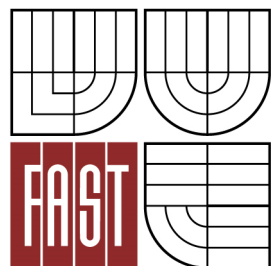




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

OVĚŘENÍ SKUTEČNÝCH FYZIKÁLNĚ – MECHANICKÝCH PARAMETRŮ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

VERIFICATION OF ACTUAL PHYSICAL-MECHANICAL PARAMETERS OF COMPOSITE
MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARKÉTA JABLONSKÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR LÁNÍK, Ph.D.

BRNO 2016

Ověření skutečných fyzikálně - mechanických parametrů kompozitního materiálu

Abstrakt

Diplomová práce řeší kompozitní materiály, detailněji se věnuje drátkobetonům. Práce je zaměřena na ověření mechanických vlastností drátkobetonu a to především jeho pevnosti v tahu za ohybu. Zkoušení bylo prováděno na betonech různých pevností s přidáním 30 kg na m³ ocelových drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N. Práce obsahuje teoretickou a experimentální část.

Klíčová slova

Kompozitní materiál, mechanické parametry, vláknobeton, drátkobeton, matrice, ocelová vlákna, zkoušky drátkobetonu

Abstract

Diploma thesis deals with composite material and it is dedicated to steel fiber concrete. The thesis focuses on verification of mechanical parameters of the steel fiber concrete. Especially on the compressive (tensile) strength at first cracking and the compressive strength in cracked state. Testing was conducted on concrete different tensile with 30 kg on m³ steel fibers KrampeHarex DE 50/1,0 N. The thesis is divided into theoretical and experimental part.

Key words

Composite material, mechanical parameters, fiber concrete, steel fiber concrete, matrix, steel fibers, tests steel fiber concrete

JABLONSKÁ, Markéta, Bc. *Ověření skutečných fyzikálně-mechanických parametrů kompozitního materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, 2016. 100 s., 7 s. příl. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaromír Láník, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma Ověření skutečných fyzikálně-mechanických parametrů kompozitního materiálu jsem zpracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

Dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s autorským právem a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Diplomová práce byla vytvořena v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I".

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Jaromíru Láníkovi, Ph.D. za cenné rady k diplomové práci a pomoc při provádění experimentálního měření.

Hlavně bych chtěla poděkovat svým rodičům, kteří mě podporovali během celého studia. Díky také patří mému bratrovi a příteli, kteří mi byli velkou oporou.

Obsah:

1	Úvod	12
2	Cíl práce.....	13
3	Kompozitní materiál.....	14
3.1	Obecné definice kompozitu	14
3.2	Historie kompozitního materiálu	15
3.3	Rozdělení kompozitů	16
3.3.1	Dělení podle geometrického tvaru výztuže	19
3.3.2	Dělení podle matrice	21
3.4	Synergismus.....	22
4	Vláknobeton	22
4.1	Prostý beton	22
4.1.1	Cement	23
4.1.2	Kamenivo.....	24
4.1.3	Voda.....	25
4.1.4	Přísady	26
4.1.5	Příměsi	27
4.2	Vlákna	28
4.2.1	Drátkobeton	28
4.2.2	Sklobeton	31
4.2.3	Beton vyztužený polypropylénovými vlákny	31
5	Drátkobeton.....	32
5.1	Návrh drátkobetonových směsí	32
5.2	Výroba drátkobetonu	32
5.3	Dávkování vláken	33
5.4	Pracovní diagram drátkobetonu	34
6	Zkoušky drátkobetonu	36
6.1	Zkoušení čerstvého drátkobetonu	36
6.1.1	Zkouška – Sednutí kužele	37
6.1.2	Zkouška rozlitím	37
6.1.3	Kontrola obsahu vláken	38
6.2	Zkoušení ztvrdlého drátkobetonu	39
6.2.1	Pevnost v tlaku.....	39
6.2.2	Pevnost v tahu.....	41
6.2.3	Pevnost v tahu za ohybu	43
7	Využití v praxi – drátkobetonové průmyslové podlahy	53

8	Experimentální část	57
8.1	Suroviny k výrobě betonu.....	58
8.2	Zkoušky čerstvého betonu	62
8.3	Zkoušky ztvrdlého betonu	68
9	Závěr	92
10	Seznam použité literatury	94
11	Seznam zkratk a symbolů.....	98
12	Seznam příloh.....	100

Seznam tabulek:

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti některých kovových vláken.	27
Tab. 2: Rozdělení do tříd podle velikosti sednutí.	36
Tab. 3: Rozdělení do tříd podle velikosti rozlití.	36
Tab. 4: Dávkování drátků ve vybraných typech kci.	37
Tab. 5: Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku dle zkoušek krychelné pevnosti	39
Tab. 6: Pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku makrotrhliny.	41
Tab. 7: Porovnání odlišnosti zkoušek.	43
Tab. 8: Vztah mezi CMOD a δ	46
Tab. 9: Referenční receptura na m ³ betonu.	57
Tab. 10: Upravené receptury pro množství 30 kg drátků.....	57
Tab. 11: Vlastnosti drátků KrampeHarex.	59
Tab. 12: Výsledky zkoušky rozlitím	61
Tab. 13: Výsledky zkoušky sednutí kužele	63
Tab. 14: Výsledky zkoušky obsahu vzduchu.	65
Tab. 15: Pevnost betonu v tlaku.	67
Tab. 16: Pevnosti betonu v příčném tahu.	70
Tab. 17: Rozměry měřených vzorků C16/20.....	76
Tab. 18: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C16/20.	77
Tab. 19: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C16/20	77
Tab. 20: Rozměry měřených vzorků C20/25.....	79
Tab. 21: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C20/25.	80
Tab. 22: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C20/25.	80
Tab. 23: Rozměry měřených vzorků C25/30.	82
Tab. 24: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C25/30.....	83
Tab. 25: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C25/30.	83
Tab. 26: Rozměry měřených vzorků C30/37.....	85
Tab. 27: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C30/37.	86
Tab. 28: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C30/37.	86
Tab. 29: Výpočet charakteristické pevnosti betonu v tahu za ohybu.....	88
Tab. 30: Výpočet reziduální charakteristické pevnosti betonu v tahu za ohybu.	88
Tab. 31: Upravený vztah mezi CMOD a δ	89

Seznam obrázků:

Obr. 1: Damascénská ocel a laminové luky.	14
Obr. 2: Dřevo jako kompozitní materiál.....	14
Obr. 3: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže.	15
Obr. 4: Schéma rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru výztuže.	16
Obr. 5: Synergické chování složek kompozitního materiálu.	20
Obr. 6: Porovnání tah. diagramů matrice a kompozitu složeného z matrice a vláken.	20
Obr. 7: Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu.....	20
Obr. 8: Požadavky na mechanické vlastnosti cementů uvedené jako charakteristické hodnoty dle ČSN EN 197-1.	22
Obr. 9: Základní dělení kameniva.	23
Obr. 10: Klasifikace typu vod.	24
Obr. 11: Ocelové drátky používané do betonu.	28
Obr. 12: Příklady využití sklobetonu.	29
Obr. 13: Skleněná vlákna používaná do betonu.	29
Obr. 14: Příklad využití betonu vyztuženého polypropylenovými vlákny.	30
Obr. 15: Polypropylenová vlákna používaná do betonu	30
Obr. 16: Vznik suchých ježků v důsledku nevhodného dávkování.	33
Obr. 17: Zařízení na extrakci ocelových vláken z betonu pomocí magnetu	37
Obr. 18: Zkouška pevnosti v tahu čtyřbodovým ohybem.	42
Obr. 19: Zkouška pevnosti v tahu tříbodovým ohybem.	44
Obr. 20: Uspořádání zkoušky ohybem pro doporučený normový trámek ($h=b=150\text{ mm}$, $L=600\text{ mm}$)	45
Obr. 21: Charakteristický pracovní diagram vláknobetonu	48
Obr. 22: Uspořádání zkoušky ohybem pro doporučený normový trámek ($h=b=150\text{ mm}$, $L=600\text{ mm}$).	49
Obr. 23: Průměrný a charakteristický diagram $(F_R - \delta_t)_m$ a $(F_R - \delta_t)_k$, odvozené ze zkoušek ohybem drátkobetonových normových trámů ($\rho_{v,f} = 0,5\%$).	50
Obr. 24: Pokládka drátkobetonové podlahy.	52
Obr. 25: Postup provádění pokládky drátkobetonové směsi.	53
Obr. 26: Zařízení pro provedení statické zatěžovací zkoušky.	54
Obr. 27: Typická trhlinka šířky $0,05\text{ mm}$ (změřeno optickým mikroskopem).....	55

Obr. 28: Měření šířky trhlinek pomocí přiloženého trhlinoměru.	55
Obr. 29: Použité drátky KrampeHarex.	59
Obr. 30: Připravené jednotlivé navážky dané betonové směsi.	59
Obr. 31: Zkouška rozlití.....	62
Obr. 32: Zkouška sednutí kužele.	64
Obr. 33: Jednotlivé měřené veličiny na zkušebním tělese	72
Obr. 34: Zkušební mechanický lis.....	73
Obr. 35: Ocelový měřicí rám a snímač průhybu	73
Obr. 36: Snímač měření rozevření trhliny	74
Obr. 37: Ustavení snímačů a rámu ke zkoušení tříbodovým ohybem.....	74
Obr. 38: Vzorky měřených trámů C16/20 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	77
Obr. 39: Pracovní diagram C16/20 + 30kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N.....	78
Obr. 40: Vzorky měřených trámů C20/25 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	80
Obr. 41: Pracovní diagram C20/25 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	81
Obr. 42: Vzorky měřených trámů C25/30 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	83
Obr. 43: Pracovní diagram C25/30 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	84
Obr. 44: Vzorky měřených trámů C30/37 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	86
Obr. 45: Pracovní diagram C30/37 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N	87

Seznam grafů:

Graf 1: Porovnání pracovního diagramu v tlaku drátkobetonu (křivka F) a prostého betonu (křivka B)	34
Graf 2: Porovnání pracovního diagramu v tahu drátkobetonu (křivka F) a prostého betonu (křivka B).	34
Graf 3: Grafy závislosti CMOD na zatížení F_L	47
Graf 4: Graf závislosti CMOD na zatížení F_j ($j = 1, 2, 3, 4$).....	48
Graf 5: Zkouška rozlitím.....	61
Graf 6: Zkouška sednutí kužele	63
Graf 7: Stanovení obsahu vzduchu.	66
Graf 8: Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	68
Graf 9: Porovnání charakteristické pevnosti betonu v tlaku ztvrdlého betonu.....	68
Graf 10: Porovnání charakteristické pevnosti betonu v příčném tahu ztvrdlého betonu....	70
Graf 11: Zatěžovací diagramy pro referenční směsi.....	75
Graf 12: Zatěžovací diagramy pro beton C16/20	76
Graf 13: Zatěžovací diagramy pro beton C20/25.	79
Graf 14: Zatěžovací diagramy pro beton C25/30.	82
Graf 15: Zatěžovací diagramy pro beton C30/37	85
Graf 16: Vzorek č.1 C 16/20 30 kg, závislost F na CMOD.....	89
Graf 17: Závislost CMOD a δ	90
Graf 18: Závislosti CMOD na průhybu, které byly využity pro statistiku.....	90

1 Úvod

Jako kompozitní materiály jsou označovány materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, které se liší například tvarem, fyzikálními nebo chemickými vlastnostmi. Jednotlivé složky kompozitního materiálu se nijak vzájemně neslučují.

Kompozitní materiály lze nalézt už v dávné historii, kdy byla hlína vyztužována kousky slámy. Kompozitní materiál nacházel ve stavební praxi stále větší uplatnění. Prostý beton patří také mezi kompozitní materiál, skládá se z plniva a pojiva.

Do kompozitních materiálů lze zařadit i vláknobeton, což je materiál sestávající se z betonové směsi a vláken.

První zdařilé uplatnění vláken pro snížení jeho křehkosti a tedy i vývoj moderního vláknobetonu využitého v praxi, lze najít na počátku 20. století. Začátkem šedesátých let 20. století nastalo nové období velkého zájmu o vyztužování křehkých stavebních hmot vlákny. Objevily se první drátkobetony. Nastal rychlý rozvoj technologie různých vláken se stále vyššími technickými parametry. Vývoj nových vláken povzbuzovaly optimistické předpovědi výroby kompozitních materiálů na základě cementu/betonu s mechanickými vlastnostmi řádově vyššími než u běžných stavebních materiálů. [2]

Drátkobeton nachází své největší uplatnění při výrobě průmyslových podlah. Jejich výhodou je rychlost výstavby a menší časová a finanční náročnost, než je tomu u železobetonu.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je porozumět vlastnostem kompozitních materiálů a získat přehled o materiálových parametrech kompozitu, který by bylo možno využít ve stavebnictví. Práce bude obsahovat teoretickou a experimentální část.

V práci se budu zabývat ověřením mechanických vlastností, které budou získány ze vzorku kompozitního materiálu, za pomoci standardních laboratorních zkoušek, ale i specifických pro daný kompozit.

Teoretická část práce bude strukturou nejprve obecně pojednávat o kompozitním materiálu o jeho historii, rozdělení. Dále bude detailněji zaměřena pozornost na vláknobetony a to především na drátkobetony, které jsou nejčastěji ve stavební praxi využívány při výrobě průmyslových podlah. Budou popsány zkoušky drátkobetonu a to jak čerstvé směsi, tak ztvrdlého betonu.

V experimentální části bude hlavní pozornost věnována zkoušení drátkobetonové směsi. Zkoušky budou probíhat v laboratoři VUT fakulty stavební.

3 Kompozitní materiál

Kompozitní materiál tvoří tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka, která se nazývá *výztuž* a spojitá obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, *matrice*. Výztuž může být částicová (kamenivo, dřevní prach – bakelit), vláknová (dlouhá či krátká vlákna, sklo, uhlík, ocel), plošná (rohože často splétané z vláken) nebo prostorová (klece). Jednou z objektivních charakteristik, odlišujících kompozitní materiály od jiných materiálů, je synergický účinek jednotlivých složek ve struktuře materiálu. Všechny parametry, na nichž závisí vlastnosti kompozitního materiálu, souvisí buď s jejich strukturou, nebo s mezifázovými vztahy. [16] [17] [18]

3.1 Obecné definice kompozitu

Definice MIL – NASA USA: „Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouští, ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“ [19]

Definice G.R.Miltona, Cambridge: „Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“ [19]

Bareš, 1988: „Kompozit je každý materiálový systém, který je složen nejméně ze dvou a více fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli fází samočinně ani prostou sumací. [11]

3.2 Historie kompozitního materiálu

Mezi nejstarší kompozity patří vysušená hlína s kousky slámy – nálezy v Izraeli 800 let př.n.l., která sloužila ke stavbě obydlí, spojením těchto dvou složek docházelo ke zvětšení pevnosti. Dále pak mongolské laminové luky – kombinace dřeva, šlach a rohoviny – podstatná součást tatarských nájezdů. Damascénská ocel – jedná se o střídavé plátky vysokouhlíkové a nízkouhlíkové oceli, jde už o modernější kompozit. Takto vzniklý kompozit je houževnatý a optimálně tvrdý. Cílený a intenzivní výzkum a vývoj kompozitních materiálů probíhal ve druhé polovině 20. století. Z velké části pro potřeby průmyslu vojenského a kosmického. [19] [20]



Obr. 1: Damascénská ocel a laminové luky

Nejznámějším přírodním kompozitem je dřevo – tvořeno celulózovými vlákny (přenášející především napětí v tahu) uloženými v ligninu – plní hydrofobní funkci, zpevňuje celulózové molekuly v rámci buněčných stěn – dodává pevnost především v tlaku. [21]



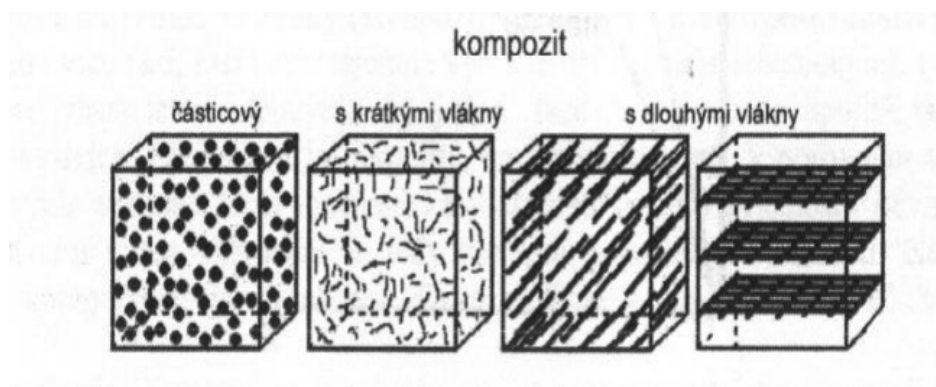
Obr. 2: Dřevo jako kompozitní materiál

3.3 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály lze klasifikovat podle řady parametrů – např. dle tvaru výztuže, typu výztuže, uspořádání výztuže a makrostruktury, typu matrice, nebo technologie výroby. [21]

3.3.1 Dělení podle geometrického tvaru výztuže

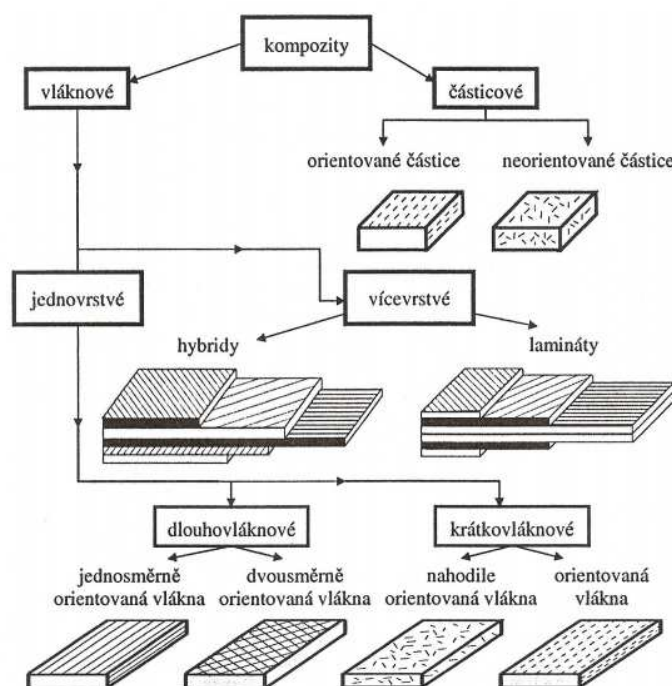
Základní dělení podle geometrického tvaru výztuže je na *částicové* a *vláknové* kompozity.



Obr. 3: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže

Pro částicové kompozity platí, že jeden rozměr výztuže výrazně nepřesahuje rozměry ostatních. Částice, jež tvoří výztuž, mají tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý či nepravidelný. Na rozdíl od toho u vláknových kompozitů, výztuž v jednom směru výrazně přesahuje rozměry ostatní.

Vláknové kompozity můžeme dále rozdělit podle délky vyztužujících vláken. Vláknové kompozity s krátkými vlákny mají délku vláken výrazně menší než je velikost celého výrobku. Naopak vláknové kompozity s dlouhými vlákny mají délku srovnatelnou s velikostí výrobku. Platí také, že poměr délky a průměru vlákna L/D je $L/D \geq 100$ pro dlouhá vlákna a $L/D \leq 100$ pro krátká vlákna. Uspořádání dlouhých vláken může mít více variant – orientace vláken v jednom směru, nebo splétání vláken do rohoží – vrstevnatá struktura kompozitu. [18] [21]



Obr. 4: Schéma rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru výztuže

Orientace výztuže ovlivňuje izotropii systému. Jestliže se v kompozitu nacházejí částice podobné tvarově a rozměrově ve všech směrech (rovnoosé), je materiál izotropní – nezávislé vlastnosti na směru. Pokud jsou částice odlišné a náhodně uspořádané, materiál se jeví jako anizotropní. V ostatních případech se materiál chová s anizotropií a může vzniknout lom, pokud bychom působili ve směru s fyzikálně nejhoršími vlastnostmi. Díky tomu můžeme navrhnout konstrukce pevné a extrémně lehké se skvělými mechanickými vlastnostmi, které jsou schopné vzdorovat vysokým namáháním. [22]

Vláknové výztuže

Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý průřez vláken, v tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při malých příčných rozměrech menší (menší průměr = menší povrch), existující vady jsou mikroskopické a orientovány v podélném směru vlákna. [23]

Hlavním problémem je vložení vláken do matrice tak, aby se mechanicky nepoškodila, aby bylo zachováno přesné usměrnění a rovnoměrné rozdělení vláken

ve výrobku a aby byla zajištěna soudržnost vláken a matrice. Vlákná se mohou relativně snadno mechanicky porušit při každé manipulaci (výběr, třídění, směrové uspořádání, prostorové rozdělení), a to i prostým dotykem dvou vláken nebo třením, poškrábáním, dotykem náradí atd.

Vláknové kompozity můžeme dělit podle délky vláken na kompozity s kontinuálními vlákny a s krátkými vlákny. Kompozity s kontinuálními vlákny mohou mít výztuž orientovanou jednosměrně, dvouose, víceose nebo nahodile uspořádanou. Také krátká vlákna a whiskery mohou být orientovány přednostně nebo nahodile. [16] [24]

V současné době je pro výrobu kompozitů k dispozici široké spektrum vláken, a to od vláken přírodních (bavlna, celulóza, azbest) až po vlákna kovová a slitinová, whiskery z keramických a metalických materiálů, polykrystalická vlákna z různých keramických materiálů, skleněná a minerální vlákna (hladká nebo tvarovaná) a vlákna polymerní. Volba materiálu a délky a specifických vlastností vláken závisí na konkrétním použití a na očekávaných vlastnostech výsledného kompozitu a samozřejmě na matici, do které budou vlákna vkládána. [18] [12]

Částicové výztuže

Částicové výztuže jsou využívány zejména pro zvýšení tvrdosti, otěruvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách. Částicové kompozity zaujímají menší podíl v porovnání s vláknovými. Poměrně rozšířené jsou částicové kompozity s kovovými maticemi – slitiny hliníku, mědi, niklu a kobaltu. [13]

Částice se přidávají do polymerních matic pro zvětšení tuhosti. Částice sférického tvaru by neměly být příliš velké, aby negativně neovlivňovaly pevnost, ale ani příliš jemné, protože potom je obtížné dosáhnout jejich rovnoměrného rozptýlení. Nejvhodnější částice s rozměry v rozmezí 1 až 10 μm , jsou považovány za tzv. velké částice. Anizometrické částice (tvar destiček, jehlic, disků) mohou matrice nejenom vyztužovat, ale také významně zpevňovat -jsou to tzv. aktivní částice. Poměr největšího rozměru částice k minimálnímu rozměru (u destičkovitých částic tloušťka) udává aspektivní (štíhlostní) poměr. [16]

3.3.2 Dělení podle matrice

Matrice je spojitá složka, která zastává funkci pojiva výztuže a chrání většinou křehká vlákna, se nazývá matrice. Polymerní matrice výrazně poddajnější než vlákna, pevnost v tahu je u všech matric menší než pevnost v tahu vláken (u polymerních matric až o dva řády menší než pevnost vláken). Hlavní úlohou matrice je spojovat vyztužující fázi a chránit ji před okolními vlivy. Funkci pojiva by si měla matrice udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice. Keramické, sklené, sklokeramické a uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna. [16] [25]

Kovová matrice

Použití kovové matrice má proti nejčastěji používané polymerní matici řadu výhod – elektrickou vodivost, nehořlavost, smykovou pevnost, tvárnost, odolnost ohrusu, vyšší tepelnou vodivost, odolnost proti povrchovému poškození. Nejvýznamnější zástupci jsou lehké slitiny hliníku, případně hořčíku a titanu. Matrice může být vytvářena z prášku (např. plazmové nanášení), fólie (lisování za tepla, válcování), popř. taveniny (infiltrace, lití). Výrobní postup je potřeba volit tak, aby došlo k dokonalému smíšení matrice s vlákny bez jejich mechanického poškození, degradace, zkřehnutí matrice, a s dostatečnou soudržností ve styku matrice.

Kvalita a vlastnosti těchto typů kompozitů závisí značně na výrobních metodách – vliv na pórovou strukturu, poruchy vláken, promísení a soudržnost. Například modul pružnosti hliníkových slitin s 50% obj. jednosměrně uspořádaných bórových vláken je v podélném směru 140 – 320 GPa a v příčném směru 85 – 250 GPa. Na výsledné pevnosti hliníkových kompozitů má vliv i rychlost zatěžování, přičemž při rychlejším nárůstu zatížení dochází k vyššímu nárůstu napětí ve vláknech než v matici. [21]

Polymerní matrice

Pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou nejpoužívanější matrice polymerní, buď reaktoplastické nebo termoplastické. Nejpoužívanější matrice jsou nenasyčené polyestery, vinylestery a epoxidy a z termoplastů polypropyleny a polyamidy.

V hromadné dopravě a ve stavebnictví jsou zvýšené nároky na bezpečnost, to si vynucuje používání nehořlavých matric s malým vývinem netoxického kouře. Těmto podmínkám vyhovují především fenolické pryskyřice. Termoplastickou matrici stačí po vstříknutí do formy (termoplasty vyztužené krátkými vlákny) nebo po tvarování kompozitní deky za tepla pouze ochladit pod teplotu tvarové stálosti za tepla.

K vyztužení termoplastických matric se používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová nebo jejich kombinace. Povrchová úprava vláken výrazně zlepšuje smáčení vláken a jejich adhezi k matrici, to vede ke zvýšení výsledných pevností. Značný vliv na pevnost a tuhost má zvýšená teplota.

Reaktoplasty vyztužené vlákny jsou nesporně nejrozšířenější konstrukční kompozity. Pro některé aplikace (zejména z důvodu snížení ceny) se využívají i přírodní vlákna (juta, sisal), nejčastěji v kombinaci se skleněnými vlákny. [16] [21] [25]

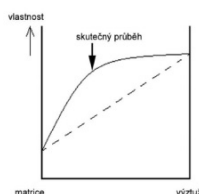
Keramická matrice

Keramické matrice mají dobrou pevnost v tahu i při teplotách, kterým některé kovové matrice neodolávají. Přípravou kompozitů s kontinuálními keramickými vlákny v keramické matrici se získají materiály s větší lomovou houževnatostí, než má monolitická keramika. Pro matrici odolnou vyšším teplotám se používají oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků nejčastěji hliníku, křemíku a hořčíku. Spojení vláken s matricí je obvykle slabé, i když může nastat jeho zpevnění v důsledku chemické reakce mezi matricí a vlákny – je nezbytné zachovávat opatrnost, neboť chemickou reakcí může dojít ke zničení vláken (například zirkonová vlákna reagují s hořčíkovou matricí při 1600 °C).

Kompozitní materiály na keramické bázi obvykle nevykazují příliš příznivé pevnosti v důsledku oddělení vláken od matrice vlivem teplotní kontrakce při výrobě. S rostoucím zastoupením vláken se pevnost může zvyšovat i snižovat podle rozdílnosti teplotních vlastností vláken a matrice. [16] [25]

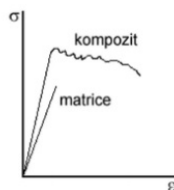
3.4 Synergismus

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, protože vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností.



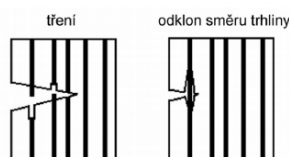
Obr. 5: Synergické chování složek kompozitního materiálu

Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolnosti proti náhlému křehkému porušení.



Obr. 6: Porovnání tah. diagramů matrice a kompozitu složeného z matrice a vláken

Chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlina je bržděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi matricí a výztuží má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. [16] [21]



Obr. 7: Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu

4 Vlákno-beton

Jedná se o konstrukční stavební kompozitní materiál, který má základní strukturu prostého betonu. Ten je doplněn o vlákna, která ztužují strukturu cementového kompozitu. Pro finální vlastnosti kompozitu je nezbytné, aby vlákna byla v jeho struktuře rovnoměrně rozptýlena, poté mohou kladně ovlivnit ty vlastnosti, které jsou u běžných typů betonu považovány za nedostatky. Především schopnost lépe odolávat projevům objemových změn betonu vlivem smršťování a působení okolní teploty, a to nejen během tuhnutí čerstvého betonu, ale při použití vhodných vláken i po zatvrdnutí betonu. Omezuje se křehkost betonu, zvyšuje se jeho houževnatost a pevnost v rázu, také se zvyšuje únavová pevnost, vlákna přenášejí sílu přes případnou trhlinu. Vlákno-beton může být vyráběn na staveništi, ve výrobě konstrukčních vlákno-betonových prvků nebo dodáván jako transportbeton přímo z centrální výroby vlákno-betonu. [3]

Vhodnost vláken je obecně prokázána, pokud vyhoví požadavku:

- ocelová vlákna vyhoví ČSN EN 14889-1 Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda,
- polymerová vlákna vyhoví ČSN EN 14889-2 Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda.

Pro ostatní typy vláken je vhodnost obecně prokázána, splňují-li požadavky vydaných technických norem, na něž je vydáno v ČR stavebně technické osvědčení. [3]

4.1 Prostý beton

Beton je kompozitní materiál ze směsi cementu hrající roli pojiva, hrubého a drobného kameniva zastávající funkci plniva a vody, s přísadami a příměsemi nebo bez nich, který získá své vlastnosti hydratací cementu. U vlákno-betonu plní beton funkci cementové matrice.

Kompozit s cementovou maticí, mezi které patří běžný beton, je znám prakticky od první poloviny 19. století, kdy byl vývoj hydraulických pojiv završen výrobou portlandského cementu. I když uplynulo více než 180 let od jeho vzniku, sdílí technická veřejnost stále jeho složitost i možnosti přetvářet jeho modifikace dalšími novými vyvíjenými komponenty, které ovlivňují nejen vlastnosti kompozitu, ale i výrazně části jeho technologie výroby, zpracování a ošetřování do doby jeho zralosti. [3]

4.1.1 Cement

Je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Pro cementy pro obecné použití včetně cementů s nízkým hydratačním teplem platí norma ČSN EN 197 – 1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. [14]

Portlandský cement obsahuje čtyři hlavní chemické složky:

Trikalciumsilikát – alit C_3S – podílí se nejvyšší mírou na vzrůstu pevnosti do 28 dnů a to tím, že se rychle slučuje s vodou, a uvolňuje tak větší hydratační teplo. Běžně je ho v cementu obsaženo < 60 %. Cementy obsahující > 60 % alitu mají vysokou počáteční pevnost.

Dikalciumpsilikát – belit C_2S – uvolňuje o polovinu méně hydratačního tepla než alit, pomalu hydratuje, ale konečná pevnost cementu je jen o málo menší než u cementů obsahujících alit. Běžně je ho v cementu obsaženo mezi 25% a 40%. Belitové cementy tuhnou a tvrdnou pomaleji.

Tetrakalciumaluminátferrit – celit C_4AF – je důležitý pro objemovou stálost. Přispívá ke vzrůstu pevnosti i po 28 dnech, ale pouze na suchu. Běžně je ho v cementu přibližně 10%.

Trikalciumaluminát – C_3A – prudce hydratuje, čímž vyvíjí přibližně 2x větší hydratační teplo než alit. [26]

pevnostní třída	pevnost v tlaku MPa				počátek tuhnutí
	počáteční pevnost		normalizovaná pevnost 28 dnů		
	2 dny	7 dnů			
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	-			

Obr. 8: Požadavky na mechanické vlastnosti cementů uvedené jako charakteristické hodnoty dle ČSN EN 197-1

4.1.2 Kamenivo

Je zrnitý anorganický materiál. Skládá se z několika frakcí, které tvoří pevnou matici a slouží jako plnivo. Všechno kamenivo použité pro přípravu betonu podle ČSN EN 206-1 musí být deklarováno podle ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu. Norma ČSN EN 12620 je však pouze deklarační a nikoli hodnotící. To znamená, že je deklarovaná úroveň určité vlastnosti a nikoli její požadovaná maximální (nebo minimální) hodnota. Ta může být definována v normě jako je ČSN EN 206-1. Konkrétní vlastnosti kameniva deklaruje výrobce kameniva (lom, 3 pískovna) v prohlášení o shodě. Výrobce betonu porovná deklarované vlastnosti kameniva s požadovanými a rozhodne, které kamenivo je pro danou betonovou směs použitelné. [14]

Kamenivo zaujímá 75 – 80 % objemu betonu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí, proto obsahuje různě velká zrna ve vhodném poměru. [27]

znak	rozdělení	příklad
objemová hmotnost	lehké (pórovité) do 2000 kg.m^{-3} hutné ($2000 \text{ až } 3000 \text{ kg.m}^{-3}$) těžké nad 3000 kg.m^{-3}	keramzit, experlit aj. magnetit, baryt aj.
původ	těžené nebo drcené, přírodní nebo umělé recyklované	
velikost zrn	zrna pod $0,063 \text{ mm}$ jemné do $0,25 \text{ mm}$ drobné od 0 do 4 mm hrubé od 4 do 63 mm směs kameniva	fíler moučka, fíler, příměs písek (0/4) drt', štěrky (4/8, 8/16, 32/63) štěrkopísek, štěrkdrt' (0/16, 0/32)
frakce (dolní / horní velikost sít d/D)	úzká (když $D/d \leq 2$) široká (když $D/d > 2$)	2/4, 4/8, 8/16, 16/32 4/11, 8/32

Obr. 9: Základní dělení kameniva

4.1.3 Voda

Všechna voda použitá pro přípravu betonu podle ČSN EN 206-1 vyhovuje, je-li v souladu s požadavky ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu – specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně jako záměsové vody do betonu. [14]

Voda má v čerstvém betonu dvě funkce: hydratační a reologickou. Hydratační funkce – voda podmiňuje hydrataci cementu, a tak spolu s cementem vytváří strukturu cementového kamene. Minimální spotřeba vody na hydrataci cementu je přibližně 25 % hmotnosti cementu. Reologická funkce – voda umožňuje vytvoření tvárného čerstvého betonu ve spojení s jeho složkami. Kapilárními silami je zajišťována koheze čerstvého betonu a viskozitou jeho plasticita. [28]

druh vody	použití jako záměsová voda
pitná	použitelná bez zkoušení
voda získaná při recyklaci	nutno ověřit použitelnost
podzemní voda	nutno ověřit použitelnost
povrchová voda	nutno ověřit použitelnost
odpadní průmyslová voda	nutno ověřit použitelnost
mořská voda	do betonu bez výztuže, obecně není vhodná pro výrobu železobetonu a předpjatého betonu
brakická (poloslaná) voda	
splašková voda	není vhodná do betonu

Obr. 10: Klasifikace typu vod

Vodní součinitel w v betonu je poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu – v [kg/m^3] / c [kg/m^3]. Pro dobrou zpracovatelnost není dobré zvyšovat vodní součinitel w/c . Zvyšování hmotnostního podílu vody v čerstvém betonu je nežádoucí. S ohledem na smrštění betonu v průběhu zrání a tvrdnutí. Dále to je vytěsňování nadbytečné záměsové vody na povrch betonové desky po zavibrování. Pro optimalizaci je volen součinitel w/c okolo 0,5. Pro lepší zpracovatelnost je lepší volit vhodnou přísadu. [29]

4.1.4 Přísady

Jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během míchání do betonu v množství od 0,2 do 5 % hmotnosti cementu za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo tvrdnoucího betonu. Celkové množství přísad, pokud se používají, nesmí překročit maximální dávkování doporučené výrobcem přísady.

Rozdělení přísad dle ČSN EN 934 – 2: 2002 Přísady do betonu, malty a injektážní malty. Část 2. Přísady do betonu – definice, specifikace a kritéria shody:

Plastifikační přísady – snižují povrchové napětí vody a zvyšují smáčecí schopnost záměsové vody, čímž dochází ke zlepšení zpracovatelnosti betonové směsi. Pokud ponecháme zpracovatelnost betonové směsi na původní úrovni, umožní plastifikační přísady snížit množství záměsové vody, a tím tak umožní dosáhnout vyšší pevnosti betonu nebo snížení dávky cementu. Dobré plastifikační přísady umožňují snížit dávku záměsové vody až o 15 %.

Stabilizační přísady – redukují odmísení vody v suspenzi, které nastává sedimentací tuhých částic.

Ztekucující přísady – jsou v podstatě vysoce účinné plastifikátory, které mají dvojnásobnou až trojnásobnou účinnost oproti běžným plastifikačním přísadám. S časem ztekucující účinek klesá. Běžná ztekucovače jsou účinné cca do 40 minut po vyrobení betonové směsi. Nejmodernější ztekucovače jsou vyráběny synteticky na bázi kombinace polymerů. Ztekucovače umožňují snížit dávku záměsové vody až o 50 %.

Provzdušňující přísady – jsou používány u betonů, od nichž je očekávána vysoká odolnost proti mrazu a proti přímému působení chemických rozmrazovacích látek. Vzduchové bubliny způsobují u čerstvého betonu lepší zpracovatelnost.

Dále pak to jsou: přísady urychlující tuhnutí, přísady zpomalující tuhnutí, těsnící přísady.

[14] [30]

4.1.5 Příměsi

Jsou jemné anorganické nebo organické látky, které se přidávají do betonu s cílem zlepšit jeho vlastnosti nebo dosáhnout vlastností požadované. Je nutné je započítat do betonu při výpočtu obsahu složek. Dle ČSN EN 260-1 se příměsi dělí na dva typy.

Typ I: Téměř inertní příměsi, například filery (kamenná moučka, jemně mletý vápenec) nebo pigmenty.

Typ II: Pucolány nebo latentní hydraulické příměsi, jako například popílek do betonu, křemičitý úlet nebo struska.

Popílky - Ve funkci pucolánové příměsi do betonu jsou v ČR nejčastěji využívány křemičité popílky dle ČSN EN 450 - 1. Přínosem popílků je především jejich pucolánová vlastnost, a tím i pokračující růst pevnosti po 28 dnech tvrdnutí. Dalším přínosem je jejich malá náročnost na vodu, tzn. jejich příznivý vliv náročnosti na vodu směsi cementu a popílku. Hlavní nevýhodou popílku je jeho nepříznivý vliv na rychlost tvrdnutí. Další nevýhodou používání popílku může být jeho nepříznivý vliv na variabilitu pevností betonu vlivem kolísání jejich vlastností. Tento vliv lze omezit především volbou stálého a spolehlivého dodavatele. [14] [31]

4.2 Vlákná

Dělení podle nejčastěji použitých vláken do prostého betonu:

- ocelová vlákna - drátkobeton
- skleněná vlákna - sklobeton
- polypropylénová vlákna - beton vyztužený polypropylénovými vlákny

4.2.1 Drátkobeton

Drátkobeton je moderní kompozitní materiál. Přidáním ocelových vláken do betonu se zásadním způsobem mění jeho vlastnosti. Drátkobeton má podobné vlastnosti jako beton vyztužený tradičním způsobem, tedy betonářskou výztuží, ale předčí ho například v houževnatosti či odolnosti proti vzniku a rozšiřování smršťovacích trhlin. [32]

Blíže je pozornost drátkobetonům věnována v kapitole 5.

Ocelová vlákna

Jako výchozí látka k výrobě se používá nejčastěji ocel (surová, pocínovaná nebo pozinkovaná), dále slitiny niklu a hliníku a na speciální vlákna platina, wolfram, molybden, beryllium nebo např. slitiny niklu s titanem. [33]

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti některých kovových vláken

Materiál	Hustota g/cm ³	Bod tání °C	Pružnost GPa	Pevnost GPa
beryllium	1,8	1350	310	1,10
měď	8,9	2083	125	0,45
wolfram	19,3	3410	350	3,82
molybden	10,2	2625	330	2,20
ocel	7,9	1300	210	4,00

Ocelová vlákna se dělí dle použitého základního materiálu pro jejich výrobu do skupin:

Skupina I – za studena tažený drát

Skupina II – vlákna stříhaná z plechu

Skupina III – vlákna oddělovaná z taveniny

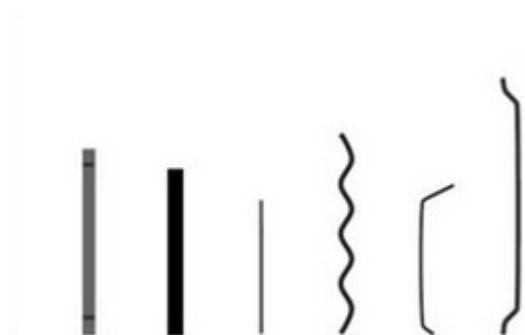
Skupina IV – vlákna protahovaná z drátu taženého za studena

Skupina V – vlákna frézovaná z ocelových bloků.

Dle tvaru se vlákna dělí na přímá a tvarovaná a výrobce musí deklarovat jejich tvar. [14]

Vlákna pro drátkobeton se definují jako krátké ocelové drátky se štíhlostním poměrem zhruba od 30 do 100, tvarem zvlněným, přímým nebo přímým se zploštělými či ohnutými konci a které jsou tak velké, aby mohly být náhodně rozptýleny v čerstvém betonu při standardních metodách míchání. Drátky kruhového průřezu se vyrábějí stříháním nebo sekáním drátů, které mají typické průměry od 0,25mm do 1,0mm. Ploché drátky o tloušťce od 0,15-0,41mm a šířce 0,25-1,14mm se vyrábějí stříháním plechů nebo zplošťováním drátů. Ocelová vlákna mohou být slepena do svazků, aby bylo zabráněno vytvoření seskupení ve tvaru ježka (ocelová vlákna s vysokou štíhlostí > 50). [15]

Při vyšších dávkách, které mohou být v rozmezí 80 až 100 kg.m⁻³ vláknobetonu, lze získat maximální fyzikálně – mechanické charakteristiky, zejména duktilitní pevnosti, resp. reziduální pevnosti, které jsou pro konstrukční vláknobetony zásadní. Hranice je v tomto případě dána možnostmi výroby a zpracováním čerstvého vláknobetonu. K tomuto efektu rovněž přispěje použití ocelových vláken s vyšší pevností v tahu 400 a 1450 N.mm⁻², vysokopevnostní vlákna pak překračují tahové pevnosti 2000 N.mm⁻². [3]



Obr. 11: Ocelové drátky používané do betonu

4.2.2 Sklobeton

Sklobeton se využívá převážně při rekonstrukci stávajících objektů, na pohledové a obkladové dílce, dále také na ztracená bednění stěn a stropů. Využívaná je zde především technologie stříkaného betonu, kdy se cementová malta s vlákny rozstříkuje pomocí stlačeného vzduchu.



Obr. 12: Příklady využití sklobetonu

Skleněná vlákna

Převážná část produkce skleněných vláken je využívána jako výztuž do polymerních matric. Významný objem aplikací tvoří také vyztužování anorganických materiálů, a to betonů, malt a sklocementových výrobků. Tato vlákna jsou používána také pro vyztužování sádky a ve speciálních případech i keramiky. Uplatňují se také v případě štíhlých nebo tvarově modelovaných prvků. [12] [21]

Běžné dávkování do betonu je 0,6 kg skleněných vláken na 1 m³. Skleněná vlákna jsou především ceněna pro dobrou odlonost vůči vysokým teplotám, nehořlavost a dobrou chemickou odolnost. [40]



Obr. 13: Skleněná vlákna používané do betonu

4.2.3 Beton vyztužený polypropylénovými vlákny

Polypropylenová vlákna se začala prakticky používat v 70 letech 20. století. Jejich využití z počátku bylo velmi neperspektivní. V dnešní době jsou však polypropylenová velmi vyhledávanou složkou do betonových směsí. Zejména kvůli lepší protipožární ochraně konstrukce a schopnosti zamezení vzniku smršťovacích trhlin. [34]



Obr. 14: Příklad využití betonu vyztuženého polypropylenovými vlákny

Polypropylénová vlákna

Polypropylen je nejlehčí ze všech textilních vláken ($0,91 \text{ g.cm}^{-3}$). Jsou odolná proti kyselinám, zásadám, mechanickému poškození během míchání a jsou kompatibilní se všemi známými typy přípravků a přísad do betonů. V současnosti se pro vyztužování cementových matric vyrábí 3 druhy PP vláken- monofilamentní, fibrilovaná a sdružená.

Polypropylénová vlákna různé délky (např. 6, 12 mm) se přidávají do betonu v množství $0,9 \text{ kg}$ na 1 m^3 . Vlákna přidáváme do betonové směsi po přidání kameniva a před přidáním cementu, vody a tekuté přísady do domíchávačů a míchaček. Několika minutové míchání betonové směsi způsobí rovnoměrné rozložení vláken.

S polypropylénovými vlákny lze zaručit výskyt mikropórů, díky kterým může rozpínající se vodní pára opustit beton, aniž by porušila strukturu a soudržnost. Při teplotě zhruba 160 °C se polypropylénová vlákna rozpustí a vytvoří tak strukturu kapilárních pórů v betonu, kterými pak v případě požáru může vodní pára z betonu uniknout a struktura cementového tmelu v betonu tak zůstane neporušena. [3] [34] [35] [39]



Obr. 15: Polypropylenová vlákna používaná do betonu

5 Drátkobeton

Experimentální část práce je zaměřena na zkoušení drátkobetonů, proto je hlavní pozornost zaměřena právě ně. V následujících kapitolách bude shrnuto navrhování, výroba a také zkoušení směsi.

5.1 Návrh drátkobetonových směsí

Správně navržená drátkobetonová směs musí vyhovovat následujícím kritériím:

Směs je vyrobena z takových složek a má takové složení, aby bylo zaručeno, že výsledný drátkobeton bude vykazovat požadované vlastnosti (např. hutnost, pevnost, trvanlivost, vodotěsnost apod.)

Směs je v daných podmínkách snadno míchatelná a dobře zpracovatelná. Směs je hospodárná.

Výchozím podkladem při návrhu směsi pro obyčejný konstrukční beton je především požadovaná pevnost betonu v tlaku. Stejně i při návrhu složení drátkobetonové směsi bude tato pevnost výchozím požadavkem, protože drátkobeton je též konstrukční materiál, který především přenáší tlaková namáhání, a proto musí být na ně navrhován. Avšak při návrhu drátkobetonové směsi by měl být tento výchozí požadavek navíc rozšířen o požadovanou pevnost drátkobetonu v tahu. Drátkobeton, oproti obyčejnému betonu musí spolehlivě přenášet tahová namáhání nejen na mezi vzniku trhlin, ale i určité ekvivalentní tahové napětí po vzniku trhlin a zajistit tak drátkobetonovému prvku požadovanou houževnatost. [1]

5.2 Výroba drátkobetonu

Již od návrhu až po zpracování patří ocelová vlákna k těm, co od základu změní technologii. Jejich vliv začíná efektem nakypření směsi kameniva ocelovými vlákny, které je nutné nejen stanovit, ale též je eliminovat při návrhu složení vláknobetonové směsi. Hlavními parametry ovlivňující nakypření jsou tvar ocelového vlákna, jeho délka, poměr mezi délkou a tloušťkou L/d a především hmotnostní dávka vláken na jednotku objemu. Obdobný vliv ocelových vláken je třeba očekávat při zpracovávání čerstvého vláknobetonu. Pro vlákna stejného tvaru obecně platí, čím vyšší je poměr L/d , tím je horší zpracovatelnost betonu. Pokud jsou ocelová vlákna stejného tvaru a mají stejný poměr L/d , rozhoduje

o zpracovatelnosti délka. Kratší vlákna mají lepší zpracovatelnost. Při návrhu složení vláknobetonu s ocelovými vlákny (drátky) je třeba rovněž vzít v úvahu působení ocelových vláken na zrna kameniva v tom smyslu, že je oddalují a brání jejich vzájemnému skloubení (setřesení) při zpracování čerstvého betonu (ukládání a hutnění v konstrukci). Jedním z hlavních důvodů k výrobě vláknobetonů s nižšími dávkami vláken bývá jeho konečná cena. Důvodem může být i skutečnost, že nízké dávky ocelových vláken zjednodušují technologii vláknobetonu při návrhu složení směsi, výrobě i jejím zpracování.

Všechny typy ocelových vláken je třeba dávkovat jako poslední složku směsi vláknobetonu. S ohledem na rozmanitost stávajících strojních zařízení pro výrobu běžného betonu, která by měla být použita i pro výrobu vláknobetonu, je nezbytné vždy předem prokázat, že strojní zařízení a stanovený postup dávkování vláken při výrobě čerstvého vláknobetonu vede k dosažení potřebné homogenity směsi. Cesta k výrobě homogenního vláknobetonu, která se ukazuje být spolehlivou, je přes využití strojních zařízení užívaných na betonárnách, tj. přes míchačky s nuceným oběhem. Výroba vláknobetonu uskutečňovaná dosud ve většině případů pomocí autodomíchávačů není optimální cestou. Dokazuje to měření, kterým lze určit hmotnost drátků ve zvolené jednotce objemu čerstvého vláknobetonu. Ukazují se rozdílné výsledky měřených hmotnostních dávek ocelových vláken. [3]

5.3 Dávkování vláken

Dávkování vláken je možné několika způsoby:

- manuálně
- mechanicky (např. vibrační zařízení, pásový dopravník, korečkový výtah, pneumatický dávkovač) a to buď ve výrobně vláknobetonu (betonárně) přímo do míchačky, nebo na betonárně či stavbě do autodomíchávačů

Pro všechny metody obecně platí, že dodatečné promíchání drátků s betonovou směsí by mělo trvat přibližně 1 min/m^3 betonu. Nesprávný způsob dávkování ocelových vláken či nedostatečná doba jejich promíchání s betonovou směsí mohou vést k rozdílnému počtu vláken v různých místech drátkobetonové konstrukce, nebo ke vzniku tzv. mokrých či suchých ježků.

Ke shlukování ocelových vláken do podoby suchých ježků dochází při jejich velmi nešetrném přidávání, kdy je do míchacího zařízení vhozeno jednorázově, v podobě velkého chomáče, značné množství vláken. Ocelová vlákna by měla být ideálně dávkována tak, aby na povrch betonové směsi dopadala ve formě deště jednotlivých vláken. Nebezpečí mokrých ježků hrozí v případě, kdy je dávkováno nadměrné množství relativně tenkých vláken, nebo při dlouhé době promíchávání drátkobetonu s vysokým podílem velké frakce kameniva. [3]

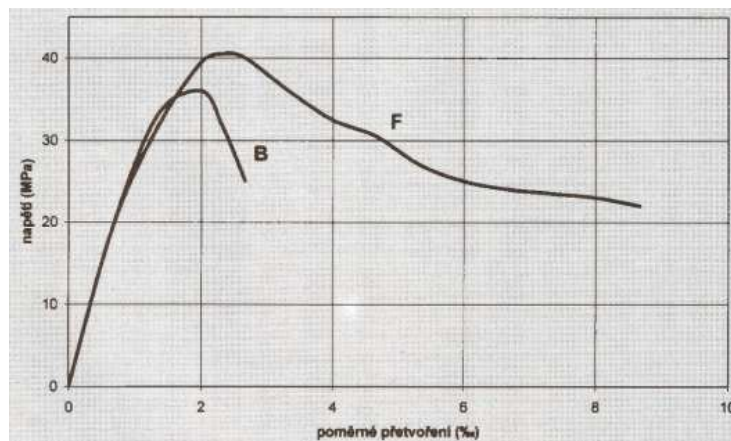


Obr. 16: Vznik suchých ježků v důsledku nevhodného dávkování

5.4 Pracovní diagram drátkobetonu

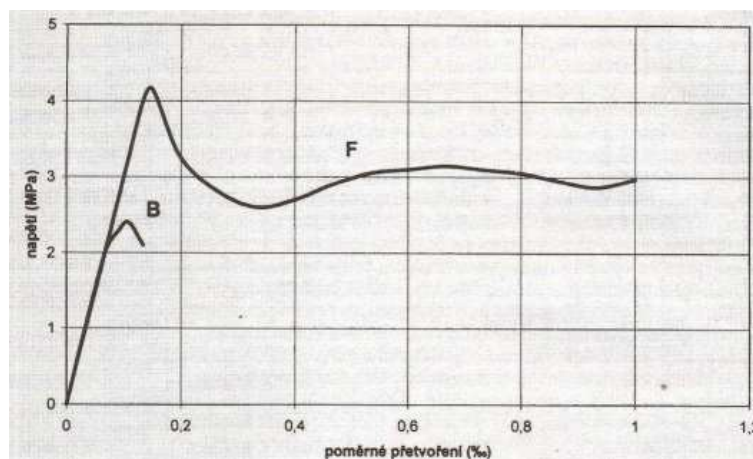
Rozptýlená výztuž podstatně ovlivňuje pracovní diagram drátkobetonu nejen v tlaku, ale především v tahu. To dovoluje pohlížet na vláknobeton jako na kvalitativně jiný materiál, než jakým je běžný beton.

Rozdíl mezi drátkobetonem a prostým betonem se projeví již při porovnání pracovních diagramů obou betonů při namáhání tlakem. U drátkobetonu se výrazně projevuje jeho velká schopnost plastického přetváření po dosažení maximálního napětí. Při poklesu napětí asi na 50 % má pracovní diagram drátkobetonu téměř vodorovný směr a přetváření materiálu má charakter tečení. Tato vlastnost drátkobetonu, zpomalující proces jeho porušování, je způsobena aktivací drátků po vzniku trhlin v betonu a podstatně se liší od charakteristického tlakového porušení prostého betonu. U betonu bez drátků dochází k porušení křehkými trhlinami vzniklými účinkem hlavních tahových napětí. Mezní stlačení drátkobetonu dosahuje zhruba trojnásobných hodnot mezního stlačení betonů prostých. [1]



Graf 1: Porovnání pracovního diagramu v tlaku drátkobetonu (křivka F) a prostého betonu (křivka B)

Ještě výrazněji se rozdíl mezi oběma druhy betonu projeví u pracovních diagramů v tahu, kde se u drátkobetonu objeví nejen vzrůst jeho pevnosti v tahu způsobený oddálením rozvoje mikrotrhlin v jeho struktuře, ale především skutečnost, že i po vzniku viditelných trhlin aktivovaná vlákna způsobují, že drátkobeton, jako houževnatý materiál, je schopen přenášet jistá reziduální tahová napětí. Jejich velikost závisí zejména na množství a tvaru drátků, přičemž mezní protažení drátkobetonu jsou až desetinásobně větší než u prostého betonu, který se již při malém protažení poruší křehkým lomem. [1]



Graf 2: Porovnání pracovního diagramu v tahu drátkobetonu (křivka F) a prostého betonu (křivka B)

6 Zkoušky drátkobetonu

Vláknobeton, který patří mezi kompozitní materiály, je třeba považovat za specifický konstrukční materiál a to jak s ohledem na jeho výrobu, tak i na zkoušení. Protože vláknobeton se řadí do skupiny kompozitních materiálů s cementovou matricí, kam patří i běžný beton, je skutečností, že vedle specifických zkoušek je rozumné využívat i zkoušek dosud standardizovaných pro obyčejný beton. Zkoušení vláknobetonu je možné provádět stejnými postupy jako u obyčejného betonu s tím, že vláknobeton je dalším kompozitním materiálem se širokou řadou modifikací. Vyznačuje se rozdílnými vlastnostmi, které je třeba prokázat zkouškami, ze kterých by se daly potřebné charakteristiky přímo odvodit. [9]

6.1 Zkoušení čerstvého drátkobetonu

Vlastnosti čerstvého drátkobetonu se ověřují standardizovanými zkušebními postupy shodnými pro zkoušky obyčejného čerstvého betonu, tedy dle souboru norem ČSN EN 12350.

Při stanovení konzistence je třeba zvážit množství a typ použitých vláken s tím, že ze standardizovaných metod bude pravděpodobně nejvhodnější metoda dle ČSN EN 12350 – 5 Zkouška čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím. To vyplývá z působení vláken ve struktuře betonu, která ji stabilizují a poněkud brání přirozenému tečení, s kterým se počítá při zkoušce sednutím kužele. Navíc vláknobeton se vždy hutní a vnáší se do nich tedy dodatečná energie, tak jako při zkoušce na rozlivové desce.

Hutněním čerstvého vláknobetonu ocelovou tyčí dochází k násilné změně struktury a u drátkobetonu i k deformaci vláken, čímž je výsledek zkoušky Sednutí kužele nepoužitelný. [9]

6.1.1 Zkouška – Sednutí kužele

Sednutí kužele podle Abramse, postup dle ČSN EN 12350 – 2. Na vlhkou podložku se postaví zevnitř zvlhčená forma kužele. Forma se postupně naplní třemi vrstvami čerstvého betonu. Každá z nich se zhutní 25 vpichy propichovací tyčí. Poté se odstraní přebytek betonu a povrch se srovná do roviny s formou valivým pohybem propichovací tyče. Forma se zdvihne během 2 až 5 sekund tak, aby nebyla nikterak ovlivněna zkouška. Výsledkem zkoušky je rozdíl výšky sednutého kužele betonu měřeného v nejvyšším bodě oproti výšce formy kužele. Změřený rozdíl v mm se zaokrouhlí na 10 mm. [14]

Tab. 2: Rozdělení do tříd podle velikosti sednutí

S1	10 - 40 mm
S2	50 - 90 mm
S3	100 - 150 mm
S4	160 - 210 mm
S5	≥ 220 mm

6.1.2 Zkouška rozlitím

Forma na beton ve tvaru kužele bude umístěna na střed rozlivové desky s poklepem. Pomocí lopatky bude naplněn kužel čerstvou směsí drátkobetonu. Směs se do formy bude ukládat ve dvou stejně velkých vrstvách, přičemž druhá vrstva bude naplněna až po okraj horní hrany kužele. Každá vrstva se bude hutnit desetinásobným dusáním hutnicí tyče. Stráscací stolek, který se skládá z horní a spodní desky, bude očištěn od spadlého betonu. Pomocí držadel se forma vyzvedne nahoru. Kužel betonu se pak po opakovaném zvedání horní desky bude postupně rozlévat. Volný pád desky se bude opakovat patnáctkrát. Následně bude pravítkem změřen největší rozměr rozlití ve dvou směrech. [14]

Tab. 3: Rozdělení do tříd podle velikosti rozlití

F1	≥ 340 mm
F2	350 - 410 mm
F3	420 - 480 mm
F4	490 - 550 mm
F5	560 - 620 mm
F6	630 - 750 mm
F7	760 - 850 mm

6.1.3 Kontrola obsahu vláken

Důležitou kontrolou čerstvého vláknobetonu je navíc kontrola obsahu vláken v betonu, kterou lze do jisté míry popsat jako homogenitu (v případě opakované zkoušky betonu z jedné dávky autodomíchávače), nebo stabilní obsah vláken během rozsáhlejší dodávky (v případě periodického provádění zkoušky různých dávek během betonáže).

Zkoušku obsahu vláken v betonu je možné provádět rozplavením definovaného množství čerstvého vláknobetonu, extrakcí vláken, jejich vysušením a následným zvážením. V případě použití ocelových vláken je pak možno tuto zkoušku s výhodou urychlit extrakcí vláken pomocí magnetu. Příkladem je zařízení s názvem Dozometr (vyvinuté společností ArcelorMittal). [9]



Obr. 17: Zařízení na extrakci ocelových vláken z betonu pomocí magnetu

Kontrola správného dávkování drátků a jejich rovnoměrného rozmístění se v praxi provádí spíše výjimečně, a to zpravidla pouze na několika málo vzorcích, jejich objem je často nedostatečný. Důvodem je pracnost a zdoluhavost metody rozplavování betonové směsi. [36]

Tab. 4: Dávkování drátků ve vybraných typech konstrukcí

Typ konstrukce	Dávkování drátků	
Průmyslové podlahy s řezanými spárami	20 - 25	kg.m ⁻³
Průmyslové podlahy bezesparé	35- 45	
Stříkaný drátkobeton	30 - 50	
Základové konstrukce	40 - 60	
Stropní desky z drátkobetonu	80 - 100	

6.2 Zkoušení ztvrdlého drátkobetonu

Zkoušky ztvrdlého drátkobetonu se provádějí rovněž standardizovanými postupy dle norem řady ČSN EN 12390 a další zkušebními metodami pro ověření specifických vlastností vláknobetonu jako je například zkoušení pevnosti v tahu za ohybu. Budou zde popsány zkoušky pevnosti, které jsou pak dále využity v praktické části.

6.2.1 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku se provádí dle ČSN EN 12390 – 3 na zkušební krychli o délce hrany 150 mm, nebo zkušebním válci o průměru 150 mm. Třída betonu se proto označuje oběma charakteristickými hodnotami těchto pevností (např. C 25/30).

Zkušební tělesa jsou zatěžována v kalibrovaném zkušebním lise, až do svého porušení. Pevnost v tlaku se vypočte z maximálního zatížení při rozdrčení tělesa. (cvicebni)

Pevnost betonu v tlaku f_c [N/mm²] vypočteme z následujícího vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde

F je maximální zatížení při porušení [N]

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]

Pro obyčejné betony byl zaveden poměr mezi charakteristickými hodnotami pevností získaných z měření na válcích a na krychlích $\alpha_{fc} = f_{c,cyl} / f_{c,cub} = 0,8$. V tom je zahrnuta i skutečnost, že při zkoušce je válec zatěžován ve směru hutnění betonu a krychle kolmo na směr hutnění. Z dlouhodobého hlediska se ukazuje, že pro konstrukční vláknobetony s ocelovými vlákny lze tento poměr změnit na poměr $\alpha_{fc} = f_{c,cyl} / f_{c,cub} = 0,9$. [9]

Tab. 5: Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku dle zkoušek krychelné pevnosti

Pevnostní třída v tlaku	Charakteristická válcová pevnost $f_{fc,ck}$ [MPa]	Charakteristická krychelná pevnost $f_{fc,ck,cub}$ [MPa]
FC 9/10	9	10
FC 13/15	13	15
FC 18/20	18	20
FC 22/25	22	25
FC 27/30	27	30
FC 33/37	33	37
FC 40/45	40	45
FC 45/50	45	50
FC 50/55	50	55
FC 55/60	55	60
FC 60/67	60	67
FC 67/75	67	75
FC 75/85	75	85
FC 85/95	85	95
FC 95/105	95	105

6.2.2 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu má pro chování vláknobetonových prvků podstatně větší význam. To platí zvláště u prvků z prostého vláknobetonu bez prutové výztuže, kde vesměs rozhoduje o únosnosti prvku. Rozptýlená ocelová vlákna mohou totiž podstatně ovlivnit nejen mez vzniku tahových trhlin u prvku, ale dokonce i zajistit určitou reziduální únosnost prvku pro vzniku trhlin a jeho duktilitu. Tahová pevnost po vzniku trhlin se dá využít při navrhování staticky neurčitých konstrukcí. Tato pevnost by měla proto být uvedena v označení pevnostní třídy vláknobetonu, jako zaručená ekvivalentní pevnost v tahu po vzniku trhlin. [9]

Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti v příčném tahu se stanovuje dle normy ČSN EN 12390 – 6. Při zkoušení tělesa v příčném tahu, je těleso vystaveno tlaku v úzkém pruhu po jeho délce. Výsledná kolmá tahová síla způsobí porušení tělesa tahem.

Zkouška může být provedena na válci, hranolu či kvádru. Zkušební těleso se umístí do středu zkušebního lisu pomocí vodícího přípravku. Rovina zatěžování musí být kolmá k ploše. Zatěžováno je těleso konstantně až do jeho porušení.

Pevnost v příčném tahu f_{ct} [N/mm²]

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a^2}$$

kde

F maximální zatížení [N]

a zvolený rozměr tělesa [mm]

Doporučené značení pevnostní třídy vláknobetonů, kde se kromě charakteristických pevností v tlaku uvedou i obě charakteristické pevnosti tahové, tj. charakteristická pevnost v tahu při vzniku trhlin a ekvivalentní pevnost v tahu je tedy:

$$FC \ f_{ick,cyl}/f_{ick,cube} - f_{ic,tk}/f_{ic,tk,eq}, \text{ např. } FC \ 25/30 - 2,2/1,6$$

Vliv vláken na tahovou pevnost je mnohem výraznější než u pevnosti v tlaku. Proto nelze pro vláknobeton aplikovat přibližné vztahy k určení pevnosti v tahu z pevnosti v tlaku používané pro obyčejný beton. U vláknobetonů, zvláště u vláknobetonů s ocelovými vlákny, je nutné pevnosti v tahu zjistit experimentálními zkouškami na vhodných tělesech. Určí se tak zaručené hodnoty uvedených pevností nutné pro zatřídění materiálu a pro navrhování

vláknobetonových konstrukcí. Jedná se o pevnosti na mezi vzniku trhlin ($f_{fc,tk}$) a dále po vzniku trhlin v jejich ekvivalentní hodnotě ($f_{fc,tk,eq}$), potřebné pro návrh z hlediska únosnosti.

Pro vzájemný vztah pevností je třeba odvodit experimentálně poměry α_f mezi osovou pevností v tahu $f_{t,ax}$ a příslušnou pevností v tahu: pro příčný tah $\alpha_{t,sp} = f_{t,ax} / f_{t,sp} = 0,85$ a pro tah za ohybu $\alpha_{t,fl} = f_{a,ax} / f_{t,tl} = 0,7$.

Zkouška v příčném tahu je zkouškou poměrně jednoduchou a rychlou. Jejím nedostatkem je, že pevnost je prokazována v předem stanoveném průřezu. Proto by její využití mělo sloužit při návrzích složení vláknobetonových směsí a na stavbě k orientačnímu posouzení shody. [9]

Tab. 6: Pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku makrotrhliny

Pevnostní třída v dostředném tahu $f_{fc,tk}$ [MPa]	Charakteristická pevnost v tahu za ohybu $f_{fc,tk,fl}$ [MPa]	Charakteristická pevnost v příčném tahu $f_{fc,tk,sp}$ [MPa]
0,9	1,3	1,1
1,1	1,6	1,3
1,3	1,9	1,5
1,5	2,2	1,8
1,8	2,6	2,1
2,0	2,9	2,4
2,2	3,2	2,6
2,5	3,6	2,9
2,7	3,9	3,2
2,9	4,2	3,4
3,0	4,4	3,5
3,1	4,5	3,6
3,2	4,6	3,8
3,4	4,9	4,0
3,5	5,1	4,1
3,6	5,2	4,2
3,7	5,4	4,4
atd.	atd.	atd.

6.2.3 Pevnost v tahu za ohybu

Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu je důležitou informací pro vláknobeton. Po vytvoření první makrotrhliny dochází k tomu, že tahovou pevnost převzoumou vlákna. V experimentální části práce se budu blíže zabývat zkouškou pevnosti v tahu za ohybu dle evropské normy ČSN EN 14651 + A1. Ta bude v následné kapitole blíže popsána. Okrajově bude popsán také postup zkoušení podle TP FC 1-1.

Pro zkoušení vláknobetonů ohybem jsou užívány tři varianty sestavy zkoušek. Také je používán odlišný postup zatěžování zkušebního tělesa od postupu zatěžování obyčejného betonu dle ČSN EN 12390 – 5. V případě zkoušky obyčejného betonu je zatěžování břemenem řízeno plynulým přírůstkem síly, která má vyvíjet v betonu konstantní přírůstek napětí v tahu. Při zkoušení vláknobetonu ohybem je naopak zatěžování břemenem proměnné a je řízeno rychlostí průhybu tělesa. Typ zkoušky ovlivňuje hodnotu $\alpha_{t,fl}$ a nedosahuje vždy stejných výsledků pro pevnost v tahu za ohybu při vzniku trhliny $f_{t,tl}$. U obyčejných betonů jsou rozdíly malé, u vláknobetonů mohou být podstatně větší.

Při čtyřbodovém zatěžování trámku není předem určen kritický průřez, ve kterém vznikne ohybová trhlina, což je výhodou tohoto postupu.

Pro zkoušení vláknobetonu v tahu ohybem dle varianty čtyřbodového ohybu jsou dostupné čtyři postupy (TP FC 1-1, Richtlinie Faserbeton, DBV Merkblatt, ČSN EN 14488-3 – stříkaný vláknobeton).



Obr. 18: Zkouška pevnosti v tahu čtyřbodovým ohybem

Uvedené postupy se liší ve velikosti zkušebních těles, vzdálenosti podpor (rozměr l), vzdálenosti břemen F (rozměr h) a v rychlosti zatěžování.

Tab. 7: Porovnání odlišnosti zkoušek

	Rozměry těles $b \times h \times l$ [mm]	Vzdálenost podpor l [mm]	Vzdálenost břemen h [mm]	Rychlost zatěžování [mm průhybu/min]
TP FC 1-1	150 x 150 x 700	600	200	0,01 do průhybu 0,2 0,2 do přírůstku průhybu 6 0,5 do přírůstku průhybu 10 nebo alternativně průměrně 0,2 $\pm 0,05$
Richtlinie Faserbeton	150 x 150 x 600 až 700	450	150	$0,2 \pm 0,03$
DBV Merkblatt	150 x 150 x 700	600	200	průměrně 0,2
ČSN EN 14488-3	75 x 125 x 500 a více	375	125	$0,25 \pm 0,05$ do průhybu 0,5 mm dále 1 do průhybu 4 mm nebo do zlomení

Pro zkoušku tříbodovým ohybem je vydána evropská norma ČSN EN 14845-2. Předmětem této normy je však zkušební metoda pro stanovení vlivu ocelových nebo polymerových vláken na zbytkovou pevnost v tahu ohybem referenčního betonu. Dle této normy se zkouší několik záměsů referenčního betonu s různými dávkami stejných vláken, aby bylo možno stanovit obsah vláken, který je potřebný k dosažení zbytkové pevnosti v tahu ohybem min. 1,5 MPa při šířce rozevření trhliny (CMOD) 0,5 mm a průměrné zbytkové pevnosti v tahu ohybem min. 1 MPa při šířce rozevření trhliny (CMOD) 3,5 mm. Z toho vyplývá, že norma je určena pro zkoušení vláken a jejich minimálního množství ve vláknobetonu, aby bylo dosaženo uvedených hodnot pevnosti a průhybu. Zkouška nemůže sloužit pro zjišťování charakteristik vláknobetonu různého složení (cement, kamenivo, přísady, příměsi apod.), potřebných pro návrh konkrétních vláknobetonů pro konkrétní konstrukci a to ani z důvodu způsobu jejího vyhodnocení. Dále je pro zkoušku tříbodovým ohybem vydána evropská norma ČSN EN 14651+A1.

Výsledky potřebného počtu zkoušek vláknobetonu jsou následně použity k zařazení vláknobetonu dle:

- pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku
- pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku makrotrhliny
- pevnostní třídy vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny [9]



Obr. 19: Zkouška pevnosti v tahu tříbodovým ohybem

Postup dle ČSN EN 14651 + A1

Tato evropská norma určuje metodu měření pevnosti v tahu za ohybu betonu s kovovými vlákny na zkušebních tělesech odlévaných do forem. Tato metoda určuje způsoby, kterými se stanoví mez úměrnosti a hodnoty zbytkové pevnosti v tahu za ohybu. Tato zkušební metoda je určena pro kovová vlákna do délky 60 mm. Metoda může být také použita pro kombinaci kovových vláken s kombinací kovových vláken s jinými vlákny.

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa jsou hranoly o šířce b a výšce h 150 mm a délce L , pro níž platí, že $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$. Daný tvar a velikost zkušebních těles jsou vhodné pro beton s maximální velikostí zrn kameniva, nepřesahující 32 mm, nebo s kovovými vlákny do délky 60 mm.

Provedení zářezu

K provedení zářezu do zkušebního tělesa se použije řezání za mokra. Tělesa se otočí o 90° kolem své osy a řez se pak provede po šířce tělesa uprostřed rozpětí.

Postup zkoušky

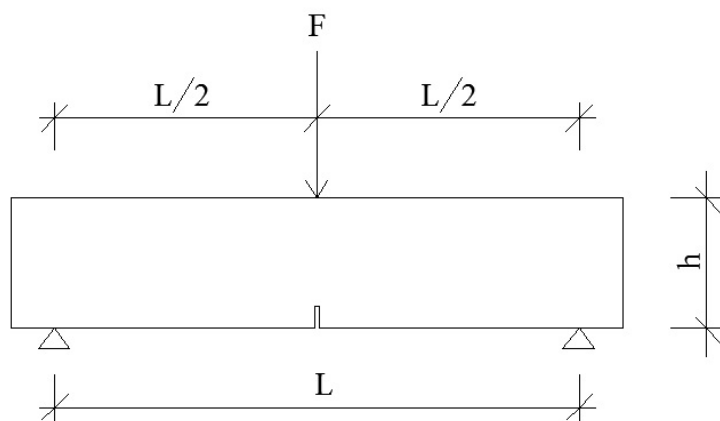
Průměrná šířka tělesa a vzdálenost mezi koncem zářezu a horní hranou tělesa v průřezu uprostřed rozpětí se určí ze dvou měření šířky a vzdálenosti v části zkušebního tělesa se zářezem. Měření se provádí pomocí posuvného měřidla.

Při měření rozevření trhliny (nebo zářezu) se snímač umístí ve směru podélné osy uprostřed šířky zkušebního tělesa tak, aby vzdálenost y mezi spodní hranou a přímkou měření byla maximálně 5 mm.

Pokud se měří také průhyb, je typické uspořádání následující. Snímač se umístí na tuhý rám, který je pevně připevněn ke zkušebnímu tělesu v polovině výšky nad podpěrami. Jeden konec rámu se připevní k tělesu způsobem umožňujícím posun a druhý konec způsobem umožňujícím pootočení.

Zkušební těleso se umístí do zkušebního stroje, přesně se vystředí a vyrovná se tak, aby podélná osa tělesa byla kolmá k podélné ose horních i spodních válečků.

Ohybová zkouška



Obr. 20: Uspořádání zkoušky ohybem pro doporučený normový trámeček
($h=b=150\text{ mm}$, $L=600\text{ mm}$)

Před ohybovou zkouškou se s přesností na mm určí průměrná délka rozpětí zkušebního tělesa. Délka rozpětí se stanoví pomocí měřidla ze dvou měření osové vzdálenosti mezi podpěrnými válečky na obou stranách tělesa. Zatížení se může aplikovat, až poté co jsou všechny zatěžovací i podpěrné válečky řádně usazeny na zkušebním tělese.

Během prvních dvou minut zkoušky se hodnoty zatížení a odpovídajícího CMOD zaznamenávají frekvencí alespoň 5 Hz. Poté se může frekvence snížit, min. však 1 Hz. Zkouška se ukončí, když je hodnota CMOD rovna 4 mm nebo větší. Zkoušky, kdy se trhlina objeví mimo zářez, se vyřadí.

Vyjádření výsledků

Vztah mezi CMOD a průhybem lze přibližně vyjádřit:

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04$$

kde

δ průhyb

CMOD hodnota rozevření trhliny, měřená při vzdálenosti mezi spodní hranou zkušebního tělesa a přímkou měření $y = 0$

Pokud je příмка měření ve vzdálenosti y pod spodní hranou tělesa, hodnota CMOD se odvodí od naměřené hodnoty CMOD_y pomocí vzorce:

$$\text{CMOD} = \text{CMOD}_y \cdot (h / h + y)$$

h celková výška zkušebního tělesa

Vztah mezi CMOD a δ

Tab. 8: Vztah mezi CMOD a δ

CMOD [mm]	δ [mm]
0,05	0,08
0,10	0,13
0,20	0,21
0,50	0,47
1,50	1,32
2,50	2,17
3,50	3,02
4,00	3,44

Mez úměrnosti je dána vztahem:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3l F_L}{2bh_{sp}^2}$$

kde

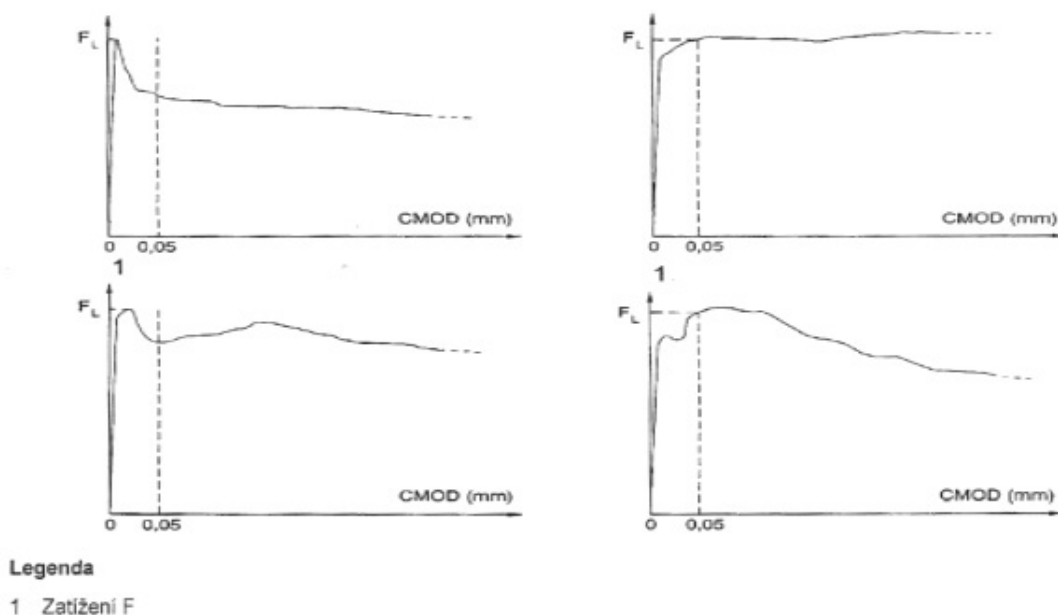
$f_{cl,L}$ mez úměrnosti

F_L zatížení odpovídající mezi úměrnosti

l délka rozpětí

b šířka zkušebního tělesa

h_{sp} vzdálenost mezi koncem zářezu a horní hranou zkušebního tělesa



Graf 3: Grafy závislosti CMOD na zatížení F_L

Hodnota zatížení F_L se určí pomocí přímky nakreslené ve vzdálenosti 0,05 mm vedené rovnoběžně s osou zatížení v grafu závislosti CMOD na zatížení nebo v grafu závislosti průhybu na zatížení. Jako F_L se vezme největší hodnota zatížení v intervalu 0,05 mm. [8]

Zbytková pevnost v tahu za ohybu

$$f_{R,j} = \frac{3l F_j}{2bh_{sp}^2}$$

kde

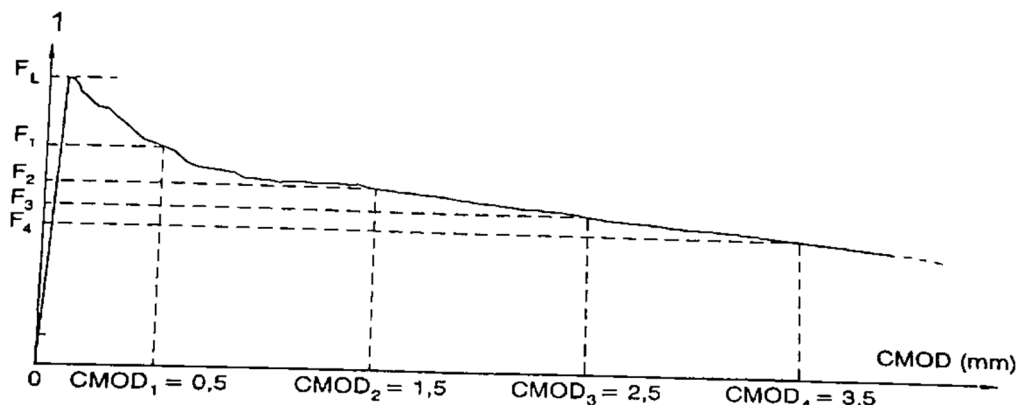
$f_{R,j}$ zbytková pevnost v tahu za ohybu odpovídající CMOD = CMOD_j nebo $\delta = \delta_j$

F_j zatížení odpovídající CMOD = CMOD_j nebo $\delta = \delta_j$

l délka rozpětí

b šířka zkušebního tělesa

h_{sp} vzdálenost mezi koncem zářezu a horní hranou zkušebního tělesa



Legenda

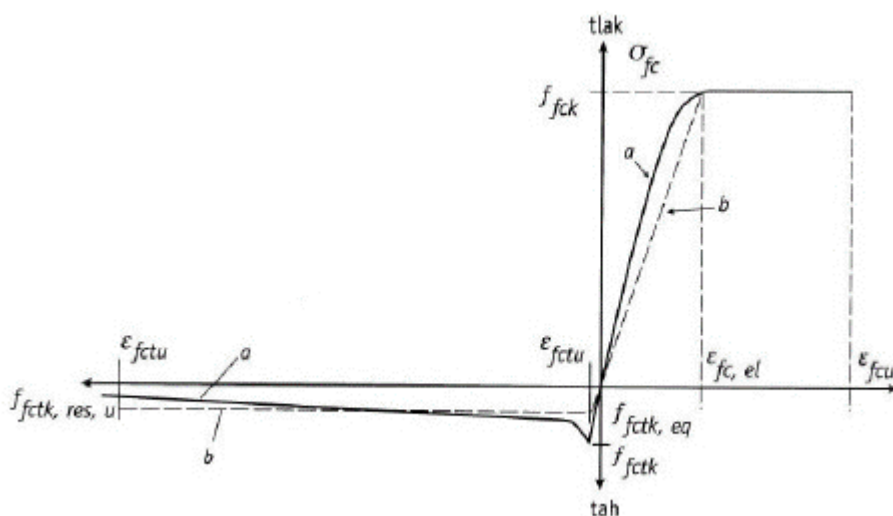
1 Zatížení F

Graf 4: Graf závislosti CMOD na zatížení F_j ($j = 1, 2, 3, 4$)

Pro navrhování konstrukcí z vláknobetonu je nutné odvodit jeho základní charakteristiku, tj. vztah mezi napětím a jeho poměrným přetvořením vyjádřený charakteristickým pracovním diagramem nejenom pro tlakové, ale především pro tahové namáhání rozhodujícího průřezu.

Charakteristický diagram odolnosti pro tahové namáhání ukazuje základní rozdíl v chování vláknobetonu do charakteristické meze vzniku makrotrhliny. Po svém vzniku se makrotrhlina velmi rychle otevře a její délka se významně prodlouží, přičemž se vlákna v trhlině aktivují a začnou přenášet tahová namáhání v kritickém průřezu. [5]

Z každého zkoušení by měl být hlavním výstupem pracovní diagram znázorňující chování materiálu s hlavními pevnostními body.



Obr. 21: Charakteristický pracovní diagram vláknobetonu

f_{fck}	charakteristická pevnost vláknobetonu v tlaku
f_{fctk}	pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu při vzniku první trhliny
$f_{fctk,eq}$	ekvivalentní pevnost v dostředném tahu
$f_{fctk, res, u}$	reziduální charakteristická pevnost
ε_{fctu}	mezí poměrné přetvoření
$\varepsilon_{fc,el}$	poměrné stlačení při kvaziplastickém chování
ε_{fcu}	mezí poměrné přetvoření v tlaku [5]

Postup dle TP FC 1-1

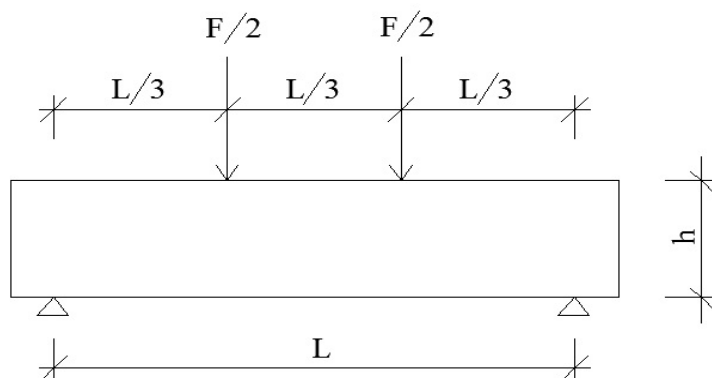
Technické podmínky TP FC 1-1 se používají pro stanovení specifických vlastností při zkoušení vláknobetonů, také pro stanovení charakteristických veličin pro navrhování nosných konstrukcí. U TP FC 1-1 je zkušební těleso zatěžováno čtyřbodovým ohybem, kdy není předem určen kritický průřez, kde vznikne trhlina.

Rozměry zkušebního trámku

Doporučené velikosti zkušebních těles z vláknobetonu pro zkoušky v tahu za ohybu jsou následující:

- trámce 150x150x600 mm pro ověřování pevností vláknobetonu v tahu za ohybu a jeho přetvořitelnosti (duktility),

Uspořádání zkoušky



Obr. 22: Uspořádání zkoušky ohybem pro doporučený normový trámek
($h=b=150\text{ mm}$, $L=600\text{ mm}$)

Postup zatěžování

Průběh zatěžování normového trámku ohybem musí probíhat ve zkušebním zařízení, na kterém lze řídit zatěžování trámku (výslednou) silou F_E tak, aby průhyb uprostřed trámku rostl ve zvolené etapě zatěžování rovnoměrně s časem, tj. rovnoměrnou rychlostí zatěžování v příslušné etapě v_{fi} [mm/min] podle vztahu:

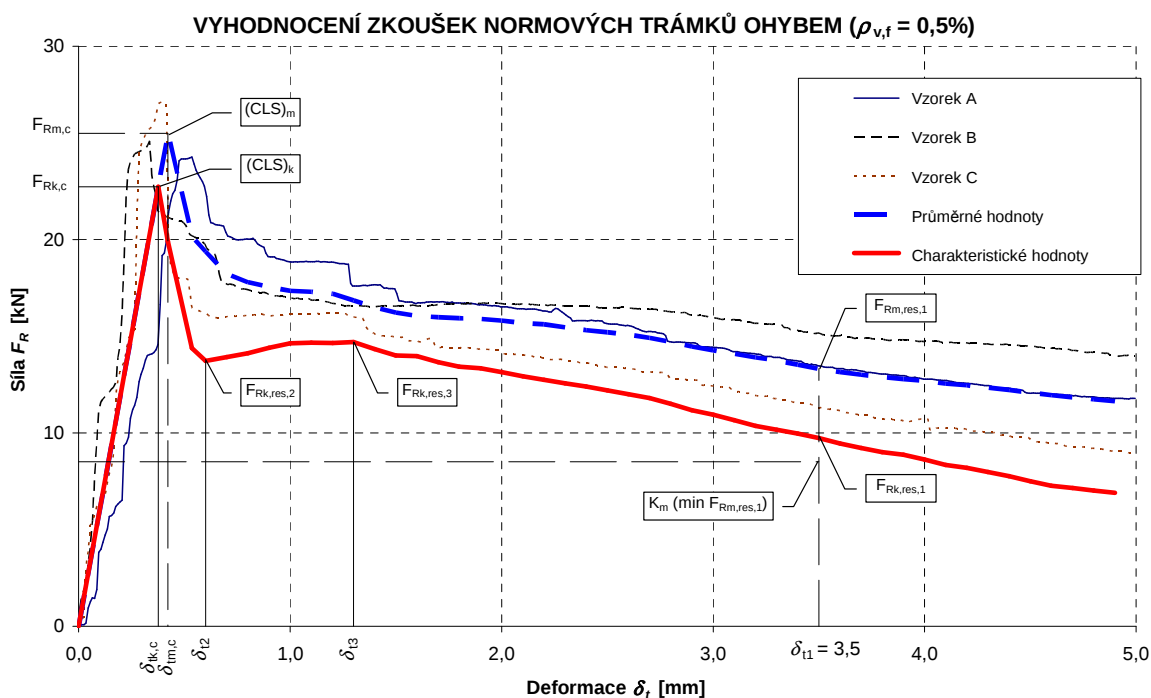
$$v_{fi} = \frac{\Delta \delta_i}{\Delta t_i}$$

kde

$\Delta \delta_i$ - přírůstek průhybu normového trámku uprostřed rozpětí ve zvolené etapě zatěžování [mm]

Δt_i - doba intervalu zvolené etapy zatěžování. [min] [7]

Vyhodnocení zkoušek



Obr. 23: Průměrný a charakteristický diagram $(F_R - \delta_t)_m$ a $(F_R - \delta_t)_k$, odvozené ze zkoušek ohybem drátkobetonových normových trámků $\rho_{v,f} = 0,5 \%$.

Označení pevnostních tříd vláknobetonu dle TP FC 1-1

Pro označení vláknobetonu jako kompozitního materiálu využitelného při návrhu nosných vláknobetonových konstrukcí, slouží podrobnější charakteristika jeho pevnostní třídy, popř. ještě výstižnější charakteristika jeho třídy duktility. [7]

Pevnostní třída vláknobetonu

$$FC \ f_{fc,ck} / f_{fc,ck,cub} - f_{fc,tk} / f_{fc,tk,res,j} - f_{fc,tk,sp}$$

Např. FC 40/45 – 3,2/0,8 – 3,8

Třída duktility vláknobetonu

$$FC \ (f_{fc,ck} / \epsilon_{fc,cu}) / f_{fc,ck,cub} - f_{fc,tk} / (f_{fc,tk,res,j} / \epsilon_{fc,t,res,j}) - f_{fc,tk,sp}$$

Např. FC (40/4,35)/45 – 3,2/(0,8/6,10) – 3,8

Ve stavební praxi se s takovým označením vláknobetonu nesetkáme. Certifikovaný vláknobeton se u nás zatím nevyrábí. Všechny konstrukce, které jsou vyrobeny z konstrukčního vláknobetonu, se skládají z certifikovaného betonu a z certifikovaných vláken.

Označení takto vzniklého kompozitního materiálu bývá většinou následující:

Např. C16/20 30 kg – jedná se o kompozitní materiál z prostého betonu s charakteristickou válcovou pevností 16 MPa, charakteristickou krychelnou pevností 20 MPa s přidáním 30 kg vláken na m³.

C16/20 30 kg DE 50/1,0 N – jedná se o kompozitní materiál ze stejného betonu, jak již bylo uvedeno, s přidáním ocelových vláken se zahnutými konci o délce vlákna 50 mm a průměru vlákna 1,0 mm. Stejný kompozitní materiál je také využit v praktické části.

Takto značené směsi vláken a betonu negarantují žádné přidání vlastnosti výsledného kompozitu (zejména požadavek na reziduální pevnost po vzniku trhliny), který je zabudováván do staveb jako konstrukční materiál dané kategorie. [10]

7 Využití v praxi – drátkobetonové průmyslové podlahy

Nejrozšířenějším příkladem využití drátkobetonu jsou průmyslové podlahy. Při návrhu těchto konstrukcí uložených v naprosté většině přímo na upraveném pružném podloží se často vychází z postupů založených na principech lineární mechaniky.

Průmyslová podlaha je konstrukce, která je zatížena rovnoměrným zatížením větším než 5 kN/m^2 , nebo pohyblivým zatížením manipulačními prostředky, jejichž celková hmotnost je větší než 2000 kg. Průmyslovou podlahou je i konstrukce se zvláštními požadavky na odolnost proti obrusu, kontaktnímu namáhání, chemickému působení a to i v případě, že zatížení je menší než výše uvedené hodnoty.

Podlaha musí především splňovat náročné funkční požadavky, které jsou dány provozem. Jedná se především o bodové a pohyblivé zatížení, obrusnost povrchu, či jeho protiskluznost.

Návrh smršťovacích spár je závislý na tloušťce betonové vrstvy. Maximální vzdálenost spár nesmí přesáhnout 30-ti násobek tloušťky nosné betonové desky a zároveň nesmí být větší než

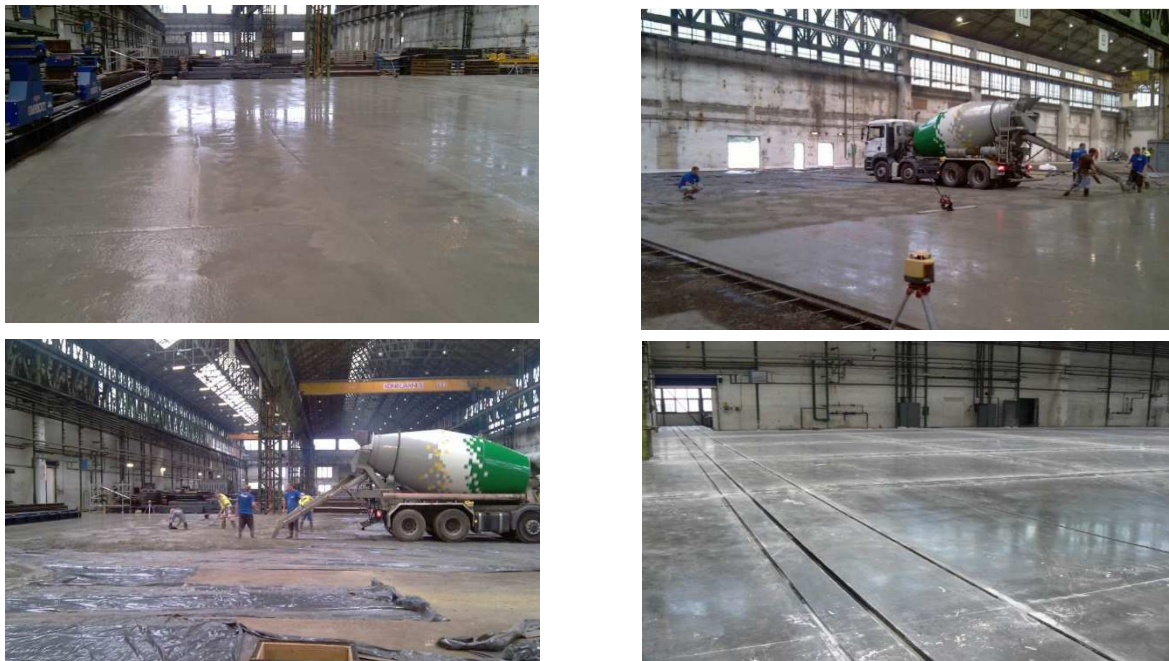
Jejich nespornou výhodou je rychlost výstavby a snížení ekonomické náročnosti díky eliminaci několika finančně náročných a časově omezujících technologických postupů, jakými jsou vyvazování a vyztužování desky pomocí ocelových rohoží.

Podle geologických podmínek, požadavků na statickou a dynamickou únosnost betonové desky a dalších ovlivňujících faktorů je dimenzováno potřebné množství výztuže pro drátkobetonové desky. [29] [37] [38]



Obr. 24: Pokládka drátkobetonové podlahy

Drátkobetonové podlahy se v současné době těší veliké oblibě a provádí se u nás takto asi 70-80% ze všech průmyslových podlah. Tento trend plyne z velmi dobrých vlastností za přijatelnou cenu. Je ovšem třeba říci, že ačkoliv se drátkobeton intenzivně rozvíjí, nejsou ještě příliš sjednoceny normy a předpisy pro navrhování a zkoušení. A výsledky jednotlivých předpisů není radno zaměňovat. Při návrhu i zkoušení je lépe se držet pouze předpisu jednoho. [15]



Obr. 25: Postup provádění pokládky drátkobetonové směsi

Podloží

Podloží se nazývá zhutněná zemina pod betonovou podlahou, která se nalézá v dosahu účinku zatížení podlahy. Základní požadavky kladené na podloží průmyslových podlah jsou homogenita, dostatečná míra zhutnění kontrolovaná například poměrem $E_{def,2}/E_{def,1}$ a modul pružnosti od 30 MPa výše.

Ze své podstaty je u drátkobetonových podlah kromě návrhu technologie či správného dimenzování neméně důležitou součástí definice základových poměrů. Konstrukce se nalézá v přímém kontaktu se zeminou a je jí tedy ovlivněna. [15]

Zkoušení podloží – Statická zatěžovací zkouška

Zatěžovací zkouška deskou patří mezi nejstarší polní zkoušky a je v současné době velmi používaná. Provádí se pomocí tuhé kruhové desky obvykle o průměru 750mm, která se prostřednictvím hydraulického lisu s protizávažím vtlačuje do zeminy. Při zkoušce jsou

obvykle sledovány hodnoty modulu přetvárnosti $E_{def,1}$ a $E_{def,2}$ obdržené při prvním a druhém zatěžovacím cyklu. Obvykle poměr $E_{def,2}/E_{def,1} < 2,0$ znamená dobře zhutněné podloží, naopak poměr $E_{def,2}/E_{def,1} > 2,5$ indikuje nevhodné podloží. Tato metoda byla původně používána výhradně v dopravním stavitelství pro ověření podloží silnic a z toho plynou i jistá omezení metody pro použití u podlah. Podlahy zatížené převážně dopravou bez plošných zatížení větší intenzity mají relativně malou aktivní deformační zónu, tj. jsou svým charakterem silnicím velmi podobné a zkouška je u nich dostatečná. Avšak podlahy zatížené mnohapatrovými regály mají hloubku deformační zóny mnohem větší v řádu několika metrů a touto zkouškou u nich nelze přetvárný vliv hlouběji položených vrstev postihnout. Potom je třeba dát přednost jiné zkoušce podloží, nebo výpočtu s uvážením celé ovlivněné zóny. [15]



Obr. 26: Zařízení pro provedení statické zatěžovací zkoušky

Drátkobetonovou podlahu by měla provádět firma, která je pro to dostatečně kvalifikována. Proti podlahám železobetonovým i podlahám z prostého betonu je třeba u práce s drátkobetonovou podlahou mít některé zvláštní znalosti a dovednosti, které běžné betonářské společnosti nevlastní. Při míchání a ukládání by se mělo zamezit vzniku shluků drátků, drátky musí být ve směsi rovnoměrně rozmístěny a neměly by trčet z povrchu ven. [15]

Bylo by vhodné provádět zkoušky drátkobetonu ještě před zabudováním do nosné konstrukce, jako je tomu i u prostého betonu. U prostého betonu je již před zabudováním do konstrukce garantována pevnostní třída betonu a následně je již jen ověřena. Naproti tomu u drátkobetonů je pevnostní třída zjištěná až po zabudování do konstrukce a ověřena zkouškami. Špatné provedení může mít dalekosáhlé následky na výslednou konstrukci.

Trhliny na povrchu betonové podlahy

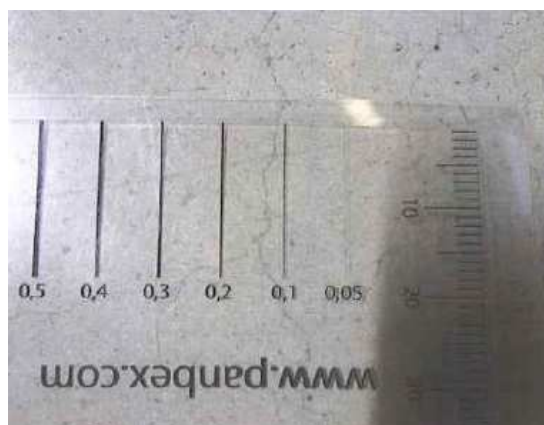
Trhliny jsou jednou z nejčastějších vad betonových podlah. Sít' trhlín na povrchu betonové podlahy je vcelku běžným jevem. Trhliny ovšem vznikají z různých příčin a v různém časovém horizontu.

Uzavřená sít' trhlín na povrchu podlahy

Tento typ trhlín má šířku do 0,1 mm, jejich hloubka jen málokdy přesahuje 3 mm. Trhlinky tvoří nepravidelné šesti až osmiúhelníky o stranách 10 až 20 mm, max. 40 mm. Trhlinky se formují v průběhu hlazení a první den po dokončení hlazení, nejpozději do jednoho týdne po dokončení podlahové konstrukce. Obvykle jsou okamžitě viditelné, ale objevují se postupně tak, jak podlaha vysychá. Sít' se zvýrazní po navlhčení povrchu podlahy a po jejím opětovném vyschnutí je povrch opět jednolitý. Tyto trhliny nemají vliv na mechanické vlastnosti betonové podlahy, neovlivňují ani odolnost podlahy v obrušování. Během používání podlahy se může stát sít' více viditelnou vlivem drobných nečistot, usazených v trhlínkách. Jen zřídka dochází k rozevírání trhlín a poruchám v okrajích.



Obr. 27: *Typická trhlínka šířky 0,05 mm (změřeno optickým mikroskopem)*



Obr. 28: *Měření šířky trhlinek pomocí přiloženého trhlinoměru*

8 Experimentální část

Cílem experimentální části této práce je ověření fyzikálně-mechanických vlastností obyčejného konstrukčního betonu daných pevnostních tříd s příměsí 30kg ocelových drátků na m^3 z hlediska pevnosti v tahu za ohybu. Výsledky budou vyhodnoceny podle jednoho z možných doporučení pro navrhování konstrukčních vláknobetonů. A to podle normy ČSN EN 14651+A1, jedná se o zkoušení drátkobetonu tříbodovým ohybem.

Betonová směs byla připravována v laboratoři VUT fakulty stavební. Z důvodu časové náročnosti, velké hmotnosti a hlavně kvůli statistickým výsledkům byly pro měření pevnosti v tahu za ohybu a určení reziduální pevnosti použity zkušební trávce o rozměrech 100x100x400 mm.

Bylo tak možné provést měření, místo na jednom normovém tělese o objemu 0,0158 m^3 , na třech neneormovaných tělesech o celkovém objemu 0,012 m^3 , bylo tedy provedeno více měření a tím jsem získala i více statistických údajů ke zpracování.

K výrobě zkušebních těles byl použit konstrukční beton o různých pevnostech a to beton C16/20, C20/25, C25/30 a C30/37 k nimž byla přimíchána ocelová vlákna o hmotnosti 30 kg na m^3 . Jednalo se o ocelové drátky KrampeHarex DE 50/1,0 N.

Typy záměsí:

konstrukční beton – C 16/20, C 20/25, C25/30, C30/37

+

ocelové drátky – KrampeHarex DE 50/1,0 N

Po odvážení jednotlivých složek betonu do nádob, byl beton míchán v laboratorní míchačce s nuceným oběhem. U každé receptury byly provedeny zkoušky čerstvého drátkobetonu a to měření konzistence metodou sednutí kužele a zkouškou rozlitím. Zkoušky na vyrobených vzorcích byly prováděny ve stáří betonu 1300 dnů. Práce navazuje na měření, které bylo provedeno v roce 2012. [10] Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny podle evropské normy ČSN EN 14651 + A1.

U cementových kompozitů s přídavkem ocelových vláken je zapotřebí dbát na správnou technologii výroby, zejména při zpracování čerstvého betonu a ukládání těles.

8.1 Suroviny k výrobě betonu

Pro výrobu 1 m³ čerstvého betonu bylo použito drobné těžené kamenivo (DTK) frakce 0 – 4 mm, hrubé drcené kamenivo (HDK) frakce 8 – 16 mm a frakce 11 – 22 mm. Byl použit cement CEM I 42, R, jemně mletý slínek, elektrárenský popílek, plastifikační přísada a záměsová voda. V drátkobetonové směsi pak byly využity ocelové drátky KrampeHarex o délce drátku 50 mm a průměru 1,0 mm.

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé navážky, potřebné k výrobě.

Tab. 9: Referenční receptura na m³ betonu

Třída betonu	CEM I 42, R [kg]	JMS [kg]	Popílek [kg]	DTK 0 – 4 [kg]	HDK 8 – 16 [kg]	HDK 11 – 22 [kg]	Přísada [kg]	Voda [l]
C16/20	220	50	30	900,5	536,2	424,9	2,30	176
C20/25	240	50	30	880,3	536,3	425,0	2,47	177
C25/30	260	50	30	860,2	536,4	425,0	2,64	178
C30/37	280	50	30	855,1	546,4	435,1	2,13	170

Další receptura měla stejný obsah jemně mletého slínku a popílku, ostatní suroviny se upravily v závislosti na přidaném množství vláken. V případě mé diplomové práce se hmotnostní podíl surovin upravil po přidání 30 kg ocelových drátků a konzistenci výsledného kompozitního materiálu. Hmotnostní navážky pro upravenou recepturu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 10: Upravené receptury pro množství 30 kg drátků

Třída betonu	Drátky [kg]	CEM I 42, R [kg]	JMS [kg]	Popílek [kg]	DTK 0 – 4 [kg]	HDK 8 – 16 [kg]	HDK 11 – 22 [kg]	Přísada [kg]	Voda [l]
C16/20	30	220	50	30	890	530	415	2,30	182
C20/25	30	240	50	30	870	530	415	2,47	183
C25/30	30	260	50	30	850	530	415	2,64	184
C30/37	30	280	50	30	845	540	425	2,13	176

Jednotlivé suroviny, které byly použity k výrobě zkušebních trámců, jsou:

Kamenivo

Pro výrobu byly použity tři frakce kameniva. Frakce 0-4 z pískovny Zaječí, frakce 8-16 a frakce 11-22 byly ze štěrkovny Luleč.

Kamenivo je vyráběno v souladu s evropskou normou ČSN EN 12 620 Kamenivo do betonu.

Na všech frakcích kameniva byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933 - 1, určena vlhkost dle ČSN EN 1097 - 5, tvarový index dle ČSN EN 933 - 4 a objemová hmotnost dle ČSN EN 1097 - 6.

Cement

Byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Dětmorovice. Portlandský cement obsahuje pouze portlandský slínek, může obsahovat maximálně 5 % doplňujících složek.

Cement je vyráběn v souladu s normou ČSN EN 197 – 1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.

Popílek

Pro výrobu zkušebních těles byl použit popílek z elektrárny Dětmorovice. Elektrárna Dětmorovice je součástí elektrárenské společnosti ČEZ, a.s. Spalováním směsi černouhelného a hnědouhelného prachu vyrábí jako vedlejší produkt popílek. Popílek je v souladu s normou ČSN EN 450 – 1 Popílek do betonu.

Drátky

Použity jsou drátky firmy KrampeHarex s.r.o. Jedná se o drátky se zahnutými konci, které zajišťují ideální kotvení v betonu. Použity byly ocelové drátky o délce 50 mm a průměru 1 mm. Bylo zvoleno dávkování 30 kg na m³ čerstvé směsi, které už je dostatečné, aby výztuž po vzniku trhlin převzala tahová namáhání a nedocházelo tak k náhlému porušení v kritickém průřezu. Jako limitní hodnota pro dávkování drátků se označuje 20 kg/m³.

Tab. 11: Vlastnosti drátů KrampeHarex

Označení	délka [mm]	průměr [mm]	materiál	pevnost v tahu [MPa]
DE 50/1,0 N	50 ± 10 %	1,00 ± 10%	C7D	1100 ± 15%

typ vlákna průměr
 ↓ ↓
DE 50/1,0 N
 ↑ ↑
 tvar vlákna délka materiál



Obr. 29: Použité dráty KrampeHarex



Obr. 30: Připravené jednotlivé navážky dané betonové směsí

Důležitým faktorem pro stavební praxi je dobrá zpracovatelnost čerstvého betonu, nejen při jeho výrobě, ale také při dopravě a ukládání do bednění.

Jednotlivé suroviny byly přesně naváženy dle receptury. A bylo možné přejít k samotné výrobě směsi. Směs byla míchána pomocí laboratorní míchačky s nuceným

oběhem. U směsi čerstvého betonu byla provedena zkouška pro zjištění konzistence betonu a to zkouška rozlitím a zkouška sednutí kužele. Tyto zkoušky jsou vyhodnoceny v kapitole 9.2. Dále už byla betonová směs připravena k ukládání do bednění. V případě laboratorních podmínek se čerstvá betonová směs ukládá do ocelových a polyuretanových forem. Pro lepší uspořádání zrn kameniva ve struktuře cementové matrice, bylo použito hutnění vibrací na vibračním stole.

Pro snadnější odformování zkušebních těles, byl použit jako odformovací přípravek prostředek separol, který zajistil snadnější vyjmutí zkušebních těles. Tělesa byla odformována a uložena.

8.2 Zkoušky čerstvého betonu

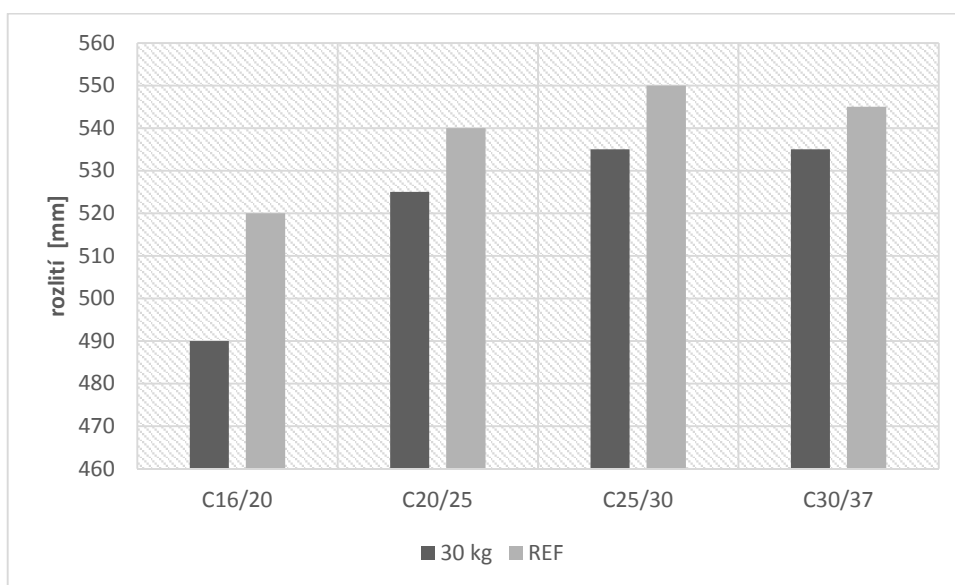
Zkoušky čerstvého vláknobetonu se provádí obdobně jako u obyčejných betonu. Pro zjištění konzistence a čerpatelnosti drátkobetonové směsi byly použity zkoušky rozlitím a sednutí kužele. A také byla provedena zkouška obsahu vzduchu v čerstvé směsi.

Zkouška rozlitím

Byla provedena zkouška rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5. Forma kužele byla naplněna ve dvou vrstvách vyrobenou směsí drátkobetonu. Pomocí střešacího stolku byla směs rozlévána po rozlivové desce. Pravítkem se pak změřily největší rozměry rozlití ve dvou směrech. Přesné provedení zkoušky rozlitím je popsáno v kapitole 6.1.2.

Tab. 12: Výsledky zkoušky rozlitím

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	rozlití [mm]
C16/20	30	490
C16/20	REF	520
C20/25	30	525
C20/25	REF	540
C25/30	30	535
C25/30	REF	550
C30/37	30	535
C30/37	REF	545



Graf 5: Zkouška rozlitím

Aby bylo zajištěno podobných hodnot rozlití, bylo nutné dávkovat plastifikátor. Výsledné rozlití, které se u referenčních směsí a u směsí s přídatkem 30 kg drátků pohybovalo v rozmezí 490 – 550 mm, řadíme do třídy F4, která je těmito hodnotami omezena. U referenčních směsí je rozlití větší, nejnižší hodnota je zde 520 mm. Konzistence je u referenční směsi tekutější, než u drátkobetonu vlivem přidávaných vláken.



Obr. 31: Zkouška rozlití

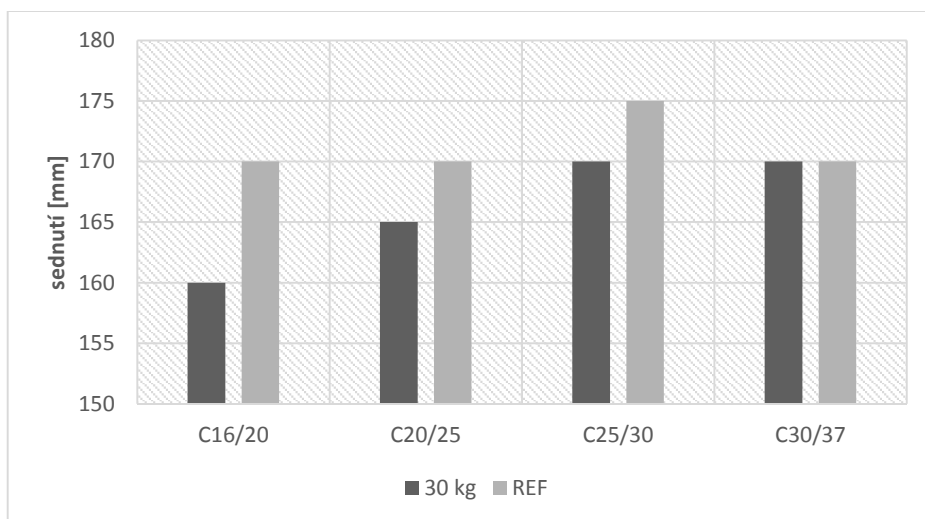
Zkouška sednutí kužele (Abramsův kužel)

Byla provedena zkouška sednutí kužele dle normy ČSN EN 12350-2.

Forma kužele byla naplněna třemi vrstvami čerstvého drátkobetonu, každá z nich zhutněna 25 vpichy propichovací tyčí. Poté byla forma odstraněna a pomocí pravítka změřen rozdíl mezi výškou sednutého kužele a formy kužele. Podrobněji je zkouška sednutí kužele popsána v kapitole 6.1.1. Zkouška byla provedena za účelem ověření čerpatelnosti drátkobetonové směsi.

Tab. 13: Výsledky zkoušky sednutí kužele

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	sednutí [mm]
C16/20	30	160
C16/20	REF	170
C20/25	30	165
C20/25	REF	170
C25/30	30	170
C25/30	REF	175
C30/37	30	170
C30/37	REF	170



Graf 6: Zkouška sednutí kužele

K výraznějšímu sednutí docházelo u betonů s přidáním vláken. Hodnoty sednutí kužele se pohybovaly od 160 mm do 175 mm. Sednutí tedy spadalo do třídy S4, která je omezena hodnotami 160 – 210 mm. Podle hodnot sednutí se jedná o tekutou směs.



Obr. 32: Zkouška sednutí kužele

Stanovení obsahu vzduchu

Obsah vzduchu v čerstvém betonu byl stanoven pomocí normy ČSN EN 12350 – 7. Obsah vzduchu byl měřen za účelem určení vlivu drátků na zvýšení obsahu vzduchu.

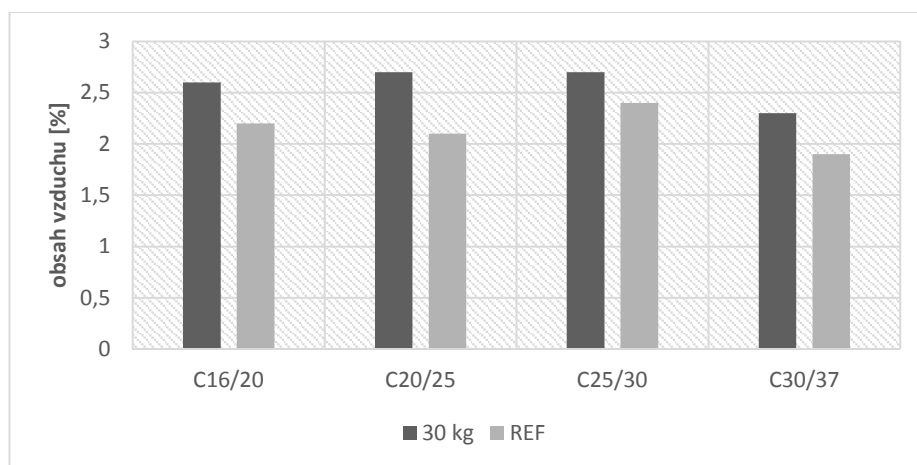
Přidáním 30 kg ocelových vláken dojde k nakypření směsi.

Nádoba byla naplněna ve třech vrstvách, každá vrstva se zhutnila. Víko se důkladně očistilo a připevnilo neprodyšně k nádobě svorkami. Hlavní ventil pro přívod vzduchu se uzavřel a boční ventily byly otevřeny. Nádoba byla naplněna vodou, dokud nevytékala z ventilu. Do vzduchové komory byl napumpován vzduch. Nastavila se ručička tlakoměru na počáteční hodnotu. Nyní byly naopak uzavřeny boční ventily a hlavní otevřen. Hodnota, která se objevila na tlakoměru, odpovídala objemu vzduchu obsaženému v čerstvé betonové směsi.

Obsah vzduchu byl měřen za účelem určení vlivu drátků na zvýšení obsahu vzduchu. Přidáním 30 kg ocelových vláken došlo k nakypření směsi, došlo ke zvýšení hodnoty obsahu vzduchu.

Tab. 14: Výsledky zkoušky obsahu vzduchu

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	obsah vzduchu [%]
C16/20	30	2,6
C16/20	REF	2,2
C20/25	30	2,7
C20/25	REF	2,1
C25/30	30	2,7
C25/30	REF	2,4
C30/37	30	2,3
C30/37	REF	1,9



Graf 7: Stanovení obsahu vzduchu

Přidáním 30 kg ocelových drátků, byla směs nakypřena. Hodnoty obsahu vzduchu u referenčních směsí se pohybovaly kolem 2,1 %, zato hodnoty u betonu s přidáním vláken tato hodnota byla kolem 2,6 %. Hodnoty obsahu vzduchu se oproti referenční směsi zvýšili u směsí s 30 kg drátků o přibližně o 20%.

8.3 Zkoušky ztvrdlého betonu

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušena dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Zkouška byla prováděna na zkušebních krychlích o rozměrech 150 mm. Těleso je zatěžováno na laboratorním zkušebním lise do té doby, než dojde k úplnému porušení zkušebního tělesa.

Tab. 15: Pevnost betonu v tlaku

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	objemová hmotnost [kg/m ³]	průměrná pevnost betonu v tlaku [MPa]	charakteristická pevnost betonu v tlaku [MPa]	směrodatná odchylka [MPa]	variační koeficient [%]
C16/20	30	2272	40,4	39,7	0,27	0,67
	REF	2251	41,0	39,7	0,51	1,24
C20/25	30	2288	47,9	47,4	0,17	0,36
	REF	2258	46,2	45,8	0,17	0,36
C25/30	30	2318	46,4	43,2	1,17	2,52
	REF	2293	46,1	45,8	0,46	0,25
C30/37	30	2330	57,6	56,6	0,37	0,64
	REF	2296	58,9	57,4	0,55	0,93

Charakteristická hodnota (5 % kvantil) byla vypočítána za předpokladu normálního rozdělení zkoumané veličiny jako:

$$x_c = m_x \cdot (1 - k_n \cdot V_x)$$

kde

m_x pevnost betonu v tlaku

k_n součinitel pro stanovení 5 % kvantilu (pro tři zkušební tělesa 1,89)

V_x variační koeficient

Variační koeficient se vypočte jako:

$$V_x = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

kde

S_x směrodatná odchylka

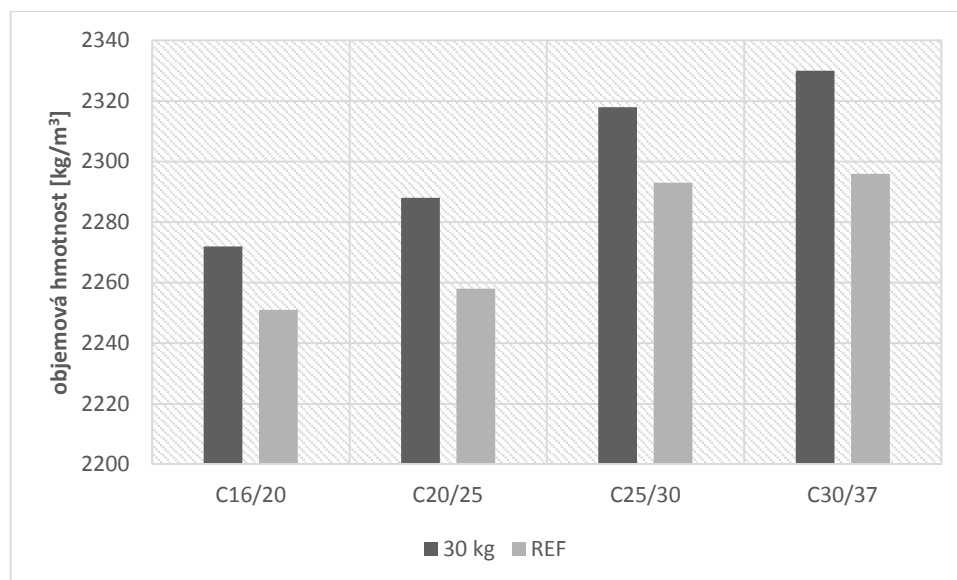
$\bar{x}$ průměr

Směrodatná odchylka se stanoví:

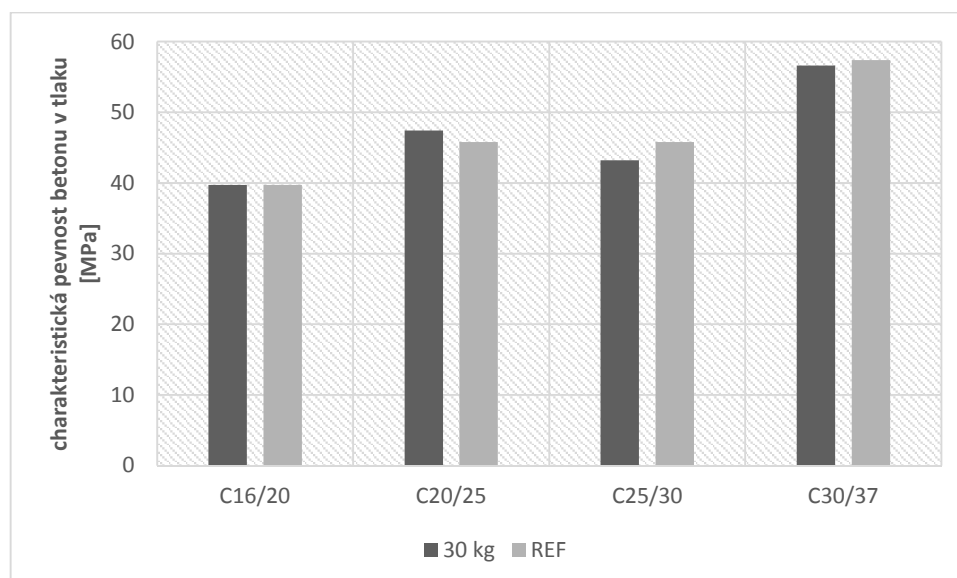
$$S_x = \sqrt{D(x)}$$

kde

D(x) rozptyl



Graf 8: Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlého betonu



Graf 9: Porovnání charakteristické pevnosti betonu v tlaku ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost se u betonu s příměsí drátků zvětší přibližně o 2 %. Největší rozdíl objemových hmotností je u betonu C16/20. Objemová hmotnost se u referenčních směsí pohybuje v rozmezí 2251 – 2296 kg/m³. Jedná se o obyčejný beton z hlediska objemové hmotnosti. Objemová hmotnost se u obyčejných betonů pohybuje v rozmezí od 2000 – 2600 kg/m³.

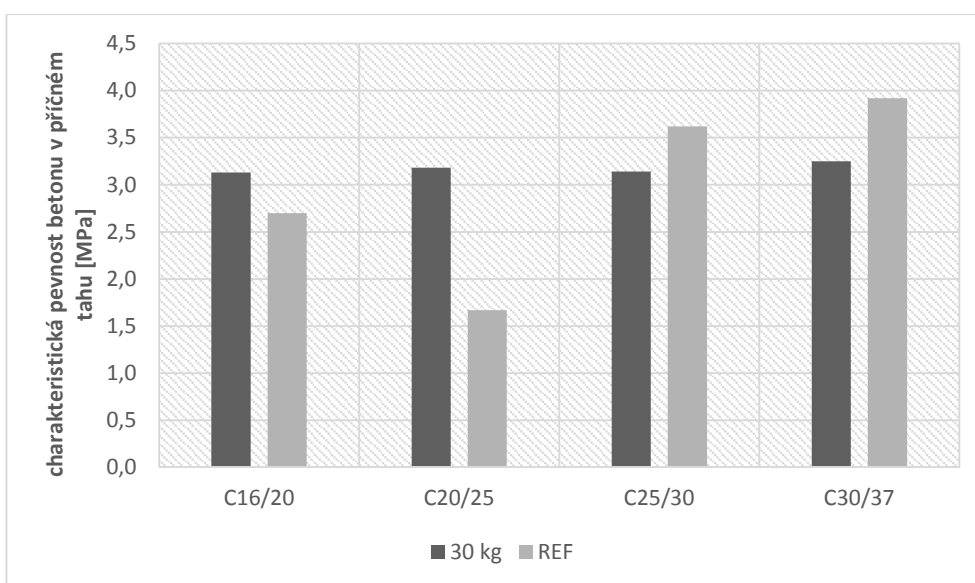
Pevnost v tlaku se zvyšuje s rostoucí pevností třídou. Již u betonu C16/20 můžeme vidět pevnost betonu v tlaku 39,7 MPa. Charakteristická pevnost v tlaku vyšla stejná u betonu C16/20 jak pro referenční směs, tak pro drátkobeton. U betonu C30/37 se pohybuje pevnost v tlaku v hodnotách kolem 57 MPa. Vliv na vysoké hodnoty pevnosti v tlaku může mít kvalitní nezvětralé kamenivo, ale také cement, který v množství větším než 200 kg/m³ pozitivně ovlivňuje pevnost betonu. Z hlediska pevnosti v tlaku je vyrobený drátkobeton velmi kvalitní a vhodný k použití do průmyslových podlah i v případě nižší pevnosti C16/20.

Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti v příčném tahu je provedena dle ČSN EN 12390 – 6. Zkouška byla provedena na krychlích o hraně 150 mm. Zkušební těleso při této zkoušce bylo vystaveno tlaku v úzkém pruhu po délce. Zkouška probíhala v laboratorním zkušebním lise, kdy těleso bylo umístěno doprostřed. Na těleso se osadily roznášecí proužky. Těleso bylo konstantně zatěžováno až do jeho porušení. V následující tabulce jsou uvedeny výsledky z měření pevnosti v příčném tahu.

Tab. 16: Pevnosti betonu v příčném tahu

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	průměrná pevnost betonu v příčném tahu [MPa]	charakteristická pevnost betonu v příčném tahu [MPa]	směrodatná odchylka [MPa]	variační koeficient [%]
C16/20	30	3,43	3,13	0,04	1,08
	REF	3,26	2,70	0,07	2,15
C20/25	30	3,40	3,18	0,03	0,80
	REF	2,93	1,67	0,17	5,37
C25/30	30	3,90	3,14	0,09	2,42
	REF	3,92	3,62	0,04	0,95
C30/37	30	4,08	3,25	0,10	2,52
	REF	4,41	3,92	0,06	1,38

**Graf 10:** Porovnání charakteristické pevnosti betonu v příčném tahu ztvrdlého betonu

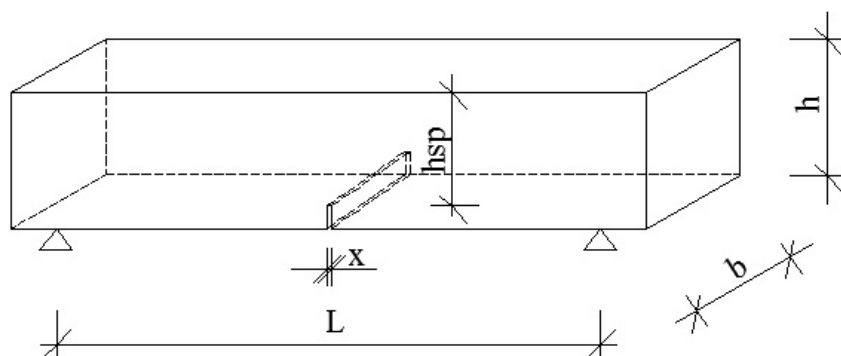
Pevnosti betonu v příčném tahu vycházejí u betonů C25/30 a C30/37 příznivěji pro referenční směsi. Naopak u betonů nižších pevností C16/20 a C20/25 je tato hodnota nižší. Přibližně se hodnoty od sebe lišily zhruba o 0,5 MPa. Hodnoty u betonu C30/37 jsou velmi příznivé, u referenční směsi se tato hodnota blíží k 4,0 MPa. U drátkobetonů vycházela přibližně stejná hodnota 3,2 MPa. U referenční směsi C20/25 můžeme vidět, že hodnota je výrazně snížena oproti ostatní hodnotám, důvodem této nízké hodnoty může být špatná míra zhutnění čerstvé směsi. Jinak jsou hodnoty vyrobených zkušebních těles příznivé.

Pevnost v tahu za ohybu

V experimentální části práce byla hlavní pozornost zaměřena na měření pevnosti v tahu za ohybu. Zkoušky byly prováděny dle normy ČSN EN 14651+A1. Zkouška třibodovým ohybem na tělese se zářezem. Byly využity zkušební trávce 100x100x400 mm. Zvolila jsem pro tuto zkoušku nenormované tělesa a to především za účelem statistických výsledků k ověření fyzikálně-mechanických vlastností, místo jednoho normovaného tělesa bylo možné provést měření na třech menších tělesech. Dalším důvodem byla také váha tělesa, protože zkoušky byly prováděny na více tělesech a manipulace s normovaným trávцем není tak jednoduchá.

Rozměry těles byly 100x100x400 mm. Počáteční zářezy byly vyřezány pilou s diamantovým kotoučem, hloubka počátečního zářezu byla asi do 1/3 výšky tělesa.

Vzorky po vytvoření zářezu byly změřeny posuvným měřítkem.



Obr. 33: *Jednotlivé měřené veličiny na zkušebním tělese*

Všechny zkoušky byly prováděny na laboratorním zkušebním mechanickém lisu HECKERT FPZ 100/1 s přesností 0,1 kN. Zkušební rozsah lisu byla nastaven na rozmezí 0 – 40 kN. Rychlost zatěžování byla po celou dobu konstantní až do momentu ukončení zkoušky.



Obr. 34: Zkušební mechanický lis

Pro zaznamenání průhybu byl využit tuhý ocelový rám, který byl ustaven na těleso. Hodnoty průhybu byly snímány kalibrovaným indukčním snímačem dráhy HBM s měřícím rozsahem do 100 mm a citlivostí 0,001 mm. Hodnoty, které byly zaznamenány snímačem, byly měřeny nad podporou. Naměřená hodnota byla dvojnásobná, proto v zaznamenaných datech bylo nutné, tuto hodnotu vydělit dvěma.



Obr. 35: Ocelový měřicí rám a snímač průhyb

Rozevření trhliny bylo měřeno cejchovaným snímačem dráhy typu „spona“ s přesností 0,01 mm. Na trámce byly pomocí dvousložkového lepidla nalepeny úhelníky. Mezi ně pak byl umístěn snímač, který zaznamenával hodnoty rozevření trhliny (CMOD-crack mouth opening displacement).



Obr. 36: Snímač měření rozevření trhliny

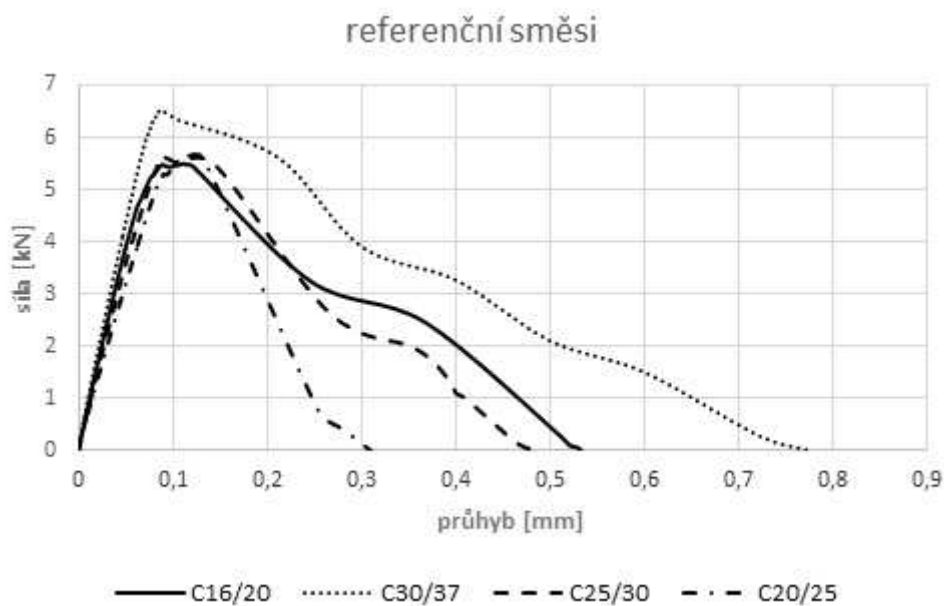
Digitální výstupy síly, průhybu a CMOD byly synchronizovány pomocí měřicí ústředny HBM Spider8 a software Catman Easy 2.1. Data byla ukládána do souboru MS Excel. Soubor obsahoval přibližně 20 000 řádků. V souboru jsou zaznamenány tyto hodnoty: čas, síla, průhyb a CMOD. Doba trvání jedné zkoušky zkušebního trámce se pohybovala kolem 45 minut. Ustavení všech snímačů a rámu bylo třeba provádět s maximální přesností a pečlivostí.



Obr. 37: Ustavení snímačů a rámu ke zkoušení tříbodovým ohybem

C16/20, C20/25, C25/30, C30/37 – referenční směsi

Pevnost v tahu za ohybu, byla zkoušena i na referenčních směsích. Pro ty platilo, že při dosažení meze úměrnosti, limitní hodnoty pro zatížení, klesala hodnota zatížení až k 0. Po dosažení meze pevnosti betonu, již beton nepřenáší tahové namáhání. Průhyb se u referenčních směsí pohyboval v rozmezí 0,3 – 0,8 mm



Graf 11: Zatěžovací diagramy pro referenční směsi

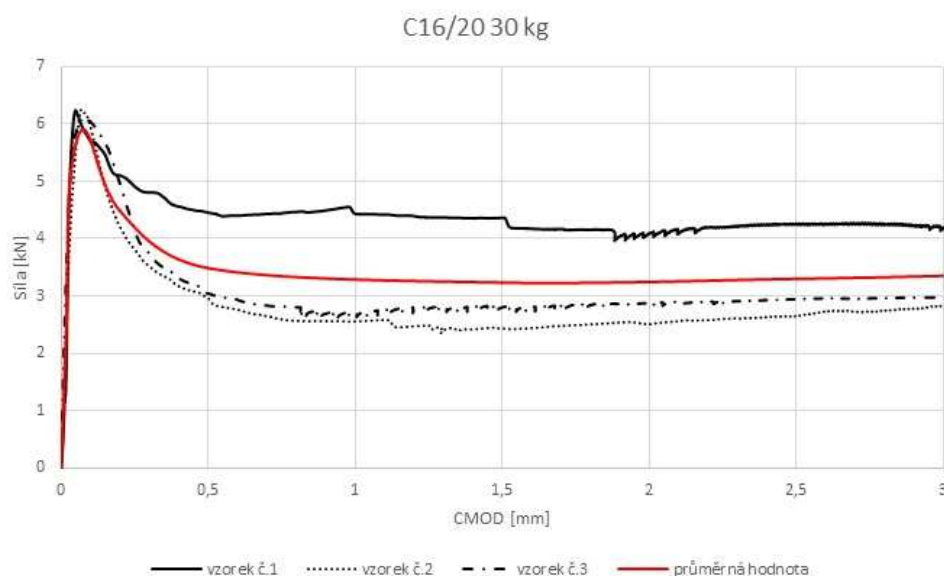
C 16/20 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N

Pro danou pevnost betonu byly využity vždy tři zkušební vzorky pro statistické výsledky. V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé naměřené hodnoty rozměrů tělesa, které jsou potřebné ke zjištění reziduálních pevností a mezi úměrnosti. Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu u vzorků C16/20 proběhlo v laboratoři VUT FAST dne 11.11.2015.

Tab. 17: Rozměry měřených vzorků C16/20

C16/20 + 30 kg	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3
šířka tělesa b [mm]	101,08	99,40	100,80
výška tělesa h [mm]	101,00	100,98	100,16
průměrná vzdálenost konce zářezu a horní hrany zkušebního tělesa hsp [mm]	68,06	68,56	67,50
šířka zářezu x [mm]	2,64	2,67	2,81
délka rozpětí L [mm]	300,00	300,00	300,00

Všechny hodnoty jsou vždy zaznamenány do grafu. Jsou v něm zaznamenány hodnoty tří vzorků, kterými je také proložena křivka, která udává průměrnou hodnotu. Tato křivka byla vytvořena pomocí 8 hodnot. Tyto hodnoty v bodech (0; 0,025; 0,05; 0,15; 0,5; 1,5; 2,5; 3) byly zprůměrovány a zaznamenány do grafu. Reziduální pevnost je obvykle odečítána také při rozevření trhliny 3,5 mm, ale vlivem špatného ustavení snímačů, nebylo možné tuto hodnotu odečíst, proto jsou všechny měření ukončeny při rozevření trhliny 3,0 mm.

**Graf 12:** Zatěžovací diagramy pro beton C16/20

Tab. 18: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C16/20

C16/20 + 30 kg	F_j [kN]				F_L [kN]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	Ø	č.1	č.2	č.3	Ø
0,05	6,2	5,5	5,8	5,8	6,2	5,5	5,8	5,8
0,5	4,4	2,9	3,0	3,4				
1,5	4,4	2,4	2,8	3,2				
2,5	4,2	2,7	2,9	3,3				

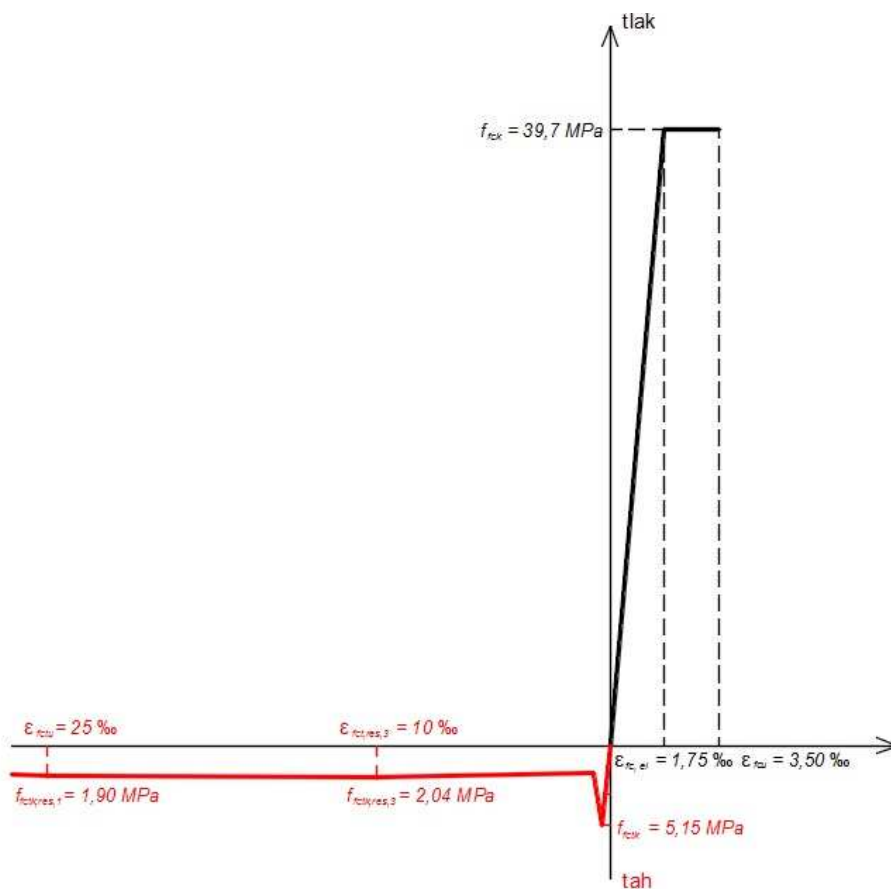
Tab. 19: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C16/20

C16/20 + 30 kg	$f_{ct,L}^f$ [MPa]				$f_{R,j}$ [MPa]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	Ø	č.1	č.2	č.3	Ø
0,05	6,0	5,3	5,7	5,7	-	-	-	-
0,5					4,2	2,7	2,9	3,3
1,5					4,2	2,2	2,7	3,0
2,5					4,0	2,5	2,8	3,1

Hodnoty F_L (zatížení na mezi úměrnosti) byly získány v bodě 0,05 na ose x, která zaznamenává CMOD. U betonu pevnosti C16/20 s přidáním 30 kg drátků dosahovalo zatížení při porušení hodnoty až 6,2 kN u vzorku č. 1. Reziduální pevnost dále mírně klesala, pořád se ale tato hodnota pohybovala kolem 3,1 kN u hodnoty CMOD 3 mm docházelo opět k mírnému stoupání, znovu se tedy aktivovala další ocelová vlákna, která přebírala tahovou pevnost. Z grafu je velmi dobře vidět, jak ocelová vlákna KrampeHarex velmi dobře přenáší účinky zatížení i po porušení trhlinou.

**Obr. 38:** Vzorky měřených trámů C16/20 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

Pracovní diagram C 16/20 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 39: Pracovní diagram C16/20 + 30kg drátků

Pro průměrné hodnoty vypočtené pro beton C16/20 + 30 kg drátků byl sestaven pracovní diagram. Nad osou x je znázorněna “černá oblast“, která zaznamenává tlak, pod osou je “červená oblast“, znázorňuje tah.

$$f_{ck} = 39,7 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk} = 5,15 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,res,3} = 2,04 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,res,1} = 1,90 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ctu} = 25 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{ct,res,3} = 10 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{ct,el} = 1,75 \text{ ‰}$$

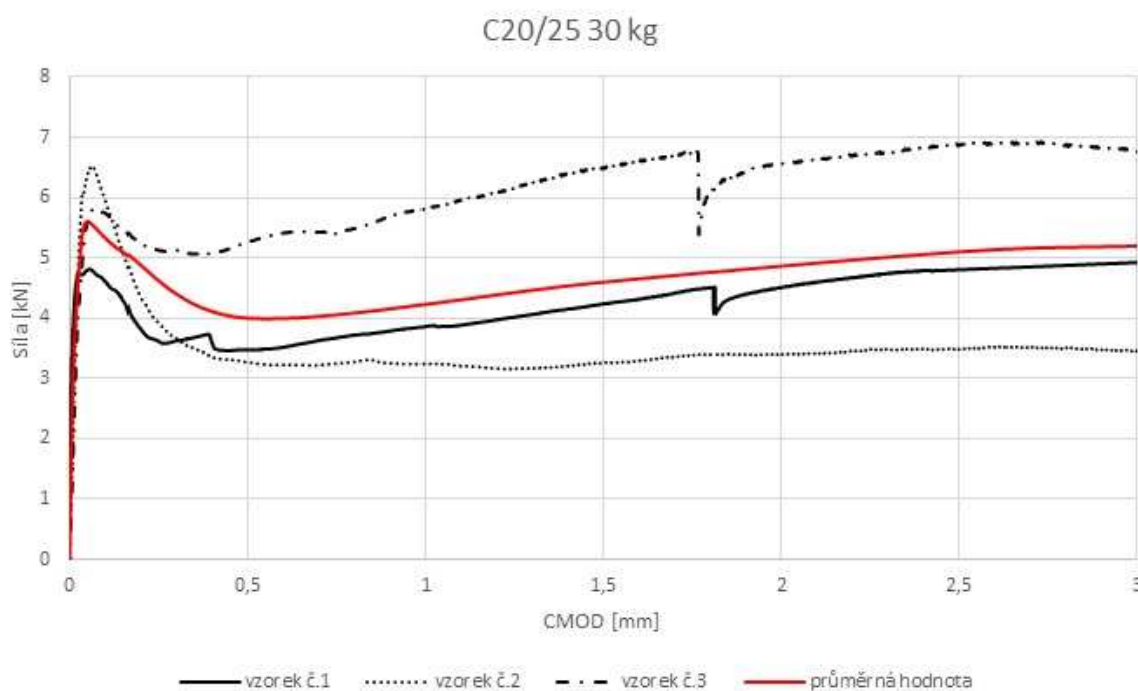
$$\varepsilon_{cu} = 3,50 \text{ ‰}$$

C 20/25 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé naměřené hodnoty rozměrů tělesa. Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu u vzorků C20/25 proběhlo v laboratoři VUT FAST dne 23.10.2015.

Tab. 20: Rozměry měřených vzorků C20/25

C20/25 + 30 kg	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3
šířka tělesa b [mm]	101,41	100,35	99,96
výška tělesa h [mm]	100,44	101,13	101,11
průměrná vzdálenost konce zářezu a horní hrany zkušebního tělesa hsp [mm]	68,38	68,63	69,13
šířka zářezu x [mm]	2,81	2,74	2,62
délka rozpětí L [mm]	300,00	300,00	300,00

**Graf 13:** Zatěžovací diagramy pro beton C20/25

Tab. 21: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C20/25

C20/25 + 30 kg	F_j [kN]				F_L [kN]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	Ø	č.1	č.2	č.3	Ø
0,05	4,8	6,3	5,6	5,6	4,8	6,3	5,6	5,6
0,5	3,5	3,3	5,3	4,0				
1,5	4,2	3,2	6,5	4,6				
2,5	4,9	3,5	6,9	5,1				

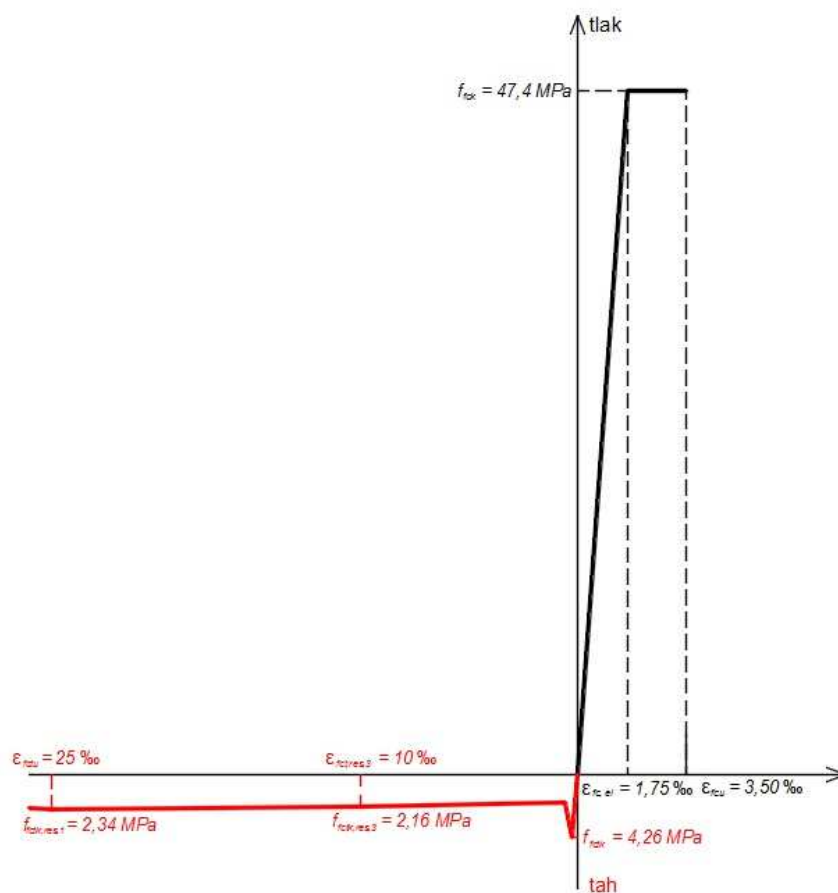
Tab. 22: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C20/25

C20/25 + 30 kg	$f_{ct,L}^f$ [MPa]				$f_{R,j}$ [MPa]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	Ø	č.1	č.2	č.3	Ø
0,05	4,6	6,0	5,3	5,3	-	-	-	-
0,5					3,3	3,0	5,0	3,8
1,5					4,0	2,9	6,1	4,3
2,5					4,7	3,3	6,5	4,8

U vzorku č. 3 betonu pevnosti C20/25 s přidáním 30 kg vláken je vidět, že reziduální zatížení je větší jen zatížení při porušení. I po vzniku trhliny nedochází k porušení, ale aktivována jsou ocelová vlákna, která jsou tažena. Reziduální zatížení dosahuje hodnoty až 6,9 kN. Průměrná reziduální pevnost se pohybovala kolem 4 kN, u hodnoty CMOD 3 mm docházelo opět k mírnému stoupání, znovu byla aktivována další ocelová vlákna, která přebírala tahovou pevnost. Ve srovnání s betonem C16/20 je pevnost při porušení o přibližně 7 % menší, oproti tomu je zde vyšší reziduální pevnost, průměrně je tato hodnota větší o 1 MPa.

**Obr. 40:** Vzorky měřených trámek C20/25 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

Pracovní diagram C 20/25 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 41: Pracovní diagram C20/25 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

$$f_{fck} = 47,4 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk} = 4,26 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk,res3} = 2,16 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk,res1} = 2,34 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fctu} = 25 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{fct,res,3} = 10 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{fc,el} = 1,75 \text{ ‰}$$

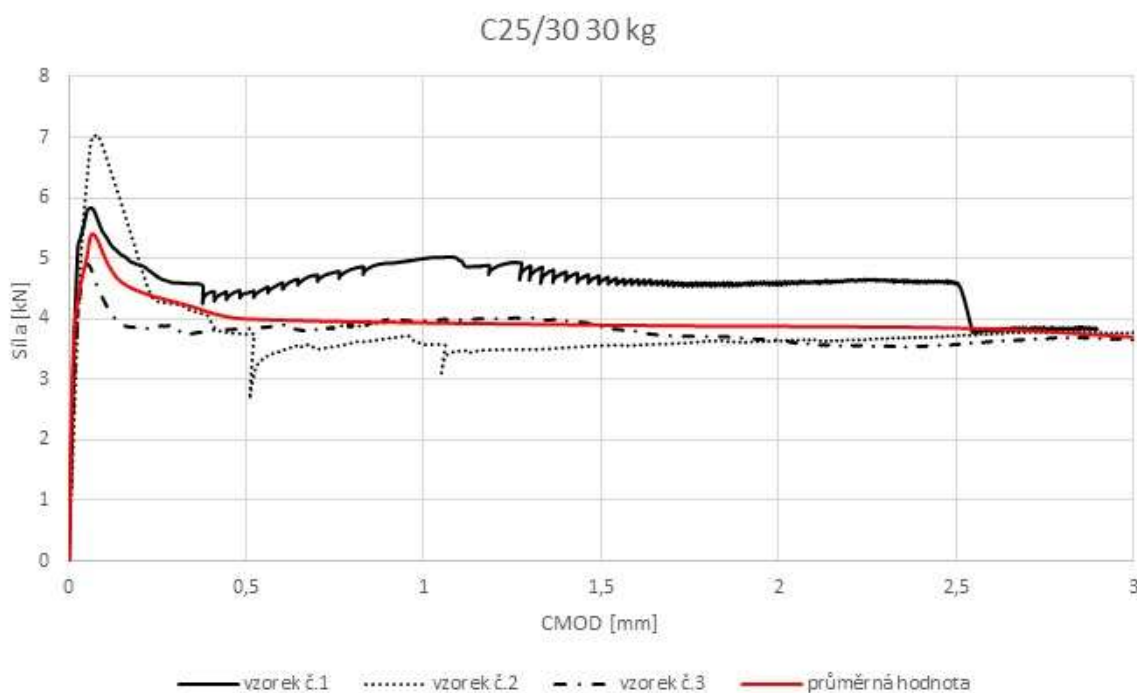
$$\varepsilon_{fctu} = 3,50 \text{ ‰}$$

C 25/30 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé naměřené hodnoty rozměrů tělesa. Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu u vzorků C25/30 proběhlo v laboratoři VUT FAST dne 26.10.2015

Tab. 23: Rozměry měřených vzorků C25/30

C25/30 + 30 kg	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3
šířka tělesa b [mm]	100,21	99,98	100,10
výška tělesa h [mm]	100,13	101,12	100,11
průměrná vzdálenost konce zářezu a horní hrany zkušebního tělesa hsp [mm]	67,90	68,85	67,56
šířka zářezu x [mm]	2,91	2,83	2,88
délka rozpětí L [mm]	300,00	300,00	300,00

**Graf 14:** Zatěžovací diagramy pro beton C25/30

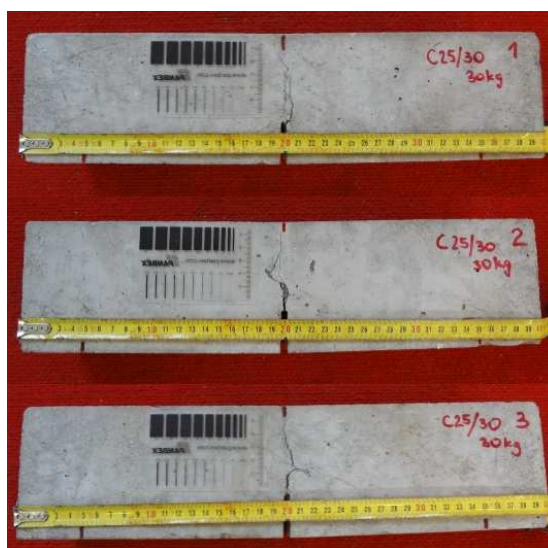
Tab. 24: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C25/30

C25/30 + 30 kg	F_j [kN]				F_L [kN]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	$\emptyset$	č.1	č.2	č.3	$\emptyset$
0,05	5,8	6,3	4,9	5,7	5,8	6,3	4,9	5,7
0,5	4,4	3,3	3,8	3,8				
1,5	4,6	3,2	3,9	3,9				
2,5	4,5	3,5	3,6	3,9				

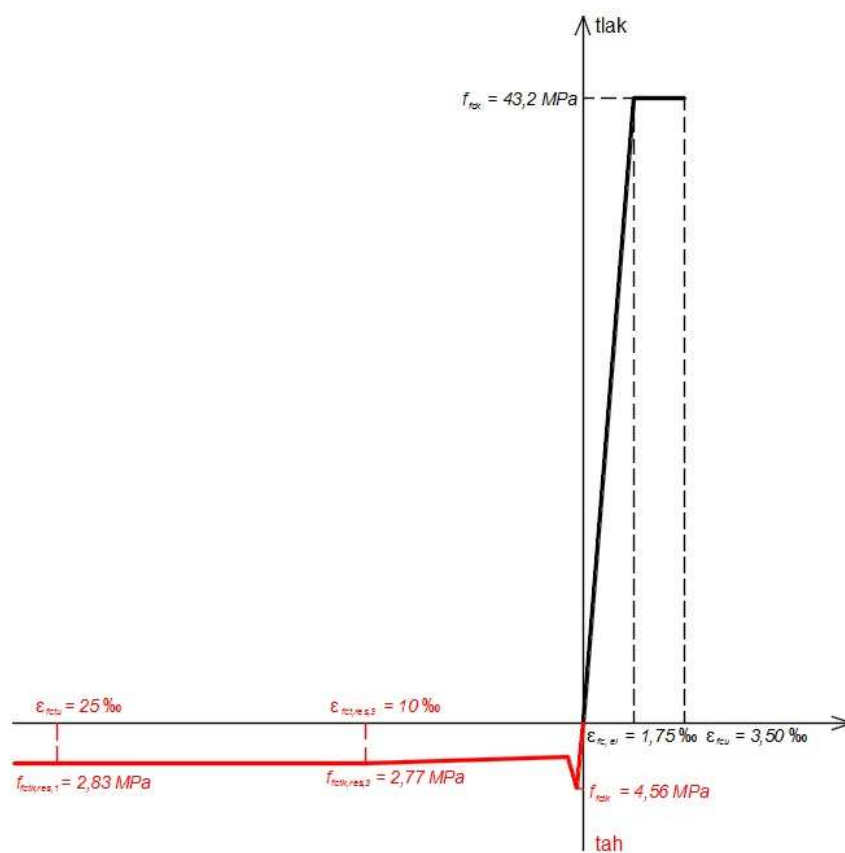
Tab. 25: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C25/30

C25/30 + 30 kg	$f_{ct,L}^f$ [MPa]				$f_{R,j}$ [MPa]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	$\emptyset$	č.1	č.2	č.3	$\emptyset$
0,05	5,6	6,0	4,8	5,5	-	-	-	-
0,5					4,3	3,1	3,7	3,7
1,5					4,5	3,0	3,8	3,8
2,5					4,4	3,3	3,5	3,7

Pro beton C25/30 + 30 kg vláken KrampeHarex DE 50/1,0 N byla mez úměrnosti v průměru naměřena 5,5 MPa. Hodnota reziduálního zatížení se ustálila v rozmezí 2,5 – 3,0 mm CMOD na hodnotě 4 kN. Průměrná reziduální pevnost byla o 13 % nižší než u betonu pevnosti C20/25, možná příčina tohoto snížení je nerovnoměrné rozprostření drátků při výrobě těles, což je také jeden z hlavních problémů při výrobě ve stavební praxi.


Obr. 42: Vzorky měřených trámek C25/30 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

Pracovní diagram C 25/30 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 43: Pracovní diagram C25/30 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

$$f_{fck} = 43,2 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk} = 4,26 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk, res3} = 2,77 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk, res1} = 2,83 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fctu} = 25 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{fct, res, 3} = 10 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{fc, el} = 1,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{fcu} = 3,50 \text{ ‰}$$

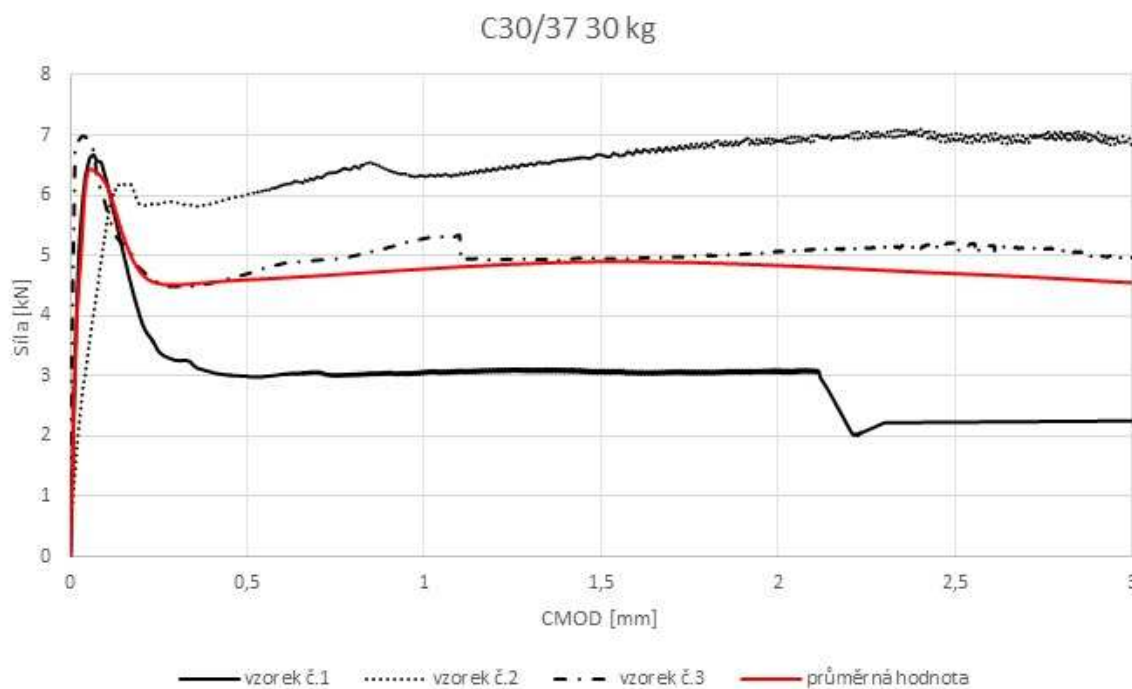
C 30/37 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé naměřené hodnoty rozměrů tělesa. Zkoušení pevnosti v tahu za ohybu u vzorků C25/30 proběhlo v laboratoři VUT FAST dne 4.11.2015

Tab. 26: Rozměry měřených vzorků C30/37

C30/37 + 30 kg	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3
šířka tělesa b [mm]	99,10	100,12	99,12
výška tělesa h [mm]	100,91	100,11	100,46
průměrná vzdálenost konce zářezu a horní hrany zkušebního tělesa hsp [mm]	67,98	67,71	68,03
šířka zářezu x [mm]	2,89	2,81	2,77
délka rozpětí L [mm]	300,00	300,00	300,00

Tab. : Rozměry měřených vzorků C30/37

**Graf 15:** Zatěžovací diagramy pro beton C30/37

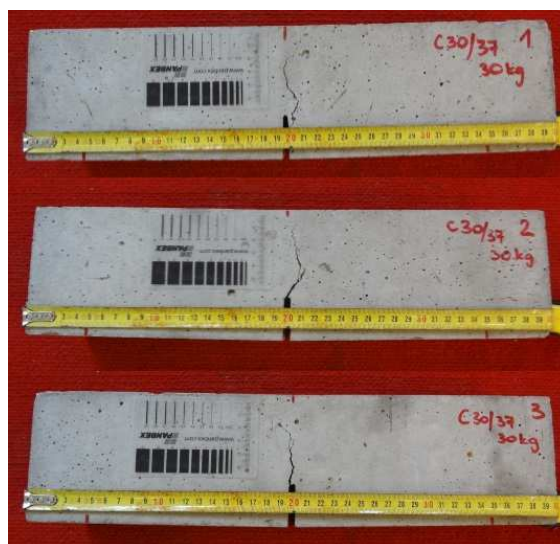
Tab. 27: Naměřené hodnoty zatížení vzorků C30/37

C30/37 + 30 kg	F_j [kN]				F_L [kN]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	Ø	č.1	č.2	č.3	Ø
0,05	6,5	5,8	6,9	6,4	6,5	5,7	6,8	6,4
0,5	3,0	6,0	4,7	4,6				
1,5	3,0	6,6	5,0	4,9				
2,5	2,2	6,9	5,1	4,7				

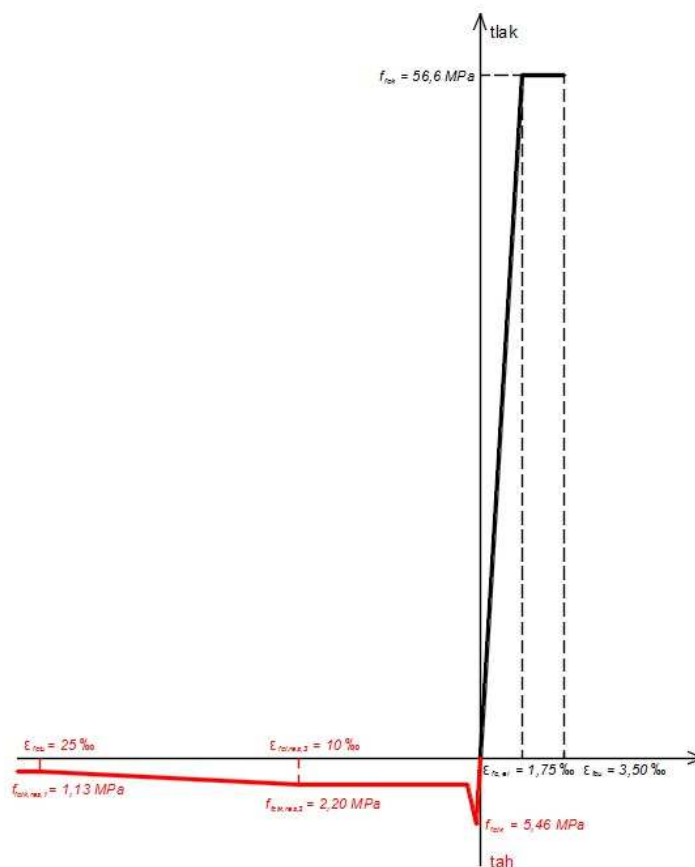
Tab. 28: Vypočtené hodnoty pevnosti vzorků C30/37

C30/37 + 30 kg	$f_{ct,L}^f$ [MPa]				$f_{R,j}$ [MPa]			
CMOD [mm]	č.1	č.2	č.3	Ø	č.1	č.2	č.3	Ø
0,05	6,3	5,7	6,8	6,3	-	-	-	-
0,5					2,9	5,9	4,6	4,5
1,5					2,9	6,5	4,9	4,8
2,5					2,2	6,8	5,0	4,7

Poslední měřené vzorky byly vzorky betonu C30/37 + 30 kg vláken. Pevnosti této drátkobetonové směsi byly nejvyšší. Průměrná hodnota pevnosti na mezi úměrnosti byla 6,3 MPa. Reziduální pevnost se liší u všech vzorků. U vzorku č. 2 je tato pevnost výrazně vyšší, zato vzorek č. 3 se rovná přibližně průměrné hodnotě.


Obr. 44: Vzorky měřených trámů C30/37 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

Pracovní diagram C 30/37 + 30 kg drátků KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 45: Pracovní diagram C30/37 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N

$$f_{fck} = 56,6 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk} = 5,46 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk, res3} = 2,20 \text{ MPa}$$

$$f_{fctk, res1} = 1,13 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{fctu} = 25 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{fct, res, 3} = 10 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{fc, el} = 1,75 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{fcu} = 3,50 \text{ ‰}$$

V následujících tabulkách jsou provedeny výpočty charakteristických hodnot pro pevnost v tahu za ohybu. Vypočítány byly hodnoty pro pevnost betonu na mezi úměrnosti a reziduální pevnosti.

Tab. 29: Výpočet charakteristické pevnosti betonu v tahu za ohybu

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	průměrná pevnost betonu v tahu za ohybu [MPa]	charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu [MPa]	směrodatná odchylka [MPa]	variační koeficient [%]
C16/20	30	5,71	5,15	0,29	5,09
C20/25	30	5,34	4,26	0,57	10,75
C25/30	30	5,50	4,56	0,50	9,09
C30/37	30	6,31	5,46	0,45	7,14

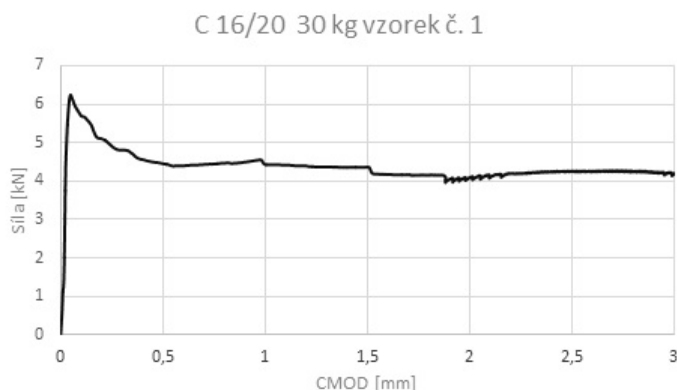
Tab. 30: Výpočet reziduální charakteristické pevnosti betonu v tahu za ohybu

Třída betonu	CMOD [mm]	průměrná reziduální pevnost betonu v tahu za ohybu [MPa]	charakteristická reziduální pevnost betonu v tahu za ohybu [MPa]	směrodatná odchylka [MPa]	variační koeficient [%]
C16/20	0,5	3,31	2,04	0,67	20,24
	1,5	3,04	1,43	0,85	27,96
	2,5	3,12	1,90	0,65	20,77
C20/25	0,5	3,83	2,16	0,88	23,01
	1,5	4,30	1,80	1,33	30,88
	2,5	4,82	2,34	1,31	27,18
C25/30	0,5	3,70	2,77	0,49	13,24
	1,5	3,81	2,65	0,61	16,11
	2,5	3,74	2,83	0,48	12,82
C30/37	0,5	4,52	2,20	1,23	27,19
	1,5	4,81	2,02	1,47	30,63
	2,5	4,71	1,13	1,89	40,19

Charakteristické hodnoty pro pevnost v tahu za ohybu se lišily od průměrné pevnosti přibližně o 1 MPa. U reziduálních hodnot tato odlišnost byla větší od 1 MPa do 3 MPa. Příčinou je velký rozptyl reziduálních hodnot, který je způsoben zkoušením pevnosti pouze na třech zkušebních tělesech. Proto by lepší prokazovat pevnosti drátkobetonu na více tělesech.

Závislost mezi CMOD a δ

V rámci diplomové práce jsem se také zaměřila na porovnání závislosti mezi rozevřením trhliny a průhybem dle normy ČSN EN 14651 + A1. Tato závislost je uvedena v **tab. 9**. Tím, že ve své diplomové práci věnuji zkouškám v tahu za ohybu na nenormovaných tělesech o rozměru 100x100x400 mm. Zajímalo mě, jestli tato závislost $\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04$ bude platit i pro zkušební tělesa menších rozměrů.



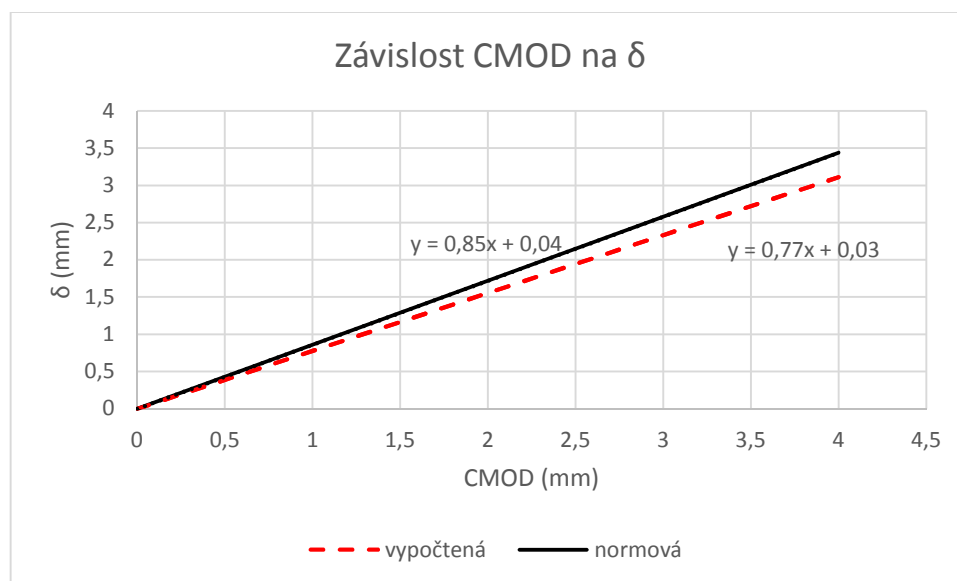
Graf 16: Vzorek č.1 C 16/20 30 kg, závislost F na CMOD

Při zatěžování byly zaznamenávány hodnoty průhybu a CMOD, proto bylo možné získat závislost mezi těmito veličinami. Zjištěním jednotlivých statistických údajů ze všech měření, jsem pomocí lineární závislosti, která mezi těmito veličinami platí, získala novou závislost, která by platila pro tělesa menších rozměrů 100x100x400 mm. Bylo provedeno měření na 12 vzorcích. Nová závislost vyšla: $\delta = 0,77 \text{ CMOD} + 0,03$

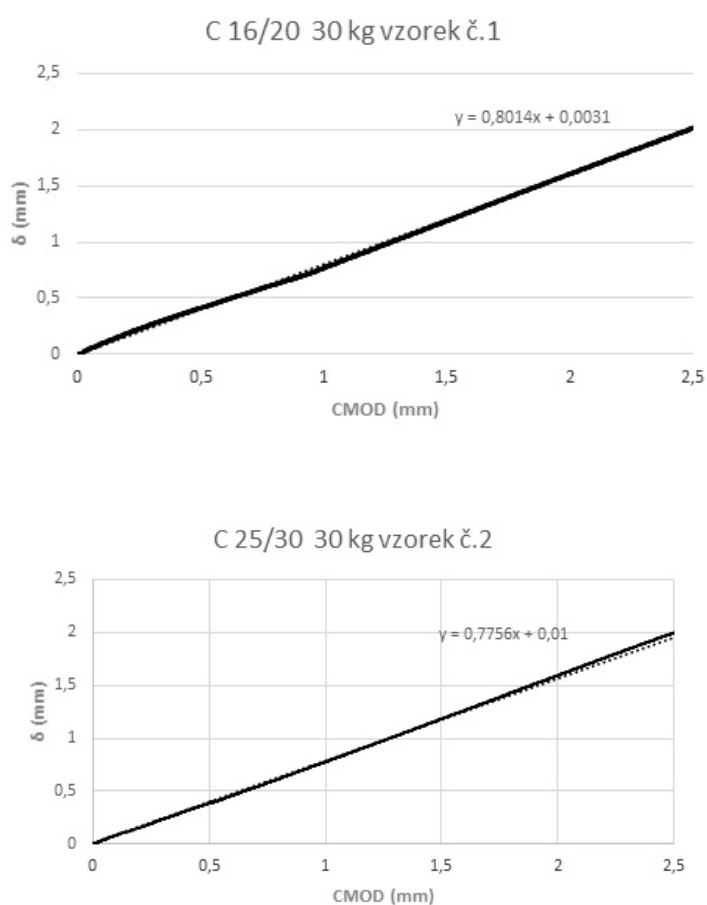
Pro ověření přesně této závislosti by bylo třeba provést více měření na zkušebních tělesech, která by toto tvrzení ještě více upřesnily.

CMOD [mm]	δ [mm]	δ_n [mm]
0,05	0,08	0,07
0,10	0,13	0,11
0,20	0,21	0,18
0,50	0,47	0,42
1,50	1,32	1,19
2,50	2,17	1,96
3,50	3,02	2,73
4,00	3,44	3,11

Tab. 31: Upravený vztah mezi CMOD a δ



Graf 17: Závislost CMOD a δ



Graf 18: Závislosti CMOD na průhybu, které byly využity pro statistiku

9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo ověření fyzikálně – mechanických vlastností kompozitního materiálu. V teoretické části je především shrnuta obecná teorie o kompozitních materiálech, největší pozornost je věnována drátkobetonům, které jsou dále zkoušeny v rámci praktické části.

Mechanické vlastnosti kompozitního materiálu byly ověřovány v experimentální části. Vyhodnoceny byly jak zkoušky čerstvého, tak i ztvrdlého betonu. Zkoušky čerstvého betonu byly prováděny kvůli zjištění konzistence a čerpatelnosti drátkobetonové směsi. U zkoušek ztvrdlého betonu byla ověřována pevnost v tlaku a tahu. Největší pozornost byla věnována ověření pevnosti v tahu za ohybu. Porovnávány byly betony s různými pevnostmi (jednalo se o třídy pevnosti C16/20, C 20/25, C25/30, C30/37). Byla zkoušena jak referenční směs, tak beton, ve kterém byla stejná příměs drátku a to 30 kg/m^3 ocelových vláken KrampeHarex. Různé pevnosti betonu se stejnou příměsí vláken, byly ověřovány kvůli zjištění pevnostních charakteristik a následně byly výsledky porovnány. Výstupem porovnání pevnosti bylo zjistit, zda je možné nahradit kvalitnější beton za beton nižší třídy s dodržením srovnatelných pevností.

Nejprve byly vyhodnoceny výsledky zkoušek čerstvého betonu. Výsledky sednutí a rozlití kužele vycházely ve třídě S4 a F4, jedná se tedy o směs tekutou. Obsah vzduchu v čerstvé směsi byl u drátkobetonu přibližně o 20 % vyšší než u obyčejných betonů. U směsi s přídavkem vláken docházelo k nakypření směsi.

Pevnostní zkoušky betonu v tlaku pro všechny betony vycházely velmi příznivě. Charakteristická pevnost betonu v tlaku se pohybovala od 39,7 MPa do 57,4 MPa. Vyšší pevnost může být ovlivněna kvalitním nezvětralým kamenivem, či vyšším množstvím použitého cementu. Pevnost betonu v příčném tahu vycházela kolem 3 – 4,5 MPa. Z hlediska ohybových zkoušek drátkobetonu byla využita jedna z možných metod zkoušení pomocí tříbodového ohybu. Při porovnání výsledků v tahu za ohybu je patrné, že nejlepších vlastností dosahuje beton třídy C30/37. Při srovnání s betonem C20/25 je jeho průměrná pevnost při vytvoření první trhliny vyšší o 19 %, u reziduální pevnosti dokonce vyšší jen o 9 %. U výsledků charakteristických pevností je rozdíl mezi betonem C16/20 a C30/37 pouze o 0,3 MPa. Znamená to, že z ekonomického hlediska, které je v dnešní době významným faktorem, je možné například do drátkobetoných průmyslových podlah využít beton s nižší pevností s přídavkem 30 kg/m^3 a bude zaručeno velmi dobrých fyzikálně – mechanických

vlastností. V případě výpočtu charakteristických reziduálních pevností docházelo k významnému podhodnocení výsledku, příčinou byl výrazný rozptyl hodnot, což bylo způsobeno měřením pouze na třech zkušebních tělesech. Proto by bylo vhodné pro přesnější výsledek, zvýšit počet zkušebních těles.

Zkoušením drátkobetonu v tahu za ohybu, bylo možné také ověřit závislost mezi průhybem a rozevřením trhliny. Tato závislost je uvedena v normě pro zkušební trámce o rozměrech 150x150x700 mm. Ze statistických údajů pro menší trámce, které jsem v rámci práce zkoušela, bylo možné tuto závislost odečíst z grafů v MS Excel. Nová závislost byla stanovena pro zkušební tělesa 100x100x400 mm jako $0,77 \text{ CMOD} + 0,03$.

Hlavní problematikou drátkobetonů je stále neucelená metodika jak návrhu směsi, tak jejich výroby a zkoušení. Kdybych se měla zaměřit především na problematiku průmyslových podlah. Významným problémem je, že nejsou ověřovány zkoušky čerstvé směsi. Zkoušky jsou prováděny na hotové konstrukci až po 28 dnech, což není zrovna příznivé z hlediska zaručení pevnosti. Takto prováděné zkoušení může mít nedozírné následky především z finančního hlediska. Řešením by bylo zajištění zkoušení již čerstvé směsi. Bylo by možné zaručit kvalitu dodávané směsi ještě před samotnou pokládkou.

10 Seznam použité literatury

- [1] Doc. Ing. JIŘÍ KRÁTKÝ, CSc. Doc. Ing. Karel Trtík, CSc. Ing. Jan Vodička CSc., *Drátkobetonové konstrukce.* : Praha: ČKAIT 1999
- [2] JM BARTOŠ, Peter. Betonové konstrukce 21. století – betony s přidanou hodnotou. Praha: Česká betonářská společnost. s.069 – 077. ISSN 1213 – 3116
- [3] VODIČKA, Jan, Vladimír VESELÝ a Jiří KRÁTKÝ. Specifika z technologie vláknobetonu. In: Beton? Technologie, konstrukce a sanace. Praha: Česká betonářská společnost. s. 38 – 42. ISSN 1213 – 3116.
- [4] VESELÝ, Vladimír, Jan VODIČKA, Jitka VAŠKOVÁ a Jiří KRÁTKÝ. Tests of struktural fibre concrete. In: Beton: Technologie, konstrukce a sanace. Praha: Česká betonářská společnost. s. 43 – 47. ISSN 1213 – 3116
- [5] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Jitka VAŠKOVÁ. Navrhování konstrukčních prvků z vláknobetonů. In: Beton: Technologie, konstrukce a sanace. Praha: Česká betonářská společnost. s. 87 – 89. ISSN 1213 - 3116
- [6] VAŠKOVÁ, Jitka. Experimental verifying of fibre concrete elements behaviour. In: Beton: Technologie, konstrukce a sanace. Praha: Česká betonářská společnost. s. 74 - 78
- [7] TP FC 1-1: Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1: Zkoušení vláknobetonu – vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí. Praha: Českomoravský beton, a.s. 2007. 34 s.
- [8] ČSN EN 14651 + A1: Česká technická norma: Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost). Praha: Český normalizační institut. 2008. 16 s.
- [9] VESELÝ, Vladimír, Jan VODIČKA, Jitka VAŠKOVÁ a Jiří KRÁTKÝ. Tests of struktural fibre concrete. In: Beton: Technologie, konstrukce a sanace. Praha: Česká betonářská společnost. s. 43 – 47. ISSN 1213 – 3116
- [10] LÁNÍK, J, Vliv rozptýlené výztuže na fyzikálně-mechanické parametry výsledného kompozitu. Disertační práce. Brno. 2014.
- [11] BAREŠ, R. Kompozitní materiály. SNLT, Praha. 325 s.
- [12] BODNÁROVÁ, L. Kompozitní materiály. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2007. 204 s.

- [13] KRATOCHVÍL B., ŠVORČÍK V., VOJTĚCH D. Úvod do studia materiálů 1. Praha. 2005. 190 s.
- [14] ČESKOMORAVSKÝ BETON, Příručka technologa – beton – suroviny, výroba, vlastnosti. 2010. 265 s.
- [15] ŽALSKÝ, P. Průmyslové betonové podlahy. Praha. 2003. 87 s.

www odkazy:

- [16] Kompozitní materiály [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf. 14 s.
- [17] Kompozitní materiály ve stavebnictví [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>, 2013 Oldřich Rejl
- [18] Měření krípkových vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15871/vaňková_2011_dp.pdf?sequence=1,
- [19] Kompozitní materiály – definice a rozdělení [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [20] Vláknové kompozitní materiály – znovuobjevovaný typ materiálu? [citace 29.9.2015] Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/polacek>
- [21] Kompozitní materiály [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [22] Obrábění kompozitních materiálů [online] [cit 2015-10-3] Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15058/DP_kveten23.5_zaloha.pdf?sequence=1
- [23] Mechanika kompozitních materiálů – 1 [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>
- [24] Mechanické vlastnosti pultuzních profilů [online] [cit 2015-10-2] Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25117/hromada_2013_bp.pdf?sequence=1
- [25] Matrice [online] [cit 2015-10-10] Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [26] Cement [online] [cit 2015-10-15] Dostupné z: <http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Cement>
- [27] Stavební látky [online] [cit 2015-10-14] Dostupné z: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/AI01/beton1.pdf>

- [28] Vliv záměsové vody na hydrataci a mechanické vlastnosti cementových kompozitů [online] [cit 2015-10-19] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=99905
- [29] Diagnostika průmyslové podlahy z drátkobetonu. [online] [cit 2015-10-19] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=97611
- [30] Přísady do betonu, jejich funkce a rozdělení. [online] [cit 2015-10-18] Dostupné z: <http://media0.webgarden.name/.../11%20-%20Přísady%20do%20betonu%20-...>
- [31] Vliv druhu a dávky rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu. [online] [cit 2015-10-25] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=78985
- [32] Ocelová vlákna – Průmyslové podlahy. [online] [cit 2015-10-25] Dostupné z: <http://ds.arcelormittal.com/repo/fanny/Flooring-CZ.pdf>
- [33] Kovové vlákno. [online] [cit 2015-10-26] Dostupné z: http://www.mgvysociny.cz/vismo/rejstrik.asp?id_org=450032&rh=1567
- [34] Experimentální analýza betonových kompozitních materiálů při extrémním teplotním namáhání. [online] [cit 2015-10-30] Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52430/SladekM_Experimentalni%20analiza_A_S_2013.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [35] O vláknech. [online] [cit 2015-10-30] Dostupné z: http://www.krampeharex.com/cz/vlakna/o_vlaknech.htm
- [36] Kontrola množství drátků v betonové směsi na stavbách průmyslových podlah z drátkobetonu. [online] [cit 2015-11-20] Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/kontrola-mnozstvi-dratku-v-betonove-smesi-na-stavbach-prumyslovych-podlah-z-dratkobetonu_101475.html
- [37] Nové znění normy ČSN 74 4505 Podlahy – Společná ustanovení. [online] [cit 2015-12-5] Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/nove-zneni-normy-csn-74-4505-podlahy-spolecna-ustanoveni_N2000
- [38] Drátkobetonové desky. [online] [cit 2015-12-5] Dostupné z: <http://www.kkstav.cz/cz/nabidka-sluzeb/betonove-podlahy/dratkobetonove-desky>
- [39] Polypropylénová vlákna [online] [cit 2015-12-10] Dostupné z: <http://www.mirra.cz/cs/polypropylenova-vlakna--96.html>
- [40] Skleněná vlákna – historie a současnost [online] [cit 2015-12-10] Dostupné z: <http://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/sklenena-vlakna-historie-soucasnost2975>

Použité normy

ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Zkouška sednutím*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Svaz výrobců betonu ČR, 2001.

ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Svaz výrobců betonu ČR, 2010.

ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 1097-5. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*. Svaz výrobců betonu ČR, 1999.

ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Svaz výrobců betonu ČR, 2001.

ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Svaz výrobců betonu ČR, 2012.

ČSN EN 933-4. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení tvaru zrn - Tvarový index*. Svaz výrobců betonu ČR, 2008.

ČSN EN 206 - 1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ČNI, 2001.

11 Seznam zkratk a symbolů

A_c	průřezová plocha betonu
CEM	cement
$CMOD$	hodnota rozevření trhliny z anglického Crack Mouth Opening Displacement
C_3S	trikalciumsilikát
C_2S	dikalciumsilikát
C_4AF	tetrakalciumaluminát
C_3A	trikalciumaluminát
DTK	drobné těžené kamenivo
DE	typ vlákna
$D(x)$	rozptyl
$F4$	označení rozlití čerstvého betonu z anglického Flowtest
F	síla
FC	vláknobeton z anglického Fibre Concrete
F_L	zatížení odpovídající mezi úměrnosti
F_j	zatížení odpovídající $CMOD = CMOD_j$ nebo $\delta = \delta_j$
HDK	hrubé drcené kamenivo
JMS	jemně mletý slínek
L	délka zkoušeného vzorku
N	materiál vlákna
REF	referenční těleso
$S_{(x)}$	směrodatná odchylka
$S4$	označení sednutí kužele čerstvého betonu
V_x	variační koeficient
b	šířka zkoušeného vzorku
c	hmotnost cementu v čerstvém betonu
f_c	pevnost betonu v tlaku
f_{ct}	pevnost betonu v příčném tahu
f_{fck}	charakteristická pevnost vláknobetonu v tlaku
f_{fctk}	pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu při vzniku první trhliny
$f_{fctk,eq}$	ekvivalentní pevnost v dostředném tahu

$f_{fctk, res, u}$	reziduální charakteristická pevnost
$f_{ct,L}$	mez úměrnosti
$f_{R,j}$	zbytková pevnost v tahu za ohybu
h	výška zkoušeného vzorku
h_{sp}	průměrná vzdálenost konce zářezu a horní hrany zkušebního tělesa
m_x	pevnost betonu v tlaku
v	účinný obsah vody
x	šířka zářezu
x_c	charakteristická hodnota
$\bar{x}$	průměr
ε_{fctu}	mezní poměrné přetvoření
$\varepsilon_{fc,el}$	poměrné stlačení při kvaziplastickém chování
ε_{fcu}	mezní poměrné přetvoření v tlaku
ρ	objemová hmotnost
δ	průhyb

12 Seznam příloh

1 Pevnost betonu v tlaku

2 Pevnost betonu v příčném tahu

3 Naměřené veličiny pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu

4 Fotografie zkušebních těles

1 Pevnost betonu v tlaku

Tab. 1: Veličiny pro výpočet pevnosti v tlaku referenčních těles

Třída betonu		b [mm]	d [mm]	h [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	F [kN]	pevnost betonu v tlaku [MPa]
C16/20	REF	150,0	150,0	150,2	7625,0	2256,0	925,6	41,1
	REF	150,0	150,0	150,9	7630,0	2247,0	924,7	41,6
	REF	150,0	150,0	151,1	7651,0	2250,0	916,0	40,4
C20/25	REF	150,8	150,5	150,4	7670,0	2248,0	1048,7	46,2
	REF	150,2	150,5	150,3	7680,0	2262,0	1047,8	46,4
	REF	150,0	150,0	150,5	7670,0	2265,0	1038,7	46,0
C25/30	REF	150,5	150,3	150,1	7815,0	2302,0	1044,5	46,2
	REF	150,4	150,0	150,8	7742,0	2277,0	1044,5	46,1
	REF	150,6	150,0	151,2	7862,0	2301,0	1046,8	46,0
C30/37	REF	150,5	150,5	150,1	7825,0	2302,0	1342,1	59,4
	REF	150,6	150,0	151,3	7854,0	2298,0	1345,4	59,0
	REF	150,6	150,0	151,1	7808,0	2289,0	1321,8	58,1

Tab. 2: Veličiny pro výpočet pevnosti v tlaku těles s příměsí 30 kg vláken

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	b [mm]	d [mm]	h [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	F [kN]	pevnost betonu v tlaku [MPa]
C16/20	30	150,0	150,0	150,4	7717,0	2280,0	919,1	40,7
	30	150,0	150,5	150,2	7687,0	2268,0	912,3	40,5
	30	150,4	150,2	150,0	7683,0	2267,0	904,1	40,1
C20/25	30	150,0	149,9	150,5	7755,0	2291,0	1082,6	47,9
	30	150,8	150,1	150,1	7762,0	2285,0	1078,9	47,7
	30	150,5	150,1	150,1	7755,0	2288,0	1085,2	48,1
C25/30	30	150,2	150,1	151,1	7971,0	2340,0	1089,1	48,0
	30	150,3	150,5	150,7	7896,0	2318,0	1035,4	45,7
	30	150,5	150,3	151,5	7863,0	2295,0	1033,6	45,3
C30/37	30	150,6	150,1	150,2	7890,0	2326,0	1302,2	57,6
	30	150,3	150,2	150,2	7893,0	2330,0	1310,0	58,1
	30	150,3	150,0	151,6	7976,0	2334,0	1302,3	57,2

2 Pevnost betonu v příčném tahu

Tab. 3: Veličiny pro výpočet pevnosti v příčném tahu referenčních těles

Třída betonu		b [mm]	d [mm]	h [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	F [kN]	pevnost betonu v příčném tahu [MPa]
C16/20	REF	150,0	150,0	150,2	7625,0	2256,0	105,3	3,0
	REF	150,0	150,0	150,9	7630,0	2247,0	123,5	3,5
	REF	150,0	150,0	151,1	7651,0	2250,0	118,9	3,3
C20/25	REF	150,8	150,5	150,4	7670,0	2248,0	127,3	3,6
	REF	150,2	150,5	150,3	7680,0	2262,0	86,7	2,4
	REF	150,0	150,0	150,5	7670,0	2265,0	98,7	2,8
C25/30	REF	150,5	150,3	150,1	7815,0	2302,0	144,5	4,1
	REF	150,4	150,0	150,8	7742,0	2277,0	135,6	3,8
	REF	150,6	150,0	151,2	7862,0	2301,0	138,7	3,9
C30/37	REF	150,5	150,5	150,1	7825,0	2302,0	147,4	4,2
	REF	150,6	150,0	151,3	7854,0	2298,0	163,8	4,6
	REF	150,6	150,0	151,1	7808,0	2289,0	160,5	4,5

Tab. 4: Veličiny pro výpočet pevnosti v příčném tahu těles s příměsí 30 kg vláken

Třída betonu	drátky [kg/m ³]	b [mm]	d [mm]	h [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg/m ³]	F [kN]	pevnost betonu v příčném tahu [MPa]
C16/20	30	150,0	150,0	150,4	7717,0	2280,0	120,0	3,1
	30	150,0	150,5	150,2	7687,0	2268,0	126,9	3,6
	30	150,4	150,2	150,0	7683,0	2267,0	117,8	3,3
C20/25	30	150,0	149,9	150,5	7755,0	2291,0	124,6	3,5
	30	150,8	150,1	150,1	7762,0	2285,0	119,7	3,4
	30	150,5	150,1	150,1	7755,0	2288,0	117,8	3,3
C25/30	30	150,2	150,1	151,1	7971,0	2340,0	132,9	3,7
	30	150,3	150,5	150,7	7896,0	2318,0	152,8	4,3
	30	150,5	150,3	151,5	7863,0	2295,0	131,4	3,7
C30/37	30	150,6	150,1	150,2	7890,0	2326,0	160,1	4,5
	30	150,3	150,2	150,2	7893,0	2330,0	139,5	3,9
	30	150,3	150,0	151,6	7976,0	2334,0	135,8	3,8

3 Naměřené veličiny pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu

Tab. 5: Veličiny pro výpočet pevnosti tahu za ohybu C16/20 + 30 kg

C16/20 30 kg, XC1					
vzorek	d [mm]	b [mm]	h [mm]	hsp [mm]	x [mm]
1	399,80	101,08	101,00	68,06	2,64
2	400,04	99,40	100,98	68,56	2,67
3	400,61	100,80	100,16	67,50	2,81

Tab. 6: Veličiny pro výpočet pevnosti tahu za ohybu C20/25 + 30 kg

C20/25 30 kg, XC2					
vzorek	d [mm]	b [mm]	h [mm]	hsp [mm]	x [mm]
1	400,25	101,41	100,44	68,38	2,81
2	400,29	100,35	101,13	68,63	2,74
3	400,14	99,96	101,11	69,13	2,62

Tab. 7: Veličiny pro výpočet pevnosti tahu za ohybu C25/30 + 30 kg

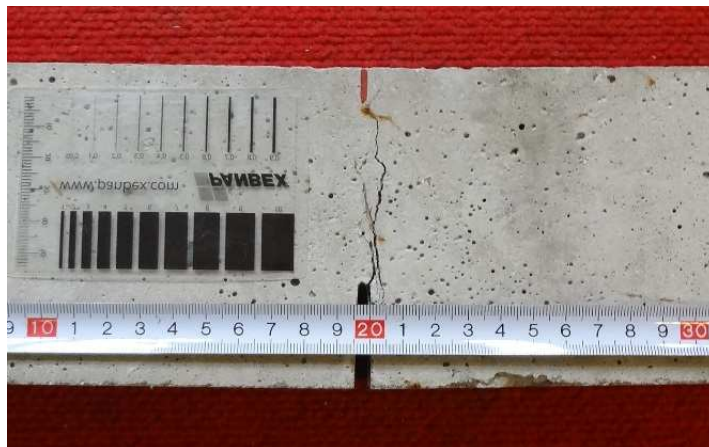
C25/30 30 kg, XC3					
vzorek	d [mm]	b [mm]	h [mm]	hsp [mm]	x [mm]
1	400,24	100,21	100,13	67,90	2,91
2	400,01	99,98	101,12	68,85	2,83
3	400,26	100,10	100,11	67,56	2,88

Tab. 8: Veličiny pro výpočet pevnosti tahu za ohybu C30/37 + 30 kg

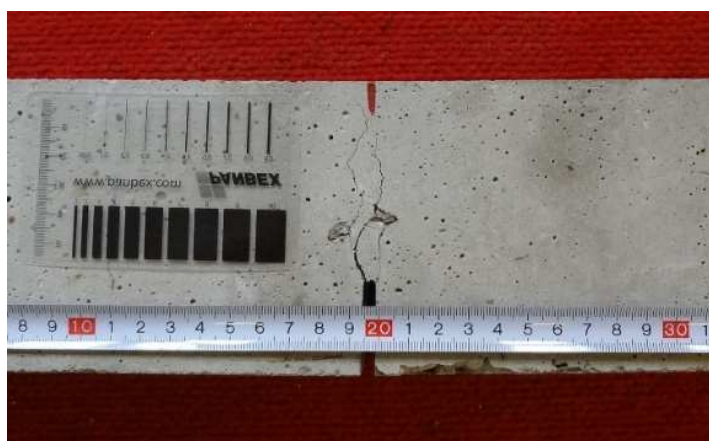
C30/37 30 kg, XC4					
vzorek	d [mm]	b [mm]	h [mm]	hsp [mm]	x [mm]
1	400,08	99,10	100,91	67,98	2,89
2	400,56	100,12	100,11	67,71	2,81
3	400,20	99,12	100,46	68,03	2,77

4 Fotografie zkušebních těles

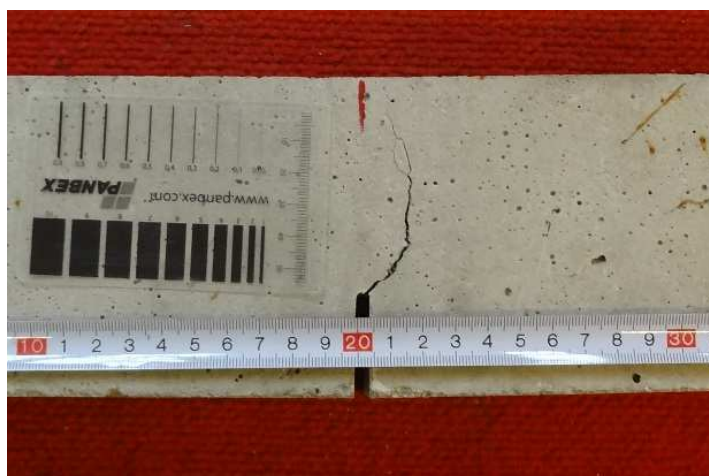
Vzorky C16/20 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 1: Vzorek č. 1



Obr. 2: Vzorek č. 2



Obr. 3: Vzorek č. 3

Vzorky C20/25 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 4: Vzorek č. 1

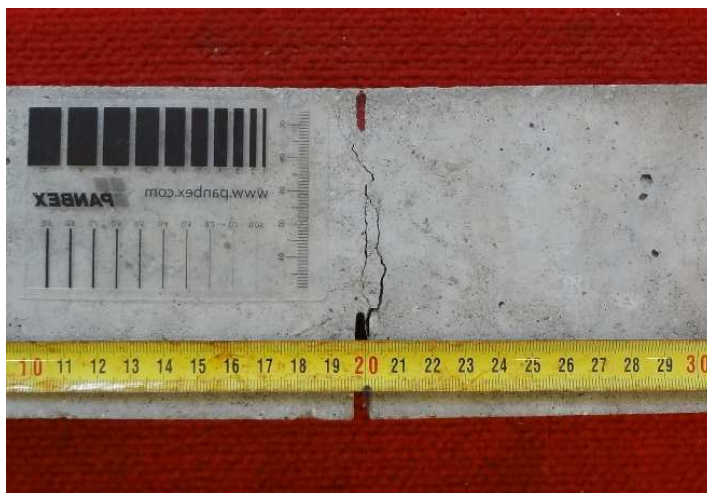


Obr. 5: Vzorek č. 2



Obr. 6: Vzorek č. 3

Vzorky C25/30 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N



***Obr. 7:** Vzorek č. 1*



***Obr. 8:** Vzorek č. 2*



***Obr. 9:** Vzorek č. 3*

Vzorky C30/37 + 30 kg KrampeHarex DE 50/1,0 N



Obr. 10: Vzorek č. 1



Obr. 11: Vzorek č. 2



Obr. 12: Vzorek č. 3