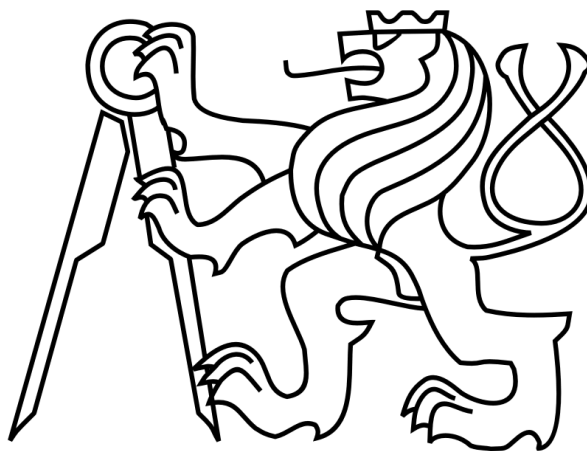


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



Diplomová práce

Experimentální vyšetřování mechanické energie absorbované
prvky z vysokohodnotného vlákny vyztuženého betonu

2016

Bc. Petr Konrád



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Konrád

Jméno: Petr

Osobní číslo: 395653

Zadávací katedra: Experimentální centrum

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální vyšetřování mechanické energie absorbované prvky z vysokohodnotného vlákny vyztuženého betonu

Název diplomové práce anglicky: Experimental investigation of mechanical energy absorbed by specimens made of high-performance fibre-reinforced concrete

Pokyny pro vypracování:

Zpracování literární rešerše, návrh experimentálního programu, výroba vzorků, provedení experimentů, zpracování výsledků, zhodnocení postupů, závěr a směřování dalšího výzkumu.

Seznam doporučené literatury:


R. Yu, L. van Beers, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings, Construction and Building Materials, Volume 107, 15 March 2016, Pages 203-215, ISSN 0950-0618

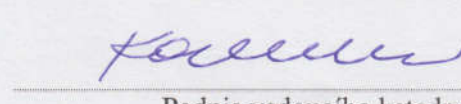
T. Ohno, T. Uchida, N. Ishikawa, Y. Kasai, H. Tsubota, M. Ueda, A. Kambayashi & T. Shira, Improvement on impact resistance of reinforced concrete panels against projectile impact, Transactions on the Built Environment vol 8, © 1994 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3509

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2017


Podpis vedoucího práce



Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

3.10.2016

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Experimentální centrum

**Experimentální vyšetřování mechanické energie
absorbované prvky z vysokohodnotného vlákny
vyztuženého betonu**

**Experimental investigation of mechanical energy
absorbed by specimens made of high-performance
fibre-reinforced concrete**

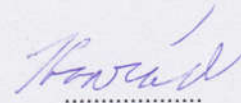
Diplomová práce

Autor: **Bc. Petr Konrád**
Vedoucí práce: **Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.**
Akademický rok: **2016/2017**

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsou citovány.

Praha, 20. prosince 2016

Bc. Petr Konrád



.....

Poděkování

Chtěl bych v první řadě poděkovat Ing. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, výpomoc při provádění experimentů a poskytnutí zásadních doporučení. Dále pak Ing. Petru Hálovi za pomoc při provádění experimentů a Ing. Michalu Frydrýnovi z Fakulty dopravní za výpomoc a za poskytnuté rady. Také bych chtěl poděkovat všem ostatním zaměstnancům Experimentálního centra, jejichž pomoc přispěla ke vzniku mé práce.

Abstrakt

V této práci je zkoumán vysokohodnotný vlákny vyztužený beton hlavně z hlediska schopnosti absorpce mechanické energie. Beton je vyztužen různými objemovými procenty vláken. Hlavním cílem práce je vytvoření nového experimentálního postupu pro zjištění absorbované mechanické energie v tahu ohybem při zatížení rázem. Dále je při kvazistatické rychlosti zatížení zjištěna pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem a ohybová houževnatost. Nový způsob provádění rázových zkoušek se zdá být vhodný pro zjišťování odolnosti materiálu proti rázovému zatížení. Hodnoty absorbované mechanické energie při zatížení rázem dosahovaly vyšších hodnot než při kvazistatickém zatížení. Rozdíl se měnil s procentem vyztužení.

Klíčová slova: HPFRC, ohybová houževnatost, absorbovaná mechanická energie, rychlost deformace, ráz, rázové kyvadlo

Abstract

In this thesis, the ability of high-performance fibre-reinforced concrete to absorb mechanical energy is investigated. Concrete is reinforced with various fibre volumes. The main goal of this thesis is to create a new experimental procedure for determining the absorbed mechanical energy under impact loading. Also, under quasi-static loading, mechanical properties were measured, such as compressive strength, flexural strength and flexural toughness. The new procedure shows promise for determining the material resistance to impact loading. Values of absorbed mechanical energy under impact loading were higher than those determined under quasi-static loading. These differences were also changing with fibre volume.

Key words: HPFRC, flexural toughness, absorbed mechanical energy, strain rate, impact, impact pendulum

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Cíle práce	1
1.3 Rozsah práce	1
2 Působení vláken v betonu	2
2.1 Uvedení do problematiky používání vláken v betonu	2
2.2 Struktura rozhraní vláken a betonové matrice	4
2.3 Chování vláken v betonu při zatížení	5
2.3.1 Vlákná rovnoběžná se směrem tahových napětí	5
2.3.2 Vlákná odkloněná od směru tahových napětí	7
2.4 Vybrané charakteristiky vláken a jejich dopad na mechanické vlastnosti	9
2.4.1 Procentuální zastoupení vláken	9
2.4.2 Rozměry vláken a jejich rozmístění	9
2.4.3 Orientace vláken a její ovlivnění	10
3 Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti betonu	12
4 Zkoušení vlákný vyztuženého betonu	15
4.1 Zkoušení jednotlivých vláken zakotvených v betonové matrici	15
4.2 Zatížení rázem	17
4.3 Kvazistatické zatížení	18
5 Experimentální program	20
5.1 Materiál	20
5.2 Rázové kyvadlo	21
5.2.1 Nedostatky původní konstrukce - důvody změny	21
5.2.2 Nová konstrukce	23
5.3 Zatížení rázem	25
5.3.1 Metoda vyhodnocení rázové zkoušky	25
5.3.2 Postup měření	26
5.4 Kvazistatické zatížení	27
6 Výsledky	30
6.1 Kvazistatické zatížení	30
6.1.1 Pevnost v tlaku	30
6.1.2 Pevnost v tahu ohybem	31
6.1.3 Pracovní diagramy	32
6.1.4 Absorbovaná mechanická energie	35
6.2 Zatížení rázem	37
6.2.1 Absorbovaná mechanická energie	37
6.2.2 Průběh rázu	39
6.3 Způsoby porušení vzorků	42

7	Zhodnocení experimentů	45
7.1	Kritické oblasti zkušebního postupu pro zatížení rázem	45
7.1.1	Analýza rychlostí z videozáznamu	45
7.1.2	Časová náročnost provedení a vyhodnocení	46
7.1.3	Proměnná rychlost deformace	46
7.1.4	Přesnost stanovení absorbované mechanické energie při jednom rázu	47
7.1.5	Přesnost stanovení celkové absorbované mechanické energie	49
7.2	Zhodnocení a porovnání výsledků	50
7.2.1	Porovnání absorbovaných mechanických energií	50
7.2.2	Zhodnocení výsledků z kvazistatické rychlosti zatížení	52
7.2.3	Rozptyly hodnot získaných vlastností	52
7.2.4	Efektivita vyztužení	54
7.3	Zhodnocení zkušebních postupů	57
7.3.1	Použití absorbované mechanické energie pro popis chování betonu	57
7.3.2	Rázové zatížení	58
8	Závěr	59
8.1	Zlepšení zkušebního postupu	59
8.2	Směrování dalšího výzkumu	60
9	Reference	61

Seznam obrázků

1	Typické pracovní diagramy různých betonů	3
2	Mikrotvrdost tranzitní zóny okolo ocelového vlákna	4
3	Model elastického přenosu napětí	6
4	Průběhy smykového napětí na rozhraní materiálů a tahového napětí ve vláknu	6
5	Průběh smykového napětí při vytahování vlákna	7
6	Deformace ocelového vlákna při rozevírání trhliny	8
7	Relativní síla potřebná k vytažení různě orientovaných vláken	8
8	Orientace vláken vlivem toku čerstvého betonu	10
9	Způsob ukládání betonu do forem	11
10	Hodnoty DIF zjištěné různými autory v závislosti na rychlosti deformace	12
11	Šíření trhliny v betonu	13
12	Tahová zkouška samostatného vlákna	15
13	Příklad vzorku pro vytahovací zkoušku	15
14	Příklady konfigurace vytahovací zkoušky	16
15	Idealizované pracovní diagramy vytahování vlákna	16
16	Rázové kyvadlo použité Yu a kol. [15]	18
17	Původní uložení vzorku a konfigurace rázové zkoušky	21
18	Původní mechanismus zafixování vzorku k silůměrům	21
19	Aktuální schéma celého rázového kyvadla	22
20	Aktuální podoba celého rázového kyvadla	23
21	Detail polohy vzorku a závaží v klidové poloze	24
22	Původní uložení vzorku	24
23	Nové uložení vzorku	24
24	Uchycení snímačů průhybu při zkoušce pevnosti v tahu ohybem	29
25	Schéma zkoušky pevnosti v tahu ohybem	29
26	Pevnosti v tlaku v závislosti na procentu vyztužení	30
27	Pevnosti v tahu ohybem v závislosti na procentu vyztužení	32
28	Pracovní diagramy zkoušky v tahu ohybem pro jednotlivá procenta vyztužení	33
29	Porovnání pracovních diagramů pro různá procenta vyztužení	34
30	Průběhy absorbované mechanické energie pro různá procenta vyztužení	36
31	Závislosti šířky trhlín na již absorbované mechanické energii při rázovém zatížení	38
32	Průběh velikosti rychlosti vzorku ihned po prvním rázu	40
33	Průběh velikosti rychlosti vzorku ihned po předposledním rázu	41
34	Porovnání průběhů dvou rázů	42
35	Vzorky porušené ohybem při kvazistatické rychlosti zatížení	43
36	Příklady porušení vzorků při zatížení rázem	44
37	Porovnání absorbované mechanické energie pro kvazistatické a rázové zatížení	51
38	Rozdíl lomových ploch vzorku s 2% vyztužením a nevyztuženého vzorku	56
39	Detail lomové plochy pro vzorek s 2% vyztužením	56

Seznam tabulek

1	Počty vyhodnocených experimentů pro jednotlivá procenta vyztužení	30
2	Pevnost v tahu ohybem při kvazistatickém zatížení	31
3	Absorbovaná mechanická energie při kvazistatické rychlosti zatížení, zkouška v tahu ohybem	36
4	Absorbovaná mechanická energie při rázovém zatížení	37
5	Porovnání efektivity vyztužení	54

1 Úvod

1.1 Motivace

Tato práce přímo navazuje na bakalářskou práci autora [1]. V té byla zjišťována maximální působící síla při zatížení rázem, respektive pevnost v tahu ohybem daného vzorku při zatížení rázem. Vzorky byly všechny vyztuženy dvěma objemovými procenty ocelových vláken. Motivací pro tuto práci bylo popsat chování vzorků s různými procenty vyztužení. Zjistit, jak s rostoucím procentem vyztužení roste absorbovaná energie při zatížení rázem. Jestli je tato závislost stejná jako při kvazistatické rychlosti zatížení, nebo jiná. Schopnost absorpce mechanické energie je vlastnost betonů vyztužených vlákny, kterou se výrazně odlišují od nevyztužených. Motivace k popsání chování betonu v této oblasti je proto vysoká.

Další motivací pro tuto práci je nalezení nového zkušební postupu - konkrétně vylepšení zkušební přístroje. To vychází obecně z potřeby vyvinout takovou zkušební metodu pro zatížení betonových vzorků rázem, která bude univerzální a budou ji moci provádět i ostatní laboratoře. Znamená to, že daná zkušební metoda musí být jednoduchá a zbavená co nejvyššího počtu neznámých, aby se dalo jednoznačně určit, jak byl betonový vzorek zatížen a jak na toto zatížení reagoval. Toto současná metoda použitá při zpracování práce [1] částečně nesplňovala.

1.2 Cíle práce

Tato práce má dva hlavní cíle. Prvním je navrhnout, vyzkoušet a zhodnotit nový zkušební postup pro zatížení rázem. Druhým je určit množství mechanické energie absorbované vzorky z vláken vyztuženého vysokohodnotného betonu při kvazistatickém a rázovém zatížení (pro zatížení ohybem).

Návrh nového zkušební postupu je proveden na základě dostupné literatury a doporučení dalších výzkumných pracovníků. Zhodnocení postupu by mělo být provedeno z pohledu jeho přesnosti, proveditelnosti, reprodukovatelnosti experimentů a jeho obecných nedostatků. V neposlední řadě je důležitým cílem zhodnocení vhodnosti použití absorbované mechanické energie k popisu chování materiálu při zatížení.

Pro určení množství absorbované mechanické energie při kvazistatickém zatížení je nutné získat a vyhodnotit pracovní diagramy zkoušky pevnosti v tahu ohybem. Aby byl zkoumaný materiál lépe popsán, je dalším důležitým cílem práce porovnání průběhů pracovních diagramů pro různá procenta vyztužení. S tím souvisí i zjištění pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku.

1.3 Rozsah práce

V teoretické části práce byla zpracována stručná literární rešerše. Důraz byl kladen na téma chování jednotlivých vláken v cementovém kompozitu. Praktická část se skládala z přípravy vzorků, přípravy zkušební postupu, provedení experimentů a vyhodnocení. Vybetonovány byly trámky s různým procentuálním zastoupením vláken. Nový zkušební postup pro zatížení rázem byl aplikován na dostupné zařízení - rázové kyvadlo použité v práci [1]. To obsahovalo přestavbu rázového kyvadla a návrh a vyzkoušení konkrétních měřících postupů pro tuto práci. Experimenty zahrnovaly zkoušky rázové, pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku při kvazistatickém zatížení.

2 Působení vláken v betonu

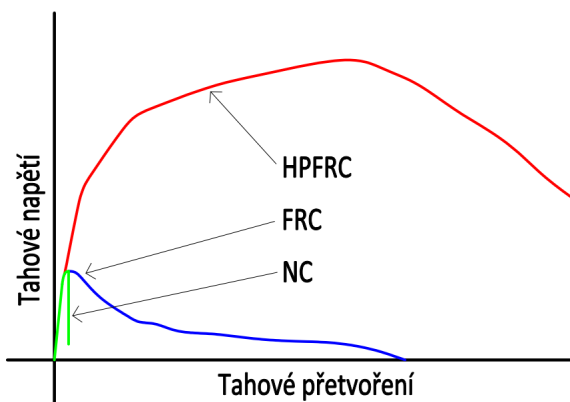
2.1 Uvedení do problematiky používání vláken v betonu

Beton je v dnešní době dominantním stavebním materiálem. Betony běžně používané k výstavbě pozemních staveb jsou ceněné hlavně díky své dobré pevnosti v tlaku v kombinaci s nízkou cenou. Ta je tvořena hlavně dobrou dostupností surovin na jeho výrobu, ale i rychlostí a relativní nenáročností zhotovení dané konstrukce. Dalším velice podstatným faktem je, že cementové kompozity obecně je možné modifikovat různými přísadami a příměsmi, případně i vlákny, a zjednodušeně řečeno materiál „ušít na míru“ konkrétním konstrukcím. Je tak možné výrazně měnit vlastnosti betonu, hlavně tedy v oblasti mechanických vlastností, trvanlivosti, bezpečnosti (např. požární ochrana nebo stínění proti radiaci) a estetiky. Nicméně zásadní vlastnost obyčejného nebo nevyztuženého betonu, která omezuje jeho použití, je jeho křehkost. Obecně o betonu hovoříme jako o kvazi-křehkém materiálu, neboť vykazuje jisté nelinearity (tedy oblasti, kde neplatí Hookův zákon) v blízkosti dosažení maximálních tahových a tlakových napětí. Beton má velmi malou duktilitu, což v praxi znamená, že vnější zatížení vyvolá napětí odpovídající maximální pevnosti při relativně malých přetvořeních, které člověk ani není schopen bez použití měřících přístrojů rozeznat. Dochází pak k náhlému poklesu tuhosti vlivem vytvoření trhlin a betonová konstrukce tzv. bez varování kolabuje. Z toho důvodu není možné stavět ohybem a tahem namáhané konstrukce z prostého betonu. Použití kontinuálních ocelových prutů jako výztuže do betonu tento problém řeší. Možnost tohoto vyztužení pramení ze tří základních faktů. Ze vzájemné soudržnosti betonu a oceli, především tedy mechanické soudržnosti vlivem různých povrchových úprav ocelových prutů, z podobného součinitele teplotní roztažnosti betonu a oceli a v neposlední řadě z vysoce alkalického prostředí betonu, ve kterém dochází k pasivaci ocelové výztuže, takže je zabráněno její korozi [2].

Železobeton však zcela neřeší úplně všechny nedostatky prostého betonu v oblasti malých tahových pevností. Hlavním přetrvávajícím problémem je tvorba a šíření trhlin, které se vytvářejí z různých důvodů, například vysycháním, smršťováním nebo změnou teploty. Problematické je také chování železobetonu při dynamických zatíženích, jako jsou zemětřesení, rázy a výbuchy, při kterých se železobeton nevhodným a někdy i nebezpečným způsobem poškozuje. Velmi obecně řečeno jsou tyto problémy železobetonu způsobeny používáním ocelových prutů relativně velkých průměrů, které je nutno řádným způsobem zakotvit. To ale znamená, že jsou jednotlivé pruty od sebe poměrně značně vzdálené a nevyztužují beton ve všech místech stejně [3]. Nejvíce se toto projevuje u povrchových vrstev betonu, kde navíc musíme dbát na dostatečnou krycí vrstvu výztuže nejen z důvodu jejího ukotvení, ale i z hlediska trvanlivosti, aby nedocházelo k rychlé korozi výztuže nejbližší povrchu. Železobeton proto neřeší odolnost povrchu například proti abrazi nebo odtržení povrchových vrstev při různých zatíženích [3, 4].

Vlákna do betonových směsí jsou obvykle diskontinuální, náhodně orientovaná a volně rozptýlená v celém objemu. Jsou vyrobená z různých materiálů, mají různé tvary (přímá, spirálovitá, s různě upravenými konci apod.), délky a povrchové úpravy. Přidání vláken do betonové směsi může nedostatky spojené s malou pevností betonu v tahu dále vylepšit. Hned na začátek je ale třeba říci, že krátká, diskontinuální, náhodně orientovaná vlákna nemohou nahradit klasickou kontinuální, orientovanou betonářskou výztuž pro přenos všech tahových napětí. Oba druhy vyztužení mají v betonu rozdílné

role. Výjimku tvoří například velmi tenké betonové prvky, kde by nebylo možné dodržet tloušťky krycích vrstev klasické výztuže. Ve většině případů se ale vlákna používají pro kontrolu vzniku a šíření trhlin. Na obrázku 1 jsou v grafu vykresleny typické pracovní diagramy pro obyčejný beton (NC), vláknobeton (FRC) a vysokohodnotný vláknobeton (HPFRC). Na první pohled je patrné, že vlákna v betonu výrazně zvýší jeho duktilitu. To ve výsledku zvyšuje i houževnatost betonu, což je schopnost absorbovat mechanickou energii (zvětšuje se plocha pod grafem pracovního diagramu). Vyztužením obyčejného betonu například ocelovými vlákny obvykle nezvýšíme jeho pevnost tak, jak je vidět na obrázku 1, pouze jeho duktilitu. Můžeme však vhodně zkombinovat vysokohodnotné betonové matrice s konkrétním druhem vláken a získat tak mnohem lepší schopnost absorbovat mechanickou energii a zároveň výrazně zvýšit pevnost [5]. Takový vysokohodnotný vláknobeton je zkoumán v této práci.



Obrázek 1: Typické pracovní diagramy různých betonů [5]

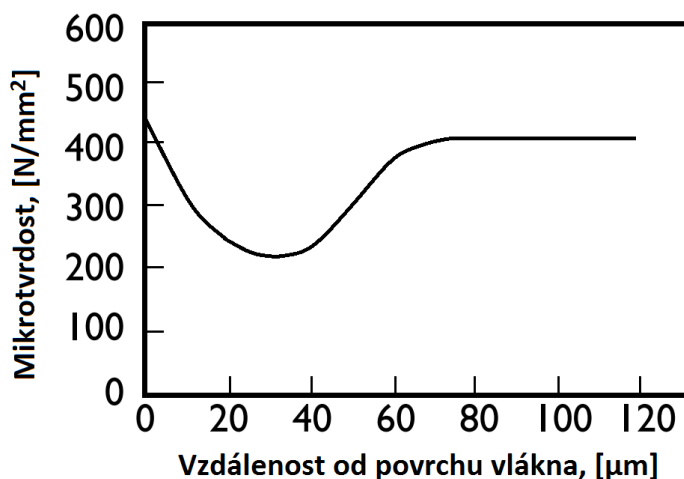
Tak jako u klasické betonářské výztuže platí i pro vlákna několik zásadních bodů, které určují vůbec možnost jejich použití v betonové směsi. Je to opět soudržnost vláken a betonové matrice, podobné součinitele teplotní roztažnosti a chemická stabilita výztuže v betonu. Případně hraje roli i ekonomické hledisko, hlavně u drahých ocelových vláken, nebo zdravotní hledisko například u vláken azbestových případně jiných lehce vdechnutelných mikrovláken. Vzhledem k tomu, že vlákna nejsou vyráběna pouze z oceli, a použité betonové matrice dokonce nemusí být na bázi portlandského cementu, nejsou tyto body automaticky splněny a je třeba kompatibilitě jednotlivých vláken a betonových směsí věnovat větší pozornost. Výsledkem dobrého návrhu ale může být cementový kompozit, který bude svými mechanickými vlastnostmi výrazně převyšovat nevyztužený beton [5].

Toto byl pouze hrubý popis možných výhod, ale i problematických oblastí spojených s vyztuženým betonem. V následujících kapitolách jsou probrána vybraná specifika vláken vyztužených betonů tak, aby byl vytvořen jakýsi přehled faktorů, které nejvíce ovlivňují schopnost absorbovat mechanickou energii. Nebude zacházeno do přílišných detailů, budou jen vysvětleny základní principy, kterým se do detailu věnuje citovaná literatura.

2.2 Struktura rozhraní vláken a betonové matrice

Již od začátku druhé poloviny 20. století je všeobecně známo, že pevnost a další různé mechanické vlastnosti betonu jsou dány jeho vnitřní strukturou (viz práce T. C. Powerse [6]). Pojem tranzitní zóna (v anglicky psané literatuře zkratka ITZ - Interfacial Transition Zone) popisuje oblast zatvrdlé cementové pasty, kde je jiná struktura než v jejím zbylém objemu. Obecně se tato zóna vyskytuje kolem různých inkluzí betonu, tedy okolo kameniva, ale i vláken. Tranzitní zóna je slabým místem betonu jako celku. Při zatížení (nebo při napětích vyvolaných smrštěním) se trhлина vytvoří právě v této zóně. Její malá pevnost je důsledkem vyšší pórovitosti, která zde vzniká kvůli lokálnímu stěnovému efektu, kdy se v malé vzdálenosti okolo inkluzí zadržuje vyšší množství vody a tím se zde zvyšuje vodní součinitel. Obecně pak platí, že čím vyšší je vodní součinitel, tím vyšší je i celková pórovitost betonu, což analogicky platí i pro tranzitní zónu [5, 7]. Snahy o zlepšení pevností různých cementových kompozitů, včetně těch vyztužených vlákny, se musí nutně zabývat otázkou zlepšení vlastností této zóny. Tedy zajistit dokonalejší spojení cementové pasty a všech inkluzí. Zkoumání struktury vláknobetonů je pak základní krok k lepšímu pochopení jejich chování při zatížení.

Z pohledu typů vláken je zde důležitý rozdíl jedná-li se o vlákna diskretní (od sebe navzájem oddělena - např. ocelová), nebo shluky vláken (např. skleněná nebo polymerní). Tyto dva druhy se odlišují kontaktem s cementovou pastou, kdy diskretní vlákno je v kontaktu celým svým povrchem, zatímco shluk vláken pouze povrchem vláken, které jsou na okraji tohoto shluku. Dále je pozornost věnována jen diskretním ocelovým vláknům, neboť ta jsou použita v této práci. Tranzitní zóna v oblasti kontaktu s ocelovým vláknem je bohatá na relativně velké krystaly portlanditu (CH). Ten se zde objevuje pravděpodobně vysrážením z roztoku čerstvého cementového gelu, kdy vlákno tvoří krystalizační centrum. Dále od vlákna se pak nachází nejvíce pórovitá vrstva tranzitní zóny, která je i nejslabším místem celého spojení. Ještě dále od vlákna už má zatvrdlá cementová pasta normální strukturu [5]. Toto ilustruje obrázek 2, kde je graf znázorňující mikrotvrdost v závislosti na kolmé vzdálenosti od povrchu vlákna.



Obrázek 2: Mikrotvrdost tranzitní zóny okolo ocelového vlákna [5]

Zlepšení struktury tranzitní zóny z hlediska dosažení vyšších pevností betonu a pevnější vazby cementové pasty a vláken, je jedním z hlavních principů (ultra)vysokohodnotných betonů. To znamená, že pokud používáme náhodně rozptýlená vlákna jako výztuž, jeví se vysokohodnotný beton mnohem efektivnější než beton obyčejného složení, protože již řeší nedostatky plynoucí z horších mechanických interakcí inkluzí a cementové pasty. Obecně je nižší pórovitost v tranzitní zóně dosaženo drastickým snížením vodního součinitele, což značí nutnost použití superplastifikátoru. Dále se pak používají různé přísady, například křemičitý úlet, který díky svým velice malým zrnům zlepšuje mikrostrukturu tranzitní zóny [5, 7].

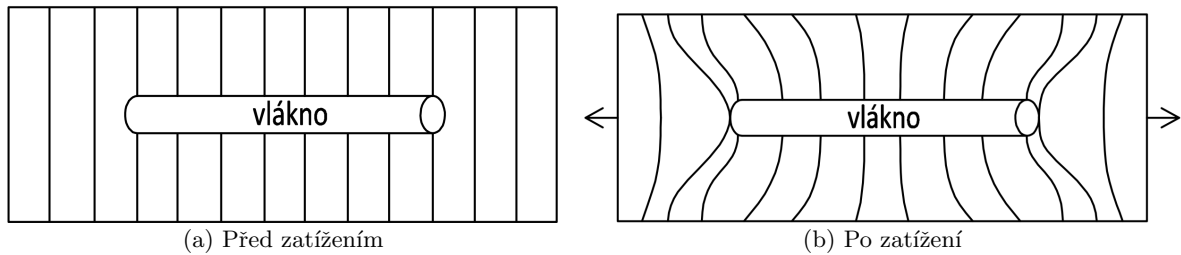
2.3 Chování vláken v betonu při zatížení

2.3.1 Vlákna rovnoběžná se směrem tahových napětí

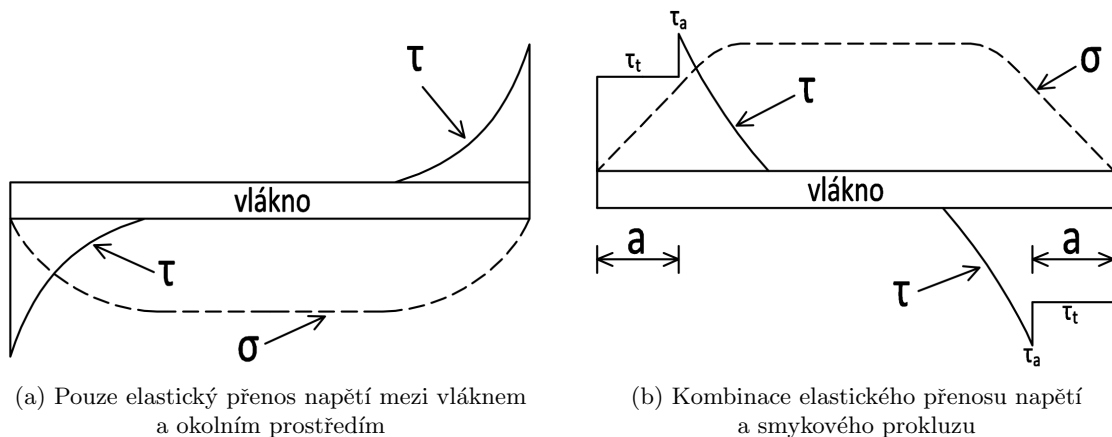
V betonové matici jsou vlákna zakotvena pomocí třech základních mechanismů. Je to fyzikální a chemická adheze, tření a zakotvení vlivem nepravidelného povrchu vlákna nebo jeho geometrie. První dva mechanismy se uplatňují především u vláken malých průměrů a vysokohodnotných betonů, což souvisí s jejich vhodnou mikrostrukturou, jak je uvedeno v předchozí kapitole. U obyčejných betonů s vlákny vyšších průměrů se dá jejich zakotvení efektivně provést pouze třetím uvedeným mechanismem. Zkoumání působení jednotlivých vláken v cementové matici při zatížení je důležité pro popis celkového chování kompozitu. Je to jeden z prvních kroků (spolu s popisem struktury, viz předchozí kapitola) k návrhu materiálu s požadovaným módem porušení (křehký, duktilní) a dalšími mechanickými vlastnostmi [5]. Opět bude dále věnována pozornost pouze rovným ocelovým vláknům, protože ta jsou použita v této práci.

Pro analýzu působení jednotlivých vláken v křehkých kompozitech je nutné rozlišit různé stavy, ve kterých se nachází hlavně přechodová oblast (tranzitní zóna) okolo zkoumaného vlákna. Tedy jestli je vlákno pevně spojené s cementovou maticí, nebo se již na rozhraní materiálů vytvořily trhliny, a případně v jaké míře. S tím souvisí možnost použití různých analytických modelů. Záleží také na tom, v jakém stavu se nachází celý betonový prvek, jestli již bylo dosaženo maximální pevnosti v tahu betonu a vlákna začínají přemosťovat trhliny, nebo je prvek stále neporušený. Předmětem zkoumání jsou tedy všechny oblasti na křivkách pracovních diagramů pro různé kompozity [5].

Při relativně malém zatížení se uplatňuje princip elastického přenosu napětí. Cox [8] poprvé uvedl model a rovnice, pomocí kterých popisuje tahové napětí ve vláknu a smykové napětí na rozhraní vlákna a okolního prostředí. V modelu se uplatňuje několik předpokladů, které více či méně neodpovídají realitě. Mezi ty nejproblematictější patří: dokonalé spojení vlákna s okolním prostředím, neexistence tranzitní zóny, nebo že vlákna jsou pravidelně uspořádána a navzájem se neovlivňují. Na obrázku 3 je graficky znázorněn průběh deformace okolního prostředí před a po zatížení, se kterým model pracuje. Na obrázku 4a jsou pak průběhy tahového napětí ve vláknu a smykového napětí na rozhraní materiálů. Přenos napětí mezi maticí a vláknem probíhá v oblasti nenulového smykového napětí, nejvíce na koncích vlákna. Z toho pak vyplývá postupný nárůst tahového napětí od konce do středu vlákna. Význam použití popsaného modelu také spočívá v určení efektivity vyztužení vlákny. Nejefektivnější vyztužení nastává v případě, kdy je do vlákna možné (vzhledem k pevnosti spojení materiálů) přenést napětí blízké se jeho pevnosti nebo mezi kluzu. Efektivní vyztužení ale nemusí nutně znamenat, že je u kompozitu dosaženo maximálních hodnot různých mechanických vlastností, např. pevnosti v tahu [5].



Obrázek 3: Model elastického přenosu napětí [5]



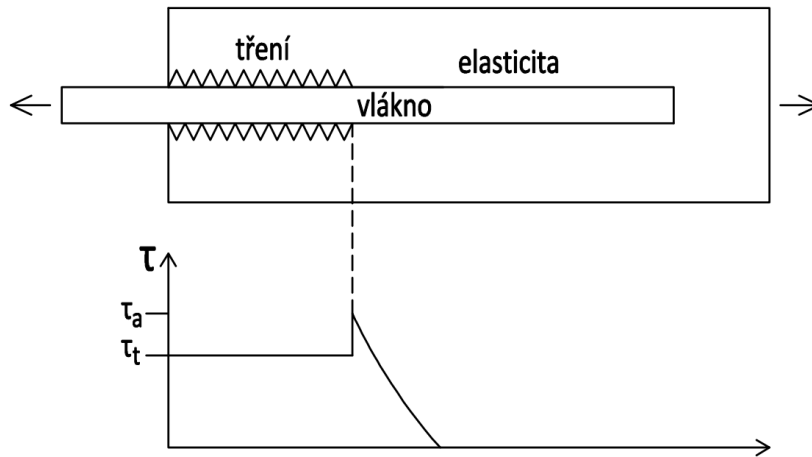
Obrázek 4: Průběhy smykového napětí na rozhraní materiálů (τ) a tahového napětí ve vláknu (σ), podle [5]

Zvyšující se zatížení, které ale stále není natolik vysoké, aby napětí v betonu dosáhlo pevnosti v tahu, může způsobit porušení vazby (adheze) mezi vláknem a cementovou pastou. Pokud dojde k úplné ztrátě spojení, vlákno již přestává plnit svojí funkci a kompozit je špatně navržen. U betonů vyztužených vlákny ale spíše dojde k postupnému narušování vazby od konců vlákna směrem k jeho středu. V oblasti rozhraní, kde došlo k vytvoření poruchy, se pak nejčastěji aktivuje mechanismus třecího prokluzu, zatímco v neporušené oblasti stále platí popsáný elastický přenos napětí. Na obrázku 4b je opět vykreslen průběh smykového a tahového napětí. Délka „a“ značí oblast porušení pevné vazby kde působí třecí prokluz. Zde se rozložení smykového napětí τ_t považuje za konstantní. Napětí τ_a je smyková pevnost adheze [5].

Ocelová vlákna se do betonu přidávají primárně pro změnu chování celého prvku po dosažení tahové pevnosti betonové matrice. Vlákna pak přemostují vzniklé hlavní tahové trhliny. Vlastnost zkoumaná v této diplomové práci - schopnost absorbovat mechanickou energii, je hlavně určena chováním v oblasti po vzniku tahových trhlin [9]. Principy přenosu napětí do vláken jsou zde podobné jako principy popsané v minulých odstavcích. Rozdíl je v poloze maximálních hodnot smykového napětí. To se nevyskytuje na koncích vlákna, ale v místě lomové plochy, což je vidět na obrázku 5. Opět se uplatňuje kombinace elastického přenosu napětí a třecího prokluzu. Oblast porušení adheze mezi vláknem a cementovou pastou se zvětšuje s rostoucím zatížením, až dojde ke ztrátě adheze po celé délce vlákna.

V tom případě se dále uplatní jen mechanismus třecího prokluzu. Existuje řada analytických modelů, které toto chování popisují, a které zavádí rovnice pro výpočet smykových napětí [5]. Pomocí výpočtů lze určit, jestli budou vlákna působit požadovaným způsobem, aby například nedocházelo k jejich náhlým vytržením z matrice nebo jejich přetržení (ideální stav je postupné vytažení celého vlákna [10]). Modely jsou sestavovány na základě výsledků vytažovacích zkoušek jednotlivých vláken. Ty budou popsány dále v kapitole 4.1.

Velikost smykového napětí při působení třecího prokluzu je dána velikostí normálového (kontaktního) napětí. Tedy síla potřebná na vytažení vlákna z betonu roste spolu s tlakem, kterým cementová pasta svírá vlákno. Normálové napětí zde vzniká v důsledku zabránění volného rozpínání matrice do prostoru, který je vyplněn vláknem. Pokud se na rozhraní normálové napětí nevytvoří (matrice nemá snahu tlačit na vlákno), efekt třecího prokluzu se značně zmenší. Faktory ovlivňující velikost normálového napětí jsou například: objemové změny betonu, externí zatížení betonového prvku, Poissonův efekt a plastická deformace vlákna. Poslední dva efekty způsobují snižování průměru vlákna s jeho protažením a tím je umožněna větší deformace matrice a snížení normálového napětí [5].



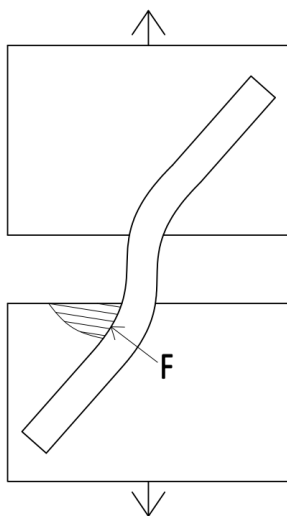
Obrázek 5: Průběh smykového napětí při vytahování vlákna, podle [5]

2.3.2 Vlákna odkloněná od směru tahových napětí

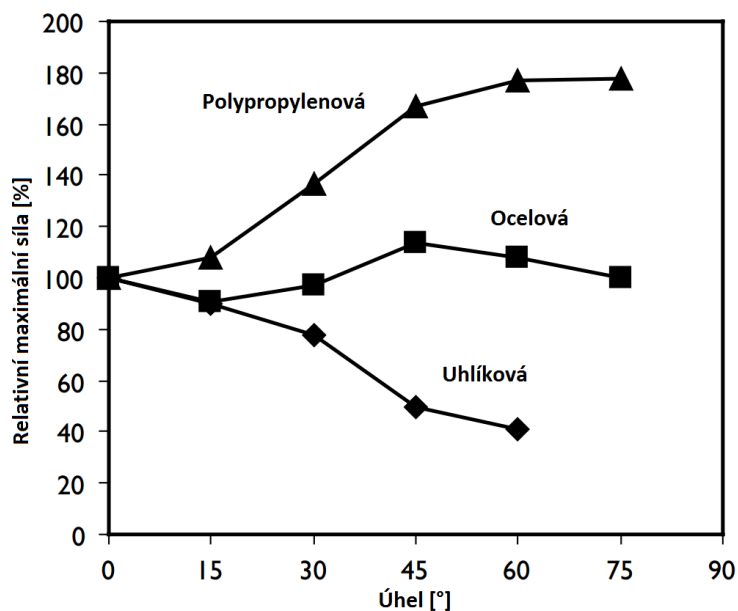
Informace uvedené v minulé kapitole se týkaly vláken, která jsou orientována rovnoběžně k tahovým napětím v betonu. Obvykle jsou ale vlákna přidávána v průběhu míchání betonové směsi, a proto po umístění do forem vykazují náhodné rozmístění a orientaci. Pro případ, kdy vlákno ještě nepřemostí uje vzniklou trhlinu, ale působí v celistvém betonu, můžeme zavést velmi podstatný předpoklad, že se vlákno deformuje pouze po své délce. V tom případě je jeho vliv na přenos tahových napětí snížen. Pro popis této snížené účinnosti ve 3D nebo 2D uspořádání se zavádí koeficient účinnosti orientace vláken. Ten udává relativní únosnost vláken vzhledem ke stavu, kdy jsou ideálně orientována. Může dosahovat hodnot od 0 (všechna vlákna kolmo ke směru tahových napětí) do 1 (všechna vlákna rovnoběžně se směrem tahových napětí - ideální stav). Pro trojrozměrný prvek, kde jsou vlákna zcela náhodně rozmístěna a orientována, v oblasti před vytvořením hlavní tahové trhliny vypočítali různí autoři, na základě dalších rozdílných předpokladů, hodnoty koeficientu od $1/3$ do $2/\pi$ [5].

V případě betonu vyztuženého ocelovými vlákny se jedná o kombinaci křehké matrice a duktilního vlákna. Z toho důvodu se vlákno, které přemostňuje rozevírající se trhlinu, bude deformovat způsobem naznačeným na obrázku 6. Není tak splněn předpoklad deformace vlákna pouze ve své ose a do určení účinnosti různě orientovaných vláken vstupují další faktory. Například se uplatní hmoždinkový efekt, který může až převýšit sníženou účinnost vlákna, a dokonce zvýšit jeho odolnost proti vytažení. Na obrázku 7 je graf znázorňující relativní sílu potřebnou k vytažení jednotlivých vláken různých materiálů v závislosti na jejich úhlu orientace (0° - vlákno rovnoběžně s vytahovací silou). Aby došlo ke zvýšení únosnosti při „horší“ orientaci, musí být vlákno duktilní s relativně malým modulem pružnosti. Křehká uhlíková vlákna s velmi vysokým modulem pružnosti toto nesplňují, a proto je trend změny odolnosti zcela jiný než u ocelových a hlavně polypropylenových vláken. Pokud navíc dojde k prasknutí vlákna před jeho vytažením, je logicky snížena i duktilita celého kompozitu. Pro deformaci vlákna navíc musí působící síla vykonat dodatečnou práci, která se přičítá do celkového množství absorbované mechanické energie [5, 10].

Popsaný efekt také závisí na použité betonové matrici. Pokud se jedná o obyčejný beton, nemusí ke zvýšení odolnosti dojít. Síla F na obrázku 6 tlačí na vyznačenou oblast, kde může dojít k odlupování betonu (spalling), čímž se výrazně snižuje celková odolnost proti vytažení vlákna. Tato síla se zvětšuje s rostoucím úhlem odklonění vlákna. Pokud je použit vysokohodnotný beton, dochází k odlupování v menší míře a v celém betonovém prvku tak efektivně působí i značně odkloněná vlákna. To má velice příznivý vliv na maximální pevnost a schopnost absorbovat mechanickou energii [10, 11].



Obrázek 6: Deformace ocelového vlákna při rozevírání trhliny, podle [5]



Obrázek 7: Relativní síla potřebná k vytažení různě orientovaných vláken [5]

2.4 Vybrané charakteristiky vláken a jejich dopad na mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti vlákniny vyztužených betonů závisí na mnoha faktorech. Některé z nich byly již zmíněny v minulých kapitolách, protože úzce souvisí s principy působení jednotlivých vláken. Tato kapitola je věnována dalším charakteristikám jednoho vlákna nebo dávkám vláken ve směsi, které mají významný vliv na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Stále je pozornost věnována pouze přímým, hladkým ocelovým vláknům. Nebudou tedy popisovány rozdíly v různých materiálech ani vlivy složitější geometrie vlákna.

2.4.1 Procentuální zastoupení vláken

Pravděpodobně nejdůležitější proměnnou při zkoumání mechanických vlastností vlákniny vyztužených betonů je množství vláken přítomných ve směsi. Obvykle se udává jako procento z celkového objemu. Vliv na tlakové pevnosti s rostoucím procentem vyztužení je minimální. Podobně nevýrazně se vlákna podílejí na zvýšení modulu pružnosti. Největší rozdíly jsou pozorovány u pevností v tahu a v tahu ohybem, které by měly podle výsledků z literatury růst lineárně s procentem vyztužení [12]. Dále s rostoucím procentem vyztužení významně rostou absorbované mechanické energie nebo odolnosti proti nárazům projektilů (menší poškození) [13].

Objem vláken v čerstvém betonu výrazně ovlivňuje jeho zpracovatelnost a do jisté míry může omezit samozhutnitelné vlastnosti. Vlákna také mohou od určitého procenta začít tvořit shluky, ve kterých jsou jednotlivá vlákna moc blízko sebe, než aby šla efektivně zakotvit. To bylo pozorováno již při betonáži vzorků pro předchozí práci [1]. Pevnost v tlaku může s příliš vysokým procentem vyztužení klesat, protože se vytvoří více pórů mezi vlákny a není tak dosaženo hutné struktury typické pro vysokohodnotné betony [14]. Maximální procento vyztužení je omezeno právě kvůli těmto jevům.

2.4.2 Rozměry vláken a jejich rozmístění

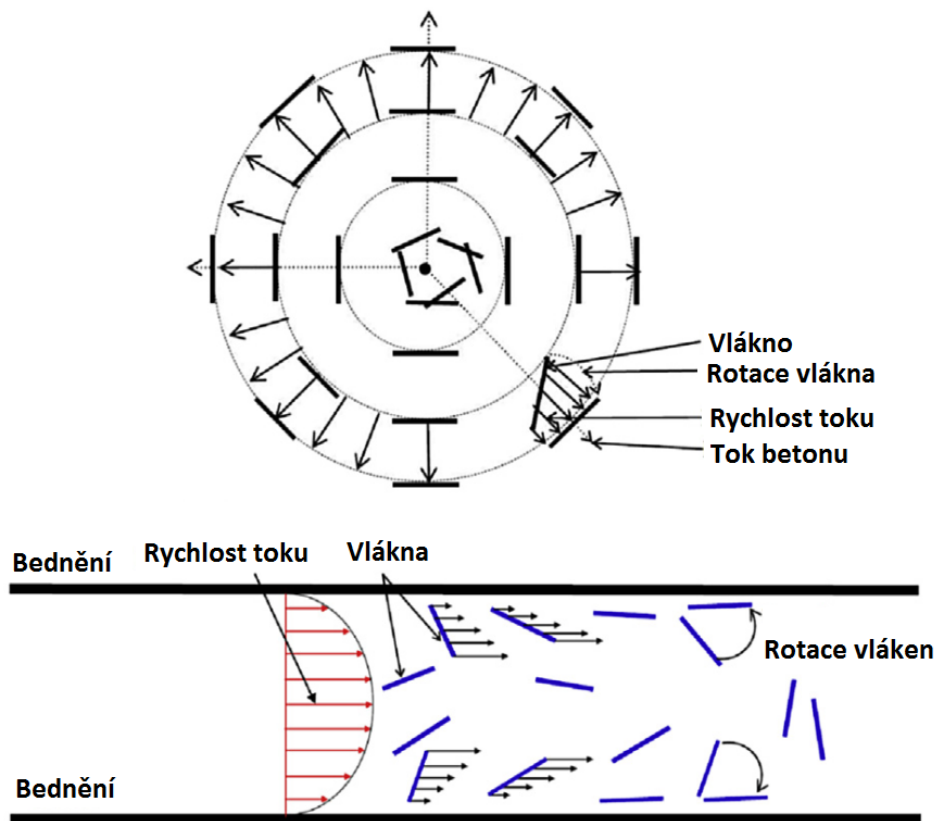
Dalším důležitým parametrem jsou rozměry vláken, konkrétně jejich délka. Protože procento zastoupení vláken udává část celkového objemu, který je vyplněn materiálem vláken, rostoucí délka jednoho vlákna znamená snížení jejich celkového množství. Počet vláken přemostujících jednu tahovou trhlinu ale nutně nemusí být menší, protože delší vlákno má vyšší pravděpodobnost výskytu v trhlíně. Pokud se uplatní mechanismus vytahování vlákna z matrice, je jeho odolnost funkcí povrchu vlákna v kontaktu s matricí a ta je logicky pro delší vlákno vyšší. To znamená, že při stejném procentuálním zastoupení vláken jsou delší vlákna efektivnější, a je s nimi dosaženo vyšších hodnot mechanických charakteristik kompozitu. Použití delších vláken také zvyšuje maximální možné rozevření tahové trhliny před kolapsem betonového prvku. Zvyšuje se tak jeho duktilita [12].

Příliš dlouhá vlákna ale přinášejí i jisté nevýhody. Popsaný efekt zvýšené odolnosti proti vytažení nemusí vůbec nastat, neboť pevnější zakotvení vlivem většího povrchu vlákna v kontaktu s matricí způsobí, že se ve vláknu vytvoří vyšší tahové napětí a vlákno může prasknout [5]. Je nutné používat větší rozměry zkušebních vzorků, aby bylo dosaženo reprezentativního objemu [15]. Delší vlákna také více zhoršují zpracovatelnost čerstvého betonu. Hůře se rozmíchávají a dochází k jejich nepravidelnému uspořádání v zatvrdlém betonu [5, 16].

2.4.3 Orientace vláken a její ovlivnění

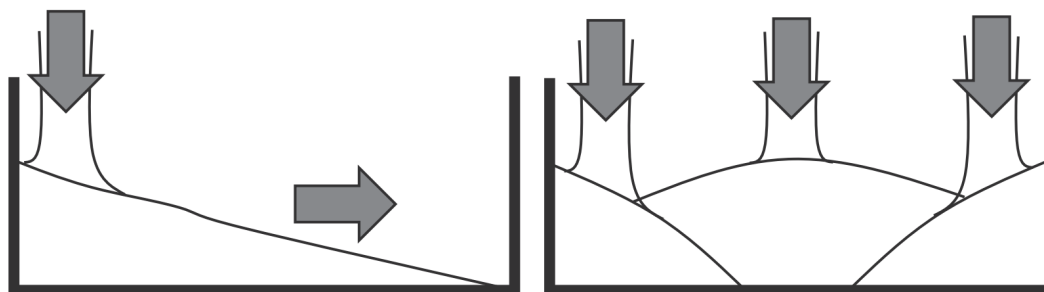
Logickým krokem pro zvýšení například pevnosti v tahu nebo absorbované mechanické energie je ovlivnit vlákna tak, aby většina efektivně přemostovala vzniklé trhliny. To znamená, že musí být nějakým způsobem cíleně orientována. V kapitole 2.3.2 bylo ukázáno, že ocelová vlákna nemusí být ve vysokohodnotném betonu nutně rovnoběžná s tahovým napětím, aby bylo dosaženo nejvyšších odolností proti jejich vytažení. To má významný dopad na celkovou efektivitu prvků, kde nemusí docházet k vytvoření tahových napětí pouze v jednom směru (jako při zkoušce pevnosti v jednoosém tahu). Například při zatížení rázem nebo výbuchem může dojít k určitým lokálním zatížením, které vyvolají tahová napětí v různých směrech. Stačí tedy, když se vlákna ve vysokohodnotném betonu zorientují alespoň přibližně podle očekávaných tahových napětí.

Na obrázku 8 je znázorněno (v půdorysu), jak se vlákna orientují vlivem různých rychlostí toku čerstvého betonu. V případě radiálního rozlité (např. při betonáží rozměrných deskových prvků) se rychlost na obvodu zvětšujícího se objemu betonu snižuje s rostoucím průměrem. Na konec vlákna blíže ke středu tedy působí větší síla vlivem vyšší rychlosti a vlákno je tak nucené orientovat se podle obrázku. V případě rozlité v relativně úzkém bednění je rychlost proudění nejnižší u okrajů a nejvyšší přesně ve středu bednění. Opět na konce vláken působí rozdílné síly vlivem rozdílných rychlostí. Vlákna jsou tak nucena se orientovat přibližně jedním směrem [12].



Obrázek 8: Orientace vláken vlivem toku čerstvého betonu. Nahoře do všech směrů (radiální tok), dole jedním směrem v úzkém bednění (smykový tok) [12]

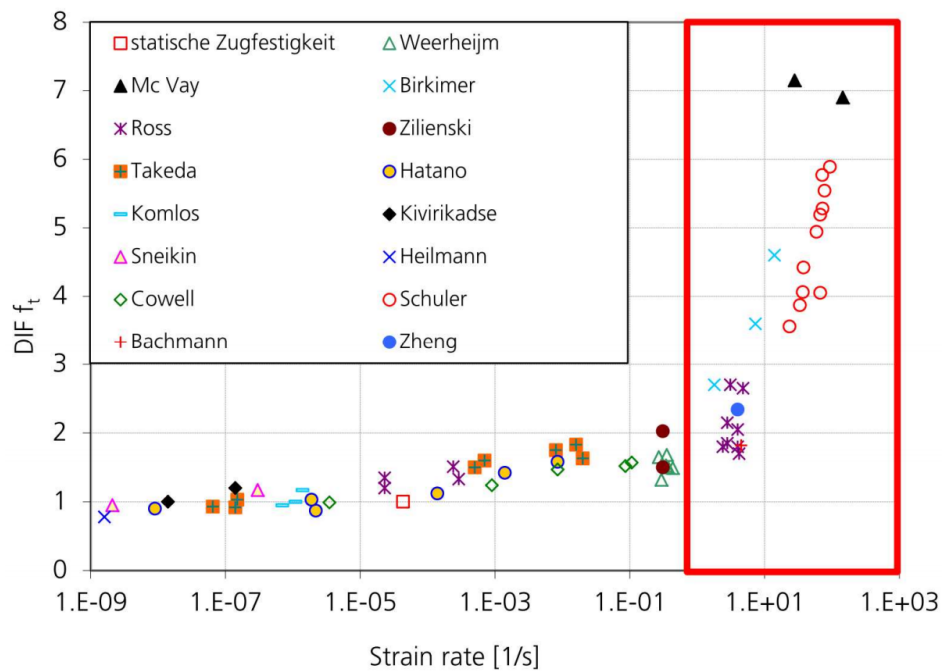
Yoo a kol. [17] zkoumali vliv způsobu ukládání vysokohodnotného betonu vyztuženého vlákny do forem na hodnoty tahových mechanických vlastností. Na obrázku 9 je znázorněna forma a různé způsoby ukládání čerstvého betonu. V levé části je beton ukládán pouze na jednu stranu formy, aby se do zbytku objemu dostal samovolným rozlitím. Vpravo je pak ukládání po velkých kusech do všech částí formy tak, aby k rozlití nedošlo. V obou případech byla použita přímá ocelová vlákna stejné délky i množství. Při kvazistatické rychlosti zatížení naměřili na vzorcích vybetonovaných prvním popsaným způsobem vyšší pevnost v tahu ohybem o 38% a absorbovanou energii o 26% pro průhyb $L/50$. Při rázovém zatížení absorbovaly vzorky pro první způsob betonáže výrazně více energie - až o 70%.



Obrázek 9: Způsob ukládání betonu do forem [17]

3 Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti betonu

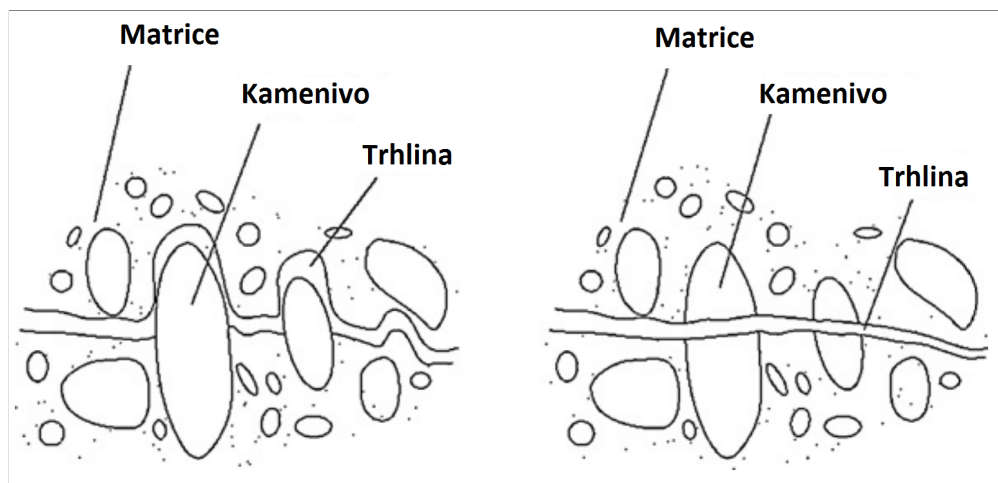
Mechanické vlastnosti betonu při různých rychlostech deformace byly v posledních letech předmětem mnoha výzkumů. Pro tlakovou pevnost se rychlost deformace projevuje minimálně. Nejvyšší rozdíly jsou pozorovány u pevnosti tahové, případně pevnosti v tahu ohybem. S tím souvisí i zvyšování absorbované mechanické energie [12]. V literatuře se obvykle pro porovnání mechanických vlastností zjištěných při různých rychlostech deformace používá koeficient dynamického nárůstu DIF. Ten je definován jako poměr hodnoty mechanické vlastnosti zjištěné při vyšší rychlosti zatížení ku stejné vlastnosti zjištěné při standardní kvazistatické rychlosti zatížení. Na obrázku 10 jsou ukázány koeficienty dynamického nárůstu pevnost v tahu v závislosti na rychlosti deformace (strain-rate), které zjistili různí autoři. Pro velmi vysoké hodnoty rychlosti deformace byly naměřeny extrémní nárůsty pevnosti v tahu. Jak ale bude vysvětleno dále, tyto výsledky pravděpodobně neodpovídají skutečným pevnostem materiálu při vysokých rychlostech deformace.



Obrázek 10: Hodnoty DIF zjištěné různými autory v závislosti na rychlosti deformace [18]

Ožbolt a kol. [19] ve své práci popisují, že odezva betonu se mění s rychlostí deformace v závislosti na třech faktorech. Prvním z nich je dotvarování materiálu mezi trhlinami. To se uplatní pouze u velice malých rychlostí deformace. Pro oblast středně vysokých rychlostí se nejvíce uplatní citlivost tvorby mikrotrhlin na rychlost deformace. Jedná se právě o oblasti pomalejších rázových zatížení, které jsou zkoumány v této práci. Wu a kol. [20] ve svých experimentech zjistili, že s rostoucí rychlostí deformace se trhliny šíří nejen oblastmi s nejnižší pevností (jako například tranzitní zónou), ale i skrz pevnější kamenivo. To je ilustrováno na obrázku 11. Ve stejné práci je uveden možný důvod tohoto jevu. Pokud je zatížení aplikováno velice rychle, není k dispozici dostatek času pro vytvoření tzv. pod-kritických poškození (například v tranzitní zóně) a trhliny jsou nuceny se šířit po kratších vzdálenostech, i skrz

pevnější oblasti. Velmi rychle se zvyšující napětí dále neumožňuje relaxaci materiálu a vzniká tak vyšší množství mikrotrhlin. Trhliny se také mohou od určité rychlosti šíření začít větvit. Kromě tahového způsobu rozevření trhliny (mód I) se zároveň více projevují i smyková porušení (módy II a III) [21]. To vše má za následek zvýšení pevnosti celého betonového prvku. Na vytvoření většího počtu trhlin je také nutno vykonat více práce, tudíž se zvyšuje absorbovaná mechanická energie.



Obrázek 11: Šíření trhliny v betonu, vlevo kvazistatické zatížení, vpravo vyšší rychlosti deformace [20]

Při vysokých hodnotách rychlosti deformace se dominantně uplatní třetí faktor vlivu na mechanické vlastnosti. Je to vliv setrvačných sil. Při kvazistatické rychlosti zatížení platí rovnováha sil. Externí síly působící na objekt musí být v rovnováze s externími reakcemi v podporách. Pokud těleso zatěžíme velice rychle, uplatní se dynamická rovnováha sil. V takovém případě již nejsou externí zatěžovací síly a externí reakce v rovnováze. V betonu totiž vlivem jeho porušování (změkčování) začnou působit vnitřní setrvačné síly proti externímu zatížení. Například u jednoosého tahu jsou pak hodnoty zatěžovací síly mnohem vyšší než reakce podpor. Ožbolt a kol. [19] zjistili, že od rychlosti deformace přibližně 10^1 s^{-1} se vnitřní setrvačné síly začnou projevovat velice výrazně a naměřené hodnoty pevností označují za pevnosti zdánlivé (neodpovídající pouze materiálovým vlastnostem). Na obrázku 10 se jedná o červeně vyznačenou oblast. U nižších rychlostí deformace pak hodnoty DIF popisují pouze chování materiálu.

Popsané faktory jsou velice důležité, protože většina zkušebních postupů pracuje s měřením síly při rázovém zatížení. Vyhodnocuje se pak pevnost v tahu a v tahu ohybem, lomová energie nebo absorbovaná mechanická energie (na základě měření síly a deformace zároveň). Pro používání čistě energetických přístupů v rázových zkouškách (jako v této práci) pak nejspíš poslední uvedený faktor působí jinak, nebo se neuplatňuje vůbec. Nebyla však dostupná literatura, která by se této problematice věnovala.

Působení vláken při různých rychlostech deformace se také mění. Z velké části to samozřejmě souvisí s chováním betonové matrice, ve které je vlákno zakotveno. Yoo a Banthia [12] ve své práci shrnuli různé poznatky z experimentů dalších autorů. Bylo například pozorováno, že příčná ocelová vlákna působí při vysokých rychlostech deformace lépe, protože vlákna s nepravidelnou geometrií se nevytahují, ale dochází k jejich přetržení. To značí vyšší odolnost proti jejich vytažení. Dále bylo zjištěno, že různé orientace vláken způsobují při rychlém dynamickém zatížení rozdílné porušení vzorků, které pak vykazují rozdílné chování.

Tai a kol. [22] ve své práci zjišťovali odolnost jednoho ocelového vlákna proti vytažení z betonové matrice. Použili přitom různé hodnoty rychlosti deformace (od 10^{-4} s^{-1} do 10^1 s^{-1}) a různé tvary vláken. Autoři použili vytahovací energii pro popis chování vlákna a DIF pro její srovnání při různých druzích zatížení. Nejvyšších hodnot DIF dosáhli u vláken přímých. Vlákna se složitější geometrií sice vykazovala vyšší absolutní hodnoty vytahovací energie, ale byla u nich pozorována nižší citlivost na rychlost deformace.

Xu a kol. [23] použili velmi podobný experimentální program pro ověření chování různých druhů vláken při rozdílných rychlostech deformace. Rychlost zatížení uvádějí jako délku vytažení vlákna za sekundu. Maximální hodnota v jejich práci je 25 mm/s. Narozdíl od výše uvedené práce zjistili nejvyšší hodnoty DIF pro vlákna se zahnutými konci. Hraje zde ale velkou roli použitý materiál, který byl v obou pracích jiný. To poukazuje na fakt, že působení vláken v betonu je velice závislé na betonové matici. Dále zkoumali vliv různé orientace vláken a došli k závěru, že vlákna odkloněná od směru zatížení o 20° mají vyšší citlivost na rychlost deformace než pro 0° a 45° .

4 Zkoušení vlákný vyztuženého betonu

4.1 Zkoušení jednotlivých vláken zakotvených v betonové matici

Před zjišťováním chování celého kompozitu je nejprve nutné experimentálně ověřit mechanické vlastnosti jednotlivých částí - vláken a betonové matrice. U vláken je důležitá znalost pevnosti v tahu (případně meze kluzu a modulu pružnosti), která se určí se zkoušky v jednoosém tahu. Zkušební přístroj je téměř totožný s přístrojem pro zkoušení tahových vlastností ocelových tyčí, jen je přizpůsoben mnohem menším vzorkům a měřeným veličinám. Příklad tahové zkoušky je na obrázku 12. Vlastnosti samotného betonu jsou pak zkoušeny standardními postupy.



Obrázek 12: Tahová zkouška samostatného vlákna [24]



Obrázek 13: Příklad vzorku pro vytahovací zkoušku [11]

Zakotvení jednoho vlákna v betonové matici a zkoumání mechanismů při jeho vytahování, které byly popsány v kapitole 2.3, jsou nejlépe analyzovány z vytahovacích zkoušek. Jejich provedení není upraveno normou, a proto různé laboratoře používají rozdílné metody. Nejčastěji se jedná o betonáž malých vzorků, do kterých je umístěno jedno vlákno tak, aby jeho jedna polovina vyčnívala ven. Příklad takového vzorku je na obrázku 13, kde je i vidět šikmé umístění vlákna pro experimentální ověření působení vláken různé orientace. Na obrázku 14 jsou příklady provádění vytahovacích zkoušek. Vlevo je vlákno přímo upevněno kleštinou zkušebního přístroje. Vpravo je pak na podobném přístroji zkoušen symetrický vzorek, kde jsou oba konce vlákna zakotvena v betonu.

Výsledkem vytahovací zkoušky je pracovní diagram - závislost vytahovací síly na posunu (vytažení) vlákna. Podle různých změn křivky pracovního diagramu je možné určit působení různých mechanismů, které byly zmíněny v kapitole 2.3. Na obrázku 14 je idealizovaný pracovní diagram pro vytahování přímého ocelového vlákna. Nejprve křivka nelineárně roste (kvůli postupné ztrátě adheze). Poté dosáhne bodu, kde je dosaženo maximální vytahovací síly a kde dojde k úplné ztrátě adheze. Dále působí pouze třecí prokluz. Křivka (a) značí ideální tření, (b) třecí změkčení, kdy dochází například k poškození betonové matrice vlivem vytahování vlákna, a (c) třecí zpevnění způsobené například poškozováním (zdršňováním) povrchu vlákna v průběhu vytahování, což zvyšuje tření mezi betonem a vláknem [5].

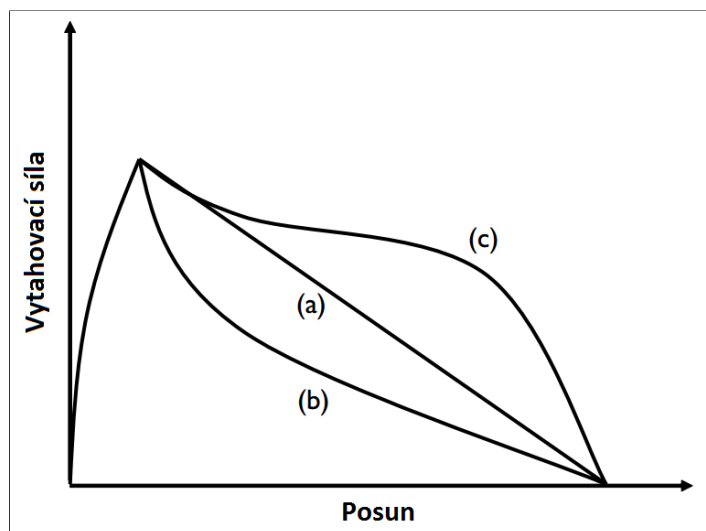


(a) [25]



(b) [26]

Obrázek 14: Příklady konfigurace vytahovací zkoušky



Obrázek 15: Idealizované pracovní diagramy vytahování vlákna [5]

4.2 Zatížení rázem

Neexistuje pouze jedna zkušební metoda, pomocí které by mohl být beton zkoušen při všech možných hodnotách rychlosti deformace - tedy od 10^{-6} s^{-1} (kvazistatické zatížení) do přibližně 10^6 s^{-1} (výbuch). Tudíž je velmi sporné, jestli jsou hodnoty mechanických vlastností zjištěných při různých rychlostech deformace funkcemi čistě rychlosti deformace, nebo i (a z jaké části) dalších proměnných vycházejících ze zkušebního postupu. Ani pro jednu konkrétní rychlost deformace (vyšší než kvazistatickou) zatím neexistuje jedna dohodnutá, případně normová zkušební metoda. Nejistota vlivu zkušebního postupu na získané výsledky je jedním z důvodů tohoto stavu. Cílem je nalezení takové metody, u které žádné nejistoty ze zkreslování výsledků nebudou, nebo bude řádně popsán jejich konkrétní vliv. Porovnávání výsledků z různých laboratoří je dále problematické z důvodu zkoušení jiných betonových směsí. V neposlední řadě pak stále není jasné, jaká veličina by vlastně měla charakterizovat odolnost vlákný vyztužených betonů proti rázům [5]. V této práci je dílčím cílem zhodnocení na základě provedených experimentů, jestli absorbovaná mechanická energie je veličinou vhodnou.

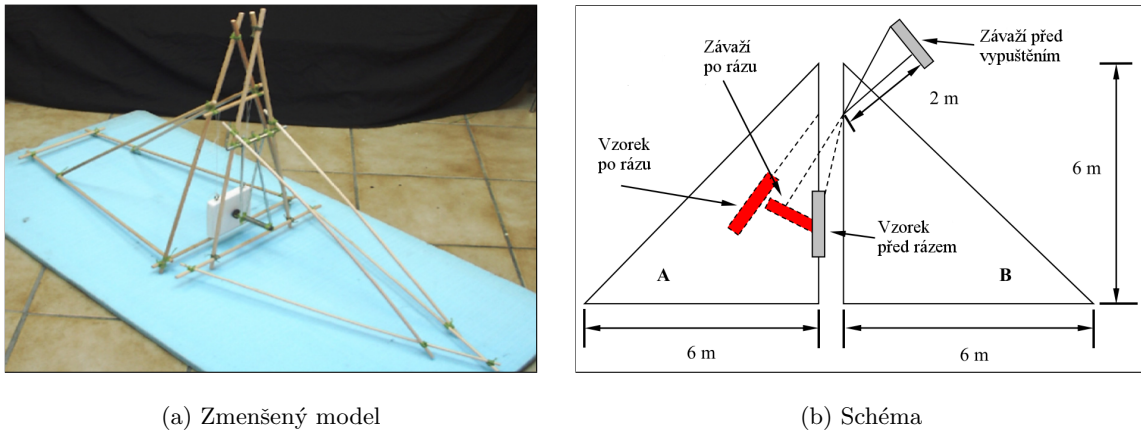
V práci [1] byly podrobněji popsány některé přístroje a metody, které se používají ve světě. V zásadě se jedná o několik základních principů, na kterých zkušební přístroje a metody fungují. Jednotlivá pracoviště je pak pro své experimenty používají různě pozměněné, ale v jádru stejné. Pro shrnutí je uveden pouze jejich stručný přehled:

- a) Jednoduché konstrukce, kde na zkoušený vzorek (trámek) kolmo dopadá závaží (v literatuře označováno jako drop weight impact). Mají většinou podobné uspořádání jako tříbodová zkouška v tahu ohybem [27].
- b) Zatěžování čtvercových desek dopadem závaží do jejich středu [28].
- c) Split Hopkinson bar - přístroj umožňující vyvolat jednoosý tah, tlak nebo kroucení při vysokých rychlostech zatížení [29, 30].
- d) SEFIM (strain energy frame impact machine) - Na jeho vylepšené variantě je možné měřit potřebné veličiny v reálném čase a tedy získat celý pracovní diagram rázové zkoušky při vysokých hodnotách rychlosti deformace (až 200 s^{-1}) [31].
- e) Různě uchycené betonové vzorky, do nichž jsou velmi rychle vystřelovány různé projektily [13, 32].
- f) Nárazové zkoušky - například pro testování různých zábran proti nárazu vozidlem [33].
- g) Rázová kyvadla - na jednom z nich jsou provedeny experimenty v této práci. Jeho podrobný popis je v kapitole 5.2.
- h) Vysokorychlostní kamera (fotoaparát) je také důležitou pomůckou pro zkoumání chování nejen betonu při vysokých rychlostech zatížení. Pomocí ní lze sledovat například vznik a vývoj trhlin. Obzvláště přínosné je, pokud je záznam časově spárován například s pracovním diagramem. Vysokorychlostní kamera je obvykle součástí jiné, výše uvedené metody provedení rázové zkoušky.

Jednomu konkrétnímu rázovému kyvadlu bude věnován následující text, neboť sloužilo jako inspirace pro zkušební postup uplatněný v této práci. Jedná se o přístroj, který použili pro své experimenty Yu a kol. [15] pro zkoumání absorpce mechanické energie vysokohodnotným betonem vyztuženým různými vlákny. Pro malé vzorky vyztužené krátkými přímými vlákny využili již zavedeného zkušebního přístroje - Charpyho kladiva. Autoři ale sami uvádějí nevhodnost použití tohoto přístroje pro zkoušení betonu právě z důvodu nemožnosti použití velkých vzorků. Sestavili tedy rázové kyvadlo, na kterém zkoušeli desky o rozměrech $500 \times 500 \times 100 \text{ mm}^3$. Jejich přístroj je na obrázku 16.

Hlavní specifikum tohoto rázového kyvadla je uchycení vzorku na lanech tak, že není bráněno jeho pohybu v ose zatížení. Z toho pak vychází i relativně netradiční způsob měření, kdy se pomocí video záznamu měří pouze rychlosti závaží a vzorku před a po rázu. Vyhodnocení jednoho rázu je provedeno pomocí bilance kinetických energií. Předpokládá se, že vzorek vydrží rázů několik. Po rázu posledním, tedy až dojde k rozlomení vzorku, se absorbované mechanické energie pro jednotlivá měření sečtou a dostaneme energii výslednou. Jedná se tedy o čistě energetický přístup k určení chování vlákny vyztužených betonů - podobně jako u Charpyho kladiva zkoušíme kovy. Autoři však nezavádí diskusi o přesnosti jejich měření.

Jak již bylo řečeno, práce Yu a kol. [15] byla z části inspirací pro experimentální program této diplomové práce. Z toho důvodu nejsou jejich způsoby měření a vyhodnocení podrobněji uvedeny v této kapitole, ale budou (v kapitole 5.3) rovnou do detailu popsány postupy zvolené pro tuto práci, protože jsou téměř identické.



(a) Zmenšený model

(b) Schéma

Obrázek 16: Rázové kyvadlo použité Yu a kol. [15]

4.3 Kvazistatické zatížení

Nedílnou součástí zkoumání odezvy materiálů na zatížení rázem, je znalost chování těchto materiálů při zatížení kvazistatickém. Jedná se o základní mechanické parametry, jako jsou například pevnosti v tahu a v tlaku nebo modul pružnosti. Dále, zvláště u betonů vyztužených vlákny, je důležité znát například lomovou energii na trámcích se zářezem nebo množství absorbované mechanické energie na trámcích bez zářezu. Obecně znalost vlastností zjištěných při kvazistatické rychlosti zatížení umožňuje mnohem lepší pochopení chování materiálu při zatížení rychlostí vyšší.

Podle normy ČSN EN 14488-5 [34] se zkouší deskové prvky z vlákniny vyztužených stříkaných betonů pro aplikace v tunelech a určuje se množství absorbované energie. ČSN EN 14488-3 [35] pak popisuje zkoušení trámku ze stejného materiálu pro určení ohybové únosnosti (pevnosti - při vzniku trhliny, mezní a zbytkové). Tato zkouška je provedena stejným čtyřbodovým ohybem, který popisuje ČSN EN 12390-5 [36] pro určení pevnosti v tahu ohybem nevyztuženého betonu. Dále ČSN EN 14488-3 určuje měření průhybu pomocí přesných snímačů dráhy umístěných na ocelovém přípravku připevněném na vzorku. České normy nepopisují zkušební a vyhodnocovací postupy pro množství absorbované mechanické energie (ohybové houževnatosti) vlákniny vyztuženými betonovými trámkami.

V zahraničí existuje několik norem, standardů či doporučení, které se touto problematikou zabývají. V literatuře je nejčastěji odkazováno na normu ASTM C1609 [37] a standard JSCE-G 552 [38], případně starší JSCE SF4 [39]. Všechny postupy předepisují konfiguraci čtyřbodového ohybu se zatížením ve třetinách rozpětí. Dovolené rozměry vzorků se různí. Základem vyhodnocení je vždy pracovní diagram ohybové zkoušky. Japonské standardy předepisují určení pevnosti v tahu ohybem a faktoru ohybové houževnatosti pro konkrétní hodnotu průhybu. Je to vlastně energie absorbovaná do konkrétní zvolené hodnoty průhybu (nejčastěji L/150) vztahovaná na průřezový modul vzorku a jeho rozpětí. Přílišná jednoduchost takového postupu však dostatečně nepopisuje průběh pracovního diagramu [9].

ASTM C1609 používá mírně složitější přístup, kdy předepisuje výpočet několika parametrů. Těmi jsou maximální dosažená síla, průhyb při dosažení maximální síly, síla a napětí při průhybu L/150 a L/600, absorbovaná mechanická energie do průhybu L/150 a koeficient zbytkové pevnosti. Je tak popsáno mnohem více parametrů než u JSCE standardů, takže je podáno více informací o průběhu pracovního diagramu. Zkouška by však měla být provedena s velmi malou rychlostí zatěžování, aby nedocházelo k nestabilním poklesům sil ihned po dosažení pevnosti betonové matrice. To se týká buď velmi slabě vyztužených vzorků, nebo vysokopevnostních betonů [9, 40].

Pro získání pracovních diagramů při zatížení ohybem u kvazistatické rychlosti byla pro tuto práci zvolena podoba zkoušky odpovídající všem uvedeným normám. Její konkrétní podoba je tedy popsána až v kapitole 5.4.

5 Experimentální program

5.1 Materiál

Dále popsané mechanické vlastnosti byly zkoumány na vysokohodnotném betonu vyztuženém vlákny. Jedná se o běžný vysokohodnotný beton. V jeho složení se nachází směs jemnozrnných písků, cement, voda, superplastifikátor, křemičitý úlet a vlákna. Všechny složky směsi, kromě vody a vláken, byly předem připraveny v podobě pytlované suché směsi. Příprava čerstvého betonu probíhala mícháním suché směsi s dávkou vody po dobu 5 minut, po které byla přidána vlákna a míchání pokračovalo dalších 5 minut. Následovalo ukládání do forem, vibrace a zakrytí forem plastovou fólií, aby nedocházelo k nadměrnému vysychání. Po 24 hodinách došlo k odbednění a vzorky byly umístěny do uzavřeného boxu, v němž byla udržována vysoká vlhkost. Tam byly ponechány do doby zkoušení, minimálně 27 dní. Neproběhlo žádné speciální ošetřování betonu, jako například tepelné nebo tlakové. Materiál a postup byl tedy stejný jako v práci [1].

Použita byla přímá, vysokopevnostní (2800 MPa), hladká ocelová vlákna o rozměrech $13 \times 0,14 \text{ mm}^2$. V minulé práci [1] byly vzorky vyztuženy pouze 2% vláken, jelikož se tato hodnota jeví jako optimální pro dosažení požadovaných mechanických vlastností. Ještě vyšší procenta vyztužení u použitého kompozitu vykazují problém se vzájemným ovlivňováním vláken. Už při 2% vyztužení je pozorováno výrazné zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu, což v důsledku znamená snížení samozhutnitelných vlastností, tvorbu velkých pórů a téměř nemožné cílené orientování vláken pomocí proudění ukládaného betonu. V ideálním případě by bylo nutné pro každé procento vyztužení upravit množství kameniva ve směsi. Protože však byla použita připravená suchá směs, bylo možné měnit pouze dávku záměsové vody. Na základě zkušeností se zpracovatelností byl pro 2% vyztužení zvýšen vodní součinitel také o 2%. Dochází tedy ke kompromisu, kdy na jedné straně stojí dobrá zpracovatelnost a na straně druhé co nejmenší vodní součinitel, který ve finále ovlivní mimo jiné tranzitní zónu okolo vláken a jejich odolnost proti vytažení.

Pro tuto práci bylo zvoleno 2% vyztužení jako maximální a dále byly vybetonovány vzorky vždy s polovičním zastoupením vláken, tedy s 1%; 0,5%; 0,25% a 0,125%. Pro porovnání byly vybetonovány i nevyztužené vzorky. Zvýšení vodního součinitele proběhlo pouze u směsi s 2% vláken, protože u nižších procent bylo dosaženo mnohem lepších zpracovatelností i s použitím nezvýšeného vodního součinitele.

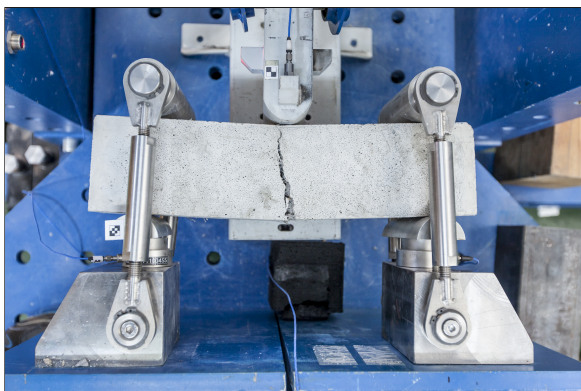
Všechny experimenty byly provedeny na trámčích o rozměrech $100 \times 100 \times 550 \text{ mm}^3$. Jedná se o delší trámky než ty, které byly použity v předchozí práci [1]. Motivací pro tuto změnu byla nedostatečná tuhost nárazníku původního rázového kyvadla, což bude vysvětleno v následující kapitole 5.2. Kromě zesílení onoho nárazníku se logicky nabízelo použití méně tuhých vzorků - tedy na větší rozpětí. Již vybetonované vzorky se ale jevily vhodné i pro novou podobu rázového kyvadla, kde je velmi důležitá jejich větší setrvačnost. To v praxi znamená, že se vzorek snadněji poškodí při určité výšce vypuštění závaží rázového kyvadla. Menší výška vypuštění zase znamená snadnější, ale i přesnější, provedení rázové zkoušky. Této problematice bude věnováno podrobnější vysvětlení v závěru práce. Pro kvazistatickou rychlost zatížení byly vyzkoušeny vzorky stejné, aby mohly být lépe porovnány získané mechanické vlastnosti.

5.2 Rázové kyvadlo

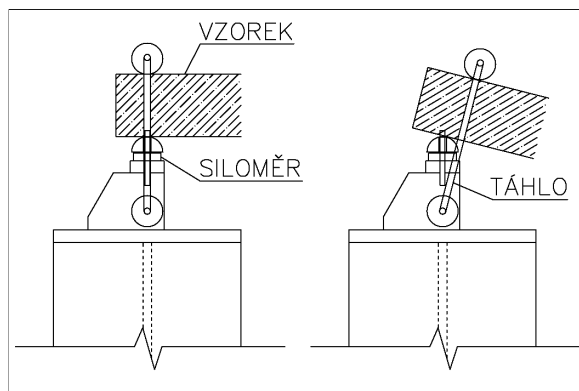
5.2.1 Nedostatky původní konstrukce - důvody změny

Základní konstrukce rázového kyvadla, na kterém proběhly rázové zkoušky, je stejná jako v práci [1]. Pro tuto diplomovou práci byla však část přístroje pozměněna. Důvody této změny jsou obsahem této kapitoly. Původně byla konfigurace zkoušky téměř totožná s tříbodovou zkouškou v tahu ohybem. Dva siloměry, od sebe osově vzdálené 300 mm, tvořily podpory vzorku. K těmto podporám pak byl vzorek zafixován pomocí mechanismu, který je uveden na obrázku 17 a na schématu 18. Předpoklad byl, že s takovým upevněním se jedná o prostý nosník, a tudíž je možné přímo srovnat rázovou zkoušku se zkouškou při kvazistatické rychlosti zatížení u tříbodového ohybu na klasickém lisu. Takový předpoklad prostého nosníku byl ale mylný, neboť docházelo k jisté plastické deformaci tohoto upevnění, což značí nemožnost volného pootočení vzorku v upevnění, případně jeho vodorovném posunu u jedné z podpor. Upevnění tedy nutně absorbovalo jistou část energie, kterou bylo prakticky nemožné vyčíslit. Jedná se proto o určitou neznámou, která ovlivňuje výsledky dosažené touto zkouškou.

Návrhy nového upevnění vzorku, které by velice málo bránilo požadovanému posunu a pootočení, vedly ke složitým mechanismům. Opět by zůstávala nezodpovězena otázka vlivu jakéhokoliv upevnění vzorku na přesnost měření a chování vzorku při rázu. Nový zkušební postup musel být nutně odproštěn od těchto nejistot, aby bylo možné se přiblížit stanovenému cíli - vytvoření univerzálního zkušebního postupu pro testování odolnosti na rázové zatížení.



Obrázek 17: Původní uložení vzorku a konfigurace rázové zkoušky



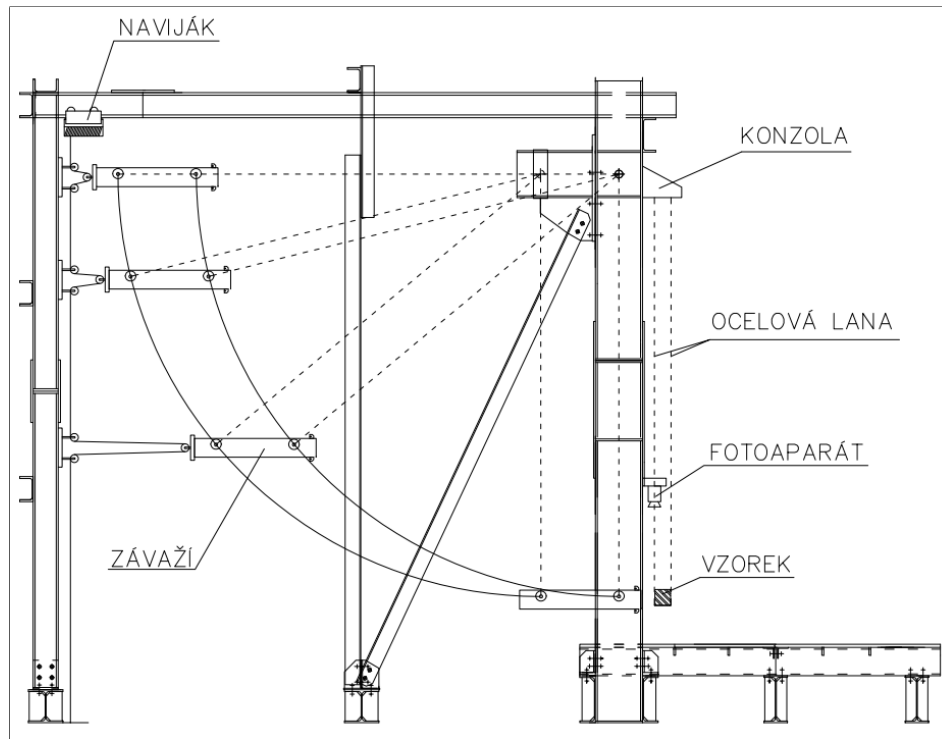
Obrázek 18: Původní mechanismus zafixování vzorku k silůměrům

Další motivací změny zkušebního přístroje je fakt, že bylo možné měřit pouze průběh reakcí v čase, respektive odečíst jejich maximální hodnotu. Pokud by měla být měřena i absorbovaná mechanická energie jako práce vykonaná vnější silou na určitý posun (průhyb) vzorku v místě působení této síly, vzniká problém. Měření průhybu v polovině rozpětí teoreticky možné je, například nalepením piezo akcelerometru do tohoto místa a dvojitou integrací získaného zrychlení. Vzniká však praktický problém, kdy rázová vlna procházející vzorkem je příliš silná a ani pevné lepidlo neudrží akcelerometr na vzorku po celou dobu zkoušky. Může také nastat situace, kdy vzniklá trhlinka prochází přímo místem, kde je umístěn akcelerometr, a ten se opět neudrží na vzorku. V neposlední řadě je problém v měnící se geometrii vzorku. Akcelerometr musí měřit po celou dobu rázu zrychlení ve stejné ose jako je směr

pohybu závaží. Toto ale není nalepeným akcelerometrem možné, protože rozevřící se trhlina na vzorku znamená, že akcelerometr se ocitne na jedné polovině rozlamujícího se vzorku, a tudíž se jeho osa měření bude odklánět od osy pohybu závaží.

Pokud by se i tak podařilo tyto problémy vyřešit, je zde další otázka samotného výpočtu vykonané práce. Při takto rychlém zatížení vzorku je nutné brát v úvahu dynamickou podstatu celé zkoušky, konkrétně konečnou rychlost šíření mechanické vlny v betonu. Síla změřená siloměry v podporách vzorku v jednom časovém bodě totiž neodpovídá síle, kterou ve stejný časový bod působí závaží na vzorek (podle klasické rovnováhy sil). Výpočet vykonané práce (síla vynásobená posunem) však nutně musí být učiněn pro síly a posuny ve stejném časovém bodě. Vzniká tedy problém, jak naměřené síly a průhyb (který i tak měřit bude velice obtížné) časově spárovat. Při takto výrazně dynamickém jevu je zde i otázka setrvačnosti vzorku, která nutně musí do celkového výpočtu absorbované mechanické energie vstoupit.

V neposlední řadě je velmi důležité zmínit vliv nárazníků rázového kyvadla. Jedná se o tu část konstrukce, ke které jsou připevněny mechanismy uchycení vzorků, a která má za úkol absorbovat zbylou energii nárazu. Zkouška tedy probíhala tak, že již při probíhající rázu docházelo k absorpci mechanické energie všemi částmi rázového kyvadla spojenými se vzorkem. To znamená, že velmi záleželo na tuhosti těchto částí, aby jejich deformace, případně rozkmitání, výrazně neovlivnili měření. Jednalo se však opět o neznámý vstup, který byl velmi těžce kvantifikovatelný, a nešlo jednoznačně určit jeho konkrétní vliv na přesnost měření. V následující kapitole bude vysvětleno, jak toto bylo s novou konstrukcí rázového kyvadla vyřešeno.



Obrázek 19: Aktuální schéma celého rázového kyvadla



(a)

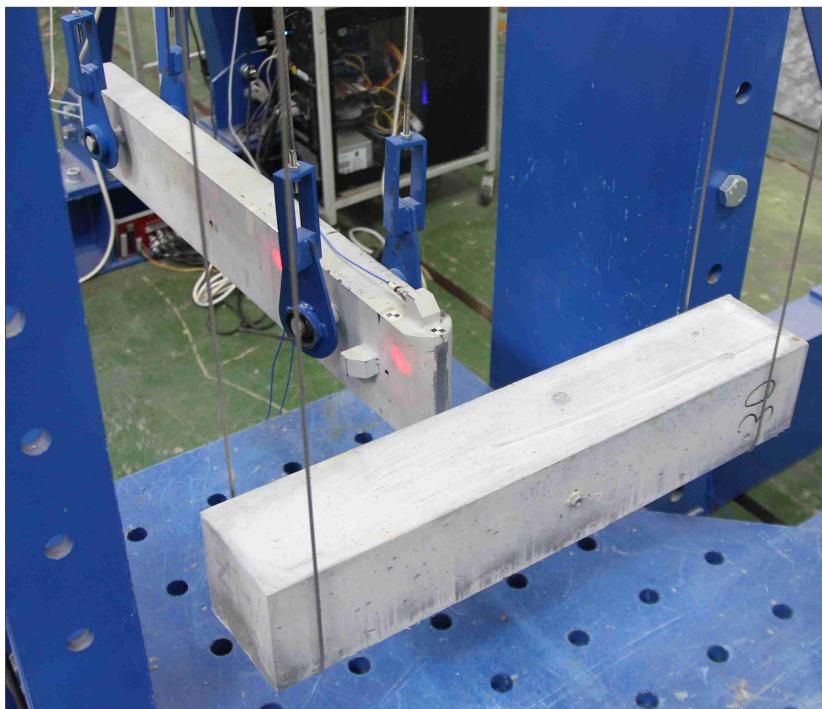
(b)

Obrázek 20: Aktuální podoba celého rázového kyvadla

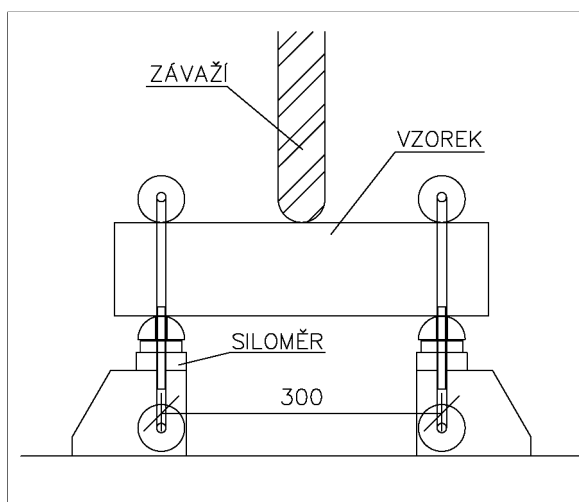
5.2.2 Nová konstrukce

Kvůli výše popsaným problémům a relativně složité konstrukci upevňovacího mechanismu, ze kterého pramení jisté nejistoty dosažených výsledků, bylo rázové kyvadlo přestavěno do podobné konfigurace rázové zkoušky, jako té uvedené v kapitole 4.2. Kompletně tedy došlo k odstranění konstrukce podpor. K rázovému kyvadlu v místě zavěšení závaží byla připevněna ocelová konzola. K té jsou připevněna dvě ocelová lanka pomocí závitových tyčí na jejichž koncích. Lanka tedy tvoří jakési dva třmeny, do kterých je betonový vzorek pouze volně položen. Lépe to ilustruje schéma na obrázku 19 spolu s obrázky 20 a 21, kde je nová konstrukce rázové kyvadla vyobrazena. Obrázky 22 a 23 pak ukazují srovnání upevnění vzorku před a po změně. Úmyslně není uvedena vodorovná vzdálenost mezi místy, kde lanka drží vzorek. Nejedná se totiž o podpory, ve kterých by rázem byla vyvolána nějaká silová reakce v klasickém pojetí. Ohybová tuhost lanek se zanedbává. Pouze setrvačnost hmoty sa-

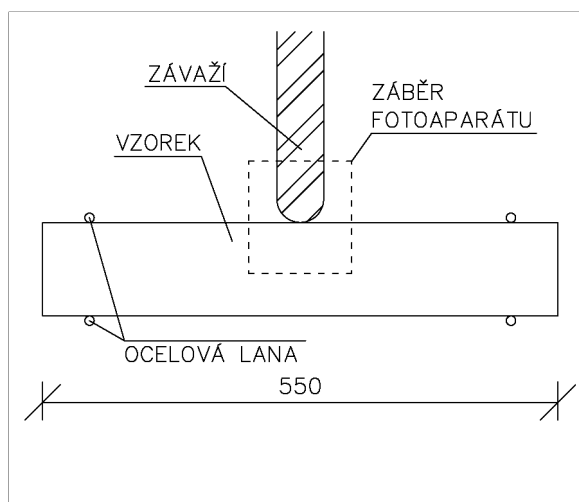
motného vzorku hraje roli v jeho porušení. Z toho důvodu je tedy poloha lanek nedůležitá, a naopak je jimi posunováno tak, aby v klidové poloze byl vzorek přesně kolmo k zatěžovacímu závaží a to dopadalo přesně na střed vzorku. Po provedení rázu by pak vzorek měl konat pouze pohyb směrem od zatěžovacího závaží. Vzorek by neměl konat žádné rotační pohyby, které by značily, že závaží nedopadlo přesně do hmotného středu vzorku.



Obrázek 21: Detail polohy vzorku a závaží v klidové poloze



Obrázek 22: Původní uložení vzorku



Obrázek 23: Nové uložení vzorku

Tato nová podoba rázového kyvadla a prováděných zkoušek je daleko méně citlivá na tuhost celé konstrukce. V minulé kapitole bylo uvedeno, že části původního rázového kyvadla byly určené k absorpci zbylé energie rázu. Tato absorpce ale probíhala již během měření odezvy vzorku na rázové zatížení. U nové konstrukce je princip měření zcela odlišný. Měří se jen ve velice krátkém časovém okamžiku, začínajícím těsně před rázem a končícím těsně po rázu. V tomto intervalu jsou závaží a vzorek spojeny se zbytkem konstrukce pouze pomocí dlouhých ocelových lan u kterých se předpokládá, že zanedbatelně brzdí jejich pohyb (neabsorbují mechanickou energii). Během krátkého okamžiku měření tak můžeme vzorek a závaží považovat za izolovanou soustavu. Zbylé mechanické energie závaží a vzorku mohou být absorbovány libovolným způsobem relativně velice dlouho po provedeném rázu, například jejich pouhým ručním zachycením.

5.3 Zatížení rázem

5.3.1 Metoda vyhodnocení rázové zkoušky

V této kapitole je popsán princip, na jehož základě je z rázové zkoušky získána vzorkem absorbovaná mechanická energie. Úmyslně je uveden před samotným popisem měření, neboť i tak probíhal návrh experimentálního programu. Nejdříve byla známa teorie vyhodnocení, až poté byl stanoven vhodný postup provedení zkoušky a měření potřebných veličin.

Při zatížení rázem byla absorbovaná mechanická energie zjišťována z bilance kinetických energií. Jedná se o stejný postup, jaký byl nastíněn v kapitole 4.2, a který při svém měření použili Yu a kol. [15]. Jak bylo uvedeno v kapitole 5.2, zkoušený vzorek je v rázovém kyvadle volně zavěšen. Bráněno je pouze svislému pohybu dolů (kolmo na směr pohybu závaží). Na začátku zkoušky je závaží zdviženo do určité výšky a je mu tudíž udělena jistá potenciální energie. Jedná se o jediný energetický vstup do celé zkoušky. Po vypuštění začne závaží volně padat a tato potenciální energie se začne měnit z většiny na energii kinetickou ale i na ztráty způsobené třením a odporem vzduchu. Těsně před prvním kontaktem se vzorkem je závaží v nejnižší poloze své trajektorie a má tudíž nulovou potenciální a maximální kinetickou energii, tedy maximální rychlost. Vektor rychlosti závaží je v tomto časovém bodě kolmý na dopadovou plochu vzorku, který je zatím v klidu. Prvním kontaktem vzorku a závaží začíná výměna mechanické energie, tedy ráz. Ten trvá velmi krátkou dobu a končí odražením vzorku od závaží. Těsně po rázu má pak vzorek svojí maximální rychlost a závaží pokračuje ve svém pohybu s určitou zbytkovou rychlostí. Nedochází tedy ke kolapsu vzorku. Cílem je jeden trámek vystavit určité sérii rázů než dojde k jeho finálnímu rozlomení na dvě části. Na základě znalosti hmotností závaží a vzorku pak rychlosti můžeme přepočítat na kinetické energie pomocí známého vztahu:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Porovnáním součtu kinetických energií vzorku a závaží před a po rázu zjistíme, že po rázu je součet menší. Jedná se tak o nedokonale pružný ráz, tedy že při samotném rázu se úbytek kinetické energie závaží nepřeměnil čistě na kinetickou energii vzorku, ale došlo k určité ztrátě. Předpokládá se, že tato ztráta je energie deformace vzorku, což je hledaná absorbovaná mechanická energie. Do této

ztráty samozřejmě spadá i energie deformace závaží, případně jiné formy energie jako například energie tepelná z tření mezi závažím a vzorkem. Tyto ostatní ztráty se však zanedbávají. Z takto definovaného rázu můžeme zapsat bilanci energií:

$$E_{ai} = E_z - E_v - E_{zb} \quad (2)$$

kde: E_{ai} : dílčí absorbovaná mechanická energie
 E_z : kinetická energie závaží před rázem
 E_v : kinetická energie vzorku po rázu
 E_{zb} : kinetická energie závaží po rázu (zbytková)

Dále můžeme dosadit za kinetické energie pomocí vztahu 1 a dostaneme:

$$E_{ai} = \frac{1}{2}m_z v_z^2 - \frac{1}{2}m_v v_v^2 - \frac{1}{2}m_{zb} v_{zb}^2 \quad (3)$$

Rychlost nebyla měřena přímo, ale pomocí analýzy snímků z videa pořízeného vysokorychlostním fotoaparátém. Předchozí rovnici proto můžeme ještě upravit:

$$E_{ai} = \frac{1}{2}m_z (d_z f)^2 - \frac{1}{2}m_v (d_v f)^2 - \frac{1}{2}m_{zb} (d_{zb} f)^2 \quad (4)$$

kde: d : rozdíl polohy zaměřeného bodu mezi dvěma snímky v metrech
 f : nastavená snímkovací frekvence fotoaparátu

Celková vzorkem absorbovaná mechanická energie ze všech rázů je pouhým součtem dílčích energií z jednotlivých rázů:

$$E_a = \sum_{i=1}^n E_{ai} \quad (5)$$

5.3.2 Postup měření

Výše popsaná bilance je aplikovatelná pouze v případě, že vzorek po rázu zůstane celistvý. Není tedy možné vypustit závaží z velmi vysoké výšky aby nový vzorek, na kterém nebyl proveden žádný ráz, zkolaboval při prvním rázu, neboť tento ráz nelze uvedeným způsobem vyhodnotit. Z toho vyplývá, že přesnost měření jednoho vzorku přímo souvisí s počtem rázů, kterým je vystaven. Vzhledem k relativní složitosti a časové náročnosti vyhodnocení jednoho rázu jich však není možné provést vysoký počet. Pro tuto práci bylo zvoleno alespoň 10 rázů na každý vzorek. Tedy aby nejdříve při 10. rázu došlo ke kolapsu vzorku. Tento ráz tedy nebude vyhodnocen a tudíž energie absorbovaná při posledním rázu se nezapočte do celkové energie. Nepředpokládalo se, že by toto způsobilo velikou nepřesnost měření, viz kapitoly 7.1.4 a 7.1.5.

Hmotnost zatěžovacího závaží (37 kg) byla po celou dobu zkoušení konstantní. Pro změnu energie dopadu závaží se musela měnit jeho výška vypuštění. Ta byla volena od 5 cm do 50 cm čistě pro účel provedení minimálního počtu rázů na jeden vzorek, tedy 10. Pro vzorky s 2% vláken by byla výhodnější výška vypuštění alespoň 100 cm. To ale nebylo z praktického hlediska možné, neboť by bylo velice obtížné pro obsluhu rázového kyvadla po rázu bezpečně zastavit vzorek a závaží. Průměrný počet rázů pro vzorky s 2% vláken byl tedy 20. Výška vypuštění nebyla při zkoušení jednoho vzorku konstantní, ale byla operativně snižována pokud bylo podezření (na základě pozorování šířky hlavní trhliny), že vzorek již nevydrží stanovený minimální počet rázů. Rozdíl rychlosti deformace pro minimální a maximální výšky vypuštění závaží se zanedbal. Dopadová rychlost je při výšce vypuštění 5 cm pouze přibližně 3× nižší než pro výšku 50 cm. Mechanické vlastnosti se však v oboru rázových zatížení mění až s řádovými rozdíly rychlosti deformace.

Měření odezvy vzorku při rázu probíhalo primárně záznamem videa pomocí digitálního fotoaparátu s možností nastavení snímkovací frekvence až 600 snímků za sekundu. Na horní stranu vzorku k místu dopadu závaží byla nalepena papírová značka o přesných rozměrech. Podobná značka byla nalepena i na závaží na jeho horní stranu co nejbliže ke vzorku. Fotoaparát byl nastaven tak, aby snímал pouze oblast, kde se tyto značky budou pohybovat. Tedy aby bylo docíleno maximálního rozlišení vzhledem k použité snímkovací frekvenci, ale zároveň nebyl obraz rozmazaný z moc velkého přiblížení. Jinými slovy fotoaparát musel být nastaven tak (přiblížení, doba expozice a snímkovací frekvence), aby bylo dosaženo kompromisu mezi ostrotí obrazu, dostatečnou snímkovací frekvencí a rozlišením. Oblast snímání také musela být nasvícena silným zdrojem světla.

Na závaží a do středu strany vzorku opačně ke straně, na kterou dopadalo závaží, byly navíc připevněny piezoelektrické akcelerometry. Těmi bylo měřeno pouze prvních několik rázů, aby byl lépe zdokumentován okamžik předání mechanické energie. Pozdější rázy měřeny nebyly z důvodu zvyšující se nepřesnosti měření akcelerometrem na vzorku kvůli jeho odchylování se od osy pohybu vzorku (viz třetí odstavce v kapitole 5.2.1). Dále se hlavně u posledních rázů neměřilo akcelerometrem na vzorku, protože hrozilo jeho poškození kolabujícím vzorkem. Záznam hodnot probíhal s frekvencí 500 kHz. Tímto měřením bylo zjištěno několik skutečností uvedených v kapitole 6.2.2.

Po každém rázu byly také měřeny šířky trhlín. Do šířky 2 mm pomocí trhlinového mikroskopu, do 5 mm přílohou měrkou a dále pravítkem. Zpracovány byly ke každému vzorku závislosti absorbované mechanické energie na šířce trhlín. Význam těchto závislostí je uveden v kapitole 6.2.1.

5.4 Kvazistatické zatížení

Pro zjištění absorbované mechanické energie při kvazistatickém zatížení byla použita zkouška pevnosti v tahu ohybem. Ta proběhla v konfiguraci čtyřbodového ohybu, kdy zatížení působilo ve třetinách rozpětí, které bylo zvoleno 450 mm. Průhyb byl měřen k hornímu povrchu vzorku pomocí dvou optoelektrických inkrementálních snímačů (s odměřovací jednotkou 1 μm) umístěných na obou stranách vzorku. Jejich měření bylo zprůměrováno na průhyb výsledný. Snímače byly ke vzorku přichyceny pomocí ocelového přípravku, který je vidět na obrázku 24. Schéma zkoušky je na obrázku 25. Měření probíhalo až do maximálního rozsahu snímačů průhybu, téměř k úplnému porušení vzorků. Zatěžovací píst se pohyboval rychlostí 0,3 mm/min a data byla získávána s frekvencí 10 Hz. Výpočet absorbované mechanické energie z křivky pracovního diagramu probíhal její numerickou integrací podle vztahu:

$$E_a = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta_{i-1}) \left[\frac{F(\delta_{i-1}) + F(\delta_i)}{2} \right] \quad (6)$$

- kde: E_a : celková absorbovaná mechanická energie
 δ_i : průhyb v bodě i
 $F(\delta_i)$: síla odpovídající průhybu v bodě i
 i : pořadí bodu v pracovním diagramu
 n : počet naměřených bodů pracovního diagramu

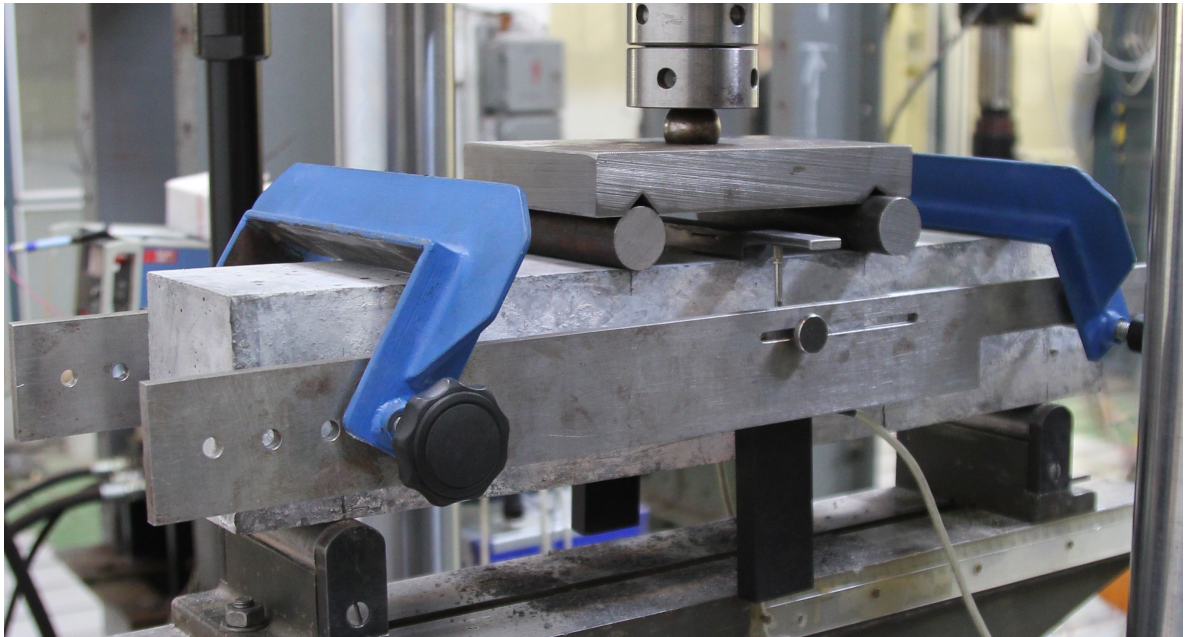
Samotná pevnost v tahu ohybem byla vypočtena ze vztahu:

$$f_{cf} = \frac{F_{max}L}{bh^2} \quad (7)$$

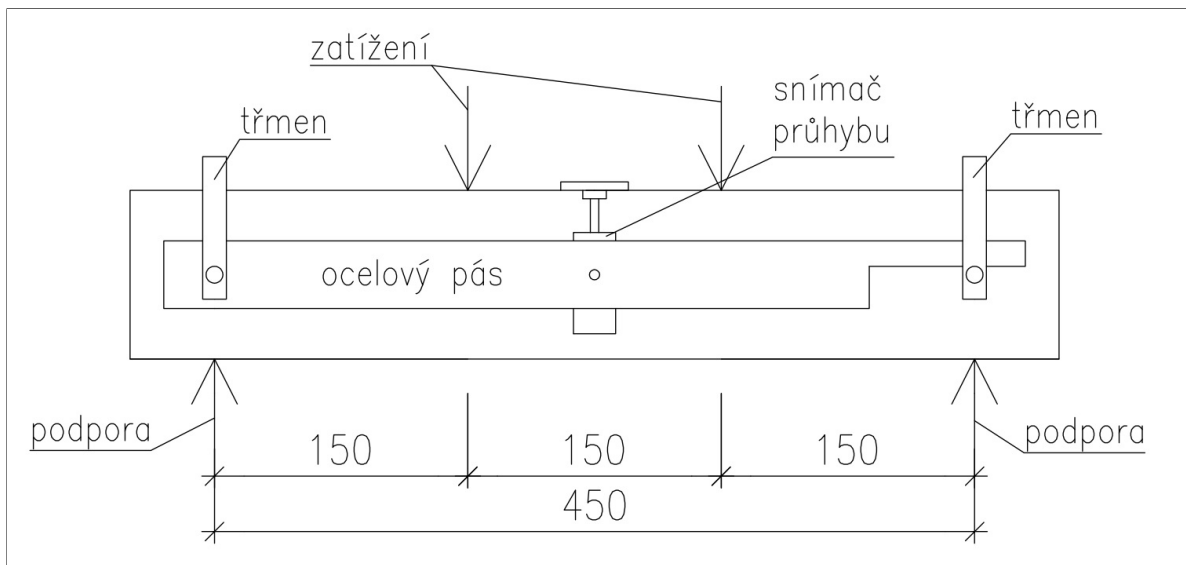
- kde: F_{max} : maximální zatěžovací síla
 L : vzdálenost mezi podporami
 b : šířka vzorku
 h : výška vzorku

Zkouška pevnosti v tahu ohybem nebyla dále vyhodnocena například pomocí parametrů, které předepisují normy popsané v kapitole 4.3. Výpočet absorbované mechanické energie proběhl přes všechna naměřená data v pracovním diagramu, ne jen do určitého průhybu.

Všechny přelomené trámký byly dále vyzkoušeny na pevnost v tlaku, aby se tak kompletně popsalo chování materiálu při kvazistatickém zatížení.



Obrázek 24: Uchycení snímačů průhybu při zkoušce pevnosti v tahu ohybem



Obrázek 25: Schéma zkoušky pevnosti v tahu ohybem

6 Výsledky

V tabulce 1 jsou uvedeny počty vzorků, na kterých úspěšně proběhly experimenty a jejich vyhodnocení. Pro 2% vyztužení bylo při kvazistatické rychlosti zatížení vyzkoušeno více vzorků, neboť se u něj očekávaly největší rozptyly výsledků a tudíž bylo z pohledu statistiky vhodné provést více měření. Důvody nevyzkoušení nevyztužených vzorků a menšího počtu vzorků s 2% vyztužením při zatížení rázem jsou uvedeny v kapitole 6.2. U kvazistatické rychlosti zatížení pro vyztužení 0,125% jsou vzorky jen 4 z důvodu špatného změření jednoho vzorku na rázovém kyvadle. Protože bylo vybetonováno 10 vzorků, bylo rozhodnuto vyzkoušet při kvazistatickém zatížení o jeden méně, aby na rázovém kyvadle proběhlo 5 měření.

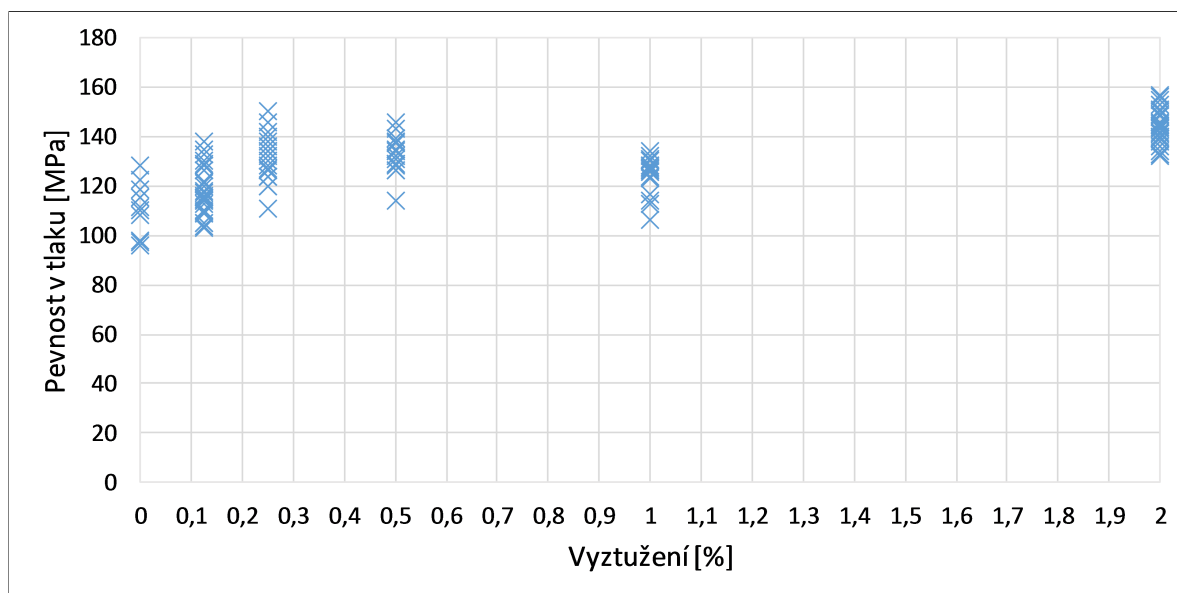
Procento vyztužení	0%	0,125%	0,25%	0,5%	1%	2%
Rázové zatížení	0	5	5	5	5	5
Kvazistat. zatížení	5	4	5	5	5	10

Tabulka 1: Počty vyhodnocených experimentů pro jednotlivá procenta vyztužení

6.1 Kvazistatické zatížení

6.1.1 Pevnost v tlaku

Na obrázku 26 je graf tlakových pevností v závislosti na procentu vyztužení. Podle očekávání vlákna příliš tlakové pevnosti neovlivňují. Zajímavý je však fakt, že se neprojevil žádný vzrůstající trend pevností a vzorky s 1% vláken vykazují menší pevnosti než ty s 0,5% a 2% vláken.



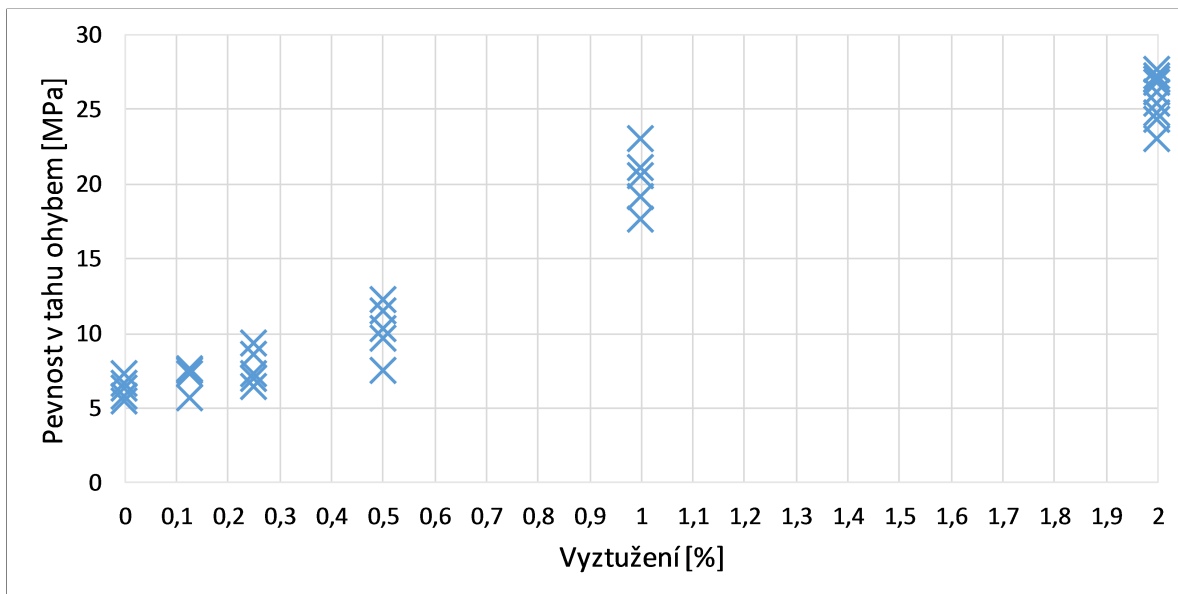
Obrázek 26: Pevnosti v tlaku v závislosti na procentu vyztužení

6.1.2 Pevnost v tahu ohybem

Pevnosti v tahu ohybem jsou uvedeny v tabulce 2 a vykresleny na obrázku 27 v závislosti na procentu vyztužení. Není zde možné pozorovat lineární zvyšování pevností s rostoucím procentem vyztužení. Pro 0%, 0,125% a 0,25% vyztužení je pevnost dána pevností kompozitu před vznikem hlavní trhliny (viz následující kapitola věnovaná jednotlivým pracovním diagramům). I tak je zde ale patrný velice mírný nárůst pevností, značící lepší působení kompozitu v elastické oblasti. Lineární trend by mohl být pozorován až od 0,5% vyztužení, při kterém je dosaženo hodnot maximální síly až v oblasti po vzniku hlavní tahové trhliny (literatura zmiňovaná v kapitole 2.4.1 uvádí lineární trend až od 1%). Hodnoty pro vzorky s 2% vláken ale neleží na pomyslné přímce procházející průměry pro 0,5% a 1% vyztužení. To by mohlo značit, že 2% objemu vláken jsou příliš a vzorky jsou převyztužené. Negativní vliv vzájemného ovlivňování vláken už přebíjí pozitivní vliv jejich zvýšeného množství.

Procento vyztužení	0%	0,125%	0,25%	0,5%	1%	2%
Pevnost v tahu ohybem	5,5 6,3 5,8 6,6 7,3	5,7 7,5 7,3 7,6	7,4 8,6 9,3 7,0 6,5	7,6 9,7 12,2 11,5 10,3	17,6 23,1 21,1 19,1 20,5	26,8 23,0 27,1 24,4 27,7 26,1 27,0 24,8 25,4 27,3
Průměr (směr. odch.)	6,3 (0,6)	7,0 (0,8)	7,8 (1,1)	10,3 (1,6)	20,3 (1,9)	26,0 (1,4)
Min. hodnota	5,5	5,7	6,5	7,6	17,6	23,0
Max. hodnota	7,3	7,6	9,3	12,2	23,1	27,7
Rozdíl min. a max. hodnot	1,8 (24,8%)	1,9 (25,5%)	2,8 (30,5%)	4,6 (38,1%)	5,5 (23,7%)	4,7 (16,7%)

Tabulka 2: Nejvyšší dosažené hodnoty zatěžovací síly při kvazistatické rychlosti zatížení, zkouška v tahu ohybem, všechny hodnoty v MPa

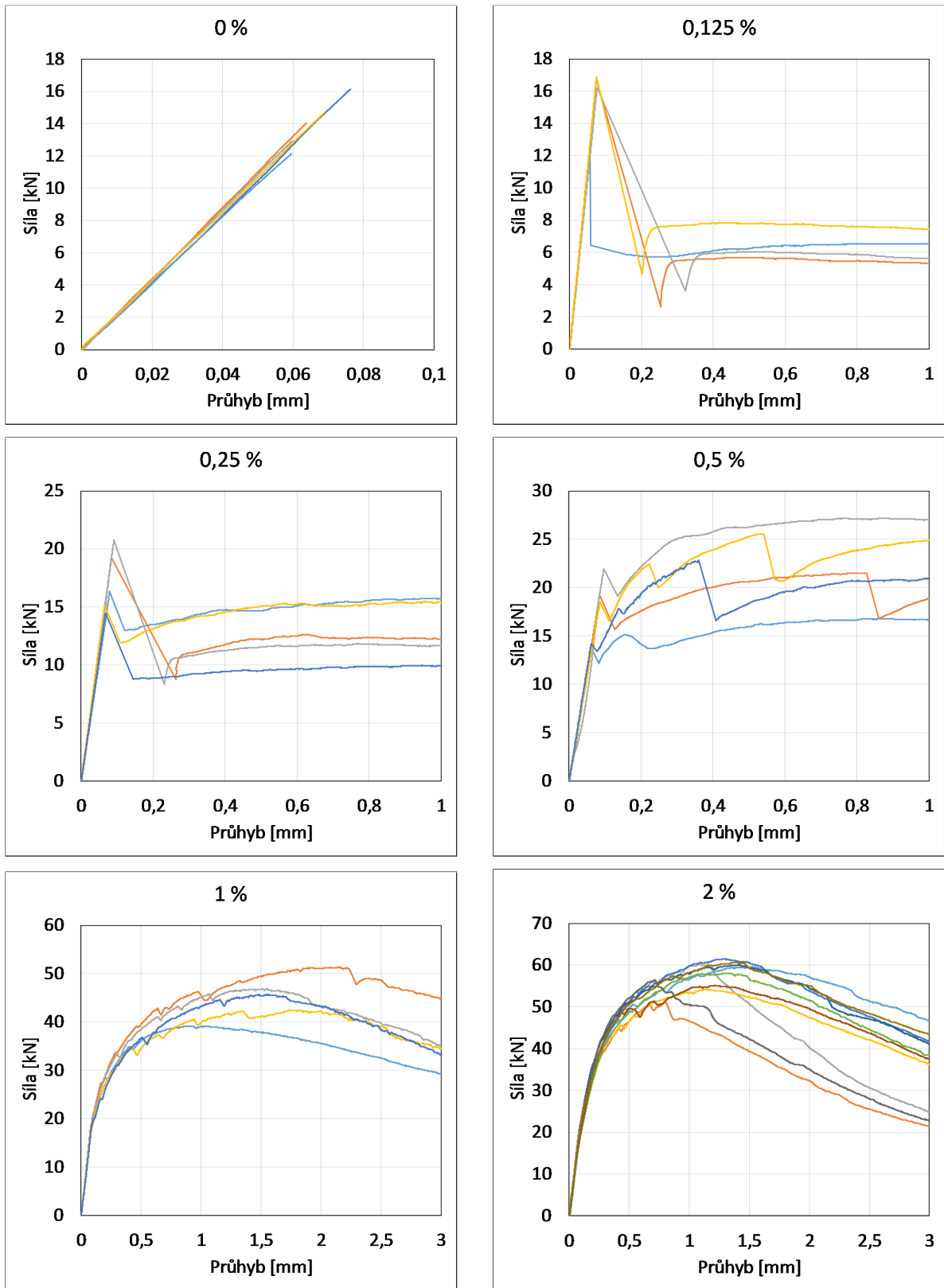


Obrázek 27: Pevnosti v tahu ohybem v závislosti na procentu vyztužení

6.1.3 Pracovní diagramy

Na obrázku 28 jsou grafy pracovních diagramů z jednotlivých zkoušek v tahu ohybem při kvazistatické rychlosti zatížení. Úmyslně nejsou grafy vykresleny až do maximálních hodnot průhybů, aby byla lépe patrná oblast dosažení maximálních hodnot zatěžovací síly, protože právě okolo ní se jednotlivá procenta vyztužení liší nejvíce. Konkrétně se liší okamžikem, kdy je dosaženo pevnosti samotné betonové matrice a dochází k aktivaci vláken (vlákna začínají přemostovat vzniklé trhliny).

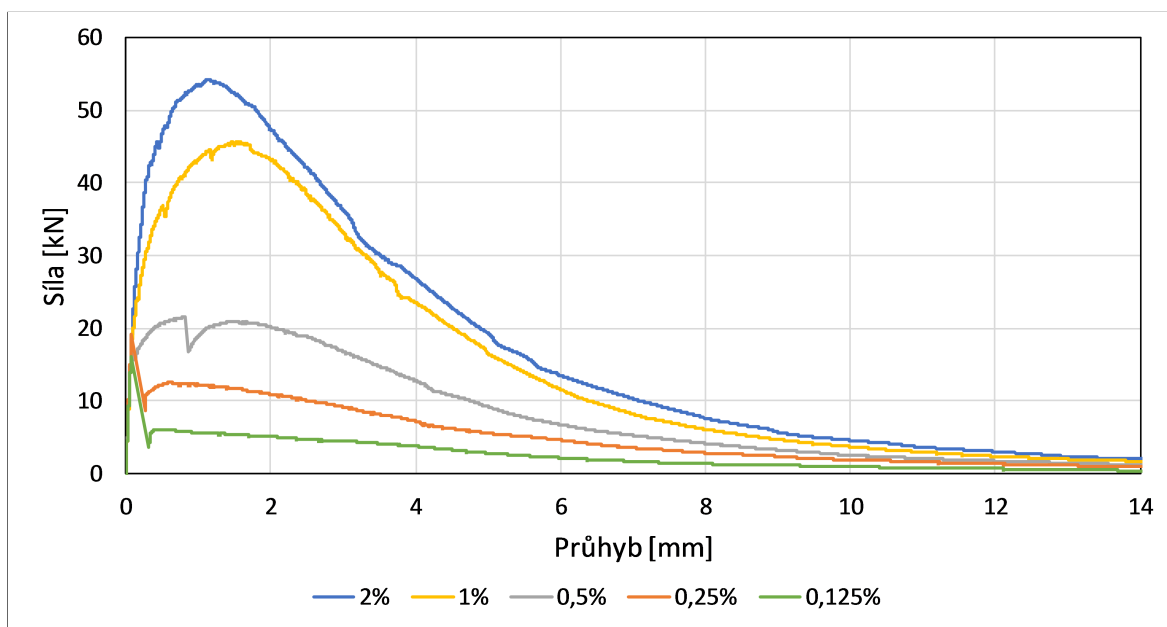
Pro nevyztužený beton platí lineární vztah mezi zatížením a deformací až do kolapsu vzorku. Už při nejnižším zkoumaném (nenulovém) procentu vyztužení je patrný extrémní nárůst absorbované energie oproti nevyztuženým vzorkům. Stále je však maximální pevnost dána pevností betonové matrice. Až do maximální pevnosti se vzestupné větve prvních dvou grafů prakticky nemění, pak ale pro 0,125% dojde k významnému poklesu na přibližně čtvrtinu síly a dále graf pokračuje sestupnou větví, kdy jsou postupně vytahována vlákna. Podobná situace nastala i pro hodnotu vyztužení 0,25%. U vyztužení 0,5% je graf na začátku opět velice podobný předchozímu, nyní ale už maximum síly leží v nelineární části grafu po vytvoření hlavní trhliny. Pro 1% vyztužení pak vlákna způsobují až dvojnásobnou hodnotu maximální dosažené síly, než je tomu u předchozího grafu. Bod, ve kterém přestane graf stoupat lineárně už začíná být hůře identifikovatelný, neboť zde nenastává náhlý pokles síly, ale pozorujeme tahové zpevnění. To je způsobeno vytvořením většího počtu tahových trhlin ještě před dosažením maximální zatěžovací síly. Velmi podobně vypadají grafy pro 2% vyztužení. Hlavními rozdíly jsou jen vyšší hodnoty maximální síly a již neidentifikovatelný bod konce lineární části grafu, kterou bychom očekávali okolo síly 20 kN. Pozorujeme zde velice plynulý přechod z lineární části k tahovému zpevnění.



Obrázek 28: Pracovní diagramy zkoušky v tahu ohybem pro jednotlivá procenta vyztužení

Náhlé poklesy sil pozorované u 0,125% a 0,25% vyztužení jsou způsobeny velmi rychlým snížením tuhosti zkoušeného trámku vlivem křehkého porušení betonové matrice. K jejímu porušení sice dochází u všech procent vyztužení, ale u menšího množství vláken se více projevuje nepoměr tuhosti trámku bez trhliny a s trhlinou. Po bodu dosažení pevnosti v tahu ohybem betonové matrice v pracovním diagramu ihned následuje bod lokálního minima. Změna tuhosti tedy mohla proběhnout maximálně za 1/10 s, protože záznam hodnot měřidel probíhal s frekvencí 10 Hz. Obrázec pod úsečkou, která spojuje tyto dva body, by bylo vhodné do výpočtu absorbované energie nezahrnout, tak jak popisuje Bantia a Trottier [9]. Vzhledem k tomu, že cílem měření je zjištění celkové absorbované energie až do kolapsu vzorku, má vyjmutí obrazce z výpočtu téměř zanedbatelný vliv. V případě vyhodnocení zkoušek v tahu ohybem podle norem uvedených v kapitole 4.3 je oblast ihned po vytvoření tahové trhliny mnohem důležitější a nestability v pracovním diagramu pak hrají zásadní roli.

Pro přehlednější srovnání procent vyztužení je na obrázku 29 graf, kde je vykreslen vždy jeden průměrný (ve smyslu průměrná dosažená maximální síla a absorbovaná mechanická energie) pracovní diagram od jednoho procenta vyztužení. Opět je uvedena jen část pracovních diagramů (do průhybu 14 mm), aby byla lépe čitelná počáteční oblast, kde pozorujeme zajímavé rozdíly. Co se týče vztupných větví, můžeme pro 1% a 2% objemu vláken pozorovat výraznější oblast tahového zpevnění, díky kterému se bod maximální dosažené síly posouvá k vyšším hodnotám průhybu. Pro tato procenta vyztužení se na vzorcích vytvořil i vyšší počet trhlin, i když se významně rozevírala jen jedna hlavní trhlina. Na grafu je také možné vidět rozdíly v sestupných větvích pracovních diagramů, které se liší hlavně sklonem neboli rychlostí poklesu zatěžovací síly s rostoucím průhybem. Pro vyšší procenta vyztužení je sestupná větev strmější, zatímco u nejnižších procent je pokles velice mírný. U hodnoty průhybu přibližně 14 mm jsou pak křivky všech pracovních diagramů již velice blízko sebe a do konce měření se dále přibližují.



Obrázek 29: Porovnání pracovních diagramů pro různá procenta vyztužení

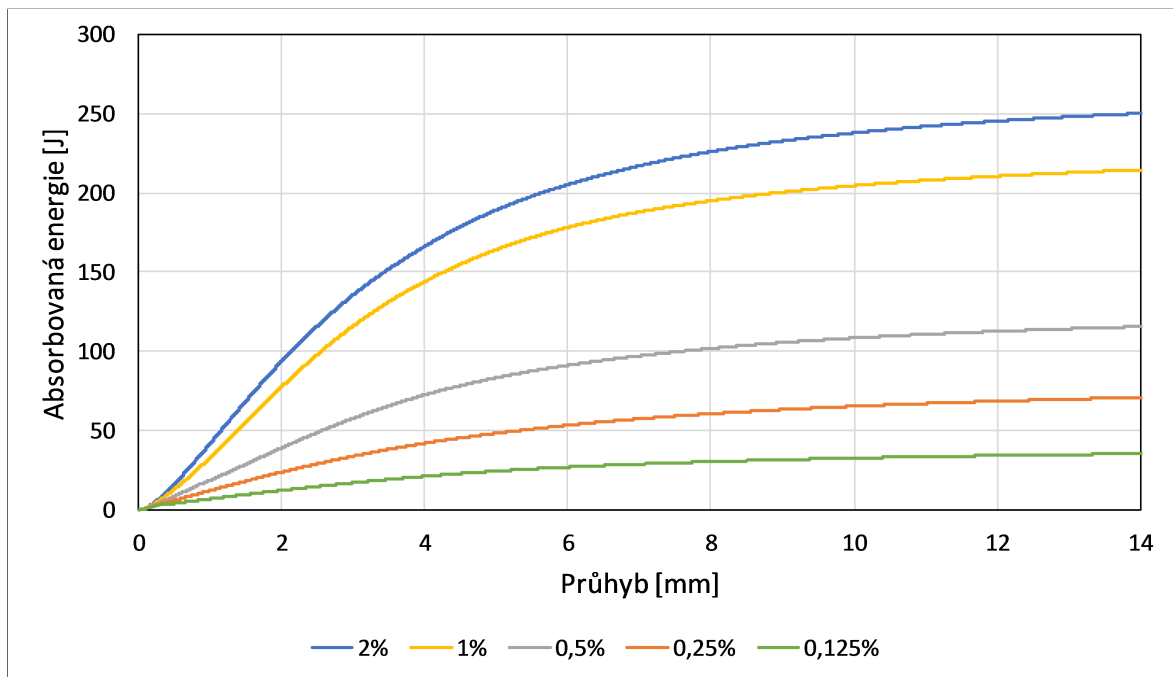
Rozdíly ve sklonech pracovních diagramů pravděpodobně vychází z faktu, že při určité šířce hlavní trhliny je již vytaženo jisté procento z celkového počtu vláken, které danou trhlinu přemostňovaly. Takové procento by se pak nemělo výrazně lišit pro vzorky s různým vyztužením, protože u všech jsou použita stejně dlouhá vlákna a platí jejich téměř náhodné rozmístění v celém objemu. Pokud budeme předpokládat lineární vztah mezi počtem působících vláken v trhlíně a pevnosti celého trámku, tak u vyšších procent vyztužení se za jednotku průhybu vytáhne více vláken a dojde k rychlejšímu poklesu pevnosti než u nižších procent vyztužení. Pro získané pracovní diagramy platí, že procentuální pokles maximální zatěžovací síly v sestupných větvích je pro jednu hodnotu průhybu téměř stejný pro všechna procenta vyztužení.

Měření bylo ukončeno dosažením maximálního rozsahu optoelektrických snímačů průhybu - tedy okolo 25 mm. Naměřená síla zde byla pro trámky všech procent vyztužení menší než 1 kN. Zkouška dále pokračovala až do plného rozlomení vzorků, kdy byla už měřena jen zatěžovací síla a posun zatěžovacího pístu. Pracovní diagram by tedy mohl být po hodnotách průhybu 25 mm doplněn měřením posunu pístu, jak ale uvádí Banthia a Trottier [9], pracovní diagramy sestavené z takových hodnot posunů jsou značně zkreslené (u čtyřbodového ohybu).

6.1.4 Absorbovaná mechanická energie

Na obrázku 30 jsou vykresleny průběhy množství absorbované energie v závislosti na průhybu pro pracovní diagramy z obrázku 29. Vzhledem k tomu, že tyto průběhy přímo vycházejí z pracovních diagramů, nepozorujeme na nich v zásadě žádné nové skutečnosti. Jen jsou lépe naznačeny rozdíly ve vývoji absorbované energie. Rychlost jejího nárůstu je samozřejmě vyšší s rostoucím procentem vyztužení. Zajímavé je, že pro všechna procenta vyztužení jsou velmi podobné procentuální rezervy absorpce další energie. Jinými slovy pro konkrétní jednu hodnotu průhybu platí, že vzorky všech procent vyztužení již absorbovaly podobné procento celkové (maximální) absorbované energie. To částečně souvisí s popisem sklonů pracovních diagramů z minulé kapitoly. Z podstaty výpočtu, kdy postupně přičítáme plochy pod grafem pracovních diagramů, vychází další zajímavost. Tyto průběhy jsou velice hladké a vytrácí se informace o různých skocích v pracovních diagramech. To lze nejlépe pozorovat například pro pracovní diagram vzorku s 0,5% vláken, kdy okolo hodnoty průhybu 0,9 mm nastává nestabilní pokles působící síly. Toto však na obrázku 30 není vůbec patrné.

V tabulce 3 jsou vypsány plochy pod grafem pracovních diagramů (absorbovaná mechanická energie v joulech). Jak již bylo vidět na pracovních diagramech, rozdíl v množství absorbované energie nevyztuženého a velmi slabě vyztuženého betonu je obrovský. Hlavně z důvodu zamezení kolapsu vzorku ihned po křehkém lomu betonové matrice. Postupné vytahování i malého počtu vláken umožňuje dosažení vysokých hodnot šířky rozevření trhliny. Působící síla je sice po celé sestupné větvi relativně malá, celková plocha pod grafem je ale velká díky dosaženému průhybu. Průměrná hodnota pro 0,125% vyztužení je 75× vyšší než pro nevyztužené vzorky.



Obrázek 30: Průběhy absorbované mechanické energie pro různá procenta vyztužení

Procento vyztužení	0%	0,125%	0,25%	0,5%	1%	2%
Energie absorbované jednotlivými vzorky	0,36	31,3	96,5	79,4	240,5	356,9
	0,45	28,4	75,4	121,4	310,5	171,1
	0,39	37,3	68,5	158,3	235,2	219,6
	0,51	42,2	88,2	124,1	221,2	259,8
	0,61		66,4	101,9	224,1	323,2
Průměr (směr. odch.)	0,46 (0,09)	34,9 (5,3)	79,0 (11,6)	117,0 (26,2)	246,3 (32,9)	271,2 (58,4)
Min. hodnota	0,36	28,4	66,4	79,4	221,2	171,1
Max. hodnota	0,61	42,2	96,5	158,3	310,5	356,9
Rozdíl min. a max. hodnot	0,25 (41,0%)	13,8 (32,7%)	30,1 (31,2%)	78,9 (49,9%)	89,3 (28,8%)	185,8 (52,1%)

Tabulka 3: Absorbovaná mechanická energie při kvazistatické rychlosti zatížení, zkouška v tahu ohybem, všechny hodnoty v joulech

6.2 Zatížení rázem

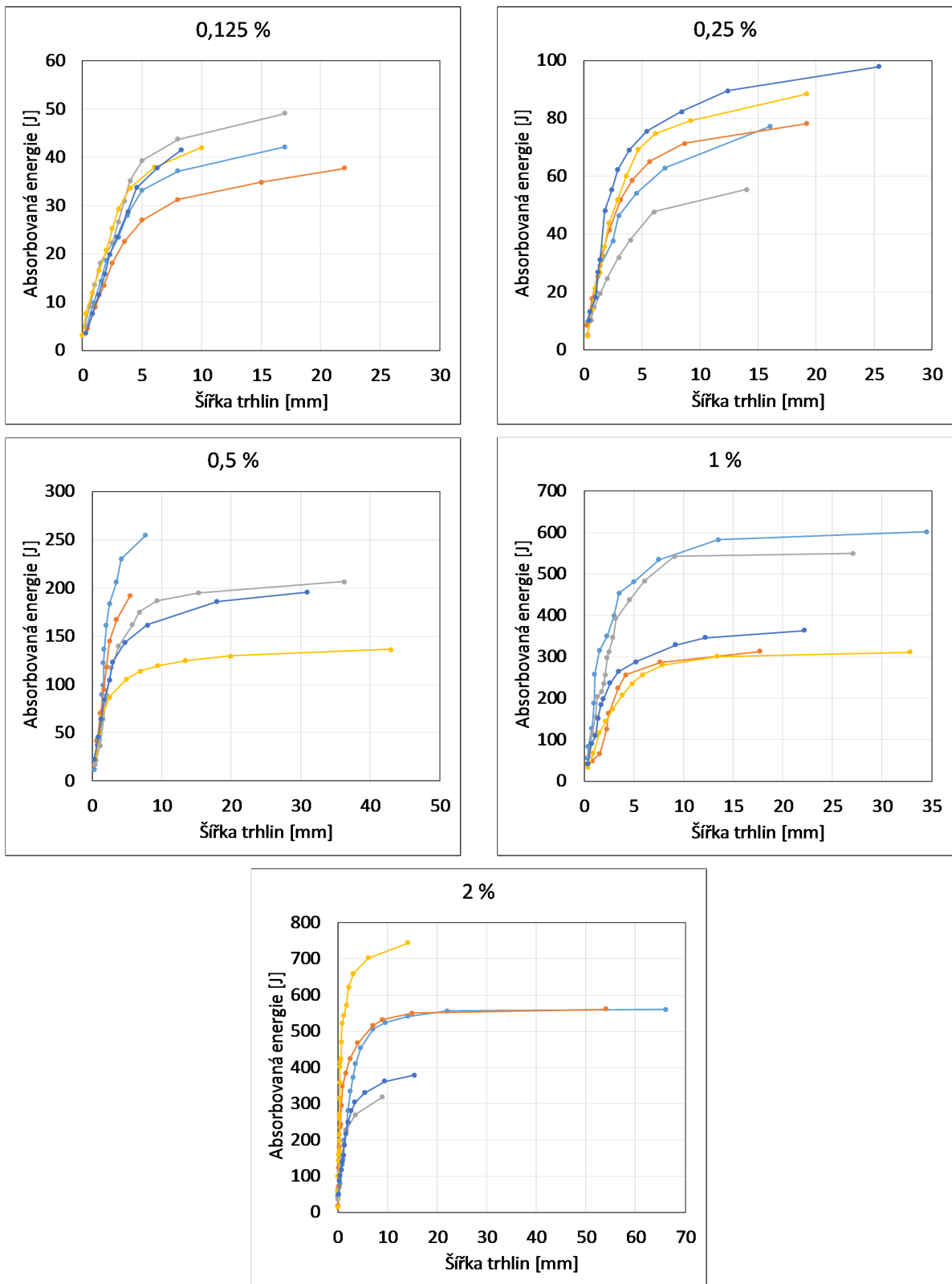
6.2.1 Absorbovaná mechanická energie

Mechanické energie absorbované jednotlivými vzorky při rázové rychlosti zatížení jsou uvedené v tabulce 4. Pro 2% vyztužení bylo zkoušení na novém rázovém kyvadle obtížnější. Hlavním nedostatkem byla relativně malá dopadová energie závaží, ze které vycházely problémy jako nutnost použití vysokého počtu rázu na přelomení několika vzorků (některé vzorky se nepodařilo přelomit vůbec) a z toho plynoucí velká časová náročnost vyhodnocení absorbované energie pro jeden vzorek. Další nedostatky budou podrobněji popsány při hodnocení celého zkušebního postupu. Zjednodušeně lze ale říci, že v současném stavu se zkoušení vzorků s 2% vyztužením jeví jako špatně proveditelné. Je proto pro úplnost tabulky 4 uvedeno pouze 5 vzorků, které se podařilo úspěšně vyzkoušet a vyhodnotit. Nejistota výsledků je však pro dané procento vyšší a lze předpokládat, že nevyhodnocené vzorky (nepřelomitelné nebo pro jiné důvody vyloučené) byly schopné absorbovat ještě více energie než 743,7 J (maximální hodnota z tabulky 4).

Experimenty s nevyztuženými vzorky také nebyly vyhodnoceny, neboť pro ně byla dopadová energie naopak příliš velká i pro velmi malé výšky vypuštění závaží. Docházelo tak k jejich křehkému kolapsu už při prvních rázech a vyhodnocení bilancí kinetických energií ani nemohlo být provedeno. U kvazistatické rychlosti zatížení nám výsledky pro nevyztužené vzorky vytvářejí referenci pro určení přínosu vláken v betonu. Hlavním předmětem výzkumů odolnosti proti rázovému zatížení je ale až vlákny vyztužený beton. Z tohoto pohledu je nemožnost zkoušení nevyztužených vzorků na novém rázovém kyvadle nepodstatná.

Procento vyztužení	0,125%	0,25%	0,5%	1%	2%
Energie absorbované jednotlivými vzorky	42,1	77,2	255,0	601,7	560,0
	37,7	78,2	192,4	312,6	561,0
	49,1	55,4	206,7	549,2	317,3
	42,0	88,4	136,5	310,9	743,7
	41,5	97,8	195,8	363,0	378,3
Průměr (směr. odch.)	42,5 (3,7)	79,4 (14,2)	197,3 (37,8)	427,5 (123,4)	512,0 (151,1)
Min. hodnota	37,7	55,4	136,5	310,9	317,3
Max. hodnota	49,1	97,8	255,0	601,7	743,7
Rozdíl min. a max. hodnot	11,4 (23,2%)	42,4 (43,4%)	118,5 (46,5%)	290,8 (48,3%)	426,4 (57,3%)

Tabulka 4: Absorbovaná mechanická energie při rázovém zatížení, všechny hodnoty v joulech



Obrázek 31: Závislosti šířky trhlin na již absorbované mechanické energii při rázovém zatížení

U ostatních procent vyztužení probíhalo zkoušení a vyhodnocení bez větších obtíží. Po každém rázu také byly změřeny šířky trhlin. Bylo tak možné vykreslit grafy závislosti celkové šířky všech trhlin na již absorbované mechanické energii (obrázek 31). Pro téměř všechny vzorky se podařilo provést minimálně 10 rázů, takže jsou křivky v grafech vykresleny s dostatečným počtem bodů, aby mohly být pozorovány jejich tvary. Hodnoty z tabulky 4 odpovídají posledním bodům křivek.

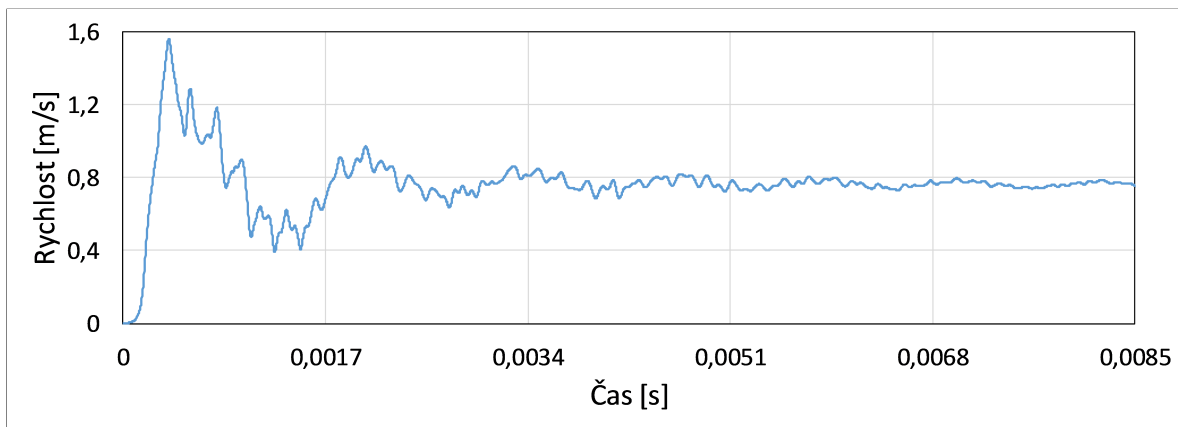
U grafů z obrázku 30 pro kvazistatickou rychlost zatížení bylo možné pozorovat, že s rostoucím průhybem se přičítalo čím dál méně energie, až byla křivka ke konci téměř vodorovná. To značí, že vyhodnocení zkoušky bylo provedeno do plného vyčerpání ohybové kapacity vzorku. Jak je vidět na grafech z obrázku 31, pro některé vzorky mají křivky u svého konce ještě stále veliký sklon, což značí nezapočítanou rezervu energie. Všechny uvedené vzorky byly sice vyzkoušeny do plného rozlomení, ale nebyl vyhodnocen poslední ráz kdy došlo k jejich kolapsu. Vždy byla při zkoušení snaha dosáhnout co největšího rozevření hlavní trhliny po předposledním rázu. Jednalo se však vždy jen o odhad na základě zkušeností z předchozích experimentů. Pokud se například trhлина po nějakém rázu rozevřela podstatně více než po rázu předchozím, bylo rozhodnuto o snížení výšky vypuštění závaží pro následující ráz, aby měl vzorek před posledním rázem jen minimální (zanedbatelnou) rezervu absorpce energie. To se bohužel nepodařilo vždy. Z grafů je patrné, že bylo nutné dosáhnout alespoň šířky rozevření 20 mm, po které jsou křivky již téměř vodorovné.

6.2.2 Průběh rázu

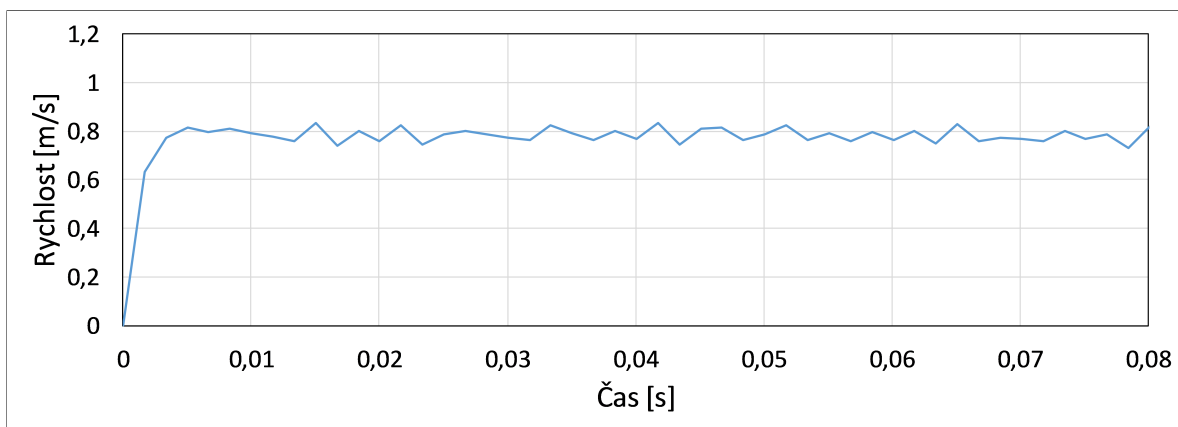
Na obrázcích 32 a 33 jsou uvedeny příklady průběhů rychlostí vzorku po rázu, na kterých můžeme pozorovat několik jevů. Všechny grafy jsou zpracovány pro jeden vzorek s 0,125% vyztužením. Při měření rychlosti akcelerometrem u prvního rázu (obrázek 32a) bylo možné zaznamenat oblast postupného nárůstu rychlosti vzorku. Je otázkou, jestli lze čas od prvního nárůstu rychlosti do dosažení maximální hodnoty (která je v tomto případě 0,0004 s) brát jako čas, po který trvala energetická výměna (kontakt) mezi vzorkem a závažím. Musíme totiž uvažovat i vliv rychlosti šíření mechanické vlny v materiálu a další vlivy. Na již zmíněném obrázku 32a je úmyslně zvolen krok popisku vodorovné osy 1/600 s (přibližně 0,0017 s), což odpovídá frekvenci snímkování použitého fotoaparátu. Můžeme tak jasně vidět, že fotoaparát tyto rychlé změny nedokázal zaznamenat.

Měření akcelerometrem také umožnilo analyzovat vlastní frekvenci kmitání betonových vzorků pro daný způsob zatížení. Pro vzorky s 0,125% vláken byla zjištěna dominantní frekvence kmitání okolo 850 Hz. Můžeme na grafu vidět, že toto kmitání mělo na počátku velmi vysokou amplitudu (až dvojnásobek rychlosti okolo které probíhalo kmitání). Působilo ale silné tlumení, protože amplitudy se dále výrazně snižovaly. Pro vzorky s 2% vláken byla vlastní frekvence vyšší, okolo 1100 Hz. To nejspíš značí zvětšující se ohybovou tuhost více vyztužených vzorků. Akcelerometrem bylo měřeno pouze několik prvních rázů, viz kapitola 5.3.2.

Na obrázku 32b je také graf průběhu velikosti rychlosti po prvním rázu, zde je ale rychlost vykreslena pomocí hodnot z analýzy videozáznamu. Nepravidelné fluktuační rychlosti v celém grafu nemohou být způsobeny kmitáním vzorku, protože jak již bylo řečeno, snímkovácí frekvence fotoaparátu na to byla příliš nízká. Jedná se proto o nepřesné hodnoty rychlosti, které vznikly v důsledku nepřesného zaměření značek na jednotlivých snímcích. Tento graf byl vytvořen automatickým vyhodnocením pomocí programu Motion Studio, tudíž značka na každém snímku byla zaměřena podle stejného algo-



(a) Akcelerometr

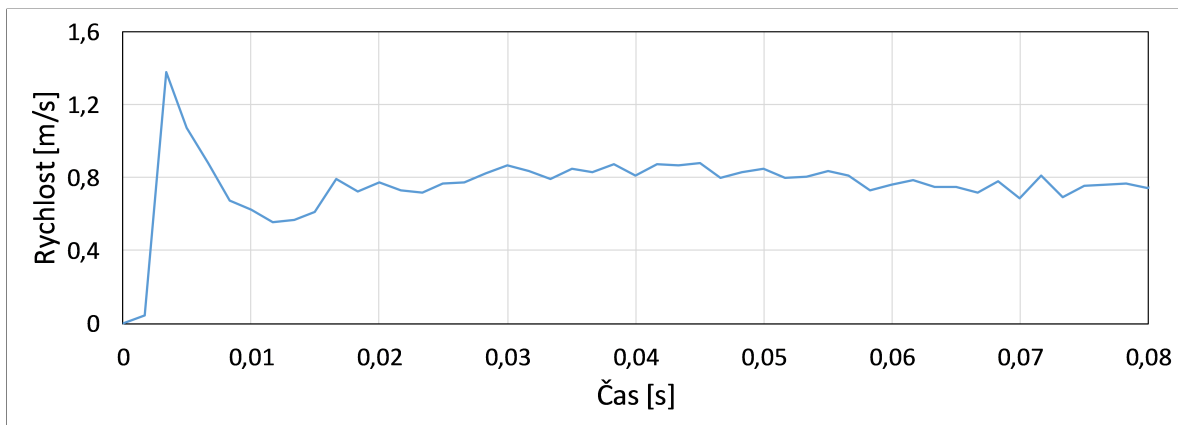


(b) Videozáznam

Obrázek 32: Průběh velikosti rychlosti vzorku ihned po prvním rázu

ritmu. Kvůli konečnému rozlišení snímků ale ani nemohla být na každém z nich zaměřena stejně. Protože rychlost je vyhodnocena jako rozdíl polohy ze dvou snímků, platí princip jakési automatické korekce nepřesného zaměření, pokud máme k dispozici data z mnoha snímků, jako máme právě zde. Můžeme si totiž všimnout, že po každé vysoké hodnotě, následuje hodnota nízká a naopak. To je způsobeno faktem, že pokud hrubě nepřesně zaměříme značku na jednom snímku, pak sice například roste rozdíl polohy mezi snímkem předchozím, ale zároveň klesá rozdíl mezi snímkem následujícím a průměrná rychlost je tudíž stejná. Jedná se tak o korekci náhodných a hrubých chyb zaměření značky na jednom snímku. Zprůměrováním hodnot z grafu 32b bychom měli dostat relativně přesnou rychlost vzorku po rázu.

Použití akcelerometry nebylo možné použít k detailní analýze celého průběhu rázové zkoušky - tedy od okamžiku vypuštění závaží až například do okamžiku vystoupení vzorku do maximální výšky po rázu. Rozlišení akcelerometrů totiž umožňuje záznam pouze velmi rychlých jevů, neboť mohou snímat zrychlení až 5000 g. V případě zde uvedených rázových zkoušek byla využita přibližně desetina jejich rozsahu, a to pouze pro okamžik rázu. Zrychlení, ze kterého by se dala vypočítat rychlost závaží



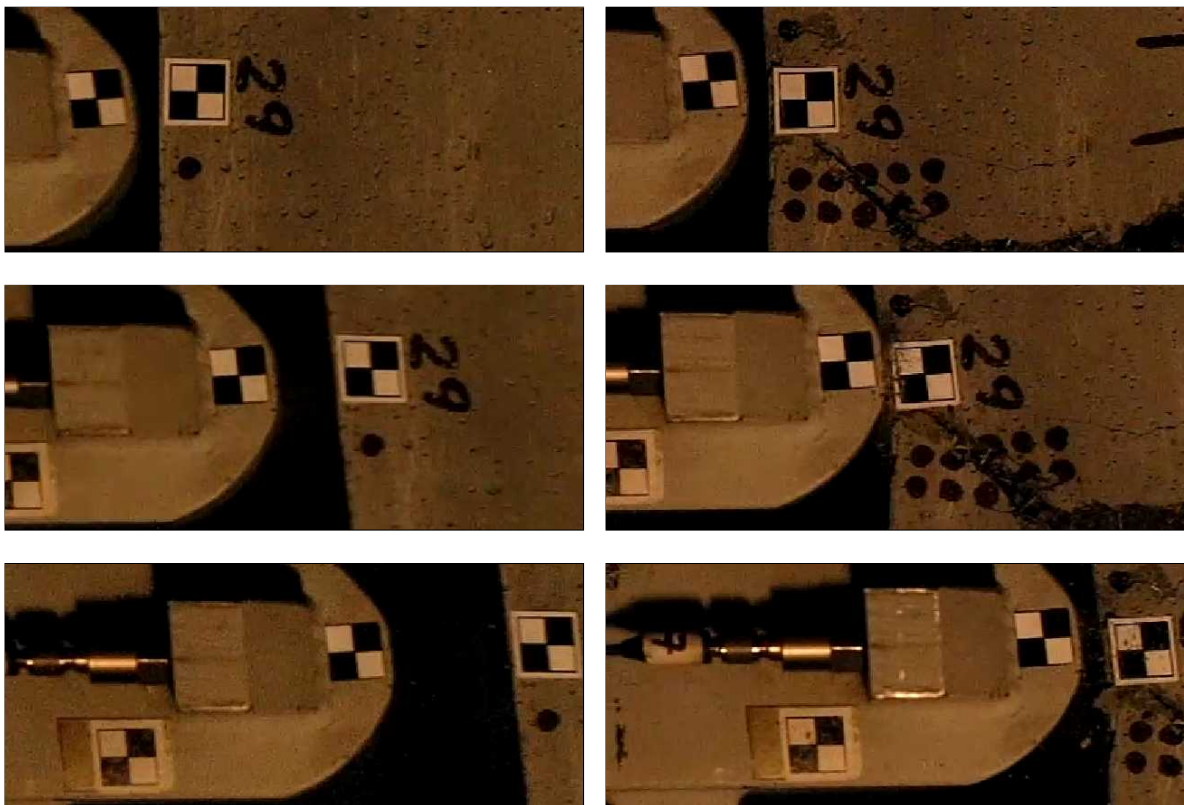
Obrázek 33: Průběh velikosti rychlosti vzorku ihned po předposledním rázu

těsně před rázem, bylo neměřitelné. Stejně tak je nevěrohodný průběh rychlosti vzorku déle po rázu. Zprůměrováním rychlostí z analýzy videozáznamu bylo nutně dosaženo určité nepřesnosti, protože rychlost vzorku po rázu určitě není v čase konstantní. Jak rychle tato rychlost klesala nebylo možné z měření akcelerometrem ověřit. V grafu na obrázku 32b žádný pokles pozorován není, a tudíž byl jeho vliv zanedbán.

Na obrázku 33 je vykreslena rychlost vzorku v čase, tentokrát po předposledním rázu pro stejný vzorek z předchozích grafů. Narozdíl od grafu po prvním rázu zde můžeme pozorovat zaznamenání amplitudy oscilace podobné té z měření akcelerometrem. Podobně vypadaly záznamy i pro další předposlední rázy ostatních vzorků. Nejspíše to značí fakt, že již téměř kompletně porušené vzorky měly výrazně menší tuhost a tím klesala i jejich vlastní frekvence natolik, že mohla být částečně zaznamenána relativně malou snímkovací frekvencí fotoaparátu. Hodnotu vlastní frekvence ale není možné určit.

Ihned po prvním rázu byla rychlost závaží 0,74 m/s (určeno pomocí videozáznamu). Oscilace rychlosti vzorku po rázu (viditelná na obrázku 32a) však způsobí lokální minimum s hodnotou rychlosti okolo 0,4 m/s. Mohlo tak dojít k druhému kontaktu závaží se vzorkem. To na videozáznamu vidět nebylo, nicméně jak již bylo řečeno, relativně nízká snímkovací frekvence mohla způsobit, že se oba kontakty udály mezi dvěma snímky.

Porovnání videozáznamů prvního a posledního rázu je na obrázku 34. První řádek snímků ukazuje stav těsně před rázem, na dalším řádku je okamžik, kdy je závaží přibližně uprostřed snímané oblasti a na posledním řádku jsou zachyceny vzorky těsně před opuštěním snímané oblasti. První ráz proběhl velice rychle tak, že ani nebyl zaznamenán kontakt vzorku se závažím. Jak je vidět na druhém snímku, vzorek je již ve značné vzdálenosti od závaží. U předposledního rázu byl první kontakt delší, protože je na videozáznamu patrný přes několik snímků. Vzorek se následně oddaluje od závaží, nicméně velice rychle zpomaluje a nastává druhý kontakt se závažím, který trvá již podstatně delší dobu. Přerušování kontaktu je pozorováno pouze na několika málo snímcích před opuštěním vzorku ze záběru. Pokud se podíváme zpět na graf rychlosti vzorku po posledním rázu, vidíme, že druhý kontakt nastal přibližně v čase 0,015 s, protože zde pozorujeme mírný nárůst rychlosti. Při druhém kontaktu tedy došlo k minimálnímu předání energie. Rychlost závaží a vzorku byla vyhodnocena až po přerušování druhého kontaktu.



(a) První ráz

(b) Předposlední ráz

Obrázek 34: Porovnání průběhů dvou rázů

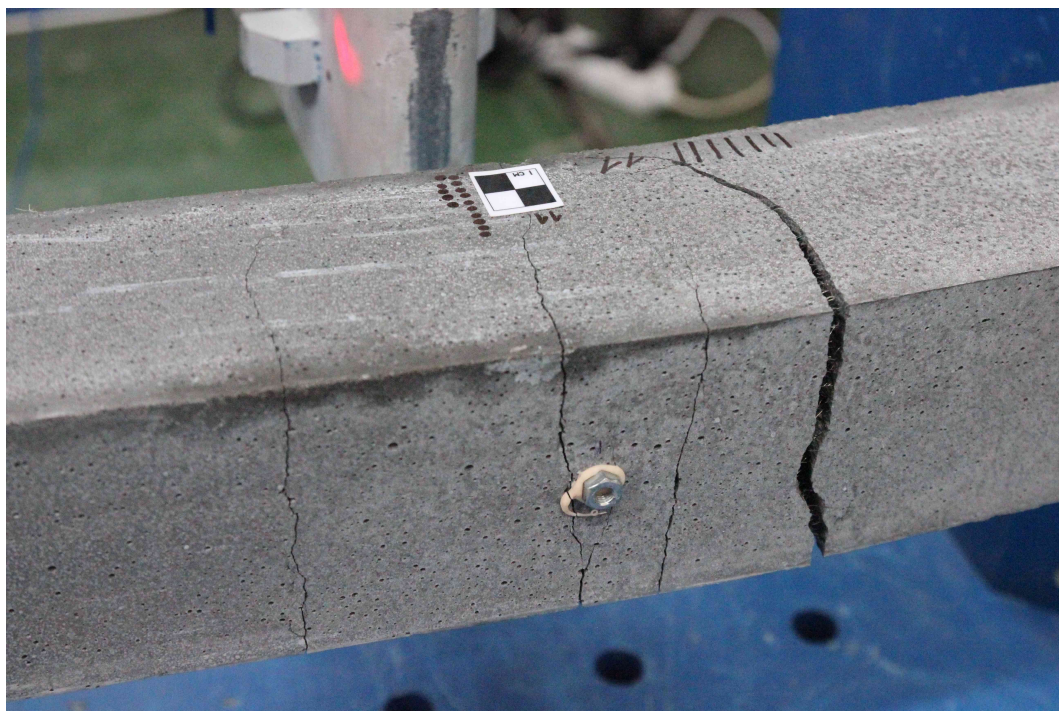
6.3 Způsoby porušení vzorků

Při zkoušce pevnosti v tahu ohybem při kvazistatické rychlosti zatížení se všechny vzorky porušily ve střední třetině rozpětí - tedy v místě maximálního ohybového momentu. Lomové plochy byly pro nízká procenta velice hladké a trhliny měly na bočních stranách tvar přímky téměř kolmé ke spodní straně vzorku. S rostoucím procentem vyztužení se lomové plochy zdrsňovaly a trhliny na boční straně měly tvar křivek (stále ale přibližně kolmých ke spodní straně). Velmi zajímavý je tvar trhlín na spodní a horní straně vzorku. Pro téměř všechny vzorky napříč všemi procenty vyztužení se zde vytvořila velice přímá trhlina kolmá k bočním stranám. U vyšších procent vyztužení se okolo hlavní trhliny vytvořily i další vlasové trhliny. Vzorky vyzkoušené při kvazistatické rychlosti zatížení jsou na obrázku 35.

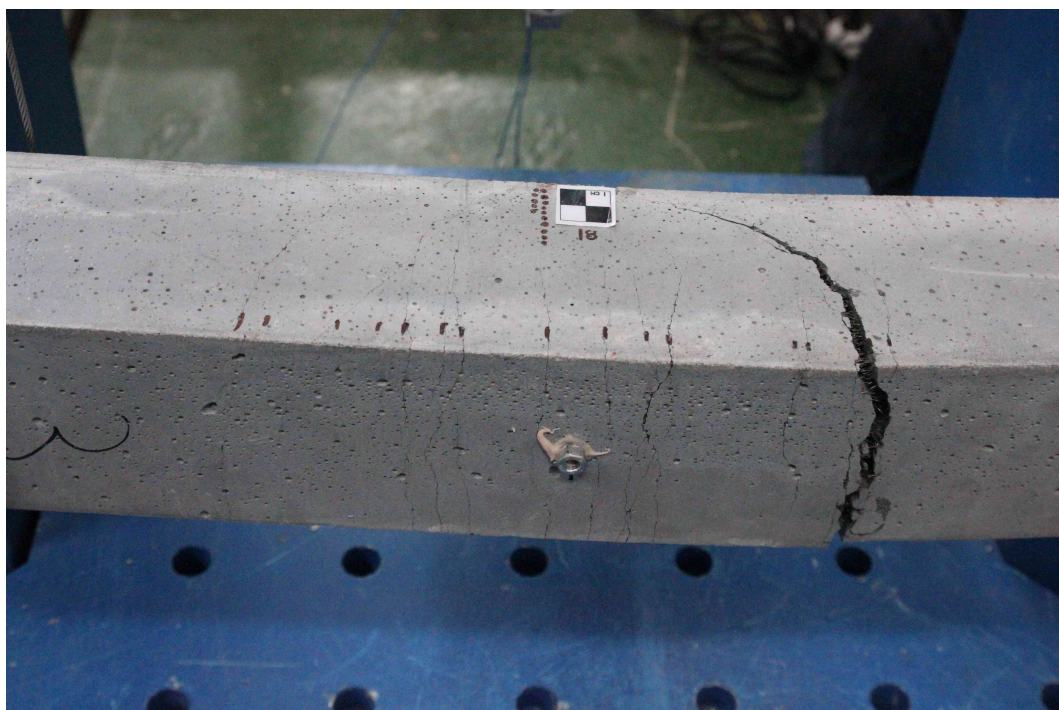
U zatížení rázem vznikaly trhliny různými způsoby. Obecně platilo, že pro 0,125% a 0,25% vyztužení se vytvořila hlavní trhlina uprostřed rozpětí a dále propagovala rovnoběžně proti směru zatížení. U vyšších procent se ale hlavní trhliny tvořily v různých vzdálenostech od středu vzorku. Na několika vzorcích bylo pozorováno téměř smykové porušení. Více o různých parametrech porušení vzorku a vlivech na získanou absorbovanou energii je uvedeno dále ve zhodnocení výsledků.



Obrázek 35: Vzorok porušené ohybem při kvazistatické rychlosti zatížení, pohled na jejich spodní a horní strany



(a) Vzorek s 0,5% vyztužením



(b) Vzorek s 2% vyztužením

Obrázek 36: Příklady porušení vzorků při zatížení rázem

7 Zhodnocení experimentů

Kapitoly 7.1 až 7.3 jsou úmyslně seřazeny tak, že jsou nejdříve podány informace o kritických částech zkušebního programu pro zatížení rázem. Zde budou popsány převážně problematické oblasti postupu měření včetně diskuse nad přesností stanovení absorbované energie. Zhodnocení a porovnání dosažených výsledků v kapitole 7.2 je pak provedeno částečně s přihlédnutím k popsaným specifikům zkušebního postupu pro zatížení rázem. Kvazistatické rychlosti zatížení je věnována pouze krátká kapitola 7.2.2. Zkoušky na pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem byly provedeny standardními postupy. Použily se běžně používané přístroje a přesná a zkalibrovaná měřidla. Z toho důvodu není nutné zavádět diskusi na téma jejich přesnosti nebo je příliš detailně hodnotit. Až poté bude v kapitole 7.3 zhodnocen zkušební program pro zatížení rázem už se znalostí všech problematických oblastí. Zde bude také zhodnocena vhodnost použití absorbované mechanické energie pro popis chování vlákny vyztuženého betonu pro obě rychlosti zatížení.

7.1 Kritické oblasti zkušebního postupu pro zatížení rázem

7.1.1 Analýza rychlostí z videozáznamu

Jediným způsobem získání rychlostí závaží před rázem a závaží a vzorku po rázu byla analýza videozáznamu z vysokorychlostního fotoaparátu. Měření akcelerometrem bylo pouze doplňkové pro detailnější popis průběhu rázů. V kapitole 5.3.2 bylo řečeno, že muselo být dosaženo kompromisu mezi různým nastavením fotoaparátu, aby bylo dosaženo ideálního zaznamenání zkoušky. Jedině tak je možné ji správně vyhodnotit.

Přesné vyhodnocení rychlosti objektu na videozáznamu spočívá v zásadě na třech faktorech. Nejprve musí být dobře nastaveno měřítko pro analýzu polohy měřených bodů. Pro tyto účely je vhodné použít velké značky, protože čím větší vzdálenost je použita na kalibraci měřítka, tím přesnější je pak analýza menších délek. Dále musí být konkrétní značky, jejichž změna polohy je vyhodnocována, zaznamenány s co možná nejvyšším rozlišením. V neposlední řadě je vhodné, aby tato značka byla na co největším počtu snímků, protože jen tak se může uplatnit princip korekce chyb v zaměření (vysvětlen v kapitole 6.2.2). Zároveň platí, že pokud máme velice vysoké rozlišení, nepotřebujeme tolik snímků pro přesné vyhodnocení rychlosti, protože zaměření na jednom snímku je provedeno s malou nejistotou. Naopak při nižším rozlišení je nutné vyhodnotit více snímků a rychlosti případně zprůměrovat (pokud v dané oblasti zanedbáváme změnu rychlosti v čase), nebo rychlosti vykreslit do grafu v závislosti na čase a vzniklou křivku nahradit vhodnou hladkou funkcí.

Oblast snímání byla nastavena tak, jak bylo ukázáno na obrázku 34 v kapitole 6.2.2. Jednalo se o takovou minimální oblast snímání, aby při všech rázech provedených na jednom vzorku nemusela být měněna její velikost (to souvisí s náročností vyhodnocení). To znamená, aby se dostatečně zaznamenaly i rázy na silně porušených vzorcích. Pro ty obecně platilo, že se kontakt závaží a vzorku přerušil až po relativně dlouhé době, kdy už vzorek téměř opouštěl záběr. Kompromis tak spočíval v dosažení velkého rozlišení a velké snímané oblasti, což jsou dva parametry, které si vzájemně odporují. Protože rozlišení i tak nebylo příliš vysoké, bylo rozhodnuto použít maximální snímkovací frekvenci fotoaparátu 600 snímků za sekundu. To sice znamenalo další mírné snížení rozlišení, umožnilo to ale získat vyšší počet snímků a mohly se tak získané rychlosti zprůměrovat z vyššího počtu hodnot.

Videozáznamy zkoušek nebyly z hlediska další analýzy zcela ideální. Bylo dosaženo pravděpodobně malého rozlišení a u některých rázů je pro vyhodnocení rychlostí po rázu k dispozici málo snímků. Nicméně i tak se pomocí nich daly určit potřebné rychlosti pro všechny provedené experimenty. Jak moc přesně je diskutováno dále v kapitole 7.1.4. Z důvodů předchozí nezkušenosti autora práce s podobným měřením rychlostí pravděpodobně bylo možné nastavení fotoaparátu dále optimalizovat. Například detailnějším prozkoumáním možnosti použití nižší frekvence snímkování. Dále by bylo do budoucna vhodné použít silnější osvětlení, aby mohla být použita menší hodnota expozice. V neposlední řadě je nutné použít větší značky pro zaměření bodu a speciální dlouhé značky pro kalibraci měřítka.

7.1.2 Časová náročnost provedení a vyhodnocení

Snahy o snížení časové náročnosti vstupují pravděpodobně do procesu optimalizace všech nově vznikajících zkušebních metod. Stejně tak je tomu i zde pro zkoušení rázovým zatížením. Čas potřebný pro vyzkoušení vzorků se přímo odvíjí od počtu rázů, které jsou třeba k vyčerpání jeho ohybové kapacity. Pokud by se neměnil zkušební postup použitý pro výše popsané experimenty, stačil by ideálně ráz jeden. Muselo by při něm dojít k absorbování drtivé většiny celkové energie, kterou je vzorek schopen absorbovat, aby se rezerva další absorpce energie mohla zanedbat. To ale není možné, protože by to vyžadovalo přesnou znalost charakteristik materiálu, aby byla přesně zvolena dopadová energie závaží za účelem cíleného porušení vzorku. Je tak nutné vždy vykonat relativně vysoký počet rázů a případně regulovat dopadové energie závaží, aby u posledního nevyhodnoceného rázu vzorek absorboval zanedbatelné množství energie. V této práci byl počet rázů zvolen na minimálně 10. Jak již bylo uvedeno, dařilo se výšky vypuštění závaží regulovat, aby opravdu byl minimální počet rázů splněn. Hodnota 10 však byla zvolena zcela náhodně. Vyzkoušení jednoho vzorku trvalo přibližně 1 hodinu čistého času. Vyhodnocení zabralo přibližně 0,5 hodiny, což také přímo souvisí s počtem provedených rázů. Celkově tak zkouška trvala přibližně 3× déle než například zkouška pevnosti v tahu ohybem při kvazistatickém zatížení. Pokud by do budoucna měla být zvýšena hodnota minimálního počtu rázů (například za účelem zvýšení přesnosti měření, viz dále), byla by časová náročnost zkoušky už problémem.

7.1.3 Proměnná rychlost deformace

Rychlost deformace, jak bylo řečeno v kapitole 3, má vliv na dosažené mechanické vlastnosti betonu. Je poměrně snadno měřitelná pro nižší rychlosti zatížení, například použitím tenzometrů. Pro rychlé dynamické jevy je její stanovení problematictější, protože se projevuje konečná rychlost šíření mechanické vlny v materiálu, která se v něm různě odráží, skládá nebo ruší. V mnoha literárních zdrojích je pro zatížení rázem uvedena pouze dopadová energie závaží, případně jeho hmotnost a výška vypuštění relativně k výšce vzorku [15, 28, 41]. To pravděpodobně pro základní srovnání rázových zkoušek stačí. Rychlost deformace nezávisí pouze na rychlosti zatížení, ale obecněji na rychlosti předání mechanické energie mezi vzorkem a zatěžovacím elementem. Takže sem vstupují například tvrdosti, tuhosti a tvary srážejících se objektů. Navíc rychlost deformace s největší pravděpodobností není stejná v celém objemu zatěžovaného vzorku. Vzhledem k tomu, že se naměřené mechanické vlastnosti betonu mění až s řádovými rozdíly rychlosti deformace, není její úplně přesné určení tolik důležité.

Faktem však zůstává, že postup měření na rázovém kyvadle vyžadoval změnu výšky dopadu závaží podle toho, jak moc vyztužený vzorek byl zrovna zkoušen. Zůstává tak nezodpovězenou otázkou, k jakému zkrácení výsledků došlo tímto vlivem. S vysokou pravděpodobností se rychlost deformace neměnila řádově pro první rázy na neporušených vzorcích. Tento odhad se zakládá na faktu, že na videozáznamech trvá kontakt závaží a vzorku přibližně stejnou dobu pro všechna procenta vyztužení (přesněji řečeno není na videozáznamu příliš patrný, pravděpodobně se udál mezi dvěma snímky). Pokud tedy budeme předpokládat, že čas předání energie byl víceméně konstantní (u prvních několika rázů), tak by rychlost deformace měla být závislá pouze na dopadové energii závaží. Ta se ale mění pouze s druhou odmocninou výšky vypuštění.

Jiná situace nastává při zatížení porušených vzorků, například při předposledních rázech. V kapitole 6.2.2 bylo detailně popsáno, že u porušených vzorků trvá ráz déle (kontakt je na videozáznamu pozorován přes několik snímků). U několika vzorků byl jasně pozorován kontakt první, po kterém měl vzorek vyšší rychlost než závaží. Ta po několika snímcích výrazně klesala až došlo k druhému kontaktu. Ze záznamů některých jiných vzorků ale toto patrné není a spíše je pozorován kontinuální styk závaží a vzorku přes několik snímků. Pokud by tomu tak skutečně bylo, znamenalo by to, že předání energie trvalo výrazně delší dobu a musela být i podstatně snížena rychlost deformace vzorku. Není ale jasné, jestli například nedošlo k hlavnímu rázu, při kterém došlo k vysoké rychlosti deformace (podobně jako při prvních rázech u neporušených vzorků) a pak vlivem kmitání vzorku a závaží k několika dalším dílčím nárazům, u kterých byla vzorku předána jen velmi malá energie. Takové sekundární nárazy pak nemusely být patrné na videozáznamu z důvodu relativně malé snímkovací frekvence.

7.1.4 Přesnost stanovení absorbované mechanické energie při jednom rázu

Stanovení absorbované energie jednotlivými vzorky se skládalo z pořízení videozáznamu, jeho analýzy a provedení bilance kinetických energií. V této kapitole jsou všechny tři části zkušebního postupu popsány z pohledu jejich možného vlivu na přesnost měření. Cílem není stanovit číselnou hodnotu nejistoty získaných výsledků, k tomu nejsou dostupná dostatečná data. Bylo by potřeba vyzkoušet mnohonásobně více vzorků, které by měly podobný mód porušení, dále ověřit absorbovanou energii jinými postupy a detailněji zjistit vliv rychlosti deformace atd. Je pouze zavedena diskuse k měřícím a vyhodnocovacím postupům jako takovým.

V kapitole 4.2 bylo popsáno zkušební zařízení a postup, které použili Yu a kol. [15], a které se stalo námětem pro experimentální program této práce. Autoři bohužel žádnou diskusi k přesnosti jejich měření nezavádějí. Ze zkušeností z provedených rázových zkoušek je však jasné, že museli na podobná problematická místa narazit také. Snímky z jejich použitého fotoaparátu například ukazují, že pořizovali videozáznam s frekvencí pouze 50 snímků za sekundu. Dále je na příkladech snímků jasně vidět malá ostrost pohybujících se objektů, tudíž se při vyhodnocování rozdílů jejich poloh museli dopustit vyšších nepřesností.

Postup vyhodnocení je analyzován pozpátku, aby bylo názorněji vysvětleno, jaká musí být kvalita vstupních hodnot pro dosažení přesných výsledků. To znamená, že nejprve je pozornost věnována rovnici 4 (bilanci kinetických energií) z kapitoly 5.3, podle které se z výsledků rázové zkoušky vypočítává energie absorbovaná vzorkem po jednom rázu. Můžeme na první pohled vidět, že se v ní vyskytuje relativně vysoký počet neznámých. Hmotnosti vzorků a závaží se dají velice přesně změřit a po celou

dobu měření jsou považovány za konstantní. To přesně platí pro hmotnost závaží. U betonového vzorku byla během zkoušení pozorována jistá ztráta hmoty v podobě vyloučení malých zrn materiálu hlavně z oblasti lomových ploch. Jednalo se však o nepatrné množství, a proto je úbytek hmotnosti vzorku zanedbán. Nepředpokládá se že by toto zanedbání výrazně ovlivnilo přesnost měření. Dostáváme se tak k rychlostem. Ty v rovnici 4 vystupují celkem tři a všechny jsou ve druhé mocnině. V praxi to znamená, že je nutné rychlosti změřit opravdu velice přesně, jinak hrozí nepoměrně vyšší zkreslení získané energie.

Příkladem může být určení nejistoty absorbované energie, pokud jsou známy nejistoty hodnot rychlostí. Relativní nejistota rychlosti se projeví v dvojnásobné relativní nejistotě příslušné kinetické energie. Protože se rychlosti měří z jednoho videozáznamu, budou mít pravděpodobně všechny tři rychlosti relativní nejistotu podobnou. Dále se provádí odečítání kinetických energií, tedy sčítání jejich absolutních nejistot. Předpokládejme vyhodnocení rázu pro vzorek s 2% vláken. Typické hodnoty kinetických energií jsou přibližně: závaží před rázem 200 J, závaží po rázu 80 J a vzorku 60 J. Provedením bilance kinetických energií dostáváme absorbovanou energii 60 J. Dále předpokládejme relativní nejistotu všech rychlostí 5% (a nulovou nejistotu hmotností). Výsledný zápis absorbované energie pak bude 60 ± 34 J. To je relativní nejistota 57%, která by dále rostla, pokud by se zvětšoval poměr mezi dopadovou energií závaží a vzorkem absorbovanou energií (rostly by totiž kinetické energie závaží a vzorku po rázu a tím i jejich absolutní nejistoty). Je tak jasné, že přesné vyhodnocení rychlostí je kritickým článkem celého postupu.

Analýza videozáznamu, tedy zaměření poloh značek na jednotlivých snímcích, byla automatizována pomocí programu Motion Studio. Odpadl tím lidský faktor, který by mohl ovlivnit dosažené výsledky subjektivním hodnocením zaměřované oblasti. V programu je manuálně definována pouze oblast, jejíž pixely budou srovnávány s následujícím snímkem. Objekt v této oblasti musí mít po celé délce videozáznamu konstantní velikost, nemůže se například různě natáčet vzhledem k objektivu apod.

Rozlišení snímků bylo takové, že jeden pixel odpovídal skutečné vzdálenosti 0,17 mm. Nelze však říci, že je to hodnota absolutní nejistoty zaměření polohy jednoho bodu. Algoritmus porovnává barvy ve vyznačených oblastech na jednotlivých snímcích, takže sem vstupuje například ostrost obrazu, ostrost hran zaměřovací značky apod. Navíc z důvodu srovnávání oblasti z předchozího snímku jsou po sobě jdoucí zaměření navzájem ovlivňovány. Je tak velice těžké odhadnout konkrétní nejistotu zaměření jednoho snímku, pomocí které by šla jednoduše vypočítat nejistota hodnoty rychlosti.

Výpočet nejistoty měření pouze na základě statistické analýzy zjištěných hodnot rychlostí pro určitý interval snímků je také problematický. Pro hodnoty rychlostí na obrázku 32b v kapitole 6.2.2 byl zaveden předpoklad, že reálná rychlost po rázu je po nějaký čas konstantní. Hodnoty tak mohly být zprůměrovány. Nelze však říci, jak bylo ve stejné kapitole vysvětleno, že hodnoty těchto rychlostí jsou souborem nezávisle, za stejných podmínek, naměřených hodnot. Každá hodnota rychlosti je ovlivněna velikostí rychlosti předchozí a analogicky ovlivňuje tu následující. Dochází tak k jakési pomyslné oscilaci kolem hodnoty skutečné, ke které bychom se měli poměrně přesně přiblížit pouhým zprůměrováním hodnot. Jakou má tato hodnota nejistotu je však velmi obtížné určit a není to ani cílem této kapitoly.

Na základě zde uvedeného rozboru by se dalo říci, že energie absorbovaná vzorkem při jednom rázu byla vyhodnocena poměrně přesně. Problematickým místem je pořízení videozáznamů, které musí být velmi kvalitní. Jak bylo řečeno v kapitole 7.1.1, záběry nebyly zcela ideální a nejspíše existuje prostor pro jejich mírnou optimalizaci (za použití stejného fotoaparátu). I přes to ale bylo pořízeno dostatečné množství snímků v uspokojivé kvalitě, aby mohla bez větších problémů proběhnout analýza rychlostí. Vyhodnocení pomocí softwaru nejspíše samo o sobě nevnese do procesu výrazné nejistoty. Bilance kinetické energie je velice náročná na přesnost vstupních hodnot. V možných směrech dalšího výzkumu bude uveden návrh jiného přístupu k měření absorbované energie, který nebude tak náročný na vstupní hodnoty.

7.1.5 Přesnost stanovení celkové absorbované mechanické energie

Hlavním problémem při určení celkové absorbované energie vzorkem je nezapočítání posledního rázu (viz kapitola 6.2.1). To se nejvíce projevilo pro vzorky s 0,5% vyztužením, kde se u některých odhaduje nezapočítání až 10% energie. Jedná se tedy o vliv, kvůli kterému jsou vypočtené celkové absorbované energie podhodnoceny. Nepotvrdil se předpoklad, že s rostoucím počtem rázů bude vzorek absorbovat stále méně energie. Hlavně vzorky s nižším procentem vyztužení absorbovaly téměř konstantní množství energie při každém rázu. Vzorky s vyšším procentem vyztužení absorbovaly nepravidelná množství energie. Nebyl však pozorován žádný trend snižování nebo zvyšování energie v závislosti na počtu již provedených rázů.

V grafech závislosti absorbované energie na šířce trhliny je patrné, že pro jedno procento vyztužení mají spojnice naměřených hodnot velice podobné tvary. Mohla by se tak neúplná křivka měření jednoho vzorku extrapolovat, aby bylo dosaženo určitého standardního tvaru. Následně by se hodnota na konci křivky odečetla jako celková absorbovaná energie. Částečně by tak odpadla nepřesnost vzniklá nevyčerpáním ohybové kapacity vzorku před posledním rázem.

Dalším možným vlivem na přesnost výsledků je samotný fakt, že vzorky byly zkoušeny několika rázy. Jedná se tak o cykly zatížení a odtížení. Při každém rázu se nejdříve vzorek deformuje elasticky, na což je spotřebována jistá energie. Elastická deformace vzorku po přerušení kontaktu závaží a vzorku musela ihned po rázu zaniknout. To způsobilo kmitání vzorku, které bylo dobře patrné na záznamu rychlosti z měření akcelerometrem na obrázku 32a v kapitole 6.2.2. Energie elastické deformace tak byla po rázu uvolněna a nejspíš se projevila změnou výsledné rychlosti vzorku po rázu. Změřena proto byla pouze energie absorbovaná na plastickou deformaci.

Jak bylo možné vidět u výsledků z kvazistatické rychlosti zatížení pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem, nevyztužený vzorek, který se elasticky deformoval až téměř do kolapsu, absorboval naprosté minimum energie. Pro elastickou deformaci již porušeného (vlákny vyztuženého) vzorku by mohlo být spotřebováno energie více. V této práci nebyl vliv cyklického zatěžování a odtěžování na celkovou absorbovanou energii zkoumán. Pravděpodobně však bude minimální.

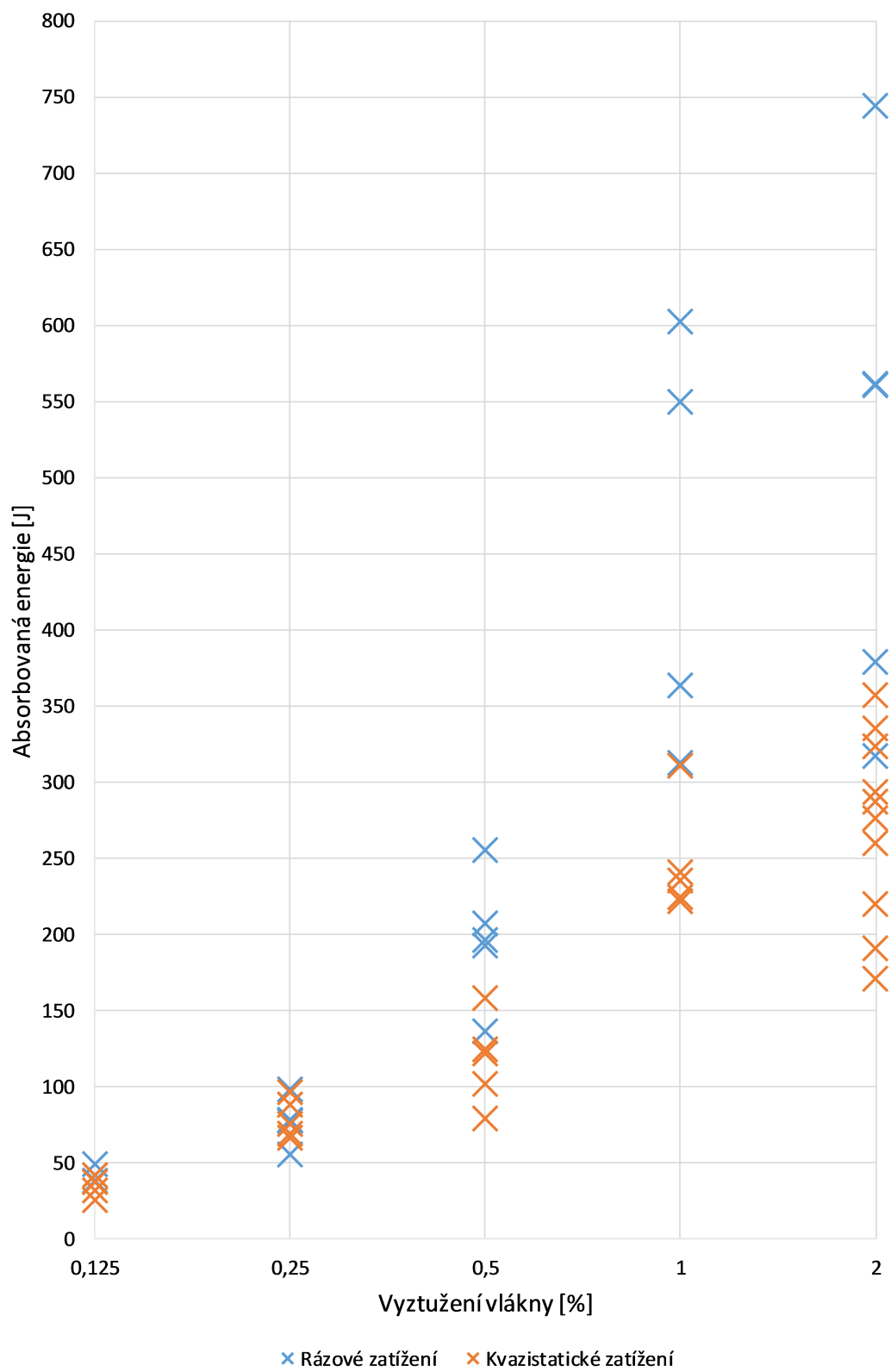
7.2 Zhodnocení a porovnání výsledků

7.2.1 Porovnání absorbovaných mechanických energií

Na obrázku 37 jsou vykresleny hodnoty absorbovaných energií pro vlákny vyztužené vzorky (vodorovná osa je v logaritmickém měřítku se základem 2). Modře jsou uvedeny hodnoty pro rázové zatížení a oranžově pro kvazistatické zatížení. Na první pohled je patrné, že u rázového zatížení je dosaženo vyšších hodnot. Rozdíly ale nejsou pro všechna procenta stejné. Pro vyztužení 0,125% a 0,25% jsou hodnoty pro oba způsoby zatížení téměř totožné. Až od 0,5% vyztužení se projevuje zvýšení hodnot pro rázové zatížení, a dále rozdíly rostou se zvyšujícím se procentem vyztužení. To mohlo zapříčinit několik vlivů. Prvním z nich je možná menší citlivost málo vyztužených vzorků na rychlost deformace. Dalším je různá rychlost deformace pro jednotlivá procenta vyztužení. Tomu se podrobněji věnovala kapitola 7.1.3. V neposlední řadě se může jednat o nevyčerpání kapacity vzorků při rázovém zatížení, jak bylo vysvětleno pomocí grafů závislosti absorbované energie na šířce trhlin v kapitole 6.2.1. Na nich bylo možné pozorovat, že křivky pro nižší procenta vyztužení nemají u svého konce téměř vodorovný průběh značící započítání veškeré absorbované energie. Pravděpodobně se jednalo o kombinaci všech tří vlivů.

Absolutní porovnávání dosažených hodnot absorbované energie pro obě rychlosti zatížení, například pomocí koeficientu DIF (viz práce [1]), není vhodné. Metody zkoušení se totiž příliš liší a získané hodnoty energií jsou vypočteny ze zcela jiných měřených veličin. To je ostatně základní problém určování koeficientu DIF obecně, například při srovnávání pevnosti betonu v tahu pro kvazistatické zatížení a zatížení výbuchem, kdy se jednotlivé zkoušky v principech diametrálně odlišují. Graf na obrázku 37 proto slouží spíše pro ilustraci zmíněných rostoucích rozdílů s vyšším procentem vyztužení nebo vyšších rozptylů výsledků u rázového zatížení oproti kvazistatickému zatížení.

Pro vyšší procenta vyztužení jsou pro rázové zatížení pozorovány přibližně dvojnásobné průměrné hodnoty absorbované energie oproti kvazistatickému zatížení. Tento rozdíl je samozřejmě z části způsobem nesouhlasem konfigurací obou zkoušek. Je ale natolik veliký, že je s největší pravděpodobností pozorováno zvýšení schopnosti absorbovat mechanickou energii při vyšší rychlosti deformace.



Obrázek 37: Porovnání absorbované mechanické energie pro kvazistatické a rázové zatížení

7.2.2 Zhodnocení výsledků z kvazistatické rychlosti zatížení

Zkouška v tahu ohybem narozdíl od práce [1] proběhla v konfiguraci čtyřbodového ohybu. Vzhledem k tomu, že u nás zatím neexistují normy pro zkoušení a vyhodnocení trámek z vlákniny vyztuženého betonu, byla zkouška provedena tak, jak popisuje většina zahraničních norem. Od ČSN EN 12390-5 se liší pouze větším rozpětím (norma sice dovoluje libovolné rozpětí, musí se ale rovnat $3 \times$ výšce respektive šířce vzorku). V literatuře často zmiňovaný japonský standard JSCE SF4 a novější JSCE-G 552 rozpětí 450 mm povoluje (zároveň s šířkou a výškou vzorku 100 mm).

V práci [1] byla použita zkouška tříbodovým ohybem pro rozpětí 300 mm, aby se zkoušky při kvazistatickém a rázovém zatížení shodovaly v rozpětí podpor a polohou jediné zatěžovací síly. Bylo však zjištěno, že taková konfigurace kvazistatické zkoušky je pro vlákniny vyztužený beton nevhodná. Ostatně ani žádná z popsaných zahraničních norem tříbodový ohyb nepřipouští. Vznikající hlavní tahová trhlinka se často iniciovala mimo místo maximálního momentu (to je např. u JSCE SF4 podmínka pro neplatnost měření) a výsledné lomové plochy se mezi stejně vyztuženými vzorky velice lišily. Průměrná hodnota pevnosti v tahu ohybem byla pro 2% vyztužení 30,1 MPa se směrodatnou odchylkou 4,2 MPa. V této práci byla průměrná hodnota 26,0 MPa, což je o 16% méně. Takový rozdíl mezi tříbodovou a čtyřbodovou zkouškou pevnosti v tahu ohybem je v pořádku. Směrodatná odchylka v této práci byla jenom 1,4 MPa, což je výrazně méně.

Standard JSCE SF4 popisuje možnost měření průhybu pomocí čtyř snímačů dráhy umístěných na obou stranách vzorku ve třetinách rozpětí. Tak by mohlo být dosaženo přesnějšího měření průhybu, protože snímače pouze uprostřed rozpětí nepostihují rozdíly v dosažených průhybech, pokud se hlavní trhlinka vytvoří jinde ve střední třetině rozpětí. Standard ale použití snímačů pouze ve středu rozpětí povoluje.

Narozdíl od práce [1] zde nemůžeme, jak již bylo uvedeno v minulé kapitole, přímo porovnat kvazistatickou a rázovou zkoušku. Byla ale vytvořena velice dobrá reference chování materiálu s různým procentuálním zastoupením vláken při kvazistatickém zatížení pro navazující výzkumy.

7.2.3 Rozptyly hodnot získaných vlastností

Podobně jako v práci [1] byly i zde pozorovány vyšší rozptyly získaných hodnot mechanických vlastností. Vliv zkušební postupu byl již popsán výše, nyní bude pozornost věnována zkušebním vzorkům, konkrétně použitému materiálu.

Problematickým faktorem u vláknobetonů obecně je jejich špatná homogenita. Konkrétně orientace a rozmístění vláken mají významný vliv na získané mechanické vlastnosti. Už v kapitole 2 bylo popsáno, jak orientace vláken ovlivňuje hodnoty mechanických vlastností betonu. Pro pevnosti v tahu ohybem pozorujeme nejnižší relativní směrodatnou odchylku a rozdíl minimální a maximální hodnoty pro 1% a 2% vyztužení. Pro vzorky s 2% vláken je toto částečně způsobeno vyšším počtem měření, i přes to jsou ale pevnosti jednotlivých vzorků velice podobné. Nejspíš se jedná o vliv rozmístění vláken, kdy se jejich menší množství pravděpodobně hůře rozmísťuje do celého objemu během míchání betonu. Naopak pro vyšší procenta vyztužení je pravděpodobnější, že se v každé oblasti vzorku bude nacházet vysoký počet vláken. Orientaci vláken při betonáži nebyla věnována pozornost, tudíž byla náhodná a zcela jistě spolu s rozmístěním ovlivnila získané výsledky.

Homogenita samotné betonové matrice ale také hraje roli. Například na výsledcích pevnosti v tlaku můžeme pozorovat velmi podobné rozptyly výsledků pro všechna procenta vyztužení, včetně nevyztužených vzorků. Protože vlákna tlakovou pevnost příliš neovlivňují, dalo by se předpokládat, že u všech vzorků se na rozptylech výsledků nejvíce podílí betonová matrice. Stejně tak se nezanedbatelné rozptyly hodnot vyskytují pro nevyztužené vzorky u pevnosti v tahu ohybem. To může být způsobeno celou řadou různých faktorů, od odchylek zastoupení složek v použité suché směsi, až po teplotu vzduchu při betonáži apod. U vysokohodnotného betonu je také velmi důležité dodržet technologii míchání [42]. Homogenita betonové matrice má nejspíš vliv také na mechanismy zakotvení vláken. Proto nelze říci, že u vyšších procent vyztužení je jediným důležitým faktorem orientace a rozmístění vláken.

Dále je nutné věnovat pozornost také způsobům porušení vzorků na rázovém kyvadle. Jak bylo popsáno v kapitole 6.3, při kvazistatické rychlosti zatížení vznikaly trhliny podobným způsobem na všech vzorcích. U rázového zatížení tomu tak nebylo. Byl pozorován vznik většího počtu trhlin, hlavně u vyšších procent vyztužení. Hlavní trhliny nebyly vždy ve středu. Na několika vzorcích se vytvořily ve značné vzdálenosti od středu, jak ukazuje obrázek 36 v kapitole 6.3. Vždy však hlavní trhliny propagovaly směrem k místu dopadu závaží. U takových vzorků se tím výrazně zvětšila lomová plocha.

Absorbovanou mechanickou energii mohlo ovlivnit mnoho faktorů. Počet vzniklých trhlin nejspíš neměl velký vliv. Jak se ukázalo z výsledků kvazistatické zkoušky pevnosti v tahu ohybem, energie absorbovaná do vzniku trhliny v betonu byla menší než 1 J. Vzhledem k tomu, že kromě hlavní trhliny měly všechny ostatní hodnotu rozevření do 1 mm, neproběhla jejich iniciací a rozevřením příliš velká absorpce energie. Rozevírání hlavní trhliny, která se iniciovala dále od středu vzorku, také mohlo mít vliv na množství absorbované energie. S tím souvisí velikost lomové plochy. Při náhodném rozmístění vláken musí platit, že na větší ploše se bude vyskytovat více vláken. Pokud se tedy zvětšuje lomová plocha, mělo by růst i množství absorbované energie. Lomová plocha vzorků byla orientačně změřena. Vzorek byl postaven lomovou plochou vzhůru pod dřevěnou desku s otvory, pomocí kterých byla hloubkoměrem zaměřena relativní výška několika bodů na lomové ploše. Pomocí těchto hodnot byl vykreslen 3D model povrchu, jehož plocha byla vypočtena. Bohužel pro žádné zde uvedené parametry poškození vzorků (počet trhlin, místo iniciace hlavní trhliny a velikost lomové plochy), a ani jejich kombinace, nebyla pozorována žádná korelace s dosaženými absorbovanými energiemi.

Dosažení vyšších hodnot absorbované energie při rázovém zatížení je s největší pravděpodobností dáno vyšší odolností vláken proti jeho vytažení. To souhlasí s výsledky z literatury uvedenými v kapitole 3. Hodnoty absorbované energie při rázovém zatížení pro jednotlivé vzorky s 1% a 2% vláken se však natolik liší, že pravděpodobně nejsou způsobeny pouze faktory popsány v minulém odstavci. Mohlo by se dále jednat o působení jiných mechanismů vytahování vláken při rázovém zatížení (ve srovnání s kvazistatickým zatížením). Jak bylo uvedeno v kapitole 2.4.3, Yoo a kol. [17] zkoumali vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti betonu. Zkoušeli také vliv orientace na absorbovanou energii při rázovém zatížení a dospěli při ní k mnohem vyšším rozdílům. Orientace vláken tak má nepoměrně vyšší vliv na odolnost betonových prvků při zatížení rázem. Tento jev by byl pravděpodobně lépe popsán vytahovací zkouškou při různých rychlostech deformace.

7.2.4 Efektivita vyztužení

Jednotlivá procenta vyztužení můžeme dále zhodnotit podle jejich efektivity na dosažené mechanické vlastnosti kompozitu. Pro 2% vyztužení platí, že vzorky vykázaly nejvyšší průměrné hodnoty zkoumaných mechanických vlastností. Nikde se však neprojeví lineární trendy zvyšování těchto vlastností spolu s procentem vyztužení.

V tabulce 5 jsou přehledně shrnuty tři hlavní mechanické vlastnosti zkoumané v této práci - pevnosti v tahu ohybem a energie absorbované při zatížení ohybem pro kvazistatické a rázové zatížení. Není uvedena pevnost v tlaku. Mírné rozdíly v závislosti na procentu vyztužení sice pozorovány byly, pro její zvýšení se však vlákna primárně nepoužívají. Hodnoty v tabulce jsou průměrné hodnoty vydělené procentem vyztužení. V závorce jsou směrodatné odchylky také vydělené procentem vyztužení.

Z pohledu pevností v tahu ohybem se jako zcela neefektivní jeví 0,125% a 0,25% objemu vláken. Pozorujeme sice velice nepatrné navýšení v důsledku pravděpodobně lepšího působení kompozitu v elastické oblasti, nejedná se však o výrazné zlepšení. Stále je pevnost v tahu ohybem daná pevností betonu před vytvořením trhliny. Proto nejsou v tabulce 5 uvedeny hodnoty popisující efektivitu. Podobně 0,5% vyztužení zvyšuje pevnost v tahu ohybem jen velice málo. Narozdíl od nižších procent už je pevnosti dosaženo tahovým zpevněním. Stále je však výsledná pevnost velice blízko pevnosti betonu před vznikem trhlin. Nejzajímavějším se zde jeví 1% vyztužení, pro které je pozorován nejvyšší skok v dosažené pevnosti oproti ostatním procentům. Pro 2% vyztužení není už zvýšení pevnosti tak výrazné a pozorujeme výrazně nižší hodnotu efektivní pevnosti v tahu ohybem.

Podobná situace nastává i pro absorbovanou mechanickou energii u kvazistatického zatížení. Vzhledem k tomu, že ocelová vlákna mají na tuto vlastnost velice výrazný vliv, jsou uvedena i nejnižší procenta vyztužení. Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.1.4, vzorek s 0,125% vyztužením absorbuje 75× více energie než nevyztužený. V tabulce 5 pak pro dvě nejnižší procenta vyztužení pozorujeme, možná nečekaně, nejvyšší efektivitu z hlediska absorbované energie. 2% vyztužení se opět jeví ze všech nejméně efektivní. Je u nich dosaženo ani ne poloviční efektivní hodnoty oproti ostatním procentům. V absolutních hodnotách absorbované energie v tabulce 3 (kapitola 6.1.4) dokonce pozorujeme téměř stejné průměrné hodnoty pro 2% a 1% vyztužení.

Procento vyztužení	0,125%	0,25%	0,5%	1%	2%
f_{cf} [MPa/%]	–	–	20,50 (3,22)	20,28 (1,85)	12,98 (0,72)
E_k [J/%]	278,96 (42,08)	316,00 (46,40)	234,06 (52,34)	246,3 (32,88)	135,59 (29,20)
E_r [J/%]	340,0 (29,6)	318,0 (56,8)	394,6 (75,6)	427,5 (123,4)	256,0 (75,55)

Tabulka 5: Porovnání efektivity vyztužení

Pro rázové zatížení se efektivní hodnoty absorbované energie liší. Opět si můžeme všimnout vysoké hodnoty pro 0,125% vyztužení. Nejlepší efektivitu dosahuje však 1% vyztužení. I přes to, že jsou 2% vyztužení stejně jako u kvazistatické rychlosti zatížení nejméně efektivní, nejsou zde tak velké rozdíly oproti ostatním procentům. Je třeba si uvědomit, že pro rázové zatížení se uvedené hodnoty absorbovaných energií pro vzorky s 2% vláken pohybují spíše pod skutečným průměrem. Nepodařilo se totiž vyzkoušet některé vzorky vlivem nedostatečné dopadové energie závaží. Buď se na jejich přelomení vynaložilo příliš mnoho rázů, nebo se je nepodařilo přelomit vůbec. V obou případech pak nebyly vyhodnoceny. Maximální hodnota pro 2% vyztužení tak platí jen pro vyhodnocené vzorky. Ty nevyhodnocené musely mít ještě vyšší potenciál absorpce energie, tudíž by průměrná hodnota dále rostla. Rostly by tím ale i rozptyly výsledků, a proto by průměrná hodnota nebyla dostatečně vypovídající. Nedá se tak s jistotou říci, jak efektivní jsou 2% vyztužení pro rázové zatížení.

Pozorovaná nízká efektivita 2% vyztužení může být způsobena například nedostatečným zakotvením jednotlivých vláken. Na obrázku 38 jsou ukázány lomové plochy vzorku s 2% vláken a nevyztuženého vzorku. Na první pohled je patrný extrémní rozdíl v charakteru lomových ploch. U nevyztuženého vzorku je plocha velice hladká, nenachází se na ní žádné další praskliny nebo ostré nepravidelnosti. Oproti tomu hustě vyztužený vzorek má lomovou plochu velice drsnou. Samozřejmě na ní pozorujeme vlákna vytažená z protilehlého kusu vzorku. Nejzásadnější je ale pozorování různých prasklin a ostrých výstupků po celé ploše. To značí, že vlákna nejspíš opravdu nebyla dostatečně zakotvená a beton se okolo vláken lokálně poškozoval (pravděpodobně vlivem smykových napětí). Na obrázku 39 vidíme jiný vzorek s 2% vláken, kde jsou dokonce na levé straně patrné malé kusy betonu, které se vytrhly, aniž by z nich bylo vytaženo vlákno.

Popsané podoby lomových ploch nebyly typické jen pro 2% vyztužení. Už od 0,5% vyztužení byly patrné různé praskliny na lomové ploše. Pravděpodobně to značí, že vlákna se nedostatečně zakotvují již při jejich relativně malém objemovém zastoupení. To by mohlo znamenat, že vliv snižování odolnosti proti vytažení jednoho vlákna se sice uplatní již při nízkých procentech vyztužení, začne ale výrazněji převyšovat pozitivní efekt vyššího množství vláken až při vysokých procentech vyztužení. Tomu vlastně odpovídají i pozorované efektivní hodnoty absorbované energie, které byly velmi vysoké pro nejnižší procenta vyztužení.

Praktická použitelnost nízkých procent vyztužení je snížena možným nerovnoměrným rozmístěním vláken (jak bylo naznačeno v minulé kapitole). Z pohledu průběhu zatěžování prvků s nízkým procentem vyztužení, které jsou reprezentovány pracovními diagramy v kapitole 6.1.3, je pak patrné, že nestabilní poklesy zatěžovacích sil mohou být problémem. Pro 0,125% a 0,25% vyztužení je po dosažení pevnosti betonové matrice velmi výrazně snížena zbytková pevnost materiálu. Z toho důvodu se nízké vyztužení nejspíše nehodí do různých konstrukčních prvků, které by měly po zatížení rázem ještě plnit nosnou funkci. Lépe vychází 0,5% vyztužení, kde už pozorujeme výraznější tahové zpevnění. Po vzniku trhlin je zde pevnost kompozitu srovnatelná s pevností betonové matrice. Stále ale pozorujeme nestabilní poklesy, které způsobují významné lokální snížení pevnosti. Z pohledu celkové efektivnosti a praktické užítelnosti se nejlépe jeví 1% vyztužení. Nestabilní poklesy jsou velice malé a jak bylo vysvětleno, dosahuje toto procento vyztužení velmi dobré efektivity. Vzorky s 2% vláken také nevykazují nestabilní poklesy, jejich efektivita je ale pro kvazistatické zatížení výrazně nižší. Pro zatížení rázem nelze na základě provedených experimentů stanovit, jestli je 1% nebo 2% vyztužení vhodnější.



Obrázek 38: Rozdíl lomových ploch vzorku s 2% vyztužením a nevyztuženého vzorku



Obrázek 39: Detail lomové plochy pro vzorek s 2% vyztužením

7.3 Zhodnocení zkušebních postupů

7.3.1 Použití absorbované mechanické energie pro popis chování betonu

Na výsledcích získaných v této práci se dá velice názorně vysvětlit význam absorbované mechanické energie pro popis chování vláknky vyztuženého betonu zatíženého ohybem. Pokud srovnáme výsledky získané z pracovních diagramů, pevnost v tahu ohybem (tabulka 2, kapitola 6.1.2) a celkovou absorbovanou energii (tabulka 3, kapitola 6.1.4), můžeme pozorovat několik faktů. Tím nejdůležitějším je, že mezi oběma charakteristikami neplatí přímá úměrnost. Nelze s jistotou říci, kolik energie vzorek absorboval pouze na základě znalosti pevnosti v tahu ohybem. Dokonce ani nelze určit, jestli vzorek s vyšší pevností v tahu ohybem absorboval více energie než vzorek s pevností nižší.

S tím souvisí i diskuse na téma rozptyly výsledků z kapitoly 7.2.3. Pro absorbovanou mechanickou energii při kvazistatickém zatížení byly narozdíl od pevností v tahu ohybem pozorovány mnohem větší rozptyly hodnot. Pevnost v tahu ohybem závisí na hodnotě maximální zatěžovací síly a rozměrech prvků, ty jsou zde ale konstantní. Logicky tak pouze pevnost v tahu ohybem nemůže podat žádnou informaci o duktilním chování materiálu. Naopak absorbovaná mechanická energie je funkcí síly a průhybu, tudíž popisuje celý pracovní diagram. Rozměry prvků jsou uplatněny také, například při výpočtu koeficientu ohybové houževnatosti podle JSCE-G 552.

Narozdíl od kovů není u betonu prakticky reálné vždy dosáhnout téměř konstantních mechanických vlastností. Pečlivým dodržením všech technologických postupů však můžeme snížit rozptyly jejich hodnot. Nikdy se však pracovní diagramy vzorků stejných betonů nebudou přesně shodovat. Pevnost v tahu ohybem je vypočítána pouze z jednoho bodu pracovního diagramu. Absorbovaná energie se vypočte pomocí bodů všech. Čistě z tohoto důvodu tak budou její hodnoty kolísat více než pevnost v tahu ohybem. Rozhodně to ale nemusí být způsobeno nepřesností měření nebo možnými hrubými chybami v technologických postupech přípravy vzorků.

Je také třeba si uvědomit, že v této práci byla použita vlákna konstantní délky. Porovnávání chování různých vláknky vyztužených betonů zkrátka není možné pouze na základě znalosti pevnosti v tahu ohybem. Vlákna různých délek, případně i tvarů, budou výrazně ovlivňovat průběhy pracovních diagramů, zatímco dosažené pevnosti se tolik lišit nemusí. Z toho důvodu je nejpřesnější charakteristikou materiálu jeho pracovní diagram. Pokud není pracovní diagram k dispozici, tak vlákny vyztužený beton popisuje absorbovaná mechanická energie lépe než pouze pevnost v tahu ohybem.

ale absorbovaná mechanická energie zcela jistě popisuje vlákny vyztužený beton lépe než jen pevnost v tahu ohybem. To se uplatňuje právě u rázových zkoušek, kde sestavení pracovního diagramu mnohdy není možné.

Pro praktické aplikace je schopnost absorpce mechanické energie z hlediska návrhu betonových prvků velice vhodná. Většinou se totiž bude jednat o zatížení například střelbou, nárazem vozidla nebo výbuchem. U takových zatížení je snadné určit množství energie, kterou je potřeba betonovým prvkem absorbovat. Je tak logické, že stejnou veličinu použijeme při návrhu odolnosti prvků.

7.3.2 Rázové zatížení

Některé nejdůležitější výhody nové konstrukce rázového kyvadla byly již popsány v kapitole 5.2. Velice podstatná výhoda oproti původní konstrukci je odstranění tuhých podpor vzorku. Je tak kompletně vyloučena zásadní neznámá a kritická část konstrukce způsobující těžko popsateľné nejistoty. Další podstatnou výhodou je pak možnost měření absorbované mechanické energie. Je sice zamezeno přímému měření pevnosti v tahu ohybem, jak ale bylo vysvětleno v minulé kapitole, měření pouze absorbované energie jako veličiny popisující chování materiálu při rázovém zatížení, je vhodnější. Nové rázové kyvadlo je tak velice jednoduché. Rázové zkoušky trvají déle než například zkouška pevnosti v tahu ohybem při kvazistatickém zatížení, jsou však jednoduché na provedení i vyhodnocení. Pouze je nutné dbát na odpovídající kvalitu pořízených videozáznamů. Prakticky jediným měřicím přístrojem je fotoaparát nebo kamera s možností vysoké snímkovací frekvence. To vše znamená, že je zde dobrá možnost reprodukce provedených experimentů v jiných výzkumných pracovištích.

Odstraněním podpor vzorku s využitím pouze jeho setrvačnosti ke vzniku deformací je možné zkoušet prakticky jakékoliv tvary a rozměry zkušebních těles. Mohou být zkoušeny i různé menší reálně používané prvky. Rázové kyvadlo má možnost rychlé výměny zatěžovacího závaží. Je tak možné používat závaží s jinými hmotnostmi, tvary nebo možnostmi upevnění různých měřidel.

Při experimentech v této práci nebylo k dispozici těžší závaží, a proto vznikal problém s vyzkoušením silně vyztužených vzorků. Z bezpečnostních důvodů nebylo závaží vypouštěno z výšky větší jak 50 cm. Proto nebyla k dispozici dostatečná dopadová energie závaží pro vyvolání odpovídající reakce vzorku. Vzorky s vyššími procenty vyztužení také vykazovaly různé způsoby porušení. Ty nejspíš byly z velké části způsobeny nekonstantní orientací vláken. Zkušební postupy pro zatížení rázem obecně budou vyžadovat jistou míru cílené orientace vláken, aby bylo dosaženo výsledků, které budou díky nižším rozptylům více vypovídající.

Použitý experimentální postup je tak hodnocen velice kladně. Všechny popsané nedostatky a možné negativní vlivy na získané výsledky bude s největší pravděpodobností možné vyřešit postupnou optimalizací.

8 Závěr

Oba dva hlavní cíle práce byly splněny. Byl navržen, vyzkoušen a kladně zhodnocen nový zkušební postup pro zatížení rázem. Jak při rázovém, tak při kvazistatickém zatížení ohybem byly zjištěny hodnoty absorbované mechanické energie zkoumaného materiálu. I všechny dílčí cíle byly splněny. Byla určena pevnost v tahu ohybem a pevnost tlaková při kvazistatickém zatížení. Na základě provedených experimentů byla zhodnocena vhodnost použití absorbované mechanické energie jako veličiny popisující vlákny vyztužený beton.

Největším přínosem práce je právě nový zkušební postup pro zatížení rázem. V průběhu experimentů a jejich vyhodnocení byly zjištěny zásadní informace, které poskytují velice dobrý základ, na kterých bude celý postup dále optimalizován. Dalším cílem je uvedení postupu do stavu spolehlivého zkušební nástroje pro zjišťování chování materiálů při rázovém zatížení. V následující kapitole budou uvedeny směry takové optimalizace.

8.1 Zlepšení zkušebního postupu

Proces důkladné optimalizace zkušebního postupu bude nedílnou součástí dalších prací provedených na rázovém kyvadle. Zde je uveden stručný seznam možných vylepšení:

- Použití lepší vysokorychlostní kamery, případně optimalizace použití současného fotoaparátu pro zjišťování rychlostí, včetně sestavení jeho lepšího uchycení a lepšího nasvícení záběru
- Pomocí vysokorychlostní kamery s velmi vysokou frekvencí snímkování bylo ověřeno, že zatěžovací závaží má před nárazem rychlost téměř přesně odpovídající teoretické rychlosti ze vztahu pro rychlost volného pádu. Pro snížení časové náročnosti vyhodnocení tak nemusí být rychlost závaží stanovena z videozáznamu, ale pouze na základě výšky vypuštění. Ta by ale měla být do budoucna měřena s větší přesností.
- Použití zatěžovacích závaží o různých hmotnostech
- Z hlediska bezpečnosti musí být stanoven lepší postup zachycení závaží a vzorku po provedených rázech
- Ověřit rychlost deformace
- Pro lepší popsání rázů bude vhodné použít citlivější akcelerometry
- Zvýšit minimální počet rázů na jeden vzorek
- Měření rychlostí nemusí být nutně prováděno pomocí videozáznamu, ale například magneticky pomocí Hallovy sondy (elektronická součástka, která sepne obvod při detekci magnetického pole) nebo pomocí optických závor apod.
- Princip měření absorbované energie může být zcela změněn, aby probíhalo pouze měření výšek, do kterých závaží a vzorek po rázu vystoupají. Jednalo by se tak o bilanci potenciálních energií, do kterých vstupují jen samotné výšky (narozdíl od druhých mocnin rychlostí pro bilanci kinetických energií).

8.2 Směřování dalšího výzkumu

Jak již bylo několikrát řečeno, pro další výzkumy bude nutné optimalizovat rázové kyvadlo. Mimo jiné tak, jak bylo uvedeno v minulé kapitole. Protože dalším cílem je, aby se z experimentálního postupu pro zatížení rázem stala plnohodnotná zkouška, bude muset být proces optimalizace velice extenzivní.

Perspektivním směrem dalšího výzkumu je cílená orientace vláken. V různých kapitolách bylo zmíněno, že orientace vláken má významný vliv na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu. Při rázovém zatížení má pak pravděpodobně vliv vyšší, než při kvazistatickém. V Experimentálním centru je obecně pozornost věnována návrhu takového cementového kompozitu, který bude dobře odolávat rázovému zatížení. Cílená orientace vláken je tak dalším logickým krokem.

Hodnoty mechanických vlastností zjištěných při kvazistatické rychlosti zatížení bude třeba doplnit o měření dalších procent vyztužení. Nejefektivnějším se zde jeví 1% vyztužení. Bude tak vhodné, aby byly provedeny experimenty například s 0,75%; 1,25% a 1,5% objemu vláken. Pro rázové zatížení by ale mohlo být zajímavé vyzkoušet i velmi silná vyztužení, například až 3%.

V kapitole 6.2.2 bylo řečeno, že byly pozorovány rozdíly ve vlastní frekvenci různě vyztužených vzorků. Možným námětem pro další výzkumy by tak mohlo být například nedestruktivní měření vlastních frekvencí vzorků jako odhad jejich schopnosti absorbovat energii při rázovém zatížení, případně jiných vlastností.

Velice důležitým krokem v dalším výzkumu bude dosažení přímého srovnání absorbované energie pro zatížení kvazistatické a rázové. V této práci takové srovnání, například pomocí koeficientu DIF, nebylo vhodné. Zkušební postupy se příliš lišily. Pravděpodobně bude nutné vyjádřit absorbovanou energii pro oba druhy zatížení v závislosti například na lomové ploše nebo průřezovém modulu prvku apod.

9 Reference

- [1] KONRÁD Petr. *Ohybová kapacita prvků z vysokohodnotného vlákny vyztuženého cementového kompozitu při zatížení rázem*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.
- [2] SVOBODA Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty* [online]. 3. vydání. Praha: Luboš Svoboda, 2013 [cit. 2016-10-22]. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [3] RICHARDSON Alan, Kathryn COVENTRY, Thomas LAMB a David MACKENZIE. *The addition of synthetic fibres to concrete to improve impact/ballistic toughness*. Construction and Building Materials. 2016, 121, 612-621. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.024. ISSN 09500618.
- [4] Advanced - Reinforced Concrete. CEMEX UK [online]. CEMEX S.A.B. de C.V. [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <http://www.cemex.co.uk/advancedconcrete.aspx>
- [5] BENTUR Arnon a Sidney MINDESS. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007. ISBN 9780203088722.
- [6] Powers T. C. *The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete*. Research and Development Bulletin Of Portland Cement Association. Skokie, No. 90, 1958.
- [7] AITCIN Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [8] COX H.L. *The elasticity and strength of paper and other fibrous materials*. British Journal of Applied Physics, 1952, (3), 72-79.
- [9] BANTHIA Nemkumar a Jean-Francois TROTTIER. *Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some Concerns and a Proposition*. ACI Materials Journal. 1995, 92(1), 48-57.
- [10] LI V.C., Y. WANG a S. BACKER. *Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix*. Composites. 1990, 21(2), 132-140. DOI: 10.1016/0010-4361(90)90005-H. ISSN 00104361.
- [11] ALBERTI M.G., A. ENFEDAQUE, J.C. GÁLVEZ a A. FERRERAS. *Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes*. Construction and Building Materials. 2016, 112, 607-622. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.128. ISSN 09500618.
- [12] YOO Doo-Yeol a Nemkumar BANTHIA. *Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review*. Cement and Concrete Composites. 2016, 73, 267-280. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001. ISSN 09589465.

- [13] SOVJÁK Radoslav, Tomáš VAVŘINÍK, Jan ZATLOUKAL, Petr MÁCA, Tomáš MIČUNEK a Michal FRYDRÝN. *Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets*. International Journal of Impact Engineering. 2015, 76, 166-177. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.10.002. ISSN 0734743x.
- [14] KHALOO Alireza, Elias MOLAEI RAISI, Payam HOSSEINI a Hamidreza TAHSIRI. *Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers*. Construction and Building Materials. 2014, 51, 179-186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054. ISSN 09500618.
- [15] YU R., L. VAN BEERS, P. SPIESZ a H.J.H. BROUWERS. *Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings*. Construction and Building Materials. 2016, 107, 203-215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157. ISSN 09500618.
- [16] YOO Doo-Yeol, Su-Tea KANG a Young-Soo YOON. *Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC*. Construction and Building Materials. 2014, 64, 67-81. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.007. ISSN 09500618.
- [17] YOO Doo-Yeol, Nemkumar BANTHIA, Su-Tae KANG a Young-Soo YOON. *Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete*. Composite Structures. 2016, 157, 62-70. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.08.023. ISSN 02638223.
- [18] NÖLDGEN Markus, Werner Riedel, Klaus Thoma a Ekkehard Fehling. *Properties of ultra high performance concrete (UHPC) in tension at high strain rates*. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. 2013, 988–1000.
- [19] OŽBOLT Joško, Akanshu SHARMA, Bariş IRHAN a Emiliano SOLA. *Tensile behavior of concrete under high loading rates*. International Journal of Impact Engineering. 2014, 69. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.005. ISSN 0734743x.
- [20] WU Shengxing, Xudong CHEN a Jikai ZHOU. *Tensile strength of concrete under static and intermediate strain rates: Correlated results from different testing methods*. Nuclear Engineering and Design. 2012, 250, 173-183. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.05.004. ISSN 00295493.
- [21] OŽBOLT Joško, Akanshu SHARMA a Hans-Wolf REINHARDT. *Dynamic fracture of concrete – compact tension specimen*. International Journal of Solids and Structures. 2011, 48(10), 1534-1543. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.01.033. ISSN 00207683.
- [22] TAI Yuh-Shiou, Sherif EL-TAWIL a Ta-Hsiang CHUNG. *Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates*. Cement and Concrete Research. 2016, 89, 1-13. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.07.013. ISSN 00088846.
- [23] XU Man, Bryan HALLINAN a Kay WILLE. *Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete*. Cement and Concrete Composites. 2016, 70, 98-109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014. ISSN 09589465.

- [24] PEŠIĆ Ninoslav, Stana ŽIVANOVIĆ, Reyes GARCIA a Panos PAPASTERGIOU. *Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres*. Construction and Building Materials. 2016, 115, 362-370. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050. ISSN 09500618.
- [25] WON Jong-Pil, Jae-Ho LEE a Su-Jin LEE. *Predicting pull-out behaviour based on the bond mechanism of arch-type steel fibre in cementitious composite*. Composite Structures. 2015, 134, 633-644. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.127. ISSN 02638223.
- [26] LEE Su-Jin, A-Hyeon EOM, Su-Ji RYU a Jong-Pil WON. *Optimal dimension of arch-type steel fibre-reinforced cementitious composite for shotcrete*. Composite Structures. 2016, 152, 600-606. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.05.099. ISSN 02638223.
- [27] WU Mingxin, Zhenfu CHEN a Chuhan ZHANG. *Determining the impact behavior of concrete beams through experimental testing and meso-scale simulation: I. Drop-weight tests*. Engineering Fracture Mechanics. 2015, 135, 94-112. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.12.019. ISSN 00137944.
- [28] MO Kim Hung, Soon Poh YAP, U. Johnson ALENGARAM, Mohd Zamin JUMAAT a Chun Hooi BU. *Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete*. Construction and Building Materials. 2014, 50, 499-507. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.016. ISSN 09500618.
- [29] ZHANG M., H.J. WU, Q.M. LI a F.L. HUANG. *Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: Experiments*. International Journal of Impact Engineering. 2009, 36(12), 1327-1334. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.009.
- [30] GERLACH Robert, Christian KETTENBEIL a Nik PETRINIC. 2012. *A new split Hopkinson tensile bar design*. International Journal of Impact Engineering. 2012, 50, 63-67. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.08.004. ISSN 0734743x.
- [31] PARK Seung Hun, Dong Joo KIM a Sung Wook KIM. *Investigating the impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using an improved strain energy impact test machine*. Construction and Building Materials. 2016, 125, 145-159. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.027. ISSN 09500618.
- [32] OHNO T., T. UCHIDA, N. ISHIKAWA, Y. KASAI, H. TSUBOTA, M. UEDA, A. KAMBAYASHI a T. SHIRAI. *Improvement on impact resistance of reinforced concrete panels against projectile impact*. Transactions on the Built Environment. WIT Press, 1994 (vol. 8), 253-260. ISSN 1743-3509.
- [33] ČSN EN 1317-2. *Silniční záchytné systémy - Část 2: Svodidla a mostní svodidla - Funkční třídy, kritéria přijatelnosti nárazových zkoušek a zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [34] ČSN EN 14488-3. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

- [35] ČSN EN 14488-5. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 5: Stanovení kapacity absorbované energie vláknobetonových deskových zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [36] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [37] ASTM C1609 / C1609M-12. *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- [38] JSCE-G 552-1999. *Test method for bending strength and bending toughness of steel fiber reinforced concrete*. Standard Specification for Concrete Structures, Test Methods and Specifications, JSCE, 2005. 362pp.
- [39] Japan Society of Civil Engineers. *JSCE SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete*. Concrete Library International. Tokyo, 1984, (3), 58-61.
- [40] BANTHIA N. a S. T. ISLAM. *Loading Rate Concerns in ASTM C1609*. Journal of Testing and Evaluation. 2013, 41(6), 20120192-. DOI: 10.1520/JTE20120192. ISSN 00903973.
- [41] HABEL Katrin a Paul GAUVREAU. *Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC) to impact and static loading*. Cement and Concrete Composites. 2008, 30(10), 938-946. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.09.001. ISSN 09589465.
- [42] MÁČA Petr, Radoslav SOVJÁK a Petr KONVALINKA. *Mix design of UHPC and its response to projectile impact*. International Journal of Impact Engineering. 2014, 63, 158-163. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.08.003. ISSN 0734743x.