo snížení teploty?*			<input type="checkbox"/> ANO #####
*: zahrnutí jiné teploty než referenčních 20°C			
teplota 0 - 80 °C	$T(\Delta t_i)$	=	0 [°C]
počet dní se změněnou teplotou:	Δt_i	=	2 [den]
tlakové napětí v betonu od zatížení:	σ_c	=	0,00 [MPa]

Obrázek 3.1: Proměnné pro výpočet dotvarování a smršťování v ČSN EN 1992-1-1

Další charakteristiky potřebné pro výpočet součinitelů se liší dle daného předpisu a budou popsány v následujících kapitolách.

3.3 Výpočet v předpisech – smršťování

K výpočtu poměrného přetvoření od smršťování potřebujeme podobné vstupní parametry jako u výpočtu dotvarování. Nicméně určité změny ve výpočtu se projevují, výpočet smršťování nám neovlivňuje čas vnesení zatížení, potřebujeme pouze čas t a dobu ošetřování betonu t_s . Také na rozdíl od dotvarování do výpočtu nevstupuje typ použitého kameniva.

Pro výpočet základního smršťování v EN potřebujeme znát pouze pevnost betonu a čas t , v případě EN 2 ještě součinitel zohledňující rychlost nárůstu pevnosti betonu a_{bs} . Ve složce smršťování při vysychání již potřebujeme znát stejně jako u složky dotvarování při vysychání relativní vlhkost okolního prostředí, třídu cementu v EN 1 (v EN 2 třídu vývoje pevnosti betonu). Dále pak náhradní rozměr prvku (v případě EN 1 se stanovuje dle hodnoty h_0 ještě další součinitel k_h).

Model B3 nám navíc umožňuje zohlednit způsob ošetřování betonu a tvar průřezu prvku.

3.3.1 ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-2

Tyto právě platné normy dále rozeznávají ve výpočtu čtyři druhy kameniva, a to: křemenec, vápenec, pískovec a čedič. Podle druhu se následně upravuje sečnový modul pružnosti E_{cm} . Součinitel dotvarování je ovšem vztažen k tečnovému modulu E_c , který lze stanovit jako $1,05 E_{cm}$. Pro lineární výpočet dotvarování se musí splnit podmínka, že tlakové napětí betonu ve stáří t_0 nesmí přesáhnout hodnotu $0,45 f_{ck}(t_0)$, poté se musí použít zjednodušený vztah pro nelineární dotvarování, ale již nelze použít určení součinitele dotvarování podle nomogramů v ČSN EN 1992-1-1. Dále se rozlišují tři druhy cementů a to: S, N a R podle pevnostních tříd, druhy cementů se projevují ve výpočtu součiniteli upravujícími výpočet součinitele dotvarování a smršťování. Oba předpisy uvažují v době ošetřování betonu se změnou teploty od referenčních 20 °C a umožňují upravit čas t a t_0 .

Obě normy rozlišují autogenní smršťování (v EN 2 již označované jako základní) a smršťování při vysychání. Na druhou stranu dotvarování na složku základní a dotvarování při vysychání rozlišuje pouze ČSN EN 1992-2.

ČSN EN 1992-2 je typická tím, že dává možnost uvažovat s betonem s obsahem mikrosiliky. Podmínkou je, aby obsah křemičitého úletu (SFC) tvořil minimálně 5 % hmotnostního obsahu cementu. Obecně je tato norma určena pro výpočet u vysokopevnostních betonu, třídy pevnosti C50/60 a vyšší, s druhem cementu R, či pro masivní betonové prvky. Vztahy v této normě jsou platné pouze v případě, pokud $f_{cm}(t_0) > 0,6 f_{cm}$.

3.3.2 Model B3

Model B3 je odborníky považován za jeden z nejlépe vystihujících dotvarování a smršťování. Byl vyvinut týmem prof. Bažanta na Northwestern University. Vztahy byly experimentálně ověřeny na velkém množství dat z celého světa. Výpočet je založen na znalosti složení a pevnosti betonové směsi.

Výpočet je omezen rozsahem platnosti na betony z portlandského cementu a současně musí být splněno:

$$0,35 \leq \frac{w}{c} \leq 0,85; \quad 2,5 \leq \frac{a}{c} \leq 13,5; \quad 17 \text{ MPa} \leq f_c \leq 70 \text{ MPa};$$

$$160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq c \leq 720 \text{kg/m}^3$$

Ošetřování betonu musí trvat minimálně 1 den,

kde

$\frac{w}{c}$ je hmotnostní poměr vody v betonové směsi (w) a obsahu cementu (c),

$\frac{a}{c}$ je hmotnostní poměr obsahu kameniva v betonové směsi (a) a obsahu cementu (c),

f_c (f_{cm}) je průměrná válcová tlaková pevnost betonu ve stáří 28 dní, výpočet je dále omezen podmínkou: $\sigma_c \leq 0,45 f_c$ (f_{cm}).

Z těchto podmínek je zřejmé, že pro výpočet musíme znát přesné množství složek (a, w, c) v betonu.

Dále tento model rozděluje stavby do pěti různých kategorií podle náročnosti, kdy úroveň 1 jsou stavby nejnižší náročnosti, naopak úroveň 5 jsou stavby typu kontejnmentů jaderných elektráren.

Dle autora je vhodné použít zjednodušený model B3 pro úrovně staveb 1 až 3. Pro nestandardní druhy betonů, které nesplňují výše popsany rozsah platnosti modelu, lze výpočet použít v případě, že koeficienty q_1 až q_5 , které závisí na složení a pevnosti betonu, se stanoví nikoliv ze vzorců, ale z experimentálních měření. Tyto koeficienty byly zjištěny z velkého množství experimentálních dat z dlouhodobých dotvarovacích zkoušek pro betony různého složení a pevností. Je doporučeno tyto parametry porovnat s experimentálními a případně provést jejich úpravu pro dosažení co nejpřesnějších výsledků. Pro kategorie staveb 4 a 5 je třeba použít rozšířený model s konstitutivními vztahy pro materiálový bod odpovídající solidifikační teorii a teorii mikropředpětí.

Model B3 rozlišuje dotvarování na základní složku a složku při vysychání. Oproti výpočtu dle Eurokódů má celkově odlišné vztahy a celkové přetvoření od dotvarování je popsáno funkcí poddajnosti:

$$J(t, t') = q_1 + J_b(t, t') + J_a(t, t', t_0) \quad (3.5)$$

Člen q_1 popisuje okamžitou deformaci, bylo zjištěno, že tato deformace je nezávislá na času zatížení t' . Druhý člen popisuje základní dotvarování a poslední člen dotvarování při vysychání.

Na druhou stranu model B3 nerozděluje smršťování na složky jako dotvarování.

Model rozeznává tři druhy cementů označených I, II a III dle klasifikace ASTM (cement I je obyčejný portlandský cement, II sulfátový cement a III je cement s rychlým nárůstem pevnosti), dále je třeba vybrat způsob ošetřování betonu ze tří možností: ošetřování párou, ochrana proti vysychání a ošetřování ve vodě nebo 100 % vlhkosti. Nakonec je třeba zvolit tvarový součinitel k_s , který rozeznává mezi: nekonečnou deskou, nekonečným válcem, nekonečným čtvercovým hranolem, koulí a krychlí. Oproti předpisům EN nelze v základní verzi modelu zohlednit změnu teploty od referenčních 20 °C v době, po kterou je beton ošetřován.

Model B3

VSTUPNÍ ÚDAJE:					
čas - sledovaný okamžik:	t	=	70000	[den]	
stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení:	t'	=	28	[den]	
doba ošetřování betonu:	t ₀	=	7	[den]	
prům. válcová pevnost v tlaku ve 28 dnech:	f _c (f _{cm})	=	38,0	[MPa]	
plocha průřezu:	v	=	1,80E+05	[mm ²]	
obvod prvku vystavený okolnímu prostředí:	s	=	1800	[mm]	
relativní vlhkost okolního prostředí:	h	=	80	[%]	
třída cementu:		TYP:	III		3
množství vody ve směsi	w	=	170	[kg/m ³]	
množství cementu ve směsi	(160 - 720) c	=	400	[kg/m ³]	
množství kameniva ve směsi	a	=	1800	[kg/m ³]	
způsob ošetřování:			normální		2
tvár průřezu:			deska		1
tlakové napětí v betonu od zatížení:	σ _c	=	0,00	[MPa]	

Obrázek 3.2: Parametry, které jsou nutné zadat pro zjednodušený výpočet modelu B3

3.4 EN 1992-1-1:2023 (EN 2)

V této kapitole je představena nová verze eurokódu (dále jen EN 2), která nahrazuje předchozí verzi EN 1992-1-1:2004/AC:2010 (dále EN 1). Předmětem bude výpočet součinitele dotvarování a smršťování. Nová verze prošla poměrně výraznými změnami, v této kapitole se zaměřím na představení výpočtu a provedených změn oproti předchozí verzi EN 1, podrobně se tato práce zabývá analýzou a srovnáním velikosti součinitele dotvarování a smršťování s ostatními předpisy v následující kapitole. Nová verze je prakticky mírně upravená verze předpisu fib Model Code 2010 (dále jen MC 2010), který je prověřen na stovkami experimentů převážně z let 1960 až 2000, pro betony vyrobené v 21. století bylo použito výrazně méně experimentálních dat, ovšem pokud nejsou překročeny limity hodnot udávané v normě, přesnost předpisu by měla být zachována. Verze EN 2 neobsahuje speciální model pro betony s obsahem mikrosiliky, jako je tomu u předpisu ČSN EN 1992-2. Vědecká společnost MC 2010 v dnešní době považuje za velmi uspokojivý předpis dotvarování a smršťování, který respektuje fyzikální zákony a svým předpisem je vhodný pro použití normativního charakteru, kdy je třeba z méně vstupních hodnot dosáhnout co nejlepší předpovědi výsledku, mělo by tedy dojít oproti verzi EN 1 k výraznému zpřesnění výpočtu pro aktuálně používané betony.

3.4.1 Představení EN 2

Pro výpočet součinitele dotvarování a smršťování je v nové generaci EN 2 několik výrazných změn, mezi které patří určení střední hodnoty sečnového modulu pružnosti E_{cm} . Nyní hodnoty nenalezneme v tabulce pevnostních a deformačních charakteristik betonu jako tomu je v EN 1 (kde byly udávány v GPa), ale v EN 2 se stanoví dle vztahu:

$$E_{cm} = k_E f_{cm}^{1/3} \quad (3.6)$$

kde f_{cm} je průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku [v MPa] a součinitel K_E se liší dle typu použitého kameniva, přičemž může nabývat hodnot od 5000 do 13 000. Pro silikátové kamenivo je doporučena hodnota 9500, konkrétní hodnota pro ostatní druhy kameniva má být doporučena v národním dodatku.

V současně platné verzi EN 1 v kap. 3.1.3 odstavci (2) je uvedeno, že pro vápencové kamenivo se hodnoty E_{cm} mají snížit o 10 %, pro pískovcové kamenivo o 30 % a pro čedičové zvýšit o 20 %. Je otázka, zda budou tato doporučení zachována a součinitel K_E bude upraven tak, aby odpovídal těmto hodnotám. Pro beton C30/37 je v EN 1 uváděna hodnota E_{cm} 33 GPa, zatímco při dosažení $K_E = 9500$ je hodnota E_{cm} 32 000MPa, rozdíl je v řádu jednotek %. Pro betony nižších pevností může být rozdíl až 5 %, zatímco při hodnotě $f_{cm} = 80$ MPa je hodnota E_{cm} již totožná. Komise cíleně provedla sjednocení jednotek f_{cm} a E_{cm} na MPa.

Další novinkou je zavedení tzv. referenčního času t_{ref} , který může nabývat hodnot 28 až 91 dní. Tradičně se uvažuje, že charakteristické pevnosti betonu je dosaženo v čase 28 dní, nicméně nová verze nám umožňuje specifikovat okamžik dosažení charakteristické pevnosti z tohoto rozmezí. Cílem opatření je usnadnit používání betonů s pomalejším nárůstem pevnosti, které jsou v současné době do jisté míry diskriminovány.

Pro výpočet dotvarování a smršťování se však nadále používá výhradně hodnota pevnosti v čase 28 dní, neboť pro ni jsou kalibrovány výpočetní modely. Aby nedocházelo k nejasnostem při návrhu, měla by být tato hodnota jednoznačně označována jako $f_{cm,28}$. Pokud se referenční čas t_{ref} , pro který je stanovena hodnota f_{cm} , nerovná 28 dní, je třeba vypočítat $f_{cm,28}$ dle vzorce (B.1) a (B.2), kde za t dosadíme 28 dní.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (B.1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s_c \left(1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right) \sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right]; t \leq t_{ref} \quad (B.2)$$

V EN 2 neexistují speciální požadavky pro vysokopevnostní betony a byla rozšířena platnost normy do betonu třídy C100/115 viz Tabulka 3.1, zatímco v předchozí generaci je uznaná nejvyšší třída betonu C90/105.

Tabulka 3.1: Pevnostní charakteristika normových tříd betonů [7]

Pevnost betonu v tlaku a tahu																
Pevnost	Třídy pevnosti betonu podle EN 206															Vztah
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115	
f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100	-
f_{cm}	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$
f_{ctm}	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3} (f_{ck} \leq 50 \text{ MPa})$ $f_{ctm} = 1,1f_{ck}^{1/3} (f_{ck} > 50 \text{ MPa})$
$f_{ctk,0.05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	2,9	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	$f_{ctk,0.05} = 0,7f_{ctm} (5\% \text{ fraktíl})$
$f_{ctk,0.95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,4	5,6	5,9	6,2	6,4	6,6	$f_{ctk,0.95} = 1,3f_{ctm} (95\% \text{ fraktíl})$

Vliv druhu cementu z předchozího EN 1, kde byly uváděny cementy o třech různých typech S, N a R, byl nahrazen třemi typy betonů rozdělenými podle rychlosti vývoje pevnosti betonu viz Tabulka 3.2. Tabulka zde uvedená vykazuje mírné změny oproti tabulce uvedené přímo v normě, jelikož se vlivem nedopatření nestihla vyměnit, nicméně změny se netýkají významných informací.

Tabulka 3.2: Třídy časového vývoje betonů [8]

Třídy vývoje pevnosti betonu

Třída	Složení a vlastnosti cementu nebo pojiva betonu		
	Beton obsahující pouze cement		Beton obsahující smíšené pojivo
	Typ cementu ^a	Třída pevnosti cementu ^b , např.	Složení pojiva (portlandský slínek ^c a příměsi ^d)
CS	CEM III CEM II/B	32,5 N; 42,5 N	Portlandský slínek a více než 65 % hm. mleté granulované vysokopecní strusky nebo více než 35 % hm. popílku
CN	CEM II/A CEM I	32,5 R; 42,5 N	Portlandský slínek a 35-65 % hm. mleté granulované vysokopecní strusky nebo 20-35 % hm. popílku
CR	CEM II/A CEM I	42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	Portlandský slínek a méně než 35 % hm. mleté granulované vysokopecní strusky nebo méně než 20 % hm. jiné příměsi než strusky
^a CEM IV, CEM V a speciální cementy mohou být zatříděny s uvážením obsahu slínku a třídy pevnosti			
^b podle EN 197-1			
^c obsah portlandského slínku v CEM I může být 95 % hm.			
^d uvažované jako pojivo pro vodní součinitel podle EN 206			

Podstata této změny spočívá v tom, že dříve byly betony složeny ve většině případů z portlandského cementu či jeho směsi s vysokopecní struskou a vývoj pevnosti cementů zároveň určoval vývoj pevnosti betonu jako celku, zatímco v dnešní době mají betony komplexněji navrhnutá pojiva, jejichž složení určuje rychlost vývoje jeho pevnosti.

V tabulce tedy vidíme rozdělení rychlosti vývoje pevnosti betonu dle typu cementu, jeho pevnosti a celkového složení pojiva na CS (pomalý, složený z portlandského slínku a více než 65 % mleté vysokopecní strusky či více než 35 % popílku), CN (normální, složený z portlandského slínku a více než 35 % a méně než 65 % mleté vysokopecní strusky či více než 20 % a méně než 35 % popílku) a CR (rychlý, ostatní složení). Nutno dodat, že vzhledem k velkým možnostem druhů cementu na trhu a také normativním možnostem, je třeba pro správné zařazení mít určité znalosti z oblasti technologie betonů.

Nová verze také nahrazuje nomogramy, které ve verzi EN 1 měly sloužit k rychlému stanovení součinitele dotvarování, avšak v praxi nebylo pro rychlé použití dostatečně přehledné, navíc byly takto dělány také z důvodu nenutnosti použití kapesní kalkulačky, což v dnešní době není problém.

Nomogramy byly tedy nahrazeny přehlednější tabulkou, viz Tabulka 3.3, která je určena k rychlému určení součinitele dotvarování v čase 50 let od zatížení.

Tabulka 3.3: Tabulka pro určení součinitele dotvarování [7]

Součinitel dotvarování $\phi(50y, t_0)$ pro beton v čase 50 let od zatížení

Stáří při zatížení t_0 [dny] pro tř. vývoje pevnosti betonu ^a			Suché prostředí (RH = 50 %)				Vlhké prostředí (RH = 80 %)			
			h_n^b [mm]				h_n^b [mm]			
CS	CN	CR	100	200	500	1000	100	200	500	1000
3	1	1	4,2	3,8	3,4	3,1	3,0	2,8	2,6	2,5
10	7	3	3,1	2,8	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9
32	28	23	2,4	2,2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5
91	91	91	1,9	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2
365	365	365	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8
Korekční exponent A			0,82	0,79	0,75	0,72	0,71	0,68	0,66	0,64
Pro geometrii průřezu nespňující dané rozmezí hodnot náhradního rozměru h_n je nutno použít výpočet dle přílohy B normy.										
Hodnoty součinitele dotvarování platí pro $f_{ck,28} = 35$ MPa. Pro jinou pevnost v rozmezí $12 \text{ MPa} \leq f_{ck,28} \leq 100$ MPa je třeba hodnoty přenásobit faktorem $(35/f_{ck})^A$, kde A je korekční exponent uvedený v tabulce, který zohledňuje vliv třídy pevnosti betonu.										
POZNÁMKA Hodnoty součinitele dotvarování jsou průměrné hodnoty s variačním koeficientem přibližně 30 %.										
^a Třídy CS, CN a CR značí pomalý, normální a rychlý vývoj pevnosti betonu, viz příloha B.3 (1) normy nebo příloha P03 těchto skript.										
^b h_n je náhradní rozměr rovný $2A_c/u$, kde A_c je průřezová plocha betonu a u je délka té části obvodu průřezu, která je vystavena vysychání.										

Dalším rozdílem je tedy to, že zatímco v předchozí verzi jsme získali součinitel dotvarování finální hodnoty v čase $t \rightarrow \infty$, z tabulky nyní získáme součinitel dotvarování v 50 letech od zatížení konstrukce, takže v případě potřeby, jestliže životnost konstrukce je větší 50 let, je třeba součinitel vypočítat dle postupu v příloze B. Další nárůst dotvarování je dán součinitelem dotvarování při vysychání, který trvá v závislosti na tloušťce prvku po desetiletí (čím je prvek tlustší, tím delší dobu).

Tabulka 3.3 je vhodné použít, pokud není vyžadována velká přesnost a závaznou podmínkou je, aby napětí nepřekročilo mez $0,4f_{cm}$, jelikož poté je třeba počítat s nelineárním dotvarováním. Funkce popisující nelineární dotvarování byla přesunuta do přílohy B a hodnoty uvedené v tabulce jsou vypočítány dle postupu uvedeného v příloze B, hodnoty v tabulce je možné interpolovat.

Pro návrh potřebujeme znát třídu betonu dle časového vývoje pevnosti, dobu od zatížení konstrukce ve dnech, náhradní rozměr prvku h_n , který se vypočítá jako: $h_n = 2 \cdot A_c / u$, kde A_c je plocha průřezu a u je obvod prvku vystavený vysychání. Dále potřebujeme znát relativní vlhkost RH a charakteristickou pevnost betonu v tlaku $f_{ck,28}$, která je limitována rozpětím od 12 MPa do 100 MPa, přičemž hodnoty jsou vypočítány pro beton o hodnotě $f_{ck,28} = 35$ MPa. Pro betony ostatních pevností je třeba součinitel dotvarování vynásobit koeficientem vypočítaným jako: $(35 / f_{ck,28})^A$, kde mocninný korekční koeficient A je uveden v tabulce v závislosti na pomyslné velikosti h_n .

Deformaci způsobenou dotvarováním lze tedy poměrně jednoduše vypočítat dle vztahu:

$$\epsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) * \frac{\sigma_c}{E_{c,28}} \quad (3.7)$$

kde

$E_{c,28}$ je tečnový modul pružnosti, který lze při nevyžadující vysoké přesnosti určit jako:
 $E_{c,28} = 1,05 * E_{cm}$.

Součinitel dotvarování $\varphi(t, t_0)$ udává Tabulka 3.3 ve věku 50 let od zatížení konstrukce,

σ_c je působící tlakové napětí.

Obdobnou tabulku jako pro dotvarování nabízí EN 2 pro smršťování betonu viz Tabulka 3.4. Nová tabulka nahrazuje tabulku z EN 1, ze které jde pouze odečíst velikost smršťování při vysychání, a navíc pouze pro cement třídy N, čili pro celkové smrštění je třeba dopočítat hodnotu základního smrštění a následně ji přičíst k hodnotě z tabulky. Dále také bylo zjištěno, že smršťování v EN 1 je výrazně podhodnocené, proč tomu tak je bude rozebráno v následující kapitole, nicméně změny v návrhu smršťování betonu jsou pro budoucí návrhy konstrukcí více než žádané.

Tabulka 3.4: Tabulka pro určení poměrného přetvoření od smršťování [7]

Nominální celkové poměrné smrštění po 50 letech vysychání betonu $\epsilon_{cs,50y}$ [‰]

Vývoj pevnosti betonu ^a	$f_{ck,28}$	Suché prostředí (RH = 50 %)				Vlhké prostředí (RH = 80 %)			
		h_n [mm]				h_n [mm]			
		100	200	500	1000	100	200	500	1000
Třída CS	20	0,57	0,56	0,48	0,36	0,33	0,32	0,28	0,21
	35	0,53	0,51	0,45	0,35	0,31	0,31	0,27	0,22
	50	0,49	0,48	0,43	0,35	0,30	0,29	0,27	0,23
Třída CN	20	0,67	0,65	0,56	0,41	0,38	0,37	0,32	0,24
	35	0,60	0,59	0,51	0,39	0,34	0,34	0,30	0,24
	50	0,55	0,54	0,48	0,37	0,31	0,31	0,28	0,23
	80	0,48	0,48	0,43	0,36	0,30	0,30	0,28	0,25
Třída CR	35	0,76	0,74	0,65	0,48	0,42	0,41	0,36	0,28
	50	0,67	0,66	0,58	0,44	0,36	0,35	0,32	0,26
	80	0,55	0,54	0,49	0,39	0,31	0,30	0,28	0,25

POZNÁMKA 1 Hodnoty jsou průměrné hodnoty s variačním koeficientem přibližně 30 %
 POZNÁMKA 2 Náhradní rozměr průřezu h_n je definován v poznámkách k tabulce pro stanovení součinitele dotvarování.
^a Třídy CS, CN a CR značí pomalý, normální a rychlý vývoj pevnosti betonu, viz příloha B.3 (1) normy nebo příloha P03

V této části budou představeny limity pro výpočet součinitele dotvarování a poměrného smrštění, které musí být pro správnost předpovědi vždy splněny. Následně budou popsány hlavní změny ve výpočtu oproti EN 1 a nakonec na vzorovém příkladu předveden postup výpočtu.

Limity:

- Předpis platí pro betony s charakteristickou pevností: $(12 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 100 \text{ MPa})$
- Při kvazistálé kombinaci: $\sigma_c \leq 0,40 f_{cm}(t_0)$; čas t_0 může být upraven dle vzorce (B.17), pokud $\sigma_c \in (0,40 - 0,60) f_{cm}(t_0)$, je třeba použít vztah pro nelineární dotvarování (B.19)
- Prvek má být vystaven průměrné hodnotě relativní vlhkosti v rozmezí: $(20 \% \leq RH \leq 100 \%)$, při teplotě $(5 \text{ °C} \leq T \leq 30 \text{ °C})$

- Stáří betonu při zatížení má být alespoň 1 den
- Vztahy mohou být použity i pro beton namáhaný tahem.

Složky dotvarování a smršťování jsou nyní rozděleny na základní složku a složku při vysychání, zatímco v předchozí verzi takto bylo rozděleno pouze smršťování, základní složka smrštění skládající se ze složky základní a autogenní, byla dříve označována jen jako složka autogenní. K rozdělení složek došlo především proto, že jsou vzájemně nezávislé, jejich vývoj je časově odlišný a je popsán typově odlišnými matematickými funkcemi.

Výpočet smršťování prošel velkou změnou, ve verzi EN 1 byly dle EN 2 výsledky až o 40 % podhodnoceny, podrobněji budou výsledky analyzovány v následující kapitole. Důvodem tohoto podhodnocení smršťování je dodatečná úprava provedená normotvůrci v normě EN 1. Původní model zamýšlený pro EN 1992-1-1:2001 (EN 1) byl identický s modelem FIP Model Code 1990, který vycházel z fyzikálních zákonů a byl optimalizován velkou sadou dat. Ovšem v porovnání s dřívějšími modely jako Model Code 1978 či 1970 vykazoval o zmíněných 30 až 40 % vyšší hodnoty, což bylo v rozporu se zkušenostmi tvůrců normy EN 1992-1-1:2004 (EN 1). Předpis byl proto upraven zavedením dodatečných součinitelů tak, aby vykazoval znovu nižší hodnoty smrštění. Hlavním argumentem bylo to, že nižší smrštění vede k menším minimálním hodnotám výztuže čili je to více ekonomické. Úprava spočívala v zavedení dodatečných součinitelů ve výpočtu smrštění ve formě K_h a $0,85$.

Vzhledem k zavedení referenčního času a zvedení součinitele s_c , který zahrnuje rychlost vývoje pevnosti a závisí také na pevnostní třídě betonu, byl v EN 2 změněn výpočet $\beta_{cc}(t_0)$ dle vztahu (B.2).

Předpis EN 2 reaguje na data, která ukazují, že časový vývoj dotvarování se zpožďuje při rostoucí době od zatížení. Tento jev je v novém modelu zastoupen ve vztahu tak, že se vliv stáří při zatížení na složku dotvarování při vysychání zohlední v exponentu časové funkce pomocí $\gamma(t_{0,adj})$, viz vztahy (B.13) a (B.14). V EN 1 je exponent ve výrazu (B.7) konstantní, rovný hodnotě 0,3.

Předpis není určen pro výpočet součinitele dotvarování na starších betonech např. při sanacích. Všechny experimenty byly prováděny na dosud nezatížených betonech, navíc bylo použito málo experimentů, kde by byla doba při zatížení větší než 5 let.

Limit pro uvažování nelineárního dotvarování byl změněn z hodnoty $0,45 f_{ck}$ na hodnotu $0,4 f_{cm}$ (jelikož hodnota f_{cm} je přesně zjistitelná hodnota z experimentu, na rozdíl od upravené hodnoty f_{ck}), přičemž horní limit je $0,4 f_{cm}$. Rostoucí nelinearitu lze vhodně popsat pomocí exponenciální funkce (B.19). Tato funkce zanedbává vliv stáří při zatížení i dobu trvání zatížení, ve skutečnosti nelineární část deformace při dotvarování výrazně klesá s dobou trvání zatížení.

EN 2 nově poskytuje informace o horních a dolních mezích součinitele dotvarování i smrštění. Variační koeficient V dosahuje hodnoty cca 30 %. Za předpokladu Gaussova rozdělení lze hodnotu kvantilu pro koeficient dotvarování vypočítat z výrazu $\varphi_{frac} = \varphi (1 - \bar{\eta}_{frac} * V)$, kde φ je střední hodnota dotvarování a η_{frac} závisí na hodnotě kvantilu. Pro 5 % kvantil $\eta_{frac} = 1,645$, pro 10 % kvantil 1,282. Výsledné hodnoty pro jednotlivé kvantily jsou uvedeny v kapitole B.5 v části (8).

Výpočet smrštění dle vztahů (B.23 – B.33) vychází v kladných hodnotách, ovšem smrštění je záporná deformace, pokud se nejedná o jev bobtnání, kde se jedná o zvětšování objemu prvku.

Nově jsou ve výpočtu smrštění zavedeny ve výrazech (B.24 a B.25) koeficienty $a_{NDP,b}$ a $a_{NDP,d}$. Základní hodnota má být uvažována jako 1,0, ovšem národní dodatek může tuto hodnotu změnit. Smysl změnit tyto koeficienty dávají případy, kdy jsou betony primárně vyráběny s použitím např. z vysoce pevného vápencového kameniva či s malým množstvím pojiva, kdy je prokázáno menší smršťování, poté je možné snížit jejich hodnotu pod 1,0.

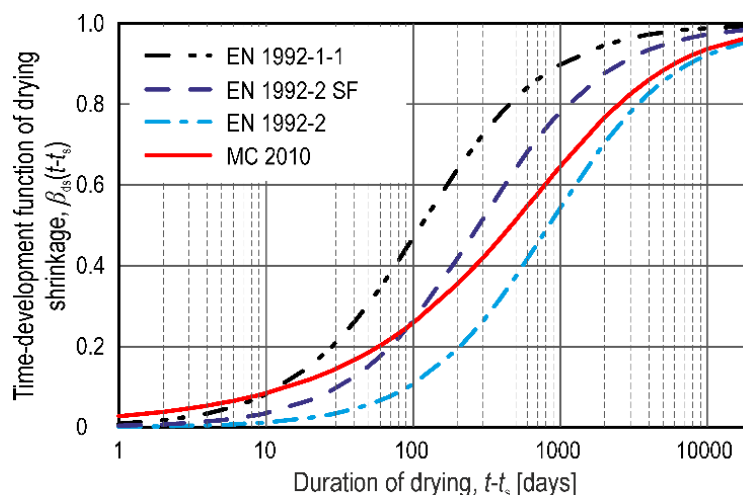
Výpočet základního smrštění byl poupraven, ve vztahu (3.12) v EN 1 došlo k nahrazení hodnoty f_{ck} hodnotou $f_{cm,28}$ v EN 2 (B.26) a do výpočtu se zavedl koeficient a_{bs} zohledňující časový vývoj pevnosti betonu. Lineární vztah byl nahrazený hyperbolickou funkcí, nyní nedochází ke změně znaménka při výpočtu u nízkých hodnot pevností a výpočet se dá považovat za fyzikálně správný, oproti výpočtu v EN 1.

Vzorce v EN 2 (B.29 až B.31) popisují vliv relativní vlhkosti okolního prostředí na velikost smrštění. Byl zaveden parametr RH_{eq} , který představuje průměrnou relativní vlhkost v % uvnitř prvku, kdy dochází v betonu k vlhkostní rovnováze a vypočítá se dle vztahu (B.32). Fyzikálním důsledkem je to, že při překročení okolní relativní vlhkosti vzduchu nad hodnotu RH_{eq} , beton se již dále nesmršťuje, ale naopak bobtná, jelikož dochází k akumulaci vody do jeho pórů. V EN 1 tento efekt nebyl správně zohledněn, nyní v rozsahu $20 \% \leq RH \leq RH_{eq}$ dochází ke smršťování při vysychání, pokud $RH_{eq} \leq RH \leq 100 \%$ dochází k bobtnání čili zvětšování objemu. Při $RH = 100 \%$ dochází také ke zvětšování objemu, ovšem vlivem vystavení povrchu prvku kapalně vodě, kdy se aktivuje kapilární transportní mechanismus, díky čemu se zvýší absorpce vody, a tedy celkového objemu.

Funkce popisující časový vývoj smrštění při vysychání (B.33) je oproti verzi EN 1 (3.10) zcela jiná. Nyní se jedná o hyperbolickou funkci, která je v souladu z teorií difúze. Velikost této změny vidíme na Obrázek 3.3, kde je vidět výrazné zpoždění vývoje smršťování při vysychání. Koeficient 0,035 ve vzorci (B.33) zastupuje průměrný difuzní koeficient c , parametr h_n neovlivňuje velikost smrštění, ale jen jeho časový vývoj. [9] [7] [8]

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t-t_s}{(t-t_s)+0,04*\sqrt{h_0^3}} \quad (3.10)$$

$$\beta_{ds,t-t_s} = \left[\frac{(t-t_s)}{0,035h_n^2+(t-t_s)} \right]^{0,5} \quad (B.33)$$



Obrázek 3.3: Porovnání smršťování při dotvarování pro různé předpisy (model MC2010 a různé varianty modelů z EN 1) pro prvek o $h_n = 200 \text{ mm}$ [9]. Výsledky EN 2 budou prakticky totožné s MC2010.

3.4.2 Vzorový výpočet dotvarování a smršťování dle EN 2

V této kapitole bude proveden názorný výpočet součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování dle postupu uvedeného v EN 2 přílohy B.

Zadání příkladu:

Nosník obdélníkového průřezu (šířka $b = 500 \text{ mm}$, výška $h = 800 \text{ mm}$), beton třídy C30/37 (f_{cm} je tedy 38 MPa), třída vývoje pevnosti betonu CN v čase $t = 18\,250$ dní (50 let). Průřez je ošetřován do času $t_s = 7$ dní, zatížení vneseno v čase $t_0 = 28$ dní, prvek je vystaven relativní vlhkosti $RH = 60 \%$ a teplotě $T = 20 \text{ °C}$.

3.4.2.1 Výpočet dotvarování

Konečný střední součinitel dotvarování se vypočítá dle vztahu:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc(t, t_0)} + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (B.5)$$

kde:

$\varphi_{bc(t, t_0)}$ je složka základního dotvarování

$\varphi_{dc}(t, t_0)$ je složka dotvarování při vysychání

t je čas pro který je řešen výsledek výpočtu

t_0 je stáří betonu při vnesení zatížení, má být upraven dle vztahu (B.17), který zohledňuje vliv vývoje pevnosti betonu v čase a upravuje čas t_0 na čas $t_{0,adj}$:

$$t_{0,adj} = t_{0,T} \left[\frac{9}{2+t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha_{sc}} = 28 \cdot \left[\frac{9}{2+28^{1,2}} + 1 \right]^0 = 28 \text{ dní} \geq 0,5 \quad (B.17)$$

kde:

α_{sc} je součinitel který závisí na vývoji pevnosti betonu, pro beton třídy CS = -1, pro CN = 0 a pro třídu CR = 1

$t_{0,T}$ odpovídá při 20 °C času t_0 , pokud nějaké dny před vnesením zatížení převládá jiná teplota, tento čas se upraví dle vztahu (B.18)

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i * \exp \left(13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} \right) \quad (B.18)$$

kde:

t_T je upravená doba odpovídající změně teploty v určitých dnech

Δt_i je počet dní, kdy převládá teplota T

$T(\Delta t_i)$ je střední teplota ve °C během doby Δt_i

Základní součinitel dotvarování se vypočítá jako:

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc, f_{cm}} \cdot \beta_{bc, t-t_0} = 0,141 \cdot 10,013 = 1,412 \quad (B.6)$$

kde:

$\beta_{bc, f_{cm}}$ je funkce popisující vliv pevnosti betonu na základní dotvarování

$$\beta_{bc, f_{cm}} = \frac{1,8}{(f_{cm,28})^{0,7}} = \frac{1,8}{38^{0,7}} = 0,141 \quad (B.7)$$

$\beta_{bc, t-t_0}$ je funkce popisující časový vývoj základního dotvarování:

$$\beta_{bc,t-t_0} = \ln \left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0,035 \right)^2 * (t - t_0) + 1 \right) = \ln \left(\left(\frac{30}{28} + 0,035 \right)^2 * (18250 - 28) + 1 \right) = 10,013 \quad (B.8)$$

Složka dotvarování při vysychání se vypočítá jako:

$$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc,fc_m} \cdot \beta_{dc,RH} \cdot \beta_{dc,t_0} \cdot \beta_{dc,t-t_0} = 2,53 * 0,592 * 0,488 * 0,987 = 0,721 \quad (B.9)$$

kde:

β_{dc,fc_m} je funkce popisující vliv pevnosti betonu na složku dotvarování při vysychání

$$\beta_{dc,fc_m} = \frac{412}{(f_{cm,28})^{1,4}} = \frac{412}{38^{1,4}} = 2,530 \quad (B.10)$$

$\beta_{dc,RH}$ je funkce popisující vliv relativní vlhkosti vzduchu okolního prostředí a vliv pomyslné velikosti prvku h_n

$$\beta_{dc,RH} = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0,1 \frac{h_n}{100}}} = \frac{1 - \frac{60}{100}}{\sqrt[3]{0,1 \frac{307,69}{100}}} = 0,592 \quad (B.11)$$

Kde RH je relativní vlhkost okolního prostředí a h_n je náhradní velikost prvku, která se vypočte jako dvojnásobek plochy průřezu vydělený obvodem prvku vystaveným vysychání: $h_n = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \cdot 500 \cdot 800}{2 \cdot (500 + 800)} = 307,69$ mm

β_{dc,t_0} je funkce popisující vliv upraveného stáří betonu $t_{0,adj}$ při aplikaci zatížení

$$\beta_{dc,t_0} = \frac{1}{0,1 + t_{0,adj}^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 28^{0,2}} = 0,488 \quad (B.12)$$

$\beta_{dc,t-t_0}$ je funkce popisující časový vývoj dotvarování při vysychání

$$\beta_{dc,t-t_0} = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_h + (t-t_0)} \right]^{\gamma(t_{0,adj})} = \left[\frac{(18250-28)}{701,54 + (18250-28)} \right]^{0,338} = 0,987 \quad (B.13)$$

$$\text{kde: } \gamma(t_{0,adj}) = \frac{1}{2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{t_{0,adj}}}} = \frac{1}{2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{28}}} = 0,338 \quad (B.14)$$

$$\beta_h = 1,5h_n + 250\alpha_{f_{cm}} = 1,5 \cdot 307,69 + 250 \cdot 0,960 = 701,54 \leq 1500\alpha_{f_{cm}} = 1440 \quad (B.15)$$

$$\alpha_{f_{cm}} = \left(\frac{35}{f_{cm,28}}\right)^{0,5} = \left(\frac{35}{38}\right)^{0,5} = 0,960 \quad (B.16)$$

Celková střední hodnota součinitele dotvarování je tedy:

$$(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) = 1,412 + 0,721 = 2,133 \quad (B.05)$$

Stanovení poměrného přetvoření v důsledku dotvarování pod napětím σ_c by se spočítalo jako:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \frac{\sigma_c}{E_{c,28}} \quad (B.20)$$

kde se musí provést převedení sečnového modulu pružnosti na tečnový dle vzorce:

$$E_{c,28} = \alpha_c E_{cm,28}, \text{ kde } \alpha_c = \frac{1}{0,8 + 0,2 \frac{f_{cm,28}}{88}} \geq 1,0 \quad (B.21), (B.22)$$

3.4.2.2 Výpočet poměrného přetvoření od smršťování

Celkové střední poměrné přetvoření od smršťování (bobtnání) se vypočítá jako:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t - t_s) = 65,538 * 10^{-6} + 460 * 10^{-6} = 525,538 * 10^{-6} \quad (B.23)$$

kde $\varepsilon_{cbs}(t)$ je složka základního smrštění, ke které dochází vždy:

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs,f_{cm}} \cdot \beta_{bs,t} \cdot \alpha_{NDP,b} = 65,538 * 10^{-6} * 1 * 1 = 65,538 * 10^{-6} \quad (B.24)$$

kde:

$\varepsilon_{cbs,f_{cm}}$ je základní koeficient smrštění, který se stanoví jako:

$$\varepsilon_{cbs,fc_m} = \alpha_{bs} \left(\frac{f_{cm,28}}{60+f_{cm,28}} \right)^{2,5} \cdot 10^{-6} = 700 \cdot \left(\frac{38}{60+38} \right)^{2,5} \cdot 10^{-6} = 65,538 \cdot 10^{-6} \quad (B.26)$$

kde α_{bs} je koeficient závisící na třídě vývoje pevnosti betonu v raných časech dle Tabulka 3.5.

Tabulka 3.5: Určení součinitele α_{bs} podle třídy vývoje pevnosti betonu

Table B.3 — Coefficients α_{bs} and α_{ds} used in Formulae (B.26) and (B.28), respectively

Early strength development of concrete ^a	α_{bs}	α_{ds}
Low early strength: Class CS	800	3
Ordinary early strength: Class CN	700	4
High early strength: Class CR	600	6
^a See B.3(1).		

$\beta_{bs,t}$ je funkce popisující časový vývoj základního smršťování:

$$\beta_{bs,t} = 1 - \exp(-0,2\sqrt{t}) = 1 - \exp(-0,2\sqrt{18250}) = 1,000 \quad (B.27)$$

$\alpha_{NDP,b}$ a $\alpha_{NDP,d}$ je součinitel rovný hodnotě 1,0, pokud není v národním dodatku uvedeno jinak, podrobněji viz str. 46.

Smršťování při vysychání se vypočítá dle vztahu:

$$\varepsilon_{cds}(t - t_s) = \varepsilon_{cds,fc_m} \cdot \beta_{RH} \cdot \beta_{ds,t-t_s} \cdot \alpha_{NDP,d} = 418,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,196 \cdot 0,92 \cdot 1 = 460 \cdot 10^{-6} \quad (B.25)$$

kde:

ε_{cds,fc_m} je základní koeficient popisující smršťování při vysychání

$$\varepsilon_{cds,fc_m} = (220 + 110 \cdot \alpha_{ds}) \cdot \exp(-0,012f_{cm,28}) \cdot 10^{-6} = (220 + 110 \cdot 4,0) \cdot \exp(-0,012 \cdot 38) \cdot 10^{-6} = 418,3 \cdot 10^{-6} \quad (B.28)$$

β_{RH} je součinitel popisující vliv relativní vlhkosti prostředí na složku smršťování při vysychání, výpočet je rozdělený do tří skupin podle srovnání s vnitřní rovnovážnou relativní vlhkostí uvnitř prvku RH_{eq}

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^3 \right] \quad \text{pro } 20 \% \leq RH \leq RH_{eq} \quad (B.29)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^2 \right] \quad \text{pro } RH_{eq} \leq RH < 100 \% \quad (B.30)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^2 \right] - 0,25 \quad \text{pro } RH = 100 \% \quad (B.31)$$

$$RH_{eq} = 99 \cdot \left(\frac{35}{f_{cm,28}} \right)^{0,1} = 99 \cdot \left(\frac{35}{38} \right)^{0,1} = 98,19 \% \leq 99 \quad (B.32)$$

→ pro nás tedy platí vztah (B.29)

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^3 \right] = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{60}{98,19} \right)^3 \right] = 1,196 \quad (B.29)$$

$\beta_{ds,t-t_s}$ je funkce popisující rychlost vývoje smršťování při vysychání:

$$\beta_{ds,t-t_s} = \left[\frac{(t-t_s)}{0,035h_n^2 + (t-t_s)} \right]^{0,5} = \left[\frac{(18250-7)}{0,035 \cdot 307,69^2 + (18250-7)} \right]^{0,5} = 0,92 \quad (B.33)$$

Celková střední hodnota poměrného smrštění je:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t - t_s) = 65,538 * 10^{-6} + 460 * 10^{-6} = 525,538 * 10^{-6} \quad (B.23)$$

4 Srovnávací studie

V této kapitole je provedena podrobná analýza čtyř představených předpisů pro určení součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování. Účelem je zjistit, jestli a popřípadě jak moc se odlišují výsledky dle použitých předpisů a jak velký vliv má změna parametrů v zadání na jejich velikost. Jeden z hlavních cílů je porovnání současné verze EN 1 s novou verzí EN 2.

Nejdříve budou porovnány jednotlivé předpisy na příkladu se vzorovým zadáním, následně budou zkoumány další vlivy zadávaných parametrů na výsledek.

V úvodním příkladu budou porovnány výsledky pro reprezentativní průřezy, konkrétně desky tloušťky 100, 250, 400 a 800 mm, vzhledem k tomu, že typ průřezu má vliv na velikost dotvarování a poměrného smršťování pouze u modelu B3, jde nám o porovnání různých velikostí náhradních rozměrů průřezů h_0 , které v případě uvažování průřezu desky mají stejnou velikost, jako je jejich tloušťka. Je třeba upozornit, že předpis ČSN EN 1992-2(dále jen EN 1m) je dle normy vhodné použít pro betony od třídy pevnosti C50/60 a vyšší a do relativní vlhkosti vzduchu 80 %. Nicméně pro porovnání výsledků s ostatními předpisy bude v této studii použit i pro betony nižší třídy, v úvodním příkladu bude uvažován bez vlivu křemičitého úletu.

4.1 Analýza dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování – úvodní příklad

Zadání úvodního příkladu:

- Beton třídy C30/37,
- třída vývoje pevnosti betonu CN,
- cement třídy N (I),
- kamenivo křemenec,
- relativní vlhkost okolního vzduchu 65 %,
- průměrná teplota je 20 °C.

- Způsob ošetřování: standardní,
- čas $t = 50$ let $\rightarrow 18250$ dní,
- doba ošetřování $t_s = 7$ dní,
- staří betonu v okamžiku vnesení zatížení $t_0 = 28$ dní.

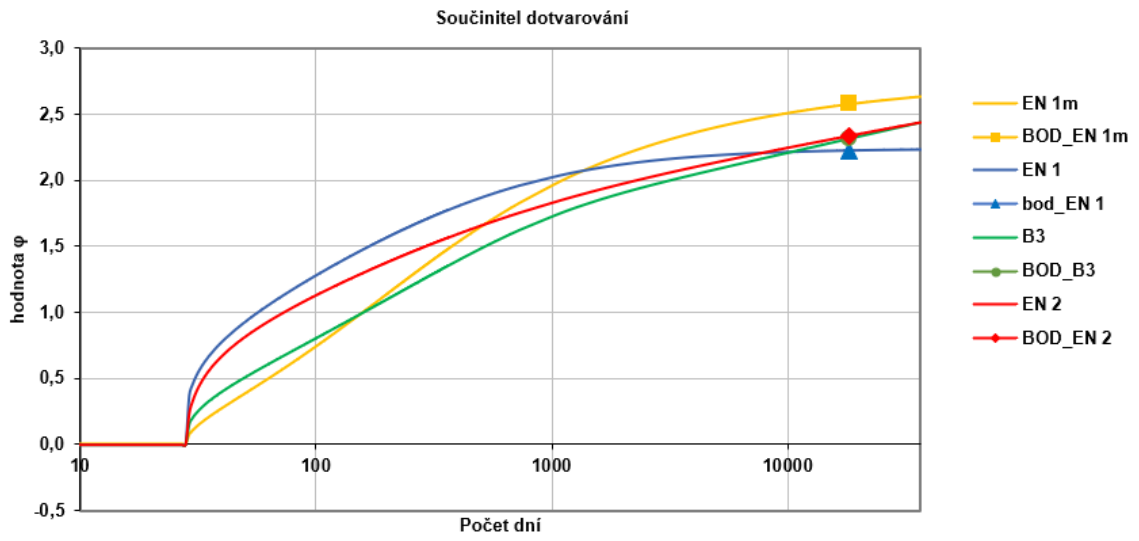
Zatížení nemusí být specifikováno, jelikož v předpisech neovlivňuje výsledky. Předpokládá se, že je splněn horní limit napětí pro lineární dotvarování podle všech předpisů. Model B3 požaduje přesnější specifikaci betonu. Předpokládaný obsah cementu, vody a kameniva ve směsi je patrný ze zadání modelu B3 pro průřez desky tl. 100 mm, které je uvedeno na Obrázek 4.1. Složení betonu je neměnné i v ostatních průřezích. Časový vývoj součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování bude pro každý průřez znázorněn pomocí grafu. Grafy znázorňují časové období 100 let (36 500 dní) a na ose x (čas) je použito logaritmické měřítko.

Model B3

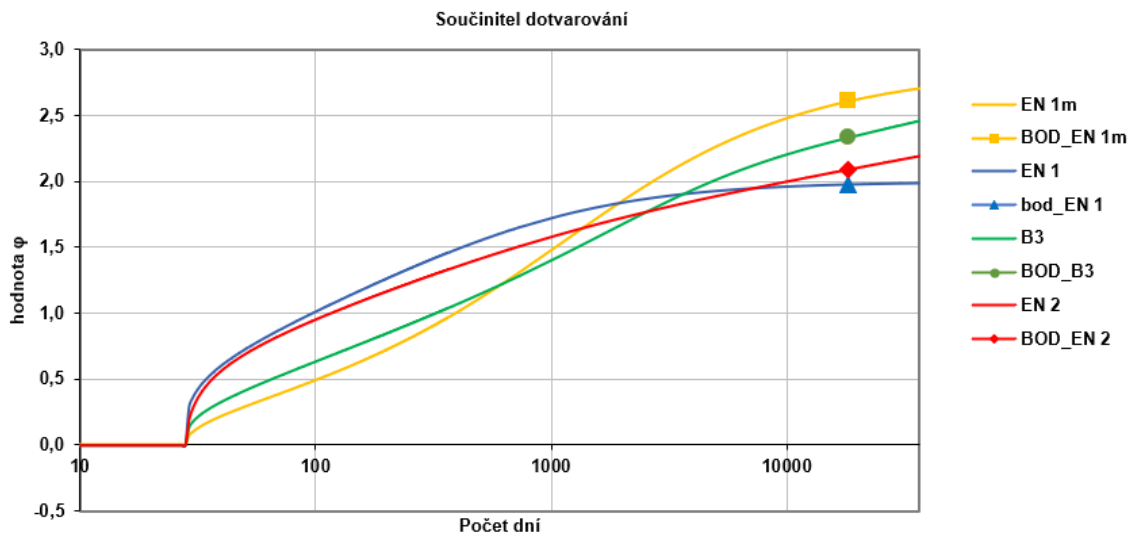
VSTUPNÍ ÚDAJE:			
čas - sledovaný okamžik:	t	=	18250 [den]
staří betonu v okamžiku vnesení zatížení:	t'	=	28 [den]
doba ošetřování betonu:	t_0	=	7 [den]
prům. válcová pevnost v tlaku ve 28 dnech:	$f_c (f_{cm})$	=	38,0 [MPa]
plocha průřezu:	v	=	1,00E+05 [mm ²]
obvod prvku vystavený okolnímu prostředí:	s	=	2000 [mm]
relativní vlhkost okolního prostředí:	h	=	65 [%]
třída cementu:		TYP:	I 1
množství vody ve směsi	w	=	140 [kg/m ³]
množství cementu ve směsi (160 - 720)	c	=	315 [kg/m ³]
množství kameniva ve směsi	a	=	1845 [kg/m ³]
způsob ošetřování:			normální 2
tvar průřezu:			deska 1
tlakové napětí v betonu od zatížení:	σ_c	=	0,00 [MPa]

Obrázek 4.1 Zadání pro model B3; deska tl. 100 mm

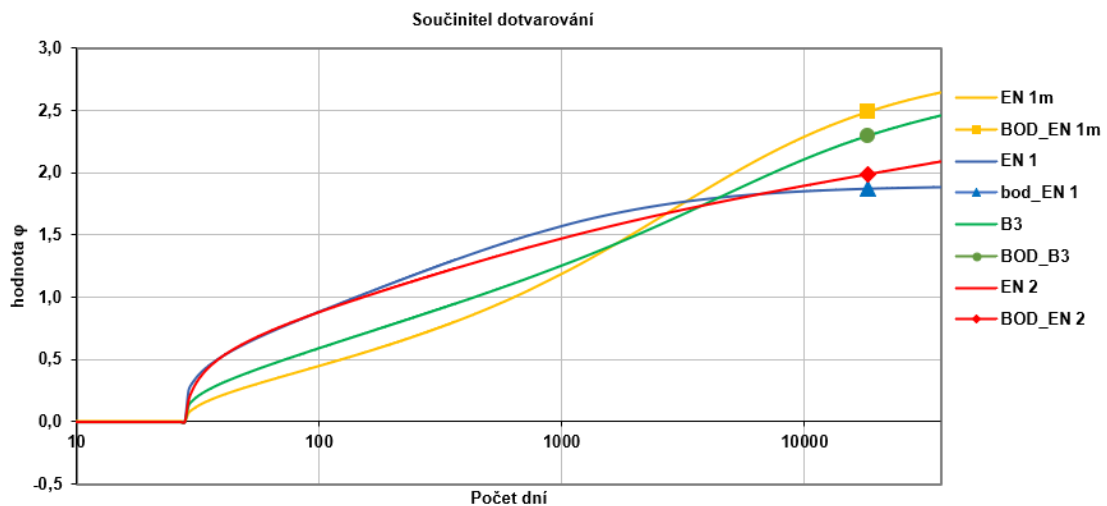
4.1.1 Výsledky – dotvarování



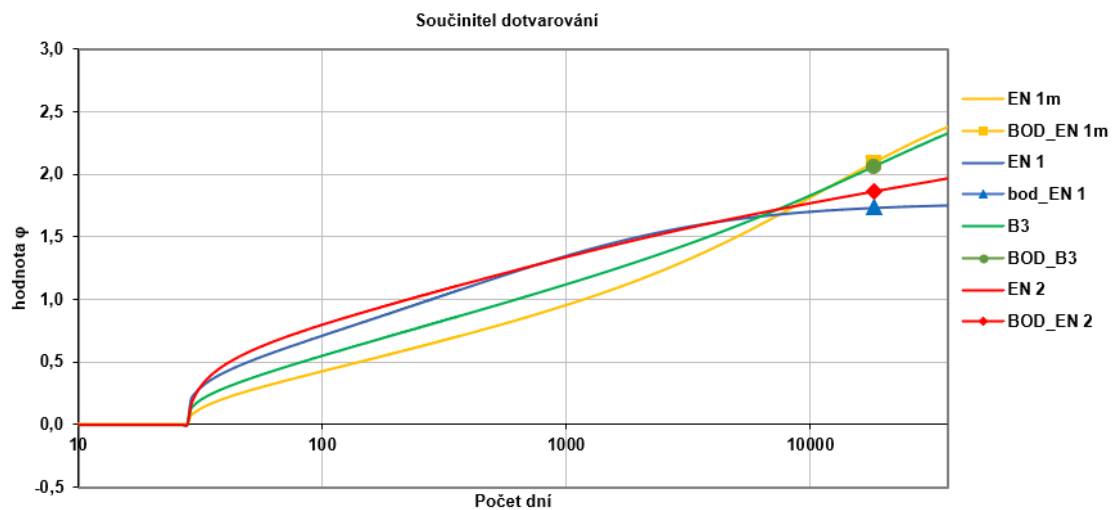
Obrázek 4.2: Součinitel dotvarování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 100$ mm



Obrázek 4.3: Součinitel dotvarování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 250$ mm



Obrázek 4.4: Součinitel dotvarování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 400$ mm



Obrázek 4.5: Součinitel dotvarování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 800$ mm

Tabulka 4.1: Výsledky součinitele dotvarování jednotlivých předpisů v čase 50 let

Náhradní rozměr prvku h_0 [mm]	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
100	2,227	2,580	2,317	2,338
250	1,976	2,609	2,334	2,092
400	1,871	2,490	2,292	1,991
800	1,736	2,089	2,059	1,867

4.1.2 Diskuse výsledků – dotvarování

Z výsledků dle Tabulka 4.1 je patrné, že bez pár dále rozebraných výjimek je splněn předpoklad, že součinitel dotvarování se v daném čase 50 let se zvětšujícím náhradním rozměrem betonového prvku snižuje. Tento předpoklad je porušen normou EN 1m a modelem B3, kde dotvarování dosahuje mírně vyšších hodnot u desky tl. 250 mm oproti desce tl. 100 mm. Zde je důležité říci, že rozměry prvku nemají žádný vliv na hodnotu základní složky dotvarování, na druhou stranu mají poměrně zásadní vliv na velikost složky dotvarování při vysychání. U předpisů je součinitel dotvarování při vysychání matematicky závislý na časech t a t_0 (t').

Velikost náhradního rozměru prvku $h_0(h_n)$, se podle všech zmíněných předpisů vypočítá jako: $2 \cdot \text{plocha průřezu } (A_c) / \text{obvod prvku vystaveného okolnímu prostředí } (u)$. Velikost náhradního rozměru prvku je tedy u desky tl. 250 mm: $2 \cdot 250 \cdot 1000 / 2 \cdot 1000 = 250 \text{ mm}$.

EN 1m definuje součinitel dotvarování při vysychání jako: $\phi_d(t, t_0) = \phi_{d0} \cdot ((\varepsilon_{cd}(t) - \varepsilon_{cd}(t_0)))$, kde ϕ_{d0} je koeficient zohledňující obsah křemičitého úletu v betonu. Odchylna z obecného předpokladu vznikla z tohoto důvodu: hodnota $\varepsilon_{cd}(t)$ splňuje předpoklad a je tudíž menší u desky tloušťky 250 mm oproti desce tl. 100 mm, nicméně výsledná hodnota celkového výrazu $\varepsilon_{cd}(t) - \varepsilon_{cd}(t_0)$ je mírně vyšší u desky tl. 250 mm. Důvod, proč je celkové dotvarování v tomto případě vyšší u většího průřezu, způsobuje velikost členu $\varepsilon_{cd}(t_0)$. Deska tl. 400 (800) mm již má nejnižší hodnoty dotvarování ve všech uvedených předpisech.

B3 model definuje funkci dotvarování při vysychání jako:

$$C_{d(t,t',t_0)} = q_5 \sqrt{[e^{-8H(t)} - e^{-8H(t')}]} \quad (1.14)$$

kde q_5 je korelační koeficient s ohledem na pevnost betonu, způsob ošetřování, typ betonu a množství vody v betonu.

Důvod, proč je u desky tl. 250 mm větší dotvarování v čase 50 let, je velmi podobný důvodu normy EN 1m. Konkrétně funkce $H_{(t)}$ dosahuje u tl. desky 100 (250) mm hodnoty lišící se hodnotou 0,01, zatímco u funkce $H_{(t)}$ je hodnota u tl. 250 mm výrazně větší, tento důvod vede k tomu, že od prakticky stejné hodnoty odečítám menší hodnotu, takže výsledná celková hodnota funkce popisující dotvarování při vysychání je větší.

Ve výsledcích Tabulka 4.1 můžeme pozorovat zajímavou skutečnost, že velikost prvku (tedy náhradního rozměru prvku h_0) má výrazný vliv na rozptyl výsledných hodnot podle jednotlivých předpisů při zvětšující se velikosti náhradního průřezu h_0 . U desky tl. 100 mm nejvyšší hodnotu součinitele dotvarování dosahuje předpis EN 1m (2,580), zatímco nejnižší hodnotu EN 1 (2,227), EN 1m dosahuje 116 % hodnoty normy EN 1 (absolutní rozdíl je tedy 16 %). Pokud porovnáme výsledky součinitele dotvarování u desky tl. 400 mm (čtyřnásobná velikost náhradního rozměru prvku h_0 oproti tl. 100 mm), zjistíme, že maximální a nejnižší hodnoty náležejí stejným předpisům jako u tl. 100 mm, ale EN 1m dosahuje 133 % hodnoty normy EN 1 (absolutní rozdíl je tedy přibližně dvojnásobný oproti tl. desky 100 mm). Na druhou stranu při $h_0 = 800$ mm, se hodnoty v čase 50 let tak výrazně neliší, viz Obrázek 4.5. Ovšem důvod je prostý, daný rozptyl nám vytváří odlišné funkce pro výpočet dotvarování při vysychání a při velké hodnotě h_0 vysychání betonového prvku trvá delší dobu. U desky tl. 100 mm proběhne prakticky celkové vysychání, zatímco u tl. 800 mm se stejným způsobem projeví mnohem později.

Tímto srovnáváním můžeme pokračovat v samotných předpisech, kde můžeme pozorovat velmi vysoké odchylky ve vlivu velikosti samotného rozměru prvku na výsledek součinitele dotvarování (pouze složky dotvarování při vysychání). Tabulka 4.2 uvádí rozptyl výsledků součinitele dotvarování dle jednotlivých předpisů v závislosti na odlišné velikosti náhradního průřezu.

Tabulka 4.2: Rozptyl výsledné hodnoty součinitele dotvarování z důvodu odlišné velikosti náhradního průřezu

Náhradní rozměr prvku h_0 [mm]	φ pro $t=18250$ dny	absolutní rozdíl hodnot	φ pro $t=18250$ dny	absolutní rozdíl hodnot	φ pro $t=18250$ dny	absolutní rozdíl hodnot	φ pro $t=18250$ dny	absolutní rozdíl hodnot
	EN 1		EN 1m		B3		EN 2	
100		2,227		2,580		2,317		2,338
250	1,976	0,251	2,609	+ 0,029	2,334	+0,017	2,092	0,246
400	1,871	0,356	2,490	0,090	2,292	0,025	1,991	0,347
800	1,736	0,491	2,089	0,491	2,059	0,258	1,867	0,471

Výsledky jsou velmi zajímavé, zatímco u modelu B3 a EN 1m je rozptyl v hodnotách součinitele dotvarování v porovnání mezi tl. desky 100 mm a 400 mm do 5 %, naopak u EN 1 a EN 2 je rozptyl okolo 20 %. Na druhou stranu u modelů B3 a EN 1m dochází k vysychání pomaleji, proto jsou u těchto modelů v čase 50 let u tl. desky 800 mm naopak výrazné rozptyly v hodnotě součinitele dotvarování oproti tl. desky 400 mm. Z těchto dat je zřejmé, že modely B3 a EN 1m používají velmi odlišný způsob výpočtu složky dotvarování při vysychání (EN 1 nerozlišuje dotvarování na základní složku a složku při vysychání) oproti předpisům EN 1 a EN 2 s ohledem na vliv velikosti h_0 na finální hodnotu součinitele dotvarování. Funkce popisující vliv relativní vlhkosti a velikosti prvku se vypočítá dle EN 2 takto:

$$\beta_{dc,RH} = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0,1 * \frac{h_n}{100}}} \quad (B.11)$$

Vzorec je velmi podobný vzorci zohledňujícímu relativní vlhkost a pomyslnou velikost prvku v EN 1, kde h_n vystupuje také pod třetí odmocninou.

U EN 2 vystupuje náhradní rozměr prvku také ve funkci popisující časový vývoj dotvarování při vysychání:

$$\beta_{dc,t-t_0} = \left[\frac{t-t_0}{\beta_h + (t-t_0)} \right]^{\gamma(t_0,adj)} \quad (B.13)$$

$$\text{kde } \beta_h = 1,5h_n + 250\alpha_{fcm} \leq 1500\alpha_{fcm} \quad (B.15)$$

Je třeba upozornit, že tato podmínka je u $h_n = 800$ splněna v horním limitu, větší náhradní rozměr by již nebyl v limitu výpočtu dle EN 2.

Složka dotvarování při vysychání se dle EN 1m vypočítá jako:

$$\varphi_d(t, t_0) = \varphi_{d0} [\varepsilon_{cd}(t) - \varepsilon_{cd}(t_0)] \quad (B.121)$$

kde φ_{d0} je součinitel, který umožňuje zohlednit beton s mikrosilikou.

$$\varepsilon_{cd}(t) = \frac{K(f_{ck})[72 \exp(-0,0046f_{ck}) + 75 - RH](t-t_s)10^{-6}}{(t-t_s) + \beta_{cd}h_0^2} \quad (B.116)$$

kde $K(f_{ck})$ je součinitel závisující na pevnosti betonu, RH je relativní vlhkost okolního prostředí, β_{cd} je součinitel zohledňující použití mikrosiliky. Náhradní rozměr prvku h_0 je umocněn exponentem 2.

Postup určení dotvarování při vysychání u modelu B3 se vstupem náhradního rozměru (v B3 označovaného jako D) složitější. Nejdříve je třeba vypočítat součinitel upravující vliv velikosti průřezu.

$$\tau_{sh} = k_t(k_s D)^2 \quad (1.11)$$

kde

- k_t je korekční součinitel vlivu pevnosti betonu
- k_s je součinitel tvaru průřezu

Poté se vypočítá funkce popisující časovou závislost $S(t)$

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}} \quad (1.09)$$

Následně funkce popisující dodatečné dotvarování od vysychání:

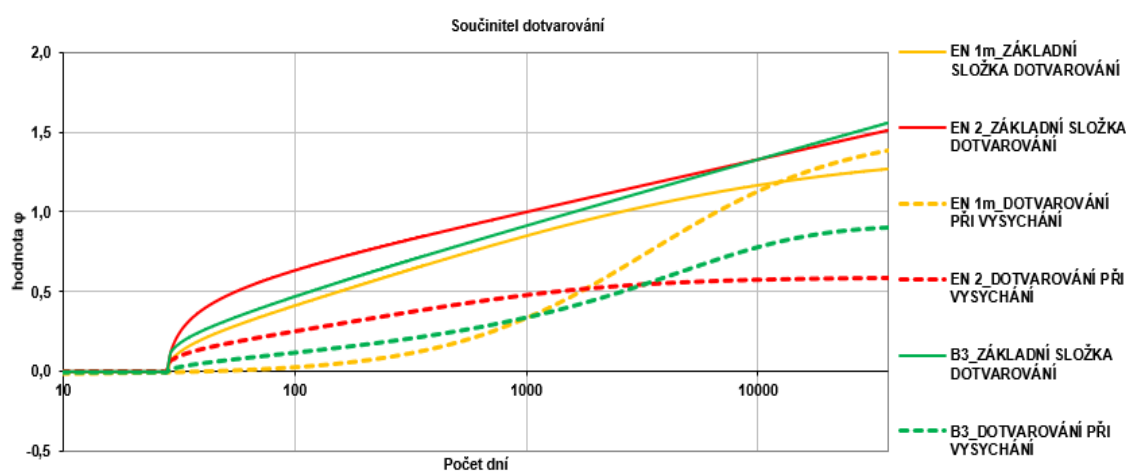
$$H(t) = 1 - (1 - h)S(t) \quad (1.13)$$

Finální funkce dotvarování při vysychání se vypočítá jako:

$$C_{d(t,t',t_0)} = q_5 \sqrt{[e^{-8H(t)} - e^{-8H(t')}] } \quad (1.14)$$

Je tedy zřejmý velmi odlišný přístup ve výpočtu složky dotvarování při vysychání, který vede až k překvapivě výrazným rozdílům ve výsledných hodnotách součinitele dotvarování. Na místě je otázka, který předpis lépe vystihuje dotvarování při vysychání, jelikož jak model B3, tak EN 2 vychází z velmi početné skupiny experimentálních dat, podle kterých jsou tyto modely kalibrovány. Pro lepší názornost jsou na grafu viz Obrázek 4.6 zobrazeny zvláště složky základního dotvarování a dotvarování při vysychání dle předpisů EN 1m, EN 2 a B3. Hodnoty jsou stanoveny pro průřez desky tloušťky 400 mm ze vzorového zadání.

Model B3 neumožňuje jednoduše oddělit hodnotu složky dotvarování základní a složky při vysychání. Aby bylo možné porovnat časový vývoj jednotlivých složek tohoto modelu, je třeba udělat úpravu výpočtu. Z výpočtu funkce poddajnosti $J(t, t')$ byla odebrána funkce popisující dotvarování při vysychání $C_{d(t, t'; t_0)}$. Funkce poddajnosti má tedy tvar: $C_{0(t, t')} + q_1$, kde $C_{0(t, t')}$ je funkce základního dotvarování a q_1 součinitel závislý na velikosti modulu pružnosti betonu v čase 28 dní. Složka dotvarování při vysychání byla vypočítána jako rozdíl celkového dotvarování a dotvarování základního. V čase 100 let je součet takto vypočítané základní složky a složky dotvarování při vysychání pouze s minimální odchylkou od absolutní velikosti součinitele dotvarování.



Obrázek 4.6: Graf zobrazující časový vývoj složek dotvarování dle předpisů EN 1m, EN 2 a B3

Obrázek 4.6 nám názorně ukazuje, jak se odlišná funkce ve výpočtu dotvarování při vysychání projevuje na hodnotě této složky. Zatímco u EN 2 v prvních měsících tato složka dotvarování rychleji stoupá a okolo třech let prakticky zastavuje svůj růst, tak podle EN 1m má naopak první tři měsíce skoro nulovou hodnotu a poté postupně zrychluje svůj růst až k výrazněji vyšším hodnotám, navíc vykazuje růst i v čase 100 let. B3 model má tvar křivky velmi podobný normě EN 1m, avšak vykazuje jasné odlišné tendence. Velikost složky dotvarování při vysychání je významně menší než u EN 1m a ve 100 letech vykazuje prakticky nulový růst. V grafu nejsou hodnoty předpisu EN 1, jelikož nerozděluje hodnotu dotvarování na jednotlivé složky.

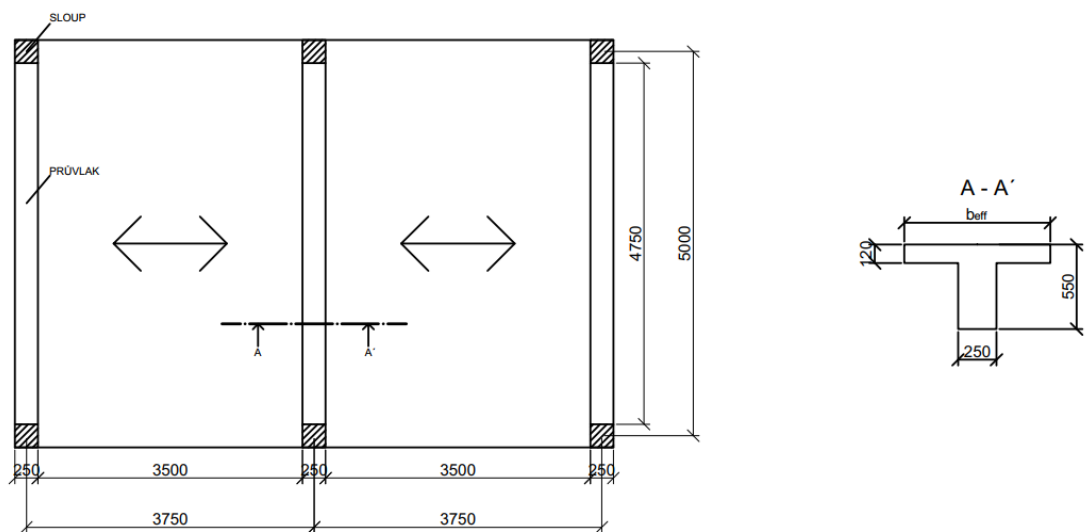
Složka základního dotvarování vykazuje podobný tvar funkce u všech předpisů, hodnoty této složky se ale liší. Od 50 do 100 let B3 a EN 2 vykazují prakticky totožnou velikost základního dotvarování a pokračující růst, tak EN 1m vykazuje menší hodnotu základního dotvarování a také ve 100 letech menší růst.

Tento efekt má zásadní vliv na výsledky dotvarování a jeho vývoj v čase. V grafech viz Obrázek 4.2, Obrázek 4.3, Obrázek 4.4, Obrázek 4.5, můžeme vidět, že nejvíce podobné výsledky mají předpisy EN 1 a EN 2, ačkoli vykazují také vzájemné odchylky, především v rozdílném časovém vývoji dotvarování po cca 50 letech a dále. Zatímco u EN 1 můžeme tvrdit, že se od času 50 let v podstatě zastavuje růst součinitele dotvarování v tomto časovém období, tak EN 2 pokračuje v jasné stoupající tendenci i po 100 letech, kde také můžeme na grafech pozorovat největší vzájemné rozdíly těchto předpisů. Naopak předpisy B3 a EN 1m dosahují velmi podobných hodnot dotvarování i ve stáří 100 let. I tak ale vykazují významné odlišnosti. EN 1m dominuje ve velikosti složky dotvarování při vysychání, dokonce od 50 let je tato složka dotvarování vyšší než složka základního dotvarování. Naopak velikost základní složky má významně menší než model B3 a EN 2.

Norma EN 1m a model B3 se v prvních třech letech svým vývojem výrazně odlišují od ostatních dvou předpisů. Tento důsledek nám vysvětluje graf viz Obrázek 4.6, kde můžeme pozorovat u těchto předpisů minimální přírůstek složky dotvarování při vysychání v tomto časovém rozmezí.

4.2 Porovnání dotvarování u průvlaků

Tato podkapitola má za cíl porovnat, jaký vliv má správné uvažování průvlaku s částí spolupůsobící šířky desky (T-trám) oproti uvažování samotného trámu. Porovnání bude provedeno z jednoduchého schématu viz Obrázek 4.7. Jedná se o prostý nosník o rozponu 5 m.



Obrázek 4.7: Schéma pro výpočet b_{eff}

$$b_1 = b_2 = 1,750 \text{ m}$$

$$l_0 = l = 5 \text{ m}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 \times b_i + 0,1 \times l_0 = 0,2 \times 1,75 + 0,1 \times 5 = 0,85 \text{ m} \leq 0,2 \times l_0 = 1 \text{ m};$$

$$b_{eff} = 2 \times b_{eff,1} + b_w = 2 \times 0,85 + 0,25 = 1,95 \text{ m} \leq b = 3,75 \text{ m}$$

Spolupůsobící šířka b_{eff} je tedy dle EN 1 1,95 m.

Charakteristiky průřezu:

Trám:

- $A_c = 250 \times 550 = 1,375 \times 10^5 \text{ mm}^2$
- $U = 250 \times 2 + 550 \times 2 = 1600 \text{ mm}$
- $h_0 = 2 \times 1,375 \times 10^5 / 1600 = 172 \text{ mm}$

T-trám:

- $A_c = 250 \times (550 - 120) + 120 \times 1950 = 3,415 \times 10^5 \text{ mm}^2$
- $u = 250 + 2 \times (550 - 120) + (1950 - 250) + 1950 + 2 \times 120 = 5000 \text{ mm}$
- $h_0 = 2 \times 3,415 \times 10^5 / 5000 = 137 \text{ mm}$

Porovnání velikosti součinitele dotvarování je uvedeno viz Tabulka 4.3, ostatní vstupní údaje jsou stejné jako v příkladu 1.

Tabulka 4.3: Porovnání hodnot vlivu uvažování spolupůsobící šířky na velikost součinitele dotvarování

Porovnání vlivu uvažování průřezu: trám x T-trám u průvlaku: φ v čase $t = 18250$ dní (50 let)				
	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
Trám	2,07	2,64	2,42	2,18
T-trám	2,13	2,63	2,41	2,25

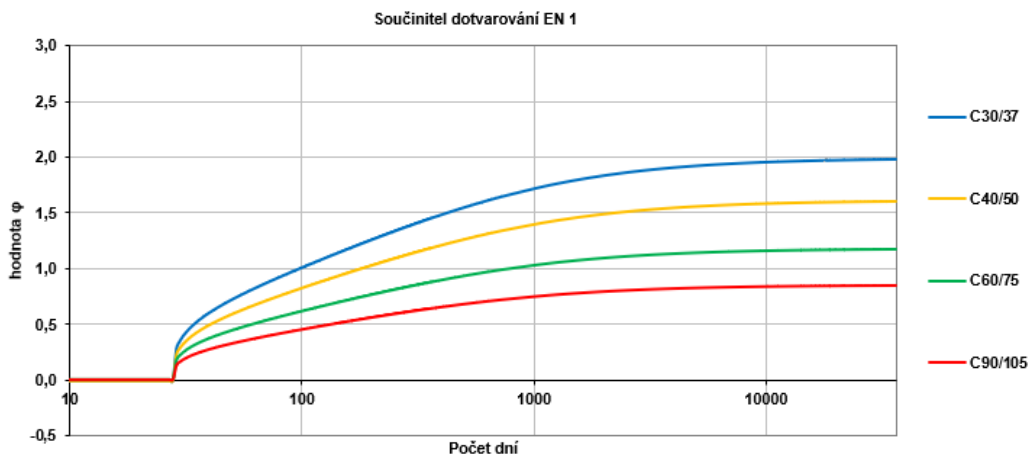
Z výsledků je patrné, že u EN 1m a B3 má uvažování průvlaku jako T-trámu zanedbatelný vliv, u EN 1 a EN 2 se její vliv projevuje v řádu jednotek %. V rámci zjednodušení výpočtu tedy lze uvažovat trám bez spolupůsobící šířky, aniž by tento krok měl významný vliv na velikost součinitele dotvarování.

4.3 Vliv pevnosti betonu na velikost dotvarování

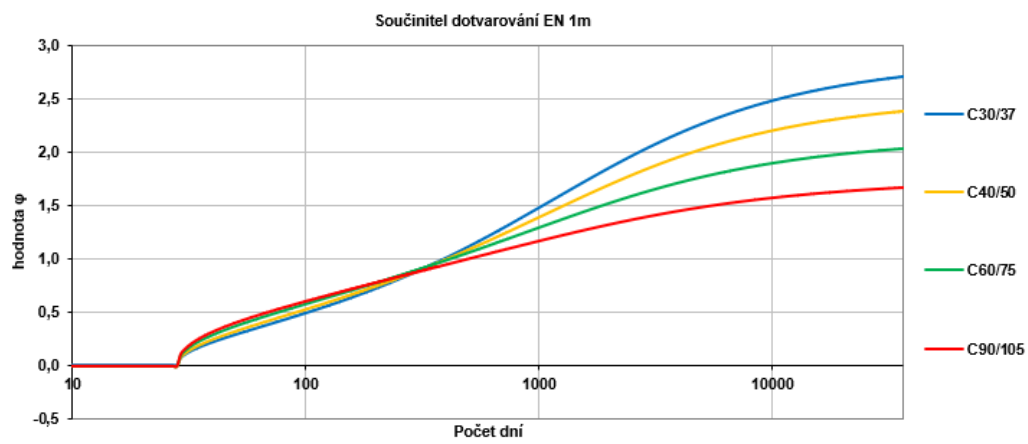
Vliv pevnosti betonu bude proveden na desce tloušťce 250 mm a ostatní vstupní parametry kromě pevnosti betonu budou použity z úvodního příkladu. Ke každému předpisu bude náležet graf se třídami pevnosti betonu: C30/37, C40/50, C60/75 a C90/105 (z důvodu limitů platnosti modelu B3 viz str. 36 nebude nejvyšší třída v tomto modelu hodnocena). Pro model B3 bude použito složení betonové směsi viz Tabulka 4.4, které bylo doporučeno doc. Ing. Josefem Fládrem, Ph.D.

Tabulka 4.4: Složení betonové směsi použité pro B3

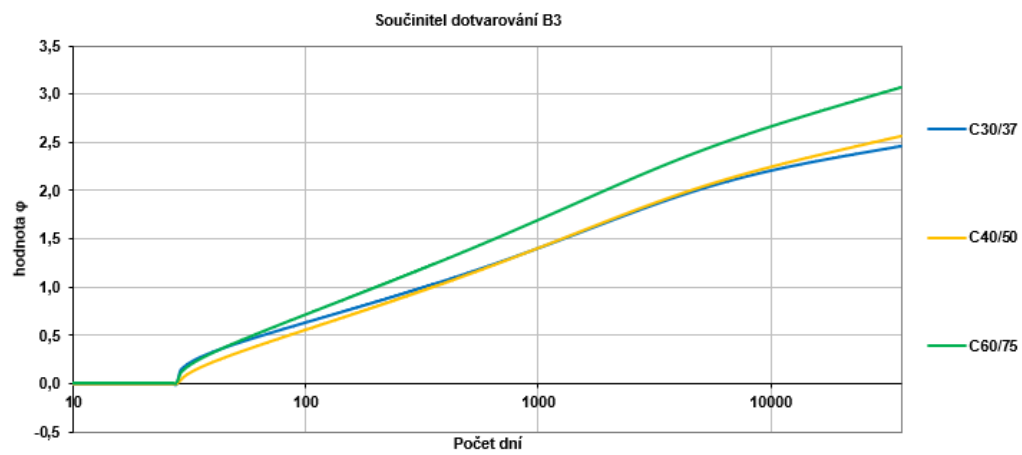
Třída pevnosti betonu			
	C30/37	C40/50	C60/75
Cement [kg/m^3]	315	335	455
Voda [kg/m^3]	140	135	165
w/c	0,44	0,40	0,36
Kamenivo [kg/m^3]	1845	1930	1800



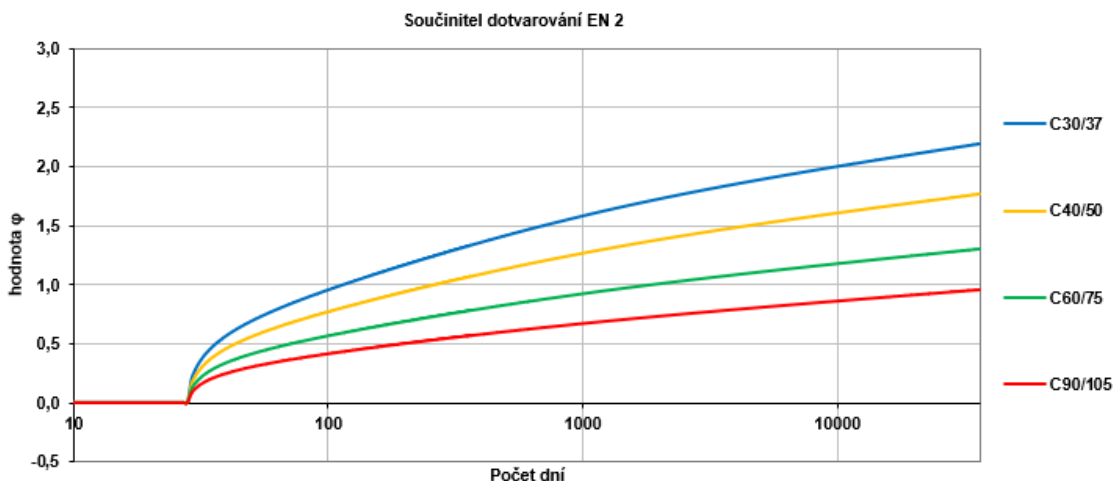
Obrázek 4.8: Vliv pevnostní třídy – EN 1



Obrázek 4.9: Vliv pevnostní třídy – EN 1m



Obrázek 4.10: Vliv pevnostní třídy – B3



Obrázek 4.11: Vliv pevnostní třídy – EN 2

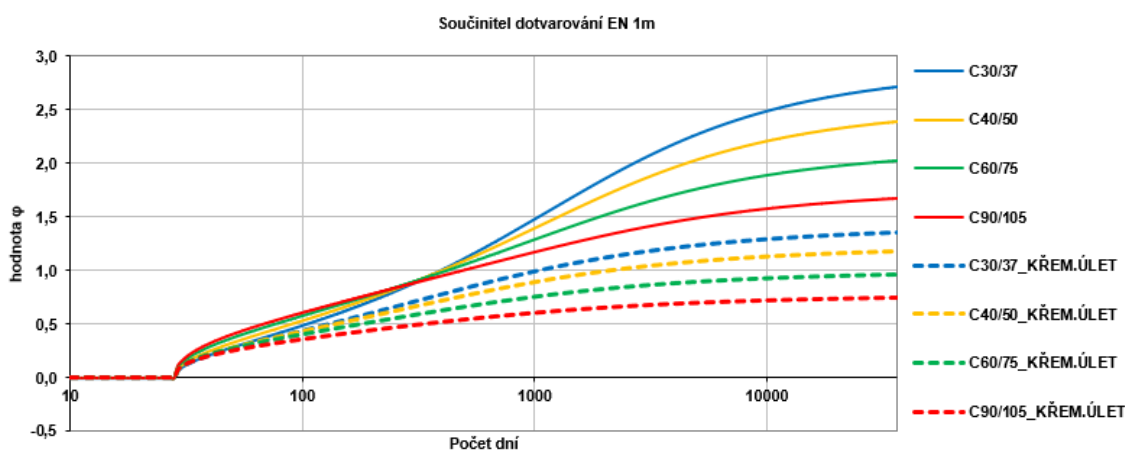
Tabulka 4.5: Hodnoty součinitele dotvarování v čase 50 let dle různých tříd pevnosti betonu

Pevnostní třída betonu	EN 1	EN 1m	EN 1m - KŘEM. ÚLET	B3	EN 2
C30/37	1,976	2,609	1,330	2,334	2,092
C40/50	1,592	2,310	1,156	2,399	1,689
C60/75	1,165	1,970	0,945	2,861	1,241
C90/105	0,850	1,629	0,739	-	0,908

Předpisy kromě modelu B3 dosahují s vyšší pevnostní třídou nižší hodnoty součinitele dotvarování.

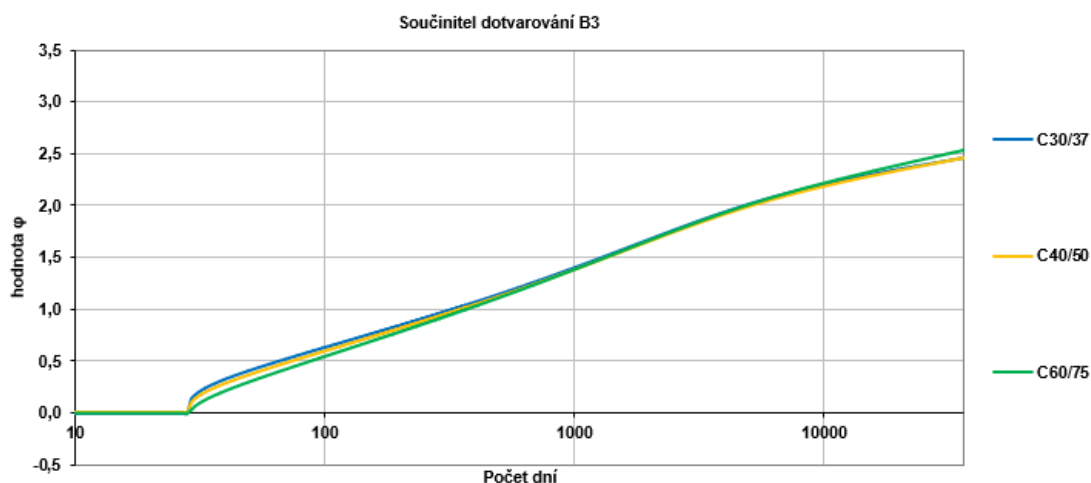
Z výsledků je zřejmé, že EN 1 a EN 2 dosahují velmi podobných hodnot pro jednotlivé pevnostní třídy. EN 2 v čase 50 let dosahuje stabilně o 5 až 10 % větší hodnoty součinitele dotvarování. Hlavní rozdíl mezi těmito předpisy, který byl již zmiňován, je ten, že u EN 2 probíhá významný růst i po 100 letech, zatímco u EN 1 se růst prakticky od 10 let zastavuje. V čase 100 let již dosahuje EN 2 větších hodnot o více jak 10 %.

EN 1m potvrzuje skutečnost, že vykazuje největší hodnoty dotvarování. V porovnání s EN 2 pro beton třídy C30/37 je hodnota o 25 % vyšší, u betonu třídy C90/105 je hodnota vyšší již o 80 %. V porovnání s EN 1 jsou rozdíly ještě mírně vyšší. Důvod již byl rozebrán, viz Obrázek 4.6 a velikost složky dotvarování při vysychání. Dále můžeme pozorovat, že do dvou let je vývoj velikosti dotvarování pro všechny pevnostní třídy prakticky stejný, teprve od tří let a déle vznikají ve velikosti výraznější odchylky, viz Obrázek 4.9. Tento předpis ovšem disponuje možností zohlednit obsah křemičitého úletu v betonu, pokud je jeho podíl minimálně 5 % hmotnostního obsahu cementu. Pokud tuto možnost zvolíme, dostaneme diametrálně odlišné výsledky. Tato možnost má totiž zásadní dopad na velikost součinitele dotvarování, viz Obrázek 4.12 a Tabulka 4.5. Z těchto výsledků můžeme pozorovat přibližně poloviční hodnotu součinitele dotvarování, pokud v EN 1m uvažujeme s vlivem křemičitého úletu. Vzhledem k tomu, že model EN 1m je určený pro vysokopevnostní betony od pevnostní třídy C50/60, tak hodnoty u pevnostních tříd C 60/75 a C90/105 již jsou podobné hodnotám EN 1 a EN 2, ovšem nyní vykazují o 20 až 25 % nižší hodnoty oproti EN 2.



Obrázek 4.12: Vliv uvažování křemičitého úletu v EN 1m na výsledky součinitele dotvarování

Model B3 vykazuje velmi odlišné výsledky oproti ostatním předpisům viz Obrázek 4.10. Jako jediný má opačnou tendenci, než bychom čekali, a sice tu, že pro větší třídu pevnosti betonu vykazuje větší dotvarování. Na rozdíl od ostatních modelů je zde omezena platnost modelu do hodnoty $f_{cm} = 70 \text{ MPa}$. Důvod tohoto chování modelu je v odlišných vstupních podmínkách, kdy je pro každou pevnostní třídu betonu logicky použité odlišné složení betonové směsi. Ostatní modely ovšem nemají možnost detailněji zahrnout složení betonu do výpočtu jako právě model B3. Pokud bychom nechali stejné složení betonové směsi pro třídu C30/37 i pro ostatní pevnostní třídy, graf vývoje dotvarování by vypadal viz Obrázek 4.13. Takové průběhy však neodpovídají realitě, neboť pro dosažení vyšších pevností je třeba větší množství pojiva.



Obrázek 4.13: Vývoj dotvarování modelu B3 pro stejné složení betonové směsi

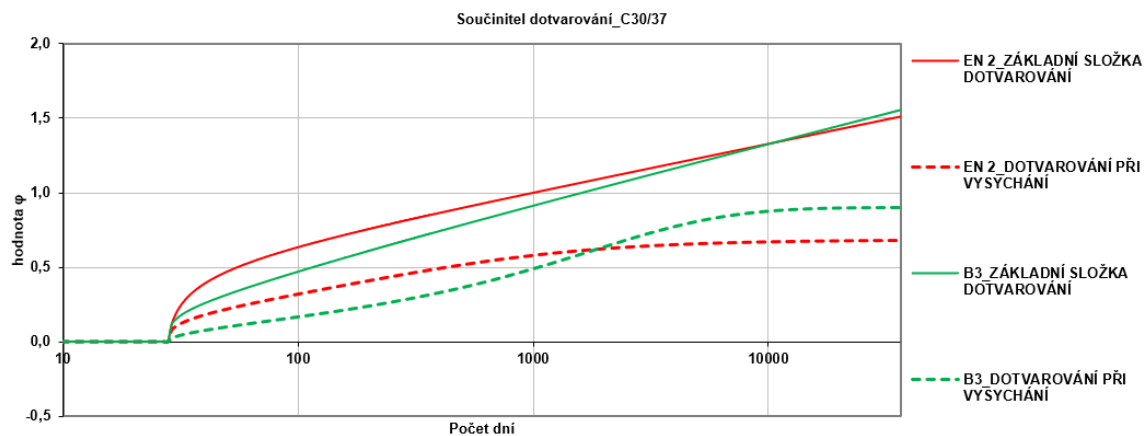
Můžeme pozorovat velmi blízké hodnoty dotvarování pro různé třídy pevnosti betonů. Je tedy zřejmé, že u modelu B3 pro velikost dotvarování má největší vliv specifikované složení betonové směsi a konkrétně množství cementu v betonu, které velmi významně ovlivňuje velikost základní složky dotvarování. Pokud porovnáme hodnoty složení betonové směsi z Tabulka 4.4 a graf vývoje dotvarování odpovídající tomuto složení, viz Obrázek 4.10, zjistíme velmi vysoký nárůst pro třídu pevnosti C60/75 z důvodu výrazně většího množství cementu v betonu.

Ve výpočtu pro základní složku dotvarování vystupuje množství cementu c nejdříve v materiálových parametrech q_2 , q_3 a q_4 . V parametru q_2 vystupuje přímo množství cementu c , takže větší množství cementu znamená větší hodnotu q_2 . V parametru q_3 vystupuje poměr w/c , čili tento jediný parametr je menší, a v parametru q_4 vystupuje poměr $(\frac{a}{c})^{-0,7}$ (a je množství kameniva), takže čím je poměr menší, tím je větší hodnota q_4 . Funkce pro základní dotvarování se vypočítá jako:

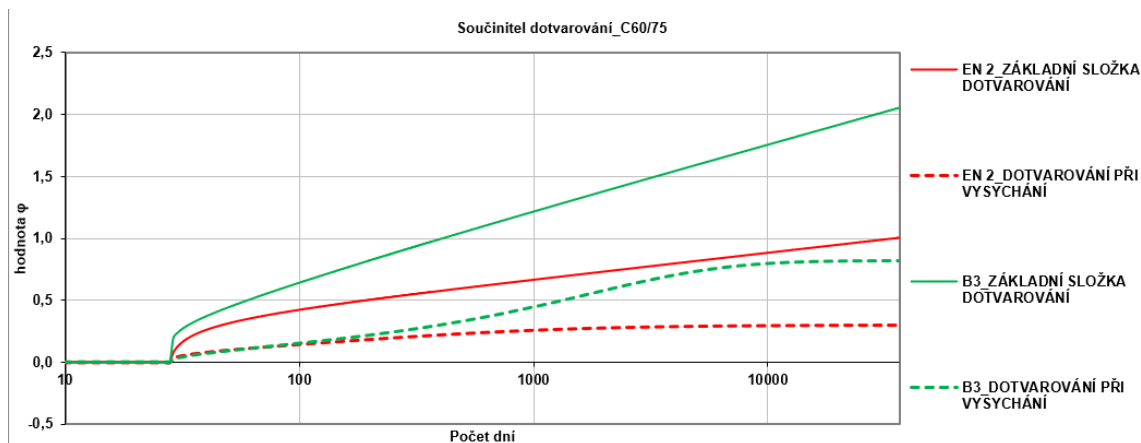
$$Co(t, t') = q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t - t')^n] + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (1.7)$$

Toto je důvod, proč množství cementu má hlavní význam ve velikosti dotvarování a pro třídu C60/75 dosahuje model B3 až 2,5krát větší hodnoty dotvarování než model EN 1.

Pro porovnání a lepší názornost je zobrazen vývoj jednotlivých složek dotvarování modelu B3 a EN 2. Na Obrázek 4.14 pro třídu betonu C30/37 a na Obrázek 4.15 pro třídu betonu C60/65. Můžeme vidět, že opravdu množství cementu má velmi vysoký vliv na velikost základní složky v modelu B3. Je vidět zásadní rozdíl, zatímco EN 2 má nižší obě složky dotvarování u třídy betonu C60/75, tak B3 má naopak výrazně vyšší hodnotu základní složky dotvarování a vykazuje také po 100 letech její vyšší pokračující růst.



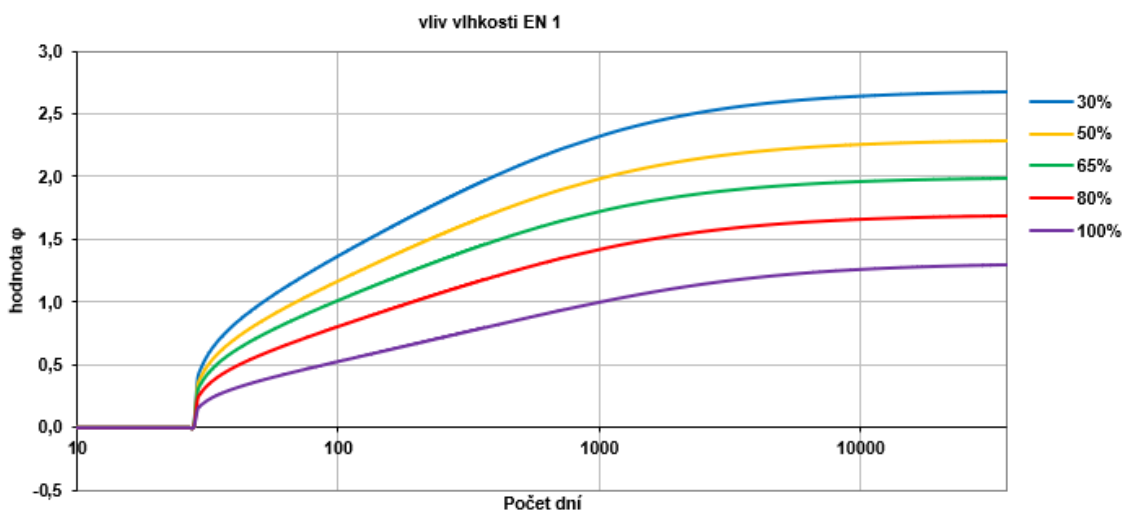
Obrázek 4.14: Vývoj jednotlivých složek dotvarování pro beton třídy C30/37



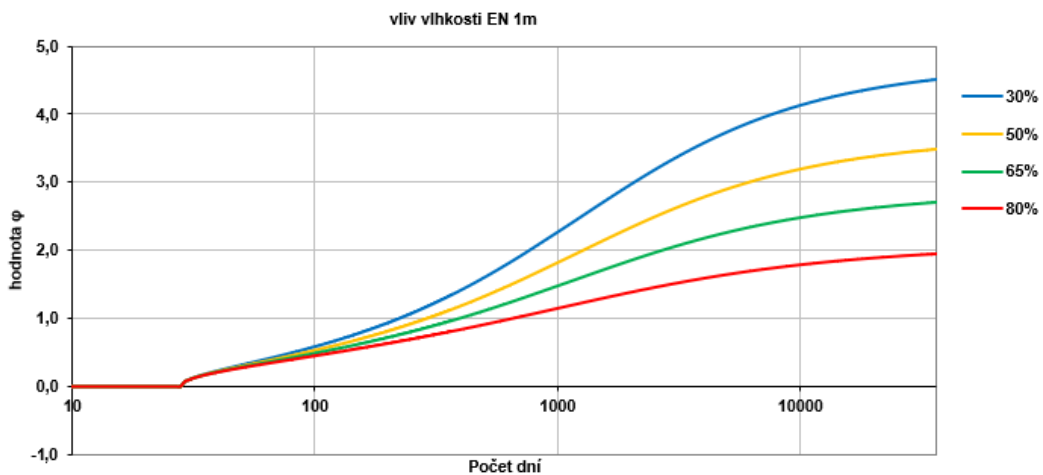
Obrázek 4.15: Vývoj jednotlivých složek dotvarování pro beton třídy C60/75

4.4 Vliv relativní vlhkosti na velikost dotvarování

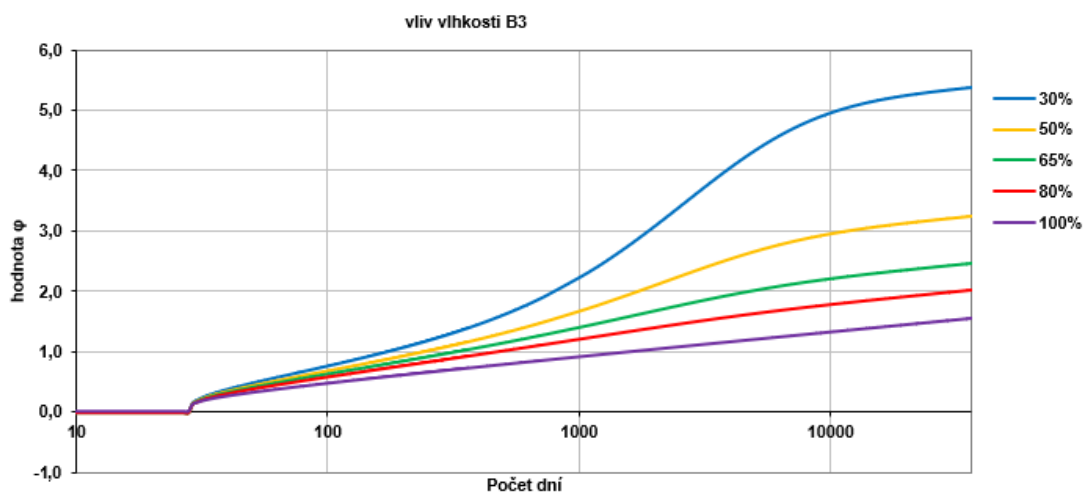
V této kapitole bude zkoumán vliv vlhkosti na velikost dotvarování v jednotlivých předpisech. Bude použito zadání z úvodního příkladu, tj. beton C30/37 a tl. desky 250 mm. Vlhkost bude uvažována: 30, 50, 65, 80 a 100 %. Z hlediska omezení maximální vlhkosti u EN 1m bude maximální vlhkost 80 %.



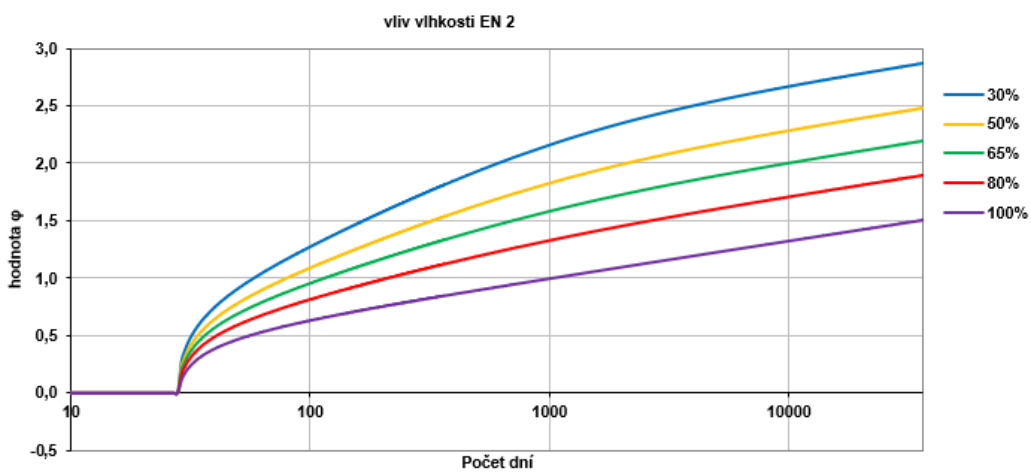
Obrázek 4.16: Vliv vlhkosti EN 1



Obrázek 4.17: Vliv vlhkosti EN 1m



Obrázek 4.18: Vliv vlhkosti B3



Obrázek 4.19: Vliv vlhkosti EN 2

Tabulka 4.6: Velikost součinitele dotvarování v čase 50 let s ohledem na vliv relativní vlhkosti vzduchu

Relativní vlhkost okolního prostředí	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
30%	2,657	4,343	5,211	2,771
50%	2,268	3,352	3,117	2,383
65%	1,976	2,609	2,334	2,092
80%	1,680	1,866	1,884	1,801
100%	1,280		1,434	1,412

Základní předpoklad, že se velikost dotvarování snižuje se vzrůstající vlhkostí prostředí, je splněn u všech modelů. Z výsledků vyplývá, že u EN 1 a EN 2 je znovu tvar časového vývoje dotvarování a hodnot velice podobný. EN 2 dosahuje vyšších hodnot o cca 5 až 10 %. Vliv vlhkosti okolního prostředí je u obou předpisů velmi podobný. Velký rozdíl můžeme znovu pozorovat ve 100 letech, kdy u EN 2 pokračuje růst hodnoty součinitele dotvarování, zatímco u EN 1 je růst již zastaven.

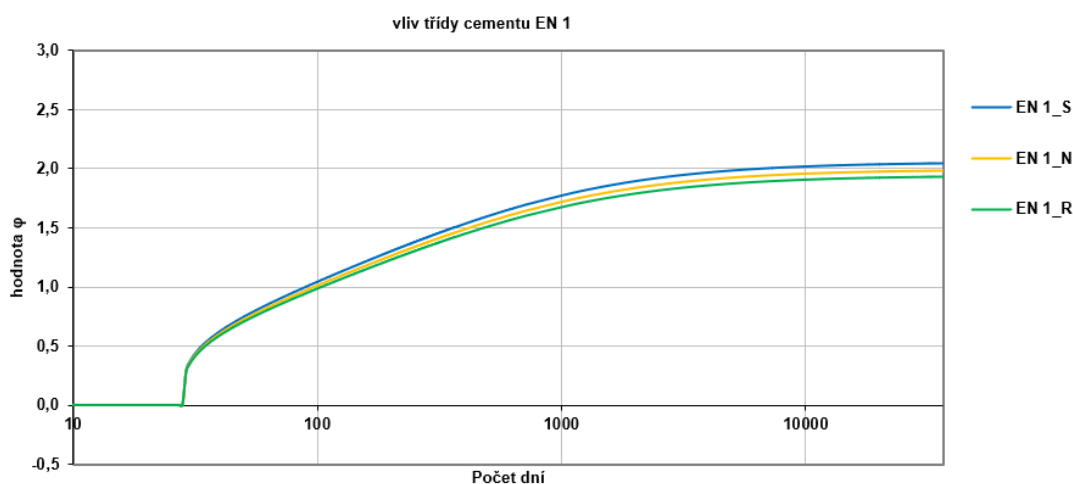
EN 1m má znovu hodnoty dotvarování významně vyšší, nicméně tato norma je určena pro betony vyšších pevností s možností uvažování křemičitého úletu, je tedy otázka, jak moc velkou můžeme dávat těmto výsledkům vypovídající hodnotu. Nicméně můžeme pozorovat, že vliv vlhkosti má významně vyšší význam u této normy na rozdíl EN 1 a EN 2. U 80 % vlhkosti tato norma dosahuje velmi podobné hodnoty jako u normy EN 2. EN 2 dosahuje při (rel. vlhkosti 80 %) 65 % hodnoty součinitele dotvarování odpovídajícího 30 % vlhkosti, zatímco u EN 1m je hodnota součinitele dotvarování při 80 % vlhkosti pouze 43,4 % z hodnoty dotvarování odpovídající 30 %. Je tedy zřejmé, že u EN 1m je vliv vlhkosti výrazně vyšší.

U modelu B3 je také vliv vlhkosti velice významný. Z Tabulka 4.6 a Obrázek 4.18 můžeme vidět, že velmi výrazný je zejména skok mezi 30 % a 50 % rel. vlhkostí vzduchu. Při 30 % vlhkosti hodnota dotvarování výrazně převyšuje hodnoty ostatních předpisů, zatímco při 50 % vlhkosti je již hodnota menší než u EN 1m. Hodnoty od 65 % vlhkosti jsou již srovnatelné s ostatními předpisy. Hodnota součinitele dotvarování odpovídající 50 % vlhkosti je v porovnání s hodnotou odpovídající 30 % nižší o 40 %.

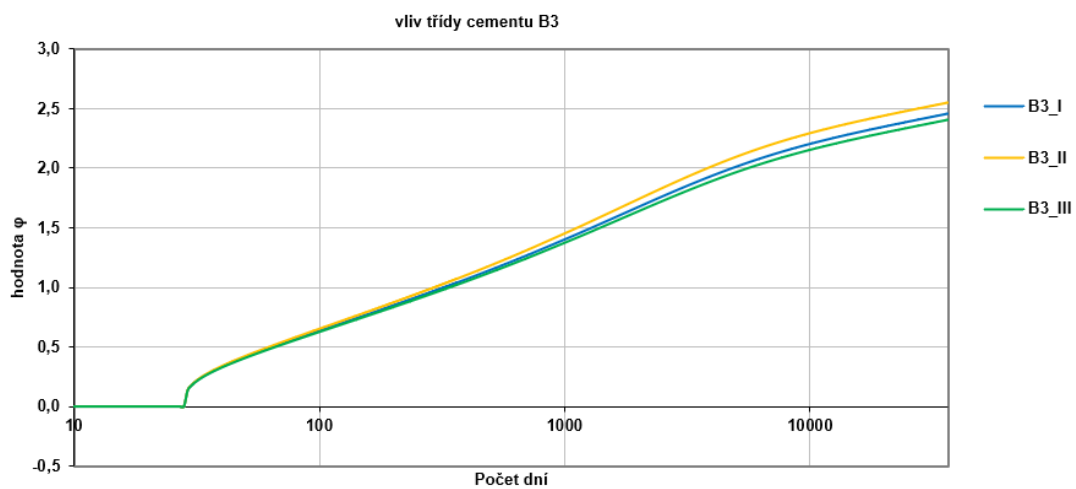
Postup výpočtu složky dotvarování při vysychání viz str. 61. Velikost vlhkosti u modelu B3 vystupuje ve vzorci $H(t)$ (1.13) a následně ve finální funkci dotvarování při vysychání (1.14).

4.5 Vliv třídy cementu a třídy vývoje pevnosti na velikost součinitele dotvarování

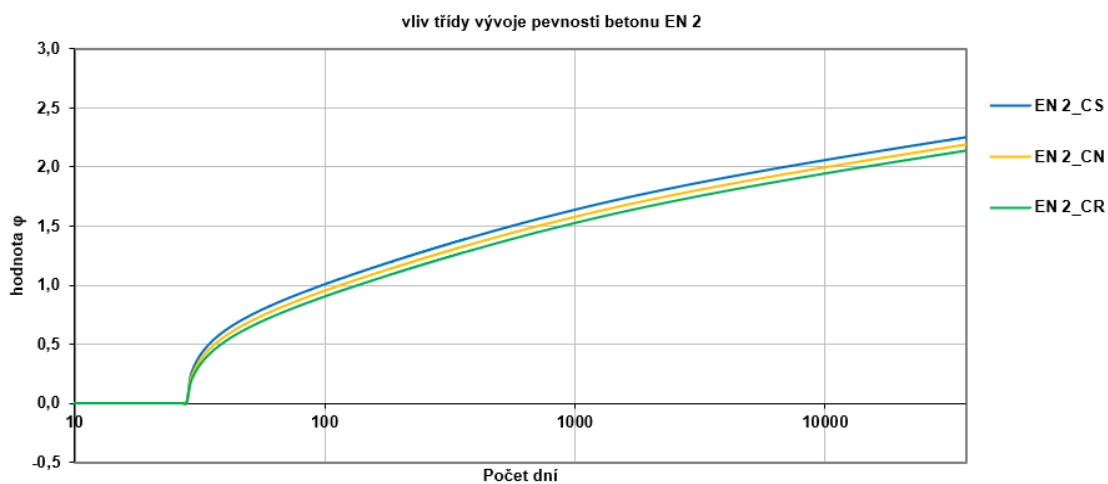
V této kapitole bude porovnán vliv třídy cementu (vývoje pevnosti betonu) na velikost dotvarování. Vstupní údaje budou použity stejné jako v minulé kapitole a úvodním příkladu, deska tl. 250 mm, beton C30/37, vlhkost 65%. U EN 1 a EN 1m rozlišujeme tři třídy cementu dle jeho pevnosti a rychlosti vývoje pevnosti, u modelu B3 rozlišujeme také tři třídy cementu dle klasifikace ASTM (portlandský cement), kdy cement třídy I je klasický portlandský cement, II je cement s odolností vůči síranům, III třída je cement s rychlým nástupem pevnosti. U EN 2 rozlišujeme tři druhy vývoje pevnosti betonu, a to pomalý, střední a rychlý nárůst. U normy EN 1m nemá třída cementu žádný vliv na dotvarování ani smrštění, tento model tedy není v této části studie zkoumán.



Obrázek 4.20: Vliv třídy cementu_EN 1



Obrázek 4.21: Vliv třídy cementu_B3



Obrázek 4.22: Vliv třídy vývoje pevnosti betonu_EN 2

Tabulka 4.7: Hodnoty součinitele dotvarování v čase 50 let s vlivem třídy cementu (vývoje pevnosti betonu EN_2)

Vliv třídy cementu(vývoje pevnosti betonu): ϕ v čase $t = 18250$ dní (50 let)			
EN 1	Třída S	Třída N	Třída R
	2,033	1,976	1,922
B3	I	II	III
	2,334	2,426	2,284
EN 2	CS	CN	CR
	2,151	2,092	2,032

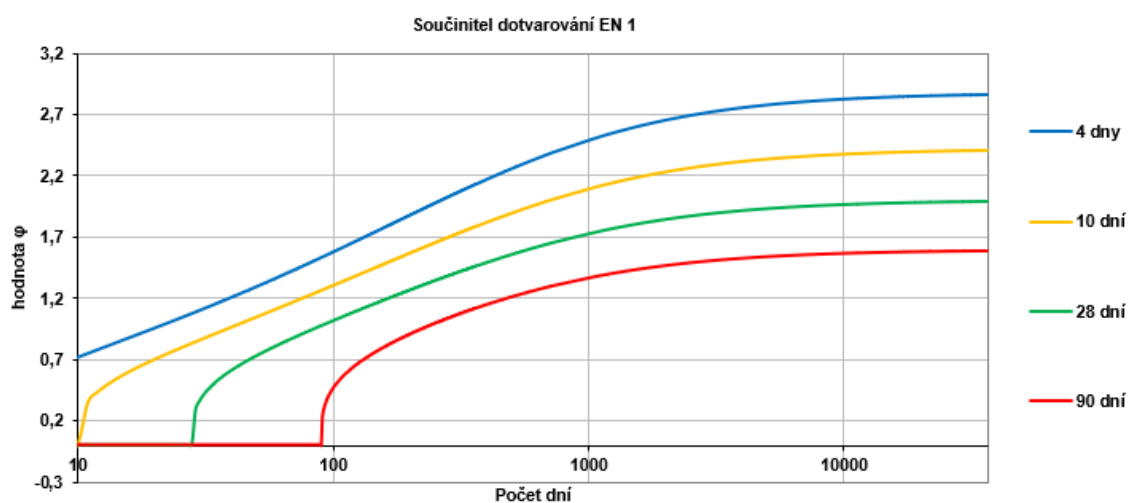
Z výsledků je patrné, že třída cementu nemá zásadní vliv na velikost dotvarování. U EN 1 a EN 2 má nejvyšší hodnoty součinitele dotvarování v čase 50 let třída S (CS), čili třídy, které zastupují pomalý vývoj pevnosti betonu, naopak u těchto předpisů mají nejnižší hodnoty třídy s nejrychlejším nástupem pevnosti. Rozdíly hodnot jsou do 10 %. U modelu B3 nejvyšší hodnoty dosahuje třída cementu II, tedy cement odolný síranům, nejnižší hodnoty znovu jako v ostatních předpisech cement s rychlým nástupem pevnosti. Rozdíly jsou stejně jako v dalších předpisech do 10 %. V EN 1 a EN 2 je od počátku viditelný poměrně stabilní vývoj rozdílů velikosti dotvarování, který je mezi jednotlivými třídami poměrně rovnoměrný, viz Obrázek 4.20 a Obrázek 4.22. U modelu B3 můžeme sledovat poměrně výrazně vyšší hodnotu II třídy oproti ostatním dvěma třídám, viz Obrázek 4.21 a Tabulka 4.7.

4.6 Porovnání vlivu doby vnesení zatížení na velikost dotvarování

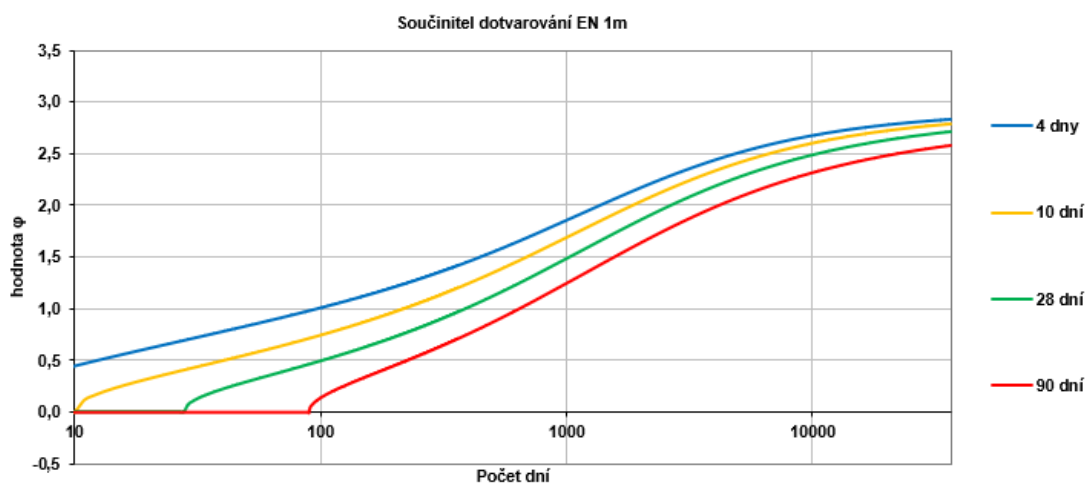
V této kapitole bude analyzován vliv doby vnesení zatížení na celkovou hodnotu součinitele dotvarování. Základní předpoklad je, že s delší prodlevou vnesení zatížení bude nižší hodnota součinitele dotvarování, jelikož u starších betonů je výrazně nižší podíl nezatvrdlé cementové pasty, která právě svým pohybem mezi zrny kameniva způsobuje deformaci – dotvarování.

Z jednotlivých grafů je patrné, že tento předpoklad je splněný u všech předpisů kromě modelu B3. Model B3 má ve svém postupu výpočtu chybu, která se projevuje v nízkých hodnotách doby vnesení zatížení a souvisí zároveň s dobou ošetřování betonu. Pro každou časovou hodnotu t lze najít kritickou hodnotu doby ošetřování t_0 , od které se již tato chyba neprojevuje. Například pro sledovaný čas 100 let a $t_0 = 4$ dny a zvolení doby vnesení zatížení t' do 10 dní včetně, je základní předpoklad porušen. Čím později vneseme zatížení z tohoto intervalu, tím dostaneme vyšší hodnotu součinitele dotvarování, viz Obrázek 4.25, kde můžeme pozorovat, že v době vnesení zatížení 4 dny je hodnota součinitele dotvarování menší, než v $t' = 10$ dní. [10]

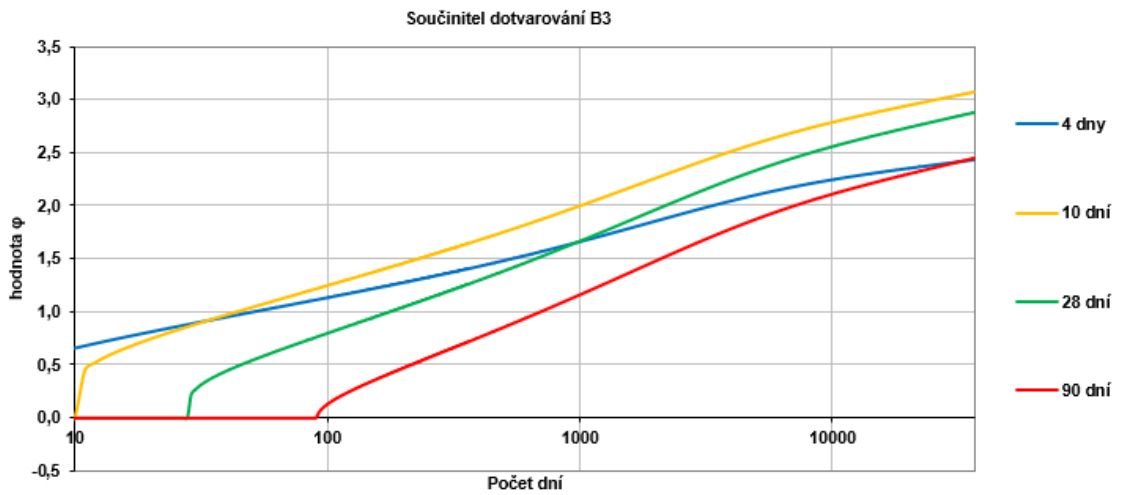
U EN 1 a EN 2 je vliv doby vnesení zatížení na velikost součinitele dotvarování velmi výrazný, na rozdíl od předpisů EN 1m a B3. Rozdíl v hodnotách doby vnesení zatížení 4 a 90 dní u EN 1 v součiniteli dotvarování v čase 50 let je 44,5 %, u EN 2 44 %, zatímco u EN 1m necelých 12 %. Nejvyšší rozdíly jsou dosaženy v době vnesení zatížení v prvních dnech, rozdíl doby vnesení zatížení mezi čtyřmi a 10 dny výrazně zmenší výsledný součinitel dotvarování, přičemž se jedná pouze o rozdíl 6 dní, zatímco rozdíl mezi dobou vnesení zatížení 28 a 90 dní již není tak výrazný.



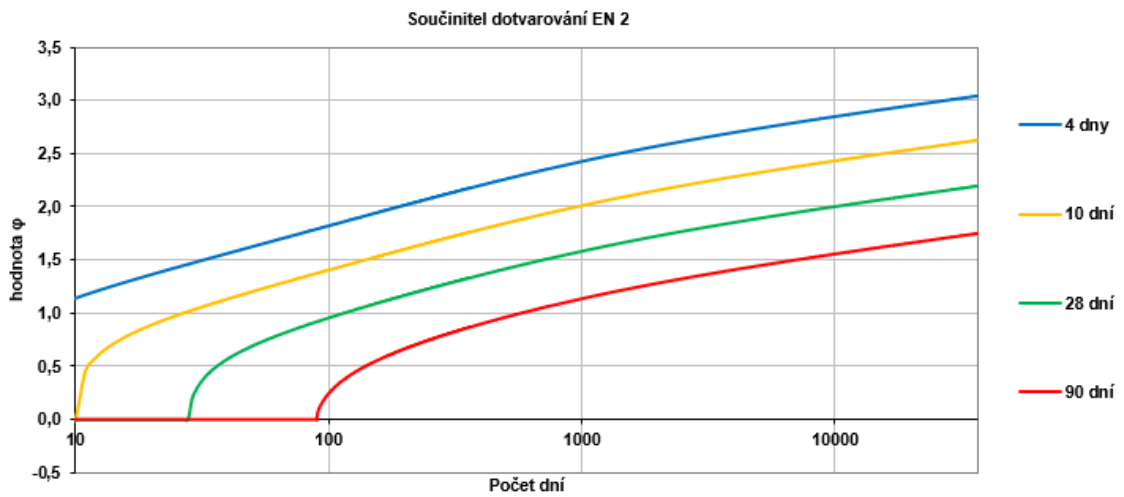
Obrázek 4.23: Vliv doby vnesení zatížení na velikost součinitele dotvarování_EN 1



Obrázek 4.24: Vliv doby vnesení zatížení na velikost součinitele dotvarování_EN 1m



Obrázek 4.25: Vliv doby vnesení zatížení na velikost součinitele dotvarování_B3



Obrázek 4.26: Vliv doby vnesení zatížení na velikost součinitele dotvarování_EN 2

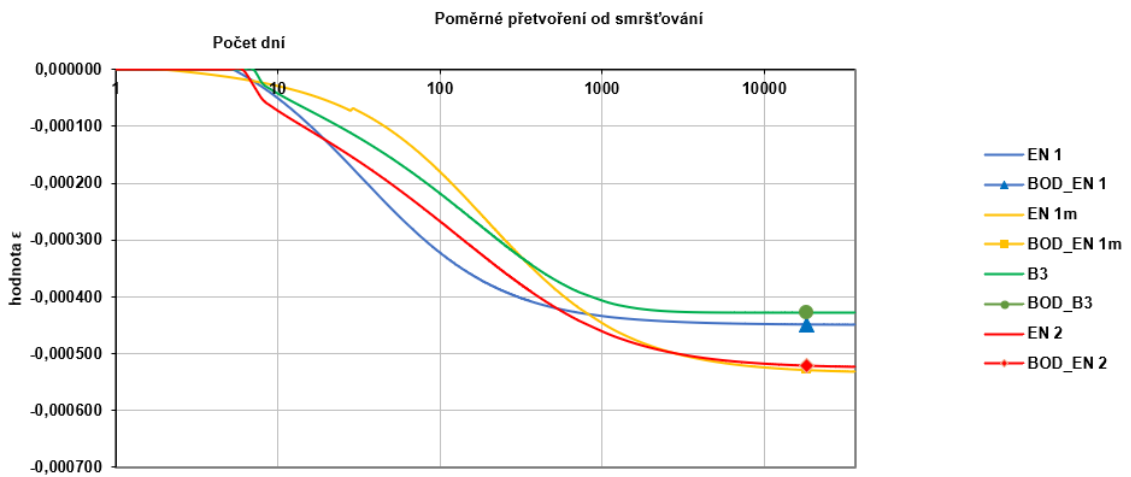
Tabulka 4.8: Hodnoty součinitele dotvarování

Doba vnesení zatížení [den]	Součinitel dotvarování v čase t = 18250 dnů (50 let)			
	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
4	2,850	2,766	2,342	2,936
10	2,402	2,707	2,922	2,524
28	1,976	2,609	2,708	2,092
90	1,581	2,457	2,278	1,644

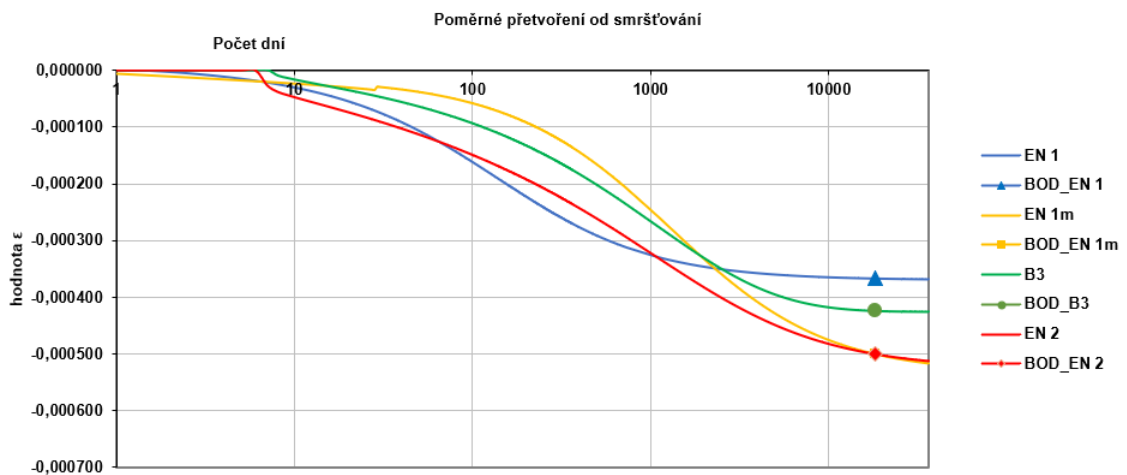
5 Poměrné přetvoření od smršťování

5.1 Úvodní příklad

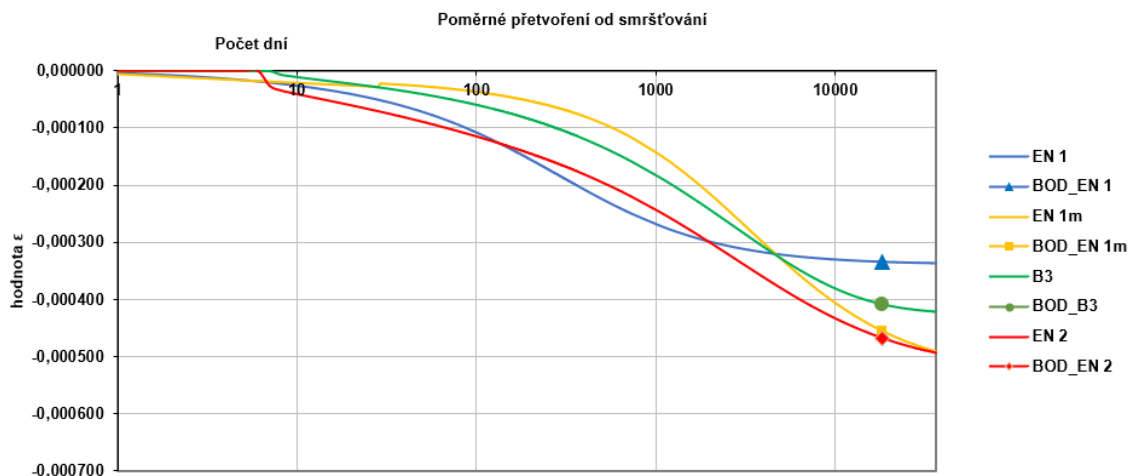
Zadání příkladu viz 4.1. Dále jsou uvedeny výsledky analýzy a jejich diskuse.



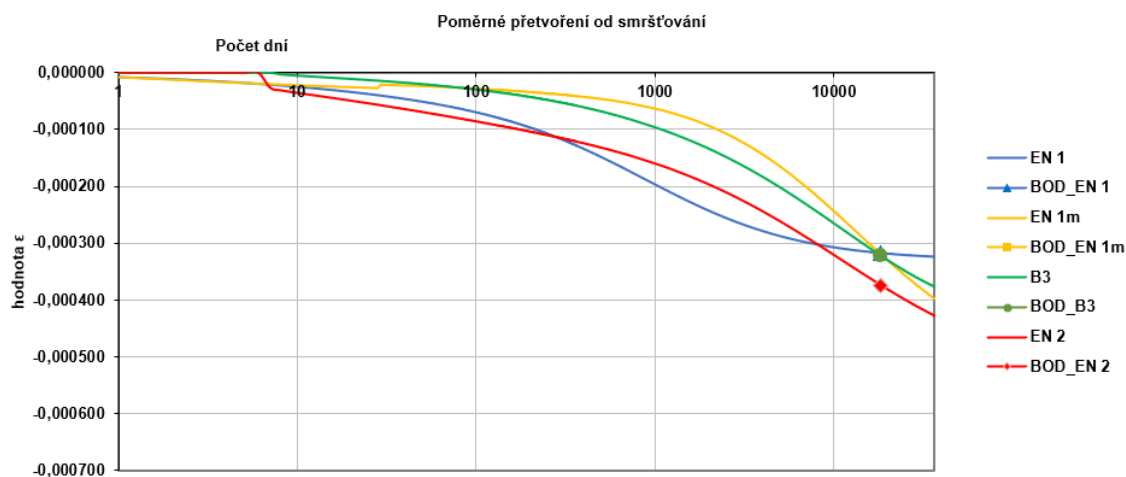
Obrázek 5.1: Poměrné přetvoření od smršťování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 100$ mm



Obrázek 5.2: Poměrné přetvoření od smršťování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 250$ mm



Obrázek 5.3: Poměrné přetvoření od smršťování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 400$ mm



Obrázek 5.4: Poměrné přetvoření od smršťování; náhradní rozměr průřezu $h_0 = 800$ mm

Tabulka 5.1: Výsledné hodnoty poměrného přetvoření od smršťování v čase 50 let

Náhradní rozměr prvku h_0 [mm]	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
100	-0,000449	-0,000528	-0,000429	-0,000521
250	-0,000367	-0,000500	-0,000424	-0,000500
400	-0,000335	-0,000455	-0,000409	-0,000468
800	-0,000317	-0,000319	-0,000321	-0,000374

Z výsledků je patrné, že vlastnosti jednotlivých modelů pro dotvarování nejsou totožné u výpočtu smršťování. Z výsledků úvodního příkladu vyplývá, že modely EN 1m a EN 2 mají velice podobné výsledky pro jednotlivé tloušťky desek. Pouze u velké tloušťky 800 mm vzniká výraznější rozdíl, jelikož se v čase 50 let projevuje rozdílný časový vývoj u jednotlivých modelů. Model EN 2 má rychlejší nárůst hodnoty smrštění oproti EN 1m, nicméně pro tloušťky desek standardních rozměrů (do 400 mm) v čase 50 let již hlavní část vývoje přetvoření od smršťování u těchto modelů proběhne a výsledné hodnoty jsou prakticky stejné.

Nejnižší hodnoty (kromě desky tl. 100 mm) dosahuje s poměrně velkými rozdíly oproti ostatním předpisům EN 1, přičemž důvod, proč tomu tak je ve srovnání s novou verzí EN 2, již je zmíněn na str. 45. Pokud porovnáme hodnoty v 50 letech z Tabulka 5.1 u tl. desky 400 mm, zjistíme, že EN 1 dosahuje pouze 72 % hodnoty smršťování EN 2, rozdíl je v tomto případě výrazný, a to skoro 30 %.

Předpisy EN 1, EN 2 a EN 1m rozdělují smršťování na složku základní (autogenní) a složku smršťování při vysychání. Model B3 toto rozdělení u smršťování neumožňuje.

U modelu B3 má výrazně menší vliv velikosti náhradního rozměru prvku oproti ostatním předpisům. Pokud porovnáme hodnoty pro tloušťky desek 100 mm a 400 mm, zjistíme, že došlo u EN 1 ke snížení přetvoření od smršťování o 25,4 %. U předpisů EN 1m a EN 2 se jedná o 13,8 %, resp. 10,2 %, a u modelu B3 došlo ke snížení pouze o 4,7 %. V modelu EN 1 je náhradní rozměr (h_0) zaveden ve funkci:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t-t_s}{(t-t_s)+0,04*\sqrt{h_0^3}} \quad (3.10)$$

a následně je podle velikosti náhradního průřezu zaveden opravný součinitel k_h ($<1,0$), kterým se výsledná hodnota smršťování při vysychání násobí, a tedy snižuje jeho hodnotu (důsledek výrazného snižování hodnoty v závislosti na velikosti h_0 .)

U modelu B3 je stejně jako u dotvarování při vysychání náhradní rozměr prvku zohledněn v koeficientu τ_{sh} a následně funkcí časové závislosti $S(t)$, viz str. 61. U všech předpisů je splněn předpoklad, že smršťování v čase 50 let s narůstajícím rozměrem prvku snižuje svoji hodnotu.

Náhradní rozměr prvku má vliv pouze na složku smršťování při vysychání. Základní smršťování závisí kromě časových proměnných na pevnostní třídě použitého betonu, se vzrůstající pevností betonu se jeho hodnota zvyšuje.

Hodnoty v 50 letech u tl. desky 800 mm jsou velmi podobné u všech předpisů, ovšem vlivem velké tloušťky dochází i ve vyšším stáří k výraznému nárůstu hodnoty smrštění u většiny předpisů (mimo předpis EN 1), viz Obrázek 5.4.

U modelu EN 1m si můžeme všimnout, že v čase 28 dní v grafech dochází k určitému zlomu a snížení hodnoty smršťování. Toto se týká pouze části výpočtu autogenního smršťování v předpisu, které se vypočítá jako:

Pro $t < 28$ dní a pokud je splněna podmínka zralosti betonu $\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} \geq 0,1$, pak se autogenní smrštění vypočítá dle vztahu:

$$\varepsilon_{ca}(t) = (f_{ck} - 20) * \left(2,2 * \frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} - 0,2 \right) * 10^{-6} \quad (B.114)$$

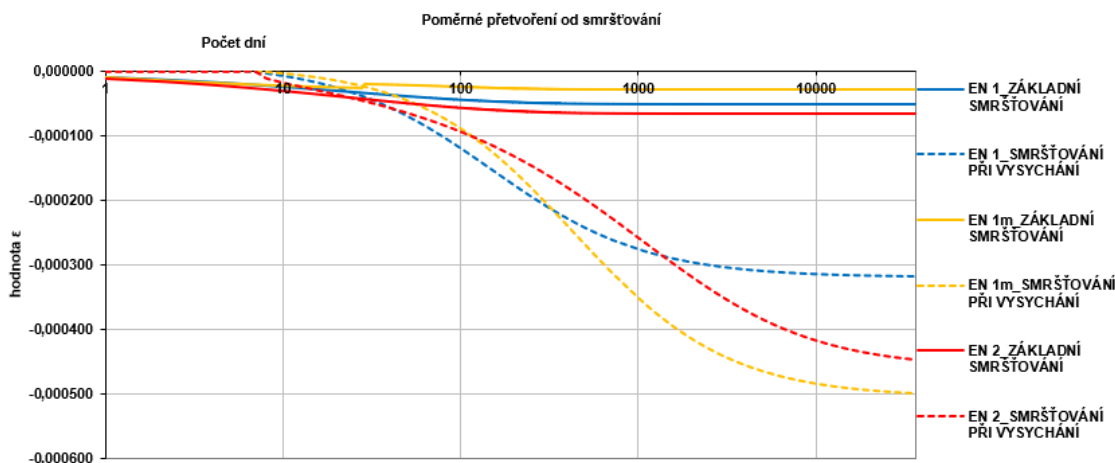
pro $t \geq 28$ dní se postupuje dle vztahu:

$$\varepsilon_{ca}(t) = (f_{ck} - 20) * \left[2,8 - 1,1e^{\left(-\frac{t}{96}\right)} \right] * 10^{-6} \quad (B.115)$$

Funkce je v čase 28 dní nespojitá, což vede ke skoku v grafu.

Na Obrázek 5.5 vidíme vývoj jednotlivých složek smršťování v čase. Můžeme vidět, že pro zadání z úvodního příkladu a tl. desky 250 mm složka základního smršťování má nízký podíl na rozdíl od složky smršťování při vysychání. Je to hlavně z důvodu použití pevnostní třídy betonu C30/37, kdy se zvyšující se pevností třídou roste podíl složky základního smršťování na úkor složky při vysychání. Zatímco hodnoty základního smrštění jsou obdobné v jednotlivých předpisech, tak naopak ve složce smršťování při vysychání vznikají významné rozdíly. Srovnání pro vyšší třídy bude provedeno v kapitole zabývající se vlivem pevnostní třídy na velikost smršťování.

Předpis EN 2 začíná uvažovat složku smršťování při vysychání až po uplynutí doby ošetřování betonu, zatímco modely EN 1 a EN 1m tuto složku uvažují již od prvního dne. Model B3 nerozlišuje smršťování na jednotlivé složky, nicméně smrštění uvažuje také až po uplynutí doby ošetřování betonu. Je také zřejmé, že hlavní část základního smrštění se vyvíjí v prvních měsících, zatímco složka smršťování při vysychání v závislosti na velikosti náhradního rozměru v řádu desítek až stovek let.



Obrázek 5.5: Vývoj jednotlivých složek smršťování v čase

5.2 Porovnání přetvoření od smršťování u průvlaků

Stejně jako u dotvarování, viz kapitola 4.2, provedeme kontrolu vlivu uvažování průvlaku bez a se spolupůsobící šířkou desky. Vstupní parametry jsou totožné.

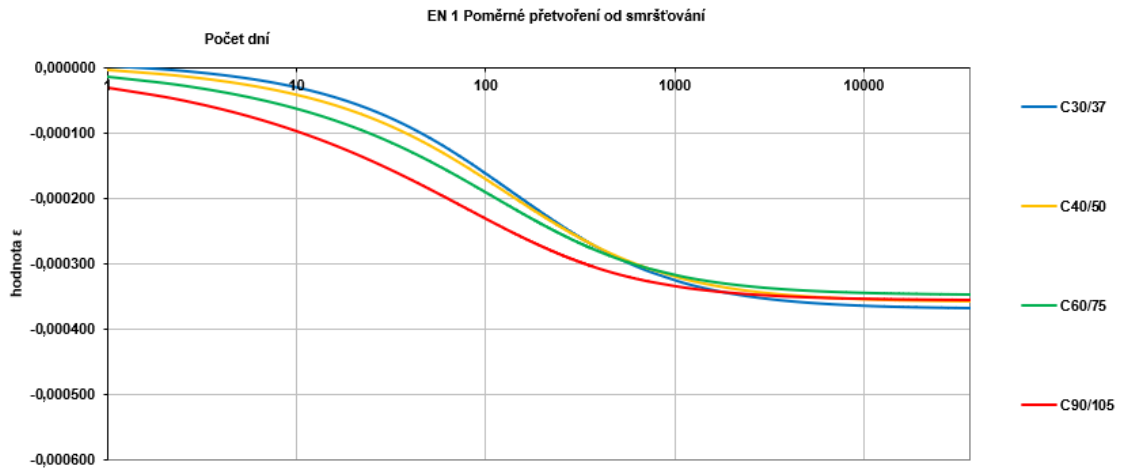
Tabulka 5.2: Porovnání hodnot přetvoření od smršťování s uvažováním spolupůsobící šířky desky u průvlaků

Porovnání vlivu uvažování průřezu: trám x T-trám u průvlaku: ϵ v čase $t = 18250$ dní (50 let) $\cdot 10^{-4}$				
	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
Trám	-4,049	-5,174	-4,260	-5,133
T-trám	-4,265	-5,234	-4,270	-5,178

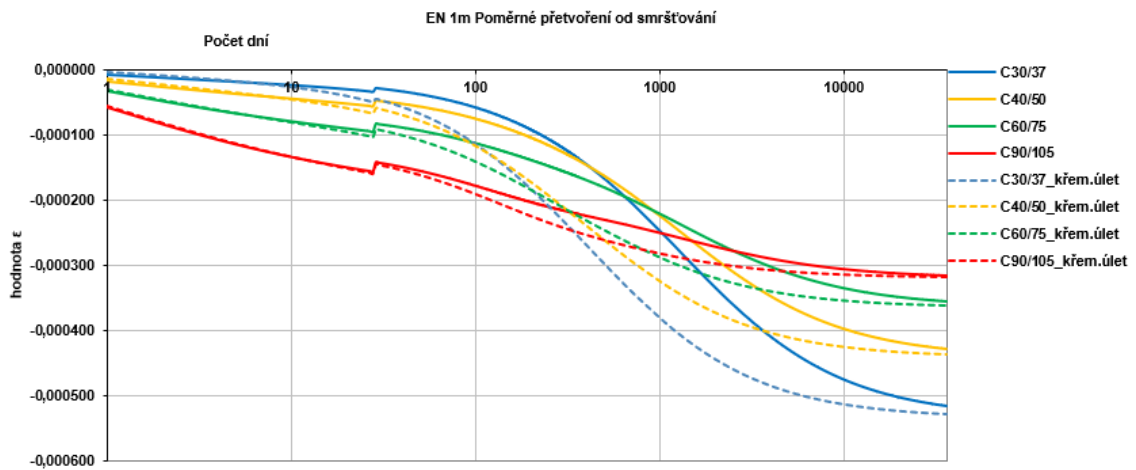
Rozdíly v hodnotách jsou jako u dotvarování do 5 % u EN 1, zatímco u modelu B3 dokonce menší než 1 %, můžeme si tedy výpočet zjednodušit uvažováním samotného trámu bez výpočtu spolupůsobící šířky desky, aniž by to mělo výraznější vliv na výsledek.

5.3 Vliv pevnosti betonu na velikost přetvoření od smršťování

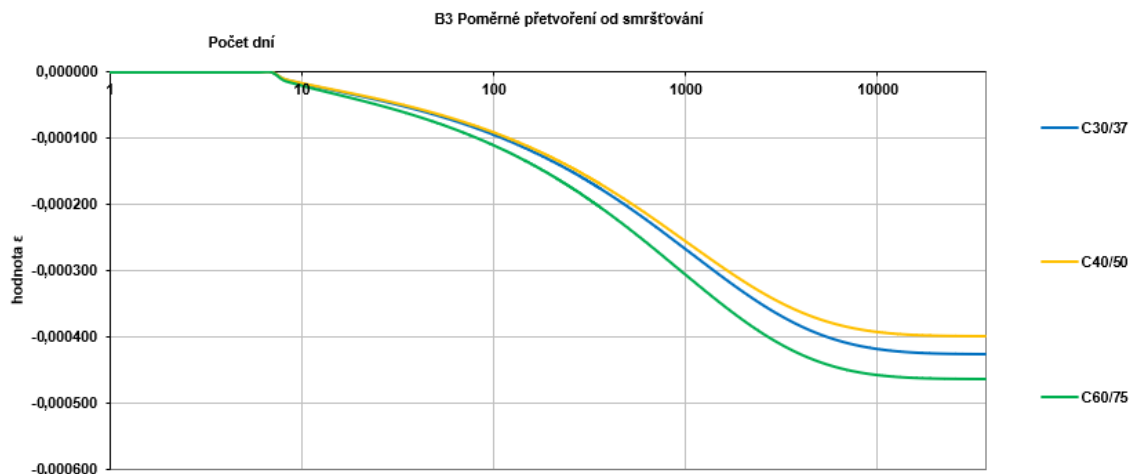
Všechny vstupní údaje jsou totožné jako v kapitole 4.3.



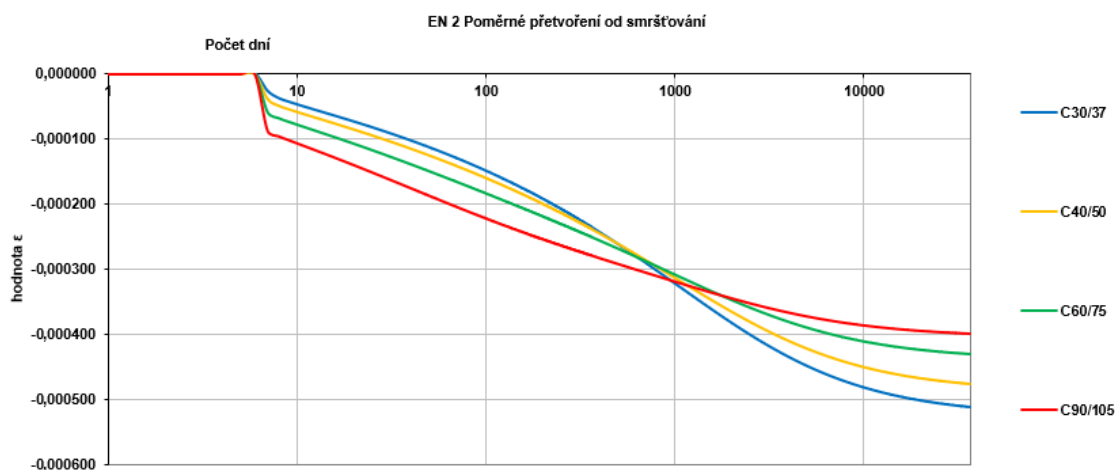
Obrázek 5.6: EN 1



Obrázek 5.7: EN 1m



Obrázek 5.8: model B3



Obrázek 5.9: EN 2

Tabulka 5.3: Výsledky poměrného přetvoření od smršťování

Třída pevnosti betonu	poměrné přetvoření od smršťování ϵ v čase $t = 18250$ dní (50 let) $\cdot 10^{-4}$			
	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
C30/37	-3,671	-5,001	-4,243	-5,005
C40/50	-3,562	-4,159	-3,993	-4,665
C60/75	-3,462	-3,483	-4,631	-4,238
C90/105	-3,543	-3,114		-3,954

Na Obrázek 5.6 můžeme vidět, že u modelu EN 1 nehraje pevnost betonu zásadní roli na velikost přetvoření od smršťování. Finální hodnoty jsou prakticky stejné, vyšší třída betonu pouze urychluje nárůst hodnoty smrštění vlivem vyššího základního smrštění, tento jev odpovídá reálnému vývoji a můžeme si ho všimnout ve všech předpisech rozdělujících smrštění na jednotlivé složky.

Naopak u modelu EN 1m jsou rozdíly velmi zásadní. Beton třídy C30/37 dosahuje o více než 60 % vyšší hodnoty oproti třídě C90/105. Znovu můžeme pozorovat rychlejší vývoj u vyšších tříd betonů, nakonec ovšem dosahují vyšší třídy výrazně nižších hodnot. Vliv křemičitého úletu pouze zrychluje vývoj smršťování, nemá ale vliv na finální hodnotu smrštění, na rozdíl od dotvarování.

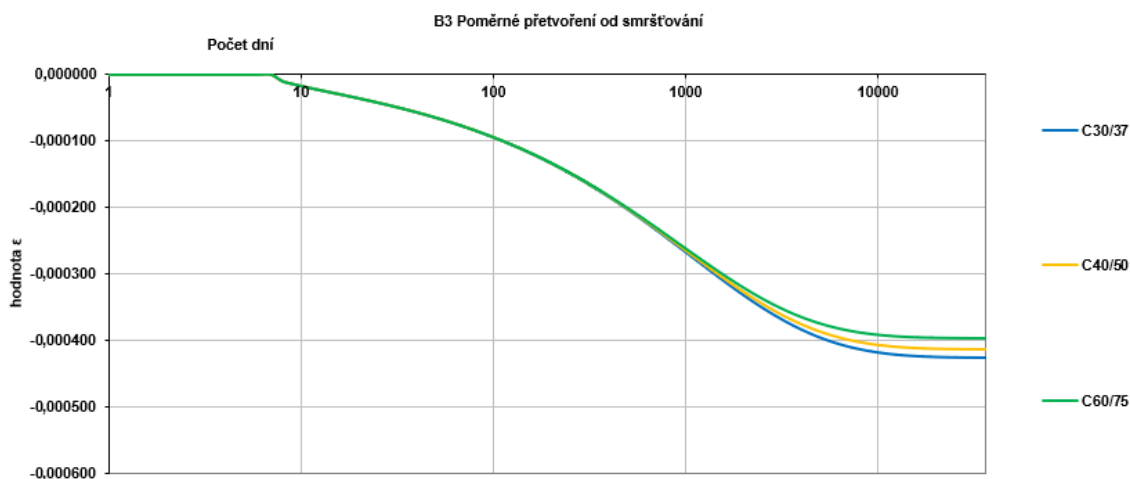
U modelu B3 je situace podobná jako u dotvarování, kde ovšem mělo zásadní vliv na velikost množství cementu, zatímco u smršťování má zásadní vliv na velikost množství vody v betonu. To je důvod, proč třída C60/75 má nejvyšší hodnotu přetvoření od smršťování, jelikož obsahuje nejvíce vody, viz Tabulka 4.4. Vyšší třída betonu snižuje hodnotu smršťování, nicméně tento faktor má menší vliv než množství vody v betonu. Třída betonu vystupuje ve výpočtu smršťování ve více součinitelích, které počítají také s modulem pružnosti betonu, hlavní vliv má výpočet součinitele základní hodnoty konečného smršťování $\varepsilon_{s\infty}$, který se vypočítá jako:

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 * \alpha_2 [1,9 * 10^{-2} * w^{2,1} * f_c^{-0,28} + 270] \quad (1.19)$$

kde α_1 a α_2 jsou součinitele závislé na druhu cementu, f_c je průměrná pevnost betonu f_{cm} ,

w je množství vody v betonu – právě díky exponentu 2,1 má množství vody velmi výrazný vliv na výsledek a jako jediný předpis porušuje pravidlo, že s vyšší třídou betonu klesá hodnota smršťování,

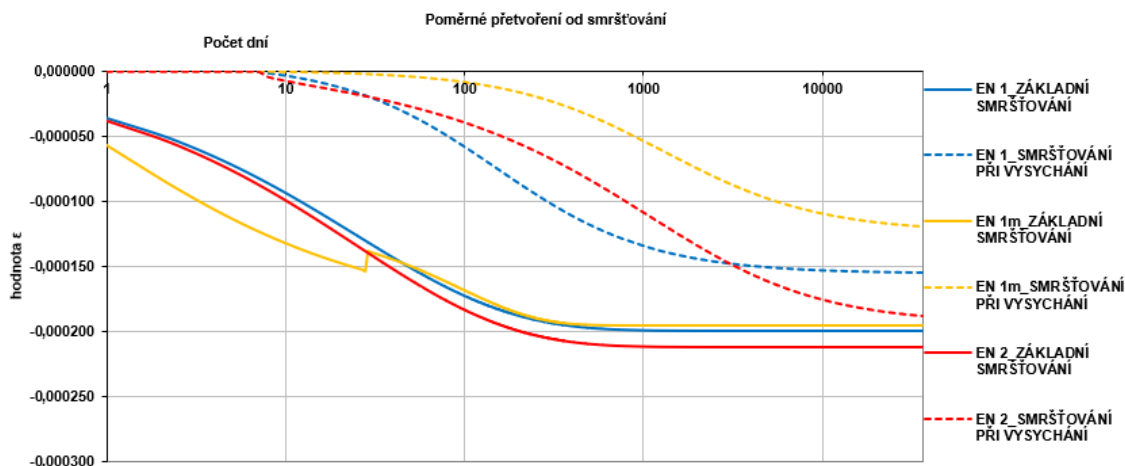
Pokud zachováme stejné složení betonové směsi odpovídající třídě C30/37 a budeme jen měnit pevnostní třídy betonů, dostaneme výrazně menší rozdíly v hodnotě smršťování, viz Obrázek 5.10, nicméně v tomto případě platí, že vyšší třída betonu má nižší hodnotu smršťování a má o něco větší vliv na velikost smršťování, než je tomu u dotvarování, viz Obrázek 4.13.



Obrázek 5.10: Vliv třídy betonu bez změny složení betonové směsi u modelu B3 na velikost přetvoření od smršťování

U předpisu EN 2 můžeme pozorovat nejrovnoměrnější snižování hodnoty smršťování ze všech předpisů. Pokud budeme porovnávat výsledky s EN 1, který vykazuje výrazně nižší hodnoty, zjistíme, že nejvyšší rozdíly jsou u nižších tříd betonů, jelikož u EN 2 dochází s vyšší třídou betonu ke snižování hodnoty smršťování, zatímco u EN 1 nikoliv. Důvodem je, že s vyšší třídou betonu se snižuje podíl složky smršťování při vysychání na celkové hodnotě. Přitom právě tato složka může za zmíněné rozdíly viz Obrázek 5.11. Na grafu můžeme vidět, že základní složka smršťování je u EN 1 a EN 2 téměř totožná. Navíc tato složka má vyšší podíl na celkové hodnotě než složka smršťování při vysychání, a proto jsou vzájemné rozdíly mezi předpisy u vyšších tříd betonu výrazně menší.

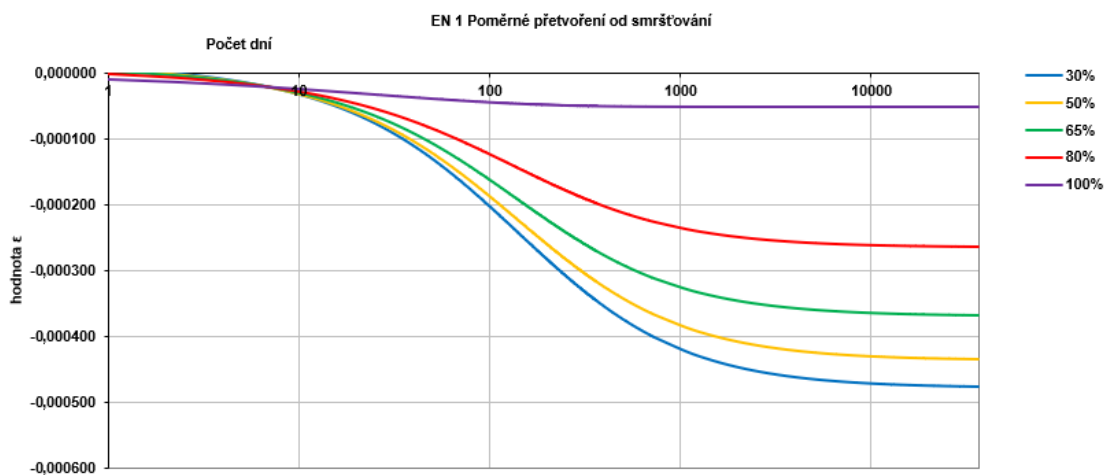
Dále můžeme vidět, že u betonu třídy C90/105 již norma EN 1m, která je přímo určena pro betony vyšší pevnosti, má nižší hodnotu smršťování, než norma EN 1.



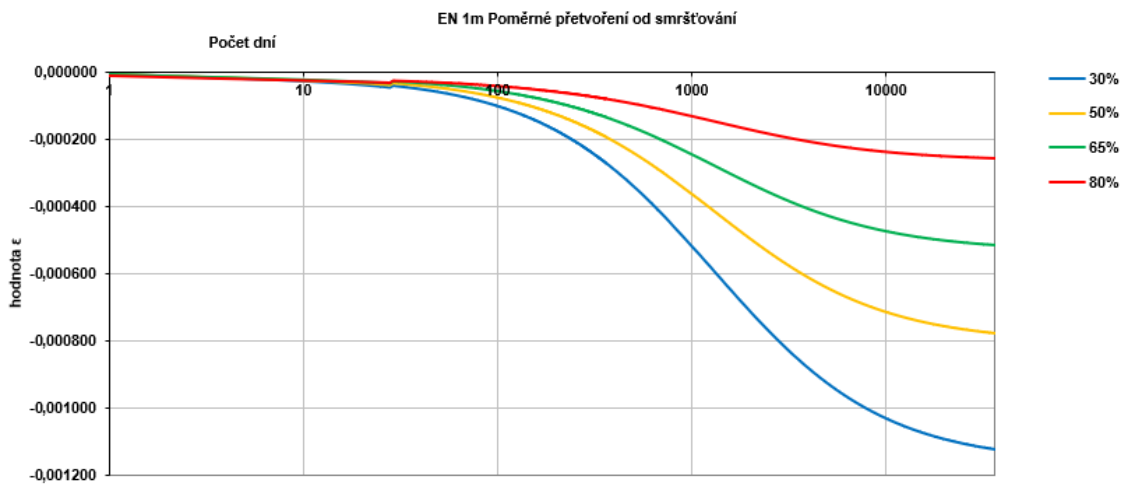
Obrázek 5.11: Vliv vyšší třídy betonu C90/105 na jednotlivé složky přetvoření od smršťování

5.4 Vliv velikosti relativní vlhkosti na poměrné přetvoření od smršťování

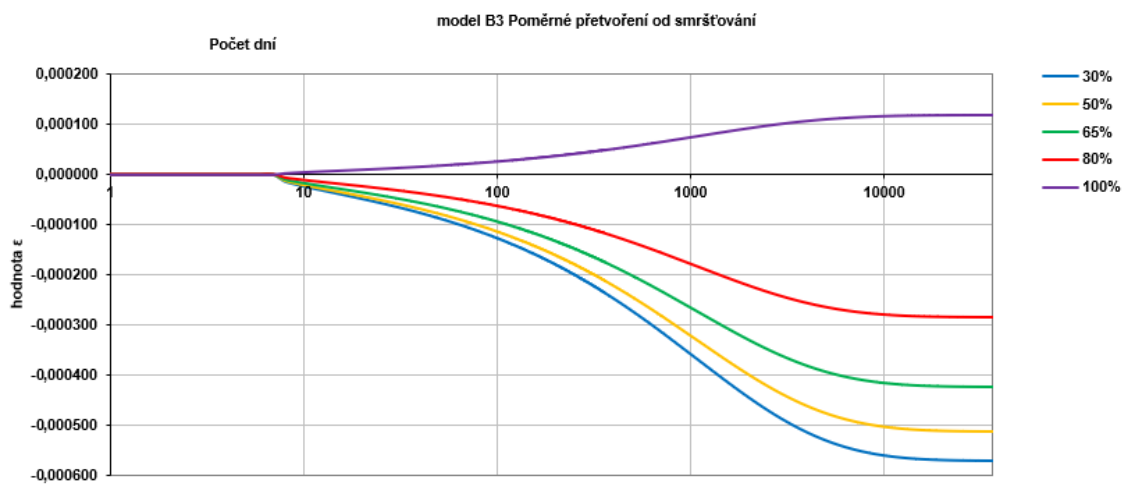
Vstupní údaje jsou stejné jako v kapitole 4.4.



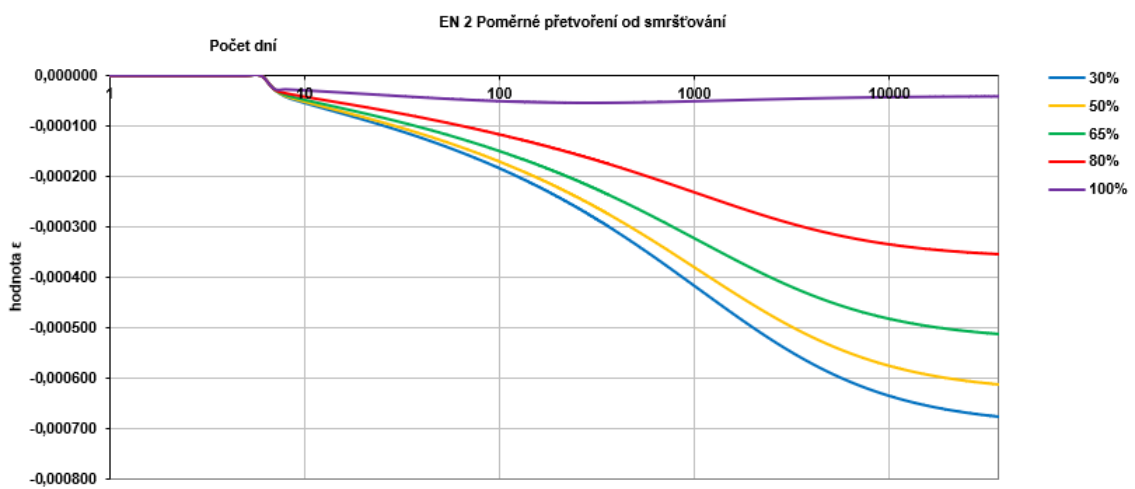
Obrázek 5.12: EN 1



Obrázek 5.13: EN 1m



Obrázek 5.14: model B3



Obrázek 5.15: EN 2

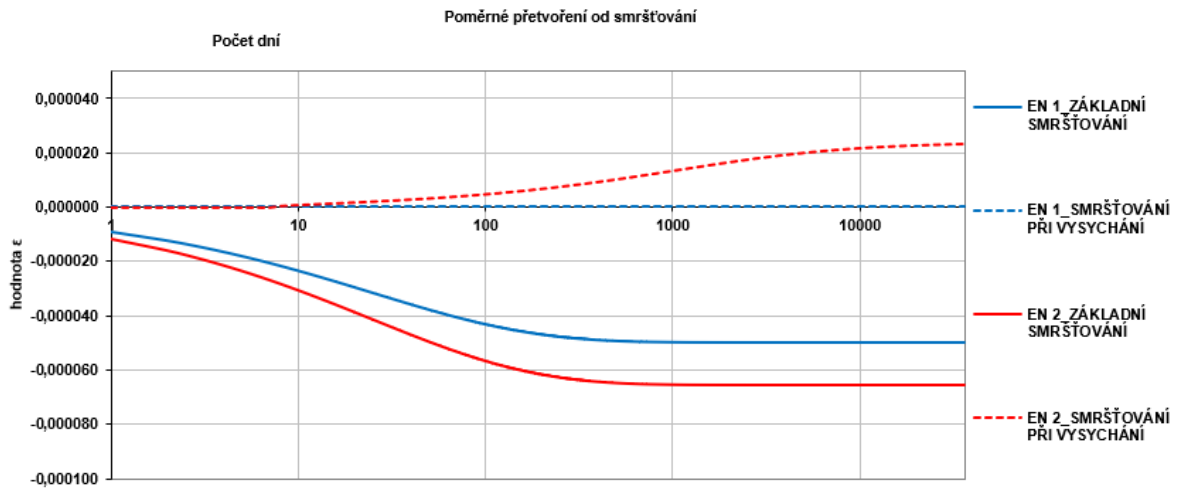
Tabulka 5.4: Výsledky analýzy vlivu relativní vlhkosti

Relativní vlhkost okolního prostředí	poměrné přetvoření od smršťování ϵ v čase $t = 18250$ dní (50 let) $\cdot 10^{-4}$			
	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
30%	-4,753	-10,878	-5,691	-6,608
50%	-4,325	-7,520	-5,118	-5,973
65%	-3,671	-5,001	-4,243	-5,005
80%	-2,633	-2,482	-2,854	-3,469
100%	-0,500	-	1,170	-0,427

Pro relativní vlhkost 30 % a 50 % má výrazně nejvyšší hodnoty smršťování model EN 1m, pro rel. vlhkost 30 % vykazuje dokonce více než dvojnásobnou hodnotu oproti modelu EN 1. S postupně se zvyšující rel. vlhkostí již nejsou rozdíly tak vysoké, naopak pro rel. vlhkost 80 % vykazuje model EN 1m nejnižší hodnotu.

Model B3 potvrzuje, že vykazovanými hodnotami se pohybuje někde mezi modely EN 1 a EN 2. Výrazně se ovšem odlišuje v chování při 100 % rel. vlhkosti, když jako jediný vykazuje tzv. bobtnání, tedy opak smršťování a zvětšení objemu prvku. U modelu EN 1 je přírůstek složky smršťování při vysychání při 100 % rel. vlhkosti nulový, vystupuje zde tedy jen složka základního smrštění. Model EN 1m je určen výhradně do 80 % rel. vlhkosti. U modelu EN 2 je složka smršťování při vysychání kladná, nicméně složka základního smršťování vykazuje vyšší hodnotu a nedochází tedy k jevu bobtnání. Rozdíl v chování modelů EN 1 a EN 2 při 100 % rel. vlhkosti je pro názornost ukázán na grafu viz Obrázek 5.16.

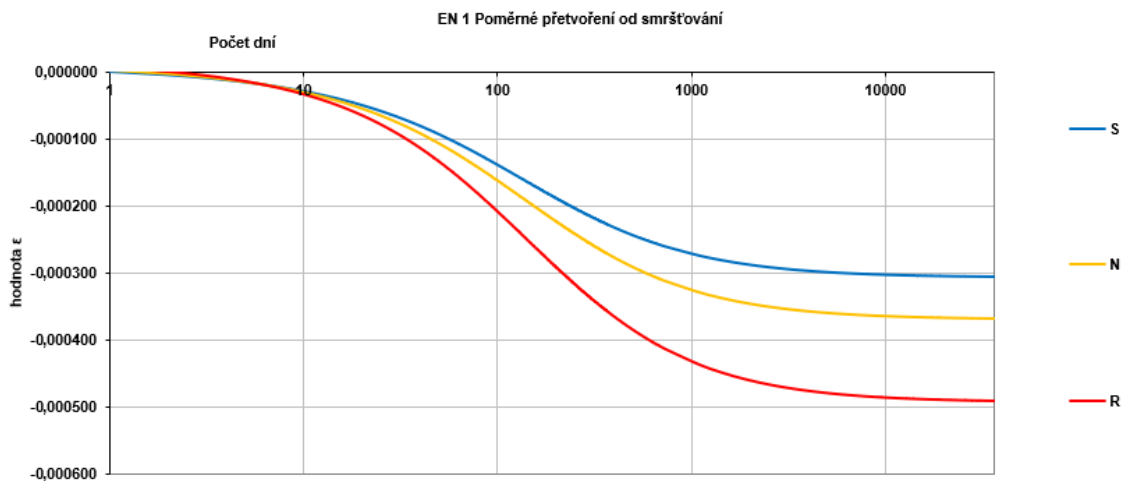
EN 2 potvrzuje, že vykazuje výrazně vyšší hodnoty oproti současně platné verzi EN 1, nárůst hodnot je mezi 30 % až 40 %.



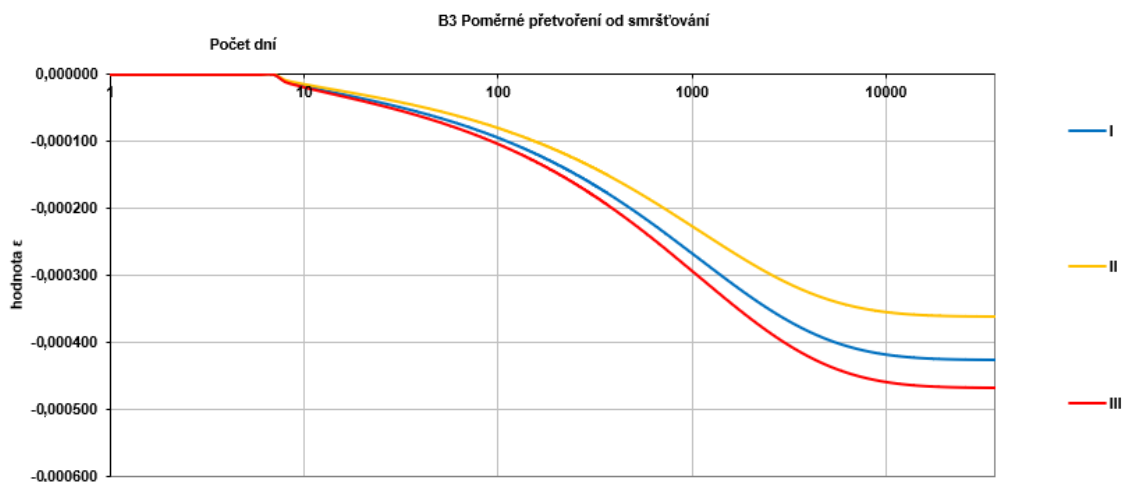
Obrázek 5.16: Rozdíl chování modelů EN 1 a EN 2 při 100 % rel. vlhkosti

5.5 Vliv třídy cementu na velikost přetvoření od smršťování

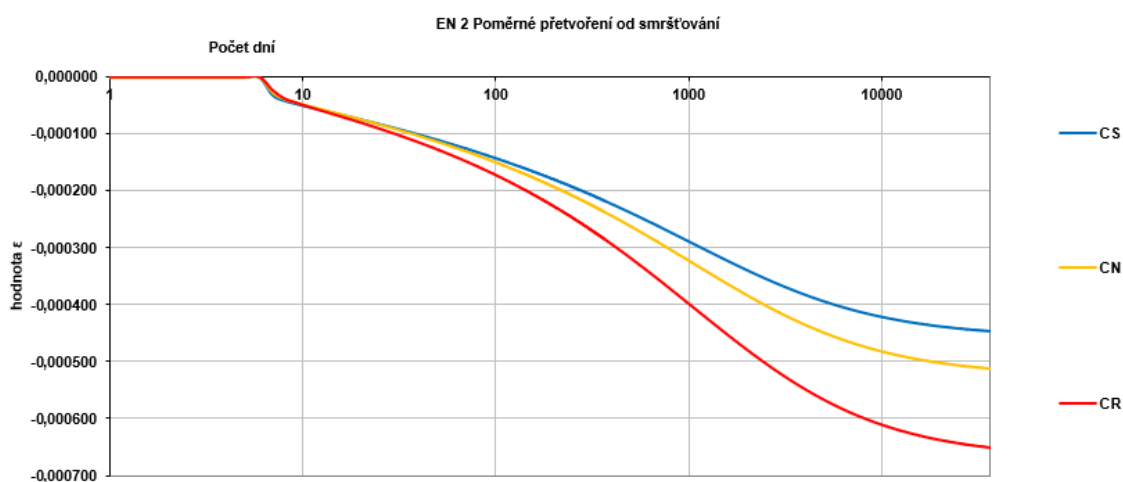
Vstupní údaje viz kapitola 4.5.



Obrázek 5.17: Vliv třídy cementu EN 1



Obrázek 5.18: Vliv třídy cementu B3



Obrázek 5.19: Vliv třídy cementu EN 2

Tabulka 5.5: Hodnoty jednotlivých předpisů

	poměrné přetvoření od smršťování ϵ v čase $t = 18250$ dní (50 let) $\cdot 10^{-4}$			
Třída cementu (vývoje pevnosti betonu)	EN 1	EN 1m	B3	EN 2
S(CS)	-3,040	-		-4,374
N(CN)	-3,671	-		-5,005
R(CR)	-4,891	-		-6,361
I			-4,243	
II			-3,606	
III			-4,667	

Třída cementu (u EN 2 třída vývoje pevnosti betonu) má významný vliv na velikost poměrného přetvoření od smrštění u všech předpisů mimo předpis EN 1m, kde změna třídy cementu nemá na smrštění žádný vliv. Jelikož model B3 používá rozdělení cementu podle jiné metodiky než EN 1 a EN 2, nelze srovnávat výsledky mezi sebou. Třída I zastupuje klasický portlandský cement, třída II je cement s odolností proti síranům a třída III je cement s rychlým nástupem pevnosti, jedná se o rozdělení cementů dle metodiky ASTM. EN 1 rozděluje cement podle rychlosti nástupu pevnosti, zatímco EN 2 rozděluje stejným způsobem beton jako celek.

Z výsledku je patrné, že jak u EN 1, tak u EN 2 nejnižších hodnot smršťování dosahují třídy s pomalejším nárůstem pevnosti, naopak nejvyšších hodnot třídy s rychlým nástupem pevnosti cementu (třídy pevnosti betonu). U modelu B3 jsou nejvyšší hodnoty dosaženy také s u třídy cementu III, která zastupuje rychlý nárůst pevnosti, nejnižších hodnot dosahuje třída cementu II.

Třída cementu R dosahuje v tomto příkladu o 61 % větší hodnoty než třída S, u EN 2 třída vývoje betonu CR dosahuje o 45,5 % větší hodnoty než třída CS. Vliv třídy cementu (vývoje pevnosti betonu) má tedy velmi výrazný vliv na výslednou hodnotu.

Pokud porovnáme hodnoty EN 1 a EN 2 mezi sebou, tak u třídy S(CS) dosahuje EN 2 o 44 % větší hodnoty, u třídy S(CS) o 30 % větší hodnoty a u třídy N(CN) o 36 %. Znovu se tedy potvrzuje, že hlavním rozdílem mezi EN 1 a EN 2 je výrazné zvýšení hodnot poměrného přetvoření od smršťování v rozsahu 30 až 50 %.

U modelu B3 je rozptyl hodnot dle třídy cementu do 30 %, ze zmíněných předpisů je tedy vliv třídy cementu nejmenší, nicméně stále významný.

5.6 Shrnutí analýzy

Výsledky byly podrobně diskutovány v předcházejících kapitolách. Tato část bude zaměřena převážně na srovnání předpisů EN 1 a EN 2, které je z hlediska praxe nejvýznamnější s ohledem na připravovanou změnu evropské normy pro navrhování betonových konstrukcí. Nejdříve budou shrnuty výsledky dotvarování a následně poměrného přetvoření od smršťování.

5.6.1 Dotvarování

Vývoj dotvarování v čase je v EN 1 a EN 2 velmi podobný. K hlavnímu rozdílu dochází v pozdější fázi přibližně od stáří 30 let, kdy se u EN 1 prakticky zastavuje nárůst dotvarování, naopak u EN 2 růst dále pokračuje, což má za následek vyšší hodnoty u EN 2 ve sledovaném čase 50 let. Tento rozdíl hodnot se bude s narůstající návrhovou životností konstrukce dále zvyšovat. Pro 50 let dosahuje EN 2 průměrně o 5 až 10 % větší hodnoty součinitele dotvarování oproti EN 1. Pokud bychom ovšem navrhovali na dobu 100 let, tak model EN 2 již dosahuje větších hodnot o více než 10 %.

Ve srovnání všech modelů nejvyšších hodnot součinitele dotvarování dosahuje předpis EN 1m a poté model B3. Rozptyl hodnot součinitele dotvarování mezi těmito modely a modely EN 1 (2) je již velmi výrazný. Podstatný je také fakt, že předpisy EN 1m, EN 2 a B3 rozdělují dotvarování na složky základního dotvarování a dotvarování při vysychání, zatímco EN 1 dotvarování na složky nerozděluje. U předpisu EN 1m má uvažování křemičitého úletu velmi významný vliv na velikost hodnoty součinitele dotvarování.

U průvlaků je možné součinitel dotvarování počítat zjednodušeně s uvažováním pouze „obdélníkového průřezu“ bez spolupůsobící šířky desky, jelikož její uvažování má vliv na velikost součinitele dotvarování pouze v řádu jednotek %.

Pevnost betonu má významný vliv na velikost součinitele dotvarování. U EN 1 a EN 2 je vliv velmi podobný a stále platí ve stáří 50 let rozdíly v hodnotách do 10 % pro různé pevnostní třídy betonu. Obecně součinitel dotvarování klesá se vzrůstající pevností betonu. Třída betonu C90/105 dosahuje přibližně 50 % hodnoty třídy betonu C30/37 u EN 1 i EN 2. Zde je nutné zmínit, že u modelu B3 je nutno zadat složení betonové směsi, která má samozřejmě pro odlišnou pevnostní třídu jiné složení. U tohoto modelu nelze pouze měnit pevnostní charakteristiky betonu, jelikož ty nemají prakticky na velikost součinitele dotvarování žádný vliv, hlavní vliv má množství cementu v použité betonové směsi. Z tohoto důvodu vychází z modelu B3 vyšší hodnoty součinitele dotvarování u vyšší třídy pevnosti betonu – viz Obrázek 4.10.

Je však potřeba říci, že model B3 nepředpokládá použití přísad v receptuře betonu, takže pro přesnou předpověď u moderních receptur betonu je třeba model nakalibrovat pomocí výsledků krátkodobých experimentů. Bez této kalibrace je predikce pro vyšší pevnostní třídy vysoce konzervativní.

Co se týká vlivu třídy cementu, resp. u EN 2 třídy vývoje pevnosti betonu, tak vliv není nijak zásadní u žádného z předpisů, u EN 1m dokonce nemá vliv žádný. U všech předpisů se jedná o rozdíly v hodnotách okolo 5 %. Nejvyšší hodnoty dosahuje cement (beton) pomalejšího nárůstu pevnosti třídy S (CS), nejnižší naopak s nejrychlejším nárůstem pevnosti. U modelu B3 je rozdělení vlivu cementu odlišné, nejvyšší hodnoty dosahuje cement třídy II, který je odolný proti síranům.

Vliv doby vnesení zatížení je velmi výrazný u předpisů EN 1 a EN 2. Znovu u těchto modelů je vliv prakticky stejný a například v době vnesení zatížení 90 dnů dosahuje hodnota součinitele dotvarování u těchto modelů v čase 50 let cca 45 % hodnoty času vnesení zatížení ve 4 dnech. U předpisu EN 1m je vliv doby vnesení zatížení velmi nízký. Obecně platí, že s vyšší dobou vnesení zatížení se snižuje součinitel dotvarování, nicméně toto neplatí vlivem chyby v modelu B3. Zde v nízkých časech dochází k chybě, kdy např. v době vnesení zatížení ve 4 dnech je součinitel dotvarování v čase 50 let menší než v době vnesení zatížení 28 dní. V časech vnesení zatížení větších jak 10 dní již model funguje správně.

5.6.2 Poměrné přetvoření od smršťování

Porovnání hodnot poměrného smršťování vede k odlišným závěrům oproti porovnání hodnot součinitele dotvarování.

U dotvarování byly rozdíly mezi modely EN 1 a EN 2 do 10 %, zatímco u smršťování jsou rozdíly výrazně větší. EN 2 dosahuje i více jak o 30 % větších hodnot oproti EN 1. Jako tomu bylo u dotvarování, i zde modely rozlišují poměrné přetvoření od smršťování na složku základní a při vysychání, v tomto případě toto rozdělení není k dispozici u modelu B3. Výrazně vyšší hodnoty EN 2 jsou dány převážně vyšší hodnotou složky smršťování při vysychání, viz Obrázek 5.5. Model EN 2 dosahuje pro návrhovou životnost 50 let podobných výsledků jako model EN 1m, ačkoliv vykazuje rychlejší nárůst poměrného přetvoření od smršťování v čase. U všech předpisů je splněn předpoklad, že v čase 50 let se se zvyšující tloušťkou desky hodnota smršťování snižuje. Na rozdíl od dotvarování má u smršťování v předpisu EN 1m přítomnost křemičitého úletu vliv pouze na rychlost vývoje smršťování, nikoliv na výslednou hodnotu v čase okolo 100 let. Ve stáří 50 let tedy přítomnost křemičitého úletu v receptuře ovlivňuje stanovenou hodnotu poměrného smršťování.

Stejně jako u dotvarování lze průvlaky (T-trámy) uvažovat zjednodušeně jako obdélníkové průřezy, aniž by to mělo výrazný vliv na výsledek, znovu je rozdíl s uvažováním spolupůsobící šířky do 5 %.

Vliv pevnosti betonu na samotnou hodnotu poměrného smrštění ve stáří 50 let je u EN 1 překvapivě minimální. S narůstající pevnostní třídou betonu ale dochází ke zrychlování vývoje poměrného přetvoření od smršťování. To je dáno převážně tím, že vyšší pevnostní třídy betonů vykazují vyšší základní smršťování. Naopak u předpisu EN 1m jsou rozdíly hodnot poměrného smrštění velmi zásadní, kdy třída betonu C90/105 dosahuje pouze 60 % hodnoty třídy C30/37. U modelu B3 má znovu zásadní vliv složení betonové směsi a tentokrát hlavně množství vody v betonu. U EN 2 jsou rozdíly nejvíce rovnoměrné a ve shodě s předpisem EN 1m odpovídají předpokladu, že s vyšší třídou betonu klesá velikost smršťování. Největší rozdíly mezi EN 1 a EN 2 vznikají u nízkých tříd betonu, jelikož u těchto betonů má hlavní podíl složka smršťování při vysychání, jejíž hodnota s nárůstem pevnosti betonu klesá, zatímco velikost základního smršťování je u obou předpisů velmi podobná.

Vliv relativní vlhkosti odpovídá u všech předpisů předpokladu, že se snižováním relativní vlhkosti narůstá hodnota celkového přetvoření od smršťování. EN 2 potvrzuje vyšší hodnoty oproti EN 1 v rozmezí 30 až 40 %. EN 1m vykazuje nejvýraznější rozdíly v porovnání výsledků pro 30% a 80% relativní vlhkost, kdy při 30 % dosahuje výrazně nejvyšších hodnot ze všech předpisů – až dvojnásobné hodnoty oproti ostatním předpisům, zatímco při 80 % relativní vlhkosti dosahuje naopak hodnot nejnižších. Jev bobtnání se projevuje při 100 % relativní vlhkosti pouze v modelu B3, ačkoliv v EN 2 je tento jev teoreticky zohledněn ve složce smršťování při vysychání viz Obrázek 5.16.

Vliv třídy cementu je oproti dotvarování u smršťování mnohem výraznější a u všech modelů platí, že největších hodnot přetvoření od smršťování dosahují cementy (betony) s nejrychlejším nárůstem pevnosti.

6 Praktický příklad

V této kapitole bude na vybrané stavbě administrativní budovy ve Veleslavíně a konkrétní stropní desce nad 2.NP porovnán celkový (včetně vlivu trhlin, výztuže, dotvarování a smršťování betonu) průhyb stropní desky podle modelů EN 1, B3 a EN 2 dle výpočetního programu Scia Engineer. Model EN 1m je vynechán z důvodu nedoporučeného použití pro beton nižší třídy, v tomto případě byla použita třída pevnosti betonu C25/30. Zatížení, včetně návrhu rozměrů konstrukce a výpočetního modelu bylo převzato z reálného projektu, který byl vypracován statickou firmou Statikon. Úkolem této DP není konstrukci navrhnout, ale na vybrané reálné konstrukci zjistit reálný vliv změny velikosti průhybu dle EN 2 oproti EN 1.

Jedná se o jednoduchou stropní konstrukci lokálně podepřené stropní desky tl. 280 mm, tloušťka stropní desky je nad sloupy zvětšena hlavicemi tl. 400 mm s půdorysným rozměrem 3 x 3 m, viz schéma konstrukce Obrázek 6.3. Po obvodě stropní desky se nachází ŽB průvlak (nadpraží) s celkovou výškou 830 mm. Místo s největším průhybem má světlý rozpon 7,7 x 6,9 m.

Zatížení:

Stálé:

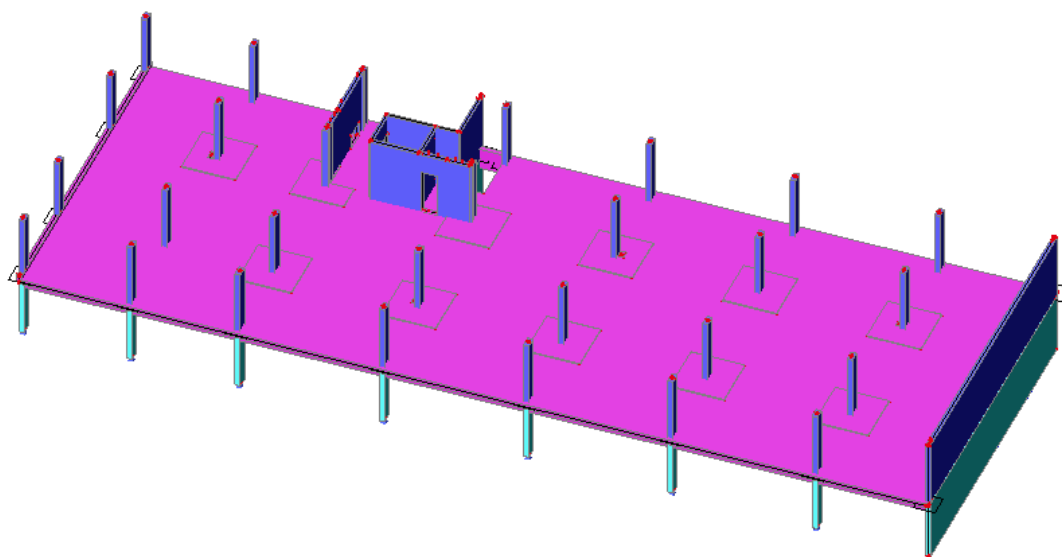
- Vlastní tíha
- Skladba podlah: $G_k = 1,70 \text{ kN/m}^2$
- Příčky: $G_k = 1,80 \text{ kN/m}^2$
- Skladba stěn (LOP) po obvodu konstrukce: $G_k = 5,60 \text{ kN/m}$

Proměnné:

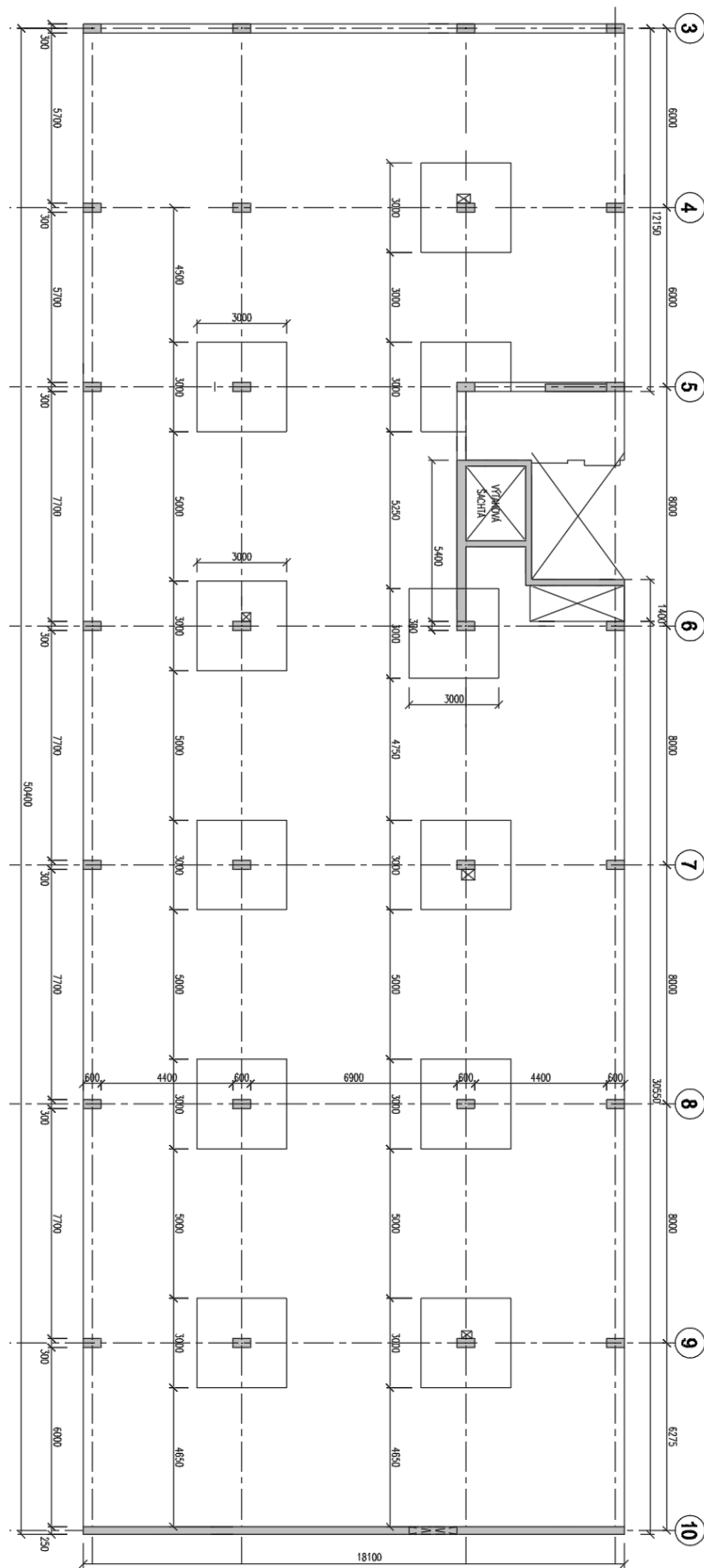
- Užitné kategorie C3 (plochy ve veřejných administrativních budovách, kde může docházet ke shromažďování osob): $Q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$
- Sklady (jen na omezené ploše viz Obrázek 6.4): $Q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2$, $Q_k = 12 \text{ kN/m}^2$



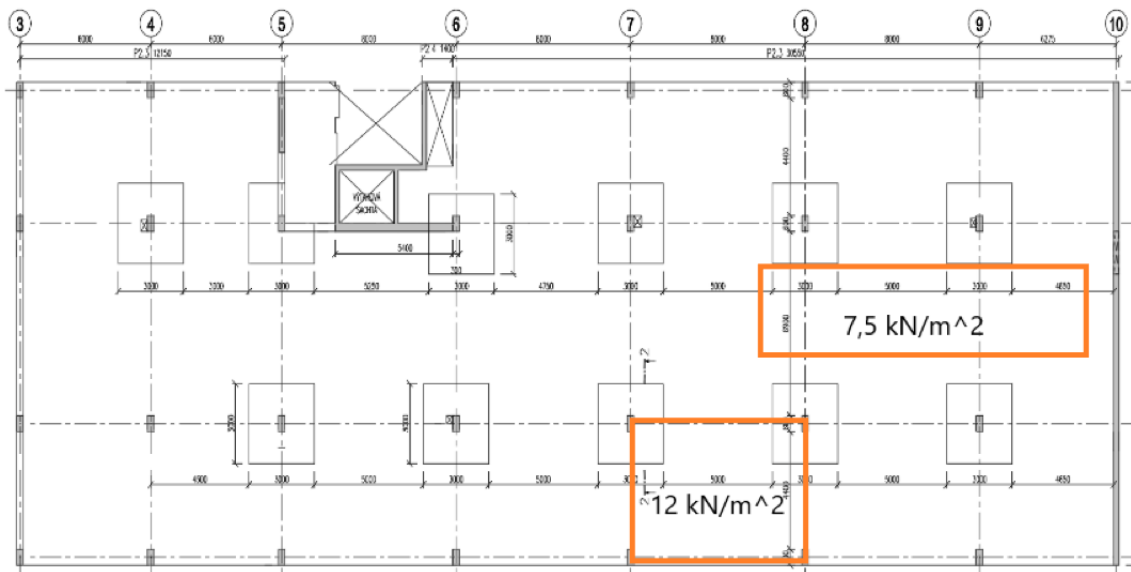
Obrázek 6.1: Z realizace konstrukce [11]



Obrázek 6.2: Výpočetní model – patrový výsek desky 2.NP



Obrázek 6.3: Schéma konstrukce

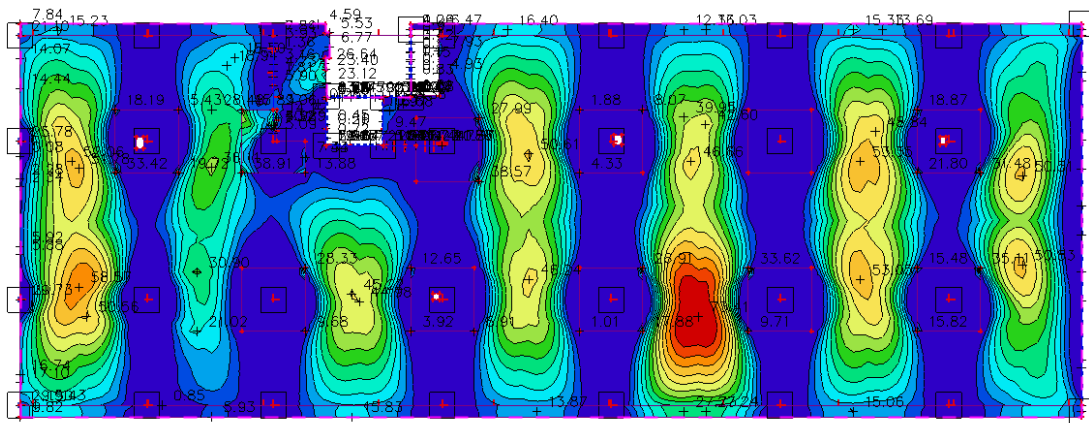


Obrázek 6.4: Umístění skladů

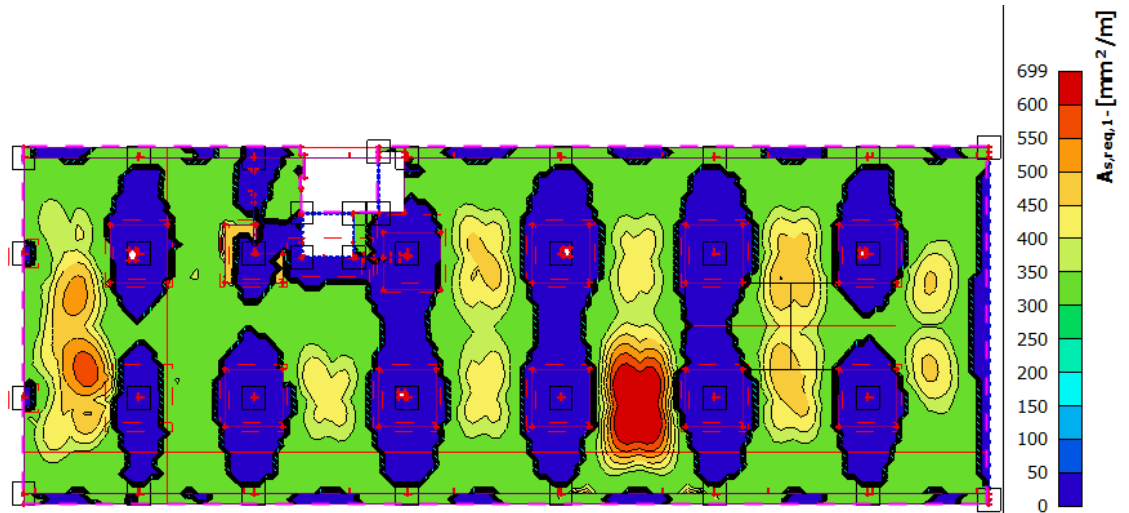
6.1 Návrh výztuže

Výztuž byla navržena na základní návrhové momenty ve směrech os x a y viz Obrázek 6.5 a Obrázek 6.6, pro kontrolu byla využita nutná plocha výztuže z programu viz Obrázek 6.6 a Obrázek 6.7. Pro vyřešení extrémních hodnot – singularit byly vloženy průměrovací body o velikosti $1,3 \times 1,3$ m (zhruba odpovídá rozměru sloupu + dvojnásobku tloušťky desky). Jedná se o nadpodporové oblasti, kde program uvažuje podporu desky v jednom bodě, ve skutečnosti však k podepření dochází na průřezové ploše sloupu. Pro správné zprůměrování hodnot je třeba, aby uvnitř průměrovacího bodu leželo alespoň pět uzlů sítě a naopak průměrovací oblast nesmí zasahovat až do míst s kladnými momenty, jelikož by docházelo k hrubé chybě při průměrování a výsledky by nebyly použitelné.

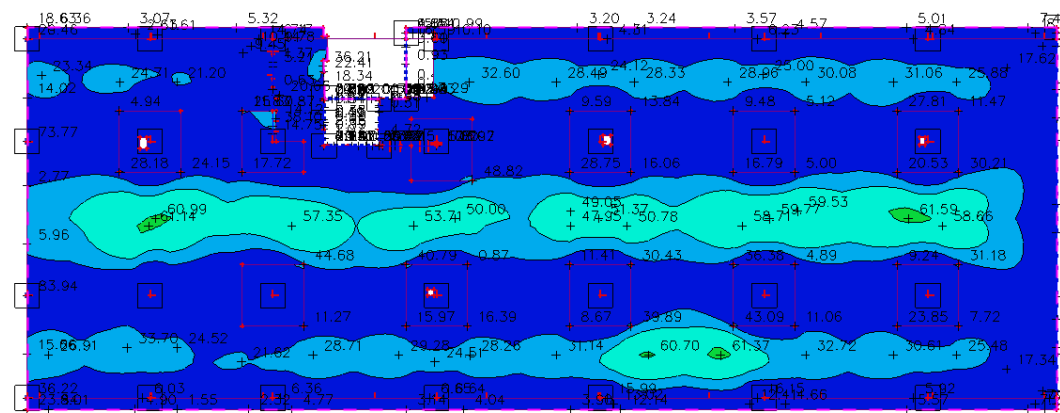
6.1.1 Spodní povrch



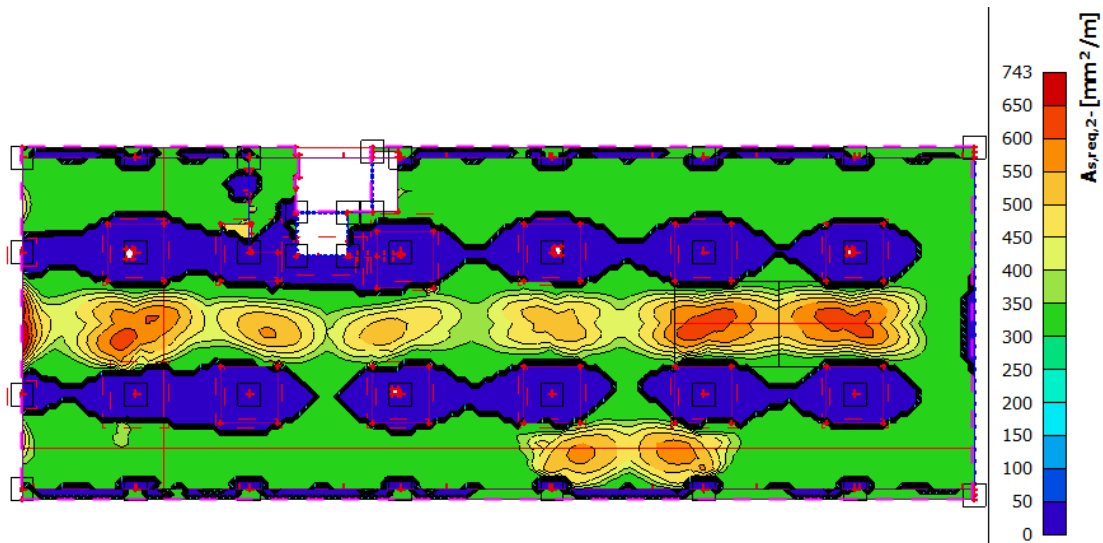
Obrázek 6.5: Základní návrhový moment ve směru osy x při spodním povrchu



Obrázek 6.6: Nutná plocha výztuže pro spodní povrch ve směru osy x



Obrázek 6.7: Základní návrhový moment ve směru osy y při spodním povrchu

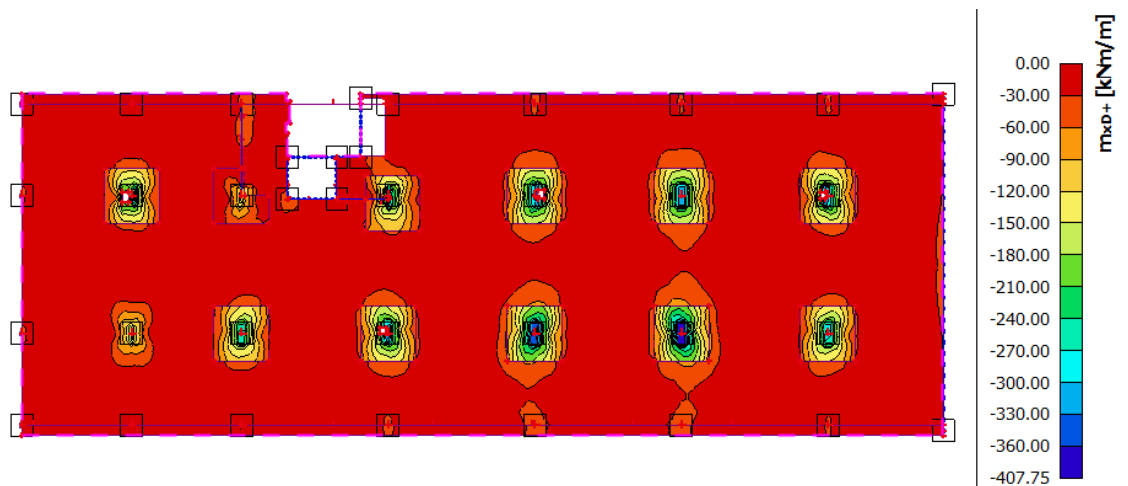


Obrázek 6.8: Nutná plocha výztuže pro spodní povrch ve směru osy y

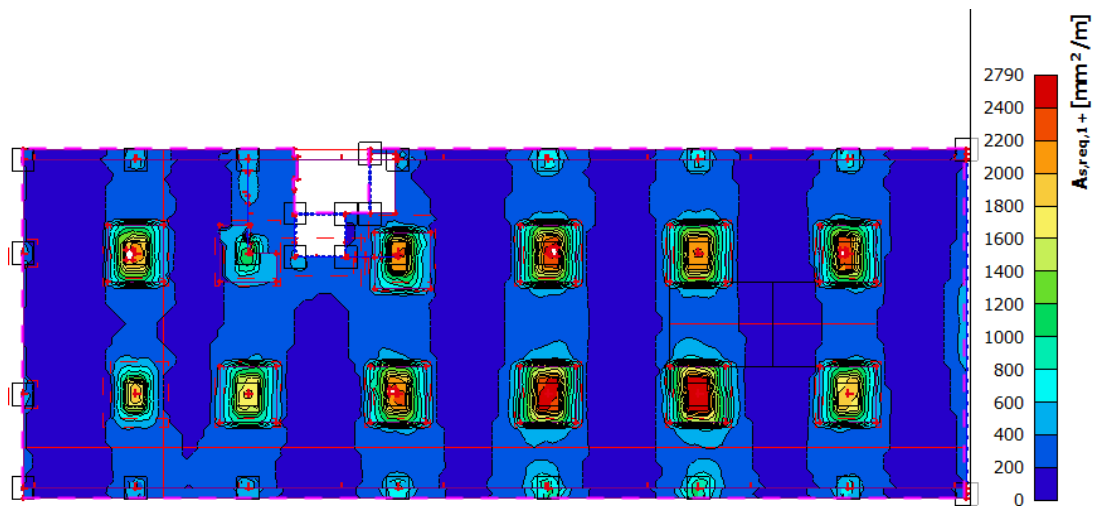
Výztuž byla navržena na maximální moment na spodním povrchu 73,41 kNm/m.

- $d = h - c - \frac{\phi}{2} = 280 - 30 - 6 = 244 \text{ mm}$
- $a_{s,req} = \frac{m_D - (MAX)}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{73,41}{0,96 * 244 * 435} * 10^6 = 721 \text{ mm}^2 / \text{m}$
- Navrhují základní rastr pro spodní povrch $\phi 12$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 754 \text{ mm}^2 / \text{m}$

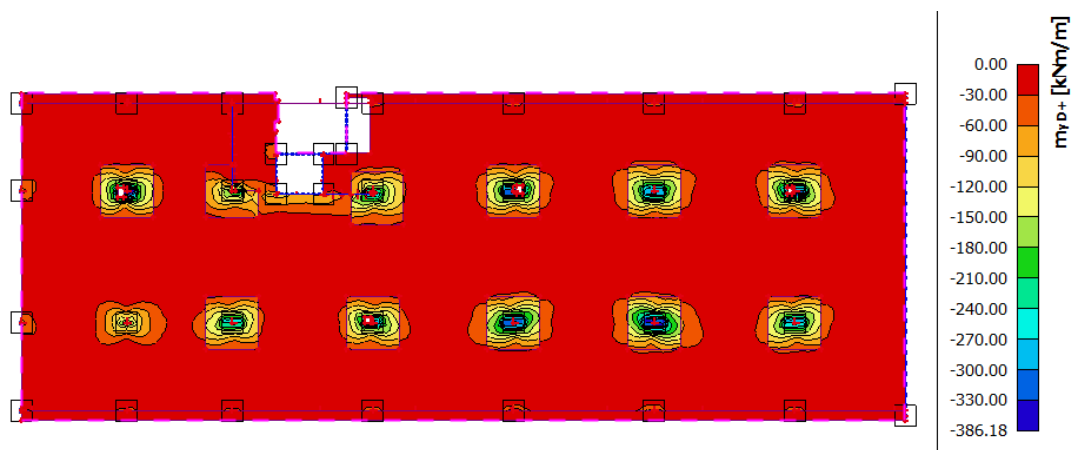
6.1.2 Horní povrch



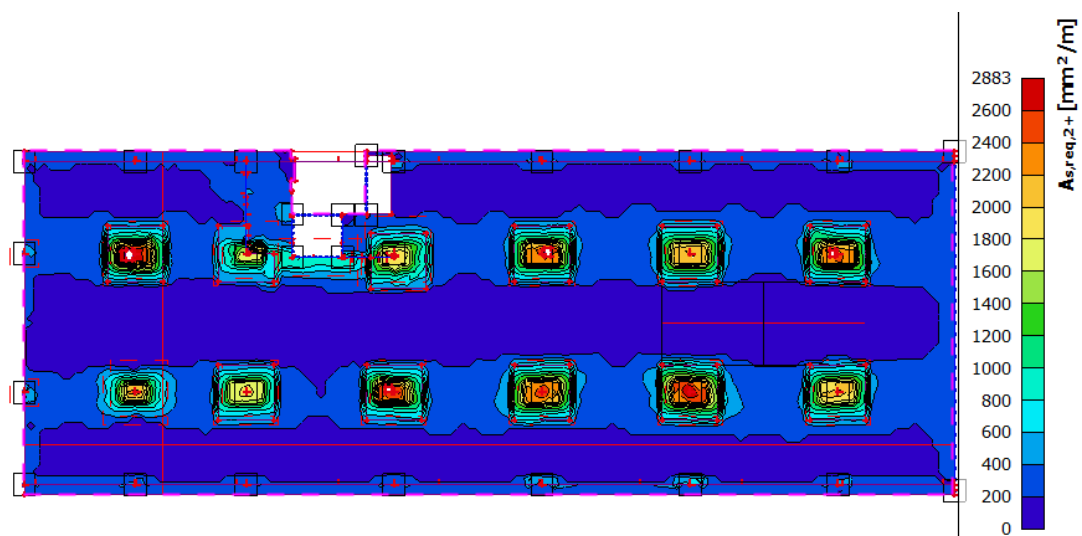
Obrázek 6.9: Základní návrhový moment ve směru osy x při horním povrchu



Obrázek 6.10: Nutná plocha výztuže pro horní povrch ve směru osy x

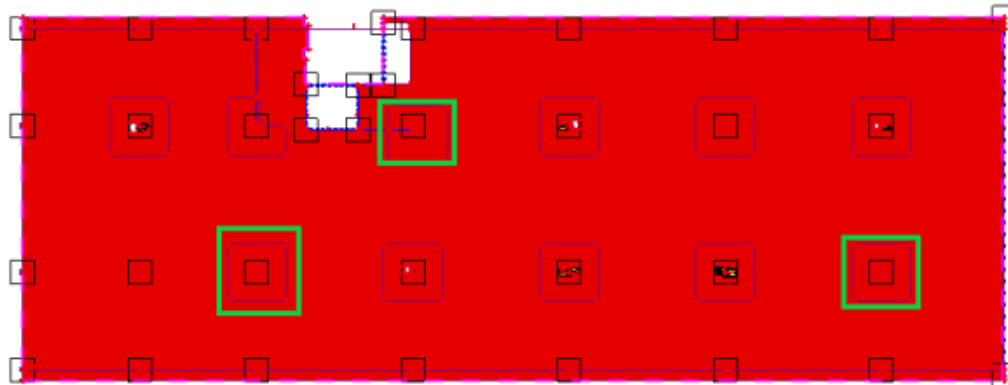


Obrázek 6.11: Základní návrhový moment ve směru osy y při horním povrchu

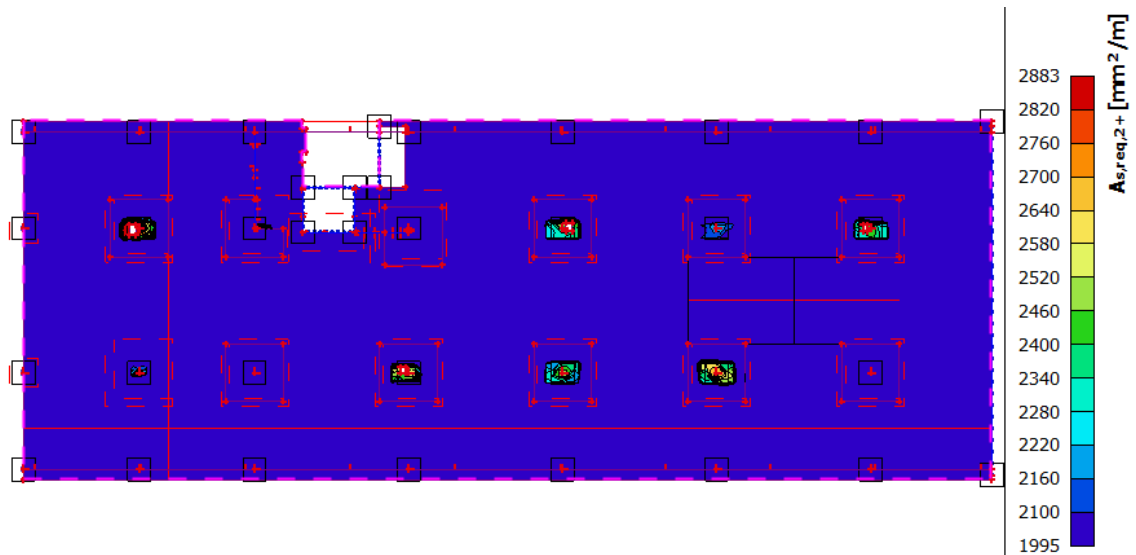


Obrázek 6.12: Nutná plocha výztuže pro horní povrch ve směru osy y

Hlavice sloupů s menším návrhovým momentem než 300 kNm/m viz Obrázek 6.13



Obrázek 6.13: Vyznačené hlavice, které vyžadují menší plochu výztuže



Obrázek 6.14: Hlavice, které vyžadují větší plochu výztuže, než 1995 mm²/m

Základní rastr při horním povrchu byl zvolen stejný jako při dolním, $\phi 12$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 754 \text{ mm}^2/\text{m}$, pro vyznačená místa na Obrázek 6.13 je vyžadována výztuž:

- $d = h - c - \frac{\phi}{2} = 400 - 30 - 6 = 364 \text{ mm}$
- $a_{s,req} = \frac{m_{D+}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{300}{0,95 \cdot 364 \cdot 435} \cdot 10^6 = 1995 \text{ mm}^2/\text{m}$

Základní rastr je $754 \text{ mm}^2/\text{m}$, zbývá $1241 \text{ mm}^2/\text{m}$ – v místě hlavic navrhuji pro pokrytí nadpodporových momentů k základnímu rastru příložky $\phi 16$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 1340 \text{ mm}^2/\text{m}$.

Pro hlavice sloupů s momentem vyšším jak 300 kNm/m navrhují na maximální nadpodporový moment -407,75 kNm/m:

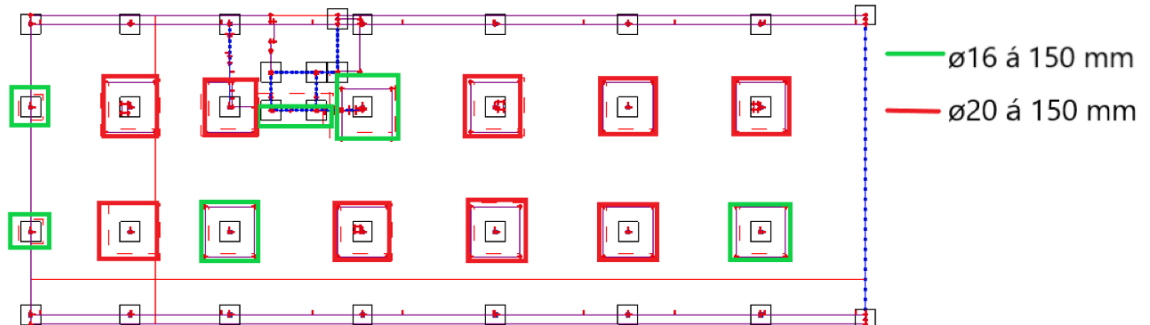
- $$a_{s,req} = \frac{m_D+(MAX)}{\zeta*d*f_{yd}} = \frac{407,75}{0,9*364*435} * 10^6 = 2860 \text{ mm}^2/m$$

V místě hlavic k základnímu rastru navrhují $\varnothing 20$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 2094 \text{ mm}^2/m$, $2094 \text{ mm}^2/m + 754 \text{ mm}^2/m = 2849 \text{ mm}^2/m$, největší potřebné množství výztuže dle SCII je $2883 \text{ mm}^2/m$, je zbytečné konstrukci vyztužovat více, jedná se o extrém navíc ve směru osy y, kde je maximální návrhový moment 386,18 kNm/m, který by nám dle ručního výpočtu navržená výztuž pokryla.

Schéma vyztužení:

Základní rastr je pro dolní a horní povrch stejný: $\varnothing 12$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 754 \text{ mm}^2/m$

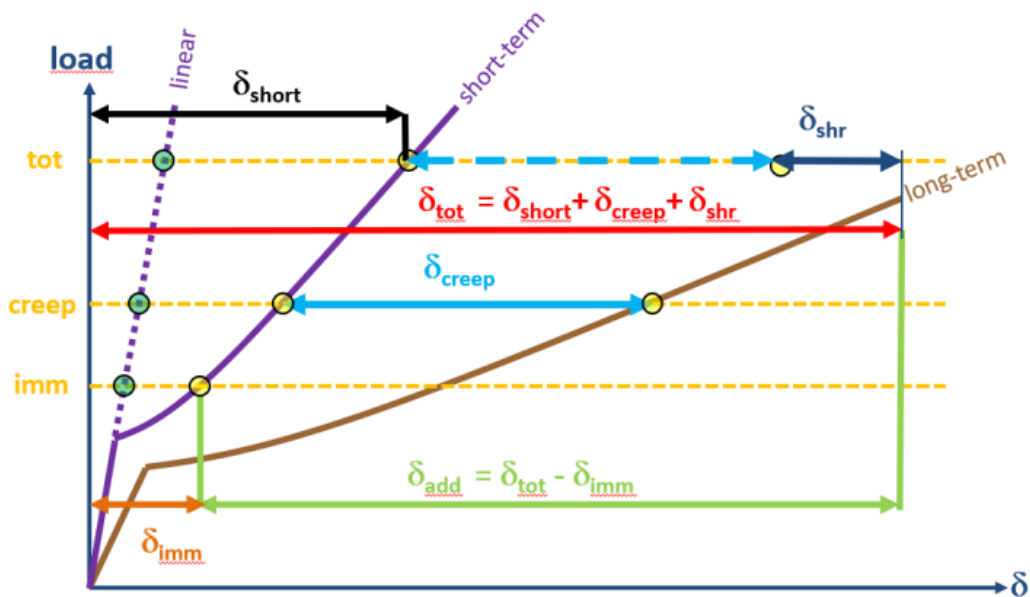
Příložky jsou pouze u horního povrchu: $\varnothing 16$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 1340 \text{ mm}^2/m$, $\varnothing 20$ á 150 mm, $A_{s,prov} = 2094 \text{ mm}^2/m$



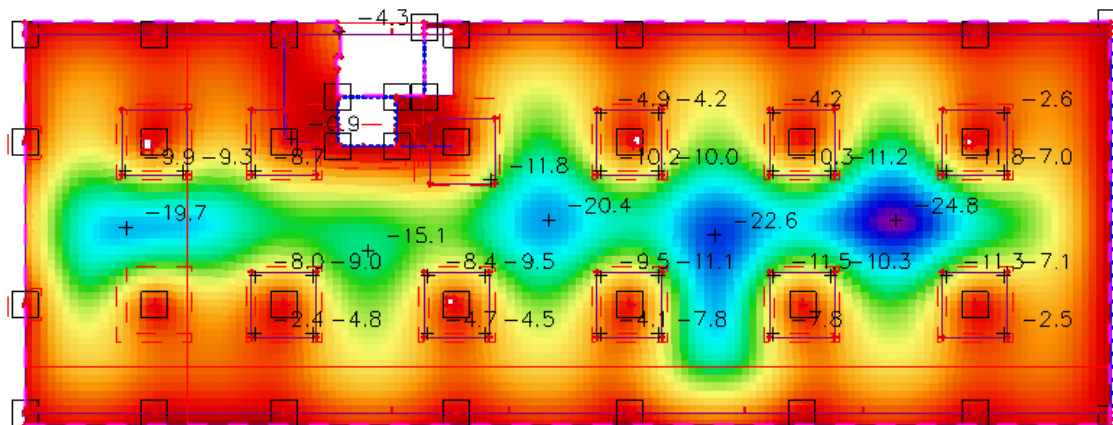
Obrázek 6.15: Schéma vyztužení konstrukce

6.2 Průhyb

Po vyztužení konstrukce následuje srovnání průhybů dle modelů EN 1, B3 a EN 2. Model EN 1m není použitý z důvodu nízké třídy betonu C25/30, pro kterou není doporučeno tento model použít. V Tabulka 6.1 jsou porovnány také jednotlivé složky celkového průhybu z jednotlivých předpisů, kdy jak součinitel dotvarování, tak poměrné přetvoření od smršťování bylo vypočítáno pro danou konstrukci dle daného předpisu a následně tyto hodnoty vloženy ručně do programu Scia pro výpočet celkového průhybu. Princip určení celkového průhybu je dle Obrázek 6.16. Jsou porovnány také hodnoty s minimální nutnou výztuží dle výpočetního programu (výztuž odpovídající 100% využití průřezu) a průhyb s vloženou uživatelskou výztuží (skutečně navržená výztuž). Následně bude pro kontrolu vypočítán a porovnán průhyb s vlivem trhlin, výztuže a dotvarování (bez vlivu smršťování) podle ručního zjednodušeného způsobu. Průhyb je srovnáván v místě s jeho největší hodnotou viz Obrázek 6.17 (místo s průhybem 24,8 mm).



Obrázek 6.16: Určení průhybu [12]



Obrázek 6.17: Normalizovaný průhyb s uvažováním nutné výztuže dle EN 1

Tabulka 6.1: Hodnoty průhybů

VÝZTUŽ NUTNÁ	φ (50 let)	$\epsilon \cdot 10^{-4}$ (50 let)	U_{total} [mm]	U_{creep} [mm]	U_{shr} [mm]	U_{short} [mm]	U_{lin} [mm]
EN 1	2,493	-4,278	24,8	11,4	4,7	9,2	4,8
B3	3,172	-5,190	27,8	13,2	5,8	9,2	4,8
EN 2	2,696	-6,117	27,1	11,9	6,5	9,2	4,8
VÝZTUŽ UŽIVATELSKÁ							
EN 1	2,493	-4,278	19,3	8	3,4	7,8	4,8
B3	3,172	-5,190	20,9	9,3	3,9	7,8	4,8
EN 2	2,696	-6,117	20,2	8,4	4,1	7,8	4,8

Z porovnání je patrné, že ačkoliv odchylky součinitele dotvarování a poměrného smršťování od vysychání stanovené v analytické části práce jsou v některých případech podstatné, dopad na výsledné průhyby je – alespoň v případě studované konstrukce – poměrně malý. Porovnáme-li celkové průhyby se skutečně navrženou (uživatelskou) výztuží podle jednotlivých modelů, jsou rozdíly menší než 5 %.

6.2.1 Ověření průhybu

Ověření průhybu je pro předpis EN 1. Z kvazistálé kombinace byl zjištěný moment v místě maximálního průhybu 34,78 kNm/m. Jelikož je tento moment menší než kritický moment na mezi vzniku trhlin M_{cr} , bude pro posouzení vzniku trhlin (a tedy poklesu tuhosti průřezu) použit moment z charakteristické kombinace. Při něm již trhliny vznikají, viz Obrázek 6.18, a pro výpočet velikosti průhybu od kvazistálé kombinace je tedy nutno s přítomností trhlin počítat. Velikost rozdělovacího součinitele ζ bude stanovena jako 0,5 dle doporučení z publikace [13]

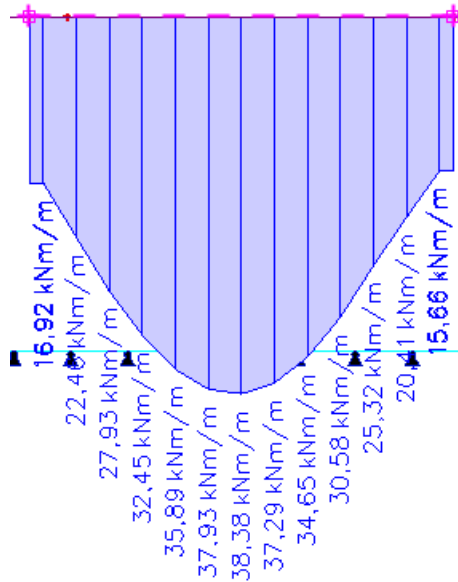
Ověření velikosti průhybu bylo provedeno pro kvazistálou kombinaci ručním výpočtem na základě hodnoty lineárního průhybu z programu, která byla přenásobena poměrem tuhostí nepotrhaného betonového průřezu a železobetonového průřezu po vzniku trhlin, viz Obrázek 6.20. Výsledkem je velká odchylka oproti výpočtu z programu Scia pro EN 1 s vloženou uživatelskou výztuží. Z ručního výpočtu, který neuvažuje vliv smršťování, vyšel průhyb 30,5 mm, zatímco z programu Scia bez smršťování 15,9 mm. Důvody tohoto rozdílu jsou následující:

- Geometrická nepravidelnost konstrukce – hlavice nad sloupy mají vyšší výšku průřezu a větší vyztužení než průřez v polovině rozpětí. Program s těmito vlivy na tuhost uvažuje, ruční výpočet však předpokládá konstantní rozložení tuhosti a křivosti po celé délce prvku.
- Odlišné započítání vlivu trhlin – ruční výpočet předpokládá, že ve všech průřezích dochází ke vzniku trhlin stejně, jako v kritickém průřezu uprostřed rozpětí. Výpočet v programu posuzuje vznik trhlin v každém průřezu pro konkrétní hodnoty působících momentů a snížení tuhosti vlivem trhlin tedy uvažuje pouze na malé části plochy desky (tam, kde je skutečně působící moment od charakteristické kombinace větší, než kritický moment na mezi vzniku trhlin).

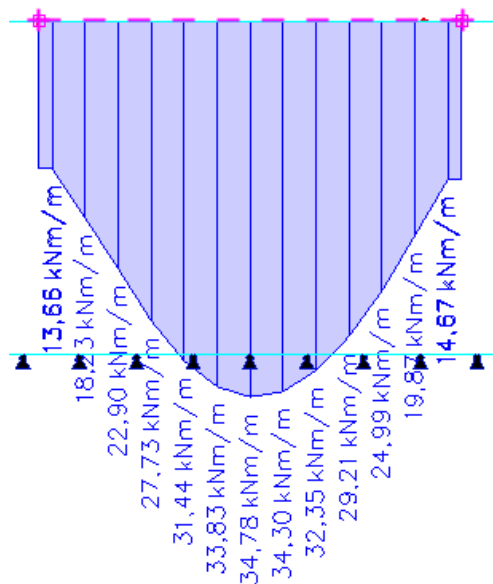
Tyto vlivy je v ručním výpočtu prakticky nemožné přesně zohlednit. Můžeme však stanovit ručním výpočtem ještě dlouhodobý průhyb za předpokladu, že by nikde na konstrukci nedošlo ke vzniku trhlin. V získaném výsledku pak budou zohledněny vlivy dotvarování a výztuže pro nepotrhaný průřez (budeme uvažovat průřezové charakteristiky vyztuženého průřezu bez trhlin, rozdělovací součinitel ζ bude mít hodnotu 0).

Tímto postupem stanovíme velikost průhybu 14 mm. Známe tedy krajní meze, mezi kterými by měl skutečný průhyb ležet. Při stejném potrhání všech průřezů desky by byla odpovídající hodnota průhybu 30,5 mm. Pokud by nedošlo k potrhání žádného z průřezu, byla by odpovídající hodnota 14 mm.

Programem stanovená hodnota 15,9 mm leží v rámci těchto mezí. Jelikož k překročení hodnoty kritického momentu, a tedy ke vzniku trhlin, dochází pouze na relativně malé části plochy desky, je výrazně blíže hodnotě pro konstrukci zcela bez trhlin. Výsledek stanovený programem lze tedy považovat za realistický.



Obrázek 6.18: Moment od charakteristické kombinace



Obrázek 6.19: Moment od kvazistálé kombinace

Materiály		Posouzení vzniku trhlin		
f_{ck}	25 MPa	A_l	289729,032 mm ²	
f_{yk}	500 MPa	a_l	140 mm	
f_{ctm}	2,6 MPa	I_l	1,93E+09 mm ⁴	
E_{cm}	31 GPa	M_{cr}	3,59E+01 kNm/m	Trhliny vzniknou od kvazistálé kombinace
E_s	200 GPa			
α_e	6,4516129 -	Průřez bez trhlin		
$\alpha_{e,lt}$	22,5354839 -	A_l	313983,51 mm ²	
konstrukce		a_l	140 mm	
h	280 mm	I_l	2,20E+09 mm ⁴	
b	1000 mm	M_{cr}	4,08E+01 kNm/m	
c	30 mm	Průřez s trhlinami		
ϕ_{s1}	12 mm	X_{cr}	63,2145716 mm	
ϕ_{s2}	12 mm	I_{II}	6,52E+08 mm ⁴	
d	244 mm	β	0,5	
d_2	36 mm	efektivní modul pružnosti betonu		
A_{s1}	754 mm ²	E_{ceff}	8,87489264 GPa	
A_{s2}	754 mm ²			
A_c	280000 mm ²	Míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami		$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{e,qp}} \right)^2$
a_c	140 mm	ζ	5,00E-01	
I_c	1829333333 mm ⁴	Vážený poměr momentů setrvačnosti		$I_{lt} = \frac{I_{I,ef} \times I_{II,ef}}{\zeta \times I_{I,ef} + (1 - \zeta) \times I_{II,ef}}$
ϕ (50 let)	2,493 -	I_{lt}	1,01E+09 mm ⁴	
$U_{lin} (f_{1,qp})$	4,8 mm	Průhyb s vlivem dotvarování		
$M, char$	38,38 kNm/m	$f_{lt,qp}$	3,05E+01 mm	$f_{lt,qp} = f_{l,qp} \times \frac{E_{cm} \times I_c}{E_{c,ef} \times I_{lt}}$
$M, kvazi$	34,78 kNm/m			

Obrázek 6.20: Ruční kontrola průhybu – výpočet s vlivem trhlin

Materiály		Posouzení vzniku trhlin		
f_{ck}	25 MPa	A_l	289729,032 mm ²	
f_{yk}	500 MPa	a_l	140 mm	
f_{ctm}	2,6 MPa	I_l	1,93E+09 mm ⁴	
E_{cm}	31 GPa	M_{cr}	3,59E+01 kNm/m	
E_s	200 GPa			
α_e	6,4516129 -	Průřez bez trhlin		
$\alpha_{e,lt}$	22,5354839 -	A_l	313983,51 mm ²	
konstrukce		a_l	140 mm	
h	280 mm	I_l	2,20E+09 mm ⁴	
b	1000 mm	M_{cr}	4,08E+01 kNm/m	
c	30 mm	Průřez s trhlinami		
ϕ_{s1}	12 mm	X_{cr}	63,2145716 mm	
ϕ_{s2}	12 mm	I_{II}	6,52E+08 mm ⁴	
d	244 mm	β	0,5	
d_2	36 mm	efektivní modul pružnosti betonu		
A_{s1}	754 mm ²	E_{ceff}	8,87489264 GPa	
A_{s2}	754 mm ²			
A_c	280000 mm ²	Míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami		$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{e,qp}} \right)^2$
a_c	140 mm	ζ	0,00E+00	
I_c	1829333333 mm ⁴	Vážený poměr momentů setrvačnosti		$I_{lt} = \frac{I_{I,ef} \times I_{II,ef}}{\zeta \times I_{I,ef} + (1 - \zeta) \times I_{II,ef}}$
ϕ (50 let)	2,493 -	I_{lt}	2,20E+09 mm ⁴	
$U_{lin} (f_{1,qp})$	4,8 mm	Průhyb s vlivem dotvarování		
$M, char$	38,38 kNm/m	$f_{lt,qp}$	1,40E+01 mm	$f_{lt,qp} = f_{l,qp} \times \frac{E_{cm} \times I_c}{E_{c,ef} \times I_{lt}}$
$M, kvazi$	34,78 kNm/m			

Obrázek 6.21: Ruční kontrola průhybu - výpočet bez vlivu trhlin

7 Závěr

Změny v nové generaci Eurokódu EN 2 ve výpočtu součinitele dotvarování a poměrného přetvoření od smršťování jsou převzaty z velké části z předpisu Model Code 2010. Oproti EN 1 je v nové verzi řada změn, například zavedení součinitele K_E pro výpočet sečnového modulu pružnosti, který již nelze vyčíst z tabulek, zavedení nové vyšší pevnostní třídy betonu C100/115, zavedení koncepce referenčního času, nebo nahrazení tříd cementu třídami vývoje pevnosti betonu. Změny se přizpůsobují modernějšímu složení betonové směsi, kdy se ve větším měřítku z důvodu technologických možností a vývoje používají různé přísady a příměsi do betonu pro zlepšení jeho vlastností. Další podstatnou změnou týkající se této verze je rozdělení dotvarování na složky základního dotvarování a dotvarování při vysychání, kdy v EN 1 toto rozdělení není k dispozici.

Ze srovnávací studie jsou patrné rozdíly v postupu výpočtu součinitele dotvarování, a především poměrného přetvoření od smršťování. Změny v hodnotách předpisu EN 2 u součinitele dotvarování oproti EN 1 v čase 50 let jsou okolo 10 %, kdy vyšších hodnot dosahuje právě nová verze EN 2. Hlavní rozdíl v tomto porovnání je ovšem u poměrného přetvoření od smršťování, kde dochází u nové verze k výrazně vyšším hodnotám oproti EN 1, průměrně okolo 30 %. Další změnou je u EN 2 pokračující růst jak součinitele dotvarování, tak poměrného přetvoření od smršťování i po 50 letech, zatímco EN 1 již vykazuje prakticky nulový nárůst.

Model EN 1m a model B3 se již více odlišují, u modelu B3 má velkou roli na výsledek složení betonové směsi, které je třeba zadat vždy specifické pro danou pevnostní třídu betonu, jelikož na konečné výsledky má nemá pevnostní třída betonu velký vliv, ale tento vliv je zastoupený v jednotlivém množství složek betonové směsi. EN 2 neumožňuje zohlednit použití křemičitého úletu jako je to možné v EN 1m.

Na konstrukci zvolené pro porovnání celkových průhybů je ovšem patrné, že změny v nové verzi EN 2 nemají výrazný vliv na velikost celkového průhybu konstrukce, alespoň ne na zvolené typické konstrukci lokálně podepřené desky v této diplomové práci. EN 2 vykazuje vyšší průhyb o cca 1 mm oproti EN 1, jedná se tedy přibližně o 5% nárůst. Ačkoli jsou změny ve výpočtu součinitele dotvarování, tak především poměrného přetvoření od smršťování viditelné a mají vliv na výsledné hodnoty, finální vliv na celkový průhyb konstrukce již není tolik zásadní.

8 Literatura

- [1] ACKER, Paul a ULM, Franz-Josef. Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. *Nuclear Engineering and Design*. 2000, roč, 143-158.
- [2] Hilsdorf a Müller. Structural Concrete, Textbook on Behaviour, Design and Performance. *Fib Bulletin*. 1996, Sv. 1, July.
- [3] Bažant, Z.P.; Havlásek, P. a Jirásek, M. *Computational Modelling of concrete Structures*. London: Taylor and Francis Group, 2014. ISBN 978-1-138-00145-9.
- [4] Havlásek, Ing. Petr. *Creep and Shrinkage of Concrete Subjected to Variable Environmental Conditions*. disertační. Praha: ČVUT Praha, 2014.
- [5] Havlásek, Petr. *Modely pro dotvarování a smršťování betonu*. Diplomová. Praha: ČVUT Praha, 2009.
- [6] Bažant, Zdeněk; Asce, F.; Cusatis, Gianluca a Cedolin, Luigi. Temperature Effect on Concrete Creep Modeled by Microprestess-Solidification Theory. *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS*. 2004, s. 690-696
- [7] prEN 1992-1-1:2023.
- [8] Müller, H.S., Urrea, F.A.: Background documents to subsections 5.1.1. – 5.1.5 prEN. 2023.
- [9] Müller, H.S., Urrea, F.A.: Background documents to Annex B prEN. 2023.
- [10] Soška, Jan a Vráblík, Lukáš. Porovnání matematických modelů pro výpočet smršťování a dotvarování betonu. *Věda a výzkum*. 2011, roč. 2011, č. 6, s. 58-65.

- [11] online. In: Statikon. 2019. Dostupné z: <https://www.statikon.cz/cs/nase-projekty/2019-adm-a-gar-veleslavin.html>. [cit. 2024-01-02].
- [12] online. *Scia Engineer*. 2021, roč. -, č. -, s. 303. Dostupné z: [https://downloads.scia.net/support/sciaengineer/manuals/MAN%20\[CZ\]%20SCIA21.0%20-%20Advanced%20Concept%20Training%20Concrete.pdf](https://downloads.scia.net/support/sciaengineer/manuals/MAN%20[CZ]%20SCIA21.0%20-%20Advanced%20Concept%20Training%20Concrete.pdf). [cit. 2024-01-02].
- [13] Procházka, Jaroslav; Kohoutková, Alena a Vašková, Jitka. *Navrhování železobetonových konstrukcí: příklady a postupy*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2021. ISBN 978-800-1069-165.
- [14] Bažant, Zdeněk P. a Baweja S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. *Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage - Structural Design Effects*. 2000, p. 1–83.
- [15] ČSN EN 1992-1-1. Navrhování betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2021
- [16] ČSN EN 1992-2., *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady*. ÚNMZ, Praha, 2007.
- [17] K.W. Nasser a A.M. Neville. Creep of concrete at elevated temperatures. *ACI Journal*. 1965, roč. 1965.
- [18] Nilson, A. H., D. Darwin a Ch.W. Dolan. *Design of concrete structures*. 14th ed. New York: McGraw-Hill, c2010. McGraw-Hill higher education. ISBN 978-0-07-329349-3.
- [19] *FIB model code for concrete structures 2010*. Berlin: Ernst, c2013. ISBN 978-3-433-03061-5.

