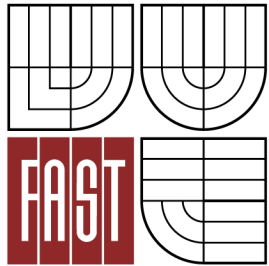




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A  
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# VÝZKUM PŘÍČIN VZNIKU PORUCH BETONOVÝCH PRVKŮ TYPU FACE BLOCK

THE RESEARCH OF CAUSE OF FAILURE OF CONCRETE ELEMENTS FACE BLOCK

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ EGER

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ÁMOS DUFKA, Ph.D.

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Lukáš Eger
<b>Název</b>	Výzkum příčin vzniku poruch betonových prvků typu Face Block
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Ámos Dufka, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2013
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

- Cusson, D., Hoogeveen, T.: An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage. In: Cement and Concrete Research 37 (2007), pp. 200-209,
- Czarnecki, B., Kroman, J.: Evaluation of cracking tendency and unrestrained shrinkage of high-performance concrete mixes in cast-in-place and precast bridge applications. In: 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete. ACI Symposium Publication, 228, 2005, pp. 1315-1328,
- Eppers, S: Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test, disertační práce, Technischen Universität Dresden, 2010,
- Hela, R.: Technologie betonu I, studijní opory VUT FAST v Brně, 2005,
- Šmerda a kol.: Životnost betonových staveb, Technická knihnice autorizovaného inženýra a technika, Praha 1999.

## Zásady pro vypracování

Práce je zaměřena na analýzu vlivů způsobujících defekty betonových tvárnic typu Face Block. Zkušenosti z praxe ukazují, že jednou z častých poruch tohoto typu betonových výrobků je vznik trhlin. Primárním cílem práce je ověření, zda a v jaké míře se na vzniku trhlin v tvárnicích podílí zálivková malta používaná pro jejich zmonolitnění. Práce bude realizována v těchto krocích:

- Rešerše relevantních poznatků v dané oblasti. Pozornost bude zaměřena především na metody detekce objemových změn stavebních materiálů, vlivy které tyto objemové změny vyvolávají (materiálové charakteristiky, vlhkost, teplota atd.),
- Na základě získaných údajů bude zpracována metodika pro měření objemových změn jednak vlastních zálivkových malt a především pak pro analýzu objemových změn systému zálivková malta – tvárnice v různých podmínkách.
- Experimentálně bude ověřen účinek různých vlivů (různé úrovně vlhkosti prostředí, cyklické změny vlhkosti, působení klimatických vlivů atd.) na chování systému tvárnice – zálivková malta. Testovány budou alespoň dvě receptury zálivkové malty.
- Získané údaje budou zpracovány a vyhodnoceny.

.....

Ing. Ámos Dufka, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřená na analýzu vlivů, které způsobují defekty betonových tvárnic. Zkušenosti z praxe ukazují, že defekty tvárnic se velmi často projevují ve formě trhlin. Velká míra výskytu defektů je přisuzována právě objemovým změnám nekvalitního výplňového betonu. Cílem této práce je analýza získaných poznatků z praxe a průzkum požadavků kladených na samotnou zdící tvárnici a především na výplňový beton, který slouží k zmonolitnění konstrukce, právě z těchto tvárnic postavených. Pozornost bude věnována především spolupůsobení systému tvárnice – výplňový beton. Zde se především zaměříme na objemové změny vyvolané změnou úrovně vlhkosti a především cyklickému působení vlhkosti.

## **Klíčová slova**

tvarovka, výplňový beton, voda, konzistence, objemové změny, přetvoření, deformace, smrštění, vlhkost, teplota

## **Abstract**

This master thesis focus on the analysis of effects that cause defects in concrete blocks. Experiences show that the defect of the blocks are often manifested in the form of cracks. Great rate of occurrence of defects is attributed to volume changes of poor quality concrete filler. The aim of this master thesis is to analyze the finding from the practical use and exploration of the requirements for the actual blocks and especially the concrete filler which is used to make monolithic structures built from these blocks. The attention will be paid to the interaction between the block and the concrete filler. Here we focus mainly on the volume changes caused by a change of moisture level and especially the cyclic moisture.

## **Keywords**

block, concrete filler, water, consistency, volume change, deformation, shrinkage, moisture, temperature

### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Lukáš Eger *Výzkum příčin vzniku poruch betonových prvků typu Face Block*. Brno, 2014. 126 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Ámos Dufka, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

Bc. Lukáš Eger

## **Poděkování**

V této části bych chtěl vyjádřit svou úctu a poděkování vedoucímu práce Ing. Ámosi Dufkovi za odborné i pedagogické vedení. Dále bych chtěl také poděkovat vedoucím pracovníkům firmy Presbeton, jmenovitě Ing. Petru Husaříkovi a Ing. Radku Pavlasovi, za konzultace a poskytnuté informace. Díky bych chtěl vyjádřit Ing. Martinu Lukavci za pomoc při řešení matematického modelu a všem pracovníkům ÚTHD FAST v Brně.

# OBSAH

ÚVOD.....	12
CÍL PRÁCE.....	13
TEORETICKÁ ČÁST.....	14
1 Specifikace zdících prvků.....	14
1.1 Tvarové zdící prvky Face Block.....	14
1.2 Tvarové zdící prvky Simple Block.....	16
2 Požadavky na zdící konstrukce.....	17
2.1 Požadavek na zdící prvek.....	17
2.1.1 ČSN EN 771-3 Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným a pórovitým kamenivem.....	17
2.1.1.1 Požadavky na betonové tvárnice.....	17
2.1.1.2 Shrnutí.....	19
2.2 Požadavek na výplň, uložení a spojení zdiva.....	19
2.2.1 ČSN EN 1996-1-1. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce.....	19
2.2.1.1 Malty.....	19
2.2.1.2 Výplňový beton.....	20
2.2.1.3 Shrnutí.....	21
2.3 Požadavky na výstavbu zděné konstrukce.....	22
2.3.1 Základy.....	22
2.3.2 Stavba zděné plotové konstrukce.....	22
2.3.3 Zastřešení plotové konstrukce.....	24
2.3.4 Shrnutí.....	24
3 Analýza příčin poruch zdících prvků.....	25
3.1 Výsledky znaleckých posudků zdících prvků.....	25
3.2 Vyhodnocení příčin poruch zdících prvků.....	31
4 Faktory ovlivňující kvalitu betonu.....	33
4.1 Cement.....	33
4.1.1 Množství cementu.....	34
4.2 Kamenivo.....	35
4.2.1 Zrnitost kameniva.....	35



4.2.2	Vlhkost a nasákavost kameniva.....	35
4.2.3	Obsah organických látek v kamenivu.....	36
4.3	Voda.....	36
4.3.1	Vliv frakce kameniva na množství záměsové vody .....	37
4.3.2	Vliv množství vody na konzistenci betonu, bez užití superplastifikačních přísad .....	37
4.3.3	Vliv množství záměsové vody na pevnost betonu v tlaku .....	38
4.4	Zhutnění betonu .....	39
4.5	Teplota .....	39
5	Objemové změny betonu .....	41
5.1	Fyzikální vyjádření objemových změn.....	42
5.2	Smrštění betonu .....	42
5.2.1	Smršťování vysycháním (vlhkostní) .....	43
5.2.2	Smršťování autogenní (chemické).....	44
5.2.3	Plastické smrštění .....	45
5.2.4	Hydratační smršťování .....	47
5.2.5	Karbonatační smršťování .....	47
5.3	Bobtnání.....	47
6	Diagnostické metody .....	49
6.1	Metody pro zjišťování změn objemu .....	49
6.1.1	Metoda hydrostatického vážení.....	50
6.1.2	Metoda vlnovce .....	51
6.1.3	Metoda žlabu .....	51
6.1.4	Metoda kužele.....	51
6.1.5	Trámečková metoda .....	52
6.1.6	Metoda vázané expanze.....	53
6.1.7	Optická metoda.....	53
6.1.8	Prstencová metoda.....	54
	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>57</b>
7	Použité vstupní suroviny .....	57
8	Metodika experimentální práce .....	60
8.1	Výroba čerstvého betonu .....	60

8.2	Stanovení objemové hmotnosti.....	60
8.3	Stanovení konzistence čerstvého betonu .....	61
8.4	Stanovení pevnosti v tlaku.....	62
8.5	Stanovení mrazuvzdornosti betonu.....	62
8.6	Stanovení nasákavosti betonu .....	63
8.7	Výstavba sloupků.....	63
8.8	Stanovení objemových změn .....	64
8.8.1	Prstencová metoda.....	64
8.8.2	Metoda můstku .....	66
9	Experimentální část .....	68
9.1	Analýza zdících tvarových prvků .....	68
9.1.1	Stanovení pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti tvárnic .....	68
9.1.2	Stanovení mezního přetvoření tvárnic .....	74
9.1.3	Vyhodnocení.....	78
9.2	Analýza výplňového betonu .....	79
9.2.1	Stanovení nasákavosti výplňového betonu.....	79
9.2.2	Stanovení pevnosti v tlaku výplňového betonu.....	80
9.2.3	Stanovení mrazuvzdornosti výplňového betonu .....	82
9.2.4	Stanovení přetvoření cementové malty .....	83
9.2.5	Vyhodnocení.....	85
9.3	Analýza systému tvarovka – výplňový beton .....	86
9.3.1	Analýza systému tvarovka – výplňový beton, při působení mrazu.....	86
9.3.2	Analýza systému tvarovka – výplňový beton, při působení vlhkosti.....	89
9.3.3	Vyhodnocení.....	107
9.4	Matematická simulace přetvoření .....	109
9.4.1	Uvažované situace .....	111
9.4.2	Výsledky výpočtu .....	112
9.4.2.1	Stanovení mezní teploty výplňového betonu .....	112
9.4.3	Teplotní pole a napjatost při rovnoměrném ochlazení sloupku.....	114
9.4.3.1	Teplotní pole .....	114
9.4.3.2	Napjatost.....	116
9.4.4	Vyhodnocení.....	117

DISKUZE .....	118
ZÁVĚR.....	121
Seznam použité literatury .....	123
Seznam použitých zkratek a symbolů .....	126

## ÚVOD

Betonové prvky jsou rozšířeným stavebním artiklem. Jejich využití je širokého rázu a výstavba za pomoci těchto zdících prvků se jeví jako snadná. S postupem času, jak se vyvíjí lidská populace, jsou kladeny nároky na výrobek, jak z technického, respektive fyzikálně mechanického hlediska, tak především z estetického hlediska, vyšší a vyšší. Samotný zdící betonový prvek zpravidla vzniká tzv. prefa výrobou za podmínek deklarující jeho kvalitu. Estetické požadavky na takový betonový prvek zajišťují širokou škálu, jak barevných provedení, a to díky již v dnešní době dobře známých barevných pigmentů, tak pohledových variant, kde můžeme mít tvarovky s hladkým povrchem nebo hrubým povrchem, který je vytvořen v závislosti na technologii výroby, buď štípáním, nebo složením betonové matrice, popřípadě odlišnou technologií výroby. V dnešní době jsou právě betonové tvarové zdící prvky velmi oblíbené pro výstavbu plotových konstrukcí. Charakter a účel takových plotových konstrukcí již netvoří pouze oddělovací rovinu odlišující pouze hranice dvou nebo více pozemků, ale v dnešní době nabývá především doplňujícího významu zkrášlující okolní prostředí.

Jak již bylo na začátku zmíněno, tak výstavba plotové konstrukce užitím betonových zdících prvků se jeví jako jednoduchá, což může být zavádějící. Je třeba dodržet určité požadavky či zásady, aby v průběhu času nedošlo k znehodnocení takovéto konstrukce, a to jak z bezpečnostního hlediska, kde by mohlo dojít v extrémních případech k ohrožení zdraví, tak především z hlediska estetického, vznikem nežádoucích jevů, a to buď odstranitelných, projevujících se ve formě například vápenných výkvětů nebo trvalých, projevujících se především tvorbou trhlin. Takto vzniklé poruchy se mohou objevit v závislosti na podmínkách již v krátkém časovém horizontu nebo až po delší době. Výsledkem je pak snížení samotné kvality plotové konstrukce. Odstranění poruch, především trvalých, je často spjato s nákladnou demontáží takové konstrukce.

Výsledky z praxe ukazují, že jako nejpravděpodobnější příčinou způsobující defekty zdících tvarových prvků je výstavba za nevhodných klimatických podmínek nebo nekvalitně provedená zálivková malta (výplňový beton) použitá k jejich zmonolitnění, popřípadě kombinace těchto vlivů. Na základě výskytu defektů zdících prvků ve formě trhlin a pro získání bližších informací o chování těchto poruch zdících prvků, příčin jejich vzniku a charakteru byla vypracována tato diplomová práce.

## CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je výzkum příčin vzniku poruch betonových prvků, které se vyskytují především ve formě trhlin. K výskytu poruch dochází velmi často u vibrolisovaných betonových zdících prvků. Defekty tvárnic ve formě trhlin vznikají podle dosavadních poznatků objemovou změnou zdícího systému, tedy vzájemnou interakcí mezi tvárnici a výplňovým betonem. V souladu se zadáním lze tuto práci rozdělit do dvou rovin.

V úvodní teoretické části diplomové práce budou vybrány a popsány dva druhy tvárnic typu Face Block a Simple Block. Dále bude věnována pozornost zásadám pro předejití výskytu poruch a provedeny rešerše zpráv zabývající se reklamačním řízením vzniklém na základě porušení plotových konstrukcí vlivem trhlin ve zdivu. Věnována bude také pozornost faktorům, které by mohly ovlivnit výplňový beton, jehož kvalita je podle dosavadních poznatků jedním ze základních kamenů ovlivňujícím možný výskyt poruch, a to v pravém slova smyslu. Vypsány budou základní objemové změny, kterým podléhá tento výplňový beton, a také stručný výčet metod pro měření objemových změn betonu atd.

Druhá část diplomové práce se zaměří na praktické ověření a simulace podmínek pro kvantifikaci potenciálních příčin vedoucích k vzniku defektů tvárnic. Bude vypracována metodika pro stanovení přetvoření, které vzniká působením klimatických vlivů a jejich cyklickému střídání. V tomto případě je práce zaměřena především na vlhkostní a teplotní namáhání. Namáhání zdícího prvku mrazem bude bráno jen okrajově. V praktické části bude věnována pozornost samotným zdícím tvarovkám, a také výplni sloužící pro zmonolitnění vzniklé konstrukce. Budou realizovány experimenty, jejichž cílem je pozorování chování systému tvarovka – výplňový beton, při vystavení vlhkostnímu a teplotnímu namáhání. Při vystavení tvarovek rozdílným klimatickým vlivům bude zjišťována velikost přetvoření a s tím související podmínky vedoucí k defektům zdících prvků. Za pomoci matematické simulace bude vytvořen model pro zjištění spolupůsobení vzniklého systému tvarovka – výplňový beton.

Cílem práce je tedy na základě teoretického rozboru a zhodnocení vybraných příkladů na reálných konstrukcích analyzovat možné příčiny vzniku trhlin v plotových sloupcích, zjištěné poznatky ověřit jak experimentálně, tak pomocí matematické simulace. Výsledné poznatky a údaje budou prezentovány formou tabulek, grafů a z těchto údajů bude vyvozen závěr.

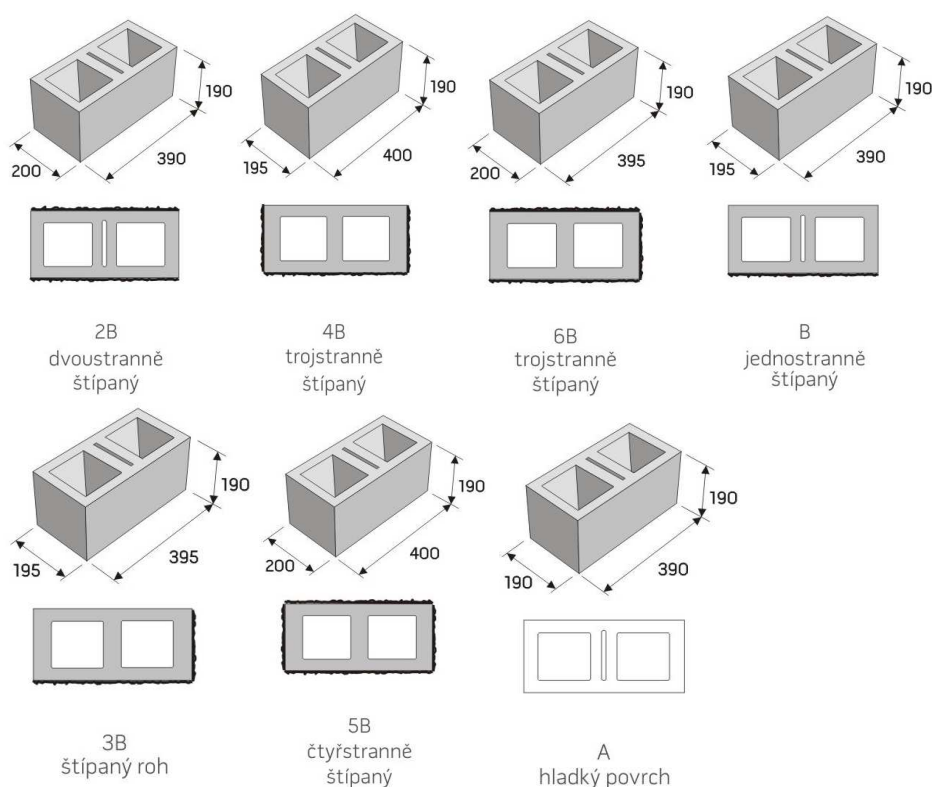
# TEORETICKÁ ČÁST

## 1 Specifikace zdících prvků

S ohledem na zaměření diplomové práce je nejdříve nutné vymezit dva základní typy betonových prvků s nejčastějším výskytem poruch. Obecně dochází k výskytu poruch v případě vibrolisovaných tvárnic, pro náš účel byly vybrány dva základní typy tvarovek FACE BLOCK a SIMPLE BLOCK. Následující část je věnována jejich popisu, vlastnostem, možnosti využití a variabilitě provedení.

### 1.1 Tvarové zdící prvky Face Block

Jedná se o betonové vibrolisované tvarové zdící prvky určené pro výstavbu garáží, budov, zídek a stěn, oplocení a drobné zahradní architektury. Tvarovky jsou tvaru kvádrů s vnitřní dělicí přepážkou, zajišťující jejich ztužení. Tento typ není určen k bezespárovému zdění. Zdící prvky se vyrábí v různých variantách, kde se od sebe liší barevnými variacemi a vzhledem vnějšího povrchu. Tvarovky jsou vyráběny v 7 barevných variantách: přírodní, písková, hnědá, cihlová, okrová, bílošedá a černá. Jednotlivého zbarvení je dosaženo pomocí barevných anorganických pigmentů. Pohledové části je hladká, kde hladkého povrchu je dosaženo výrobou v důsledku tvaru forem, nebo přírodního charakteru. Zde dochází při výrobě ke štípaní tvárnic a tímto procesem k dosažení přírodního povrchu. V závislosti na štípané straně jsou jednotlivé tvarovky rozděleny do 7 kategorií (Obrázek 1.1). V tabulce 1.1 můžeme vidět jednotlivé rozdělení s odpovídajícím označením. [1]



Obrázek 1.1: Varianty provedení štípaní tvarovek typu Face Block, převzato z [1]

Tabulka 1.1: Označení tvarovek typ Face Block [1]

Označení	Počet štípaných stran
HX 2/19/2B	2 strany
HX 2/19/4B	3 strany
HX 2/19/6B	3 strany
HX 2/19/B	1 strana
HX 2/19/3B	roh
HX 2/19/5B	4 strany
HX 2/19/A	hladká

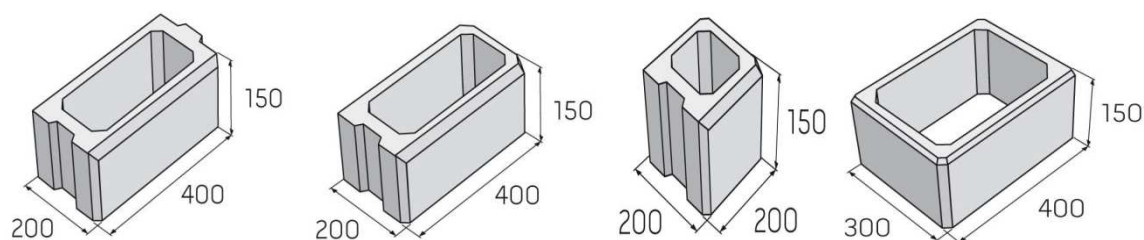
Systém posuzování a ověřování stálých vlastností, slouží pro deklaraci stabilních vlastností a identifikaci daného specifického výrobku. V tabulce 1.2, lze vidět deklarované vlastnosti zdících prvků typu Face Block podle systému 2+, dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011, Přílohy V, čl. 1.3.

Tabulka 1.2: Deklarované vlastnosti zdících tvarovek typu Face Block, převzato z [1]

Základní charakteristika	Vlastnosti			Harmonizované technické specifikace
Rozměrová tolerance, (kat. D1)	Délka	Šířka	Výška	ČSN EN 771-3 čl. 5.2.2
	+ 3 mm	+3 mm	+ 3 mm	
	- 5 mm	- 5 mm	- 5 mm	
Objemová hmotnost	min. 1900 kg/m <sup>3</sup>			ČSN EN 1338 čl. 5.4
Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu, vztaženo na celkovou plochu, kategorie I	10 N/mm <sup>2</sup>			ČSN EN 771-3 čl. 5.5.1
Mrazuvzdornost	50 cyklů			ČSN EN 771-3 čl. 5.7
Nasákavost	≤ 250 g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )			ČSN EN 771-3 čl. 5.8
Propustnost vodních par	5/15 (faktor difuzního odporu – tab. hodnota)			ČSN EN 771-3 čl. 5.10
Reakce na oheň	Třída A1			ČSN EN 771-3 čl. 5.11
Přídržnost (stanovená hodnota)	0,15 N/mm <sup>2</sup>			ČSN EN 771-3 čl. 5.12
Hmotnostní aktivita 226Ra	≤ 150 Bq/kg			Vyhláška 307/2002 Sb. ve znění Vyhl. č. 499/2005 Sb.
Index hmotnostní aktivity	≤ 0,35			
Ekvivalentní tepelná vodivost	1,0 W/m·K			ČSN EN 771-3 čl. 5.6

## 1.2 Tvarové zdící prvky Simple Block

Tyto vibrolisované betonové zdící prvky slouží především pro výstavbu plotových systémů. Vyrábí se s fazetou i bez, v závislosti na umístění v konstrukci a jsou určeny pro bezesparé zdění. Máme 4 typy tvarovek: průběžná celá, ukončující celá, ukončující poloviční a sloupková (viz Obrázek 2.1). Díky užití anorganických barvicích pigmentů jsou tvarovky vyráběny ve třech barevných variantách: přírodní, okrová a cihlová. Další vysokou variabilitu zajišťuje typ povrchu, který může být hladký, nebo hrubý. [1]



Obrázek 1.2: Varianty provedení zdících prvků typu Simple Block, zleva: průběžná celá, ukončující celá, ukončující poloviční a sloupková, převzato z [1]

V tabulce 1.3, lze vidět deklarované vlastnosti zdících prvků typu Simple Block podle systému 2+ dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011, Přílohy V, čl. 1.3.

Tabulka 1.3: Deklarované vlastnosti zdících tvarovek typu Simple Block, převzato z [1]

Základní charakteristika	Vlastnosti			Harmonizované technické specifikace
	Délka	Šířka	Výška	
Rozměrová tolerance, (kat. D1)	+ 3 mm	+3 mm	+ 3 mm	ČSN EN 771-3 čl. 5.2.2
	- 5 mm	- 5 mm	- 5 mm	
Objemová hmotnost	min. 1900 kg/m <sup>3</sup>			ČSN EN 1338 čl. 5.4
Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu, vztaheno na celkovou plochu, kategorie I	3,5 N/mm <sup>2</sup>			ČSN EN 771-3 čl. 5.5.1
Mrazuvzdornost	50 cyklů			ČSN EN 771-3 čl. 5.7
Nasákavost	≤ 250 g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )			ČSN EN 771-3 čl. 5.8
Propustnost vodních par	5/15 (faktor difuzního odporu – tab. hodnota)			ČSN EN 771-3 čl. 5.10
Reakce na oheň	Třída A1			ČSN EN 771-3 čl. 5.11
Přídržnost (stanovená hodnota)	0,15 N/mm <sup>2</sup>			ČSN EN 771-3 čl. 5.12
Hmotnostní aktivita 226Ra	≤ 250 Bq/kg			Vyhláška 307/2002 Sb. ve znění Vyhl. č. 499/2005 Sb.
Index hmotnostní aktivity	≤ 0,35			
Ekvivalentní tepelná vodivost	1,0 W/m·K			ČSN EN 771-3 čl. 5.6



## 2 Požadavky na zdící konstrukce

Tato kapitola je rozdělena do tří částí. Jednotlivé části jsou zaměřeny na normativní i nenormativní požadavky, které jsou kladeny na zdící prvek jako samostatný celek, výplň a spojení jednotlivých prvků a v neposlední řadě tvorbu celé zdící konstrukce. V našem případě jsou jednotlivé požadavky koncipovány ve smyslu tvorby zdící konstrukce ve formě plotové konstrukce.

### 2.1 Požadavek na zdící prvek

Zde je brán jako zdící prvek samostatná tvarovka. Základní požadavky na tvárnice udává norma ČSN EN 771-3 Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným a pórovitým kamenivem. V následující podkapitole bude tato norma blíže rozebrána a budou vybrány důležité vlastnosti, které mohou ovlivnit výskyt poruch tvárnic.

#### 2.1.1 ČSN EN 771-3 Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným a pórovitým kamenivem

V této normě jsou stanoveny charakteristické vlastnosti betonových tvárnic s hutným nebo pórovitým kamenivem nebo směsí obou těchto kameniv a funkční požadavky na vlastnosti těchto prvků. Tyto zdící prvky jsou určeny pro zhotovení obyčejného omítaného, neomítaného zdiva vnitřních nebo vnějších nosných i nenosných zděných konstrukcí v podzemních a inženýrských stavbách. Tvárnice jsou vhodné pro všechny druhy stěn včetně dutinových stěn. [2]

V našem případě je tvárnice definována jako lícový zdící prvek pro vnější stěny, který je vystaven působení vnějšího prostředí, není opatřen omítkou a není ani jiným způsobem chráněn. [2]

##### 2.1.1.1 Požadavky na betonové tvárnice

###### Objemová hmotnost v suchém stavu

Výrobce musí deklarovat objemovou hmotnost v suchém stavu v  $\text{kg/m}^3$ . [2] Tyto údaje lze použít pro výpočet:

- vlastní tíhy konstrukce
- vzduchové neprůzvučnosti
- tepelně technických vlastností
- reakce na oheň

Kromě toho výrobce smí deklarovat minimální a maximální jednotlivé hodnoty objemové hmotnosti betonu tvárnic v suchém stavu. [2]

###### Pevnost v tlaku tvárnic

Výrobce musí deklarovat pevnost v tlaku tvárnic v  $\text{N/mm}^2$ . Deklarovanou hodnotou musí být buď charakteristická pevnost tvárnic v tlaku  $f_c$  (pro pravděpodobnost 5 %), nebo průměrná pevnost tvárnice  $f_m$  (pro pravděpodobnost 50 %). [2]

Kromě pevnosti v tlaku musí výrobce deklarovat:

- zda betonová tvárnice náleží do kategorie I (zdící prvky, u nichž pravděpodobnost, že se nedosáhne deklarované pevnosti v tlaku, je menší než 5 %), nebo kategorie II (zdící prvky, u nichž se předpokládá, že nesplní podmínku požadovanou u prvků kategorie I) [2]
- podle potřeby normalizovanou pevnost v tlaku [2]

Deklarovaná pevnost v tlaku musí obsahovat údaje o orientaci tvárnic při zkoušce, údaj o způsobu provedení ložných spár při zkoušce a údaje o tom, zda se některé otvory v tvárnici úplně zaplní maltou. Výrobce musí deklarovat použitý způsob kondicionování a úpravu povrchu vzorků. [2]

Celá tvárnice nebo její části se mohou zkoušet v odlišné poloze, než je jich obvyklá poloha ve zdivu jenom tehdy, když existuje spolehlivá korelace mezi oběma způsoby zkoušení. [2]

### **Trvanlivost**

Pokud je to významné pro použití, pro které jsou betonové tvárnice uváděny na trh, musí výrobce vyhodnotit a deklarovat mrazuvzdornost betonových tvárnic odkazem na předpisy, které platí v místě určeného použití, až do doby, kdy bude k dispozici příslušná evropská norma. [2]

### **Nasákavost**

Pokud je to významné pro použití, pro které jsou betonové tvárnice uváděny na trh, a kromě toho u všech lícových zdících prvků pro vnější stěny, musí výrobce deklarovat maximální hodnotu součinitele nasákavosti lícových povrchu tvárnic v  $\text{g/m}^2\text{s}$ . [2]

### **Vlhkostní přetvoření**

Pokud je to významné pro použití, pro které jsou betonové tvárnice uváděny na trh, a kromě toho u všech betonových tvárnic, které jsou určeny pro nosné zdivo, musí výrobce deklarovat vlhkostní přetvoření (smrštění nebo roztažnost). [2]

### **Propustnost vodních par**

Pokud je to významné pro použití, pro které jsou betonové tvárnice uváděny na trh, a kromě toho u všech betonových tvárnic, které jsou určeny pro vnější stěny, výrobce musí deklarovat propustnost vodních par prostřednictvím tabulkové hodnoty faktoru difuzního odporu uvedené v EN 1745 nebo stanovené podle EN ISO 12572. [2]

### **2.1.1.2 Shrnutí**

Z výše vybraných požadavků v závislosti na úhlu pohledu, lze vyčíst jistou benevolentnost výše citované normy. Jak lze vidět, tak tato norma dává velký prostor výrobcí pro deklaraci vlastností výrobku. Udává sice požadavky na betonové tvárnice, ve smyslu definovaných veličin a jim odpovídající jednotky. Opomíjí však definice jednotkové hodnoty, ve smyslu konkrétní hodnoty, přiřazenou k jednotlivé veličině, které by odpovídala danému výrobku určenému pro konkrétní využití v příslušném prostředí. Vezmeme-li jako příklad vlhkostí přetvoření, tak zde nejsou definovány žádné hodnoty smrštění nebo roztažnosti.

Výrobce v závislosti na výrobku tak dostává velký prostor pro stanovení hodnoty, kterou bude deklarovat kvalitu výrobku. Což je málo obvyklé a je na pováženu jestli by tato norma neměla poskytnout výrobcům bližší jednotkovou specifikaci.

## **2.2 Požadavek na výplň, uložení a spojení zdiva**

Základem pro ukládání, spojování a spárování zdiva jsou malty. Výplňový beton slouží pro vyplnění dutin tvarovky. Při využití systému bezespáreho zdění nahrazuje funkci malty z části výplňový beton. Rozdělení a požadavky na malty a výplňový beton jsou uvedeny v ČSN EN 1996-1-1. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce. V následující podkapitole bude proveden stručný výpis z normy, jednotlivých požadavků na malty a výplňový beton.

### **2.2.1 ČSN EN 1996-1-1. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce**

#### **2.2.1.1 Malty**

Malta pro zdění je definována jako směs jednoho nebo více anorganických pojiv s kamenivem a vodou, někdy s příměsí nebo přísadou, používaná pro ukládání, spojování a spárování zdiva. [3]

#### **Druhy malt**

- a) Malty pro zdění lze v závislosti na složení definovat do následujících skupin: obyčejné malty, malty pro tenké spáry nebo lehké malty. [3]
- b) V závislosti na způsobu určení jejich složení se rozdělují na předpisové a návrhové. [3]
- c) Podle způsobu výroby se rozdělují malty na průmyslově vyráběné (předem mísené nebo dávkované), z části připravené průmyslově a staveništní. [3]
- d) Průmyslově vyráběné a předem dávkované malty musí splňovat požadavky EN 998-2. Malty připravované na staveništi musí vyhovovat EN 1996-2. Předem dávkované vápenopískové malty, používané pro výrobu na staveništi, musí splňovat požadavky EN 998-2 a být zhotovovány podle téže normy. [3]

## Specifikace malt pro zdění

- a) Malty lze dělit dle své pevnosti v tlaku, označené písmenem M a číslem vyjadřující pevnost v tlaku v  $\text{N/mm}^2$ , např. M5, nebo podle svého předepsaného poměru složení, např. 1 : 1 : 5, což udává poměr objemových dílů cementu : vápna : písku. [3]
- b) Obyčejné malty pro zdění mohou být buď jako návrhové malty podle EN 998-2 nebo předpisové malty podle téže normy. [3]
- c) Malty pro tenké spáry a lehké malty mají být návrhové malty podle EN 998-2. [3]

## Pevnost v tlaku malty pro zdění

- a) Pevnost malty v tlaku pro zdění se stanoví podle EN 1015-11. [3]
- b) Malta pro zdění určená pro použití ve vyztuženém zdivu musí mít pevnost  $f_m$  nejméně  $4 \text{ N/mm}^2$ . Malta pro zdění určená pro použití ve zdivu s výztuží do ložných spár musí mít pevnost  $f_m$  nejméně  $2 \text{ N/mm}^2$ . [3]

## Přídržnost malty a zdících prvků

- a) Přídržnost malty a zdících prvků musí být přiměřená zamýšlenému použití. Přiměřená přídržnost závisí na druhu použité malty a na zdících prvcích, s nimiž bude ve styku [3]

### 2.2.1.2 Výplňový beton

Výplňový beton pro zdění je definován jako beton vhodné konzistence, s vhodným největším zrnem kameniva pro vyplnění dutin ve zdivu. [3]

## Všeobecně

- a) Beton určený pro výplň musí vyhovovat ustanovení EN 206. [3]
- b) Výplňový beton je určen charakteristickou pevností v tlaku  $f_{ck}$  (pevnostní třída betonu), která se vztahuje k válcové/krychelné pevnosti ve stáří 28 dnů podle EN 206. [3]

## Požadavky kladené na výplňové betony

- a) Třída pevnosti výplňového betonu podle EN 206-1 má být nejméně C12/15. [3]
- b) Směs pro zhotovení výplňového betonu může být buď návrhová, nebo předpisová a má obsahovat dostatek vody k tomu, aby se dosáhlo jednak předepsané pevnosti, jednak vhodné zpracovatelnosti. [3]
- c) Zpracovatelnost výplňového betonu musí být taková, aby se dutiny ve zdivu zcela vyplnily, pokud se beton ukládá podle EN 1996-2. [3]
- d) Stupeň konzistence vyjádřený sednutím od S3 do S5 nebo stupeň konzistence vyjádřený rozlitím od F4 do F6 podle EN 206-1 jsou ve většině případů postačující. V otvorech, v nichž nejmenší rozměr je menší než 85 mm, se mají stanovit stupně konzistence S5 nebo S6. Jestliže se použijí silně ztekucené betony, musí se učinit opatření pro snížení nevhodně vysokého smršťování betonu. [3]
- e) Největší zrno kameniva výplňového betonu nemá být větší než 20 mm. U výplňového betonu, který se ukládá do dutin, jejichž nejmenší rozměr je menší než 100 mm, nebo

který tvoří krycí vrstvu výztuže tenčí než 25 mm, má být největší zrno kameniva nejvýše 10 mm. [3]

### Vlastnosti výplňového betonu

- Charakteristické hodnoty pevnosti v tlaku a ve smyku výplňového betonu se musí stanovit na základě zkoušek betonových těles. Výsledky zkoušek lze získat zkouškami v rámci zpracování projektu nebo jsou k dispozici jako součást databáze. [3]
- Jestliže nejsou výsledky zkoušek k dispozici, lze charakteristické pevnosti v tlaku  $f_{ck}$  a charakteristické pevnosti ve smyku  $f_{cvk}$  výplňového betonu převzít z tabulky 2.1. [3]

Tabulka 2.1: Charakteristické pevnosti výplňového betonu, převzato z [3]

Pevnostní třída betonu	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30 nebo vyšší
$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	12	16	20	25
$f_{cvk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	0,27	0,33	0,39	0,45

#### 2.2.1.3 Shrnutí

Z normy EN 1996-1-1 byly vybrány důležité vlastnosti a požadavky kladené na maltu a výplňový beton.

V dnešní době je velmi rozsáhlou oblastí využití průmyslové malty. Zde jsou již jednotlivé suroviny zamíchány v přesně definovaném poměru a je zaručena jejich kvalita v důsledku certifikace systému řízení výroby. U takto vyrobených malt stačí pouze zamíchání s vodou a následně aplikovat. Na rozdíl od malt připravovaných přímo na stavbě, kde je příprava komplikovanější v závislosti na zkušenostech a správném dávkování poměru jednotlivých komponent. Z tohoto vyplývá, že kvalita průmyslových malt je neúměrně vyšší a proto lze tvrdit, že užitím průmyslových malt vyhovíme výše uvedené normě a zároveň vyřadíme jejich vliv na možné negativní vlivy na výslednou konstrukci.

Požadavky kladené na výplňový beton dle EN 1996-1-1 jsou uvedeny v části: Specifikace výplňového betonu. Zde je požadováno dosažení vysoké míry ztekucení betonu v závislosti na minimální požadované třídě pevnosti betonu C12/15 a maximálním zrnem kameniva diskutabilní. V případě průmyslové výroby (v betonárně) a za pomoci užití superplastifikátoru nebude obtížné dosáhnout těchto parametrů. Vezmeme-li v potaz výrobu výplňového betonu v domácích podmínkách, kde můžeme téměř vyloučit užití plastifikátoru, bude dosažení požadovaných parametrů obtížné. Je známo, že s rostoucím vodním součinitelem, dochází k poklesu pevností betonu v tlaku. Dále pak při vysokém užití vody dochází při vysychání k tvorbě sítě kapilár. Při omezení velikosti frakce kameniva v závislosti na velikosti otvoru tvarovky, může dosáhnout vynechání jednotlivých frakcí kameniva, které bude mít za následek tvorbu mezerovitého betonu. Při následné kombinaci vysoké mezerovitosti a vysokého množství záměsové vody, nemusí dojít ke splnění požadavků na minimální třídu pevnosti. Zde je třeba zvážit, zda by norma

neměla blíže specifikovat výplňový beton ve smyslu poměru a dávkování jednotlivých komponent, tak aby byly zajištěny požadované vlastnosti. Tímto by se z části eliminoval možný pozdější výskyt poruch zděných konstrukcí.

## **2.3 Požadavky na výstavbu zděné konstrukce**

Tato podkapitola je zaměřena na výstavbu zděné plotové konstrukce opírající se o normativní i nenormativní poznatky a požadavky. Normativní požadavky jsou uvedeny v ČSN EN 1996-1. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 2: Volba, konstruování a provádění zdiva. Nenormativní poznatky byly získány z [1], [5]. V následujících jednotlivých krocích zde budou popsány postupy a doporučení pro výstavbu zděné plotové konstrukce.

### **2.3.1 Základy**

Základy jsou nedílnou a první částí zděné konstrukce. Musí splňovat určité konstrukční a funkční požadavky. Jejich základní funkcí je roznášení zatížení zděné konstrukce do půdy. Hloubka základů se odvíjí od tzv. nezámrazné hloubky. V našich podmínkách je požadovaná minimální hloubka základů 80 cm pod úroveň terénu. Z praktických znalostí [1], [5] postačí hloubka základové spáry v rozmezí 60 až 80 cm. Pevnostní třída základového betonu v intervalu C16/20 až C20/25.

Pro spojení základu se zdivem, a zajištění tak prostorové tuhosti, se má do základů vkládat výztuž tak, aby vyčnívala ze základů a umožňovala tak napojení s přesahem výztuže umístěné ve vlastní zděné plotové konstrukci. Průměr ocelové výztuže se doporučuje 14 nebo 16 mm, nebo v závislosti na projektové dokumentaci. [5] Minimální hloubka zapaštění ocelové výztuže do základů se doporučuje 25 cm. [1] Povrch výztuže nesmí být znečištěn, tak aby nedošlo ke snížení vzájemné soudržnosti oceli s maltou nebo betonem. Znečištění nastává, pokud je ocel v přímém kontaktu se zemí, blátem, olejem, mazivy nebo v místě svařování. [4]

Doporučená minimální výška základů nad okolním terénem je 5 cm. Aby nedocházelo vlivem kapilární elevace ke vzlínání vody ze základů do zdiva, je vhodné opatřit základy izolací proti zemní vlhkosti. Dále pro zajištění vzájemného spojení základové konstrukce a plotové konstrukce mimo kotvící prvky je třeba zajistit tuhé spojení a to pomocí izolační stěrky. [5]

### **2.3.2 Stavba zděné plotové konstrukce**

V závislosti na užití různých typů tvarovek můžeme rozlišit dva základní typy výstavby plotové konstrukce. V prvním z nich jsou tvarovky určeny k bezspáremu zdění. U tohoto typu tvarovek je zajištěna vyšší rozměrová přesnost tvárnic. Tvarovky jsou na sebe kladeny na sucho. Spojení a prostorová tuhost je zajištěna pomocí fazety, výplňového betonu a výztuže. Druhý typ výstavby, obvyklejší je zdění se spárou (vyšší rozměrová tolerance tvárnic) nebo lepení tvárnic k sobě pomocí lepidla (přesnější tvárnice). Pro zdění se spárou se doporučuje používat cementovou maltu. Při usazování tvarovek do maltového lóže (obvyklá tl. 10 mm) si je třeba uvědomit jejich rozměrovou toleranci. Proto se pro usazování doporučuje užít kolíčků, z důvodu rovinatosti spár. Spárování a zdění probíhá

současně. Přebytečná malta vytlačená ze spár se doporučuje odstranit až po částečném zavadnutí, to samé se doporučuje i při znečištění pohledové plochy tvarovek. [1], [5]

Při samotné výstavbě hrají důležitou roli klimatické podmínky. Jak malty, tak betony jsou limitovány teplotou cca 5 °C. Při této teplotě u betonů dochází k zpomalení hydratace cementu a při poklesu pod tuto teplotu dochází téměř k zastavení hydratace. U lepidel, jejichž součástí jsou syntetické pryskyřice, dochází k znehodnocení, v průběhu času dochází k vyplavení lepidla na povrch a následnému vzniku skvrn. [5]

Zajištění prostorové tuhosti se provádí pomocí svislé výztuže navázané na výztuž ze základu a vkládání vodorovné výztuže do ložných spár, která přenáší příčné napětí vyvolané ohybem. Aby se zabránilo tvorbě rezavých skvrn, z důvodu nedostatečné ochrany vrstvou ložné malty vodorovné výztuže, doporučuje se užití korozivzdornou ocel. Četnost vyztužení se odvíjí od rozměru konstrukce a typu tvarovky. Základem pro výpočet četnosti vyztužení plotové konstrukce je zatížení větrem. [1]

Pokud dochází ke vkládání kotevních prvků do sloupků, na něž je navázána plotová výplň doporučuje se užití nerezovou plátkovou ocel, pro zabránění tvorby skvrn rzi. Takto vkládaná ocel probíhá skrz celý sloupek, aby došlo k dostatečnému zakotvení. Je třeba si připravit drážky předem, následná tvorba drážek po zabetonování je pracná a může dojít při vrtání a sekání k poškození tvarovky. V případě užití kotevních prvků a jejich připevnění pomocí kotevních šroubů a hmoždinek se doporučuje užití tzv. chemických hmoždinek, které ve tvarovce nevyvolávají tahová napětí jako klasické plastové hmoždinky, které jsou zachyceny rozepnutím ve vyvrtaném otvoru. Tím se eliminuje možný vznik trhlin či poškození vyvolané ztrátou únosnosti kotevního prvku. [5]

Při výstavbě plotové konstrukce hrají nemalou roli dilatační celky. Požadavky a definice jsou uvedeny v ČSN EN 1996-1. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 2: Volba, konstruování a provádění zdiva. Pro zabezpečení proti poškození se mají ve zdivu používat dilatační spáry nebo zabudovaná výztuž, tak aby umožnili eliminovat dilatace od účinků změn teploty, vlhkosti, průhybu a dotvarování nebo přetvoření, které mají za následek vznik trhlin, boulení, zkroucení. Tato norma také udává minimální vodorovnou doporučenou vzdálenost pro zdivo z betonu a umělého kameniva 6 m. [4] Vzdálenost jednotlivých dilatačních celků se také odvíjí od intenzity vyztužení vodorovné výztuže. Z praxe je doporučeno zaměřit se na stěny, které jsou orientované jihozápadním směrem. V tomto případě jsou stěny nejvíce osluněny, tepelně namáhány. Při vystavení a probetonování, celé potové konstrukce dojde ke vzniku tuhé konstrukce. Jakmile nebude tato tuhá konstrukce obsahovat dilatační celky, může v důsledku klimatických vlivů dojít například k délkové deformaci a zablokování branky doplňující tuto konstrukci. V horších případech může dojít, až k nadměrné deformaci, která bude mít za následek potrhání konstrukce. Dilatační spáry se doporučuje vyplňovat trvale pružným lepidlem. [4]

### **2.3.3 Zastřešení plotové konstrukce**

Zastřešení plotové konstrukce se provádí za účelem zabránění vniknutí srážkové vody do výplňového betonu. Vzájemné spojení spár stříšek se má provádět za pomoci flexibilní spárovací hmoty nebo silikonového tmele. Vzájemné propojení stříšky a tvarovky se provádí pomocí mrazuvzdorného lepidla. Úpravou povrchů stříšek hydrofobní impregnací zabráníme tvorbě mechů a plísní. Takto upravené povrchy lze pak snadněji čistit. Doporučuje se poslední tvárnici nevyplňovat až po okraj, ale vytvořit částečnou vzduchovou mezeru mezi poslední tvárnicí a spodní částí zákrytové desky. Zabrání se tak možnému vnikání vody do výplňového betonu a provlhnání konstrukce. [1], [5]

### **2.3.4 Shrnutí**

Při výstavbě plotové konstrukce musíme dodržet určitá výše popsaná pravidla. Jednou ze základních podmínek, kterou je třeba dodržet, je vyvarování se realizace v období, kdy se teploty pohybují okolo teploty 5 °C nebo dokonce klesají pod tuto hodnotu. Přes den za slunečného počasí sice teploty mohou pohybovat nad touto hodnotou, ale v nočních hodinách již tomu tak být nemusí. Další chybou, často se vyskytující, je nedodržení nezámrazné hloubky základů. Stupeň vyztužení vypočítaný pomocí statického výpočtu zpravidla udává samotný výrobce, a tudíž není problém si jej dohledat. Zanedbatelná není ani tvorba svislých dilatačních spár, čímž jsou eliminovány negativní důsledky objemových změn. Z pravidla poslední část a velmi opomíjená je ochrana před deštěm či táním sněhu pomocí zastřešení, která brání provlhnání konstrukce. Při dodržení výše uvedených požadavků by mělo být zabráněno všem nežádoucím vlivům.



### 3 Analýza příčin poruch zdících prvků

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu potenciálních příčin poruch betonových zdících prvků. Následující text se zabývá analýzou poruch zděných plotových konstrukcí. K vypracování této části napomohly rešerše posudků zaměřené na tyto závady.

#### 3.1 Výsledky znaleckých posudků zdících prvků

Typickým příkladem poruch vyskytující se u plotových zděných konstrukcí vystavených z tvarovek typu FACE BLOCK a SIMPLE BLOCK je tvorba svislých trhlin. Jak lze vidět na obrázku 3.1, porušení zdícího prvku je charakteru trhlin. Jednotlivé trhliny se vyskytují ve velké míře ve sloupkové části plotové konstrukce. Trhliny se vyskytují nepravidelně nebo procházejí podél celé výšky sloupku. Jejich směr je zpravidla vertikální s občasným mírným bočním sklonem.



Obrázek 3.1: Výběr z fotodokumentace poruch zdících prvků – zastoupeny jsou typické poruchy

V rámci šetření in situ, dochází nejprve k vizuálnímu hodnocení poruch a následnému odebrání vzorku výplňového betonu za pomoci vývrtů na základě předpisu ČSN EN 12504-1. Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku. Před provedením vývrtu dochází ke zkoumání poškozeného tělesa pomocí ultrazvukové impulsní metody, pro zjištění fyzikálně-mechanických (heterogenních) vlastností výplňového betonu. Z vývrtů jsou následně vytvořeny zkušební tělesa a zpravidla jsou prováděny následující zkoušky:

- Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu podle ČSN EN 12390-7
- Pevnost v tlaku zkušebních těles podle ČSN EN 12390-3
- Zkouška nasákavosti podle ČSN EN 13369, příloha G

V následujícím textu byly vybrány 3 nezávislé znalecké posudky. Jako základní ukazatelé slouží objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku a hmotnostní nasákavost.

V prvním případě (Obrázek 3.2), byla plotová konstrukce provedena ze zdících prvků typu Simple Block. Samotná výstavba probíhala v období 31.10 až 2.11.2012. Následná reklamace v měsíci březnu 2013. Před provedením samotného vývrtu byla zkoumána heterogenita výplňového betonu pomocí ultrazvukové impulzní metody. Následná vizuální prohlídka potvrdila výskyt trhlin ve struktuře betonové výplně. Během vývrtu docházelo k vydrolování zrn kameniva ze zatvrdlého betonu. Maximální velikost zrna kameniva byla 16 mm. Z přiložené fotodokumentace lze vidět nepravidelný výskyt trhlin, jak ve sloupkové části, tak i ve zděné části plotové konstrukce. [6]



Obrázek 3.2: Výběr z fotodokumentace poruch zdících prvků [6]

V tabulce 3.1 můžeme vidět výsledky naměřených hodnot. Výsledná průměrná objemová hmotnost je  $2100 \text{ kg/m}^3$ . Průměrná pevnost betonu v tlaku je rovna  $18,6 \text{ MPa}$ , z čehož vyplývá, že výsledný výplňový beton splňuje požadavek na minimální pevnost betonu v tlaku, která po zatížení podle ČSN EN 206-1 odpovídá třídě C12/15. V případě nasákavosti ovšem výplňový beton již nesplňuje požadavek, kde nasákavost betonu pro venkovní užití za přítomnosti mrazu musí být menší než 7 %. V tomto případě se průměrná nasákavost betonu rovná 10,2 %. Tato hodnota převyšuje požadovaných 7 % téměř 1,5 krát. [6]

Tabulka 3.1: Výsledky naměřených hodnot podle znaleckých posudků [6]

Měřený údaj	Jednotka	Označení vzorku						Průměrná hodnota
		1a	1b	1c	1d	1e	1f	
Objemová hmotnost	$[\text{kg/m}^3]$	2030	2000	1990	-	-	-	<b>2100</b>
Pevnost v tlaku	$[\text{MPa}]$	19,0	17,9	18,9	-	-	-	<b>18,6</b>
Nasákavost	$[\%]$	-	-	-	9,9	10,4	10,3	<b>10,2</b>

Výsledky naměřené na získaném vzorku betonu prokazují, že tento výplňový beton není schopen odolávat dlouhodobému působení mrazu a vlhkosti. Což dokládá vydrolování

velkých zrn kameniva z jeho struktury a obsah sítě vlasových trhlin ve struktuře betonu. Vzorek betonu byl podle vnitřní struktury vystaven mrazu za jeho vysoké vlhkosti a při nízkém stupni hydratace, v důsledku toho s velkou pravděpodobností došlo k nesoudržnosti zrn kameniva a cementového tmelu. U betonu s nasákavostí vyšší než 7 % dochází vlivem vlhnutí a vysychání k velkým objemovým změnám, již při nadnulových teplotách a následnému vzniku napětí v plášti plotových tvarovek od nabývání výplně. V zimním období při minusových teplotách a vysoké nasákavosti dochází k destrukci vnitřní struktury vlivem změny vody v led. Nasákavost 7 % je třeba považovat za normou požadovanou mezní hodnotu. Pro zabezpečení mrazuvzdornosti by beton nebo malta měl mít nasákavost cca 5,0 %. [6]

Jako další byl vybrán posudek plotové konstrukce, kde taktéž došlo ke tvorbě trhlin. Plotová konstrukce byla vystavena na přelomu července a srpna 2012 z tvarovek typu Simple Block. Reklamace proběhla v březnu 2013. Na obrázku 3.3, lze vidět nepravidelný výskyt trhlin ve sloupkové části plotu. Před provedením vývrtu z výplňového betonu, byl vzorek podroben ultrazvukové impulsní metodě, díky níž byl zjištěn možný výskyt trhlin a dutin ve výplňovém betonu. Beton byl zhotoven z drobného kameniva a při odřezávání vzorku pomocí diamantového pilového kotouče docházelo k drobení betonu a to i při kontaktu s rukou. Na obrázku lze pozorovat vydrolení odebraného vzorku v části kontaktu s výztuží a vzájemné nepropojení spodní navazující části sloupkového prvku. [7]



Obrázek 3.3: Výběr z fotodokumentace poruch zděicích prvků [7]

Z výsledných hodnot je patrná nižší objemová hmotnost, tato hodnota je rovna  $1870 \text{ kg/m}^3$ . Velmi nízkých hodnot dosahuje i výsledná pevnost betonu v tlaku, kde průměrná hodnota pevnosti v tlaku na třech vzorcích vychází pouhých 6,5 MPa. Tuto hodnotu nelze zařadit dle ČSN EN 206-1, zde je minimální třída pevnosti betonu v tlaku C 8/10. Průměrná hmotnostní nasákavost vychází pak 12,2 %. Tato hodnota přesahuje mezní 7 % hodnotu, pro venkovní betony vystavené účinkům mrazu stanovenou normou a to 1,7 krát. [7]

Tabulka 3.2: Výsledky naměřených hodnot podle znaleckých posudků [7]

Měřený údaj	Jednotka	Označení vzorku						Průměrná hodnota
		2a	2b	2c	2d	2e	2f	
Objemová hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]	1840	1870	1890	-	-	-	<b>1870</b>
Pevnost v tlaku	[MPa]	6,9	6,5	6,2	-	-	-	<b>6,5</b>
Nasákavost	[%]	-	-	-	12,2	11,9	12,4	<b>12,2</b>

Z naměřených hodnot je prokázáno, že výplňový beton není schopen odolávat dlouhodobému působení vlhkosti a mrazu, dlouhodobě chránit výztuž před korozi a zajistit její spolupůsobení. Vznik trhlin v plášti byl zapříčiněn velkou objemovou změnou výplňového betonu a to především množstvím vody, kterou může absorbovat, díky jeho vysoké nasákavosti. Tato nasákavost má za následek změnu objemu, při nenulových teplotách zapříčiněnou vlhnutím a vysycháním, při záporných teplotách dochází ke změně skupenství vody na led a značnému zvýšení objemu. Pro zabezpečení mrazuvzdornosti by beton nebo malta měl mít nasákavost cca 5,0 %. [7]

Z přiložené fotodokumentace lze vidět nepravidelný výskyt trhlin v plotové konstrukci. Tato plotová konstrukce byla vystavena z tvárnic typu Simple Block, v měsíci září 2012, následná reklamace porušeného zdiva proběhla v březnu 2013. Ve sloupkové části se trhliny vyskytují v prostoru kotvení plotové výplně, ale i mimo ni, z čehož lze usoudit, že trhliny nejsou zapříčiněny usazováním kotevních prvků. Ze vzhledu řezné plochy, při odběru vzorku pro vývrty, lze usoudit, že beton byl vyroben z drobné frakce kameniva. Před provedením vývrty byl odebraný vzorek podroben impulsní ultrazvukové metodě. Pomocí ultrazvuku byla zjištěna nehomogenita betonu, která může být zapříčiněna výskytem trhlin ve vnitřní struktuře. [8]



Obrázek 3.4: Výběr z fotodokumentace poruch zdících prvků [8]

Ze vzorků byla stanovena nižší průměrná objemová hmotnost 1910 kg/m<sup>3</sup>. Výsledná průměrná pevnost v tlaku je rovna 9,8 MPa. Tuto výslednou pevnost v tlaku nelze zařadit dle ČSN EN 206-1, kde je minimální pevnostní třída C8/10 a minimální požadovaná pevnost pro zařazení do této pevnostní třídy je 10 MPa. Výsledná průměrná nasákavost výplňového betonu vychází 11,7 %. Tato hodnota překračuje mezní hodnotu 7 % téměř 1,7 krát. [8]

Tabulka 3.3: Výsledky naměřených hodnot podle znaleckých posudků [8]

Měřený údaj	Jednotka	Označení vzorku						Průměrná hodnota
		3a	3b	3c	3d	3e	3f	
Objemová hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]	1920	1890	1910	-	-	-	<b>1910</b>
Pevnost v tlaku	[MPa]	8,4	9,1	11,8	-	-	-	<b>9,8</b>
Nasákavost	[%]	-	-	-	11,5	11,9	11,7	<b>11,7</b>

Z naměřených hodnot je prokázáno, že výplňový beton není schopen odolávat dlouhodobému působení vlhkosti a mrazu, dlouhodobě chránit výztuž před korozí a zajistit její spolupůsobení. Za příčinu vzniku trhlin v plášti plotových tvarovek jsou považovány nadměrné objemové změny výplňového betonu. U betonu s nasákavostí vyšší než 7 % dochází vlivem vlhnutí a vysychání k velkým objemovým změnám již při nadnulových teplotách a následnému vzniku napětí v plášti plotových tvarovek od nabývání výplně. V zimním období při minusových teplotách a vysoké nasákavosti dochází k destrukci vnitřní struktury vlivem změny vody v led, což má za následek zvýšení objemu. Pro zabezpečení mrazuvzdornosti by beton nebo malta měl mít nasákavost cca 5,0 %. [8]

Předešlé výskyty poruch zdících prvků byly zaznamenány, až po zimním období. K výskytu trhlin ovšem dochází také mimo zimní sezónu, kdy vystavěná plotová konstrukce neprochází mrazem. Bohužel posudek z takového období není k dispozici. Výskyt defektů, vedl pracovníky firmy Presbeton k výstavbě části plotové konstrukce ve formě sloupků, za účelem experimentálního ověření příčin vzniku trhlin bez působení mrazu. Na obrázku 3.5, lze vidět sloupky z tvárnic typu Simple Block, u kterých došlo k poškození vlivem trhlin.



Obrázek 3.5: Výběr z fotodokumentace poruch zdících prvků

Pro experimentální ověření výskytu trhlin, byly výrobcem zdících prvků, tedy pracovníky firmy Presbeton, vystavěny tři sloupky. Jeden sloupek byl upraven tak, že z jedné části došlo k vyložení sloupku pružným mirelonem a druhá část zůstala bez úpravy (Obrázek 3.5 vpravo), následně byl sloupek probetonován. Další sloupek byl, bez jakékoliv úpravy vyplněn betonem (Obrázek 3.5 vlevo). Poslední sloupek, byl slepen pomocí flexibilního lepidla, bez užití záливkové malty.

Tato sada třech sloupků byla vystavena v období okolo 10. dubna a výskyt poškození vlivem trhlin byl zaznamenán za dobu 2 měsíců u dvou sloupků, tedy v měsíci červnu. U sloupku, bez probetonování nebyly pozorovány žádné defekty. Podle dat získaných na webu českého hydrometeorologického ústavu, byla minimální průměrná teplota za období duben cca 5 °C. Tudíž bychom mohli vyloučit vznik trhlin vlivem působení mrazu. U sloupku zmonolitněného betonem, procházela trhlina druhou tvarovkou od vrchu (Obrázek 3.5 uprostřed) a byla zaznamenána v měsíci červnu. V měsíci listopadu došlo k zaznamenání nového výskytu trhlin u sloupku vyloženého mirelonem a zmonolitněného betonem. U sloupku vyloženého mirelonem se trhlina vyskytla v horní části tvarovky (Obrázek 3.6 vlevo). U vybetonovaného sloupku vznikla trhlina ve druhé tvarovce od spodu viz detail obrázek 3.6 vpravo.



Obrázek 3.6: Výběr z fotodokumentace poruch zdících prvků

Poškození vyloženého sloupu mirelonem, byly pozorovány v místě, bez vyložení zdíčního prvku. Tedy tam, kde dochází k spolupůsobení tvarovky s výplňovým betonem. Bohužel bližší specifikace ve formě zkoušek, které byly provedeny na výplňovém betonu, jako v předešlých rešerších, nejsou k dispozici.

Po výskytu defektů ve formě trhlin ve sloupcích, se pracovníci firmy Presbeton rozhodli rozšířit tento experiment výstavbou další sady sloupků (Obrázek 3.7). Tato výstavba, byla provedena na sklonku května. V tomto případě, se jednotlivé sloupky liší složením záливkové malty, typem užití tvarovky a spojením zákrytových desek. Pro tuto výstavbu byly využity tvarovky typu Simple Block s hladkým a hrubým povrchem. Zákrytové desky se spojili pomocí mrazuvzdorného lepidla k sobě nebo byly ponechány bez úpravy, tedy nespojeny. V případě zákrytových desek nespojených, došlo při srážkách k znatelnému provlhání zdiva a hromadění vody pod těmito deskami (viz Obrázek 3.8). V případě nově vystavené sady sloupků však nebyly pozorovány doposud žádné defekty.



Obrázek 3.7: Výběr z fotodokumentace, experimentální výstavby sloupků – zkušební sloupky realizované výrobcem tvárnic



Obrázek 3.8: Výběr z fotodokumentace, vliv spojení zákrytové desky na zatékání vody

### 3.2 Vyhodnocení příčin poruch zdících prvků

Na zdící prvek jsou kladeny jak normativní, tak i nenormativní požadavky. Výsledný výrobek je pravidelně kontrolován a jeho kvalitu podmiňuje výrobce dodržением platných norem. Proto se jako velmi nepravděpodobné jeví příčina poruch zdících tvarových prvků vlivem výroby, a tedy samotného zdícího prvku.

Jak vyplívá z rešerší znaleckých posudků, tak se jako vysoce pravděpodobné jeví špatný návrh výplně tvarovky betonovou směsí, a také nesprávného provedení výplně. Z výsledků zkoušek, teoretických a praktických poznatků o chování betonu lze tedy konstatovat, že zásadní vliv na výskyt poruch má výplňový beton.

Z naměřených výsledků je patrná závislost výsledných parametrů. S klesající objemovou hmotností dochází k poklesu pevnosti a nárůstu nasákavosti. Jak lze vidět z výsledků, tak i dosažením minimální požadované třídy pevnosti C12/15 (první případ), kterou stanovuje norma ČSN EN 1996-1-1. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí [3], není zabezpečen možný výskyt poruch.

Jako základní ukazatel nekvality a nevhodnosti výplňového betonu se jeví nasákavost betonu, nebo-li jeho mezerovitost. Za kritickou hodnotu můžeme považovat hranici nasákavosti do 7 %. Tato hodnota vyplívá z ČSN EN 13198. Betonové prefabrikáty, kde je

kladen požadavek na nasákavost výrobku pro venkovní užití vystaveného zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům [9]. Zde je sice zmíněno, že se nasákavost vztahuje na výrobek, nikoli na výplňový beton, ale vzhledem k interakci mezi tvarovkou a výplňovým betonem, můžeme tuto hodnotu vztáhnout na výplňový beton. Vzhledem k absenci jakýchkoliv jiných požadavků na výplňový beton, než těch, které jsou uvedeny v kapitole 2.2, můžeme tuto hodnotu použít jako mezní a vztáhnout jí na výplňový beton. Mezní hodnota 7 % nasákavosti je považována za normou dostačující. Bezpečně mrazuvzdorný beton by měl mít nasákavost cca 5,0 %. [6], [7], [8]

U všech odebraných vzorků bylo zjištěno překročení nasákavosti 7 %. Vše tedy nasvědčuje tomu, že poruchy zděných plotových konstrukcí má za následek nekvalitní výplňový beton a jeho následná aplikace do dutin tvarovek. Jako zásadní se ukazuje podcenění jeho výroby, aplikace a celková kompletace plotové konstrukce. Při kombinaci mrazu a vlhkosti dochází k vnikání kapaliny do jeho struktury. V důsledku mrazu pak změně skupenství z kapalného na pevné. Tato přeměna je doprovázena nárůstem objemu o hodnotu pohybující se kolem 9 %. S tím je spojen vývin tlaků ve struktuře zdiva. Při několika násobném opakování tohoto procesu pak dochází k uvolnění napětí ve formě výsledných trhlin ve zdivu.

Nesmíme zapomenout ani na zmíněné objemové změny vyvolané nadměrným provlháním a vysycháním zdiva v důsledku vysoké nasákavosti, která zapříčiňuje tvorbu kapilár, tedy zvyšuje jeho permeabilitu. Je otázkou, do jaké míry se může provlhání a vysychání zdiva podílet na vzniku trhlin. Tento jev by mohl být příčinou poruch sloupku, uvedeném v poslední části analýzy příčin poruch zdících prvků. Bohužel v tomto případě neproběhla žádná měření a nelze vznik trhlin vlivem nadměrného provlhnutí a vysychání zdiva bez působení mrazu potvrdit, ale ani vyloučit. Provlhnutí a vysychání zdiva, je jeden ze základních aspektů, na který je v rámci této práce zaměřena pozornost.

Výstavba za chladného počasí při teplotě okolo 5 °C nebo dokonce pod tuto teplotu zpomaluje nebo dokonce zastavuje hydrataci cementu a brání tak vytvoření tuhého celku. Provlhnutí zdiva a následné pronikání vlhkosti do konstrukce za chladného počasí, taktéž snižuje jeho kvalitu a životnost v případě nekvalitního betonu.

Závěrem lze tedy říci, že za poruchy vzniklé na plotových konstrukcích, z informací získaných z rešerží posudků, může nekvalitně provedený výplňový beton, jeho vysoká nasákavost, spolu s kombinací expozice a výstavby za nízkých teplot. Otázkou je, do jaké míry, se na defektech zdících tvarových prvků může podílet působení jiných klimatických podmínek, než-li nízké teploty, a jaký vliv má na toto chování nekvalitní výplňový beton.



## 4 Faktory ovlivňující kvalitu betonu

Vliv na vznik a rozvoj poruch zdících prvků nemá jen výplňový beton a jeho kvalita, ale i mnoho dalších faktorů, které s jeho výrobou souvisí, a to jak jeho složky, tak i nepřímé součásti jeho výroby a neposlední řadě klimatické podmínky. Při jeho výrobě a následné aplikaci a výstavbě zděné konstrukce je třeba dodržet určitá ustanovení a pravidla, kterým jsme se věnovaly v kapitole 2. V kapitole 3 můžeme vidět praktickou ukázkou poškození konstrukce v důsledku špatného návrhu nebo provedení výplňového betonu. V této kapitole jsou popsány jednotlivé faktory, jejichž samostatným účinkem nebo kombinací, může být příčinou vzniku a propagace poruch zdících prvků a konstrukcí z nich postavených.

Základní složky betonu jsou cement, voda, kamenivo, a doplňující složky (přísady a příměsi). V našem případě doplňující složky (přísady a příměsi) a jejich vliv na kvalitu betonu můžeme vynechat. Tyto složky jsou zpravidla přidávány při průmyslové výrobě betonu, kde jejich užití je ozkoušeno a kvalita takového betonu je deklarována.

### 4.1 Cement

Cement je základní pojivou hydraulickou složkou betonu. Jeho základní složkou je slínek, který vzniká výpalem vhodné surovinové moučky obsahující odpovídající poměr těchto základních čtyř oxidů: CaO (odpovídající zkratka C), SiO<sub>2</sub> (S), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F). Slínek je složen ze dvou kalciumsilikátů C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S obsahující asi z 80% slínek. A dvou kalciumaluminátů C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF cca 20 % slínku. Kalciumalumináty se podílí na prvotní fázi, tedy tuhnutí, zatímco kalciumsilikáty se podílejí na dlouhodobých pevnostech, tedy procesu tvrdnutí. Pro zajištění dostatečné doby tuhnutí se při mletí přidává jako tzv. regulátor tuhnutí sádrovec (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O), hemihydrát (CaSO<sub>4</sub> · ½H<sub>2</sub>O), anhydrit (CaSO<sub>4</sub>) nebo jejich směsi. [11]

Cement se dělí dle ČSN EN 197-1 do pěti skupin podle složení:

- CEM I – portlandský cement
- CEM II – portlandský směsný cement
- CEM III – vysokopecní cement
- CEM IV – pucolánový cement
- CEM V – směsný cement

Běžně pro naše účely se setkáme s prvními dvěma druhy cementu, portlandským cementem (CEM I) a směsným cementem (CEM II).

Dále se cementy dělí dle fyzikálních vlastností do třech základních tříd, každá třída má dvě označení N a R, kde písmeno N označuje cement s normálním nárůstem počátečních pevností a písmeno R označuje cement s vysokým nárůstem počátečních pevností. V tabulce 4.1, můžeme vidět jednotlivé rozdělení cementů a požadavky na jejich vlastnosti podle ČSN EN 197-1.

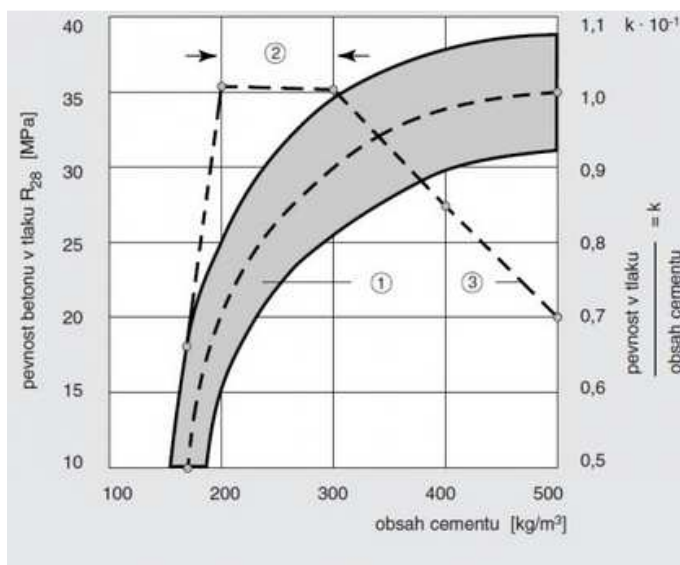
Tabulka 4.1: Fyzikální vlastnosti cementů

Třída cementu	Pevnost v tlaku [MPa]			Počátek tuhnutí [min.]	Objemová stálost [min.]
	počáteční pevnost		normalizované pevnost		
	2 dní	7 dní	28 dní		
32,5 N	–	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	$\geq 75$
32,5 R	$\geq 10,0$	–			
42,5 N	$\geq 10,0$	–	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\leq 10$
42,5 R	$\geq 20,0$	–			
52,5 N	$\geq 20,0$	–	$\geq 52,5$	–	
52,5 R	$\geq 30,0$	–			

Cement po smíchání s vodou tuhne a tvrdne. V závislosti na množství vody, který udává tzv. vodní součinitel ( $w$ ), tedy poměr mezi hmotností vody ( $v$ ) a hmotností cementu ( $c$ ), dochází k tvorbě hydratačních produktů C-A-H, C-A(F)-H, C-S-H, C-H...

#### 4.1.1 Množství cementu

S rostoucí dávkou cementu v závislosti na množství záměsové vody dochází ke zvýšení pevnosti, voděodolnosti, ochraně výztuže a modulu pružnosti betonu. Nadměrná dávka však má za následek smrštění a následný vznik trhlin, vysoký vývin hydratačního tepla a poklesu pevnosti, kdy dochází k tzv. nakypření. Minimální dávka cementu je u prostého betonu  $200 \text{ kg/m}^3$ . Minimální dávka cementu v závislosti na stupni vlivu prostředí je udávána  $260 \text{ kg/m}^3$  a maximální pak  $360 \text{ kg/m}^3$ . Dávka nad hodnotu  $450 \text{ kg/m}^3$  pak výrazně nezvyšuje kvalitu betonu, ale neúměrně jeho cenu. Na obrázku 4.1, v oblasti bodu 1 lze pozorovat nárůst pevností s dávkou cementu (závislost byla stanovena pro bývalou třídu cementu 25), při zachování stejné zpracovatelnosti (tuhá a plastická  $w = 0,5 - 0,9$ ; křivka zrnitosti B). Oblast 2 je stanovena jako nejefektivnější využití cementu. Část 3 udává pevnost v tlaku a obsah cementu. [12]



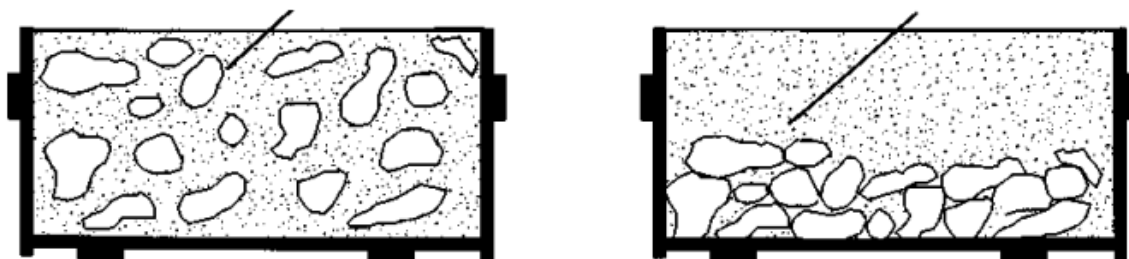
Obrázek 4.1: Poměr obsahu cementu na pevnosti v tlaku, převzato z [12]

## 4.2 Kamenivo

Kamenivo vyplňuje beton ze 70 – 80 % objemu. Hlavním účelem kameniva je tvořit kostru betonu s minimální mezerovitostí. Základní rozdělení kameniva je podle petrografie, frakce (0,063 - 0,125 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 32 - 64 -125 mm), vzniku (těžené, drcené, přírodní, umělé) a objemové hmotnosti (do 2000 kg/m<sup>3</sup> lehké; 2000 - 3000 kg/m<sup>3</sup> hutné; nad 3000 kg/m<sup>3</sup> těžké). V případě klasického betonování se setkáme s hutným kamenivem do velikosti frakce 32 mm.

### 4.2.1 Zrnitost kameniva

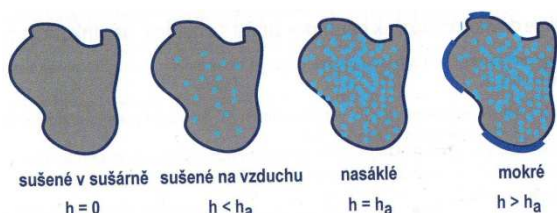
Snahou je docílit co nejnižší mezerovitosti, tedy co nejvyšší hutnosti kameniva, tak aby menší zrna mohly vyplnit mezery mezi většími zrny. Tato kostra je pak spojena cementovým tmelem, který obalí jednotlivá zrna kameniva a vyplní prostor mezi nimi. Tím vznikne tvrdý a pevný materiál. Při míšení různých frakcí je snaha docílení ideální zrnitosti, což je velmi podceňováno. Na obrázku 4.2 můžeme vidět nedodržení vhodnosti frakce spolu s vysokým množstvím záměsové vody a nízkým obsahem cementu, při užití hrubé frakce kameniva, kde dochází k segregaci, nebo-li odmísení kameniva. [13]



Obrázek 4.2: Příklad segregace kameniva, převzato z [14]

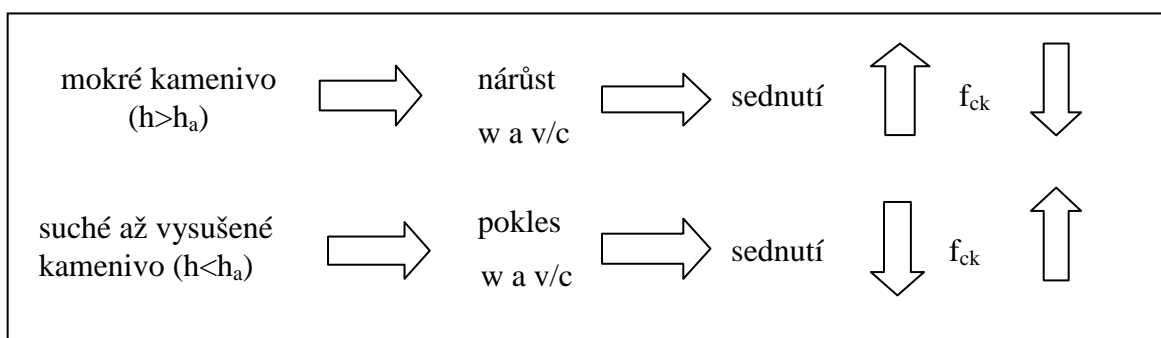
### 4.2.2 Vlhkost a nasákavost kameniva

Vlhkost kameniva zásadně ovlivňuje pevnost, pórovitost, trvanlivost a zpracovatelnost betonu. Vlhké kamenivo může ovlivnit množství záměsové vody a s tím spojenou zpracovatelnost a výslednou pevnost betonu. Je třeba si uvědomit, že kamenivo může obsahovat póry a tyto póry mohou být zaplněny vodou, jedná se tedy o tzv. nasákavost kameniva ( $h_a$ ). Nasákavost kameniva  $h_a$  můžeme tady definovat tak, že kamenivo je uvnitř nasycené vodou, ale na povrchu je suché. Vlhkost kameniva ( $h$ ) se stanovuje z hmotnostního úbytku v procentech při sušení do dosažení úplného vysušení. Na obrázku 4.3 můžeme vidět základní vlhkostní stavy kameniva. [10]



Obrázek 4.3: Schematické znázornění různých vlhkostí kameniva, převzato z [10]

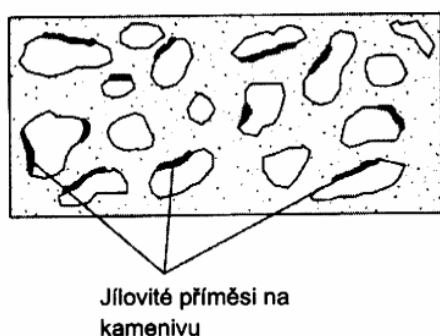
Jak již bylo zmíněno, tak vlhkost a nasákavost kameniva ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti betonu. Ideální je stav, kdy kameniva je nasáklé, ale má suchý povrch ( $h = h_a$ ). V tomto případě kamenivo neabsorbuje vodu a ani jí neodebírání cementovému tmelu. Na obrázku 4.4 můžeme vidět vliv vlhkosti kameniva na fyzikální a mechanické vlastnosti betonu. [10]



Obrázek 4.4: Vliv vlhkosti kameniva na zpracovatelnost a pevnost betonu v tlaku, převzato z [10]

### 4.2.3 Obsah organických látek v kamenivu

V tomto případě se může jednat například o humusovité nebo jílové částice, které jsou součástí drobného kameniva. Dále pak bobtnající organické látky jako dřevo, uhlí. Tyto látky se mohou dostat do betonu v případě využívání říčních písku při domácí výrobě. Organické látky (cukry, rozpustné soli) mohou ovlivnit tvrdnutí betonu.



Obrázek 4.5: Nevhodné kamenivo s jílovými příměsi, převzato z [14]

## 4.3 Voda

Voda je jednou ze základních složek betonu. Bez její přítomnosti by nemohlo dojít k hydrataci cementového zrna, v tomto případě se jedná o tzv. vodu hydratační. Minimální potřeba vody na hydrataci činí přibližně 23 % až 25 % hmotnosti cementu. Pro zajištění tvárnosti čerstvého betonu ve spojení s jeho složkami slouží voda reologická. Kde plastičnost čerstvého betonu je zajištěna kohezi pomocí kapilárních sil. Technologicky se voda rozděluje na záměsovou vodu, která se přidává při mísení betonu a ošetrovací, voda sloužící pro ošetření betonu a udržení ve vlhkém stavu [15]. Při domácí výrobě, bez užití plastifikačních přísad je velmi obtížné dodržet technologické požadavky na beton v závislosti na jeho zpracovatelnost (viz kapitola 2.2.1.2). Obecně lze tedy říci, že množství záměsové vody ovlivňuje zásadně návrh betonové směsi.

Základním ukazatelem pro množství záměsové vody je tzv. vodní součinitel ( $w$ ), který se stanoví z poměru hmotnosti vody ( $m_v$ ) ke hmotnosti cementu ( $m_c$ ).

$$w = \frac{m_v}{m_c} \quad (1)$$

#### 4.3.1 Vliv frakce kameniva na množství záměsové vody

Pro dosažení určité konzistence (zpracovatelnosti) čerstvého betonu je potřeba stanovit množství záměsové vody. Konzistence čerstvého betonu se stanovuje dle ČSN ISO 4109, kde jsou jednotlivé třídy označeny symbolem (od S1 do S5). Lyse [10] stanovil množství záměsové vody potřebné k dosažení určité konzistence v závislosti na velikosti kameniva. Lyseho pravidlo vychází z měrného povrchu kameniva, kde pro větší zrno kameniva ( $D_{\max}$ ) je potřeba menší množství záměsové vody, než pro kamenivo menší pro dosažení stejné konzistence (viz Tabulka 4.2). [10]

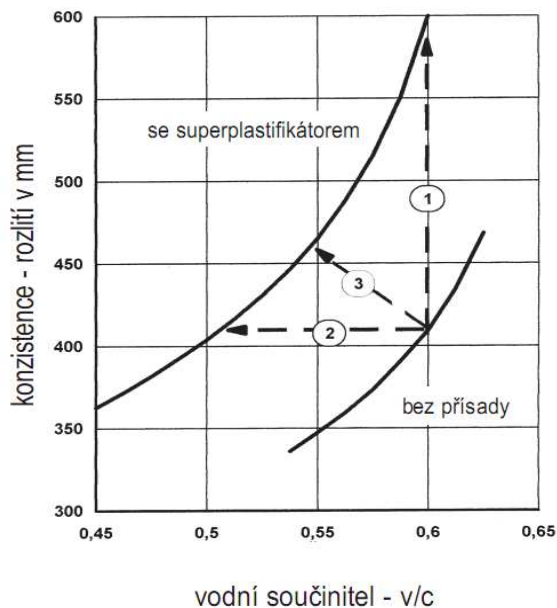
Tabulka 4.2: Lyseho pravidlo: vliv max. zrna kameniva na dávku záměsové vody, převzato z [10]

Max. zrno (mm)	Dávka vody [ $\text{kg/m}^3$ ] podle stupně konzistence				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220

Tuto tabulku dle Lyseho je třeba brát s určitou rezervou, protože v praxi jsou uplatňovány další parametry, jako typ kamenina (těžené drcené), křivka zrnitosti, granulometrie, nasákavost aj. Podstata je ale stále stejná.

#### 4.3.2 Vliv množství vody na konzistenci betonu, bez užití superplastifikačních přísad

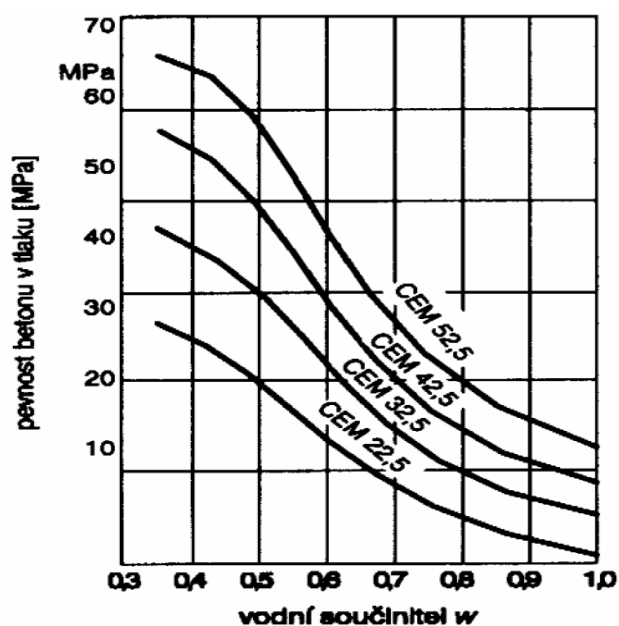
Ve většině případu dochází při výstavbě plotových konstrukcí za pomoci vlastní výroby výplňového betonu, je tedy velmi reálný předpoklad, že nejsou používány plastifikační a superplastifikační přísady. Proto je k dosažení potřebné konzistence, pro vyplnění tvarovky udávané normou EN 1996-1-1 [3] značné množství záměsové vody. Na obrázku 4.6 můžeme vidět rozdíl konzistence betonu stanoveného rozlitím dle EN 12350-5, při užití superplastifikátoru a bez jeho užití. Tento případ je třeba brát obecně, protože je mnoho dalších faktorů, které mohou mít vliv na konzistenci a to například, typ kameniva (drcené, těžené), typ a množství cementu aj.



Obrázek 4.6: Porovnání konzistence betonu v závislosti na vodním součiniteli s a bez užití superplastifikátoru, převzato z [16]

#### 4.3.3 Vliv množství záměsové vody na pevnost betonu v tlaku

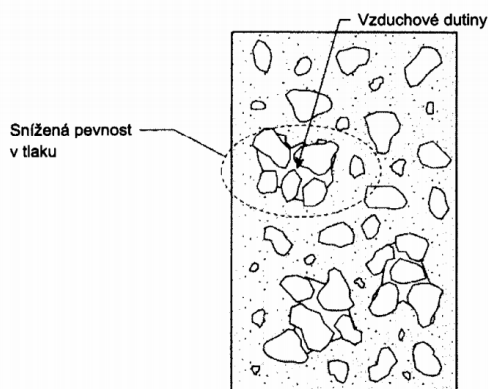
Voda při kontaktu s cementovým zrnem vyvolá reakci (hydrataci), při níž dochází na povrchu zrna k tvorbě vláken C-H-S gelu, která jsou nositelem pevností. Tyto vlákna se začínají postupně dotýkat a následně přemostňovat mezery mezi hydratujícími zrny, až do stavu tvrdnutí. Mezi jednotlivými částicemi prorostlých vláken C-S-H gelu jsou mikropóry, tyto mikropóry se nazývají kapiláry, jejich velikost se pohybuje v rozmezí 0,1 až 10  $\mu\text{m}$ . Kapiláry zvyšují permeabilitu a snižují pevnost a trvanlivost betonu. Snižováním vodního součinitele se snižuje vzdálenost mezi hydratujícími zrny cementu, zahustí se tak síť vláken a dalších forem C-S-H gelu. [10] Na obrázku 4.7 lze vidět pokles pevností betonu s rostoucím vodním součinitelem.



Obrázek 4.7: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu, převzato z [14]

## 4.4 Zhutnění betonu

Při správném návrhu betonové směsi může její nesprávné zhutnění způsobit problémy. V závislosti na konzistenci betonové směsi a maximální velikosti použitého zrna kameniva je třeba provést určité zhutnění. V našem případě tak, aby beton vyplnil celý objem dutiny tvarovky a nedošlo k tvorbě dutin a to jak mezi tvarovkou a výplňovým betonem, tak ve výplňovém betonu v důsledku zaklesnutí kameniva (viz Obrázek 4.8).



Obrázek 4.8: Nekvalitně uložený beton, převzato z [14]

V takovémto případě dochází ke snížení pevnosti betonu. Vlivem kapilárního systému pak může pronikat voda ve formě páry do těchto dutin a v nich kondenzovat. V zimním období pak vlivem přeměny skupenství vody v led dochází k nárůstu objemu a následné deformaci cementového tmele.

## 4.5 Teplota

Teplota má vliv jak na pevnost cementu, tak na pevnost výsledného betonu. Normové podmínky udávají teplotu  $20 \pm 2$  °C, v praxi však teplota při míchání a ukládání betonu této hodnotě nedopovídá.

Vliv teploty na kvalitu betonu a jeho výslednou pevnost můžeme definovat pomocí tvorby vláken C-S-H gelu. V prvním případě obsah vláken C-S-H gelu roste v závislosti na stupni hydratace a v druhém případě je houževnatost vláken C-S-H gelu závislá na teplotě. Colleparidi [10] uvádí rovnici, kde je z kvantitativního hlediska vysvětlen vliv vláken C-S-H gelu na výslednou pevnost:

$$f_c = K \cdot [0,6790 \cdot \alpha / (0,3175 \cdot \alpha + v/c)]^3 \quad (2)$$

$K$  je konstanta závislá na teplotě a druhu cementu,  $\alpha$  je stupeň hydratace cementu a poměr  $v/c$  udává vodní součinitel.

Při nízkých teplotách pod hodnotu 15 °C dochází ke zpomalení tvorby hydratačních produktů a následného tvrdnutí, což má za následek snížení počátečních pevností. Vliv nižších teplot má za následek pomalejší růst vláken C-S-H gelu, paradoxem je, že tyto vlákna jsou pak kvalitnější (větší a houževnatější), ale jejich počet je postupem času menší. Výsledná pevnost a množství vláken C-S-H gelu je ovlivněna také vodním součinitelem

(viz kapitola 4.3.3), a dobou expozice nízkým teplotám. Základní složky jako jsou voda a kamenivo by nemělo být vystaveny nízkým teplotám, tím by byl umocněn efekt zpomalení tvrdnutí. Doporučuje se používat cementy CEM I typu R, pro rychlý nárůst počátečních pevností. Zde je využito měrné hydratační teplo ( $q_t$ ), které se odvíjí od druhu a pevnostní třídy cementu. [10]

V případech, kdy teplota kolísá k nulovým hodnotám a v noci je dosaženo teplot pod bodem mrazu, hrozí nevratné poškození čerstvého betonu. Jak je všeobecně známo, tak objem vody při přechodu na led nabývá o 9 %, což má za následek nárůst hydraulického tlaku v pórové mikrostruktuře betonu. Pokud beton nedosahuje dostatečné pevnosti, dochází vlivem napětí v tahu k místnímu porušení struktury. Proto je třeba chránit beton v raném období nebo neprovádět betonáž. Minimální počáteční pevnost nazývaná zmrazovací pevnost  $R_z$  je udávána hodnotou 5 MPa, ale také v mezích 2,5–15 MPa. Tato zmrazovací pevnost není dostačující pro vícenásobné zmrazování, v jehož důsledku vlivem opakování dochází k rozšíření a prodloužení vzniklých mikrotrhlin. Minimální pevnost v tlaku pro odolnost proti 25 zmrazovacím cyklům je udávána 12–15 MPa. [15] Ale ani v tomto případě nemusí být zabezpečena mrazuvzdornost (viz kapitola 3).

Pytlík [15] popsal vliv záporných teplot na kvalitu betonu v závislosti na vzrůstající pevnosti  $R_B$  a rozdělil je na tři časové období:

- $R_B \leq 0,1$  MPa. V této části prakticky ještě nezačala hydratace a při dosažení teplot pod bodem mrazu hydratace ustává. Dojde-li k pozdějšímu zvýšení teploty nad hodnotu 5 °C, hydratace může nerušeně pokračovat a prakticky nedojde k porušení struktury a snížení konečných pevností. Při roztání krystalu ledu mezi zrny cementu dojde k opětovnému vrácení do těsného seskupení.
- $R_z (= 5 \text{ MPa}) > R_B > 0,1$  MPa. V případě vystavení záporným teplotám dochází k vytvoření ledu ve struktuře betonu, destrukci a porušení cementového kamene, následnému vzniku trhlin a znehodnocení betonu. V takovémto případě nedosáhne beton pevností ani v budoucnu.
- $R_z < R_B < R_{\min} (= 12\text{--}15 \text{ MPa})$ . Tvrdnoucí beton může jedenkrát zmrznout bez jeho výraznějšího porušení struktury nebo snížení pevnosti. V tomto stádiu dochází k nárůstu pevností, beton však není odolný zmrazovacím cyklům.

Tabulka 4.3: Vliv teploty na vývoj pevností, převzato z [10]

Teplota [°C]	Pevnost [%] v čase [dní]:				
	1	3	7	28	90
31 - 37	140	115	100	95	90
24 - 30	125	110	100	95	95
17 - 23	100	100	100	100	100
10 - 16	35	35	80	100	120
6 - 9	15	25	50	90	110
0 - 5	0	10	30	40	50



V předchozí tabulce můžeme vidět výsledky pevnosti betonu v závislosti na teplotě. Těchto hodnot lze dosáhnout při použití cementu pevnostní třídy 32,5R s vodním součinitelem do hodnoty 0,41 nebo u cementu 42,5R kde  $w < 0,45$ .

Při vyšších teplotách v důsledku vyššího stupně hydratace dochází k nárůstu množství vláken C-S-H gelu. Zato v pozdějším období se projevuje jejich kvalita, která má za následek nižší konečné pevnosti [10]. V důsledku vyšších teplot může dojít ke snížení zpracovatelnosti. Tento jev by neměl být řešen prostřednictvím přídatku záměsové vody (viz kapitola 4.3.3), ale například volbou jiného typu cementu, např. CEM II typu N nebo omezení přímého vystavení slunci a to, jak kamenivo, tak strojní zařízení či samotný beton.

## 5 Objemové změny betonu

Objemové změny betonu mají značný vliv na konstrukci a její fungování. Faktory ovlivňující kvalitu betonu (viz kapitola 4), a jejich kombinace mají za následek objemové změny betonu. Vlivem objemových změn jako je bobtnání, či smršťování může docházet k porušení konstrukce, a to jak ve větší, či menší míře. Přetvoření je komplikovaný jev, který je závislý na čase. Přetvoření zpravidla vznikají v důsledku působení napětí a mohou se projevovat okamžitě či se zpožděním. Přetvoření mohou být vratná či nevratná. Vratná přetvoření mohou být způsobena změnou teploty a vlhkosti, zato nevratná vznikají od smršťování nebo nabývání. Betonový prvek se může vlivem trvalého konstantního napětí volně přetvářet. Toto přetvoření má za následek dotvarování prvku. Zamezíme-li přetvoření od dotvarování, dojde ke snížení napětí a vznikne relaxace. Relaxace je tedy snížení napětí při konstantním přetvoření. Deformace je zdrojem vzniku trhlin, větších či menších a nepříznivě ovlivňuje chování a vlastnosti stavebních prvků a konstrukcí. Na vznik těchto nepříznivých přetvoření může mít vliv mnoho faktorů, a to jak zatížení prvku, kdy dochází k dotvarování, tak samostatné složení prvků, kdy dochází většinou ke smrštění nebo nabývání. Je třeba zmínit, že všechny tyto změny spolu úzce souvisí a dá se s nadsledem říci, že jsou na sobě závislé. [17] Můžeme si rozdělit objemové změny podle způsobu deformace, která je buď vyvolána s, nebo bez působení napětí (viz Tabulka 5.1).

Tabulka 5.1: Popis deformace betonu, převzato z [18]

<b>Deformace betonu vznikající bez vlivu napětí</b>		
	<b>Vratné</b>	<b>Nevratné</b>
<b>Krátkodobé</b>	teplotní deformace $\epsilon_t = \alpha \cdot \Delta t$	
<b>Dlouhodobé</b>		smršťování $\epsilon_s$
<b>Deformace betonu vyvolané napětím</b>		
	<b>Vratné</b>	<b>Nevratné</b>
<b>Krátkodobé</b>	pružnost-Hookeův zákon	plastické
<b>Dlouhodobé - DOTVAROVÁNÍ</b>	zpožděné pružné	zpožděné nevratné

## 5.1 Fyzikální vyjádření objemových změn

Fyzikálně lze objemové změny vyjádřit pomocí relativního délkového přetvoření  $\varepsilon$ , vycházející z Hookova zákona:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

kde  $\Delta l$  odpovídá změně délky vůči původnímu rozměru  $l_0$ . Délkové relativní přetvoření  $\varepsilon$  se udává jako bezrozměrná veličina nebo lze také vztáhnout na změnu délky v metrech na původní metr (m/m). V závislosti na velikosti přetvoření udávají jednotliví autoři toto přetvoření ještě v jednotkách mm/m nebo  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Jak Nováček ve své práci [19] upozornil, tak vyjádření objemových změn délkovým rozměrem je poněkud zavádějící. Následující přepočítání na celkovou změnu objemu s přihlédnutím k anizotropnímu chování hydraulických silikátů není jednoznačné. V našem případě, ale postačí udávání přetvoření v délkovém rozměru.

Nováček ve své práci [19] s využitím značení teorie modelování objemových změn udává výpočet pro celkové (totální) relativní přetvoření hydratujícího silikátu v rozsahu celkové životnosti vztahem 4.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{chem} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{mech} + \varepsilon_c + \varepsilon_{deg} + \varepsilon_{pl} \quad (4)$$

Ze vztahu 4 lze vyčíst, že totální objemová (délková) změna rozměrů, je rovna součtu přetvoření o původní chemické  $\varepsilon_{chem}$ , tepelné  $\varepsilon_{th}$ , mechanické  $\varepsilon_{mech}$ , creepové, nebo-li dotvarovací  $\varepsilon_c$ , degradační  $\varepsilon_{deg}$  a smrštění v čerstvém plastickém stavu  $\varepsilon_{pl}$ .

Chemické přetvoření  $\varepsilon_{chem}$  je vlastní chemické smrštění projevující se zpočátku jako záporná změna vnějších rozměrů a později jako vnitřní celkové pórovitosti. U směsí s prvotní chemickou (krystalickou) expanzí se započítává kladné přetvoření. Tepelné přetvoření  $\varepsilon_{th}$  je celková objemová změna vyvolaná tepelnou roztažností nebo smrštěním v závislosti na hydratačním teplu, výparném a kondenzačním teplu vody a spolupůsobení okolní teploty. Mechanické síly působící na skelet silikátu mají za následek mechanické přetvoření  $\varepsilon_{mech}$ . Na mechanické přetvoření se podílí externí zatížení  $\varepsilon_{e,load}$  a přetvoření vyvolané poklesem kapilárního tlaku, tzv. smrštění vysycháním  $\varepsilon_{shr}$ . Smrštění vysycháním zahrnuje autogenní smrštění a hygroskopickou reakci vyvolanou při změně relativní vlhkosti okolního prostředí. Dotvarování vyvolané vlivem externího nebo interního zatížení, které může být způsobeno vlhkostními nebo teplotními gradienty je tzv. creepové přetvoření  $\varepsilon_c$ , nazývané také jako dotvarování. Degradační přetvoření  $\varepsilon_{deg}$  je způsobeno dlouhodobou degradací vyvolanou jevy jako sulfatace, karbonatace. [19]

## 5.2 Smrštění betonu

Smrštění lze popsat jako zmenšení objemu, které je vyvoláno bez působení vlivu napětí. Jedná se o deformaci nevratnou dlouhodobou. Smrštění není jednoduše popsatelný jev. Vlivem kapilárních jevů dochází k úbytku vody vázané v krystalové mřížce (chemicky vázaná voda) a vlivem migrace vlhkosti (molekuly vody mezi zrny hydratujícího cementu)

mezi různě velkými kapilárami, podle napětí vodních par okolního prostředí dochází ke smrštění. Současně působí napětí na rozhraní cementového kamene a povrch kameniva. Bylo zjištěno, že cementový kámen zpočátku tvrdnutí stlačuje povrch kameniva v radiálním směru. V důsledku výše zmíněných kapilárních sil dochází ke smršťování cementového kamene a stlačování povrchu kameniva. Inflexní bod této závislosti zhruba odpovídá změně pružné deformace na trvalou – plastickou. Zmenšení deformace na povrchu zrn kameniva snížíme nejen smrštění, ale i zvýšíme mechanické vlastnosti betonu. [20]

Některé dílčí způsoby smršťování působí souběžně, nebo postupně přecházejí jeden v druhý. Vysychání se může, podle podmínek prostředí, v kterém se beton nachází, cyklicky střídát s přijímáním vody z okolí (nabýváním/ bobtnáním). Smrštění cementového kamene je vyvoláno fyzikálně chemickými vlivy. Smrštění můžeme dělit do následujících základních skupin:

- plastické smrštění
- smrštění vysycháním
- autogenní smrštění
- hydratační smrštění
- karbonatační smrštění

### **5.2.1 Smršťování vysycháním (vlhkostní)**

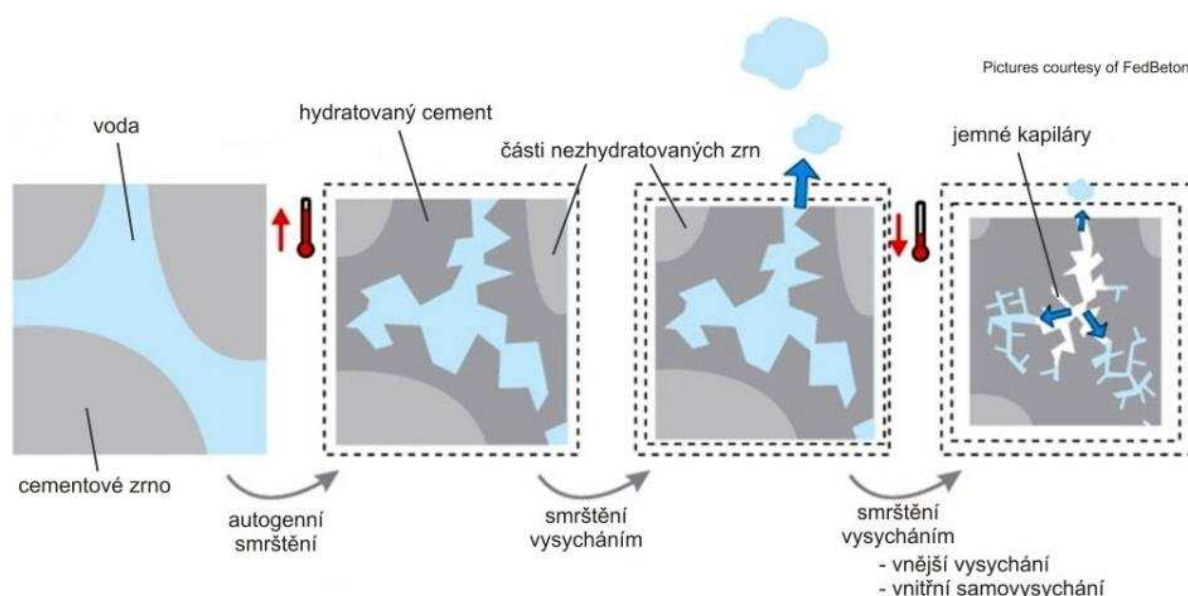
Základem smrštění vysycháním je migrace vlhkosti v kapilárách. Migrace vlhkosti souvisí s kapilární pórovitostí a relativní vlhkostí vnějšího prostředí. Odpařování vody z kapilár probíhá do doby vytvoření rovnováhy mezi vlhkostí vzduchu a vlhkostí cementového kamene. Ovlivnění smrštění vysycháním lze výrazně ovlivnit velikostí kapilár 0,36 až 0,5 mm. Zvlhčování a vysušování pórové struktury cementového kamene je příčinou reverzibilního smrštění, které představuje asi 2/3 celkového smrštění cementového kamene vlivem migrací vlhkosti. Smršťování vysycháním se podílí nejvíce na výsledném smrštění a může dosáhnout hodnoty až 2,5 mm/m. Při vlhkostní smršťování vznikají objemové změny v době od uložení do doby cca 21 dní, výrazně ovlivňují spolehlivost betonových konstrukcí, neboť vzniká množství vad, které mají původ již v projektové činnosti. [20]

Colleparidi uvádí [10], že zásadní vliv na smrštění vysycháním má kamenivo, respektive granulometrie. Kamenivo zde hraje roli překážky, která má za úkol bránit hydratujícím zrnům cementového tmele vyvíjet smrštění. Čím hutnější je kostra kameniva, tím je více bráněno smrštění vysycháním cementového tmele. Experimentálně bylo zjištěno, že smrštění betonu je zanedbatelné při relativní vlhkosti 95 %. Což je způsobeno tím, že parciální tlak v kapilárách cementové pasty je nižší, než parciální tlak vody ve volném prostoru. Proto také kondenzuje pára v kapilárních pórech v cementové pastě při hodnotě nižší než 95 % relativní vlhkosti (kapilární kondenzace).

## 5.2.2 Smršťování autogenní (chemické)

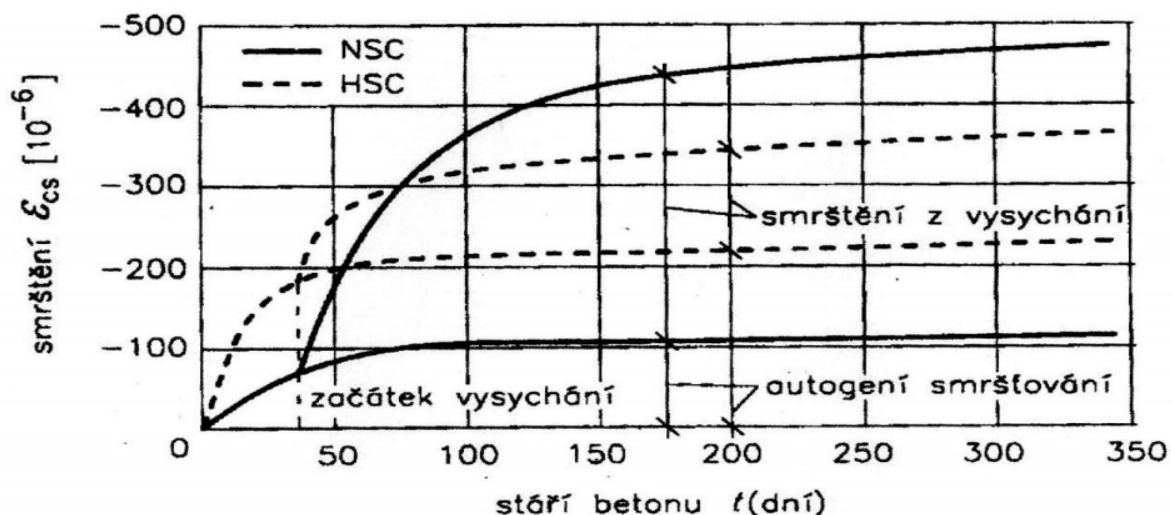
Princip autogenního smrštění je založen na tom, že vstupní složky (voda, cement), vstupující do procesu hydratace nabývají většího objemu než složky po hydrataci (cementový kámen). Toto chemické smrštění je závislé na vnitřním vysychání, tzv. samovysychání, které závisí na tom, jak intenzivně může voda prostupovat po výšce průřezu. Tento typ smrštění zpravidla probíhá u betonů s velmi nízkým vodním součinitelem (0,30 - 0,40). U betonu s vodním součinitelem nad hodnotu 0,45 se uvádí [10], že je autogenní smrštění zanedbatelné (zhruba 50  $\mu\text{m}/\text{m}$  za dobu 1 měsíc a 100  $\mu\text{m}/\text{m}$  za dobu 5 let) a to z důvodů, že u betonů s rostoucím vodním součinitelem se stává kapilární systém hrubší, tím umožňuje hydrataci zrna cementu obsažených v hrubých kapilárách, pouze ze záměsové vody, bez přítomnosti ošetřování, protože voda je v hrubých kapilárách slabě vázaná a její odvod je snadný. V tomto případě již voda zcela nezaplňuje kapiláry a dochází k tvorbě menisků. V případě hrubých kapilár vyvíjí menisky vzniklé odvodem vody na stěny hrubých kapilár nižší napětí. U betonu s nižším vodním součinitelem je velikost kapilár malá, transport vody z důvodu hydratace cementového zrna (tzv. samovysychání) mezi hrubšími a jemnějšími kapiláry a následný vznik menisků je intenzivnější, což má za následek zvýšení tahového napětí a snížení objemu hydratované cementové pasty. [22]

Autogenní smršťování rozhoduje spolu s vývojem hydratačního tepla o velikosti tahových napětí v průřezu. Toto smrštění probíhá delší dobu. Velmi významnými faktory jsou vodní součinitel a jemnost mletí, které udávají rychlost hydratace a hydratační teplo. Udává se, že toto smrštění může nabýt hodnoty až  $0,9 \cdot 10^{-3}$  mm v závislosti na vodním součiniteli. [20] Schematicky lze smršťování vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Schematický popis smrštění autogenního a smrštění vysycháním, převzato z [12]

Na obrázku 5.2, lze vidět časovou závislost poměrného přetvoření autogenního smršťování  $\epsilon_{ca}$  a smršťování vysycháním  $\epsilon_{cd}$  pro běžný beton (NCS) a pro vysokopevnostní beton (HSC).



Obrázek 5.2: Časová závislost poměrného přetvoření autogenního smrštění a smrštění z vysychání, převzato z [21]

### 5.2.3 Plastické smrštění

Jedná se o poruchy, které se projevují již v čerstvém stavu ihned po uložení a zhutnění čerstvého betonu, tedy v amorfní hmotě, která se ještě neřídí zákony pevných látek. Toto smrštění je výrazně ovlivněno vodním součinitelem a teplotami na povrchu při ukládání čerstvého betonu. V důsledku vysokého vodního součinitele, velkému množství vody, které vede k nadměrnému odpařování vody a k výraznému zmenšení objemu v době tuhnutí a vzniku trhlin. Zásadně je tento jev ovlivněn větrem, než teplotou prostředí. Z tohoto důvodu je nutné udržovat povrch betonu vlhký a zabránit tak rychlému odpařování vody. Odtud plyne možnost využití nástříků, pro zabránění rychlému odpařování vody. U plastického smršťování a sedání se jedná o poruchy povrchu betonu. Původ těchto poruch můžeme hledat ve složení betonu, způsobu zhutňování, ale především v ošetřování.

Jako nejdůležitější se jeví teplotní gradient ( $\delta T$ ). Jedná se o rozdíl teplot v daném čase mezi nejteplejším místem betonu (uprostřed) a nejchladnějším (na kraji). Colleparidi [10] stanovil podle vztahu 5, výpočet maximální tahové deformace ( $\varepsilon_t$ ) v závislosti na teplotním gradientu ( $\delta T$ ):

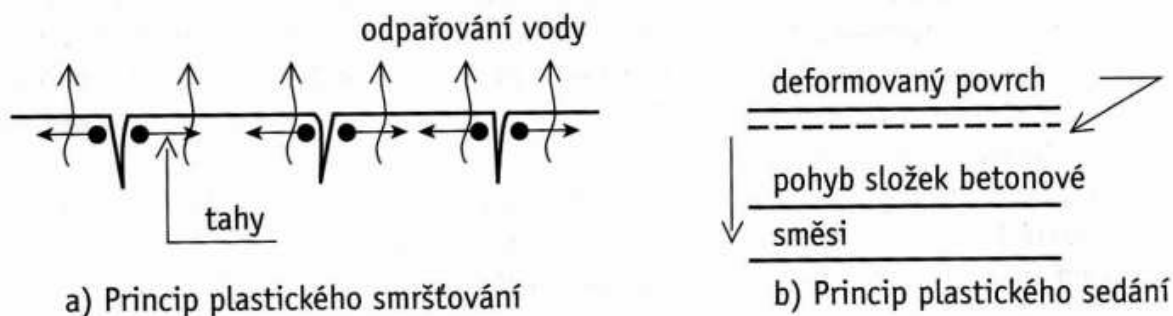
$$\varepsilon_t = \delta T \cdot \beta_t = 200 \cdot 10^{-5} = 200 \mu m/m \quad (5)$$

kde  $\beta_t = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  je koeficient teplotní roztažnosti betonu,  $\delta T$  je teplotní gradient odpovídající  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ . V důsledku toho, že maximální deformace betonu při namáhání v tahu je asi  $200 \mu m/m$ , musí být maximální teplotní gradient  $\delta T$  nižší než  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Při nedodržení této podmínky může dojít k tvorbě trhlin na povrchu betonu.

Na povrchu betonových konstrukcí mohou vznikat trhliny jak vzniklé plastickým smršťováním, tak plastickým sedáním. Tyto jevy probíhají současně a účinky se projevují při rozdílných tloušťkách průřezu nebo v místě nad uložení výztuže. Poruchy toho charakteru se projevují v době od 15 min do cca 8 hodin po zhutnění betonu. Na povrchu

se trhliny mohou jevit jako velmi úzké, ale po obroušení povrchu dosahují šířky až 3 mm, mívají nepravidelný tvar a jejich hloubka může být, až 80 mm. [20]

Zdroje plastického smršťování a plastického sedání jsou obdobné, i když jejich mechanismus je jiný.

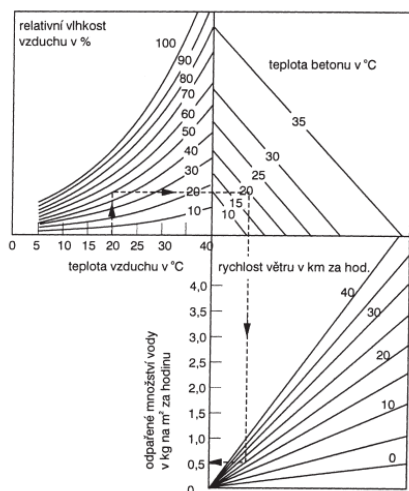


Obrázek 5.3. Princip plastického sedání a smršťování, převzato z [20]

V případě plastického smršťování se jedná o poruchy vzniklé vodorovným přetvořením od rychlého vysychání betonu, který je ve fázi tuhnutí, ale ještě je v plastickém stavu, tedy nemůže přenášet žádné tahové a smykové napětí (viz Obrázek 5.3a).

V případě plastického sedání jde o neschopnost čerstvého betonu přenést současně tahová a smyková napětí vznikající od rozdílů ve svislých deformacích, které vznikají transportem nadbytečné záměsové vody k povrchu ztuhlého betonu a následným odpařováním. Transport nadbytečné záměsové vody má tedy za následek pohyb cementového tmele spolu s kamenivem ve ztuhlém betonu (Obrázek 5.3b) a přispívá tak ke zvýraznění trhlin od plastického smršťování, anebo je způsobuje a nelze je od sebe výrazně oddělit. [20]

Na obrázku 5.4, můžeme vidět vliv okolních podmínek na rychlost odpařování. Při teplotě vzduchu 20 °C, relativní vlhkosti vzduchu 50 %, teplotě betonu 20 °C, rychlosti větru 20 km/h dojde k odpaření vody v množství  $0,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obrázek 5.4: Vliv okolních podmínek na rychlost odpařování vody z povrchu betonu, převzato z [16]

Významný vliv mají rozdílné tloušťky uložených vrstev. U deskových nevyztužených konstrukcí, u kterých se průřez po dále nemění, dojde k poklesu povrchu betonu v celém rozsahu rovnoměrně a nedochází k žádným viditelným změnám. Při rozdílné tloušťce průřezu (naš případ), se projeví vliv rozdílného plastického sedání, kdy beton nedozrává v celém průřezu vlivem rozdílných teplot, rychlosti odvodu nadbytečné vody k povrchu a rozdílným vývinem hydratačního tepla, což vede ke vzniku rozdílných tahových napětí, rozdílné napjatosti po výšce průřezu a následné deformaci povrchu nebo vzniku trhlin. [20]

#### 5.2.4 Hydratační smršťování

Je vyvoláno hydratací slínekových minerálů jako  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_4AF$ ,  $C_3A$ , které je doprovázeno objemovými změnami. Dochází ke zmenšování objemu systému (cement + voda) při současném zvětšování objemu tuhé fáze. Udává se, že z  $1 \text{ cm}^3$  cementu vznikne  $2,2 \text{ cm}^3$  gelu. Hydratace probíhá postupně a hydratační smrštění je časově závislé na stupni hydratace. Faktorem ovlivňující toto smrštění je především jemnost mletí cementu. U cementu s vyšším měrným povrchem je toto smrštění vyšší. Například hydratační smrštění za dobu 40 až 50 dní bývá  $0,2 \text{ mm/m}$ . [20]

#### 5.2.5 Karbonatační smršťování

Vzniká v důsledku karbonatace cementového kamene působením vzdušné vlhkosti  $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$ . Vyskytuje se na povrchu betonu při styku se vzduchem obsahující  $\text{CO}_2$  (běžně  $0,03 \%$  obj.). Tento druh smršťování probíhá v časovém úseku let. [20]

### 5.3 Bobtnání

Beton krom smršťování vykazuje i objemové změny v opačném směru. Tento jev můžeme nazvat například bobtnání. Na bobtnání mohou mít vliv dva hlavní faktory, kterými jsou teplota a vlhkost. Pytlík uvádí [15], že teplotní roztažnost betonu je dána součet změn vzdálenosti molekul v důsledku kinetiky pohybu molekul. V důsledku obsahu póru, gelových (vyskytujících se uvnitř hydrátů o velikosti  $1 - 10 \text{ nm}$ ) a kapilárních ( $0,1 - 10 \mu\text{m}$ ) v cementovém kameni dochází při působení tepla k objemovému přetvoření vlivem změny povrchového napětí fyzikálně vázané vody v kapilárách a bobtnání gelu. Zdánlivá teplotní roztažnost je definována jako součet objemových změn koloidní látky vlivem migrace fyzikálně vázané vody mezi gelovými a kapilárními póry, beze změny celkového obsahu vody. Teplotní roztažnost je pak dána součtem pravé a zdánlivé teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost lze pak rozdělit na objemovou a lineární. Lineární teplotní roztažnost betonu, lze vypočítat podle vztahu 6.

$$\Delta l_T = l \cdot \Delta T \cdot \alpha_T [m] \quad (6)$$

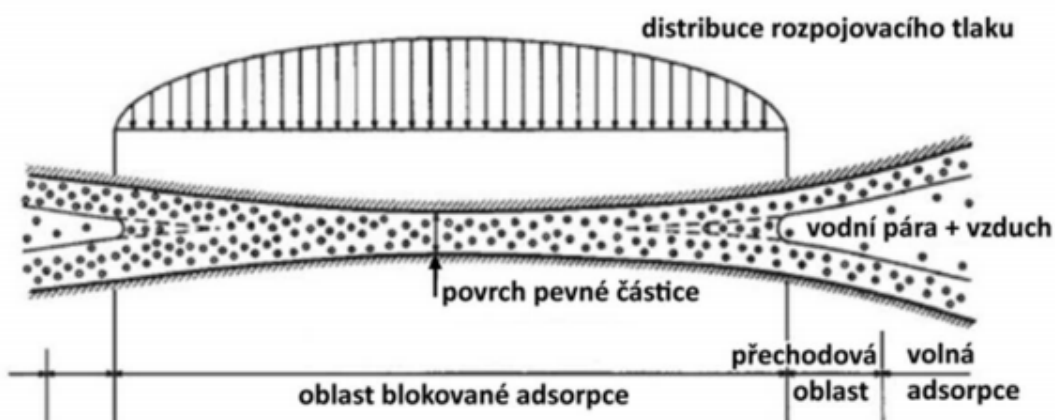
kde  $l$  je celková délka betonové konstrukce v metrech,  $\Delta T$  odpovídá teplotní diferenci ve  $^\circ\text{C}$  a  $\alpha_T$  je součinitel délkové teplotní roztažnosti v  $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ . Obecně se pro výpočet teplotní roztažnosti betonu užívá součinitel  $\alpha_T$  roven  $10 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Dalším zdrojem bobtnání, může být vystavení betonu vysokým vlhkostem. Je třeba si uvědomit, že v našem případě je vystavení vysokým vlhkostem jen krátkodobý jev. V takovémto případě jsou eliminovány vlivy smrštění vysycháním, plastické a autogenní. Aítcin [23] při měření bobtnání betonů s vodním součinitelem 0,30 – 0,45 dosáhl hodnot v úrovni 25 – 55  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Bobtnání podle Kosmatka [24], je zapříčiněno kombinací růstu krystalů, adsorpcí vody a působením osmotického tlaku. Collepardi [10] podmiňuje bobtnání betonu relativní vlhkostí  $> 95\%$ . V tomto případě se molekuly vody dostávají mezi částice C-S-H gelu, snižují jejich povrchové napětí a působí proti kohezním silám částic. Výsledkem je potom expanze, při dlouhodobém působení extrémní vlhkosti může expanze dosahovat 200 – 300  $\mu\text{m}$ . Collepardi v závislosti na velikosti expanze a za pomoci Hookova zákona odvodil vztah (7) a dál do poměru tlakové napětí ( $\sigma_c$ ) s pevností betonu v tlaku ( $f_c$ ). [10]

$$f_c > \sigma_c = E \cdot \varepsilon_d \quad (7)$$

kde součin expanze  $\varepsilon_d$  a modulu pružnosti betonu  $E$  je roven tlakovému napětí  $\sigma_c$ . Z důvodů nízkého přetvoření nedochází k porušení a vzniku trhlin v závislosti na dosažené pevnosti betonu v tlaku ( $f_c$ ).

Nováček ve své práci [19] s návazností na poznatky Idiarta [25] přisuzuje nárůstu objemů hygroskopické expanzi v prostředí vyšší relativní vlhkosti, než je aktuální relativní vlhkost v pórech. Základem je nárůst rozpojovacích tlaků vyvolaný adsorpcí vlhkostí pórovým systémem. Nově přítomná voda zvyšuje relativní vlhkost v pórech, což má za následek zvýšení tloušťky adsorbovaného filmu v kapilárách a to vede k rozšiřování pórů úzkých kapilár. Tento jev můžeme vidět na obrázku 5.5, kde z místa přechodové oblasti kombinací vodní páry se vzduchem dochází k nárůstu rozpojovacího tlaku, až do místa blokové adsorpce, kde je vyvinut maximální rozpojovací tlak na stěny kapilár.



Obrázek 5.5: Schéma distribuce rozpojovacích tlaku v kapiláře s vodním meniskem [25]

Podle Indiarta [25] hygroskopická expanze vyvolávající zvýšení rozpojovacích tlaků nastává při relativní vlhkosti  $> 50\%$  a to z důvodů, že v pórech v nano-měřítku nemůže docházet ke vzniku kapalinových menisků v pravém slova smyslu.



## 6 Diagnostické metody

V následujícím textu budou popsány jednotlivé metody pro zjištění příčin poruch zdících prvků. Bude uveden přehled jednotlivých metod a to jak klasických, tak alternativních.

### 6.1 Metody pro zjišťování změn objemu

Objemové změny hydratujících silikátů jako je beton, mají vliv na jeho fyzikálně – mechanické vlastnosti, použitelnost a životnost. V českých a evropských normách se můžeme setkat s dvěma základními eurokódy, které stanovují výpočet nebo tabelovou hodnotu objemové změny betonu. V ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [26], se uvádí, že celkové smrštění betonu je závislé na okolní vlhkosti, rozměrech prvku a složení betonu. Výsledné smrštění betonu je rovno součtu autogenního a smrštění od vysychání. Smrštění od vysychání lze zjistit v závislosti na použité třídě cementu, pevnostní třídě betonu a relativní vlhkosti prostředí, ve kterém bude beton umístěn. Autogenní smrštění zde závisí pouze na pevnostní třídě betonu. Z výčtu parametrů a ze znalostí uvedených v kapitole 5, jsou v tomto Eurokódu 2 zanedbány vlivy konkrétního složení betonu, mající zásadní vliv na smrštění. [27] ČSN EN 1996-1-1 Eurokód 6 [3] udává tabelové hodnoty konečného dotvarování, délkové změny vlivem vlhkosti a tepelnou roztažnost v závislosti na druhu použitého zdícího prvku. V tabulce 6.1 můžeme vidět ukázkou hodnot pro náš případ zdícího prvku vyrobeného z betonu s hutným kamenivem.

Tabulka 6.1: Rozmezí součinitelů pro dotvarování, nabývání vlivem vlhkosti a pro délkovou tepelnou roztažnost, převzato z [3]

Druh zdícího prvku	Konečné hodnoty součinitele dotvarování $\phi_{\infty}$	Konečné hodnoty délkových změn vlivem vlhkosti mm/m	Součinitel délkové tepelné roztažnosti $\alpha_t$ $10^{-6}/K$
Z betonu s hutným kamenivem a z umělého kameniva	1,0 až 2,0	-0,6 až -0,1	6 až 12

Principiálně pro stanovení objemových změn betonu je určena pouze norma ČSN 73 1320, kde jsou měřeny objemové změny na trácích, ale až po vyjmutí těles z formy, kdy už je dostatečně zatuhnutá cementové matrice. Nedochozí tedy k zachycení objemových změn při průběhu hydratace a tvorbě tuhé struktury. Tento nedostatek byl vyplněn vývojem velkého množství zkušebních metod různých institucí a také za pomoci amerických technických standardů ASTM, který rozšiřuje metody zkoumání.

Nováček ve své práci [19] dělí objemové změny dle následujících kritérií. První kritérium je založeno na stavu napjatosti hmoty v závislosti na mechanickém spolupůsobení hmoty s okolím.

- **měření objemových změn ve volném stavu** (objemovým změnám vlastního materiálu není bráněno žádnými vazbami a silami, kromě působení gravitační síly)

- **měření objemových změn ve vázaném (blokováném) stavu** (objemovým změnám je „bráněno“ a to ve smyslu spolupůsobení s výztuží nebo adhezí „spojením“ s podkladem)
- **měření objemových změn a deformací vlivem vnějšího zatížení**

V našem případě je v praktické části nejvíce věnovaná pozornost druhé variantě. Kde dochází k měření objemových změn ve vázaném stavu.

Jako další kritérium uvádí Nováček [19] dělení metod podle období hydratace, při kterém dochází ke snímání objemových změn. V závislosti na faktorech, které mohou ovlivnit průběh hydratace, může docházet k prolínání jednotlivých období.

- měření od čerstvého (kvazikapalného) stavu (ihned po uložení, smíchání, hutnění)
- měření od doby získání počátečních mechanických pevností (po konci tuhnutí)
- měření objemových změn vyzrálého materiálu (zpravidla ve stáří > 28 dní)

### 6.1.1 Metoda hydrostatického vážení

Tato metoda využívá Archimédův zákon, který říká, že těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou, jejíž velikost se rovná tíze kapaliny stejného objemu, jako je objem ponořeného tělesa. Výsledný objem potom odpovídá rozdílu hmotností tělesa zváženého na suchu a pod vodou. Měření se provádí tak, že hydratující materiál uzavřeme do nepropustného pružného obalu (využívá se prezervativu). Toto těleso zvážíme na vzduchu a následně zavěsíme na váhu (Obrázek 6.1) a ponořené těleso vážíme. Hydratace probíhá, bez kontaktu s okolním prostředím, tím pádem je vyloučen jev vysychání a také plastické smrštění. Při nárůstu objemu vzorku dochází k zvýšení vztlakové síly kapaliny, která způsobuje snížení hmotnosti vzorku. Stejný jev funguje i opačně.



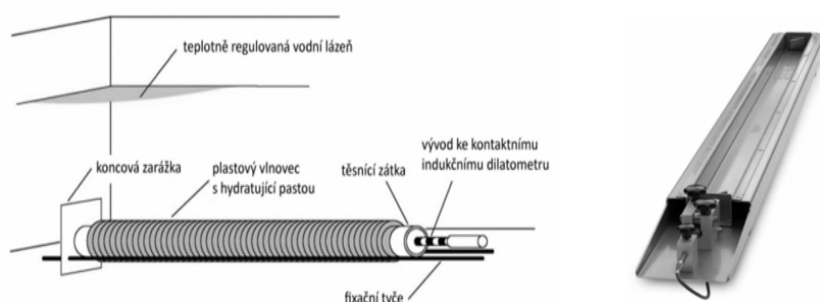
Obrázek 6.1: Měřicí soustava při hydrostatickém vážení, převzato z [19]

Jak uvádí Nováček [19], tak měření je omezeno na jemnozrnné malty a pasty v množství 100 – 200 g suché směsi. U hrubších pojiv dochází vlivem frakce k poškození nebo protržení obalu a měřené množství je pro tyto hrubozrnnější pojiva nedostačující. Jako další nevýhodu uvádí výskyt vzduchových kapes uvnitř obalu ovlivňující nepříznivě přesnost měření. Z důvodů obtížnějšího plnění a následného vzniku vzduchových kapes je obtížné se tomuto jevu vyvarovat. Metodou hydrostatického vážení, lze měřit účinky

autogenního smrštění, protože měření probíhá za izotermických podmínek, kde uvolněné hydratační teplo je pohlceno okolní vodou. Tuto metodu můžeme zařadit do skupiny měření objemových změn ve volně vázaném stavu.

### 6.1.2 Metoda vlnovce

Tato metoda vychází z ASTM C 1698 pod názvem Corrugated tube method. Základem je vlnitá plastová trubice (vlnovec) průměru 29 mm a délky 420 mm. Měřicí zařízení se skládá z fixační tyče, koncové zarážky, plastové trubice, těsnící zátky a dilatometru, který je propojen pomocí pákového mechanismu s trubicí a je umístěn mimo vodní lázeň (viz Obrázek 6.2 vlevo). Výsledkem je délková změna (relativní přetvoření) vyvolané deformací plastové trubice. Vybočení je zajištěno pomocí fixační tyče. Při tomto měření jsou zajištěny izotermické podmínky v závislosti na malém průměru vlnovce a vodním uložení, ASTM předpokládá maximální zvýšení teploty o 2 K. Tato metoda je vhodná k měření autogenního smrštění jemnozrnných malt a past, vzhledem k izotermickým podmínkám. Maximálnímu zrno je omezeno na velikost 4,75 mm. Vzhledem k průměru vlnovce dochází k problematickému plnění a možnému výskytu dutin, které mají za následek zvýšenou nepřesnost měření. Tato metoda existuje v mnoha modifikacích lišící se od sebe rozměrem vlnovce nebo vertikální orientací. [19], [28]



Obrázek 6.2: Schéma pro měření vlnovce (vlevo) a fotografie žlabu (vpravo), převzato z [19]

### 6.1.3 Metoda žlabu

Základem této metody je ocelový žlab s pohyblivým čelem (viz Obrázek 6.2 vpravo). Po vyplnění žlabu vznikne těleso 1000 mm dlouhé, 100 mm široké a 60 mm vysoké. Posuvné čelo je opatřeno hákem pro zajištění provázání betonu. Čelní strana je osazena indukčním dilatometrem, který zaznamenává pohyb měřeného vzorku. Výsledkem je délkové přetvoření. Výsledné přetvoření je ovlivněno působením klimatických podmínek. Další vliv na přetvoření má třením vzorku o formu. Tření se snižuje využitím neoprenové vložky. Jako další nevýhoda této metody se jeví zachycení objemových změn až po dosažení tahových pevností. [19]

### 6.1.4 Metoda kužele

Základem této metody je laserový snímač, kužel a reflexní terčičk. V závislosti na typu zařízení se může lišit i velikost kužele. Na obrázku 6.3 vlevo můžeme vidět válcovou nádobu, v níž je umístěn kužel, výška kužele je rovna 100 mm, vrchní průměr odpovídá

cca. 115 mm a objem nádoby je 350 ml. Pro snížení tření je kužel vyložen fólií. V tomto případě je možné regulovat teplotu pomocí chladicího zařízení. Data lze kontinuálně zapisovat do počítače. Při tomto objemu kužele 350 ml, se doporučuje využívat směsí do maximálního zrna 2 mm. [29]

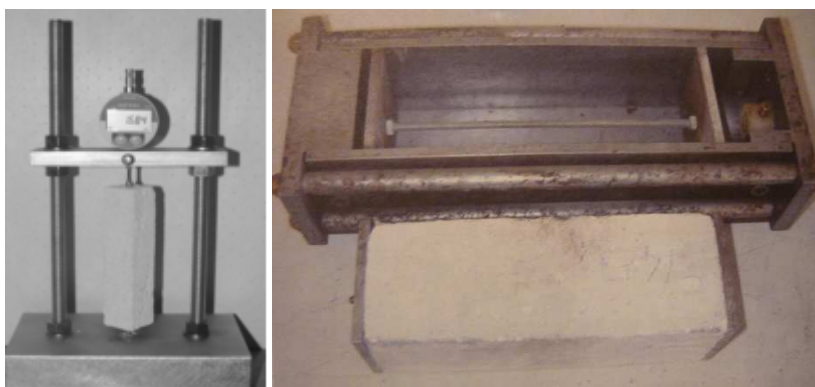


Obrázek 6.3: Měřicí soustava kuželové metody, převzato z [29]

Měřicí soustavu můžeme vidět na obrázku 6.3, kde vlevo je kužel vyložený fólií s možnou termoregulací, vpravo na vrchu laserový přístroj s laserem a optickou jednotkou, vpravo dole pak reflexní terčik. Při měření dochází k vyplnění kužele maltou, na povrch malty se umístí reflexní terčik. Nad hladinou je na stojanu umístěno laserové čidlo s optickým senzorem, které snímá odraz laseru od reflexního terčíku. Výsledkem je potom změna objemu vyvolaná poklesem hladiny. [29]

### 6.1.5 Trámečková metoda

Tato metoda se používá pro dlouhodobé měření objemových změn betonů, malt a past. V závislosti na použitém materiálu (beton, malta) se vyrobí zkušební těleso, pro betony nejčastěji trámec o rozměrech 100x100x400 mm, pro malty 40x40x160 mm. Po odformování zkušební tělesa, v čerstvém stavu, dochází k osazení terčičky s důlkem. Terčičky můžeme osadit do čela, v tomto případě měříme délkové přetvoření v podélné ose nebo na bok vzorku. Rozdílné přetvoření lze také simulovat v závislosti na prostředí uložení vzorku nebo jejich povrchové ochraně. Měření můžeme provádět pomocí digitálního nebo analogového dilatometru, která může být buď trvale osazen (Obrázek 6.4 vlevo) nebo příložený. [19]



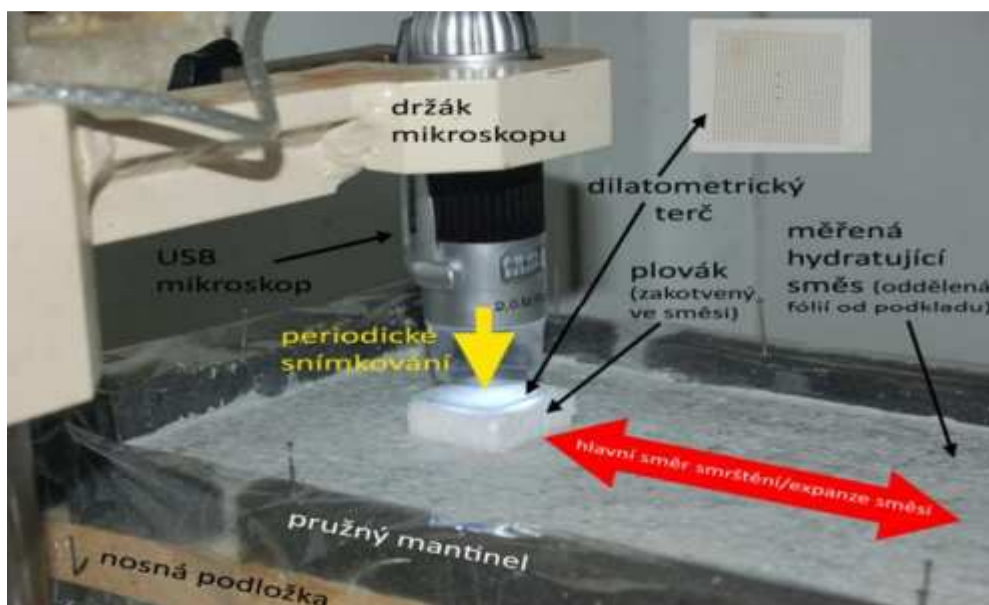
Obrázek 6.4: Trámečková metoda (vlevo) a metoda vázané expanze (vpravo), převzato z [10], [19]

### 6.1.6 Metoda vázané expanze

Metoda vázané expanze vychází z ASTM 845-90. Základem je ocelová forma s vnitřní ocelovou tyčí v podélné ose a dvěma ocelovými deskami na konci tyče (Obrázek 6.4 vpravo). Ocelové desky umožňují odformování vzorku bezprostředně po začátku tuhnutí (4 – 6 hodin). V závislosti na vystavení vzorku odpovídající relativní vlhkosti větší nebo menší než 95 %, popřípadě uložení ve vodě dochází k měření vázané expanze. V čele ocelových desek jsou umístěny terčičky, na které je možné připojení dilatometru. V závislosti na délkové změně ocelové tyče umístěné uprostřed betonového vzorku, je pak možné měření vázané expanze betonu. [10]

### 6.1.7 Optická metoda

Jedná se o novou bezkontaktní optickou metodu, pro sledování objemových změn malt a betonů, bez ovlivnění vlastního vzorku třecí či jinou silou, kterou by mohl být ovlivněn měřený vzorek. Vývoji této metody a jejímu popisu se věnuje Nováček ve své práci [19]. Základem této metody je optické čidlo (digitální USB mikroskop) snímající dilatometrický terč s fotogrammetrickým obrazem. Tento terč je uložen na dilatometrickém plaváku (Obrázek 6.5). Plavák je položen na ploše tuhnoucí směsi a kopíruje chování směsi (smrštění nebo expanzi).



Obrázek 6.5: Schéma principu bezkontaktní optické metody snímání posunů při rozlivu směsi v tenké vrstvě, převzato z [19]

Výsledkem je série snímků pořízených digitálním mikroskopem. Jednotlivé snímky se od sebe liší v závislosti na pohybu hydratační směsi. Výsledný posun je odečten ze série snímků fotogrammetrického obrazce v ortogonální ose pixelové matice vůči předchozímu snímku (to znamená změny sloupcové a řádkové souřadnice). Při použití kalibrovaného terče je možný převod pomocí výpočtu za použití vhodného softwaru na posun v metrické soustavě. Jako minimální rozsah pro měření počátečních hydratačních změn malt a betonů je udáván 0 – 5 mm ve směru podélné osy formy. Při měření je dosaženo střední chyby posunu označovanou jako  $m_{0t} < 15 \mu\text{m}$ . [19]

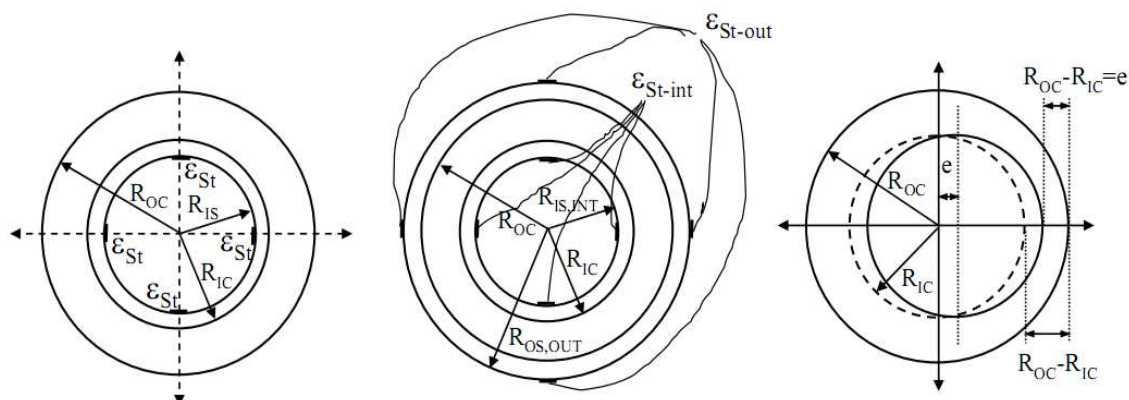
### 6.1.8 Prstencová metoda

Prstencová metoda v originále známá pod názvem Restrained ring test, vychází z amerických standardů ASTM C 1581-04 a ASTM C 1698-09. Tyto normy umožňují určit vznik tahových napětí a vznik trhlin, popřípadě měření smrštění. Tato metoda se skládá z vnitřního prstence vytvořeného z cementové malty, který je obklopen ocelovými prstenci (Obrázek 6.6). V důsledku postupného tuhnutí a tvrdnutí vnitřního prstence vytvořeného z cementové malty, dochází k vývinu napětí na vnitřní „vnější“ ocelový prstenc. Napětí působí v radiálním směru a má za následek deformaci ocelových prstenců. Jednotlivé ocelové prstence jsou osazeny tenzometry, u nichž vlivem působení napětí dochází k deformaci. U vnitřního prstence jsou tenzometry osazeny z vnitřní strany a u vnějšího z vnější strany (Obrázek 6.6).



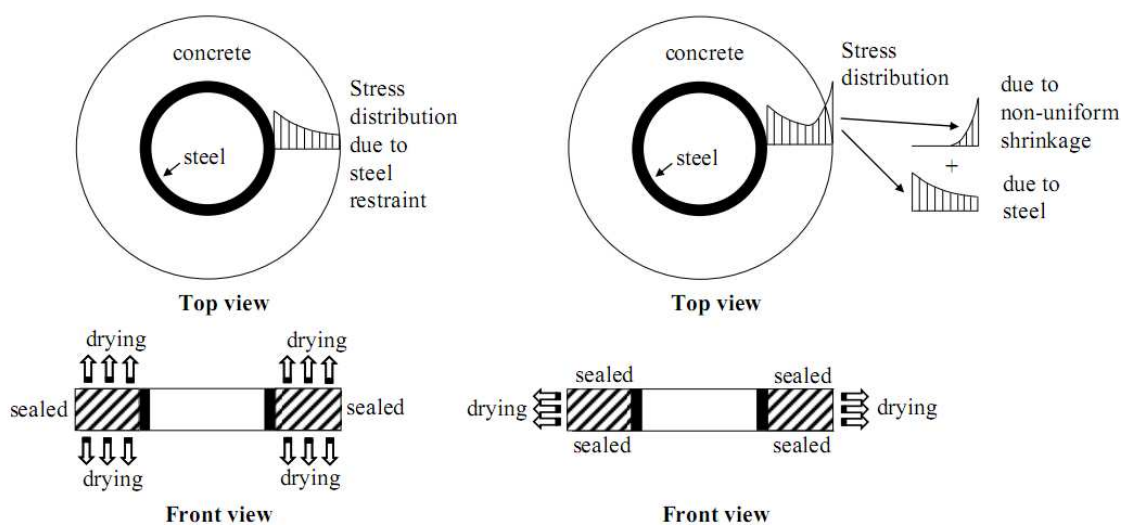
Obrázek 6.6: Prstencová metoda, varianta dvou prstenců

Při měření by jednotlivé tenzometry měli ukazovat podobné hodnoty, aby bylo zabráněno zkreslení. Velikost maximálního možného zrna, je závislá na průměru jednotlivých prstenců. Proto se prstencová metoda nejvíce využívá při měření smrštění cementových malt a potěrů. Výška prstenců je zpravidla stejná. Na obrázku 6.7, můžeme vidět varianty provedení prstenců. Vliv na výsledné tahové napětí může mít i jednotlivé vzájemné excentrické uložení prstenců (Obrázek 6.7 vpravo), jejich tvar, velikost, modul pružnosti oceli, vlhkost a neposlední řadě i způsob vysychání (Obrázek 6.8). Napětí vyvozené působením betonového prstence nemůže být ovládáno aktivně. Proto tuto metodu řadíme do oblasti pasivních metod měření objemových změn. [28]



Obrázek 6.7: Varianty provedení prstencové metody: standardní (vlevo), dvojitý kruh (uprostřed), excentrické vyosení (vpravo), převzato z [31]

Vyvolané obvodové napětí není konstantní podél celého poloměru, ale mění se nelineárně. Pokud uvažujeme jednotné smrštění v radiálním směru, dochází ke vzniku maximálního obvodového napětí na vnitřní straně betonového kruhu a dochází k jeho poklesu podél poloměru. V případě zajištění izotermických podmínek, je možné měřit autogenní smrštění. Výsledné napětí v závislosti na způsobu vysychání můžeme vidět na obrázku 6.8. Na obrázku 6.8 vlevo dochází k vysychání z vrchní a spodní strany, v tomto případě je maximálního napětí dosaženo na vnitřním poloměru betonu. Dochází-li k bočnímu vysychání (Obrázek 6.8 vpravo) není napětí v radiálním směru jednotné (skládá se z napětí způsobeného vysycháním z boku a napětím vyvolaného smrštěním betonového prstence). Určení maximálního napětí v případě bočního vysychání je proto obtížné a může se vyskytovat na vnitřní nebo vnější straně. [30]



Obrázek 6.8: Vliv vysychání na výsledné napětí, převzato z [30]

Eppers ve své práci [28] uvádí výpočetní vztahy pro získání napětí vyvolaného přetvořením betonového kruhu. Tyto napětí rozděluje na dvě základní. První tzv. teoretické-elastické napětí  $\sigma_{elastic}$  a aktuální napětí  $\sigma_{actual}$ , kterým odpovídají tlaky  $P_{elastic}$  a  $P_{actual}$ . Elastické napětí  $\sigma_{elastic}$  je vyvoláno působením elastického tlaku  $P_{elastic}$  ke kterému dochází vlivem pružné deformace betonu a lze vypočítat ze znalosti volné smrštění  $\mu_{free}$ , které vychází ze vztahu (8).

$$|\mu_{free}| = R_{C,i} \cdot \varepsilon_{SH} \quad (8)$$

kde  $R_{C,i}$  odpovídá vnitřnímu poloměru betonového prstence a  $\varepsilon_{SH}$  odpovídá volnému smrštění, získané vhodným měřením. Uvážíme-li soustředné smrštění betonového kroužku, působí elastický tlak  $P_{elastic}$  po celém obvodu ocelového kroužku, za předpokladů, že  $R_{C,i} = R_{St,o}$ , tedy vnitřnímu poloměru betonového prstence je roven vnějšímu poloměru ocelového prstence (nevzniká mezera). Elastický tlak  $P_{elastic}$ , tedy vede k elastickému posunu  $\mu_C$  a  $\mu_{st}$  vzhledem ke smrštění betonového prstence. Součet těchto elastických posunu je potom roven volnému smrštění  $\mu_{free}$  vztah (9).

$$|\mu_{free}| = |\mu_C| + |\mu_{st}| \quad (9)$$

Elastické posuny lze potom vypočítat ze vztahu (10) a (11). Index  $SH$  určuje smrštění vyvolávající tlak. Poissonovo číslo  $\nu_C$  je zde bráno jako konstanta.

$$u_{St} = P_{elastic,SH} \cdot \frac{R_{St,o}^2 \cdot [(1+\nu_{St}) \cdot R_{St,i}^2 + (1-\nu_{St}) \cdot R_{St,o}^2]}{E_{St} \cdot R_{St,o} \cdot (R_{St,o}^2 - R_{St,i}^2)} \quad (10)$$

$$u_C = P_{elastic,SH} \cdot \frac{R_{C,i,o}^2 \cdot [(1+\nu_C) \cdot R_{C,o}^2 + (1-\nu_C) \cdot R_{C,i}^2]}{E_C \cdot R_{C,i} \cdot (R_{C,o}^2 - R_{C,i}^2)} \quad (11)$$

Úpravou vztahu (8) a (11) získáme vztah (12), pro výpočet elastického tlaku  $\Delta P_{elastic,SH}$ , který roste se zvyšujícím se smrštěním.

$$\Delta P_{elastic,SH} = - \frac{\Delta \varepsilon_{SH} \cdot E_C}{\frac{E_C \cdot ((1+\nu_{St}) \cdot R_{St,i}^2 + (1-\nu_{St}) \cdot R_{St,o}^2)}{E_{St} \cdot (R_{St,o}^2 - R_{St,i}^2)} + \frac{((1-\nu_C) \cdot R_{St,o}^2 + (1+\nu_C) \cdot R_{C,o}^2)}{(R_{C,o}^2 - R_{St,o}^2)}} \quad (12)$$

Výsledné maximální teoretické-elastické napětí  $\sigma_{\theta,max,elastic}$  vyvolané elastickým tlakem  $P_{elastic,SH}$ , lze potom vypočítat ze vztahu (13).

$$\sigma_{\theta,max,elastic} = P_{elastic,SH} \cdot \frac{R_{C,i}^2 + R_{C,o}^2}{R_{C,o}^2 - R_{C,i}^2} \quad (13)$$

Aktuální napětí  $\sigma_{actual}$  je závislé na skutečném tlaku  $P_{actual}$  vyvolaném skutečným smrštěním (přetvořením)  $\varepsilon_{St,SH}$  betonového prstence. Hodnoty udávající tenzometry lze přímo přiřadit velikost smrštění  $\varepsilon_{St,SH}$ . V závislosti na smrštění  $\varepsilon_{St,SH}$  lze vypočítat podle vztahu (14) aktuální tlak  $P_{actual,SH}$ . Při znalosti aktuálního tlaku  $P_{actual,SH}$ , lze pak pomocí vztahu (15) vypočítat maximální aktuální napětí  $\sigma_{\theta,max,actual}$ . Je třeba si uvědomit, že výsledné hodnoty jsou závislé na čase a v jeho průběhu dochází k jejich změně.

$$P_{actual,SH}(t) = -\varepsilon_{st,SH}(t) \cdot E_{St} \cdot \frac{(R_{St,o}^2 - R_{St,i}^2)}{2 \cdot R_{St,o}^2} \quad (14)$$

$$\sigma_{\theta,max,actual} = P_{actual,SH} \cdot \frac{R_{C,i}^2 + R_{C,o}^2}{R_{C,o}^2 - R_{C,i}^2} \quad (15)$$

kde  $\varepsilon_{st,SH}(t)$  odpovídá přetvoření (deformaci) vyvolaná vlivem zrání betonu v čase  $t$ ,  $E_{St}$  je modul pružnosti oceli,  $R_{St,o}$  vnější poloměr oceli,  $R_{St,i}$  vnitřní poloměr oceli,  $R_{C,i}$ , vnitřní poloměr betonu,  $R_{C,o}$  vnější poloměr betonu ( $R_{C,o} = R_{St,i}$ ).



# PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část diplomové práce je věnována metodice prováděných experimentů. V následujících kapitolách bude zaměřena pozornost, jak na užití suroviny, tak na použité metody měření a za pomoci těchto metod získané hodnoty.

## 7 Použité vstupní suroviny

V diplomové práci byly použity tři základní suroviny pro výrobu betonu a dva typy tvárnic. Jedná se o tvárnice typu Simple Block a Face Block. Pro výrobu betonu byly použity suroviny: cement, voda a dvě frakce kameniva. Tyto suroviny byly zvoleny záměrně s ohledem na podmínky, které nastávají při samotné výrobě betonu v domácích podmínkách. Z tohoto důvodu nejsou do betonu přidávány žádné plastifikační nebo superplastifikační přísady ani žádné příměsi.

### Cement

Jako vstupní a základní surovina byl použit portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R s rychlým nárůstem počátečních pevností z produkce Českomoravský cement a.s., závod Mokrý. Jeho vlastnosti a složení můžeme vidět v následující tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Vlastnosti cementu dle ČSN EN 197-1

Druh cementu	Hlavní složky			Doplňující složky
	Portlandský slínek	Vysokopecní struska	Vápenec	
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	65 – 79 %	21 – 35 %		0 – 5 %
<b>Pevnost v tlaku</b>				
po 2 dnech	19 – 24 MPa			
po 28 dnech	45 – 51 MPa			

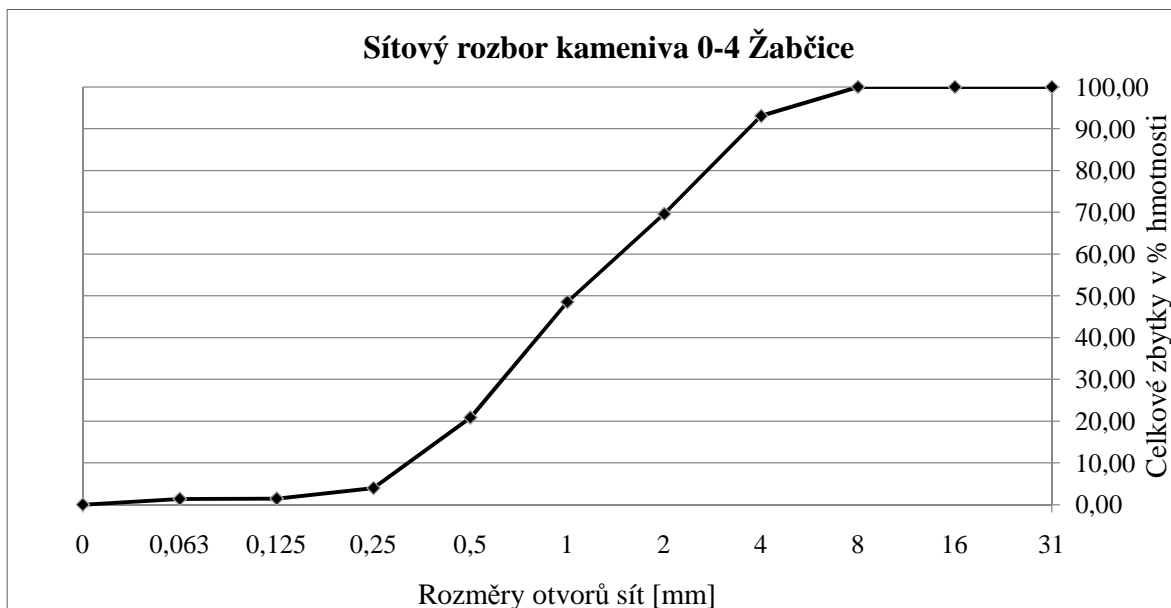
### Voda

Na všechny receptury byla použita pitná voda z vodovodního městského řádu.

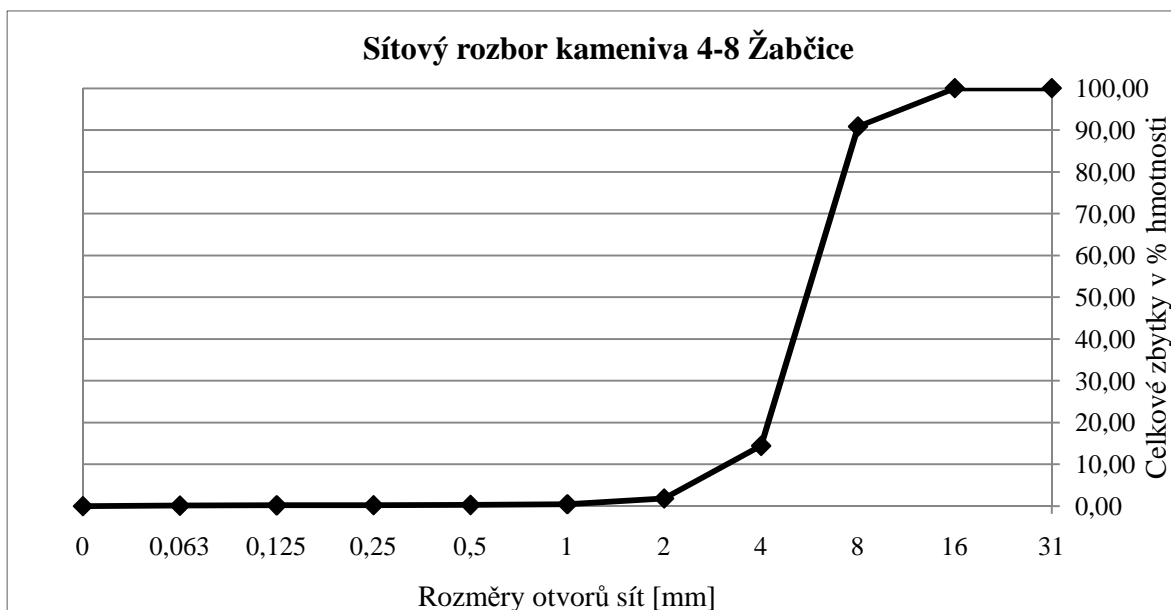
### Kamenivo

Na výrobu betonu byly použity dvě frakce kameniva. Jednotlivé frakce byly voleny s ohledem na normu ČSN EN 1996-1-1. Eurokód 6 [3], kde největší zrno kameniva výplňového betonu nemá být větší než 20 mm. U výplňového betonu, který se ukládá do dutin, jejichž nejmenší rozměr je menší než 100 mm, nebo který tvoří krycí vrstvu výztuže tenčí než 25 mm, má být největší zrno kameniva nejvýše 10 mm. Současně po domluvě s vedoucím práce, byly vybrány následující frakce kameniva. Kamenivo frakce 0 – 4 mm přírodní, těžené z pískovny Žabčice. Druhá hrubší frakce 4 – 8 mm přírodní těžené

kamenivo, také z pískovny Žabčice. Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí můžeme vidět v grafech 1 – 2. Jednotlivé vlastnosti kameniva pak můžeme vidět v tabulce 7.2.



Graf 1: Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 – 4 mm Žabčice



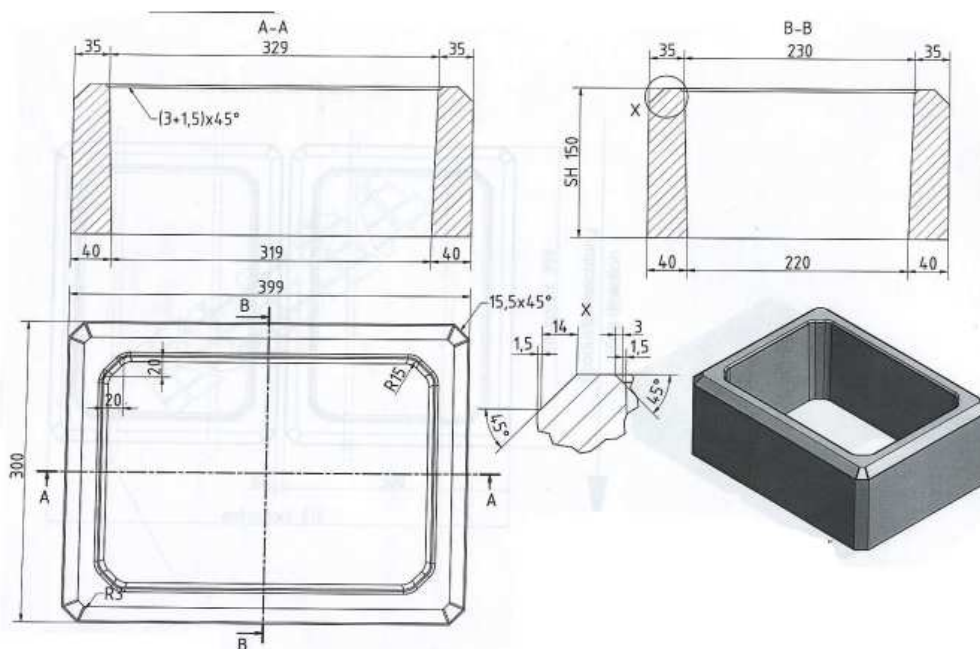
Graf 2: Křivka zrnitosti kameniva frakce 4 – 8 mm Žabčice

Tabulka 7.2: Vlastnosti kameniva frakce 0 – 4 mm a 4 – 8 mm

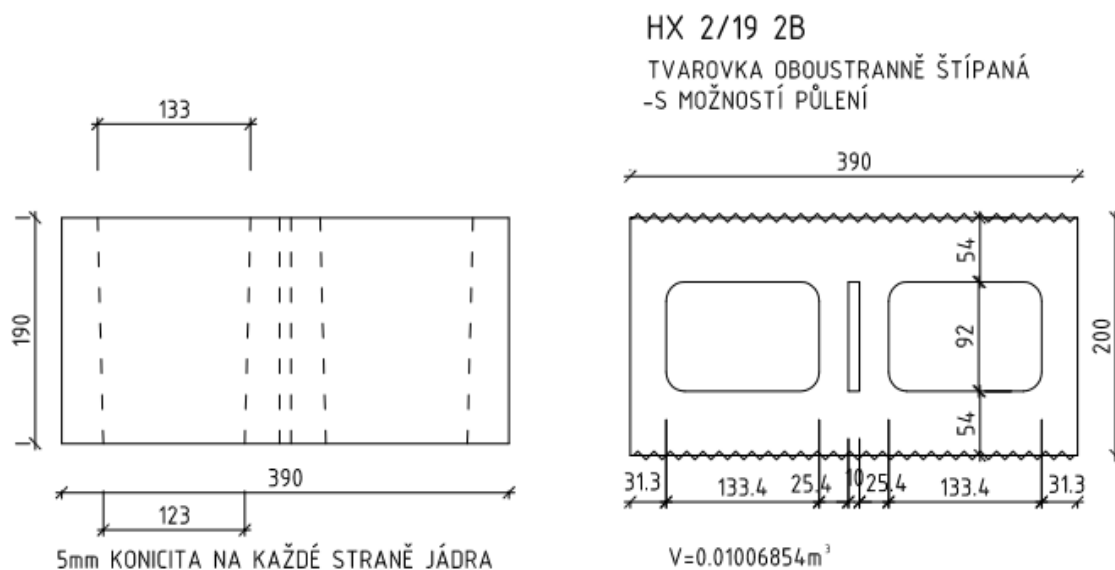
Frakce	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$D_{\text{volně sypané}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$D_{\text{setřesené}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Mezerovitost v [%]
0 – 4 Žabčice	2500	1570	1790	28
4 – 8 Žabčice	2400	1480	1630	32

## Tvárnice

Jako reprezentativní zástupci byly vybrány dva typy vibrolisovaných tvárníc. Tvárnice typu Simple Block HX 1/30/AF sloupková, hladká (Obrázek 7.1), dále pro zjednodušení bude používána v dalším textu zkratka SB. Druhá tvárnice typu Face Block HX 2/19/2B oboustranně štípaná (Obrázek 7.2), dále jen FB.



Obrázek 7.1: Rozměry tvárnice typu Simple Block



Obrázek 7.2: Rozměry tvárnice typu Face Block

## 8 Metodika experimentální práce

V této části budou popsány jednotlivé postupy a metody pro získání vhodných dat a údajů, které slouží k následné analýze a vyhodnocení. Tuto metodiku můžeme rozdělit do tří etap.

První etapa je zaměřena na zkoumání vlastností samotné tvarovky. V druhé etapě je testován samotný výplňový beton. Poslední třetí etapa, je zaměřena na analýzu chování systému výplňový beton – tvarovka, při působení různých klimatických vlivů. Podmínkám působení klimatickým jevům budou vystaveny sloupky, které byly za tímto účelem vystaveny nebo samotné tvárnice.

### 8.1 Výroba čerstvého betonu

#### Vážení všech surovin směsi

Pro získání složení betonové směsi musí dojít k vážení jednotlivých surovin. V našem případě docházelo k hmotnostnímu dávkování a vážení probíhalo na elektronických vahách.

#### Postup při mísení surovin

Výroba a ukládání čerstvého betonu probíhalo v následujících krocích:

- Příprava a navážení složek pro danou betonovou záměs v množství, které zaujímá požadovaný výsledný objem.
- Navlhčení míchačky s nuceným oběhem typu Coufal.
- Dávkování sypkých složek do míchačky, poté postupné přidávání záměsové vody. Celková doba míchání tak činila 3- 4 minuty.
- Ukládání čerstvého betonu probíhalo do připravených forem o rozměrech 100×100×100 mm a jejich uchycení k vibračnímu stolku s horizontální vibrací a jeho spuštění při 3000 ot./min a amplitudou 0,3 mm, po dobu 10 - 30 sekund.
- Následoval identifikační popis a expedice vzorku do vlhkého uložení.

### 8.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla posuzována podle ČSN EN 12350 Zkoušení čerstvého, zatvrdlého betonu – Část 6,7: Objemová hmotnost. Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů. Podstatou zkoušky je změření objemu zkušebního tělesa a stanovení jeho hmotnosti. Objemová hmotnost byla zjišťována na krychlích 100×100×100 mm uložených v laboratorních podmínkách podle vztahu (16).

$$\rho = \frac{m}{V} [kg/m^3] \quad (16)$$

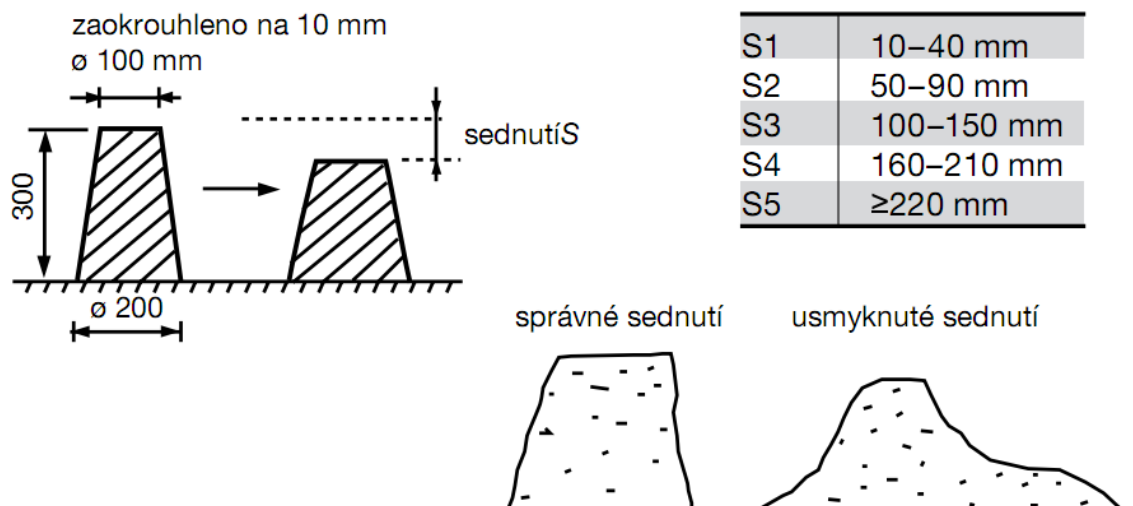
kde:

$m$  hmotnost zkušebního tělesa [kg]

$V$  vypočítaný objem zkušebního tělesa [m<sup>3</sup>]

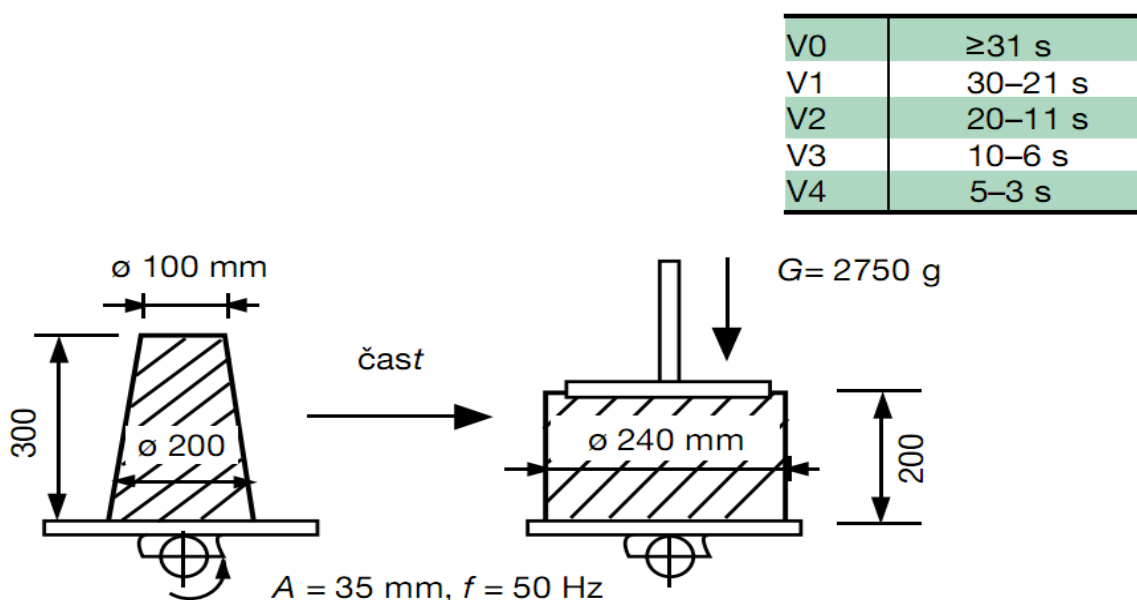
### 8.3 Stanovení konzistence čerstvého betonu

Na čerstvém betonu byla stanovena jeho konzistence, pomocí sednutí kužele, dle ČSN EN 12350-2, Zkoušení čerstvého betonu. Část 2: Zkouška sednutím. Na obrázku 8.1 můžeme vidět ilustraci provedení a zatřídění sednutí (Abramsova) kužele.



Obrázek 8.1: Stanovení konzistence čerstvého betonu, pomocí sednutí (Abramsova) kužele, převzato z [16]

Jako další metoda byla pro stanovení konzistence čerstvého betonu použita metoda, podle ČSN EN 12350-3, Zkoušení čerstvého betonu - Část 3: Zkouška Vebe. Na obrázku 8.2, můžeme vidět schéma této zkoušky a zatřídění stupně konzistence podle tzv. času Vebe.



Obrázek 8.2: Stanovení konzistence čerstvého betonu, metodou Vebe, převzato z [16]

## 8.4 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ČSN EN 12390 – 3, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Pevnost v tlaku byla stanovena po 28 dnech na zkušebních krychlích 100×100×100 mm a tvárnících typu Simple Block a Face Block. Zkušební tělesa ve formě krychlí, byla po vyrobení až do doby zkoušky uložena ve vlhkém prostředí.

Základem zkoušky je stanovení smluvního napětí, které je definováno poměrem maximální dosažené síly potřebné k porušení zkušebního tělesa při namáhání tlakem a velikosti plochy tlačného průřezu zkušebního tělesa. Zkušební tělesa jsou uložena do lisu kolmo na směr zhutnění. Výsledná pevnost betonu v tlaku  $f_{ck,cube}$  se vypočte podle vztahu (17).

$$f_{ck,cube} = F/A \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (17)$$

kde:

$F$  největší dosažená síla [N]

$A$  tlačná plocha [mm<sup>2</sup>]

## 8.5 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Základem této metody je vystavení zkušebních vzorků cyklům opakovaného zmrazování a rozmrazování a vychází z ČSN 73 1322, Stanovení mrazuvzdornosti betonu. V našem případě byla mrazuvzdornost betonu zkoušena na krychlích 100×100×100 mm. Zkušební vzorek je vystaven po dobu 6 hodin jednomu cyklu (Graf 3).



Graf 3: Schéma jednoho cyklu, při stanovení mrazuvzdornosti

Jeden cyklus se skládá ze dvou částí. První část (zmrazovací) trvá 4 hodiny, za tuto dobu je vzorek vystaven teplotě od -15 °C do -22 °C. V druhé části (rozmrazovací) dochází k zaplavení vzorku vodou a ohřátí na teplotu 20 °C. Výsledkem této zkoušky je tzv. součinitel mrazuvzdornosti. Jedná se o poměr aritmetického průměru pevnosti v tlaku vzorků vystavených zmrazovacím cyklům k pevnosti vzorků v tlaku porovnávacích. Beton je pro daný počet cyklů mrazuvzdorný, jestliže součinitel mrazuvzdornosti je  $\geq 0,75$ .

## 8.6 Stanovení nasákavosti betonu

Základem pro stanovení nasákavosti betonu je norma ČSN 73 1316, Stanovení vlhkosti nasákavosti a vztlávanosti betonu. Nasákavost se stanovuje na betonu minimálního stáří 28 dní. V našem případě byla nasákavost stanovena na úlomcích zkušebních vzorků ze stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, což norma povoluje. Výsledná nasákavost ( $v$ ) se stanoví ze vztahu (18).

$$v = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100 [\%] \quad (18)$$

kde:

$m_s$  hmotnost zkušebního vzorku nasáklého vodou [g]

$m_d$  hmotnost zkušebního vzorku vysušeného [g]

## 8.7 Výstavba sloupků

Pro analýzu chování systému tvarovka – výplňový beton (zálivková malta), došlo k výstavbě 8 sloupků. Pro zmonolitnění jednotlivých sloupků, byly použity dvě odlišné receptury betonu (viz tabulka 8.1). Vyplnění sloupku směsí můžeme vidět na schématu 1. Pro zjednodušení bude používána v dalším textu zkratka SB, pro tvárnice typu Simple Block a FB, pro tvárnice typu Face Block.

Tabulka 8.1: Navržené receptury

Složení betonové směsi [kg/m <sup>3</sup> ]	Receptura I	Receptura II
<b>CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R</b>	350	350
<b>Kamenivo 0 – 4 Žabčice</b>	1500	750
<b>Kamenivo 4 – 8 Žabčice</b>	1250	750
<b>Voda</b>	140	190
<b>w</b>	0,40	0,54

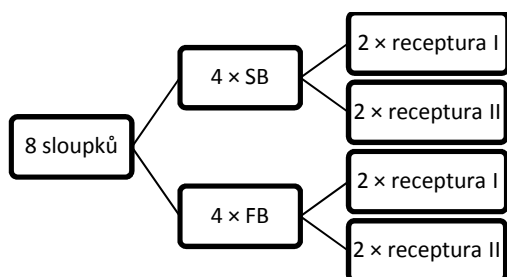


Schéma 1: Zastoupení směsi ve sloupcích

Jednotlivé tvarovky použité pro výstavbu byly osazeny ocelovými plíšky pro umístění ocelového můstku s digitálním úchytkoměrem. Pro výstavbu sloupků byly použity tvárnice typu SB a FB. Pro výstavbu jednoho sloupku z tvárnic FB bylo použito 5 těchto tvárnic, na sloupky vystavených s tvárnici SB bylo využito 6 tvárnic. Výstavba sloupku z tvárnic FB

probíhala tak, že se první tvárnice vyplnila ze  $\frac{3}{4}$ , následovalo hutnění třiceti vpichy hutnicí tyčí používanou, pro hutnění při stanovení sednutí kužele. Dále pak se na ta tuto tvárnici umístila další tvárnice, která se vyplnila do  $\frac{1}{2}$  objemu a následovalo hutnění. Tento proces se opakoval, až do ukončení výstavby sloupku. U sloupku vystaveného z tvárnic typu SB byl proces výstavby obdobný s rozdílem vyššího počtu hutnění. V tomto případě bylo hutnění prováděno 50 vpichy. Na obrázku 8.3 můžeme vidět jednotlivé sloupky.



Obrázek 8.3: Sloupky z tvárnic typu Face Block a Simple Block

## 8.8 Stanovení objemových změn

Vzhledem k zaměření této diplomové práce, která se zabývá analýzou příčin poruch betonových prvků, bylo třeba vyvinout (využít) „neobvyklých“ metod pro zachycení objemových změn. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé použité metody pro měření objemových změn.

### 8.8.1 Prstencová metoda

Tato metoda byla podrobně pospaná v teoretické části. V našem případě se měřicí soustava skládá z dvou ocelových prstenců, vnějšího a vnitřního, jednotlivé rozměry prstenců můžeme vidět v tabulce 8.2.

Tabulka 8.2: Rozměry prstenců

	Vnitřní prstenec [mm]	Vnější prstenec [mm]	Mezní úchylka
<b>Tloušťka stěny</b>	10	10	$\pm 15 \%$
<b>Vnější poloměr</b>	122,5	84,4	$\pm 1,5 \%$
<b>Vnitřní poloměr</b>	112,5	74,4	$\pm 1,5 \%$
<b>Výška</b>	70	70	-

Každý z těchto prstenců je osazen 4 tenzometry, pro snímání deformace jednotlivých prstenců. Pro naše měření byly k dostání tři měřicí soustavy prstenců (Obrázek 8.4).





Obrázek 8.4: Měření objemových změn pomocí prstenců

Měřicí soustava se skládá ze tří prstencových dvojic (vnější a vnitřní), ústředny pro sběr dat, která je propojena s jednotlivými tenzometry a osobního počítače vybaveného softwarem umožňujícím sběr dat z ústředny. Výsledné vyhodnocení pak probíhá pomocí vhodného softwaru umožňujícího výpočet získaných dat.

Při měření dochází nejprve k nachystání měřicí soustavy tak, že se jednotlivé prstence ze spodní části opatří nepropustným povlakem (v našem případě vazelínou), tak aby nedošlo k odtečení záměsové vody. Následně dojde k vymazání prstenců pro zajištění pozdějšího čištění a eliminace zkreslení přetvoření vlivem tření. Prstence se usadí na rovný hladký povrch např. sklo. Pro zajištění zkreslení vlivem excentricity (viz Obrázek 6.7), byly vyrobeny distanční proložky (Obrázek 8.4 vlevo) zabezpečující stejný průměr betonového prstence, při plnění cementovou maltou. Jako poslední část nastává vyplnění prstenců cementovou maltou a její hutnění v závislosti na konzistenci, pro zajištění maximálního vyplnění prostoru a současně eliminace nerovnoměrného smrštění. Pro zajištění zkreslení výsledného napětí vlivem nerovnoměrného vysychání dochází k zakrytí betonových prstenců při měření (Obrázek 8.4 vpravo).

V důsledku postupného tuhnutí a tvrdnutí vnitřního prstence vytvořeného z cementové malty, dochází k vývinu napětí na vnitřní „vnější“ ocelový prstenec. Napětí působí v radiálním směru a má za následek deformaci ocelových prstenců. Jednotlivé ocelové prstence jsou osazeny tenzometry, u nichž vlivem působení napětí dochází k deformaci. Výsledné přetvoření tenzometrů je pak přes ústřednu přenášeno do počítače.

V kapitole 6.1.8 je věnována značná část výpočtu tlaku a napětí. Pro náš případ postačí znalost vztahu (14) a (15), kde vlivem přetvoření  $\varepsilon_{St,SH}$  betonového prstence a ze znalostí jednotlivých rozměrů ocelových prstenců (Tabulka 8.2), lze vypočítat skutečný tlak  $P_{actual,SH}$  v čase  $t$ , za pomoci vztahu (14). Ze znalostí skutečného tlaku  $P_{actual,SH}$ , pak můžeme pomocí vztahu (15) vypočítat maximální aktuální napětí  $\sigma_{\theta,max,actual}$ .

$$P_{actual,SH}(t) = -\varepsilon_{St,SH}(t) \cdot E_{St} \cdot \frac{(R_{St,o}^2 - R_{St,i}^2)}{2 \cdot R_{St,o}^2} \quad (14)$$

$$\sigma_{\theta,max,actual} = P_{actual,SH} \cdot \frac{R_{C,i}^2 + R_{C,o}^2}{R_{C,o}^2 - R_{C,i}^2} \quad (15)$$

kde  $\varepsilon_{St,SH}(t)$  odpovídá přetvoření (deformaci) vyvolaná vlivem zrání betonu v čase  $t$ ,  $E_{St}$  je modul pružnosti oceli 211 GPa,  $R_{St,o}$  vnější poloměr oceli,  $R_{St,i}$  vnitřní poloměr oceli,  $R_{C,i}$  vnitřní poloměr betonu,  $R_{C,o}$  vnější poloměr betonu ( $R_{C,o} = R_{St,i}$ ).

Nevýhodou této metody je pro náš účel, omezení velikosti frakce kameniva ve směsi. Nelze proto měřit přímo objemové změny betonu respektive smrštění, ale pouze cementové malty s maximálním zrnem frakce 0 – 4 mm. Pro náš účel, ale pro dokázání chování výplňového „beton“ malty tato metoda postačila.

Prstencová metoda byla využita pro popis chování cementové malty při vystavení rozdílné vlhkosti, kde jednotlivé prstence byly umístěny do klimatizační komory (Obrázek 8.4). Dále pak byly prstence využity, při stanovení mezního přetvoření pomocí expanzní směsi.

### 8.8.2 Metoda můstku

V našem případě bylo třeba zvolit vhodnou metodu pro měření objemových změn, nebo-li přetvoření zdíci tvarovky, vlivem působení změn vlhkosti, teploty popřípadě kombinací těchto faktorů. Další „kritérium“ byla dostupnost měřícího zařízení, jeho nenáročnost spolu s možností reprodukovatelnosti měření. Vzhledem k přihlédnutí k výše zmíněným požadavkům se jako nejlepší varianta jevila kombinace ocelového můstku spolu s digitálním úchylkoměrem (viz Obrázek 8.5).



Obrázek 8.5: Kombinace ocelového můstku s digitálním úchylkoměrem

Základem této sestavy je ocelový můstek (Obrázek 8.5 vlevo) o rozpětí 150 mm, jehož čelní části jsou spojeny pomocí třech ocelových tyčinek, kde boční části zajišťují fixaci čel a prostřední ocelová tyčinka spojuje pohyblivě jednotlivé čelní plíšky, tím je zajištěn pohyb čelní části a následný záznam pohybu pomocí digitálního úchylkoměru. Tento digitální úchylkoměr (Obrázek 8.5 uprostřed) je osazen do ocelového můstku a zafixován pomocí upínacího systému (viz obrázek 8.5 vpravo). Výsledné přetvoření je tedy měřeno na základně 150 mm, což odpovídá rozpětí můstku.

Úchylkoměr zobrazuje přetvoření (délkové přetvoření) vyvolané pohybem čelní části ocelového můstku, se kterým je v kontaktu čelní část (hrot) úchylkoměru (Obrázek 8.5 vpravo). Toto přetvoření je následně vyobrazeno na displeji v řádu 0,001 mm. Rozsah úchylkoměru Sylvac  $\mu$ S229 je 25 mm, výsledná přesnost odpovídá 5  $\mu$ m s opakovatelností měření 2  $\mu$ m. Tento digitální úchylkoměr umožňuje propojení s počítačem a kontinuální záznam hodnot ve zvolených časových intervalech.

Tato měřicí soustava (ocelový můstek + digitální úchylkoměr) byla v naší práci využita především v kombinaci s pozinkovanými plíškami tloušťky 1,4 mm (Obrázek 8.6 vlevo)



Obrázek 8.6: Kombinace plíšku s ocelovým můstkem (vlevo), osazení měřicí soustavy do tvarovky (vpravo)

Do těchto plíšků byly vyfrézovány drážky pro uložení ocelového můstku. Takto upravené pozinkované plíšky byly osazeny do tvarových zdících prvků tak, že došlo vyřezání drážky do tvarovky, do těchto drážek se následně usadily plíšky a došlo k zafixování pomocí lepidla na bázi epoxidu a tím byla definována měřicí základna. Po osazení těchto plíšků do tvarovky, následovalo umístění ocelového můstku s digitálním úchylkoměrem (viz Obrázek 8,6 vpravo).

Tato metoda byla využita pro stanovení objemových změn systému tvarovka – výplňový beton (zálivková malta), v tomto případě se jedná o délkového přetvoření zdících prvků vystavených působením rozdílných teplot a vlhkostí. Dále také byla tato metoda užita, při stanovení mezního přetvoření.

## 9 Experimentální část

V této části diplomové práce budou vyhodnoceny veškeré výsledky získané měření. Experimentální část je koncipována do čtyřech základních rovin. Tyto roviny jsou spolu úzce spjaty. První část je zaměřena na samotné tvarové zdící prvky typu Face Block a Simple Block. Druhý úsek popisuje vlastnosti samotné výplně, tedy zálivkové malty, nebo-li betonu. Třetí část je zaměřena na analýzu objemových změn systému tvarovka – výplňový beton (zálivková malta). Poslední čtvrtá část je věnována statickému a dynamickému výpočtu a modelování.

### 9.1 Analýza zdících tvarových prvků

Jak již bylo zmíněno, tak nejvíce defektů zdících prvků se vyskytuje u vibrolisovaných tvárnic. Pro vypracování této práce byly vybrány dva reprezentativní druhy tvárnic typu Face Block a Simple Block. Na těchto tvárnících byla stanovena pevnost v tlaku a objemová hmotnost po 28 dnech stáří tvárnic. Výsledné hodnoty byly pak porovnány s deklarovanými hodnoty. Dále pak byla na tvarovkách stanovena mezní hodnota přetvoření. Pro zjednodušení bude používána v dalším textu zkratka SB, pro tvárnice typu Simple Block a FB, pro tvárnice typu Face Block.

#### 9.1.1 Stanovení pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti tvárnic

Tabulka 9.1: Deklarované vlastnosti zdících tvarovek typu Face Block, převzato z [1]

Základní charakteristika	Vlastnosti			Harmonizované technické specifikace
	Délka	Šířka	Výška	
Rozměrová tolerance, (kat. D1)	+ 3 mm	+3 mm	+ 3 mm	ČSN EN 771-3 čl. 5.2.2
	- 5 mm	- 5 mm	- 5 mm	
Objemová hmotnost	min. 1900 kg/m <sup>3</sup>			ČSN EN 1338 čl. 5.4
Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu, vztaheno na celkovou plochu, kategorie I	10 N/mm <sup>2</sup>			ČSN EN 771-3 čl. 5.5.1
Mrazuvzdornost	50 cyklů			ČSN EN 771-3 čl. 5.7

Tabulka 9.2: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Face Block

typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
FB 1-A	390,3	0,3	200,6	0,1	190,8	0,0	22500	2230	1392,55	17,8	18,0	26,3	26,7
FB 1-B	390,1	0,1	200,0	0,3	190,8	0,7	22450	2230	1351,79	17,3		25,7	
FB 1-C	390,2	0,3	200,0	0,1	190,3	1,0	23200	2300	1476,24	18,9		28,1	

Tabulka 9.3: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Face Block

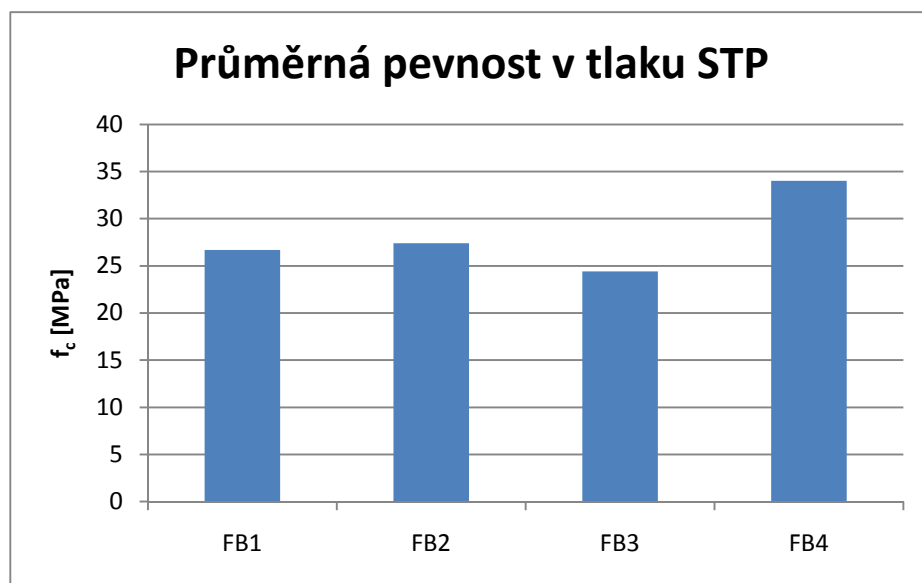
typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
FB 2-A	390,2	0,1	200,1	0,0	190,2	0,1	23500	2330	1470,41	18,8	18,5	27,9	27,4
FB 2-B	389,9	0,1	200,5	0,9	190,3	0,6	23050	2290	1208,96	15,5		22,9	
FB 2-C	390,1	0,2	200,9	0,2	190,5	0,4	23950	2380	1664,84	21,2		31,4	

Tabulka 9.4: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Face Block

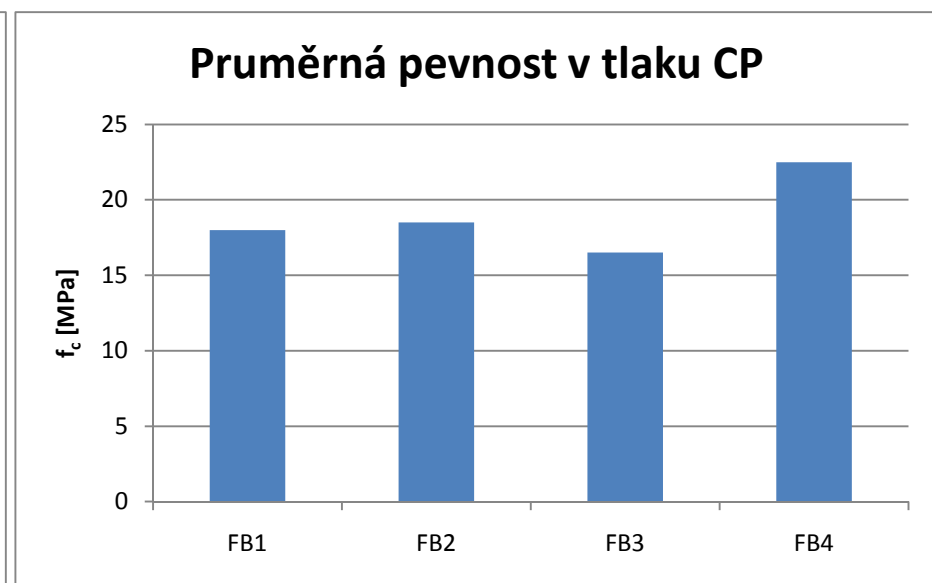
typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
FB 3-A	389,7	0,4	200,3	0,1	188,8	0,2	22800	2260	1216,07	15,6	16,5	23,1	24,4
FB 3-B	389,8	0,1	200,4	0,1	189,8	0,3	22600	2240	1398,91	17,9		26,5	
FB 3-C	389,7	0,1	200,2	0,1	189,3	0,2	22950	2280	1241,79	15,9		23,6	

Tabulka 9.5: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Face Block

typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
FB 4-A	350,1	0,1	199,0	0,1	189,5	0,7	22400	2220	1585,80	22,8	22,5	35,8	34,0
FB 4-B	390,5	0,4	199,2	0,1	189,4	0,2	24450	2430	1747,10	22,5		33,4	
FB 4-C	390,4	0,4	199,6	0,2	189,5	0,2	22850	2270	1726,01	22,1		32,9	



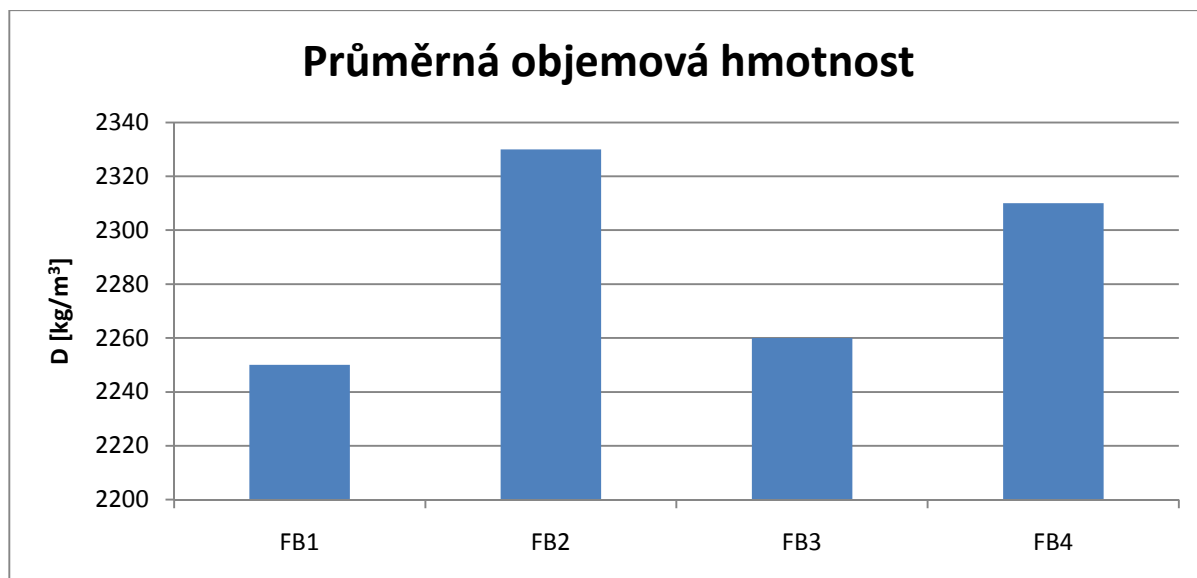
Graf 4: Porovnání pevností v tlaku (STP) tvárnic typu FB



Graf 5: Porovnání pevností v tlaku (CP) tvárnic typu FB

Poznámka:

Δ – největší rozdíl mezi dvěma naměřenými hodnotami rozměrů, CP – pevnost v tlaku vztažená na celkovou plochu tvarovky  
 STP – pevnost v tlaku vztažená na skutečnou tlačnou plochu tvarovky



Graf 6: Porovnání objemové hmotnosti tvárnic typu FB

Tabulka 9.6: Průměrné fyzikálně – mechanické vlastnosti tvarovky typu FB

Typ tvarovky	Průměrná D [kg/m³]	Průměr CP [MPa]	Průměr STP [MPa]
FB	2290	18,9	28,1

Tabulka 9.7: Deklarované vlastnosti zdících tvarovek typu Simple Block, převzato z [1]

Základní charakteristika	Vlastnosti			Harmonizované technické specifikace
	Délka	Šířka	Výška	
Rozměrová tolerance, (kat. D1)	+ 3 mm	+3 mm	+ 3 mm	ČSN EN 771-3 čl. 5.2.2
	- 5 mm	- 5 mm	- 5 mm	
Objemová hmotnost	min. 1900 kg/m³			ČSN EN 1338 čl. 5.4
Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu, vztaženo na celkovou plochu, kategorie I	3,5 N/mm²			ČSN EN 771-3 čl. 5.5.1
Mrazuvzdornost	50 cyklů			ČSN EN 771-3 čl. 5.7

Tabulka 9.8: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Simple Block

typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
SB 1-A	400,3	0,2	300,3	0,1	150,1	0,5	14450	2100	548,94	4,6	4,6	22,3	22,3
SB 1-B	400,4	0,1	300,2	0,1	150,2	0,1	14450	2100	547,03	4,6		22,2	
SB 1-C	400,2	0,0	300,2	0,1	150,1	0,1	14350	2080	546,48	4,5		22,3	

Tabulka 9.9: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Simple Block

typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
SB 2-A	399,1	0,1	300,5	0,2	150,1	0,6	14050	2040	659,25	5,5	5,4	27,1	26,5
SB 2-B	399,1	0,0	300,6	0,1	150,1	0,4	14050	2040	621,03	5,2		25,5	
SB 2-C	399,2	0,1	300,6	0,1	150,0	0,6	14100	2050	656,25	5,5		26,9	

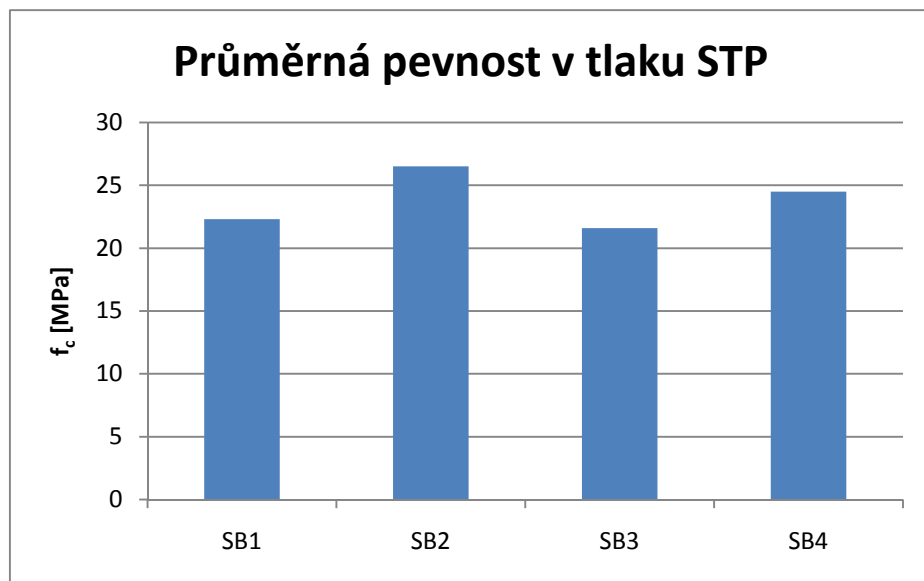
Tabulka 9.10: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Simple Block

typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
SB 2-A	400,1	0,0	300,8	0,1	148,9	0,1	14150	2050	527,18	4,4	4,4	21,3	21,6
SB 2-B	400,0	0,1	300,9	0,1	149,3	0,3	14150	2050	535,95	4,5		21,7	
SB 2-C	400,5	0,9	300,8	0,1	149,3	0,1	14100	2050	540,69	4,5		21,8	

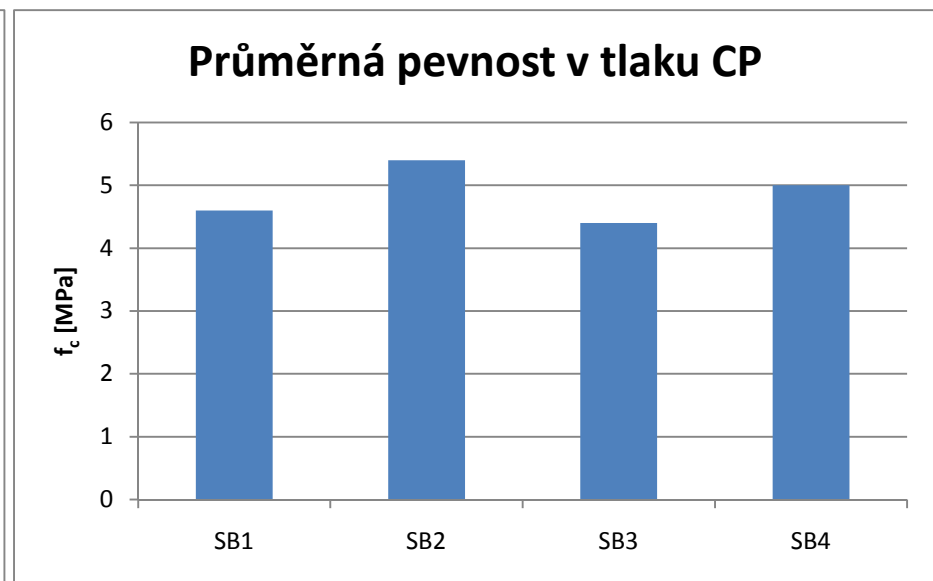


Tabulka 9.11: Stanovení pevnosti v tlaku tvarovky typu Simple Block

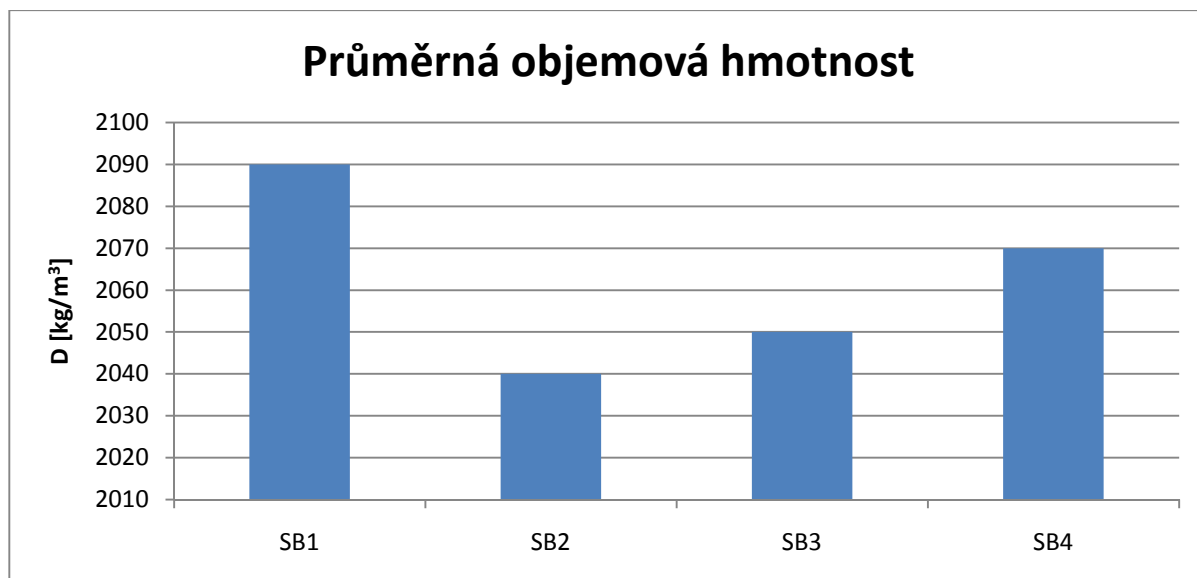
typ a označení tvarovky	Rozměr						Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Lomové zátížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]					CP	Průměr CP	STP	Průměr STP
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
SB 2-A	399,4	0,1	300,4	0,6	149,7	0,5	14250	2070	583,31	4,9	5,0	23,9	24,5
SB 2-B	399,4	0,1	300,4	0,4	149,8	0,4	14250	2070	631,08	5,3		25,9	
SB 1-C	399,3	0,1	300,4	0,5	149,9	0,2	14200	2060	579,41	4,8		23,8	



Graf 7: Porovnání pevností v tlaku (STP) tvárnic typu SB



Graf 8: Porovnání pevností v tlaku (CP) tvárnic typu SB



Graf 9: Porovnání objemové hmotnosti tvárnic typu SB

Tabulka 9.12: Průměrné fyzikálně – mechanické vlastnosti tvarovky typu SB

Typ tvarovky	Průměrná D [kg/m³]	Průměr CP [MPa]	Průměr STP [MPa]
SB	2060	4,9	23,7

### 9.1.2 Stanovení mezního přetvoření tvárnic

Pro získání informací o mezním přetvoření tvarovky, byla použita metoda můstku spolu s prstencovou metodou. V obou těchto případech byla použita expanzní hmota Bentodex. Jedná se o jednosložkovou suchou expanzní hmotu. Jednotlivé parametry můžeme najít v tabulce 9.13. Toto měření probíhalo na tvárnících typu Face Block.

Tabulka 9.13: Parametry expanzní směsi

Barva	šedá
Ztráta žíhání max. [%]	1,0
Zrnitost [mm]	max. 0,2
Poměr mísení (voda:expanzní směs)	3:10
Max. rozpojovací tlak [MPa]	70

V prvním případě bylo zjištěno maximální přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max}}$ , při kterém podléhá tvarovka deformaci. Za tímto účelem se využila metoda můstku, kdy byla tvarovka osazena měřicím zařízením (můstkem). Tento můstek byl propojen s počítačem pro získání informací v průběhu deformace (Obrázek 9.1). Deformace tvarovky pak byla vyvolána tak, že došlo k vyplnění tvarovky expanzní směsí, která způsobila potrhání tvarovky (viz Obrázek 9.1).

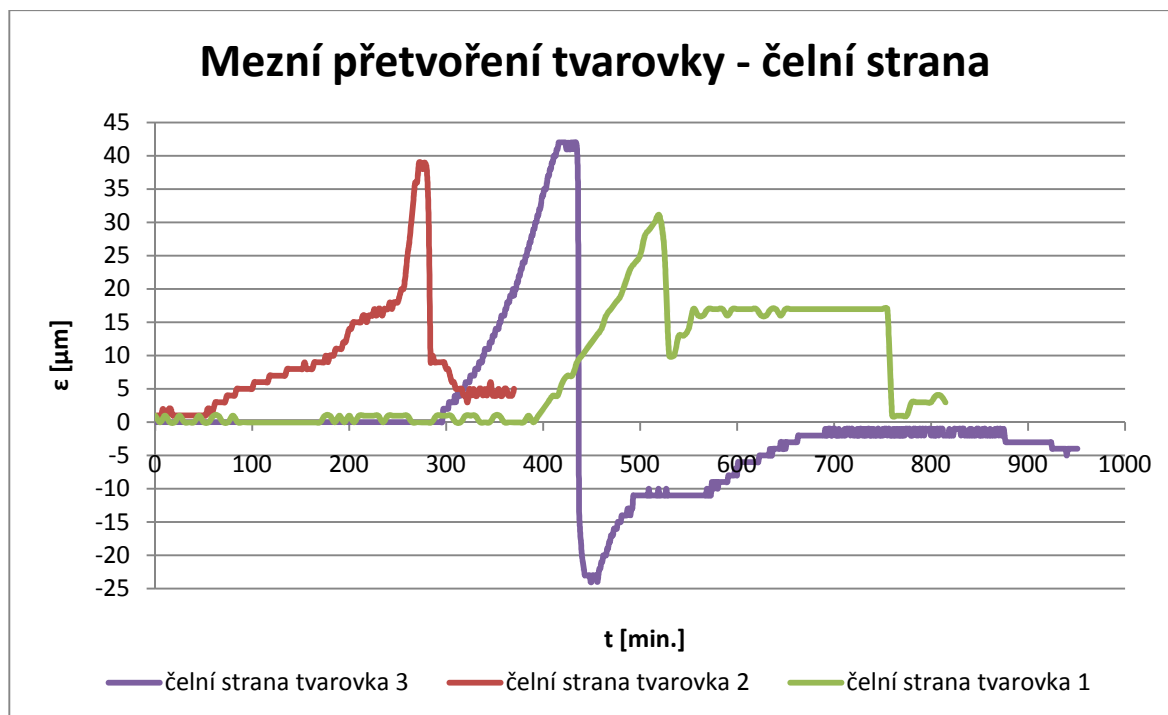


*Obrázek 9.1: Měření mezního přetvoření, metodou můstku*

V grafu 10, a tabulce 9.14 můžeme vidět maximálního dosaženého přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max}}$ , vyvolaného pomocí expanzní směsi. Na obrázku 9.2, můžeme vidět výskyt trhlin při stanovení mezního přetvoření.



*Obrázek 9.2: Deformace tvarovek vlivem expanzní směsi*



Graf 10: Mezní přetvoření tvarovky, vyvolané expanzní směsí

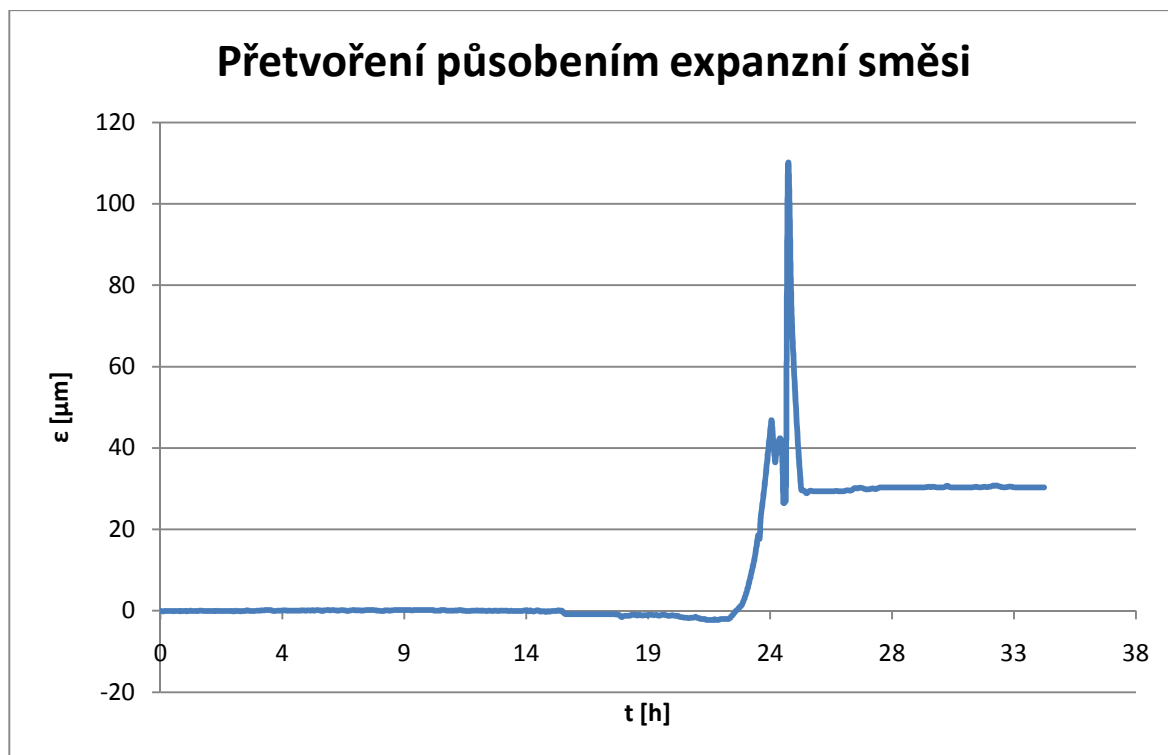
Tabulka 9.14: Stanovení mezního přetvoření

Místo měření	Max. mezní přetvoření $\epsilon_{def,max}$ [μm]	Průměrné max. mezní přetvoření $\epsilon_{def,max,prům}$ [μm]
čelní strana tvarovka 1	31	37
čelní strana tvarovka 2	39	
čelní strana tvarovka 3	42	

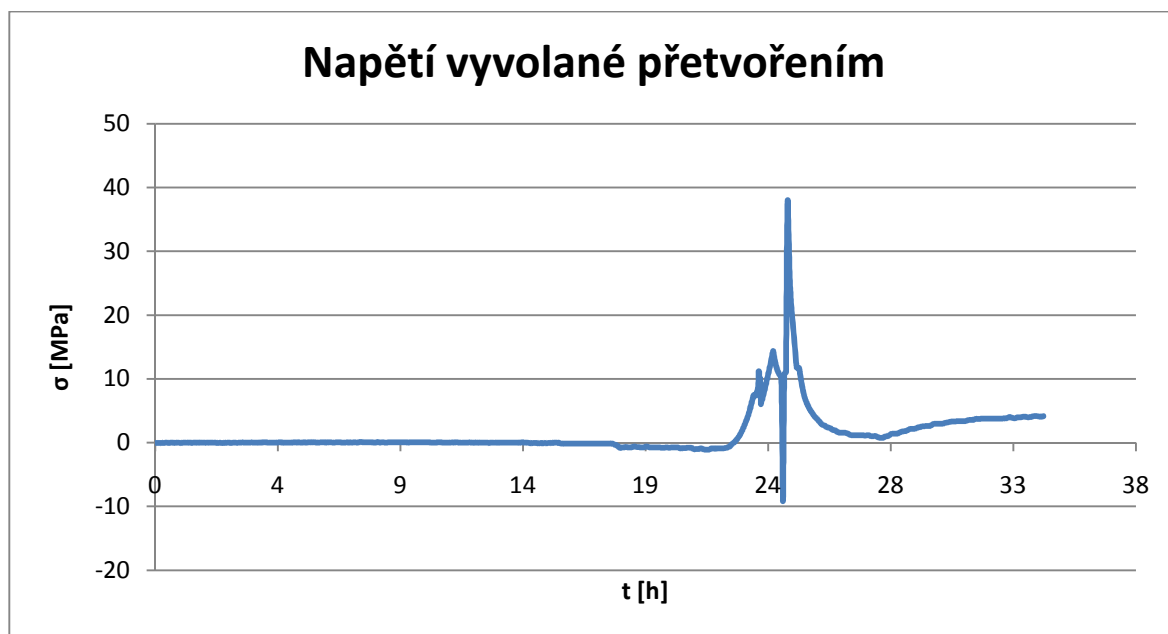
Pro stanovení maximálního vnitřního napětí, při kterém může dojít k porušení tvarovky, byla využita prstencová metoda spolu s expanzní směsí (Obrázek 9.3). Jak již víme z teoretických poznatků o této metodě, tak pomocí vztahu (14) a (15) můžeme výsledné tlak působící na prstence přepočítat na napětí. V našem případě na maximální deformační napětí  $\sigma_{def,max}$ . V grafech 11 a 12, můžeme vidět přetvoření a výsledné napětí vyvolané expanzní směsí.



Obrázek 9.3: Měření mezního přetvoření prstencovou metodou



Graf 11: Přetvoření vlivem expanzní směsi



Graf 12: Napětí vyvolané vlivem expanzní směsi

Pomocí metody můstku jsme stanovili maximální dosažené přetvoření  $\epsilon_{\text{def,max}}$ . Známe-li toto přetvoření (viz Tabulka 9.14), můžeme z grafů 11 a 12 získaných pomocí prstencové metody, výsledné maximální deformační napětí  $\sigma_{\text{def,max}}$ . Výsledné napětí odpovídající jednotlivým přetvořením můžeme vidět v tabulce 9.15.

Tabulka 9.15: Mezní přetvoření a tomu odpovídající napětí, vyvolané vlivem expanzní směsi

$\epsilon_{\text{def,max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	29,9	30,8	31,8	32,8	33,8	34,8	35,8	36,8	37,8	38,8	39,8	40,8	41,8	42,8
$\sigma_{\text{def,max}}$ [MPa]	0,68	0,70	0,73	0,75	0,78	0,80	0,83	0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,04

Odečteme-li hodnotu mezního přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max}}$  z tabulky 9.14 a tuto hodnotu dosadíme do tabulky 9.15, dostaneme výsledné mezní přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max}}$  a tomu odpovídají deformační napětí  $\sigma_{\text{def,max}}$  (viz Tabulka 9.16).

Tabulka 9.16: Výsledné mezní přetvoření a deformační napětí

PARAMETR	HODNOTA	Poznámka
mezní přetvoření $\varepsilon_{\text{def,max}}$	31-42 $\mu\text{m}$	Přetvoření neměřené metodou můstku, pomocí expanzní směsi. Měřičská základna 150 mm.
deformační napětí $\sigma_{\text{def,max}}$	0,7-1,04 MPa	Změřeno metodou ring test za pomoci expanzní směsi

### 9.1.3 Vyhodnocení

Pro zjednodušení bude používána v dalším textu zkratka SB. pro tvárnice typu Simple Block a FB pro tvárnice typu Face Block. Při porovnání jednotlivých deklarovaných vlastností prvků typu FB lze vidět, že minimální deklarovaná pevnost v tlaku vztažená na celkovou plochu (CP) tvarovky byla 10 MPa. Naměřená minimální pevnost vlastního betonu tvarovky, byla 16,5 MPa, maximální pak 22,5 MPa, výsledný rozdíl mezi min. a max. pevností činí 6 MPa. Průměrná pevnost v tlaku ze tří měření vyšla 18,9 MPa, tedy převyšuje deklarovanou hodnotu o téměř 190 %. Minimální objemová hmotnost tvárnice je rovna 2250  $\text{kg/m}^3$ , maximální pak 2330  $\text{kg/m}^3$ , průměrná hodnoty 2290  $\text{kg/m}^3$ . Minimální deklarovaná obj. hm. byla 1900  $\text{kg/m}^3$ . V tomto případě průměrná obj. hm. převyšuje minimální požadovanou hodnotu o 120 %.

Porovnáme-li požadované a deklarované hodnoty u tvárnic typu SB, kde minimální deklarovaná pevnost v tlaku vztažená na celkovou plochu (CP) tvarovky je 3,5 MPa. Minimální naměřená hodnota pevnosti v tlaku byla 4,4 MPa, maximální 5,4 MPa. Průměrná pevnost tvarovky v tlaku byla 4,9 MPa. Tato hodnota převyšuje požadovanou pevnost o 140 %. Deklarovaná minimální obj. hm. je 1900  $\text{kg/m}^3$ . Minimální obj. hm. byla naměřena 2040  $\text{kg/m}^3$ , maximální pak 2090  $\text{kg/m}^3$ . Průměrná obj. hm. vyšla 2060  $\text{kg/m}^3$ . Průměrná obj. hm. převyšuje deklarovanou hodnotu o téměř 110 %.

Porovnáme-li deklarované a zjištěné fyzikálně – mechanické vlastnosti, můžeme vidět, že bylo u zkoušených tvárnic typu SB a FB dosaženo splnění minimálních deklarovaných hodnot.

Při stanovení mezního přetvoření na tvárnících typu Face Block, bylo zjištěno výsledné mezní přetvoření v čelní části  $\varepsilon_{\text{def,max}}$  v intervalu 31 až 42  $\mu\text{m}$  a tomu odpovídají deformační napětí  $\sigma_{\text{def,max}}$  0,7 až 1,04 MPa. Měřičská základna odpovídá rozměru můstku, tedy 150 mm. Výskyt defektů byl vždy v čelní části tvarovky (viz Obrázek 9.2). Mezní hodnoty přetvoří, jsou uvedené v rozmezích s přihlédnutím k „odlišným“ mechanickým vlastnostem tvarovek, která jsme zjistili z předešlých měření.

## 9.2 Analýza výplňového betonu

Na výplňovém betonu byly stanoveny požadavky jako konzistence čerstvého betonu, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost a nasákavost, které mohou bezprostředně souviset s možným výskytem poruch zdících prvků. Pro získání informací o chování záливkové malty při vystavení odlišným klimatickým jevům, byla použita prstencová metoda. Pro výplňový beton byly navrženy dvě receptury, jejich složení můžeme najít v tabulce 8.1, pro zjednodušenou orientaci bude tabulka uvedena i v této kapitole jako tabulka 9.17.

Tabulka 9.17: Navržené receptury

Složení betonové směsi [kg/m <sup>3</sup> ]	Receptura I	Receptura II
<b>CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R</b>	350	350
<b>Kamenivo 0 – 4 Žabčice</b>	1500	750
<b>Kamenivo 4 – 8 Žabčice</b>	1250	750
<b>Voda</b>	140	190
<b>Konzistence</b>	-	S3 (110)

### 9.2.1 Stanovení nasákavosti výplňového betonu

Tabulka 9.18: Hmotnosti vzorku uložených pod vodou

RECEPTURA I				
vzorek	m <sub>st1</sub>	m <sub>st2</sub>	m <sub>st3</sub>	m <sub>st4</sub>
	[g]			
I-A	241,48	250,40	249,93	249,86
I-B	339,32	350,73	349,70	350,15
I-C	277,18	288,26	287,70	287,95

Tabulka 9.19: Hmotnosti vzorku vysušených a výsledná nasákavost

RECEPTURA I					
vzorek	m <sub>dt1</sub>	m <sub>dt2</sub>	m <sub>dt3</sub>	<i>v</i>	průměrná <i>v</i>
	[g]			[%]	[%]
I-A	231,11	230,87	230,67	8,3	8,2
I-B	326,54	325,78	324,72	7,8	
I-C	266,68	265,82	265,59	8,4	

Tabulka 9.20: Hmotnosti vzorku uložených pod vodou

RECEPTURA II				
vzorek	m <sub>st1</sub>	m <sub>st2</sub>	m <sub>st3</sub>	m <sub>st4</sub>
	[g]			
II-A	229,22	318,04	317,88	318,20
II-B	333,75	357,21	355,47	354,60
II-C	136,63	146,00	144,36	144,49

Tabulka 9.21: Hmotnosti vzorku vysušených a výsledná nasákavost

RECEPTURA II					
vzorek	$m_{dt1}$	$m_{dt2}$	$m_{dt3}$	$v$	průměrná $v$
	[g]			[%]	[%]
II-A	291,62	291,56	291,65	9,1	8,8
II-B	325,25	325,06	325,10	9,1	
II-C	133,59	133,58	133,60	8,2	

## 9.2.2 Stanovení pevnosti v tlaku výplňového betonu

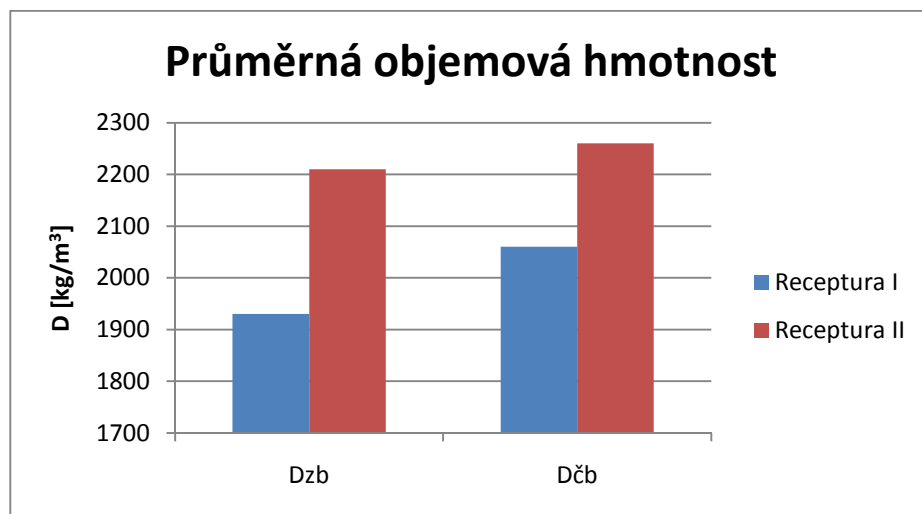
Tabulka 9.22: Stanovení pevnosti v tlaku betonu, vyrobeného podle receptury I

Označení vzorku	Rozměr						Hmotnost [g]	$D_{zb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Průměrná $D_{zb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Průměrná $D_{čb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F [kN]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	Průměr $f_{ck,cube}$ [MPa]
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]								
	Průměr	$\Delta$	Průměr	$\Delta$	Průměr	$\Delta$							
I-A	99,3	0,7	100,7	0,3	101,3	0,8	1978	1950	1930	2060	125	12,3	10,1
I-B	100,8	0,4	100,5	0,4	102,2	0,5	1988	1920			111	10,8	
I-C	99,6	0,3	100,1	0,3	102,7	0,4	1934	1890			136	13,2	
I-D	98,5	0,6	101,3	0,4	102,0	0,5	1944	1910			84	8,1	
I-E	98,8	0,5	100,3	0,2	103,1	0,7	1992	1950			83	8,0	
I-F	100,9	0,5	102,5	0,4	101,2	0,4	2008	1920			86	8,3	

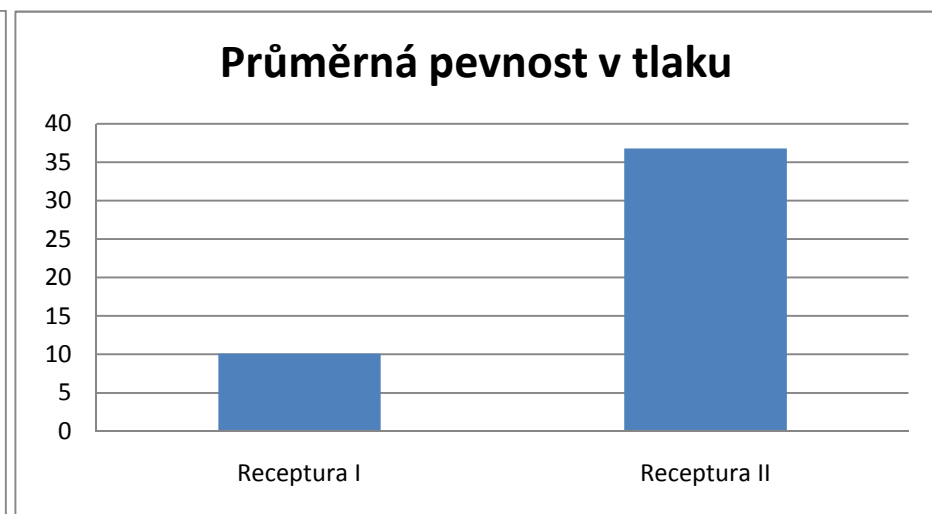


Tabulka 9.23: Stanovení pevnosti v tlaku betonu, vyrobeného podle receptury II

Označení vzorku	Rozměr						Hmotnost [g]	$D_{zb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Průměrná $D_{zb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Průměrná $D_{čb}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F [kN]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	Průměr $f_{ck,cube}$ [MPa]
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]								
	Průměr	$\Delta$	Průměr	$\Delta$	Průměr	$\Delta$							
II-A	100,8	0,4	100,8	0,2	100,0	0,2	2254	2220	2210	2260	350	34,7	36,8
II-B	100,3	0,3	100,9	0,4	99,5	0,4	2252	2240			405	40,3	
II-C	100,7	0,3	100,9	0,4	99,4	0,6	2242	2220			385	38,4	
II-D	100,7	0,5	101,0	0,2	99,6	0,5	2230	2200			365	36,3	
II-E	100,0	0,4	100,3	0,6	99,8	0,7	2262	2260			385	38,5	
II-F	99,7	0,2	100,5	0,7	100,0	0,4	2110	2110			325	32,3	



Graf 13: Porovnání objemové hmotnosti



Graf 14: Porovnání pevností v tlaku

### 9.2.3 Stanovení mrazuvzdornosti výplňového betonu

Tabulka 9.24: Stanovení pevnosti v tlaku betonu navrženého podle receptury I, po 50 cyklech zmrazování

Označení vzorku	Rozměr						Hmotnost	D <sub>zb</sub>	Průměrná D <sub>zb</sub>	Průměrná Dč <sub>b</sub>	F	f <sub>ck,cube,50</sub>	Průměr f <sub>ck,cube,50</sub>
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]								
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
I-AZ	100,3	0,3	99,8	0,3	101,3	0,4	1978	1950	1950	2100	98	9,7	9,8
I-BZ	100,0	0,4	99,9	0,5	101,0	0,4	1988	1970			110	10,9	
I-CZ	99,9	0,4	100,2	0,4	100,5	0,5	1934	1920			90	8,9	

Tabulka 9.25: Stanovení pevnosti v tlaku betonu navrženého podle receptury II, po 50 cyklech zmrazování

Označení vzorku	Rozměr						Hmotnost	D <sub>zb</sub>	Průměrná D <sub>zb</sub>	Průměrná Dč <sub>b</sub>	F	f <sub>ck,cube,50</sub>	Průměr f <sub>ck,cube,50</sub>
	Délka [mm]		Šířka [mm]		Výška [mm]								
	Průměr	Δ	Průměr	Δ	Průměr	Δ							
II-AZ	100,6	0,2	100,7	0,4	99,7	0,3	2248	2230	2230	2310	375	37,4	36,7
II-BZ	101,4	0,2	101,0	0,3	100,9	0,4	2288	2210			365	35,8	
II-CZ	100,5	0,3	100,4	0,2	99,9	0,5	2272	2260			370	36,9	

Tabulka 9.26: Stanovení mrazuvzdornosti po 50 cyklech

Složení	Průměr f <sub>ck,cube</sub>	Průměr f <sub>ck,cube,50</sub>	koeficient mrazuvzdornosti	Poznámka
Receptura I	10,1	14,2	0,97	Vyhovuje
Receptura II	36,8	49,4	0,99	Vyhovuje

## 9.2.4 Stanovení přetvoření cementové malty

Pro tento účel byla použita prstencová metoda. Vzhledem k omezení frakce, pro tuto metodu, byla použita receptura (viz Tabulka 9.27). Z výsledků a poznatků o chování malt a betonů, je patrný velký význam teploty a vlhkostí na jejich objemovou změnu. Graf 15 a 16 poukazuje na změnu hodnot v závislosti na podmínkách.

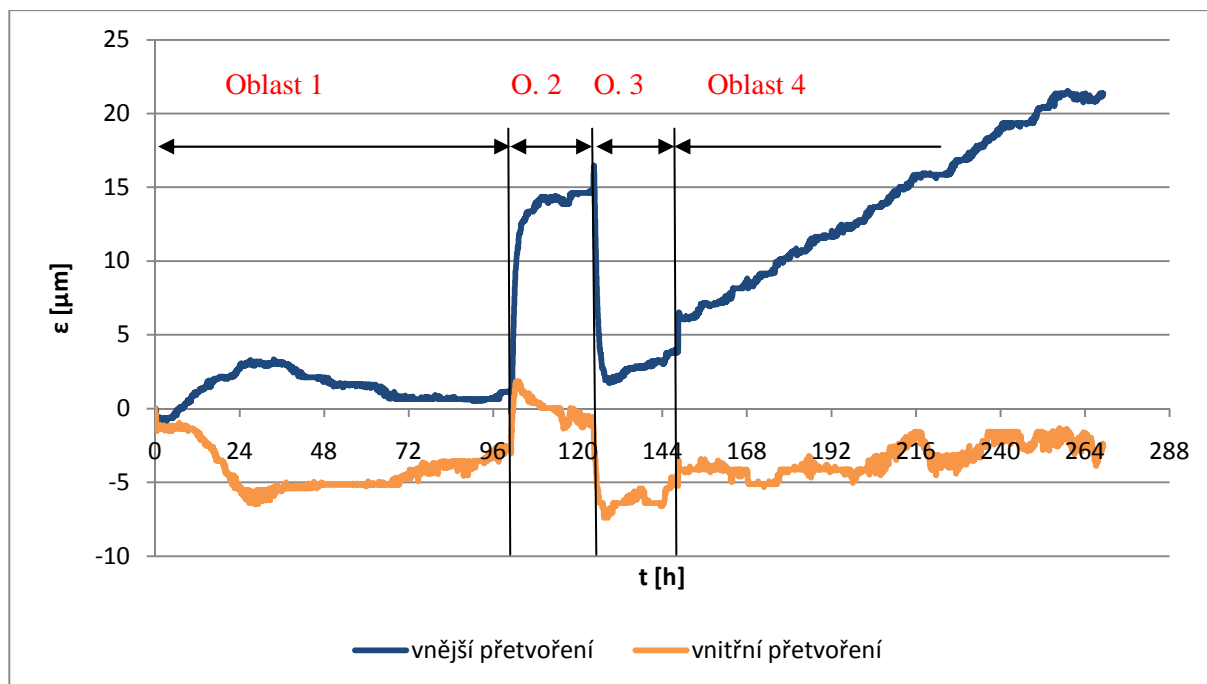
Tabulka 9.27: Návrh cementové malty pro prstencovou metodu

Složení cementové malty [kg/m <sup>3</sup> ]	Receptura
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	350
Kamenivo 0 – 4 Žabčice	1500
Voda	140

U použitých prstenců můžeme hodnotám, které udávají tenzometry přímo přiřadit velikost smrštění, resp. „rozpínání“ v závislosti, na kterém z ocelových prstenců byly naměřeny. Je třeba si uvědomit, že výslednou hodnotu pak uvádíme jako absolutní. V grafech 15 a 16 je tato hodnota uvedena pro lepší ilustraci jako záporná (pokud je měřena na vnitřním prstenci, dochází ke stlačování tenzometru), nebo jako kladná (v případě vnějšího prstence, dochází k rozpínání tenzometru). Pomocí vztahu (14) a (15) lze vypočítat tlak a následně napětí, tzv. zádržné napětí, vyvozené betonovým kroužkem na vnější, vnitřní ocelový prsteneček.

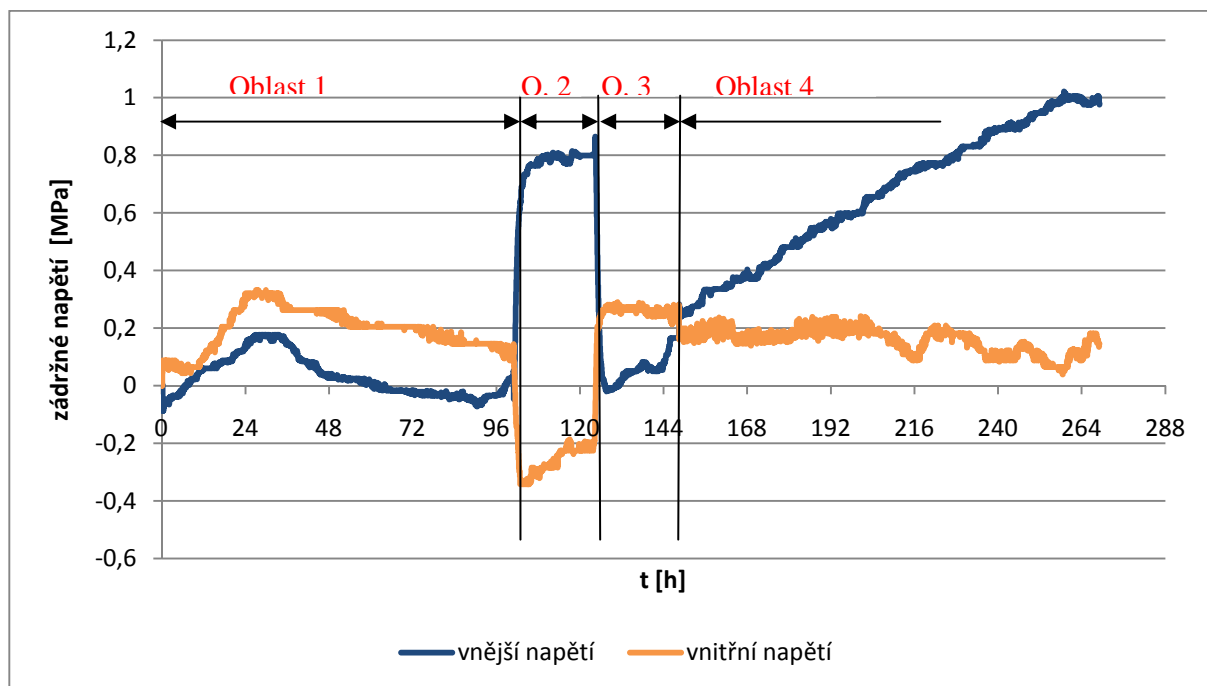
V průběhu času byly vzorky vystaveny rozdílným klimatickým vlivům. V první fázi (Oblast 1) vzorky zrály při klimatických podmínkách laboratoře. Po uplynutí této doby se vzorky vystavily prostředí o relativní vlhkosti  $\varphi = 50 \%$ ,  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (Oblast 2), následně pak došlo k poklesu teploty na  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , při  $\varphi = 50 \%$  (Oblast 3). V poslední fázi byla změněna relativní vlhkost na hodnotu  $\varphi = 95 \%$  při zachování teploty  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Oblast 4). V následujících grafech 15,16 lze vidět jednotlivé přetvoření a vyvolané napětí v závislosti na jednotlivých prostředích.

V grafu 15, lze vidět přetvoření v oblasti 1, kde na vnějším prstenci byla dosažena maximální hodnota přetvoření  $\varepsilon_{st,SH} = 3,1 \text{ } \mu\text{m}$ . Na vnitřním prstenci tato hodnota odpovídá téměř dvojnásobku a to  $\varepsilon_{st,SH} = -6,1 \text{ } \mu\text{m}$ . V oblasti dva o  $\varphi = 50 \%$ ,  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  nastává prudká změna přetvoření, kde hodnota na vnějším prstenci odpovídá hodnotě okolo  $\varepsilon_{st,SH} = 14,0 \text{ } \mu\text{m}$ , a na vnitřním, hodnotě okolo  $\varepsilon_{st,SH} = 1,0 \text{ } \mu\text{m}$ . Ve třetí oblasti dochází ke snížení teploty na hodnotu  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  a zachování relativní vlhkosti  $\varphi = 50 \%$ . Zde odpovídají střední hodnoty naměřené na vnějším i vnitřním prstenci hodnotám oblasti 1. Jako nejzajímavější se jeví oblast 4. Zde dochází při zachování teploty  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  k nárůstu relativní vlhkosti na  $\varphi = 95 \%$ . Zde lze pozorovat změny přetvoření odpovídající kolísání hodnot v intervalu  $\varepsilon_{st,SH} = -5$  až  $-2 \text{ } \mu\text{m}$ . Ovšem na vnějším prstenci dochází k nárůstu přetvoření z hodnoty  $\varepsilon_{st,SH} = 5 \text{ } \mu\text{m}$  na hodnotu až  $\varepsilon_{st,SH} = 22 \text{ } \mu\text{m}$ . V tomto případě, by jsme mohli mluvit o vykompenzování smrštění nabýváním na objemu.



Graf 15: Přetvoření v čase závislé na relativní vlhkosti a teplotě.

Vyobrazení výsledného napětí vypočteného dle vztahu (14) a (15), lze vidět v grafu 16. V tomto případě odpovídá vyvolané napětí v první oblasti na vnějším prstenci  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,17 \text{ MPa}$  a na vnitřním  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,27 \text{ MPa}$ . V oblasti 2, je vidět náhlá změna napětí vyvolaná vyšší teplotní změnou. Hodnota napětí odpovídající vnějšímu prstenci pak dosahuje hodnoty  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,80 \text{ MPa}$  a tomu odpovídající střední hodnota napětí vnitřního kruhu  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,28 \text{ MPa}$ .



Graf 16: Napětí v čase závislé na relativní vlhkosti a teplotě.

Předposlední oblast 3 dosahuje střední hodnota napětí na vnějším kruhu  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,10 \text{ MPa}$ , a na vnitřním  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,25 \text{ MPa}$ . Poslední oblast se zvýšenou relativní vlhkostí

má za následek nárůst napětí na vnějším kruhu na hodnotu, až  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 1,0$  MPa. Střední hodnota napětí na vnitřním kruhu je  $\sigma_{\theta, \max, \text{actual}} = 0,18$  MPa.

### 9.2.5 Vyhodnocení

Receptury byly navrženy tak, aby svým složením korespondovaly s výplňovými betony, které jsou pro daný účel běžně používány. První z receptur byla záměrně navržena tak, aby představovala méně kvalitní beton, druhá pak reprezentovala relativně kvalitnější beton. Při stanovení konzistence čerstvého betonu receptury II, bylo naměřeno sednutí kužele 110 mm odpovídající třídě S3. Stanovení konzistence receptury I nebylo možné, z důvodu rozpadu směsi, při ukládání do kužele, pro stanovení času Vebe.

Nasákavost směsi I byla stanovena  $v = 8,2$  %, směsi II potom  $v = 8,8$  %.

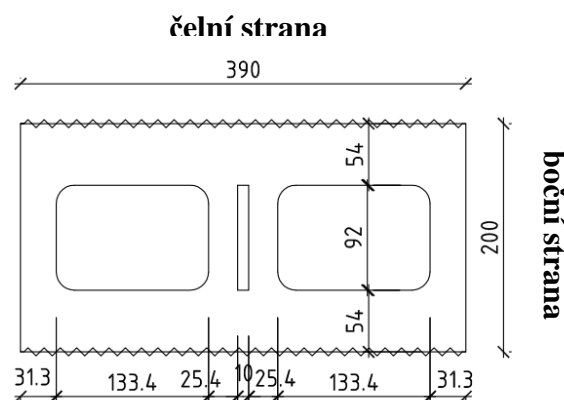
Objemová hmotnost čerstvého betonu vyrobeného podle receptury I je  $D_{\text{čb}} = 2060$  kg/m<sup>3</sup>. Průměrná pevnost betonu v tlaku, vyrobeného podle receptury I je rovna  $f_{\text{ck, cube}} = 10,1$  MPa. Této hodnotě odpovídá objemová hmotnost zatvrdlého betonu  $D_{\text{zb}} = 1930$  kg/m<sup>3</sup>. Pevnost betonu v tlaku receptury II  $f_{\text{ck, cube}} = 36,8$  MPa a objemové hmotnosti čerstvého a zatvrdlého betonu jsou  $D_{\text{čb}} = 2260$  kg/m<sup>3</sup> a  $D_{\text{zb}} = 2210$  kg/m<sup>3</sup>. Rozdíl průměrných pevností betonu v tlaku směsi I a II  $\Delta f_{\text{ck, cube}} = 26,7$  MPa, při stejné dávce cementu, ale při odlišném množství dávky záměsové vody a podílu jednotlivých frakcí kameniva (viz Tabulka 9.17). Kde poměr frakce 0 – 4 mm a 4 – 8 kameniva směsi I je 55:45, při vodním součiniteli  $w = 0,45$ . U směsi II je poměr frakcí kameniva 50:50, při  $w = 0,54$ .

Mrazuvzdornost udávaná poměrem pevnosti v tlaku betonu vystaveného mrazu k pevnosti betonu v tlaku porovnávacího, byla v případě směsi I  $\geq 0,75$  a směsi II  $\geq 0,75$ . V obou případech vyhovuje beton na mrazuvzdornost. Výplňový beton tedy odolá působení mrazu min. po dobu 50 cyklů.

Při měření přetvoření cementové malty v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti prostředí, je významný popis chování malty v jednotlivých oblastech. První oblast je část, kdy vzorky zrály při klimatických podmínkách laboratoře, tedy jsou stanoveny konstantní podmínky a nedochází k závažným změnám. V oblasti 2, kde vzorky byly vystaveny prostředí o relativní vlhkosti  $\varphi = 50$  %,  $T = 30$  °C, lze již pozorovat změnu, na niž má zásadná vliv teplota. V tomto případě může docházet k odpařování vody z kapilárního systému, což má za následek takto prudké změny. Pokud bychom v této části pokračovali, pravděpodobně by došlo k vysušení a následného popraskání malty. V třetí oblasti došlo k poklesu teploty na  $T = 20$  °C, při  $\varphi = 50$  %. Pro nás nejvýznamnější je oblast čtyři, kde jsou prstence vystaveny zvýšené relativní vlhkosti na hodnotu  $\varphi = 95$  %, při zachování teploty  $T = 20$  °C. Zde se s velkou pravděpodobností jedná o hygroskopickou expanzi, kde právě vlivem zvýšené relativní vlhkosti, dochází k zvýšení tloušťky adsorbovaného filmu v kapilárách a to vede k rozšiřování pórů úzkých kapilár a následnému nárůstu objemu. Tento jev, byl blíže popsán v teoretické části. Toto měření dokazuje, že cementová malta může měnit objem, tedy vysychat, smršťovat se, ale i bobtnat, nabývat na objemu. Otázkou je, do jaké míry ovlivní hrubší frakce kameniva tyto přetvoření a jakou měrou ovlivní vodní součinitel tyto objemové změny.

### 9.3 Analýza systému tvarovka – výplňový beton

Tato práce je zaměřená, právě na zkoumání vlivů mající za následek defekty tvarových zdících prvků. Pro zmonolitnění zdícího prvku, při výstavbě plotových konstrukcí slouží výplňový beton. Z předešlého měření a teoretických poznatků již víme, že výplňový beton, malta může v určité míře podléhat objemovým změnám. Tyto objemové změny, vlivem určité nasákavosti tvarovky, která odpovídá hodnotě  $\leq 250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ , mohou být vyvolány i u tvarovky. Proto je důležité posoudit, jak se chová systém vzniklý kombinací tvarovky a výplňového betonu. Pro zachycení objemových změn, respektive přetvoření ve formě délkové „deformace“ byla použita metoda můstku. Toto přetvoření vždy bylo měřeno na čelní (délka) a boční (šířka) straně tvarovky (viz Obrázek 9.4).



Obrázek 9.4: Ilustrace, pro přehled umístění můstku, při měření přetvoření

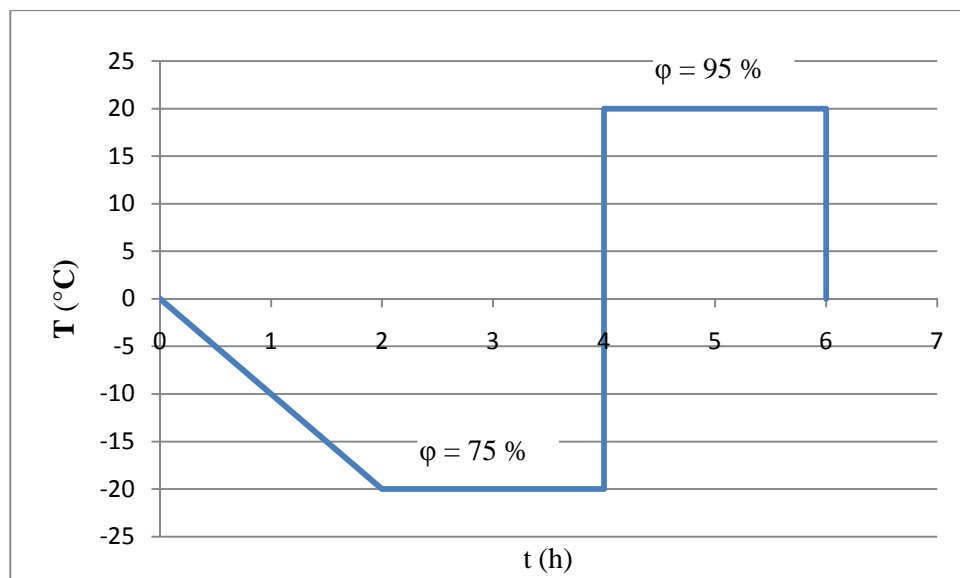
#### 9.3.1 Analýza systému tvarovka – výplňový beton, při působení mrazu

V tomto případě byla tvarovka spolu s výplní testována při vystavení podmínkách působení mrazu (Obrázek 9.5). Kde k simulování těchto podmínek byla použita klimatizační komora Weiss WK 600. Toto měření bylo realizováno za pomoci metody můstku, kde tvarovka byla osazena ze dvou stran (Obrázek 9.5 vpravo). Z boční strany a čelní strany. Digitální úchylkoměry byly napojeny na počítač a výsledná data byla snímána kontinuálně.



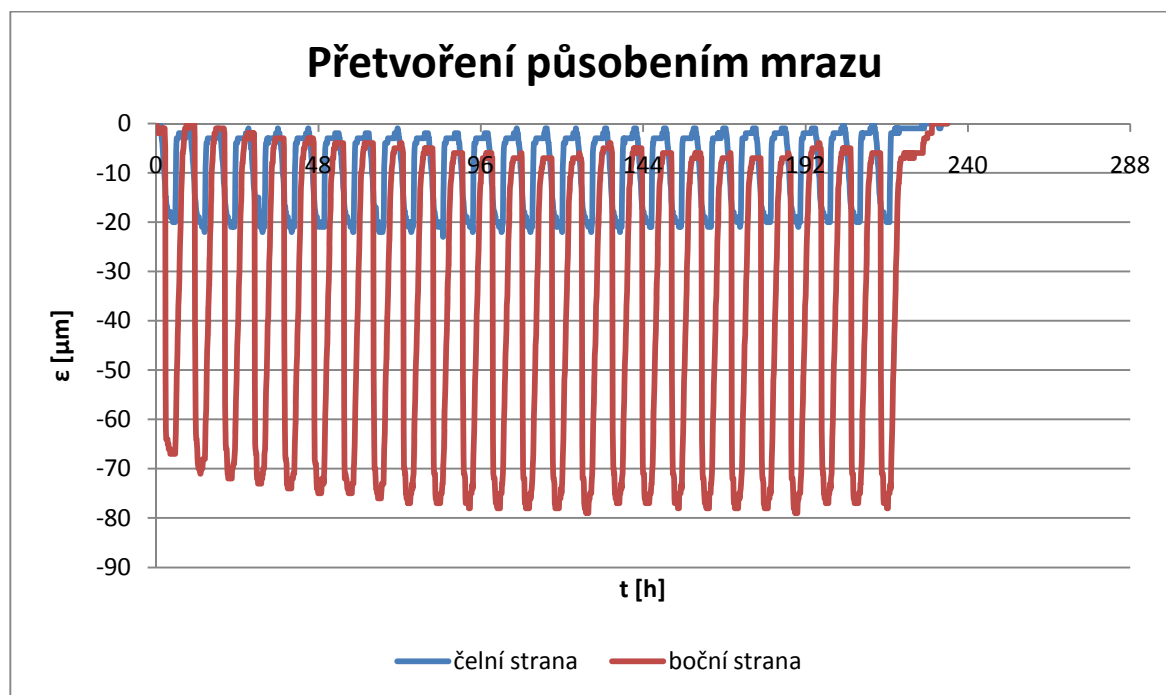
Obrázek 9.5: Měření přetvoření vyplněné tvarovky působením mrazu

Klimatizační komora byla naprogramována tak, aby napodobila zkoušku mrazuvzdornosti. A to z důvodů, kdy nelze měřící soustavu, tedy digitální úchylkoměr, vystavit ponoření pod vodu (proces rozmrazování). V tomto případě by došlo k znehodnocení měřidla. Nastavený program simulující mrazuvzdornost, se skládá z jednoho cyklu, který trvá 6 hodin (Obrázek 9.6). Při procesu zmrazování byla tvarovka vystavena teplotě  $-20\text{ °C}$  a relativní vlhkosti  $\varphi = 75\%$ . Při procesu rozmrazování pak teplotě  $+20\text{ °C}$  a relativní vlhkosti  $\varphi = 95\%$ . Celková doba trvání působení mrazu byla nastavena na dobu 25 cyklů.



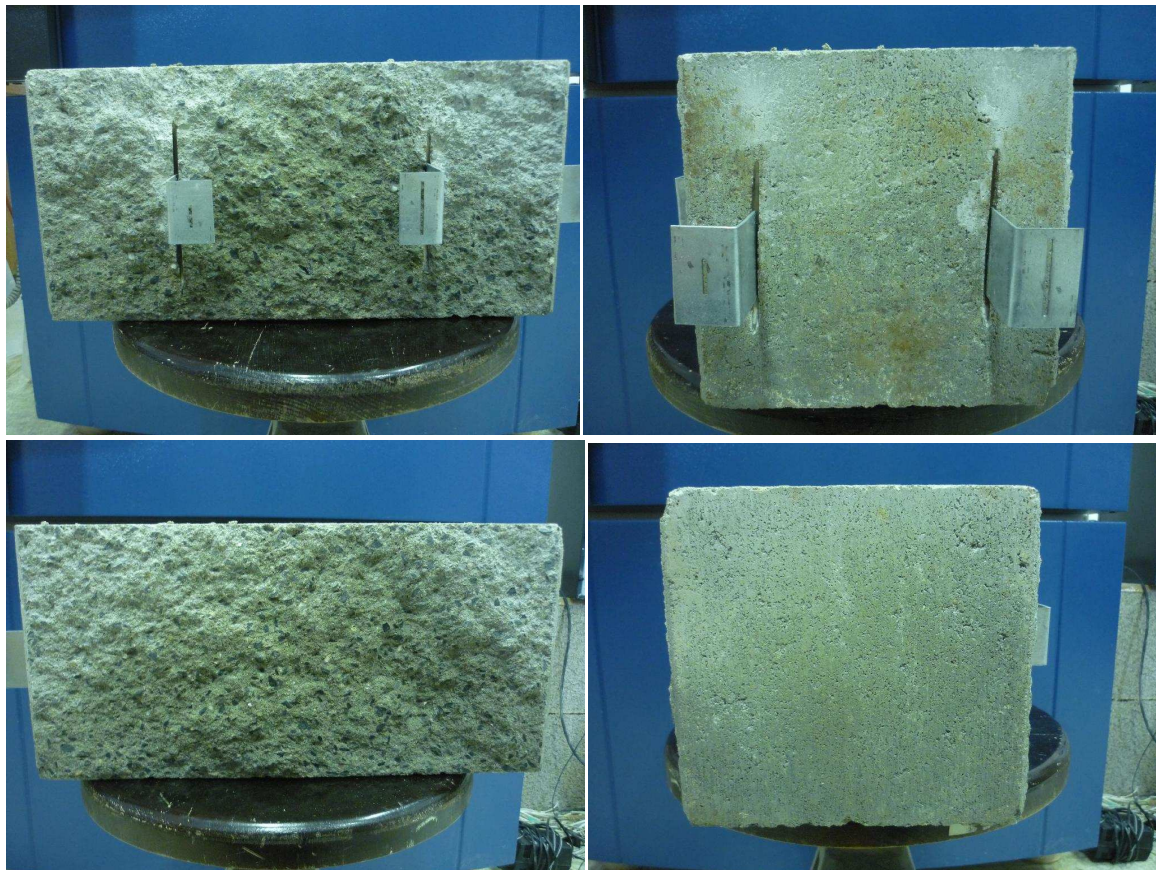
Obrázek 9.6: Cyklus zmrazování, při měření přetvoření vyplněné tvarovky

V grafu 17, můžeme vidět přetvoření vyvolané působením mrazu.



Graf 17: Přetvoření tvarovky vyvolané cyklickým působením mrazu

Průměrné přetvoření  $\varepsilon_{\text{prům,z}}$  vyvolané působením zmrazování a rozmrazování tvarovky po 25 cyklech, je u čelní strany rovno  $\varepsilon_{\text{prům,zč}} = -19 \mu\text{m}$ . U boční části tvarovky, bylo průměrné přetvoření  $\varepsilon_{\text{prům,zb}} = -70 \mu\text{m}$ . Po ukončení měření byla vystavená tvarovka zmrazování a rozmrazování opticky prozkoumána. Na obrázku 9.7, můžeme vidět, že nedošlo k žádnému porušení vlivem mrazu.



Obrázek 9.7: Fotodokumentace tvárnice vystavené působení mrazu



### 9.3.2 Analýza systému tvarovka – výplňový beton, při působení vlhkosti

Pro tento účel byly vystaveny sloupky, na kterých bylo měřeno přetvoření vyvolané působením cyklického střídání vlhkosti a teploty. Jednotlivé sloupky byly umístěny v kovové vaně, ve které byla umístěna voda. To z důvodu simulace zemní vlhkosti. Na schématu 2 můžeme vidět systém sloupku, s popisem působení vlhkosti. Pro usnadnění popisu zdících prvků je v tomto textu pro tvárnice typu Face Block užitá zkratka FB, pro Simple Block SB. Jeden z dvojice sloupků byl vždy skrápěn v intervalech cca 12 hodin, po potřebnou dobu (viz Schéma 3), pro zajištění dostatečného prosycení sloupků vodou. Druhý z dvojice byl ponechán bez působení vlhkosti.

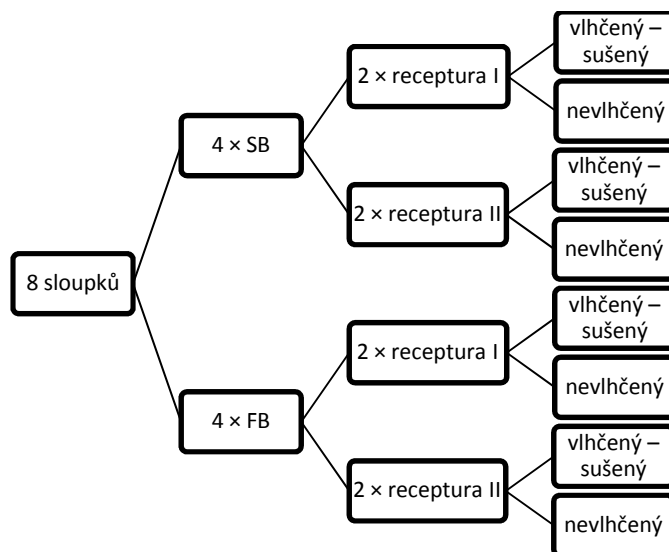


Schéma 2: Popis působení vlhkosti na sloupky

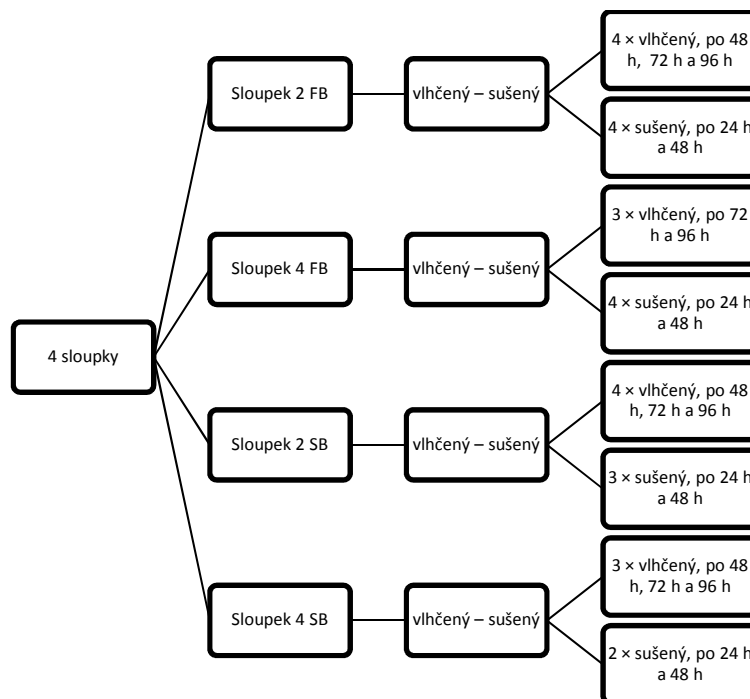


Schéma 3: Popis intervalů vlhčení a sušení sloupků

Zvlhčování sloupků bylo zajištěno zkrápěním vodou (Obrázek 9.8 vlevo) a vysušování, bylo zajištěno horkým vzduchem za pomoci teplometu o výkonu 1200 w, a pomocí osvětlení systémem žárovek o výkonu 900 W (Obrázek 9.8 vpravo). Při ohřevu povrchu sloupků, bylo dosaženo maximální teploty na osvětlené straně sloupku  $T_{\max} = 50 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , po výšce sloupku potom tato teplota kolísala v intervalu  $\pm 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na neosvětlené straně sloupků se teplota pohybovala okolo  $30 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tento systém měl za úkol simulovat denní osvit za letního počasí a zvlhčování pak výskyt srážek.



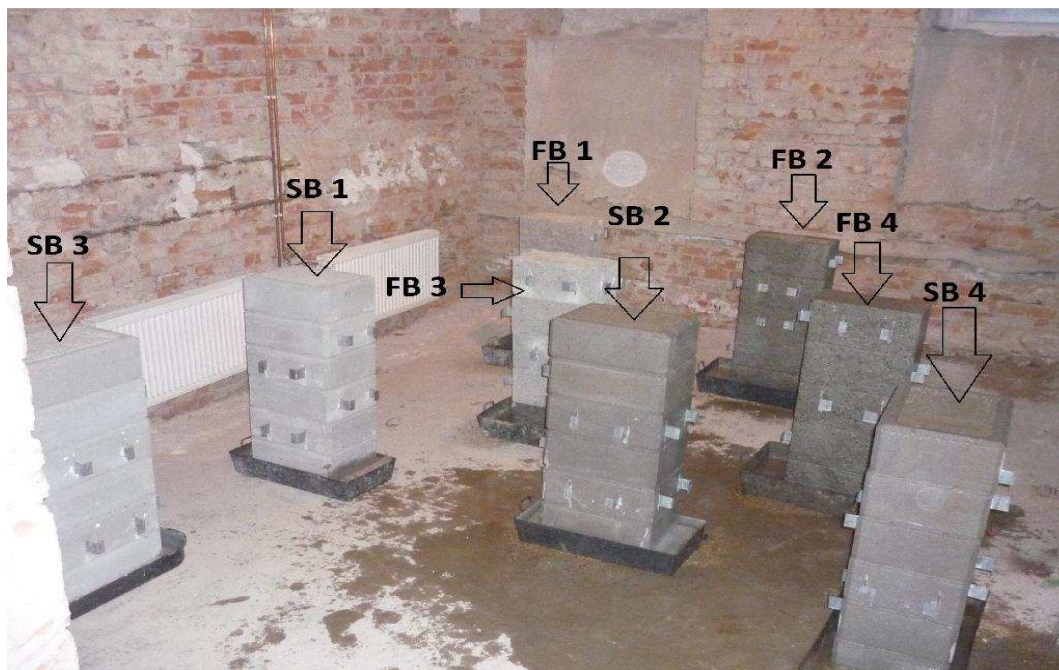
Obrázek 9.8: Vlhčení a vysoušení sloupků

V tabulkách 9.28 až 9.39 a grafech 18 až 29, můžeme vidět přetvoření jednotlivých sloupků vystavených z odlišných tvárníc a vyplněných odlišnou recepturou (Schéma 2). Výsledné naměřené hodnoty byly aproximovány, pro lepší znázornění. Naměřené výsledky poukazují na chování sloupků vystavených působením vlhkosti a vysychání. Je třeba podotknout, že níže prezentované výsledky, byly z časových i technických důvodů realizovány ručním měřením, pomocí metody můstku. Měření v jednom bodě probíhalo opakovaně čtyřikrát za sebou, pro snížení chyby měření. Výsledné hodnoty vzhledem k ručnímu měření, které zapříčinilo vnášení chyby, jsou „orientační“. Pro pochopení a vysvětlení chování systému tvarovka – výplňový beton ovšem plně postačí.

Jednotlivé zkratky v grafech a tabulkách, byly užity pro zpřehlednění jednotlivých výsledků a znamenají:

$\Delta$  odpovídá nejvyššímu rozdílu mezi naměřenými hodnoty přetvoření  $\epsilon$ . Prostředí  $p$  je přirozené prostředí měřicí místnosti o  $T = 20 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $v$  – období vlhčení sloupku,  $s$  – odpovídá období sušení tvarovky.

Na obrázku 9.9 můžeme vidět jednotlivé sloupky s popisem odpovídající značení v následujících tabulkách a grafech. Na obrázku 9.10, pak můžeme vidět číselné označení tvarovek ve sloupku, na kterých bylo měřeno jednotlivé přetvoření. Pro usnadnění popisu zdících prvků je v tomto textu, pro tvárnice typu Face Block užita zkratka FB, pro Simple Block SB.



Obrázek 9.9: Popis sloupků a jejich označení, užití při měření



Obrázek 9.10: Číselné značení tvarovek ve sloupku, užití při měření

Tabulka 9.28: Naměřené hodnoty pro sloupek 1, z tvárnic typu Face Block, čelní strana

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	8	0	10	0	5	0	15
p	2-1	-25	10	-20	8	-30	10	-18	10
p	2-2	-21	12	-24	10	-26	12	-19	12
p	5	-14	11	-5	15	-8	10	-12	18
p	6	-14	10	-10	8	-7	8	-5	13
p	7	-13	10	-9	9	-7	10	-4	10
p	8	-7	9	-15	15	-5	13	-2	14
p	9	-14	11	-14	12	-8	15	-5	13
p	12	-11	10	-13	14	-6	10	-6	8
p	13	-13	17	-22	13	-4	12	-2	15
p	14	-11	12	-16	12	-5	5	-4	6
p	15	-10	10	-14	13	-7	8	-4	6
p	16	-14	9	-15	14	-9	10	-5	17
p	19	-5	13	-17	9	-5	15	-6	10
p	20	-15	12	-14	6	-8	10	-2	12
p	21	-14	14	-10	15	-7	12	-1	6
p	22	-16	12	-16	17	-10	10	-3	12
p	23	-19	13	-17	12	-8	13	-5	7
p	26	-20	12	-14	13	-5	11	-4	5
p	27	-14	10	-5	14	-8	13	-3	9
p	28	-15	15	-15	5	-6	12	-2	11
p	29	-10	13	-14	12	-10	5	-4	14
p	32	-15	12	-7	6	-9	5	-7	10
p	33	-13	15	-17	11	-9	7	-1	6

Tabulka 9.29: Naměřené hodnoty pro sloupek 2, z tvárnic typu Face Block, čelní strana

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	5	0	10	0	2	0	8
p	2-1	-30	11	-35	15	-49	5	-25	6
p	2-2	-26	14	-23	12	-30	2	-23	4
p	5	-27	8	-20	14	-45	8	-20	9
s	6	49	4	30	20	2	10	10	2
p	7	20	10	25	21	-5	6	-8	10
p	8	25	12	28	12	-8	10	-6	9
v	9	60	5	68	14	20	11	5	3
v	12	55	3	50	6	28	2	8	9
v	13	60	5	69	14	25	15	10	7
s	14	30	15	17	18	9	16	-2	12
v	15	48	12	45	4	38	3	6	2
v	16	53	14	48	5	30	9	5	2
v	19	50	9	43	22	35	8	7	2
s	20	25	10	10	15	15	14	-2	3
s	21	20	15	8	18	12	2	-4	2
v	22	30	8	33	21	45	15	10	5
v	23	36	7	36	23	50	3	8	6
v	26	35	8	32	12	41	15	10	8
v	27	38	13	35	15	55	16	9	7
s	28	28	13	22	13	10	13	3	11
s	29	25	13	25	8	15	6	3	8
v	32	40	17	34	18	31	9	8	6
v	33	45	5	38	12	32	7	9	3

Tabulka 9.30: Naměřené hodnoty pro sloupek 3, z tvárnic typu Face Block, čelní strana

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	7	0	6	0	2	0	9
p	2	-51	9	-53	12	-45	5	-30	5
p	5	-28	10	-39	5	-35	5	-20	4
p	6	-22	2	-30	8	-30	5	-15	6
p	7	-16	6	-15	16	-25	7	-12	1
p	8	-14	3	-13	9	-22	6	-8	8
p	9	-15	10	-11	11	-16	4	-9	9
p	12	-15	4	-10	9	-8	5	-7	6
p	13	-12	4	-9	6	-7	9	-6	11
p	14	-14	3	-10	2	-4	10	-4	3
p	15	-16	9	-13	5	-8	7	-2	7
p	16	-13	4	-12	1	-10	6	-3	8
p	19	-10	11	-10	4	-5	8	-4	6
p	20	-12	12	-9	6	-8	4	-5	5
p	21	-10	3	-11	6	-9	10	-1	10
p	22	-15	9	-14	7	-7	10	-2	9
p	23	-14	10	-13	5	-6	12	1	5
p	26	-11	12	-12	4	-8	7	4	7
p	27	-14	5	-14	7	-10	2	-2	8
p	28	-10	6	-9	3	-11	13	2	3
p	29	-13	8	-10	5	-5	6	4	6
p	30	-14	6	-11	10	-8	7	0	5

Tabulka 9.31: Naměřené hodnoty pro sloupek 4, z tvárnic typu Face Block, čelní strana

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	8	0	9	0	9	0	9
p	2	-45	12	-30	14	-35	12	-20	12
p	5	-20	10	-29	12	-31	8	-11	16
p	6	-19	15	-17	15	-30	13	-8	11
p	7	-18	9	-16	7	-28	5	-8	10
s	8	-20	7	-13	9	-33	9	-12	2
p	9	-15	8	-15	8	-30	12	-11	6
p	12	-14	3	-14	6	-29	14	-8	9
v	13	4	2	-5	5	5	13	0	11
v	14	8	2	-2	5	3	5	2	13
v	15	6	4	-3	3	6	9	4	14
s	16	-1	11	-6	2	-1	6	-9	8
v	19	10	13	0	3	3	8	1	19
v	20	9	5	2	4	1	7	2	1
v	21	9	6	1	4	4	8	3	2
s	22	5	8	-4	1	-4	9	-1	8
s	23	6	4	-3	9	-2	6	-6	9
v	26	12	5	2	11	5	4	4	2
v	27	13	9	5	10	5	2	6	9
v	28	10	7	4	9	6	8	4	8
v	29	11	7	4	9	4	3	7	7
s	30	6	9	1	8	-2	11	5	6

Tabulka 9.32: Naměřené hodnoty pro sloupek 1, z tvárnic typu Simple Block, čelní část

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	4	0	12	0	9	0	3
p	2	75	10	77	2	70	2	50	11
p	3	70	11	78	9	60	5	49	2
p	4	65	5	70	5	48	14	49	5
p	5	63	8	69	7	50	16	45	6
p	8	60	9	68	11	46	18	40	8
p	9	59	7	69	4	52	12	38	11
p	10	58	14	60	6	57	6	39	10
p	11	59	6	65	9	56	9	39	11
p	12	57	9	59	13	54	11	42	1
p	13	55	10	63	16	53	8	44	9
p	16	59	6	67	18	57	9	40	8
p	17	57	4	68	2	60	11	38	18
p	18	54	2	65	3	55	2	39	14
p	19	56	8	68	8	56	9	45	2
p	20	58	7	69	9	59	14	41	8
p	23	57	11	64	7	58	12	45	9
p	24	53	5	66	11	50	6	44	17
p	25	57	12	65	13	53	15	40	9

Tabulka 9.33: Naměřené hodnoty pro sloupek 1, z tvárnic typu Simple Block, boční část

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	11	0	9	0	9	0	9
p	2	30	13	36	5	40	7	28	8
p	3	25	9	32	3	35	8	28	11
p	4	24	4	32	7	30	10	25	15
p	5	22	8	30	12	33	11	24	17
p	8	20	9	28	16	30	8	24	9
p	9	23	6	27	8	31	6	20	5
p	10	24	14	29	6	30	4	19	3
p	11	22	17	24	7	29	9	19	2
p	12	29	5	23	10	30	7	18	7
p	13	25	9	25	11	32	3	17	8
p	16	22	8	27	9	28	11	20	6
p	17	24	7	23	5	32	12	21	6
p	18	23	6	25	4	34	5	20	3
p	19	20	6	21	9	30	14	19	4
p	20	19	8	22	10	28	13	18	12
p	23	18	10	24	14	30	2	21	7
p	24	22	11	20	8	32	8	20	8
p	25	19	12	20	7	30	9	17	7



Tabulka 9.34: Naměřené hodnoty pro sloupek 2, z tvárnic typu Simple Block, čelní část

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	11	0	14	0	11	0	11
p	2	71	13	50	18	65	15	55	13
p	3	65	18	51	16	58	19	48	12
p	4	61	20	44	13	57	16	40	5
v	5	70	19	53	14	69	13	45	8
v	8	72	16	55	8	67	8	50	9
s	9	58	9	43	19	48	2	47	11
v	10	69	14	49	17	67	19	53	10
v	11	72	13	53	8	69	13	50	13
v	12	74	9	52	19	67	11	44	17
s	13	60	10	47	13	60	10	40	9
s	16	61	9	45	15	63	14	39	6
v	17	75	8	59	6	68	8	44	8
v	18	76	10	60	7	68	9	45	9
v	19	77	17	58	11	65	7	40	2
v	20	76	8	57	10	67	3	43	5
s	23	70	9	50	14	60	6	38	7
s	24	72	7	50	9	59	4	39	7
v	25	76	11	55	7	67	10	41	8

Tabulka 9.35: Naměřené hodnoty pro sloupek 2, z tvárnic typu Simple Block, boční část

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	8	0	4	0	10	0	9
p	2	20	10	10	3	34	12	19	7
p	3	21	11	12	8	35	14	20	8
p	4	19	8	11	11	36	12	21	8
v	5	25	9	20	9	40	9	29	5
v	8	29	5	19	7	43	14	30	11
s	9	23	6	15	10	33	12	20	5
v	10	30	5	21	14	40	13	29	10
v	11	32	7	22	13	39	11	28	5
v	12	31	6	20	11	42	8	27	8
s	13	25	3	16	10	33	9	22	9
s	16	22	4	14	8	35	11	20	13
v	17	30	9	23	7	41	10	29	17
v	18	33	10	25	6	43	8	27	12
v	19	34	8	26	4	44	7	28	10
v	20	32	9	26	5	40	6	30	13
s	23	28	7	20	8	35	11	25	2
s	24	25	7	22	8	33	10	23	6
v	25	31	5	24	9	39	15	28	4

Tabulka 9.36: Naměřené hodnoty pro sloupek 3, z tvárnic typu Simple Block, čelní část

Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	10	0	7	0	9	0	11
p	4	11	14	20	15	33	11	30	5
p	5	13	9	17	16	34	4	35	16
p	6	12	8	19	13	29	7	29	13
p	7	14	9	15	14	30	9	31	8
p	8	10	6	16	2	28	10	36	9
p	11	9	11	19	2	25	13	30	10
p	12	11	15	20	17	27	7	33	8
p	13	13	10	21	4	26	14	29	7
p	14	10	8	28	9	30	17	28	5
p	15	9	5	19	8	25	5	34	3
p	18	8	4	20	7	28	8	30	7
p	19	10	4	21	11	24	10	33	9
p	20	11	7	18	7	29	11	31	10
p	21	10	8	19	6	31	13	30	14

Tabulka 9.37 Naměřené hodnoty pro sloupek 3, z tvárnic typu Simple Block, boční část

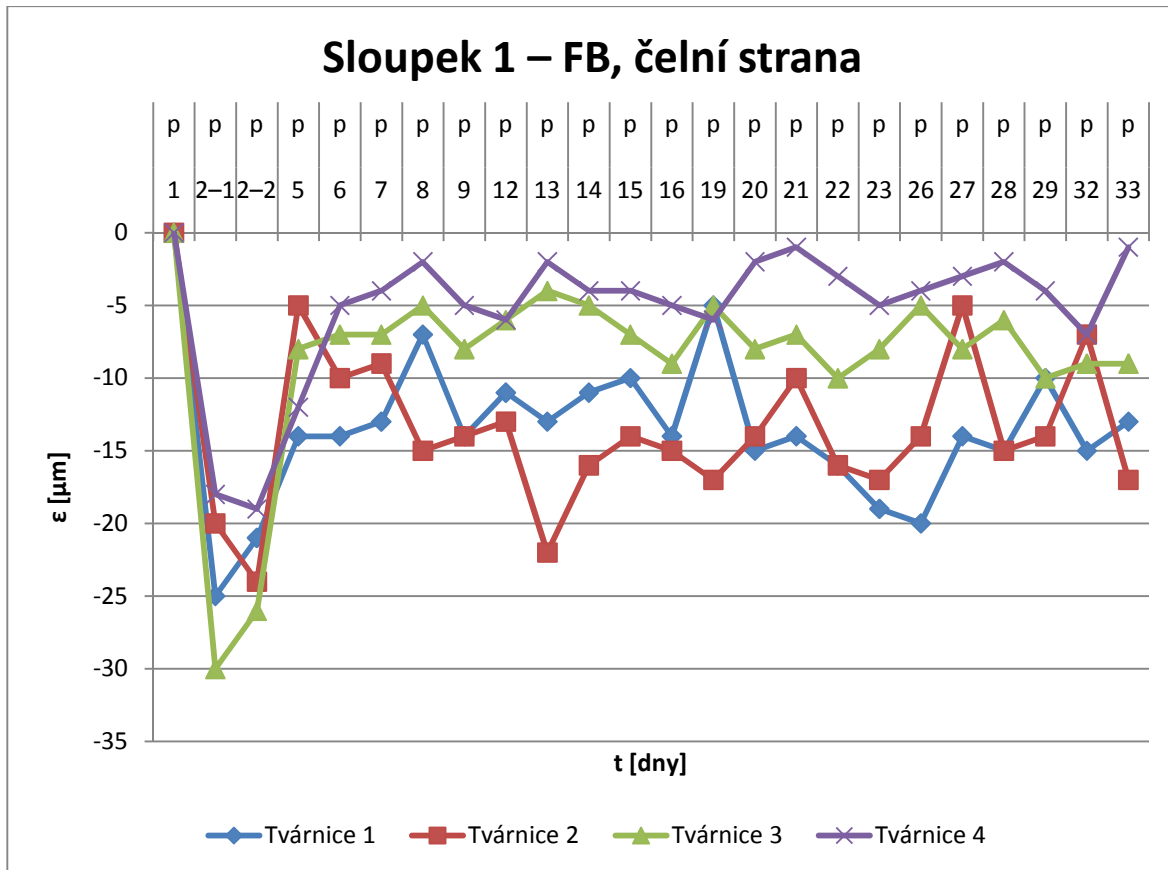
Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	16	0	5	0	2	0	9
p	4	25	9	14	12	29	14	31	11
p	5	25	5	10	14	25	7	33	8
p	6	23	3	9	18	19	9	26	9
p	7	20	7	11	10	22	3	29	7
p	8	18	9	13	6	24	5	28	11
p	11	19	12	13	14	20	8	30	13
p	12	19	5	8	15	23	11	26	1
p	13	20	8	10	6	18	2	24	17
p	14	22	10	12	7	22	16	23	15
p	15	18	13	10	9	21	9	24	16
p	18	20	14	9	8	23	5	26	9
p	19	23	14	10	8	20	7	28	14
p	20	19	2	11	5	19	4	25	5
p	21	21	7	12	3	22	4	24	9

Tabulka 9.38: Naměřené hodnoty pro sloupek 4, z tvárnic typu Simple Block, čelní část

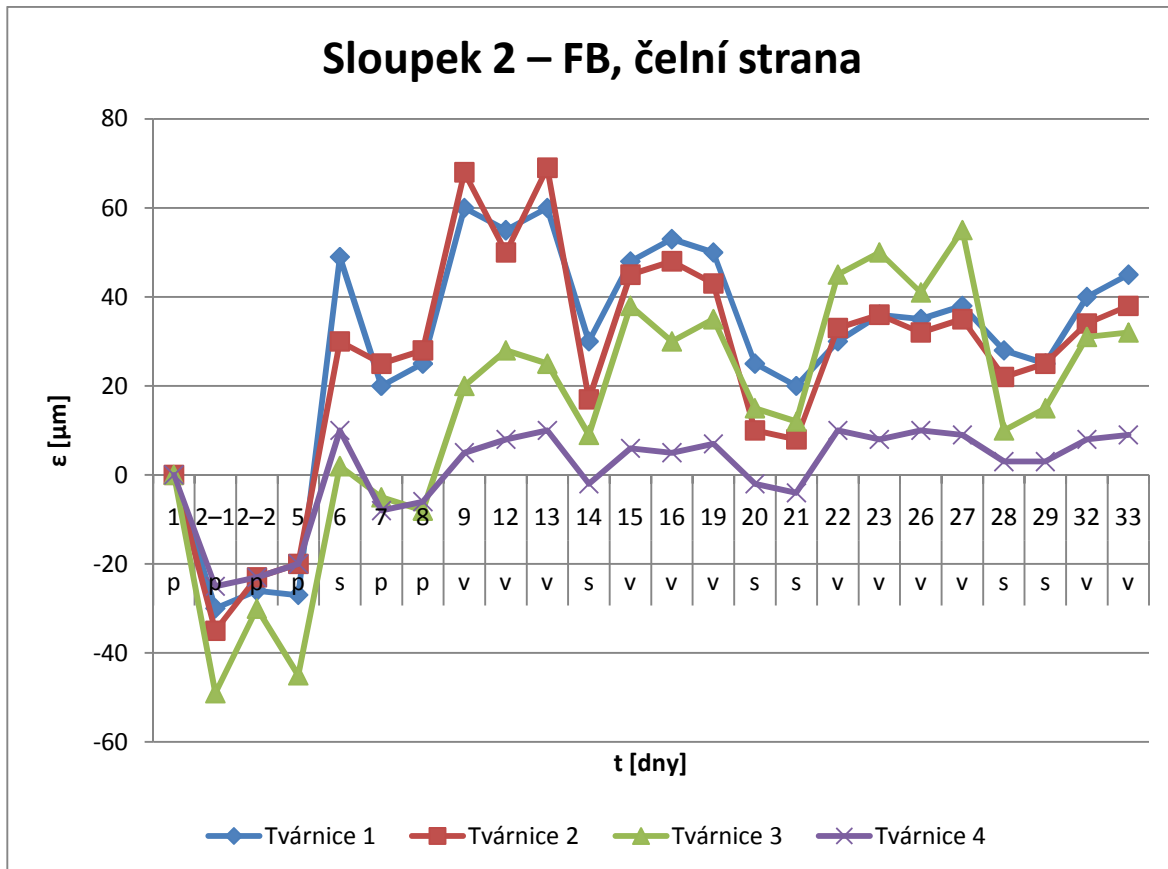
Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	5	0	14	0	7	0	3
p	4	44	11	43	3	59	4	28	15
p	5	45	8	40	4	54	9	24	7
p	6	40	9	38	6	57	15	20	9
v	7	49	13	53	2	69	4	31	10
v	8	51	3	55	2	68	7	33	12
s	11	35	17	37	11	59	12	16	7
v	12	44	5	47	18	67	9	28	5
v	13	46	19	45	4	65	13	30	14
v	14	47	6	43	9	66	8	33	15
v	15	43	8	46	15	65	14	29	14
s	18	30	11	28	13	58	12	17	1
s	19	29	10	26	4	57	11	15	8
v	20	38	4	34	17	60	10	29	7
v	21	37	3	36	7	61	7	30	10
v	22	36	11	39	9	58	9	28	4

Tabulka 9.39: Naměřené hodnoty pro sloupek 4, z tvárnic typu Simple Block, boční část

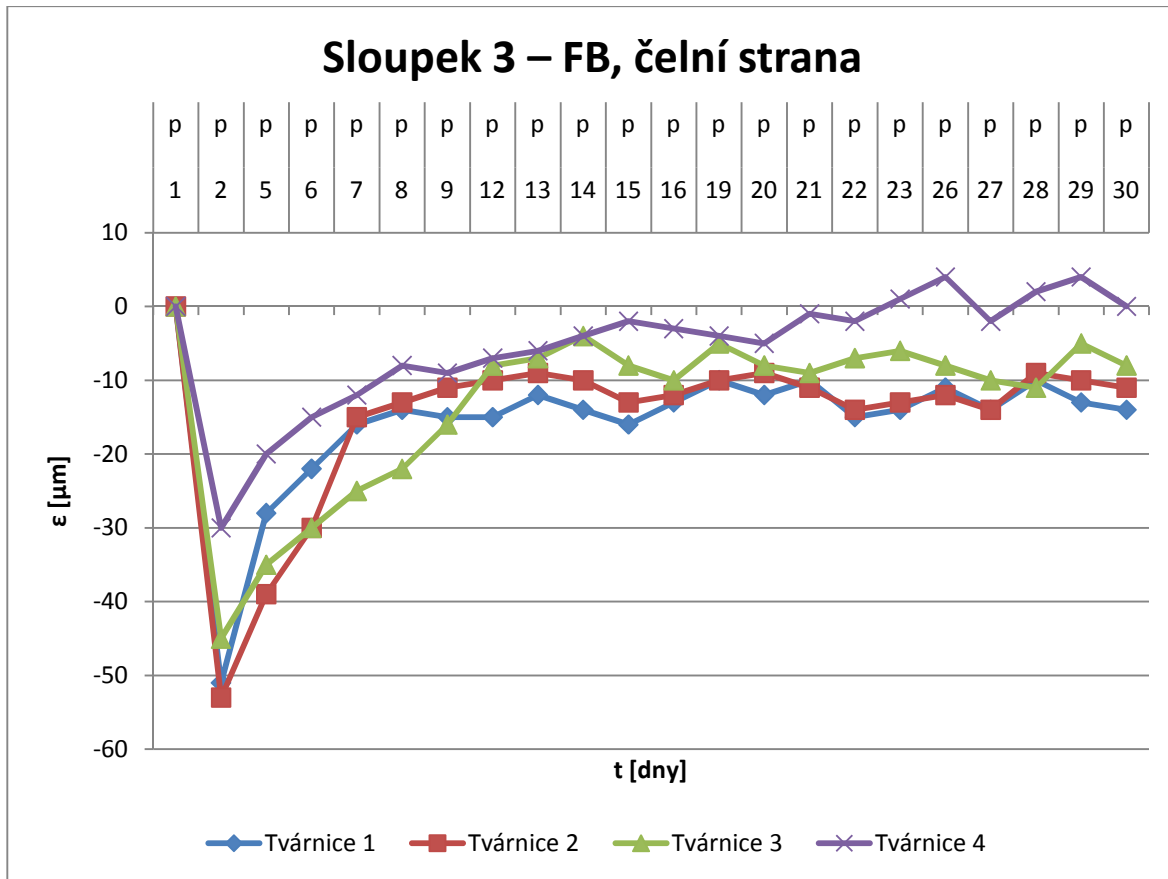
Prostředí	Čas [dny]	Tvárnice 1	Δ	Tvárnice 2	Δ	Tvárnice 3	Δ	Tvárnice 4	Δ
		ε [μm]							
p	1	0	11	0	4	0	6	0	5
p	4	15	10	34	7	19	7	35	48
p	5	16	4	30	9	17	8	36	8
p	6	13	7	31	11	15	11	33	14
v	7	25	9	39	12	29	4	40	7
v	8	22	5	44	5	30	10	41	10
s	11	9	8	28	13	13	4	32	11
v	12	19	10	39	19	27	9	44	9
v	13	20	13	40	5	29	6	42	4
v	14	21	15	44	8	30	8	45	15
v	15	23	19	41	10	30	2	46	9
s	18	10	5	29	11	11	7	38	7
s	19	8	3	25	4	9	3	30	8
v	20	19	10	33	3	19	5	35	5
v	21	20	9	39	12	18	8	36	6
v	22	23	7	35	7	23	11	38	2



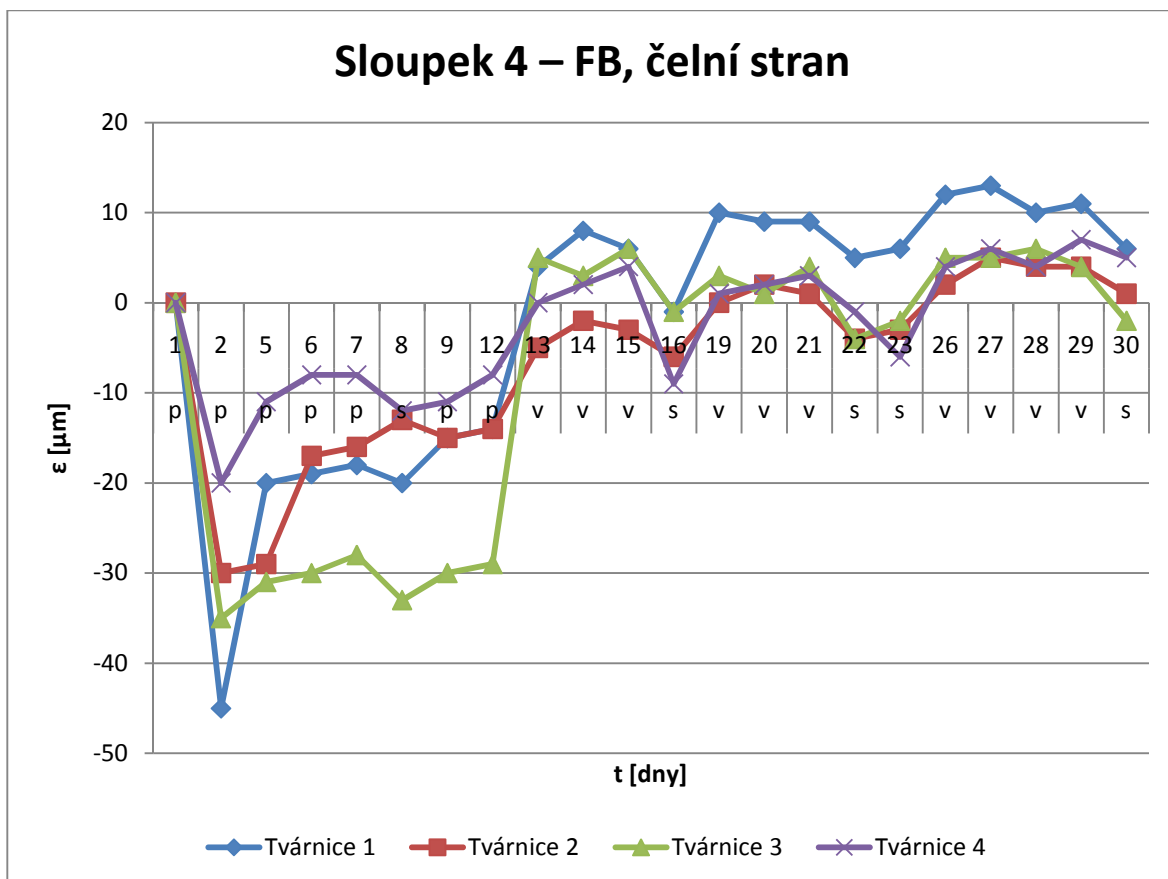
Graf 18: Přetvoření sloupku 1, bez působení vlhkosti



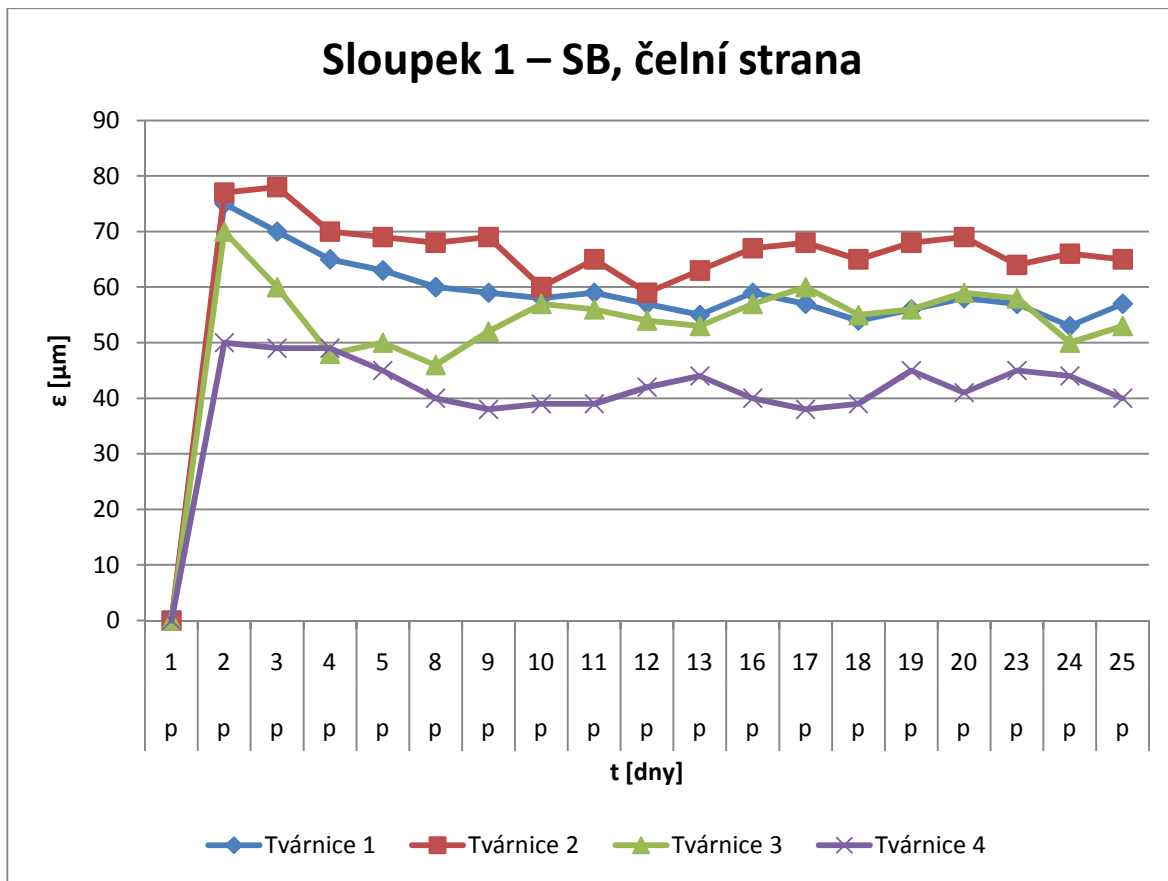
Graf 19: Přetvoření sloupku 2, působením vlhkosti



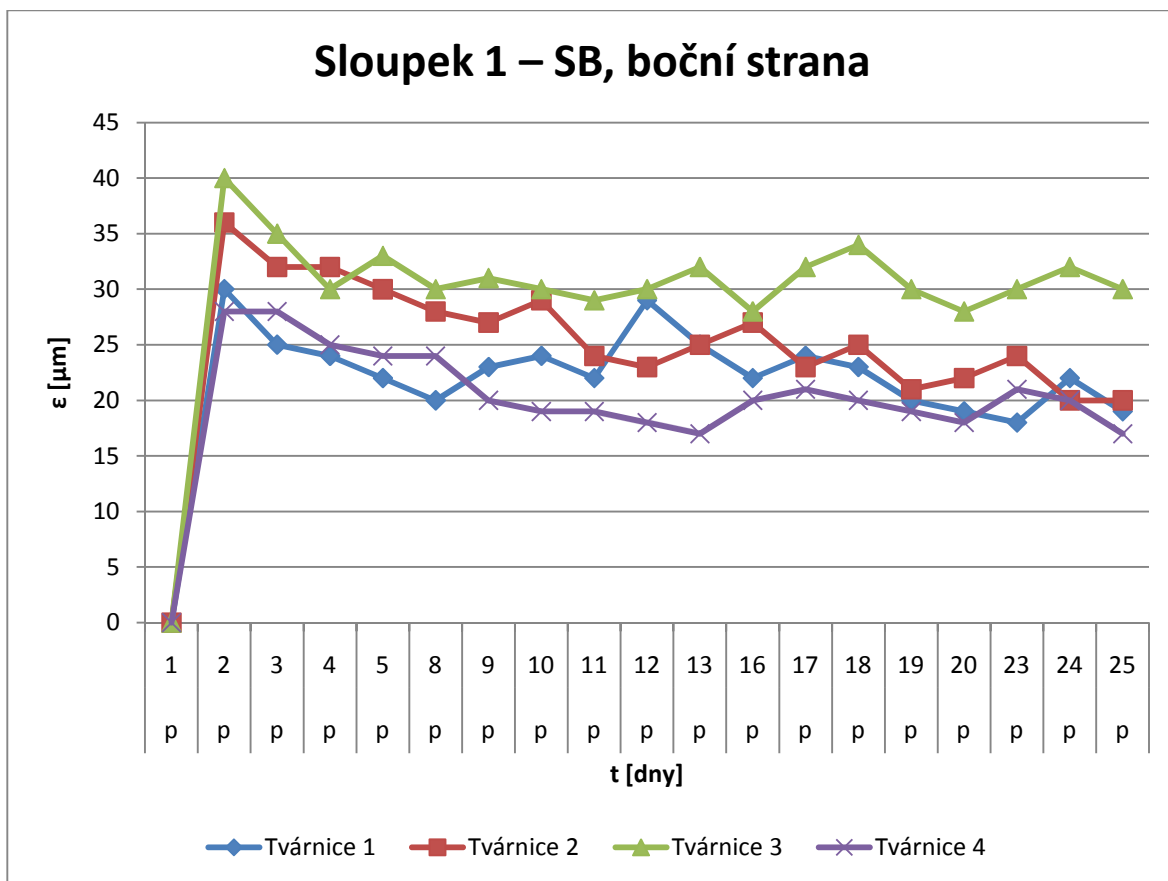
Graf 20: Přetvoření sloupku 3, bez působení vlhkosti



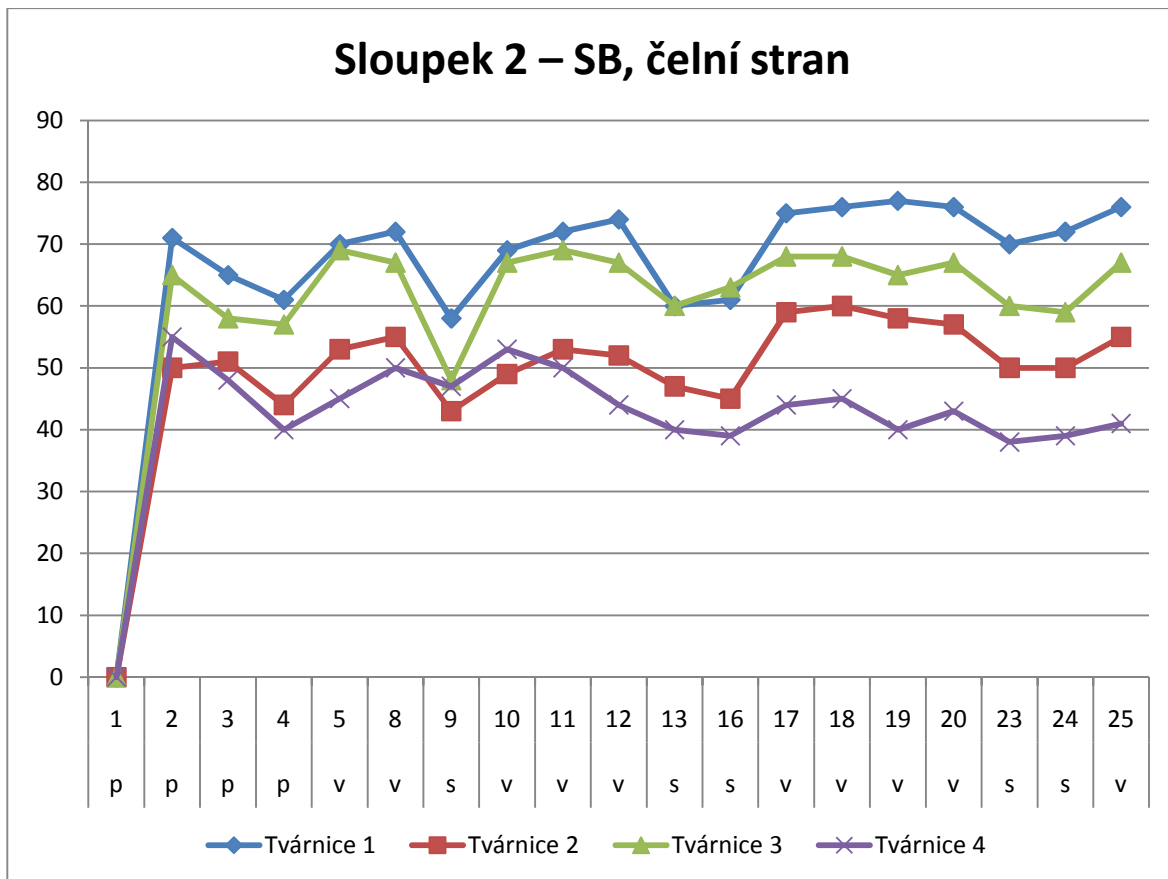
Graf 21: Přetvoření sloupku 4, působením vlhkosti



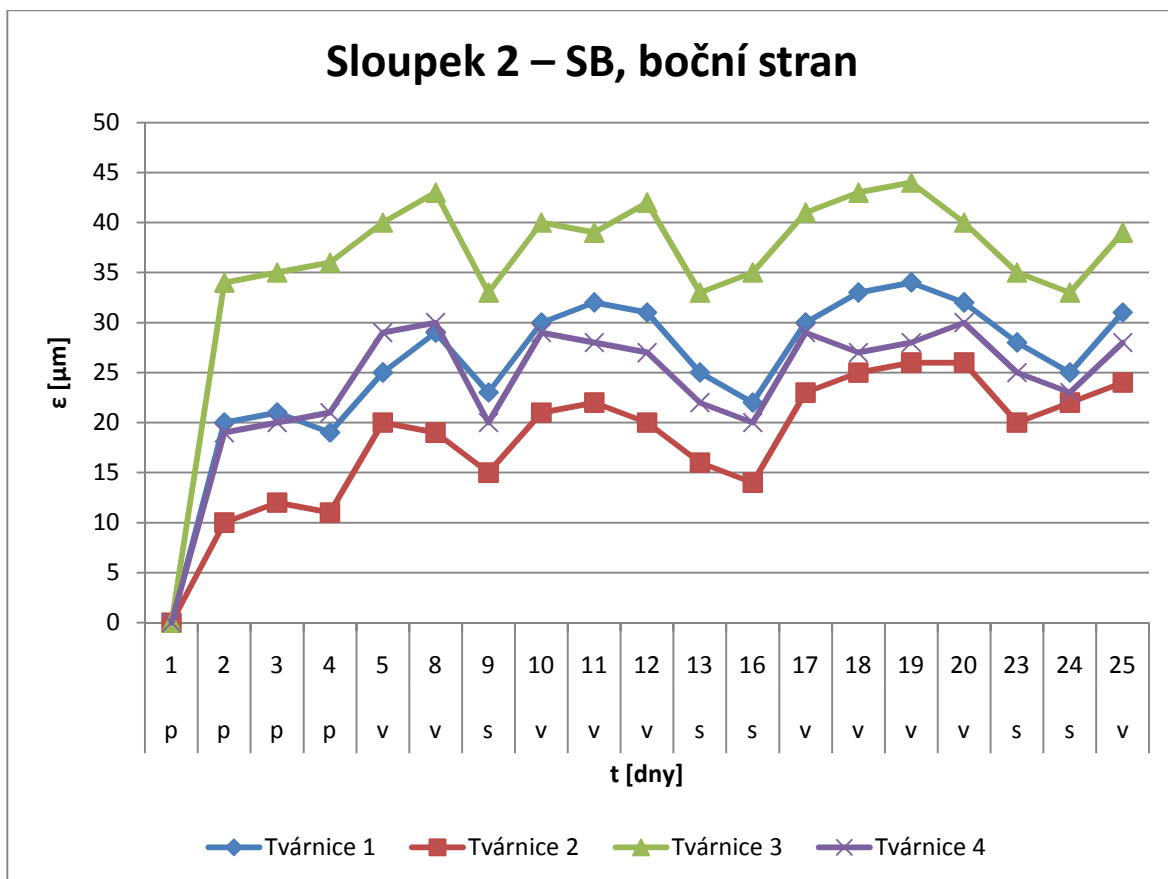
Graf 22: Přetvoření čelní strany sloupku 1, bez působení vlhkosti



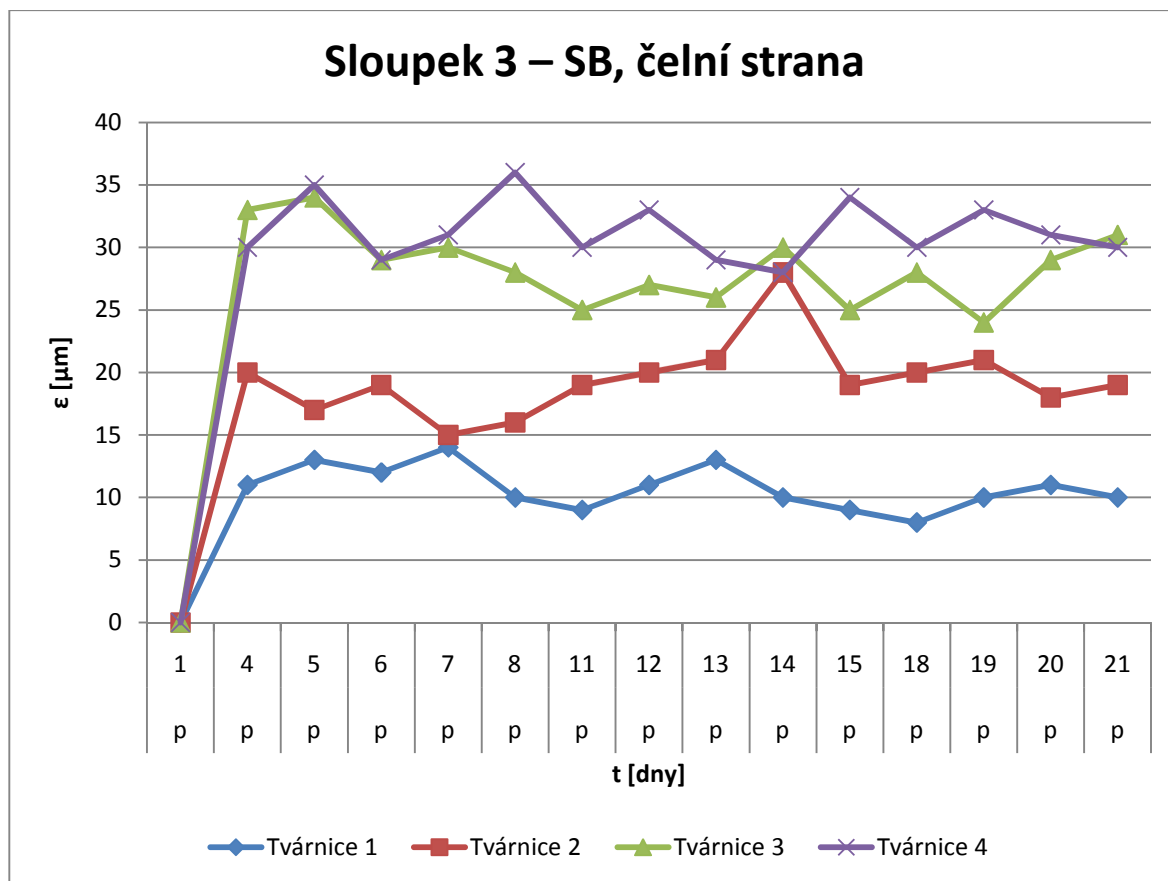
Graf 23: Přetvoření boční strany sloupku 1, bez působení vlhkosti



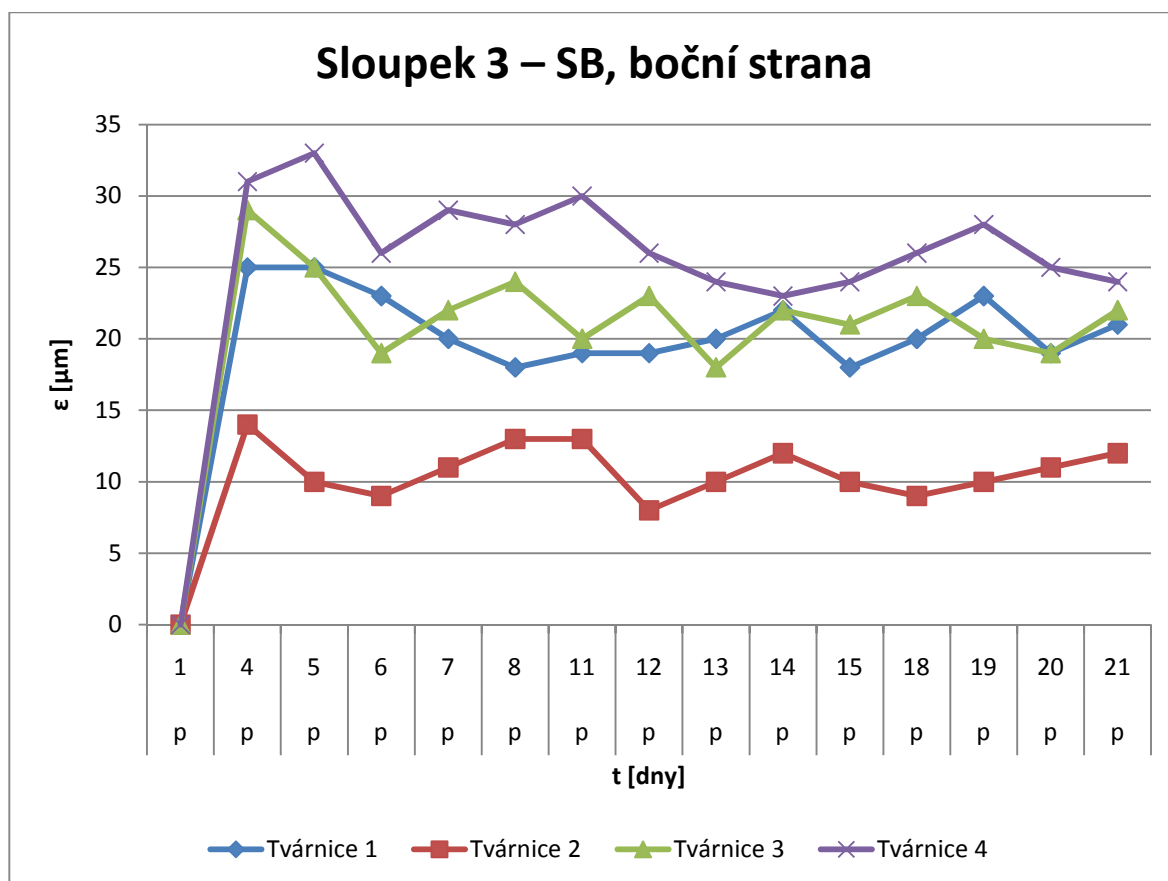
Graf 24: Přetvoření čelní strany sloupku 2, působením vlhkosti



Graf 25: Přetvoření boční strany sloupku 2, působením vlhkosti

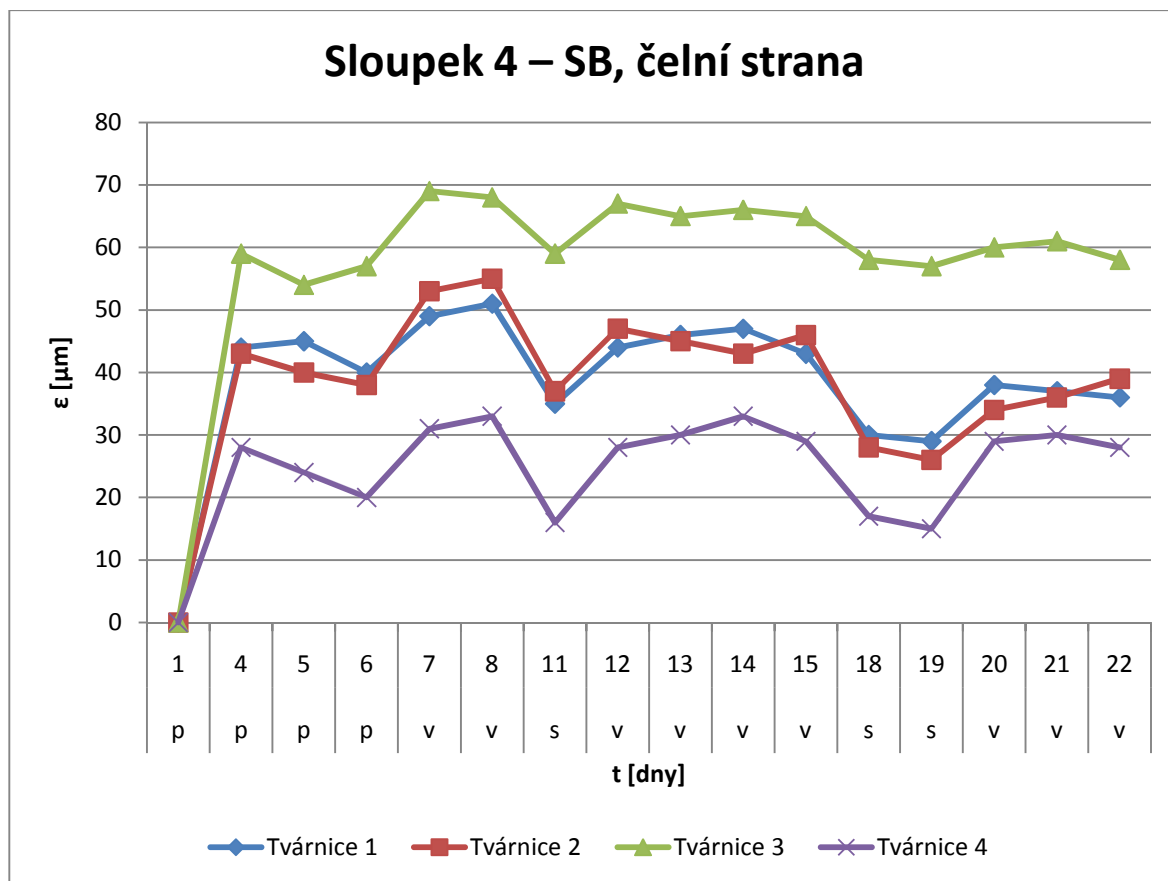


Graf 26: Přetvoření čelní strany sloupku 3, bez působení vlhkosti

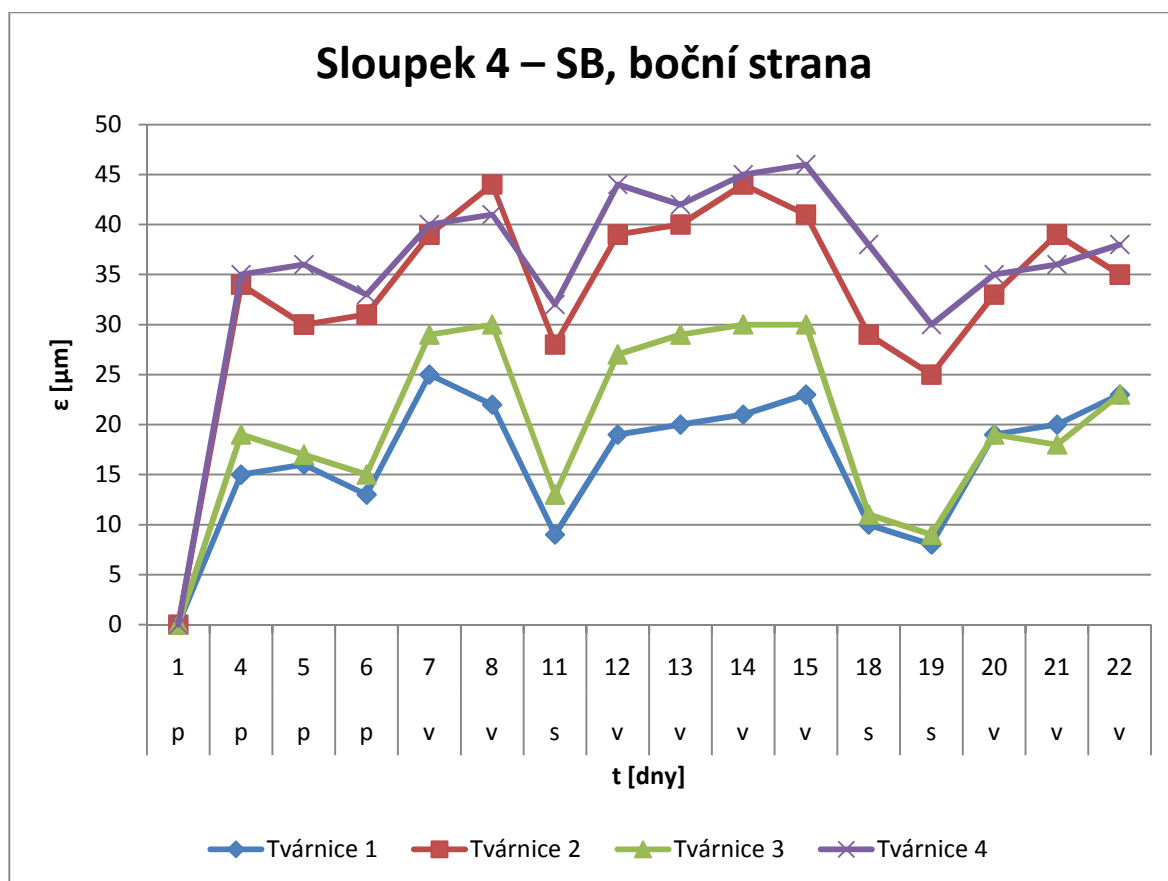


Graf 27: Přetvoření boční strany sloupku 3, bez působení vlhkosti



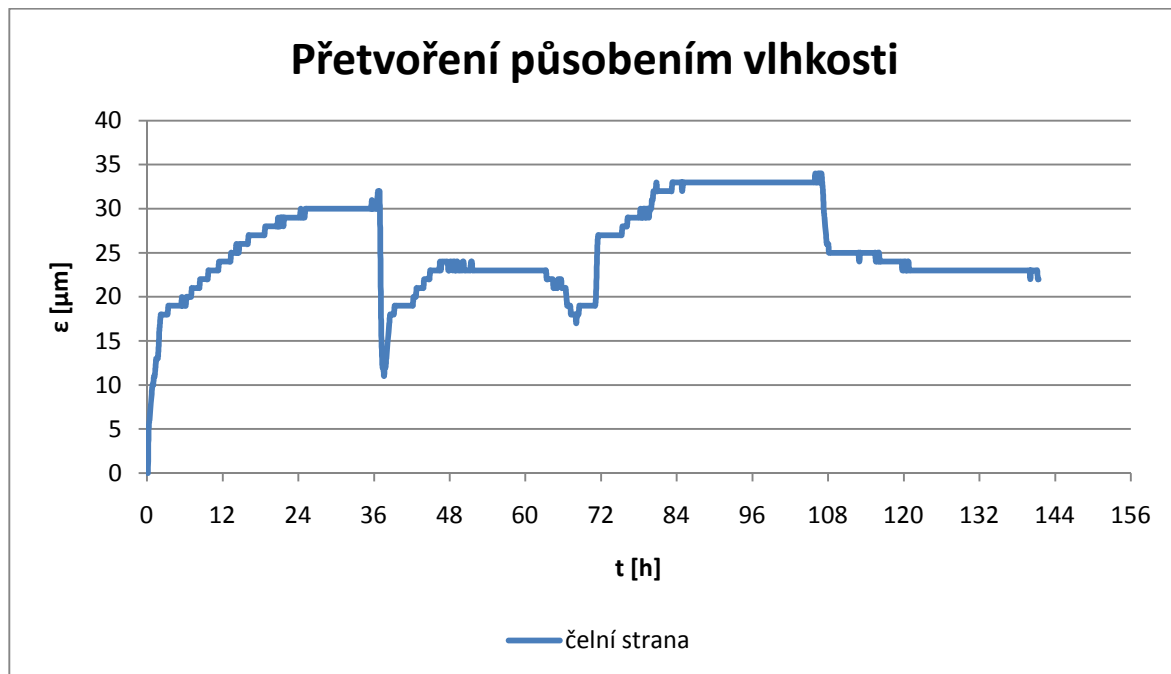


Graf 28: Přetvoření čelní strany sloupku 4, působením vlhkosti



Graf 29: Přetvoření boční strany sloupku 4, působením vlhkosti

Pro získání relevantních poznatků o chování sloupku vystavených působení rozdílných vlhkostí byla použita metoda můstků s automatickým záznamem hodnot. V grafu 30, můžeme vidět přetvoření tvarovky ve sloupku působením střídavého zvlhčování a vysychání. V tomto případě byla tvarovka ve sloupku osazena můstky a výsledné hodnoty přetvoření v čase byly zaznamenány do počítače (Obrázek 9.8).



Graf 30: Vliv působení vlhčení a vysychání tvarovky ve sloupku 2, při automatickém měření



Obrázek 9.11: Osazení sloupků měřicí soustavou

Z grafu 30 je patrné přetvoření  $\epsilon$  působením vlhkosti a následného vysušení. Průměrné přetvoření vyvolané vlhčením a sušením na čelní straně tvarovky  $\epsilon_{\text{prům, vv, č}} = 15 \mu\text{m}$ .

### 9.3.3 Vyhodnocení

Pro usnadnění popisu zdících prvků je v tomto textu pro tvárnice typu Face Block užitá zkratka FB, pro Simple Block SB. Průměrné přetvoření tvarovky typu FB, při působení zmrazování a rozmrazování po 25 cyklech bylo u čelní strany  $\varepsilon_{\text{prům,zč}} = -19 \mu\text{m}$ . Na boční straně dosáhlo přetvoření  $\varepsilon_{\text{prům,zb}} = -70 \mu\text{m}$ . Přetvoření měřené automaticky, které bylo vyvolané působením rozdílných vlhkostí (vlhčení a sušení) bylo na čelní straně tvárnice  $\varepsilon_{\text{prům,vv,č}} = 15 \mu\text{m}$ .

Výsledky ručního měření poukazují na rozdílné chování jednotlivých sloupku v závislosti na použitém typu tvárnice. Výsledné naměřené hodnoty byly aproximovány, pro lepší znázornění. Naměřené výsledky poukazují na chování sloupků vystavených působením vlhkosti a vysychání. Je třeba podotknout, že výše prezentované výsledky, byly z časových i technických důvodů realizovány ručním měřením, pomocí metody můstku. Měření v jednom bodě probíhalo opakovaně čtyřikrát za sebou, pro snížení chyby měření. Výsledné hodnoty vzhledem k ručnímu měření, které zapříčinilo vnášení chyby, jsou „orientační“. Pro pochopení a vysvětlení chování systému tvarovka – výplňový beton ovšem plně postačí. V případě sloupků vyrobených z tvárnic typu FB jsou publikovány pouze hodnoty naměřené na čelní straně. Hodnoty naměřené na boční straně nejsou publikovatelné, z důvodů velmi nízkých hodnot a vysokému zkreslení i po aproximaci. V obou případech sloupkových konstrukcí je však v grafech dobře viditelný vliv vlhkosti a sušení na přetvoření tvarovky.

V případě sloupků vyrobených z tvarovek typu FB lze vidět prvotní „smrštění“ sloupku. Tento jev může být vysvětlen následovně. Při výstavbě sloupku a prvních dnech zrání docházelo u sloupků k nárůstu objemu. Což přisuzujeme vývinu hydratačního tepla výplňového betonu, jeho dotvarování a interakcí s tvarovkou. První, tedy nulté měření, nabývá nejvyšší hodnoty, proto ostatní hodnoty přetvoření se zdají jako smrštění, což ale není pravda. Zde totiž dochází k vyrovnání předešlého přetvoření a sloupek se vlivem „expanze“ výplňového betonu vrací do původní polohy.

Při měření sloupků vystavených z tvárnic typu SB dochází k opačnému jevu jako u sloupků vystavených z tvarovek FB. Naměřené hodnoty poukazují na nárůst přetvoření v počátku. Tento jev přisuzujeme spolupůsobení systému tvarovka – výplňový beton, kdy dochází vlivem vývinu hydratačního tepla k expanzi betonu. V tomto případě může mít vliv na výsledné počáteční přetvoření, také množství výplňového betonu, kde vnitřní objem tvarovky SB je 1,8 krát větší (Obrázek 7.1 a 7.2), než vnitřní objem tvarovky typu FB. V dalším průběhu pak dochází k ustálení přetvoření.

V grafech 9.28 až 9.39, můžeme vidět vliv vlhkosti a složení výplňového betonu na velikost přetvoření. Je třeba znovu podotknout, že toto měření má orientační smysl. Naměřené velikosti přetvoření mají vlivem aproximace a chybovosti měření demonstrativní charakter. U sloupků vystavených z tvárnic FB je rozdílné přetvoření. Kde při klasickém zrání sloupků 1 a 2 nedochází k významným změnám, což platí i pro sloupky vyrobené z tvárnic SB. U vlhčených sloupků ovšem hraje významnou roli složení výplňového betonu. Sloupek 1 vyrobený z tvárnic FB a vyplněný směsí 1 (Tabulka 9.17),

podléhá vyšší objemovým změnám než sloupek 2 ze stejných tvárnic. U sloupků vyrobených z tvárnic typu SB dochází zpravidla k vyššímu přetvoření u čelní části, než u boční části. Sloupek 1 vyplněný směsí 1 podléhá vyšší deformaci než sloupek 2 vyplněný směsí 2. Obecně sloupky z tvárnic SB podléhají vyššímu přetvoření vyvolanému vlivem změn vlhkosti, než sloupky z tvárnic FB.

Při měření přetvoření vlivem vlhkosti dochází k dvěma fázím, provlhčení a následnému vysušení sloupků. Zde je třeba zmínit, že vlhčení bylo prováděno v intervalech cca 12 hod. po potřebnou dobu. Během první fáze, tedy fáze vlhčení je z grafů 9.28 až 9.39 patrný nárůst objemu, což není nikterak neobvyklé. Tento jev přisuzujeme hygroskopické expanzi. Druhou fázi sušení si můžeme rozdělit do dvou částí. V první části při vysoušení, při dostatečném prosycení vodou, nemusí docházet ke změně objemu, což můžeme vidět například v grafu 30, kde došlo ke střídání procesu vlhčení a sušení v intervalu 24 hodin. Tento jev přisuzujeme odpařování vlhkosti z kapilárního systému, které má za následek v této části zvýšení kapilárního tlaku. Tento jev se může také projevit zvýšením objemu v prvním stádiu zrání betonu, kdy je ještě dostatečně vlhký (Graf 19). V další části se již projevuje vysoušení a následné snížení objemu, v našem případě délkového přetvoření.

Z výsledků je také patrný vliv uložení jednotlivé tvarovky ve sloučku a strana, která je ohřívána viz obrázek 9.10. Pokud tvarovka je uložena nejvýše tvarovka 1, je vysychání nejvyšší. S uložení tvarovky níže a níže (poloha 1 – 2 – 3 – 4) dochází k poklesu objemových změn a pozdějšímu projevu přetvoření. Ne vždy, se ale poloha tvarovky ve sloučku projevuje jako zásadní. Velký vliv má i zmíněná strana, která je ohřívána a na které je přetvoření měřeno. Na velikost přetvoření může mít také vliv, jak samotné zatížení po výšce sloučku, tak uložení samotné tvárnice v blízkosti výskytu vody (ocelové vany s vodou simulující zemní vlhkost). Do této vany je sice vložena tvárnice tvořící jakési rozhraní mezi vodní hladinou a poslední (čtvrtou) tvárnici. Nelze zde ale opomenout jev kapilární elevace, kdy vlivem kapilárního systému tvořeného propojenými póry, které vznikly při vyplnění tvarovky betonem. V tomto případě dochází k jímání vlhkosti z „dělicí“ tvarovky do poslední tvarovky (čtvrté), a vyrovnání vlhkosti.

## 9.4 Matematická simulace přetvoření

Tato závěrečná část je založena na statickém a dynamickém výpočtu provedeném na tvárnici typu Face Block. Cílem výpočtu je posouzení možných příčin vzniku trhlin ve sloupcích oplocení, které jsou zhotoveny z tvarovek z vibrolisovaného betonu. Tento výpočet má za úkol ověřit, jestli existuje potenciál pro vznik trhlin ve zdících tvarovkách za podmínek, kdy je vyloučena objemová expanze výplňového betonu v důsledku působení mrazu, tzn. při kladných teplotách vnějšího vzduchu. Matematická simulace vychází z námi získaných podkladů.

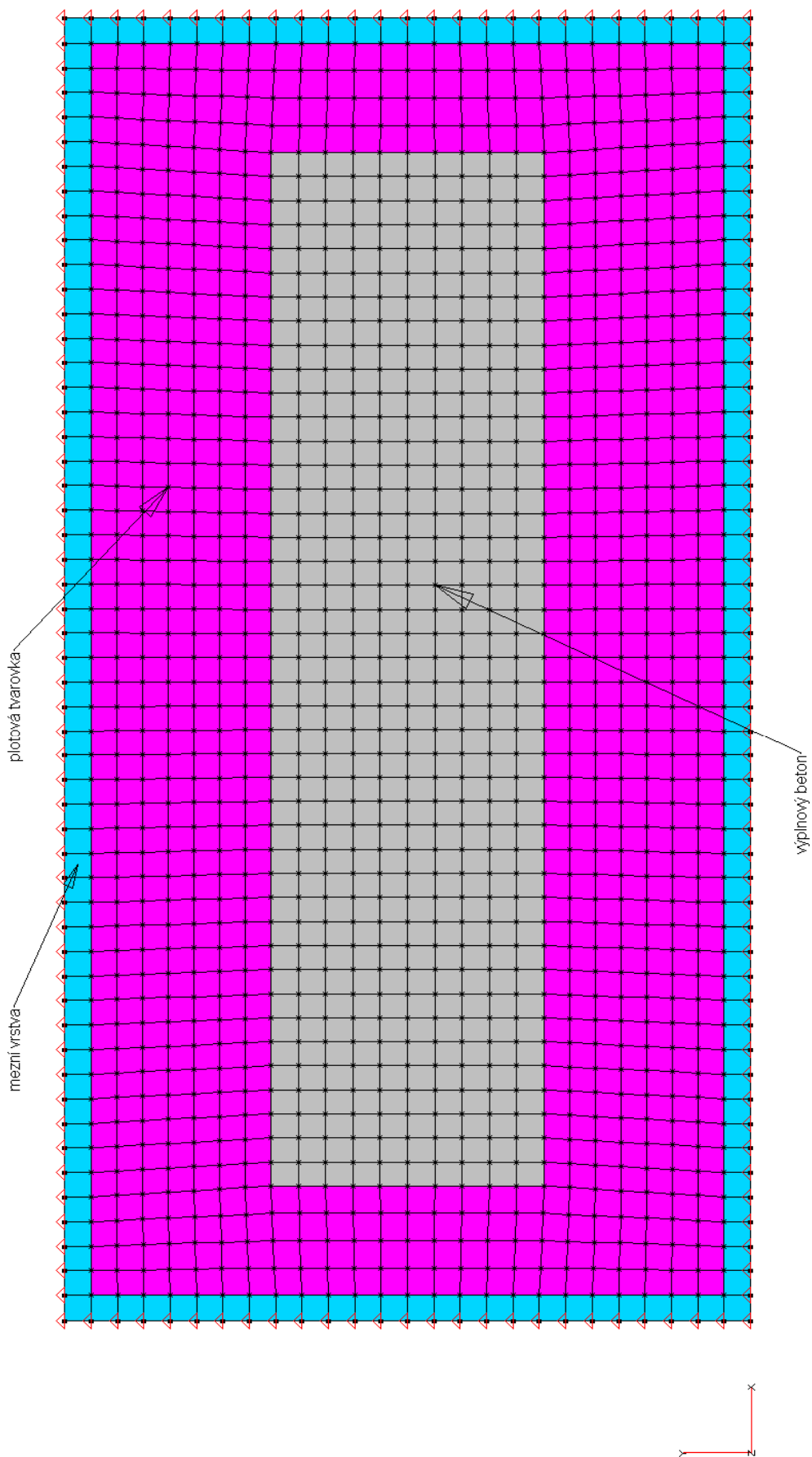
Problém pro analýzu programem STARDYNE byl řešen jako rovinná úloha MKP, tzn. mechanický problém za předpokladu rovinné napjatosti (vliv vertikálního napětí  $\sigma_z$ , lze zanedbat) a problém vedení tepla ve 2D. Problém je dvouose symetrický, avšak pro názornost a z důvodu zjednodušení okrajových podmínek problému vedení tepla byla modelována celá tvarovka o vnějším rozměru 390×190 mm – výpočtový model je znázorněn na obrázku 9.12. Byla uvažována tvarovka bez vnitřního ztužujícího žebra. Střední rozměr sítě MKP je 7 až 8 mm. [32]

Mezní vrstva je modelována pouze z důvodu řešení problému vedení tepla – tepelný odpor vrstvy je roven odporu při přestupu tepla  $R_{se} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$  (viz Tab. J.1 v ČSN 73 0540).

Okrajové podmínky jsou specifikovány předepsaným časovým průběhem teploty na vnějších uzlech mezní vrstvy při řešení problému nestacionárního vedení tepla a podmínkami nulového posuvu při řešení napjatosti.

Tabulka 9.40: Mechanické a tepelně technické vlastnosti materiálu – předpoklad pro matematickou simulaci

Část konstrukce	Materiál	Modul pružnosti E [GPa]	Poissonův součinitel $\nu$	Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [ $\text{K}^{-1}$ ]	Objemová hmotnost $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	Měrné teplo $c$ [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
plotová tvarovka	beton C16/20	29.0	0.19	1.0e-5	2300	1020	1.3
výplňový beton	beton C12/15	27.0	0.19	1.0e-5	2250	1020	1.36
mezní vrstva	vzduch	~ 0.0	0.19	0.0	1.25	1010	0.06154



Obrázek 9.12: Výpočtový model příčného řezu sloupkem oplocení, převzato z [32]

### 9.4.1 Uvažované situace

Uvažované simulace vycházejí z předpokládaných podmínek, které mohou v určitých běžných situacích působit ve skutečné konstrukci a které by mohly vést ke vzniku tahových napětí v betonu tvarovek sloupku. Při stanovení potenciálních příčin se vycházelo z analýz, které byly provedeny v předešlých etapách řešení. Předpokládaná spodní mez pevnosti betonu tvarovek v prostém tahu je 1.3 MPa (hodnota  $f_{ct,0.05}$  v Tab. 3.1 v ČSN EN 1992-1-1 pro beton třídy C16/20). Pokud je tedy dosaženo napětí v hlavním tahu rovném mezi pevnosti v tahu, lze předpokládat inicializaci tahové trhliny.

Ke vzniku tahových napětí v tvarovkách a k jejich případnému porušení může dojít v důsledku jednoho ze dvou níže uvedených vlivů, anebo jejich kombinovaným účinkem:

- Expanze výplňového betonu uvnitř tvarovky, ke kterému může dojít např. vlivem vývinu hydratačního tepla ve stadiu tuhnutí výplňového betonu. Cílem této simulace je stanovit mezní hodnotu teplotního ohřátí výplňového betonu, který by mohl svým objemovým expanzním účinkem způsobit vznik tahových trhlin v betonových tvarovkách. Teplota tvarovek se přitom uvažuje stejná jako vnějšího vzduchu.
- Rovnoměrné ochlazení sloupku v délce trvání 4 hodin na teplotu vnějšího vzduchu + 5 °C za předpokladu, že počáteční teplota v konstrukci je + 17 °C. Cílem druhé úlohy je analýza nestacionárního teplotního pole a posouzení teplotní napjatosti pro výstupní čas, při kterém je dosaženo maximálních relativních teplotních rozdílů uvnitř konstrukce.



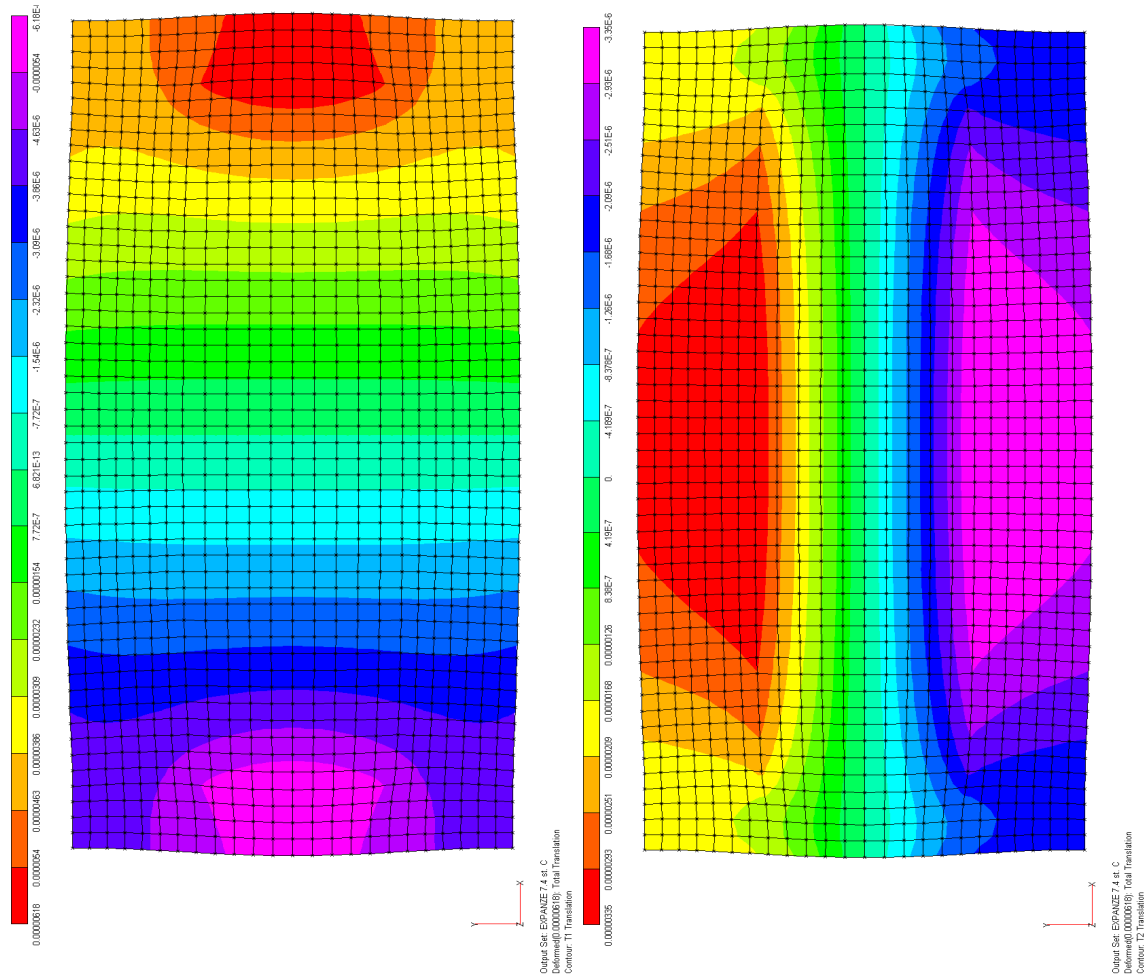
Obrázek 9.13: Předpokládaný časový průběh teploty vnějšího vzduchu

## 9.4.2 Výsledky výpočtu

### 9.4.2.1 Stanovení mezní teploty výplňového betonu

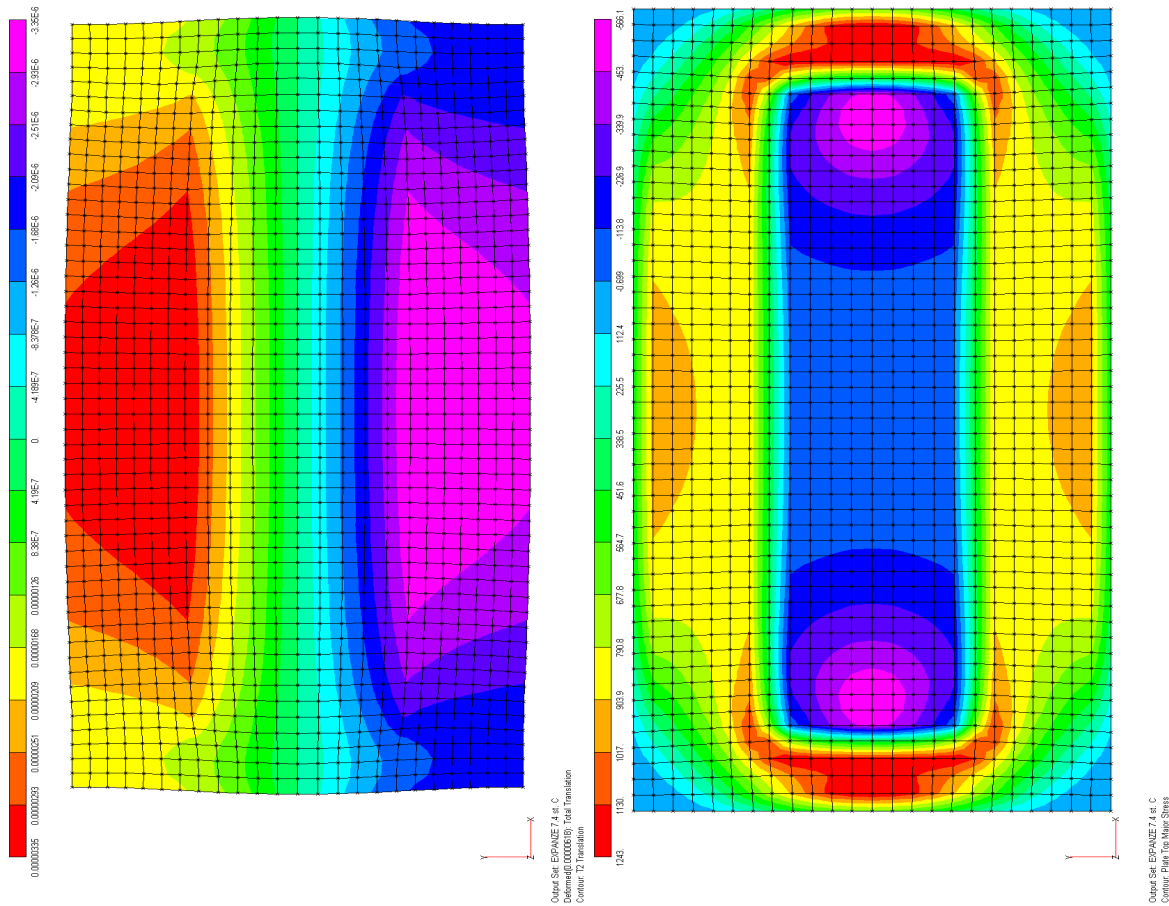
Meze pevnosti v hlavním tahu o hodnotě 1.3 MPa je dosaženo v bočních příčkách tvarovky při hodnotě nárůstu teploty výplňového betonu o + 7.4 °C. Výsledky výpočtu z hlediska posuvů a napětí v hlavním tahu jsou uvedeny na následujících obrázcích.

Výpočty platí za předpokladu, že modul pružnosti výplňového betonu i součinitel teplotní roztažnosti výplňového betonu dosahuje normové hodnoty betonu C12/15. Tento předpoklad však ve stadiu tuhnutí, kdy dochází k vývinu hydratačního tepla, nemusí být splněn – hodnota těchto parametrů je pro stadium tuhnutí výplňového betonu obtížně definovatelná a k porušení tvarovek může proto dojít až při vyšší hodnotě teplotního rozdílu. Např. tedy, pokud je modul pružnosti cca 50 % normové hodnoty, bude hodnota teplotního rozdílu inicializující vznik tahové trhliny při obvyklé hodnotě součinitele teplotní roztažnosti betonu  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$  dvojnásobná než je hodnota zde vypočtená. [32]

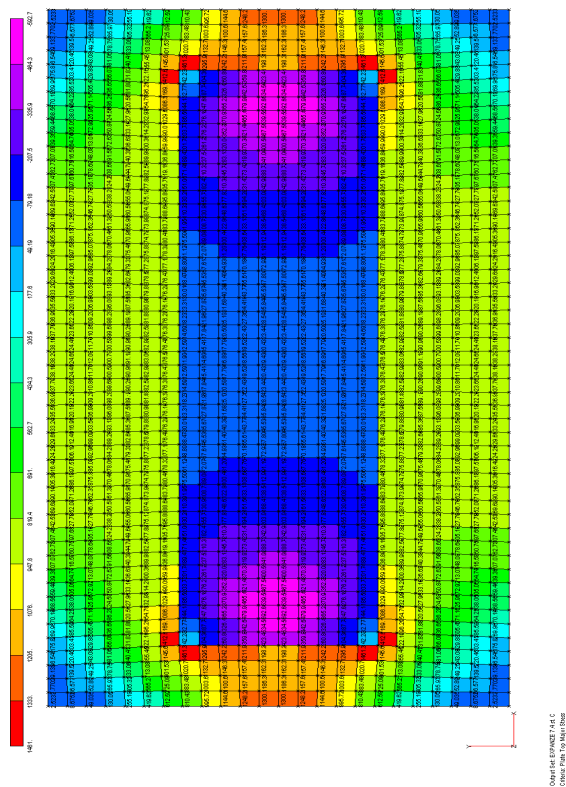


Obrázek 9.14: Tvar deformace a průběh posuvů  $U_x$  [mm] (vlevo), tvar deformace a průběh posuvů  $U_y$  [mm] (vpravo), převzato z [32]





Obrázek 9.15: Tvar deformace a průběh posuvů  $U_y$  [mm] (vlevo), průběh izočar napětí v hlavním tahu  $\sigma_{11}$  [mm] (vpravo), převzato z [32]

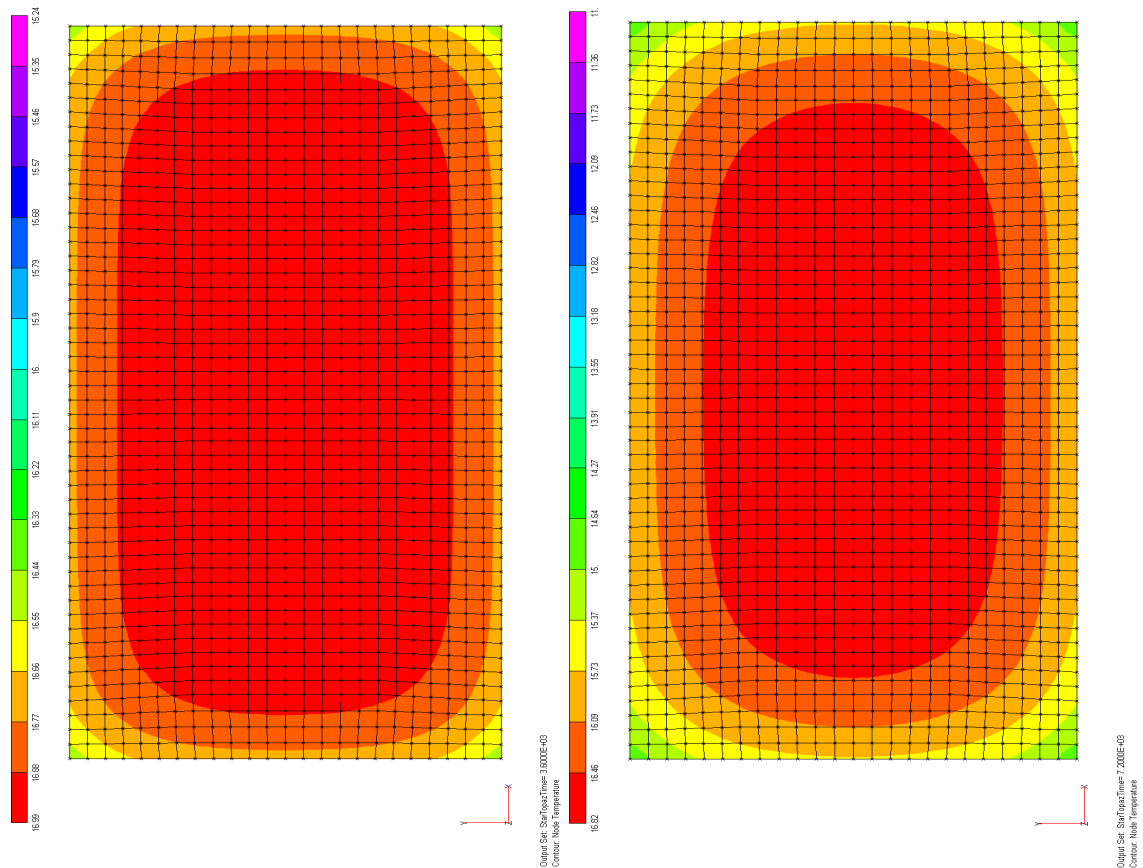


Obrázek 9.16: Hodnoty napětí v hlavním tahu  $\sigma_{11}$  [mm], převzato z [32]

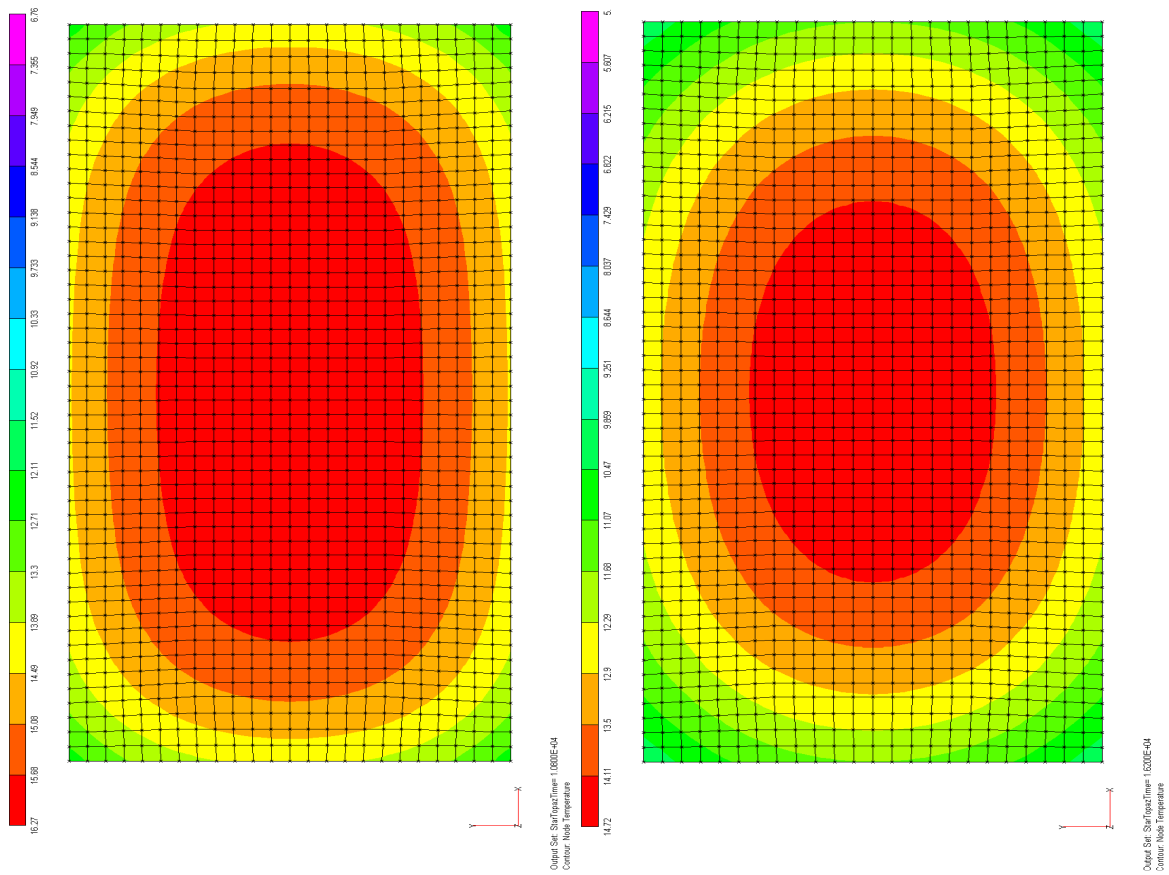
## 9.4.3 Teplotní pole a napjatost při rovnoměrném ochlazení sloupku

### 9.4.3.1 Teplotní pole

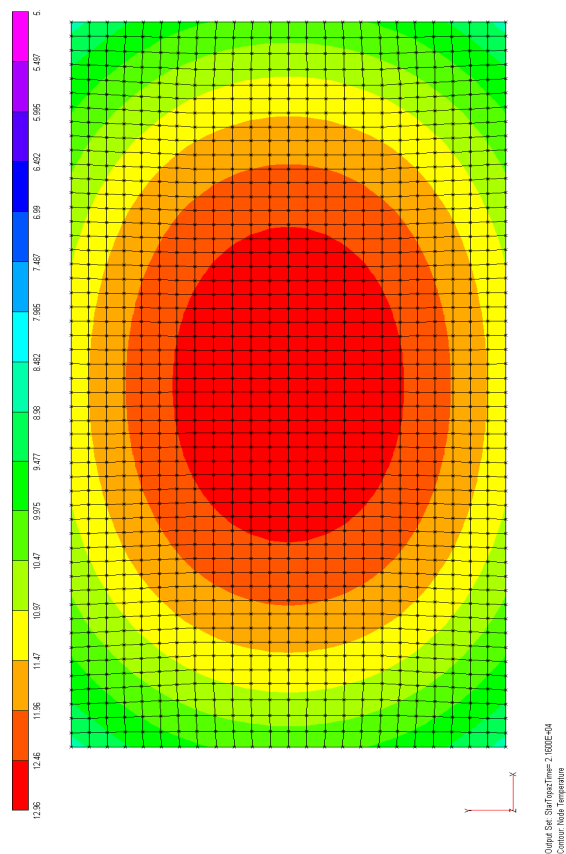
Výsledky analýzy nestacionárního vedení tepla z výpočtu programem TOPAZ při postupném chladnutí sloupku jsou uvedeny na následujících obrázcích, na kterých jsou znázorněny průběhy teploty pro vybrané výstupní časy. Maximální relativní teplotní rozdíl nastává v čase  $t = 4.5$  h (Obrázek 9.18 vpravo). [32]



Obrázek 9.17: Průběh teploty v čase  $t = 1$  h [ $^{\circ}$ C] (vlevo), Průběh teploty v čase  $t = 2$  h [ $^{\circ}$ C] (vpravo), převzato z [32]



Obrázek 9.18: Průběh teploty v čase  $t = 3 \text{ h}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] (vlevo), Průběh teploty v čase  $t = 4,5 \text{ h}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] (vpravo), převzato z [32]

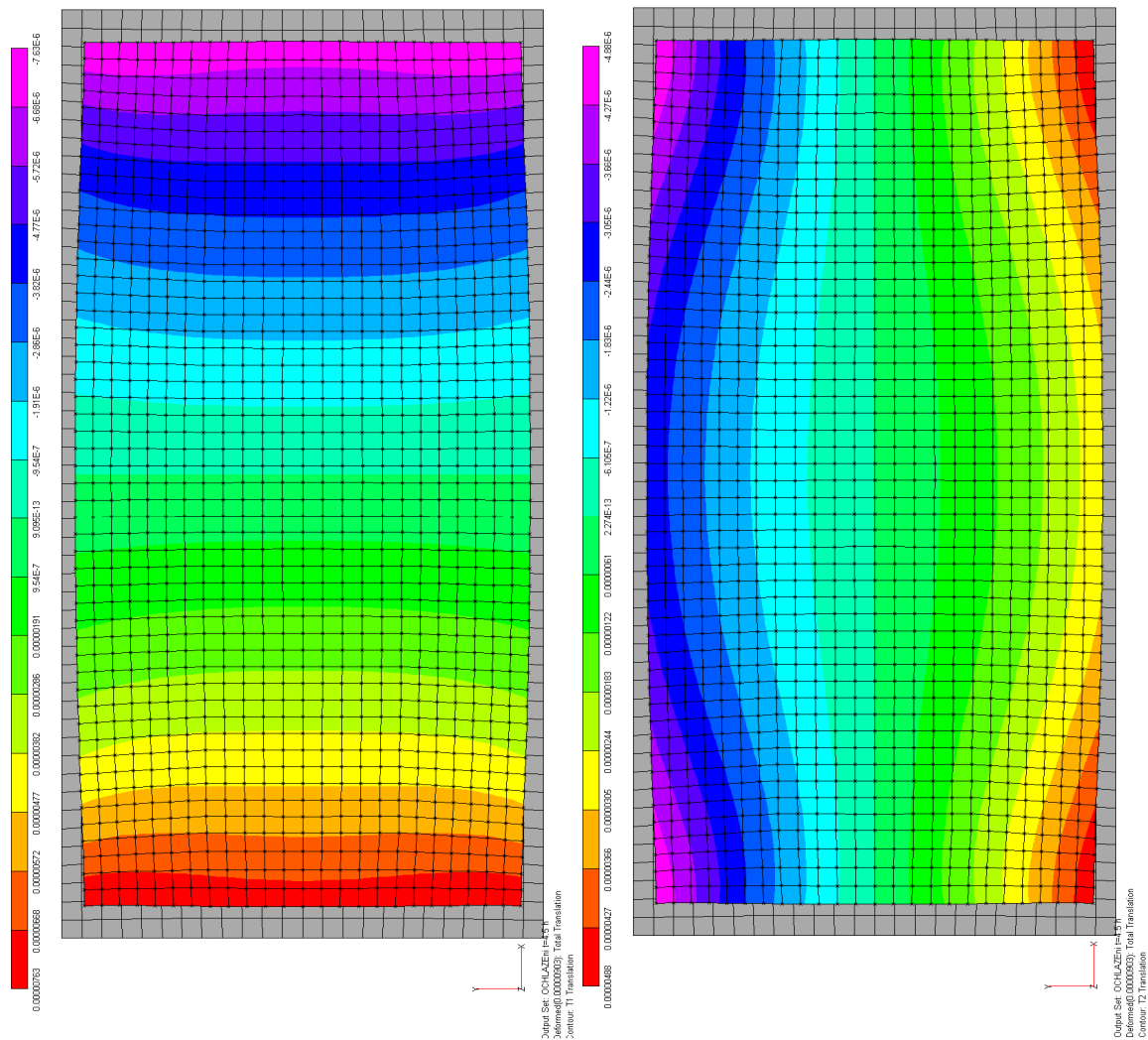


Obrázek 9.19: Průběh teploty v čase  $t = 5 \text{ h}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], převzato z [32]

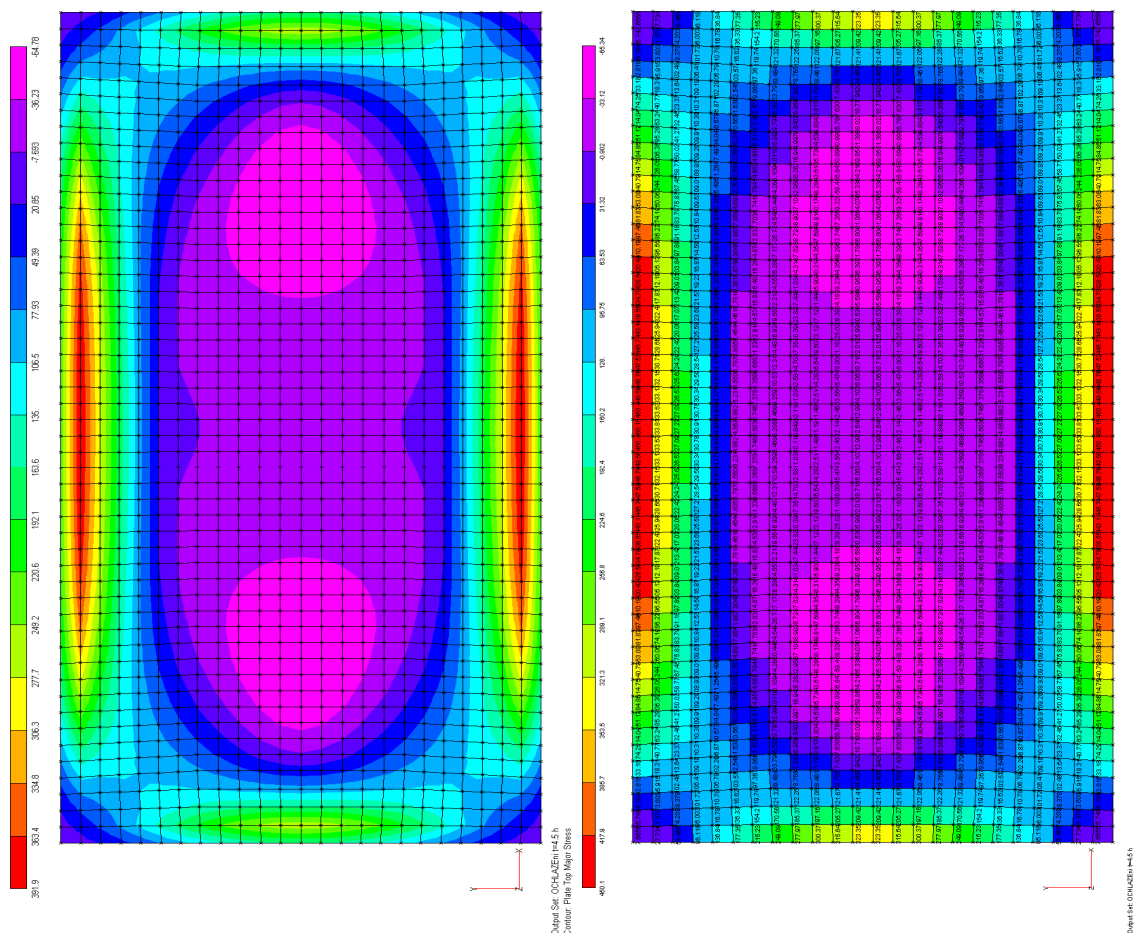
### 9.4.3.2 Napjatost

Výsledky výpočtu z hlediska posuvů a napětí v hlavním tahu pro výstupní čas  $t=4$  h 30 min jsou uvedeny na následujících obrázcích.

Z průběhů hodnot napětí v hlavním tahu na obrázku 9.21 je zřejmé, že vypočtená maximální hodnota napětí v hlavním tahu dosahuje pouze cca 1/3 hodnoty spodní meze pevnosti tvarovek v tahu. [32]



Obrázek 9.20: Tvar deformace a průběh posuvů  $U_x$  pro výstupní čas  $t = 4$  h 30 min. [mm] (vlevo), tvar deformace a průběh posuvů  $U_y$  pro výstupní čas  $t = 4$  h 30 min. [mm] (vpravo), převzato z [32]



Obrázek 9.21: Průběh izochar napětí v hlavním tahu  $\sigma_{11}$  pro výstupní čas  $t = 4 \text{ h } 30 \text{ min.}$  [mm] (vlevo), hodnoty napětí v hlavním tahu  $\sigma_{11}$  pro výstupní čas  $t = 4 \text{ h } 30 \text{ min.}$  [mm] (vpravo), převzato z [32]

#### 9.4.4 Vyhodnocení

Z výsledků výpočtu, uvedených v předchozí kapitole vyplývají následující závěry:

Ke vzniku tahových trhlin v tvarovkách sloupků oplocení může dojít při objemové expanzi výplňového betonu odpovídající teplotnímu rozdílu  $+7.4 \text{ }^\circ\text{C}$ , tzn. při poměrném přetvoření (strainu)  $+7.4 \cdot 10^{-5}$  (viz kapitola 9.4.2.1). Tento účinek může být způsoben např. námi uvažovanou teplotní expanzí výplňového betonu v důsledku vývinu hydratačního tepla při tuhnutí, popř. dalšími vlivy, způsobujícím kladné objemové změny výplňového betonu, jako např. bobtnáním vlivem vlhkosti.

Relativní rozdíly teplot, vznikající při postupném ochlazení sloupku, kde je uvažován pokles teploty o  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  vůči výchozí teplotě nemohou samy o sobě, při takovém to ochlazení vést k inicializaci tahových trhlin v betonových tvarovkách. Při tomto scénáři je u tvarovek dosaženo pouze cca 1/3 meze spodní pevnosti v tahu.

V případném dalším výzkumu problematiky poruch zdících prvků se doporučuje věnovat pozornost otázkám technologie betonáže výplňového betonu. Především ve smyslu poměru jednotlivých komponent a zejm. problematice vývinu hydratačního tepla a teplotám výplňového betonu v průběhu jeho tuhnutí.

## DISKUZE

K vypracování diplomové práce vedl výskyt defektů ve formě trhlin v plotových konstrukcích vystavených z vibrolisovaných betonových tvárnic. Z teoretických a praktických poznatků získaných během vypracování práce můžeme hovořit o tom, že výrazný vliv na potenciální výskyt trhlin má výplňový beton sloužící k zmonolitnění konstrukce. Tato práce byla především zaměřena na analýzu spolupůsobení systému výplňový beton – tvarovka, při vystavení cyklickému působení vysoké vlhkosti (provlhnutí) a následnému vysušení. Působení záporných teplot bylo posuzováno jen okrajově. Ke vzniku trhlin totiž dochází i u plotových konstrukcí, které prokazatelně nebyly vystaveny záporným teplotám. Proto je nezbytné provést analýzu zdících tvarových prvků při působení rozdílných teplot a vlhkostí. V této diplomové práci byly vybrány dva reprezentativní typy tvárnic Face Block a Simple Block. Na těchto tvárnících byly prováděny experimenty. Získané informace z měření můžeme rozdělit do několika částí.

V první části byla zaměřena pozornost na samotné mechanické vlastnosti tvarovek a porovnání jejich vlastností s parametry deklarovanými výrobcem. Provedenými zkouškami byl zjištěn jistý rozdíl pevností v tlaku. U tvárnic typu Face Block činí rozdíl pevností v tlaku mezi min. a max. pevností 6 MPa. Při průměrné pevnosti v tlaku tvárnice 18,9 MPa činí tento rozdíl 6 MPa, tedy 31,5 % celkové pevnosti v tlaku tvarovky. U tvárnice typu Simple Block je rozdíl mezi min. a max. pevností v tlaku 1 MPa. Při průměrné naměřené pevnosti v tlaku tvárnic 4,9 MPa odpovídá tato hodnota 20,4 % celkové pevnosti v tlaku tvarovky. Výsledné hodnoty při porovnání s deklarovanými hodnotami potom vyhovují. V dalších etapách řešení byla věnována pozornost normativním požadavkům, kde výrobce není nikterak limitován požadavky na mechanické vlastnosti tvárnic a je pouze na něm, jaké hranice si stanoví. Tento přístup se v technické praxi jeví jako neobvyklý. V první části bylo také stanoveno tzv. mezního přetvoření (kapitola 9.1.2). Pro stanovení mezního přetvoření byla využita expanzní směs v kombinaci s metodou můstku a prstencovou metodou. Toto mezní přetvoření nastává při defektu tvárnice, který se projeví vznikem trhlin (viz Obrázek 9.2). S přihlédnutím na jistou variabilitu tvarovek je tato hodnota uváděna v intervalu. Mezní přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max}}$  bylo naměřeno v čelní části tvarovky typu Face Block v intervalu 0,021 až 0,028 ‰ a tomu odpovídající deformační napětí  $\sigma_{\text{def,max}} = 0,7$  až 1,04 MPa. Získané hodnoty byly použity při vypracování matematické simulace. Dále pak při analýze potenciálních rizik vzniku poruch trhlin ve zdících prvcích.

V druhé části byla zaměřena pozornost na výplňový beton. Zde byly navrženy dvě směsi o stejné dávce cementu 350 kg/m<sup>3</sup>, s maximální velikostí frakce 8 mm (viz Tabulka 9.17). Receptury byly navrženy tak, aby svým složením korespondovaly s výplňovými betony, které jsou pro daný účel běžně používány. První z receptur byla záměrně navržena tak, aby představovala méně kvalitní beton, druhá pak reprezentovala relativně kvalitnější beton. Pevnost v tlaku betonu podle receptury I je rovna  $f_{\text{ck,cube}} = 10,1$  MPa, pevnost betonu v tlaku receptury II  $f_{\text{ck,cube}} = 36,8$  MPa. Rozdíl průměrných pevností betonu v tlaku směsi I a II činí  $\Delta f_{\text{ck,cube}} = 26,7$  MPa při stejné dávce cementu, ale při odlišném množství záměsové vody

a podílu jednotlivých frakcí kameniva (viz tabulka 9.17). Směs I byla navržena jako sušší, v tomto případě nebylo možné změřit konzistenci z důvodů nízké dávky záměsové vody, která měla za následek nesoudržnost směsi při stanovení času Vebe. Směs II byla koncipována jako vlhčí, zde bylo naměřeno sednutí kužele 110 mm odpovídající třídě S3. Nasákavost směsi I byla naměřena  $v = 8,2 \%$ , směsi II potom  $v = 8,8 \%$ . I přes vysokou nasákavost betonu, byl koeficient mrazuvzdornosti obou směsí  $\geq 0,75$ . Proto je možné tvrdit, že beton v obou testovaných případech bude odolný vystavení mrazu. Výsledky dosažená na směsi I (referenční pevnost pouze 10,1 MPa) nepotvrdili nízkou mrazuvzdornost betonu u pevnostních tříd nižších než C12/15.

Vezmeme-li v úvahu normativní požadavky na výplňový beton uvedené v kapitole 2.2, které jsou velmi strohé a omezují se pouze na stanovení minimální třídy pevnosti betonu C12/15 a velikost frakce kameniva do 20 mm, můžeme hovořit o neobvyklém přístupu. V úvahu bereme i nevhodné stanovení zpracovatelnosti udávané stupněm konzistence vyjádřené sednutím, kde je minimální požadovaná hodnota S3 tedy 100 až 150 mm. Z velké části bude výstavba plotových konstrukcí probíhat za pomoci domácí výroby. V takovém případě můžeme s vysokou pravděpodobností počítat s absencí jakýchkoliv přísad zlepšující zpracovatelnost. V našem případě lze vidět, že zpracovatelnost se podílí na výsledných pevnostech betonu, ale vliv na nasákavost není nikterak výrazný. V případě nasákavosti, která úzce souvisí s mezerovitostí hraje zásadní roli složení betonu, tedy poměr jednotlivých frakcí kameniva. Kamenivo tvoří kostru celého betonu a při vzájemném vhodném poměru jednotlivých frakcí, lze zabezpečit trvanlivost betonu. Zde by se norma měla spíše zaměřit na poměr jednotlivých komponent betonu, místo jeho zpracovatelnosti. V případě zpracovatelnosti je třeba dbát při výstavbě na správné uložení betonu ve smyslu hutnění výplňového betonu ve tvarovce. Z rešerží realizovaných v rámci této práce je potom patrný vliv vysoké nasákavosti na trvanlivost celkové konstrukce. V těchto praktických případech došlo k poruchám zdiva vlivem nízkých teplot a vysoké nasákavosti, kde byla překročena mezní hodnota nasákavosti výplňového betonu 7 %.

Vliv působení mrazu na poruchy zdících prvků je patrný a obecně známý. Zkušenosti z praxe ovšem ukazují, že k defektům vibrolisovaných tvárnic a z nich postavených konstrukcí, především plotových, dochází v některých případech působením objemových změn vyvolaných při nadnulových teplotách. K vysvětlení a pochopení tohoto chování se věnujeme v posledních dvou částech této práce. Z výsledku uvedených v kapitole 9.2 a 9.3 lze usoudit, že na objemové změny výplňového betonu a systému tvarovka – výplňový beton má vliv vlhkost. V prostředí s vysokou relativní vlhkostí  $> 95 \%$ , v důsledku hygroskopické expanze dochází v kapilárách adsorpcí vlhkostí pórovým systémem. Nově přítomná voda zvyšuje relativní vlhkost v pórech, což má za následek zvýšení tloušťky adsorbovaného filmu v kapilárách, a to vede k rozšiřování pórů úzkých kapilár. V grafech 9.28 až 9.39 můžeme vidět vliv vlhkosti a složení výplňového betonu na velikost přetvoření.

Při zkoumání systému tvarovka – výplňový beton bylo pomocí matematického modelu zjištěno, že mezního přetvoření u tvárnic typu Face Block, je dosaženo překročením tahového napětí 1,3 MPa v bočních příčkách tvarovky. Tomu odpovídá např. situace, kdy

ke vzniku tahových trhlin v tvarovkách sloupků může dojít při objemové expanzi výplňového betonu odpovídající teplotnímu rozdílu  $+7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tzn. při poměrném přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max,vyp}} = 0,049\text{ }_{\text{‰}}$ . Tento účinek může být způsoben např. teplotní expanzí výplňového betonu v důsledku vývinu hydratačního tepla při tuhnutí, bobtnáním vlivem vlhkosti popř. dalšími vlivy, které způsobují kladné objemové změny výplňového betonu. Nejčastější výskyt trhlin právě v bočních příčkách se potvrdil i při praktickém ověření (viz Obrázek 9.2). Při námi naměřeném přetvoření v čelní části tvarovky  $\varepsilon_{\text{def,max}} = 0,021$  až  $0,028\text{ }_{\text{‰}}$  došlo právě k porušení v boční části. Tomu meznímu přetvoření odpovídá tahové napětí  $\sigma_{\text{def,max}} = 0,7 - 1,04\text{ MPa}$ , které vyvolala expanzní směs. V našem případě jsme u tvarovky vyplněné směsí I dosáhly průměrného přetvoření vyvolané působením rozdílných vlhkostí (vlhčení a sušení) na čelní straně tvárnice hodnoty  $\varepsilon_{\text{prům,vv,č}} = 0,010\text{ }_{\text{‰}}$ . Tato hodnota se nachází pod mezí porušení.

Z matematického modelu také vyplývá, že relativní rozdíly teplot vznikající při postupném ochlazení sloupku o teplotu  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  vůči výchozí teplotě nemohou samy o sobě vést k inicializaci tahových trhlin v betonových tvarovkách. Při tomto scénáři je u tvarovek dosaženo pouze cca  $1/3$  meze spodní pevnosti v tahu. Pokud ale zvýšíme teplotní rozdíl na hodnotu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , čehož jsme dosáhly, při vystavení tvarovky mrazu (viz kapitola 9.3.1). Dosáhne u čelní strany průměrné přetvoření  $\varepsilon_{\text{prům,zč}} = -0,013\text{ }_{\text{‰}}$ , což odpovídá zhruba dvou třetinám naměřeného spodního mezního přetvoření  $\varepsilon_{\text{def,max}} = 0,021$  až  $0,028\text{ }_{\text{‰}}$ . Na boční straně potom přetvoření  $\varepsilon_{\text{prům,zb}} = -0,047\text{ }_{\text{‰}}$ . Tato hodnota překračuje námi naměřené mezní přetvoření a podle výpočtu se blíží hodnotě mezní deformace  $\varepsilon_{\text{def,max,vyp}} = 0,049\text{ }_{\text{‰}}$ . Je tedy zřejmé, že v důsledku působení mrazových cyklů se namáhání velice přibližuje vypočtené mezní deformaci. Ale ani v tomto případě nedošlo ke vzniku defektu tvárnice. Tento jev přisuzujeme tomu, že nebyla překročena mez pevnosti v tahu zkoušené, konkrétní tvarovky (díky jisté variabilitě tvarovek) a přetvoření bylo tedy pouze pružného charakteru.



## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzovat příčiny vzniku poruch trhlin v betonových tvárnících, používaných především pro realizaci plotových konstrukcí. V našem případě se zejména věnujeme vzniku trhlin ve tvarovkách v důsledku přetvoření systému tvarovka – výplňový beton, a to především v závislosti na kolísání vlhkosti a teploty. Jako směrodatným ukazatelem odolnosti betonu proti přetvoření se jeví modul pružnosti. Modul pružnosti úzce souvisí s pevnostními parametry betonu. S rostoucí pevností v tlaku dochází ke zvýšení modulu pružnosti a snížení potřebného přetvoření k dosažení deformace na mezi porušení. Nelze opomenout ani geometrii zdíciho prvku, jednotlivý poměr stran a tloušťku stěn.

Jednou z příčin či potenciálních zdrojů, které mohou v tvarovkách vyvolovat tahová napětí, a to až za mezí porušení mohou být objemové změny výplňového betonu. Tyto změny mohou být vyvolány buď mrazem, zráním výplňového betonu nebo působením rozdílných teplot a vlhkostí. V našem případě jsme se zaměřili na počáteční přetvoření betonu vyvolané jeho zráním a působením rozdílných teplot a vlhkostí. Zcela jednoznačně stanovit objemové změny výplňového betonu, které potenciálně vedou k defektu tvárnice je velmi obtížné. V našem případě bylo dosaženo jisté disproporce mezi výsledky získanými experimentálně pomocí expanzní směsi a výsledky matematického modelování. Pravděpodobnou majoritní příčinou tohoto rozdílu je jistá variabilita vlastností tvarovek. Jak potvrzují výpočty, tak k defektu tvárnice může docházet v případě překročení napětí v prostém tahu tvarovky, které je vyvoláno objemovou změnou výplňového betonu.

Získané poznatky v rámci řešení diplomové práce lze shrnout v následující.

Při cyklickém vystavení tvarovek vysoké vlhkosti a následnímu vysušení se nepodařilo vytvořit prostředí vedoucí k iniciaci trhlin. Při měření přetvoření působení záporných teplot došlo sice k překročení naměřeného mezního přetvoření, ale ani v tomto případě nedošlo k projevu poškození tvárnice.

Bylo prokázáno, že trhliny ve tvarovce se mohou vytvořit v raných stádiích po vylití tvarovky betonem. V důsledku objemových změn doprovázející zráním betonu, dochází k vývinu hydratačních produktů, které jsou doprovázeny exotermní reakcí. Tato exotermní reakce má za následek expanzi výplňového betonu uvnitř tvarovky v počátečním stádiu tuhnutí. Nejvyšší rozdíl teplot při exotermické reakci vzniklé hydratací cementu nastává v době přibližně 4,5 hodiny. Tento čas lze považovat za kritický, kdy může dojít k překročení tahového napětí tvarovky a iniciaci trhlin. Trhlina resp. její zárodek nemusí být vizuálním posouzením patrná, ale může mít za následek lokální porušení betonu v některé části tvárnice v pozdějším období.

Po zatvrdnutí betonu je vytvořena jeho stabilní struktura. Objem této struktury může být přirozeně měněn v důsledku kolísání vlhkosti a teploty. Lze konstatovat, že samotný nárůst objemu vlivem vysoké vlhkosti nepostačí k defektu tvarovky. V případě provlhnutí tvarovky dochází vlivem kapilárního systému výplňového betonu k zisku vlhkosti, který

má za následek zvýšení objemu. Jakmile ale dojde např. vlivem větru nebo oslunění k odběru vlhkosti z povrchu tvarovky (vysušení) při zachování „zvýšeného“ objemu výplně, může tvarovka tzv. obepnout vnitřní výplň. V tomto případě může dojít k překročení tahových napětí tvarovky a následnému vzniku trhlin ve tvárnici.

Na tvorbě defektů tvarových zdících prvků se s velkou pravděpodobností podílejí oba tyto vlivy jak hydratační teplo doprovázející zrání výplňového betonu, tak vlhkostní přetvoření.

Mezi další faktory, které se na vzniku trhlin mohou podílet lze zahrnout především: variabilní kvalitu tvárnic, působení mrazu apod. Lze konstatovat, že u reálných konstrukcí může ke vzniku a rozvoji trhlin v betonových tvárnících docházet synergickým působením uvedených vlivů.

## Seznam použité literatury

- [1] *PRESBETON Nova, s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.presbeton.cz/>
- [2] ČSN EN 771-3. *Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] ČSN EN 1996-1-1. *Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce.* Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [4] ČSN EN 1996-2. *Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 2: Volba materiálů, konstruování a provádění zdiva.* Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [5] *MCT spol. s r. o.* [online]. 2010 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://mct.cz/PDF/Betonov%C3%A9%20ploty.pdf>
- [6] Vetchý, J., *Posouzení kvality betonu – reklamace RZ/20/2013.* MCT. Praha, 2013.
- [7] Vetchý, J., *Posouzení kvality betonu – reklamace RZ/21/2013.* MCT. Praha, 2013.
- [8] Vetchý, J., *Posouzení kvality betonu – reklamace RZ/23/2013.* MCT. Praha, 2013.
- [9] ČSN EN 13198. *Betonové prefabrikáty – Uliční a zahradní výroba.* Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [10] COLLEPARDI, Mario. *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.
- [11] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton.* 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [12] *EBeton | eBeton - Specialista na beton* [online]. 2010 [cit. 2013-12-16]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/>
- [13] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu.* Bratislava: Jaga, 2006, 190 s. ISBN 80-807-6032-2.
- [14] Drochytka, R., *Trvanlivost stavebních látek.* Vysoké učení technické v Brně 2007.
- [15] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu.* 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [16] Příručka technologa betonu. In: [online]. 2013 [cit. 2013-12-19]. Dostupné z: [http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/3C0A2CE4-C25E-472C-9690-570271F4E311/0/Prirucka\\_technologa\\_BETON.pdf](http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/3C0A2CE4-C25E-472C-9690-570271F4E311/0/Prirucka_technologa_BETON.pdf)

- [17] ŠMERDA, Z., KŘÍSTEK, V. *Dotvarování a smršťování betonových prvků a konstrukcí*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1978, 232 s.
- [18] Katedra betonových a zděných konstrukcí. In: [online]. [cit. 2013-12-21]. Dostupné z: [http://concrete.fsv.cvut.cz/~kristek/ATK1/ATK1\\_prednaska\\_1cast.pdf](http://concrete.fsv.cvut.cz/~kristek/ATK1/ATK1_prednaska_1cast.pdf)
- [19] Nováček, J., *Studium objemových změn pojivových silikátových směsí*. Brno, 2013. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [20] Hela, R., *Technologie betonu II*, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Modul M01, Brno 2007.
- [21] Procházka, J. a kol. *Navrhování betonových konstrukcí I*, Prvky z prostého a železového betonu. Česká betonářská společnost ČSSI a ČSB Servis, s.r.o., Praha, 2009, 314 s.
- [22] AITICI, P., C. Cement and Concrete Composites. *The durability characteristics of high performance concrete: a review*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada. Volume 25, Issues 4-5, May-July 2003, Pages 409-420.
- [23] AITCIN, P., C. Does Concrete Shrink or Does it Swell?, Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, December 1999, pages 77 to 80.
- [24] KOSMATKA, S.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. Design and Control of Concrete Mixtures, 14th Edition, Portland Cement Association. 2002 (rev. 2008). 372p. ISBN 0-89312-217-3, Dostupné online na: <http://www.scribd.com/doc/38044723/Design-and-Control-of-Concrete-Mixtures-PCA>
- [25] IDIART, A., E. Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2009, ISBN 9788469271414
- [26] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [27] TŮMA, P. 2010. Smršťování betonu a platné normy In: [online]. [cit. 2013-12-21]. Dostupné z: <http://www.imaterialy.cz/Normy/Smrstovani-betonu-a-platne-normy.html>
- [28] Eppers, S., *Die Bewertung der autogenen Schwindrissneigung von Beton mit Hilfe des Ring-Tests*. Dresden, 2010. Dissertation. Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden.
- [29] Eppers, S., Müller, C., *On the examination of the autogenous shrinkage cracking propensity by means of the restrained ring test with particular consideration of*

*temperature influences*. In: beton 5/2009 pp. 227-230 (part 1) and beton 6/2009 pp. 283-289 (part 2).

- [30] Kim, B., Weiss, J., *Using acoustic emission to quantify damage in restrained fiber-reinforced cement mortars*. Cement and Concrete Research, Nr. 2, 2003, pp. 207-214.
- [31] Radlinska, A. Moon, J. H., Rajabipour, F., Weiss, J., *The ring test: a review of recent developments*. In: Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, International RILEM Conference: Proceedings, Lyngby, Denmark, August 2006, pp. 205-214.
- [32] LUKAVEC, M. *Výpočtové posouzení možných příčin vzniku trhlin v plotových tvarovkách při kladných teplotách: Statický a dynamický výpočet*. Praha: Inženýrská, konzultační a projektová kancelář, 2014.

## Seznam použitých zkratek a symbolů

FB	tvárnice typu Face Block
SB	tvárnice typu Simple Block
CP	pevnost v tlaku vztažená na celkovou plochu tvarovky [MPa]
STP	pevnost v tlaku vztažená na skutečnou tlačnou plochu tvarovky [MPa]
$\Delta$	největší rozdíl mezi naměřenými hodnotami rozměrů [-]
D	objemová hmotnost betonu [ $\text{kg/m}^3$ ]
$D_{\text{čb}}$	objemová hmotnost čerstvého betonu [ $\text{kg/m}^3$ ]
$D_{\text{zb}}$	objemová hmotnost zatvrdlého betonu [ $\text{kg/m}^3$ ]
$f_{ck,cube}$	krychelná pevnost betonu v tlaku [MPa]
$f_{ck,cube,50}$	krychelná pevnost betonu v tlaku, po 50 cyklech zmrazování [MPa]
$m_{st}$	hmotnost vzorku nasáklého vodou v čase (t) [g]
$m_{dt}$	hmotnost vzorku vysušeného v čase (t) [g]
$\varepsilon_{\text{def,max}}$	mezní přetvoření naměřené při porušení tvarovky [ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon_{\text{def,max,vyp}}$	mezní přetvoření vypočtené při porušení tvarovky [ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon_{\text{prům}}$	průměrné přetvoření [ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon_{\text{prům,z}}$	průměrné přetvoření vyvolané působením zmrazování a rozmrazování [ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon_{\text{prům,zb}}$	průměrné přetvoření vyvolané působením zmrazování a rozmrazování naměřené na boční straně tvarovky [ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon_{\text{prům,zč}}$	průměrné přetvoření vyvolané působením zmrazování a rozmrazování naměřené na čelní straně tvarovky [ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon_{\text{prům,vv,č}}$	průměrné přetvoření vyvolané působením vlhčením a sušením naměřené na čelní straně tvarovky [ $\mu\text{m}$ ]
$\sigma_{\text{def,max}}$	mezní napětí při porušení tvarovky [MPa]

Poznámka: V této diplomové práci jsou použity další zkratky a symboly. Tyto symboly a zkratky jsou vysvětleny v jednotlivých kapitolách.