

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

NUMERICKÉ SIMULACE OBJEMOVÝCH ZMĚN VYBRANÝCH CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

NUMERICAL SIMULATION OF VOLUME CHANGES OF SELECTED CEMENTITIOUS
COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

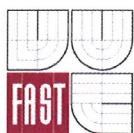
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAGDALÉNA DRBUŠKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK KERŠNER, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Magdaléna Drbušková
Název	Numerické simulace objemových změn vybraných cementových kompozitů
Vedoucí bakalářské práce	doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
Specialista, konzultant	Ing. Petr Frantík, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, 2006.

COLLEPARDI, M. Moderní beton. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2009.

Další podklady podle pokynů vedoucího práce.

Zásady pro vypracování

Studium doporučených podkladů a souvisejících materiálů, průzkum webových zdrojů, orientace v problematice smršťování a dotvarování cementových kompozitů, vyhodnocení výpočetně i experimentálně zjištěných objemových změn těles z vybraných betonů, diskuse výsledků, závěrečné shrnutí.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací.



.....
doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
vedoucí bakalářské práce

Abstrakt CZ

Tato práce se zabývá numerickými simulacemi objemových změn vybraných cementových kompozitů. Dělí se na dvě části, teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou popsány objemové změny, které se vyskytují u betonových konstrukcí. Praktická část se zaměřuje především na počáteční stádia smršťování těles z dvousložkového cementového kompozitu (cementová pasta + kamenivo) a jejich numerickou simulaci. K analýze byly využívány počítačové aplikace SpatiDist a FyDiK 2D. Pro porovnání bylo simulováno smrštění zkušebních těles bez a se zářezem. Výsledkem práce je parametrická studie zohledňující vliv druhu kameniva a stupně smrštění cementového kamene.

Klíčová slova

beton, objemové změny, smršťování, dotvarování, numerická simulace, software SpatiDist, software FyDiK 2D, parametrická studie

Abstrakt EN

This thesis deals with volume changes of selected cementitious composites. They are divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical section describes the volume changes that occur in concrete structures. The practical part is focused primarily on the initial stage of shrinkage specimens of two-component cement composite (cement paste + aggregate) and its numerical simulation. For analysis were used SpatiDist and FyDiK 2D computer applications. It was simulating shrinkage of specimens with and without notch to compare. The result is a parametric study which reflects the influence of type and size of grain aggregate and shrinkage degree of cementitious paste.

Keywords

concrete, volume changes, shrinkage, creep, numerical simulations, software SpatiDist, software FyDiK 2D, parametric study

Bibliografická citace VŠKP

DRBUŠKOVÁ, M. Numerická simulace objemových změn vybraných cementových kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, 2012. 46 s., 10 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., specialista/konzultant Ing. Petr Frantík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
podpis autorky

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat panu doc. Ing. Zbyňku Keršnerovi, CSc, za odborné vedení práce, jeho cenné rady, připomínky a trpělivost. Nemalý dík patří rovněž panu Ing. Petru Frantíkovi, Ph.D. za pomoc při využívání počítačových programů potřebných ke zpracování této práce. Také děkuji všem svým blízkým za psychickou podporu a vytvoření pracovní atmosféry.

Práce vznikla za podpory projektu GA ČR P104/10/2359 „*Přetvárné vlastnosti betonů vyšších pevností*“.

Obsah

1 Úvod	8
2 Smršťování a nabývání betonu	9
2.1 Smrštění vysycháním.....	10
2.2 Plastické smrštění.....	10
2.3 Autogenní smrštění.....	11
2.4 Karbonatační smrštění.....	12
2.5 Redukce smrštění	12
3 Dotvarování	15
3.1 Činitele ovlivňující dotvarování	16
4 Konstrukce ovlivněné smršťováním a dotvarováním	18
5 Problematika smršťování a dotvarování v normě	19
5.1 Smršťování v ČSN EN 1992-1-1.....	19
5.2 Dotvarování v ČSN EN 1992-1-1.....	22
6 Vliv teploty	24
7 Pilotní studie – motivace práce	25
8 Používaný software	26
8 Používaný software	26
8.1 Aplikace SpatiDist.....	26
8.2 Aplikace FyDiK 2D	26
9 Vyšetřovaná tělesa	28
9.1 Geometrie	28
9.2 Materiál	29
10 Získání a zpracování výsledných dat	31
11 Vyhodnocení výsledných dat.....	34
11.1 Parametrická studie – stupeň smrštění.....	34
11.2 Parametrická studie – druh kameniva.....	35
11.3 Dílčí závěry	36
10 Závěr	41
Seznam použitých zdrojů	42
Seznam použitých zkratk a symbolů	44
Seznam příloh	46

1 Úvod

První zmínky o kompozitech typu betonu nalézáme již v antice. I v dnešní době, kdy je produkována řada moderních materiálů, je beton díky svým mechanickým, fyzikálním, chemickým a strukturálním vlastnostem nejrozšířenějším konstrukčním materiálem používaným na celou řadu staveb.

Jedná se o kompozitní materiál primárně sestávající z plniva a pojiva. Pojiva mohou být různá, nejčastěji se však jedná o cementové kompozity. Pojiva jsou pak na bázi portlandského slinku. Teprve jejich hydratací však získává beton své konečné vlastnosti. Na výsledné kvalitě materiálu se také podílí mnoho dalších vlivů souvisejících s výrobou, dopravou, ukládáním, hutněním, ošetřováním a zráním betonu.

Jedním z faktorů, na které je třeba se při návrhu a realizaci betonových prvků a konstrukcí zaměřit, jsou objemové změny. Jedná se především o smršťování, nabývání (bobtnání), dotvarování a o teplotní objemové změny. V důsledku těchto jevů může docházet ke vzniku trhlin, které by se po zatížení mohly začít rozšiřovat a zvětšovat a betonovou konstrukci znehodnotit.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá numerickou simulací smrštění vybraných cementových kompozitů. Simulace je prováděna u těles bez zářezu a se zářezem, kde se mění stupeň smrštění cementové pasty a druh kameniva.

Cílem je ověřit správnost zvolených postupů při simulaci smrštění cementových kompozitů a vytvořit parametrickou studii, která zahrnuje vliv druhu kameniva a stupně smrštění na výsledné přetvoření betonových těles.

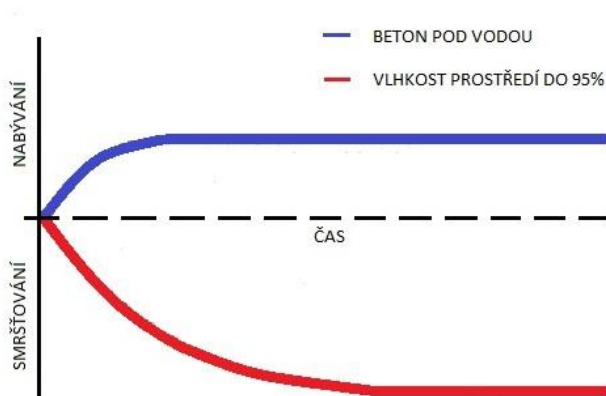
2 Smršťování a nabývání betonu

Colleparidi (2009, s. 207) tvrdí, že Powers, Brownyard (1947), Brunauer (1972), Wittmann (1977) nejvíce přispěli k výzkumu smršťování. Na základě poznatků těchto autorů se domnívá, že smršťování souvisí s molekulami vody, které jsou situovány mezi zrny hydratujícího cementu. Důležité v tomto procesu je také povrchové napětí a kapilární kondenzace. Oproti tomu, dle Feldmannova a Seredova modelu, hrají hlavní roli při smršťování molekuly vody nacházející se ve struktuře C-S-H gelu.

Rozlišujeme čtyři typy smrštění, které mohou nastat v různých fázích zrání betonu:

- smrštění vysycháním,
- plastické smrštění,
- autogenní smrštění,
- smrštění způsobené karbonatací.

Oproti smrštění vysycháním může beton nabývat (bobtnat) – materiál vodu přijímá. Tento jev nastává v případě, že se beton nachází trvale pod vodou (viz Obr. 1). Dle Powerse (1959, s. 211) totiž molekuly vody působí proti kohezním silám a dostávají se do struktury C-S-H gelu, čímž dochází k expanzi. Nabývání však v běžných případech dosahuje zanedbatelných hodnot a především napětí způsobené vazbami mezi betonem a výztuží, či jinými překážkami je mnohem menší než pevnost betonu. Proto zpravidla nedochází k porušení betonu.



Obr. 1 Vliv relativní vlhkosti prostředí na objemové změny betonu podle Colleparidiho (2009).

2.1 Smrštění vysycháním

Tento typ smrštění souvisí s výměnou vody mezi betonem a okolním prostředím a závisí na mnoha okolnostech. Například na vlhkosti prostředí, době, po kterou je beton vystaven prostředí s nízkou vlhkostí, dále na složení betonu, na množství výztuže a tvaru betonových prvků.

Každá složka betonu má na smrštění vysycháním jiný vliv. Podle Collepardiho (2009, s. 209) voda, která neobsahuje žádné škodliviny, na smrštění vliv nemá. Co se týká cementu, může smrštění ovlivnit obsah regulátoru tuhnutí. Výrazněji toto smrštění může také ovlivnit plnivo. Dále může být smrštění ovlivněno superplastifikátory, provzdušňovacími přísadami, stálou ochranou betonových konstrukcí atd. (podrobněji rozebráno v kapitole 2.5 Redukce smrštění).

2.2 Plastické smrštění

Jedná se o smrštění způsobené odpařováním vody z ještě nezatvrdlého betonu v plastickém stavu. Kromě odpařování může být voda z betonu odvedena v důsledku kapilárního sání starým, již suchým betonem (základy, podkladní vrstva apod.).

Existuje řada faktorů, které smrštění redukuje, nebo k němu vůbec nedochází:

- na povrch může vystoupit voda v důsledku rozmísení betonové směsi,
- vliv ocelové výztuže,
- vliv tření mezi betonem a podkladem.

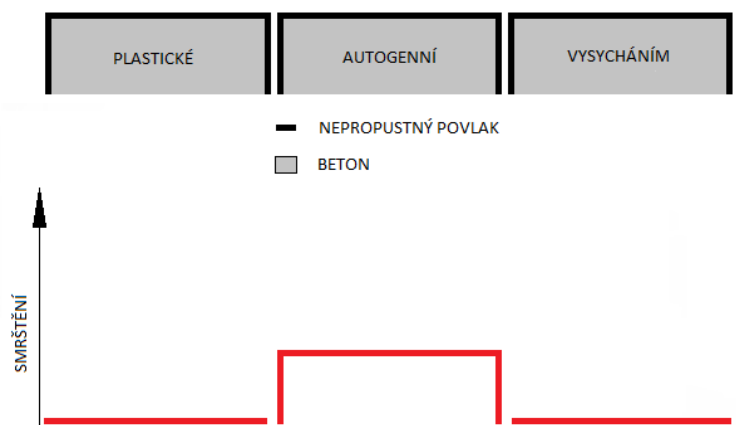
Plastické smrštění nastává v prvních několika hodinách po uložení a při působení těchto vlivů:

- větru,
- vysoké teploty,
- beton je vystaven prostředí s relativní vlhkostí vzduchu menší než 95%.

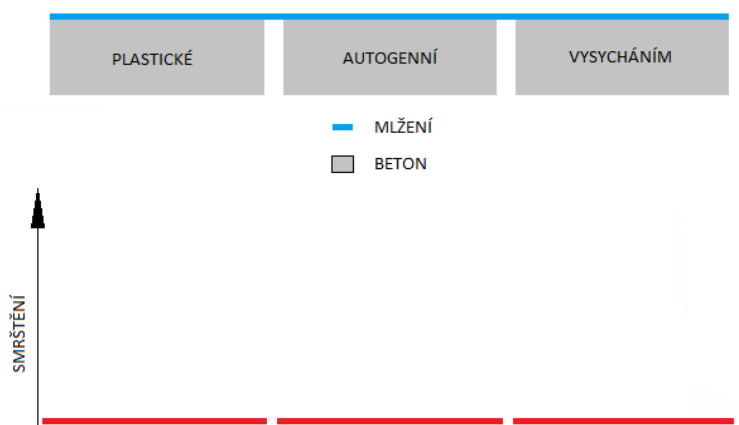
Výsledkem je tvorba mikrotrhlin, protože tahová pevnost betonu (f_t) je menší než tahové napětí (σ_t). Vzniku mikrotrhlin lze zabránit dvěma způsoby. Prvním je ochrana povrchu betonu. Alternativou je, že do betonu přidáme např. polymerní mikrovlákná.

2.3 Autogenní smrštění

K autogennímu smrštění dochází, pokud je beton izolován od vnějšího prostředí. Představme si, že je betonový prvek opatřen nepropustnou folií (ošetřovací folie). Nedochozí k výměně vody mezi betonem a okolím. Za těchto okolností tedy nevzniká plastické smrštění, ani smrštění vysycháním (viz Obr. 2 a 3). Objemovou změnu, která nastala, zapříčinilo autogenní smrštění. Dalo by se říct, že výsledný produkt reakce mezi cementem a vodou má menší objem než vstupní látky.



Obr. 2 Vliv nepropustného povlaku na smrštění podle Collepardiho (2009).



Obr. 3 Vliv ošetřování vodou na smrštění podle Collepardiho (2009).

U běžných betonů půjde většinou o zanedbatelnou položku. Autogenní smrštění však nabývá na důležitosti u vysokohodnotných betonů s nízkým vodním

součinitelem. V takovém případě může dosahovat stejných hodnot jako smrštění způsobené vysycháním.

Autogenní smrštění lze eliminovat vodním ošetřováním betonu nebo přidáním redukujících přísad.

2.4 Karbonatační smrštění

Pro úplnost lze uvést také tzv. karbonatační smrštění. Vyskytuje se na povrchu betonových konstrukcí, které přicházejí do kontaktu se vzduchem obsahujícím CO_2 . Vzniká v důsledku karbonatace cementového kamene v dlouhodobém časovém měřítku (roky).

2.5 Redukce smrštění

Smršťování je složitý proces, který ovlivňuje řada činitelů, proto je také možné jej docela dobře redukovat. V předchozích odstavcích jsou už naznačeny možnosti, jak lze tento jev ovlivnit. V této podkapitole jsou nejdůležitější faktory shrnuty a popsány podrobněji; jedná se o cement, vodu, kamenivo, přísady, výztuž a ochranu betonu.

Cement:

- použití speciálních cementů tzv. cementů s kompenzovaným smršťováním, rozpínavé, expanzní cementy;
- množství regulátoru tuhnutí.

U expanzních cementů smrštění redukuje rozpínavé složky, které na základě chemických reakcí zvětšují svůj objem. Při použití těchto cementů je nutné vodní ošetřování především po uložení a na začátku vytvrzování, kdy beton zvětšuje svůj objem. Důležité je poznamenat, že při užití rozpínavých cementů neodstraňujeme smršťování, pouze redukuje jeho negativní projev na konstrukci – snižuje se možnost tvorby smršťovacích trhlin.

Množství regulátoru tuhnutí smrštění ovlivňuje ve smyslu, že čím menší je dávka, tím menší může nastat smrštění.



Voda:

- chemické složení vody,
- vodní ošetřování,
- množství vody – vodní součinitel.

Chemicky čistá voda bez škodlivin na zmenšování objemu vliv nemá. Voda obsahující např. organické látky (cukry, tuky, rašelina apod.) nebo větší množství látek chemických (sírany, dusičnany, fosfáty apod.) ovlivňuje konečné vlastnosti betonu, což se projeví i na smršťování.

Vodní ošetřování betonu je důležité především v prvních fázích po odbednění. Eliminuje smršťování v důsledku odpařování vody z betonu.

Čím vyšší je vodní součinitel, tím větší je smrštění.

Kamenivo:

Může se stát, že kamenivo tvoří překážku pro hydratující cementová zrna, která pak nevyvíjejí odpovídající smrštění (hutnější kostra znamená větší eliminaci smrštění).

Přísady:

- protismršťující přísady,
- plastifikátory,
- provzdušňovací přísady,
- polymerní mikrovlákná.

Přidáním protismršťujících přísad dojde ke snížení povrchového napětí vody v kapilárách betonu (eliminace autogenního smrštění).

Přidáním plastifikátorů do betonu dosáhneme snížení množství záměsové vody. S tím souvisí zmenšení deformací v důsledku objemových změn.

Provzdušňovací přísady redukuje plastické smrštění. Mají schopnost během míchání vytvořit velké množství malých oddělených pórů. Tyto póry přerušují kapiláry v betonu, který tak má menší nasákavost. Provzdušňovací přísady také zlepšují zpracovatelnost betonu.



Přidáním mikrovláken – např. na bázi polymerů – do betonové směsi zvětšíme tahovou pevnost betonu (f_t).

Výztuž:

Vhodným bráněním zvyšování objemu v důsledku nabývání (výztuží, soudržností) se ve výztuži vyvíjí tahové napětí a v betonu roste napětí tlakové. To znamená, že místo tvorby smršťovacích trhlin dochází nejprve ke snížení tlakové rezervy. Čím vyšší je stupeň vyztužení, tím vyšší je tlaková rezerva.

Ochrana betonu:

V ideálním případě, při zabránění veškeré expanze betonu např. při betonáži v ocelové trubce, by se následné smrštění projevilo v minimální míře.

Dalším typem může být ochrana povrchu betonu rohožemi, membránami a postřiky (vyloučení smrštění vysycháním).

3 Dotvarování

Základní rozdíl mezi dotvarováním a smršťováním je, že dotvarování vyjadřuje přetvoření betonu vlivem dlouhodobého vnějšího zatížení, kdežto smrštění souvisí pouze s výměnou vody mezi betonem a okolním prostředím.

Šmerda, Křístek (1978) tvrdí: „Dotvarování má svůj původ v mikrostruktuře cementového tmelu, který spojuje kamenivo a zrna písku. Jeho základní hmotou je cementový gel, což je homogenní hmota s koloidním charakterem – obsahuje vodu chemicky vázanou, koloidní vodu (v pórech), a také volnou vodu (v kapilárách a makropórech). Dlouhotrvající napětí má za následek vytlačování vody, která není chemicky vázaná, z mikropórů do kapilár, z nichž se voda odpařuje. Vytlačování vody je dáno napětím v betonu, kdežto odpařování souvisí s podmínkami okolního prostředí. Ztráta vody vede k tomu, že se napětí přenáší postupně více z viskózního prostředí na pružnou kostru betonu a po odtížení se pak přetvoření z části vrátí“ (Šmerda, Křístek, 1978, s. 20).

Rozeznáváme dva druhy dotvarování:

- základní (čisté) dotvarování nastává v případě, že je zabráněno výměně vlhkosti s okolím. Velikost základního dotvarování závisí pouze na vnějším zatížení a vlastnostech betonu.

- dotvarování spojené s vysycháním ε_D je způsobeno napětím σ_c , které vytlačuje vodu z cementové pasty. Jeho hodnotu zjistíme jako rozdíl mezi celkovou deformací ε_T a součtem deformací $\varepsilon_e + \varepsilon_c + S$ (Colleparidi, 2009, s. 222).

Významným v této problematice je také fakt, že dotvarování úzce souvisí se smrštěním vysycháním. Mohou nastat tři situace:

1. beton je po odbednění vystaven suchému vzduchu – podléhá smrštění vysycháním S ;
2. beton je vystaven vlhkému vzduchu (relativní vlhkost je více než 95%) – nenastává smrštění vysycháním, ale ihned po odformování je vystaven tlakovému napětí σ_c – elastická deformace ε_e + základní dotvarování ε_c ;
3. beton je vystaven jak smrštění vysycháním, tak tlakovému namáhání σ_c .

3.1 Činitele ovlivňující dotvarování

Dotvarování betonu ovlivňuje celá řada faktorů, jako je zatížení, obklopující prostředí, rozměry a tvar konstrukce, cement a vodní součinitel, stáří materiálu a jeho ošetřování.

Působící zatížení

Dalo by se říct, že když není konstrukce zatížena, neexistuje ani dotvarování. Toto tvrzení však není pravdivé, protože konstrukce je zatížena vždy minimálně vlastní tíhou.

Zatížení tedy ovlivňuje dotvarování spíše z hlediska **velikosti** (minimální zatížení = minimální dotvarování – zanedbává se), **rychlosti zatěžování** (čím vyšší je rychlost zatěžování, tím větší je konečné dotvarování), **stupně zatížení** (do 40% pevnosti betonu je dotvarování úměrné napětí, vyšší napětí zvyšuje dotvarování), **délky** (čím větší je doba zatížení, tím větší je dotvarování) a **druhu zatížení** (dotvarování se sleduje v tahu, tlaku a v tahu za ohybu, tlakové nebo tahové napětí vyvolá zhruba stejné dotvarování při stejném stupni zatížení).

Prostředí

Relativní vlhkost prostředí výrazně ovlivňuje konečnou hodnotu dotvarování. V sušším prostředí je dotvarování velké, naopak ve vlhkém prostředí nebo pod vodou nabývá dotvarování malých hodnot, či může být dokonce nulové. Dotvarování je také ovlivněno změnami teplot. Zmenšuje se se snižováním teploty.

Rozměry a tvar prvku

Platí, že se zvětšující velikostí konstrukce se dotvarování zmenšuje. Podle Collepardiho (2009, s. 225) bylo prokázáno, že dotvarování silnějšího betonového sloupu (40×40 cm) bylo o 20% menší než u štíhlejšího (20×20 cm). Důležitou roli hraje také velikost povrchu ve styku s okolním prostředím.

Druh a obsah cementu, vodní součinitel

Vzájemný vztah dotvarování a druhu cementu je složitý, neboť závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech cementu a také na stupni hydratace



cementového tmelu (Šmerda, Křístek, 1978, s. 34). Použitím cementů vyšší pevnostní třídy dosáhneme menších hodnot dotvarování než při použití cementů třídy nižší. Jinými slovy: čím vyšší je v okamžiku zatěžování pevnost betonu, tím nižší je dotvarování (Collepari, 2009, s. 224). Dotvarování se snižuje s klesajícím množstvím cementu, předávkování způsobí dotvarování větší. Vyšší vodní součinitel způsobuje větší dotvarování. To může být sníženo použitím kameniva s větším zrnem a nižším stupněm zpracovatelnosti (Collepari, 2009, s. 225).

Stárí betonu

Betonové prvky dotvarují nejvíce během prvních dvou let (až 95%). Z toho tedy vyplývá, že čím později beton zatížíme, tím menší je dotvarování.

Ošetřování betonu

Ošetřování betonu prokazatelně snižuje dotvarování. Tepelné ošetřování betonu snižuje dotvarování ještě více, protože dochází k urychlování tvrdnutí betonu.

4 Konstrukce ovlivněné smršťováním a dotvarováním

Smršťování a dotvarování má negativní vliv na většinu konstrukcí. V této kapitole jsou zmíněny pouze ty nejvýznamnější.

V první řadě se jedná o vysoké a dlouhé stavby. U staveb vysokých je třeba uvažovat jak smršťování tak dotvarování, u dlouhých staveb je rozhodující smršťování.

Další typem konstrukce, kde se musí počítat s vlivy od smršťování a dotvarování, jsou předpjaté konstrukce (objemové změny jsou významným zdrojem ztráty předpětí).

U rámových konstrukcí dochází vlivem smršťování a dotvarování ke zvětšení průhybu u průvlaků. U sloupů namáhaných tlakem dochází k zmenšení výšky a rozšíření průřezu.

Negativní projevy lze pozorovat také na mostních konstrukcích, které mívají velká rozpětí a jsou tvořeny štíhlými konstrukčními prvky. Vzhledem ke specifickým výrobním postupům zde hraje hlavní roli čas, protože to je jeden z parametrů smršťování a dotvarování (letmá montáž, různě staré pilíře, přístavba k již funkčním konstrukcím apod.). Dalším důležitým faktorem je stupeň vyztužení, jelikož vliv vyztuže významně ovlivňuje finální přetvoření. U takto rozsáhlých konstrukcí jako jsou mosty, je záhodno navrhovat vyztuž nejen při horním a dolním okraji, ale i uvnitř průřezu (eliminace vzniku mikrotrhlin).

V neposlední řadě by se měla pozornost věnovat také nenosným konstrukcím, například obkladovým dílcům, které se mohou v důsledku smrštění a dotvarování nosných částí deformovat, či porušit.

5 Problematika smršťování a dotvarování v normě

Tato kapitola vychází ze současné platné normy ČSN EN 1992-1-1, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1 Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Následující vztahy jsou převzaty z výše uvedené technické normy.

Eurokód 2 uvádí, že smršťování a dotvarování betonu závisí na vlhkosti okolního prostředí, na složení betonu a rozměrech prvku. Kromě toho má na dotvarování vliv také zralost betonu v době prvního zatížení a závisí na velikosti zatížení a době trvání zatížení.

5.1 Smršťování v ČSN EN 1992-1-1

Celkové poměrné smrštění ϵ_{cs} zjistíme jako součet poměrného smrštění vysycháním ϵ_{cd} a poměrného autogenního smrštění ϵ_{ca} .

Smrštění vysycháním závisí na migraci vody ztvrdlým betonem, proto se vyvíjí pomalu.

Autogenní smrštění se projevuje především v prvních dnech po vybetonování, vzniká v průběhu tvrdnutí betonu. Poměrné autogenní smrštění je lineárně závislé na pevnosti betonu. Má být uvažováno zejména v případech, pokud se nový beton ukládá na beton již zatvrdlý.

Hodnota celkového poměrného smršťování je tedy (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 35):

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$$

Konečná hodnota poměrného **smršťování vysycháním** ϵ_{cd} (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 35):

$$\epsilon_{cd} = k_h \cdot \epsilon_{cd,0}$$

Hodnotu základního poměrného přetvoření od smrštění vysycháním $\epsilon_{cd,0}$ v ‰ lze stanovit z následující tabulky Tab.1.

*Tab. 1 Základní poměrné přetvoření v závislosti na relativní vlhkosti a třídě betonu
(tabulka 3.2 v ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 36).*

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relativní vlhkost (v %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

nebo ze vztahu (příloha B.2 ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 181):

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right],$$

kde: f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti v tlaku v MPa,

$f_{cmo} = 10$ MPa,

α_{ds1} je součinitel, který závisí na druhu cementu:

= 3 pro cement třídy S,

= 4 pro cement třídy N,

= 6 pro cement třídy R;

α_{ds2} je součinitel, který závisí na druhu cementu:

= 0,13 pro cement třídy S,

= 0,12 pro cement třídy N,

= 0,11 pro cement třídy R;

RH je relativní vlhkost okolního prostředí (%), $RH_0 = 100\%$.

Hodnotu součinitele k_h , který závisí na náhradním rozměru h_0 určíme z následující tabulky Tab. 2.

Tab. 2 Závislost součinitele k_h na náhradním rozměru h_0 (tabulka 3.3 v ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 36).

h_0 (mm)	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Náhradní rozměr prvku h_0 v mm se vypočte (viz příloha B.2 ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 181):

$$h_0 = 2A_c/u,$$

kde: A_c je plocha průřezu,

u je obvod prvku vystavený okolnímu prostředí.

Posledním činitelem je $\beta_{ds}(t, t_s)$ a vypočítá se ze vztahu (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 36):

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

kde: t je stáří betonu v uvažovaném okamžiku (ve dnech),

t_s je stáří betonu (ve dnech) na začátku smršťování vysycháním (nabýváním), obvykle je to na konci doby ošetřování betonu,

h_0 je náhradní rozměr průřezu.

Poměrné **autogenní smrštění** ϵ_{ca} je dáno vztahem (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 36):

$$\epsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty),$$

kde: $\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$,

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}),$$

t je dáno ve dnech.

5.2 Dotvarování v ČSN EN 1992-1-1

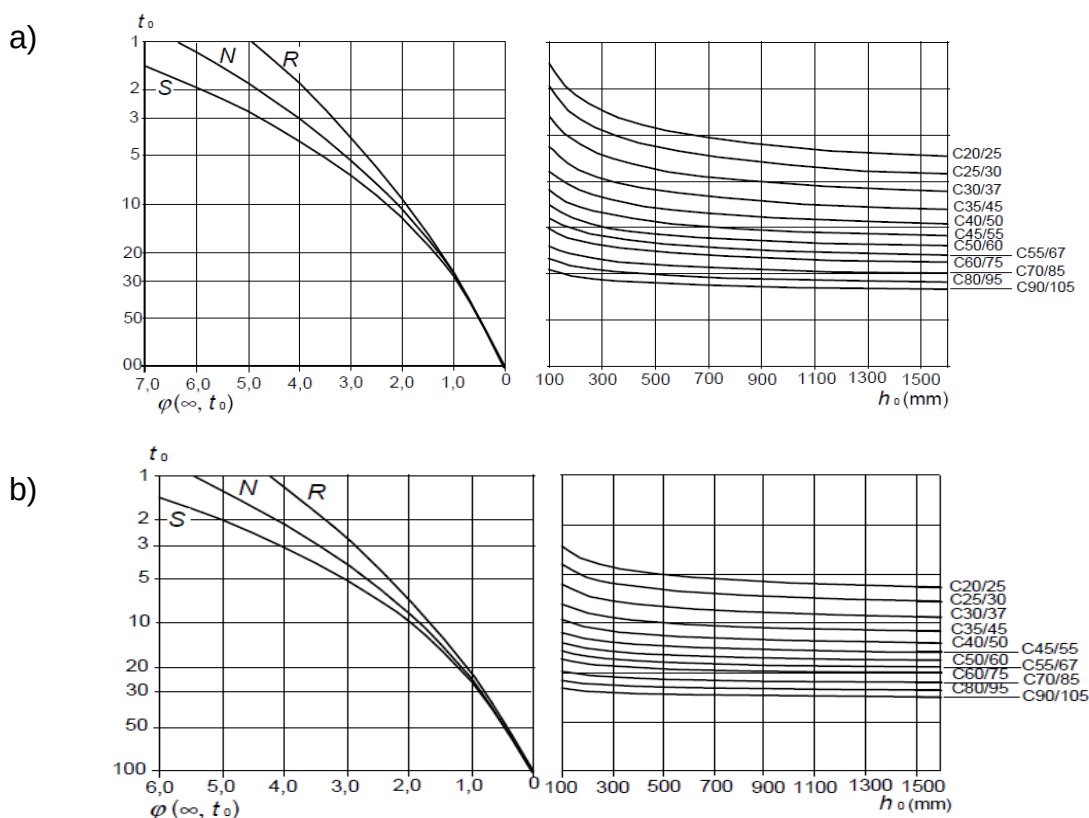
Poměrné přetvoření vyvolané dotvarováním betonu $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ v čase $t = \infty$ při konstantním napětí σ_c , působící ve stáří betonu t_0 je dáno vztahem (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 35):

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot (\sigma_c / E_c),$$

kde: $\varphi(\infty, t_0)$ je konečná hodnota součinitele dotvarování,

E_c je tečnový modul pružnosti obyčejného betonu při napětí tlakovém napětí v betonu $\sigma_c = 0$ a ve stáří 28 dní.

Součinitel dotvarování $\varphi(t, t_0)$ se vztahuje k tečovému modulu E_c , který lze uvažovat hodnotou $1,05 \cdot E_{cm}$. Pokud není vyžadována velká přesnost a za předpokladu, že beton není namáhán tlakovým napětím větším než $0,45 \cdot f_{ck}(t_0)$ ve stáří t_0 , tj. ve stáří betonu v okamžiku zatížení, může se hodnota stanovena obrázků Obr. 4a, Obr. 4b považovat za součinitel dotvarování.



Obr. 4a Vnitřní prostředí (RH 50%), 4b Vnější prostředí (RH 80%),
(obr. 3.1 ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 34).

Hodnoty uvedené na obrázku platí pro okolní teploty -40°C až $+40^{\circ}\text{C}$ a průměrnou relativní vlhkost mezi $\text{RH} = 40\%$ a $\text{RH} = 100\%$. Jsou použity následující značky:

$\varphi(\infty, t_0)$ je konečná hodnota součinitele dotvarování,

t_0 je stáří betonu v okamžiku zatížení ve dnech,

h_0 je náhradní rozměr průřezu,

S je třída cementu (CEM 32,5 N),

N je třída cementu (CEM 32,5 R, CEM 42,5 N),

R je třída cementu (CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R).

Jestliže je tlakové napětí betonu ve stáří t_0 větší než $0,45 \cdot f_{ck}(t_0)$, pak se má uvažovat nelineární dotvarování. Takové napětí může vzniknout díky předpětí, např. u prefabrikovaných prvků v úrovni předpínacích vložek. V těchto případech má být základní nelineární součinitel dotvarování stanoven ze vztahu (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 35):

$$\varphi_k(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \exp(1,5(k_\sigma - 0,45)),$$

kde: $\varphi_k(\infty, t_0)$ je základní nelineární součinitel dotvarování, který nahradí konečnou hodnotu součinitele dotvarování $\varphi(\infty, t_0)$;

k_σ je poměr tlakového napětí σ_c a průměrné pevnosti betonu v tlaku v momentě zatížení $f_{cm}(t_0)$.

POZNÁMKA: Pro výpočet součinitele dotvarování $\varphi(t, t_0)$, který zohledňuje průběh dotvarování v čase, lze použít přílohu B.1 v ČSN EN 1992-1-1, 2006, s.180–181.

6 Vliv teploty

S kolísáním teplot okolního prostředí beton mění svůj objem. Rostoucí teploty mají za následek roztahování, naopak snižování teploty vede ke zkracování betonových konstrukcí.

Změna délky se vypočítá ze vztahu:

$$\Delta l_t = \alpha \cdot l_t \cdot \Delta T,$$

kde: Δl_t je přírůstek (úbytek) délky konstrukce,

α je součinitel teplotní roztažnosti (pro beton 10^{-5} K^{-1}),

l_t je výchozí délka konstrukce,

ΔT je rozdíl změny teploty konstrukce.

Vytvoření dilatačních spár je účinným opatřením proti působení teplotních změn na betonové konstrukce. Rozdělení na jednotlivé části umožní jejich nezávislé přetváření. Vzdálenost dilatačních spár závisí na vyztužení konstrukce, její tloušťce a změnách teploty. U konstrukcí z prostého betonu se spáry provádějí ve vzdálenostech 3 až 25 m, u železobetonu ve vzdálenostech do 40 m (Abraham, 2009).

7 Pilotní studie – motivace práce

Bakalářská práce byla motivována pilotní studií (Štafa, Frantík, 2011), která se zabývala modelováním smršťování betonu pomocí pružinové sítě.

Numerický model byl tvořen pružinovou sítí sestavenou pomocí Deloneho triangulace. V každém vrcholu sítě byl situován hmotný bod. Vlastnosti těchto bodů a pružin byly určeny geometrií a materiálovými charakteristikami.

Smršťování bylo simulováno zkracováním délky pružin pomocí aplikace FyDiK (Frantík, 2011), která řeší úlohu dynamicky.

Modelovaný cementový kompozit byl uvažován jako dvousložkový: ztvrdlá cementová pasta a kamenivo (4 třídy velikosti zrn od 1 do 2 cm). Řídícím parametrem této studie byla relativní velikost smrštění (malé $3,5 \cdot 10^{-4}$, střední $3,31 \cdot 10^{-3}$, velké $3,23 \cdot 10^{-2}$).

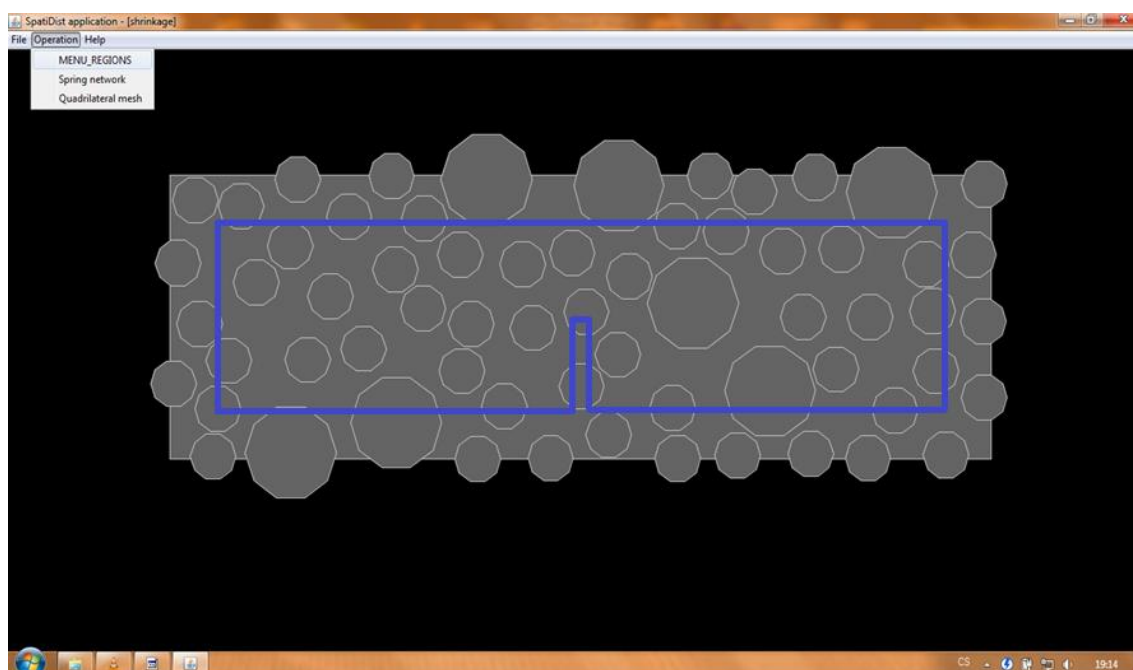
Výsledné hodnoty relativního smrštění naznačovaly, že rychlost smršťování vzorku, ve kterém je obsaženo kamenivo, je nižší než rychlost smršťování pouhé cementové pasty.

Rozdíl mezi následující praktickou částí této práce a výše specifikovanou pilotní studií je ten, že místo metody pružinové sítě je použita metoda konečných prvků. Samotná bakalářská práce se dále zaměřuje z výše popsaných objemových změn pouze na smršťování. Numerické modelování smršťování je prováděno na tělesech z dvousložkového kompozitu. Pro simulace je využíván softwar SpatiDist a FyDiK 2D (Frantík, 2011).

8 Používaný software

8.1 Aplikace SpatiDist

Program SpatiDist umožňuje definovat geometrii tělesa v prostoru a jeho materiálové vlastnosti. Je také schopen vytvořit materiálově nehomogenní prostředí, které je vhodné pro modelování lomu těles. Tato aplikace vygeneruje komplexní numerický model pro simulaci nelineárního chování těles. Data jsou ukládána do XML souboru, jehož obsah lze snadno vytvářet a editovat (Frantík, 2011). Ukázka uživatelského rozhraní tohoto programu – viz Obr. 5.



Obr. 5 Uživatelské rozhraní aplikace SpatiDist.

8.2 Aplikace FyDiK 2D

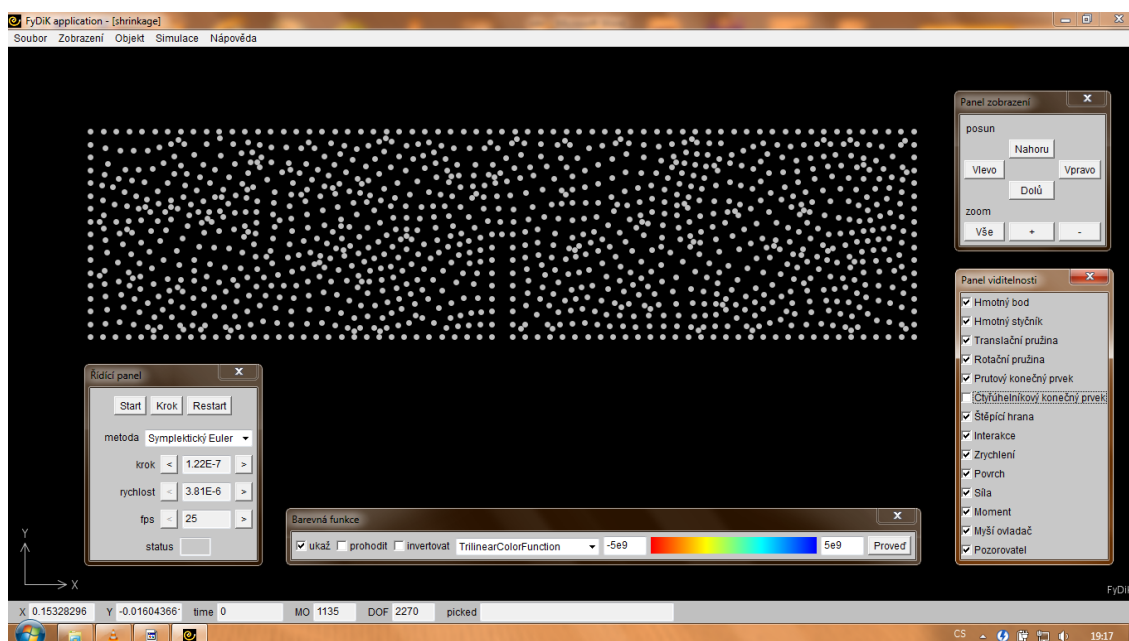
Aplikace FyDiK slouží k simulování nelineárních dynamických systémů, které zastupují modely mechanických konstrukcí a konstrukčních prvků. Pomocí simulací zjišťujeme, jak se dynamický systém vyvíjí z určitých počátečních podmínek v čase. Program se využívá pro výpočty kmitání konstrukcí, deformací, porušování materiálu, atd. Výhodou tohoto programu je možnost měnit nastavení hodnot parametrů v průběhu simulace.

K ovládání programu FyDiK slouží čtyři hlavní panely. První z nich je **panel zobrazení**, kde se nastavuje poloha a přiblížení či oddálení modelu vyšetřovaného tělesa.

Dalším ovládacím panelem je **panel viditelnosti**, který určuje zobrazování jednotlivých prvků modelu.

Následuje **panel barevných funkcí**. Vhodnou volbou barevné stupnice a nastavením odpovídajícího rozmezí docílíme dobrou viditelnost změn napětí v ploše tělesa.

Poslední je **řídící panel**. Pomocí něj lze simulaci spustit, zastavit, krokovat a restartovat. Může se také měnit metoda výpočtu, časový krok, rychlost simulace a počet zobrazovaných snímků. Nastavení kroku určuje, po jakých časových úsecích se budou zaznamenávat výsledná data. Příklad uživatelského rozhraní této aplikace - viz Obr. 6.



Obr. 6 Uživatelské rozhraní aplikace FyDiK 2D.

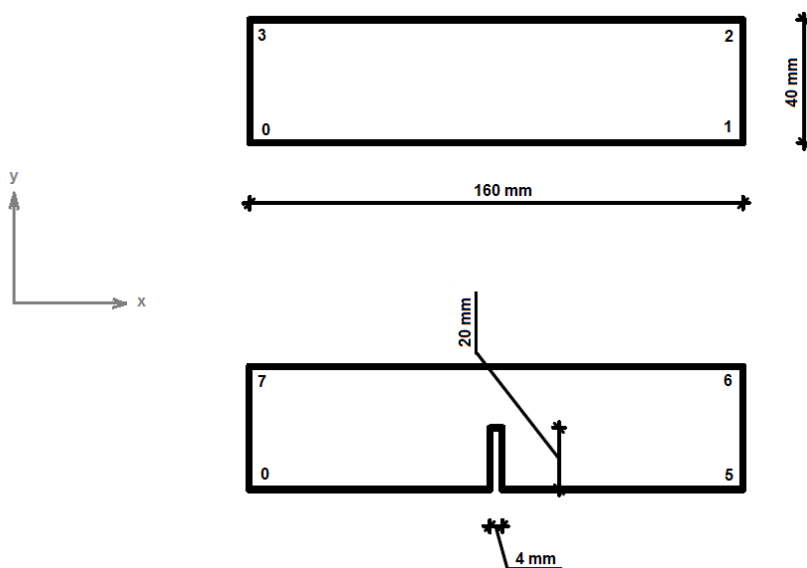
9 Vyšetřovaná tělesa

9.1 Geometrie

Před použitím programu SpatiDist je nejdříve nutné zadat do textového souboru rozměry a tvar vyšetřovaných těles pomocí souřadnic (viz Obr. 7). Počátek souřadného systému je zvolen v bodě 0 (viz Obr. 8). Čísla v rozích objektu vyjadřují označení těchto hmotných bodů v aplikaci FyDiK 2D a používají se při dalším zpracování dat. Vyšetřovány jsou dva vzorky o velikosti 160×40×40 mm. První vzorek je plný, druhý je opatřen koncentrátorem napětí typu zářez délky 20 mm a šířky 4 mm – viz Obr. 8.

```
<OBJECT class="cz.kitnarf.geom.Polygon2D" >
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0" y="0" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0.078" y="0" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0.078" y="0.02" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0.082" y="0.02" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0.082" y="0" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0.16" y="0" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0.16" y="0.04" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Point" x="0" y="0.04" />
</OBJECT>
```

Obr. 7 Ukázka výpisu ze vstupního textového souboru: souřadnice tělesa se zářezem.



Obr. 8 Souřadný systém a geometrie vyšetřovaných těles.

9.2 Materiál

Dalším krokem je zadání materiálových charakteristik. Jedná se o dvousložkový kompozit zkušebních vzorků: **matrice – ztvrdlá cementová pasta** a **inkluze – kamenivo**. Postupně je simulováno smrštění těles s různými druhy kameniva (žula, pískovec, čedič). V následující tabulce (Tab. 3) jsou uvedeny uvažované vlastnosti ztvrdlé cementové pasty a jednotlivých druhů kameniva. Pro ověření funkčnosti použité metody je také simulováno smrštění cementové pasty a kameniva s totožnými vlastnostmi.

Tab. 3 Materiálové charakteristiky jednotlivých druhů kameniva a ztvrdlé cementové pasty.

Vlastnosti		Cementový kámen	Žula	Pískovec	Čedič
Hustota	kg/m ³	2500	2700	2000	2900
Modul pružnosti	GPa	25	50	20	60
Tahová pevnost	MPa	3	20	10	20
Tlaková pevnost	MPa	30	200	90	220
Lomová energie	J/m ²	35	50	10	40

Následujícím zadávaným parametrem je stupeň smrštění cementové matrice. Pro kompozit složený z cementové pasty a žuly je simulováno 1%, 2%, 4% a 8% smrštění cementové pasty. Pro další kompozity se – vzhledem k ověřené linearitě výsledků – uvažuje pouze největší 8% smrštění (viz Obr. 9).

```
<OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.Container" >
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.LinearCohesiveFunction" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.ExpandableMaterial" density="2500"
    thickness="0.15" modulusE="25e9" tensileStrength="3e6"
    compressiveStrength="-30e6" fractureEnergy="35" name="cementPaste"
    cohesiveFunction="container[0]" expansion="0.92"/>
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.Material" density="2700"
    thickness="0.15" modulusE="50e9" tensileStrength="20e6"
    compressiveStrength="-200e6" fractureEnergy="50" name="grain"
    cohesiveFunction="container[0]"/>
</OBJECT>
```

Obr. 9 Ukázka výpisu ze vstupního textového souboru: materiálové charakteristiky a stupeň smrštění.

Do textového souboru se zadává také velikost zrn kameniva. Pro účely této studie jsou jednotně nastaveny dvě frakce o velikosti 10 a 20 mm (viz Obr. 10).

```
<OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.ConstantSizeDistribution" size="0.004" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.CircleDistributor" minDiameter="0.01"
    maxDiameter="0.02" groupCount="2" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatidistapplication.mesh.RegionGenerator"
    sizeDistribution="container[3]" regionDistributor="container[4]"
    material="container[2]"/>
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.DistanceDistributor" />
  <OBJECT class="cz.kitnarf.spatialdistribution.Template" >
  </OBJECT>
</OBJECT>
```

Obr. 10 Ukázka výpisu ze vstupního textového souboru: počet frakcí a velikost zrn kameniva.

10 Získání a zpracování výsledných dat

Vytvořený textový soubor se otevře v aplikaci SpatiDist a podle zadaných charakteristik se vygeneruje model (viz Obr. 5) pro použití metody konečných prvků a následné simulace v programu FyDiK 2D.

V další fázi se připravený model z programu SpatiDist otevře v aplikaci FyDiK. Nastaví se útlum vyšetřovaného tělesa a ukládání dat u monitorovaných rohových hmotných bodů. Z důvodu sledování napětí se rovněž zaznamenávají data u konečného prvku poblíž vrcholu zářezu. U tělesa bez zářezu se vybere odpovídající prvek pro možnost následného porovnání výsledků. V obou případech jsou konečné prvky v kamenivu. Během simulace se ukládají také grafické výstupy zobrazující rozložení napětí v ploše zkušební tělesa na startu a na konci simulace. Zvolená metoda je Symplektický Euler, krok $1,22 \cdot 10^{-7}$ s, rychlost simulace $3,8 \cdot 10^{-6}$ a počet snímků je 25. Simulace je ukončena v čase 0,0025 s, kdy jsou sledované body v ustálené poloze.

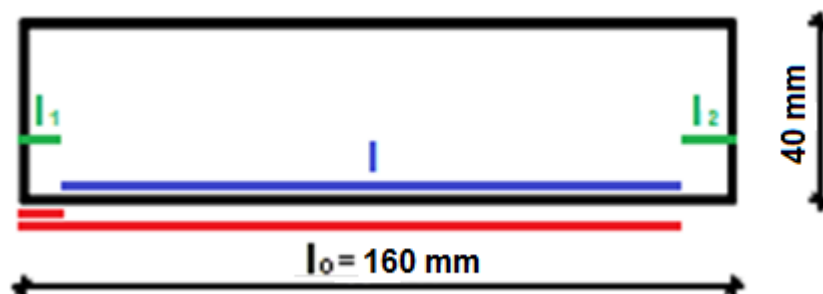
Výsledná data se automaticky zaznamenávají do textového souboru a pro další zpracování se přenesou do programu Microsoft Excel (viz Obr. 11).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
State file	saved from application FyDiK2D, version: 4.83 20120212, homepage: http://www.kitnarf.cz									
ModelElement	MassPoint									
time	dampingC	dampingC	dampingC	massProp	actualMas	coordX	coordY	velocityX	velocityY	accelerati
0	10000	0	0	true	6.92E-04	0	0	0	0	0
1.22E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	0	0	0	0	5480390
2.44E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	8.17E-08	7.95E-08	0.668993	0.650935	1.60E+07
3.66E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	4.01E-07	3.82E-07	2.616886	2.477626	3.05E+07
4.88E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	1.18E-06	1.09E-06	6.342852	5.774823	4.79E+07
6.10E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	2.66E-06	2.37E-06	12.19437	10.54057	6.67E+07
7.32E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	5.15E-06	4.38E-06	20.34055	16.45763	8.54E+07
8.54E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	8.90E-06	7.18E-06	30.76168	22.92605	1.02E+08
9.77E-07	10000	0	0	true	6.92E-04	1.42E-05	1.07E-05	43.25523	29.14192	1.16E+08
1.10E-06	10000	0	0	true	6.92E-04	2.12E-05	1.49E-05	57.45671	34.21019	1.26E+08

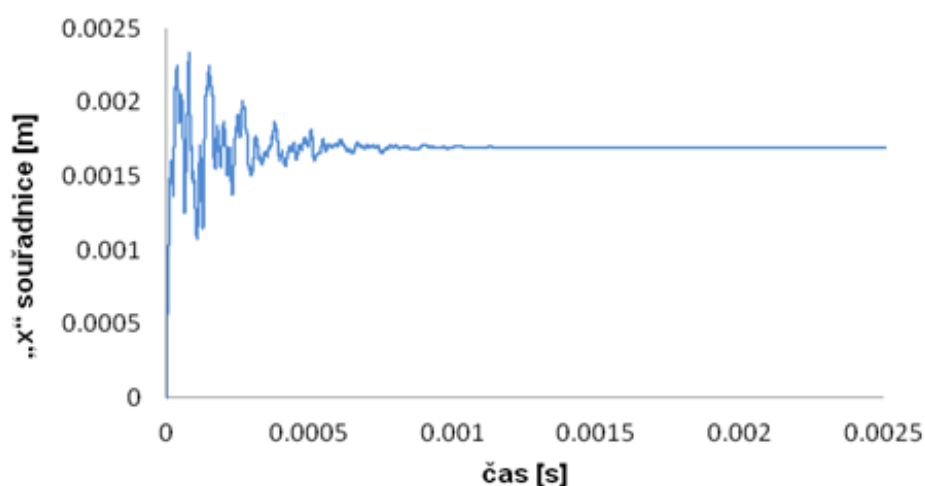
Obr. 11 Ilustrace výstupu z aplikace FyDiK přenesený do Excelu.

Pro zjištění poměrného smrštění, změny velikosti a relativní délky jsou rozhodující ustálené x-ové souřadnice sledovaných hmotných bodů viz Obr. 12

(červeně vyznačené) – tzn. souřadnice v čase 0,0025 s. Ustabilování souřadnice bodu 0 v čase znázorňuje Obr. 13.



Obr. 12 Zkušební těleso s vyznačenými délkami pro výpočty.



Obr. 13 Graf znázorňující ustalování souřadnice bodu 0 v čase.

Uváděné hodnoty poměrného smrštění byly vypočteny ze vzorce

$$\varepsilon = (l - l_0) \cdot 1000 / l_0,$$

relativní délka ze vztahu

$$l_r = l \cdot 1000 / l_0$$

a změna velikosti lze vypočítat jako

$$\Delta l = l - l_0 = l_1 + l_2,$$



kde: l je délka zkušebního tělesa po smrštění v metrech ($l = l_0 - l_1 - l_2$),

l_0 je původní délka zkušebního tělesa v metrech,

l_1, l_2 jsou úbytky velikostí, (viz Obr.12).

U každé simulace byla k dispozici data čtyř rohových hmotných bodů vyšetřovaného tělesa. Střední hodnoty zjišťovaných veličin byly získány po zprůměrování výsledných hodnot ze souřadnic u spodního líce – body 0 a 1 (5) a souřadnic u horního líce – body 2 (6) a 3 (7).

Podrobnější výpočty zjišťovaných veličin pro jednotlivé druhy kameniva jsou uvedeny v příloze P1.

11 Vyhodnocení výsledných dat

11.1 Parametrická studie – stupeň smrštění

V následujících tabulkách jsou seřazeny výsledky ze simulací smrštění zkušebního tělesa z cementové pasty a zrn žuly s různými stupni smrštění.

Tab. 4 Relativní délka vyšetřovaného tělesa v závislosti na stupni smrštění cementové matrice.

Stupeň smrštění matrice [-]	Relativní délka	
	bez zářezu [mm/m]	se zářezem [mm/m]
0.99 (1%)	994.78	994.95
0.98 (2%)	989.55	989.90
0.96 (4%)	979.09	979.79
0.92 (8%)	958.13	959.53

Tab. 5 Poměrné smrštění vyšetřovaného tělesa v závislosti na stupni smrštění cementové matrice.

Stupeň smrštění matrice [-]	Poměrné smrštění	
	bez zářezu [mm/m]	se zářezem [mm/m]
0.99 (1%)	-5.22	-5.05
0.98 (2%)	-10.45	-10.10
0.96 (4%)	-20.91	-20.21
0.92 (8%)	-41.87	-40.47

Tab. 6 Změna velikosti vyšetřovaného tělesa v závislosti na stupni smrštění cementové matrice.

Stupeň smrštění matrice [-]	Změna velikosti	
	bez zářezu [mm]	se zářezem [mm]
0.99 (1%)	0.836	0.808
0.98 (2%)	1.672	1.616
0.96 (4%)	3.345	3.234
0.92 (8%)	6.700	6.476

11.2 Parametrická studie – druh kameniva

V dalších tabulkách jsou výsledky jednotlivých veličin při simulacích smrštění kompozitů z cementové pasty a různých druhů kameniva a také cementové pasty s kamenivem se stejnými vlastnostmi jako matrice. Stupeň smrštění je **0,92**, tedy 8%.

Tab. 7 Relativní délka vyšetřovaného tělesa v závislosti na druhu kameniva.

Materiál	Relativní délka	
	bez zářezu [mm/m]	se zářezem [mm/m]
žula	958.125	959.526
pískovec	951.876	953.332
čedič	959.204	960.607
cementová pasta	920.000	920.000

Tab. 8 Poměrné smrštění vyšetřovaného tělesa v závislosti na druhu kameniva.

Materiál	Poměrné smrštění	
	bez zářezu [mm/m]	se zářezem [mm/m]
žula	-41.875	-40.474
pískovec	-48.124	-46.668
čedič	-40.796	-39.393
cementová pasta	-80.000	-80.000

Tab. 9 Změna velikosti vyšetřovaného tělesa v závislosti na druhu kameniva.

Materiál	Změna velikosti	
	bez zářezu [mm]	se zářezem [mm]
žula	6.700	6.476
pískovec	7.700	7.467
čedič	6.527	6.303
cementová pasta	12.800	12.800

V poslední sadě tabulek jsou zaznamenány údaje o průběhu napětí v prvku poblíž vrcholu zářezu a u vzorku bez zářezu v odpovídajícím konečném prvku. Grafy vyjadřující průběhy napětí v konečném prvku poblíž vrcholu zářezu pro porušený vzorek a pro těleso bez zářezu u odpovídajícího prvku lze nalézt v příloze P2.

Tab. 10 Ustálené hodnoty napětí v závislosti na druhu kameniva.

Materiál	Ustálené hodnoty napětí	
	bez zářezu [MPa]	se zářezem [MPa]
žula	-3.04E+02	-1.57E+02
pískovec	-2.34E+02	-1.69E+02
čedič	-3.22E+02	-1.16E+02
cementová pasta	1.04E-03	-6.20E-03

Tab. 11 Hodnoty minimálních, maximálních napětí a rozkmitu napětí v závislosti na druhu kameniva.

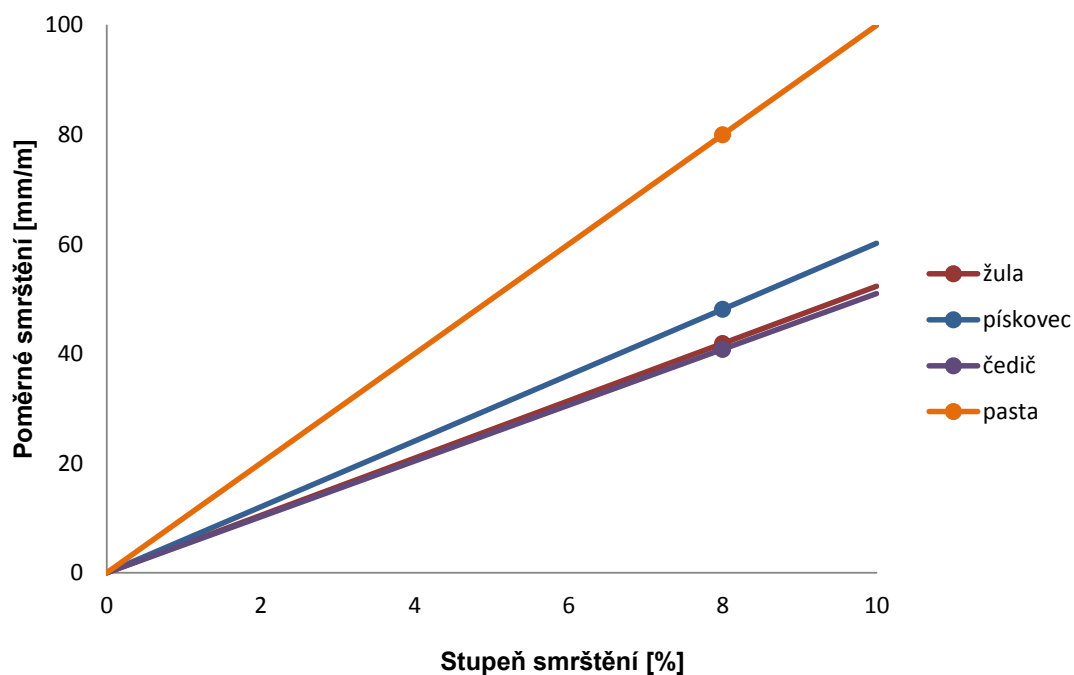
Materiál	Napětí					
	bez zářezu [MPa]			se zářezem [MPa]		
	max	min	rozkmit	max	min	rozkmit
žula	3.16E+03	-2.17E+03	-5.33E+03	6.93E+03	-2.18E+03	-9.11E+03
pískovec	2.48E+03	-1.83E+03	-4.31E+03	4.42E+03	-1.40E+03	-5.82E+03
čedič	3.34E+03	-2.20E+03	-5.53E+03	7.55E+03	-2.41E+03	-9.96E+03
cem. pasta	4.33E+03	-2.48E+03	-6.81E+03	1.10E+04	-2.27E+03	-1.32E+04

11.3 Dílčí závěry

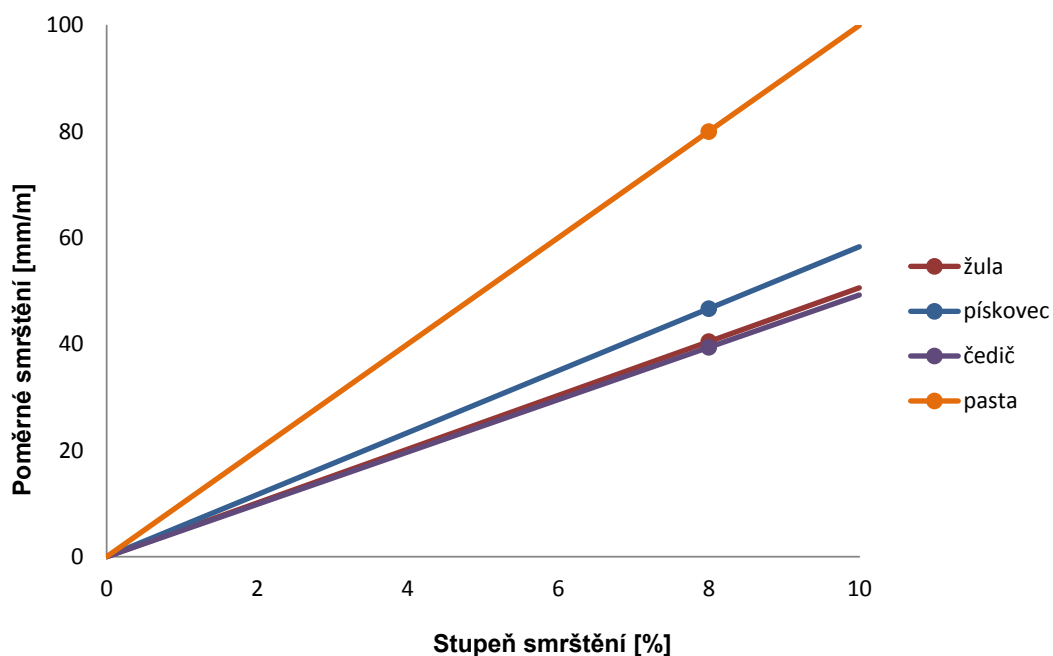
První graf (viz Obr. 14) znázorňuje závislost poměrného smrštění tělesa na stupni smrštění matrice pro vzorky bez zářezu z různých druhů kameniv a srovnávacího vzorku z cementové pasty a kameniva s totožnými vlastnostmi.

Pro každý druh kameniva bylo vyneseno poměrné smrštění při stupni smrštění cementové pasty 8%. Vzhledem k linearitě funkce byly těmito body proloženy přímkou. Z grafu je tedy možno odečíst odpovídající hodnoty pro další stupně smrštění matrice.

Následující graf ukazuje stejnou závislost poměrného smrštění na smrštění matrice, ale u vzorků se zářezem (viz Obr. 15).

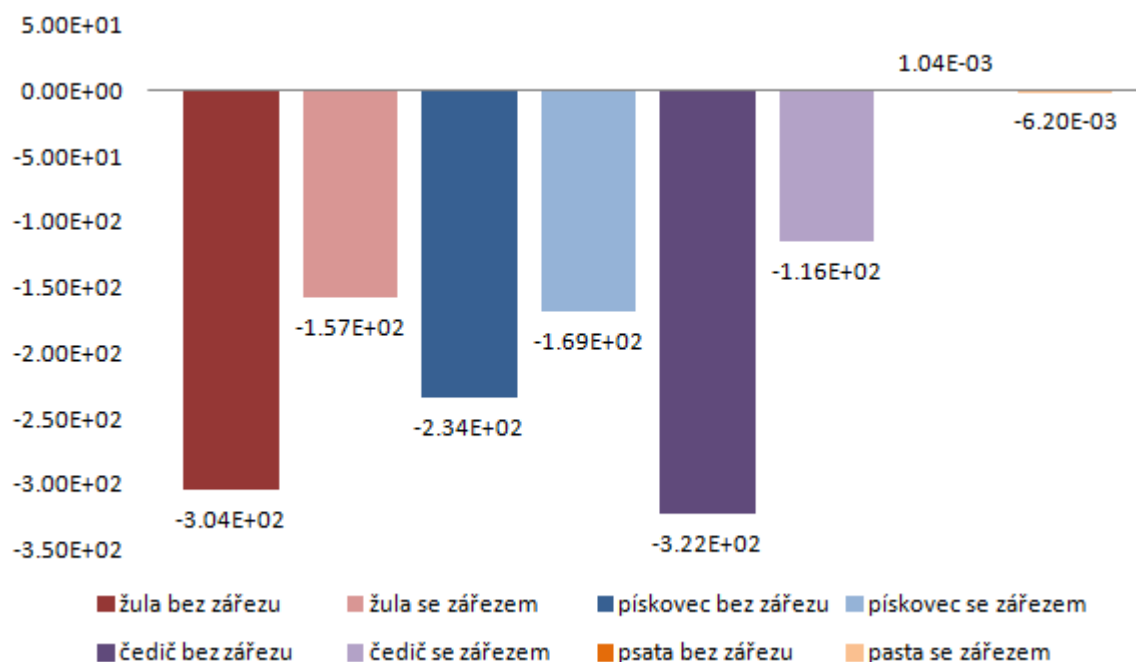


Obr. 14 Závislost poměrného smrštění na stupni smrštění pro různé druhy kameniva – těleso bez zářezu.



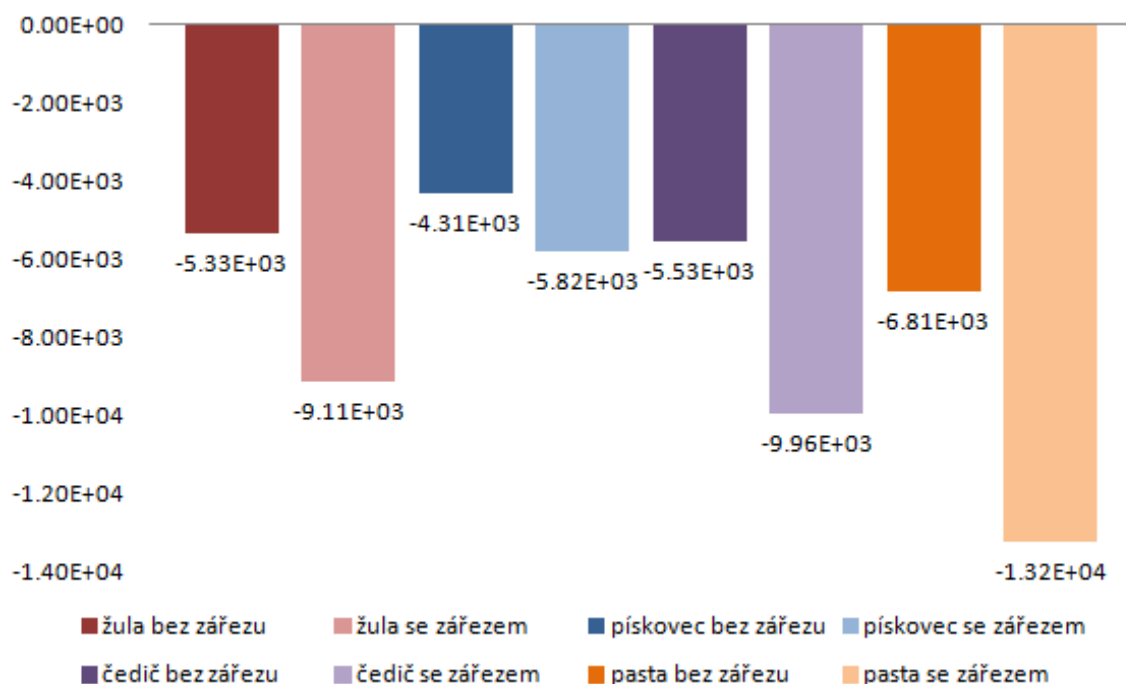
Obr. 15 Závislost poměrného smrštění na stupni smrštění pro různé druhy kameniva – těleso se zářezem.

V dalším grafu jsou zobrazena ustálená napětí v čase 0,0025 s pro tělesa bez zářezu a se zářezem z různých druhů kameniva (viz Obr. 16). Pro porovnání jsou v grafu zobrazeny i kompozity z cementové pasty a kamenivem se stejnými vlastnostmi – napětí u těchto vzorků jsou však téměř nulové.



Obr. 16 Graf ustálených hodnot napětí pro jednotlivé druhy kameniva a vzorky bez a se zářezem.

Druhý sloupcový graf ukazuje hodnoty rozkmitu napětí (viz Obr. 17). Rozkmit napětí se vypočítá jako rozdíl největšího záporného a maximálního kladného napětí získaného při každé simulaci. Toto napětí je opět znázorněno pro všechny druhy použitého kameniva a pro tělesa se zářezem i bez něj.



Obr. 17 Graf znázorňující hodnoty rozkmítu napětí pro jednotlivé druhy kameniva a vzorky bez a se zářezem.

Následující tabulky (Tab. 12a, 12b, Tab. 13a, 13b) vyjadřují vztah mezi materiálovými charakteristikami a výsledným poměrným smrštěním. Jedná se o hodnoty korelačního koeficientu (nabývá hodnot od -1 do 1).

Tab. 12a Vstupní hodnoty pro vytvoření korelační závislosti – těleso bez zářezu

12b Korelační závislost jednotlivých veličin – těleso bez zářezu.

a)

Materiál	Charakteristiky					
	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	G_F [J/m ²]	ϵ_s [?]
žula	2700	50	20	200	50	4.1875
pískovec	2000	20	10	90	10	4.8124
čedič	2900	60	20	220	40	4.0796
cementová pasta	2500	25	3	30	35	8.0000

b)

Korelační koeficient [?]				
ρ [kg/m ³]	E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	G_F [J/m ²]
-0.2166	-0.6203	-0.9088	-0.8732	-0.1139

Tab. 13a Vstupní hodnoty pro vytvoření korelační závislosti – těleso se zářezem

13b Korelační závislost jednotlivých veličin – těleso se zářezem.

a)

Materiál	Charakteristiky					
	ρ [kg/m³]	E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	G_F [J/m²]	ε_s [?]
žula	2700	50	20	200	50	4.0474
pískovec	2000	20	10	90	10	4.6668
čedič	2900	60	20	220	40	3.9393
cementová pasta	2500	25	3	30	35	8.0000

b)

Korelační koeficient [?]				
ρ [kg/m³]	E [GPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	G_F [J/m²]
-0.2090	-0.6143	-0.9055	-0.8694	-0.1067

Poslední jsou grafické výstupy – rozložení napětí po ploše zkušebního tělesa pro každou simulaci (na startu, tzn. po skokovém vnesení 8% smrštění cementové pasty, a na konci simulace, tzn. v čase 0,0025 s) jsou uvedeny v příloze P3.

10 Závěr

V teoretické části této práce byly popsány objemové změny, se kterými je třeba počítat při návrhu a realizaci staveb z betonu.

V praktické části bylo simulováno smršťování těles z modelového cementového kompozitu. Materiál sestával z matrice (ztvrdlá cementová pasta) a zrn kameniva (žula, pískovec, čedič). Vyšetřována byla dvojí tělesa – hranol bez a se zářezem.

Nejdříve se u jednotlivých simulací parametricky měnil stupeň smrštění matrice: 1%, 2%, 4%, 8%. Jednalo se o kompozit složený z cementové pasty a zrn žuly. Kamenivo bylo ze dvou frakcí o velikosti 10 a 20 mm. U zkušebních těles se zářezem bylo zjištěno menší průměrné smrštění (do 4%) oproti zkušebním tělesům bez zářezu. Získané výsledky potvrdily, že se jedná o lineární problém, proto se pro simulaci smrštění těles s dalšími druhy kameniva uvažovalo pouze s jedním stupněm smrštění matrice (8%).

V další fázi výzkumu se měnil druh kameniva a tím i charakteristické vlastnosti. Podle očekávání se nejméně smrštil vzorek, jehož inkluze byla tvořena čedičem, naopak největší smrštění bylo prokázáno u modelových kompozitů tvořených cementovou pastou a zrny pískovce.

Pro kontrolu použitých metod bylo simulováno i smrštění cementové pasty a kameniva se stejnými vlastnostmi. Výsledky potvrdily správnost postupů – poměrné smrštění vyšlo přesně 8%, jak bylo na začátku zadáno u cementové pasty.

V poslední části byl monitorován průběh napětí v čase poblíž vrcholu zářezu a v odpovídajícím místě u vzorku bez zářezu. Ze získaných dat vyplývá, že u těles se zářezem vzniká zejména na počátku simulace větší rozkmit napětí než u vzorků bez zářezu.

V bakalářské práci byla ověřena funkčnost modelů objemových změn těles z dvousložkových kompozitů. Při dalším zkoumání by bylo možno rozšířit parametrickou studii o tělesa s jinými koncentratory napětí, jinou zrnitostí kameniva, sledovat více hmotných bodů (především u těles se zářezem) atd.

Seznam použitých zdrojů

Literatura a normy

- [1] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*
- [3] KERŠNER, Z., NÁHLÍK, L., KNĚSL, Z. Analýza interakce kamenivo-trhlina z hlediska lomových charakteristik betonu. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2002, roč. 2, č. 5, s. 40-43. ISSN 1213-3116.
- [4] LAVICKÝ, M., PĚNČÍK, J. Vliv reologických vlastností betonu na vznik poruch stavebních konstrukcí. *Soudní inženýrství*. 2005, roč. 16, č. 3, s. 169-171.
- [5] POWERS, T.C. Causes and kontrol of volume chase. *Journal of Portland Cement Association Research, and Development Laboratories*. 1959, 1, N.1, pp. 29-39.
- [6] ŠMERDA, Z., KŘÍSTEK, V. *Dotvarování a smršťování betonových prvků a konstrukcí*, SNTL, Praha, 1978, 229 s.
- [7] ŠTAFKA, M., FRANTÍK, P. Modelování smršťování betonu pomocí pružinové sítě: pilotní studie. In: *Víceúrovňový design pokrokových materiálů*. Brno: Ústav fyziky materiálů AV ČR, 2011, s. 171-176.

Webové odkazy

- [8] ABRAHAM, E. *Vlastnosti betonu*. [online]. 2009, [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://vyuka.spsslipnik.cz/ABRAHAME/Technologie%20betonu%20%20přednášky/>
- [9] CoJeCo. *Smršťování betonu* [online]. 2000, 19.9.2008 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?s_term=&s_lang=2&detail=1&id_desc=88453
- [10] ConVERTER. *Hustota - pevné látky* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>



- [11] EBETON. *Slovník pojmů: Dotvarování betonu* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/dotvarovani-betonu>
- [12] FRANTÍK, P. *Application FyDiK* [online]. 2007, 11. 10. 2011 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://fydik.kitnarf.cz/>
- [13] FRANTÍK, P. *SpatiDist* [online]. 2011, 03.2012 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://spatidist.kitnarf.cz/>
- [14] HAVLÁSEK, P. *Modely pro dotvarování a smršťování* [online]. Praha, 2010 [cit. 2012-05-13]. Studentská vědecká a odborná činnost. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Jirásek, DrSc.
- [15] Občanská výstavba. *Vliv objemových změn na výskyt trhlin v betonových podlahách* [online]. 25.11.2007, 19.1.2009 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.obcanskavystavba.cz/clanek/vliv-objemovych-zmen-na-vyskyt-trhlin-v-betonovych-podlahach/>
- [16] Properties of Rock Materials [online]. 2011 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://lmrwww.epfl.ch/en/ensei/Rock_Mechanics/ENS_080312_EN_JZ_Notes_Chapter_4.pdf
- [17] TRTÍK, K. *Technologie betonu: Přísady a příměsi pro výrobu betonu* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://concrete.fsv.cvut.cz/pomucky/down/BK10SL3%20.pdf>
- [18] Vševed. *Dotvarování betonu* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://encyklopedie.vseved.cz/dotvarování+betonu>
- [19] ZAPA Beton a.s. *Beton* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.zapa.cz/technologicke-okenko/beton>

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka

Význam

FyDiK	Fyzikální Diskretizace Kontinua
SpatiDist	Spatial Distribution (Prostorové rozdělení)

Symbol

Význam

Jednotka

A_c	plocha průřezu	mm^2
E_c	tečnový modul pružnosti (stáří 28 dní)	GPa
E_{cm}	střední hodnota modulu pružnosti	GPa
f_{ck}	charakteristická pevnost betonu v tlaku	MPa
f_{cm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku	MPa
f_{cmo}	10	MPa
f_t	pevnost v tahu	MPa
h_0	náhradní rozměr průřezu	mm
k_h	součinitel, který závisí na h_0	-
k_σ	součinitel, který závisí na σ_c a f_{cm}	-
l	délka zkušebního tělesa po smrštění	m
l_t	výchozí délka konstrukce	m
l_0	původní délka zkušebního tělesa	m
l_1, l_2	úbytek velikosti	m
l_r	relativní délka	m
RH	relativní vlhkost okolního prostředí	%
RH_0	100	%
S	smrštění vysycháním	-
t	stáří betonu v uvažovaném okamžiku	dny
t_0	stáří betonu v okamžiku zatížení	dny
t_s	stáří betonu na začátku smrštění vysycháním	dny
u	obvod prvku vystavený okolnímu prostředí	mm
α	součinitel teplotní roztažnosti	K^{-1}



$\alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$	součinitel, který závisí na druhu cementu	-
$\beta_{ds}(t, t_s)$	součinitel, který závisí na t a t_s	-
Δl	změna velikosti	m
Δl_t	přírůstek (úbytek) délky konstrukce	m
ΔT	rozdíl změny teploty konstrukce	°C
ε	poměrné smrštění	-
ε_c	základní dotvarování	-
ε_{ca}	poměrné autogenní smrštění	-
ε_{cc}	poměr. přetvoř. od dotvarování betonu	-
ε_{cd}	konečné poměrné přetvoření od smrštění vysycháním	‰
$\varepsilon_{cd,0}$	základní poměrné přetvoření od smrštění vysycháním	‰
ε_D	dotvarování vysycháním	-
ε_e	elastická deformace	-
ε_T	celková deformace	-
σ_c	tlakové napětí	MPa
σ_t	tahové napětí	MPa
$\varphi(\infty, t_0)$	konečná hodnota součinitele dotvarování	-
$\varphi(t, t_0)$	součinitel dotvarování, který zohledňuje průběh dotvarování v čase	-
$\varphi_k(\infty, t_0)$	základní nelineární součinitel dotvarování	-



Seznam příloh

1 P1 – Výpočet poměrného smrštění, změny velikosti a relativní délky.....	2
2 P2 – Průběh napětí v čase	4
3 P3 – Grafické znázornění napětí na startu a na konci simulace.....	8

P1 – Výpočet poměrného smrštění, změny velikosti a relativní délky

Tab. P1 Výpočet zjišťovaných veličin: cementová pasta + žula.

Žula: bez zářezu, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.1	souř.1 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0037	0.1567	0.1530	-43.8819	0.0070	956.1181
čas	souř.3	souř.2	souř. 2 - souř. 3	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0032	0.1568	0.1536	-39.8679	0.0064	960.1321
průměr				-41.8749	0.0067	958.1251
Žula: se zářezem, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.5	souř. 5 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0034	0.1570	0.1536	-39.7724	0.0064	960.2276
čas	souř.7	souř.6	souř. 6 - souř. 7	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0033	0.1567	0.1534	-41.1757	0.0066	958.8243
průměr				-40.4741	0.0065	959.5259

Tab. P2 Výpočet zjišťovaných veličin: cementová pasta + pískovec.

Pískovec: bez zářezu, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.1	souř.1 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0041	0.1562	0.1521	-49.2471	0.0079	950.7529
čas	souř.3	souř.2	souř. 2 - souř. 3	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0037	0.1561	0.1525	-47.0007	0.0075	952.9993
průměr				-48.1239	0.0077	951.8761
Pískovec: se zářezem, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.5	souř. 5 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0038	0.1566	0.1528	-45.1620	0.0072	954.8380
čas	souř.7	souř.6	souř. 6 - souř. 7	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0037	0.1560	0.1523	-48.1734	0.0077	951.8266
průměr				-46.6677	0.0075	953.3323

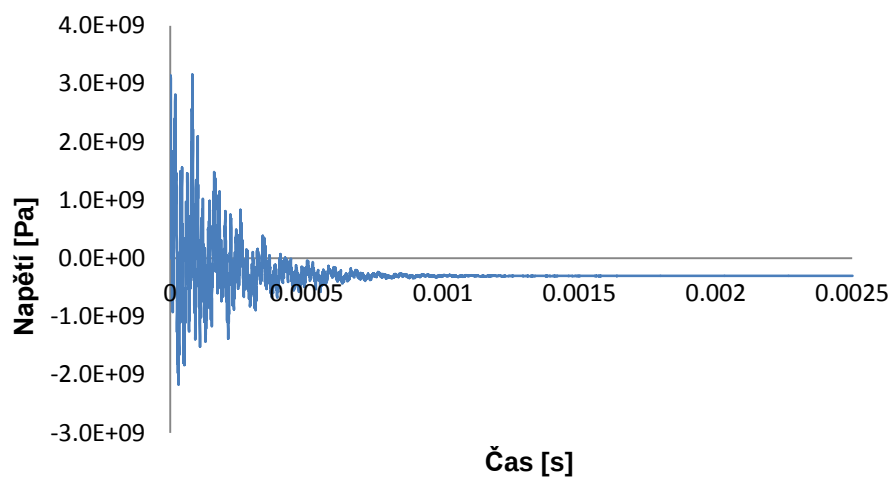
Tab. P3 Výpočet zjišťovaných veličin: cementová pasta + čedič.

Čedič: bez zářezu, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.1	souř.1 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0036	0.1567	0.1531	-42.8918	0.0069	957.1082
čas	souř.3	souř.2	souř. 2 - souř. 3	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0031	0.1569	0.1538	-38.7000	0.0062	961.3000
průměr				-40.7959	0.0065	959.2041
Čedič: se zářezem, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.5	souř. 5 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0033	0.1571	0.1538	-38.7641	0.0062	961.2359
čas	souř.7	souř.6	souř. 6 - souř. 7	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0032	0.1568	0.1536	-40.0213	0.0064	959.9787
průměr				-39.3927	0.0063	960.6073

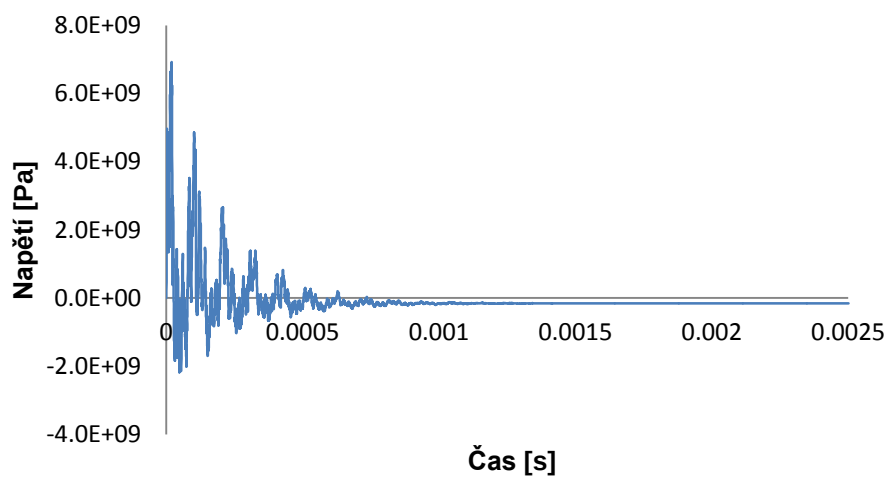
Tab. P4 Výpočet zjišťovaných veličin: cementová pasta + kamenivo se stejnými vlastnostmi.

Cementová pasta: bez zářezu, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.1	souř.1 - souř. 0	poměrné smrštění	změna velikosti	relativní délka
0.0025	0.0064	0.1536	0.1472	-80.0001	0.0128	919.9999
čas	souř.3	souř.2	souř. 2 - souř. 3	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0064	0.1536	0.1472	-80.0001	0.0128	919.9999
průměr				-80.0001	0.0128	919.9999
Cementová pasta: se zářezem, stupeň smrštění 8% (0.92)						
[s]	[-]	[-]	[-]	[mm/m]	[m]	[mm/m]
čas	souř.0	souř.5	souř. 5 - souř. 0	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0064	0.1536	0.1472	-80.0001	0.0128	919.9999
čas	souř.7	souř.6	souř. 6 - souř. 7	poměrné smrštění	rozdíl	relativní délka
0.0025	0.0064	0.1536	0.1472	-80.0003	0.0128	919.9997
průměr				-80.0002	0.0128	919.9998

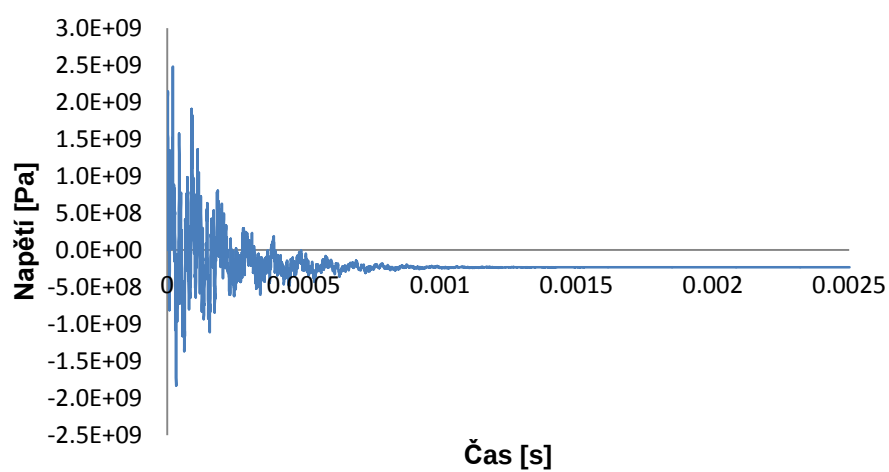
P2 – Průběh napětí



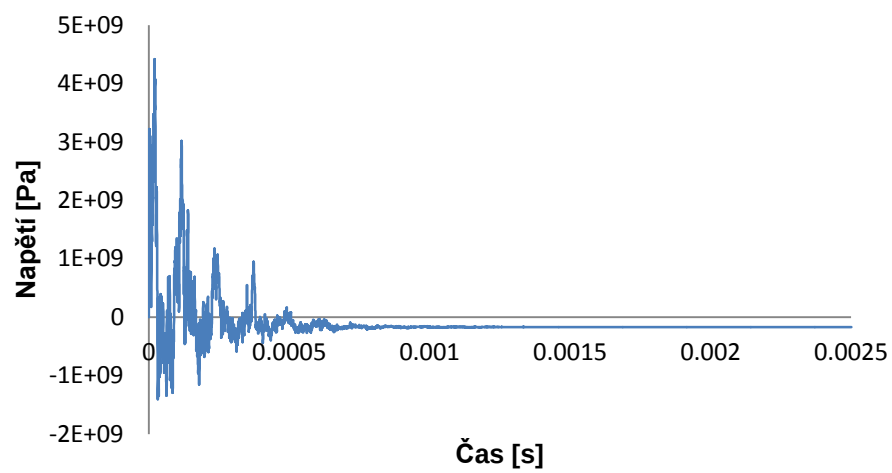
Obr. P1 Průběh napětí v čase, těleso bez zářezu: cementová pasta + žula.



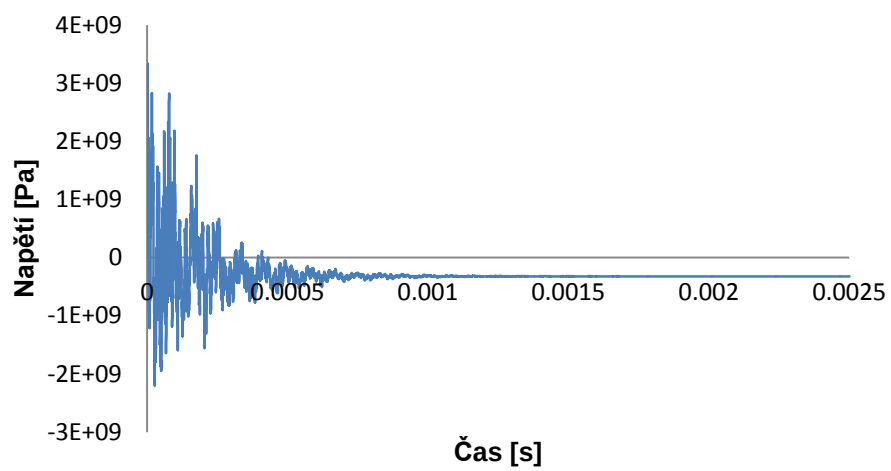
Obr. P2 Průběh napětí v čase, těleso se zářezem: cementová pasta + žula.



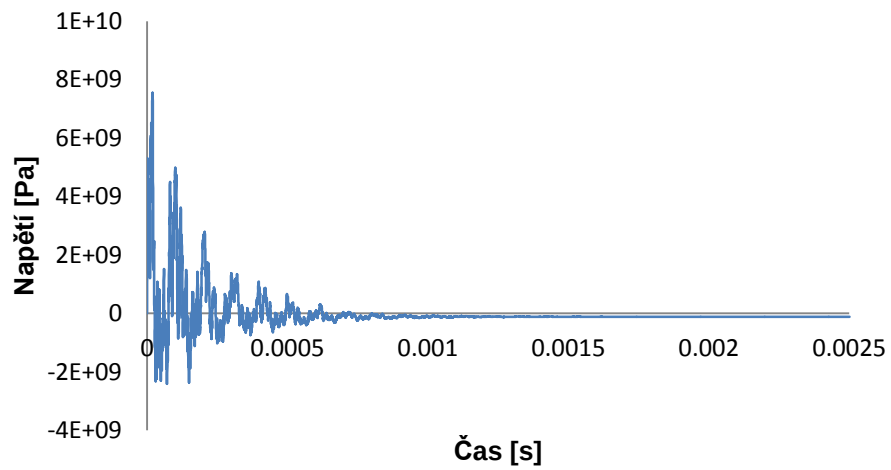
Obr. P3 Průběh napětí v čase, těleso bez zářezu: cementová pasta + pískovec.



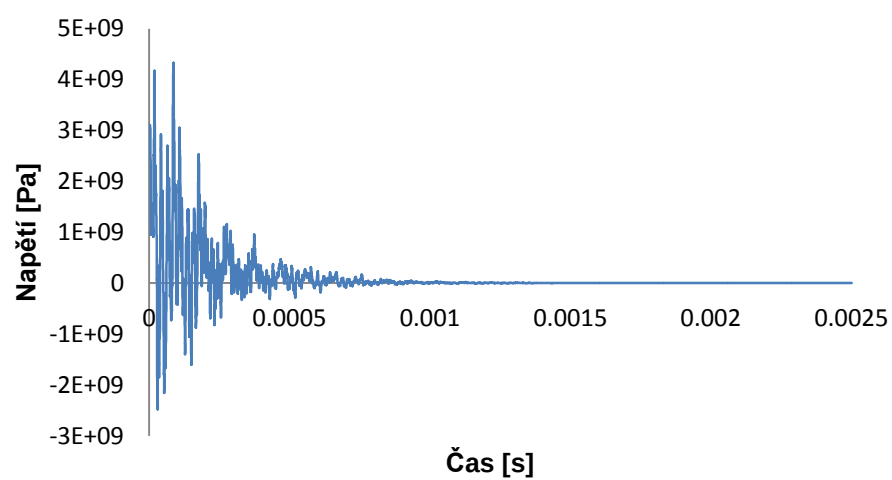
Obr. P4 Průběh napětí v čase, těleso se zářezem: cementová pasta + pískovec.



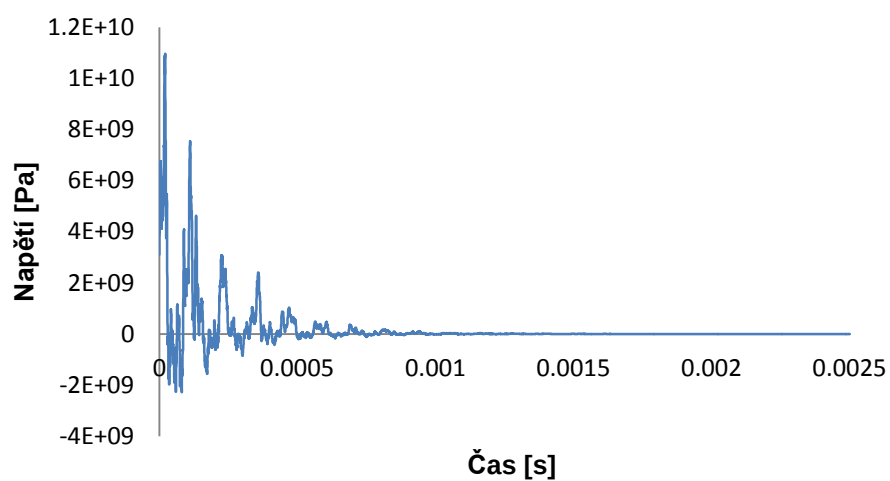
Obr. P5 Průběh napětí v čase, těleso bez zářezu: cementová pasta + čedič.



Obr. P6 Průběh napětí v čase, těleso se zářezem: cementová pasta + čedič.

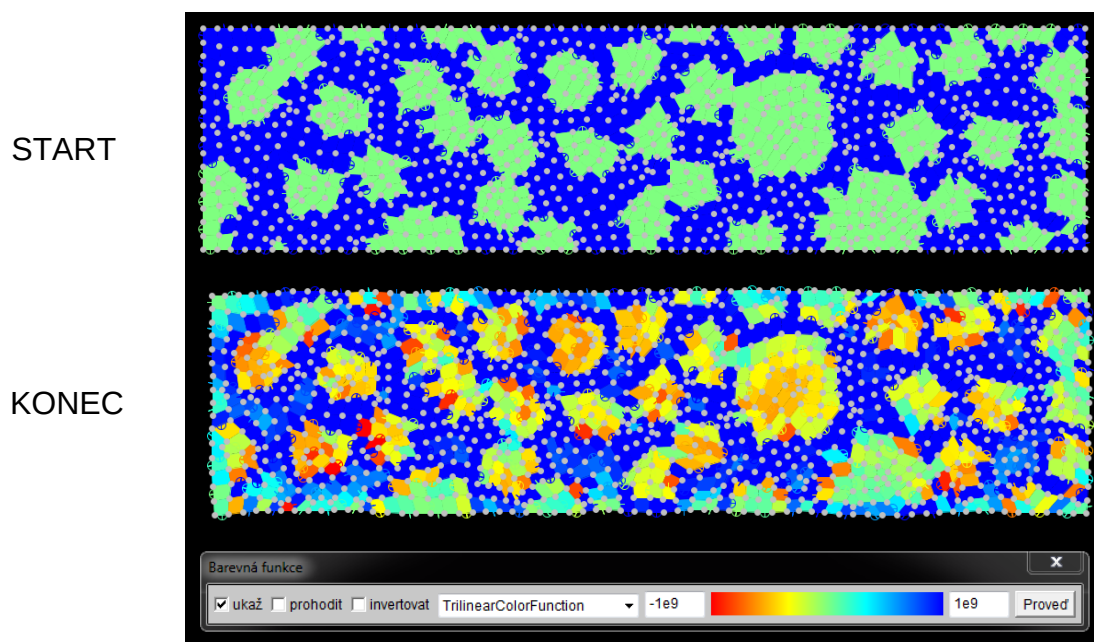


Obr. P7 Průběh napětí v čase, těleso bez zářezu: cementová pasta + kamenivo se stejnými vlastnostmi.

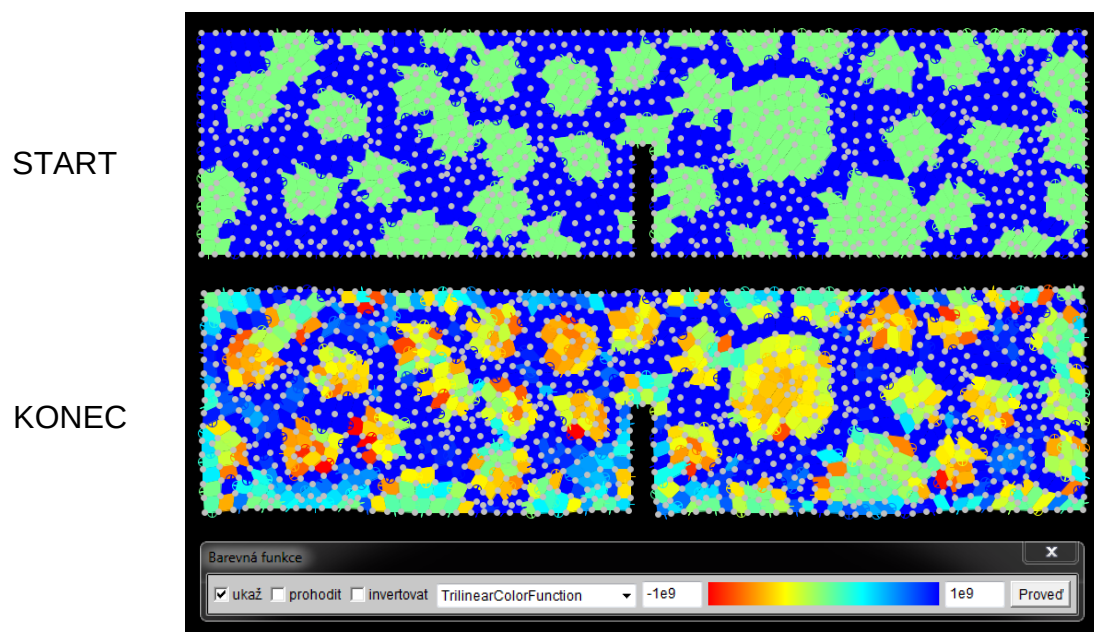


Obr. P8 Průběh napětí v čase, těleso se zářezem: cementová pasta + kamenivo se stejnými vlastnostmi.

P3 – Grafické znázornění napětí na startu a na konci simulace

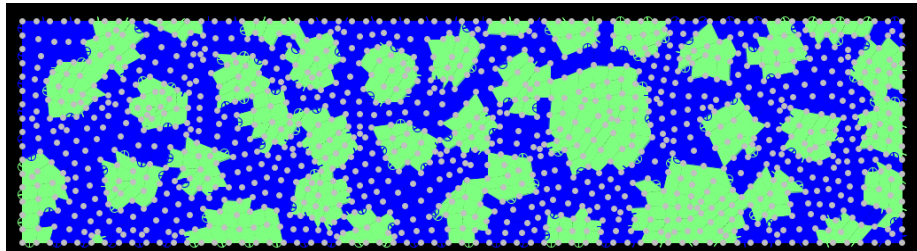


Obr. P9 Průběh napětí v ploše tělesa bez zářezu: cementová pasta + žula.

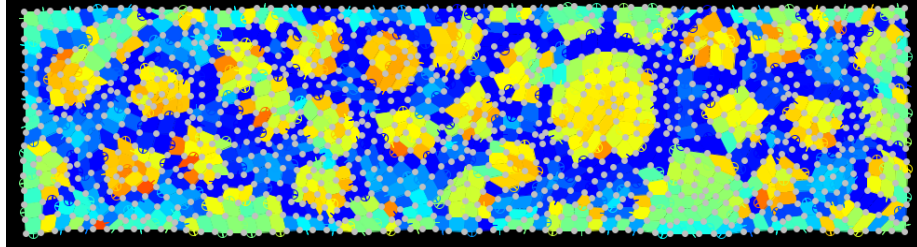


Obr. P10 Průběh napětí v ploše tělesa se zářezem: cementová pasta + žula.

START

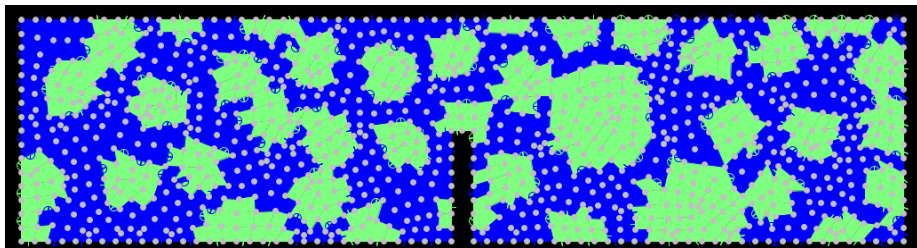


KONEC

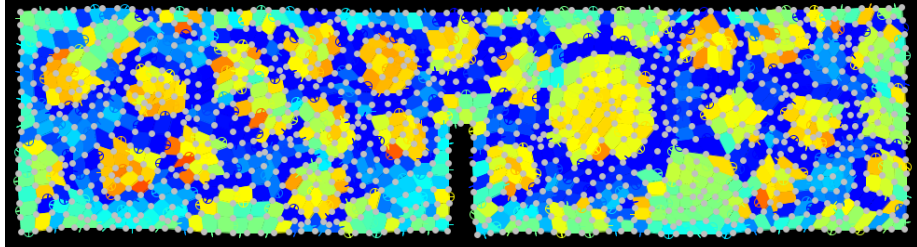


Obr. P11 Průběh napětí v ploše tělesa bez zářezu: cementová pasta + pískovec.

START

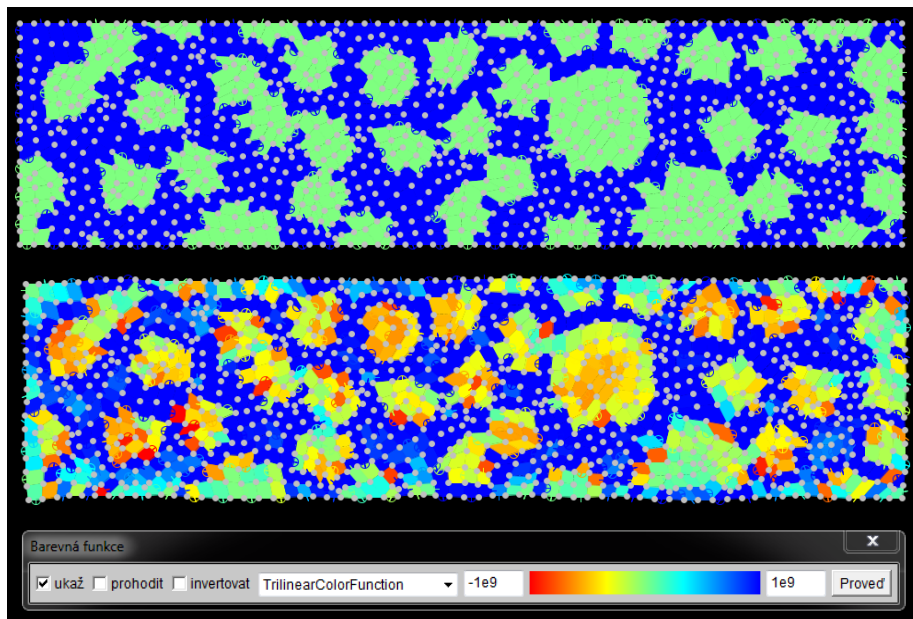


KONEC



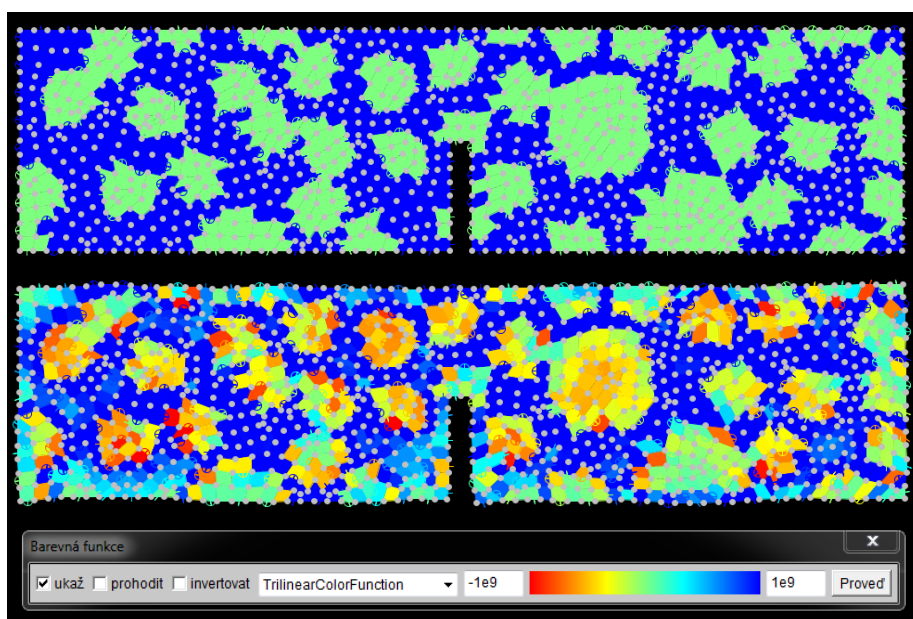
Obr. P12 Průběh napětí v ploše tělesa se zářezem: cementová pasta + pískovec.

START



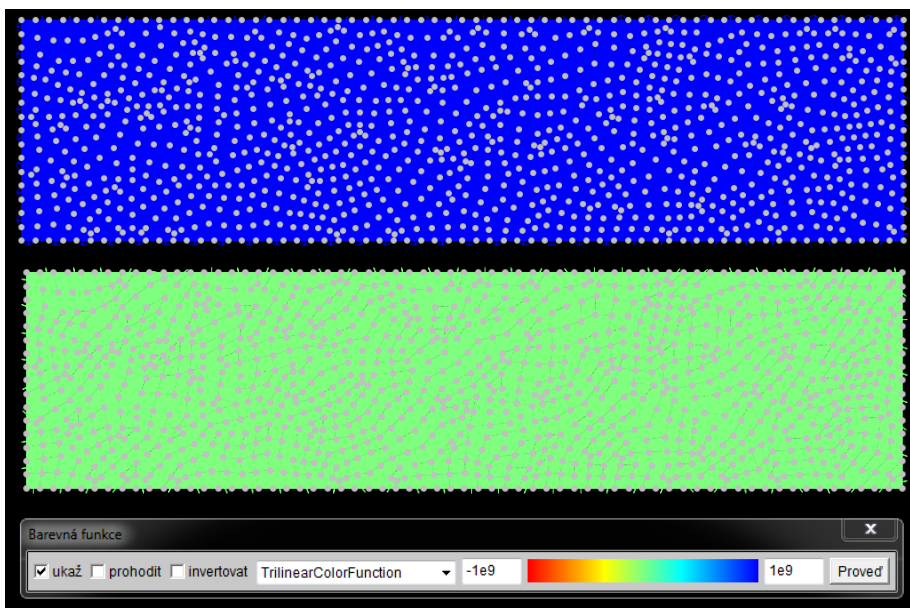
Obr. P13 Průběh napětí v ploše tělesa bez zářezu: cementová pasta + čedič.

START



Obr. P14 Průběh napětí v ploše tělesa se zářezem: cementová pasta + čedič.

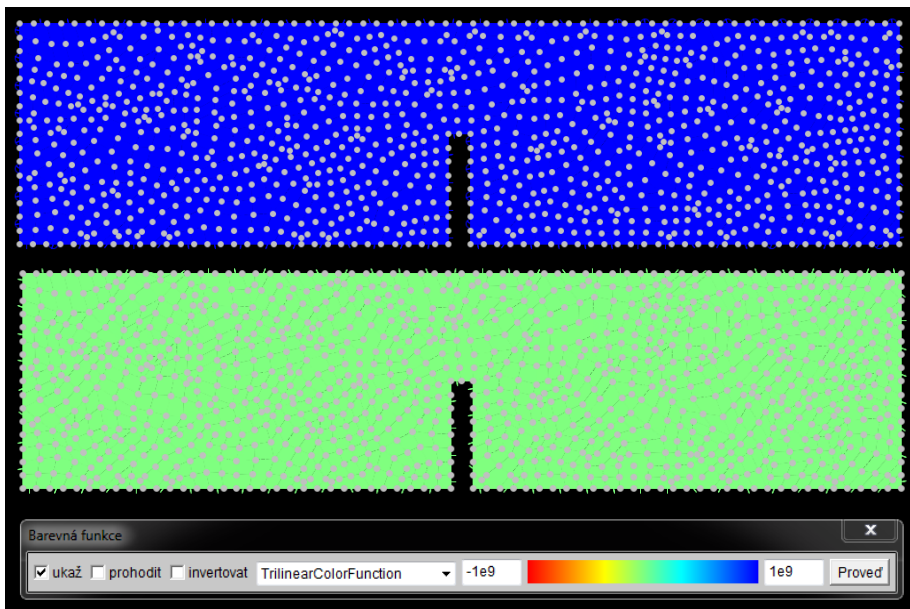
START



KONEC

Obr. P15 Průběh napětí v ploše tělesa bez zářezu: cementová pasta + kamenivo se stejnými vlastnostmi.

START



KONEC

Obr. P16 Průběh napětí v ploše tělesa se zářezem: cementová pasta + kamenivo se stejnými vlastnostmi.