

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza vlivu různých typů vláken v konstrukčním vláknobetonu
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr Bečica**
Osobní číslo: **D18229**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Experimentální analýza vlivu různých typů vláken v konstrukčním vláknobetonu**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Požaduje se zpracovat rešerše stávající míry poznání konstrukčních vláknobetonů. Cílem bakalářské práce je experimentálně popsat charakteristiky vláknobetonu se zaměřením na různé typy aplikovaných vláken. Experimentální zkoušky budou probíhat na autorem zhotovených zkušebních tělesech. Je doporučeno použít různé typy vláken (ocelové drátky, syntetická, skleněná a dřevěná vlákna). Kromě standardních zkoušek se požaduje zaměřit se na reologické vlastnosti vláknobetonů (smršťování, nabývání). Experimentální část práce bude prováděna v laboratoři CEMEX Czech Republic, s.r.o.

Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí

Praktické využití vláknobetonů

2) Experimentální část

Výroba

Provedení zkoušek v čerstvém stavu

Provedení zkoušek ve ztvrdlém stavu

Stanovení vývoje objemových změn

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- ČSN EN 206+A2. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2024.
- ČSN EN 14889-1, 2007. Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14889-2, 2007. Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN P 73 2450, 2015. Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN P 73 2451, 2015. Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN P 73 2452, 2015. Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- COLLEPARDI, M. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.
- PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- TKP 18, 2016. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.**
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **12. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 13. října 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Experimentální analýza vlivu různých typů vláken v konstrukčním vláknobetonu jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 6. 8. 2024

Petr Bečica, v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování za nápomoc, konzultace, vedení a cenné rady patří především Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D. Dále děkuji své manželce Nikolce za trpělivost během celého studia. Dále děkuji zaměstnancům firmy CEMEX, Ing. Danielu Šmídovi a Michalu Konířovi za pomoc při výrobě zkušebních těles, pomoc při zkouškách ztvrdlého betonu a za konzultace nad naměřenými daty.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá rešerší na téma vláknobetonu, analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí. Experimentální část se týká návrhu receptur s obsahem různých typů vláken, které jsou zkoušeny v čerstvém stavu - stanovení sednutí kužele, objemovou hmotnost a obsah vzduchu, ve ztvrdlém stavu se pak zkouší pevnost v tlaku, pevnost v tahu, stanovení kapacity absorbované energie, mrazuvzdornost. Na zkušebních tělesech proběhne též dlouhodobé sledování objemových změn od okamžiku uložení čerstvého betonu až do stáří několika týdnů.

KLÍČOVÁ SLOVA

vláknobeton, smrštění, expanze, zbytková pevnost, osový tah, absorbovaná energie

TITLE

Experimental analysis of the effect of different types of fibers in structural fiber concrete

ANNOTATION

The bachelor's thesis deals with research on the topic of fiber concrete, analysis of the current state of knowledge in the Czech Republic and in the world. The experimental part refers to the design of recipes containing different types of fibers, which are tested in the fresh state to determine cone seating, volumetric weight and air content. In the hardened state, the volumetric weight, compressive strength, tensile strength, determination of absorbed energy capacity, frost resistance are tested. Long-term volume changes will be monitored on the test specimens from the moment the fresh concrete is placed until it is several weeks old.

KEYWORDS

fiber reinforced concrete, shrinkage, expansion, residual strength, axial tension, absorbed energy

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM GRAFŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM VZORCŮ.....	12
CÍLE PRÁCE.....	13
TEORETICKÁ ČÁST	14
1 Smrštění betonu	14
1.1 Vlhkostní smrštění (vysychání)	14
1.2 Chemické smrštění.....	15
1.3 Samovysychání betonu	15
1.4 Teplotní smrštění.....	16
1.5 Plastické smrštění	16
1.6 Smrštění vysycháním.....	16
1.7 Autogenní smrštění	17
1.8 Karbonatační smrštění	18
2 Normový přístup k návrhu.....	18
3 Vlákná	20
3.1 Dělení vláken	20
3.1.1 Podle procesu výroby.....	20
3.1.2 Podle uložení vlákna v cementovém kompozitu	20
3.1.3 Podle průměru vlákna	20
3.2 Druhy vláken podle materiálu.....	20
3.2.1 Ocelová vlákna	20
3.2.2 Polypropylenová vlákna	23
3.2.3 Skleněná vlákna	23
3.2.4 Uhlíková vlákna.....	24
3.2.5 Přírodní vlákna.....	26
3.2.6 Čedičová vlákna.....	26
3.2.7 Konopná vlákna	27
4 Současný stav poznání	27
5 Praktické využití	29
PRAKTICKÁ ČÁST	31
5 Výroba zkušebních těles	33
5.1 Receptura 2	35
5.2 Receptura 3	37
5.3 Receptura 4	37
5.4 Receptura 5	39
5.5 Receptura 6	40
5.6 Receptura 7	41
5.7 Receptura 8	41
5.8 Receptura 9	42
6 Výhodnocení naměřených dat	43
6.1 Pevnost v tlaku.....	43
6.2 Pevnost v tahu.....	45

6.2.1 Pevnost v tahu ohybem	46
6.2.2 Pevnost v příčném tahu.....	48
6.2.3 Mez úměrnosti	49
6.2.4 Osový tah – experimentální zkouška ohybové pevnosti.....	56
6.2.5 Stanovení mrazuvzdornosti betonu.....	62
6.2.6 Stanovení kapacity absorbované energie	62
6.2.7 Stanovení objemových změn	67
6.2.7.1 Receptura 1 – bez vláken	72
6.2.7.2 Receptura 2 – Krampe Harex.....	75
6.2.7.3 Receptura 3 – Mapefibre ST 30	77
6.2.7.4 Receptura 4 – Masterfibre 482.....	79
6.2.7.5 Receptura 5 – Isofibre 1100	81
6.2.7.6 Receptura 6 – Mapefibre ST 50 Twisted	83
6.2.7.7 Receptura 7 – Orlimex.....	85
6.2.7.8 Receptura 8 – Anti crack 67/36	87
6.2.7.9 Receptura 9 – Skelný prototyp.....	89
6.2.7.10 Receptura 10 – referenční 2	91
6.2.7.11 Sumarizace výsledků – objemové změny	93
7 Závěr	100
PŘEHLED POUŽITÝCH ZDROJŮ	103
DOKLADOVÁ ČÁST.....	107

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Křivka vývoje zdánlivého objemu betonového vzorku [2].....	15
Obrázek 2 Úbytek hmotnosti vzorků různého rozměru v relativní vlhkosti prostředí 55 % [2]	16
Obrázek 3 Ilustrace tvorby menisků vody (modře) a směr kapilárních sil (červeně), vlákna C-S-H gelu (bíle), která kapilární síly stahují k sobě a vzniká smrštění, upraveno z [3]	18
Obrázek 4 Srovnání průběhu pevnosti v tlaku [4]	21
Obrázek 5 Srovnání průběhu pevnosti v tahu [4]	21
Obrázek 6 Typický tvar ocelového makrovlákna a jeho rozměry [5].....	22
Obrázek 7 Schéma výroby skelných vláken [6]	24
Obrázek 8 Schéma výroby uhlíkových vláken [9].....	25
Obrázek 9 Schéma výroby čedičových vláken odstředivým způsobem [10, 11]	26
Obrázek 10 Torkretování opěrné stěny [42]	30
Obrázek 11 Betonování průmyslové podlahy [43]	30
Obrázek 12 CEM II/A-M 42,5 R Prachovice	31
Obrázek 13 Vertikální míchačka s nuceným oběhem	33
Obrázek 14 navlhčený Abramsův kužel před zkouškou sednutím na navlhčené podložce	34
Obrázek 15 Zkouška sednutí.....	34
Obrázek 16 Stanovení obsahu vzduchu v ČB.....	35
Obrázek 17 Kovová makrovlákna Krampe Harex.....	36
Obrázek 18 Plnění formy, všesměrně rozptýlená vlákna Krampe Harex	36
Obrázek 19 Polypropylenová makrovlákna Mapefibre ST 30	37
Obrázek 20 Masterfibre 482	38
Obrázek 21 Masterfibre 482 rozptýleno ve směsi – foto Ing. Šmíd, CEMEX	38
Obrázek 22 Isofiber 1100.....	39
Obrázek 23 Isofiber 1100 rozptýleno v čerstvém betonu	39
Obrázek 24 Mapefibre ST 50 Twisted	40
Obrázek 25 Mapefibre ST 50 Twisted rozptýleno v čerstvém betonu.....	40
Obrázek 26 Čedičové mikrovlákno Orlimex	41
Obrázek 27 Skelné vlákno Anti crack 67/36 [31].....	41
Obrázek 28 Skelný prototyp vláken, foto Ing. Šmíd, CEMEX	42
Obrázek 29 Zkušební a záznamové zařízení CONTROLS	43
Obrázek 30 Umístění zkušebního tělesa v lisu	50
Obrázek 31 Čidlo pro zaznamenávání velikosti rozevření trhliny	51
Obrázek 32 Zkušební těleso po ukončení zkoušky (směs 4, vlákna Masterfibre 482).....	52
Obrázek 33 Porušený průřez po zkoušce Rozevření trhliny, směs 3, vlákna Mapefibre ST 30	53
Obrázek 34 Poškozený trámec při nestandardním průběhu zkoušky	54
Obrázek 35 Úprava zkušebního tělesa – vývrt průměru 80 mm.....	56
Obrázek 36 Zkušební těleso umístěno v lisu před započítáním zkoušky	57
Obrázek 37 Zkušební trámec po ukončení zkoušky (Masterfibre 482).....	57
Obrázek 38 Přetřhaná vlákna na spodním líci zkušebního trámce (Mapefibre ST 50 Twisted)	58
Obrázek 39 Lomová plocha po zkoušce osový tah, vlákna Krampe Harex, receptura 2, foto Ing. Šmíd, CEMEX	60

Obrázek 40 Makrotrhlina s prosvítajícími vlákny po zkoušce osový tah, vlákna Krampe Harex, receptura 2, foto Ing. Šmíd, CEMEX	61
Obrázek 41 Zkušební těleso pro zkoušku Stanovení absorbované energie, ihned po naplnění formy.....	63
Obrázek 42 Zkušební přípravek pro zkoušku Stanovení absorbované energie	64
Obrázek 43 Zkušební těleso umístěno v lisu před začátkem zkoušky.....	64
Obrázek 44 Deformace tělesa po ukončení zkoušky	65
Obrázek 45 Měřicí žlab SCHLEIBINGER GERATE – připraven na naplnění čerstvým betonem	67
Obrázek 46 Měřicí žlab po naplnění čerstvým betonem	68
Obrázek 47 Horní část obrázku – čerstvý beton ve zkušebním žlabu, zabránění vysušování povrchu, spodní část obrázku – ztvrdlý beton přichystaný na manuální měření objemových změn.....	69
Obrázek 48 Nástroj pro manuální měření deformací [23]	70
Obrázek 49 Manuální měření objemových změn	70
Obrázek 50 Přiložený odchylkoměr na měřicím bodě.....	71

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Porovnání pevnosti v tlaku a vodního součinitele.....	44
Graf 2 Porovnání pevností v tahu – větší tělesa.....	45
Graf 3 Pevnost v tahu - menší tělesa.....	46
Graf 4 Znázornění pevnosti v tahu a vodního součinitele	48
Graf 5 Porovnání pevností v příčném tahu	49
Graf 6 Závislost zatížení na rozevření trhliny (výstup ze zkušebního zařízení, graficky vyznačeny výsledky zkoušky)	51
Graf 7 Porovnání pevností na mezi úměrnosti, zbytková pevnost	55
Graf 8 Porovnání pevností – osový tah.....	59
Graf 9 Zatěžovací diagram zkušebního tělesa - Mapefibre ST 50 Twisted	61
Graf 10 Zatěžovací diagram zkušebního tělesa - Isofibre 1100.....	62
Graf 11 Zatěžovací diagram při zkoušce Stanovení absorbované energie	66
Graf 12 Diagram absorbované energie v závislosti na průhybu zkušebního tělesa, vyznačení výsledku zkoušky.....	66
Graf 13 Průběh objemových změn, receptura 1	74
Graf 14 Průběh objemových změn, receptura 2	76
Graf 15 Průběh objemových změn, receptura 3	78
Graf 16 Průběh objemových změn, receptura 4	80
Graf 17 Průběh objemových změn, receptura 5	82
Graf 18 Průběh objemových změn, receptura 6	84
Graf 19 Průběh objemových změn, receptura 7	86
Graf 20 Průběh objemových změn, receptura 8	88
Graf 21 Průběh objemových změn, receptura 9	90
Graf 22 Průběh objemových změn, receptura 10	92
Graf 23 Znázornění velikosti objemových změn – expanze a smrštění	94
Graf 24 Porovnání vlivu různých typů vláken na objemové změny.....	95
Graf 25 Porovnání vlivu různých typů vláken na objemové změny - detail 24 h	96
Graf 26 Časová osa měření objemových změn	98
Graf 27 Vyznačení termínů výkyvů měření	99

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Jmenovité hodnoty neomezeného poměrného smrštění vysycháním (%) [30].....	19
Tabulka 2 Složení receptur.....	32
Tabulka 3 Výsledky zkoušek čerstvého betonu	42
Tabulka 4 Porovnání pevností v tlaku.....	44
Tabulka 5 Pevnost v tahu ohybem	46
Tabulka 6 Pevnost v tahu ohybem – přepoččet	47
Tabulka 7 Srovnání pevností v příčném tahu.....	48
Tabulka 8 Tabulka pevností na mezi úměrnosti, zbytková pevnost.....	54
Tabulka 9 pevnost v tahu – osový tah.....	59
Tabulka 10 Výsledky zkoušky Stanovení absorbované energie	67
Tabulka 11 hodnoty smrštění jednotlivých receptur	93

SEZNAM VZORCŮ

Vzorec 1 Rovnice karbonatace	18
Vzorec 2 Stanovení celkového smrštění	19
Vzorec 3 Stanovení autogenního smrštění podle [30]	19
Vzorec 4 Štíhlostní poměr ocelových drátků.....	22
Vzorec 5 Přepoččet pevnosti v tahu ohybem pro vláknobeton	47

CÍLE PRÁCE

V teoretické části bude provedena rešerše na téma smršťování betonu, vlastnosti a použití různých druhů vláken. Současně budou zmíněny výsledky vědeckých prací zabývajících se tématem vláknobetonů z ČR a ze světa.

V praktické části bude navržena receptura betonu, kde budou použity různé druhy vláken. Budou provedeny zkoušky v čerstvém a ztvrdlém stavu betonu. Budou provedeny jak zkoušky normové, tak i nenormové, některé normové zkoušky budou použity pro jiný druh vláken, než je v normě uveden. Pro tahovou pevnost bude použito více typů zkoušek, kdy budou porovnány výsledky v rámci dané zkoušky bez přesahu do zkoušek jiných. Výsledky zkoušek bude popsán vliv jednotlivých druhů vláken na vlastnosti betonu.

TEORETICKÁ ČÁST

Použitím vláken do betonu se snažíme tradičnímu betonu upravit nebo vylepšit jeho vlastnosti. Použití vláken do betonu není věc nová, avšak stále není zcela běžnou praxí. Existují již případy, kdy se vlákna do betonu přidávají standardně. Zde je řeč o kovových vláknecích, která se používají při betonování průmyslových podlah anebo v podzemních stavbách. Dále jsou vlákna používána v tenkostěnných konstrukcích, používají se jako příměs do samozhutnitelných betonů. Výzkum vlivu vláken různých typů na vlastnosti betonu je dlouhodobý a časově i finančně náročný úkol, kdy lze přidávat nebo ubírat různé množství vláken nebo zkoumat chování jejich kombinací v různých poměrech. Množství vláken se může lišit podle typu konstrukce, ve které má být beton uložen nebo podle ročního období, ve kterém je betonáž prováděna. Zatím ne moc častou možností je využití vláken v betonu jako částečná náhrada klasické žebírkové výztuže. V literatuře [32] se uvádí možnost výroby prefabrikovaných vláknobetonových prvků jako jsou mostní římsy, obrubníky, kanalizační trouby aj. Autor v [3] zmiňuje, že vláknobeton je nejlepší možnou volbou pro omezení růstu trhlin od vzniku tahových napětí při různých druzích smrštění. Pozorování vlivu různých typů vláken na objemové změny bude i jedním z témat experimentální části této práce.

1 Smrštění betonu

Smrštění betonu je komplexní jev, u kterého je potřeba brát v úvahu jednotlivé vlivy a procesy, které v betonu mohou nastat. Samovysychání a odpařování probíhá v cementové pastě. Další objemové změny, i když ne významné, se mohou projevit v kamenivu. Celkové smrštění (objemové změny) je tedy vztaženo k objemové změně cementové pasty a teplotní objemové změně, které podléhá jak cementová pasta, tak kamenivo. Teplotní objemová změna je větší u cementové pasty. Zrna kameniva brání kontrakci zdánlivého objemu. Proto je jednou z cest, jak zabránit smrštění, použitím kameniva s vyšším obsahem hrubé frakce. Vlivem stěnového efektu, kdy je u stěny bednění více cementové pasty, bude vždy tato vrstva vykazovat větší hodnotu smrštění než uvnitř betonu.

Celkové smrštění betonu je potom součtem autogenního smrštění, teplotního smrštění a smrštění odparem. Velikost karbonatačního smrštění je pro potřeby teoretického výpočtu zanedbatelné. Dalším aspektem, který může mít vliv na tvorbu trhlin, je vodní součinitel. Čím je vodní součinitel vyšší, tím je hrubší kapilární systém. Voda je z hrubších kapilár snadněji odváděna, protože je vázána menšími kapilárními silami. Voda tedy už nebude úplně vyplňovat kapiláry a dojde ke vzniku menisků. Ve velkých kapilárách nejsou síly, kterými menisky působí na stěnu kapiláry, moc velké, takže ani autogenní smrštění není tak velké. Pokud se však voda z velkých kapilár spotřebuje na hydrataci, začne do větších kapilár migrovat voda z kapilár menších. Tím může dojít k nárůstu tahových napětí a vývinu vyššího autogenního smrštění. Primárně však dochází k odpařování vody z povrchu čili i tento typ smrštění je u běžných betonů dominantní. [2]

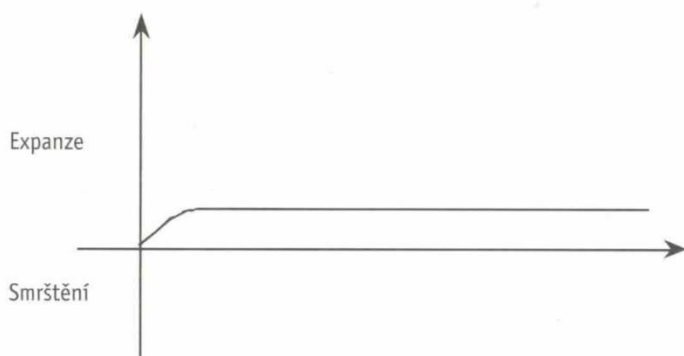
1.1 Vlhkostní smrštění (vysychání)

Tento typ smrštění je způsoben migrací vody v kapilárách. Migrace vlhkosti souvisí s kapilární pórovitostí a vlhkostí okolního prostředí. Vypařování vody z kapilár probíhá tak dlouho, dokud

není vytvořena rovnováha mezi vlhkostí vzduchu a vlhkostí cementové pasty. Při různých vlhkostech vzduchu mohou kapiláry v závislosti na jejich průměru obsahovat vzduch anebo zkondenzovanou vodu. Zvlhčování a vysušování kapilár je potom příčinou reversibilního smrštění, které představuje asi 2/3 celkového smrštění cementového kamene způsobené migrací vlhkosti. [1]

1.2 Chemické smrštění

Tento typ smrštění je spojen se změnou zdánlivého a absolutního objemu. Hydratací cementu začínají v cementové pastě vznikat hydráty cementových minerálů. Vzniklé hydráty mají menší objem, než je počáteční objem cementu a vody. Zatímco absolutní objem klesá, zdánlivý objem nemusí nutně klesat taktéž. **Pokud je beton na počátku ošetřován stále pod vodou, dochází spíš k zvětšování zdánlivého objemu.** Tento jev je způsoben růstem krystalů *ettringitu* a *portlanditu*, které vznikají na počátku tvrdnutí betonu, nebo bobtnáním *C-S-H gelu* v důsledku adsorpce vody (Obrázek 1). V této fázi je beton stále plastickým materiálem s velmi slabou kohezí. Růst uvedených krystalů vzdaluje ostatní pevné složky od sebe až do doby, kdy tahová pevnost betonu je vyšší než tlak vyvozený růstem krystalů. Protože však v reálných podmínkách **není možné zajistit kompletní proces tvrdnutí betonu pod vodou**, dochází k samovysychání a odpařování vody do okolního prostředí, během kterého **klesá zdánlivý objem betonu**. Tento jev se nazývá smrštění vysycháním. [2]



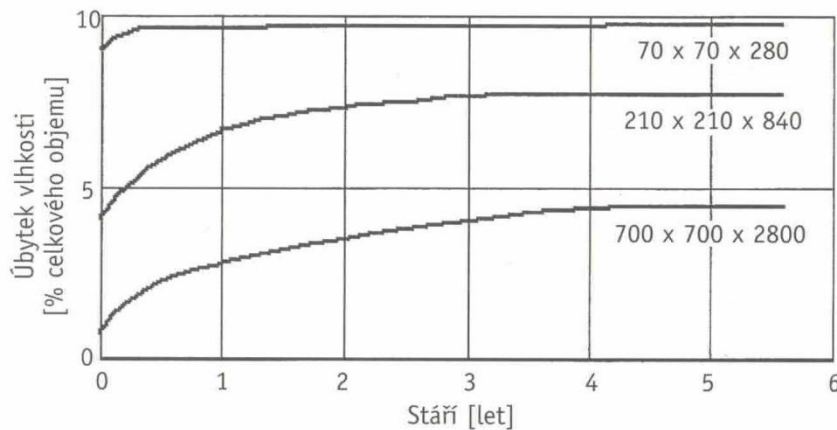
Obrázek 1 Křivka vývoje zdánlivého objemu betonového vzorku [2]

1.3 Samovysychání betonu

Samovysychání je důsledkem odpařování vody obsažené v systému kapilár, které jsou spojeny s povrchem betonu. Toto odpařování vody směřuje k vyrovnání vlhkosti v kapilárách a vlhkosti okolního vzduchu. Nejdříve opouští voda větší kapiláry, které jsou při povrchu betonu. Zde se voda odpařuje snadněji, protože je ke kapilárám vázána menšími kapilárními silami. Jak postupně v betonu vody ubývá, odpařuje se stále z menších kapilár, zde je však voda vázána většími kapilárními silami. Proto je pro vodu v čase stále těžší se z kapilár odpařovat (Obrázek 2).

Celkový úbytek hmotnosti (vlhkosti) pak závisí na tvaru vzorku, celkovém objemu pórů, velikosti pórů, jejich propojenosti, tvaru a vlhkosti okolního prostředí. Odpařování vody přímo závisí na průměru kapilár, respektive velikosti kapilárních sil. Pokud jsou kapilární síly menší než tahová pevnost betonu, probíhá v betonu plastické smrštění. **Pokud jsou kapilární síly**

větší než pevnost betonu v tahu, zatvrdlá cementová pasta začíná prskat. Pokud je beton ošetřován pod vodou, neexistují v něm prázdné kapiláry, protože jsou zaplňovány vodou. Nedochází k tvorbě menisků, nedochází k autogennímu smrštění betonu, nevznikají trhliny. Samovysychání pak pozorujeme v celém objemu neošetřovaného betonu jako součást hydratace, naproti tomu odpařování je jev, který nastává na povrchu betonu a poté se šíří hlouběji do konstrukce. [2]



Obrázek 2 Úbytek hmotnosti vzorků různého rozměru v relativní vlhkosti prostředí 55 % [2]

1.4 Teplotní smrštění

Beton, stejně jako ostatní materiály, podléhá teplotní objemové kontrakci. Na rozdíl od ostatních materiálů se však chemické a mechanické vazby tvoří za vyšší teploty, než v jaké bude následně konstrukce uložena po zbytek životnosti. Hydratace je exotermická reakce. Vlivem dobře známých fyzikálních zákonitostí je možné dopředu předpokládat velikost teplotních změn v betonu. [2]

1.5 Plastické smrštění

O plastickém smrštění mluvíme v případě, kdy se z povrchu čerstvého betonu odpařuje záměsová voda. Nastává v případě, kdy je vlhkost prostředí nižší než 95 % a povrch konstrukce je vystaven povětrnostním vlivům, tj. vysoká teplota vzduchu a vítr nebo pokud je voda odváděna nasávkavým podkladem. **O plastickém smrštění mluvíme v tom případě, kdy je beton ještě v plastickém stavu, tj. cca 10-12 hodin po uložení betonu.** K tvorbě mikrotrhlin potom může dojít v případě, že je vnitřní napětí od odpařování vody vyšší než tahové napětí betonu. Plastickému smrštění lze předcházet ošetřováním povrchu betonu. Na beton může být použit ochranný vodonepropustný nástřík nebo může být zakryt nasávkavou fólií, která je neustále zvlhčována. [3]

1.6 Smrštění vysycháním

Na smrštění vysycháním může mít vliv mnoho faktorů. Ať už se jedná o různé příměsi a přísady nebo přímo složky betonové záměsi.

Voda, pokud neobsahuje velké množství škodlivých látek, nemá velký vliv na smrštění vysycháním. Volbou cementu lze částečně ovlivnit smrštění vysycháním, např. pokud cement obsahuje látky regulující rychlost tuhnutí.

Kamenivo použité v betonové záměsi může ovlivnit smrštění vysycháním poměrně výrazně. Pokud je ve záměsi hutná kostra tvořená kamenivem, kamenivo pak brání smrštění hydratujícím cementovým zrnům.

Použití superplastifikátorů, které pomáhají ke zpracovatelnosti betonové záměsi, výrazně redukuje smrštění vysycháním. Naopak použití provzdušňovací přísady smrštění vysycháním zvyšuje, protože beton obsahuje velké množství pórů naplněných vzduchem a tím snižují pevnost betonu.

Použití minerálních, příměsí, jako jsou pucolány nebo vysokopepční granulovaná struska, zvyšuje smrštění vysycháním v případě, že jich je použito ke zvýšení objemu cementové pasty. Naopak použití mletého vápence smrštění snižuje, protože zvyšuje pevnost v tlaku – působí spíše jako kamenivo než jako pojivo.

Stálá ochrana povrchu betonu keramickým obkladem nebo epoxidovým nátěrem může snižovat smrštění vysycháním. **Ochranné nátěry**, které se používají v prvních dnech po uložení betonu do konstrukce, nemají vliv na dlouhodobé smrštění vysycháním, ale **mají velký vliv v počátku tvrdnutí, tuhnutí a zrání betonu**. Zejména pak mají velký vliv v prostředí s nízkou relativní vlhkostí. To je důležité pro růst pevnosti a nízkou pórovitost betonu. Z hlediska smrštění vysycháním ale nelze jednoznačně prokázat vliv delšího ošetřování povrchu betonu na smrštění vysycháním, protože delší ošetřování redukuje množství nezhydratovaných zrn cementu, která působí jako překážka smrštění.

Pokud je však beton s vodním součinitelem alespoň 0,45 trvale chráněn před vysycháním, např. v uzavřených formách anebo je opatřen ošetřovacím nástřikem, nebude voda z betonu unikat. Stejně tak pokud bude beton v prostředí s relativní vlhkostí vyšší než 95 %, nebude docházet ke smrštění vysycháním. Pokud bude beton ukládán pod vodou, bude bobtnat. Molekuly vody se totiž budou dostávat mezi vrstvy C-S-H gelu, což přispívá k expanzi. Touto expanzí nedochází k porušení betonu ze dvou důvodů, prvním je velmi malá hodnota expanze, pohybující se v hodnotách maximálně 200-300 μm , druhým důvodem je tlakové napětí, které je vyvolané působením mezi betonem a výztuží nebo jinými překážkami, a je mnohem menší než tlaková pevnost betonu. [3]

1.7 Autogenní smrštění

Aby se zabránilo autogennímu smrštění, musel by být beton ošetřován vodou co nejdéle dobu. Betony s vodním součinitelem pod 0,4 musí být ošetřovány minimálně 3 dny a musí být ošetřovány vodou ihned po počátku tuhnutí.

Autor [3] uvádí, že autogenní smrštění je u betonu s vodním součinitelem nad 0,45 zanedbatelné, ale u betonů s vodním součinitelem kolem 0,2 může dosahovat až 700 $\mu\text{m}/\text{m}$. V tomto případě nastává jev, který se nazývá samovysychání. To nastává během hydratace betonů s nízkým

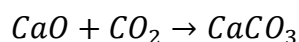
vodním součinitelem, které jsou ošetřovány nástřikem nebo obaleny folií. V cementové matrici vznikají póry, protože objem cementu a vody je větší než objem produktů, které z nich vznikly. Tyto póry nejsou zaplněny vodou. Chemické smrštění je vyvoláno hydratací slínkových minerálů, ale je daleko výraznější v případě purolánové reakce, která nastává mezi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a mikrosilikou. Tím se vysvětluje, proč je tento typ smrštění tak významné pro betony s nízkým vodním součinitelem a zároveň příměsí mikrosiliky. V betonu pak dochází k migraci vody do těchto nezaplňených pórů a **vlivem povrchového napětí se zde tvoří menisky**. Síly vznikající na základě menisků mají tendenci kapiláru uzavírat, což je **příčina smrštění do samovysychání** (Obrázek 3). Toto smrštění vysycháním spolu s chemickým smrštěním představuje hlavní složky autogenního smrštění.



Obrázek 3 Ilustrace tvorby menisků vody (modře) a směr kapilárních sil (červeně), vlákna C-S-H gelu (bíle), která kapilární síly stahují k sobě a vzniká smrštění, upraveno z [3]

1.8 Karbonatační smrštění

Karbonatační smrštění vzniká působením karbonatace. Vyskytuje se na povrchu betonu vlivem působení vzdušného CO_2 . Smrštění vlivem karbonatace je měřitelné v řádu let. [1]



Vzorec 1 Rovnice karbonatace

2 Normový přístup k návrhu

Podle [30] kap. 2.3.2 a 2.3.3 jsou smrštění a dotvarování betonu časově závislé účinky, jež se mají zpravidla uvažovat při ověření mezních stavů použitelnosti. Při návrhu se však musí počítat s důsledky deformací vyvozených teplotou, dotvarováním nebo smrštěním. Minimalizace těchto vlivů musí být zohledněna např.:

- návrhem vhodné betonové receptury
- omezení deformací použitím ložisek nebo dilatačních spár

Pokud se požaduje uvažovat zatížení smrštěním, v mezních stavech únosnosti, použije se dílčí součinitel spolehlivosti (pro ČR roven 1,0).

Hodnota celkového poměrného smrštění je dána vztahem:

$$\varepsilon_{CS} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

Kde:

ε_{CS} celkové poměrně smrštění

ε_{cd} poměrné smrštění vysycháním

ε_{ca} poměrně autogenní smrštění

Vzorec 2 Stanovení celkového smrštění

Celkové poměrné smrštění vysycháním pro potřeby návrhu konstrukcí je uvedeno v [30].

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

Tabulka 1 Jmenovité hodnoty neomezeného poměrného smrštění vysycháním (%) [30]

Stanovení poměrného přetvoření od smrštění vysycháním je uvedeno také v příloze B normy [30].

Poměrné autogenní smrštění je dáno vztahem:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t)\varepsilon_{ca}(\infty)$$

Kde:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6}$$

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

t dáno ve dnech

Vzorec 3 Stanovení autogenního smrštění podle [30]

3 Vlákná

Vlákná se ve stavebnictví používají již dlouhou dobu. Vyztužování omítek nebo nepálených cihel rostlinnými stonky je věc již dlouho známá. V současnosti se běžně používají makrovlákna a mikrovlákna různých materiálů a velikostí – ocel, sklo, uhlík, různé druhy polymerů, dřevo. Vláknobeton lze zařadit jako krátkovláknový jednovrstvý kompozit s náhodně orientovanými-rozptýlenými vlákny, respektive všesměrně rozptýlená výztuž. Vlákná se v betonu využívají především pro omezení deformací od smrštění. Vyztužením vlákny se mohou zlepšit některé další mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu, zejména zvýšení pevnosti v tahu. Pevnost v tahu nevyztuženého betonu se pohybuje v hodnotě kolem 10 % pevnosti v tlaku.

3.1 Dělení vláken

3.1.1 Podle procesu výroby

- přírodní vlákna – stvolý rostlin, mořské řasy, piliny, třísky, hobliny, kokosové vlákno, azbest
- syntetická vlákna – celulosová, polymerová, skleněná, ocelová, čedičová

3.1.2 Podle uložení vlákna v cementovém kompozitu

- Dlouhovláknové kompozity – klasické železobetonové prvky, kde výztužné ocelové pruty tvoří usměrněná dlouhá vlákna
- Krátkovláknové kompozity – cementotřískové desky, cementovláknité desky, vláknobeton

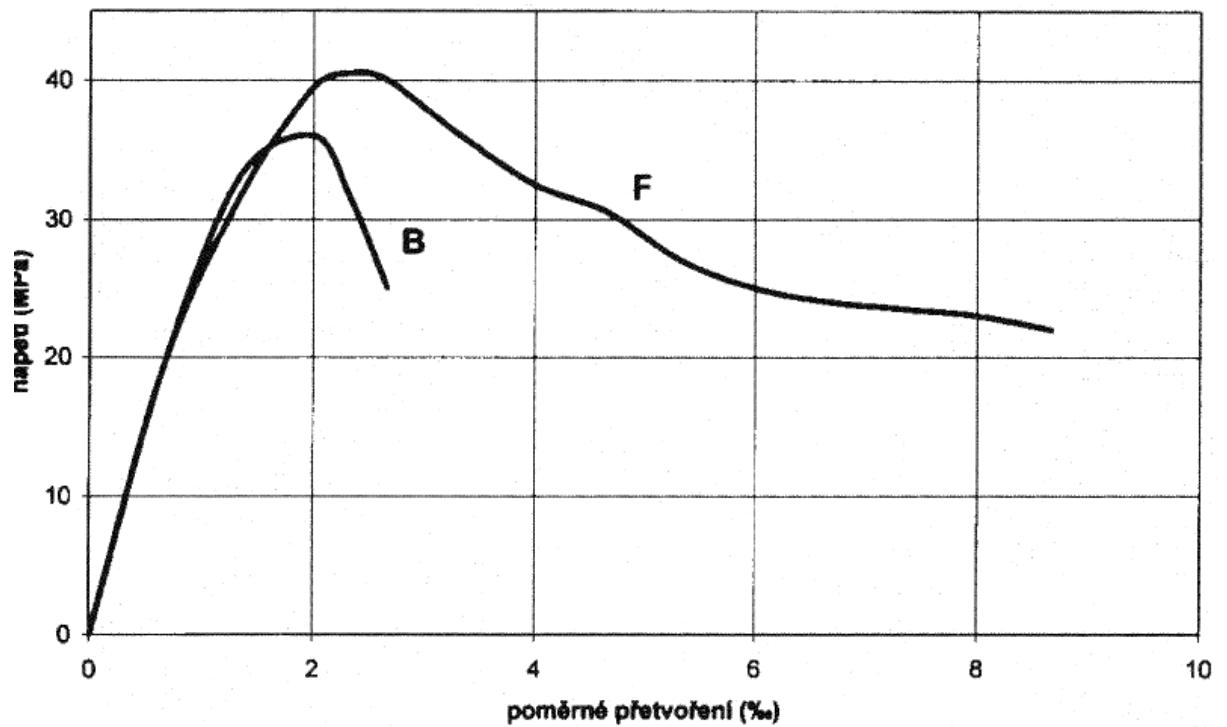
3.1.3 Podle průměru vlákna

- Mikrovlákna – průměr vlákna < 300 μm
- Makrovlákna – průměr vlákna > 300 μm

3.2 Druhy vláken podle materiálu

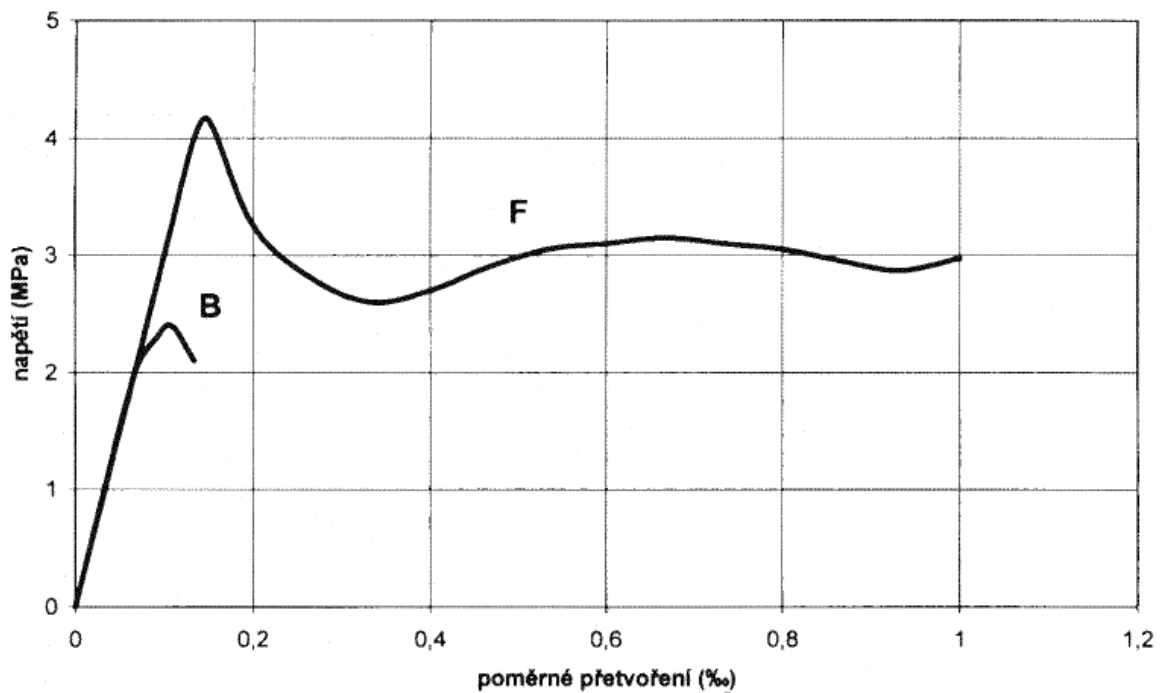
3.2.1 Ocelová vlákna

Mezi hlavní výhody ocelových vláken při jejich použití v kompozitu patří zvýšení pevnosti nejen v tlaku, ale především v tahu. Dále se uvádí větší odolnost vůči rázům. Vyšší pevnost v tahu i v tlaku je zřetelná ze srovnání diagramů pevnostních zkoušek na Obrázku 4 pevnost v tlaku (F – receptura s ocelovými vlákny, B – receptura bez vláken) a Obrázku 5 pevnost v tahu (F – receptura s ocelovými vlákny, B – receptura bez vláken).



Obrázek 4 Srovnání průběhu pevnosti v tlaku [4]

U pevnosti v tlaku vyplývá, že ocelová vlákna mají pozitivní vliv na hodnotu meze pevnosti. Dále je zřejmé, že je receptura s vlákny schopna přenášet reziduální napětí i po dosažení meze pevnosti, kdy po vzniku trhlin v betonu tato napětí přenáší drátky.



Obrázek 5 Srovnání průběhu pevnosti v tahu [4]

U pevnosti v tahu můžeme z diagramu vyčíst, že ocelová vlákna zvyšují pevnost v tahu téměř dvojnásobně. Dále po dosažení meze pevnosti dochází opět k aktivaci drátků, které jsou schopny přenášet další tahová napětí i po vzniku viditelných trhlin. Velikost napětí, která lze takto dále přenášet závisí dále na tvaru, množství a orientaci drátků v receptuře. Do betonu je vhodné užít drátky se zahnutými konci nebo drátky, které mají zdrsňenou povrchovou úpravu, aby s kompozitem lépe spolupůsobily. Soudržnost drátků v betonu je zajištěna tvarováním při výrobě - zvlňování, zkrucování.

Drátky by měly být delší než největší možná vzdálenost jednotlivých zrn hrubého kameniva. Z tohoto předpokladu je zřejmé, že je nutné navrhovat délku drátků v receptuře podle navrženého množství hrubého kameniva. Dle dostupných zdrojů [4] lze z výsledků zkoušek říct, že je vhodné použít drátky o délce 60 mm při podílu 50 % hrubého kameniva 8/16 z celkového množství použitého kameniva. Při míchání a uložení drátků do konstrukce by nemělo docházet k jejich přílišné deformaci, to by mělo být zajištěno uložení do konstrukce, jejíž nejmenší rozměr je dvakrát delší, než je délka drátků a také je nutné vzít v úvahu jejich štíhlostní poměr.

$$L/d \leq 100$$

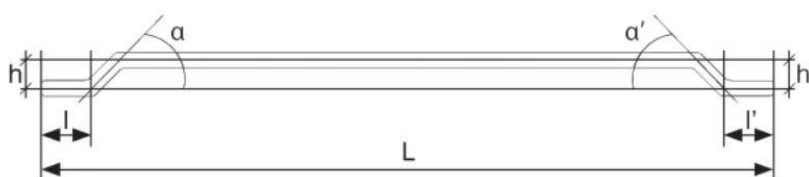
Vzorec 4 Štíhlostní poměr ocelových drátků

Výroba drátků pro použití v betonu se řídí normou [19].

Výrobci deklarují minimální tahovou pevnost ocelových vláken 1000 MPa.

Dávkování ocelových vláken se pohybuje v rozmezí 20-100 kg/m³. Jako příměs se dle technických listů má přidávat jako poslední složka, následně se musí dostatečně promíchat.

Výrobci v ČR – DOPS – vlákno Feramzit, zahnuté ocelové vlákno délky 50 mm, průměr 1,05 mm, Krampe Harex, tvarované ocelové vlákno délky 50 mm, 60 mm, průměr 1 mm, TriTreg, zahnuté ocelové vlákno délky 50 mm, průměr 1,05 mm, BASF, MasterFiber 482, ocelové mikrovláknem délky 13 mm.



Jmenovitý průměr (d)	1,05 mm	± 0,05 mm
Délka drátku (L)	50 mm	+2 mm / -3 mm
Délka ohybu (l a l')	1,5 – 4 mm	
Výška ohybu (h a h')	1,8 mm	+1 mm / -0 mm
Úhel ohybu (α a α')	45°	(min. 30°)
Pevnost v tahu (Rm)	min. 1000 Mpa	

Obrázek 6 Typický tvar ocelového makrovláknem a jeho rozměry [5]

3.2.2 Polypropylenová vlákna

Polypropylenová vlákna zamezují vzniku trhlin při smrštění betonu v čerstvém i ve ztvrdlém betonu. Zvyšují také rázovou pevnost. Základní rozdělení polypropylenových vláken podle způsobu výroby je na monofilamentní, fibrilovaná a sdružená.

Monofilamentní vlákna

Monofilamentní vlákna jsou vyráběna jednotlivě a následně jsou dělena na požadovanou délku. Tímto způsobem lze vyrábět mikro i makrovlákna. Monofilamentní mikrovlákna mají velký měrný povrch. Jejich vysoký počet v hmotnostní jednotce zajišťuje ve betonu jejich vysokou účinnost, zejména v plastickém stavu. K dosažení jejich účinnosti je tedy možná již malá dávka, obvykle do 1 kg/m³. Jejich vliv na zvýšení pevností je však zanedbatelný.

Monofilamentní makrovlákna mají větší průměr a obvykle strukturovaný povrch. Tím je jejich soudržnost v betonu lepší a i díky vyšší dávce, která se pohybuje kolem 4,5 kg/m³, tak významně přispívá k vyšší pevnosti betonů, v kterých jsou tato vlákna použita.

Fibrilovaná vlákna

Vyrábějí se rozvlákňováním upravené plastové fólie, která poté získá fibrilní/vláknitý charakter.

Sdružená vlákna

Vlákna vyrobená způsoby popsanými výše, ale sdružováním vláken obou typů vznikají další sdružené svazky.

Vlastnosti polypropylenu

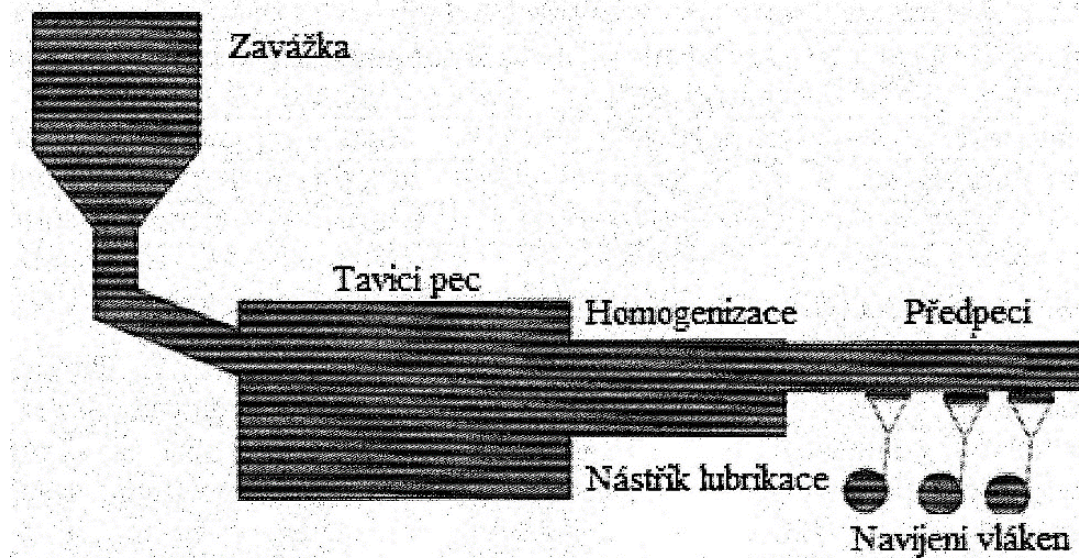
- Odolný vůči většině kyselin a alkálií
- Dobře odolává biologickému působení
- Má nulovou nasákavost, jeho vlastnosti se tedy nemění v závislosti na jeho vlhkosti
- Teplota měknutí je 140-160°C, teplota tavení je 165-175°C

3.2.3 Skleněná vlákna

Skelná vlákna jsou poměrně dobře prozkoumaným odvětvím. Jsou poměrně levné a snadno dostupné. Jejich nedostatkem je korozní odolnost – vlákna jsou náchylná vůči vlhkosti. Skelná vlákna se používají mimo betonu i v dalších druzích matric – především epoxidové pryskyřice. Nejčastějším druhem skleněných vláken jsou vlákna vyráběná ze suroviny označované jako E sklo, která vykazuje vysoký elektrický odpor a dobrou tvárnost. Tato vlákna se získávají kontinuálními technologiemi, kdy se vlákna vytahují z platinových vaniček a navíjejí se na buben. Vzhledem k vysoké abrazivitě, lámavosti a nutnosti zachovat v kompozitních systémech odpovídající adhezi k použité matrici, jsou vlákna opatřena tzv. apretační vrstvou. Ta zlepšuje interakci mezi vláknem a matricí. Mezi další typy vláken patří S sklo. Tato vlákna vykazují vyšší pevnost v tahu a modul pružnosti než E sklo. Primárně byla S skla využívána pro vojenství letectví a raketových systémech. Dalšími druhy jsou D sklo a C sklo. Oba materiály mají horší mechanické vlastnosti než E sklo, D sklo má však nízkou relativní permitivitu, C sklo lepší chemickou odolnost než E sklo. L sklo je charakteristické přítomností olova, jež zvyšuje nepropustnost rentgenového záření. Tato vlastnost se využívá ve vojenství nebo lékařství.

Pro výrobu skelných vláken slouží bezalkalická sklovina, která se v podobě kuliček taví a vlastní tíhou protéká trysekou. Po opuštění trysek tuhne. Celý proces výroby pak začíná tavením vstupních surovin za teploty cca 1400 °C – křemičitý písek, vápenec, kaolín, dolomit, kyselina boritá a kazivec. Tímto postupem se vytvoří E sklovina, která se několik dní čirí. Poté se odvede do spřádacích trysek, ze kterých tato tavenina vytéká a tuhne ve tvaru vláken o průměru cca 2 mm. Takto vytvarovaná vlákna se poté dlužením kalibrují na požadované průměry. V průběhu výroby skelných vláken tažením z trysek jsou vlákna lubrikována. Tímto procesem se zlepšují jejich vlastnosti:

- Mazání vláken – lubrikace, zajišťuje alkalivzdornost v cementovém kompozitu
- Apretace – impregnace povrchu, zajišťuje adhezi v kompozitu
- Nanášení antistatik – odvádění elektrostatického náboje
- Vytváření filmu – ochrana vláken, spojování vláken do pramenů



Obrázek 7 Schéma výroby skelných vláken [6]

Do betonu se přidávají vlákna vyráběná ze skla typu E. Dávkování skelných vláken se obvykle pohybuje v rozmezí 1-5 kg/m³, podle typu, výrobce a použití vlákna v konstrukci není výjimkou ani dávkování až 70 kg/m³. Pevnost v tahu skelných vláken se pohybuje v řádu více než 1000 MPa. Skelná vlákna mají nejen pozitivní vliv na vývoj smrštění v betonu, ale také na mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu, zejména pevnost v tahu a duktilitu.

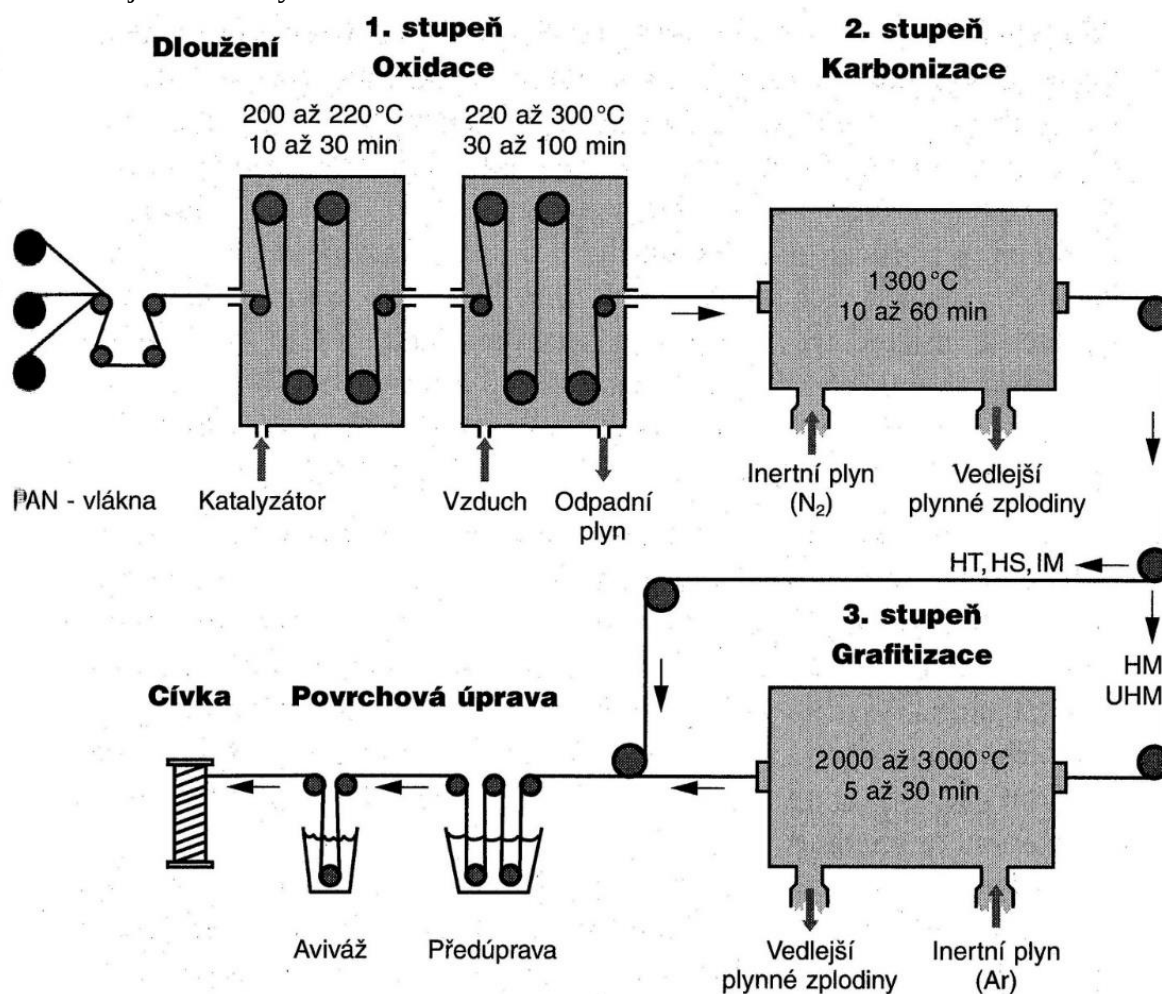
3.2.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se od ostatních vláken odlišují především výrobou. Uhlík není možné roztavit, je odolný vůči rozpouštědlům, vlákna jsou získávána pyrolýzou organických sloučenin. Nejčastějším materiálem pro výrobu uhlíkových vláken je polyakrylonitril. Vstupní surovina je shodně pro všechny druhy nazývána prekurzor. Výroba uhlíkových vláken se dá rozdělit do několika kroků: [7, 8]

- Příprava prekurzoru – zvláknování
- Stabilizace – vlákno se na vzduchu zahřeje na teplotu kolem 200-300°C na 30-120 minut. Takto do sebe vstřebá molekuly kyslíku, které molekulovou strukturu vlákna změní na více stabilní. Při tomto procesu vzniká vnitřní teplo, které je nutné odebrat.
- Karbonizace – stabilní vlákno je poté vystaveno teplotě 1000-3000°C v prostředí bez přístupu kyslíku. V tomto prostředí nemůže vlákno začít hořet, vstupní a výstupní body

jsou utěsněny, aby se kyslík nemohl dostat do komory. V komoře je udržován vyšší tlak než tlak mimo komoru. Při postupném zahřívání do maximální teploty vlákno začínají opouštět nekarbonové prvky, vodní pára a další prvky.

- Úprava povrchu – po karbonizaci nemá vlákno ideální povrch pro soudržnost v kompozitech. Proto je vlákno oxidováno. Oxidace zaručí lepší chemickou i mechanickou soudržnost s matricí. Vlákno je vystaveno působení různých prostředí, plyných např. vzduchu, oxidu uhličitého, ozón, kapalných např. chlornan sodný, kyselina dusičná. Úprava povrchu může proběhnout také elektrolyticky. Posledním krokem je ochranný nátěr a navíjení na cívky.



Obrázek 8 Schéma výroby uhlíkových vláken [9]

Hlavní typy dostupných uhlíkových vláken jsou: AS – Average Strength, HS – High Strength, HT – High Tenacity

Uhlíková vlákna se používají většinou v polymerních kompozitech, ale také v kovových, keramických nebo uhlíkových. Uhlík se významně používá obecně ve strojírenství při výrobě generátorů, lodí a hlavně v letectví. Uhlíková vlákna se také používají do betonů pro zvýšení odolnosti proti tlakové vodě, snížení elektrické vodivosti, zvýšení pevnosti. Dále se v betonu uhlíková vlákna používají ve formě uhlíkových kompozitních výztuží – sítí nebo prutů, kde je epoxidová nebo polymerní matrice vyztužená uhlíkovými vlákny. Významnými vlastnostmi uhlíku je nízká hmotnost, odolnost vůči korozi, pevnost v tahu vyšší než 2000 MPa.

3.2.5 Přírodní vlákna

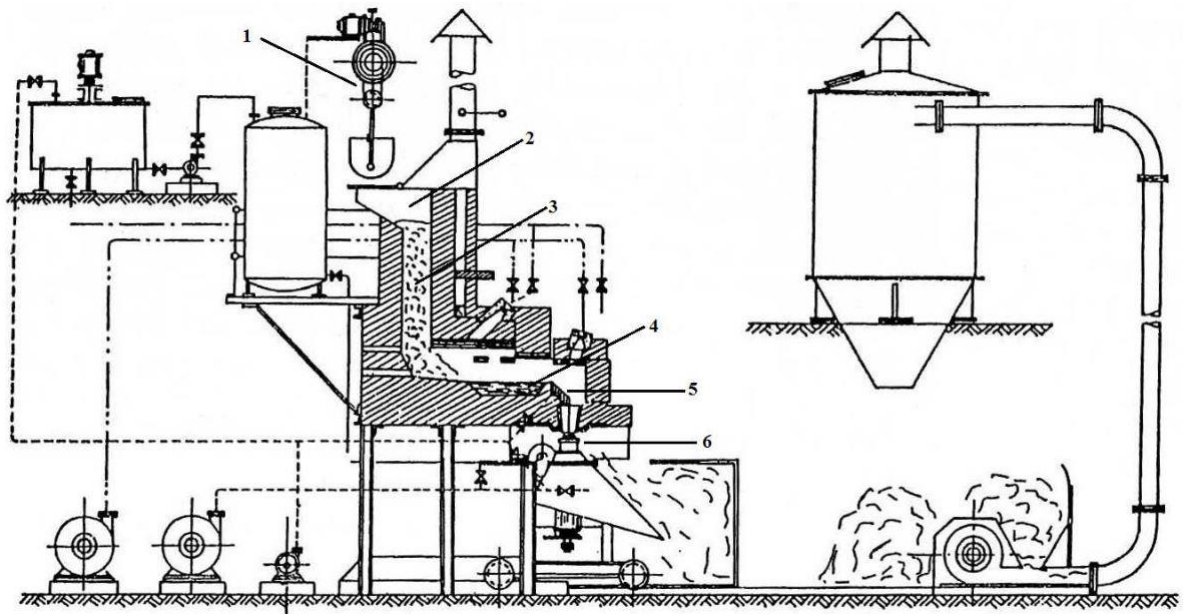
Mezi přírodní rostlinná vlákna lze zařadit len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlnu. Jsou to vlákna, která obsahují celulózu. Tyto vlákna se primárně používají ve vyztužování polymerů. Mezi jejich výhody patří nízká hmotnost a pevnost v tahu, kde dosahují hodnot 500–750 MPa. Mezi nevýhody patří závislost vláken na podmínkách jejich růstu, citlivost na vlhké prostředí, nákladná úprava vláken pro soudržnost s matricí.

3.2.6 Čedičová vlákna

Dalšími druhy přírodních vláken používaných ve stavebnictví jsou čedičová vlákna. Čedičová vlákna se vyrábí zkapalňováním vyvřelé horniny a následným rozvláknováním do nekonečných fibrilovaných vláken. Čedičová vlákna mají vyšší pevnost v tahu než ocel, lepší tepelně vodivé vlastnosti. Používají se jako tepelná izolace známé jako čedičová nebo kamenná vlna. Dalším využitím je ve formě čedičových kompozitních výrobků – sítě, pruty jako alternativní výztuž ke klasické ocelové žebírkové výztuži. Čedič se také vyrábí jako mikrovláknem, které se používá jako příměs do betonu. Čedičová vlákna se vyrábí různými způsoby.

Odstředivý způsob výroby

„Základní surovinou pro výrobu tímto způsobem je přírodní čedič bez přísad. Výroba odstředivým způsobem za použití rozvláknovacího kotouče je zobrazena na Obrázku 9. Rozdrcený a vytríděný čedič o velikosti 6-10 cm se naváží do násypky šachtové pece. Odtud čedič padá do šachty a v zahřátém stavu přichází na plošinu tavicího prostoru, kde se taví při teplotě 1300 °C a následně stéká po tavicí plošině do jímky. Zde nastává homogenizace a teplotní vyrovnání. Poté tavenina pokračuje přes přetokový můstek na střed rozvláknovacího kotouče.“ [10, 11]



Obrázek 9 Schéma výroby čedičových vláken odstředivým způsobem [10, 11]

Výroba vláken rozfoukáváním

„Způsob je stejný jako při výrobě skleněných vláken. Roztavená homogenizovaná tavenina čediče se vede do odporově vyhřívané platinové pícky, kde je rozdělena na několik proudů podle počtu výtokových trysek. Vytékající praménky přicházejí do parní dyšny, která je umístěna několik centimetrů pod platinovou píckou. Prudce proudící přehřátou párou je

pramének taveniny rozšlehána na jemné kapičky, ty se ve zlomcích vteřiny vytahují na jednotlivá vlákna. Odtahovou troubou, ve které jsou vlákna potřísněna lubrikačním prostředkem, je proud vláken veden k pletivovému dopravnímu pásu, na němž ulpí jednotlivá vlákna. Vzniklé zplstnělé rouno se navíjí na role nebo se lisuje do balíků. Někdy se rouno ihned dále zpracovává na výrobní lince, což je nejméně výhodnější varianta.“ [10, 11]

„Čedič je bohatě se vyskytující nerost zaujímající zhruba 30 % zemské kůry, který je vhodný k rozvlákňování. Čedič je velmi odolný a tvrdý materiál jemnozrné struktury. Je odolný vůči obrusu. Čedičová vlákna jsou složena z nekonečně dlouhých fibril, které vznikají z rozvlákňování taveniny čediče. Vlákna jsou velice ohebná, pevná a dobře využitelná ve všech odvětvích průmyslu. Čedičová vlákna vykazují výborné vlastnosti, mezi které patří:

- vysoká pevnost a vysoký modul pružnosti (čedič se svou pevností blíží uhlíkovým vláknům)
- nízká tepelná vodivost
- vysoká tepelná odolnost
- antikorozi vlastnosti
- výborné tepelně izolační vlastnosti
- výborná soudržnost s betonem
- vysoká chemická odolnost proti vodě, většině alkálií, organickým kyselinám, anorganickým kyselinám, organickým rozpouštědlům, většině chemikálií a jiným agresivním látkám
- vysoký elektrický odpor
- vysoký koeficient zvukové pohltivosti
- odolnost proti UV záření
- odolnost proti plísním a jiným mikroorganismům
- nehořlavost a nízký obsah spalin“ [10, 11]

Čedičová vlákna se dávkuje okolo 2 kg/m^3 . Pevnost čedičových vláken v tahu je více než 3000 MPa.

3.2.7 Konopná vlákna

Konopná vlákna patří do skupiny přírodních vláken. V poslední době stoupá jejich používání na oblibě. Pro použití v technické praxi se používá konopí seté, je to jednoletá rostlina, která dorůstá výšky 2-5 m. Používá se v textilním průmyslu pro výrobu textilií, plachet, lan. Z konopí se také vyrábí vláknité izolační desky používané k zateplení staveb. Pro různé druhy výrobků se používají různé části rostlin. Pro výrobky z vláken se používá obal stonku, vnitřní část stonku se nazývá pazdeří. Ve stavebnictví se používá jak vlákno, tak i pazdeří, popř. kombinace obojího. Nejčastěji se využívá pro výrobu izolačních desek o různé objemové hmotnosti, kdy deska s vyšší objemovou hmotností obsahuje více pazdeří. K roku 2010 byly v ČR funkční pouze 2 zpracovatelské tírny (prvzpracovatel) konopných stonků. [28] Dle [29] jsou konopná vlákna teplotně stálá, odolná UV záření. Pevnost v tahu se pohybuje 500-900 MPa

4 Současný stav poznání

Autoři se ve své práci [33] věnují úpravě konopných vláken před použitím v betonu. Máčením konopného vlákna v roztoku Ca(OH)_2 po dobu 14 hodin se zvýšily hodnoty mechanických

zkoušek (pevnost v tlaku, pevnost v tahu, CMOD) ztvrdlého betonu oproti receptuře bez ošetřených vláken máčením.

Autoři se v práci [34] zaměřili na stanovení optimální dávky konopných vláken do betonu a jejich vliv na pevnost v tahu. Provedli receptury bez vláken, potom receptury s obsahem 7, 10, 16, 20 % objemu betonové směsi. Délka vláken byla kolem 20 mm. Jako ideální dávka se ukázala 16 % objemu, kdy v porovnání s referenční směsí byla zaznamenána nejvyšší pevnost. Tuto dávku potom uplatnili i v dalších recepturách, kde byla vlákna upravena máčením v roztoku NaCl a $AlCl_3$, kde se pevnosti v tahu ještě zvýšily. Máčení v roztocích změnilo mikrostrukturu vlákna a zvýšilo jeho adhezi v betonu.

Autoři se v [35] věnují porovnání vlivu polypropylenových mikrovláken a polyolefinových makrovláken na mechanické vlastnosti betonu. Dávka vláken byla u obou typů stejná a to 1 % objemu betonu. Oba typy vláken byly délky 30-50 mm. Autoři práce vyrobili různě velká zkušební tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku. Dále stanovovali odolnost vůči kyselému prostředí, odolnost vůči chloridům, odolnost vůči sulfátům. Ve všech typech zkoušek dosahovala receptura s polyolefinovými vlákny nejlepších hodnot, ať se jednalo o zkoušku pevnosti nebo odolnosti v chemickém prostředí. Receptura v polypropylenovými vlákny byla v hodnocení zkoušek lepší než receptura bez vláken, ale horší než receptura s polyolefinovými vlákny.

Autoři práce [36] se zabývali vlivem množství a různých typů vláken na vlastnosti ztvrdlého betonu. Pro experiment zvolili tři druhy vláken a to kovová mikrovlákna délky 6 mm, kovová makrovlákna délky 30 mm, skleněná mikrovlákna délky 13 mm. Tato vlákna přidávali do záměsí v množství 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5, 2 % objemu. Testovali pevnosti v tlaku a v tahu ve stáří 7, 28, 56 90 a 180 dní. Oproti referenčním tělesům bez vláken měly všechny receptury s vlákny vyšší pevnosti až na skleněná vlákna ve stáří 180 dní, kdy receptury bez ohledu na množství vykazovaly v tomto stáří nižší pevnost než v 90 dnech. Nejvyšších pevností dosahovala kovová mikrovlákna následována kovovými makrovlákny, nejnižší pevnosti zaznamenala skleněná mikrovlákna.

Autoři práce [37] se zabývali vývojem betonu s kombinací makro polypropylenových a mikro čedičových vláken. Postupně vyrobili zkušební tělesa bez vláken, s obsahem pouze makrovláken v množství 0,3, 0,7 a 1,0 %, poté zkušební tělesa s obsahem pouze 0,1 % čedičových vláken, k nim postupně přidávali polypropylenová vlákna v množství 0,3, 0,7 a 1,0 %. Takto navržené množství vláken aplikovali do receptur návrhové pevnosti C30 (w/c 0,68) a C60 (w/c 0,45). Autoři zkoumali vliv přidaných vláken na konzistenci, kdy postupným přidáváním jednotlivých množství polypropylenových vláken lineárně klesala křivka hodnoty sednutí kužele. Přidáním čedičových mikrovláken pak křivka měla stejnou klesající tendenci, kdy hodnoty sednutí byly posunuté průměrně o 13 mm. Dále zjistili, že největší efekt na zvýšení pevnosti v tlaku po 28 dnech mělo přidání pouze čedičových vláken. Přidání různých množství polypropylenových vláken již nemělo velký vliv na zvýšení pevnosti, v některých případech byla pevnost v tlaku mírně menší než v receptuře pouze s čedičovými vlákny. V případě pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech jsou u receptur s obsahem 0,3 % polypropylenových vláken zaznamenány poklesy pevnosti oproti referenční, u ostatních objemových množství se pevnost zvýšila, po přidání čedičových vláken byla pevnost u každé receptury zvýšena o dalších cca 10 %.

Autoři práce [38] se zabývali vývojem betonu s kombinací mikro polypropylenových vláken a makro kovových vláken. V receptuře referenční nejprve nahradili 10 % množství cementu křemičitým úletem, do této upravené receptury pak přidávali samostatně 0,15, 0,3 0,45 % objemu polypropylenových vláken, poté samostatně 0,25, 0,5, 0,75 a 1,0 % objemu kovových vláken, v poslední řadě kombinaci vláken tak, aby celkový objem vláken byl maximálně 1% objemu. Kombinace vláken byly 0,15 PP + 0,85 KOV, 0,30 PP + 0,70 KOV, 0,45 PP + 0,55 KOV. Na zkušebních tělesech zkoušeli pevnost v tlaku, v tahu ohybem a pevnost v příčném tahu ve stáří 7, 28 a 91 dní. Na zvýšení pevností mělo v první řadě vliv nahrazení části cementu křemičitým úletem. Samotná polypropylenová vlákna měla vliv na zvýšení všech typů pevností. Největší vliv na zvýšení pevností měla kombinace vláken 0,15 PP + 0,85 KOV, která zaznamenala u pevnosti v tlaku nárůst o 13–18 % MPa, pevnosti v příčném tahu o 46–52 %, pevnost v tahu ohybem se zvýšila o 49–54 %. Nejmenší vliv na zvýšení pevností měla samotná polypropylenová mikrovlákna, kde nárůst pevností byl zaznamenán u pevnosti v tlaku o 5–12 %, pevnost v příčném tahu 11–13 %, pevnost v tahu ohybem 6–9 %.

Autor práce [39] používá pro zvýšení pevností v tlaku a tahu ocelová vlákna Masterfibre 482, která jsou taktéž použita v experimentální část této práce. Z autorovy práce vyplývá, že receptura, v které jsou použita tato vlákna, dosahuje nejvyšší pevnosti v tlaku ze všech jím zkoušených vláken.

Autoři práce [40] se věnují problematice smrštění UHPC, kdy kombinace vysoké dávky cementu a nízkého vodního součinitele způsobuje velké smrštění. Autoři pracují s návrhem vyztužení UHPC ocelovými vlákny. Do receptur postupně přidávají vlákna v množství 1, 1,5, 2, a 3 % objemu betonové směsi. Receptury s vlákny i bez vláken podrobili zkoušce stanovení objemových změn na stejném zařízení, které je použito v této práci. Z výsledků práce vyplývá, že čím je vyšší dávka ocelových vláken, tím je menší hodnota smrštění jak na začátku tak i celkově na konci sledovaného období.

Autoři se v [41] věnují srovnání skutečného smrštění a výpočtové predikci smrštění na základě různých predikčních modelů. Mimo jiné se věnují metodice popsané v [30]. Pro skutečné smrštění bylo použito betonů s ocelovými vlákny a gumovou drtí. Autory bylo potvrzeno, že metodiku predikce smrštění popsanou v [30] lze použít v predikci smrštění betonu běžných pevností. Pro vysokopevnostní betony metodika není použitelná i vzhledem k tomu, že nebyly splněny limity použitelnosti výpočtových modelů.

5 Praktické využití

V praxi se vláknobetonu dnes využívají v tenkostěnných konstrukcích, kde je použit UHPC, označován jako UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete). UHPC s vlákny se dále používá na zesilování konstrukcí. Další zcela běžným využitím vláknobetonů, respektive drátkobetonů, jsou betonové podlahy v průmyslových halách. Nahrazení drátku namísto tradiční výztuže má vliv na počet dilatačních spár, kdy hrany na spojích desek jsou namáhány přejezdy dopravních prostředků. Vláknobetonu jsou výhodné i z technologického hlediska, kdy není potřeba hlídat polohu tradiční výztuže při betonáži. Stříkané drátkobetonu (známé taky jako torkrety, torkretování) se využívají v podzemním stavitelství, kdy jsou využívány jako primární ostění. Vláknobetonu mohou být využity i v kombinaci s tradiční

výztuží, kde mohou působit jako vyztužení okrajových částí betonových prvků, kam již tradiční výztuž nedosahuje, navíc mohou částečně nahradit množství tradiční výztuže. Stříkané drátkobeton se dále využívají ke stavbě opěrných zdí, kde těsně přilnou k výkopu bez spár a kavern. Do budoucna je téměř jisté použití v konstrukčních betonech, kde bude část tradiční výztuže nahrazena vlákny.



Obrázek 10 Torkretování opěrné stěny [42]



Obrázek 11 Betonování průmyslové podlahy [43]

PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část se věnuje výrobě zkušebních těles a následným podstoupením zkoušek čerstvého i ztvrdlého betonu na recepturách s obsahem různých typů vláken. Pro většinu receptur s vlákny bylo zhotoveno:

- 6 ks krychlí 150x150x150 mm,
- 4 ks trámčů 100x100x400 mm,
- 4 ks trámčů 150x150x700 mm,
- 2 ks desek 600x600x100 mm.

Dále byla zhotovena tělesa přímo ve smršťovacím žlabu.

Na čerstvém betonu byly provedeny zkoušky Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu, Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu, Zkouška sednutím.

Na ztvrdlém betonu byly provedeny zkoušky Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, Stanovení pevnosti v tlaku, Stanovení pevnosti v tahu ohybem, Stanovení meze úměrnosti, zbytková pevnost, Osový tah, Stanovení kapacity absorbované energie, Stanovení smrštění.

Souhrn jednotlivých receptur nabízí Tabulka 2. U množství kameniva jednotlivých frakcí bude uvedena N/A. Množství kameniva použitého v recepturách je obchodním tajemstvím společnosti CEMEX. Proto nebude zveřejněno množství ani původ kameniva. V této bakalářské práci bude zveřejněn pouze hmotnostní poměr jednotlivých frakcí, a to $8/16 : 4/8 : 0/4 = 10 : 2 : 7$. Byl použit cement CEM II/A-M 42,5 R Prachovice.



Obrázek 12 CEM II/A-M 42,5 R Prachovice

označení receptury	typ vláken	CEM II/A-M 42,5 R Prachovice [kg/m ³]	voda [kg/m ³]	kamenivo 0/4 [kg/m ³]	kamenivo 4/8 [kg/m ³]	kamenivo 8/16 [kg/m ³]	podíl frakcí kameniva	superplastifikační přísada [kg/m ³]	vlákna [kg/m ³]	vodní součinitel
1 X- ref		330	230	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	-	0,70
2 Krampe Harex 50/1,2		330	230	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	30	0,70
3 Mapefibre ST 30		330	210	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	2	0,64
4 Masterfibre 482		330	180	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	60	0,55
5 Isofibre 1100		330	198,2	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	0,45	0,60
6 Mapefibre ST 50 Twisted		330	180	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	2	0,55
7 Orilimex 12 mm		330	203,2	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	1	0,62
8 Anticrak 67/36		330	188,9	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	10	0,57
9 Skelný prototyp		330	174,4	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	4	0,53
10 X - ref2		330	199,5	N/A	N/A	N/A	10:2:7	1,9	-	0,60

Tabulka 2 Složení receptur

5 Výroba zkušebních těles

Míchání čerstvého betonu a následná výroba zkušebních těles probíhala v zázemí akreditované laboratoře CEMEX Pardubice. Výroba zkušebních těles probíhala podle kapacitních možností akreditované laboratoře CEMEX. V jednom termínu byly zhotoveny nejčastěji 2 receptury s různým typem vláken. Množství vláken do receptury bylo vždy zvoleno jako střední hodnota doporučeného dávkování výrobcem.

Postup při výrobě zkušebních těles byl dodržen stále stejný. Do vertikální míchačky s nuceným oběhem (Obrázek 13) bylo vsypáno odvážené kamenivo všech frakcí. Toto kamenivo bylo určitou chvíli mícháno samostatně, aby se směs kameniva promíchala. Poté byl přidán cement a větší část záměsové vody. Po promíchání byla se zbytkem záměsové vody vmíchána superplastifikační přísada. Jako poslední se do míchačky přidala odvážená vlákna.

Po dostatečném promíchání čerstvého betonu byla provedena zkouška sednutím [20]. (Obrázek 14, Obrázek 15) Další zkouškou čerstvého betonu byla provedena objemová hmotnost čerstvého betonu [21] a obsah vzduchu v čerstvém betonu [15]. (Obrázek 16) Výsledky zkoušek čerstvého betonu jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 3.

Po provedených zkouškách čerstvého betonu následovalo plnění forem, hutnění betonu ve formách bylo prováděno na vibračním stole s výjimkou velkoformátových těles 600 x 600 x 100 mm pro zkoušku Stanovení kapacity absorbované energie. Způsob hutnění je popsán v kapitole 6.2.6.



Obrázek 13 Vertikální míchačka s nuceným oběhem



Obrázek 14 navlhčený Abramsův kužel před zkouškou sednutím na navlhčené podložce



Obrázek 15 Zkouška sednutí



Obrázek 16 Stanovení obsahu vzduchu v ČB

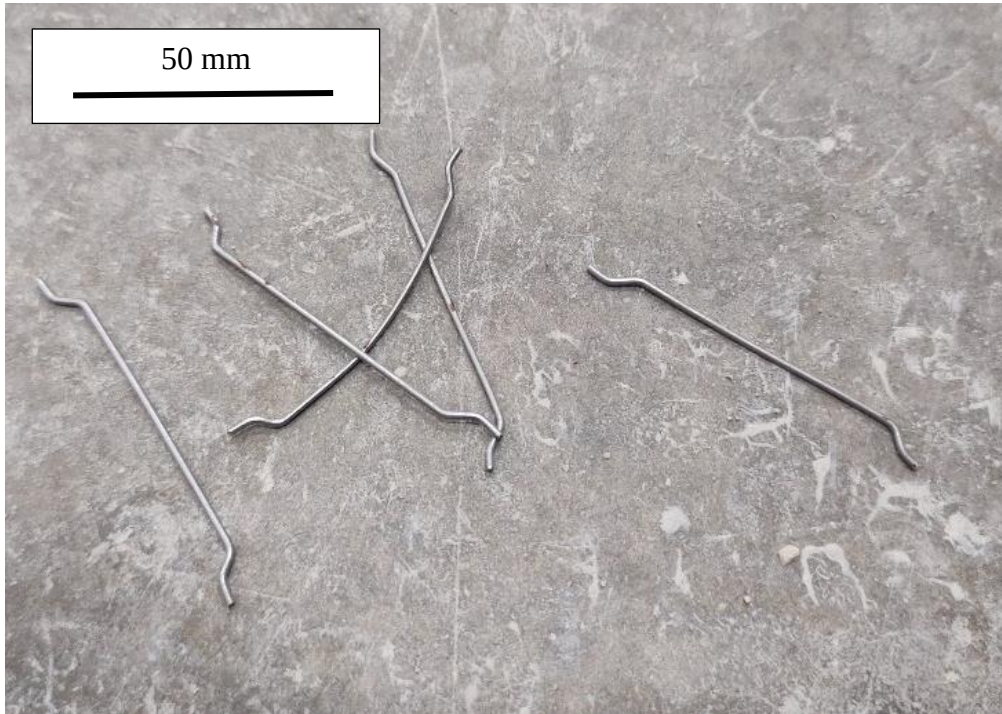
Jako první byla připravena referenční receptura č. 1 bez vláken. Na této záměsi bylo mimo jiné úkolem upravit množství záměsové vody tak, aby konzistence po zkoušce sednutí Abramsovým kuželem dosáhlo třídy S4 při hodnotě 200-220 mm. Po navážení a smíchání všech vstupních surovin byla provedena zkouška sednutí Abramsovým kuželem. První hodnota sednutím byla stanovena na třídu S3 (150 mm). Proto bylo rozhodnuto o přidání záměsové vody v navýšeném množství 50 kg/m^3 . Po řádném smíchání přidané vody se záměsí v míchačce se již povedlo docílit požadované třídy S4 při sednutí 200 mm. Podíl jednotlivých složek je uveden v tabulce 1. Dále byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu a obsah vzduchu v čerstvém betonu. Z této záměsi bylo zhotoveno celkem 10 ks zkušebních těles, a to 6 ks kostek $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ a 4 ks trámčů $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$.

Referenční receptura byla připravena ještě jednou, jako poslední záměs č. 10. K tomuto bylo přistoupeno z důvodu výroby zkušebních těles pro zkoušku osový tah a mez úměrnosti, které nebyly vyrobeny při přípravě receptury 1. Zároveň bylo v receptuře 10 použito méně záměsové vody než u receptury 1, aby konzistence čerstvého betonu odpovídala ostatním recepturám, ve kterých byla použita vlákna. Sednutí upraveného referenčního čerstvého betonu bylo 170 mm.

5.1 Receptura 2

V další záměsi č. 2 byla přidána ocelová makrovlákna Krampe Harex 50/1 o délce 50 mm. Přidáním vláken byla očekávána změna konzistence, kdy se toto očekávání potvrdilo. Přidaná

vlákna změnila hodnotu sednutí Abramsovým kuželem na 170 mm, stupeň konzistence S4. Byly provedeny stejné zkoušky čerstvého betonu jako u referenční záměsi, bylo zhotoveno 16 zkušebních těles, oproti referenční záměsi byly zhotoveny navíc 4 ks trámů 150x700x700 a 2ks desek 600x600x100 mm.



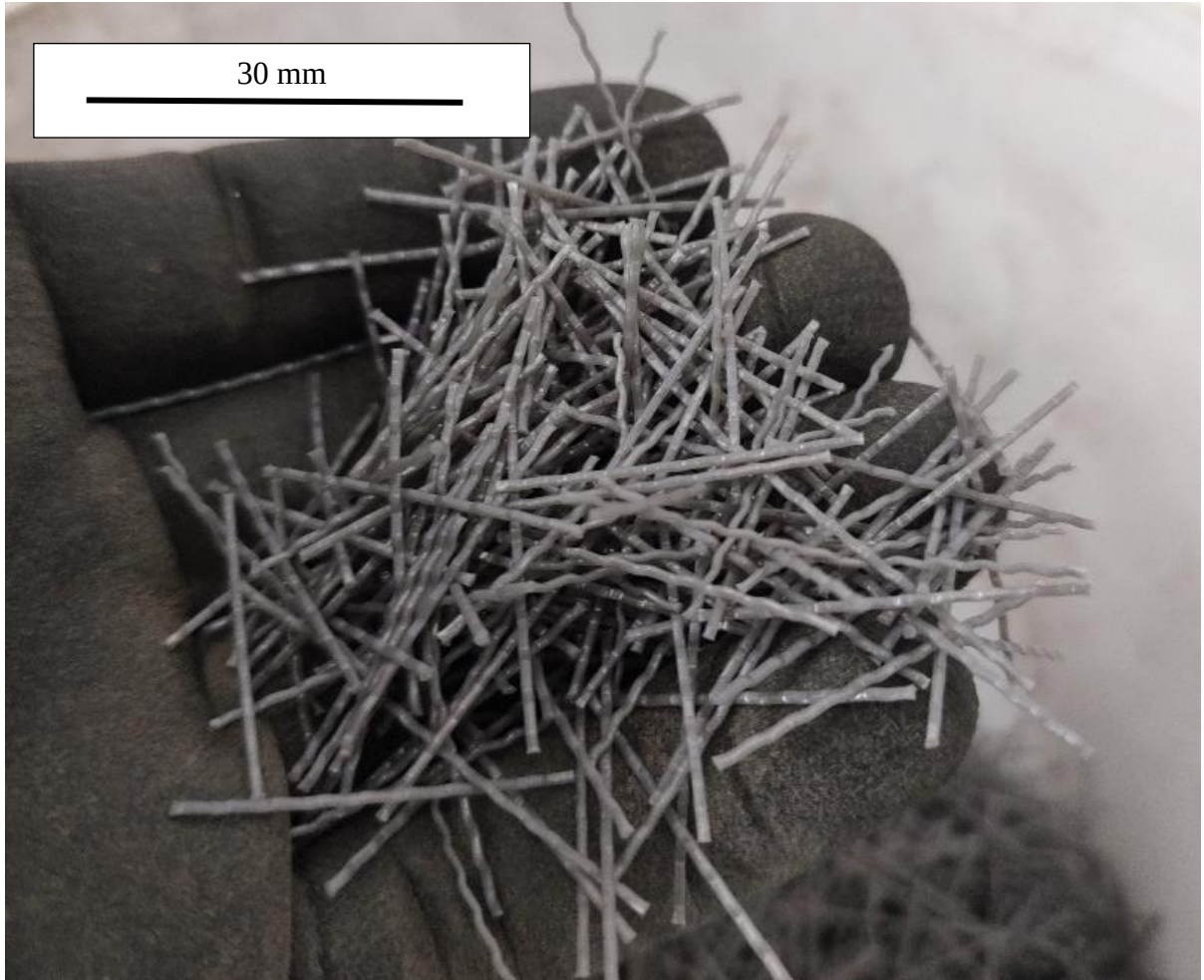
Obrázek 17 Kovová makrovlákna Krampe Harex



Obrázek 18 Plnění formy, všesměrně rozptýlená vlákna Krampe Harex

5.2 Receptura 3

V záměsi č. 3 byla přidána polymerová makrovlákna Mapefibre ST 30 délky 30 mm. U této záměsi byla opět nižší hodnota sednutí oproti referenční a to 170 mm, stupeň konzistence S4. Bylo vyrobeno stejné množství a typy těles jako u záměsi č. 2.



Obrázek 19 Polypropylenová makrovlákna Mapefibre ST 30

5.3 Receptura 4

Záměs č. 4 obsahuje ocelová mikrovlákna vlákna Masterfibre 482 o délce 13 mm. Sednutí kužele 80 mm, stupeň konzistence S2.



Obrázek 20 Masterfibre 482



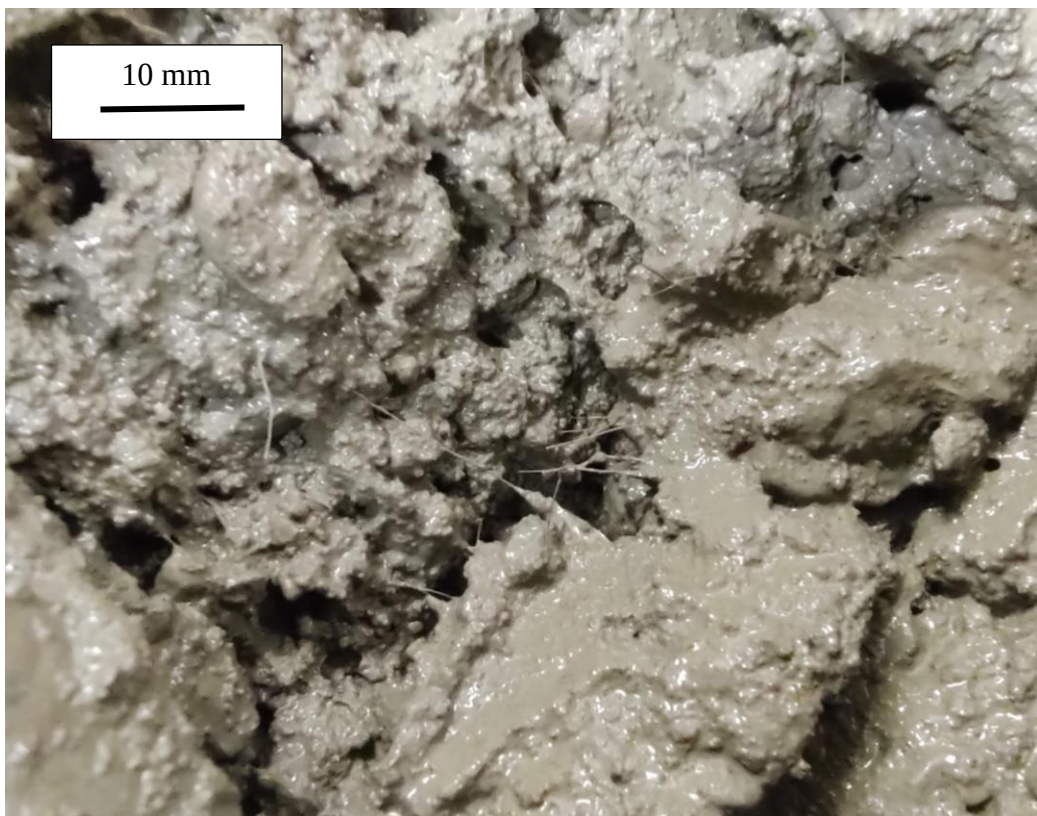
Obrázek 21 Masterfibre 482 rozptýleno ve směsi – foto Ing. Šmíd, CEMEX

5.4 Receptura 5

Záměs č. 5 obsahuje konopná mikrovlákná Isofibre 1100 o délce 13 mm. Sednutí kužele 110 mm, stupeň konzistence S3.



Obrázek 22 Isofibre 1100



Obrázek 23 Isofibre 1100 rozptýleno v čerstvém betonu

5.5 Receptura 6

V záměsi č. 6 byla použita polyolefinová makro vlákna Mapefibre ST 50 Twisted o délce 50 mm. Sednutí kužele 90 mm, stupeň konzistence S2.



Obrázek 24 Mapefibre ST 50 Twisted



Obrázek 25 Mapefibre ST 50 Twisted rozptýleno v čerstvém betonu

5.6 Receptura 7

V záměsi č. 7 byla použita čedičová mikro vlákna Orlimex Orlitech Basalt fiber 13-12p o délce 12 mm. Sednutí kužele 100 mm. Stupeň konzistence S3.



Obrázek 26 Čedičové mikrovláknó Orlimex

5.7 Receptura 8

V záměsi č. 8 byla použita skleněná makro vlákna Owens Corning Anti crack 67/36 o délce 36 mm. Sednutí kužele 80 mm. Stupeň konzistence S2.



Obrázek 27 Skelné vlákno Anti crack 67/36 [31]

5.8 Receptura 9

V záměsí č. 9 byla jako vlákna použita vyvíjená skleněná vlákna, která jsou kombinací makro a mikrovláken. Sednutí kužele 100 mm. Stupeň konzistence S3.



Obrázek 28 Skelný prototyp vláken, foto Ing. Šmíd, CEMEX

V následující tabulce jsou seřazeny výsledky zkoušek čerstvého betonu.

označení směsi	typ vláken	sednutí kužele [mm]	stupeň konzistence sednutím	objemová hmotnost ČB [kg/m ³]	obsah vzduchu v ČB [%]
1	X- ref	200	S4	2240	2,5
2	Krampe Harex 50/1,2	170	S4	2250	3
3	Mapefibre ST 30	170	S4	2250	3,2
4	Masterfibre 482	80	S2	2310	3
5	Isofibre 1100	110	S3	2260	3,4
6	Mapefibre ST 50 Twisted	90	S2	2290	2,6
7	Orlimex 12 mm	100	S3	2270	3,5
8	Anticrak 67/36	80	S2	2270	2,9
9	Skelný prototyp	100	S3	2200	5,6
10	X - ref2	170	S4	2270	3

Tabulka 3 Výsledky zkoušek čerstvého betonu

6 Vyhodnocení naměřených dat

Zkoušky ztvrdlého betonu byly prováděny zejména na kompletu zkušebních lisů s počítačem s možností volby různých zatěžovacích rychlostí zn. CONTROLS, sestávající se ze zkušebních jednotek 50-C56Z00 pro zkoušení pevnosti v tlaku na krychlích, DUPLEX 50-C1701/FR 350 kN pro velikost zkušebních těles do 700 mm, 65-L28Z10 pro zkoušení cementů a malt do velikosti zkušebních těles 160 mm. Všechny jednotky jsou napojeny na záznamovou řídicí jednotku Automax. Zkušební sestava odpovídá požadavkům [44]. Veškeré zkoušky ztvrdlého betonu byly prováděny v akreditované zkušební laboratoři CEMEX Pardubice.



Obrázek 29 Zkušební a záznamové zařízení CONTROLS

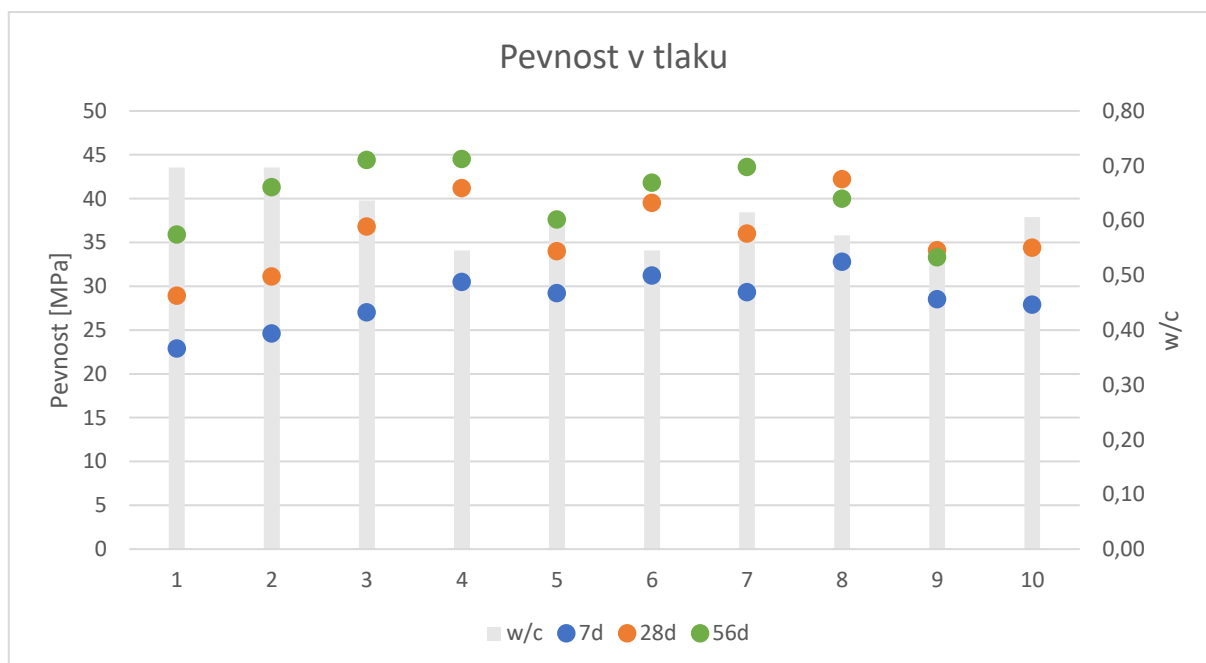
6.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla provedena na zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm ve stáří 7 a 28 dní. Pevnost v tlaku ve stáří 56 dní byla zkouška na tělesech zhotovených z odlomků trámů 100x100x400 porušených při zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Zkouška proběhla dle [14]. Výsledné hodnoty jsou seřazeny do Tabulky 4.

označení receptury	vlákna	pevnost v tlaku 7d - krychle [MPa]	pevnost v tlaku 28 d - krychle [MPa]	pevnost v tlaku 56 d - konce trámčů [MPa]	vodní součinitel
1	X -ref	22,9	28,9	35,9	0,70
2	Krampe Harex 50/1,2	24,6	31,1	41,3	0,70
3	Mapefibre ST 30	27	36,8	44,4	0,64
4	Masterfibre 482	30,5	41,2	44,5	0,55
5	Isofibre 1100	29,2	34	37,6	0,60
6	Mapefibre ST 50 Twisted	31,2	39,5	41,8	0,55
7	Orlimex 12 mm	29,3	36	43,6	0,62
8	Anticrak 67/36	32,8	42,2	40	0,57
9	Skelný prototyp	28,5	34,1	33,3	0,53
10	X - ref2	27,9	34,4	-	0,60

Tabulka 4 Porovnání pevností v tlaku

Pro vyhodnocení vlivu vláken na pevnost v tlaku bude porovnávána pevnost v tlaku na krychlích o hraně 150 mm po 28 dnech. Z Tabulky 4 vyplývá, že přidání jakýchkoliv vláken do směsi zvyšuje pevnost v tlaku. Další vliv na hodnotu pevnosti v tlaku má množství záměsové vody, což dokazují výsledné hodnoty receptury 10 vůči směsi 1, kdy u receptury 10 byl menší vodní součinitel a pevnosti v tlaku vykazuje tato směs vyšší. I tak má směs 10 bez vláken nižší nebo srovnatelnou pevnost v tlaku po 28 dnech než všechny směsi s vlákny s výjimkou směsi 2, která má však vyšší vodní součinitel než směs 10. Směsi 5 a 9 mají srovnatelnou pevnost v tlaku jako směs 10. Grafické srovnání nabízí Graf 1.

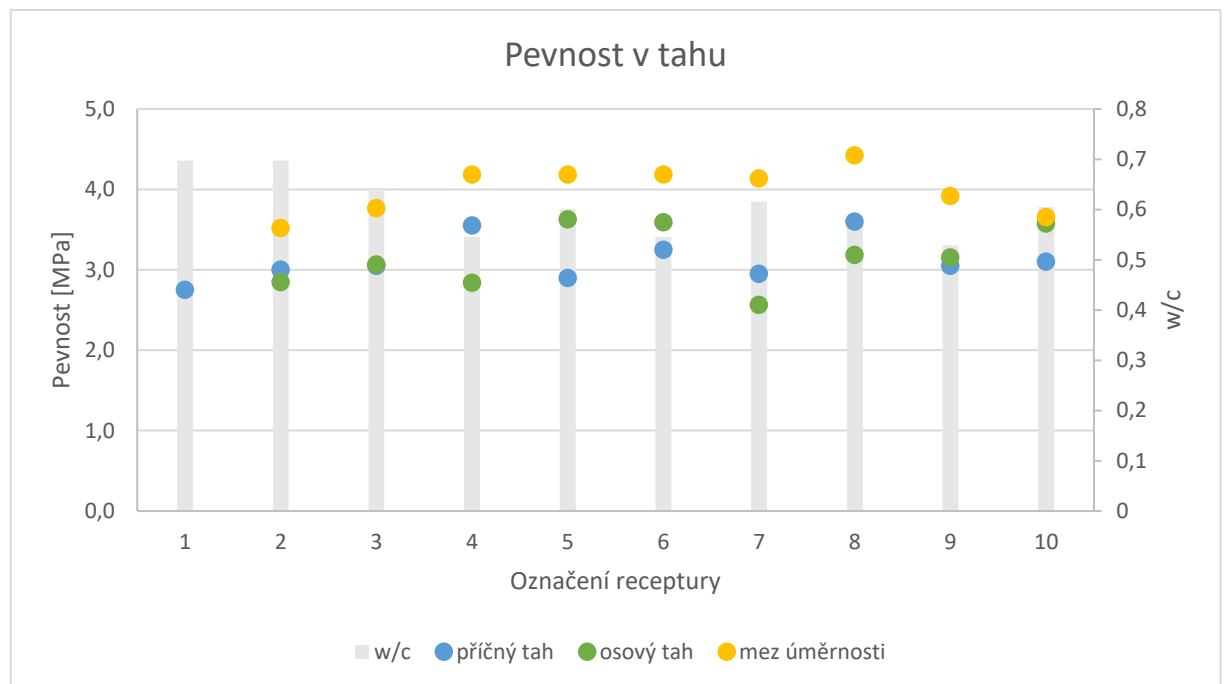


Graf 1 Porovnání pevnosti v tlaku a vodního součinitele

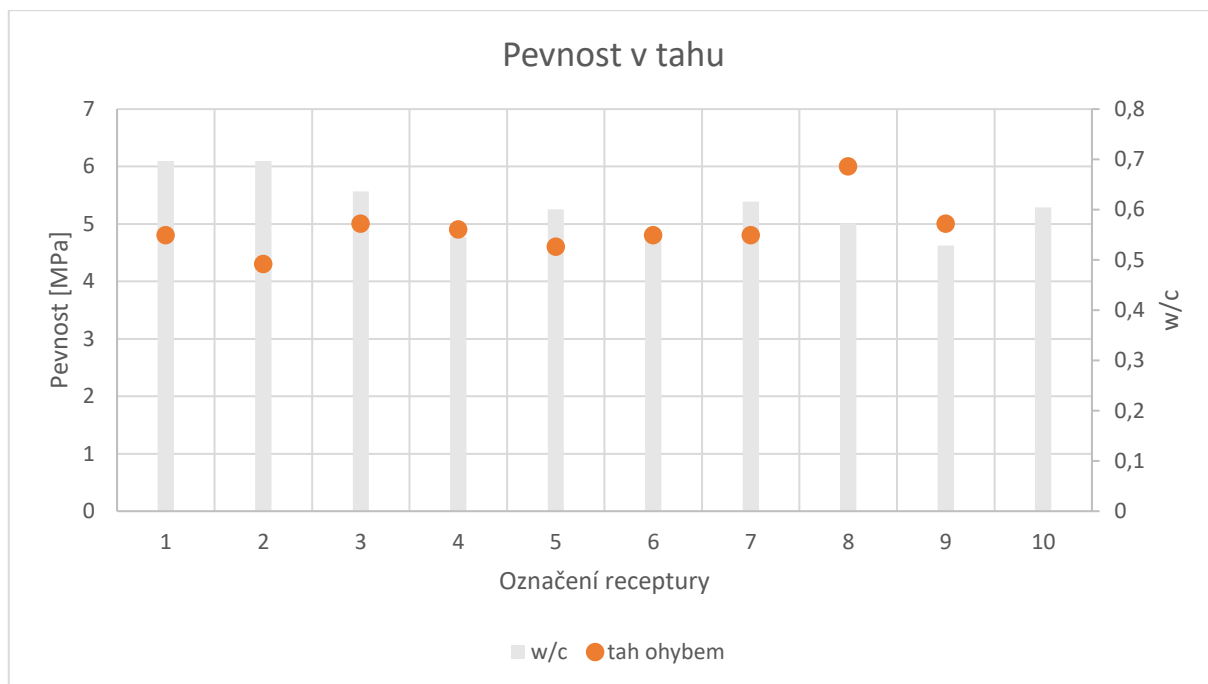
Nejvyšší vliv na pevnost v tlaku mají vlákna použita v receptuře 4, 6 a 8, což jsou postupně ocelová mikrovlákná Masterfibre 482, polyolefinová makrovlákná Mapefibre ST 50 Twisted a skleněná makrovlákná Anti crack 67/36. U těchto receptur se pevnost v tlaku po 28 dnech pohybovala kolem 40 MPa. Zároveň mají tyto receptury nejnižší vodní součinitel, kde množství záměsové vody může pevnost v tlaku ovlivnit více než použití vláken. Obecně se dá usuzovat, že pro zvýšení pevnosti v tlaku je vhodné spíše použití makrovláken než mikrovláken.

6.2 Pevnost v tahu

Z teoretické části vyplývá, že všesměrně orientovaná rozptýlená vlákna by měla zvyšovat pevnost v tahu. Pevnost v tahu byla zkoušena různými způsoby na různých zkušebních tělesech. Pro pevnost v příčném tahu byly použity krychle o hraně 150 mm. Pro pevnost v tahu ohybem byly použity trámce o velikosti 100x100x400 mm. Pro zkoušky osový tah a mez úměrnosti byly použity trámce 150x150x700 mm. Pevnost v tahu ohybem nebyla provedena u receptury 10 z důvodu vytížení zkušební laboratoře. Pevnost v tahu zkouškami, které byly prováděny na tělesech 150x150x700 nebo 150x150 mm srovnává Graf 2, pevnost v tahu, která byla vypočtena na základě zkoušky na tělesech 100x100x400 mm srovnává Graf 3.



Graf 2 Porovnání pevností v tahu – větší tělesa



Graf 3 Pevnost v tahu - menší tělesa

6.2.1 Pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu ohybem byla zkoušena podle normy [16]. Zkušební tělesa byla podrobena zkoušení ve stáří 56 dní. Stanovení pevnosti v tahu ohybem bylo doplňkovou zkouškou jako srovnávací ke zkoušce Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Tabulka 5 a Graf 3 znázorňují dosažené pevnosti v tahu ohybem ve stáří 56 dní. Pevnosti dosažené touto zkouškou jsou u všech receptur vyšší než pevnosti dosažené dalšími tahovými zkouškami.

označení receptury	vlákna	pevnost v tahu ohybem 56d [MPa]	w/c
1	X - ref	4,8	0,70
2	Krampe Harex 50/1,2	4,3	0,70
3	Mapefibre ST 30	5	0,64
4	Masterfibre 482	4,9	0,55
5	Isofibre 1100	4,6	0,60
6	Mapefibre ST 50 Twisted	4,8	0,55
7	Orlimex 12 mm	4,8	0,62
8	Anticrak 67/36	6	0,57
9	Skelný prototyp	5	0,53
10	X - ref2	-	0,60

Tabulka 5 Pevnost v tahu ohybem

Dle normy [24] je pro určení charakteristické třídy pevnosti v tahu vláknobetonu nutné výsledky zkoušky v tahu ohybem přepočítat podle vzorce:

$$f_{fc,tk,cr} = f_{fc,tk,fl} / 1,45$$

Vzorec 5 Přepočet pevnosti v tahu ohybem pro vláknobeton

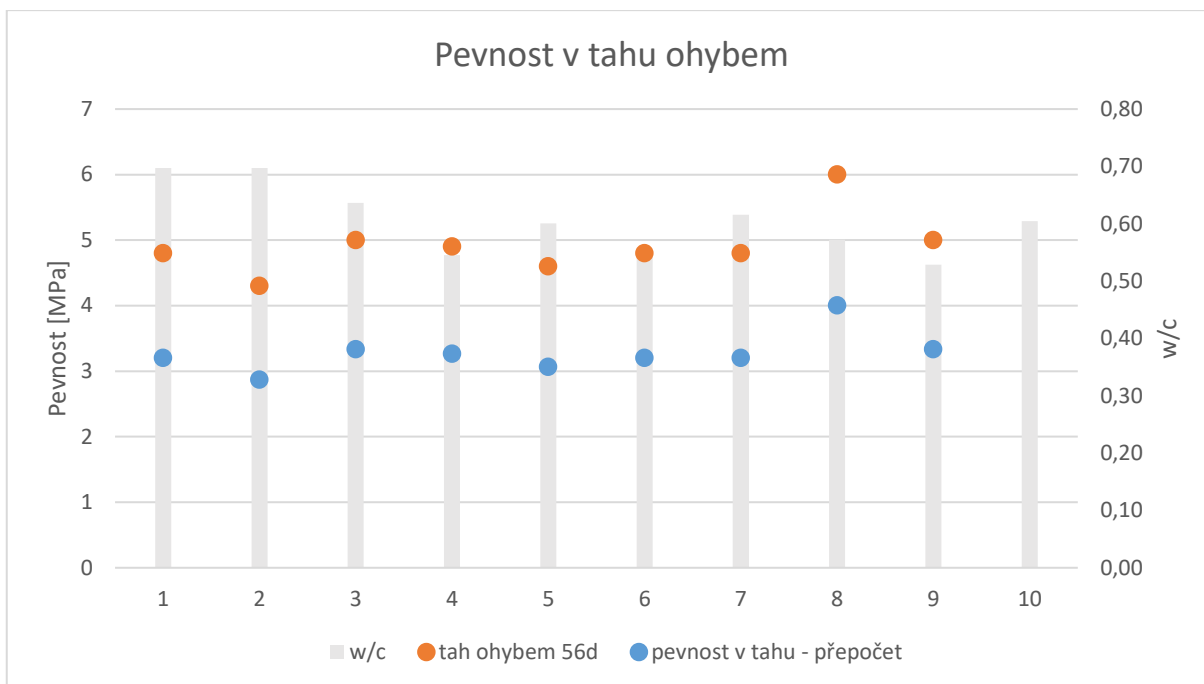
Přepočet pevností je uveden v tabulce níže (Tabulka 6).

označení receptury	vlákna	pevnost v tahu ohybem 56d - přepočet [MPa]	w/c
1	X -ref	3,2	0,70
2	Krampe Harex 50/1,2	2,9	0,70
3	Mapefibre ST 30	3,3	0,64
4	Masterfibre 482	3,3	0,55
5	Isofibre 1100	3,1	0,60
6	Mapefibre ST 50 Twisted	3,2	0,55
7	Orlimex 12 mm	3,2	0,62
8	Anticrak 67/36	4,0	0,57
9	Skelný prototyp	3,3	0,53
10	X - ref2	-	0,60

Tabulka 6 Pevnost v tahu ohybem – přepočet

Dosažené pevnosti v tahu ohybem jsou vyšší než tahové pevnosti dosažené alternativními zkouškami. Po přepočtu dle normy [24] jsou pevnosti již srovnatelné s ostatními výsledky.

Jednoznačně nejvyšší pevnosti dosáhla receptura 8. Vzhledem k naměřeným hodnotám, kdy pevnost je spíše závislá na hodnotě vodního součinitele, má receptura 8 výrazně vyšší pevnost než ostatní receptury s podobným vodním součinitelem. Ostatní výsledky pevností jsou srovnatelné s referenční směsí bez ohledu na použítá vlákna. Srovnání tahových pevností i s hodnotami po přepočtení na charakteristickou pevnost nabízí Graf 4.



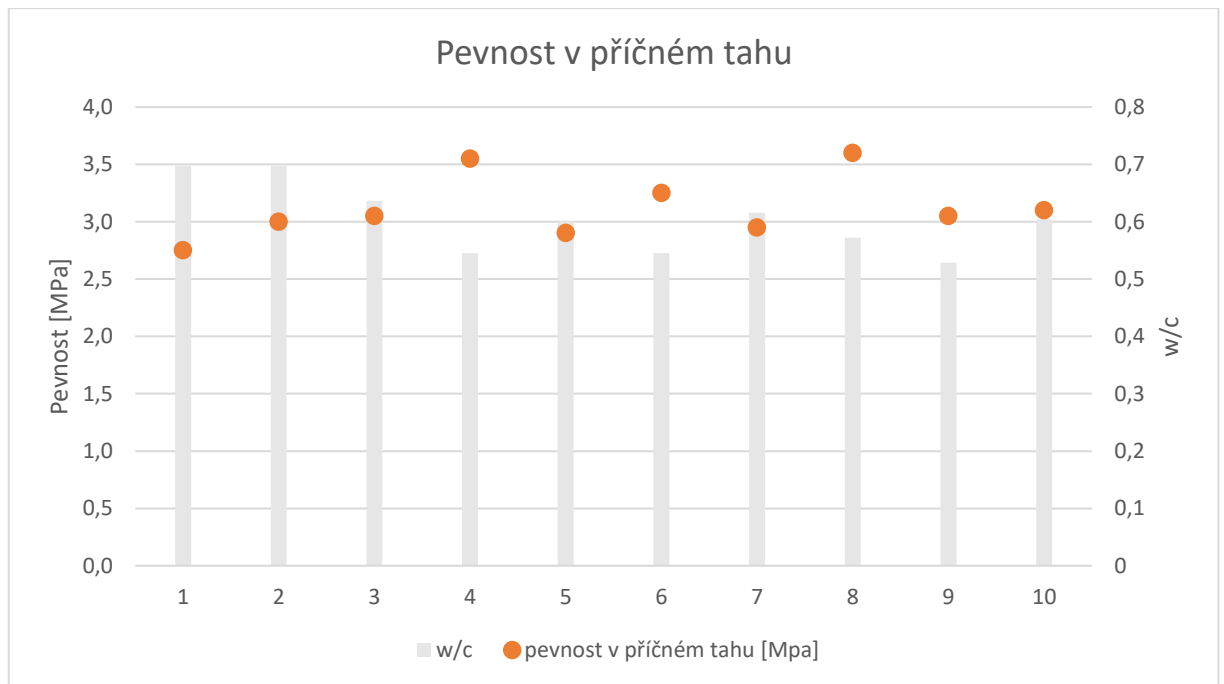
Graf 4 Znárodnění pevnosti v tahu a vodního součinitele

6.2.2 Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnost v příčném tahu byla provedena dle [17]. Vliv vláken na pevnost v tahu znázorňuje Tabulka 7 a Graf 5.

označení receptury	vlákna	pevnost v příčném tahu [Mpa]	w/c
1	X - ref	2,8	0,70
2	Krampe Harex 50/1,2	3,0	0,70
3	Mapefibre ST 30	3,1	0,64
4	Masterfibre 482	3,6	0,55
5	Isofibre 1100	2,9	0,60
6	Mapefibre ST 50 Twisted	3,3	0,55
7	Orlimex 12 mm	3,0	0,62
8	Anticrak 67/36	3,6	0,57
9	Skelný prototyp	3,1	0,53
10	X - ref2	3,1	0,60

Tabulka 7 Srovnání pevností v příčném tahu



Graf 5 Porovnání pevností v příčném tahu

Z Tabulky 7 a Grafu 5 vyplývá, že přidání jakýchkoliv vláken mělo vliv na zvýšení pevnosti v příčném tahu v porovnání s recepturou 1. Nejvyšší nárůst zaznamenalo použití vláken ve směsi 4 a 8, tj. Masterfibre 482 a Anti crack 67/36, a to v obou případech nárůstem pevnosti o cca 30 %. Nejnižší vliv na nárůst pevnosti měla vlákna Isofibre 1100, která byla použita ve směsi č. 5 a to cca jen o 5 %. Obecně tedy z této zkoušky vyplývá, že pro zvýšení pevnosti v příčném tahu je vhodné zvolit ocelová mikroválkna nebo skleněná makroválkna. Pro zvýšení pevnosti v příčném tahu jsou méně vhodná jakákoliv mikroválkna, kdy zvýšení pevnosti u obou použitých bylo pouze o 5 %, resp. 8 %.

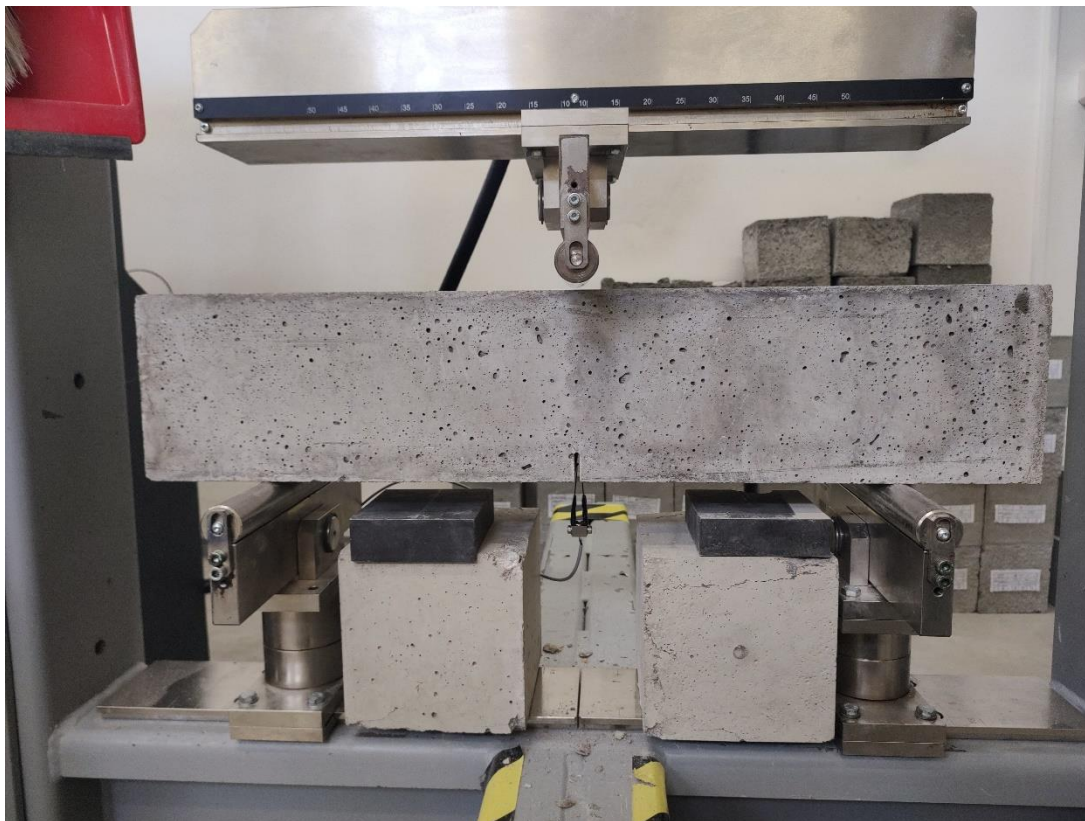
V porovnání se směsí 10 – ref2 bylo již zvýšení pevností směsí s vláknem menší, a to z důvodu vyšší pevnosti v příčném tahu směsí 10. Směs 10 měla oproti směsi 1 pevnost v příčném tahu vyšší o téměř 13 %, což zastínilo výsledky pevností u směsí č. 5, 7 (mikroválkna), směsí č. 2, 3, 9 měly pevnost v příčném tahu srovnatelnou se směsí č. 10. Směsi 4 a 8 mají vyšší pevnost v porovnání se směsí 10 o cca 15 %.

6.2.3 Mez úměrnosti

Zkouška probíhala podle normy [12]. Norma je určena pro směsi s kovovými vlákny délky do 60 mm, kombinaci kovových vláken nebo kombinaci kovových vláken a jiných vláken. Pro experimentální analýzu praktické části práce byla tato zkouška zvolena i pro směsi s jinými než kovovými vlákny.

Zkouška spočívá ve sledování rozevření trhliny v přesně definovaném průřezu, který je určen zářezem o hloubce 25 mm ve zkušebním tělese. První sledovanou hodnotou je nejvyšší zatížení při rozevření do 0,05 mm (mez úměrnosti), poté se zaznamenává hodnota zatížení při rozevření

1, 2, 3 a 4 mm (zbytková pevnost). Směs 1 není vyhodnocena, zkušební tělesa pro tuto zkoušku nebyla vyrobena, referenční tělesa bez vláken pro tuto zkoušku byla vyrobena ve směsi č. 10.

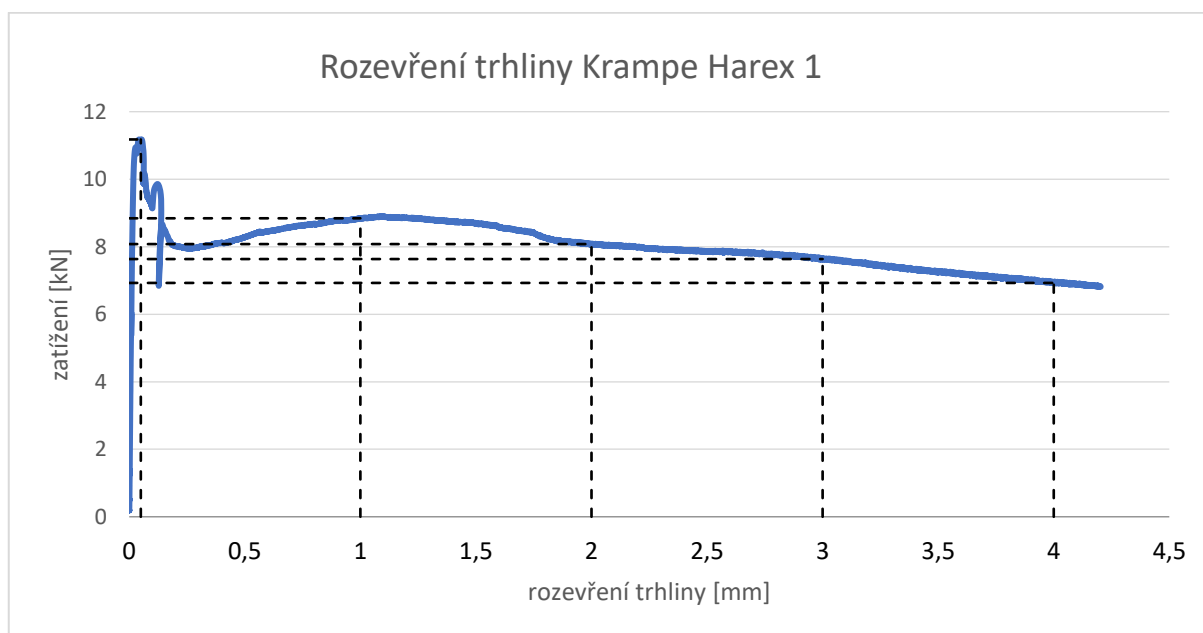


Obrázek 30 Umístění zkušebního tělesa v lisu



Obrázek 31 Čidlo pro zaznamenávání velikosti rozevření trhliny

Graf 6 (směs č. 2, zkušební těleso č. 1) níže znázorňuje průběh zatížení při zkoušce. Je patrné, že po porušení tělesa nastává pokles pevnosti, dokud není aktivována sekundární pevnost – pevnost vláken.



Graf 6 Závislost zatížení na rozevření trhliny (výstup ze zkušebního zařízení, graficky vyznačeny výsledky zkoušky)

V Tabulce 8 je porovnání pevností a zbytkových pevností ze zkoušky. V porovnání s referenční směsí č. 10 mají všechna vlákna pozitivní vliv na mez úměrnosti, tj zvyšují pevnost ve sledovaném rozevření do 0,05 mm. Jediná směs, která má mírně menší mez úměrnosti je směs č. 2, kde jsou použita ocelová makrovlákna Krampe Harex. Co se týče zbytkové pevnosti na sledovaných mezích rozevření trhliny 1, 2, 3, 4 mm mají vlákna Krampe Harex v první a každé další sledované mezi nejmenší pokles pevnosti ze všech směsí, a to zhruba o 30 %. Dá se tedy vyvodit, že tato vlákna nesou relativně velkou a stálou část zatížení i po porušení v mezi úměrnosti. Dalšími vlákny, která jsou schopna nést část zatížení po porušení jsou ve směsi č. 4, ocelová mikrovlákna Masterfibre 482. Zde je pokles napětí v první mezi asi o 40 %, dále klesá do poslední meze o 65 %. Směsi č. 3 (Mapefibre ST 30) a 6 (Mapefibre ST 50 Twisted) byly sledovány také až do rozevření trhliny 4 mm, i když použitá vlákna byla schopná nést relativně malou část zatížení oproti mezi úměrnosti, a to v poklesu cca o 85 %. Směs, která nesla část zatížení pouze k rozevření trhliny 3 mm, byla směs č. 8 (Anticrak 67/36), avšak zde nesené zatížení klesalo od 85 do cca 95 % meze úměrnosti. Ostatní směsi již při rozevření 1 mm byly schopny nést velmi malé zatížení anebo nulové.



Obrázek 32 Zkušební těleso po ukončení zkoušky (směs 4, vlákna Masterfibre 482)



Obrázek 33 Porušený průřez po zkoušce Rozevření trhliny, směs 3, vlákna Mapefibre ST 30

Na Obrázku 33 lze vidět zbytek vláken, která byla nositelem zbytkové pevnosti v průřezu. V levém horním rohu fotky lze vidět zářez, kterým bylo definováno místo porušení. Na Obrázku 34 je zkušební trámec poškozen při nestandardním průběhu zkoušky.

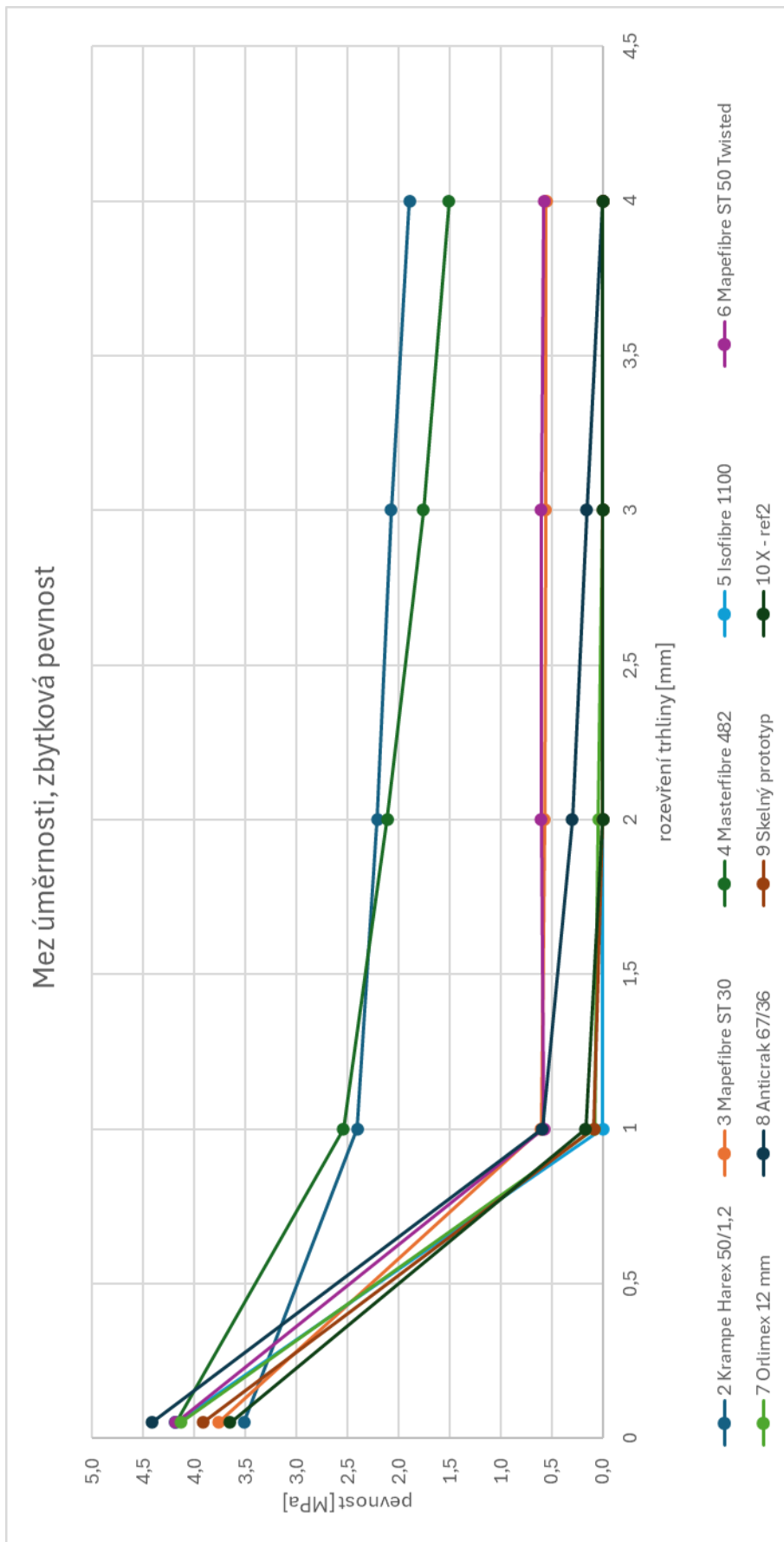


Obrázek 34 Poškozený trámec při nestandardním průběhu zkoušky

Obecně lze říci, že při tomto typu porušení jsou jednoznačně lepším nositelem zbytkové pevnosti ocelová makrovlákná, která pomáhají po porušení nést 35-70% meze úměrnosti v závislosti na rozevření trhliny ve sledovaném průřezu, zejména pak vlákna Krampe Harex. Naopak neosvědčila se jakákoliv mikrovlákná a vlákna ze skelného prototypu, kde je obsahem kombinace mikro a makrovláken.

označení receptury	typ vláken	mez úměrnosti [Mpa]	zbytková pevnost v tahu CMOD 1 [MPa]	zbytková pevnost v tahu CMOD 2 [MPa]	zbytková pevnost v tahu CMOD 3 [MPa]	zbytková pevnost v tahu CMOD 4 [MPa]
1	X- ref					
2	Krampe Harex 50/1,2	3,5	2,4	2,2	2,1	1,9
3	Mapefibre ST 30	3,8	0,6	0,6	0,6	0,6
4	Masterfibre 482	4,2	2,5	2,1	1,8	1,5
5	Isofibre 1100	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0
6	Mapefibre ST 50 Twisted	4,2	0,6	0,6	0,6	0,6
7	Orlimex 12 mm	4,1	0,1	0,0	0,0	0,0
8	Anticrak 67/36	4,4	0,6	0,3	0,2	0,0
9	Skelný prototyp	3,9	0,1	0,0	0,0	0,0
10	X - ref2	3,7	0,2	0,0	0,0	0,0

Tabulka 8 Tabulka pevností na mezi úměrnosti, zbytková pevnost



Graf 7 Porovnání pevností na mezi úměrnosti, zbytková pevnost

6.2.4 Osový tah – experimentální zkouška ohybové pevnosti

Další zkouškou byla zvolena zkouška ohybové pevnosti, v této práci nazvána osový tah. Princip zkoušky byl publikován v [18]. Zkouška je principiálně čtyřbodovým ohybem, kdy zkušební trámec je upraven jádrovým vývrtem o průměru 80 mm uprostřed jeho délky. Zkušební těleso je v lisu umístěno kolmo k ose vývrtní, kde pak v části nad vývrtem je tlačena oblast, v části pod vývrtem oblast tažená. Tažená oblast je navíc namáhána čistě osovým tahem, dává tedy jasněji najevo vliv použitých vláken na tahovou pevnost bez ohledu na jejich délku či materiál. Jako první se poruší spodní tažená oblast, poté přebírá zatížená horní, původně pouze tlačena oblast, ze které se stává nízký nosník, který má horní tlačenu a spodní taženou oblast. V původní spodní pouze tažené oblasti přebírají tahové napětí vlákna.



Obrázek 35 Úprava zkušebního tělesa – vývrt průměru 80 mm



Obrázek 36 Zkušební těleso umístěno v lisu před započítím zkoušky



Obrázek 37 Zkušební trámec po ukončení zkoušky (Masterfibre 482)



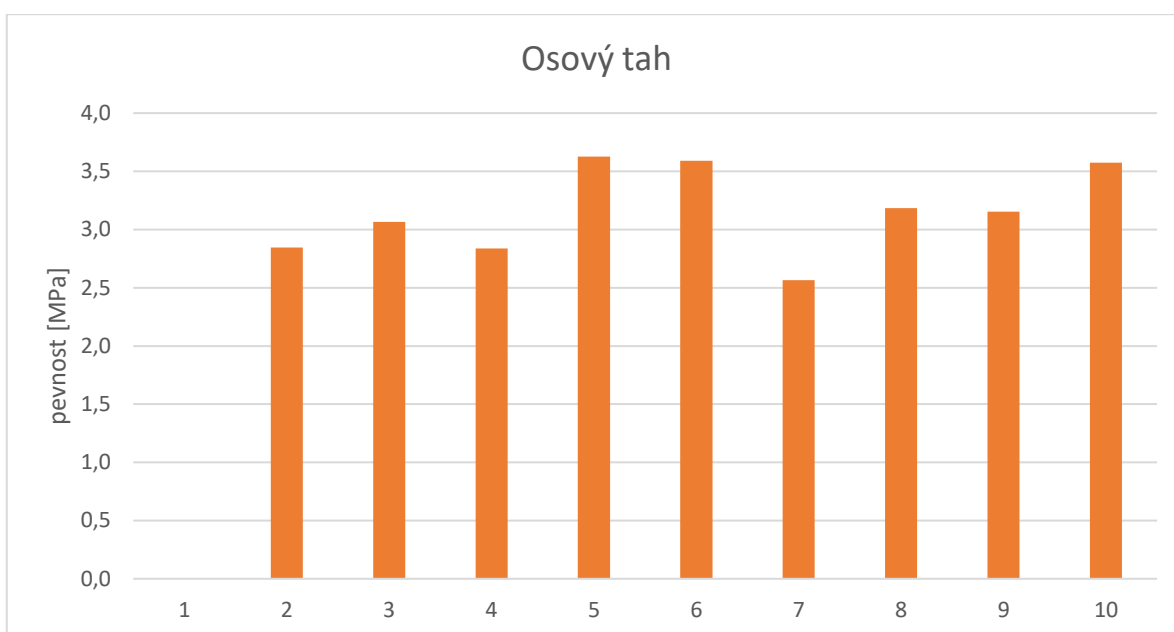
Obrázek 38 Přetrhaná vlákna na spodním líci zkušebního trámce (Mapefibre ST 50 Twisted)

V Tabulce 9 jsou uvedeny vypočtené hodnoty pevností po zkoušce osový tah. V [18] autor uvádí, že hodnoty pevnosti v tahu by měly být přesnější a zároveň nižší, než pevnosti dosažené zkouškou tří nebo čtyřbodovým ohybem. Předpoklad celkově nižších pevností se potvrdil.

Nejvyšší pevnosti v tahu po této zkoušce dosáhla referenční směs 10 bez vláken. Stejně pevnosti v tahu dosáhly směsi 5 (Isofibre 1100) a 6 (Mapefibre ST 50 Twisted). O několik desetin menší pevnost mají směsi 3 (Mapefibre ST 30), 8 (Anticrak 67/36) a 9 (Skelný prototyp). Z výsledků této zkoušky vyplývá, že vlákna nemají na pevnost v osovém tahu vliv, naopak pevnost v tahu mají receptury s vlákny stejnou nebo nižší než receptura bez vláken. Tento výsledek neodpovídá výstupům z teoretické části ani deklarováním výrobců, že rozptýlená výztuž zvyšuje pevnost v tahu. Tento typ zkoušky je první zkouškou ztvrdlého betonu této práce, kde se fakta z teoretické části nepotvrdila.

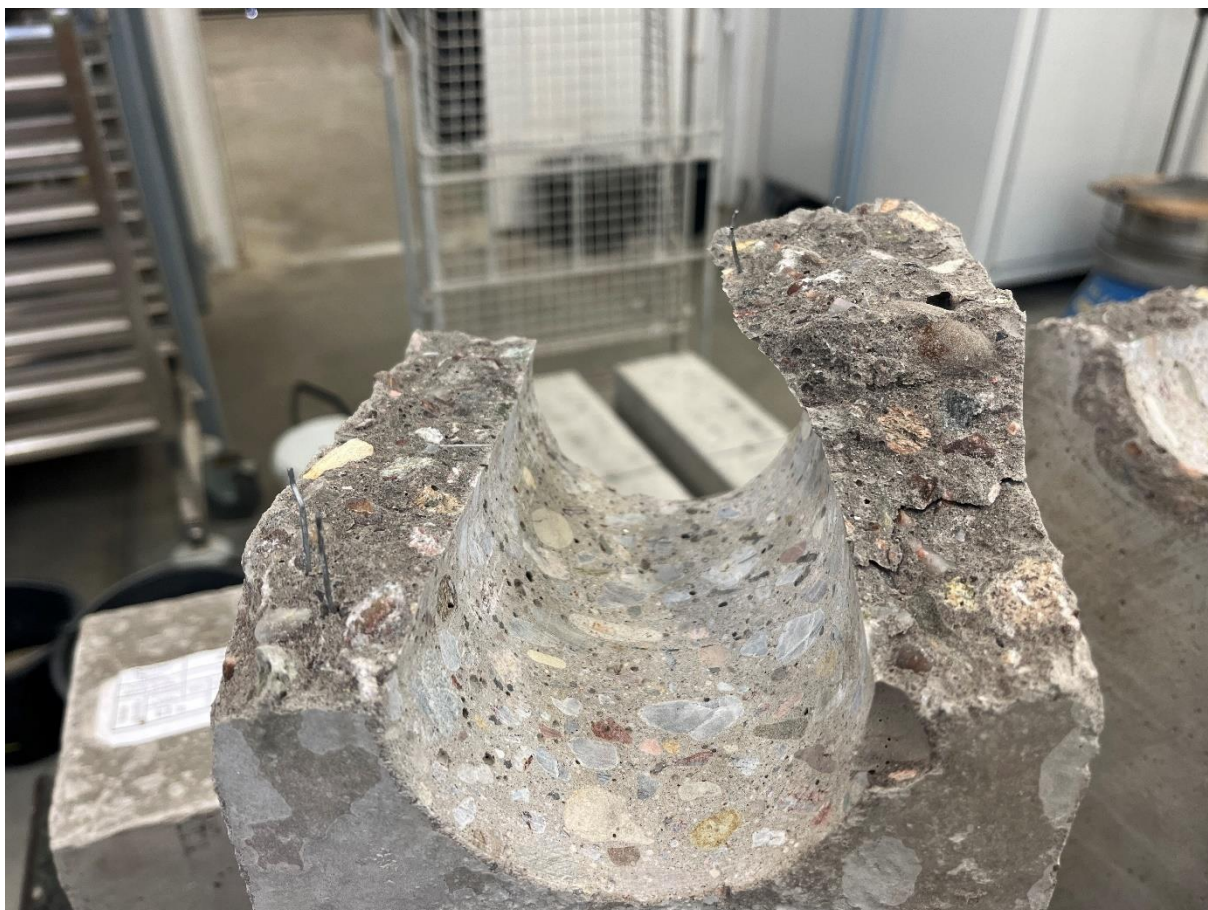
označení receptury	typ vláken	osový tah [MPa]
1	X - ref	-
2	Krampe Harex 50/1,2	2,8
3	Mapefibre ST 30	3,1
4	Masterfibre 482	2,8
5	Isofibre 1100	3,6
6	Mapefibre ST 50 Twisted	3,6
7	Orlimex 12 mm	2,6
8	Anticrack 67/36	3,2
9	Skelný prototyp	3,2
10	X - ref2	3,6

Tabulka 9 pevnost v tahu – osový tah



Graf 8 Porovnání pevností – osový tah

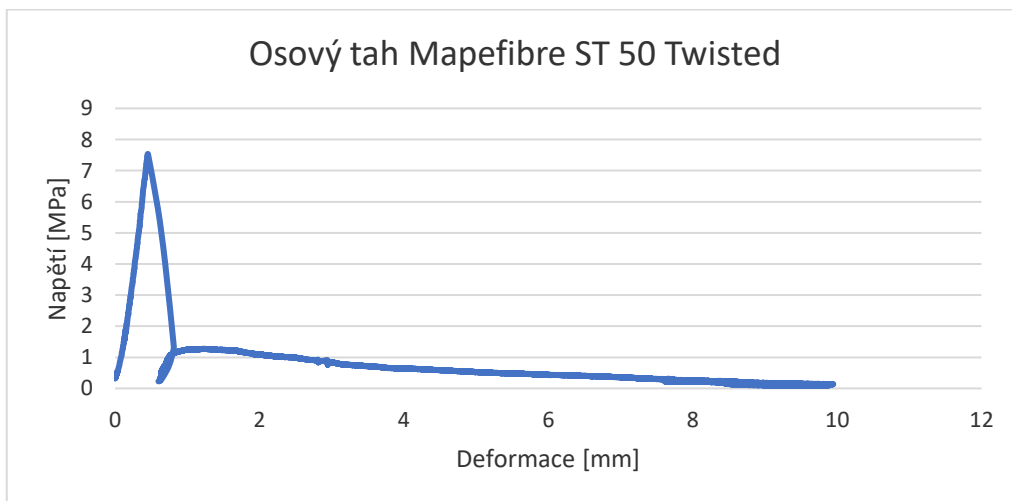
Zatěžování zkušebních těles bylo nastaveno na průhyb do 10 mm. Některá zkušební tělesa byla schopna, podle typu vláken, nést část zatížení i po porušení (Graf 9), ostatní po vzniku porušení nebyly další zatížení schopny přenést (Graf 10). Chování těles bylo podobné, jako u zkoušky mez úměrnosti, zbytková pevnost. Vzhledem k těmto faktům lze zobecnit, že tato zkouška může vnést správný pohled na pevnost v čistém osovém tahu, ale zkreslený pohled na další chování vláken po porušení. V dalším vývoji vláknobetonů by bylo vhodné použít vyšší počet zkušebních těles, kdy z více výsledků by dosažené průměrné hodnoty pevností byly relevantnější. U některých druhů vláken by bylo možné zvýšit dávku vláken, viz Obrázek 39, Obrázek 40, na kterých je vidět velmi malý počet vláken.



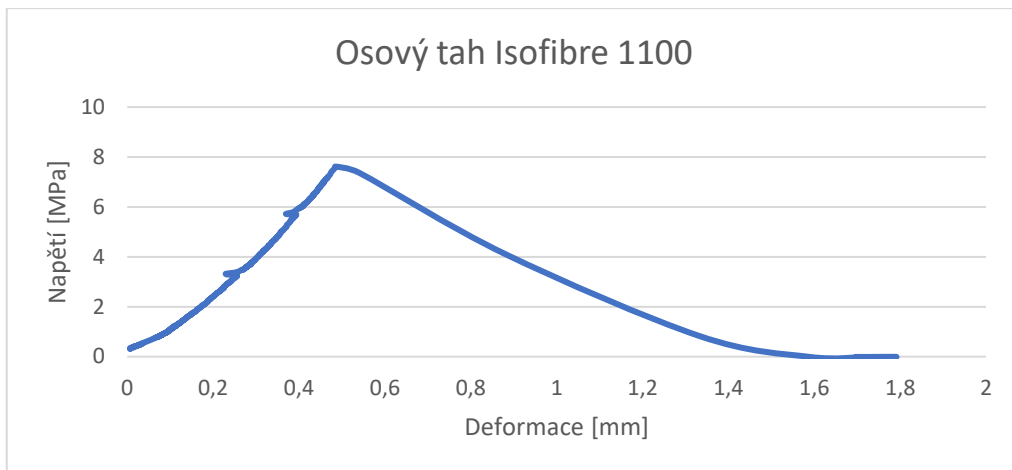
Obrázek 39 Lomová plocha po zkoušce osový tah, vlákna Krampe Harex, receptura 2, foto Ing. Šmíd, CEMEX



Obrázek 40 Makrotrhlina s prosvítajícími vlákny po zkoušce osový tah, vlákna Krampe Harex, receptura 2, foto Ing. Šmíd, CEMEX



Graf 9 Zatěžovací diagram zkušebního tělesa - Mapefibre ST 50 Twisted



Graf 10 Zatěžovací diagram zkušebního tělesa - Isofibre 1100

6.2.5 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Zkouška proběhla dle [27]. Bylo zvoleno celkem 75 zmrazovacích cyklů rozdělených po 25 cyklech. Zkušební tělesa byla v den vložení do zkušebního zařízení ve stáří 56 dní. Pro zkoušku byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech 100x100x400 mm. Na srovnávacích tělesech stejných rozměrů byly vykonány zkoušky pevnost v tahu ohybem, na koncích úlomků byla vykonána zkouška pevnost v tlaku. Tyto dílčí zkoušky byly vyhodnoceny již v předchozích kapitolách.

Vlivem zmrazování a rozmrazování zkušebních těles došlo u všech receptur k rozpadu zkušebních těles již během prvních 25 cyklů. Nebylo tedy možné posoudit mrazuvzdornost na žádné z 10 receptur.

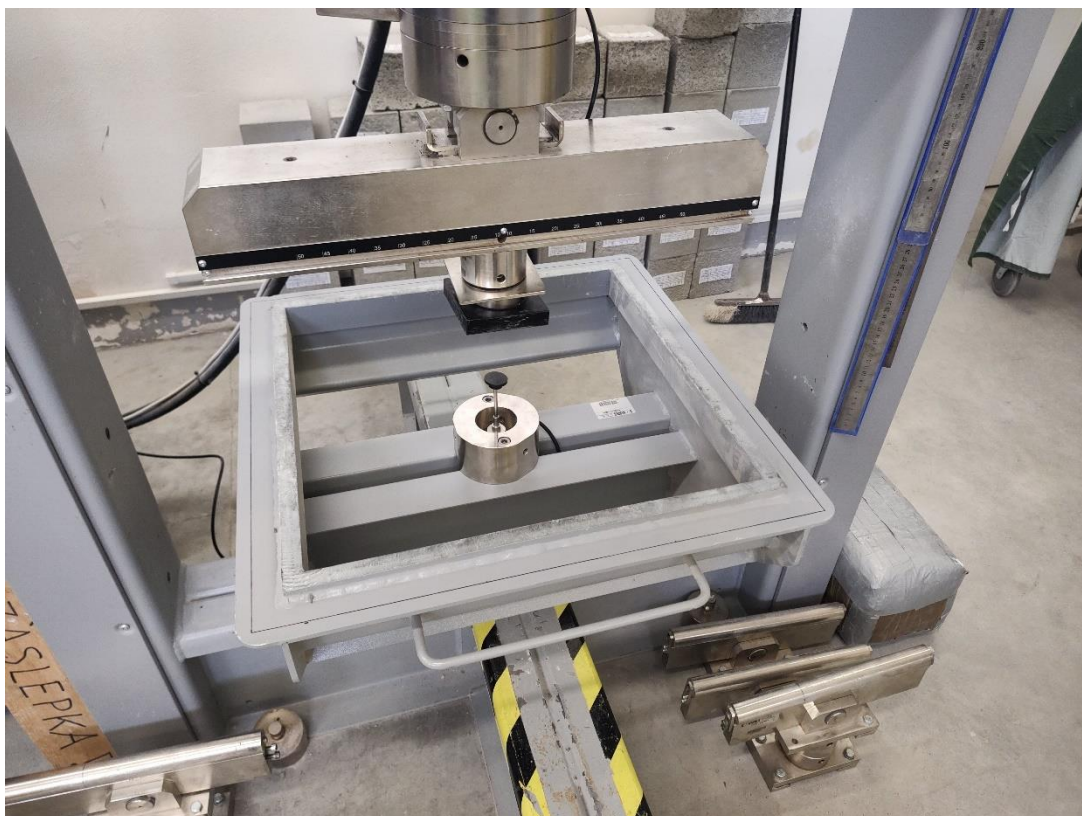
6.2.6 Stanovení kapacity absorbované energie

Zkouška proběhla podle [22]. Jedná se o zkoušku stříkaného betonu, pro experimentální část práce byla však využita pro vybrané receptury s makrovlákny. Zkušební tělesa nebyla vytvořena stříkáním, ale plněním a současným hutněním betonu ve formě. Hutnění probíhalo propichováním zednickou lžící, vzduch od stěn bednění byl odstraněn poklepáváním na stěny formy. Povrch betonu v naplněné formě byl uhlazen nerezovým hladítkem. Při tomto způsobu hutnění betonu teoreticky mohlo dojít k částečnému usměrnění vláken v čerstvém betonu. Zkušební těleso má tvar kvádra o výšce 100 mm, délka hran je 600 mm. (Obrázek 41)



Obrázek 41 Zkušební těleso pro zkoušku Stanovení absorbované energie, ihned po naplnění formy

Zkušební těleso je ve stáří 28 dní vloženo do lisu, kde je již připraven zkušební přípravek. Těleso je poté zatěžováno tuhou deskou o rozměrech 100 x 100 mm uprostřed jeho plochy (Obrázek 42, Obrázek 43).



Obrázek 42 Zkušební přípravek pro zkoušku Stanovení absorbované energie



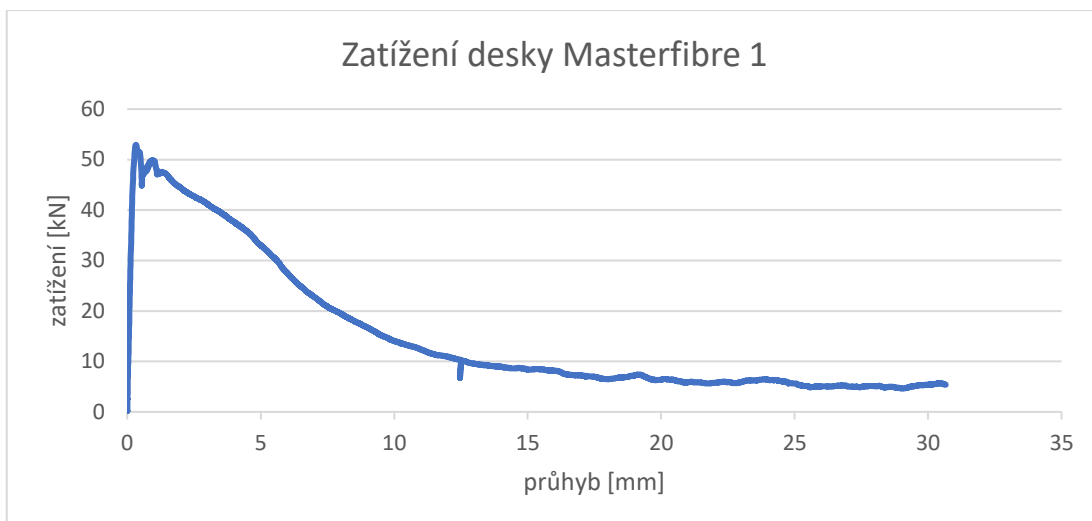
Obrázek 43 Zkušební těleso umístěno v lisu před začátkem zkoušky

Zaznamenává se průhyb zkušební tělesa do 30 mm a síla, kterou lis působí na zkušební těleso. Na Obrázku 44 je vidět typicky deformované zkušební těleso po konci zkoušky, je rozlomeno na několik částí a vlivem působení zatížení uprostřed desky jsou zvednuté rohy zlomených částí desky.

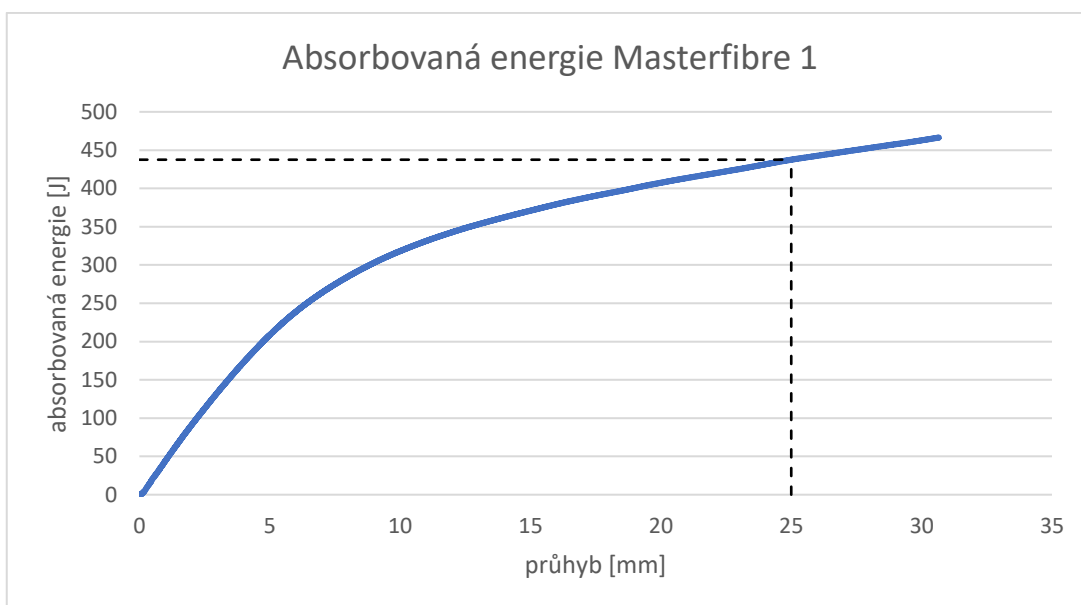


Obrázek 44 Deformace tělesa po ukončení zkoušky

Během zkoušky se zaznamenává průhyb a síla, která na těleso působí. Příklad diagramu lze vidět v Graf 11. Velikost absorbované energie v Joulech se stanoví jako výpočet plochy pod křivkou. Takto vypočítaná energie je znázorněna v Graf 12. Výsledkem zkoušky je energie absorbovaná od průhybu 0 mm do 25 mm.



Graf 11 Zatěžovací diagram při zkoušce Stanovení absorbované energie



Graf 12 Diagram absorbované energie v závislosti na průhybu zkušebního tělesa, vyznačení výsledku zkoušky

V Tabulce 10 jsou seřazeny výsledky zkoušky. Největší množství energie dokáže při průhybu 25 mm pohltit receptura 2 (vlákna Krampe Harex), druhou největší hodnotu zaznamenala receptura 4 (Masterfibre 482). Nejmenší hodnotu má receptura 8 (Anticrak). Uprostřed pomyslného pole se umístily receptury s polymerními vlákny. Z těchto výsledků lze usoudit, že pro absorbování energie jsou nejlepší dlouhá kovová makrovlákna.

označení receptury	absorpce energie [J]	maximální síla [kN]
2	620	63
3	240	37
4	480	56
6	400	47
8	150	48

Tabulka 10 Výsledky zkoušky Stanovení absorbované energie

Výsledné hodnoty absorbované energie lze aplikovat všude tam, kde je nutné počítat s jakýmikoliv rázy na ztvrdlý beton. Jedná se například o oblast hornictví, kde stříkaný beton může být využit jako primární ostění dobývacích prostor, stabilizace základů starých budov, stavba opěrných zdí [25, 26].

6.2.7 Stanovení objemových změn

Všechny receptury byly podrobeny stanovení objemových změn. Měření probíhalo dvěma způsoby, automatickým zaznamenáváním v první fázi, v druhé fázi manuálním měřením. Automatické měření v první fázi je vhodnější právě hned po uložení čerstvého betonu do formy. Z teoretické části vyplývá, že objemové změny jsou největší právě na začátku tuhnutí a tvrdnutí betonu. Automatické měření probíhalo za pomoci měřicího žlabu SCHLEIBINGER GERÄTE. Vnitřní rozměr žlabu a tedy rozměr zkušební tělesa je 100 x 40 x 1000 mm. (Obrázek 45)



Obrázek 45 Měřicí žlab SCHLEIBINGER GERÄTE – připraven na naplnění čerstvým betonem

„Měřicí žlab SCHLEIBINGER GERÄTE je navržen pro zkoušení roztažnosti nebo smršťování betonu a malt.

Zařízení je navrženo dle požadavků rakouské normy OENORM B 3329: 2009-06-01 pro zkoušení malty.

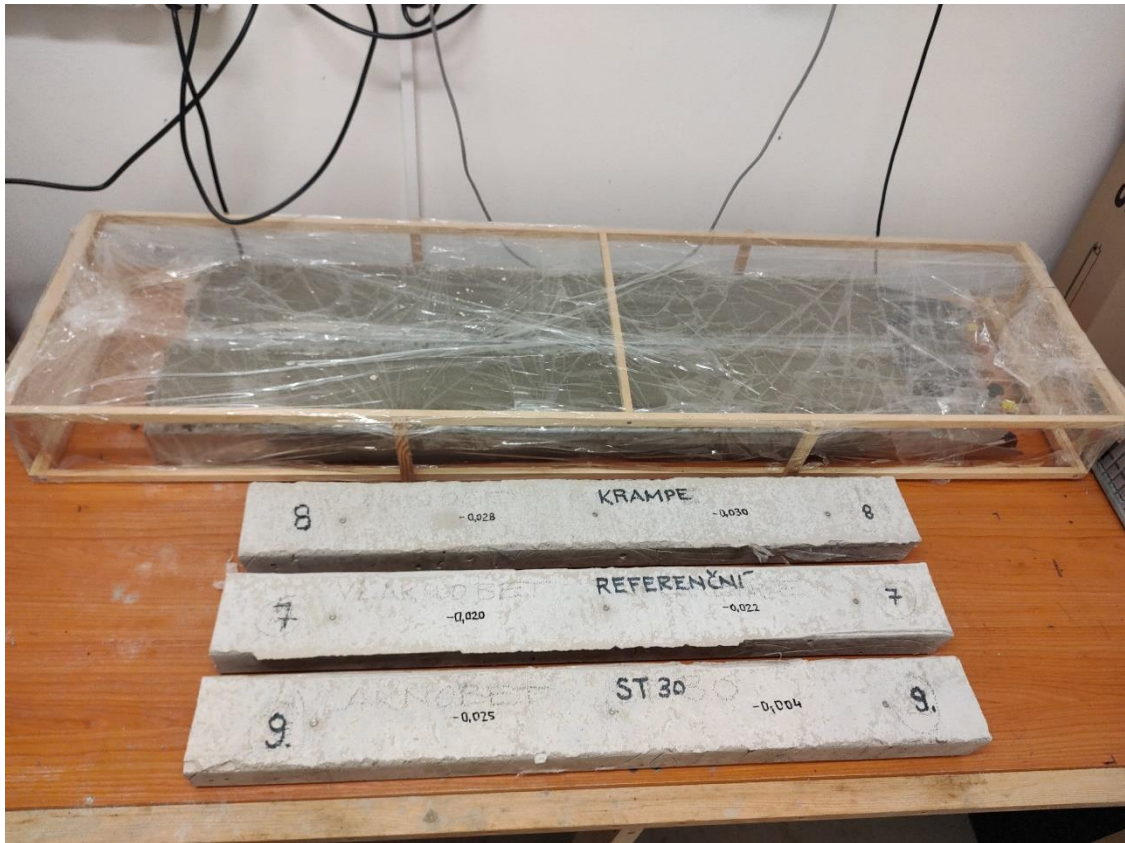
Měřicí žlab je vyroben z 1 m dlouhého U-profilu z nerezové oceli, do kterého je uložen vzorek. Aby se minimalizovalo tření o stěny žlabu, je pod vzorek položena speciální neoprenová folie. Na jedné straně žlabu je pevná kotva. Na druhé straně žlabu je pohyblivé čelo formy, které je napojeno na vysoce přesný snímač posunutí.

Měřicí čidlo je napojeno na dataloger, který snímá a zaznamenává data z průběhu celé zkoušky.“ [23]

Měřicí žlab byl naplněn čerstvým betonem (Obrázek 46). Aby bylo zabráněno smrštění vysycháním z povrchu betonu, byl navíc žlab zakryt neprodyšnou fólií (Obrázek 47). Poté byl žlab napojen na datalogger. Datalogger v intervalech 15 minut zaznamenává polohu posuvné části žlabu. Měřicí žlab byl umístěn v komoře se stálou teplotou a vlhkostí.



Obrázek 46 Měřicí žlab po naplnění čerstvým betonem



Obrázek 47 Horní část obrázku – čerstvý beton ve zkušebním žlabu, zabránění vysušování povrchu, spodní část obrázku – ztvrdlý beton přichystaný na manuální měření objemových změn

Automatické zaznamenávání objemových změn probíhalo zpravidla týden, kdy po týdnu byl již ztvrdlý beton vyjmut ze žlabu, aby žlab mohl být naplněn dalším čerstvým betonem – jinou recepturou. Na vyjmutých zkušebních tělesech probíhalo další měření objemových změn již manuálním měřením.

Pro manuální měření bylo použito zařízení pro manuální měření objemových změn Controls - 58-C0230/30D, výrobce CONTROLS. Příprava zkušebního vzorku pro manuální měření spočívala v nalepení měřících terčů na zkušební těleso. Každé těleso na sobě mělo 3 měřící terče, jejichž rozteč je pevně stanovena kalibrační tyčí (Obrázek 48). Po zaschnutí lepidla se přiložil odchytkoměr a zaznamenala se základní hodnota vzdálenosti měřících bodů. Při každém dalším měření se znovu přikládá odchytkoměr a zapisuje se aktuální vzdálenost měřících bodů. Výpočtem rozdílu vzdáleností bodů se určí objemová změna mezi jednotlivými měřeními.

Na Obrázku 48 je kalibrační tyč pro správné umístění měřících terčů, posuvné měřidlo s odchytkoměrem, měřící terče, lepidlo. Na Obrázku 49 a Obrázku 50 je ilustrováno manuální měření objemových změn.



Obrázek 48 Nástroj pro manuální měření deformací [23]



Obrázek 49 Manuální měření objemových změn



Obrázek 50 Přiložený odchylkoměr na měřicím bodě

Měření objemových změn

Předpokladem byla teze, že mikrovlákná budou mít v betonu vliv na nižší objemové změny než receptury bez vláken nebo receptury s makrovláknem. Z teoretické části vyplývá, že objemové změny se v betonu projevují již během tuhnutí a počátku tvrdnutí betonu, kdy dochází ze začátku tuhnutí k expanzi, poté postupně dochází ke smrštění vlivem ztráty vody odpařováním (samovysychání). U receptur, které se v experimentu připravovaly jako první, probíhalo měření objemových změn až 123 dní. Receptura, která se míchala jako poslední, byla sledována po dobu 66 dní. Ve vyhodnocení budou pro porovnání výsledky měření ve stáří 66 dní u všech receptur. U receptur, které byly sledovány déle, bude pro úplnost zmíněna i celková objemová změna na konci měření.

Předpokladem sledování a měření bylo neustálé smršťování betonu bez větších výkyvů, které bude postupně zpomalovat a křivka celkových objemových změn se bude pomalu zplošťovat. Avšak při dvou termínech manuálního měření byla namísto očekávaného dalšího smrštění pozorována expanze – roztažení vzorku. Toto roztažení může mít několik vysvětlení:

- Nepřesnost měření
- Nestálost podmínek ve zrací komoře (nesprávná funkce čidel vlhkosti, teploty, klimatizační jednotky)
- Technologická nekázeň v souvislosti se zrací komorou (nedovření dveří, změna teploty, změna vlhkosti)
- Nesprávně zkalibrovaný odchylkoměr
- Předávání vlhkosti mezi neustále přibývajících zkušebními tělesy dalších receptur

Zajímavosti na těchto nečekaných naměřených hodnotách je fakt, že křivky mají ve stejných termínech manuálního měření srovnatelný tvar, tj expanze je zaznamenána téměř vždy ve stejný den, primárně u těles, která byla v komoře již delší dobu.

Měření objemových změn bylo v rukách laborantů laboratoře CEMEX, v britské normě pro manuální měření objemových změn BS 1881: Part 206 je zmíněno, aby měření prováděl vždy jeden pracovník, protože rozdílný tlak na odchylkoměr při měření může mít vliv na přesnost měření. Pokud se tedy u měření střídali pracovníci laboratoře, může to být důvod výkyvů těchto hodnot.

Dalším důvodem může být absorpce vlhkosti ze zkušebních těles, která byla do komory postupně přidávána. V den přípravy dalších receptur bylo do komory opakovaně vstupováno pro potřeby nastavení měření na nově namíchaných vzorcích. Toto střídání vlhkosti při vstupování do místnosti mohlo mít vliv na roztažnost zkušebního tělesa, i když bylo s největší opatrností dbáno na udržení stálých podmínek v komoře.

Dalším možným aspektem může být změna teploty tělesa. Teplotní roztažnost betonu je 10×10^{-6} m/mK. Tedy při změně teploty tělesa o 1 K se změní délka tělesa o 10 μ m na 1 m. Pokud se tedy do místnosti vstupovalo v den výměny zkušebních těles v takové frekvenci, aby tělesa zvýšila svou teplotu, mohla být v následném měření tato změna zaznamenána.

Na odchylky v měření je upozorněno u měření každé receptury zvlášť.

6.2.7.1 Receptura 1 – bez vláken

Receptura bez vláken vykazuje největší objemové změny během prvních 12 hodin od uložení do smršťovacího žlabu. První 4 hodiny jde o expanzi, kdy na jejím vrcholu byla zaznamenána hodnota expanze 29 μ m. Na této hodnotě se otáčí směr objemových změn a zkušební těleso se začíná smršťovat, během dalších 4 h se těleso vrátilo na svou počáteční velikost a začíná se oproti své původní velikosti smršťovat, kdy se během dalších 2 hodin smrští o cca 6,5 μ m. Od této doby jsou objemové změny téměř konstantní díky umístění zkušebního žlabu pod neprodyšnou folii.

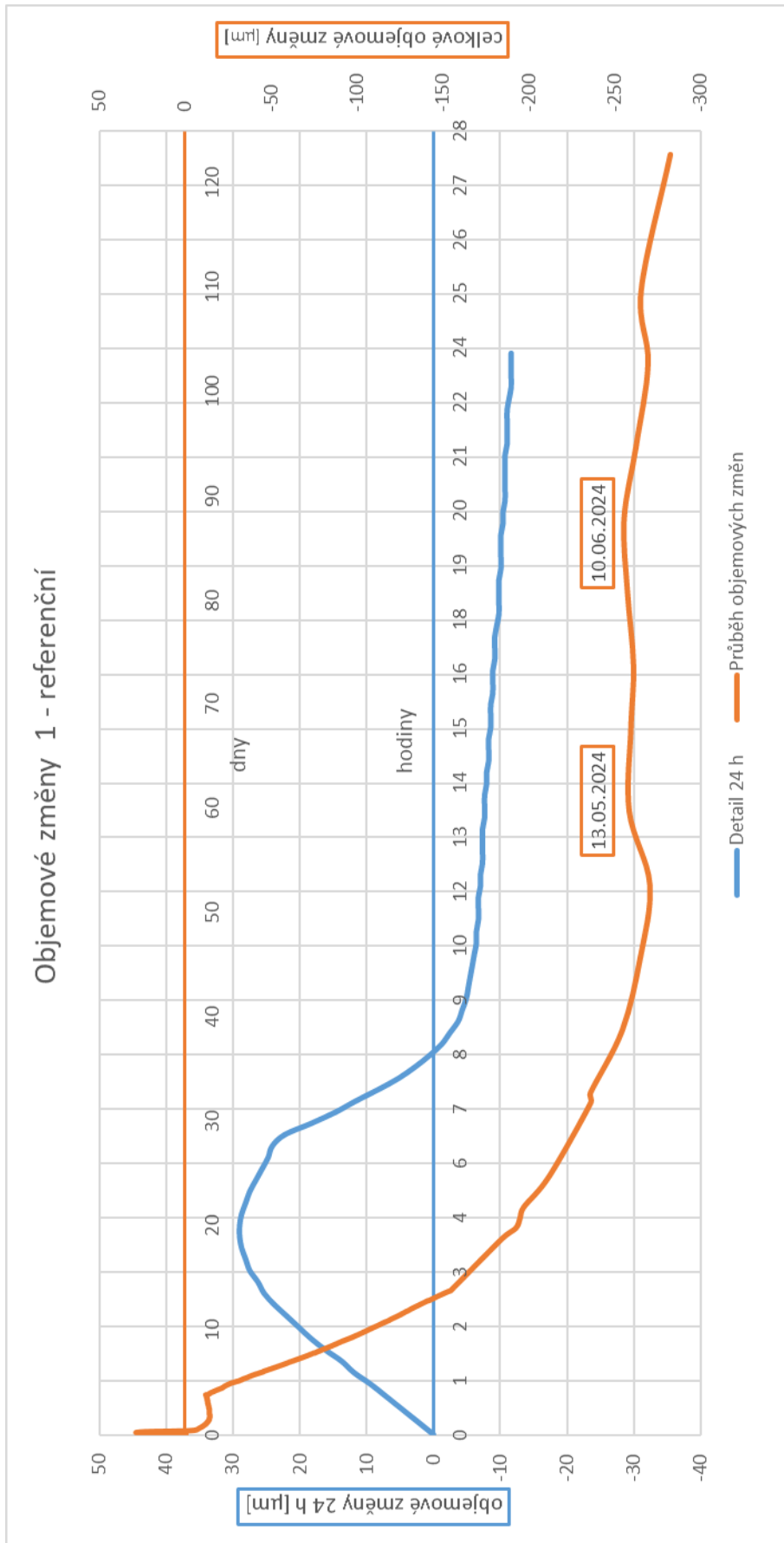
Další změna nastává v době stáří betonu cca 4 dní (již se dá mluvit o ztvrdlém betonu), kdy je odstraněna neprodyšná folie a přidává se smrštění vysycháním z povrchu ztvrdlého betonu. Díky zaručení stálých podmínek v klimatizované komoře probíhá rychlost smrštění vysycháním lineárně bez větších výkyvů. Ve stáří přibližně 2 týdnů bylo těleso vyjmuto ze smršťovacího žlabu, dále pokračuje měření manuálně, zpočátku každý den, poté přibližně jednou týdně.

Průběh objemových změn je zaznamenán v Grafu 13, kde modrá křivka znázorňuje průběh celkových objemových změn od začátku až do konce měření a oranžová křivka znázorňuje detail průběhu objemových změn během prvních 24 h.

Celková objemová změna tělesa receptury 1 je během sledování smrštění o 282 μ m oproti velikosti při uložení čerstvého betonu ve stáří 123 dní. Ve stáří 66 dní bylo smrštění tělesa 259 μ m. Větší odchylky měření byly zaznamenány, když ve stáří tělesa 53 dní mělo hodnotu

smrštění 270 μm , ve stáří 59 dní byla hodnota smrštění 258 μm . Další mírná odchylka byla kolem stáří betonu 80 dní, zde je však změna smrštění pouze okolo 5 μm .

Dokud beton zrál pod neprodyšnou folií, nebyly objemové změny příliš velké, probíhalo autogenní/plastické smrštění. Po prvních pár hodinách se dokonce vývoj objemových změn neprojevoval. Teprve až po odstranění folie nastává smrštění vysycháním, kde rychlost smrštění je již znatelně větší a z grafu pozorovatelné. Křivka se s narůstající dobou měření zplošťuje, objemové změny již nejsou tak velké.



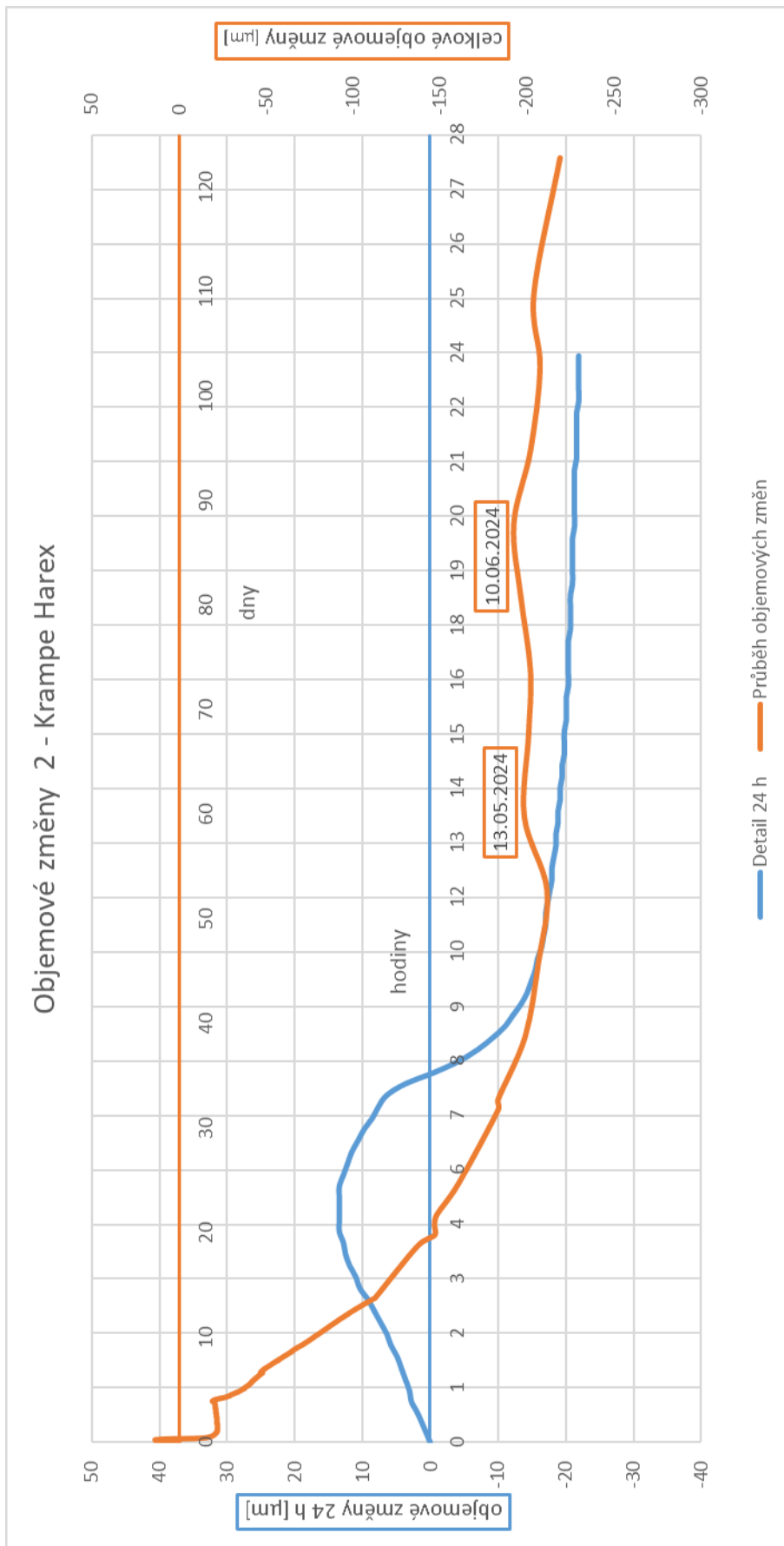
Graf 13 Průběh objemových změn, receptura 1

6.2.7.2 Receptura 2 – Krampe Harex

Tato receptura zaznamenala vrchol expanze na hodnotě 13 μm během 5 hodin zrání. Poté postupně klesala až se dostala do smrštění, kdy na konci prvních 24 hodin již byla ve smrštění o 22 μm . Celkové smrštění je ale ve výsledku menší než u referenční směsi bez vláken. Průběh objemových změn včetně detailu prvních 24 h je znázorněno v Grafu 14.

Výsledné smrštění tělesa receptury 2 je 219 μm ve stáří 123 dní. Smrštění tělesa ve stáří 66 dní je 201 μm . Vlákná Krampe Harex jsou horší než směs bez vláken v počáteční fázi tuhnutí a tvrdnutí betonu, kdy smrštění pod folií je větší, ale mají pozitivní vliv na celkovou hodnotu smrštění v delším časovém horizontu.

I u této receptury se objevují 2 hodnoty expanze, kde by bylo očekávané pokračující smrštění, v pozdější fázi zrání betonu, ve stejných termínech měření jako u receptury 1. Jedná se taktéž o stejný termín měření, kdy beton ve stáří 53 dní měl smrštění 211 μm , ve stáří 59 dní již pouze 200 μm . Druhý výkyv má podobný rozdíl jako měření v prvním termínu, a to stáří 80 a 87 dní, kdy smrštění bylo 202 a 192 μm .

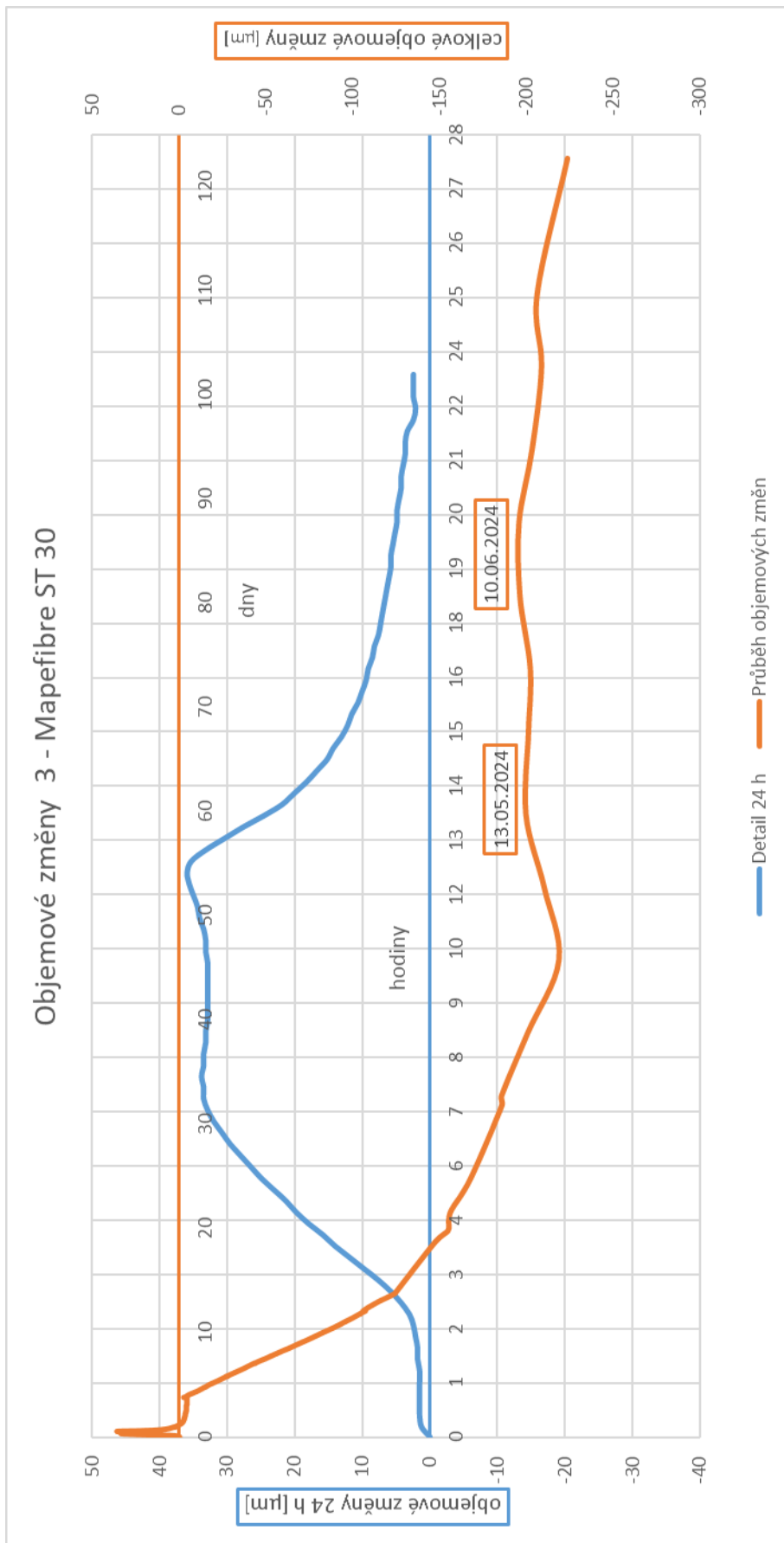


Graf 14 Průběh objemových změn, receptura 2

6.2.7.3 Receptura 3 – Mapefibre ST 30

U receptury 3 se v oblasti expanze objevily 2 srovnatelně velké vrcholy. První vrchol v expanzi měl hodnotu 34 μm po 7,5 h zrání. Vzorek se ve žlabu začal mírně smršťovat a během dalších dvou hodin klesla expanze na hodnotu 33 μm . Poté začala expanze opět stoupat a po cca 12,5 hodinách od uložení čerstvého betonu do žlabu dosáhla expanze svého vrcholu, a to na hodnotě 36 μm . Po tomto vrcholu se vzorek ve žlabu začal smršťovat a po 24 hodinách od uložení byl stále v mírné expanzi, cca na hodnotě 2,5 μm . Až ve stáří 27 hodin od uložení čerstvého betonu dosáhl vzorek své původní velikosti a začal se postupně smršťovat, kdy se hodnota smrštění pod folií konstantně pohybovala hodnot kolem -4 μm .

Použití polypropylenových vláken Mapefibre ST 30 dovolila čerstvému betonu zvětšit svůj objem až na 36 μm , což je více než referenční směs. Zároveň ale během srovnávacího období 24 h od uložení udržela celkovou objemovou změnu srovnatelnou se svou původní velikosti při uložení, stejně jako při dalším zrání, dokud byl ztvrdlý beton ve stejném prostředí pod fólií, tzn. v průběhu ošetřování pod folií nedocházelo k výraznému smrštění. Po odstranění fólie postupně smrštění narůstalo až na hodnotu 224 μm , což je srovnatelná hodnota s ocelovými vlákny Krampe Harex. Smrštění ve stáří 66 dní bylo 201 μm . K výkyvu měření zde došlo mezi stáří vzorku 45-59 dní, kdy z hodnoty smrštění 219 μm ve 45 dnech stáří se vzorek změnil na hodnotu smrštění 210 μm ve stáří 52 dní a hodnotu 201 μm při 59 dnech. Během 14 dní byla tedy při měření zaznamenána v každém měření mírná expanze. Poté vzorek oscilloval mezi smrštěním a mírnou expanzí v rozmezí $\pm 5 \mu\text{m}$ do stáří 88 dní, kde poté probíhalo prakticky jen smrštění, s mírnou expanzí ve 110 dnech stáří. Průběh objemových změn je znázorněn v Grafu 15.



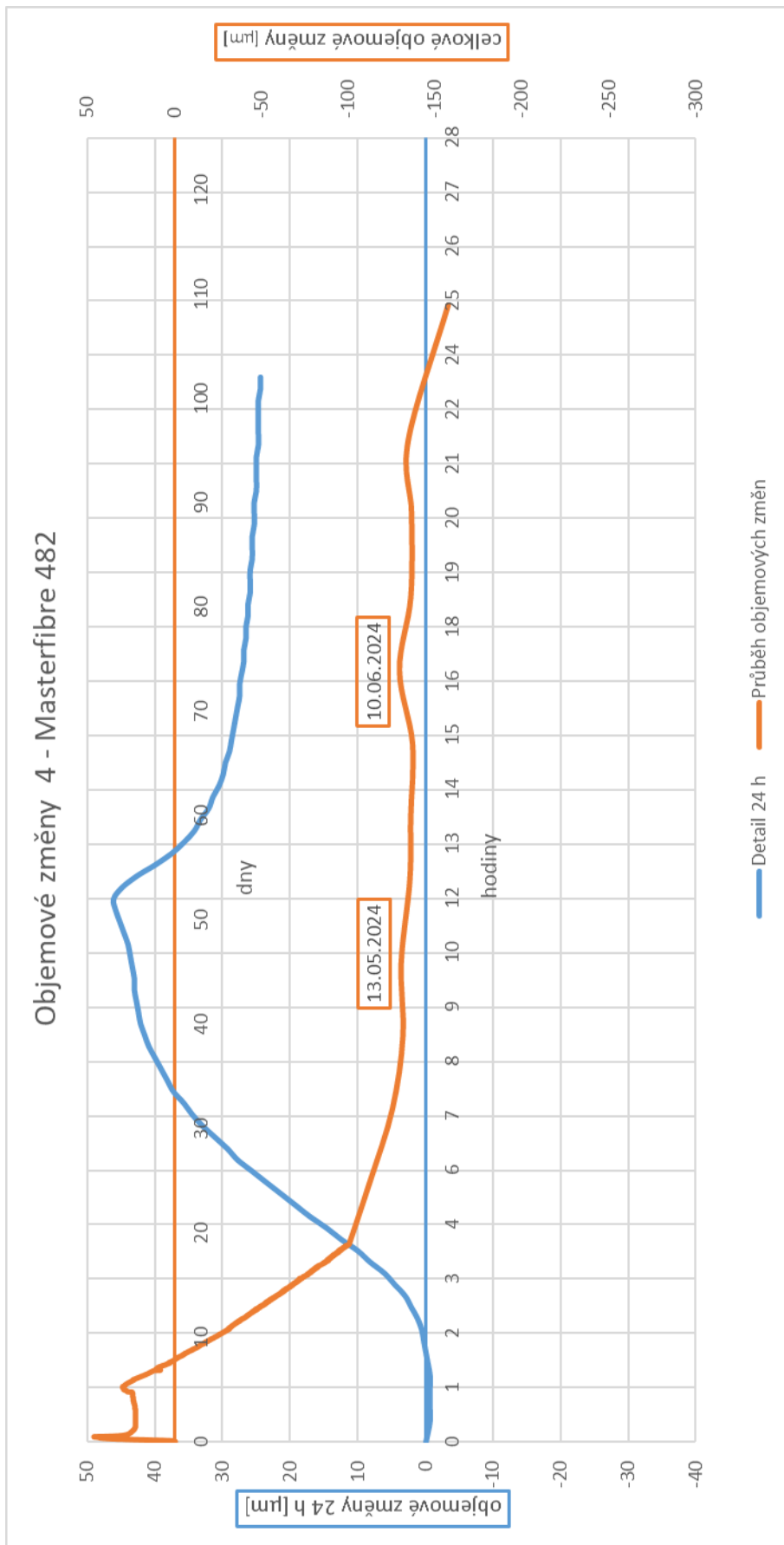
Graf 15 Průběh objemových změn, receptura 3

6.2.7.4 Receptura 4 – Masterfibre 482

U receptury 4 po dobu zrání pod folií došlo k expanzi betonu až na hodnotu 46 μm po 12 hodinách od uložení čerstvého betonu. Potom bylo na tělese pozorováno smrštění k hodnotě 25 μm . Hodnota expanze kolem 25 μm byla téměř neměnná, dokud byl vzorek pod neprodyšnou folií. Celkově se objemové změny pohybovaly pořád v prostoru expanze

Po odstranění folie ve stáří tělesa 4 dnů byla po dobu 27 hodin zaznamenávána expanze z 25 μm až k 28 μm . Od této chvíle bylo pozorováno pouze smrštění až ke dvěma termínům měření ve stáří 46 a 74 dní, kdy stejně jako v předchozích případech byla zaznamenána mírná expanze přibližně 5 μm .

Celkové smrštění na konci měření bylo 157 μm . Smrštění ve stáří 66 dní bylo 137 μm . Z průběhu křivky objemových změn je zřejmé, že tato mikrovlákna z prozatím zkoušených typů mají nejlepší vliv na průběh objemových změn. Receptura s těmito vlákny má největší hodnotu expanze ze všech sledovaných receptur. Zároveň patří mezi 3 receptury, které vrcholu expanze dosáhly po 12 hodinách od uložení čerstvého betonu, navíc tato receptura měla nejmenší pokles od vrcholu expanze ve sledovaném období 24 hodin.



Graf 16 Průběh objemových změn, receptura 4

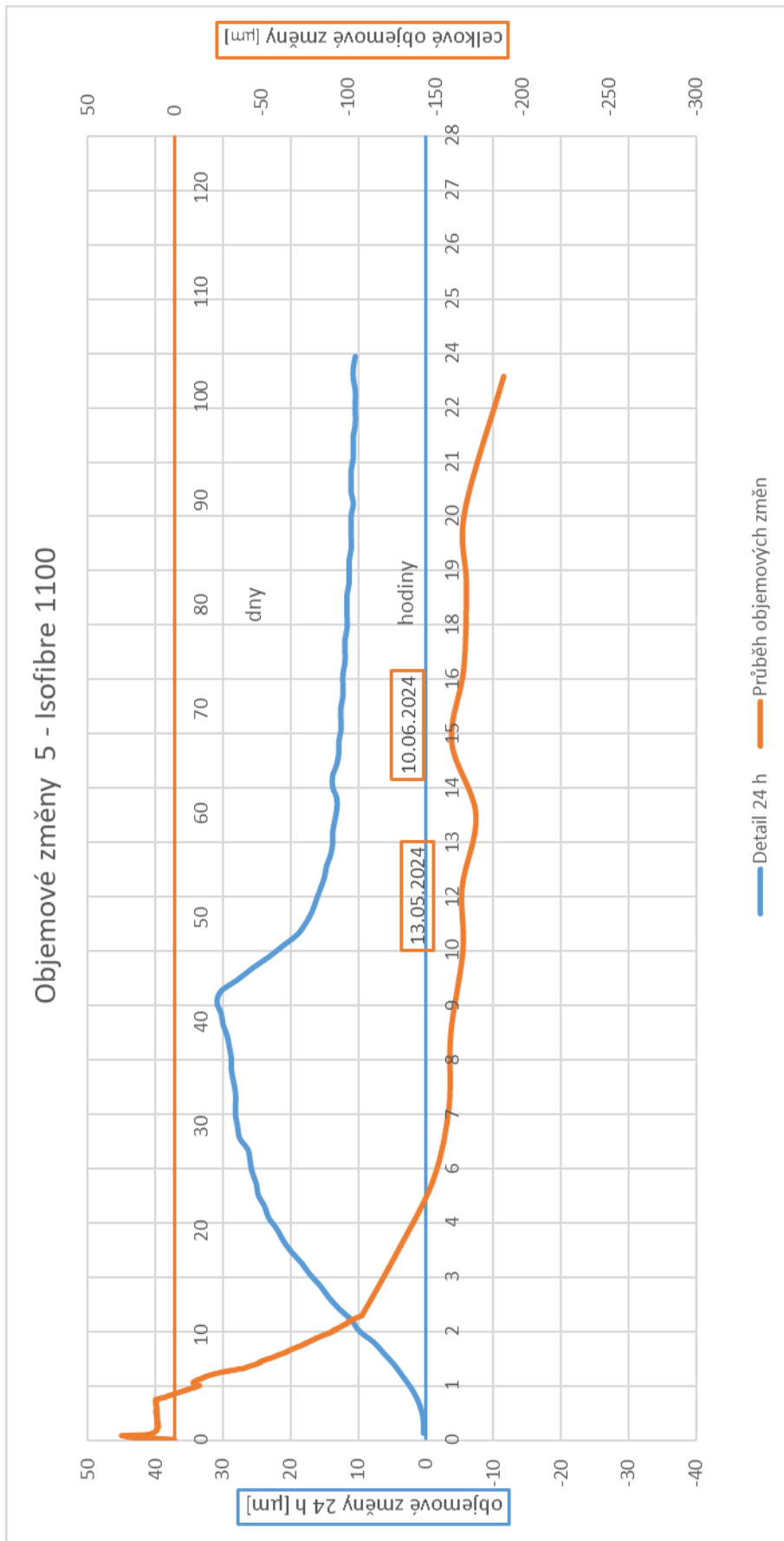
6.2.7.5 Receptura 5 – Isofibre 1100

U receptury 5 byla pozorována expanze během zrání pod folií 31 μm za dobu téměř 10 hodin od uložení čerstvého betonu. Následně expanze klesla k hodnotě 15 μm . Opět se potvrzuje, že mikrovlákná působí příznivě na objemové změny, po dobu 24 h od uložení čerstvého betonu nedošlo k výraznému smrštění.

Po odstranění krycí folie ve stáří 4 dní od uložení začalo probíhat smrštění, kdy zhruba ve stáří 30 dní dosáhlo hodnoty 158 μm a křivka se začala zplošťovat.

Celkové smrštění pak bylo 189 μm , ve stáří 66 dnů byla hodnota smrštění 159 μm . Tato hodnota je ale v jednom ze dvou termínů měření s výkyvem, předchozí hodnota smrštění, která je ve stáří 59 dnů, byla 173 μm . V druhém výkyvu se změna dostala z hodnoty 173 μm ve stáří 60 dní až na 159 μm ve stáří 67 dní.

Co se týče absolutních hodnot, ve srovnání s ostatními mikrovláknými má tento typ největší hodnotu smrštění, nicméně v porovnání v celkovém měřítku s ostatními použitými vlákny jsou hodnoty smrštění stále v lepší polovině.



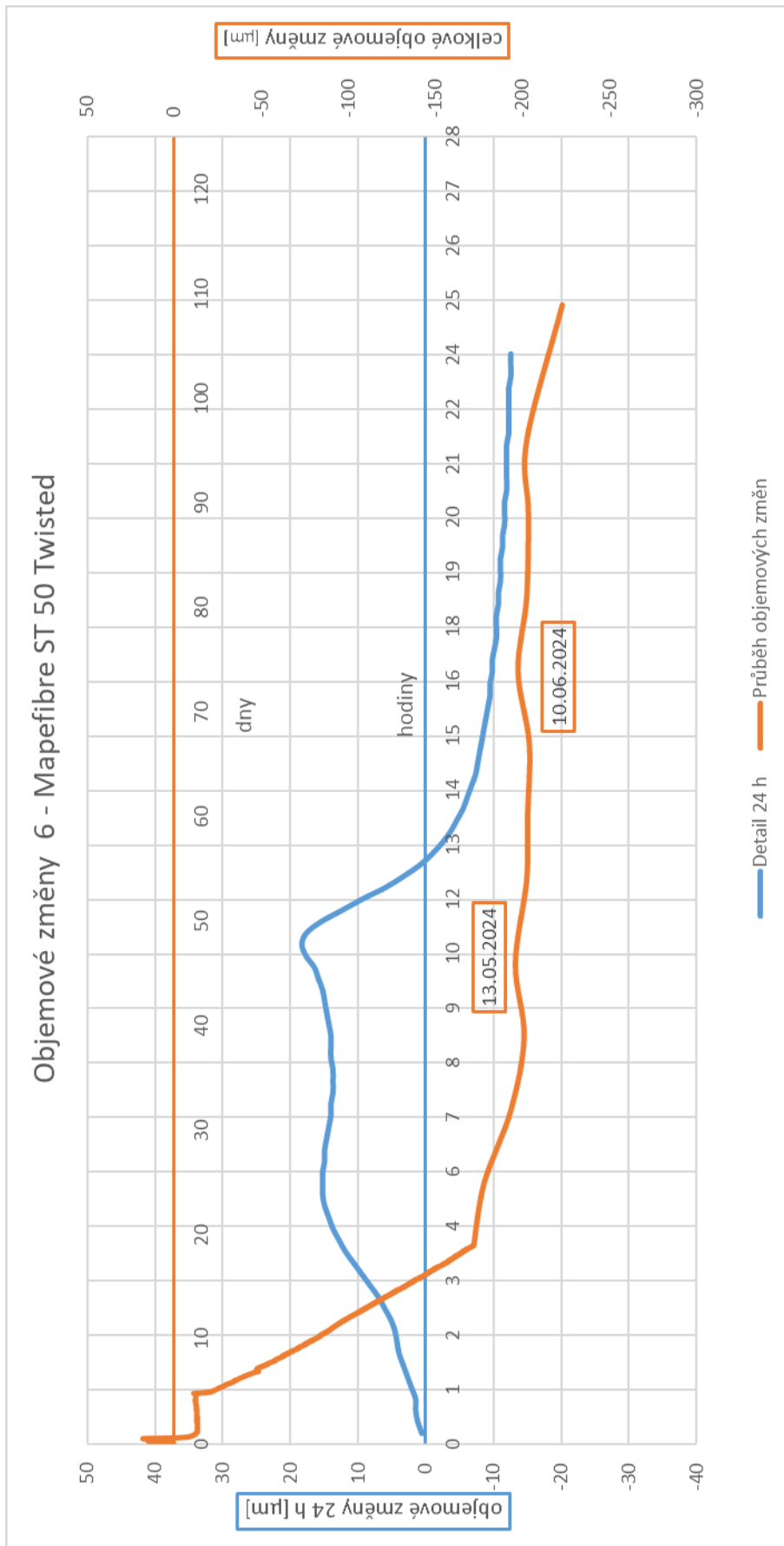
Graf 17 Průběh objemových změn, receptura 5

6.2.7.6 Receptura 6 – Mapefibre ST 50 Twisted

Tato receptura dosáhla vrcholu své expanze po 10 hodinách od uložení betonu. Vrchol byl na hodnotě pouhých 18 μm , což je čtvrtá nejnižší hodnota expanze. Poté se beton začal smršťovat a již po 13 hodinách od uložení se velikost betonu dostala na úroveň při uložení, dále pak klesala až na hodnotu smrštění 12 μm během 24 hodin. Stejně jako u ostatních receptur se hodnota objemových změn po dobu překrytí folií výrazně neměnila.

Pod odkrytí folie opět nastalo smrštění, které lineárně klesalo do stáří 18 dní, poté bylo těleso odformováno a pokračovalo se v manuálním měření. Ve stáří kolem 39 dní se začala křivka objemových změn zplošťovat, kdy bylo zaznamenáno smrštění 201 μm , výkyvy smrštění nebyly výrazné, další měření se pohybovalo v rozmezí $\pm 5 \mu\text{m}$.

Celkové smrštění ve stáří 109 dní bylo 223 μm . Ve srovnávacím období 66 dní bylo smrštění 204 μm . Tato vlákna měla podobný celkový průběh objemových změn jako vlákna receptur 2 (Krampe Harex) a 3 (Mapefibre ST 30). Výkyvy měření zde byly ve stáří 46 a 74 dní, kdy změna smrštění byla ve velikosti kolem 5 μm .



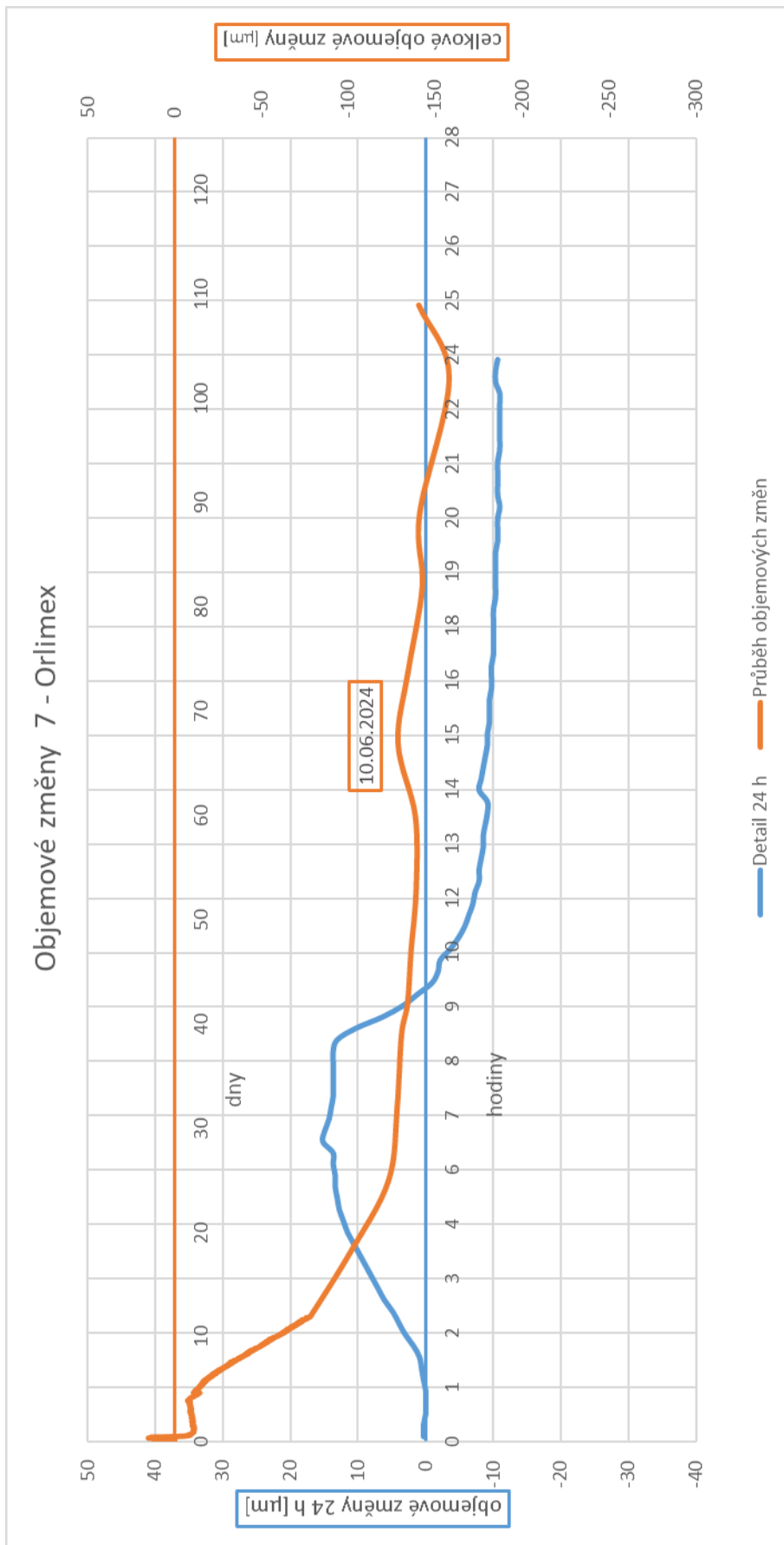
Graf 18 Průběh objemových změn, receptura 6

6.2.7.7 Receptura 7 – Orlimex

Tato receptura dosáhla vrcholu expanze po 6,5 h na hodnotu 15 μm . Na této hodnotě se další 2 h držela, poté začalo smršťování, které se zastavilo na smrštění 10 μm . Jsou to jediná mikrovlákná, která během prvních 24 h nezůstala v oblasti expanze, ale nastalo smrštění. Kolem hodnoty 10 μm nadále oscilovalo měření až do doby sejmutí folie.

Smrštění pokračovalo lineárně do doby odformování tělesa ze žlabu ve stáří 12 dní, poté se pokračovalo s manuálním měřením. Křivka smrštění se začala zplošťovat ve stáří 32 dnů s hodnotou smrštění 128 μm . Tato receptura nebyla ovlivněna výkyvem měření v prvním termínu. Druhý termín výkyvu je však měřen ve srovnávacím stáří 66 dnů.

Celková hodnota smrštění na konci měření ve stáří 109 dní je 141 μm . Zde je však opět znatelný výkyv měření, kdy předchozí hodnota ve stáří 10 dní je 158 μm . Smrštění ve stáří 66 dní bylo 129 μm , hodnota je však poznamenána výkyvem měření, předchozí hodnota smrštění ve stáří 60 dní byla 139 μm . I tak je v konečné hodnotě smrštění ve srovnávacím období druhou nejlepší recepturou.



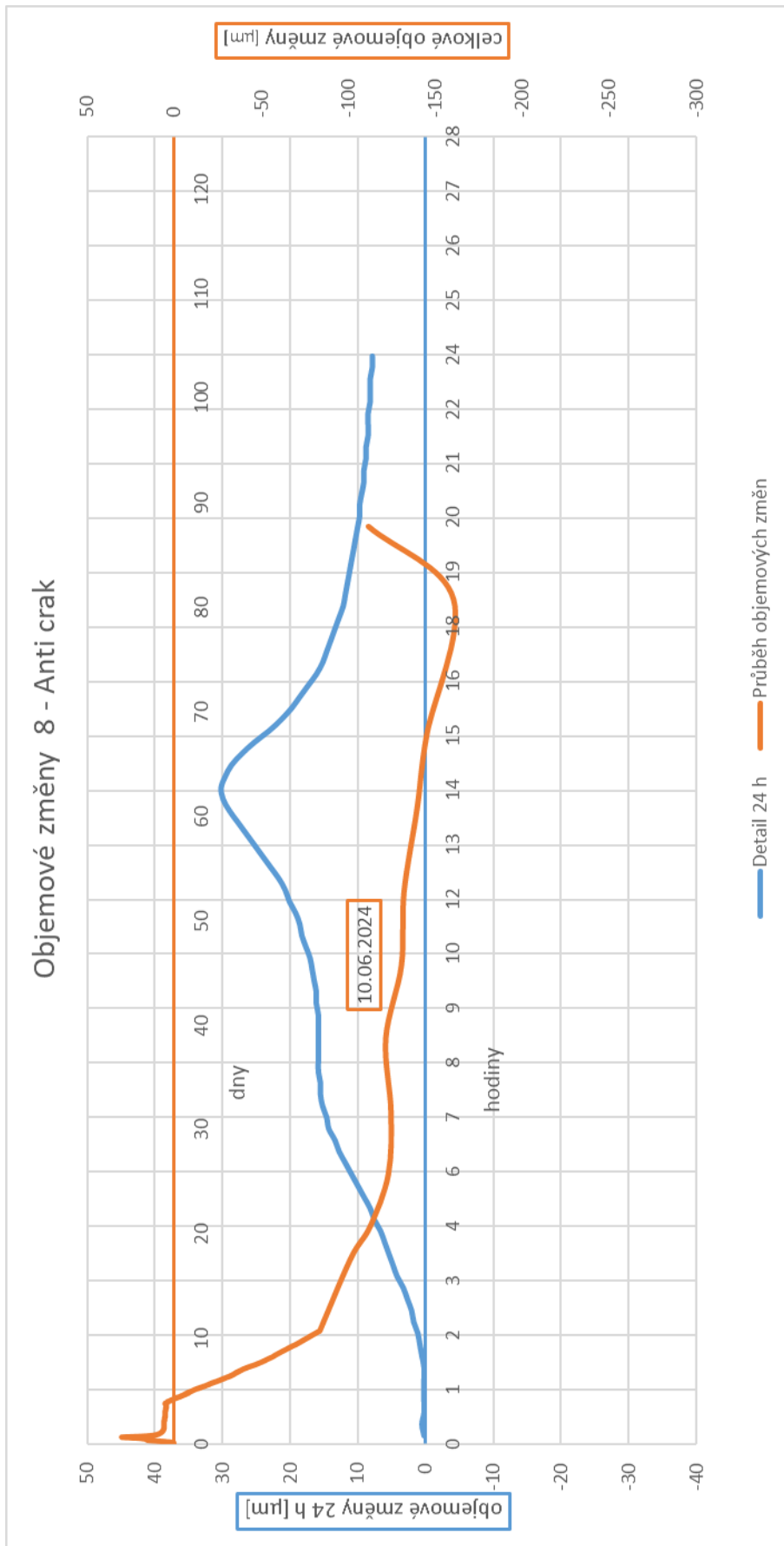
Graf 19 Průběh objemových změn, receptura 7

6.2.7.8 Receptura 8 – Anti crack 67/36

Receptura 8 dosáhla maximální expanze 30 μm v době 14 hodin po uložení čerstvého betonu do žlabu. Expanze má tedy u tohoto vzorku nejpomalejší nárůst. Po dosažení maximální expanze pak křivka přešla ve smrštění, které se v době 24 h od uložení nacházelo na hodnotě 8 μm . Do doby sundání folie se beton stále smršťoval až na hodnotu 5 μm ve stáří 4 dnů.

Po odstranění folie pokračovalo smrštění lineárně do doby odformování tělesa ve stáří 11 dnů. Křivka se začala zplošťovat ve stáří tělesa 32 dní při hodnotě 125 μm . Na rozdíl od ostatních receptur se zde neprojevil výrazný vliv sledovaných výkyvů měření a smrštění bylo každým měřením menší, křivka stále klesala.

Na konci měření ve stáří 88 dní bylo celkové smrštění 112 μm , předchozí hodnota ve stáří 81 dní byla 161 μm . Zde je opět znatelný výkyv na konci měření, hodnota je s velkou pravděpodobností ovlivněna. Ve srovnávacím období ve stáří 66 dní bylo smrštění na hodnotě 145 μm .



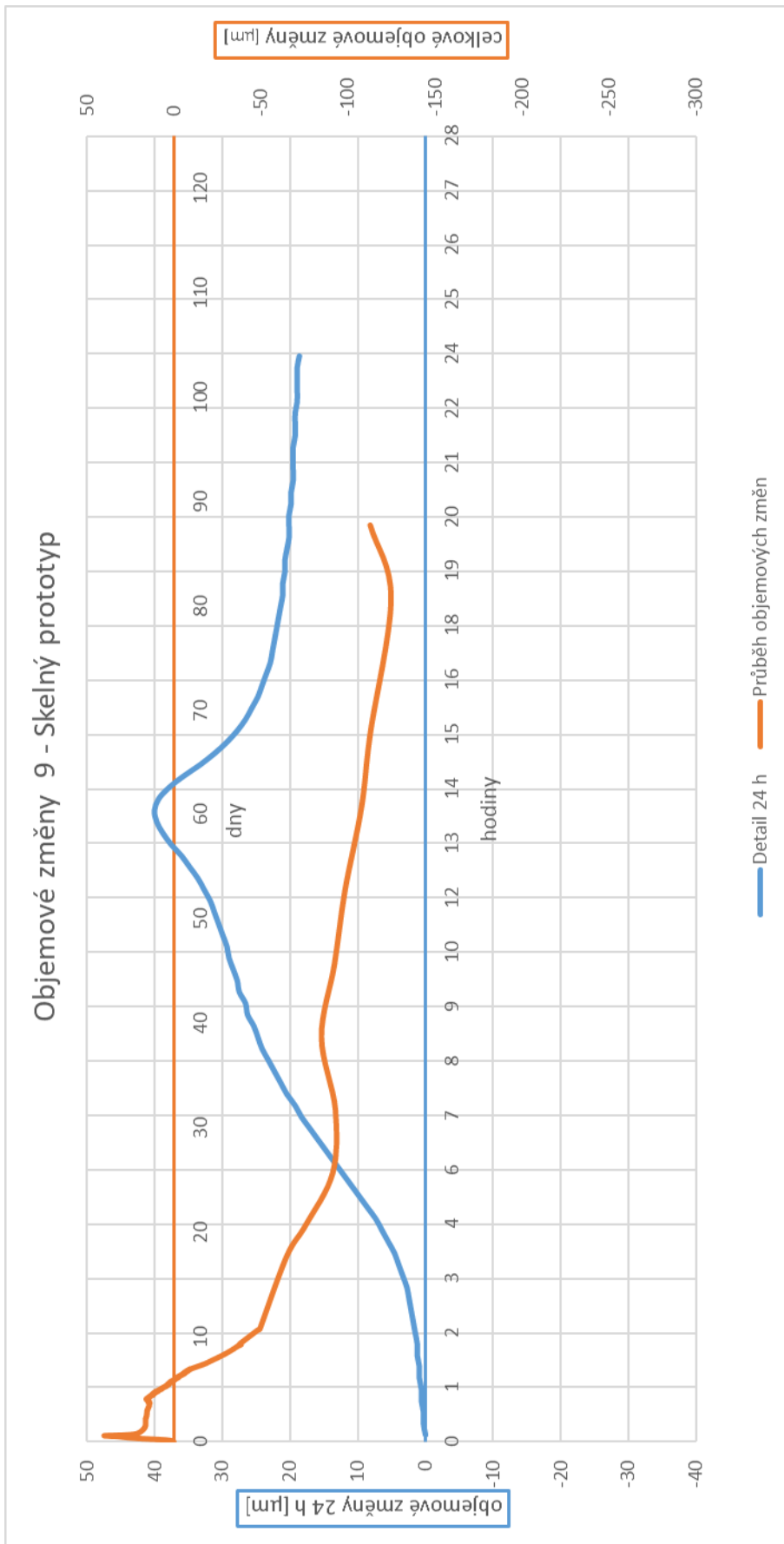
Graf 20 Průběh objemových změn, receptura 8

6.2.7.9 Receptura 9 – Skelný prototyp

Tato receptura má v prvních 24 hodinách podobný průběh jako receptura 8. U této receptury byla hodnota expanze druhá největší ze všech receptur, a to 40 μm v době 14 h od uložení betonu do měřicího žlabu. Poté, stejně jako u receptury 8, docházelo k mírnému smrštění do konce sledovaného období 24 h.

Během 4 dnů, kdy byl beton pod nepropustnou folií, byl zaznamenán pokles o 4 μm . Po 4 dnech byla folie odstraněna a vysycháním se začal beton lineárně smršťovat po dobu ve smršťovacím žlabu, po vyjmutí ze žlabu smršťování pokračovalo až do stáří 32 dní na hodnotu 93 μm , v dalším měření ve stáří 39 dní byla zaznamenána mírná expanze na hodnotu 85 μm , potom následovalo opět smrštění až do konce měření.

Celkové smrštění ve stáří 88 dní bylo 113 μm , předchozí měření ve stáří 81 dní bylo 125 μm . Smrštění ve sledovaném stáří 66 dní bylo 113 μm . Tato receptura měla ve sledovaném stáří těles 66 dní nejmenší hodnotu smrštění.



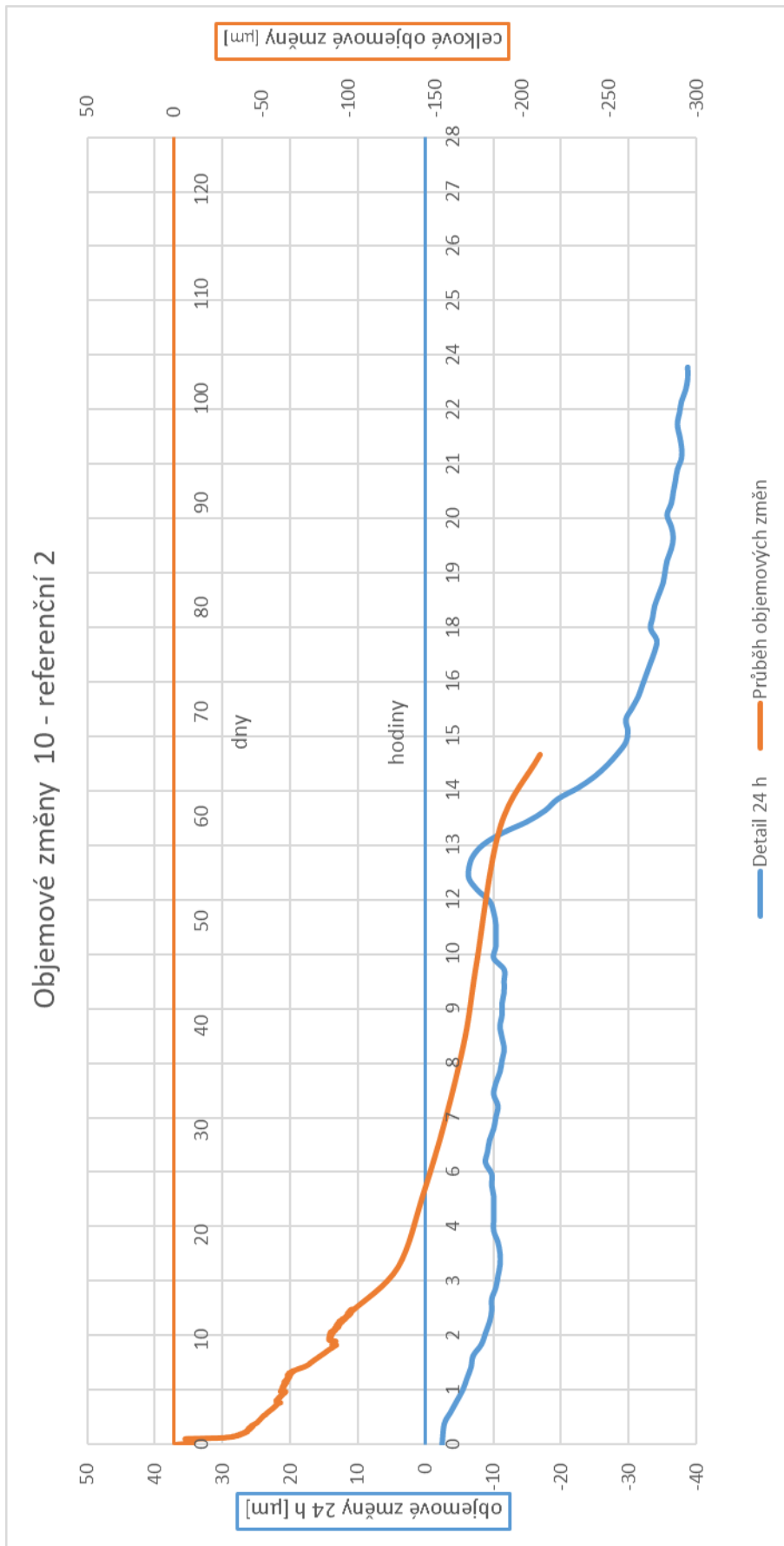
Graf 21 Průběh objemových změn, receptura 9

6.2.7.10 Receptura 10 – referenční 2

U této receptury, jako u jediné, nebyla zaznamenána žádná počáteční hodnota expanze. Celé měření objemových změn se odehrávalo v oblasti smrštění. Z počátku tuhnutí a tvrdnutí betonu bylo do doby 3 h od uložení zaznamenáno smrštění až na hodnotu 11 μm . Dalších několik hodin smrštění oscilovalo kolem této hodnoty, aby pak v době kolem 12,5 h vystoupalo na smrštění 6 μm . Po tomto vrcholu se beton začal poměrně prudce smršťovat, kdy v období na konci sledovaných prvních 24 h hodnota smrštění byla 39 μm .

Po tomto prudkém poklesu následovalo další smršťování i pod nepropustnou folií, kdy v období 4 dnů klesla hodnota smrštění na 61 μm . Je tedy znatelné zpomalení smrštění.

Na konci sledovaného období, které je zároveň i celkovou hodnotou smrštění pro tuto recepturu, je hodnota smrštění 210 μm . Tato hodnota je srovnatelná s hodnotami receptur, kde byla použita makrovlákna.



Graf 22 Průběh objemových změn, receptura 10

6.2.7.11 Sumarizace výsledků – objemové změny

Grafické srovnání nabízí Graf 24 a Graf 25. V grafech je kromě barevného odlišení receptur i odlišení receptur s mikrovlákny – tečkovanou křivkou. Lze potvrdit tezi, že mikrovlákna mají pozitivní vliv na velikost i průběh smrštění.

Na všech zkoušených recepturách byla zřejmým způsobem znatelná mez, kdy z betonu byla po 4 dnech zrání odstraněna nepropustná folie a byl ponechán prostředí v komoře. To značí důležitost ošetřování povrchu betonu co možná nejdéle. Pro další měření objemových změn vláknobetonů lze doporučit delší dobu ošetřování, např. minimálně 7 dní.

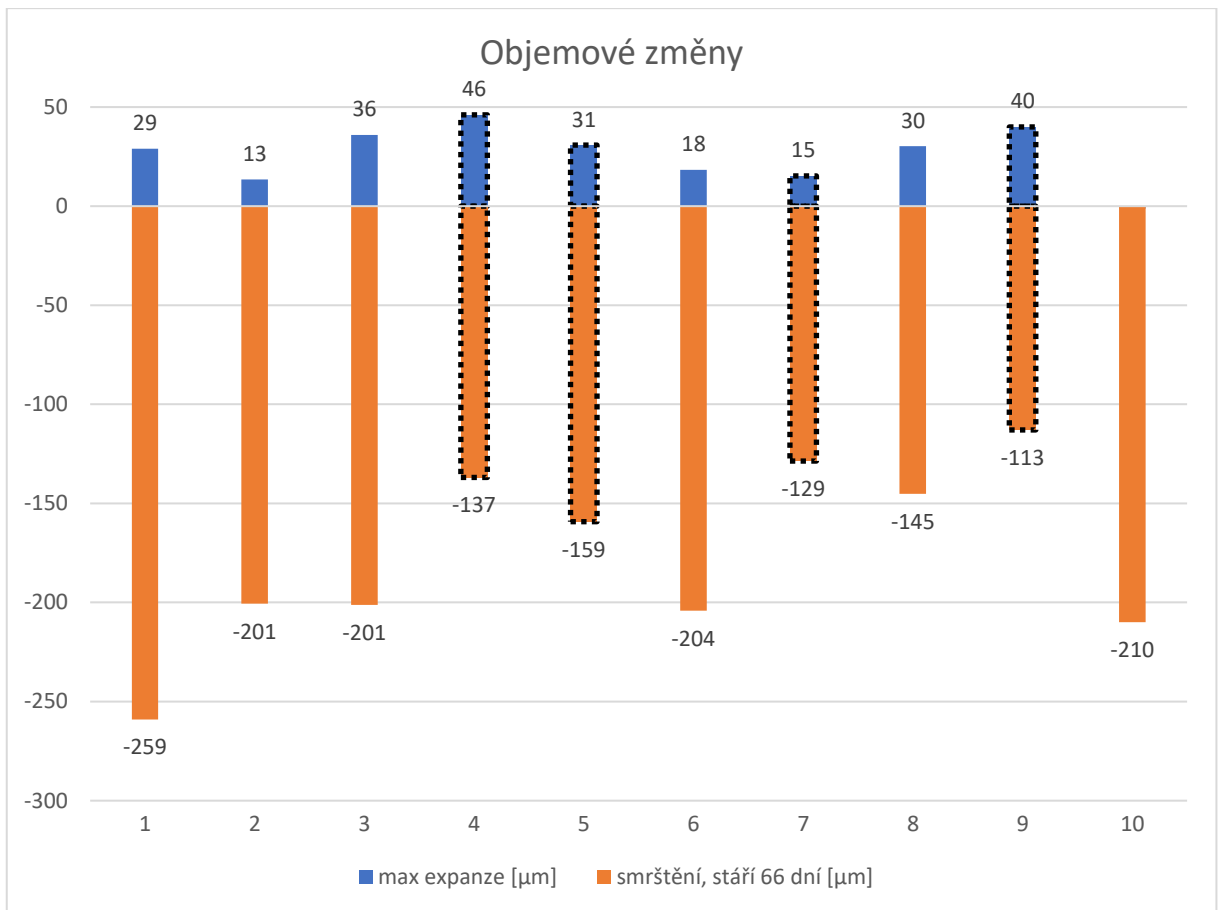
Mikrovlákna se ukazují jako jednoznačná volba pro omezení objemových změn betonu. Každá receptura s mikrovlákny měla nižší celkové smrštění po 66 dnech než receptura s makrovlákny. Dále se jako vhodná vlákna s pozitivním vlivem na velikost smrštění ukázala skelná makrovlákna Anti crack, která měla pozitivní vliv během prvních 24 hodin i na celkové smrštění. Další makrovlákna, která měla pozitivní vliv hlavně v počáteční fázi, byla Mapefibre ST 30, která držela beton v expanzi celých 24 hodin od uložení čerstvého betonu do měřicího žlabu. Mikrovlákna Orlimex zaznamenala malou hodnotu expanze i malou hodnotu smrštění v prvních 224 hodinách, podobnou hodnotu smrštění v prvních 24 hodinách zaznamenala i makrovlákna Mapefibre ST 50 Twisted a stejně tak i referenční směs bez vláken 1.

V dlouhodobém horizontu (srovnávací stáří 66 dní) jednoznačně lépe omezují smrštění betonu jakákoliv mikrovlákna a makrovlákna Anti crack. Podle typu zaznamenávají mikrovlákna o cca 21–44 % nižší smrštění než nejlepší ostatní makrovlákna.

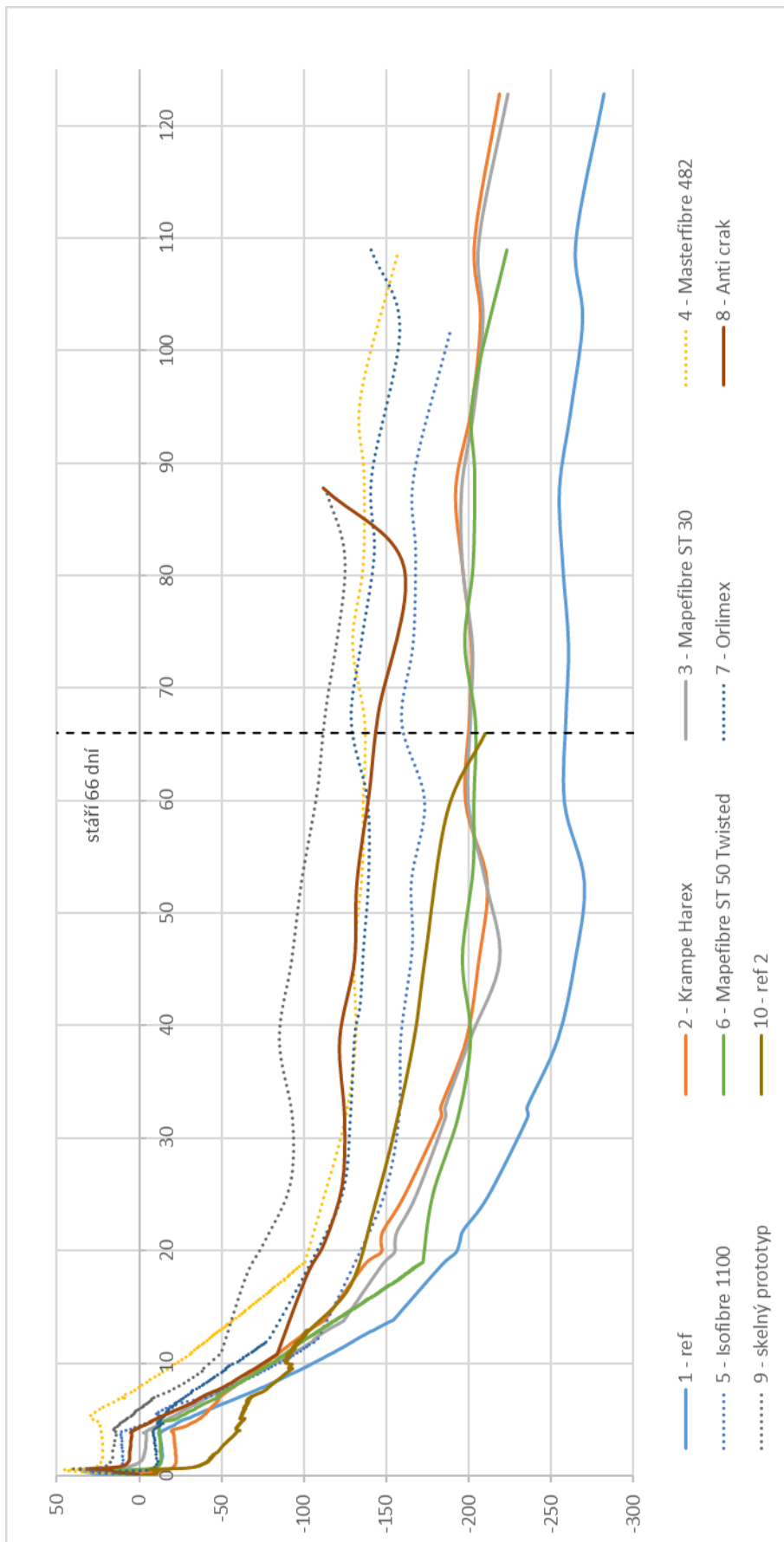
V Tabulce 11 Tabulka 11 a Grafu 23 jsou uvedeny absolutní maximální, minimální a celkové hodnoty objemových změn. Odlišení makrovláken a mikrovláken nabízí Graf 23, kde sloupce ohraničené tečkovanou čarou jsou receptury s mikrovlákny.

označení	typ vláken	max expanze [μm]	smrštění, stáří 66 dní [μm]	celková změna délky (66 dní) [μm]
1	X- ref	29	-259	288
2	Krampe Harex 50/1,2	13	-201	214
3	Mapefibre ST 30	36	-201	237
4	Masterfibre 482	46	-137	183
5	Isofibre 1100	31	-159	190
6	Mapefibre ST 50 Twisted	18	-204	222
7	Orlimex 12 mm	15	-129	144
8	Anticrak 67/36	30	-145	175
9	Skelný prototyp	40	-113	153
10	X - ref2	-1	-210	209

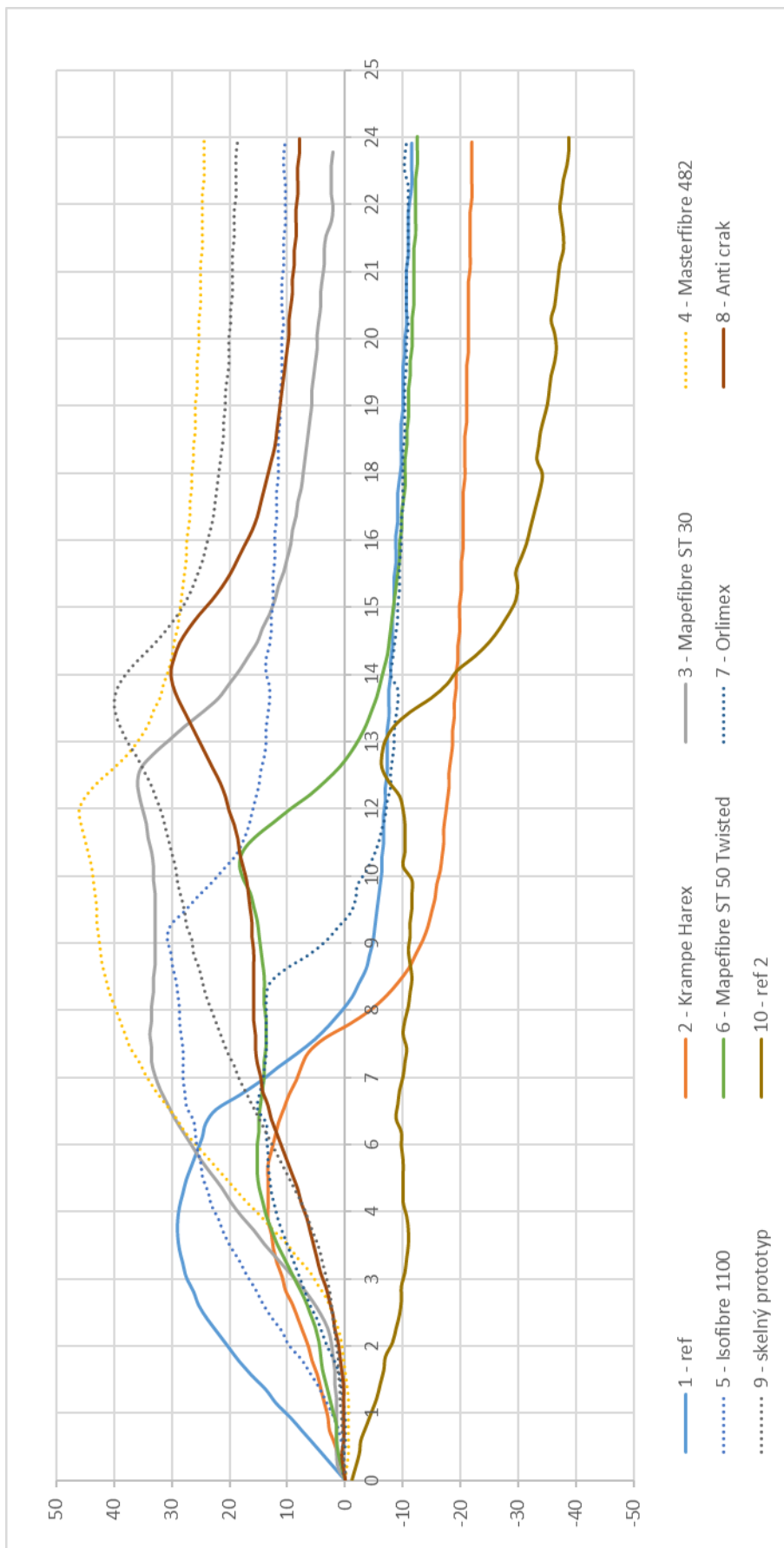
Tabulka 11 hodnoty smrštění jednotlivých receptur



Graf 23 Znárodnění velikosti objemových změn – expanze a smrštění

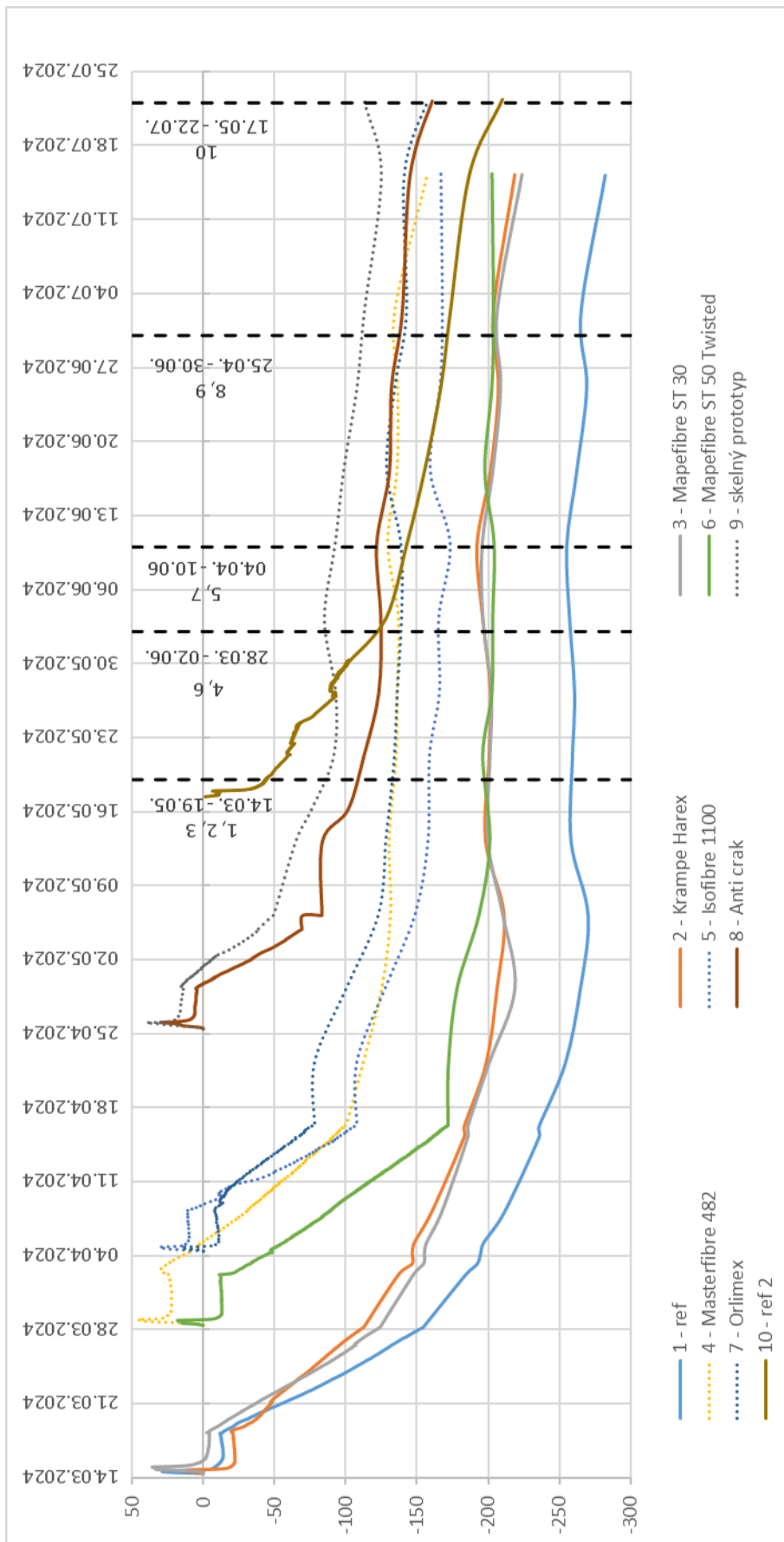


Graf 24 Porovnání vlivu různých typů vláken na objemové změny

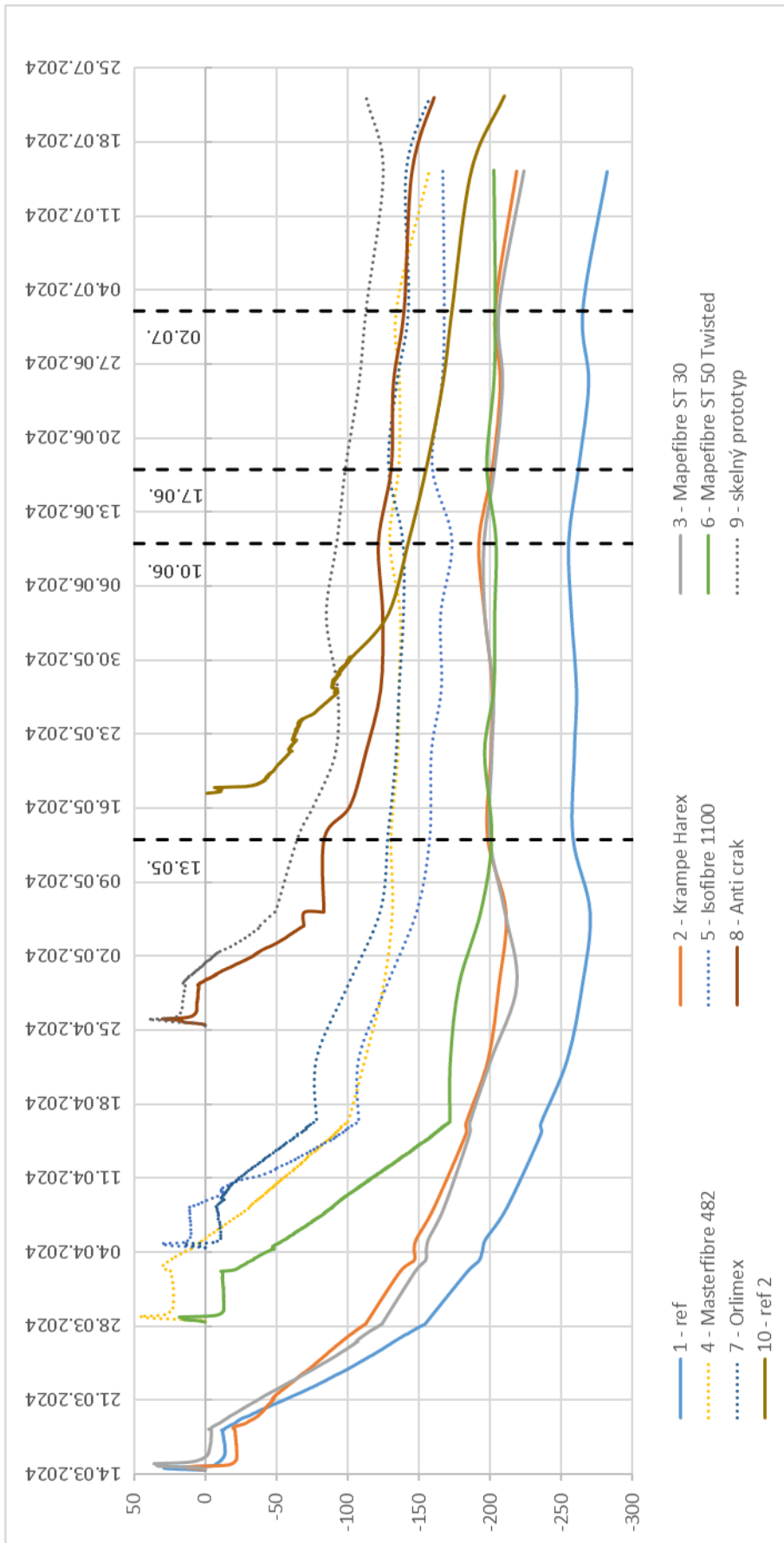


Graf 25 Porovnání vlivu různých typů vláken na objemové změny - detail 24 h

Pro úplnost vyhodnocení výsledků jsou k dispozici následující 2 grafy. Graf 26 nabízí časovou osu od data přípravy čerstvého betonu jednotlivých receptur s vymezením sledovaného období stáří betonu 66 dní, které bylo stanoveno podle termínu přípravy receptury č. 10. Tato receptura byla byla míchána jako poslední a sledování objemových změn probíhalo nejkratší dobu, a to právě 66 dní. Graf 27 znázorňuje termíny měření, ve kterých byla namísto očekávaného smrštění naměřena hodnota mírné expanze. Z tohoto grafu je patrné, že ovlivněno bylo měření u všech receptur, které byly právě měřeny. Některé receptury byly ovlivněny více, některé méně, ovlivnění každé z receptur je uvedeno vždy v kapitolách věnující se průběhu objemových změn každé jednotlivé výše.



Graf 26 Časová osa měření objemových změn



Graf 27 Vyznačení termínů výkyvů měření

7 Závěr

V teoretické části byly rešerší popsány druhy objemových změn, které se v betonu objevují v průběhu času. Dále byly popsány vlastnosti, výroba a vliv některých druhů vláken na beton.

V praktické části bylo cílem ověřit vliv zvolených druhů vláken na vlastnosti betonu v čerstvém a ztvrdlém stavu. Pro experimentální část práce bylo zvoleno 10 receptur. Složení receptur a v nich použitý konkrétní typ vláken přibližuje Tabulka 2.

Čerstvý beton

Už při přípravě čerstvého betonu bylo znatelné použití vláken, kdy jejich rozdílná nasákavost a povrch, který ubíral vodu smáčivostí, měnil konzistenci čerstvého betonu. Při míchání čerstvého betonu bylo důležité dodržet dávkování a typ superplastifikátoru, aby byly zaručeny stejné podmínky pro působení přísad ve všech recepturách. Bylo rozhodnuto konzistenci měnit pouze za pomoci přidání nebo ubrání množství záměsové vody, kdy bylo důležité zachovat zpracovatelnost čerstvého betonu. Vzhledem k tomu, že vlákna v čerstvé směsi ovlivňují konzistenci, nebylo možné dodržet u všech receptur stejné množství vody, vždy bylo o množství vody a zároveň o ponechané konzistenci rozhodnuto operativně, podle toho, jaké hodnoty čerstvý beton vykazoval při míchání.

Obsah vzduchu v čerstvém betonu se pohyboval nejčastěji mezi 2,5 – 3 %, směs 3 (polypropylenová vlákna Mapefibre ST 30) měla obsah vzduchu 3,2 %, receptura s mikrovláknem 5 a 7 měla obsah vzduchu 3,5 %, receptura 9, kde je kombinace mikro a makro vláken dosáhla hodnoty až 5,6 %. Z těchto výsledků vyplývá, že mikrovláknem zvyšují obsah vzduchu v čerstvém betonu. V dalším výzkumu by bylo vhodné zaměřit se také na obsah účinných pórů v betonu (póry do velikosti 300 μm), kdy by mohla být zajištěna mrazuvzdornost betonu.

Ztvrdlý beton

Mrazuvzdornost

Na recepturách nebylo možné mrazuvzdornost vyhodnotit, protože u všech těles podrobených zkoušce mrazuvzdornosti došlo po prvních 25 cyklech k rozpadu zkušební tělesa.

Pevnost v tlaku

Při porovnání pevností v tlaku, kdy bylo k dispozici srovnání pevnosti po 7, 28 a 56 dnech zrání, bylo možné pozorovat zvýšení pevností se zvyšováním stáří až na receptury 8 a 9, kde pevnosti po 56 dnech byly o 2, resp. o 1 MPa nižší než pevnost po 28 dnech. Zároveň se ale pevnost po 56 dnech zkoušela na odlomcích trámů 100x100x400 mm, pevnost v tlaku po 28 dnech se zkoušela na krychlích o hraně 150 mm. Zároveň bylo pozorováno zvýšení pevnosti v tlaku u každé receptury s přidáním vláken oproti referenční receptuře bez vláken. Zde však bylo nutné vzít v úvahu rozdílné vodní součinitele jednotlivých receptur, kdy obsah záměsové vody má pravděpodobně vyšší vliv na výslednou pevnost než množství a typ použitých vláken. Pro další vývoj by bylo vhodné upravit složení receptury tak, aby vodní součinitel byl co možná nejpodobnější u všech receptur a konzistenci upravit jiným nebo pomocí kombinace různých plastifikačních přísad.

Pevnost v tahu

Pro pevnost v tahu byly zvoleny různé typy zkoušek. Proběhly 3 zkoušky normové a jedna experimentální. Pevnosti v tahu zkouškou mez úměrnosti a osový tah byly podle očekávání většinou vyšší nebo stejné u receptur s vlákny v porovnání s referenční recepturou, opět se ale může projevit vliv množství vody, kdy u receptur s menším vodním součinitelem vycházely obecně tahové pevnosti vyšší. Pro další studium je vhodné zaměřit se na vyšší dávky vláken nebo kombinaci mikro a makro vláken. Zároveň je nutné dodržet stejný vodní součinitel a zpracovatelnost upravit pomocí plastifikátorů.

Osový tah – experimentální zkouška ohybové pevnosti

Jedinou tahovou zkouškou, kde se vliv vodního součinitele tolik neprojevil, byla experimentální zkouška osový tah. Zde naopak referenční směs bez vláken měla pevnost v osovém tahu nejvyšší, na stejnou pevnost dosáhly zároveň receptury 5 a 6. Podle autorů studie [18], ve které je tato experimentální zkouška popsána, tato zkouška nejlépe vyjadřuje vliv vláken na tahovou pevnost zkoušeného tělesa. Pokud by se měla brát tato zkouška jako charakteristická pro tahovou pevnost jednotlivých receptur, muselo by být konstatováno, že vlákna mají negativní vliv na tahovou pevnost betonu.

Pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu ohybem nepřinesla velké výkyvy pevností, kdy všechny receptury včetně referenční se pohybovaly kolem pevnosti 5 MPa, receptura 2 byla na hodnotě 4,3 MPa, pouze receptura 8 se skleněnými vlákny zaznamenala pevnost 6 MPa.

Mez úměrnosti, zbytková pevnost

Zkouška mez úměrnosti, zbytková pevnost, jinak také známá pod pojmem rozevření trhliny, zkoumala maximální sílu do velikosti rozevření 0,05 mm, poté se zaznamenávala síla při rozevření 1-4 mm. Pevnost na mezi úměrnosti, což je do rozevření 0,05 mm, měly receptury v rozmezí 3,5-4,5 MPa. Nejnižší pevnost 3,5 MPa měla receptura 2 s kovovými vlákny Krampe Harex, tato vlákna ale na dalších sledovaných mezích 1-4 mm měla míru zbytkové pevnosti na hodnotě 2,5 – 2 MPa. Receptura 4 s kovovými mikrovlákny měla třetí nejvyšší pevnost na mezi úměrnosti, zbytková pevnost pak lineárně klesala od 2,5 do 1,5 MPa. Oba druhy polypropylenových a polyolefinových vláken zaznamenaly zbytkovou pevnost kolem 0,6 MPa, zbývající receptury zanedbatelnou až nulovou. Z výsledků vyplývá, že když v konstrukci dojde ke vzniku makrotrhliny, kovová vlákna jsou schopna přenést zatížení rovno přibližně 70 % své původní pevnosti.

Stanovení kapacity absorbované energie

Zkouška je normová pro stříkaný beton, pro zajímavost byla zařazena i pro experimentální část této práce. Požadavky na tuto zkoušku jsou u staveb ostění tunelů, u vodních staveb, opěrných zdí, hornictví apod. Tato zkouška tedy byla spíše doplňkovou zkouškou. Byly zkoušeny pouze receptury 2, 3, 4, 6, 8. Nejvyšší hodnotu absorbované energie měla receptura 2 s kovovými makrovlákny, druhá největší hodnota byla u kovových mikrovláken receptura 4. Tyto dvě receptury zaznamenaly i největší sílu, která na zkušební těleso působila. Zbývající receptury s polypropylenovými, polyolefinovými a skleněnými vlákny již měly nižší hodnotu jak absorbované energie, tak i maximální síly. Pro potřeby zvýšení absorpce energie je tedy vhodné

použit v receptuře kovová makro nebo mikrovlákna, v dalším studiu by bylo možné zkusit vlákna zkombinovat anebo zkoušet samostatně s různě vyššími/nížšími dávkami.

Sledování objemových změn

Objemové změny bylo díky smršťovacím žlabům možno sledovat již od fáze čerstvého betonu přes tuhnutí až do tvrdnutí a zrání betonu, kde potom automatické měření bylo ukončeno a kvůli uvolnění smršťovacích žlabů se pokračovalo v manuálním měření. Nejmladší zkušební těleso mělo k termínu zpracování této práce stáří 66 dní, proto bylo jako srovnávací období stáří receptur zvoleno 66 dní. Největší objemové změny se projevovaly od uložení betonu do žlabu po dobu prvních 24 hodin. U některých receptur bylo v tomto období sledováno smrštění, u ostatních expanze. Expanze byla pozorována u 3 z 4 receptur s mikrovlákny a u 2 receptur s makrovlákny. Smršťovací žlaby byly uloženy v komoře se stálými podmínkami, navíc byly překryty folií, aby bylo zabráněno smrštění vysycháním z povrchu. Tím bylo simulováno ošetřování povrchu betonu po uložení do konstrukce/bednění. Po dobu, kdy byl žlab překrytý, byly objemové změny ustáleny a výrazně se neměnily, ve většině případů zůstaly na podobných hodnotách jako po prvních 24 h. Teprve po odstranění folie se přidalo smrštění vysycháním. Ve stáří 66 dní bylo sledováno nejmenší smrštění u všech receptur s mikrovlákny, kdy nejmenší smrštění z těchto zaznamenala receptura 9 se skelným prototypem (kombinace mikro a makrovláken), a to 113 μm . Další 3 receptury, 4, 7, 8 měly srovnatelné smrštění kolem 135 μm , nejhorší mikrovlákno, receptura 5, mělo smrštění 159 μm . Směsi s makrovlákny a referenční bez vláken měly smrštění více než 200 μm .

Pro praktické využití poznatků z měření smrštění je vhodné zvolit správný druh vlákna podle typu konstrukce, venkovní teploty, ceny apod. Pro betonování ve vyšších teplotách je vhodné použít vlákna, která mají dřívější náběh expanze, pro betonáž objemných konstrukcí, kde vzniká velké hydratační teplo je lepší vlákno, které drží déle vyšší hodnotu expanze. Ve všech případech je velmi vhodné ošetřovat povrch čerstvého betonu kropením nebo zakrytím. V navazujících pracích je vhodné zaměřit se na správnou metodiku měření odchylkoměrem nebo zajistit lepší stálost podmínek ve zrací komoře.

PŘEHLED POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Učebnice (VUTIUM). Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Betonové stavitelství. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Betonové stavitelství. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] KRÁTKÝ, Jiří; VODIČKA, Jan a TRTÍK, Karel. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití: směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. Betonové stavitelství. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. ISBN 80-86364-00-3.
- [5] *Rozměry ocelového vlákna*. Online. In: Ocelová vlákna do betonu | TRITREG Třinec. Dostupné z: <https://www.tritreg.com/images/ocelov-vlkn0-640x154.png>. [cit. 2024-08-05].
- [6] VALÁŠEK, Petr. *Kompozity, prášková metalurgie a keramika*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, katedra materiálu a strojírenské technologie, 2014. ISBN 978-80-213-2488-6.
- [7] *Products – ZOLTEK Corporation*. Online. In: ZOLTEK Corporation. Dostupné z: <https://zoltek.com/products/>. [cit. 2024-08-05].
- [8] SOMIYA, Shigeyuki. *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties*. 2nd edition, Academic Press, 2013. ISBN 978-0-12-385469-8.
- [9] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [10] FIALA, M. Chování lubrikační emulze a pryskyřice ve výrobě minerální plsti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010. 46 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Ptáček, Ph.D.
- [11] Aneta Gottwaldová Studium vlastností cementových kompozitů s rozptýlenou výztuží z anorganických vláken. Brno, 2019. 99 s., 3 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [12] ČSN EN 14651+A1 Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)

- [13] ČSN EN 14488-5 Zkoušení stříkaného betonu – Část 5 - Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles
- [14] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [15] ČSN EN 12350–7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody
- [16] ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles
- [17] ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles
- [18] VODIČKA, Jan; KŘÍSTEK, Vladimír; HANZLOVÁ, Jana; TIPKA, Martin a KURTH, Helmut. *25. Betonářské dny 2018: Ohybová zkouška pro výstižnější stanovení tahové pevnosti vláknobetonu*. Pardubice: Česká betonářská společnost, 2018. ISBN 978-80-906759-6-4.
- [19] ČSN EN 14889 Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda
- [20] ČSN EN 12350–2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím
- [21] ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost
- [22] ČSN EN 14488-5 Zkoušení stříkaného betonu – Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles
- [23] *Měřící žlab pro stanovení objemových změn | strojeprzkusebnictvi.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.strojeprzkusebnictvi.cz/merici-zlab-pro-stanoveni-objemovych-zmen.html>. [cit. 2024-08-05].
- [24] ČSN P 73 2452 Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu
- [25] E. CAZAN, Oana; CONSTANTINESCU, Horia; ȘOSA, Ioan a GHERMAN, Marius Călin. *CONSTRUCTII Journal: DETERMINATION OF ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF FIBER REINFORCED SPRAYED CONCRETE*. Online. 2014, roč. 52, č. 2. 2014. ISSN 2247-0328. Dostupné z: https://constructii.incd.ro/Archive/2014-2/Constructii_2014_Vol.15_No.2_ID2014150204.pdf. [cit. 2024-08-04].
- [26] EKTA ET AL. *Materials Today: Proceedings: Investigation of fiber reinforced concrete – Energy absorption capacity with steel and polymeric fibers*. Online. 2023, roč. N/A, č. N/A. 2023. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.076>. [cit. 2024-08-04].
- [27] ČSN EN 731322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

- [28] *Situační a výhledová zpráva len a konopí*. Online. In: Ministerstvo zemědělství. 2010. Dostupné z: https://mze.gov.cz/public/web/file/56759/LEN_a_KONOPI_2010.pdf. [cit. 2024-08-05].
- [29] AWWAD, Ellie; MABSOUT, Mounir; HAMAD, Bilal; TALAL FARRAN, Mohamad a KHATIB, Helmi. Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers. Online. *Construction and Building Materials*. 2012, roč. 35, s. 710-717. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.119>. [cit. 2024-08-05].
- [30] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [31] *Hp 67 By 36 - Owens Corning Anti-Crack Glass Fibers*. Online. In: Indiamart. N/A. Dostupné z: <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Default/2023/10/357151075/FI/SK/EI/36393016/hp-67-by-36-owens-corning-anti-crack-glass-fibers-500x500.jpeg>. [cit. 2024-08-05].
- [32] SOVJÁK, Radoslav. *Ochranné konstrukce z pokročilých vláken vyztužených cementových kompozitů: Protective structures made of advanced fibre-reinforced cementitious composites*. [Praha]: České vysoké učení technické v Praze, 2023. ISBN 978-80-01-07116-8.
- [33] ZHOU, Xiangming; SAINI, Harmeet a KASTIUKAS, Gediminas. Engineering Properties of Treated Natural Hemp Fiber-Reinforced Concrete. Online. *Frontiers in Built Environment*. 2017, roč. 3. ISSN 2297-3362. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00033>. [cit. 2024-08-06].
- [34] SEDAN, D.; PAGNOUX, C.; SMITH, A. a CHOTARD, T. *Journal of the European Ceramic Society*. Online. 2008, roč. 28, č. 1. 2008. ISSN 0955-2219. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221907003925>. [cit. 2024-08-06].
- [35] GORJI AZANDARIANI, Mojtaba; VAJDIAN, Mehdi; ASGHARI, Kian a MEHRABI, Saeed. *Mechanical properties of polyolefin and polypropylene fibers-reinforced concrete—An experimental study*. Online. 2023, roč. 12, č. N/A. 2023. ISSN 2666-6820. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266668202300066X>. [cit. 2024-08-06].
- [36] GESOGLU, Mehmet; GÜNEYISI, Erhan a SABAH ASAAD, Diler. *Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration*. Online. 2016, roč. 103, č. N/A. 2016. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816304565>. [cit. 2024-08-06].
- [37] SHI, Feng; HAO, Hong; PHAM, Thong M. a HAO, Hong. Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths. Online. *Construction and Building Materials*. 2020, roč. 262, č. N/A, s. N/A. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120108>. [cit. 2024-08-06].

- [38] AFROUGHSABET, Vahid a OZBAKKALOGLU, Togay. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. Online. *Construction and Building Materials*. 2015, roč. 94, č. N/A, s. 73-82. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>. [cit. 2024-08-06].
- [39] EMINGER, Luboš. *Optimalizace návrhu složení ultra-vysokohodnotného betonu (UHPC) pro místní betonárny*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2022.
- [40] Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete. Online. ZHANG, Xiuzhen; LIU, Zhichao a WANG, Fazhou. *Construction and Building Materials*. 2019, roč. 226, č. N/A, s. 459-468. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.177>. [cit. 2024-08-06].
- [41] An analysis of the applicability of existing shrinkage prediction models to concretes containing steel fibres or crumb rubber. Online. CHYLÍK, Roman; FLÁDR, Josef; BÍLÝ, Petr; TRTÍK, Tomáš a VRÁBLÍK, Lukáš. *Journal of Building Engineering*. 2019, roč. 2019, č. N/A, s. N/A. ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.021>. [cit. 2024-08-06].
- [42] *Parkovací dům Syner Tower Liberec: Provedení stříkaných betonů*. Online. In: RS – speciální úpravy s.r.o. 2024. Dostupné z: <https://www.rs-upravy.cz/reference/parkovaci-dum-syner-tower-liberec/>. [cit. 2024-08-06].
- [43] *Vláknobeton a venkovní plochy s protiskluznou úpravou*. Online. In: ZAPA Beton. 2022. Dostupné z: <https://www.zapa.cz/cs/vlaknobeton-venkovni-plochy-s-protiskluznou-upravou>. [cit. 2024-08-06].
- [44] ČSN EN 12390-4 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy

DOKLADOVÁ ČÁST

- A – Prohlášení o vlastnostech vlákna Krampe Harex DE 50/1,0
- B - Prohlášení o vlastnostech vlákna Mapefibre ST 30
- C – prohlášení o vlastnostech vlákna Masterfibre 482
- D – reklamní brožura Isofiber 1100
- E – Prohlášení o vlastnostech vlákna Mapefibre ST 50 twisted
- F – vlastnosti čedičového vlákna Orlimex
- G – prohlášení o vlastnostech vlákna Anti crack 67/36



Prohlášení o vlastnostech DE 50/1,0 N

055

Ocelová vlákna do betonu

DE 50 / 1,0 N

Ocelová vlákna pro použití se statickou funkcí v betonu, maltě nebo injektážní maltě

KrampeHarex CZ s.r.o.
Osvobození 234
664 81 Ostrovačice

System 1

Autorizovaná osoba MPA Braunschweig - č. 0761 – prověřila v rámci prvotní kontroly základní vlastnosti výše uvedeného produktu, provedla prvotní inspekci výrobního závodu a jeho vlastní výrobní kontroly, běžnou kontrolu a evaluaci této výrobní kontroly podle systému 1, a vystavila potvrzení v souladu vlastní výrobní kontroly č. 0761-CPD-0085.

Potvrzované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnost	Harmonizovaná technická specifikace
Délka vlákna	50 mm	EN 14889-1
Průměr vlákna	1,0 mm	EN 14889-1
Tahová pevnost	1.100 N/mm ²	EN 14889-1 5.3
Tvar vlákna	Se zahnutými kotvícími konci	EN 14889-1
Vliv na konzistenci betonu při dávkování vláken 20 kg/m ³	Doba Vebe : 10 s	EN 12350-3
Einfluss auf die Festigkeit von Beton mit 20 kg/m ³	1,5 N/mm ² → CMOD 0,5 mm 1,0 N/mm ² → CMOD 3,5 mm	EN 14845-2

Vlastnosti ocelových vláken typ DE 50/1,0 N splňují výše uvedené charakteristiky
Za vystavení tohoto prohlášení o vlastnostech zodpovídá výlučně výrobce KrampeHarex CZ s.r.o.
Za výrobce a jeho jménem:

Jiří Žvanut, kvalita

Ostrovačice 31.10.2016

B - Prohlášení o vlastnostech vlákna Mapefibre ST 30

MAPEFIBRE ST30
OZNAČENÍ CE
 Příloha k PoV č. CPR-IT1/0541



 0925	 Via Cafiero 22 – 20158 Miláno (Itálie) www.mapei.it
15 CPR-IT1/0541 EN 14889-2:2006 MAPEFIBRE ST30 <i>Tvarovaná polypropylenová vlákna (Třída II, délka 30 mm, průměr 0,8 mm) pro použití do betonu, malt nebo tmelů, se statickou funkcí</i>	
Pevnost v tahu: Modul pružnosti: Konzistence s vlákny 5,0 kg/m ³ : Vliv na pevnost betonu: Uvolňování nebezpečných látek:	450 N/mm ² 3800 N/mm ² Vebe 11 s 5,0 kg/m ³ k získání 1,5 N/mm ² při šířce rozevření trhliny (CMOD) = 0,5 mm a 1 N/mm ² při šířce rozevření trhliny (CMOD) = 3,5 mm Nestanoveno

— Prohlášení o vlastnostech

Č. 1372-CPR-1573 – 20230801

podle Přílohy III nařízení Evropského parlamentu a rady č. 305/2011
ve znění Evropské komise č. 574/2014

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:

MasterFiber 482 (skupina ocelových vláken I)

2. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití:

pro strukturální použití do betonu, malty nebo omítky

3. Výrobce:

Master Builders Solutions Deutschland GmbH, Dr.-Albert-Frank-Str. 32,
D-83308 Trostberg, Site 2009943

4. ystém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností (AVCP):

System I

5. Harmonizovaná norma:

EN 14889-1:2006-11

6. Notifikovaná osoba:

Tecno Piemonte SpA (I372)



7. Vlastnosti uvedené v prohlášení:

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností	Harmonizované technické specifikace
Typ polymeru	ocel - mosazný povlak	System 1	EN 14889-1:2006-11
Hustota [kg/m ³]	1300		
Tvar (podélný)	rovný		
Tvar (příčný řez)	kolo		
Ekvivaletní průměr [mm]	0.20		
Délka vlákna [mm]	13		
Štíhlostní poměr	65		
Pevnost v tahu [MPa]	3100		
Vliv na konzistenci betonu [dávkování vláken v kg/m ³ , Vebe čas v s s vlákny]	17.0 7.0		
Vliv na pevnost betonu [Dávkování vláken v kg/m ³ splňující požadavky]	17.0		
Uvolňování nebezpečných látek	NPD		

NPD: Žádný ukazatel není stanoven

Výše uvedené vlastnosti výrobku jsou v souladu s deklarovanými vlastnostmi. Toto prohlášení o vlastnostech je vydáno v souladu s Nařízením Evropského parlamentu a rady č. 305/2011, na výhradní odpovědnost výše uvedeného výrobce.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

Mannheim, 01.08.2023
Master Builders Solutions Deutschland GmbH

i.V. 

Dr. Jürgen Bokern
Global Fiber & Sustainable Concrete
Manager

i.V. 

Dr. Olivier Bayard
Global Marketing Manager



ISOFIBER 1100 Series is a next-generation natural micro-fibre solution ideal for reducing the risk of cracking in concrete - Enabling natural surface durability.

The fibre guarantees a homogeneous, fast and three-dimensional distribution throughout the concrete matrix to provide an effective reduction of plastic shrinkage cracking at the initial stage of the setting phase.

- Reduces the risk of plastic shrinkage and settlement cracking
- Alternative solution to traditional secondary reinforcement solutions
- Improves the durability of concrete
- Improves impact resistance
- Increases resistance to freeze/thaw cycles



ADDED PERFORMANCE



ADDED EFFICIENCY



ADDED SUSTAINABILITY



ADDED EXPERTISE

Enabling natural reinforcement

As part of our wider Future in Action strategy, the ISOFIBER 1100 series enables sustainable urbanisation replacing the need for plastic micro-fibres in light applications



Contact our expert team for more information or sample requests.

☎ 0800 667 827 www.cemex.co.uk/admixtures

✉ gb-admixtures.sales@cemex.com

E – Prohlášení o vlastnostech vlákna Mapefibre ST 50 twisted

MAPEFIBRE ST 50 TWISTED
OZNAČENÍ CE
 Příloha k PoV č. CPR-IT1/0747



 0925	 Via Cafiero 22 – 20158 Miláno (Itálie) www.mapei.it
19 CPR-IT1/0747 EN 14889-2 MAPEFIBRE ST 50 TWISTED <i>Tvarovaná polyolefinová vlákna (Třída II, délka 50 mm, průměr 0,40 mm) pro použití do betonu, malt nebo tmelů, se statickou funkcí</i>	
Pevnost v tahu: Modul pružnosti: Konzistence s vlákny 5,0 kg/m ³ : Vliv na pevnost betonu: Uvolňování nebezpečných látek:	660 N/mm ² 5000 N/mm ² Vebe 15 s 5 kg/m ³ k získání 1,5 N/mm ² při šířce rozevření trhliny (CMOD) = 0,5 mm a 1 N/mm ² při šířce rozevření trhliny (CMOD) = 3,5 mm Nestanoveno

F – vlastnosti čedičového vlákna Orlimex

Charakteristika	Hodnota
Základní průměr vlákna - μm	9,13,17
Tolerance – odchylka v základním průměru vlákna v - μm 9	-1; +2
Tolerance – odchylka v základním průměru vlákna v - μm 13-17	-2; +1
Délka vlákna mm	6,12,18,24,30
Barva	Tmavě olivová
Vůně - zápach	Bez vůně
Obsah vlhkosti - % ne víc než	1
Obsah látek odpařených kalcinací - %	0,2 – 2,0
Povolený počet nesestříhaných vláken - % ne víc než	0,1
Chemická odolnost – úbytek hmotnosti během 3 dnů - %	
- H ₂ O	1
- 2H NaOH	2,5
- 2H HCl	2,5

G – prohlášení o vlastnostech vlákna Anti crack 67/36

Technical Characteristics (Nominal Values)

FIBER LENGTH	ASPECT RATIO (LENGTH/DIAMETER)	EQUIVALENT DIAMETER (EN14889-2)	MODULUS OF ELASTICITY	TENSILE STRENGTH
36 mm 1-1/2 inches	67	0.54 mm	72 GPa 10 x 10 ⁶ psi	>1,000 MPa >145 x 10 ³ psi

- **Electrical Conductivity:** very low
- **Specific Gravity:** 2.68 g/cm³
- **Material:** Alkali Resistant Glass¹
- **Softening Point:** 860°C/1580°F
- **Chemical-Resistance:** very high
- **Loss on Ignition (ISO 1887):** 0.80-2.00%
- **Moisture (ISO 3344):** 0.50% max

¹In compliance with ASTM C1666 and EN 15422, and under the recommendations of PCI and GRCA.

How to Use

It is recommended to add **Anti-CRAK® HP 67/36** at the mixer into wet concrete during the last stage of mixing, or directly into a ready-mix concrete truck on the job site. Mixture proportions and fiber dosage should be verified by testing.

The recommended dosages are:

FIBER TYPE	THERMAL AND SHRINKAGE CRACKING		STRUCTURAL PERFORMANCE	
	kg/m ³	lbs/yd ³	kg/m ³	lbs/yd ³
Macro	1-5	1.5-8.5	5-15	8.5-25
BENEFIT	Anti-cracking mesh replacement		Structural mesh and steel rebar replacement	
PRIMARY APPLICATION	Residential floor, light commercial floors		Commercial & industrial floors, pavements, thin-walled precast	