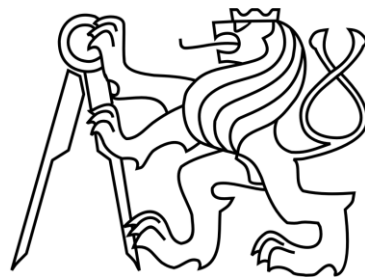


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
STAVEBNÍ FAKULTA
Katedra mechaniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Experimentální analýza deformací
kompozitního dřevobetonového nosníku**

Veronika Hlavatá

2018

Vedoucí: Ing. Václav Nežerka, Ph.D.

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Václava Nežerky, Ph.D., a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 27. 5. 2018

.....

Veronika Hlavatá

Poděkování

Chtěla bych poděkovat především Ing. Václavu Nežerkovi, Ph.D za vedení této bakalářské práce, ochotu a laskavost po celou dobu vypracování, za poskytnutí materiálů a cenných rad obratem, kdykoli jsem to potřebovala. Také za to, že mě našel a nabídl mi spolupráci na činnostech v experimentální mechanice a ukázal mi její krásu. Mé poděkování patří také doc. Ing. Petru Kuklíkovi, CSc. a Ing. Anně Kuklíkové, Ph.D. za umožnění účastnit se experimentu prováděného v rámci jimi řešeného projektu, poskytnutí dat z tohoto experimentu a jejich laskavost. V neposlední řadě bych ráda poděkovala mé rodině za jejich plnou podporu a pochopení během mých let studia.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákuova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hlavatá</u>	Jméno: <u>Veronika</u>	Osobní číslo: <u>437999</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra mechaniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Experimentální analýza deformací kompozitního dřevobetonového nosníku</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Experimental study on deformations of a composite timber-concrete beam</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1. Rešerše literatury	
2. Účast na experimentálním měření	
3. Vyhodnocení polí posunu a deformací	
4. Určení prokluzů mezi spáženými vrstvami	
5. Diskuse výsledků	
Seznam doporučené literatury:	
Odborné publikace WoS a SCOPUS	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Václav Nežerka, PhD</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>23. 2. 2018</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>27. 5. 2018</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.</i>	
_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Anotace

Dřevobetonové stropy nacházejí čím dál více uplatnění nejen u rekonstrukcí, ale také ve výstavbě dřevostaveb jako tuhé stropní konstrukce s minimalizací mokrého procesu. Cílem této práce je analyzovat a pochopit chování staticky zatížených spřažených dřevobetonových kompozitů. Za tímto účelem byla využita metoda korelace digitálního obrazu (digital image correlation, známé jako DIC), která umožnila efektivní vyhodnocení polí posunů a deformací ve 2D. Nejdříve byla provedena validace měření, porovnáním dat z DIC a extenzometrů připevněných na testované těleso. Dále byla provedena analýza chování celého testovaného tělesa, se zvláštním zaměřením na chování rozhraní mezi betonovou deskou a dřevěnými trámy. Pomocí virtuálních extenzometrů byly vyhodnoceny vertikální (zamačkávání) i horizontální (prokluz) relativní posuny mezi deskou a trámy, po délce nosníku i v čase. Po porovnání s normovým výpočtem podle Eurokódu bylo zjištěno, že skutečná únosnost je 3x vyšší než výpočtová.

Klíčová slova: dřevobetonové stropy, kompozit, korelace digitálního obrazu, DIC, experimentální mechanika, deformace

Abstract

Timber-concrete composite beams are increasingly used not only for renovations, but also for the construction of rigid floors with minimum amount of wet processes during assembly. The purpose of this work is to study the behavior of composite timber-concrete composites when statically loaded. To that purpose, digital image correlation (DIC) was employed in order to acquire full-field displacements and strains in 2D. First, validation was carried out by comparing the DIC results and outcomes of extensometers attached to the tested structure. Next, a comprehensive analysis of its behavior was done with focus on the performance of the shear connectors at the interface between the concrete slab and timber beams. Relative vertical and horizontal components of displacement were assessed along the beam and in time. It was found that the actual load-bearing capacity exceeded the predictions provided by the calculations according to Eurocode by the factor of three.

Keywords: timber-concrete floors, composite, digital image correlation, DIC, experimental mechanics, deformations

Obsah

Úvod.....	8
Cíle	9
ČÁST I: TEORETICKÁ.....	10
1 Dřevobetonové konstrukce	11
1.1 Princip.....	11
1.1.1 Spolupůsobení	11
1.1.2 Výhody.....	13
1.2 Použití.....	13
1.2.1 Historie.....	13
1.2.2 Současnost	14
1.3 Technologie	15
1.3.1 Druhy konstrukce.....	16
1.3.2 Materiály	17
1.3.3 Spřahovací prostředky.....	18
1.3.3.1 Spřahovací prostředky kolíkového typu	18
1.3.3.2 Spřahovací prostředky plošného typu	18
2 Korelace digitálního obrazu.....	20
2.1 Princip.....	20
2.2 Kontrastní vzor.....	21
2.3 Vyhodnocení.....	22
ČÁST II: EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČETNÍ.....	25
3 Experiment.....	26
3.1 Zkušební těleso	26
3.1.1 Průřez a rozměry	26
3.1.2 Materiály	27
3.1.2.1 Dřevo.....	27
3.1.2.2 Beton.....	28
3.1.2.3 Spřahovací prostředky.....	28
3.2 Příprava a průběh experimentu	29
4 Validace.....	33
4.1 Reálné snímače a virtuální extenzometry.....	33

5	Výsledky a diskuse	36
5.1	Vývoj posunů a deformací po délce nosníku	36
5.2	Vývoj posunů a deformací v čase.....	37
5.3	Únosnost nosníku	40
	Závěr.....	41
	Reference.....	42

Úvod

Spřažené dřevobetonové kompozity se ve stavebnictví objevují již od počátku 20. století. Lidé se snaží navracet k přírodním a obnovitelným zdrojům materiálů pro výstavbu a tím je hlavně dřevo. V rekonstrukcích je kombinace s betonem více než zřejmá. Trámy jsou mnohdy ve stále skvělém stavu, ale záklop je potřeba z různých důvodů nahradit. Často tímto důvodem bývá zvýšení únosnosti stropu. Při rekonstrukci je možné dřevěné stropní trámy zachovat a pomocí spřažení navázat deskou betonovou.

U výstavby dřevostaveb jsme ve stavebnictví narazili na limity tuhosti ve vodorovné rovině, a právě beton dokáže tuto tuhost zajistit. I proto se výzkumy věnují problematice výroby dřevobetonových prefabrikátů.

Cílem této práce je analyzovat chování takové dřevobetonového prefabrikátu a jeho deformace. Rozhodla jsem se pro analýzu metodou korelace digitálního obrazu (též nazývané DIC) – novodobé technologie umožňují zkoumat prvek bez užití snímačů umístěných přímo na zkoušeném prvku, jejichž nevýhodou je nedostatečné pokrytí prvku. Na rozdíl od metody DIC, díky které jsme schopni vykreslit deformace na celé ploše a odhalit tak třeba i případné lokální anomálie, které se pomocí skutečných snímačů zachycují jen těžko a spíše náhodou než cíleně.

Práce je rozdělena na dvě části – část teoretickou a část experimentální a výpočetní. V teoretické části je podrobně popsáno historické a současné využití dřevobetonových kompozitů pro stropní konstrukce. Dále pak vysvětlení metody DIC a jejího fungování. V experimentální a výpočetní části je, jak již název napovídá, popsán postup experimentu a tvar a rozměry zkušebního tělesa. Dále je uvedeno důkazné srovnání hodnot metody DIC a hodnot získaných z reálných snímačů pro průkaznost dalších výsledků, výpočtů a grafů, jež následují a analyzují deformace zkoušeného tělesa.

Cíle

Cílem této bakalářské práce je analyzovat deformace prefabrikovaného kompozitního dřevobetonového nosníku, resp. stropního panelu, při jeho zatěžování. Zaměřuje se zejména na:

- vyhodnocení výsledků pozorování deformací metodou korelace digitálního obrazu
- porovnání výsledků metody korelace digitálního obrazu s výsledky z reálných tenzometrů na zkoušeném prvku
- vyhodnocení celkových průhybů nosníku
- vyhodnocení zamačkávání betonu do dřevěných trámů
- vyhodnocení prokluzů mezi dřevěnými trámy a betonovou deskou
- ověření výpočtové únosnosti nosníku dle Eurokódu

ČÁST I:
TEORETICKÁ

1 Dřevobetonové konstrukce

V rámci trvale udržitelné výstavby můžeme v České republice, ale i ve světě, v posledních letech sledovat zvyšující se zájem o výstavbu z ekologicky šetrných materiálů. Mezi ně se automaticky nabízí dřevo a výrobky a kompozity na bázi dřeva, zvláště když uvážíme, že dřevo má pasivní uhlíkovou stopu.

Dřevostavby mají mnoho výhod, a především je to rychlost výstavby. Při výstavbě rodinných domů již dřevostavby nejsou žádnou výjimkou, při výstavbě bytové či administrativní už to tak obvyklé není. Totiž u dřevostaveb o více než dnešních standardních třech podlažích jsou kladené vyšší nároky na stropní konstrukce, které nejsou čistě dřevěné stropy schopné naplnit. Jedná se například o vyšší tuhost stropní konstrukce, vysoká zatížení nebo větší rozpětí. Zde se jako ideální řešení nabízí spřažení dřeva a betonu v kompozitních dřevobetonových konstrukcích.

1.1 Princip

Pomocí spřažení můžeme vytvářet nové prvky, které spojují ty nejlepší vlastnosti různých materiálů a potlačují tak vzájemně své méně příznivé vlastnosti. V případě spřažené dřevobetonové konstrukce se jedná o spojení betonové desky, resp. železobetonové, která má skvělé vlastnosti v tlaku, a tak je umístěna v oblasti převážně namáhané tlakem, a dřevěného nosníku, jež je namáhán převážně tahem za ohybu, resp. ohybem, v němž zase beton nevyniká.

Tím vytváříme konstrukci umožňující několikanásobně zvýšit únosnost konstrukčního systému. Při užití spřažené dřevobetonové stropní konstrukce je tuhost v horizontální rovině tak velká, že ji lze považovat za nekonečnou [4].

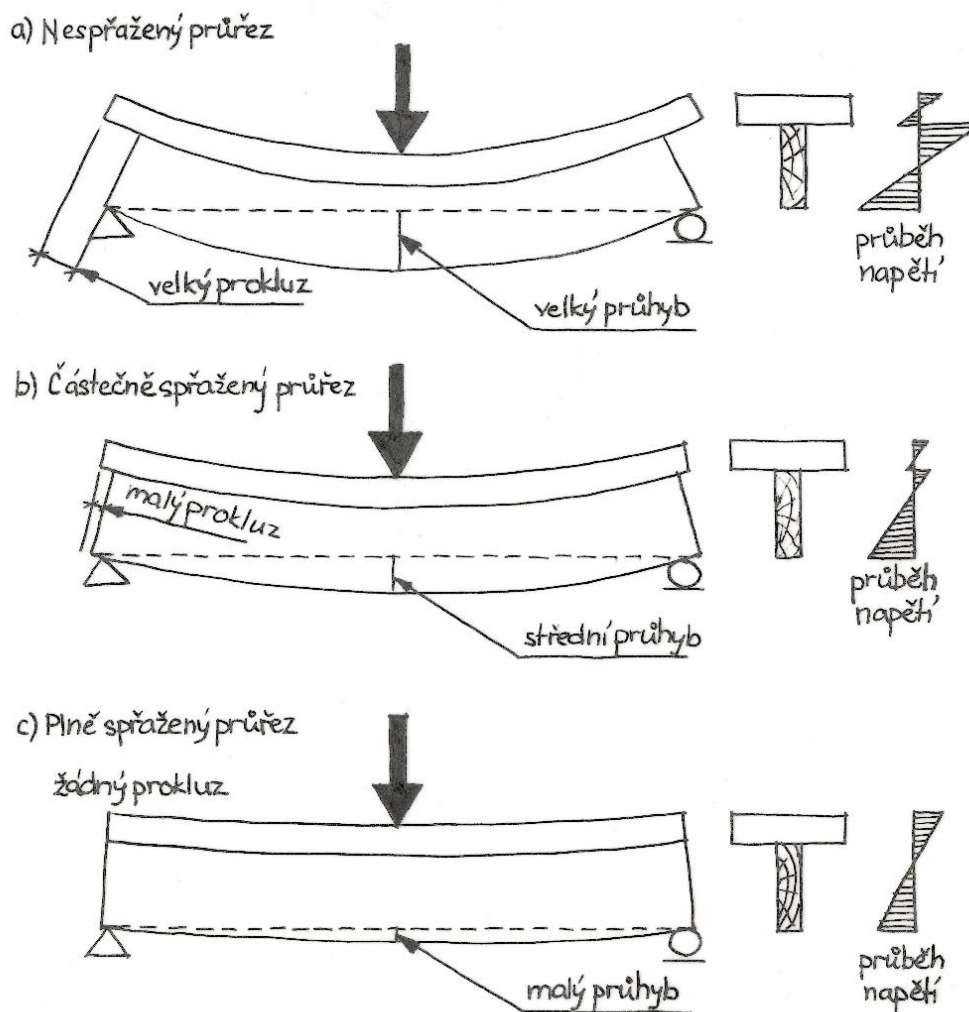
Spojení obou materiálů je provedeno spřahovacími prvky například kolíkového typu, což jsou různé hřeby, vruty apod., či plošného typu jako jsou spřahovací ocelové destičky s trny.

1.1.1 Spolupůsobení

Beton přenáší tlakové síly, zatímco, pokud je navržena, výztuž v něm přenáší malé tahové síly. Častěji se však neutrální osa nachází v místě dřevěných trámů a výztuž v betonu tak pouze zabraňuje vzniku trhlin od jeho smršťování. Do tažené oblasti je umístěn dřevěný nosník nebo masivní dřevěná deska. Na styku materiálů vznikají smykové síly přenášené pomocí spřahovacích prostředků, zpravidla ocelových.

Při ohybu spřaženého nosníku existují 2 hranice kompozitního chování. Dolní hranicí je nekompozitní chování (Obr. 1.1 a), kdy je betonová deska volně položena na dřevěných nosnících bez vzájemného propojení. Oba prvky se ohýbají nezávisle na sobě, v jejich styku nedochází k přenosu sil a mají každý svou vlastní neutrální osu. Horní hranicí je plně kompozitní chování (Obr. 1.1 c), kdy uvažujeme, že oba prvky jsou dokonale spojeny a fungují jako jeden. Na styku nedochází k žádnému prokluzu a mají jednu neutrální osu.

Reálně jsou prvky spojeny mechanickými prostředky podléhajícími deformaci a umožňující tak prokluz mezi vrstvami. Skutečné chování spřažené konstrukce je tak někde mezi těmito dvěma hranicemi (Obr. 11 b) [5].



Obr. 1.1: Chování konstrukce v závislosti na tuhosti spřažení.

1.1.2 Výhody

Dřevobetonové spřažené konstrukce se používají hlavně tam, kde potřebujeme systém v horizontální rovině zvlášť tuhý, přenést vysoká zatížení, či velká rozpětí. Navíc je ověřeno, že dřevobetonové stropní konstrukce mají lepší parametry kročejové a vzduchové neprůzvučnosti a požární odolnost oproti tradičním dřevěným stropům, či moderním systémům na bázi prefabrikace z velkoplošných dílců [6].

Shrnutí hlavních výhod spřažených dřevobetonových stropů:

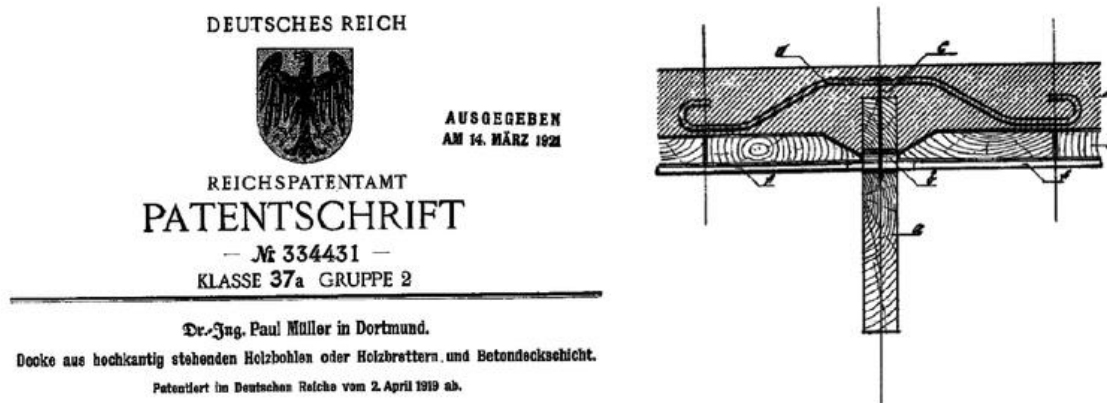
- vyšší únosnost,
- možná větší rozpětí,
- vyšší tuhost konstrukce, tedy možnost více podlaží v dřevostavbách,
- vyšší požární odolnost (až 90 minut),
- dobrá vzduchová a kročejová neprůzvučnost,
- dobré tepelně technické vlastnosti,
- při rekonstrukcích zachování původní dřevěné konstrukce,
- při rekonstrukcích bez zásahu do nižších podlaží.

Dřevobetonové spřažené stropy poskytují hospodárnou variantu k čistě dřevěným nebo čistě železobetonovým stropům.

1.2 Použití

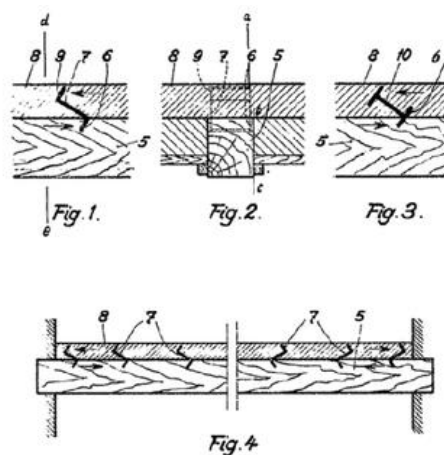
1.2.1 Historie

První dřevobetonové konstrukce pocházejí již z počátku 20. let 20. století. Po první světové válce se zmenšili zásoby oceli a hledaly se nové materiály pro výstavbu. Prvním spojením dřeva a betonu pro stavební účely je německý patent Paula Müllera již v roce 1921 (Obr. 1.2), kde je na dřevěných trámech položen záklop z prken a ke spřažení slouží ohnutá betonářská výztuž do tvaru ramene [5].



Obr. 1.2: Německý patent Paula Müllera z roku 1921 [5].

Další patent na propojení dřeva a betonu vlastnil švýcarský inženýr a vynálezce Otto Schaub. Tento patent registroval ve Švýcarsku v roce 1930 a následně jej rozšířil do mnoha evropských zemí i USA. V průběhu let vymyslel celou řadu různých řešení a v roce 1938 si nechal patentovat inovativní řešení spočívající v použití Z a I – profilů nebo tesařských skob (Obr. 1.3) [5].



Obr. 1.3: Švýcarský patent Otto Schaub z roku 1938 [5].

Poté až do konce 80. let 20. století byl dřevobeton užíván především pro renovace a zesilování dřevěných stropních konstrukcí historických objektů. Jedna z prvních renovací se realizovala v roce 1960 v Bratislavě, kterou provedl inženýr Jozef Poštulka. Ten ke spřažení použil hřebíky $\varnothing 6,3$ mm a délky 180 mm v rozteči 100 mm v oblasti podpory a 250 mm uprostřed rozpětí, a to až v pěti řadách na jednom nosníku v závislosti na jeho šířce [5].

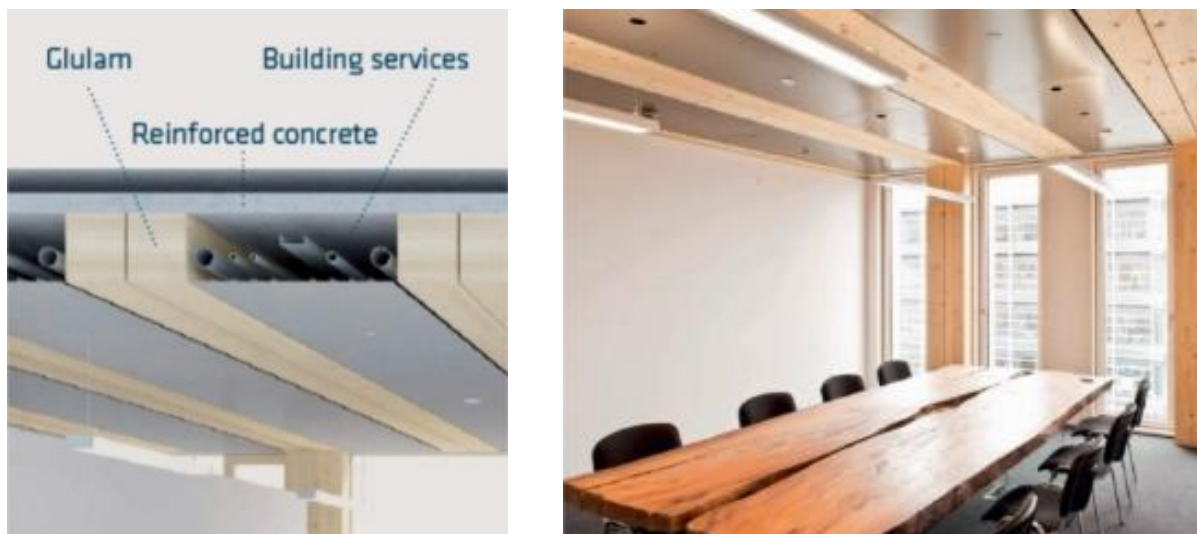
1.2.2 Současnost

Jak již bylo řečeno, i dnes se dřevobeton užívá převážně k vyztužování a zesilování starých stropních konstrukcí. Své uplatnění ale již nachází právě ve výše zmíněných vícepodlažních dřevostavbách v bytové i nebytové výstavbě, kde je velmi důležité, aby stropní deska byla co nejtužší, nebo pro realizaci mostů a lávek.

Příklad stavby, kde jsou uplatněny dřevobetonové prefabrikované stropní dílce, je budova Life Cycle Tower ve Vídni (Obr. 1.4). Dřevobetonové prefabrikované dílce pomohly stavbu urychlit a vyřešit požadavky na požární bezpečnost. Díky tvaru stropních dílců se navíc podařilo efektivně vyřešit vedení inženýrských sítí mezi trámy v podhledu (Obr. 1.5).



Obr. 1.4: Life Cycle Tower [4].



Obr. 1.5: Vedení inženýrských sítí mezi trámy dřevobetonových panelů v Life Cycle Tower [4].

1.3 Technologie

Při realizaci dřevobetonových stropních konstrukcí převládá monolitické provedení desky přímo na stavbě, to má ale mnoho nevýhod. Naopak u rekonstrukcí je tento způsob nenahraditelný. Při rekonstrukci se starý dřevěný strop rozebere pouze po záklop, umístí se spřahovací prvky a zalije se betonovou směsí. Bez zásahu do spodních podlaží, bez demontáže původních dřevěných trámů.

U novostaveb je nevýhodou například nutnost vytvořit bednění, které je buď uloženo přímo na nosnících, čímž vytváří mezivrstvu mezi kompozity, což negativně ovlivňuje celkovou únosnost spřažení, nebo je částečně zapuštěno pod úroveň horní hrany, a to zvyšuje pracnost a náklady.

Další nevýhodou je nutnost ochrany dřeva proti vlhkosti z betonové směsi, potřeba podpěrné konstrukce při betonáži, a to nemluvě o vnášení mokrého procesu na stavbu, což obecně prodlužuje dobu výstavby, u dřevostaveb uplatňovaných právě pro svou rychlost tolik nežádoucí. Z toho důvodu se odborníci začali zabývat možnostmi prefabrikované výroby.

Prefabrikaci můžeme rozdělit na celkovou nebo částečnou. Celkovou prefabrikaci není třeba dlouze vysvětlovat, jednoduše se na staveniště doveze hotový panel již spřaženého dřevobetonu a zabuduje se do konstrukce. Stavba se maximálně vyhne mokrému procesu a zrychlí se doba výstavby. Problémem pak zůstává nutnost podélného spojení dílců a zvýšené nároky na skladování, přepravu a montáž.

Částečnou prefabrikaci lze provést přípravou nosníků se spřahovacími prostředky dovezených na staveniště a zde po osazení vybetonovat desku, čímž se ale nezbavíme monolitické technologie. Výhodou může být použití složitějších spřahovacích prostředků a jejich kvalitní provedení.

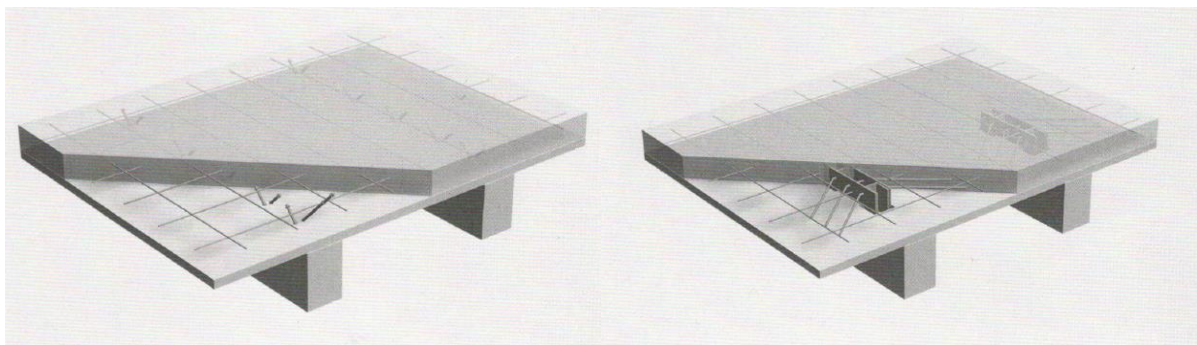
Druhou možností částečné prefabrikace je naopak příprava betonové desky se zabetonovanými spřahovacími prostředky a osazení na nosníky probíhá na stavbě. Výhodou je, že nemusíme používat bednění, vyhneme se monolitické technologii a nemusíme provádět ochranu dřeva vůči vlhkosti z betonové směsi. Nevýhodou může být zvýšená pracnost a nároky na vysokou přesnost montáže.

Doporučení pro provádění jsou shrnutá v následujících bodech.

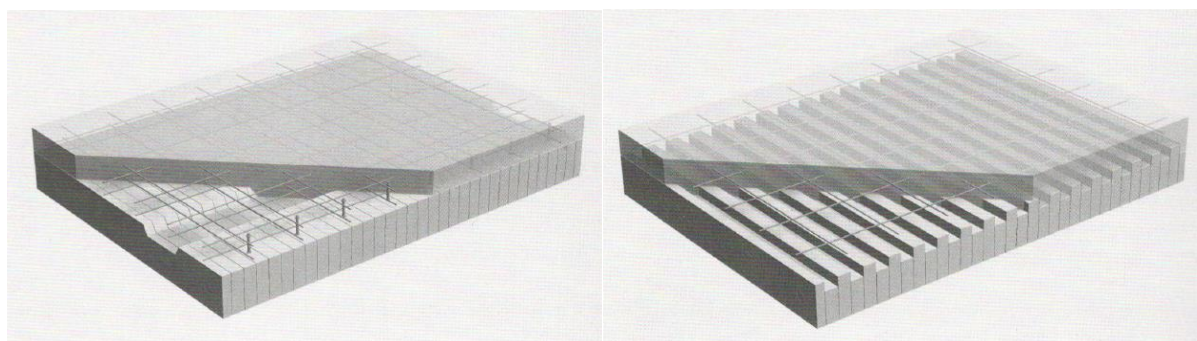
- Spřažené dřevobetonové stropní konstrukce by neměly být používány v prostorách, kde je vysoká vlhkost vzduchu a/nebo vysoká teplota.
- Nemělo by se na ně používat dřevo napadené dřevokaznými houbami a též dřevo se dřevní a s vysokou vlhkostí.
- U dřeva by měla být zvýšená pozornost věnována již existujícím i potenciálně možným výsušným trhlinám. V místech existujících či předpokládaných výsušných trhlin by neměly být umísťovány spojovací prostředky.
- Ocelové spojovací prostředky by měly mít protikorozní povrchovou úpravu.
- Zvýšená pozornost by měla být věnována vyztužení tlustých betonových desek, aby se předešlo ztrátě tuhosti spřaženého průřezu v důsledku trhlin v tažené oblasti betonové desky.
- Při betonování desky by mělo být dřevo chráněno před vodou z betonové směsi např. použitím vodotěsné fólie, nebo použitím betonu s nižším vodním součinitelem (bude menší smršťování betonu). Tento požadavek je vhodné zajistit především z estetického hlediska.
- Pozor na dřeviny, které mohou zpomalovat tuhnutí betonu s ohledem na vyšší obsah cukrů v dřevní hmotě.
- S rostoucím rozpětím nosníků by měla být dána přednost měkčím spojovacím prostředkům.
- Když je to možné, betonová deska by měla být používána především za účelem snížení průhybu stropní konstrukce, než za účelem snížení napětí ve dřevěných nosnících [3].

1.3.1 Druhy konstrukce

Při vytvoření dřevobetonového spřaženého stropu ještě rozlišujeme různé druhy konstrukcí: trémovou stropní konstrukci s lineární nosnou konstrukcí (Obr. 1.6) nebo plošné nosné systémy, kde je jako nosná dřevěná konstrukce použit strop vrstvený z řeziva (Obr. 1.7) nebo také deskové, lepené výrobky.



Obr. 1.6: Trámový strop (spřažené kotvy SFS vlevo, spřažené kotvy BVD vpravo) [1].



Obr. 1.7: Stropy vrstvené z řeziva [1].

1.3.2 Materiály

Železobetonová deska v tlačené oblasti zpravidla bývá z hutného betonu jakékoli třídy tloušťky 80 až 200 mm spojitá přes dřevěné nosníky. Je vyztužená jen tak, aby se předešlo trhlinám od smršťování betonu a od ohybu betonové desky mezi dřevěnými nosníky. Vzhledem k minimální krycí vrstvě výztuže a rameni vnitřních sil je tloušťka desky nejméně 80 mm.

Pro dřevobetonové konstrukce se dá použít celá škála dřevěných prvků, ať už z rostlého řeziva, nebo třeba lepené lamelové dřevo.

Dimenze dřevěných nosníků a tloušťka betonové desky vychází ze statického a dynamického výpočtu konstrukce. Dimenze, počet ocelových desek a jejich umístění po délce nosníků a výškové umístění desky v průřezu vychází ze statického a dynamického výpočtu konstrukce [6].

Tuhost spřaženého stropu je závislá především na účinnosti spřažení a ohybové tuhosti dřevěného nosníku

Spřažené dřevobetonové konstrukce lze zjednodušeně řešit s využitím ČSN EN 1992-1-1, ČSN EN 1995-1-1 a ČSN EN 1995-1-2 [7].

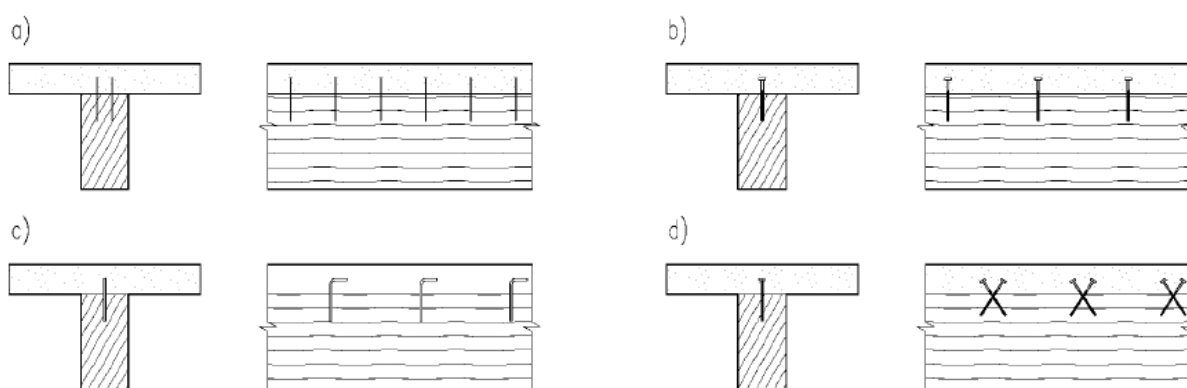
1.3.3 Spřahovací prostředky

Spřahovací prostředky slouží ke spřažení dřeva a betonu v kompozitní prvek. Použitím těchto prostředků zvýšíme tuhost i únosnost stropní konstrukce a snažíme se o minimální prokluz spojení, což zároveň způsobí minimalizaci celkového průhybu konstrukce.

Během posledních 20 let vznikly desítky možností, jak oba materiály vzájemně spojit. Zájem o větší uplatnění kompozitních dřevobetonových konstrukcí vedl k vývoji nových spřahovacích prostředků určených jen pro tyto konstrukce.

1.3.3.1 Spřahovací prostředky kolíkového typu

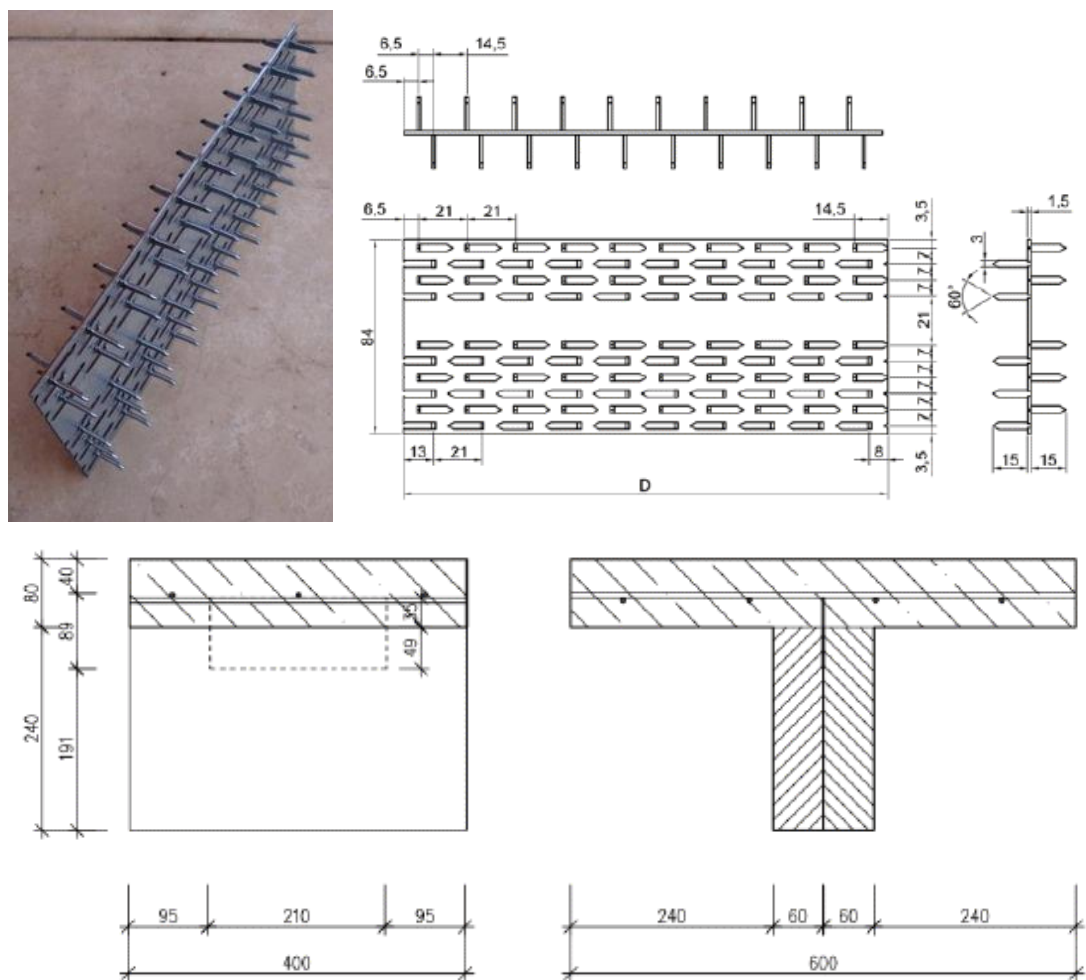
Dříve dominovaly klasické spojovací prostředky kolíkového typu (hřebíky, vruty, kolíky apod.; Obr. 1.8) a v mnoha inovacích se používají dodnes. Tento typ spojovacích prostředků zajišťuje poddajný nebo polotuhý typ spřažení.



Obr. 1.8 Spřahovací prostředky kolíkového typu: a) hřebíky, b) šrouby (vertikálně), c) lepená výztuž, d) šrouby (nakloněné) [13].

1.3.3.2 Spřahovací prostředky plošného typu

Z potřeby vyrábět stropy alespoň částečně, ideálně zcela, prefabrikované dřevobetonové stropy vznikl inovativní spřahovací prostředek (Obr. 1.9). Současně s vývojem tohoto spřahovacího prostředku byla zpracována idea pro vlastní aplikaci do kompozitního průřezu, aby byl splněn požadavek snadné a ekonomické výroby. Kompozitní průřez vznikne spojením dvojice dřevěných nosníků z rostlého dřeva obdélníkového průřezu pomocí ocelových desek s oboustranně prolisovanými trny tak, aby část desky přečnívala přes horní okraj nosníků. Tento přesah je následně zalit betonovou směsí. K zalisování ocelových desek s používá speciální lisovací zařízení [6].



Obr. 1.9: Inovativní spřáhovací prostředek BV15/0 [6] [7].

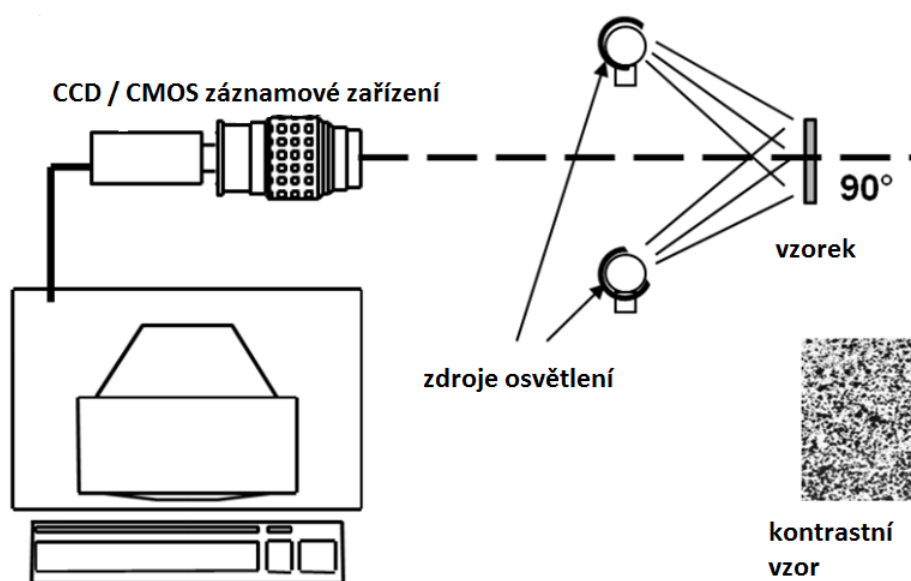
2 Korelace digitálního obrazu

Korelace digitálního obrazu (metoda známá jako DIC = Digital Image Correlation) je optická bezkontaktní metoda v experimentální mechanice pro určování polohy, posunů a deformací na povrchu objektů (v digitálních obrazech). Metoda je velmi efektivní a umožňuje nám pozorovat zkoušený prvek v celé jeho ploše, aniž bychom museli interpolovat výsledky mezi jednotlivými tenzometry.

2.1 Princip

Jak již bylo řečeno, jedná se o optickou metodu, není tedy třeba prvek nijak zvlášť připravovat, umisťovat tenzometry apod. Jediné, co je potřeba, je nanesení speciálního skvrnitého vzoru. Výhodou této metody je, že jí lze pozorovat prvky jakékoli velikosti, právě proto, že není třeba na ni umisťovat fyzická zařízení pro záznam deformací.

Poté, co je prvek takto připraven, se připraví samotné zařízení pro pozorování (Obr. 2.1). V podstatě se jedná o obyčejný fotoaparát, který je namířen na pozorovaný prvek a nastaven tak, aby prvek fotografoval v konkrétní frekvenci v průběhu pozorování deformačního stavu, kterou volí uživatel podle potřeby a charakteristiky účelu. Může se tak jednat o vteřiny, ale i dny (např. u pozorování sesuvů skalních masivů). Podmínkou většinou je, aby byl prvek kvalitně nasvícen a nedocházelo k velkým výkyvům intenzity osvětlení v průběhu měření. To by mohlo výsledky zkoušky negativně ovlivnit.

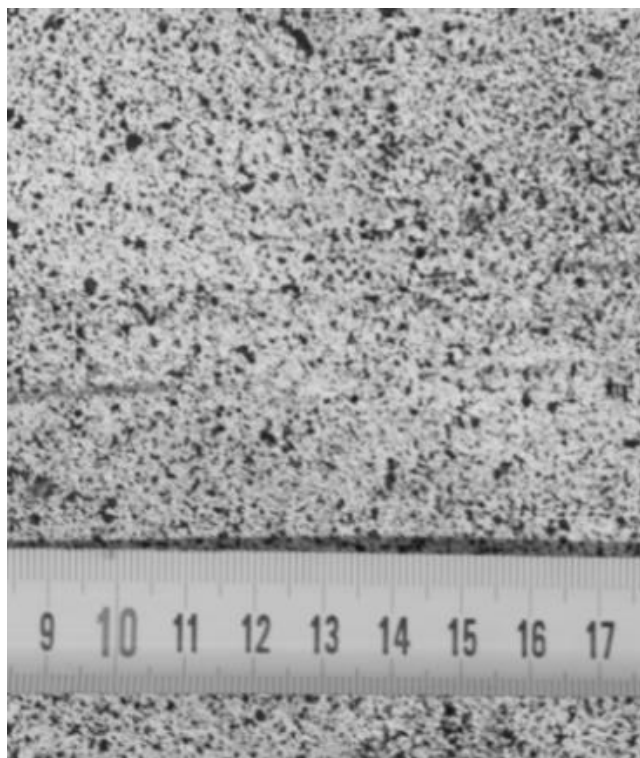


Obr. 2.1: Rozmístění fotoaparátu a osvětlení vůči pozorovanému prvku [14].

Jakmile jsou snímky povrchu zatěžovaného tělesa nasnímané, převedou se na matice se stupni šedi, oříznou nepotřebné okraje a tím jsou připravené k vyhodnocení. Vyhodnocení probíhá pomocí softwaru tomu určenému (v mém případě kombinace programů Ncorr a Ncorr_post). Software pracuje na principu sledování změn mezi jednotlivými po sobě jdoucími snímky. Rozlišení výsledných polí posunů a deformací je přímo úměrné rozlišení pořízených snímků; velikost pixelu souvisí s rozlišovacími schopnostmi měřicího zařízení – fotoaparátu a rozměry analyzované oblasti. Software hledá (koreluje) skrz jednotlivé snímky sety pixelů a iterativně dopočítává i jejich deformace. Ve fázi post-processingu je možné výsledné posuny v pixelech (používaný software dokáže vyhodnocovat i podpixelové deformace) naškálovat na fyzikální jednotky délky, tj. v případě používaného softwaru metry.

2.2 Kontrastní vzor

Kontrastní skvrnitý vzor (Obr. 2.2) je na prvky nanášen z toho důvodu, aby následně vyhodnocující software dokázal jednoduše rozpoznat posuny a deformace z průběhu zkoušky. Aby posuny rozpoznal, je nutné, aby byl každý set pixelů maximálně unikátní. Toho docílíme právě nanesením skvrnitého vzoru.



Obr. 2.2: Kontrastní skvrnitý vzor [14].

Jak můžeme vidět na Obr. 2.3. jedině tento skvrnitý vzor dokáže zaručit, aby se na snímku neopakovaly stejné sety pixelů. Vzor nesmí být opakující se, anizotropní a musí mít dostatečný kontrast.

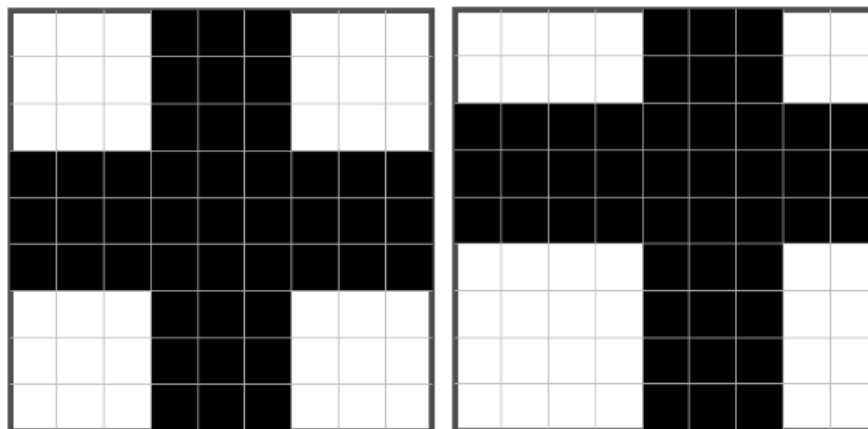


Obr. 2.3: Ukázky různých vzorů.

Náhodný skvrnitý vzor získáme pomocí nástřiku černé barvy (výjimečně se dá využít přirozená textura samotného prvku). Nástřik musí být náhodný a jednotlivé skvrnky nesmí být ani moc malé ani moc velké, mohli bychom pak zjistit, že určité sety jsou pouze černé nebo pouze bílé, a to by mohlo způsobit chyby v měření. Někdy je vhodné dokonce pod černý nástřik nanést souvislý bílý nátěr. Jedná se o případy, kdy by černý nástřik nebyl dostatečně kontrastní vůči barvě zkoušeného prvku.

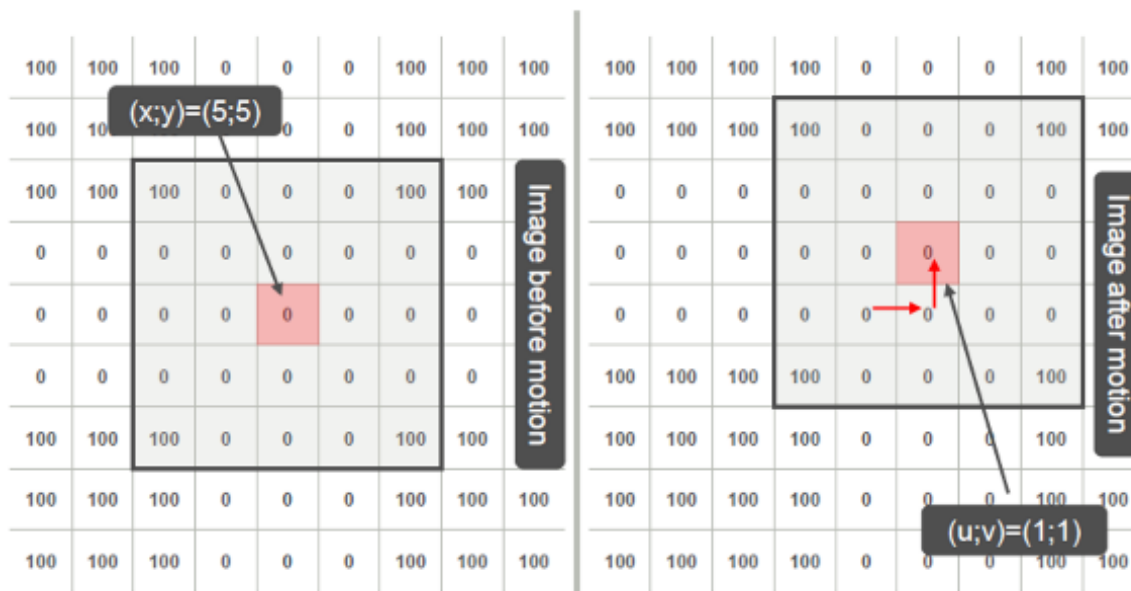
2.3 Vyhodnocení

Jak již bylo řečeno, software vyhodnocuje změny mezi jednotlivými snímky pomocí setů pixelů. To znamená, že existuje vždy výchozí snímek a posuzovaný snímek, dejme tomu jako na Obr. 2.4.



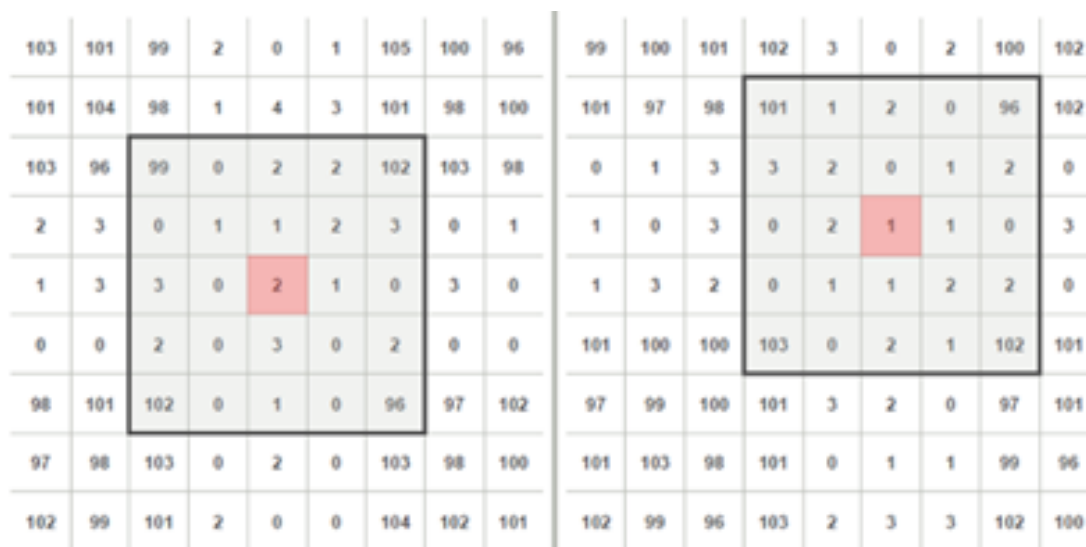
Obr. 2.4: Vyhodnocované snímky: výchozí vlevo, posuzovaný vpravo [14].

Software tedy začne vyhledávat sety pixelů a zkoumat, kam se tyto sety přemístily (Obr. 2.5).



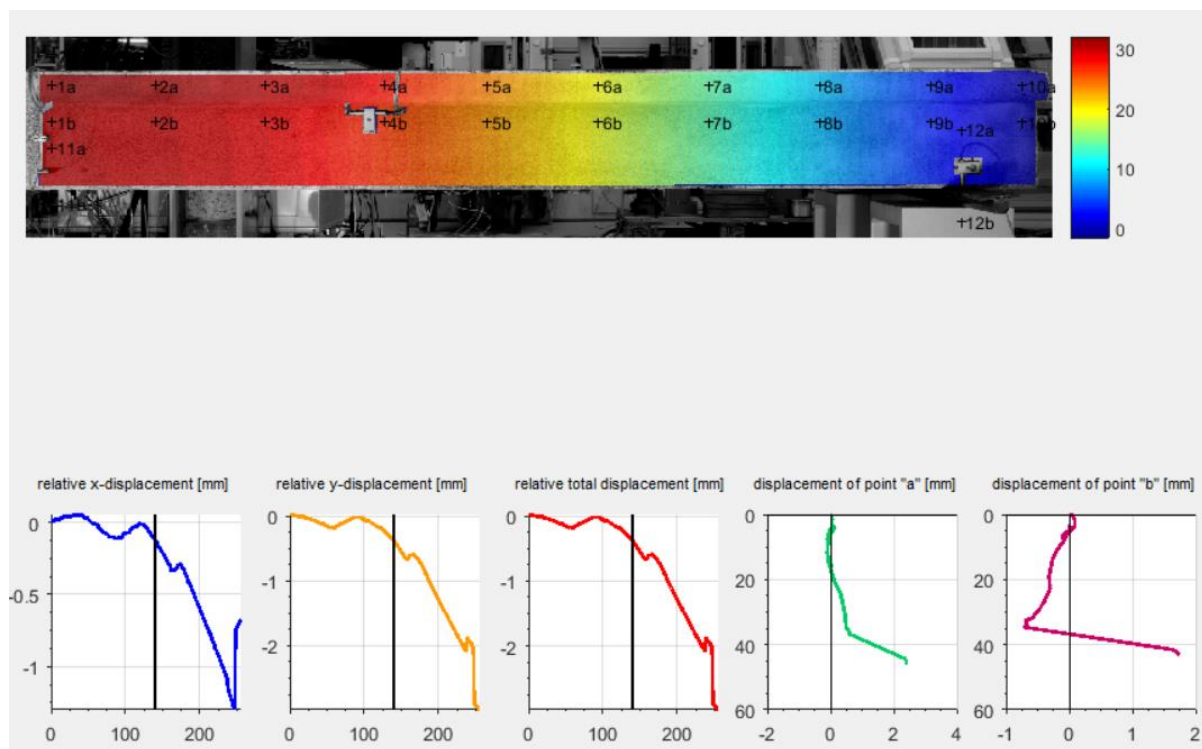
Obr. 2.5: Vyhodnocované snímky při vyhodnocení: výchozí vlevo, posuzovaný vpravo [14].

V praxi je logické, že software nemůže vždy najít 100 % shodu, protože o kus vedle působí set pixelů jinak barevně, nebo dochází k narušení vzoru vlivem deformace apod., tudíž je samozřejmě schopen hledat podobnou shodu, tedy mírně pod 100 % (Obr. 2.6).



Obr. 2.6: Vyhodnocované snímky při vyhodnocení bez 100 % shody: výchozí vlevo, posuzovaný vpravo [14].

Výsledkem takového vyhodnocení softwarem je grafické znázornění posunů na povrchu pozorovaného prvku (Obr. 2.7).



Obr. 2.7: Výstup DIC analýzy v programu Ncorr_post.

ČÁST II:
EXPERIMENTÁLNÍ
A VÝPOČETNÍ

3 Experiment

Tato práce se věnuje experimentální analýze deformací kompozitního dřevobetonového nosníku. Práci tedy předcházela experiment, kdy byl takový kompozit zatěžován a pozorován dvěma různými metodami. Jednou z metod je standardní použití skutečných snímačů posunů a deformací (tenzometry a extenzometry) umístěných přímo na povrchu zkoušeného kompozitu. Druhou metodou je metoda korelace digitálního obrazu, tj. optická metoda bez kontaktu s kompozitem během jeho zkoušení (metoda popsána v samostatné kapitole výše).

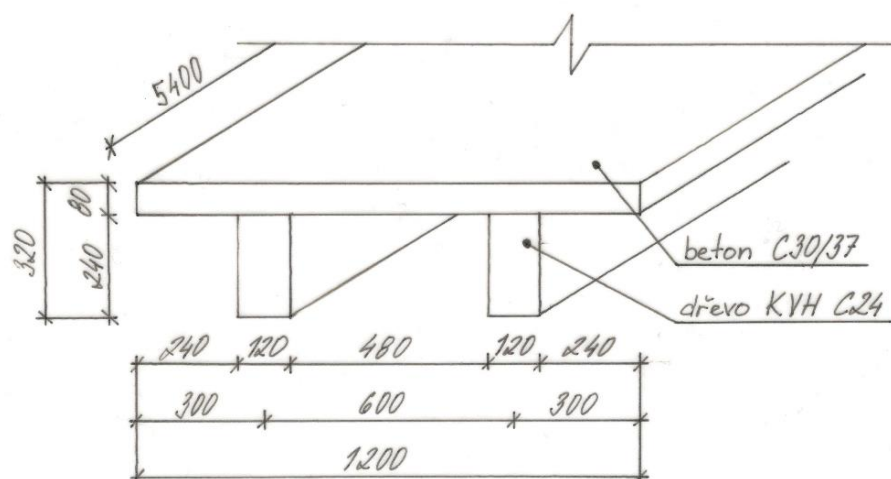
Experiment se uskutečnil v laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze, Trinecká 1024, Buštěhrad.

3.1 Zkušební těleso

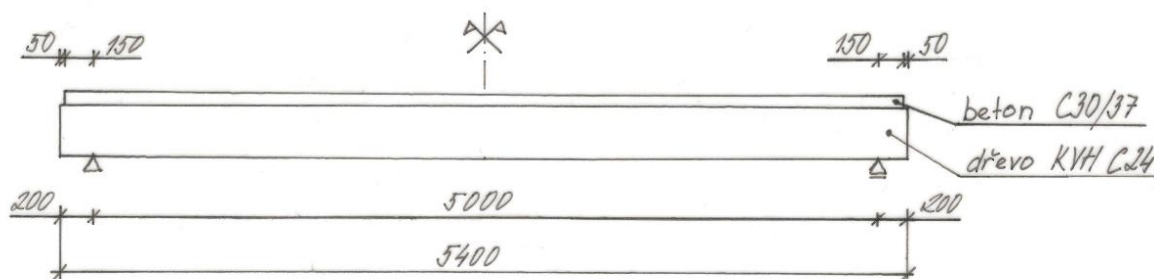
Základem zkušebního tělesa jsou hranoly z rostlého dřeva vždy v páru, mezi nimiž se nachází zalisované spřahovací ocelové destičky s prolisovanými trny. Tyto destičky jsou částečně vysunuty mimo tyto hranoly a následně jsou zality betonovou deskou. Nosník je proveden bez bednění v mezivrstvě, hranoly jsou tak v přímém kontaktu s betonovou deskou.

3.1.1 Průřez a rozměry

Zkušební těleso má tvar průřezu „TT“, je tvořen čtyřmi hranoly z rostlého dřeva vždy v páru spojenými do obdélníkového průřezu 120/240 mm a betonovou deskou tloušťky 80 mm. Hranoly jsou spojené mezi sebou a zároveň spřažené s betonem spřahovacími prvky umístěnými v rozteči 500 mm. Zkušební těleso je široké 1 200 mm a délky 5 400 mm, rozpon mezi trámy je 600 mm. Těleso je symetrické jak po své podélné, tak příčné ose.



Obr. 3.1: Tvár průřezu a rozměry zkušebního tělesa.



Obr. 3.2 Podélné řešení a rozměry zkušebního tělesa.

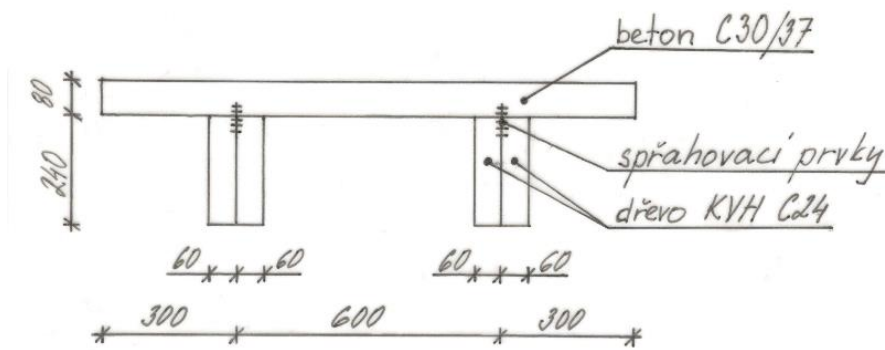
3.1.2 Materiály

Základem pro výpočty experimentu je mimo známé rozměry i znalost materiálů a jejich charakteristických hodnot.

3.1.2.1 Dřevo

Pro zkušební těleso byly použity hranoly z rostlého dřeva KVH třídy pevnosti C 24 o rozměrech 60 x 240 mm. Pro výpočty jsou uvažovány následující charakteristické hodnoty:

- pevnost v ohybu $f_{m,k} = 24$ MPa
- pevnost v tahu $f_{t,0,k} = 14$ MPa $f_{t,90,k} = 0,5$ MPa
- pevnost v tlaku $f_{c,0,k} = 21$ MPa $f_{c,90,k} = 2,5$ MPa
- pevnost ve smyku $f_{v,k} = 2,5$ MPa
- modul pružnosti $E_{0,mean} = 11,0$ GPa
- hustota $\rho_k = 350$ kg.m⁻³
- součinitel materiálu $\gamma_M = 1,3$



Obr. 3.3: Schéma spřažení hranolů a betonu zkušebního tělesa.

3.1.2.2 Beton

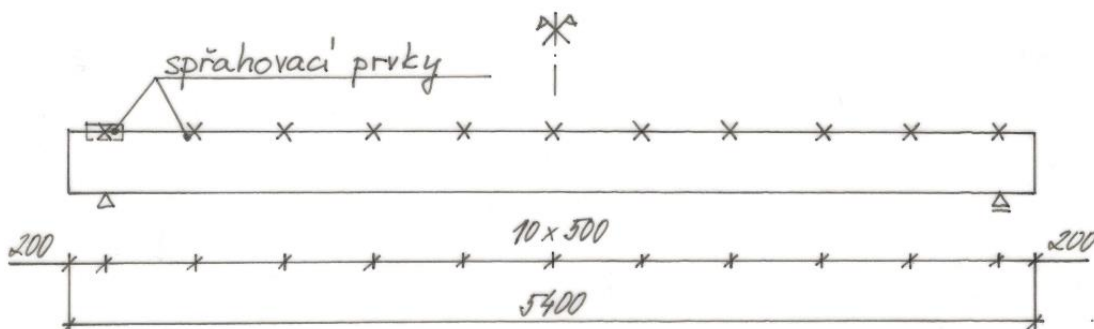
Na výrobu zkušebního tělesa byl použit beton pevnostní třídy C 30/37 tloušťky 80 mm. Pro výpočty jsou uvažovány následující charakteristické hodnoty:

- pevnost v tlaku $f_{c,k} = 30$ MPa
- pevnost v tahu $f_{ct,m,k} = 2,90$ MPa
- modul pružnosti $E_{c,m} = 32,8$ GPa
- součinitel materiálu $\gamma_M = 1,5$

3.1.2.3 Spřahovací prostředky

Jako spřahovací prvky jsou navrženy ocelové destičky s prolisovanými trny 210/84 v rozteči 500 mm symetricky od středu nosníku. Parametry spřažení jsou následující:

- modul prokluzu $K_{ser} = 33$ kN.mm⁻¹
- modul prokluzu pro mezní stavy únosnosti
 $K_u = 22$ kN.mm⁻¹
- charakteristická únosnost pro jeden stříh jednoho spojovacího prostředku
 $F_{v,Rk} = 33$ kN

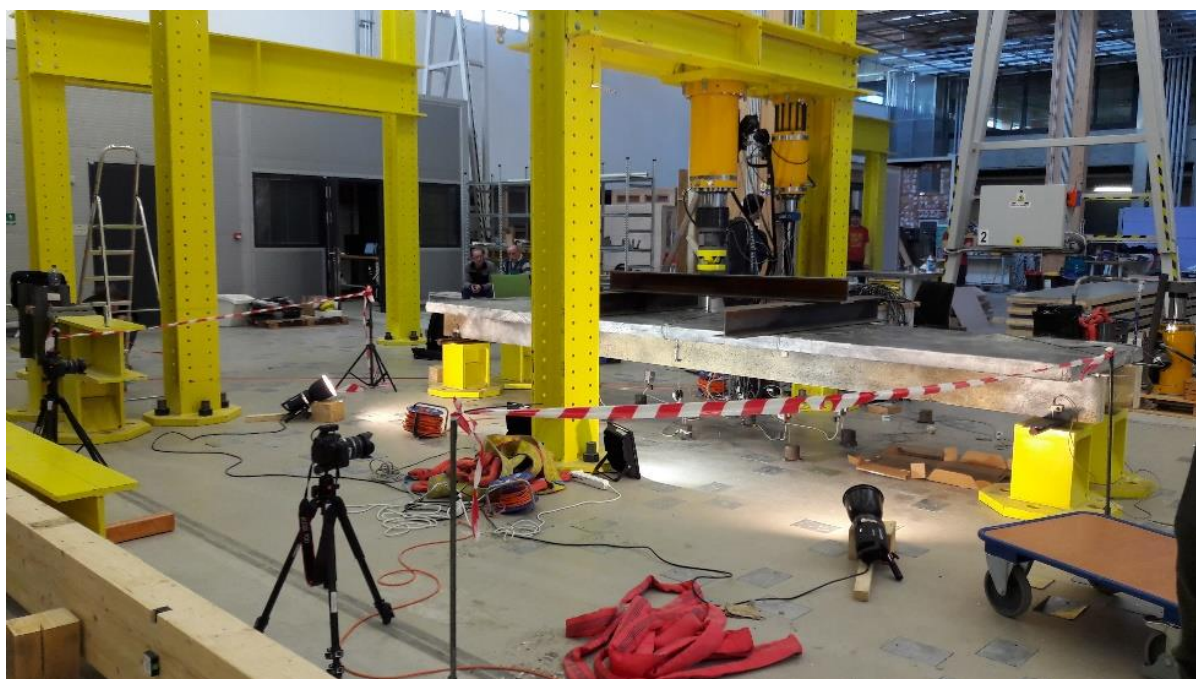


Obr. 3.4: Rozmístění spřahovacích proků na zkušebním tělese.

3.2 Příprava a průběh experimentu

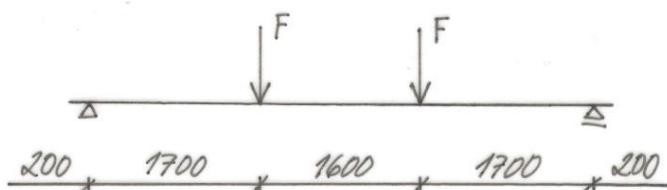
Pro pozorování deformací na zkušebním tělese bylo potřeba před zahájením samotné zkoušky umístit na těleso potřebné snímače - odporové tenzometry, potenciometry a indukční snímače.

Pro sledování metodou DIC se provedl na jedné z podélných stran nosníku potřebný nástřík. Dále pak byly umístěny dva fotoaparáty tak, aby každý snímal jednu polovinu nosníku. Nosník byl navíc nasvícen halogenovými svítilnami pro zvýšení kontrastu na fotografiích pro pozdější zpracování.



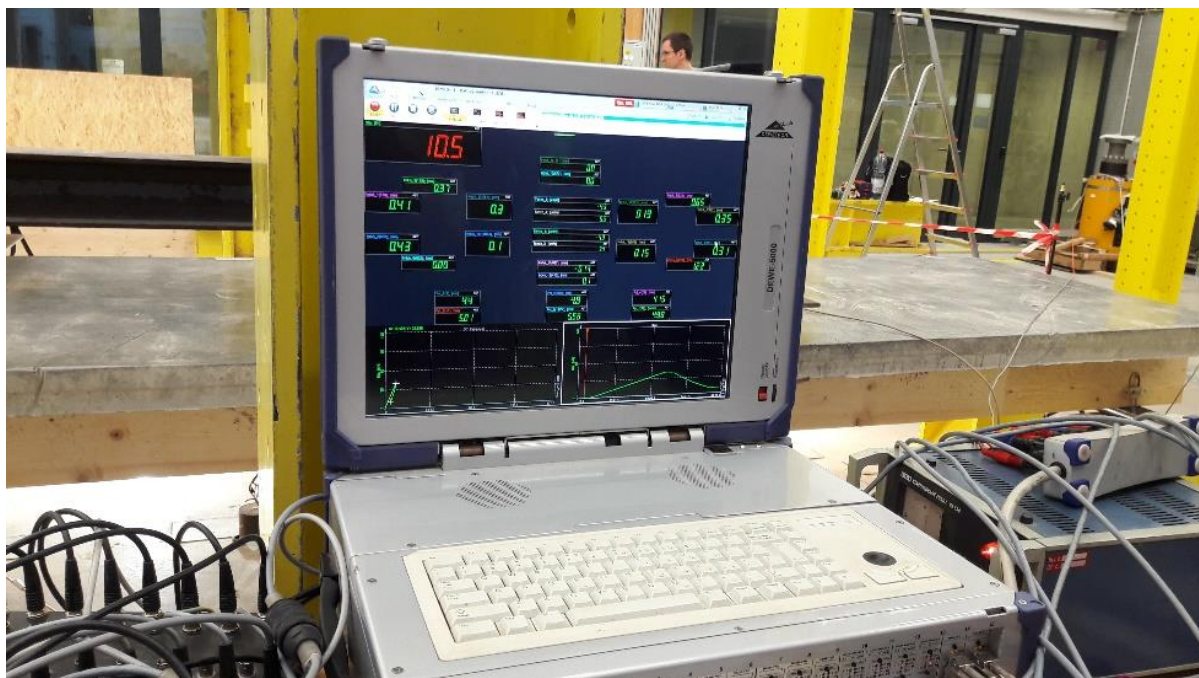
Obr. 3.5: Rozmístění fotoaparátů a osvětlení vůči pozorovanému proku, způsob zatížení.

Nosník byl umístěn na podpory tak, že je z každé strany 200 mm vykonzolován za podporu, pod lis. Lis přes soustavu „I“ profilů vytvářel na nosník čtyřbodové zatížení. Geometrie působení sil, resp. statické schéma, je vidět na Obr. 3.6.

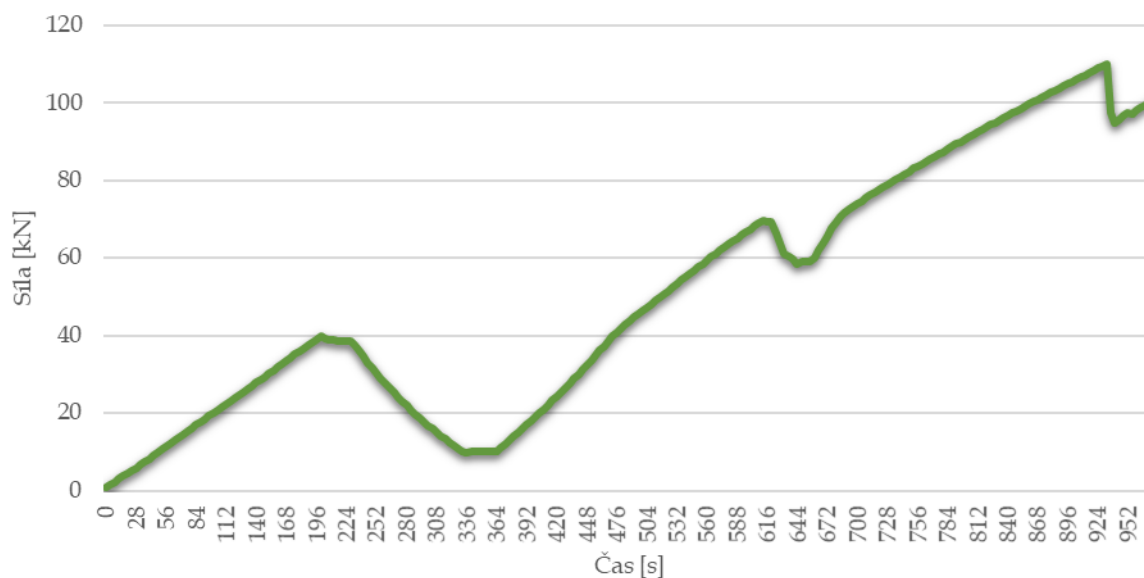


Obr. 3.6: Statické schéma experimentu.

Průběh zatěžovací zkoušky bylo možné sledovat na monitoru, kam byly odesílány hodnoty z fyzických snímačů umístěných na nosníku, jak je vidět na Obr. 3.6. Průběh zatěžování je možno sledovat v grafu (Obr. 3.7.) znázorňujícím velikost síly v čase zatěžovací zkoušky.



Obr. 3.6: Záznam měřených hodnotu během zatěžovací zkoušky.



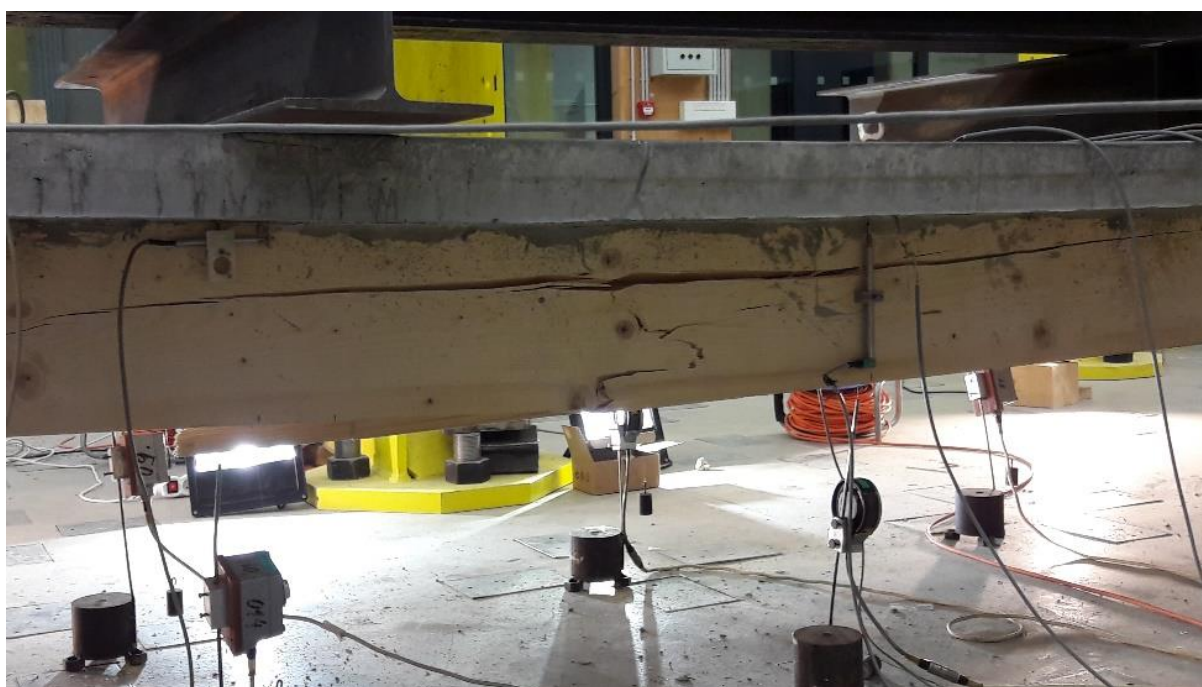
Obr. 3.7: Průběh zatěžování.

K porušení nosníku došlo po 16,4 minutách (přesněji 984 s) od zahájení zkoušky, a to za vzniku trhliny od středu nosníku až k těsné blízkosti umístění břemene, kde došlo ke kolapsu spodních vláken dřevěného trámu. K totožnému

narušení došlo i v druhém trámu nosníku. Průběh trhlin je možné vidět na Obr. 3.8 – 3.10.



Obr. 3.8: Průběh trhliny v trámu pozorovaném metodou DIC.



Obr. 3.9: Průběh trhliny v druhém trámu nosníku.



Obr. 3.10: Pohled na průběh trhlin v dřevěných trámčích z profilu nosníku.

4 Validace

Jak již bylo zmíněno výše, na zkušebním tělese byly umístěny snímače zaznamenávající jeho deformace během zkoušky. Zároveň bylo zkušební těleso fotografováno pro vyhodnocení metodou DIC. Cílem této kapitoly je porovnání výsledků z obou těchto metod pozorování deformací a dokázat jejich shodu.

4.1 Reálné snímače a virtuální extenzometry

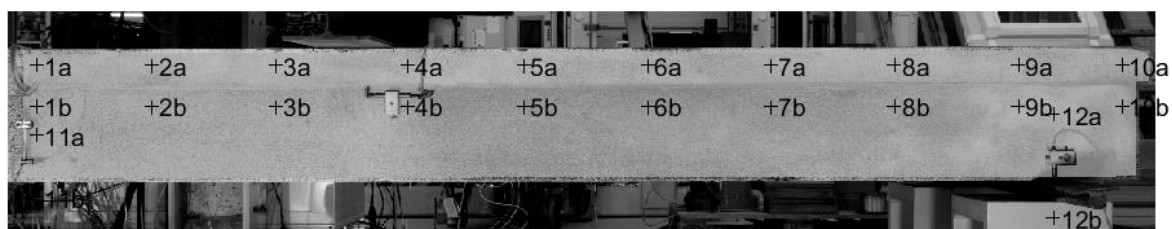
Na zkušebním tělese bylo umístěno celkem 26 snímačů. Jejich popis je shrnutý v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Popis snímačů umístěných na zkušebním tělese.

Název	Měřená veličina	Jedn.	Snímač
Induk_1(676)	Prokluz vrstev na pravém konci nosníku	mm	Indukčnostní snímač
Induk_2(565)	Prokluz vrstev na pravém konci nosníku	mm	Indukčnostní snímač
Induk_3(983)	Prokluz vrstev na levém konci nosníku	mm	Indukčnostní snímač
Induk_4(982)	Prokluz vrstev na levém konci nosníku	mm	Indukčnostní snímač
Induk_5(189)	Pokles pravé podpory	mm	Indukčnostní snímač
Induk_6(822)	Pokles pravé podpory	mm	Indukčnostní snímač
Induk_7(821)	Pokles levé podpory	mm	Indukčnostní snímač
Induk_8(823)	Pokles levé podpory	mm	Indukčnostní snímač
Induk_9(189)	Zatlačení betonu do dřeva ve středu nosníku	mm	Indukčnostní snímač
Induk_10(577)	Zatlačení betonu do dřeva ve středu nosníku	mm	Indukčnostní snímač
induk_11(987)	Zatlačení betonu do dřeva ve středu nosníku	mm	Indukčnostní snímač
Induk_12(433)	Zatlačení betonu do dřeva ve středu nosníku	mm	Indukčnostní snímač
induk_13(603)	Prokluz vrstev pod pravým břemenem	mm	Indukčnostní snímač
Induk_14(19604)	Prokluz vrstev pod pravým břemenem	mm	Indukčnostní snímač
Induk_15(583)	Prokluz vrstev pod levým břemenem	mm	Indukčnostní snímač
Induk_16(582)	Prokluz vrstev pod levým břemenem	mm	Indukčnostní snímač
Pot_1(19)	Průhyb nosníku pod levým břemenem	mm	Potenciometr
Pot_2(12VK)	Průhyb nosníku uprostřed rozpětí	mm	Potenciometr
Pot_3(11)	Průhyb nosníku pod pravým břemenem	mm	Potenciometr
Pot_4(28)	Průhyb nosníku pod levým břemenem	mm	Potenciometr
Pot_5(20K)	Průhyb nosníku uprostřed rozpětí	mm	Potenciometr
Pot_6(9)	Průhyb nosníku pod pravým břemenem	mm	Potenciometr
Tenzo_1	Poměrná deformace nosníku	$\mu\text{m}/\text{m}$	Odporový tenzometr
Tenzo_2	Poměrná deformace nosníku	$\mu\text{m}/\text{m}$	Odporový tenzometr
Tenzo_3	Poměrná deformace nosníku	$\mu\text{m}/\text{m}$	Odporový tenzometr
Tenzo_4	Poměrná deformace nosníku	$\mu\text{m}/\text{m}$	Odporový tenzometr

Pozn.: Pravá, levá část nosníku je určena z pohledu fotoaparátů.

Rozmístění virtuálních extenzometrů je patrné na Obr. 4.1.

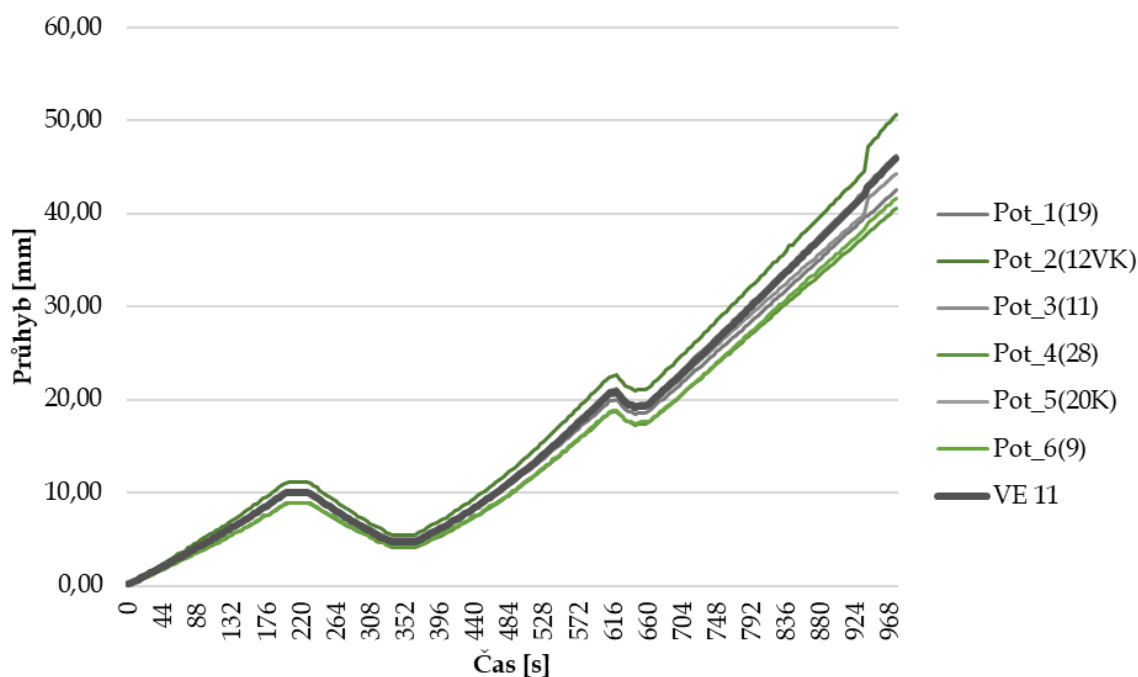


Obr. 4.1: Rozmístění virtuálních extenzometrů na pravé polovině zkušebního tělesa.

Vzhledem k tomu, že metodou DIC byla měřena pouze jedna strana nosníku, na rozdíl od reálných snímačů, jež byly umístěny i na jiných plochách nosníku, nejsou všechny hodnoty z obou metod vzájemně srovnatelné. Některá data z reálných snímačů jsou dokonce zřejmě chybná. Důvodů může být mnoho, špatné osazení snímače, ztráta kontaktu během měření, anomální chování v konkrétním místě, avšak zpětně nejsme schopni zjistit, který z těchto důvodů chyby skutečně nastal.

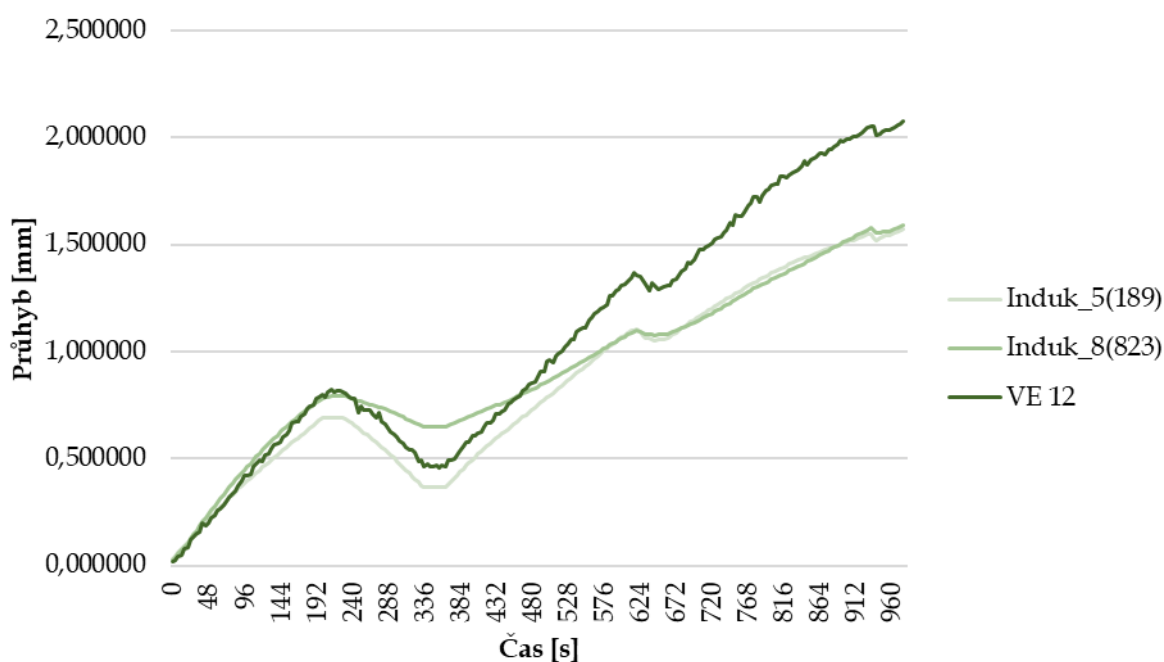
Níže na Obr. 4.1 a 4.2 je tedy možné vidět v grafech porovnání srovnatelných hodnot z obou metod měření.

Na Obr. 4.1 jsou vykresleny průhyby v blízkosti středu nosníku, tedy v místě nulové posouvající síly, resp. téměř nulové (tuto nenulovou hodnotu způsobuje pouze vlastní tíha a její velikost je v celkovém měřítku zanedbatelná). Křivky s označením Pot_* ukazují hodnoty naměřené potenciometry, křivka označená VE 11 (= Virtuální Extenzometr č. 11), navíc ještě zvýrazněná, pak ukazuje naměřenou hodnotu vyhodnocením metodou DIC. Je evidentní, že dochází ke shodě, jak v hodnotách, tak v trendu křivky.



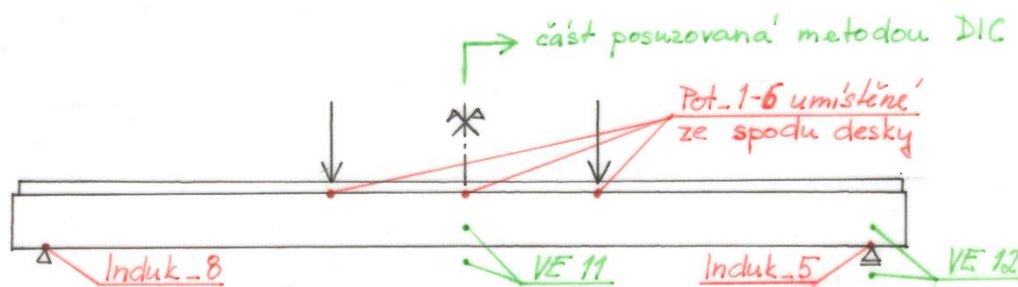
Obr. 4.1: Porovnání výsledků průhybů nosníku v jeho středu.

Na Obr. 4.2 jsou vykresleny průhyby, resp. poklesy podpor nosníku. Křivky s označením Induk_* ukazují hodnoty naměřené indučnostními snímači v místě podpor na straně nosníku pozorované pro metodu DIC, číslo 8 je podpora levá, číslo 5 pak podpora pravá. Křivka označená VE 12 y, navíc ještě zvýrazněná, pak ukazuje naměřenou hodnotu vyhodnocením metodou DIC, v místě pravé podpory. Dochází k téměř 100 % shodě hodnot, konečná odchylka je cca 0,5 mm a může být způsobena mírně odlišným označením místa měření metodou DIC, než byl umístěn skutečný snímač. Shodný je i trend křivky.



Obr. 4.2: Porovnání výsledků poklesů podpor nosníku.

Na obrázku níže je patrné umístění validovaných reálných snímačů a virtuálních extenzometrů na zkušebním tělese. Na konec této kapitoly je nutné podotknout, že z důvodů časové náročnosti výpočtů prováděných metodou DIC v programech Ncorr a Ncorr_post, velkého rozponu nosníku, takže se nevešel celý do záběru jednoho fotoaparátu, a faktu, že nosník byl plně symetrický, byly výpočty prováděny pouze na jedné polovině nosníku, a to pravé.



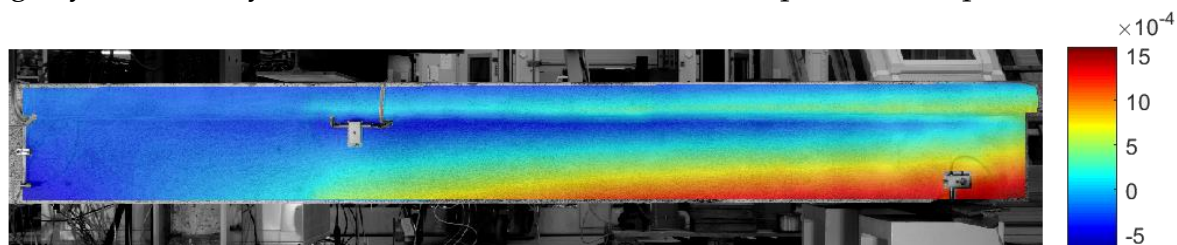
Obr. 4.3: Schéma umístění validovaných reálných snímačů a virtuálních extenzometrů.

5 Výsledky a diskuse

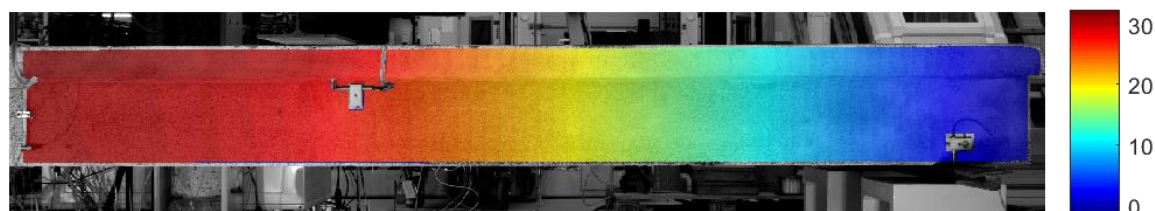
Tato kapitola se věnuje již pouze hodnotám zjištěným pomocí metody DIC, a z důvodů výše zmíněných pouze pravé polovině zkoušeného nosníku.

5.1 Vývoj posunů a deformací po délce nosníku

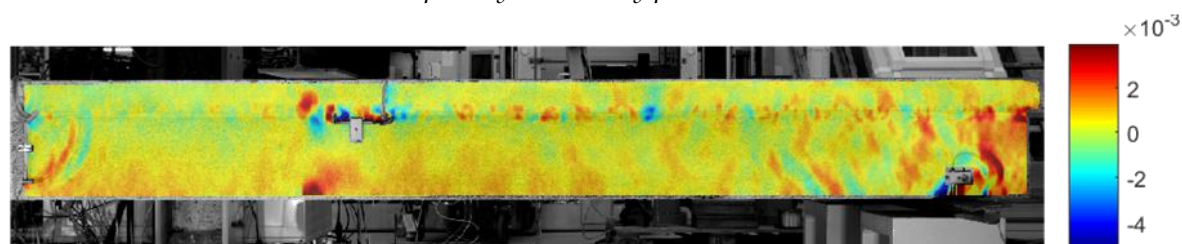
Na Obr. 5.1 – 5.4 jsou vykresleny jednotlivé deformace a posuny po délce nosníku v čase zatěžování, kdy ještě nedochází k trvalým deformacím dřeva a betonu. Z výpočtů je zřejmé, že během zatěžování dochází k zatlačování betonu do dřeva, logicky tak nelze vyloučit, že nedochází k zatlačování i spřahovacích prvků.



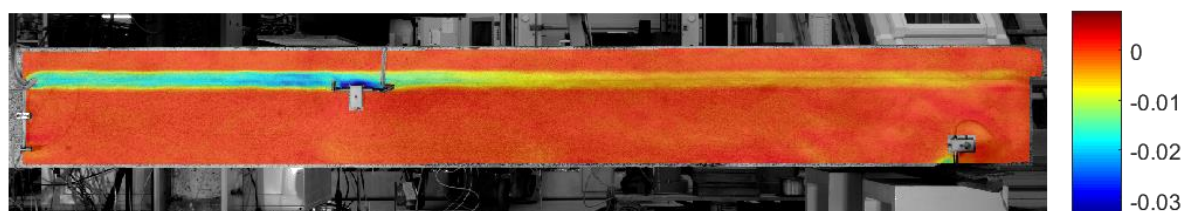
Obr. 5.1: Relativní posuny ve směru x při síle 57 kN na siloměru.



Obr. 5.2: Relativní posuny ve směru y při síle 57 kN na siloměru.

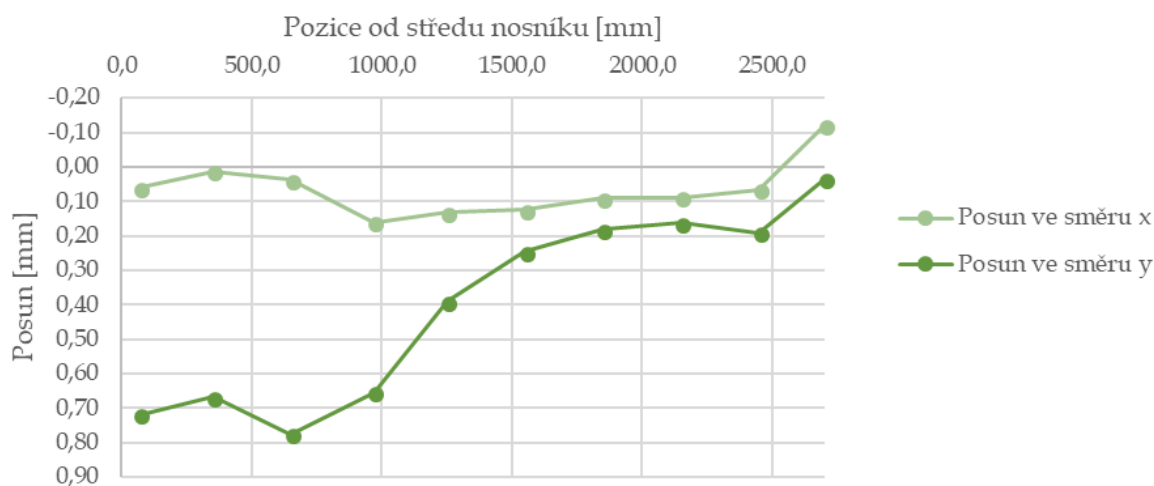


Obr. 5.3: Relativní deformace ve směru x při síle 57 kN na siloměru.

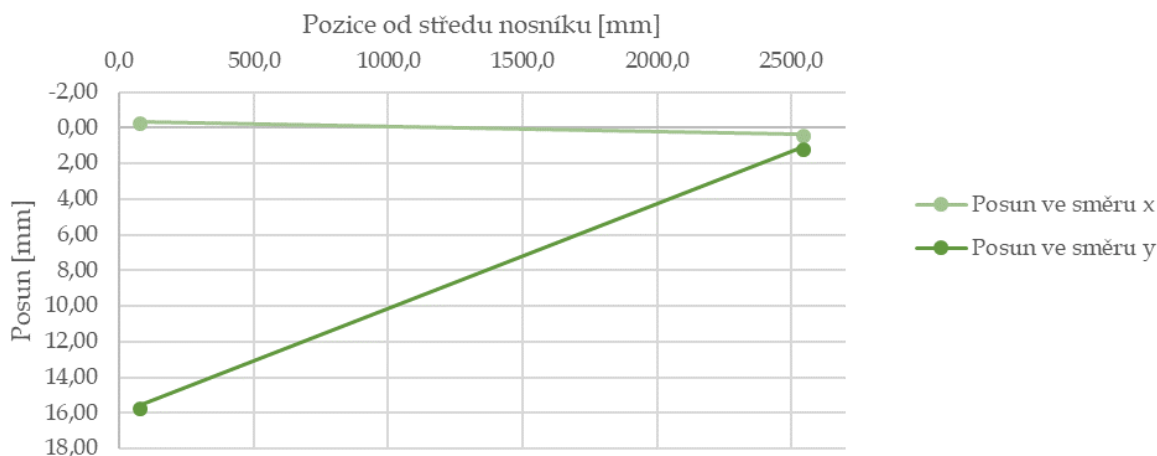


Obr. 5.4: Relativní deformace ve směru y při síle 57 kN na siloměru.

Na Obr. 5.5 a 5.6 jsou vykresleny grafy (pro přehlednost jsou kladné hodnoty směrem dolů, ve směru y tak vidíme skutečný tvar průhybu). První graf ukazuje relativní posuny ve směru x a y betonu vůči dřevu, říká nám tak, jak velké jsou prokluzu mezi vrstvami a k jak velkému zatlačování betonu do dřeva dochází. V druhém grafu je znázorněn celkový relativní posun nosníku v místě podpory a ve středu nosníku.



Obr. 5.5: Relativní posuny mezi spřaženými vrstvami ve směru x a y.

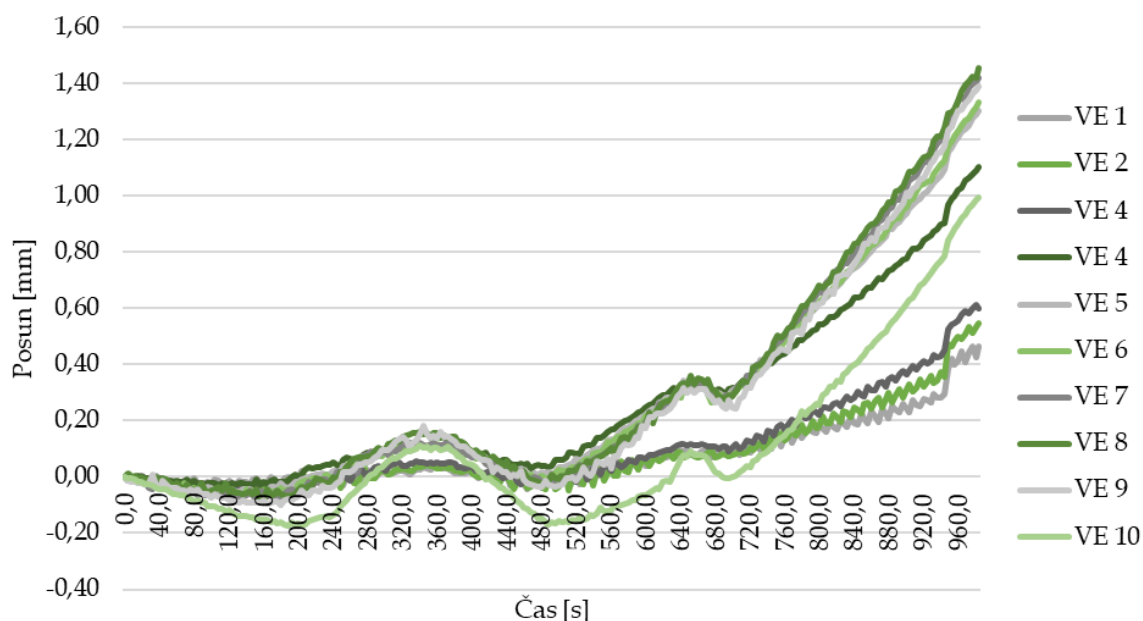


Obr. 5.6: Celkové relativní posuny ve středu nosníku a v místě podpory ve směru x a y.

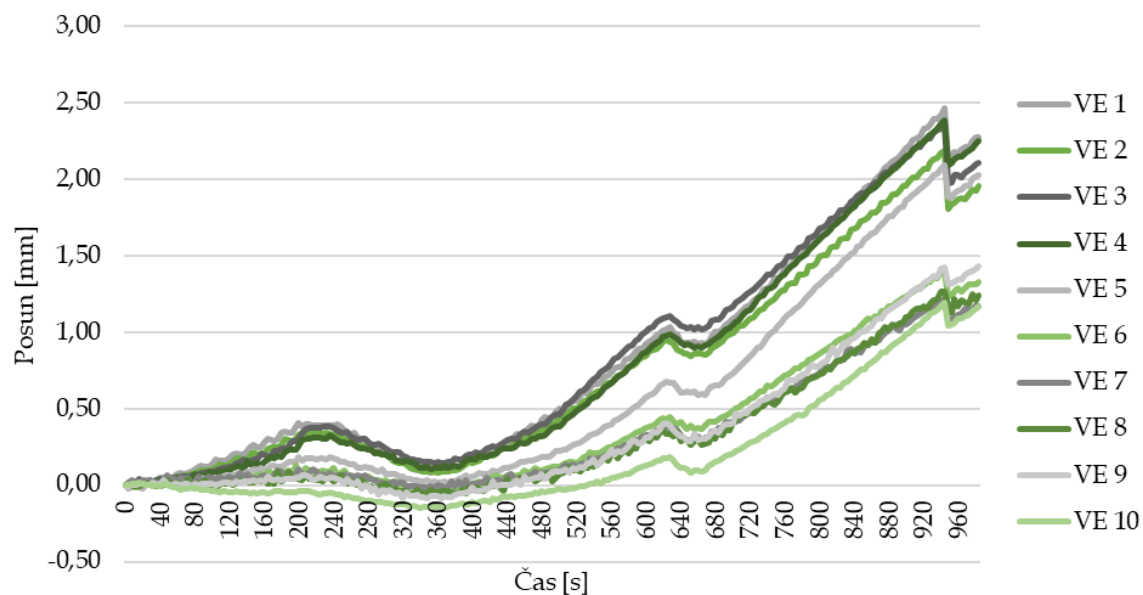
5.2 Vývoj posunů a deformací v čase

Obr. 5.7 a 5.8 ukazují v grafu vyjádřené relativní posuny betonu vůči dřevu v čase v různých bodech, kde jsme umístili virtuální extenzometry, ve směru x a y. Můžeme vidět, že trend křivky průhybu kopíruje trend zatěžování. Tento fakt nám potvrzuje správnost výsledků. Těsně před kolapsem nosníku je maximální velikost

zatlačení betonu do dřeva cca 1,4 mm, minimální velikost je cca 0,4 mm. Hodnoty jsou velmi malé, ale nezanedbatelné.



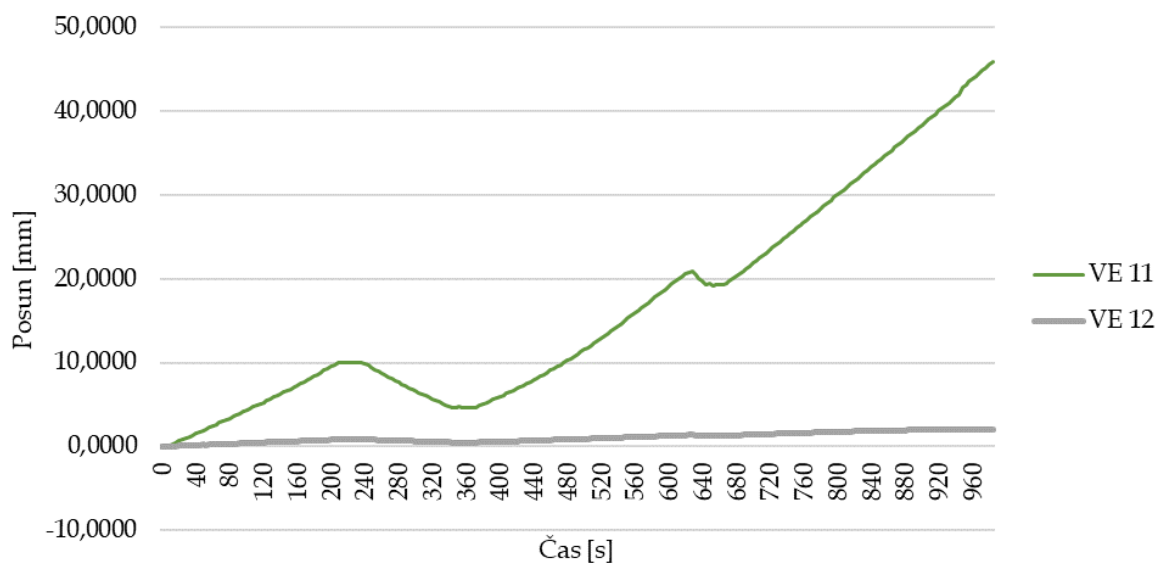
Obr. 5.7: Relativní posuny betonu vůči dřevu v čase ve směru x .



Obr. 5.8: Relativní posuny betonu vůči dřevu v čase ve směru y .

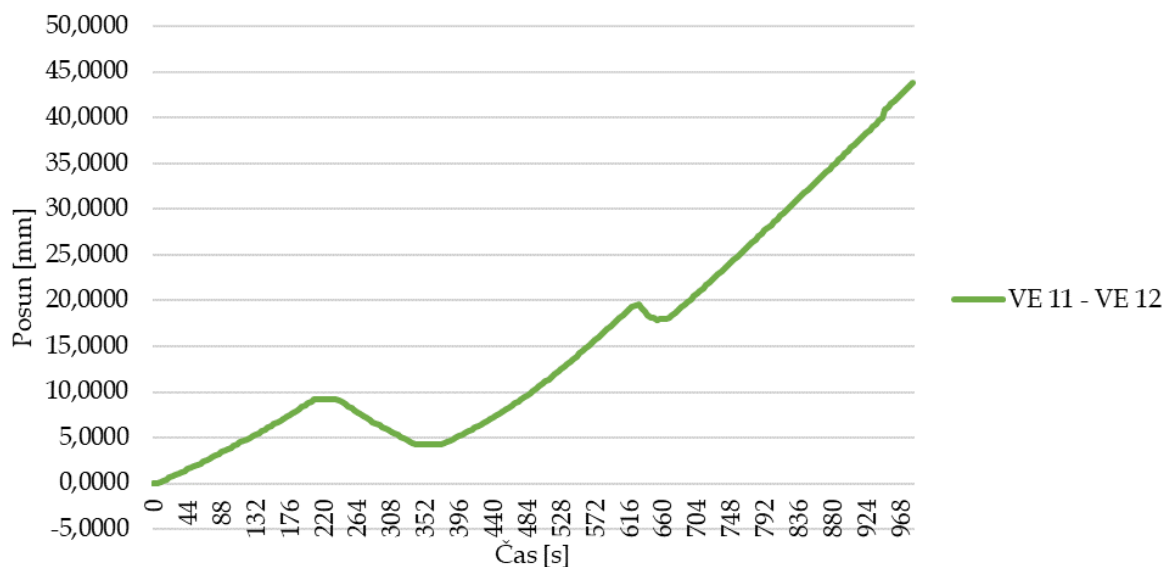
Na Obr. 5.9 je v grafu znázorněn celkový relativní posun nosníku v jeho středu a v místě podpory ve směru y . Hodnoty jsou řádově odlišné, což nám opět jediné

potvrzuje logickou správnost výsledků. Těsně před kolapsem nosníku je maximální hodnota průhybu v jeho středu cca 45 mm a pokles podpory je cca 3 mm.



Obr. 5.9: Celkové relativní posuny nosníku ve středu a nad podporou ve směru y.

Pokud uděláme rozdíl mezi těmito dvěma křivkami, dostaneme celkový maximální průhyb nosníku, jak je vidět na Obr. 5.10.

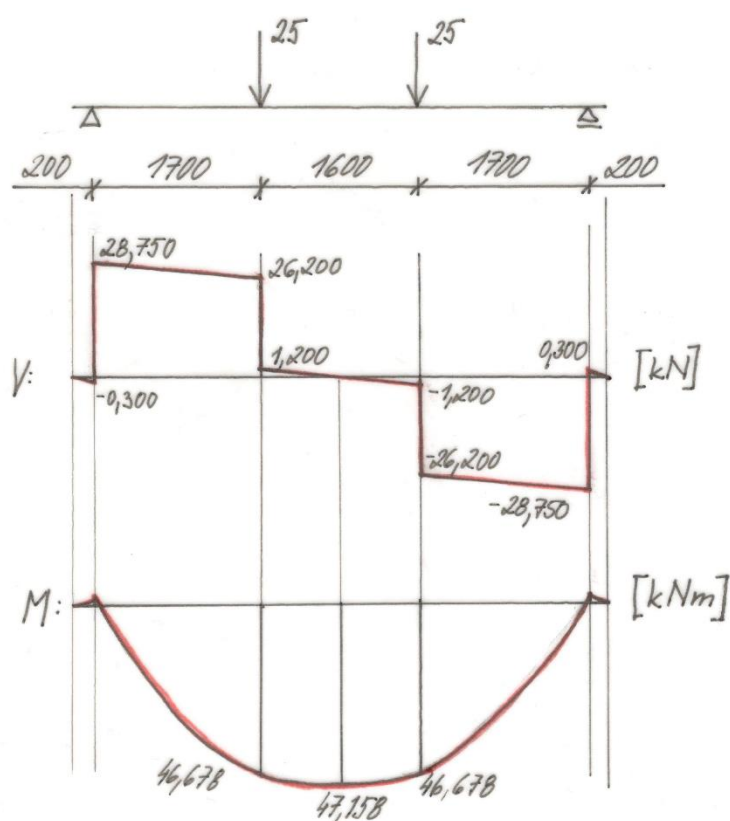


Obr. 5.10: Celkový průhyb nosníku.

5.3 Únosnost nosníku

Dle statického výpočtu se kritický průřez nalézal uprostřed kompozitního nosníku. Na Obr. 5.11. je znázorněna distribuce posouvacích sil a momentů v důsledku zatížení vlastní tíhou a silou těsně před kolapsem nosníku, cca 100 kN, rozloženou do 4 bodů. Musíme uvážit, že zkouška byla čtyřbodová a síla se přenášela na dva trámy, odtud víme, že pro jedno břemeno musíme tuto maximální hodnotu za siloměru vydělit čtyřma. Dostáváme tak maximální břemeno o velikosti 25 kN.

Z výpočtu pak dostaneme, že maximální moment byl 47,2 kNm.



Obr. 5.11: Schéma vnitřních sil.

Mezní moment únosnosti M_{Rd} byl početně vyčíslen na 14,8 kN v betonu a mezní napětí spodních vláken dřeva je tak 14,1 MPa. Je tak zřejmé, že únosnost nosníku byla reálně až trojnásobně vyšší než únosnost spočtená, která navíc předpovídala porušení v betonu.

Závěr

Dřevobetonové stropu jsou dnes již tradiční, od počátku 19. století prošly velkými změnami, a čím dál více nacházejí využití už nejen v rekonstrukcích, ale i v novostavbách, speciálně pak ve výstavbě dřevostaveb. V současné době je velmi populární výzkum prefabrikovaných dřevobetonových stropů. I tato práce se jím zabývá.

Práce byla zaměřena na sledování lokálních deformací kolem spřahovacích prvků a celkové chování spřaženého kompozitu dřevobetonu během jeho zatěžování. Je třeba brát v úvahu, že vlastnosti spřahovacích prvků výrazně ovlivňují celkové chování kompozitu při jeho namáhání.

Dle předpokladu, ve spřaženém dřevobetonu dochází k prokluzu mezi vrstvami – malému, ale nezanedbatelnému – a také k zatlačování betonu do dřeva, též nezanedbatelnému.

Ke kolapsu nosníku došlo ve spodních vláknech dřevěného trámu, stalo se tak při ohybovém momentu 47,2 kNm.

Metoda DIC umožnila vyhodnotit pole posunů a deformací nosníku v celé jeho ploše, stejných výsledků nejsme schopni žádnou jinou metodou dosáhnout. Zároveň je nám umožněno spatřit lokální anomálie, ke kterým může zvláště u přírodního a anizotropního materiálu jako je dřevo, běžně docházet.

Veškeré poznatky této práce mohou být použity při budoucím numerickém modelování.

Reference

- [1] KOLB, Josef. *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 2., aktualiz. vyd. v České republice. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-802-4740-713.
- [2] HÁJEK, Petr. Kompozitní konstrukce na bázi vysokohodnotných silikátů a dřeva: environmentální optimalizace a experimentální ověření. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-5192-4.
- [3] KUKLÍK, Petr, Anna KUKLÍKOVÁ a Radek BRANDEJS. Prostorová tuhost budov na bázi dřeva. *Časopis stavebnictví* [online]. 2007, (10/07) [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/prostorova-tuhost-budov-na-bazi-dreva_A422_I10_07
- [4] ŠAFRATA, Jiří a Jana DAŇKOVÁ. Vývoj a použití dřevobetonových kompozitních prefabrikovaných dílců v pozemním stavitelství. *Materiály pro stavbu* [online]. 30. 1. 2015 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/vyvoj-a-pouziti-drevobetonovych-kompozitnich-prefabrikovanych-dilcu-v-pozemnim-stavitelstvi_41996.html
- [5] NECHANICKÝ, Pavel. Možnosti provádění kompozitních dřevobetonových konstrukcí. In: *TZB - info* [online]. 12.3.2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/8362-moznosti-provadeni-kompozitnich-drevobetonovych-konstrukci>
- [6] KUKLÍKOVÁ, Anna a Pavel NECHANICKÝ. Dřevobetonové stropy pro lehké skelety dřevostaveb. In: *TZB - info* [online]. 18.6.2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/8717-drevobetonove-stropy-pro-lehke-skelety-drevostaveb>
- [7] KUKLÍK, Petr, Anna KUKLÍKOVÁ a Anna GREGOROVÁ. Kompozitní dřevobetonové stropní konstrukce s mechanickými spojovacími prostředky. In: *TZB - info* [online]. 24.4.2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/15665-kompozitni-drevobetonove-konstrukce-s-mechanickymi-spojovacimi-prostredky>
- [8] CALDOVÁ, Eva, Anna KUKLÍKOVÁ a Petr VYMLÁTIL. Spřažení dřevobetonových nosníků s rozptýlenou výztuží. In: *TZB - info* [online]. 7.10.2013 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10415-sprazeni-drevobetonovych-nosniku-s-rozptylenou-vyztuzi>

- [9] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČNI Praha, 2011.
- [10] ČSN EN 1995-1-1 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČNI Praha, 2006.
- [11] ČSN EN 1995-1-2 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. ČNI Praha, 2006
- [12] VÁLEK, Jakub. *Návrh dřevobetonové spřažené stropní konstrukce* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58267. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Ivana Švaříčková, Ph.D.
- [13] NEŽERKA, Václav. *Timber-Concrete Composite Structures* [online]. Praha, 2010 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/~nezerka/files/TCC.pdf>. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.
- [14] NEŽERKA, Václav, Jakub ANTOŠ a Jan TREJBAL. *Digital Image Correlation in Experimental Mechanics: Lecture 1: Basics of DIC*. ČVUT v Praze, 2017.
- [15] HORNÝ, Lukáš. *Modelování a experimentální zjišťování mechanických vlastností nelineárních materiálů*. ČVUT v Praze, 2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné také z: <http://www.biomechanika.cz/materials/Projekt%20II%202012%20Korelace%20digit%C3%A1ln%C3%ADch%20obraz%C5%AF%20%20vybran%C3%A9%20experiment%C3%A1ln%C3%AD%20metody.pdf>
- [16] GROSSOVÁ, Olga. *Analýza odezvy celodřevěného spoje na mechanické namáhání pomocí metody korelace digitálního obrazu* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=51037;download_prace=1. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Václav Sebera.
- [17] BŘEZINA, Martin. *Dřevobetonové spřažené stropy* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65667/F1-BP-2016-Brezina-Martin-Drevobetonove%20sprazene%20stropy.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Mikeš, Ph.D.