

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

KATEDRA DŘEVĚNÝCH VÝROBKŮ A KOSNTRUKCÍ

ZESILOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH NOSNÍKŮ METODOU
APLIKACE VLÁKEN S VYSOKOU PEVNOSTÍ

Disertační práce

REINFORCEMENT OF WOOD BEAMS USING HIGH
STRENGTH FIBER APPLICATION

Dissertation thesis

Autor:

Ing. Martin Sviták

Školitel:

doc. Ing. Štefan Barčík, CSc.

PRAHA 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma „Zesilování dřevěných nosníků metodou aplikace vláken s vysokou pevností" vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Praze dne 30. dubna 2013



Ing. Martin Sviták

Poděkování:

Děkuji panu doc. Ing. Štefanu Barčíkovi, CSc. za vedení při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a kolegům za psychickou i materiální pomoc.

Disertační práce byla vypracována za finanční podpory Interní grantové agentury České zemědělské univerzity v Praze:

- Grant IGA 201140/2011 - Výzkum a aplikace uhlíkových vláken pro vyztužování dřevěných nosníků

- Grant IGA 20124358/2012 - Hodnocení adhezních vlastností lepidel při vyztužování dřevěných nosníků vláknou s vysokou pevností

Abstrakt:

Disertační práce se zabývá stanovením míry vhodnosti uplatnění vláken s vysokou pevností na bázi uhlíku pro aplikace v nosnících ze smrkového dřeva namáhaných především ohybem. Vhodnost použití uhlíkových vláken ve formě tkaniny je stanovena průkaznými destruktivními zkouškami a MKP modelovou analýzou. Při zkouškách jsou stanoveny mezní hodnoty maximálního zatížení kolmo ke směru podélné osy nosníků vyztužených přilepenou uhlíkovou tkaninou a předepjatou uhlíkovou tkaninou s adhezivem na bázi epoxidové pryskyřice a polyuretanu. Na základě porovnání výsledků MKP modelu a destruktivních zkoušek lze prokázat, že daný typ tkaniny na bázi uhlíku v kombinaci se zvoleným typem adheziva je vhodný pro účel vyztužování dřevěných nosníků, z hlediska zvýšení zjištěných pevnostních parametrů.

Klíčová slova:

dřevěný nosník, vyztužení, uhlíková tkanina, MKP modely

Abstract:

Dissertation thesis is focused on determination appropriateness rate of high strength carbon-based fibers application for use in construction beams made of spruce wood mainly stressed by bending. The suitability of carbon fibers use in fabrics form is determined by conclusive destructive testing and FEM analysis model. In tests are limiting maximum loads perpendicular to longitudinal axis of construction beams reinforced with simply bonded-on carbon fabrics and pre-strained carbon fabrics with adhesives based on epoxy resins and polyurethanes based. Confronting comparison results of the FEM model and destructive tests can be demonstrated detections of fabrics based on carbon in combination with selected type of adhesive is appropriate for purpose of reinforcing construction beams in order to increase detected strength parameters.

Key words:

wood beam, reinforcement, carbon fabric, FEM models

Obsah

1	ÚVOD	11
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	13
2.1	MOŽNOSTI VYZTUŽOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH NOSNÍKŮ VE STAVEBNICTVÍ.....	13
2.1.1	<i>Dřevobetonové konstrukce</i>	<i>13</i>
2.2	VYZTUŽOVÁNÍ DŘEVA UHLÍKOVÝMI VLÁKNY PŘILEPENÍM	14
2.3	DŘEVĚNÉ NOSNÍKY VYZTUŽENÉ PŘEDEPJATÝMI VLÁKNY - DELAMINACE	17
2.3.1	<i>Zkoušky v ohybu předepjatých lepených nosníků.....</i>	<i>17</i>
2.4	NÁVRHOVÝ MODEL PRO NOSNÍKY Z LEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA VYZTUŽENÉHO FRP.....	18
2.5	MKP MODEL NOSNÍKŮ Z LEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA.....	19
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	20
4	MATERIÁL	21
4.1	DŘEVO JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁL	21
4.1.1	<i>Stavba dřeva</i>	<i>21</i>
4.1.2	<i>Fyzikální vlastnosti dřeva</i>	<i>23</i>
4.1.2.1	Hustota dřeva	23
4.1.2.2	Vlhkostní vlastnosti	24
4.1.3	<i>Mechanické vlastnosti dřeva.....</i>	<i>29</i>
4.1.3.1	Druhy namáhání.....	29
4.1.3.2	Napětí a deformace	30
4.1.3.3	Základní mechanické vlastnosti	32
4.1.4	<i>Mezní stavy</i>	<i>35</i>
4.2	ADHEZIVA A JEJICH FUNKCE.....	36
4.2.1	<i>Polyuretanová adheziva.....</i>	<i>37</i>
4.2.2	<i>Epoxidová adheziva.....</i>	<i>37</i>
4.3	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	39
4.3.1	<i>Uhlíková vlákna.....</i>	<i>39</i>
4.3.2	<i>Uhlíkové tkaniny.....</i>	<i>41</i>
5	METODIKA	44
5.1	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	44
5.1.1	<i>Stanovení některých mechanických vlastností dle ČSN EN 408.....</i>	<i>44</i>
5.1.2	<i>Návrh zkušebních těles.....</i>	<i>48</i>
5.1.3	<i>Stanovení hustoty dřeva zkušebních těles.....</i>	<i>48</i>
5.1.4	<i>Klimatizace zkušebních těles před vyztužením.....</i>	<i>50</i>
5.1.5	<i>Příprava a nalepení uhlíkové tkaniny.....</i>	<i>50</i>
5.1.5.1	<i>Předepnutí uhlíkové tkaniny</i>	<i>52</i>

5.1.6	Zkušební metoda.....	53
5.2	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT.....	54
5.2.1	Normální rozdělení četnosti.....	55
5.2.2	Testovací hypotézy.....	56
5.2.3	Vyloučení extrémních hodnot.....	56
5.2.4	Analýza rozptylu - ANOVA.....	57
5.2.5	Tukeyova metoda mnohonásobného porovnávání.....	57
5.3	TEORETICKÝ VÝPOČET.....	58
5.3.1	Metoda náhradních průřezů.....	58
5.4	MODELOVÁ ANALÝZA.....	60
5.4.1	Popis výpočtového modelu vytvořeného pomocí MKP.....	60
5.4.1.1	Model Geometrie.....	60
5.4.1.2	Model materiálu.....	61
5.4.1.3	Diskretizace modelu.....	62
5.4.1.4	Okrajové podmínky modelu.....	62
5.4.1.5	Simulace nosníku.....	63
6	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	66
6.1	VYHODNOCENÍ OHYBOVÉ ZKOUŠKY STATISTICKÝMI METODAMI.....	66
6.1.1	Srovnání výsledků skupin vzorků.....	78
6.2	VYHODNOCENÍ MODELOVÉ ANALÝZY.....	80
6.3	SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH A MODELOVÝCH VÝSLEDKŮ STATISTICKÝMI METODAMI.....	83
6.4	DISKUZE.....	86
7	ZÁVĚR.....	88
7.1	SOUHRN.....	88
7.2	PŘÍNOS PRO VĚDU.....	89
7.3	PŘÍNOS PRO PRAXI.....	90
8	SUMMARY.....	92
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	94
9.1	LITERATURA.....	94
9.2	INTERNETOVÉ ZDROJE.....	99
9.3	NORMY.....	101
9.4	SOFTWARE.....	103
9.5	PUBLIKACE AUTORA.....	104
10	PŘÍLOHY.....	105

Seznam obrázků:

Obr. 1 Dřevobetonový strop se ztraceným bedněním z překližek (MOJDOM, 2009)...	14
Obr. 2 Strukturální hladiny dřeva (NILSSON, ROWELL, 2012).....	22
Obr. 3 Hlavní směry anizotropie dle (EYMAA, et al., 2004).....	22
Obr. 4 Rovnovážná vlhkost dřeva při sorpci a desorpci (POŽGAJ, et al., 1993).....	25
Obr. 5 Rovnovážná vlhkost dřeva (EMC) v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu při různých teplotách prostředí (HAILWOOD, HORROBIN, 1946)	26
Obr. 6 Hystereze rovnovážné vlhkosti dřeva při sorpci a desorpci (SIROKAA, et al., 2008).....	27
Obr. 7 Pracovní deformační diagram (POŽGAJ, et al., 1993)	31
Obr. 8 Epoxidové skupiny (VÍDEŇSKÝ, 2012)	38
Obr. 9a Struktura uhlíkového vlákna - grafitové krystaly (MOCHIDAA, et al., 2000). 40	
Obr. 9b Grafitové vrstvy a jejich vazby v příčném a podélném směru (MOCHIDAA, et al., 2000)	40
Obr. 10 Pásek vláken ve formě rovingu (PRINCE ENGINEERING, 2011)	42
Obr. 11. Běžné způsoby zpracování vláken do tkanin (ELEARNING TUL, 2013).	43
Obr. 12 Uspořádání zkoušky pro čtyřbodový ohyb dle ČSN EN 408.....	45
Obr. 13 Schéma pro výpočet normálových napětí složeného průřezu	47
Obr. 14 Uhlíková tkanina SikaWrap 300C/60 použitá na vyztužení a) dodávané balení b) vytvořené jednotlivé pruhy dle rozměrů nosníku.....	50
Obr. 15 Laminovací váleček pro nanášení adheziva	51
Obr. 16 Předepnutí uhlíkových tkanin na dřevěných nosnících	52
Obr. 17 Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti v ohybu	53
Obr. 18 Trhací stroj UTS 50 TESTSYSTEME	53
Obr. 19 Gaussovo rozdělení četnosti	55
Obr. 20 Schéma výpočtu metody náhradních průřezů (REINPRECHT, ŠTEFKO, 2000).....	59
Obr. 21 Čtvrtinový model se zobrazením rovin symetrie.....	61
Obr. 22 Zobrazení vrstev navrhovaného modelu.....	61
Obr. 23 Zobrazení poloviny nosníku a jeho prostorové sítě.....	62
Obr. 24 Předepsaná okrajová podmínka symetrie nosníku.....	63
Obr. 25 Okrajové podmínky nosníku s rozložením prostorové sítě	63
Obr. 26 Vliv konstant materiálového modelu na napětí v nosníku	64

Obr. 27 Vliv konstant materiálového modelu na průhyb nosníku	65
Obr. 28 Porovnání hodnot zatěžovací síly F [N] pro skupiny nosníků.....	71
Obr. 29 Porovnání hodnot průhybu w [mm] pro skupiny konstrukčních nosníků	71
Obr. 30 Porovnání hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] pro skupiny nosníků	72
Obr. 31 Porovnání hodnot pevnosti v ohybu σ_m [MPa] pro skupiny nosníků	73
Obr. 32 Zatěžovací síla F [N] ve skupinách nosníků.....	74
Obr. 33 Průhyb w [mm] ve skupinách nosníků	75
Obr. 34 Modul pružnosti E_m [MPa] ve skupinách nosníků	76
Obr. 35 Pevnost v ohybu σ_m [MPa] ve skupinách nosníků	77
Obr. 36 Průběh nárůstu hodnot zatěžovací síly F [N] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP	84
Obr. 37 Průběh nárůstu hodnot průhybu w [mm] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP	84
Obr. 38 Průběh nárůstu hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP	85
Obr. 39 Průběh nárůstu hodnot pevnosti v ohybu σ_m [MPa] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP	85

Seznam tabulek:

Tab. 1 Poissonova čísla vybraných dřevin (POŽGAJ, et al., 1993)	33
Tab. 2 Typické hodnoty vlastností uhlíkových vláken (SIKA s.r.o., 2010)	41
Tab. 3 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro nevyztužené nosníky	66
Tab. 4 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky uhlíkovou tkaninou s EP adhezivem	67
Tab. 5 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou s EP adhezivem	68
Tab. 6 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky uhlíkovou tkaninou s PU adhezivem.....	69
Tab. 7 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou s PU adhezivem.....	70
Tab. 8 Tukeyův HSD test s proměnnou F [N].....	75
Tab. 9 Tukeyův HSD test s proměnnou w [mm].....	76
Tab. 10 Tukeyův HSD test s proměnnou E_m [MPa].....	77
Tab. 11 Tukeyův HSD test s proměnnou σ_m [MPa]	78
Tab. 12 Shrnutí výsledných údajů pro sílu F [N] potřebnou k přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin.....	78
Tab. 13 Shrnutí výsledných údajů pro průhyb w [mm] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin.....	79
Tab. 14 Shrnutí výsledných údajů pro modul pružnosti E_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin	79
Tab. 15 Shrnutí výsledných údajů pro pevnost v ohybu σ_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin	80
Tab. 16 Shrnutí výsledných údajů pro sílu F [N] potřebnou k přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP	81
Tab. 17 Shrnutí výsledných údajů pro průhyb w [mm] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP	82
Tab. 18 Shrnutí výsledných údajů pro modul pružnosti E_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP.....	82
Tab. 19 Shrnutí výsledných údajů pro pevnost v ohybu σ_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP.....	83

Seznam použitých zkratek:

AFRP	Aramide Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený aramidovými vlákny
apod.	a podobně
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený uhlíkovými vlákny
cca	circa (přibližně)
č.	číslo
ČR	Česká republika
ČSN	Československá státní norma
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
ČZU	Česká zemědělská univerzita v Praze
et al.	a kolektiv
FRP	Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený vlákny
EP	epoxidové
EP+	epoxidové předepjaté
GFRP	Glass Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený skleněnými vlákny
HSD	honest significant difference - významný rozdíl
HSF	High Strength Fibres – vysokopevnostní vlákna
MKP	metoda konečných prvků
např.	například
Obr.	obrázek
PVA	polyvinil acetátové
PU	polyuretanové
PU+	polyuretanové předepjaté
PUR	polyuretan
resp.	respektive
RH	relativní vlhkost vzduchu
s.r.o.	s ručením omezeným
Tab.	tabulka
tzv.	takzvaný

1 ÚVOD

Dřevěné konstrukce vykazují značné změny průhybu při měnícím se zatížení. Proto je vhodné využívat metodu vyztužování materiálů či staveb dalšími přidanými materiály pro zvýšení jejich pevnosti. Jedná se v podstatě o systém složený ze dvou nebo více substancí, který má za úkol výslednému výrobku dodat nové vlastnosti. Úkol jedné substance v materiálu je většinou zajistit pevnost, druhá slouží jako pojivo. Takový produkt se obecně nazývá kompozitní materiál. Nejznámějším a nejvýznamnějším kompozitním materiálem lze nazvat železobeton.

V šedesátých letech dvacátého století se technologové a výrobci začínali pomalu zajímat o výrobu kompozitních vláken. Vlákna uhlíková, aramidová, čedičová, skleněná, azbestová, PVA a další se nazývají kompozitní vlákna (HORSKÁ, 2009; REDON, 2001; PLEVRIS, TRIANTAFILLOU, 1995). Jedná se o materiál anizotropní. Vlastnosti, jako vysoká pevnost v tahu, vysoká tuhost a nízká hmotnost nám umožňují široké spektrum použití (KRŇANSKÝ, 2009).

Charakteristiky dřeva jsou velice variabilní a i jeho anizotropní chování se u navrhování složitějších staveb stává často nevýhodou z hlediska únosnosti a tuhosti. Proto se materiály s vysokou pevností využívají jako vyztužení nejen pro dřevěné prvky. Ve stavebním oboru se nejčastěji pro aplikace vyztužování uvažuje s vlákny uhlíkovými, aramidovými a skleněnými (ŠILHAN, 2008). Vyskytují se ve formě desek, lamel, tyčí nebo tkanin a vlastnosti, díky nimž jsou v současné době tolik využívány, mají pouze ve směru vláken (TOMKOVÁ, 2007). Tato metoda se aplikuje také na objekty zasažené vlivem stárnutí, chyb projektování, změn zatížení nebo poničení a je potřeba je zesílit. Vysokopevnostními materiály, dále FRP (Fiber Reinforced Polymers – laminát vyztužený vlákny) je možné vyztužit nosníky, sloupy, podlahy a mnoho dalších stavebních prvků (OZEL, BANK, 2000; ROMANI, BLASS, 2001).

Hlavními požadavky návrhu vyztužení dřevěných konstrukcí jsou potřeby zvýšení únosnosti z důvodu změny způsobu zatížení zabudovaných nosníků nebo změny velikosti zatížení nosné konstrukce objektu, případně jeho části. V úvahu připadá také dodatečné zesílení nosníků dřevěných historických objektů při rekonstrukci prvků kulturních památek, zamezení vzniku nadměrných přetvoření vč. limitující výšky průřezu a v neposlední řadě také eliminace tečení dřeva, které se projevuje zvyšováním průhybu nosníku v závislosti na čase (GAGHER, 2000; FIORELL, DIAS, 2003).

V České republice se mezi prvními uvedla na trh firma Sika s. r. o. v roce 1996, čímž vznikl trend zesilování konstrukcí pomocí lepených uhlíkových lamel či tkanin. Jedná se o dodatečné vyztužení uhlíkovými vlákny lepením v různých formách, avšak tato metoda se na našem trhu používá převážně pro železobetonové konstrukce. Nedostatky, které prosté lepení na konstrukce přináší, jsou v tom, že jejich pevnost je využívána jen ze 40 % bezpečné únosnosti. Aby se docílilo vyššího využití vláken, existují dvě možnosti realizace. První lze využít např. u zesilování mostních konstrukcí, kdy je potřeba eliminovat stávající průhyb buď dočasným přizvednutím konstrukce, nebo odstraněním stávajícího stálého zatížení. Druhou možností lepšího využití pevnosti vláken je jejich předepnutí. V současné době se firmy zabývají i systémem použitelným pro předepnutí dřevěných ohýbaných nosníků a ukazuje se, že tato metoda použití uhlíkových vláken je plně funkční (DAVIDS, LANDIS, 2000; SIKA s.r.o., 2010).

Při pohledu do posledního desetiletí lze říci, že se popularita dřevěných konstrukcí překvapivě zvýšila. Rozšíření využívání vrstveného lepeného lamelového dřeva je jednou z nejvýznamnějších příčin tohoto trendu. Lepené nosníky mají oproti masivnímu dřevu lepší fyzikální vlastnosti, jako jsou rozměry a homogenita (REINPRECHT, ŠTEFKO, 2000; MICELLI et al., 2005). Vzhledem k tomuto faktu je vhodné se věnovat několika důležitým výzkumům týkajících se lepených lamelových nosníků, jejich numerickým modelům vytvořených metodou konečných prvků (MKP), jak vyztužených tak nevyztužených a jejich typům porušení (BLASS, 2000).

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Výzkumy, které se zaměřují na vyztužování dřevěných nosníků z masivních prvků, jsou testovány v tahu i ohybu při respektování různých vlivů a poukazují na problematiku delaminace. O tomto problému je nutné uvažovat již při výběru výztuhy a to na základě zjištěných vlastností vláken (KORŘÍNEK, 2011). Jak již v úvodu bylo deklarováno, v úvahu připadají vlákna uhlíková, aramidová nebo skleněná.

Při navrhování vyztužování nosníků FRP kompozity je potřeba brát v úvahu všechny stavy zatěžení, které mohou nastat. Je potřeba, aby navržený splňoval cílený efekt vyztužení a možnost přerozdělení vnitřních sil v posíleném nosníku. Navrhování se provádí na základě modelů vycházejících z analýz a částečně na základě zkušeností v této problematice. Přirozeně se jako vstupní hodnota uvažuje nosník před vyztužením (STADO CZ s.r.o., 2007).

2.1 Možnosti vyztužování dřevěných nosníků ve stavebnictví

Ačkoliv je konstrukční i lepené lamelové dřevo často využívané a objevuje se v mnoha konstrukcích, nehodí se kvůli svým pevnostním charakteristikám na všechny typy konstrukcí. Proto je vývoj zaměřován na materiály, které by použití dřeva ve stavebnictví zvýšily. Známé jsou pokusy s vyztužením dřeva pomocí vlepovaných ocelových táhel nebo vysokopevnostních drátů. Toto vyztužení vykazuje mnoho problémů kvůli nekompatibilitě mezi dřevem a výztuží, častému výskytu koroze, vysoké hmotnosti a nepříznivé chování při požáru. Protahání oceli na mezi kluzu je nižší než u dřeva, čímž není využita plasticita dřeva (TINGLEY, 1996; HLUŠÍ, 2011).

2.1.1 Dřevobetonové konstrukce

Již v roce 1922 byl uveden první patent v oblasti dřevobetonových konstrukcí a v roce 1943 vystavěn dřevobetonový most (KUKLÍKOVÁ, 2004). Tento typ konstrukcí nebyl ovšem donedávna odbornou veřejností uznáván, neboť panovaly obavy z poškození dřeva hnilobou kvůli zvýšení vlhkosti vodou z betonu. Toto se ukázalo jako bezpředmětné a již dnes se můžeme setkat s řadou realizací v praxi, při rekonstrukcích historických bytových domů (KUKLÍKOVÁ, 2004; HLUŠÍ, 2011).

Ideální kombinací dřeva a betonu jsou spřažené dřevobetonové stropy, neboť beton zvýší tuhost i únosnost stropní konstrukce a vylepší kročejovou a vzduchovou neprůzvučnost i požární odolnost. V Čechách byly takové konstrukce navrhovány

od roku 1960. Výzkumy se v dnešní době věnují zejména různým typům spřahovacích prostředků v závislosti na tuhosti (KUKLÍKOVÁ, 2004). Navrhování dřevobetonových nosníků je již také zakotveno do národních norem (HLUŠÍ, 2011).

Sledovanými faktory u takových konstrukcí jsou vlhkost vzduchu a teplota prostředí. Výroba předpokládá použití vysušeného dřeva bez napadení biologickými škůdci a houbami. Spřahovací prostředky by se neměly umisťovat do míst s existujícími a potenciálně možnými výsušnými trhlinami. Nejširší využití těchto konstrukcí je v obytných stavbách a rekonstrukcích původních dřevěných stropů. Při výstavbě lze využít např. ztracené bednění z překližek (HLUŠÍ, 2011), (Obr. 1).



Obr. 1 Dřevobetonový strop se ztraceným bedněním z překližek (MOJDOM, 2009)

2.2 Vyztužování dřeva uhlíkovými vlákny přilepením

Vysokopevnostní vlákna spolu s polymerní matricí tvoří kompozity, které vykazují velkou únosnost a odolnost, ale také vysokou variabilitu tvaru pro přesně dané rozměry vyztužovaného nosníku. Vyztuže mají příznivý poměr hmotnosti a pevnosti.

Kompozity dřeva a vlákna s vysokou pevností prozatím v ČR velké uplatnění nenašly. V určité míře se objevují u památkových objektů, kde se používají na sanace prvků stropů, ale mnohem méně než u betonových konstrukcí. Hlavními důvody jsou vysoká cena materiálů s vysokou pevností a neinformovanost odborné veřejnosti. V současné době probíhá výzkum na Fakultě stavební ČVUT v Praze, výzkum v oblasti

lepeného lamelového dřeva vyztuženého uhlíkovými lamelami různé tloušťky (VÍDENSKÝ, MELZEROVÁ, 2007). Další oblast výzkumu je zaměřena na výrobu dřevěných vrtulí pokrytých několika vrstvami vláken a to ve Výzkumném zkušebním a leteckém ústavu v Praze (MARTAUS, 2002).

V celosvětovém měřítku lze nalézt problematiku vyztužování dřeva vysokopevnostními vlákny dále. V posledních deseti letech se této oblasti věnuje řada vědců. Za průkopníky lze považovat výzkumníky z Oregonské státní univerzity v USA, D. A. TINGLEY a R. J. LEICHTI, kteří provedli řadu rozsáhlých výzkumů nejen kompozitů dřeva s vysokopevnostními vlákny, ale i v oblasti samotných vyztužujících materiálů (PTÁČEK et al., 1999; LEICHTI et al., 1994; MARTIN, TINGLEY, 2000; MOTAVALLI, FLÜELER, 1998; TINGLEY et al., 1996). Od roku 2000 bylo s jejich jmény spojeno 24 patentů v oblasti vyztužování konstrukcí. V jejich výzkumu lze nalézt i oblast ekonomické stránky věci (TINGLEY et al., 1996), a to porovnání mezi vyztuženým a nevyztuženým nosníkem ze dřeva o shodné únosnosti. Porovnávali náklady na dřevo, lepidlo a technologii zpracování nosníku. Výsledky ukazovaly 20 % ušetření dřeva u vyztuženého nosníku s tím, že bylo pro tento použito kvalitativně horší dřevo, což se projevilo na pořizovacích nákladech. Celková úspora byla vyčíslena na 35 %, což je ekonomicky velmi výhodné. Dle praktických realizací, jako je lávka přes jezero Taylor (LEICHTI et al., 1994), se ukazuje, že reálná úspora se pohybuje mezi 20 - 35 % celkových nákladů.

Dalšími vědci věnující se dané problematice je řešitelský tým z Advanced Engineered Wood composites Center (AEWC) z univerzity v Maine, USA, kteří provedli v druhé polovině 90. let 20. století řadu experimentů, díky kterým sestavili výpočetní program pro rozsáhlou databázi dřeva s výztuží vysokopevnostních vláken (LINDYBERG, 2009). Tým AEWC v Pensylvánii a na jihovýchodě státu Maine přispíval k realizaci více než 30 mostů z lepeného lamelového dřeva vyztuženého vlákny s vysokou pevností (COMPOSITES CENTER, 2013).

V roce 1992 se experimentováním s přidanou uhlíkovou lamelou jako zesilující vrstvou na dřevěném průřezu zabýval Plevris (VÍDEŇSKÝ, 2012) a stanovil výpočetní fenomenologickou rovnici pro kombinované zatížení vč. normálové síly a ohybového momentu pro různý druh selhání. Ve výzkumu bylo zjištěno, že i malý stupeň vyztužení vlákní vysoké pevnosti vede k významnému zvýšení únosnosti a tuhosti.

V roce 1990 EMP dřevařská laboratoř začala provádět rozsáhlý výzkum na využití HSF laminátů pro vyztužení spojů u dřevěných konstrukcí poté, co se

seznámila s možnostmi použití a vývojem HSF. Základní myšlenkou bylo spojit tahové nosníky sestříhané z desky HSF laminátů. Jako druh dřeviny se při zkouškách používal smrk, neboť je nejčastěji využívanou dřevinou ve střední Evropě a obzvláště ve Švýcarsku (STEIGER, 2010).

Zahajovací série malých, jen v tahu zkoušených vzorků byla provedena jako testování prototypů. Zkoušky byly prováděny při úvaze o různých parametrech jako je druh adheziva, tloušťka vrstvy adheziva, délka a vzdálenost HSF laminátů od okraje, kvalita provedení povrchů před lepením, apod. Po první sérii, která ukázala možnosti spojování dílců dřeva prostřednictvím HSF laminátů, následuje druhá série zaměřená na větší rozměry nosníků. Studie se skládala z tahové a ohybové zkoušky. Vliv klimatu (teplota a relativní vlhkost vzduchu) a dlouhodobého zatížení (dotvarování) bylo hodnoceno také pro snížení velikosti zkoušeného vzorku. Nedávná série zkoušek byla zaměřena na vylepšení spojení HSF laminátů a dřeva lepením a zjištění rozsáhlejších informací o teplotní odolnosti a tečení. Testovány byly komerční (hlavně typ epoxidového) adheziva a adheziva upravena právě pro tuto konkrétní aplikaci.

První vyhodnocení se provádělo pro adheziva s nízkou viskozitou, která byla testována torzní oscilací. Hlavní zkoumaný parametr byla teplota skelného přechodu. Testy potvrdily technické parametry výrobců adheziv, které ukazují, že skleněná přechodová teplota je mezi 40 a 55 °C pro epoxidové pryskyřice a vytvrzuje při 20 °C (MOSALLAM et al., 2000). Tato hodnota může být zvýšena tepelnou aktivací (post-vytvrzení při 80 °C po dobu čtyř hodin), která umožňuje vyšší přípustnou provozní teplotu. Adheziva byla vybrána na základě torzních zkoušek a poté byla podrobena tahovým zkouškám (STEIGER, 2010).

Zkoušky torzního kmitání a tahové zkoušky ukázaly, že při teplotě nad 50 °C vlastnosti adheziva ve smyku obsahující plniva prudce klesají. Při této vyšší teplotě mají adheziva bez plniva vyšší modul pružnosti ve smyku, a proto neměla vliv teplota na pokles pevnosti. Nad 70 °C ani jedno z testovaných adheziv neprokázalo dostatečnou pevnost a tuhost. Proto je nejlepší použít lepidlo, které je přizpůsobeno pro konkrétní aplikaci a je ho třeba vybrat v závislosti na očekávané teplotě během celého procesu lepení. Doba trvání dlouhodobých testů byla omezena na max. 24 hodin. Výsledky přesto ukázaly první údaje rozsahu možností použití testovaných adheziv. Problémy s přilnavostí vyskytující se při 50 °C mezi dřevem a některými adhezivy, nebyly použitím resorcinového nátěru přijatelně vyřešeny (STEIGER, 2010).

2.3 Dřevěné nosníky vyztužené předepjatými vlákny - delaminace

Delaminace je hlavním problémem u lepených nosníků, které jsou posíleny přidanými předepjatými vysokopevnostními vlákny v tažené části nosníku. V projektu COST E13 autoři analyzovali dvě možná řešení. První řešení zahrnuje použití speciálního zařízení pro přidání předepjatých vláken v několika fázích od středu nosníku. Druhý přístup zahrnuje zdokonalování použitého "tvárného" adheziva, které šíří síly k předepnutí přes větší plochu na koncích nosníku. Zkoušky se zařízením pro předepnutí dosahují uspokojivých výsledků. Zkoušky s různými lepícími směsmi přinesly některé zajímavé výsledky průkopnické povahy, nicméně pevnost upnutí zaostala za očekáváním (BRUNNER, SCHNUERIGER, 2004).

Metoda se často používá ke zvýšení únosnosti lepených nosníků a zahrnuje použití vysokopevnostních vláken v tažené části nosníků. Praktická zkušenost ukazuje, že vysoká pevnost těchto vláken nemůže být plně využita, pokud jsou vlákna prostě lepena na nosník. Proto někteří vědci hledají cesty, jak připevnit předepjatá vlákna, aby se lépe využila jejich vysoká pevnost a zároveň aby se snížilo množství těchto vláken, a tím i potřebné náklady (BRUNNER, SCHNUERIGER, 2004).

Lepené nosníky zatížené ve směru vláken vykazují vysokou pevnost. Teoreticky by mělo být možné použít velmi vysoké síly předepnutí na relativně malém průřezu. V praxi mohou být použity pouze menší síly předepnutí, protože kvůli delaminaci hrozí nebezpečí rozvrstvení způsobené přenosem síly z umělých vláken na koncích nosníku do hlavní části nosníku. Pokud jsou použita obvyklá adheziva vyskytující se na trhu, jsou síly předepnutí upevněny na malé ploše na obou koncích nosníku (BRUNNER, SCHNUERIGER, 2004; TRIANTAFILLOU, DESKOVIC, 1992).

Výsledkem přenosu koncentrované síly se indukují vysoké tlaky ve směru kolmém k vláknům, kde postačuje nízká energie k vytvoření povrchových trhlin. Toto vede k předčasné delaminaci podél linie adheziva nebo k praskání dřeva.

2.3.1 Zkoušky v ohybu předepjatých lepených nosníků

Zde byla potřeba ověřit, zda by bylo možné bezpečně připojit předepjatá vlákna na lepený nosník reálné velikosti bez delaminace. Zkoušky v ohybu byly provedeny k prokázání zvýšení pevnosti lepených nosníků s přilepenými předepjatými vlákny. Vzhledem k pozitivním výsledkům úvodních zkoušek, byla směs mix 8 vybrána k přilepení předepjatého laminátu na lepený nosník. Bohužel pokus byl naprostý nezdár:

předepjatá síla 30 kN zanikla během pěti dnů, protože lepidlo ji neudrželo (LI et al., 2009).

Ve druhé sérii testů byly lepené nosníky posíleny uhlíkovým laminátem předepjatým pomocí kotevního systému silou 60 kN, což je síla běžně používá v souvislosti s betonovými nosníky. Lepidlo stanovené pro tento systém, bylo speciální epoxidové. Experiment byl naprostým úspěchem, protože v tomto případě nebyly žádné známky delaminace nebo tečení. Ve třetí sérii testů byly lepené nosníky posíleny pomocí nepředepjatého uhlíkového laminátu. Pro kontrolu byly připraveny lepené nosníky o stejné velikosti bez vyztužení (BRUNNER, SCHNUERIGER, 2004; GIANCASPRO et al., 2002).

Výsledky ohybových zkoušek, jak jsou uvedeny ukazují, že lepené nosníky mohou být vyztužené laminátem z uhlíkových vláken nepředepjatých i předepjatých. Testy také prokázaly, že vyztužení předepjatým laminátem je účinnější než použití laminátu nepředepjatého: pevnost nosníku v ohybu byla zvýšena při použití předepjatého laminátu o 32 %, při použití nepředepjatého o 21 % oproti nevyztuženému nosníku (BRUNNER, SCHNUERIGER, 2004).

2.4 Návrhový model pro nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztuženého FRP

Oblasti stanovení návrhového numerického modelu se věnovala Fakulta stavební ČVUT v Praze (VÍDEŇSKÝ, MELZEROVÁ, 2007). Byly zde zjišťovány možnosti zesílení nosníků z lepeného lamelového dřeva rovnoběžně s vlákny. Cílem vyztužení bylo zvýšit ohybovou a osovou tuhost nosníků. Pro tuto metodu vyztužení na tažené straně průřezu, bylo použito skelných a uhlíkových vláken ve formě kompozitu (MINSTER, 2006). Proveden byl návrhový model uvažující plastické chování dřeva namáhaného tlakem rovnoběžně s vlákny (KUKLÍK et al., 2007).

Potenciální oblast použití vyztužených dřevěných nosníků (TRANTAFILLOU, 1997):

- *v konstrukcích dřeva s nižší třídou kvality*
- *zlepšovat vlastnosti nových a již existujících konstrukcí*
- *opravovat poškozené konstrukce*

Dle výsledků dochází k porušení v tažené části průřezu a to zejména v místě suků a zubovitých spojů. Aby bylo zesíleno toto slabé místo, je vhodné vyztužit nosníky

na tažené straně a to materiálem s vysokým modulem pružnosti a s velkým poměrným přetvořením na mezi porušení. Vhodné materiály jsou plasty vyztužené skelnými (GFRP) či uhlíkovými vlákny (CFRP). Nevhodná je ocel – má nízkou pevnost na mezi kluzu, která vede k plastickým deformacím dříve, než dojde k porušení dřeva. Při použití vysokopevnostních vláken k tomuto jevu nedochází. Při správném vyztužení dochází k plastickému chování dřeva v tlačené části. U nevyztuženého dřeva návrhové modely s tímto efektem nepočítají, protože u něj nejdříve dojde k plastické deformaci v tažené části (KUKLÍK et al., 2005; CORRADI, BORRI, 2007).

2.5 MKP model nosníků z lepeného lamelového dřeva

Tato problematika byla opět sledována Fakultou stavební ČVUT v Praze. Hlavním důvodem vytváření MKP modelů je porovnat chování vymodelovaného nosníku s reálným. Tato metoda se nazývá Metoda konečných prvků (KUKLÍK et al., 2007) a má uplatnění také v modelaci fiktivních nosníků vyztužených vysokopevnostními vlákny, jak vykazuje další výzkum (VÍDEŇSKÝ, MELZEROVÁ 2010).

V tomto výzkumu se autoři zabývají porovnáním modelů nosníků vyztužených skleněnými a uhlíkovými vlákny a skutečných lepených nosníků vyztužených stejnými kompozitními vlákny. I zde byla použita metoda konečných prvků. Na rozdíl od předchozího výzkumu bylo bráno v úvahu také rozmístění zubovitých spojů segmentů po délce nosníku. Vlastnosti jednotlivých lamel byly získány sklerometrickou a dynamickou metodou, následně byly vytvořeny modely a porovnány s odzkoušenými skutečnými nosníky stejných rozměrů (VÍDEŇSKÝ, MELZEROVÁ 2010; MUFTI et al., 1991).

Autoři Kuklík a Vídeňský popisují tvorbu jednoho MKP modelu z dvaceti nosníků z lepeného lamelového dřeva. Dvacet nosníků s rozměry skutečné konstrukce bylo komerčně vytvořeno. Během zatěžovacích testů, které probíhaly až do porušení nosníků, byla sledována řada různých parametrů. Materiálové charakteristiky jednotlivých lamel byly určeny nezávisle. Díky těmto skutečnostem je možné model MKP vytvořit velmi přesně. Dále se testovala shoda mezi výsledky MKP modelu a skutečně zjištěnými parametry na reálném nosníku (KUKLÍK et al., 2007).

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem této práce je testování aplikace nově vyvinutého a vyrobeného typu tkaniny na bázi uhlíku v kombinaci s vhodným typem adheziva za vzniku kompozitu pro aplikaci k vyztužení dřevěných nosníků ve stavebnictví, a to při ohybovém zatížení. Hlavním úkolem je porozumět mechanismu chování kompozitu uhlíkové tkanin a dvou druhů adheziv při jejich aplikaci na dřevěné smrkové nosníky. K tomuto účelu je z důvodu odhadnutí a stanovení průběhu sil ve vyztuženém nosníku vytvořen staticko-matematický model v softwarovém systému ANSYS a porovnáním s průkaznými destruktivními zkouškami tento výpočtový model ověřen. Výsledkem těchto zkoušek je vyhodnocení, zdali daný typ vlákna v kombinaci s daným typem adheziva je vhodný pro účel vyztužování dřevěných nosníků a dále poté stanovení mechanicko-fyzikálních vlastností daného kompozitu.

Díličními cíli jsou:

1. Prohloubení znalostí o vláknových kompozitech a kompozitech dřeva s vlákny vysoké pevnosti pomocí literárních zdrojů.
2. Výběr a zajištění zkušebních vzorků dřevěných smrkových nosníků, vysoko-pevnostní uhlíkové tkaniny a vhodných typů adheziv.
3. Zhotovení vyztužených nosníků s nalepenou uhlíkovou tkaninou a předepjatou uhlíkovou tkaninou s vybranými druhy adheziv.
4. Provedení průkazných destruktivních zkoušek v ohybu všech vzorků a zjištění zkoumaných pevnostních parametrů.
5. Vypracování staticko-matematického modelu nosníků shodných se zkušebními nosníky, pomocí MKP (metody konečných prvků) v softwarovém programu ANSYS 14.0.
6. Ověření výpočtového simulovaného modelu MKP s experimentálním měřením a zhodnocení výsledků.
7. Analyzování statistického zpracování výsledků a porovnání pevnostních parametrů nevyztužených nosníků, vyztužených nosníků přilepenou uhlíkovou tkaninou a nosníků s předepjatou uhlíkovou tkaninou.
8. Závěrečné vyhodnocení a návrhy použitelnosti dřevěných nosníků s přidanou vyztuží ve formě uhlíkové tkaniny pro vědu i praxi.

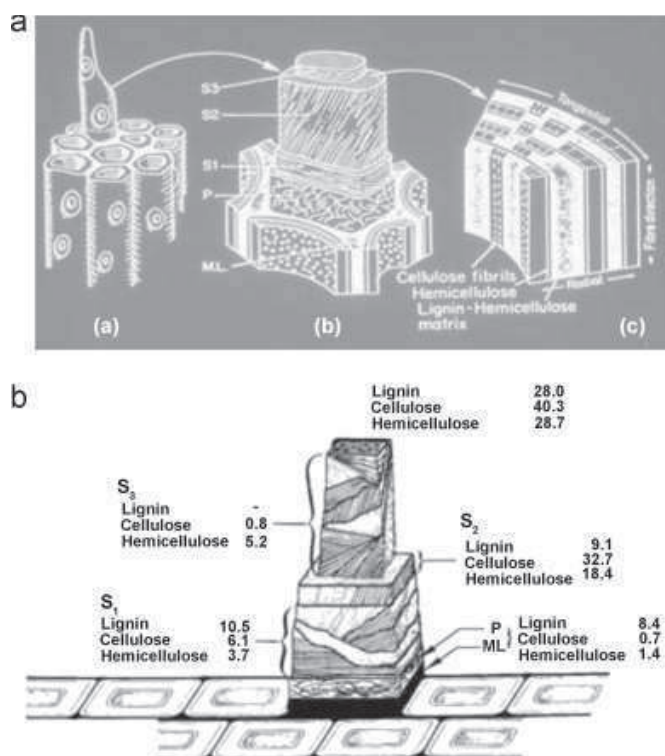
4 MATERIÁL

4.1 Dřevo jako konstrukční materiál

Dřevo je z hlediska své struktury a z ní vyplývajících vlastností konstrukčně zajímavý materiál. Tak jako každý konstrukční materiál i dřevo má své přednosti a nedostatky, které je nutné znát pro správné použití a účel v konstrukcích. Je to právě dřevo, které velmi ovlivňuje únosnost a tuhost vyztužených dřevěných nosníků, a proto je věnována pozornost poznatkům o stavbě a mechanicko-fyzikálních vlastnostech dřeva.

4.1.1 Stavba dřeva

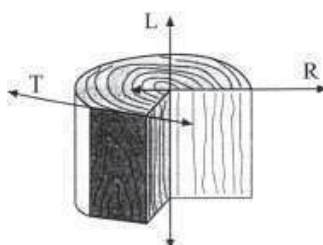
Stavba dřeva vychází z jeho složení. Je to organický materiál složený z buněk, vytvořený z chemických vazeb celulózy, hemicelulózy, ligninu a doprovodných látek (HOREJŠÍ, 1987). Struktura dřeva se liší podle druhu dřeviny (HLUŠÍ, 2011). Jehličnaté jsou většinou měkké dřeviny, jejichž skladebným prvkem jsou tracheidy, které činí až 95 % objemu dřevní hmoty a buňky 2 - 5 mm s šířkou 30 - 40 μm . Tloušťka stěny buněk se liší v závislosti na ročním období a přírůstku. Listnaté dřeviny obsahují také tracheidy, ale současně se vyskytují tracheje, které tvoří asi 75 % objemu dřevní hmoty (HOREJŠÍ, 1987). Buňky jsou širší a objemnější, díky čemuž řadí listnaté dřeviny do skupiny tvrdých dřev. Skladba dřeva je definována několika strukturálními hladinami, které vycházejí z lokalizace celulózy, hemicelulózy a ligninu, jak je patrné z obrázku (Obr. 2). (REINPRECHT, 1994; NILSSON, ROWELL, 2012).



Obr. 2 Strukturální hladiny dřeva (NILSSON, ROWELL, 2012).

Na dřevěné konstrukce se častěji používají jehličnaté dřeviny, právě kvůli snadnější zpracovatelnosti a vhodnosti možnosti lepení.

Dřevo je nehomogenní materiál, který obsahuje lokální vady a nepravidelnosti, mezi které patří suky, trhliny, odklon vláken apod. Je také výrazně anizotropní a vykazuje odlišné chování v různých směrech. Vlastnosti dřeva se popisují ve třech rovinách vymezených třemi hlavními směry anizotropie (Obr. 3) - podélným (L), radiálním (R) a tangenciálním (T), (VYHNÁLEK, 2005).



Obr. 3 Hlavní směry anizotropie dle (EYMAA, et al., 2004)

Lze s ním tedy pro zjednodušení uvažovat jako s ortotropním materiálem (LAŠ, 2004). U řeziva je často obtížné stanovit orientaci radiální a tangenciální osy, běžně se tedy udává jedna společná hodnota pro celou rovinu RT (rovinu průřezu).

V radiálním a tangenciálním směru je ovšem výrazný rozdíl v objemových změnách důsledkem změny vlhkosti, což je příčinou tvarových změn řeziva. Největší pevnosti i tuhosti a zároveň nejmenší deformace od účinku teploty, sesychání či bobtnání má dřevo ve směru rovnoběžně s vlákny, tedy ve směru osy L (HLUŠÍ, 2011).

4.1.2 Fyzikální vlastnosti dřeva

Vlastnosti dřeva jsou dány jeho stavbou a také řadou činitelů, které vychází především z množství vody ve dřevě a také délce trvání působícího zatížení. (VÍDEŇSKÝ, 2012).

4.1.2.1 Hustota dřeva

Hustota, přesněji objemová hmotnost, kvůli uvažování objemu vč. pórů, je velice proměnlivá. Rozdíly jsou patrné nejen mezi jednotlivými druhy, ale i v rámci umístění v délce stromu, což je dáno růstovými podmínkami jedince. Průměrnou hustotou a procentuálním zastoupením základních stavebních látek buněčné stěny - celulóza 1 560 kg.m⁻³, hemicelulózy 1 500 kg.m⁻³ a lignin 1 350 kg.m⁻³ - jsou dány rozdíly v hustotě dřevní substance (GRNIAK, 2003).

I přesto, že je označení hustota zavádějící, vzhledem k faktu, že pórovitost dřeva ovlivňuje mnoho dalších vlastností, je v této práci dále používáno pro objemovou hmotnost právě užívané označení hustota, z důvodu značení této veličiny v normách ČSN EN, zabývající se dřevěnými konstrukcemi.

Důležitou fyzikální charakteristikou dřeva je právě hustota. Většina mechanických vlastností dřeva, jakož i únosnost spojů nosníků, pozitivně koreluje s hustotou ρ , kterou lze definovat vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1.)$$

kde: m je hmotnost dřeva;

V je objem dřeva.

Hustota dřeva závisí na vlhkosti, neboť vlhkost zvětšuje jeho hmotnost a objem.

Hustota ρ_w při vlhkosti dřeva w [%] je vyjádřena vztahem:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} = \frac{m_0(1 + 0,01w)}{V_0(1 + 0,01\beta_V w)} = \rho_0 \frac{1 + 0,01w}{1 + 0,01\beta_V w} \quad (4.2.)$$

kde: m_w je hmotnost mokrého dřeva;

m_0 je hmotnost absolutně suchého dřeva;

- V_w je objem mokrého dřeva;
- V_0 je objem absolutně suchého dřeva;
- ρ_0 je hustota dřeva v absolutně suchém stavu;
- β_V je součinitel objemového bobtnání [% přetvoření na % zvýšení vlhkosti]

K bobtnání dochází pouze v případě, že voda proniká do buněčných stěn. Vlhkost, při které jsou buněčné stěny zcela nasyceny, je tzv. mez nasycení vláken w_f , odpovídající vlhkosti cca 28 %. Nad touto mezí již nedochází k dalšímu bobtnání. Pod mezí nasycení dřevních vláken se může pro praktické účely předpokládat lineární závislost bobtnání a sesychání na vlhkosti.

Při zpracování dřeva a u navrhování dřevěných konstrukcí se používá hlavně hustota v absolutně suchém stavu ρ_0 a hustota ρ_{12} při vlhkosti dřeva 12 %. Hodnoty hustoty dřeva se většinou vztahují k jeho hmotnosti a objemu při rovnovážné vlhkosti, odpovídající teplotě prostředí 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %.

V praxi používané hodnoty hustoty se uvažují buď jako průměrná hustota $\rho_{12,mean}$ při vlhkosti dřeva 12 % nebo jako charakteristická hustota $\rho_{12,k}$ při vlhkosti dřeva 12 % definované jako 5 % kvantil základního rozdělení souboru. U jednotlivých tříd konstrukčního dřeva se hustota zpravidla předpokládá s normálním rozdělením a variačním koeficientem 10 %. Z toho vyplývá:

$$\rho_{12,k} = \rho_{12,mean} - 1,65(0,1\rho_{12,mean}) = 0,84\rho_{12,mean} \quad (4.3.)$$

Hustota buněčné stěny je lehce vyšší než 1 500 kg.m⁻³. Hustota dřeva je proto závislá na jeho pórovitosti. Smrkové konstrukční dřevo v absolutně suchém stavu vykazuje zpravidla hustotu mezi 300 až 550 kg.m⁻³, což odpovídá objemovému podílu dutin 0,63 až 0,8 (GRNIAK, 2003).

4.1.2.2 Vlhkostní vlastnosti

Vlhkost dřeva w je definována jako poměr hmotnosti vody odvedené ($m_w - m_0$) a hmotností suchého dřeva (m_0):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} 100 \quad [\%] \quad (4.4.)$$

Hmotnost v suchém stavu lze získat při umělém sušení za teploty 103 ± 2 °C (GRNIAK, 2003). Dodržení této hranice teploty je důležité, neboť při teplotě okolo 118 °C začíná degradovat lignin a při nižších teplotách není dosažena hranice

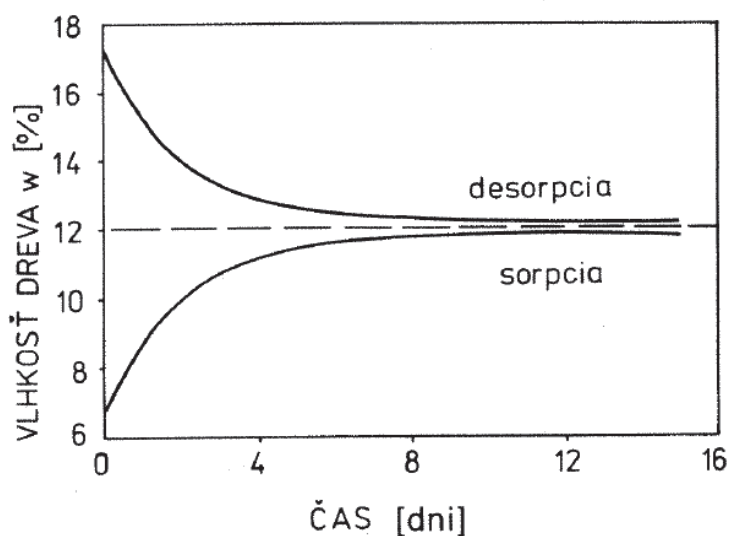
absolutního vysušení. Vlhkost dřeva může být vyjádřena jako zlomek nebo v procentech. Běžně se lze setkat s hodnotami v procentech.

Měření vlhkosti dřeva se provádí elektrickými vlhkoměry, pouze v rozmezí od 4 do 28 % s přesností ± 2 %, což je plně dostačující pro praktický význam.

Při sušení čerstvě pokáceného dřeva je voda nejprve odváděna z buněčných dutin. Tato voda není na dřevo vázáná molekulárně a nazývá se voda volná. Voda uvnitř buněčných stěn se nazývá vázaná voda, protože je pomocí vodíkových můstků a Van der Waalsovými silami vázána na buněčnou stěnu. Odvedení vody z buněčných stěn proto vyžaduje větší spotřebu energie, než odvedení vody volné.

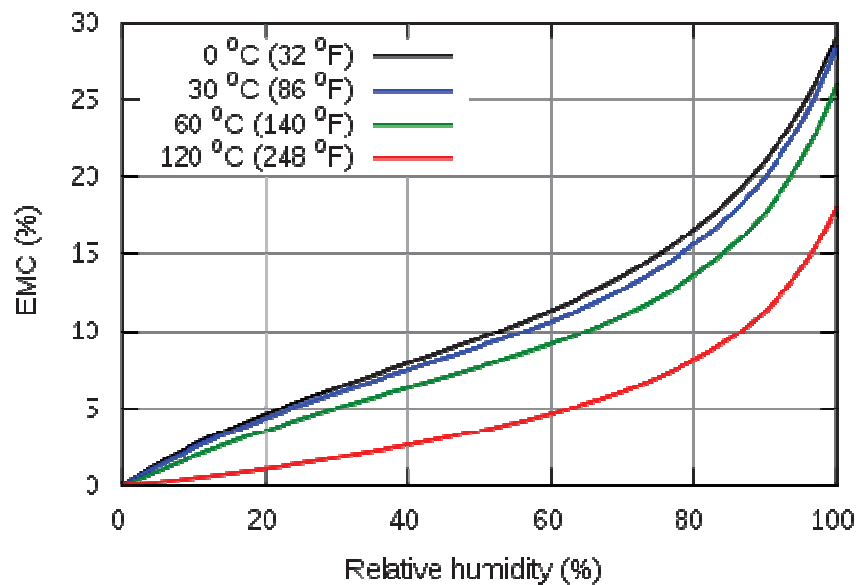
Vlhkost, při které jsou buněčné stěny nasyceny vodou, avšak do buněčných dutin ještě nevstupuje voda volná, se označuje jako mez nasycení dřevních vláken. Tato mez je u většiny druhů dřeva mezi 25 až 35 %, avšak pro většinu praktických aplikací je vhodná hodnota 28 %. Mez nasycení dřevních vláken je velmi důležitá, protože pod touto mezí dochází k významným změnám většiny fyzikálních i mechanických vlastností dřeva. Nad touto mezí je většina vlastností přibližně konstantní (GRNIAK, 2003).

Vzhledem k tomu, že je dřevo hygroskopické, dochází téměř nepřetržitě k výměně vlhkosti s okolním prostředím. Pro každou kombinaci teploty a vlhkosti okolního vzduchu existuje příslušná vlhkost dřeva, při níž difúze vlhkosti vstupující do dřeva je v rovnováze s difúzí vlhkosti vystupující ze dřeva (Obr. 4).



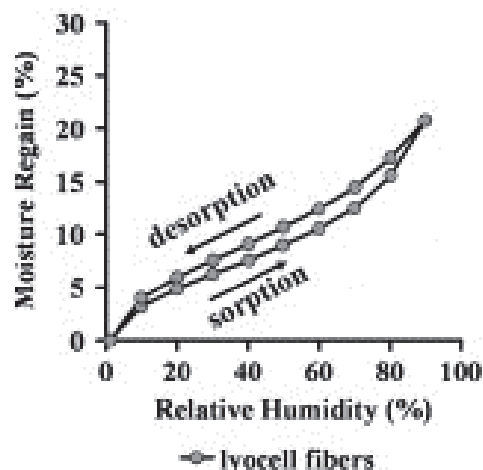
Obr. 4 Rovnovážná vlhkost dřeva při sorpci a desorpci (POŽGAJ, et al., 1993)

Tato vlhkost je označována jako rovnovážná. Stav, kdy je dřevo v rovnovážné vlhkosti však nastane jen zřídka, protože klimatické podmínky okolního prostředí se neustále mění. Rychlost a velikost změn vlhkosti mají velký vliv na téměř všechny vlastnosti dřeva. Závislost rovnovážné vlhkosti dřeva na relativní vlhkosti vzduchu pro různé teploty prostředí lze nalézt v následujícím grafu (Obr. 5).



Obr. 5 Rovnovážná vlhkost dřeva (EMC) v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu při různých teplotách prostředí (HAILWOOD, HORROBIN, 1946)

Rovnovážnou vlhkost, kterou dřevo dosáhne při sorpci, je o něco málo nižší než při desorpci. Závisí tedy na tom, zda byla rovnovážná vlhkost dosažena sorpcí nebo desorpcí. Rozdíl mezi rovnovážnou vlhkostí dřeva dosaženou při sorpci nebo desorpci vodních par se nazývá hystereze rovnovážné vlhkosti (Obr. 6).



Obr. 6 Hystereze rovnovážné vlhkosti dřeva při sorpci a desorpci (SIROKAA, et al., 2008)

Pro dosažení rovnováhy vlhkosti dřeva s konstantním okolním klimatem je potřeba poměrně dlouhá doba. Pro smrkové dřevo průřezu 54 x 100 mm s vlhkostí 20 % jsou potřeba minimálně 4 týdny při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu RH = 54 %, aby bylo možné vykazovat rovnovážnou vlhkost 10 %. Proto se rovnovážné vlhkosti nosníku dřevěné konstrukce dosáhne dříve, pokud působí příslušná průměrná teplota a relativní vlhkost vzduchu po dobu několika týdnů, než při krátkých cyklech s vysokými či nízkými hodnotami vlhkosti vzduchu. Změny vlhkosti pod mez nasycení dřevních vláken způsobují jeho objemové změny.

Vstupuje-li vlhkost do buněčné stěny, dřevo bobtná. Mikrofibry se posunou bočním směrem, a tím dochází k bobtnání buněčné stěny. Objem buněčných dutin zůstává při bobtnání stálý. Z tohoto lze předpokládat pro praktické aplikace ekvivalentní objem přijaté vody (GRNIAK, 2003).

Vystupuje-li vlhkost z buněčné stěny, dřevo sesychá. Sesychání i bobtnání v mezích běžných změn vlhkosti u dřevěných konstrukcí bývá označeno jako vlhkostní přetvoření.

Anizotropie mezi vlhkostním přetvořením v příčném (RT) a podélném (L) směru je řádově 20:1. V příčném směru se ovšem vlivem vlhkostních změn objevují přetvoření také. Tangenciální (T) vlhkostní přetvoření se mohou prakticky uvažovat jako dvojnásobek radiálních (R) přetvoření. Pro technické použití však není nutné tyto dva směry rozlišovat, čili vlhkostní přetvoření v příčném směru (RT) se uvažuje jako průměrná hodnota.

V rozmezí vlhkosti dřeva mezi 5 a 20 % se rozměry dřeva mění lineárně se změnou vlhkosti. Toto vlhkostní přetvoření lze vypočítat z následujícího vztahu:

$$h_2 = \frac{h_1 [100 + \beta(|w_2 - w_1|)]}{100} \quad (4.5.)$$

kde: h_1 a h_2 jsou rozměry (tloušťky) při obsahu vlhkosti dřeva w_1 popř. w_2 [%];
 β je součinitel bobtnání (kladný) nebo součinitel sesychání (záporný) [-].

Nejsou-li k dispozici hodnoty součinitele bobtnání a sesychání pro daný druh dřeva, může se použít zjednodušený vztah. Tento vztah stanovuje za součinitel objemového bobtnání a sesychání β_v číselně shodnou hodnotu s hustotou [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$], což ve výsledku znamená, že se objem dřeva s hustotou $0,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ při každém přírůstku vlhkosti dřeva o 1 % zvětší o 0,4 %. Z toho lze usuzovat, že součinitel bobtnání β_v odpovídá objemu přijaté vody. Součinitel bobtnání a sesychání v podélném (L) směru β_0 je zpravidla zanedbatelný a v příčném směru (RT) β_{90} se rovná poloviční hodnotě součinitele objemového bobtnání či sesychání β_v .

Pro většinu druhů dřeva na stavební konstrukce, jako je např. smrk, borovice, jedle, modřín nebo dub, mohou být uvažovány hodnoty $\beta_0 = 0,01$ a $\beta_{90} = 0,2$.

Pro minimalizování problémů vlhkostního přetvoření se má dřevo do konstrukce zabudovat tak, aby co nejvíce odpovídalo budoucí rovnovážné vlhkosti. Dle ČSN EN 1995 se má dřevo převyšující 20 až 22 % zabudovávat pouze tehdy, když je možné přiměřeně rychle vysychání konstrukce bez rizika biologické degradace nebo trvalých přetvoření účinkem mechanicko-sorpčního dotvarování.

Anizotropie příčného (RT) bobtnání a sesychání dřeva může způsobit při změně vlhkosti zborcení průřezů. Skutečnost, že tangenciální (T) sesychání je přibližně dvojnásobkem radiálního (R), ukazuje tendenci letokruhů k napřimování.

Vnitřní napětí, která vznikají anizotropním sesycháním, se odbourávají v první řadě vznikem radiálních trhlin. Čím větší průřez a rychlejší vysoušení, tím dříve dochází k výsušným trhlinám (GRNIAK, 2003).

4.1.3 Mechanické vlastnosti dřeva

Z výše uvedených parametrů je zjevné, že mechanické vlastnosti dřeva závisejí na vlhkosti. Vzestup vlhkosti vede k poklesu hodnot pevnosti a tuhosti. Tento účinek se zčásti vysvětluje bobtnáním buněčné stěny, následkem čeho je k dispozici méně buněčné stěny na plošnou jednotku. Důležitější je však to, že voda vniká do buněčné stěny a zeslabuje vodíkové spoje, kterými je buněčná stěna spojena. Změny vlhkosti nad mez nasycení dřevních vláken nemají vliv na mechanické vlastnosti, protože se volná voda ukládá pouze do buněčných dutin (GRNIAK, 2003).

Výhodou dřeva při použití jako konstrukčního materiálu je jeho vlastnost, že při relativně nízké hmotnosti má dobrou pevnost. Mechanické vlastnosti sehrávají významnou úlohu i při jeho zpracování. Proto je i z tohoto hlediska nutné znát chování dřeva při namáhání, aby ho bylo možné optimálně zpracovat.

Účinek změn vlhkosti na různé mechanické vlastnosti je rozdílný. Důležitou roli přitom hrají vodíkové vazby citlivé vůči vlhkosti. Při namáhání tlakem rovnoběžně s vlákny je porušení způsobeno vybočením vláken, kdežto porušení tahem rovnoběžně s vlákny znamená porušení kovalentních vazeb odtržením mikrofibril buněčné stěny. Pevnost v tlaku je proto ovlivněna vlhkostí více než pevnost v tahu.

Při mechanickém namáhání vzniká interakce mezi mechanickými silami s dalšími činiteli namáhání a dřevem. Výsledkem tohoto procesu jsou dočasné anebo trvalé změny dřeva. Namáhání dřeva podle fyzikální podstaty sil je možné rozdělit na vlhkostní, mechanické, chemické a další, včetně jejich kombinací (GRNIAK, 2003; POŽGAJ, et al., 1993; ČSN EN 384).

4.1.3.1 Druhy namáhání

Tah a tlak

V případě, že síla táhne průřez a vnitřní síly působí kolmo na ní, jde o tahové namáhání. Při opačném směru působení síly (síla průřez tlačí) vzniká tlakové namáhání. Po dosažení meze pevnosti v tahu se vlákna přetrhnou a při tlaku roztlačí (DICKÝ, MISTRÍKOVÁ, 2000). Vzhledem k působení vnější síly na průběh vláken a letokruhů rozeznáváme tyto tři případy namáhání dřeva tahem a tlakem:

- síla působí rovnoběžně s vlákny = pevnost v tlaku, resp. tahu rovnoběžně (L) s vlákny,
- síla působí kolmo na vlákna a tečně k letokruhům = pevnost v tlaku, resp. tahu kolmo na vlákna tangenciálním směrem (T);

- síla působí kolmo na vlákna a kolmo na letokruhy = pevnost v tlaku, resp. tahu kolmo na vlákna radiální (R) směrem.

Ohyb

Pokud ohybový moment působí na těleso kolmo k průřezu, vznikají ve dřevě normálové a tangenciální napětí způsobující jeho zatížení buďto pootočením průřezu nebo ohybem. Když se dosáhne mez pevnosti, dřevo se zlomí. Vzhledem k orientaci vláken a letokruhů a směru působící síly mohou nastat tři případy zatížení ohybem:

- vlákna probíhají rovnoběžně (L) s podélnou osou zatěžovaného nosníku a síla vyvolávající ohybový moment působí tangenciálně (T) anebo radiálně (R) na letokruhy (POŽGAJ, et al., 1993). Toto je jediný případ zatížení, který se používá ve stavebních konstrukcích;

- vlákna probíhají kolmo na podélnou osu zatěžovaného nosníku a síla působí kolmo na vlákna (POŽGAJ, et al., 1993). Tento druh ohybového namáhání se pro malé konstrukční rozměry těles nepoužívá;

- vlákna probíhají kolmo na podélnou osu zatěžovaného nosníku a síla působí kolmo na vlákna (POŽGAJ, et al., 1993). Ani tento druh ohybového namáhání se v praxi nepoužívá, z důvodu malých rozměrů těles.

Pevnost v ohybu je mezní napětí, při kterém dvojice sil vyvolá moment v rovině kolmé k průřezu a způsobí zlomení zkušební tělesa.

Smyk

Pokud se výslednice vnějších sil vzájemně posunují po vláknech v jejich rovinách, vzniká tangenciální napětí. Vzhledem k pozici vláken ve dřevě, rozlišujeme následující případy zatížení posouvající silou a z toho následně vyplývající pevnosti ve smyku (POŽGAJ, et al., 1993):

- smyk v radiální (R) a tangenciální (T) rovině = síly působí ve směru vláken;

- smyk v radiální (R) a tangenciální (T) rovině = síly působí kolmo na vlákna;

- smyk v příčné rovině (RT) = síly působí v radiálním (R) a tangenciálním (T) směru.

Krut

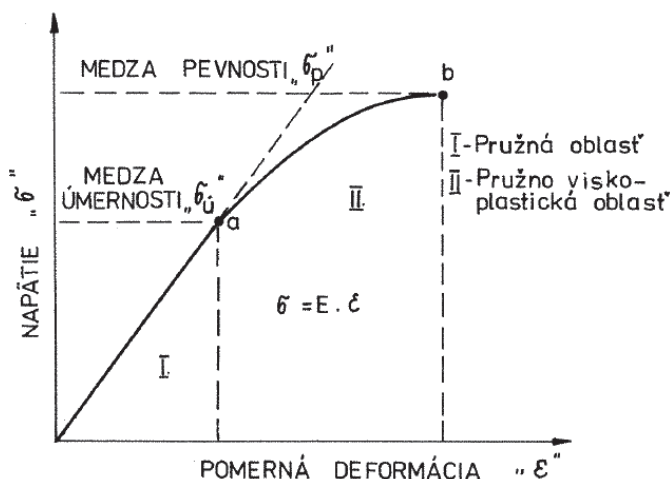
Pokud kroutící moment působí ve směru průřezu, hovoříme o namáhání na krut. Účinkem krutu se vlákna dřeva od sebe odchylují (POŽGAJ, et al., 1993).

4.1.3.2 Napětí a deformace

Napětí ve dřevě představuje míru vnitřních sil, které vznikají v tělese jako výsledek vyvolaný vnějšími mechanickými silami (LEBOW, et al., 2003).

Při působení síly, pokud síla působí na plochu průřezu kolmo, vyvolává normálové napětí σ . Pokud síla působí v rovině průřezu, vzniká tangenciální (T) - smykové napětí τ .

Charakteristickou pevností materiálu je veličina maximálního napětí, čili hranice porušení materiálu, kterou nazýváme mezí pevnosti. Napětí odpovídající vzniku plastických deformací, které se časem nevytrácí, nazýváme mezí úměrnosti.



Obr. 7 Pracovní deformační diagram (POŽGAJ, et al., 1993)

Pracovní diagram (Obr. 7) můžeme rozdělit na dvě části a to na lineární část - pružná oblast, po mez úměrnosti σ_u a nelineární část od meze úměrnosti po mez pevnosti σ_p - pružně viskózní plastická oblast. Mez úměrnosti odpovídá napětí, při kterém předpokládáme pouze pružných deformací ve dřevě.

Pojem mez úměrnosti σ_u u dřeva není totožná s pojmem meze pružnosti (u kovových materiálů), protože není možné vizuálně přesně určit fyzikální začátky vzniku trvalých deformací. Mez úměrnosti se určuje pouze na základě subjektivního vizuálního posouzení, jako přechod mezi lineární a nelineární částí diagramu (DAGHER, 2000).

V pružně viskózní plastické oblasti vznikají kromě pružných deformací i deformace pružné v čase a plastické deformace. Nad mezí úměrnosti už nastává pružná deformace v čase a plastická deformace. Jejich rozvoj v závislosti na napětí není lineární. Vznik plastických deformací je výhradně nenávratný proces (KUKLÍK, 2001).

Pevnost dřeva je závislá od délky působení vnějších sil. Se stoupajícím časovým působením sil se pevnost snižuje. Při statických zkouškách napětí rovnoměrně roste až

do bodu zlomu. Z deformačního diagramu vyplývá, že lze uvažovat s průběhem vztahů mezi silou a časem při konstantní rychlosti deformování, anebo se vztahem mezi deformací a časem při konstantním vzrůstem síly (Obr. 7).

Změny rozměru a tvaru materiálu při působení sil nazýváme deformačními vlastnostmi. Samotnou změnu tvaru nazýváme deformací (BUCHANAN, 1990). Ve dřevě ji způsobuje vlhkostní napětí.

Deformace lze rozdělit na pružné, pružné v čase a plastické. Pružné deformace se dělí na pružné okamžité, tj. okamžitě se objevující při působení síly a okamžitě se ztrácející po uvolnění a pružné postupem času (vazké), objevující se v určitém čase zatížení a také mizející po tomto čase. Takovéto stavy napjatosti vznikají v pružné viskózní oblasti.

Pokud dřevo nenapodobí svůj počáteční tvar a rozměry po uvolnění síly, nastávají trvalé změny materiálu a vznikají plastické anebo trvalé deformace. Plastické deformace se nachází pod mezí úměrnosti. Po mezí úměrnosti lze uvažovat s platností Hookeova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.6.)$$

kde: E je modul pružnosti

ε je poměrné prodloužení

4.1.3.3 Základní mechanické vlastnosti

Pružnost

Pružnost dřeva je definovaná schopností navrátit původní rozměry (tvar) po uvolnění vnějších sil. Tato schopnost je omezena určitým namáháním, které při překročení této hranice znamená, že dřevo zůstává trvale přetvořené (plasticky deformované) anebo se poruší. Toto mezní namáhání je charakteristické jako mez pružnosti. Na základě deformačního diagramu je pružnost kvantifikována těmito charakteristikami (POŽGAJ, et al., 1993):

- E moduly pružnosti;
- μ Poissonovo čísla;
- σ_u mezí úměrnosti;
- energií pružné deformace.

Modul pružnosti

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím jsou větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace. Rozlišujeme modul pružnosti při normálových namáháních E (tah, tlak, ohyb) a moduly pružnosti G při tangenciálních namáháních (smyk, krut). Modul pružnosti a smykový modul charakterizují tuhost materiálu, čili schopnost odolávat deformacím. Pro běžné dřeviny v ČR se modul pružnosti pohybuje v rozsahu 7 000 až 15 000 MPa a smykový modul pružnosti 100 až 2 000 MPa při průměrné absolutní vlhkosti dřeva $w_a \cong 12\%$ (POŽGAJ, et al., 1993).

Poissonovo číslo

Poissonova čísla jsou důležitými charakteristikami pružnosti dřeva a využívají se především při objemových změnách dřeva, způsobených vlivem mechanických zatížení. Hodnoty Poissonových čísel pro smrk ukazuje Tab. 1 (POŽGAJ, et al., 1993).

Tab. 1 Poissonova čísla vybraných dřevin (POŽGAJ, et al., 1993).

Poissonove čísla v hlavných smeroch pružnej symetrie

(L, R, T) ($w_a = 11-12\%$)

Drevina	V smere vláken		Radiálnym smerom		Tangenciálnym smerom	
	Poissonove čísla		Poissonove čísla		Poissonove čísla	
	μ_{RL}	μ_{TL}	μ_{TR}	μ_{LR}	μ_{RT}	μ_{LT}
<i>Picea abies</i> Karst. (smrek)	0,489	0,557	0,990	0,023	0,687	0,014

Počet pozorovaní $n = 90-120$ pre každý priemer, rozmery telesa $50 \times 50 \times 150$ mm.

Mez úměrnosti

V deformačním diagramu lze po překročení meze úměrnosti σ_u sledovat odklon lineárního průběhu. Napětí, které odpovídá tomuto zlomu, je mez úměrnosti. Tuto hranici můžeme definovat jako největší napětí ve dřevě, při kterém ještě nevznikají plastické deformace a deformace pružné v čase (POŽGAJ, et al., 1993).

Pevnost

Pevností dřeva rozumíme odpor anebo odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Podle fyzikální povahy veličin, kterými definujeme pevnost, rozlišujeme tři druhy pevnosti:

- konvenční (smluvenou) pevnost;
- skutečnou pevnost;
- ideální anebo teoretickou pevnost.

Konvenční pevnost vyjadřuje největší napětí, které se vztahuje na průřez skutečného tělesa. U dřeva tato pevnost z praktického hlediska nemůže být brána do úvahy, neboť zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout. Skutečná pevnost se definuje skutečným napětím v okamžiku porušení zkušebního tělesa. Ideální pevnost je maximální teoretická hodnota pevnosti dřeva, kterou je možné dosáhnout pro konkrétní dřevinu a daných podmínek zatěžování (POŽGAJ, et al., 1993).

Podle (DICKÝ, MISTRÍKOVÁ, 2000) rozděluje pevnostní charakteristiky:

- podle stavu napjatosti na pevnosti získané při jednoosém anebo více-osovém stavu napjatosti;
- podle způsobu zatížení na pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu a smyku;
- podle časového průběhu zatěžovací síly na statické a dynamické;
- podle účinku zatížení dřeva na pevnosti, které jsme získali destruktivní anebo nedestruktivní metodou (BOHNHOFF, 2002).

Plastičnost dřeva

Plastičnost je schopnost dřeva měnit vlivem vnějších sil svůj tvar bez patrného porušení, čili se plasticky deformovat před porušením v bodě zlomu. Jedná se o trvalou změnu tvaru dřeva, tedy změny vzájemných ploch částic porušených chemických stavebních složek (BOSTRÖM, et al., 1999).

Plastická deformace dřeva při krátkodobém zatížení se začíná projevovat tehdy, když napětí překročí mez úměrnosti. Při dlouhodobých zatíženích se dřevo chová jako viskózně pružný materiál a plastická deformace vzniká od začátku zatížení. Dřevo je tím plastičtější, čím má větší plastickou deformaci bez vzniku makroskopického zlomu (POŽGAJ, et al., 1993).

Houževnatost dřeva

Houževnatost dřeva je obrazem jeho struktury a vazebných energií se zřetelem na daný způsob zatížení.

Statická houževnatost dřeva je mechanická vlastnost, která představuje mechanickou energii spotřebovanou na vznik plastické deformace. Odpovídá tedy

mechanické práci. Houževnatost je tím větší, čím více práce se spotřebuje na vznik plastické deformace (BENDER, 2006).

Rázová houževnatost dřeva charakterizuje schopnost dřeva absorbovat práci rázovým ohybem. Cílem takového namáhání je zjistit velikost práce, která se spotřebovala na přeražení za určitých podmínek (POŽGAJ, et al., 1993).

4.1.4 Mezní stavy

Dimenzování dřevěných konstrukcí, vystavovaných různým druhům zatížení, se stanovuje metodou mezních stavů (ČSN EN 1995-1-1, 2006). Mezní stavy únosnosti se rozdělují do dvou skupin:

- mezní stav únosnosti;
- mezní stav použitelnosti.

Mezní stav únosnosti

Při ověřování konstrukce z hlediska vyhovění mezního stavu únosnosti se ve všeobecnosti uvažuje mezní stav statické rovnováhy anebo celkového přetvoření konstrukce, při kterých se musí prokázat, že:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} \quad (4.7.)$$

anebo se uvažuje mezní stav porušení, nadměrného přetvoření průřezu, nosníku či spoje, přičemž platí:

$$S_d \leq R_d \quad (4.8.)$$

kde: $E_{d,dst}$ a $E_{d,stab}$ jsou návrhové účinky stabilizujícího a destabilizujícího zatížení

S_d je návrhová hodnota vnitřní síly nebo momentu

R_d je návrhová hodnota odpovídající odolnosti

Mezní stav použitelnosti

Při posouzení konstrukcí (převážně prvků stropů a krovů) na mezní stav použitelnosti se většinou jedná o prokázání dovolených průhybů nosníků, prokluzu spoje a kmitání. Je nutné definovat také hodnoty okamžité a konečné deformace od vlivu zatížení s použitím průměrných hodnot příslušných modulů pružnosti, modulů pružnosti ve smyku a modulů prokluzu (BELPERIO, GRAD, 1999).

4.2 Adheziva a jejich funkce

Technologie lepení má v dřevařské praxi velice důležité místo, které nabývá na významu z důvodu vývoje nových polymerních materiálů. Dřevěné nosníky mohou tímto výrobním postupem získávat nové vlastnosti, díky kterým lze nosníky lépe zařadit do konkrétních projektů dle specifických požadavků.

Adheziva pro nosné dřevěné prvky se používají pro vzájemné spojování prvku tak, aby staticky působily jako celek. Lepidlo vyplňuje spáry mezi dřevěnými prvky a vytváří mezi nimi adhezivní spojení, které je stejně pevné a trvanlivé jako kohezní síly uvnitř nosníku. Vrstva adheziva musí kromě toho vykazovat dostatečnou pevnost a trvanlivost, aby v uvažované třídě trvání zatížení byla v průběhu předpokládané životnosti konstrukce trvale účinná. První fází je nanesení tekutého adheziva tak, aby smáčelo povrchy obou spojovaných částí, druhá fáze je přechod adheziva do pevného stavu, tedy tzv. vytvrzování, které může nastat třemi způsoby: fyzikálním procesem (tavná adheziva, termoplastická adheziva), chemickým procesem (adheziva z epoxidových pryskyřic, polyuretanová adheziva) nebo kombinací přeměny roztoku a chemické reakce (močovinová, melaminová a fenolická adheziva), (VYHNÁLEK, 2005).

Jednotlivé druhy adheziv se od sebe značně odlišují charakteristikami jako objemová stálost v závislosti na teplotě a vlhkosti, křehko-lomové vlastnosti, tažnost ap. Společnými vlastnostmi jsou vysoká pevnost a relativně vysoká tuhost vytvrzeného adheziva.

Vhodnou vlastností, kterou by bylo vhodné u adheziva pro spojení dřeva a výztuží na bázi uhlíku uplatňovat, je jeho pružnost. Takovouto vlastností disponují polyuretanová adheziva. Materiál vytvrzují vzdušnou vlhkostí a jsou snadno aplikovatelná. Používají se především pro lepení a spojování sportovních povrchů, dětských hřišť a jiných dynamicky zatěžovaných konstrukcí (DAWEX, 2013). Vhodné jsou jako podklady pod umělé povrchy, absorbují rázy a mají dlouhou životnost.

V současné době se za nejlepší typ považují epoxidová adheziva, jejichž výhodou je vysoká pevnost při všech typech zatížení, vysoký modul pružnosti a dobrá trvanlivost. Jde o dvousložková adheziva – složka I. je epoxidová pryskyřice, složka II. obsahuje tvrdidlo. Obecně je modul pružnosti v jednotkách GPa, pevnost v tlaku v desítkách GPa. Firmy zabývající se výrobou adheziv, uvedly na trh lepidla, přímo určená pro lepení systému zesilování.

4.2.1 Polyuretanová adheziva

Polyuretan má svou historii z doby před 2. světovou válkou. Vynálezcem polyuretanu byl profesor Dr. Otto BAYER. Skutečný rozmach přichází s použitím nového typu polyolů (na bázi polyetherů) v roce 1957.

Polyuretan (PUR) patří do skupiny syntetických polymerů. Polymery jsou látky, v jejichž velké molekule (makromolekule) se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka.

Základem syntézy polyuretanových adheziv je reakce izokyanátů (látky obsahující chemicky reaktivní skupiny – NCO), polyolů (polyestery, polyethery), aminů a vody (látky obsahující hydroxylové skupiny a aminové skupiny – OH, -NH₂).

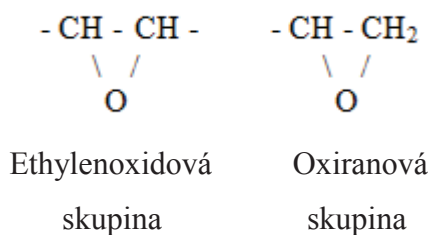
Volbou vhodné kombinace těchto látek, které vstupují do reakce, lze získat polyuretany lišící se svými vlastnostmi – od velmi elastických (pružných) pěn až po „silně zesíťované“ tvrdé pěny. Rozhodujícím faktorem pro typ pěny je počet reaktivních skupin v molekule každé látky a molekulová hmotnost. Reakce, při níž polyuretan vzniká, je exotermní (tzn., vzniká při ní teplo). Proces „vypěňování“ začíná vývinem nadouvacího plynu. Tímto plynem může být buď CO₂ (uvolněný chemickou reakcí izokyanátu s vodou) nebo inertní látka (např. 1, 1, 1, 2 - tetrafluorethan). Příprava pěny je složitý chemický a fyzikální proces ovlivňovaný nejen vlastnostmi vstupních surovin, ale i teplotními a tlakovými účinky, smykovými vlivy tekoucího materiálu, záměrně přidávanými aditivami a v neposlední řadě i nečistotami. Dalším velmi důležitým faktorem pro výslednou kvalitu pěny je zároveň důkladná homogenizace (promíchání) reakční směsi.

Z polyesteru nebo polyetheru a přebytku diisokyanátu se připravuje předpolymer, a tato reakční směs je v aplikačních dózách ve formě aerosolu, kde se jako hnací plyn obvykle používá směs isobutanu s propanem (může působit také jako nadouvadlo). Výrobek je z tohoto důvodu hodnocen jako extrémně hořlavý (neobsahuje CFC – halogenované uhlovodíky poškozující ozónovou vrstvu země). Jako izokyanátová složka se pro syntézu polyuretanových adheziv používá téměř výhradně 4, 4 - difenylmethandiisokyanát (MDI) – např. ICEMA R 145 Professional.

4.2.2 Epoxidová adheziva

Vývoj epoxidových adheziv začal ve Velké Británii po roce 1950. Jedná se o rozsáhlou skupinu adheziv, která se v různých modifikacích nejčastěji používá pro lepení kovových materiálů. Za epoxidovou se považuje taková pryskyřice, která

v nevytvrzeném stavu obsahuje ve své molekule dvě a více skupin na bázi epoxidu (Obr. 8).



Obr. 8 Epoxidové skupiny (VÍDEŇSKÝ, 2012)

V případě, že je v molekule látky pouze jedna taková skupina, jedná se o reaktivní ředidlo nebo změkčovadlo.

Dnes se vyrábí velké množství různých druhů epoxidových pryskyřic. Každý druh může mít podle délky řetězce molekul řadu typů, lišících se od sebe viskózními vlastnostmi, a to od nízko viskózních až po tuhé látky. Dodávají se jako jednosložkové nebo dvousložkové systémy. Epoxidová adheziva určená pro práci ve vyšších teplotách vyžadují obvykle vyšší vytvrzovací teploty a jsou křehčí než adheziva pro nižší teploty.

Podle účelu použití jsou to práškové hmoty vylisované do tyčinek, viskózní kapaliny nebo plasty. Obdobně jsou i tvrdidla kapalná, prášková nebo plastová. Modifikací epoxidových pryskyřic lze získat adheziva používaná ve všech odvětvích průmyslu. Dle složení jsou jejich možnosti použití ve velkém teplotním rozmezí, a to od - 220 do + 260 °C. Technologickou výhodou při zpracování je to, že není potřeba k vytvrzení vyvíjet přetlak lepených dílů a jejich zajištění při vytvrzování. Doporučená hodnota přetlaku je 0,3 MPa, což vede k dokonalejšímu slícování jednotlivých lepených částí (VÍDEŇSKÝ, 2012).

Z celé řady epoxidových adheziv je přímo výrobci doporučováno na lepení výztuží na bázi uhlíku, například lepidlo Sikadur - 330 firmy Sika CZ, s.r.o.

Epoxidová lepidla vykazují velmi dobrou adhezi k celé řadě materiálů a jejich kohezní pevnost často převyšuje pevnosti lepených materiálů, což lze předjímat jako vlastnost vhodnou pro používání různých druhů výztuží na bázi jiného než dřevěného materiál. V dřevařském průmyslu pro vytváření konstrukčních materiálů a spojů mezi dřevěnými nosníky, např. nekonečného vlisu, se ovšem používají spíše fenol-formaldehydová a resorcin-formaldehydová adheziva (MINSTER, HRISTOVÁ, 2006).

4.3 Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken

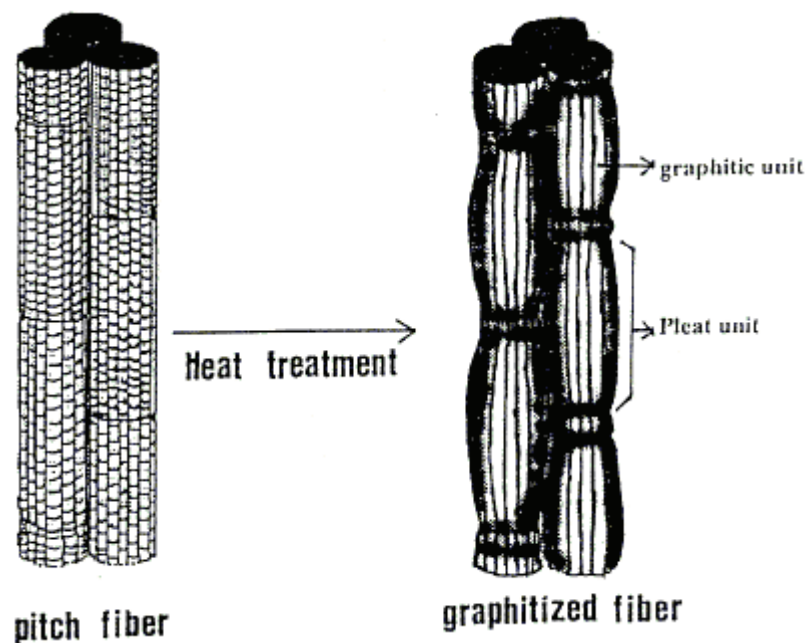
Obecně je kompozitní materiál nebo zkráceně kompozit, materiál ze dvou, nebo více substancí s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí. Obvykle jedna ze součástí dodává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo. Kompozitní výrobky se používají mnoha různými způsoby, často v případech podobně jako masivní dřevo. Kompozitní výrobky ze dřeva mohou být upřednostněny před masivním dřevem. V některých případech díky určitým nepoměrným výhodám, které tyto materiály přináší (VÍDEŇSKÝ, 2012).

4.3.1 Uhlíková vlákna

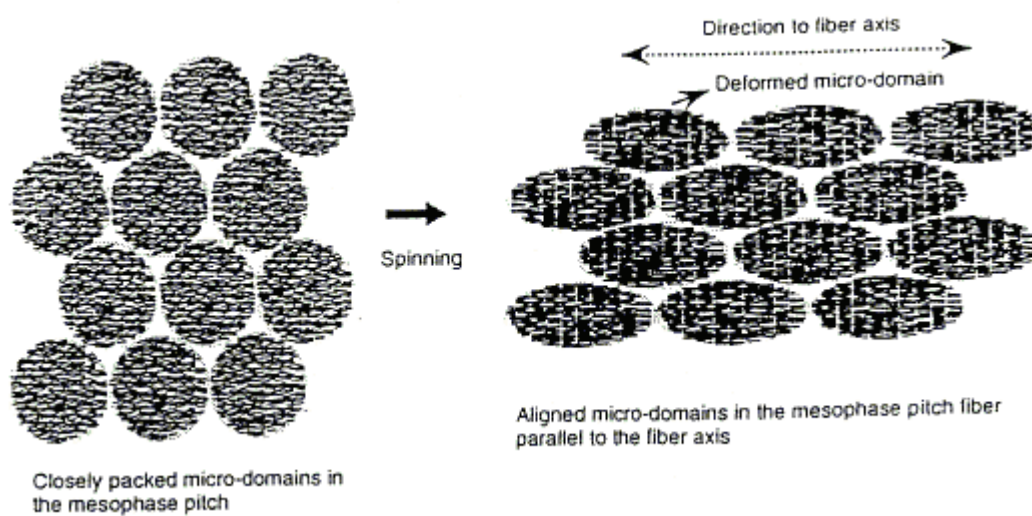
Uhlíková vlákna patří mezi jedny z nejdůležitějších vyztužovacích materiálů pro výrobu kompozitů v polymerní matrici. Velké uplatnění mají v špičkových technických kompozitech. Jsou to vlákna anorganická, vyráběné pyrolýzou organických výchozích materiálů jako jsou vlákna z regenerované celulózy, bitumenové anebo polyakrylonitrilové (PAN) vlákna v inertní atmosféře (MELNICK, 2000). Podíl čistého uhlíku ve vláknech závisí na teplotě pyrolýzy, která se pohybuje v rozmezí 93 - 99 %. Podle způsobu výroby lze uhlíková vlákna rozdělit (GRNIAK, 2003; MOCHIDAA, et al., 2000) na:

- částečně karbonizované při teplotě 400 °C s obsahem uhlíku cca 90 %;
- karbonizované při teplotách 900 až 1 000 °C s obsahem uhlíku 90 až 95 %;
- grafitové, kde grafitizace probíhá v rozmezí teplot 2 800 až 3 000 °C a s obsahem uhlíku ve vláknech až 98 %.

Uhlíková vlákna jsou tvořena grafitovými krystaly, které se na hranách navzájem dotýkají (Obr. 9a). Velikost krystalů se pohybuje od 2 do 10 nm. Krystaly jsou tvořené grafitovými vrstvami (obr. 9b), které svou orientací vůči ose vlákna ovlivňují vlastnosti vlákna (HAVRILA, et al., 1998; MOCHIDAA, et al., 2000; ŠTĚPÁNEK, 2000).



Obr. 9a Struktura uhlíkového vlákna - grafitové krystaly (MOCHIDAA, et al., 2000)



Obr. 9b Grafitové vrstvy a jejich vazby v příčném a podélném směru (MOCHIDAA, et al., 2000)

Uhlíková vlákna jsou silně anizotropní a mají fibrilární strukturu. Youngův modul pružnosti v rovině grafitových vrstev dosahuje hodnot cca 910 GPa a ve směru kolmo k základním rovinám je menší, cca 30 GPa (AGARWAL, BROUTMAN, 1987).

Typické hodnoty vlastností uhlíkových vláken dle (SIKA s.r.o., 2010) jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2), přičemž je nutné uvést, že dané hodnoty jsou

charakteristické pro skupinu vláken, ne pro samostatné vlákno ani pro kompozity vyrobené z vláken (MACHEK, SODOMKA, 2008).

Tab. 2 Typické hodnoty vlastností uhlíkových vláken (SIKA s.r.o., 2010)

	Pevnost v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti E_m [MPa] $\cdot 10^3$	Relativní prodloužení ε [%]	Specifická hmotnost
Carbon high strength	4 300 - 4 900	230 - 240	1,9 - 2,1	1,8
Carbon high modulus	2 740 - 5 490	294 - 329	0,7 - 1,9	1,78 - 1,81
Carbon ultra high modulus	2 600 - 4 020	540 - 640	0,4 - 0,8	1,91 - 2,12

Manipulace s jednotlivými vlákny je v běžné praxi zcela nemyslitelná. Aby bylo možné využívat všech výhod vláken s vysokou pevností, bývají uspořádána do svazků, rohoží a volně tkaných či spletených forem. Nejčastější aplikací jsou tzv. vícefázové kompozity, kdy např. jedna fáze netkaného vlákna tvoří nosnou část kompozitu a druhá fáze, kterou lze nazvat pojivem nebo matricí, tvoří stabilizační část. Manipulace s takovými polotovary je mnohem praktičtější. Výrobkem vhodným pro praktické použití potom mohou být např. vyztužující rohože, tkaniny, lamely anebo prostorové kompozity. V této práci je uvažováno pouze s tkaninou na bázi uhlíku, a to typem SikaWrap 300C/60 (SIKA s.r.o., 2010; LOUD, 1996).

4.3.2 Uhlíkové tkaniny

Základním složením všech vyztužujících forem na bázi uhlíku jsou pásy uhlíkových vláken ve formě rovingu. Termínem "roving" se označují nekonečná vlákna, jejichž společným znakem je nezkroucený pramenec tvořený individuálními vlákny, který je navinutý na cívku (Obr. 10), (VÍDEŇSKÝ, 2012).



Obr. 10 Pásek vláken ve formě rovingu (PRINCE ENGINEERING, 2011)

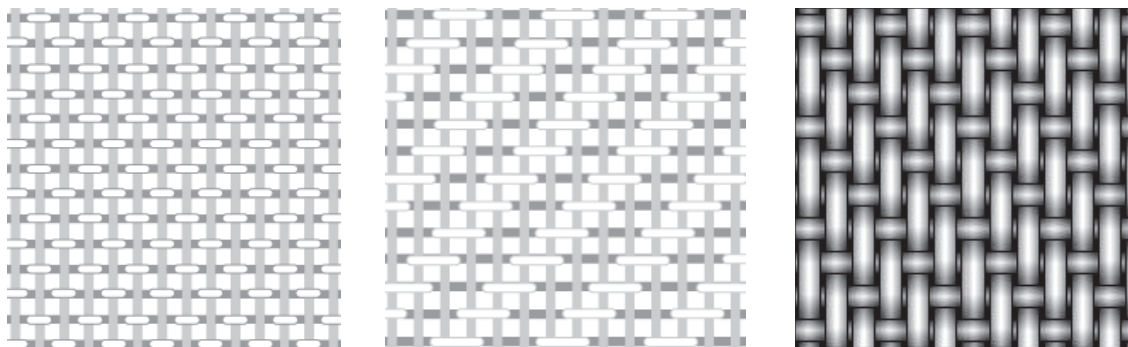
Tato forma vláken tvoří základ většiny dalších výrobků a samostatně je prakticky nevhodná a nepoužitelná. Pro speciální účely se vyrábějí vlákna ve formě rovingu, který může být široký i několik centimetrů (VÍDEŇSKÝ, 2012).

Vyztužující rohož

Vyztužující rohož je netkaná výztuž, která se vyrábí z nasekaných rovingů se slabým naimpregnováním pryskyřicí nebo termoplastem a tepelným slisováním do ploché kontinuální rohože. Obsah pojiva se pohybuje v rozmezí 5 až 30 % objemu, a to dle použití. Vyrábí se v různých plošných hmotnostech. Jelikož jsou vlákna neuspořádaná, je maximální dosah v této formě výztuhy prostorově limitovaný, což vede k nižším tuhostem a pevnostem. Výrobek má však v makroskopickém měřítku ve své rovině izotropní vlastnosti (VÍDEŇSKÝ, 2012).

Tkanina

Podobným způsobem, jako běžné textilie, je z rovingů vyráběna tkaná výztuž. Výrobky mají různou hodnotu plošné hmotnosti a jsou tkány různými způsoby vazeb (Obr. 11) s běžným značením osnovy tkaniny černou barvou a útku bíle s obrysem. Výhodou ve srovnání s netkanou výztuží je větší obsah vláken a tudíž vyšší tuhost a pevnost výsledného kompozitu. Nevýhodou může být jev, že vlákna vlivem tkaní nejsou zcela přímá (VÍDEŇSKÝ, 2012).



Plátno 1/1

Kepr 1/2

Atlas 1/4

Obr. 11. Běžné způsoby zpracování vláken do tkanin (ELEARNING TUL, 2013).

Podle toho, jak je tkanina utkána, tak se chová při praktickém použití. Výhodou použití tkanin je jejich tvarová variabilita. Snadná aplikace je možná např. u oblých povrchů a u vrstvení tkanin, kde je možné vzájemně měnit úhel vláken v jednotlivých vrstvách (VÍDEŇSKÝ, 2012).

5 METODIKA

5.1 Experimentální měření

Celkem bylo zkoušeno 50 dřevěných nosníků rozdělených do pěti skupin. K experimentu byly stanoveny tyto skupiny nosníků:

- nevyztužené dřevěné nosníky
- vyztužené dřevěné nosníky tkaninou SikaWrap 300C/60 s přilepením pomocí polyuretanového (PU) adheziva
- vyztužené dřevěné nosníky předepjatou tkaninou SikaWrap 300C/60 s následným přilepením pomocí polyuretanového (PU) adheziva
- vyztužené dřevěné nosníky tkaninou SikaWrap 300C/60 s přilepením pomocí epoxidového (EP) adheziva
- vyztužené dřevěné nosníky předepjatou tkaninou SikaWrap 300C/60 s následným přilepením pomocí polyuretanového (EP) adheziva

Všechny nosníky byly podrobeny laboratorním destruktivním zkouškám, na základě kterých bylo možno stanovit některé mechanické vlastnosti.

5.1.1 Stanovení některých mechanických vlastností dle ČSN EN 408

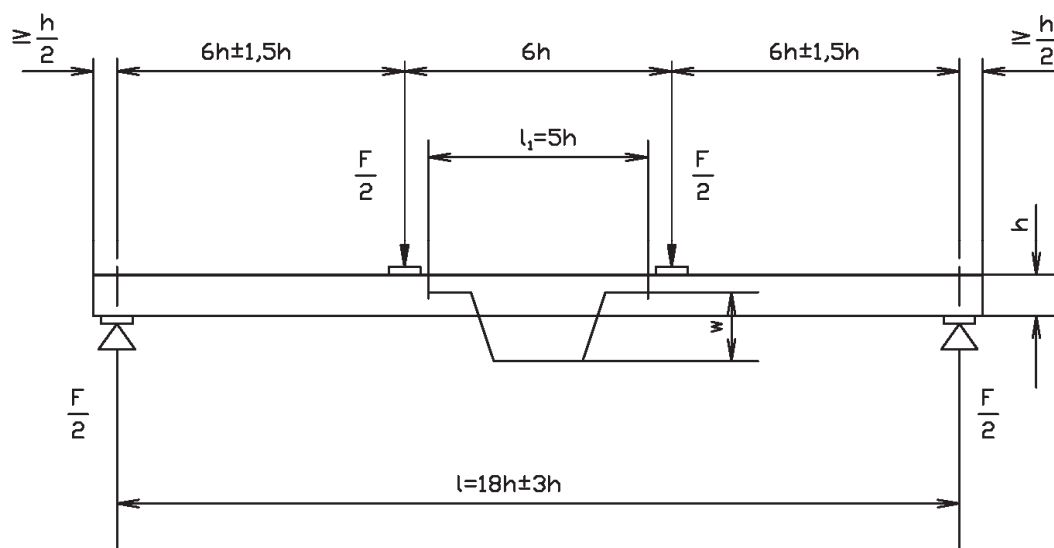
Při zatížení tělesa vzniká v jeho horní části napětí v tlaku a ve spodní části v tahu. Nedeformovatelná část v tělese bez normálového napětí se označuje jako neutrální osa. Mezi tahovým a tlakovým napětím je smykové napětí. Vzhledem k tomu, že tlaková pevnost dřeva podél vláken je mnohem menší než tahová pevnost, začíná porušení tělesa při ohybu v tlakové zóně vybočováním vláken, což je málokdy pozorovatelné pouhým okem. Konečné porušení tělesa probíhá v tahové zóně, kdy po překročení meze pevnosti dojde nejdříve k odštěpení krajních vláken a potom k úplnému zlomení tělesa. Dřevo křehké, málo pevné má zlom téměř hladký. Houževnaté, pevné dřevo má zlom vláknitý nebo třískovitý. Mez pevnosti ve statickém ohybu (napříč vláken) je průměrně 100 MPa. Variační koeficient bývá 16% (ČSN 49 0116; ČSN EN 408).

Pevnost dřeva charakterizující odpor (odolnost) dřeva proti jeho trvalému porušení lze považovat za základní veličinu. Kvantitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa - napětím na mezi pevnost σ_p . S ohledem na nemožnost vypočítat teoretickou pevnost dřeva pro žádný způsob mechanického namáhání stanovuje se pevnost dřeva jako skutečná pevnost dřeva. Údaje o pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde se sleduje skutečné napětí

v okamžiku porušení tělesa. Hodnoty pevností dřeva nejsou ovšem absolutními konstantami dřeva, ale jde o veličiny závislé na metodice zkoušení. Pro vzájemnou porovnatelnost získávaných hodnot pevností dřeva byla přijata dohoda o zkušebních postupech, která definuje podmínky, při kterých se pevnost zjišťuje. Základní zásady zkoušení pevnosti dřeva spočívají ve stanovení velikosti tělesa, postupu zkoušky a výpočtu výsledků.

Hodnoty ohybové pevnosti dřeva leží mezi hodnotami tahové a tlakové pevnosti dřeva ve směru vláken. Mez úměrnosti při statickém ohybu je průměrně 70% meze pevnosti. Pevnost v ohybu závisí mimo jiné i na rozměrech zatěžovaného tělesa. Podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa (štíhlostní poměr) musí odpovídat, a to dle stanovených postupů v ČSN EN 408. U smrkového dřeva se mez pevnosti v ohybu při vlhkosti 12 % pohybuje na úrovni 80 MPa (POŽGAJ, et al., 1993). Vzhledem k poměrně vysoké ohybové pevnosti bylo použito na nosníky namáhané ohybem právě smrkové dřevo, při vlhkosti 12 % (ČSN EN 380).

Ohybová zkouška byla provedena na trhacím zařízení UTS 50 TESTSYSTEM GMBH & CO, které se nachází v laboratoři na Fakultě lesnické a dřevařské ČZU. Stroj se skládá ze stabilního podporového přípravku a zatěžovacího trnu, pohybujícího se ve vertikální rovině. Zkušební těleso se zatěžuje na ohyb symetricky dvěma břemeny s rozpětím $l = 18h \pm 3h$. Deformace se měří ve střední části měřeného úseku s délkou $l_1 = 5h$. Další definované rozměry s rozmístěnými tlakovými body jsou patrný na schématu (Obr. 12).



Obr. 12 Uspořádání zkoušky pro čtyřbodový ohyb dle ČSN EN 408

Modul pružnosti E_d , pro nevyztužené dřevěné nosníky lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$E_d = \frac{a.l_1^2.(F_2 - F_1)}{16.I.(w_2 - w_1)} \quad [MPa] \quad (5.1.)$$

kde: $F_1 - F_2$ je přírůstek síly v oblasti lineární deformační křivky;

$w_1 - w_2$ je odpovídající přírůstek průhybu;

I je moment setrvačnosti průřezu tělesa;

a je vzdálenost zatěžovacího břemene od bližší podpory;

l_1 je délka snímače pro zjišťování modulu pružnosti.

Vzhledem k tomu, že zkoumaný nosník je složený z více druhů materiálů s různými moduly pružnosti, nemůžeme s jistotou určit polohu neutrální osy zkoumaného kompozitu. Můžeme uvažovat pouze s fiktivním modulem pružnosti, který se vypočítá podle vztahu:

$$E_k = \frac{a.l_1^2.(F_2 - F_1)}{16.I_{yk}.(w_2 - w_1)} \quad [MPa] \quad (5.1.)$$

kde: I_{yk} je fiktivní moment setrvačnosti vypočítaný dle vztahu:

$$I_{yk} = I_{y1} + n.I_{y2} \quad [mm^4] \quad (5.2.)$$

kde: n je poměr mezi moduly pružnosti za předpokladu, že $E_2 > E_1$:

$$n = \frac{E_2}{E_1} \quad [-] \quad (5.3.)$$

Normálové napětí σ_d v průřezu pro nevyztužené dřevěné nosníky lze stanovit dle vztahu:

$$\sigma_d = \frac{M}{I}.z \quad [MPa] \quad (5.4.)$$

kde: M je ohybový moment v Nmm;

z je vzdálenost těžiště od nejvzdálenějšího namáhaného vlákna

Pokud uvažujeme obdélníkový průřez ($b \times h$), pak modul průřezu tělesa je:

$$W = \frac{I}{z} = \frac{\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3}{\frac{h}{2}} = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \quad [MPa] \quad (5.5.)$$

kde: b je šířka tělesa v mm;

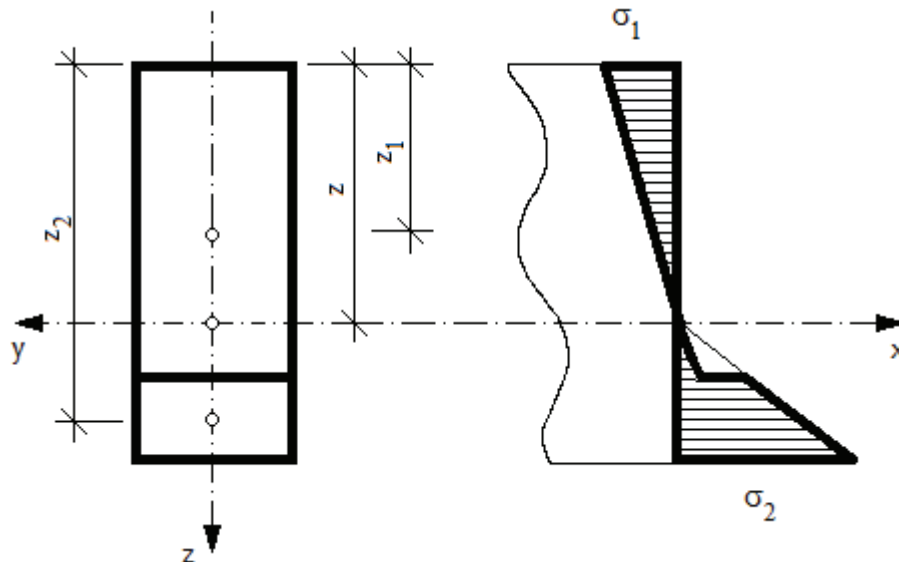
h je výška tělesa v mm.

Modifikovaný vztah pro výpočet normálového napětí v ohybu je:

$$\sigma_d = \frac{F_u \cdot I_0}{b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (5.6.)$$

kde: F_u je síla na mezi úměrnosti deformační křivky v N.

V případě kompozitu se napětí v průřezu složeného tělesa stanoví dle schématu (Obr. 13) a vztahů:



Obr. 13 Schéma pro výpočet normálových napětí složeného průřezu

$$\sigma_{k1} = \frac{M}{I_{yk}} \cdot z \quad [MPa] \quad (5.7.)$$

$$\sigma_{k2} = n \cdot \frac{M}{I_{yk}} \cdot z \quad [MPa]$$

(5.8.)

kde: z je souřadnice polohy fiktivní neutrální osy stanovená dle:

$$z = \frac{A_1 \cdot z_1 + n \cdot A_2 \cdot z_2}{A_1 + n \cdot A_2} \quad [mm] \quad (5.9.)$$

5.1.2 Návrh zkušebních těles

Vybranou dřevinou pro výrobu nosníků byl Smrk ztepilý (*Picea abies*). Smrkové dřevo bylo zvoleno především kvůli častému používání pro dřevěné nosníky v praxi. Pro testování přímých prostých nosníků o přesných hoblovaných rozměrech 30 x 66 x 1 200 mm a počtu 10 kusů v každé skupině, je zapotřebí smrkového řeziva zařazeného dle požadavků ČSN 73 2824-1 do třídy S10, určené pro výrobu konstrukčních dílců. Řezivo bylo získáno od společnosti Lesy České republiky s. p., pobočka Lázně Kynžvart. Při výběru dřeva byl brán zřetel především na kvalitu dodávaného řeziva, aby bylo zamezeno výskytu nežádoucích vad, které by mohli ovlivnit výsledky zkoušek, dle ČSN EN 1611-1.

Dle normy ČSN EN 408 se stanovily rozměry nosníků, které jsou odvozeny od rozměrů zkušebního stroje s maximálním rozpětím přípravků 400 mm:

$$h = \frac{l_p}{6} = \frac{400}{6} = 66,67 \text{ mm} \quad (5.10.)$$

kde: h je výška nosníku v mm;
 l_p je rozpětí přípravků v mm;

Délka nosníku se tedy stanoví:

$$l_t = 18h \pm 3h + 2.(\leq \frac{h}{2}) \quad (5.11.)$$

kde: l_t je délka celého nosníku v mm;
 $18h \pm 3h$ je vzdálenost podpěr v mm;
 $2.(\leq \frac{h}{2})$ jsou přesahy tělesa od podpěr v mm;

Norma ČSN EN 408 také upřesňuje, že vzdálenost podpěr od konců by neměla být menší než 150 mm.

5.1.3 Stanovení hustoty dřeva zkušebních těles

Hustota celého průřezu zkušebního tělesa byla zjišťována na vzorcích odebraných ze zkušebního tělesa dle ČSN 49 0108 a ČSN EN 13183-1 váhovou (gravimetrickou) metodou. Tyto vzorky byly odebrány z celého průřezu. Vzorky neobsahovaly žádné vady dřeva (ČSN EN 408, 2012). Obecně je hustota vyjadřována jako poměr mezi hmotností a objemem.

Podstatou váhové metody je zjištění hmotnosti zkušební tělesa vážením a jeho objemu měřením rozměrů. Výpočtem se pak zjistí hmotnost jednotkového objemu dřeva.

Norma ČSN 49 0108 požaduje zkušební tělesa ve tvaru pravoúhlého hranolu se čtvercovou základnou 20 x 20 mm a délkou hranolu podél vláken 25 ± 5 mm. Zkušební těleso musí obsahovat minimálně pět letokruhů, jinak se musí zvětšit jeho rozměry. Minimální počet zkušebních těles je 16 ks. Hmotnost zkušebních těles se zjistí s přesností na 0,01 g. Rozměry základny a délka se změří s přesností na 0,1 mm ve směru osy symetrie zkušebních těles.

Hustota ρ_w každého zkoušeného tělesa při dané vlhkosti W v čase zkoušky se vypočítá v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ dle vztahu:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (5.12.)$$

kde m_w je hmotnost zkušební tělesa v kg (g) při vlhkosti W ;

a_w, b_w, l_w jsou rozměry zkušební tělesa v m (cm) při vlhkosti W ;

V_w je objem zkušební tělesa v m^3 (cm^3) při vlhkosti W .

Vypočítaný výsledek se zaokrouhlí na $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($0,005 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Metoda zjišťuje délkové rozměry nebo objem při vlhkosti stejné anebo vyšší, než je mez hygroskopicity buněčných stěn, při normalizované vlhkosti. Účelem je zjištění změn těchto rozměrů v poměru k rozměrům při vlhkosti rovné anebo vyšší než mez hygroskopicity buněčných stěn podle ČSN 49 0128. Úhel sklonu letokruhů k dvěma protilehlým stranám průřezu tělesa nesmí být větší než 10° . Pro zjednodušení při výrobě zkušebních těles pro tuto zkoušku byla použita tělesa o rozměrech 20 x 20 x 30 mm.

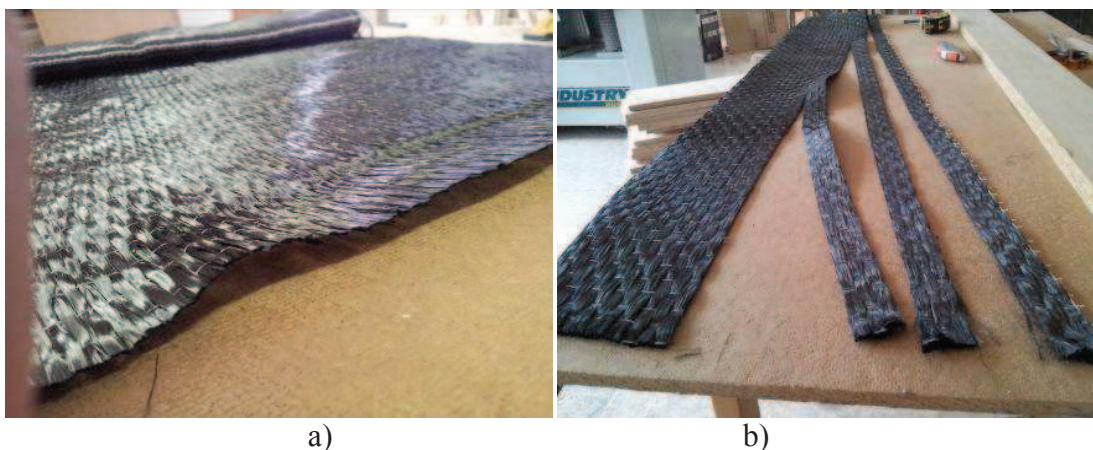
Zkušební tělesa byla kondicionována v předepsaných podmínkách normalizovaného prostředí charakterizovaného teplotou $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $(65 \pm 5)\%$ tak, aby nevznikaly trhliny. Změny rozměrů dvou nebo tří zkušebních těles se prověřovali postupným měřením každých nejméně 6h až do ustálení podmínek. Kondicionování zkušebních těles se ukončilo, pokud rozdíl mezi dvěma následujícími měřeními nebylo větší než 0,02 mm.

5.1.4 Klimatizace zkušebních těles před vyztužením

Dřevěné nosníky byly ponechány jeden měsíc ve vhodném prostředí, tzn. při relativní vzdušné vlhkosti $w_r = 65 \% \pm 5 \%$ a teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro zjištění ustálení vlhkosti dřeva na 12 % (ČSN EN 380), byla provedena dvě vážení po sedmi dnech v rozmezí šesti hodin, dle požadavků normy ČSN EN 408. Následné změření vlhkosti dřeva bylo provedeno dle normy EN 13183-1 hrotovým vlhkoměrem VHT 650 od firmy Elbez (rozsah měření 5 - 50 %, chyba měření 1 % při vlhkosti do 25 %, 3 % při vlhkosti nad 25%). Pro přesné zachování vlhkostních parametrů byly všechny nosníky před dalším zpracováním vloženy do klimatizační komory WEISS 12 SD/15JU, kde bylo udržováno požadované prostředí, a to jak před nalepením vyztužovací tkaniny, tak před realizací deformačních zkoušek.

5.1.5 Příprava a nalepení uhlíkové tkaniny

Použitou uhlíkovou tkaninou je SikaWrap 300C (obr. 14a), kterou dodala švýcarská firma se zastoupením v ČR, SIKA CZ s.r.o (technický list v příloze č. 5). Uhlíková výztuž byla dodána ve formě tkaniny o šířce cca 30 cm a délce 10,5 metru. Šířka tkaniny byla sestavena z jednotlivých souborů vláken, jejich počet byl na $\pm 25 \text{ cm}$ 28 kusů.



Obr. 14 Uhlíková tkanina SikaWrap 300C/60 použitá na vyztužení a) dodávané balení
b) vytvořené jednotlivé pruhy dle rozměrů nosníku

Tkanina byla rozčleněna na jednotlivé pruhy (obr. 14b) dle rozměrů nosníku tak, aby plně pokrývala namáhanou taženou část. Požadavky na stupeň opracování povrchu dřevěných prvků před vlastním lepením doporučuje výrobce vláken stupeň 8 – broušení (dle ČSN 49 0231).

První adhezivum nutné pro nalepení tkaniny Sikadur 330 bylo dodáno firmou SIKA CZ s.r.o. Jedná se o dvousložkové lepidlo, které se skládá z epoxidové pryskyřice a tužidla (EP). Tato dvoukomponentní tixotropní laminační pryskyřice na epoxidové bázi je preferována výrobcem k lepení uhlíkových tkanin SikaWrap pro zesilování nosníků a stavebního dřeva zatíženého v ohybu či ve smyku. Výhody tohoto adheziva jsou vysoká pevnost, dlouhá doba zpracovatelnosti (při 20 °C je to 30 minut) a poměrně nízká viskozita. Mísící poměr komponentu A (epoxidová pryskyřice) a komponentu B (tužidlo) je v hmotnostním poměru 4:1. Lepidlo bylo nanášeno na očištěný hoblovaný povrch nosníku speciálním laminačním válečkem (Obr. 15) pro nanášení doporučeného množství adheziva a vytvoření lepicí spáry zhruba o tl. cca 1 mm.



Obr. 15 Laminovací váleček pro nanášení adheziva

Lepidlo Sikadur 330 má dobu vytvrzení dle technického listu minimum 12 hodin při + 23 °C a maximum při 7 dnech (při dodržení podmínek lepení), (Příloha č. 5). Nosníky proto byly ponechány v klimatizovaném prostředí po tuto dobu a poté byly připraveny na laboratorní testování.

Druhé lepidlo, které bylo k lepení použito je komerční jednosložkové lepidlo na bázi polyuretanu, vzhledem k jeho pružným vlastnostem a častém praktickém použití. Jedná se o lepidlo (PU) na dřevo ICEMA R 145 Professional a je vhodné pro lepení dřevěných konstrukcí, čepových spojů a pro kombinace dřevo – polystyren, kovy, plasty, minerální vlna atd. Toto lepidlo se vyznačuje vysokou pevností, odolností proti vlhkosti a vodě. Doba zpracovatelnosti při 20 °C je cca 90 minut (Příloha č. 5). PU lepidlo bylo na očištěný povrch nosníků nanášeno dřevěnou špachtlí ve vrstvě zhruba 1,5 mm, dle doporučení výrobce.

Po rozetření (EP) či (PU) adheziva byl na povrch nosníků pokladen soubor vláken, který byl napnut v podélném směru, aby došlo k plnému využití vysoké pevnosti vláken při testech v ohybu. Další vrstva adheziva byla nanesena na tkaninu a rozetřena, aby došlo k řádnému prosycení vláken. Poslední krok lepení byl aplikování potravinové PE fólie přes celou plochu nosníku, přiložení laťoviny nebo hranolku a na třech místech zafixování rychlo-svěrkami k sobě pro dostatečné přitlačení tkaniny k lepenému nosníku.

Polyuretanové adhezivum (PU) má úplnou dobu vytvrzení v tahu po několika dnech, lepidlo Sikadur 330 (EP) má tuto dobu 7 dní (při dodržení podmínek lepení), (Příloha č. 5). Vzorky proto byly ponechány v klimatizovaném prostředí 7 dnů a poté byly připraveny na laboratorní testování.

Všechna lepení byla provedena při ± 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu cca 60 %.

5.1.5.1 Předepnutí uhlíkové tkaniny

Pro jednu skupinu nosníků, při použití PU i EP adheziva, bylo použito předepnutí na speciálně vyvinutém zařízení (Obr. 16), které umožňovalo zmíněnou tkaninu SikaWrap 300C/60 předepnout na 100 Kg, což je 980 N. Zařízení umožnilo provést u takto předepjaté tkaniny lepení až pěti nosníků najednou.

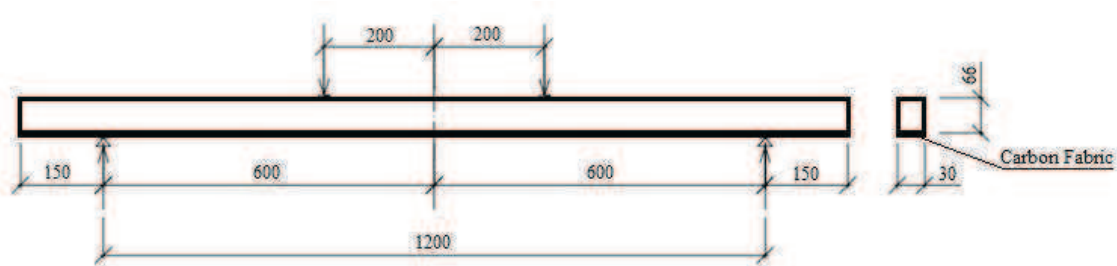


Obr. 16 Předepnutí uhlíkových tkanin na dřevěných nosnících

Tento způsob vyztužování je velice časově i technologicky náročný, avšak dle rozboru výše zmiňované literatury slibuje velice dobré výsledky z hlediska pevnosti a únosnosti.

5.1.6 Zkušební metoda

Zkouška ohybem obvykle probíhá při čtyřbodovém uložení. Čtyřbodový ohyb má výhodu zejména v tom, že mezi břemeny dochází k čistému ohybu bez posouvajících sil. Použité uspořádání (Obr. 17) se používá pro stanovení globálního modulu pružnosti pro dřevěné konstrukce dle ČSN EN 408. Všech 50 nosníků bylo podrobena této zkoušce.



Obr. 17 Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti v ohybu

Pro realizaci zkoušek byl použit stroj typu UTS 50 TESTSYSTEME od výrobce UTS TESTSYSTEME GMBH & CO., Německo, rok výroby 1996 (Obr. 18).



Obr. 18 Trhací stroj UTS 50 TESTSYSTEME

Rychlost zatěžování byla konstantní a posunutí zatěžovací hlavy nesmělo být větší než $0,003h \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, to znamená, že rychlost nesměla být větší než $0,186 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

V tomto případě byla tato rychlost $0,15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Při zatížení se měřil průhyb nosníků pomocí číselníkového úchylkoměru s přesností $0,01 \text{ mm}$.

Každý jednotlivý nosník se postupně ukládal do zkušebního zařízení a se zvyšující zatěžující silou se sledoval údaj o vznikající síle a průhybu. V okamžiku, kdy napětí v některém z krajních vláken dřeva nebo tkaniny dosáhlo své mezí hodnoty, došlo k přelomení nosníku a tím k zastavení a odečtení hodnot síly a průhybu nosníku, právě v tento okamžik.

5.2 Statistické zpracování dat

Statistické zpracování naměřených dat bylo prováděno za účelem vyhodnocení jednotlivých hodnot sledovaných znaků metodami popisné statistiky tak, aby bylo možno s předem stanovenou přesností potvrdit či zamítnout určenou hypotézu o míře vhodnosti uplatnění uhlíkových tkanin na dřevěném nosníku. Jednotlivá data byla mezi sebou porovnávána testem hypotézy o shodě dvou průměrů s tím, že testy byly uvažovány na pěti procentní hladině významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$.

Statistické vyhodnocení souboru pracuje s těmito parametry (HINDLS a kol, 2004)

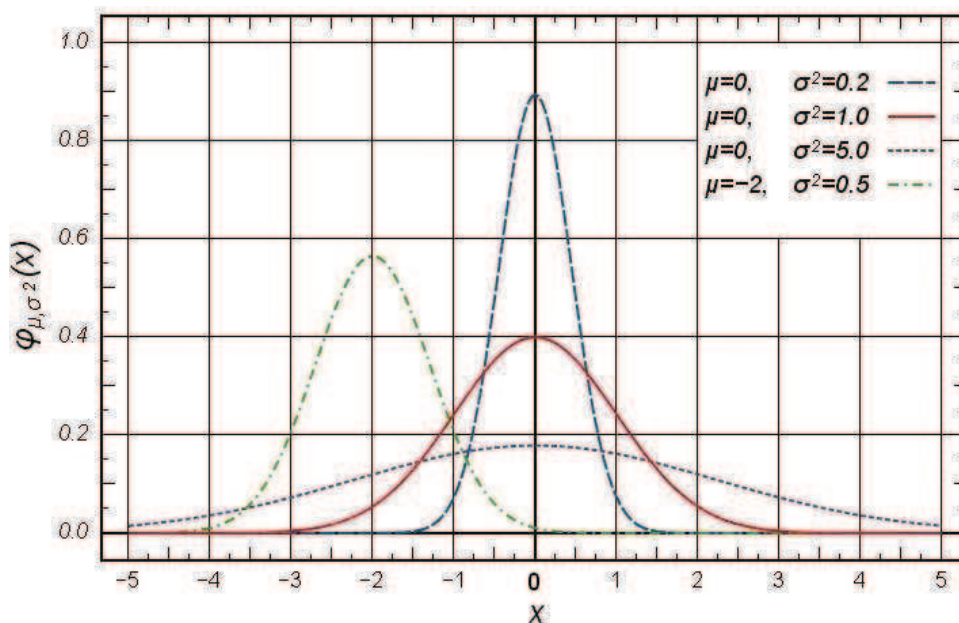
- rozsah souboru (N) – počet všech případů, výsledků měření, hodnot sledované vlastnosti souboru složeného ze statistických jednotek;
- rozsah výběru (n) – udává počet jednotek ve výběru;
- průměr souboru (μ) – hodnota charakterizující polohu souboru, tedy hodnota průměrná;
- rozptyl souboru (s_2) – průměr druhých mocnin odchylek jednotlivých pozorovaných hodnot v souboru od jeho průměru μ ;
- směrodatná odchylka souboru (s) – je druhou odmocninou z hodnoty rozptylu s_2 ;
- největší výběrová hodnota ($x \text{ max}$);
- nejmenší výběrová hodnota ($x \text{ min}$);
- variační koeficient (V) – je relativní mírou rozptýlení hodnot stanovený podílem směrodatné odchylky (s) a průměru (μ).

Před zpracováním samotných analýz bylo důležité provést posouzení naměřených hodnot z hlediska normálního rozdělení četnosti a odhalení extrémů. Pro posouzení naměřených hodnot fyzikálních a mechanických vlastností byly použity statistické metody (ANOVA) a metody mnohonásobného porovnávání dle zvoleného

testu. Následně byla pomocí regresní křivky určena síla vztahu mezi popisovanými veličinami.

5.2.1 Normální rozdělení četnosti

Normální neboli Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti (Obr. 19), je jedno z nejdůležitějších rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny. Tímto rozdělením pravděpodobnosti se sice neřídí velké množství veličin, ale jeho význam spočívá v tom, že za určitých podmínek dobře aproximuje řadu jiných pravděpodobnostních rozdělení (spojitých i diskretních). V souvislosti s normálním rozdělením jsou často zmiňovány náhodné chyby, např. chyby měření, způsobené velkým počtem neznámých a vzájemně nezávislých příčin. Proto bývá normální rozdělení také označováno jako zákon chyb. Podle tohoto zákona se také řídí rozdělení některých fyzikálních a technických veličin.



Obr. 19 Gaussovo rozdělení četnosti

5.2.2 Testovací hypotézy

Na základě realizace náhodného výběru rozsahu n lze ověřit určitou hypotézu týkající se náhodné veličiny X . Statistická hypotéza znamená určité tvrzení o parametrech (parametrické testy) pozorované náhodné veličiny pocházející ze základního souboru nebo tvaru rozdělení znaku v souboru (neparametrické testy) na základě pozorované náhodné veličiny. Testování statistických hypotéz je jednoduchý rozhodovací postup, při němž se na základě výsledků získaných náhodným výběrem vysloví buďto nulová hypotéza nebo alternativní hypotéza.

Při testování hypotéz proti sobě stojí dvě hypotézy:

H_0 nulová (testovaná) hypotéza:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (5.13.)$$

H_1 alternativní hypotéza (popírá nulovou hypotézu):

1. dvoustranná alternativní hypotéza:

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (5.14.)$$

2. jednostranná alternativní hypotéza (pravostranná):

$$H_1: \mu_1 > \mu_2 \quad (5.15.)$$

3. jednostranná alternativní hypotéza (levostranná):

$$H_1: \mu_1 < \mu_2 \quad (5.16.)$$

Při testování hypotéz jde o rozhodnutí, které může, ale nemusí být správné (Statistica 8).

5.2.3 Vyloučení extrémních hodnot

Před vlastním statistickým zpracování dat je důležité vyloučení extrémů, které by mohly nepravdivě ovlivnit celkový výsledek měřené veličiny. Je nutné extrémy nějakým způsobem lokalizovat. K tomuto účelu byl využit software Microsoft Excel 2007. Extrémy zobrazuje nejlépe bodový graf s proloženou lineární spojnici trendu. Jakákoliv extrémní hodnota se okamžitě projeví v bodovém grafu jako odlehlá hodnota a může tak být vyřazena z následujícího zpracování. Tato grafická metoda může odhalit extrémní hodnoty, které lze v některých případech opravit, např. pokud se jedná o chybu v zadání měřených hodnot.

5.2.4 Analýza rozptylu - ANOVA

Jako analýza rozptylu (ANOVA) je označován soubor postupů induktivní statistiky užívaných při testování hypotéz o středních hodnotách při různém, často i velmi komplikovaném uspořádání experimentu.

Na analýzu rozptylu s jednoduchým tříděním lze pohlížet jako na zobecnění dvouvýběrového t-testu pro situaci, kdy se testuje shoda středních hodnot ve více než dvou skupinách. Na takovéto úlohy lze použít opakovaně dvouvýběrový t - test pro všechny dvojice výběru, pokud je cílem, aby pravděpodobnost chyby prvního druhu byla rovna zvolené hladině významnosti.

Vlastní postup analýzy rozptylu lze rozdělit do pěti kroků, jimiž jsou (MELOUN, MILITKÝ, 2006):

- odhad parametrů základního modelu ANOVA;
- testování jeho významnosti a konstrukce různých modelů;
- vyjádření složek rozptylů a testování jejich významnosti;
- ověření předpokladu normality a indikace silně vybočujících hodnot;
- interpretace výsledků s ohledem na zadání dat a jejich případné úpravy.

Závislost zkoumaných veličin byla posuzována na základě porovnání zvolené závislé proměnné s nezávislými proměnnými.

5.2.5 Tukeyova metoda mnohonásobného porovnávání

Tukeyova (ANDIL, 2003) metoda mnohonásobného porovnávání je vlastně obdobou t-testu a používá se v případě vyváženého třídění, tedy pokud:

$$n_1 = \dots = n_l = n \quad (5.17.)$$

Z hlediska síly testu a případné robustnosti k porušení předpokladů analýzy rozptylu je u tohoto testu doporučen stejný počet pozorování ještě důrazněji než u analýzy rozptylu. Pro různé počty pozorování n_i a n_j ve srovnávaných skupinách i a j byla vytvořena modifikace tohoto testu, který se v softwarových programech používá pod názvem Tukey HSD (honest significant difference).

Ve všech případech se testuje nulová hypotéza, oproti alternativní hypotéze. Nulová hypotéza tvrdí, že střední hodnoty porovnávaných skupin i a j se neliší. Testové kritérium má tvar:

$$Q = \frac{|\hat{\mu}_i - \hat{\mu}_j|}{S_*} \quad (5.18.)$$

kde: S_* je směrodatná odchylka pro shodné počty pozorování n ve skupinách i a j tvaru:

$$S_* = \sqrt{\frac{S_E}{n(N-I)}} \quad (5.19.)$$

a testované kritérium Q se porovná s tabelovanou kritickou hodnotou:

$$q_{1-\alpha}(I, N - I) \quad (5.20.)$$

která se nazývá studentizované rozpětí (ANDIL, 2005) a je součástí podrobnějších statistických tabulek.

Pokud je hodnota testovaného kritéria Q menší než kritická hodnota, potom nezamítáme nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot obou porovnávaných skupin. Tento test musíme provést pro všechny možné kombinace skupin.

Pro různé počty pozorování n_i a n_j ve srovnávaných skupinách i a j má směrodatná odchylka tvar:

$$S_* = \sqrt{\frac{S_E}{2(N-I)} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (5.21.)$$

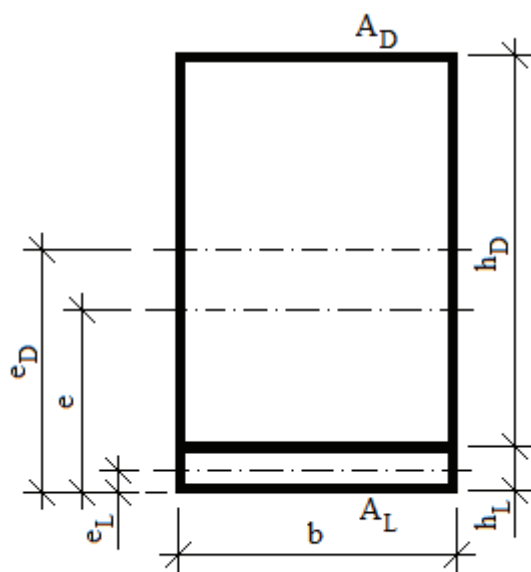
Testové kritérium se opět rovná tabelované kritické hodnotě. Pokud je hodnota testovaného kritéria Q menší než kritická hodnota, pak nezamítáme nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot obou porovnávaných skupin.

Tukeyho test patří k nejužívanějšímu a považuje se také za jeden z nejlepších z hlediska vhodného kompromisu síly testu a možnosti výskytu chyby prvního druhu (BLATNÁ, 1996).

5.3 Teoretický výpočet

5.3.1 Metoda náhradních průřezů

Při dimenzování jednoduchých průřezů zesílených vrstvou tkaniny a adheziva možno s určitými omezeními použít teorii náhradních průřezů (Obr. 20), (REINPRECHT, ŠTEFKO, 2000).



Obr. 20 Schéma výpočtu metody náhradních průřezů (REINPRECHT, ŠTEFKO, 2000)

Náhradní plocha se stanovila dle:

$$A_N = A_T \cdot n \quad [mm^2] \quad (5.22.)$$

kde: A_T je plocha tkaniny;

n je poměr mezi moduly pružnosti za předpokladu, že $E_2 > E_1$, tedy:

$$n = \frac{E_T}{E_D} \quad [-] \quad (5.23.)$$

kde: E_T je modul pružnosti tkaniny;

E_D je modul pružnosti dřeva.

Poloha neutrální osy se vyjádřila jako:

$$e = \frac{A_D \cdot e_D + A_N \cdot e_T}{A_D + A_N} \quad [mm^2] \quad (5.24.)$$

kde: A_D je plocha dřeva;

e_D je vzdálenost těžiště dřevěného průřezu od okraje;

e_T je vzdálenost těžiště tkaniny od okraje.

Vyjádření výsledného momentu setrvačnosti náhradního průřezu můžeme stanovit dle Steinerovy věty takto:

$$I = I_D + n \cdot I_T + A_D \cdot (e_D - e)^2 + A_N \cdot (e - e_T)^2 \quad [mm^4] \quad (5.25.)$$

kde: I_D je moment setrvačnosti dřevěného průřezu;

I_T je moment setrvačnosti tkaniny.

Maximální napětí v dřevěné části průřezu, za předpokladu přímé úměry průběhu napětí je:

$$\sigma_D = \frac{M_{MAX}}{I_D} \cdot e \quad [MPa] \quad (5.26.)$$

kde: M_{MAX} je maximální hodnota ohybového momentu na nosníku.

Napětí v zesíleném nosníku:

$$\sigma_D = n \cdot \frac{M_{MAX}}{I} \cdot e \quad [MPa] \quad (5.27.)$$

Uvedené vztahy mají omezenou platnost. V oblasti malých průřezů (moment setrvačnosti menší než 300 cm⁴) dochází k pružně plastickým deformacím, kdy v dřevěné části průřezu dojde k tečení dřeva a napětí se redistribuují rovnoměrně. Vzhledem k tomu, že v takovýchto průřezích je únosnost tkanin nevyužitá, pozbývá v praxi tento druh vyztužení význam (ŠTEFKO, GRNIAK, 2001).

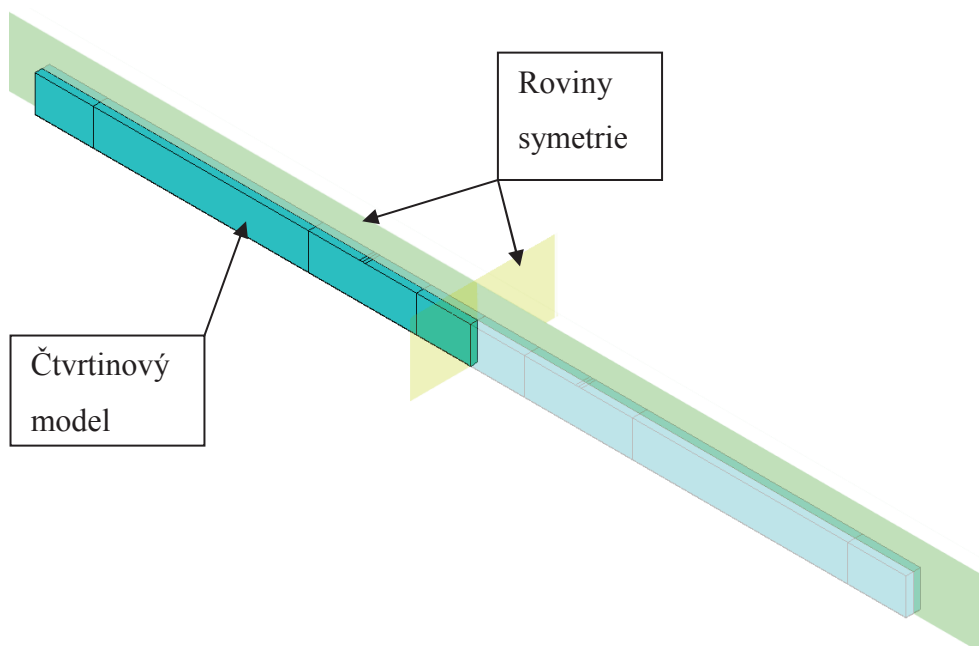
5.4 Modelová analýza

5.4.1 Popis výpočtového modelu vytvořeného pomocí MKP

Výpočtová simulace byla provedena pomocí metody konečných prvků (dále MKP). Model byl vytvořen v prostředí komerčního programu ANSYS verze 14.0. Program ANSYS je softwarový nástroj sloužící pro realistickou simulaci namáhání a porušení dřevěných konstrukcí. Rozměry výpočtového modelu souhlasí s rozměry nosníků pro laboratorní destruktivní metody (Obr. 17) v kapitole 5.1.6 (KUKLÍK, et al., 2006).

5.4.1.1 Model Geometrie

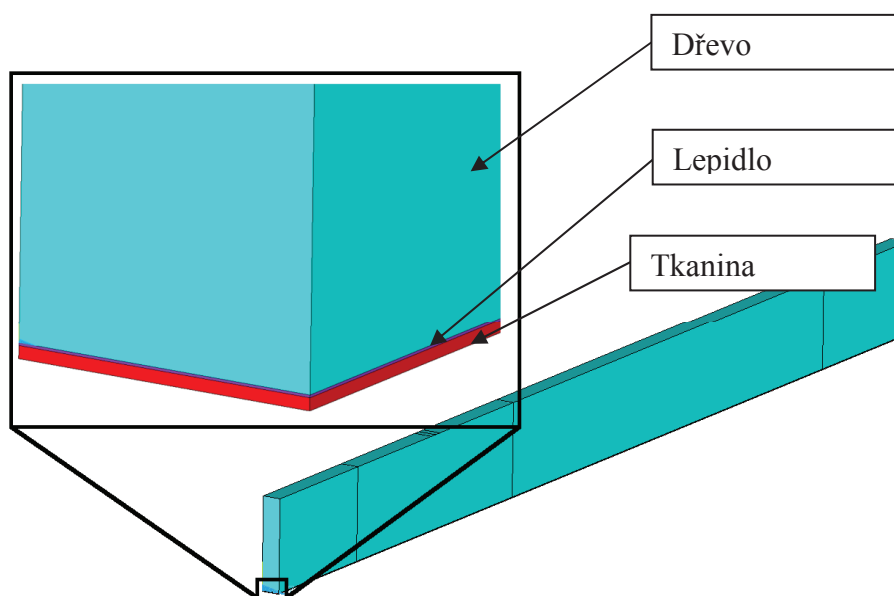
Základní model tvořil dřevěný nosník, na jehož spodní ploše byla nalepena tkanina z uhlíkové tkaniny. Po několika testovacích výpočtech byla dána přednost prostorovému modelu před rovinným. Vzhledem k tomu, že jak geometrie nosníku, tak i zatížení mají 2 roviny symetrie, bylo možno pro výpočtovou simulaci použít pouze čtvrtinový model (Obr. 21) s příslušnými okrajovými podmínkami na rovinách symetrie.



Obr. 21 Čtvrtinový model se zobrazením rovin symetrie

5.4.1.2 Model materiálu

Pro popis dřeva byl použit lineární ortotropní model materiálu. Deformační chování adheziva bylo považováno za směrově nezávislé, byl tedy použit lineární isotropní model materiálu. Tkanina měla výrazně vyšší tuhost ve směru vláken, proto bylo potřeba i zde použít ortotropní model materiálu, který lépe definuje vlastnosti v příslušném směru. Definování polohy s umístěním jednotlivých vrstev ukazuje Obr. 22.

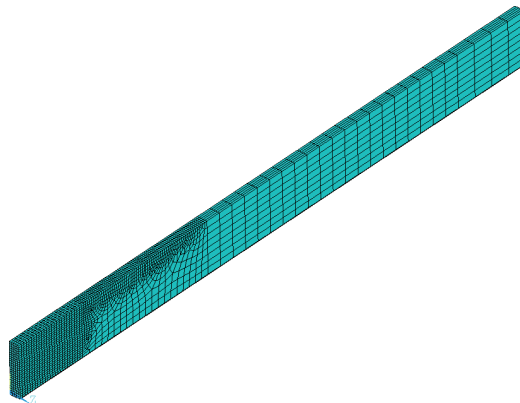


Obr. 22 Zobrazení vrstev navrhovaného modelu

5.4.1.3 Diskretizace modelu

Princip MKP spočívá v rozdělení kontinua na dostatečný počet malých podoblastí (jejichž počet je konečný) a vyřešení neznámých parametrů v uzlových bodech těchto podoblastí. V praxi se toto dělení děje pomocí vytvoření sítě z předdefinovaných nosníků. V tomto případě byl použit strukturální prostorový dvacetiozlový prvek SOLID 186. Tento prvek je v podstatě nástupce prvku SOLID 95, který již není v současných verzích programu ANSYS podporován. Prvek SOLID 186 má kvadratické bázové funkce a mimo jiné umožňuje zahrnout do analýzy i předepjetí. Tento prvek byl použit k vytvoření sítě na objemech odpovídajících nosníku, vrstvě adheziva i tkanině.

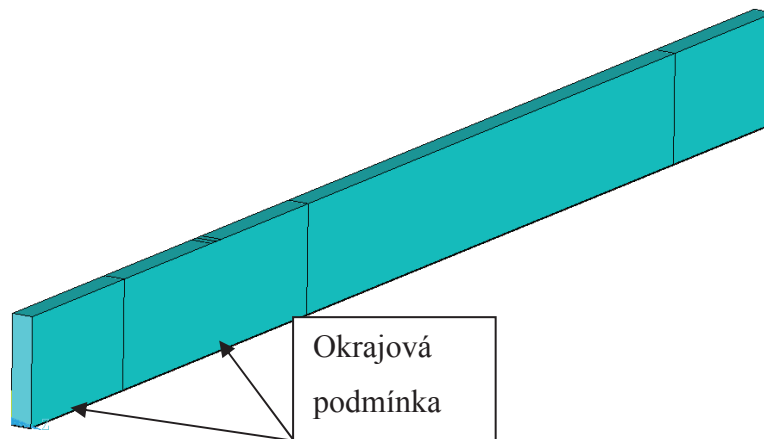
Vygenerovaná síť je zobrazena na obrázku (Obr. 23). V místech, kde dochází k odečítání hodnot napětí byla síť zahuštěna, aby došlo ke snížení diskretizační chyby. Na druhou stranu, s počtem uzlů narůstá výpočtový čas, proto v místech, která jsou nepodstatná z hlediska řešení tohoto problému, byla vytvořena poměrně řídká síť, což je běžnou praxí u stanovování takovýchto modelů.



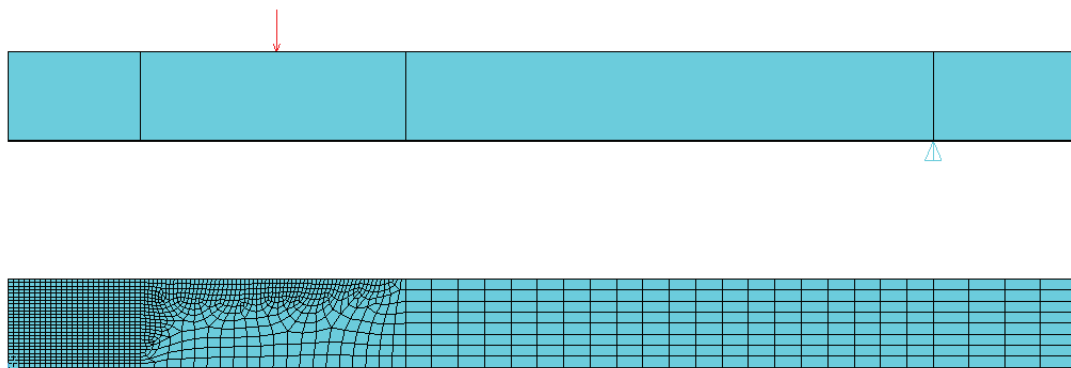
Obr. 23 Zobrazení poloviny nosníku a jeho prostorové sítě

5.4.1.4 Okrajové podmínky modelu

Vzhledem k tomu, že pro výpočtovou simulaci byl použit čtvrtinový model, musela být na roviny řezu předepsána okrajová podmínka symetrie (Obr. 24). Další okrajové podmínky jsou patrné z obrázku (Obr. 25). Podpora byla modelována zamezením posuvů v příslušných směrech a zatěžující síla byla aplikována do příslušné vzdálenosti.



Obr. 24 Předepsaná okrajová podmínka symetrie nosníku

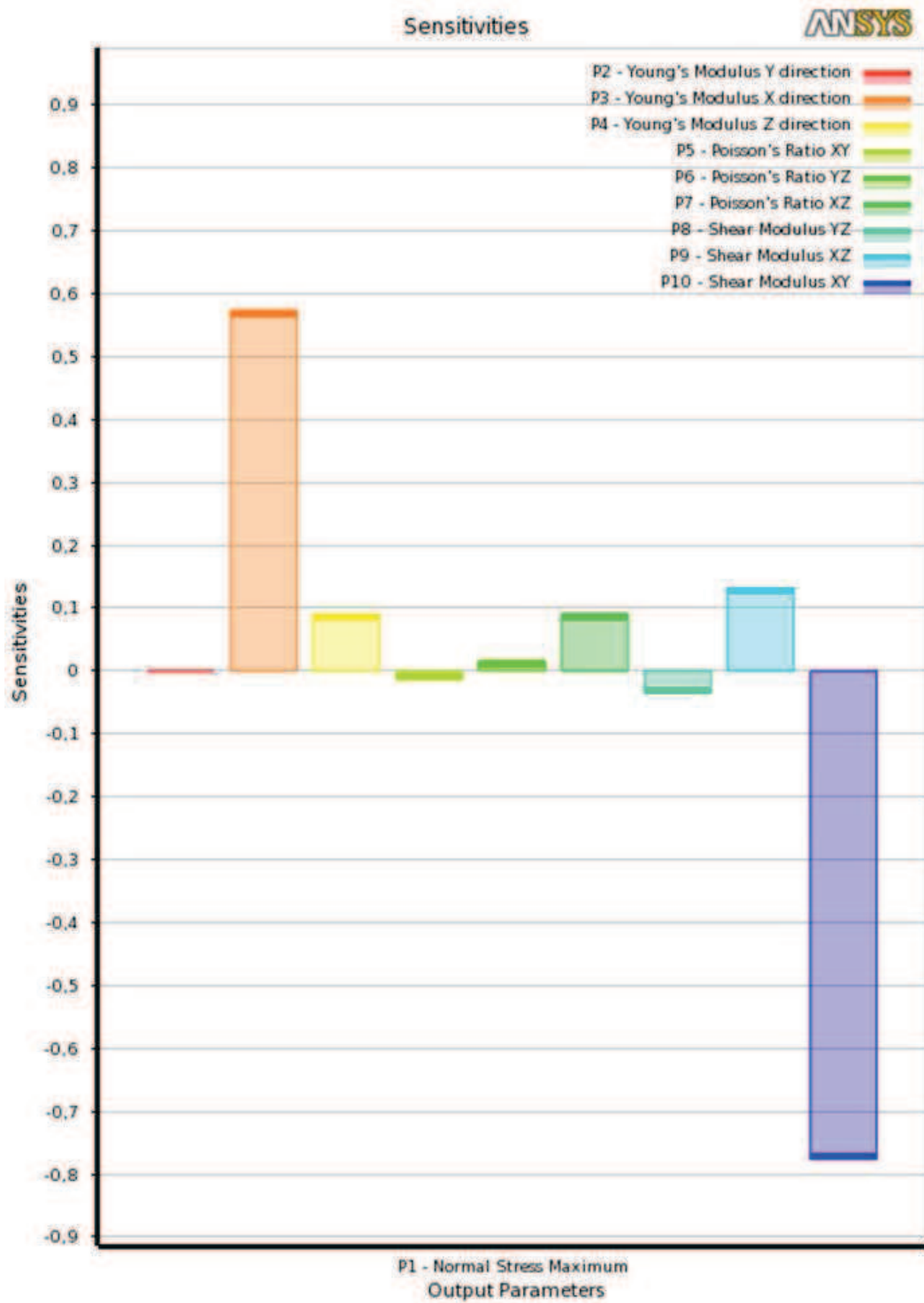


Obr. 25 Okrajové podmínky nosníku s rozložením prostorové sítě

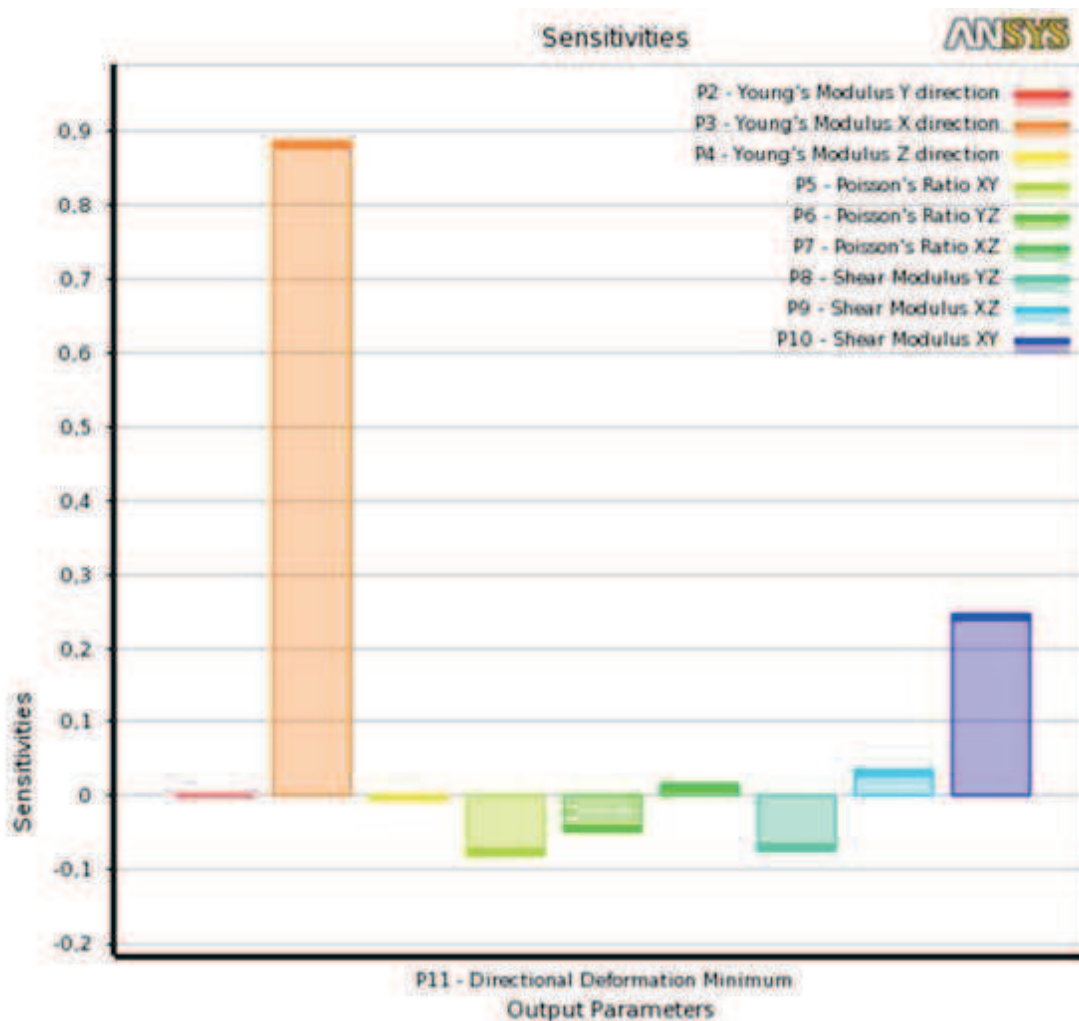
5.4.1.5 Simulace nosníku

Vzhledem k tomu, že se jednalo o inverzní úlohu (získání zatížení při znalosti napětí v tělese), musela být provedena statická analýza několikrát, s postupně se zvyšující zatěžující silou. V okamžiku, kdy napětí v některém z krajních vláken dřeva nebo tkaniny dosáhlo své mezí hodnoty, byla simulace zastavena a odečtena hodnota síly a průhybu nosníku, podobně jako při destruktivních zkouškách v laboratoři.

Analýza citlivosti ukazuje pro přehlednost, jaký vliv mají jednotlivé konstanty materiálového modelu dřeva na napětí (Obr. 26) a průhybu (Obr. 27). Nejvíce ovlivňující parametr je modul pružnosti, případně smykový modul.



Obr. 26 Vliv konstant materiálového modelu na napětí v nosníku



Obr. 27 Vliv konstant materiálového modelu na průhyb nosníku

Na nosníku byl analyzovaný vliv proměnných materiálových veličin na průhyb, ohybové napětí na horním okraji nosníku a na maximální smykové napětí. Teoreticky analyzovaný nosník byl shodný s experimentálně ověřovaným nosníkem. Všechny nosníky byly zkoumané i ve všech pěti skupinách jednotlivě, a to nevyztužených nosníků, vyztužených nosníků uhlíkovou tkaninou s použitím PU adheziva, vyztužených nosníků uhlíkovou tkaninou s použitím EP adheziva a vyztužených nosníků s předepjatou uhlíkovou tkaninou pro oba druhy adhezních přípravků PU i EP, s příslušnými parametry proměnných vlastností.

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

6.1 Vyhodnocení ohybové zkoušky statistickými metodami

Vyhodnocením naměřených údajů z deseti nevyztužených konstrukčních nosníků (nevyztužené), deseti vyztužených nosníků přilepením uhlíkové tkaniny s EP adhezivem (EP), deseti vyztužených nosníků přilepením předepjaté uhlíkové tkaniny s EP adhezivem (EP+), deseti vyztužených nosníků přilepením uhlíkové tkaniny s PU adhezivem (PU) a deseti vyztužených nosníků přilepením předepjaté uhlíkové tkaniny s PU adhezivem (PU+) se získal soubor hodnot, který bylo možné podrobit statistickým porovnáním dat. Na základě jednofaktorové analýzy rozptylu zmiňovaných skupin, bylo možné zjistit vzájemný vztah mezi těmito skupinami navzájem, a to pro zatěžovací sílu F [N] potřebnou k přelomení nosníků, průhyb nosníků w [mm] při porušení, modul pružnosti E_m [MPa] a příslušnou pevnost v ohybu σ_m [MPa].

Následující tabulky Tab. 3 až 7 ukazují naměřené výsledky zjišťovaných veličin (nevyztužené, EP, EP+, PU a PU+) pro jednotlivé nosníky, a to vždy s průměrnou hodnotou, směrodatnou odchylkou a variačním koeficientem. Tabulky jsou rozděleny podle typu nosníků, tj. skupin s konkrétními čísly nosníků a jejich hodnotami hmotnosti a hustoty.

Tab. 3 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro nevyztužené nosníky

č.	typ	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
2	nevyztužené	1 015,43	497,70	6 862,75	28,211	21 313	17,7
15	nevyztužené	1 000,15	471,07	6 452,15	28,493	16 086	16,7
23	nevyztužené	1 020,53	493,50	6 885,10	31,48	14 212	17,8
36	nevyztužené	1 013,37	509,31	5 199,37	26,343	18 082	13,4
43	nevyztužené	960,96	524,00	6 268,31	40,136	11 440	16,2
44	nevyztužené	943,95	475,13	6 701,14	41,028	15 831	17,3
48	nevyztužené	882,73	394,34	4 386,24	25,181	14 382	11,3
53	nevyztužené	971,71	486,11	6 349,50	30,517	9 927	16,4
60	nevyztužené	897,55	510,79	5 979,42	38,731	14 662	15,4
62	nevyztužené	1 010,32	434,39	5 156,57	26,264	13 251	13,3
průměrná hodnota		971,67	479,63	6 024,05	31,64	14 919	15,6
směrodatná odchylka		50,15	39,15	841,24	6,08	3 227	2,2
variační koeficient		5,16 %	8,16 %	13,96 %	19,20 %	21,63 %	13,96 %

Hodnoty zatěžovací síly F [N] z tabulky Tab. 3 pro nevytlužené nosníky se pohybovaly od minima 4 386,24 N po maximum 6 885,10 N a vykazují variační koeficient 13,96 %, což značí poměrně nízký rozptyl hodnot. Naopak u hodnot průhybu w [mm] a modulu pružnosti E_m [MPa] se hodnoty pohybují s variačním koeficientem 19,20 %, resp. 21,63 %, což ukazuje na výrazný rozptyl hodnot, a tudíž velice různorodou kvalitu nosníků. Rozptyl hodnot i variační koeficient pro pevnost v ohybu σ_m [MPa] je shodná jako u maximální zatěžovací síly.

Tab. 4 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vytlužené nosníky uhlíkovou tkaninou s EP adhezivem

č.	typ	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
21	EP	1 046,55	487,43	7 579,80	42,351	14 858	19,6
27	EP	892,66	425,91	7 820,83	48,406	17 393	20,2
28	EP	911,80	397,33	7 133,46	36,232	18 316	18,4
32	EP	1 077,52	481,67	7 526,39	43,725	19 208	19,4
39	EP	946,49	419,13	7 242,55	38,925	16 151	18,7
40	EP	922,08	408,81	5 660,99	28,301	17 915	14,6
45	EP	909,33	420,81	6 839,77	46,658	16 312	17,7
52	EP	911,88	397,72	7 599,24	49,293	16 809	19,6
55	EP	931,92	413,52	6 329,55	31,446	15 777	16,3
59	EP	1 018,90	460,49	9 259,34	43,437	19 569	23,9
průměrná hodnota		956,91	431,28	7 299,19	40,88	17 231	18,8
směrodatná odchylka		65,68	33,22	954,54	7,07	1 527	2,5
variační koeficient		6,86 %	7,70 %	13,08 %	17,30 %	8,86 %	13,08 %

Tabulka Tab. 4 ukazuje hodnoty pro vytlužení nosníků přilepenou uhlíkovou tkaninou. Poměrně kvalitní relativní rozptýlení dat, čili variační koeficient je patrný u zatěžovací síly F [N] a pevnosti v ohybu σ_m [MPa] s hodnotou 13,08 %. Minimální hodnota zatěžovací síly je 5 660,99 N a maximální hodnota zatěžovací síly je 9 259,34 N. Zvýšení těchto hodnot zapříčiňuje přidaná výztuž. Pro průhyb w [mm] je zde patrný variační koeficient 17,30 %, což může být způsobeno rozdílnou kvalitou dřeva nosníků. Velice zajímavé z hlediska kvality zjištěných dat se jeví hodnoty modulu pružnosti E_m [MPa], které mají variační koeficient 8,86 %. To je způsobeno přidanou výztuhou, která má velký vliv na danou veličinu.

Tab. 5 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou s EP adhezivem

č.	typ	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
4	EP+	1 158,17	534,03	10 255,81	40,435	23 899	26,5
6	EP+	984,12	413,69	9 990,40	37,083	20 909	25,8
7	EP+	1 027,23	405,14	9 490,91	46,203	21 574	24,5
9	EP+	1 169,55	537,94	9 453,41	32,028	27 342	24,4
10	EP+	1 100,45	473,54	9 357,83	37,501	21 180	24,2
11	EP+	1 022,79	479,28	8 183,84	44,265	20 366	21,1
14	EP+	1 075,58	484,61	7 999,87	37,937	17 686	20,7
16	EP+	1 029,54	399,42	7 453,28	42,524	17 383	19,2
18	EP+	1 065,60	476,75	8 566,04	47,733	21 412	22,1
41	EP+	1 148,80	490,27	10 496,09	50,481	22 253	27,1
průměrná hodnota		1 078,18	469,47	9 124,75	41,62	21 401	23,6
směrodatná odchylka		64,35	49,26	1 025,36	5,67	2 860	2,6
variační koeficient		5,97 %	10,49 %	11,24 %	13,62 %	13,36 %	11,24 %

Naměřené hodnoty v tabulce Tab. 5 ukazují zkoumané veličiny pro skupinu nosníků vyztužených předepjatou uhlíkovou tkaninou a epoxidovým adhezivem. Zatěžovací síla F [N] se pohybuje od nejnižší hodnoty 7 453,28 N do nejvyšší hodnoty 10 496,09 N s variačním koeficientem 11,24 %. K nárůstu těchto hodnot došlo díky předepjaté uhlíkové tkanině. Taktéž u pevnosti v ohybu σ_m [MPa] je variační koeficient 11,24 %. Zajímavým zjištěním je údaj variačního koeficientu 13,62 % u průhybu w [mm], který je oproti ostatním skupinám nosníků (Tab. 3 a 4) nízký. Je to dáno zkvalitněním přidané výztuhy předepnutím a tím pádem zajištění stabilnějších hodnot pro průhyb. Obdobně je na tom modul pružnosti E_m [MPa] s hodnotou 13,36 % variačního koeficientu.

Tab. 6 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky uhlíkovou tkaninou s PU adhezivem

č.	typ	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
20	PU	1096,9	506,88	8994,697	34,4	20 522	23,2
24	PU	976,76	454,94	6901,389	24,834	17 233	17,8
25	PU	855,48	408,78	7225,126	45,6	13 458	18,7
29	PU	1041,27	494,11	8641,288	61,416	16 917	22,3
31	PU	1034,6	498,42	8365,783	66,247	14 877	21,6
34	PU	980,39	471,23	7958,586	66,869	13 442	20,5
35	PU	1021,6	471,97	7590,783	52,208	11 277	19,6
50	PU	998,92	490,17	7913,889	47,061	18 121	20,4
58	PU	1043,25	483,03	7142,551	42,272	24 841	18,4
64	PU	930,59	429,52	7597,601	50,925	17 721	19,6
průměrná hodnota		997,98	470,91	7 833,17	49,18	16 841	20,2
směrodatná odchylka		67,67	31,51	678,01	13,51	3 915	1,8
variační koeficient		6,78 %	6,69 %	8,66 %	27,47 %	23,25 %	8,66 %

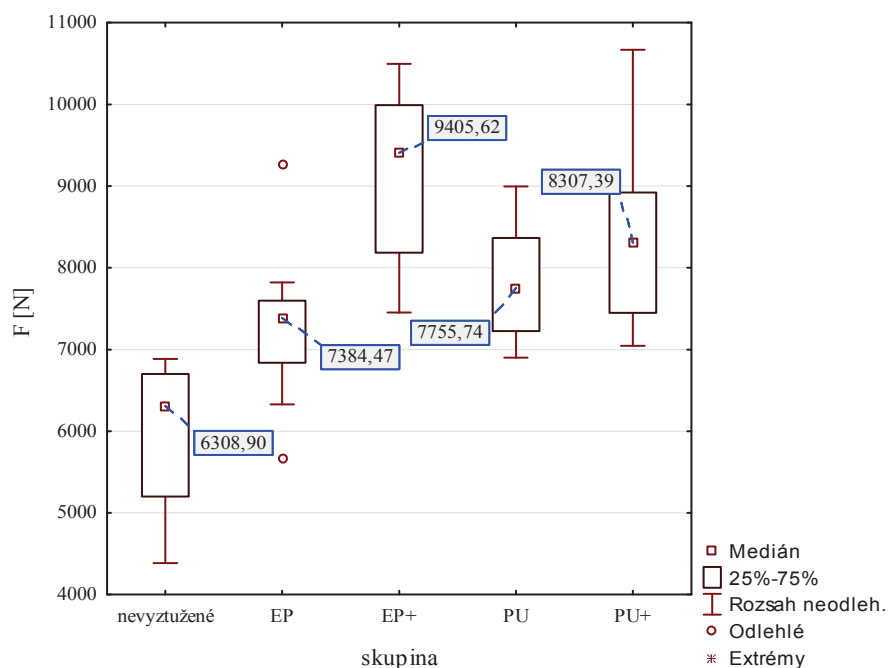
Z tabulky Tab. 6 je možné vyčíst chování nosníků s přilepenou uhlíkovou tkaninou a použitím polyuretanového adheziva (PU). Hodnoty zatěžovací síly F [N] se oproti skupině nevyztužených nosníků zvýšily a pohybují se od 6 901,389 N do 8 994,697 N, s variačním koeficientem 8, 66 %, stejně jako u pevnosti v ohybu σ_m [MPa]. Tento údaj se jeví jako poměrně zpřesňující, avšak při pohledu na ostatní veličiny, jako jsou průhyb w [mm] a modul pružnosti E_m [MPa] s hodnotami variačního koeficientu 27,47 % a 23,25 %, ho můžeme považovat za zavádějící. Vysoká míra relativního rozptýlení dat je dána strukturou adheziva, které vykazuje značnou pružnost v lepené spáře a tím ovlivňuje veličiny pružnosti.

Tab. 7 Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou s PU adhezivem

č.	typ	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
3	PU+	1123,62	538,12	10666,161	28,368	24 419	27,5
5	PU+	1087,85	472,97	8566,54	29,47	23 292	22,1
8	PU+	1019,26	406,98	8919,697	28,673	20 481	23,0
17	PU+	878	397,33	7236,995	40,446	16 409	18,7
42	PU+	899,64	411,67	7045,076	35,698	16 941	18,2
46	PU+	1016,6	504,89	7575,126	42,32	16 330	19,6
54	PU+	869,21	511,07	7449,874	50,996	16 589	19,2
56	PU+	968,56	475,48	8154,924	34,834	18 623	21,1
57	PU+	1096,5	495,96	8459,849	35,807	24 078	21,8
61	PU+	1082,06	465,86	9177,777	47,831	19 567	23,7
průměrná hodnota		1 004,13	468,03	8 325,20	37,44	19 673	21,5
směrodatná odchylka		95,78	48,18	1 096,33	7,89	3 259	2,8
variační koeficient		9,54 %	10,29 %	13,17 %	21,06 %	16,57 %	13,17 %

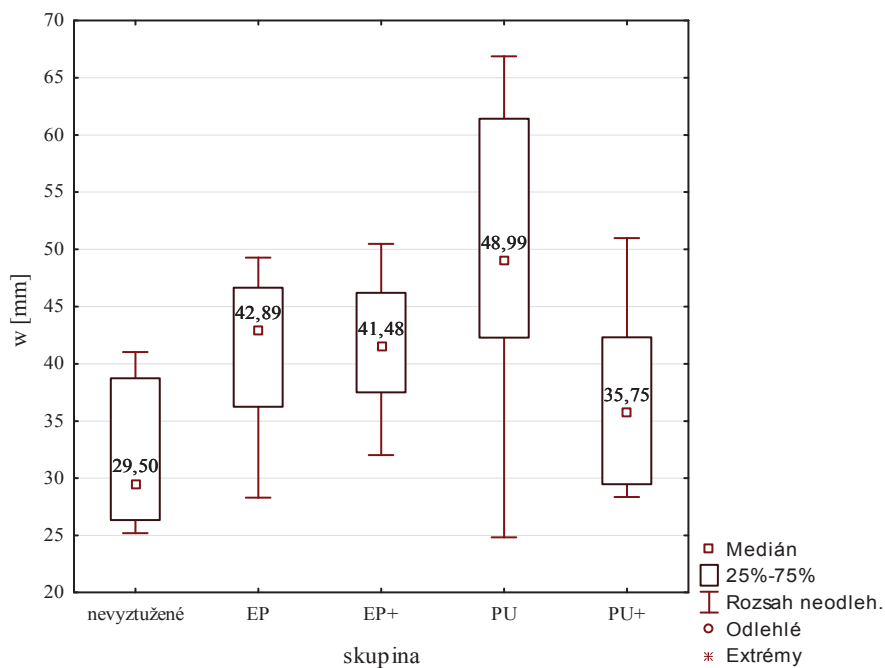
Zjištěné hodnoty v tabulce Tab. 7 ukazují naměřené veličiny pro nosníky vyztužené předepjatou uhlíkovou tkaninou za použití polyuretanového adheziva. U síly F [N] a pevnosti v ohybu σ_m [MPa] byly zjištěny hodnoty variačního koeficientu 13,17 %. Minimální hodnota síly je 7 045,076 N a maximální hodnota síly je 10 666,161 N. I zde je patrný vliv předepjaté tkaniny, ovšem v důsledku použití polyuretanového adheziva je vysoké relativní rozptýlení dat u hodnot průhybu w [mm] 21,06 % i u modulu pružnosti E_m [MPa] 16,57 %.

Naměřené hodnoty zatěžovací síly F [N], průhybu w [mm], modulu pružnosti E_m [MPa] a pevnosti v ohybu σ_m [MPa] v následujících grafech zpracovaných v softwaru Statistica 8 (Obr. 28, Obr. 29, Obr. 30 a Obr. 31) naznačují, že statisticky průkazně nižších hodnot všech sledovaných veličin dosahuje skupina nevyztužených nosníků. Oproti tomu skupiny s předepjatými vlákny EP+ a PU+ se pohybují na srovnatelné úrovni, ovšem s jistým rozdílem rozptýlu dat. Z grafů je patrný zvyšující se trend z oblasti nevyztužených nosníků, přes oblast vyztužených nosníků až po nosníky s předepjatými tkaninami. Nižší hodnoty nebo velký rozptyl se vyskytují obecně u použití polyuretanového adheziva (skupiny PU a PU+), což je dáno pružností lepené spáry, čímž dochází ke snížení pevnosti u vyztužených nosníků.



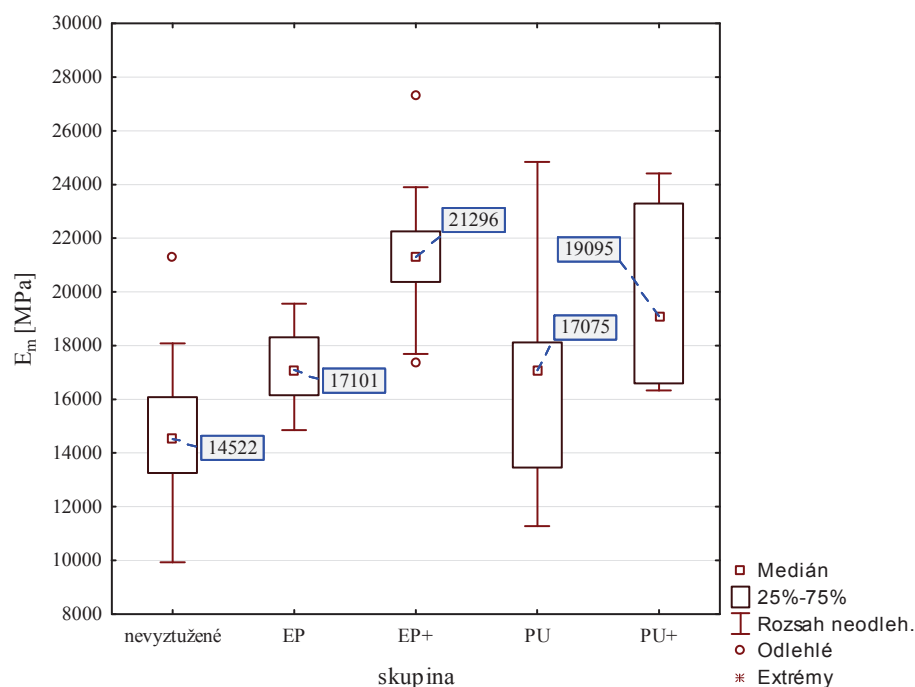
Obr. 28 Porovnání hodnot zatěžovací síly F [N] pro skupiny nosníků

Z grafu (Obr. 28) je patrné zvyšování zatěžovací síly F [N] v rámci epoxidového adheziva, a to od skupiny nevyztužených nosníků přes vyztužené nosníky přilepenou uhlíkovou tkaninou až po vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou.



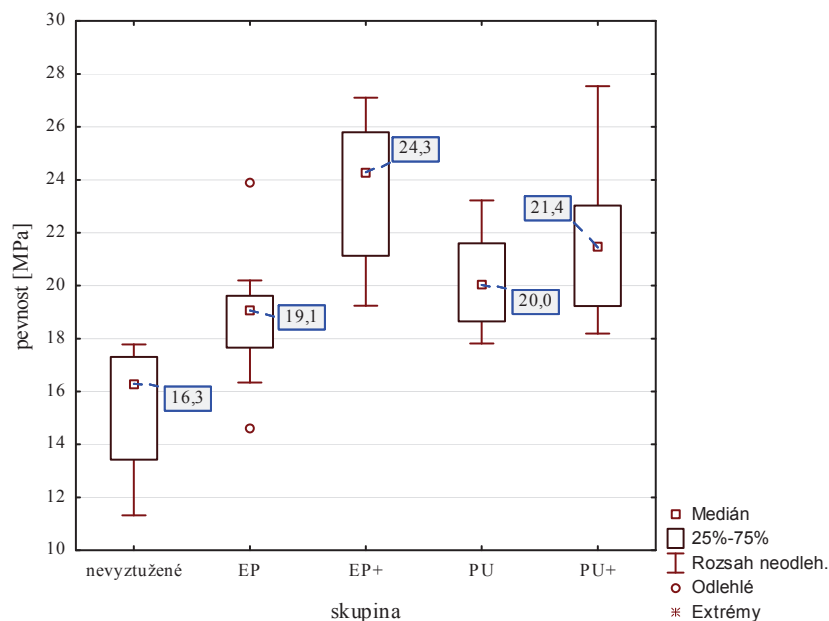
Obr. 29 Porovnání hodnot průhybu w [mm] pro skupiny konstrukčních nosníků

Obr. 29 ukazuje hodnoty průhybu w [mm] všech skupin. Nárůst průhybu je patrný, ovšem skupina PU vykazuje velký relativní rozptyl dat.



Obr. 30 Porovnání hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] pro skupiny nosníků

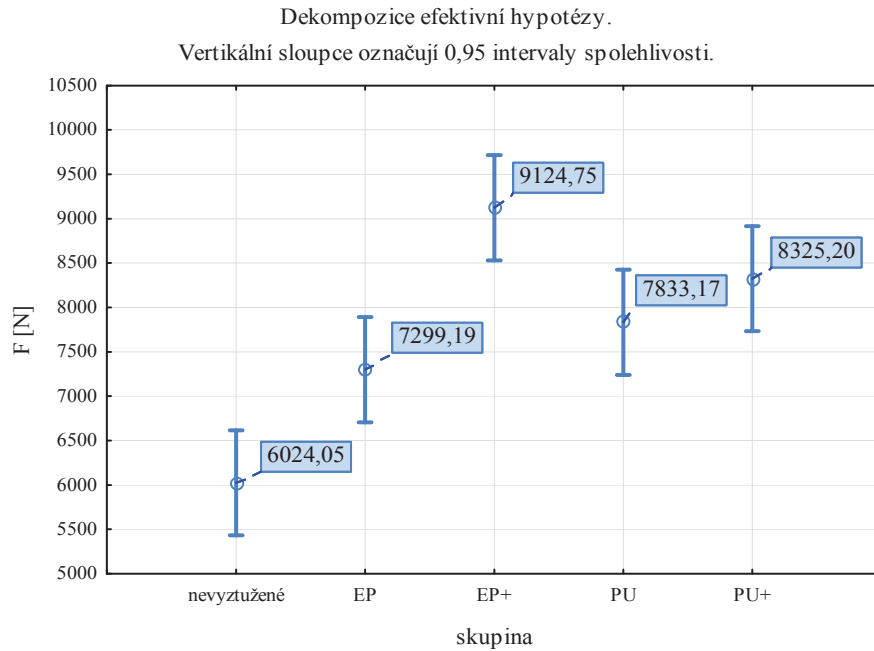
Hodnoty v grafu (Obr. 30) naznačují zvyšující tendenci modulu pružnosti E_m [MPa] v rámci epoxidového adheziva, a to od skupiny nevyztužených nosníků přes vyztužené nosníky přilepenou uhlíkovou tkaninou až po vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou. Efekt je o to zajímavější, že hodnoty v těchto skupinách EP a EP+ mají malý relativní rozptyl dat. Skupiny PU a PU+ mají podobnou tendenci, ovšem s vyšším variačním koeficientem, který ukazuje, že data mohou mít určitou nepřesnost.



Obr. 31 Porovnání hodnot pevnosti v ohybu σ_m [MPa] pro skupiny nosníků

Z grafu (Obr. 31) je patrné zvyšování pevnosti v ohybu σ_m [MPa] v rámci epoxidového adheziva, a to od skupiny nevyztužených nosníků přes vyztužené nosníky přilepenou uhlíkovou tkaninou až po vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou. Podobný, ale méně výrazný efekt je i mezi skupinami PU a PU+.

Dále byla jednotlivá data mezi sebou porovnávána testem hypotézy o shodě dvou průměrů s tím, že testy byly uvažovány na pěti procentní hladině významnosti. Významnost sledovaných faktorů ukazují následující grafy (Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35) a tabulky (Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10 a Tab. 11) s hodnotami definujícími významné rozdíly mezi jednotlivými skupinami, podle Tukeyovo metody mnohonásobného porovnávání.



Obr. 32 Zatěžovací síla F [N] ve skupinách nosníků

Z dosažených výsledků vyplývá zřejmý rozdíl mezi hodnotami pro nosníky nevyztužené a vyztužené uhlíkovou tkaninou (EP a PU), případně předpjatou uhlíkovou tkaninou (EP+ a PU+).

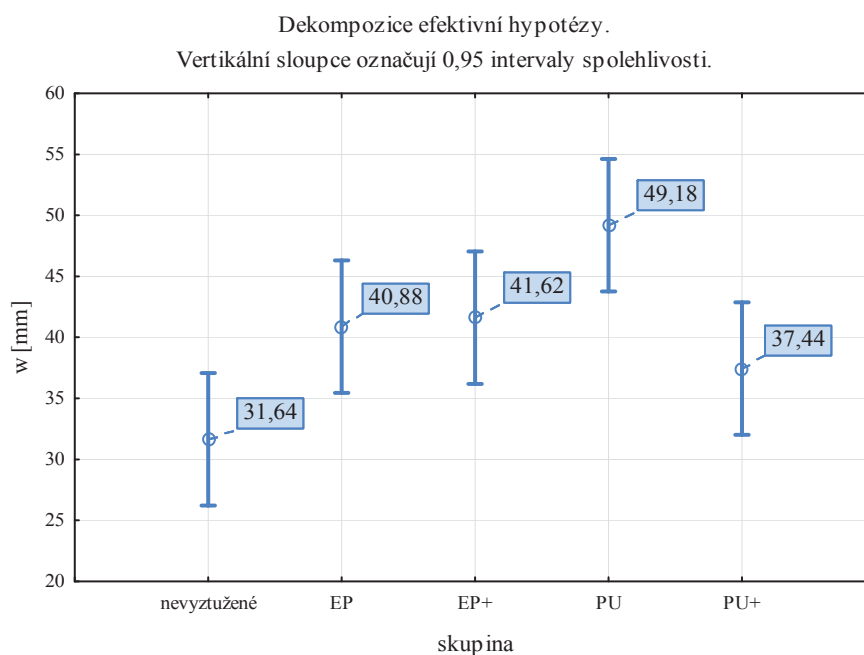
Tento efekt mají za důsledek uhlíková vlákna ve formě tkaniny, která částečně eliminují anizotropii dřeva a kumulují větší část pevnostních hodnot vyztužených nosníků do souborů s menším rozptylem. V případě síly F [N] potřebné pro přelomení nosníku statistický výpočet o shodě dvou průměrů dokazuje, že se průměrné hodnoty mezi skupinami statisticky liší.

Z toho vyplývá, že vyztužené nosníky (EP a PU) mají průměrně vyšší pevnost z hlediska potřebné síly k přelomení, než nevyztužené nosníky. Ještě větší významný rozdíl je mezi skupinou nevyztužených nosníků a nosníků s přidáním předpjatou tkaninou (EP+ a PU+), jak ukazuje Obr. 32. Tato tvrzení jsou patrna z následující tabulky (Tab. 8), kde je možné vidět významné rozdíly mezi skupinami.

Tab. 8 Tukeyův HSD test s proměnnou F [N]

Tukeyův HSD test; proměnná síla (statistika) Chyba: meziskup. PČ = 8664E2, sv = 45,000						
	typ	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		6024,1	7299,2	9124,7	7833,2	8325,2
1	nevztyžené		0,028932	0,000134	0,000843	0,000154
2	EP	0,028932		0,000761	0,702979	0,117210
3	EP+	0,000134	0,000761		0,026156	0,321549
4	PU	0,000843	0,702979	0,026156		0,761517
5	PU+	0,000154	0,117210	0,321549	0,761517	

V případě maximálního průhybu w [mm] při přelomení nosníku statistický výpočet o shodě dvou průměrů dokazuje, že se průměrné hodnoty mezi skupinami statisticky liší, a to mezi skupinami vyztužených (EP a PU) a nevztyžených nosníků (Obr. 33).



Obr. 33 Průhyb w [mm] ve skupinách nosníků

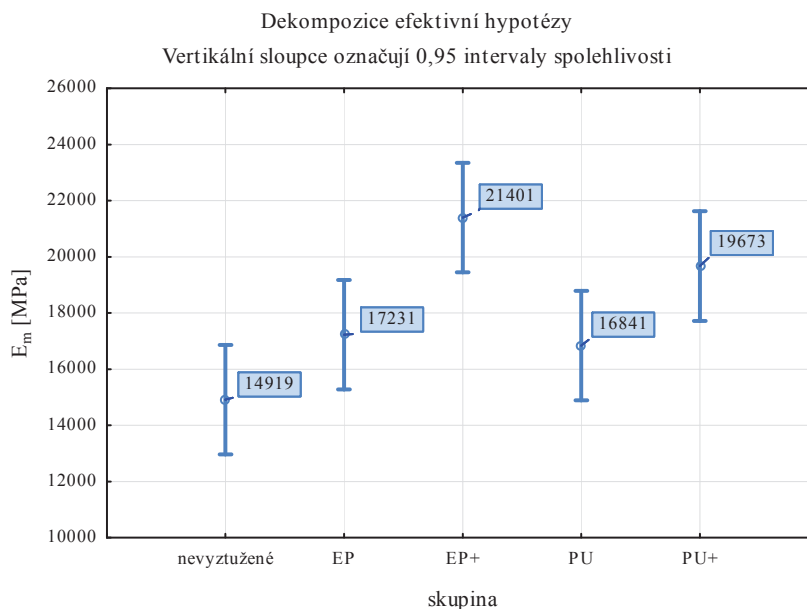
Na úrovni vyztužených nosníků (EP a PU) a nosníků s předepjatou tkaninou (EP+ a PU+) je v tomto případě výsledek statisticky nevýrazný (Tab. 9). Přesto mezi skupinou nevztyžených nosníků a nosníků s předepjatou tkaninou s PU adhezivem (PU+) je statisticky významný rozdíl. Z toho vyplývá, že vyztužené nosníky (EP a PU),

vč. nosníků s předepjatými tkaninami (EP+ a PU+) mají průměrně větší průhyb w [mm], než nevyztužené nosníky.

Tab. 9 Tukeyův HSD test s proměnnou w [mm]

Tukeyův HSD test; proměnná průhyb (statistika) Chyba: meziskup. PČ = 72,751, sv = 45,000						
	typ	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		31,638	40,877	41,619	49,183	37,444
1	nevyztužené		0,128142	0,084359	0,000444	0,554007
2	EP	0,128142		0,999701	0,206967	0,895433
3	EP+	0,084359	0,999701		0,290749	0,808510
4	PU	0,000444	0,206967	0,290749		0,027908
5	PU+	0,554007	0,895433	0,808510	0,027908	

Hodnoty zjištěného modulu pružnosti E_m [MPa] v jednotlivých skupinách dle statistického výpočtu o shodě dvou průměrů ukazují, že se průměrné hodnoty mezi skupinami statisticky liší, a to mezi skupinami nevyztužených nosníků a nosníků s předepjatou tkaninou (EP+ a PU+), (Obr. 34).



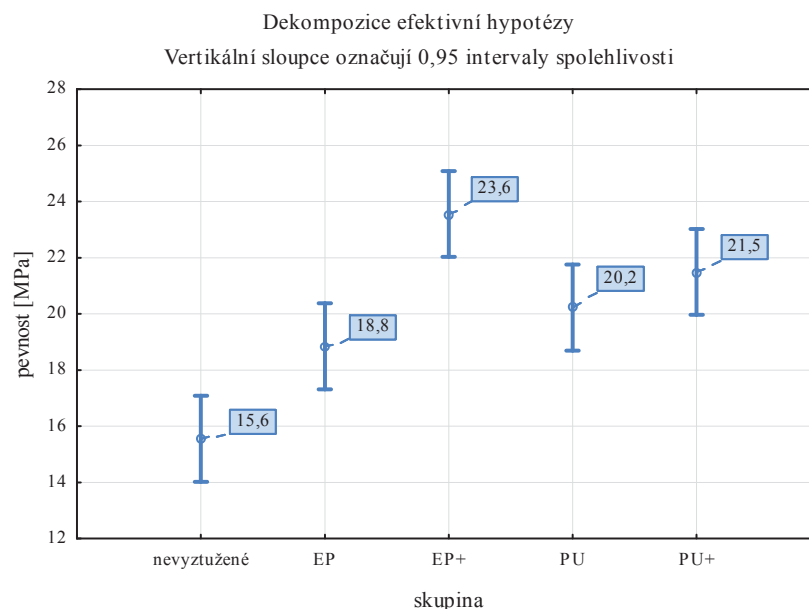
Obr. 34 Modul pružnosti E_m [MPa] ve skupinách nosníků

V případě vyztužených nosníků s předepjatou tkaninou (EP+ a PU+) je výsledek statisticky výrazný (Tab. 10). Čímž je prokázáno, že tyto nosníky mají průměrně větší modul pružnosti E_m [MPa], než nevyztužené nosníky.

Tab. 10 Tukeyův HSD test s proměnnou E_m [MPa]

Tukeyův HSD test; proměnná E Chyba: meziskup. PČ = 9375E3, sv = 45,000						
	typ	{1} 14919	{2} 17231	{3} 21401	{4} 16841	{5} 19673
1	nevyztužené		0,451205	0,000337	0,628543	0,009781
2	EP	0,451205		0,030288	0,998580	0,395643
3	EP+	0,000337	0,030288		0,014392	0,715559
4	PU	0,628543	0,998580	0,014392		0,251657
5	PU+	0,009781	0,395643	0,715559	0,251657	

Poslední zkoumanou veličinou je pevnost v ohybu σ_m [MPa], které se průměrné hodnoty v jednotlivých skupinách dle statistického výpočtu o shodě dvou průměrů statisticky liší, a to mezi všemi skupinami, čili mezi nevyztuženými nosníky a nosníky vyztuženými (EP a PU) i s předepjatou tkaninou (EP+ a PU+) (Obr. 35).



Obr. 35 Pevnost v ohybu σ_m [MPa] ve skupinách nosníků

Z toho také vyplývá, že vyztužené nosníky (EP a PU) mají průměrně vyšší pevnost v ohybu σ_m [MPa], než nevyztužené nosníky. Výraznější významný rozdíl je

mezi skupinou nevyztužených nosníků a nosníků s přidáním předepjatou tkaninou (EP+ a PU+), což je patrné z (Tab. 11).

Tab. 11 Tukeyův HSD test s proměnnou σ_m [MPa]

Tukeyův HSD test; proměnná pevnost Chyba: meziskup. PČ = 5,7753, sv = 45,000						
	typ	{1} 15,6	{2} 18,8	{3} 23,6	{4} 20,2	{5} 21,5
1	nevyztužené		0,028932	0,000134	0,000843	0,000154
2	EP	0,028932		0,000761	0,702979	0,117210
3	EP+	0,000134	0,000761		0,026156	0,321549
4	PU	0,000843	0,702979	0,026156		0,761517
5	PU+	0,000154	0,117210	0,321549	0,761517	

6.1.1 Srovnání výsledků skupin vzorků

Na základě provedeného měření a dosažených výsledků porovnávaných parametrů lze konstatovat, že došlo ke změně chování vyztužených nosníků (EP a PU) a vyztužených nosníků s předepjatou tkaninou (EP+ a PU+) při zatěžování v ohybu.

Následující tabulky shrnují předchozí výsledky a na základě průměrných hodnot stanovují procentuální nárůst vyztužení uhlíkovou tkaninou a předepjatou uhlíkovou tkaninou. Nárůsty se vždy vztahují k výchozí průměrné hodnotě nevyztužených nosníků, ať už v případě průměrné hodnoty potřebné síly F [N] k přelomení nosníku (Tab. 12), zaznamenané průměrné hodnoty průhybu w [mm] při přelomení (Tab. 13), průměrné hodnoty modulu pružnosti E_m [MPa] (Tab. 14) nebo průměrné hodnoty pevnosti v ohybu σ_m [MPa] (Tab. 15).

Tab. 12 Shrnutí výsledných údajů pro sílu F [N] potřebnou k přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin

	síla F [N]					
	\bar{x} [N]	s	v [%]	F_{MIN}	F_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	6 024,05	841,24	13,96	4 386,24	6 885,10	0
EP	7 299,19	954,54	13,08	5 660,99	9 259,34	17
EP+	9 124,75	1 025,36	11,24	7 453,28	10 496,09	34
PU	7 833,17	678,01	8,66	6901,389	8994,697	23
PU+	8 325,20	1 096,33	13,17	7045,076	10666,161	28

Z tabulky (Tab. 12) je patrné, že pro přelomení nosníku je zapotřebí u takto vyztužených nosníků zvýšit sílu F [N] o 17 % u přilepené uhlíkové tkaniny (EP), respektive o 23 % pro (PU) a o 34 % u předepjaté uhlíkové tkaniny (EP+), respektive o 28 % pro (PU+).

Tab. 13 Shrnutí výsledných údajů pro průhyb w [mm] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin

průhyb w [mm]						
	\bar{x} [mm]	s	v [%]	w_{MIN}	w_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	31,64	6,08	19,20	25,18	41,03	0
EP	40,88	7,07	17,30	28,30	49,29	23
EP+	41,62	5,67	13,62	32,03	50,48	24
PU	49,18	13,51	27,47	24,834	66,869	36
PU+	37,44	7,89	21,06	28,368	50,996	15

Významně se také projevil vzrůst průhybu w [mm] z tabulky (Tab. 13) u vyztužených nosníků (EP) o 23 %, respektive o 36 % pro (PU) a u předepjaté tkaniny (EP+) o 24 %, respektive 15 % u skupiny (PU+).

Tab. 14 Shrnutí výsledných údajů pro modul pružnosti E_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin

E_m [MPa]						
	\bar{x} [MPa]	s	v [%]	E_{MIN}	E_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	14 919	3 227	21,63	9927	21313	0
EP	17 231	1 527	8,86	14858	19569	13
EP+	21 401	2 860	13,36	17383	27342	30
PU	16 841	3 915	23,25	11277	24841	11
PU+	19 673	3 259	16,57	16330	24419	24

V tabulce (Tab. 14) je možné sledovat procentuální nárůst hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] mezi skupinami nevyztužených nosníků a skupin (EP) o 13 %, (PU) o 11 %, (EP+) o značný nárůst 30 % a (PU+) o 24 %.

Tab. 15 Shrnutí výsledných údajů pro pevnost v ohybu σ_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin

σ_m [MPa]						
	\bar{x} [MPa]	s	v [%]	σ_{MIN}	σ_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	15,6	2,2	13,96	11,3	17,8	0
EP	18,8	2,5	13,08	14,6	23,9	17
EP+	23,6	2,6	11,24	19,2	27,1	34
PU	20,2	1,8	8,66	17,8	23,2	23
PU+	21,5	2,8	13,17	18,2	27,5	27

Z tabulky (Tab. 15) je patrný nárůst pevnosti v ohybu σ_m [MPa] o 17 % u přilepené uhlíkové tkaniny (EP), respektive o 23 % pro (PU) a o 34 % u předepjaté uhlíkové tkaniny (EP+), respektive o 27 % pro (PU+).

6.2 Vyhodnocení modelové analýzy

Na základě zvolených parametrů uvedených v kapitole 5.4 pro vytvoření modelu MKP, byly vypočteny hodnoty nárůstu maximální zatěžovací síly F [N], průhybu w [mm], modulu pružnosti E_m [MPa] a pevnosti v ohybu σ_m [MPa] pro všechny nosníky, které byly podrobeny laboratorním destruktivním zkouškám, a to z důvodu možnosti porovnání výsledných údajů mezi sebou.

Během simulace se ukázalo, že se síla chová podle předpokladu, čili podobně jako u destruktivních zkoušek. Je ovšem mnohem menší a to včetně průhybu, modulu pružnosti i pevnosti v ohybu. Na druhou stranu je poměr síly a průhybu u experimentu i simulace podobný. Jedno z možných vysvětlení je, že k zastavení simulace dochází v okamžiku, kdy napětí v krajním bodě nosníku dosáhne mezní hodnoty. Pokud se tedy poruší jedno vlákno ve dřevě v reálných podmínkách, tak je nosník stále schopen přenášet zatížení, proto dále roste síla, průhyb, modul pružnosti i pevnost v ohybu.

Pro jednotlivé nosníky byla vytvořena schémata s vyjádřením deformovaného tvaru a s hodnotami průběhu normálového napětí S_x , včetně průběhu napětí S_x v transverzální rovině uprostřed nosníku. Další vyjádřenou veličinou pro každý nosník byl průběh smykového napětí S_{xy} , včetně průběhu smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed nosníku. Posledním schématem pro každý nosník je vyjádření hodnot průhybu. Všechny průběhy se nacházejí v příloze č. 1.

Tabulky s konkrétními výslednými hodnotami jednotlivých nosníků pro zatěžovací sílu F [N] potřebnou k přelomení nosníku, průhyb nosníku w [mm] při porušení, modul pružnosti E_m [MPa] a příslušnou pevnost v ohybu σ_m [MPa] lze nalézt v příloze č. 2.

Porovnání výsledných hodnot výše uvedených veličin pro jednotlivé nosníky z modelu MKP jsou v příloze č. 3. Významnost sledovaných faktorů těchto veličin z modelu MKP s příslušnými Tukeyovo HSD testy se nachází v příloze č. 4.

Následující tabulky shrnují výsledky z přílohy č. 2 a na základě průměrných hodnot stanovují procentuální nárůst vyztužení uhlíkovou tkaninou a předepjatou uhlíkovou tkaninou. Nárůsty se vždy vztahují k výchozí průměrné hodnotě nevyztužených nosníků, ať už v případě průměrné hodnoty potřebné síly F [N] k přelomení (Tab. 16), zaznamenané průměrné hodnoty průhybu w [mm] při přelomení (Tab. 17), průměrné hodnoty modulu pružnosti E_m [MPa] (Tab. 18) nebo průměrné hodnoty pevnosti v ohybu σ_m [MPa] (Tab. 19).

Tab. 16 Shrnutí výsledných údajů pro sílu F [N] potřebnou k přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP

síla F [N]						
	\bar{x} [N]	s	v [%]	F_{MIN}	F_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	1 078,10	126,32	11,72	900,00	1 219,00	0
EP	1 902,10	232,05	12,20	1 813,00	2 318,00	43
EP+	3 410,40	203,11	5,96	3 116,00	3 714,00	68
PU	2 063,60	233,49	11,31	1 675,00	2 307,00	48
PU+	3 263,30	183,09	5,61	3 050,00	3 693,00	67

Z tabulky (Tab. 16) je patrné, že pro přelomení je zapotřebí u takto vyztužených nosníků zvýšit sílu F [N] až o 43 % u přilepené uhlíkové tkaniny (EP), respektive o 48 % pro (PU) a až o dokonce 68 % u předepjaté uhlíkové tkaniny (EP+), respektive o 67 % pro (PU+). Tyto enormní hodnoty je možné sledovat právě u parametru síly, neboť se jedná o hlavní stanovující veličinu pevnosti. I přes to, je nutné brát hodnoty s určitou rezervou, z důvodu velice nízkých průměrných hodnot naměřených sil.

Tab. 17 Shrnutí výsledných údajů pro průhyb w [mm] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP

průhyb w [mm]						
	\bar{x} [mm]	s	v [%]	w_{MIN}	w_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	6,220	2,020	32,476	2,558	9,706	0
EP	7,510	0,970	12,916	5,573	9,076	17
EP+	8,530	0,730	8,558	6,912	9,388	27
PU	8,770	2,050	23,375	5,216	12,478	29
PU+	8,650	0,700	8,092	7,357	9,495	28

Významně se také projevil vzrůst průhybu w [mm] (Tab. 17) u vyztužených nosníků (EP) o 17 %, respektive o 29 % pro (PU) a u předepjaté tkaniny (EP+) o 27 %, respektive 28 % u skupiny (PU+).

Tab. 18 Shrnutí výsledných údajů pro modul pružnosti E_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP

E_m [MPa]						
	\bar{x} [MPa]	s	v [%]	E_{MIN}	E_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	2 492	878	35,23	1 515	4 645	0
EP	3 319	212	6,39	2 987	3 641	25
EP+	5 253	474	9,02	4 656	6 330	53
PU	3 174	514	16,19	2 417	4 198	21
PU+	4 966	532	10,71	4 389	5 775	50

V tabulce (Tab. 18) je možné sledovat poměrně vysoký procentuální nárůst hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] mezi skupinami nevyztužených nosníků a skupin (EP) o 25 %, (PU) o 21 %, (EP+) o výrazný nárůst 53 % a (PU+) o 50 %. Opět se hodnoty nárůstů jeví jako velice vysoké, avšak i v tomto případě je výsledek zkreslen nízkými průměrnými hodnotami.

Tab. 19 Shrnutí výsledných údajů pro pevnost v ohybu σ_m [MPa] při přelomení nosníku a procentuální nárůst daných skupin z modelu MKP

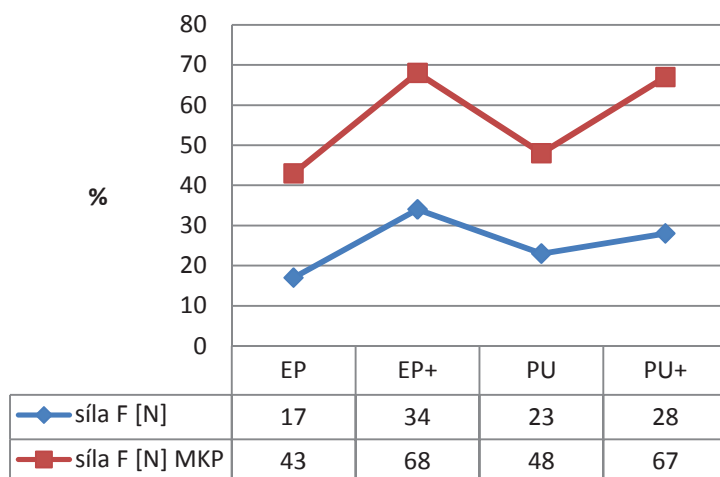
	σ_m [MPa]					
	\bar{x} [MPa]	s	v [%]	σ_{MIN}	σ_{MAX}	nárůst %
nevyztužené	27,8	3,3	11,72	23,2	31,5	0
EP	49,1	6,0	12,20	37,6	59,8	43
EP+	88,1	5,2	5,96	80,5	95,9	68
PU	53,3	6,0	11,31	43,2	59,6	48
PU+	84,3	4,7	5,61	78,7	95,3	67

Z tabulky (Tab. 19) je patrný nárůst pevnosti v ohybu σ_m [MPa] o 43 % u přilepené uhlíkové tkaniny (EP), respektive o 48 % pro (PU) a o 68 % u předepjaté uhlíkové tkaniny (EP+), respektive o 67 % pro (PU+), obdobně jako u parametru síly.

I přes značně vysoké nárůsty zjištěných hodnot sledovaných parametrů bude možné výstupy porovnat s laboratorními destruktivními zkouškami. Tendence kulminace mezi jednotlivými skupinami vyjadřuje obdobný charakter.

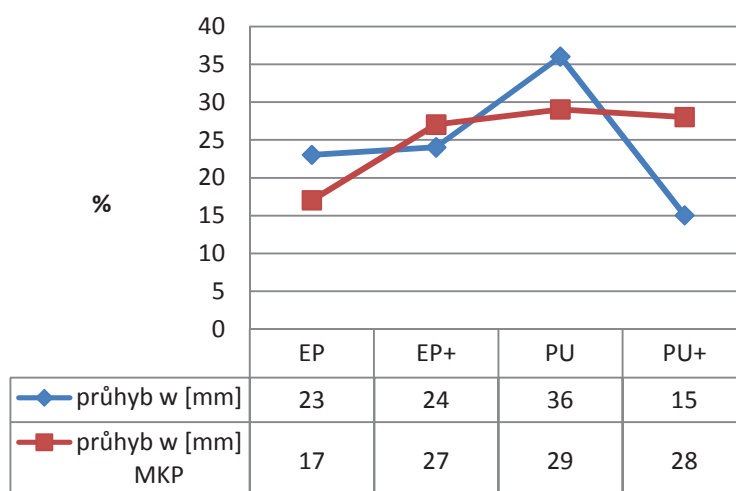
6.3 Srovnání experimentálních a modelových výsledků statistickými metodami

Pro zobrazení charakteru vývoje jednotlivých procentuálních hodnot nárůstů všech skupin poslouží hodnoty z laboratorních destruktivních zkoušek i z vytvořených modelů MKP. Hodnoty z obou výstupů se od sebe liší dosti výrazně, ale pro stanovení výsledku aplikovatelnosti uhlíkových tkanin je možné vytvořit podobné tendence křivky, které lze mezi sebou porovnat. Výsledné křivky jsou uvedeny v grafech (Obr. 36 až Obr. 39).



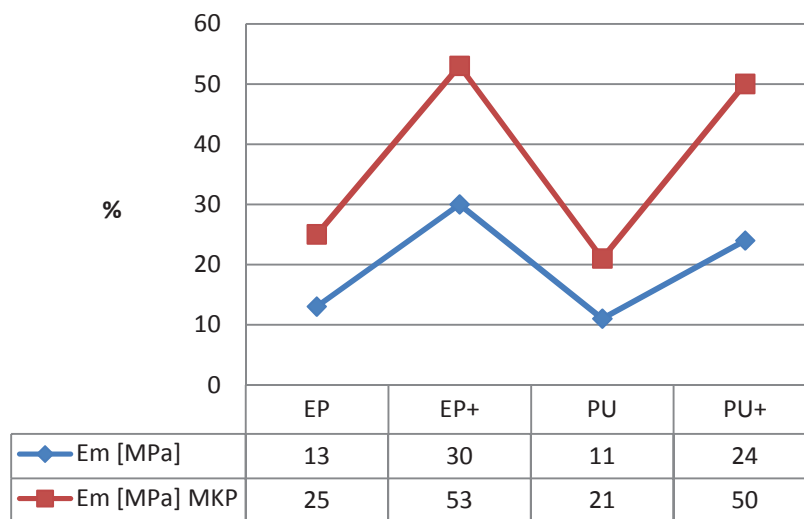
Obr. 36 Průběh nárůstu hodnot zatěžovací síly F [N] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP

Graf (Obr. 36) naznačuje vývoj síly F [N] potřebné k přelomení nosníku, kde je jednoznačné stanovit obdobný průběh obou křivek. Tím lze potvrdit, že jak destruktivní zkoušky, tak i model MKP stanovují shodné závěry.



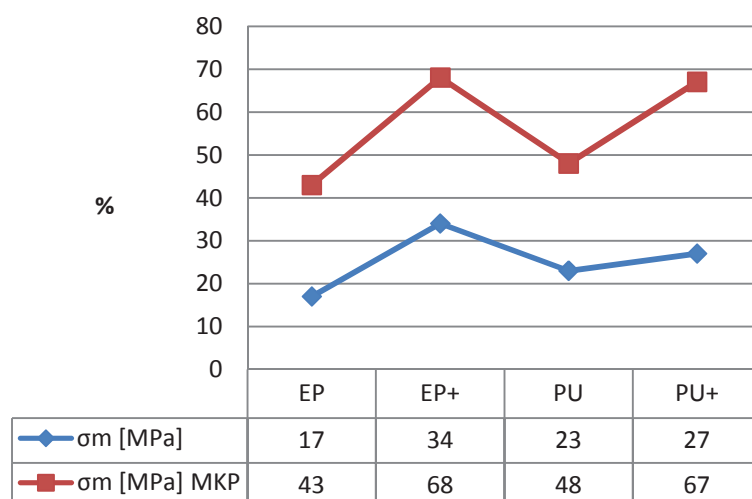
Obr. 37 Průběh nárůstu hodnot průhybu w [mm] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP

Obdobně na tom jsou i křivky průměrných hodnot průhybu w [mm] (Obr. 37) v procentech z jednotlivých skupin, kde kromě skupiny (PU), můžeme určit shodný charakter průběhu. Skupina (PU) je ve výsledku křivky modelu mírně odlišná, což může být způsobeno lokální chybou výpočtového modelu MKP nebo příliš nízkými hodnotami.



Obr. 38 Průběh nárůstu hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP

Vyjádřením průběhu křivky modulu pružnosti E_m [MPa] v procentech pro jednotlivé skupiny průměrných hodnot naměřených při zkouškách a vypočtených z modelu MKP (Obr. 38), je možné znázornit situaci, která je v obou výstupech obdobná. Menší pokles byl zaznamenán u skupiny (PU) destruktivních zkoušek, který je zanedbatelný. Křivka pro hodnoty z těchto zkoušek je výraznější ve všech bodech, což je dáno zpřesňujícími zadávacími parametry reálné zkoušky.



Obr. 39 Průběh nárůstu hodnot pevnosti v ohybu σ_m [MPa] v procentech pro jednotlivé skupiny hodnot naměřených a vypočtených z modelu MKP

Průběh křivek hodnot pevnosti v ohybu σ_m [MPa] je obdobný jako u sledované zatěžovací síly F [N].

Analýzou bylo prokázáno, že vývoj jednotlivých hodnot pro konkrétní oblasti zkoumaných veličin je srovnatelný. Je to dáno především obdobnými hodnotami konkrétních zkoumaných nosníků a správně zvolených parametrů pro model MKP.

6.4 Diskuze

Na základě provedeného měření a dosažených výsledků porovnávaných parametrů lze konstatovat, že došlo ke změně chování vyztužených nosníků a nosníků vyztužených s předepjatou tkaninou při zatěžování. Statisticky se významně liší síla F [N] potřebná k přelomení nosníku mezi všemi skupinami a průhyb w [mm] se významně liší mezi nosníky vyztuženými a nevyztuženými. Obdobně jsou na tom i modulu pružnosti E_m [MPa] a pevnosti v ohybu σ_m [MPa]. Z výše uvedených výsledků vyplývá, že epoxidová pryskyřice Sikadur 330, která je vyvinuta pro aplikaci uhlíkových vláken ve formě tkaniny, se jeví jako vhodnější způsob vyztužení než lepidlo na bázi polyuretanu ICEMA R 145 Professional.

Výsledky jiných autorů ukazují, že je důležité předem stanovit postup lepení, dimenze nosníků a další parametry, které vycházejí z laboratorních podmínek (ROHANOVA et al., 2003). Na nosnicích dochází k poměrně velké koncentraci napětí v místě přilepení uhlíkových tkanin, a protože má lepidlo samo o sobě ve smyku větší pevnost než vlákna dřeva, dochází při porušení k jejich vytržení. To lze vysvětlit příliš vysokým modulem pružnosti uhlíkových tkanin pro použití společně se dřevem.

Jelikož pevnost vysokopevnostních vláken není při prostém přilepení v tažené části nosníku plně využita, byla realizována myšlenka tato vlákna předepnout. Tím je jejich pevnost lépe využita. Použití velkých předepínacích sil je problém, protože přenos síly z vláken na koncích nosníku do hlavní části nosníku může způsobit delaminaci – rozvrstvení. Problém delaminace je však patrný, dle výzkumů (BLANKENHORN, et al., 2001), až při hodnotách předepnutí nad 3 000 N. Dle (STEIGER, 2010) prokázaných testů na malých vzorcích v tahu se ukázalo, že síla spoje uhlíkových vláken a dřeva je celkem vysoká, a lze přenášet zatížení až téměř 250 kN.

Síla potřebná k porušení a příslušné průhyby nosníků ze dřeva jsou vždy vstupními parametry, na základě kterých je možné vyhodnocovat závěry těchto zkoušek (BLANKENHORN, et al., 2001).

Zjištěné výsledky mechanicko-fyzikálních vlastností jsou porovnatelné s výsledky autorů (HLUŠÍ, KONVALINKA, 2007). Autoři se v této práci zmiňují, že vyztužené nosníky uhlíkovými vlákny vykazují vyšší parametry než normové a tím potvrzují následné závěry. Dalšími doporučenými možnostmi, které zkoumají podobné charakteristiky dle ČSN EN 386, jsou vyztuže uhlíkovými lamelami u lepeného lamelového dřeva, jak zmiňují autoři (MELZEROVÁ, KUKLÍK, 2009).

7 ZÁVĚR

7.1 Souhrn

V disertační práci byla provedena analýza vlivu vyztužení na nosníky z rostlého smrkového dřeva. Základními zkoumanými veličinami byly: maximální síla dosažená při porušení zatíženého nosníku v ohybu, celkový průhyb a příslušné hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v ohybu. Materiálové a geometrické charakteristiky nosníků byly voleny takovým způsobem, aby mohly poskytovat reálný přehled o zkoumaném vlivu.

Ve všech skupinách nosníků nastávala změna v použití uhlíkové tkaniny, a to buďto prostým přilepením (EP a PU) nebo předepnutím (EP+ a PU+). Tyto skupiny byly porovnávány s výchozími hodnotami ze skupiny nevyztužených nosníků bez vyztužení.

Vyhodnocení ohybové zkoušky z laboratorních zkoušek je rozděleno do čtyř skupin, které porovnávají vybrané skupiny nosníků mezi sebou a umožňují definovat zvýšení maximální dosažené síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu, v procentuálních údajích.

Výsledky měření při destruktivních zkouškách prokázaly značný nárůst na mezi porušení v porovnání s nevyztuženými nosníky. Zvýšení maximální dosažené síly při přelomení je výrazné u skupiny s předepjatými tkaninami na bázi uhlíku (EP+), a to průměrně o 34 % oproti skupině nevyztužených nosníků. Výrazným údajem se ukázal také průhyb, který je pro vyztužení přilepenou uhlíkovou tkaninou (PU) adhezivem na bázi polyuretanu 36 %, což je dáno pružnými vlastnostmi zmiňovaného adheziva. Nejvyšší hodnoty modulů pružnosti byly zjištěny u skupiny s předepjatými tkaninami, a to u skupiny (EP+) 30 %, respektive (PU+) 24 %. Podobně se pohybovaly hodnoty pevnosti v ohybu pro (EP+) 34 % a (PU+) 27 %.

Kromě přímého zesilujícího vlivu vyztužení včetně předepnutí se jeví zajímavým i zjištění, že u skupin (EP) a (EP+) byl značný pokles variačního koeficientu. U nevyztužených nosníků pro hodnocení modulu pružnosti byla průměrná hodnota od 21,63 %. Pro skupiny (EP) a (EP+) byla hodnota variačního koeficientu 8,86 %, respektive 13,36 %. Tento efekt lze vysvětlit pozitivním působením uhlíkových tkanin na zesílení nejslabších míst taženého okraje nosníku, kterým byly vady dřeva a nepravidelnosti, mezi které patří suky, trhliny, odklon vláken apod. Zjištěné tvrzení podporují i pozorované způsoby porušení, které se vyskytly častěji jinde než právě

ve viditelných vadách dřeva jako u nevyztužených nosníků, a to nejčastěji třískovitým zlomem, se zvlinitými vlákny dřeva, což nasvědčuje vyšší kvalitě dřeva.

Vzhledem k zjištěnému pozitivnímu vlivu vyztužující tkaniny na zvýšení ohybové tuhosti nosníků a také na prokázání pevnostních hodnot aplikace epoxidového adheziva a pružných vlastností polyuretanového adheziva jak ukazují výsledky, by bylo zajímavé provést srovnatelné zkoušky s dalšími druhy adheziv, které by indikovaly tyto vlastnosti současně.

Vyztužené nosníky uhlíkovými vlákny ve formě tkanin vykazují vyšší pevnost tím, že je potřeba vyvinout větší sílu k porušení v ohybu a také vyznačují větší průhyby v těchto bodech. Tato skutečnost platí pro vyztužené nosníky s použitím epoxidové pryskyřice Sikadur 330 a především pro vyztužení uhlíkovou tkaninou, která je předepnuta na 980 N, s použitím stejného adheziva.

Závěry získané modelovou analýzou MKP vykazují podobný vývoj hodnot jako u laboratorních zkoušek, což potvrzuje zesilující účinek výztuže v jednotlivých skupinách.

7.2 Přínos pro vědu

Význam disertační práce a zjištěných závěrů je v potvrzení výsledků z předchozích výzkumů, podložených laboratorními testy, včetně prokázání procentuálního zvýšení únosnosti aplikace výztuh pomocí MKP. Díky těmto modelům je predikováno chování vyztužení přilepené a předepjaté uhlíkové tkaniny při jejich chování v nosnících na bázi dřeva.

Pro použití dřeva nižší třídy pevnosti je ve většině případů rozhodující dosažení meze pevnosti v tažených vláknech. Proto bylo zvoleno dřevo v třídě kvality S10, a díky zjištěným závěrům ověřena oblast použití vyztužení.

Pro další rozvoj problematiky v oblasti využití dřeva je vhodné použít i jiné druhy dřevin, případně tkanin a také metod porovnávání, např. s uvažováním přímého smykového zatížení.

Zvolená metoda vyztužení dřevěných nosníků nabízí další způsob aplikace a technologie, zvyšující hodnotu stávající konstrukce, nebo poskytuje řešení, jak tuto konstrukci ochránit či uchovat, což rozšiřuje oblast výzkumu použití dřeva a dřevěných konstrukcí.

Zajímavými přínosy práce jsou další dopady zjištěných závěrů v ostatních vědních oborech i aplikovaném výzkumu, jako například využití pro statiku dřevěných konstrukcí a možnosti navázání na pokročilejší modelaci simulací MKP při zhoršených podmínkách užívání, jako je například požární odolnost a teplotní vliv na kompozity.

7.3 Přínos pro praxi

Z pohledu praxe je hodnotným údajem vliv vyztužení uhlíkové tkaniny na deformaci, respektive průhyb nosníků. Důvodem je to, že prostě podepřený nosník při navrhování nevyhoví dřívě na požadovanou hodnotu mezního stavu použitelnosti nežli na hodnotu mezního stavu únosnosti. Tento jev je dán relativně nízkým modulem pružnosti dřeva. Z tohoto důvodu se jeví tento druh vyztužení jako velice vhodným.

Pro aplikaci uhlíkových tkanin v praxi je velice důležité opatřit nosníky krycí lamelou. Důvodem je vhodně zajistit podhled přiznaných nosníků s přihlédnutím k požární ochraně, dle ČSN EN 1995-1-2. Řešením může být např. použití tenké dřevěné dýhy s vysokou pevností, která se aplikuje na výrobu překližek, případně některých dalších materiálů na bázi dřeva s vyšší požární odolností.

Spolupůsobení dřeva s jinými konstrukčními materiály je možné považovat při určitých aplikačních řešeních za výhodné, z důvodu povahy dřevěného materiálu jako takového a jeho příznivých mechanických vlastností, při nízké hmotnosti. Pro výrobu a montáž je právě dřevo energeticky nenáročné a z hlediska ekologie příznivým materiálem, což se může v dnešní době jevit investorům a výrobcům jako potenciálně zajímavý fakt.

Díky výše uvedeným závěrům je možné dřevo využívat také i na mnohem nepříznivější oblasti zatížení, čímž se zvyšuje jeho aplikovatelnost a zvýšení bezpečnosti provozu až o čtvrtinu při očekávaných zatíženích. Praktické použití se tedy rozšiřuje na potřeby zvýšení únosnosti stávající dřevěné konstrukce z důvodu změny způsobu či velikosti zatížení nosné konstrukce objektu nebo jeho části, především u historických prvků z masivního dřeva, jako jsou např. stropnice apod. U nových konstrukcí je možné využít tento způsob vyztužení na dřevěné stavební prvky, kde je limitující konstrukční výška průřezu anebo zamezení vzniku nadměrných přetvoření či eliminace tečení dřeva, které se může projevit zvyšováním průhybu nosníku v závislosti na čase.

Uvedené a zjištěné závěry je možné dále rozvíjet ve spolupráci s potenciálními investory, kteří budou mít o definované výsledky s ohledem na jejich možné užití, značný zájem.

8 SUMMARY

Dissertation thesis analyzes impact on reinforcement beams of solid spruce wood. The principal variables studied were: the maximum force occurring in breaking of the loaded beam in bending, deflection and the total value of the modulus of elasticity and bending strength. The material and geometric characteristics of beams were to be selected in such a way as to provide a realistic view of the analysis of influence.

In all groups of beams change occurred in the use of carbon fabric, either by simply bonded-on (PE and PU) or pre-strained (EP + and PU +). These groups were compared with baseline group values of non-reinforced beams without reinforcement.

Evaluation of bending load as laboratory tests are divided into four groups and compare a selected group of beams between each other, allows to increase the maximum achieved force, deflection, modulus of elasticity and bending strength in percentages.

The measurement results in destructive tests showed a significant increase in the failure compared with unreinforced beams. The increase in maximum force achieved in destruction is significant for group with pre-strained carbon-based fabric (EP +), and an average of 34% versus the unreinforced beams. A very high indication is showed a deflection, which for reinforcement carbon fabric adhesive (PU) based on polyurethane 36% is due to elastic properties of the aforementioned adhesive. High values of elastic modulus of elasticity were detected in the group with pre-strained fabric and that the group (EP +) 30%, respectively (PU +) 24%. Similarly ranged values for flexural strength (EP +) and 34% (PU +) 27%.

In addition to direct amplification effect of reinforcement including pre-straining seems interesting also founding for groups (EP) and (EP +), a significant decrease in the coefficient of variation. For non-reinforced beams to evaluate the modulus of elasticity, the average value was 21.63%. For groups (EP) and (EP +) was the value coefficient of variation of 8.86% and 13.36%. This effect can be explained by the positive effect of carbon fabrics to strengthen the weakest points tensile edge beams, which were wood defects and irregularities, including knots, cracks, slope of grain, etc. Identified statement is supported by the observed failure modes that occurred more frequently elsewhere than just in visible defects such as wood beams with unreinforced, most

commonly fragmented break, the ripple wood fibers, suggesting a higher quality of wood.

View the observed positive effect of reinforcing fabric to increase the bending stiffness of the beam and also to demonstrate the value and strength epoxy adhesive and elastic properties of polyurethane adhesives as the results shows, it would be interesting to perform comparative tests with other types of adhesives that would indicate these properties simultaneously.

Wood beams reinforced with carbon fibers in the form of fabrics exhibit higher strength that is needed to create greater strength to breach in bending and also have a larger deflections at these points. This facts for reinforced beams is effective with using epoxy resin Sikadur 330, and in particular for the reinforcement of a carbon fabric which is pre-strained to 980 N with using the same adhesive.

The conclusions obtained by model FEM analysis show a similar trend as the values in laboratory tests which is confirms the potentiating effect of reinforcement in each group.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

9.1 Literatura

- AGARWAL, B., BROUTMAN, L. *Vláknové kompozity*. Státní nakladatelství technické literatury. Praha, 1987, 294 s.
- ANDIL, J. *Statistické metody*, Praha, Matfyzpress, 2003.
- ANDIL, J. *Základy matematické statistiky*, Praha, Matfyzpress, 2005.
- BELPERIO, R., GRAD, I. E. *The performance of Glulam Beams Reinforced with Carbon Fibre*. In: Pacific Timber Engineering Conference, New Zeland, Anais, 1999, pp. 99-106.
- BENDER, D. A., WOLCOTT, M. P., DOLAN, J. D. *Structural design and applications with wood-plastic composites*. Wood Design Focus - A Journal of Contemporary Wood Engineering, 16(3), 2006, pp. 13-15.
- BLANKENHORN, P. R., BLANKENHORN, B. D., SILSBEE, M. R., DIVILA, M. *Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of wood fibre-cement composites*. In Cement Concrete Research 31, 2001, pp. 1049-1055.
- BLATNÁ, D. *Neparametrické metody*, Praha, Vysoká škola ekonomická, 1996.
- BOHNHOFF, D. R. Post Foundation design considerations. Wood Design Focus - A Journal of Contemporary Wood Engineering, 12(3), 2002, pp. 10-16.
- BOSTRÖM, L., HOFFMEYER, P., SOLLI, K. H. *Assignment of nordic glulam to the European strength class system*. In proceedings pro008: International RILEM Symposium on Timber Engineering. 1999, pp 523-532. ISBN: 2-912143-10-1.
- BRODY, J., RICHARD, A., SEBESTA, K., WALLACE, K., HONG, Y., ANILDO, R. L., DAVIDS, W., LANDIS, E. *FRP-wood-concrete composite bridge girders*. 2004, Structures Congress 2000: Advanced Technology in Structural Engineering, pp. 103.
- BUCHANAN, A. H. *Bending Strength of Lumber*. Journal of Structural Engineering. 116 (5). 1990, pp. 1213–1229. ISSN (print): 0733-9445.
- CORRADI, M., BORRI, A. *Fir and chestnut timber beams reinforced with GFRP pultruded elements*. 2007, Composites Part B: Engineering, s. 172-181.
- CORRADI, M., SPERANZINI, E., BORRI, A., VIGNOLI, A. *In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP*. 2006, Composites Part B: Engineering, s. 310-319.

- DAGHER, H. J. *High - Performance Wood Composites for Construction*. In: VII EBRAMEM, São Carlos - Brasil. Anais, 2000.
- DICKÝ, J., MISTRÍKOVÁ, Z. *Pružnosť pevnosť I*. STU, Bratislava, 2000, 337 s.
- GIANCASPRO, J., BALAGURU, P., LYON, R. *Flexural behavior of balsa wood cores reinforced with inorganic carbon composite*. 2002, International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), s. 530.
- GRNIAK, M. *Vystužovanie drevených prvkov uhlíkovými lamelami*. Zvolen: TU, Fakulta drevárska. 2003. Disertační práce.
- HAILWOOD, A., J., HORROBIN, S. Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. 1946. Trans. Faraday Soc. 42B: 84–102.
- HAVRILA, F., PRIGANC, S., ALARSHI, A. *Vláknitá výstuž CFRP - Sika a jej prvá aplikácia na Slovensku*. Stavebné materiály a skúšobníctvo. 1998.
- HINDLS, R., HRONOVÁ, S., SEGER, J.: *Statistika pro ekonomy*, páté vydání, Professional Publishing, Praha, 2004, str.146, ISBN 80-86419-59-2 (5.vyd.).
- HLUŠÍ, L. *Materiálové charakteristiky dřeva vyztuženého vlákny*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební. 2011. Disertační práce.
- HLUŠÍ, L., KONVALINKA, P. *Materials used for composites containing timber*. In Computational and Experimental Analysis of Structure and Properties of New Building Materials from Nano - to Macrolevel V. Prague: CTU, Faculty of Civil Engineering, 2007, pp. 41-46. ISBN 978-80-01-03917-5.
- HOREJŠÍ, J. a kolektiv. *Statické tabulky*. Praha: SNTL, 1987. ISBN 04-705-88.
- KRŇANSKÝ, J. Perspektivy využití nanotextilií na bázi polymerů ve stavebnictví. *Difúzně otevřené konstrukce dřevostaveb*, ČVUT v Praze, 2009s. 1-26, ISBN 80-7157-953.
- KUKLÍK, P., *Dřevěné konstrukce 10*. ČVUT v Praze, 2001, pp. 141. ISBN 80-01-01748-6.
- KUKLÍK, P., MELZEROVÁ, L., VÍDENSKÝ, J. MKP model dřevěných nosníků vyztužených lamelou z vláken vysoké pevnosti. In Acta Mechanica Slovaca, 2006, pp. 289-294.
- KUKLÍK, P., MELZEROVÁ, L., VÍDENSKÝ, J.: *MKP model nosníků z lepeného lamelového dřeva*. AT&P journal PLUS1 2007. Str.51-54. ISSN 1336-5010.
- KUKLÍKOVÁ, A. *Kompozitní dřevobetonové konstrukce*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební. 2004. Disertační práce.

- LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-273-X.
- LEBOW, S., WINANDY, J., BENDER. *Treated wood in transition - a lood at CCA and candidates to replace it*. *Frame Building News* 15(5), 2003, pp. 32-38.
- LEICHTI, R., J., GILHAM, P. C., TINGLEY, D., A. *Partially Reinforced Glulam Girders Used in a Light-Commercial Structure*. *Wood Design Focus*, 1994, str. 3-6.
- LEICHTI, R., J., GILHAM, P. C., TINGLEY, D., A. *The Taylor Lake Bridge: A Reinforced-Glulam Structure*. *Wood Design Focus*, 1993, Svazek 4, str. 3-4.
- LI, Y. F. , XIE, Y. M. , TSAI, M. J. *Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets*. 2009, *Construction and Building Materials*, s. 411-422.
- LINDENBERG, R. F. ReLAM. *A nonlinear stochastic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending*. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, ME, 2000.
- LOUD, S. *Three steps toward a composites revolution in construction*. 1996, *SAMPE Journal*, s. 5.
- MACHEK, V., SODOMKA, J.: *Polymery a kompozity s polymerní matricí; Nauka o materiálu. 4. část*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2008. 86 stran. ISBN 978-80-01-03937-4.
- MARTAUŠ, František. *Vývoj univerzální metody RTM pro obecné kompozitní průmyslové výrobky*. VZLÚ Praha, 2002.
- MARTIN, Z., A., TINGLEY, D., A. *Commercialization of FRP Reinforced Glulam Beam Technology*. World Conference on Timber Engineering. 2000, Poster P51.
- MARTIN, Z., A., TINGLEY, D., A. *Fire Resistance of FRP Reinforced Glulam Beams*. World Conference on Timber Engineering. 2000.
- MELNICK, S., 2000: *Fibre Reinforced Polymer Market Expands*. *Structure*. Springerlinck, s. 42-45.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Kompendium statistického zpracování dat: Metody a řešené úlohy*. Praha: Academia, 2006. 982 s. ISBN 80-200-1396-2.
- MICELLI, F., SCIALPI, V., LA TEGOLA, A. *Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods*. *Journal of Composites for Construction*, 2005, s. 337-347.
- MINSTER, J. *Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví, ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR*, 2006.

- MINSTER, J., HRISTOVÁ, M., *Moisture effects on long-term relaxation and creep characteristics of an epoxy resin*. Proceed. 11th International Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials, Sofia, October 2 - 4, 2006, s. 257-263.
- MOSALLAM, A., KREINER, J., GILLETTE, K. *Structural upgrade and repair of wood members using cross-ply carbon/epoxy*. 2000, International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), s. 45.
- MOTAVALLI, M., FLÜELER, P. *Characterization of Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastic Laminates*. Materials and Structures. 1998, Svazek 31, str. 178-180.
- MUFTI, A., ERKI, M., JAEGER, L. *Advanced Composite Materials with Application to Bridges*. Montreal, The Canadian Society, 1991.
- OZEL, M., BANK, L., 2000: *Mechanical testing of Pultruded FRP bars and plates for determination of In-plane Engineering Constants*. Dept of Civ. and Envir. Engrg., University of Wisconsin, Madison, WI.
- PLEVRIS, N., TRIANTAFILLOU, T., C. *Creep behavior of FRP-reinforced wood members*. 1995 Journal of structural engineering New York, N.Y., s. 174.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Príroda Bratislava. 1993, 485 s.
- PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1999. ISBN 80-7204-248-3.
- REDON, C., LI, V.C., WU, C., HOSHIRO H.; SAITO, T.; OGAWA, A., *Measuring and modifying interface properties of PVA fibres in ECC matrix*, Journal of Materials in Civil Engineering 13 (6), 2001, s. 399-406.
- REINPRECHT, L. *Ochrana dreva a kompozitov*. TU Zvolen, 1994, s. 1-9.
- REINPRECHT, L., ŠTEFKO, J.: *Dřevěné stropy a krovy, typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce*. ABF, a.s., Nakladatelství ARCH, Praha, 2000, 252 stran, ISBN 80-86165-29-9.
- ROHANOVÁ, A., KRAKOVSKÝ, A., KRÁL, Š. *The influence of carbon lamella on strength properties of spruce wood loaded by mechanical-thermo loading in bending*. In Drevarsky Vyskum/Wood Research, 2003, 48 (1-2) , pp. 43-52.
- ROMANI, M., BLASS, H. J. *Design model for FRP reinforced glulam beam*. In International Council for Research on Innovation in Building and Construction.

- Working Commission W18 - Timber Structures. Venice, Italy: Meeting 34, 2001, pp. 1-10.
- ŠTEFKO, J., GRNIAK, M. *Zosilňovanie drevených konštrukcií lamelami na báze uhľikových vlákien*. Záverečná správa. 2001. 21 s.
- ŠTĚPÁNEK, P. *Seminář CONCON 2000 - Spřažené konstrukce*, Praha, 2000, s. 95-108.
- TINGLEY, D., A. et al. *Long Term Load Performance of FRP Reinforced Glulam Bridge Girders*. National Conference on Wood Transportation Structures. 1996, str. 201-206.
- TINGLEY, D., A. et al. *Testing Methods to Determine Properties of Fibre Reinforced Plastic Panels Used for Reinforcing Glulams*. Journal of Composites for Construction. 1997, str. 160-167.
- TINGLEY, D., A. *High-Strength Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement of Wood and Wood Composites*. 41st International SAMPE Symposium. 1996, str. 667-678.
- TINGLEY, D., A. *Wood and Wood Composites Reinforced with High-Strength, Fiber-Reinforced Plastic: Innovative, Cost Effective, Structural Materials*. Matrice Technology Ltd., 1996, str. 85-87.
- TINGLEY, D., A., CEGELKA, S. *New Compression Based Design Principals for Reinforced Glulams*. Materials for the New Millennium, 4th Materials Engineering Conference. 1996, str. 1479-1491.
- TINGLEY, D., A., DANDU, R. *FRP Properties on Performance of FRP Reinforced Bridge Girders*. Structure Congress XV. 1997, Svazek 1, str. 575-579.
- TINGLEY, D., A., LEICHTI, R. J. *Glued-Laminated Beams Having a High-Strength Fibre Reinforcement: The Bimaterial Interface*. Pacific Timber Engineering Conference, 1994, str. 665-675.
- TRIANAFILLOU, T. C., DESKOVIC, N. *Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members*. 1992, Journal of structural engineering New York, s. 1270.
- TRIANAFILLOU, T., C. *Shear reinforcement of wood using FRP materials*. 1997, Journal of Materials in Civil Engineering, s. 65-69.
- VÍDEŇSKÝ J. *Dřevěné prvky s nanosenou vrstvou kompozitu*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební. 2012. Disertační práce.
- VYHNÁLEK, R. *Nelineární chování dřevěných konstrukcí s kovovými spoji*. Praha: Písemná práce ke státní doktorské zkoušce, 2005.

9.2 Internetové zdroje

- BLASS, H. J., ROMANI, M. *Reinforcement of glulam beams with FRP reinforcement* [Online]. University of Karlsruhe, Germany. 2000. [cit. 2012-7-22]. Dostupné z [www: <http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gc20/IHB/PUBLIC/23.pdf>](http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gc20/IHB/PUBLIC/23.pdf).
- BRUNNER, M., SCHNUERIGER, M.: *Timber beams strengthened with prestressed fibres: Delamination* [Online]. Biel, Switzerland. 2004. [cit. 2012-7-21]. Dostupné z [www: <http://www.ewpa.com/Archive/2004/jun/Paper_059.pdf>](http://www.ewpa.com/Archive/2004/jun/Paper_059.pdf).
- COMPOSITES CENTER. *Advanced Structures & Composites Center*. [Online]. 2013 [cit. 2013-1-29]. Dostupné z [www: <http://www2.umaine.edu/aewc/content/blogcategory/15/38/>](http://www2.umaine.edu/aewc/content/blogcategory/15/38/).
- DAWEX. [Online]. [cit. 2013-1-26]. Dostupné z [www: <http://www.dawex.cz/lepidla-a-lepici-systemy/polyuretanova-pruzna>](http://www.dawex.cz/lepidla-a-lepici-systemy/polyuretanova-pruzna).
- ELEARNING TUL. [Online]. [cit. 2013-1-27]. Dostupné z [www: <http://e-learning.tul.cz/cgi-bin/elearning/elearning.fcgi?stranka=publ_tema&akce=tisk&ID_tema=73>](http://e-learning.tul.cz/cgi-bin/elearning/elearning.fcgi?stranka=publ_tema&akce=tisk&ID_tema=73).
- EYMAA, F., MÉAUSOONEA P-J., MARTIN P. *Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process*. [Online]. Journal of Materials Processing Technology. Volume 148, Issue 2, 15 May 2004, Pages 220–225. [cit. 2012-2-24]. Dostupné z [www: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360300880X>](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360300880X).
- FIGLIARELLI, J., DIAS, A. A. *Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber* [Online]. In Materials Research, vol. 6, no. 2, 2003, pp. 193-202. [cit. 2011-4-21]. Dostupné z [www: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v6n2/16023.pdf>](http://www.scielo.br/pdf/mr/v6n2/16023.pdf).
- GAGHER, H., J. *Performance wood composites for construction* [Online]. In VII EMBRAMEM, Sao Carlos, Brasil. 2000 [cit. 2012-7-10]. Dostupné z [www: <http://www.cmec.wsu.edu/publications/NTross.pdf>](http://www.cmec.wsu.edu/publications/NTross.pdf).
- HORSKÁ, P. *Příprava polymerních kompozitů: skleněné vlákno/polyesterová pryskyřice* [online]. 2009. [cit. 2011-4-20]. Dostupné z [www: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13702>](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13702).
- KOŘÍNEK, Z. 2. vlákna [Online]. Nedatováno. Str. 2-55. [cit. 2011-4-21]. Dostupné z [www: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>](http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf).

- KUKLÍK, P., MELZEROVÁ, L., VÍDENSKÝ, J. *Návrhový model pro nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztuženého FRP*. [Online]. Praha. Vystaveno 6. 12. 2005. [cit. 2012-6-26]. Dostupné z www: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/>.
- KUKLÍK, P.: *Dimenzování prvků dřevěných konstrukcí*. [Online]. Nedatováno. [cit. 2012-4-21]. Dostupné z www: http://www.prolignum.cz/fileadmin/prolignum/media.cz/7_Dimenzova%CC%81ni%CC%81%20prvku%CC%8A%20dr%CC%8C%8C%8C%8Cny%CC%81ch%20konstrukci%CC%81_Petr%20Kukli%CC%81k.pdf.
- LINDYBERG, R., F. *FRP-Glulam Beams Modeling and Code Approval*. [Online] 2009 [cit. 2012-5-19]. Dostupné z www: <http://bridges.transportation.org/Documents/FRPGLulamBeams.pdf>.
- MELZEROVÁ, L., KUKLÍK, P. 2009. *Beams from the Glued Laminated Timber Experiment versus FEM Model*. In World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009, pp. 258-262.
- MOCHIDAA, I., KORAIA, Y., KUA, Ch., WATANABEA, F., SAKAIB, Y. *Chemistry of synthesis, structure, preparation and application of aromatic-derived mesophase pitch*. Carbon. Volume 38, Issue 2, 2000, Pages 305–328.
- MOJDOM. [Online]. *Oprava poškozeného stropu*, 2010 [cit. 2012-1-4]. Dostupné z www: <http://mojdom.zoznam.sk/cl/10027/382793/Oprava-poskodeneho-stropu>.
- NILSSON T., ROWELL R. *Historical wood – structure and properties*. [Online]. Journal of Cultural Heritage, Volume 13, Issue 3, Pages S5-S9, 2012. [cit. 2012-2-24]. Dostupné z www: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207412000659>.
- PRINCE ENGINEERING. [Online]. [cit. 2013-1-27]. Dostupné z www: [http://www.build-on-prince.com/carbon-fiber.html#gallery\[pageGallery\]/3/](http://www.build-on-prince.com/carbon-fiber.html#gallery[pageGallery]/3/).
- SIKA s.r.o. [Online]. 2010 [cit. 2012-10-04]. Dostupné z www: http://cze.sika.com/content/czech_republic/main/content/dam/Czech_Republic/Main/01_General/cz_news/2010/20100525_cz_con_velkypartner.pdf.
- SIROKAA, B., NOISTERNIGB, M., GRIESSERB, U., J., BECHTOLD, T. *Characterization of cellulosic fibers and fabrics by sorption/desorption*. [Online]. Carbohydrate Research. Volume 343, Issue 12, 11 August 2008, Pages 2194–2199. [cit. 2012-6-23]. Dostupné z www:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008621508000529>>.

STADO CZ s.r.o. [Online]. 2007 [cit. 2012-10-04]. Dostupné z www:

<http://www.stado.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=250>.

STEIGER, R.: *Bonding of Carbon Fibre-reinforced Plastics with Wood* [Online].

Dübendorf, Switzerland. 2010. [cit. 2012-7-5]. Dostupné z www:

<http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/33921/---/l=1>.

ŠILHAN, O. *Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží*

[Online]. Časopis stavebnictví, 2008, č. 06. [cit. 2011-4-20]. Dostupné z www:

<http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecnelepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21>.

TOMKOVÁ, B. *Využití predikce vlastností kompozitů s textilní výztuží*

pro optimalizaci výrobního procesu [Online] 2007. [cit. 2011-4-21]. Dostupné z

www: <<http://www.statspol.cz/request/request2006/sbornik/tomkova.pdf>>.

VÍDEŇSKÝ, J., MELZEROVÁ, L. *Numerický model lepených lamelových nosníků*

vyztužených lamelou ze skelných vláken. Juniorstav 2007. [Online] 2007 [cit. 2012-3-

2]. Dostupné z www:

<http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce_2.2/Vidensky_Jan_CL.pdf>.

Webové stránky firmy Compass stavební chemie s.r.o. *Technický list produktu Sikadur*

330 [online]. Vystaveno leden 2006. [cit. 2011-04-21]. Dostupné z www:

<http://www.compassholding.com/media/file/cz-con-tds-sikadur_330.pdf>.

Webové stránky prodejce uhlíkových vláken Sika CZ, s. r. o. *Technický list produktu*

SikaWrap®-600 C/120 [online]. Vystaveno červen 2006. [cit. 2011-04-21].

Dostupné z www: <<http://cz01.webdms.sika.com/files/show.do?documentID=482>>.

Webové stránky firmy SIKA SK, s. r. o. *PREVIADUR – zesilování konstrukcí*

uhlíkovými vlákny [online]. Nedatováno. [cit. 2011-5-11]. Dostupné z:

<http://www.sika.sk/cz-connews-mat7_2004.pdf>.

9.3 Normy

ČSN EN 1611-1. *Řezivo – Vizuální třídění jehličnatého dřeva – Část 1: Evropské*

smrky, jedle, borovice a douglasky. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12

s.

- ČSN 49 0108. *Dřevo – Zisťovanie hustoty*. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993. 5 s.
- ČSN 49 0116. *Dřevo. Metoda zjišťování modulu pružnosti ve statickém ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1980. 8 s.
- ČSN 49 0128. *Skúšky vlastností rastlého dreva – Metóda zisťovania zosýchavosti*. Vydavateľstvá ÚNM, 1989. 20 s.
- ČSN 49 0231. *Přídavky na opracování řeziva a přířezů řeziva, drsnost povrchu výrobků ze dřeva a na bázi dřeva*. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993. 8 s.
- ČSN 73 2824-1. *Třídění dřeva podle pevnosti - Část 1: Jehličnaté řezivo*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 24 s.
- ČSN EN 13183-1. *Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou*. Český normalizační institut, 2002. 8 s.
- ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 12 s.
- ČSN EN 380. *Dřevěné konstrukce. Zkušební metody. Všeobecné zásady pro statické zatěžovací zkoušky*. Český normalizační institut, 1995. 8 s.
- ČSN EN 384. *Konstrukční dřevo - Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 20 s.
- ČSN EN 386. *Lepené lamelové dřevo - Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky*. Český normalizační institut, 2002. 16 s.
- ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2006. 114 s.
- ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Český normalizační institut, 2006. 68 s.
- ČSN EN 408 +A1. *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 32 s.

9.4 Software

ANSYS 14.0, ANSYS, Inc. – program pro výpočet konstrukcí pomocí metody konečných prvků (MKP)

AutoCAD 2012, Autodesk, Inc. – kreslení obrázků použitých v práci

CorelDRAW 12, Corel Corporation – kreslení obrázků použitých v práci

Česká trial verze programu Statistica 8, dostupná z www:

<<http://www.statsoft.cz/podpora/kestazeni/Normy>>.

Microsoft Office 2007, Microsoft Corporation – MS Word, MS Excel

9.5 Publikace autora

- SVITÁK, M., BARCÍK, Š., RYSPLER, J. APPLICATION OF CARBON FIBERS ON WOOD BEAMS. ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN. 2013. S. 5 - 13. 55 (2). ISSN 1336-3824.
- RYSPLER, J., SVITÁK, M. EVALUATION OF THE IMPACT OF STRUCTURAL REINFORCING FIBERS ON THE FATIGUE WOOD PINE FOREST UNDER CYCLIC LOADING. THE 8TH INTERNATIONAL SCIENCE CONFERENCE CHIP AND CHIPLESS WOODWORKING PROCESSES, 6. - 8. 9. 2012, ZVOLEN: TECHNICAL UNIVERSITY IN ZVOLEN, SLOVAKIA, ISBN: 978-80-228-2385-2
- SVITÁK, M., PODHORA, O., RYSPLER, J., BARCÍK, Š. THE MODEL OF SOLID WOOD BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBERS. THE 8TH INTERNATIONAL SCIENCE CONFERENCE CHIP AND CHIPLESS WOODWORKING PROCESSES, 6. - 8. 9. 2012, ZVOLEN: TECHNICAL UNIVERSITY IN ZVOLEN, SLOVAKIA, ISBN: 978-80-228-2385-2
- SVITÁK, M., VEITH, P., BARCÍK, Š. RESEARCH AND APPLICATION OF CARBON FIBERS FOR TIMBERING WOODEN BEAM. THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE WOODWORKING TECHNIQUES, 7. - 10. 9. 2011, PRAHA: CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE, CZECH REPUBLIC, ISBN: 978-80-213-2182-3
- SVITÁK, M. RESEARCH AND APPLICATION OF CARBON FIBERS FOR REINFORCEMENT OF WOOD BEAMS. 1. ROČNÍK, INTERDISCIPLINÁRNÍ MEZINÁRODNÍ VĚDECKÁ KONFERENCE DOKTORANDŮ QUAERE, 25. 4. 2011, HRADEC KRÁLOVÉ: MAGNANIMITAS, ISBN: 978-80-904877-3-4, ETTN: 085-11-11007-04-1

10 PŘÍLOHY

Seznam příloh:

Příloha č. 1: Vyjádření průběhu normálového napětí S_x včetně transverzální roviny, průběhu smykového napětí S_{xy} včetně transverzální roviny a průhybu konstrukčních prvků.

Příloha č. 2: Výsledky zatěžovací síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro jednotlivé prvky z modelu MKP.

Příloha č. 3: Porovnání výsledných hodnot zatěžovací síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro jednotlivé prvky z modelu MKP.

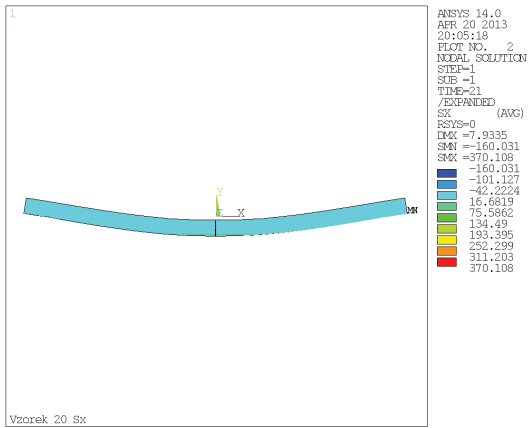
Příloha č. 4: Významnost sledovaných faktorů zatěžovací síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu z modelu MKP s příslušnými Tukeyovo HSD testy.

Příloha č. 5: Technické listy uhlíkové tkaniny a použitých adheziv.

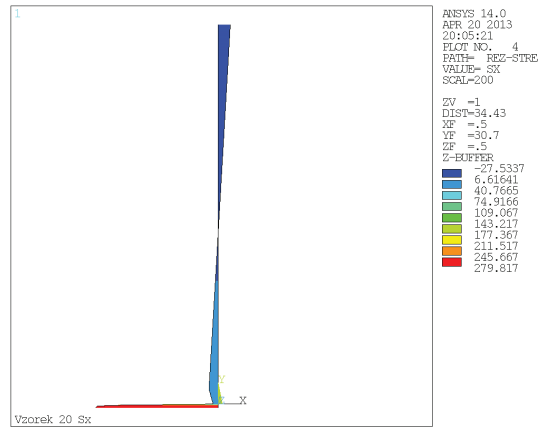
Příloha č. 6: Foto dokumentace.

Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 20

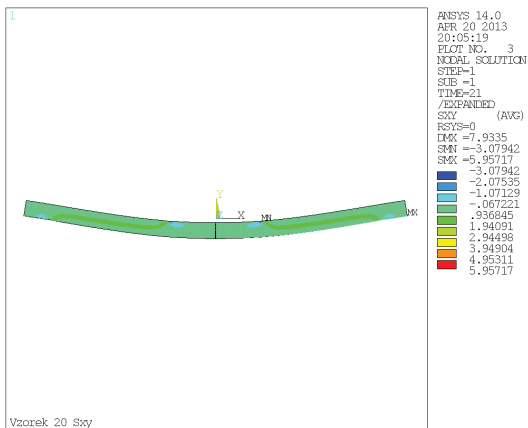
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



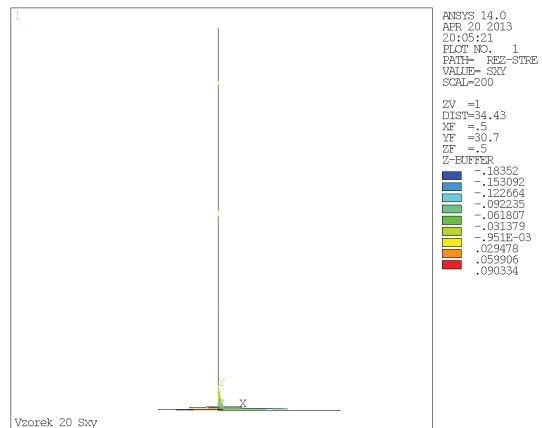
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



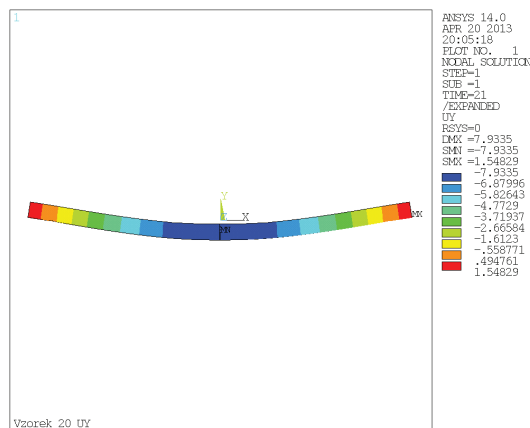
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

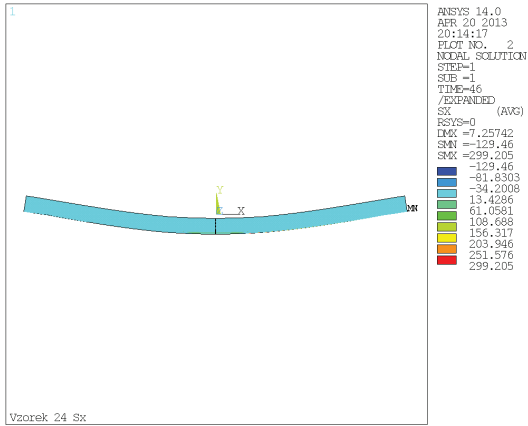


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

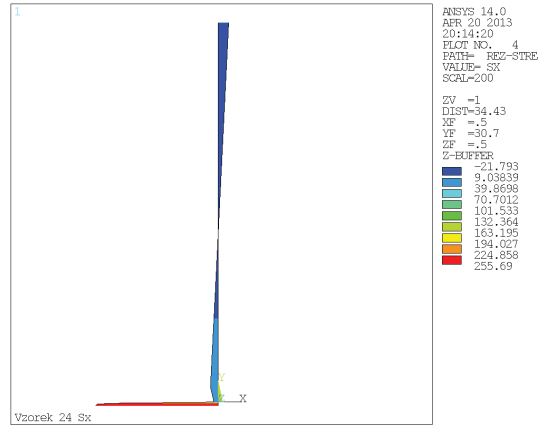


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 24

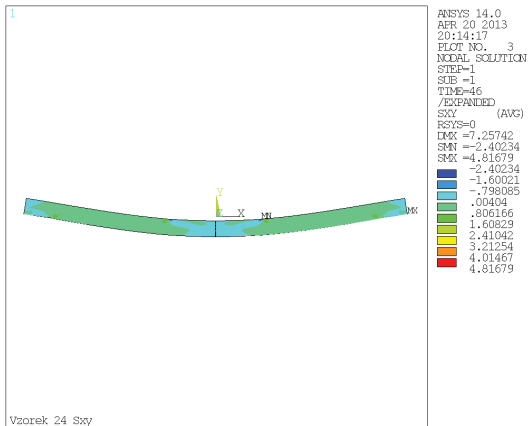
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



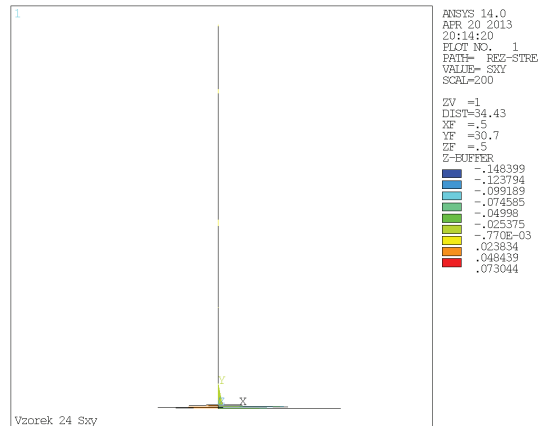
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



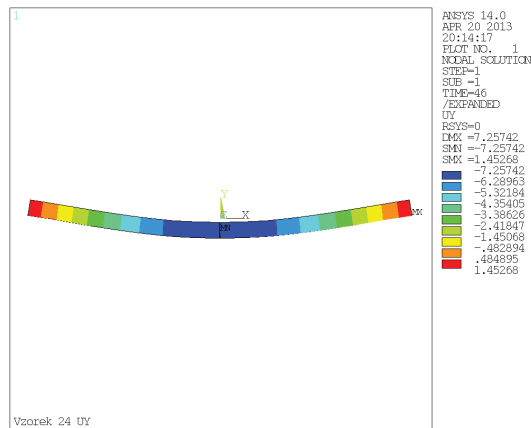
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

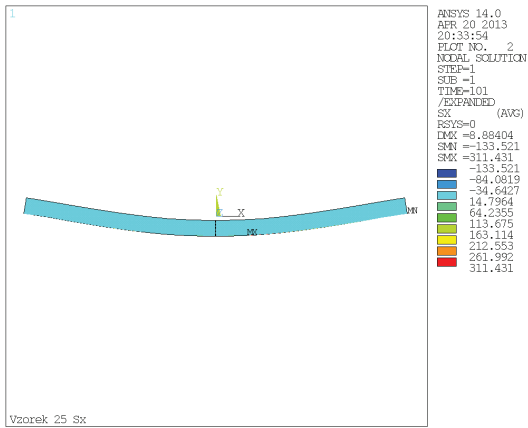


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

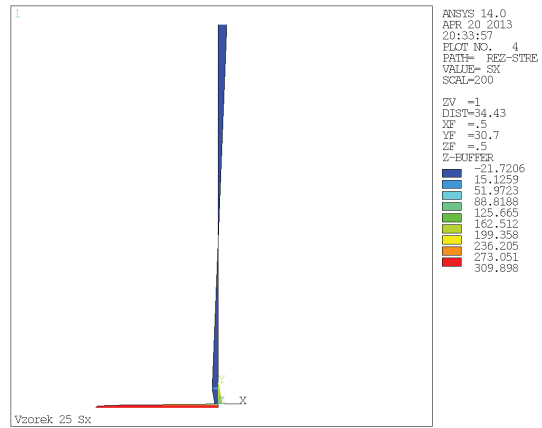


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 25

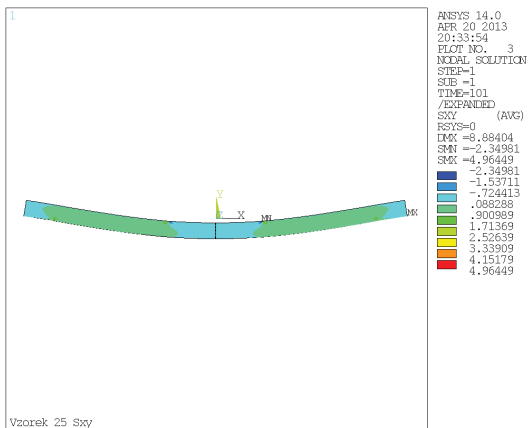
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



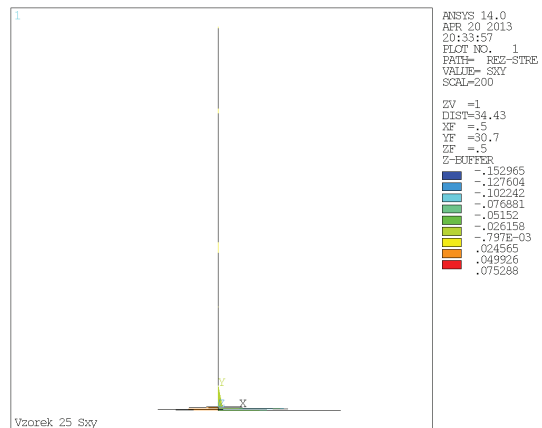
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



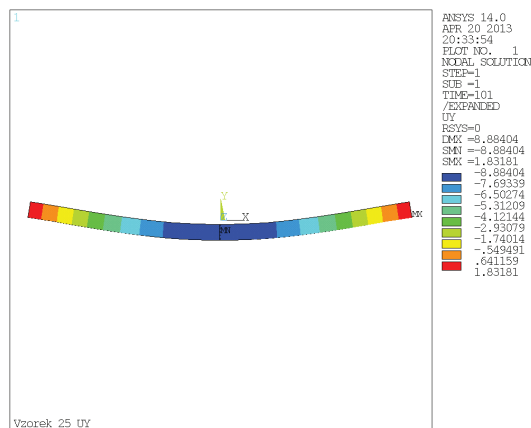
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

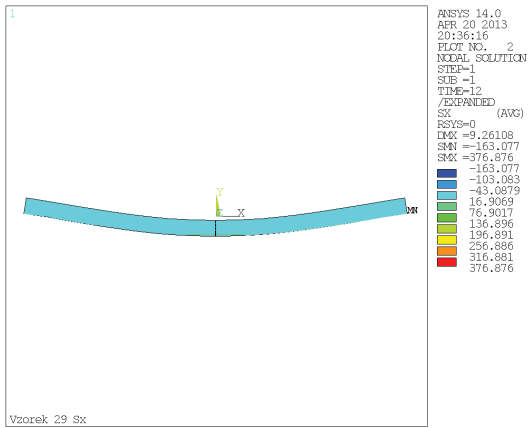


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

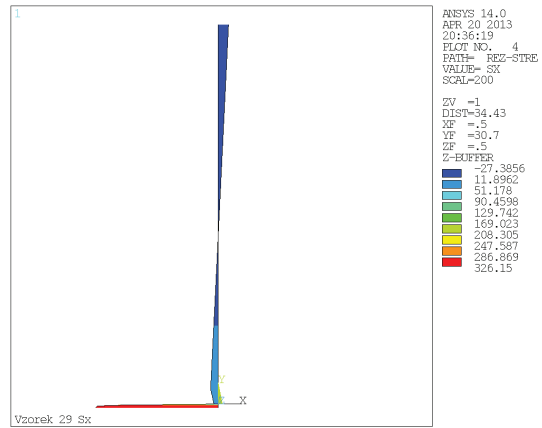


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 29

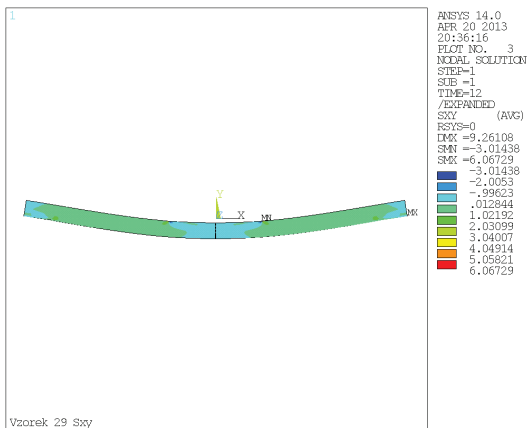
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



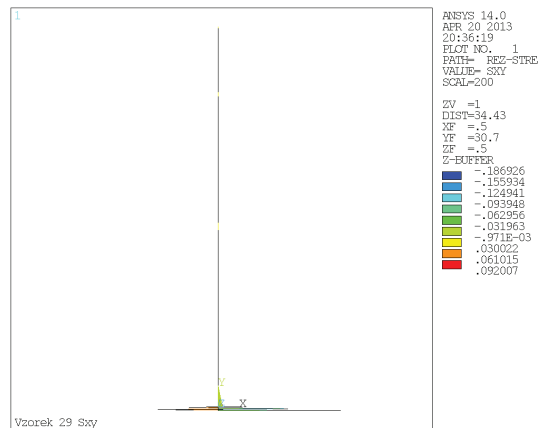
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



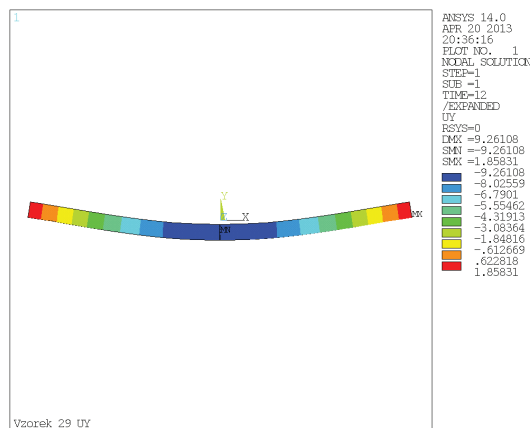
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

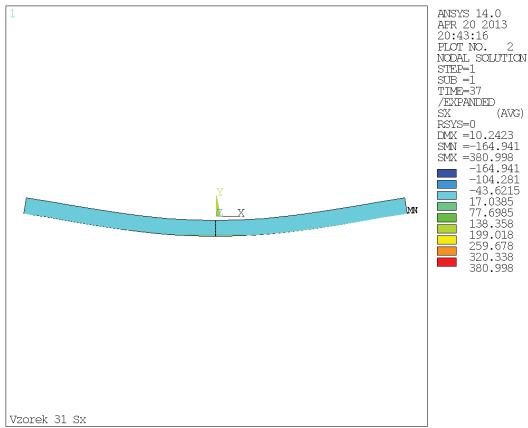


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

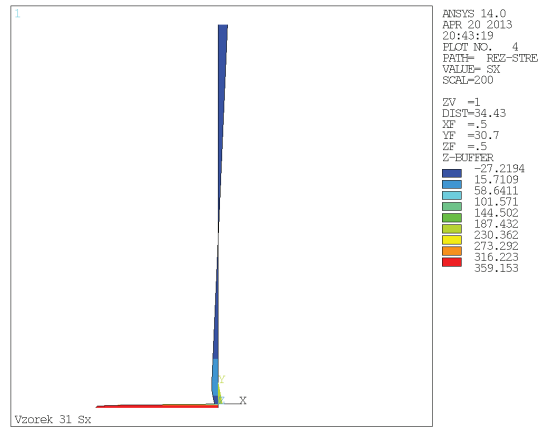


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 31

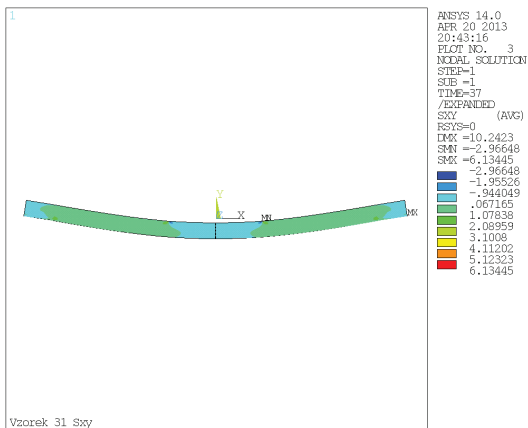
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



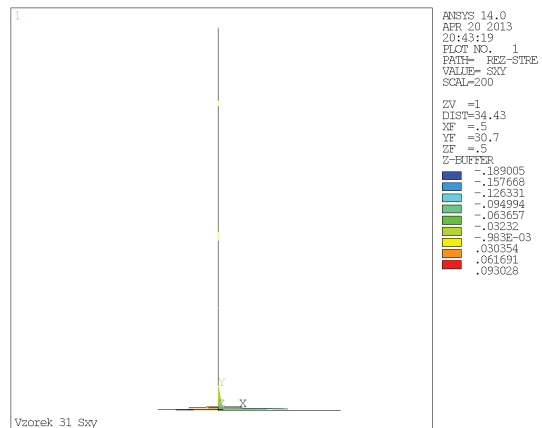
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



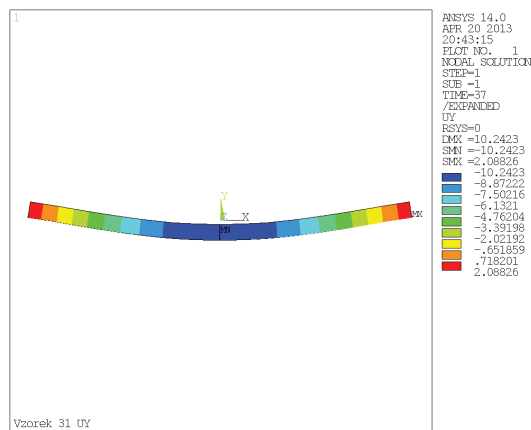
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

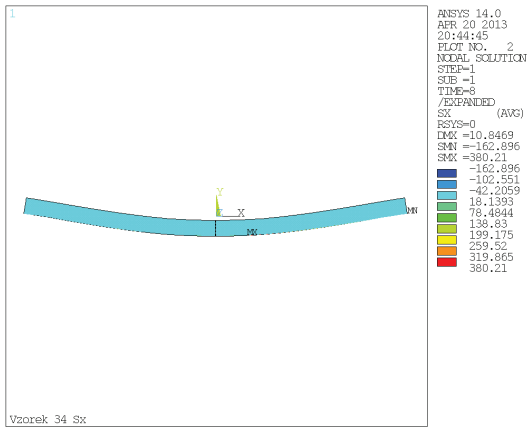


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

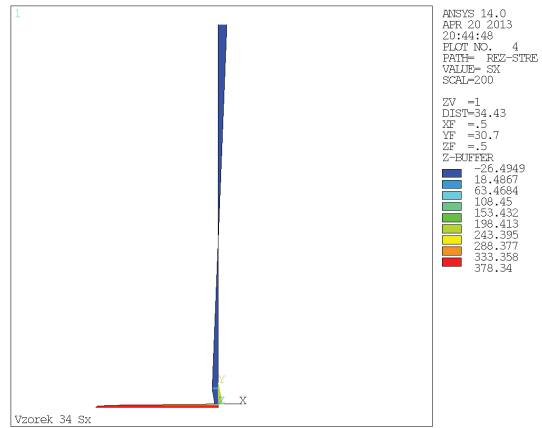


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 34

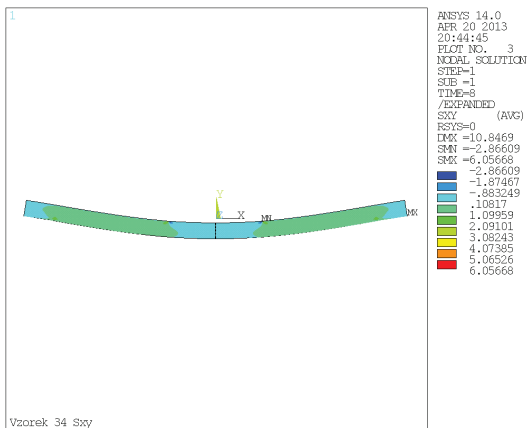
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



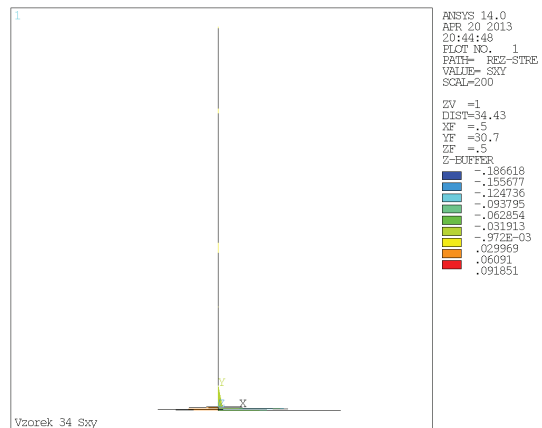
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



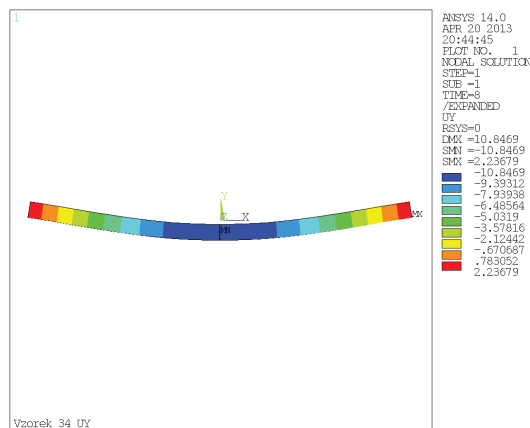
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

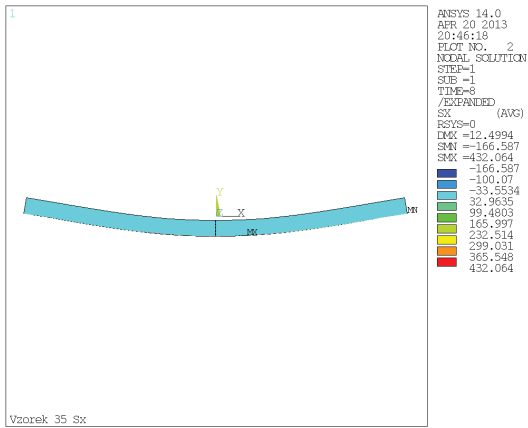


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

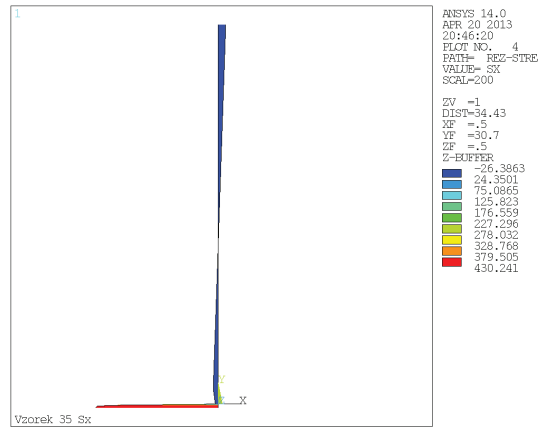


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 35

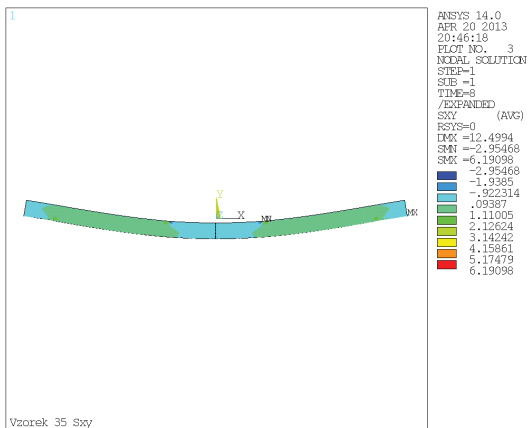
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



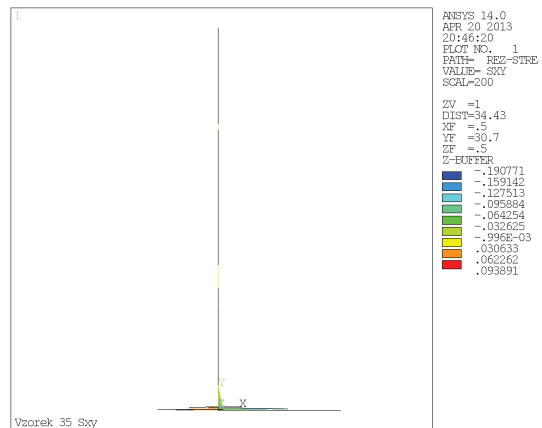
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



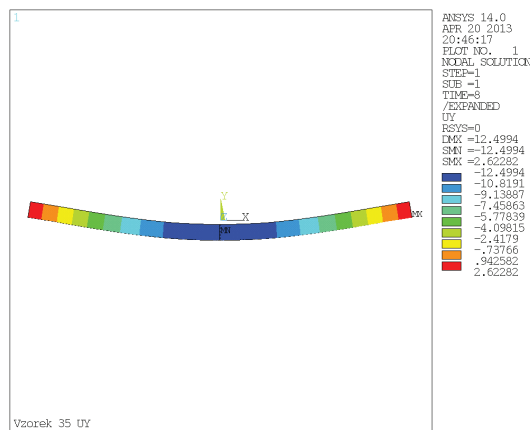
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

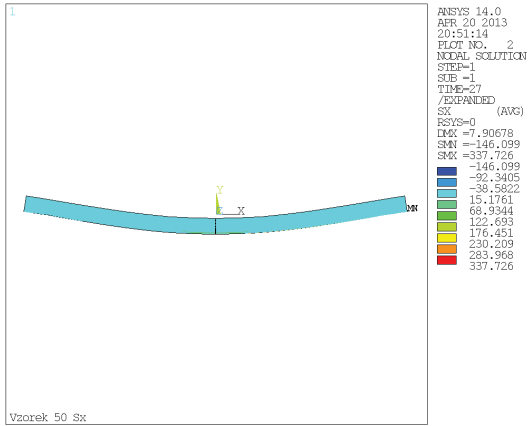


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

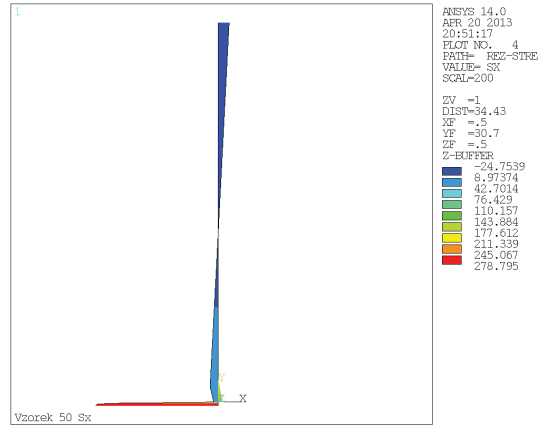


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 50

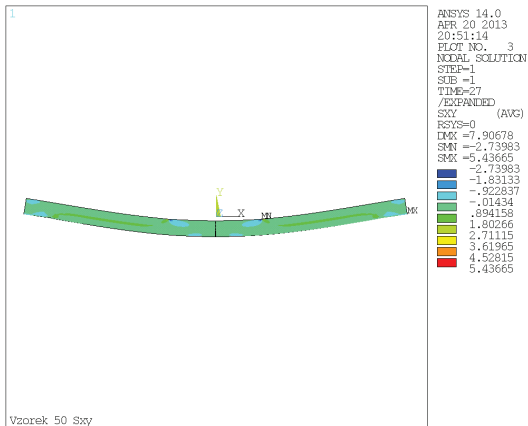
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



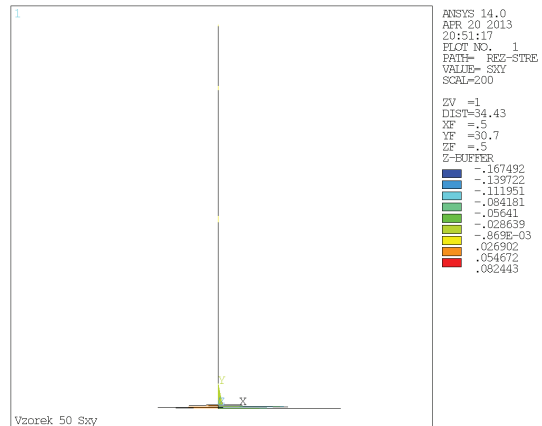
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



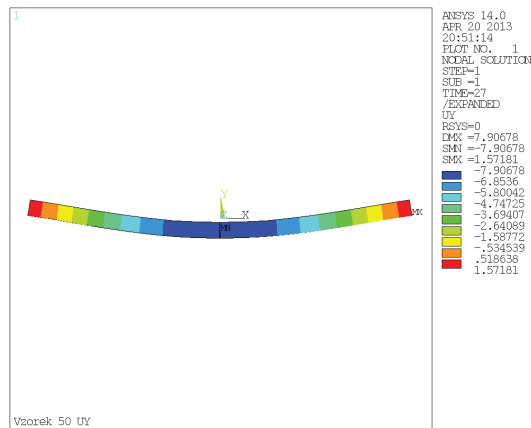
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

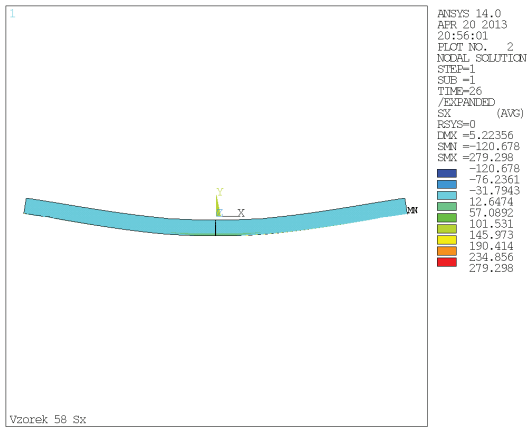


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

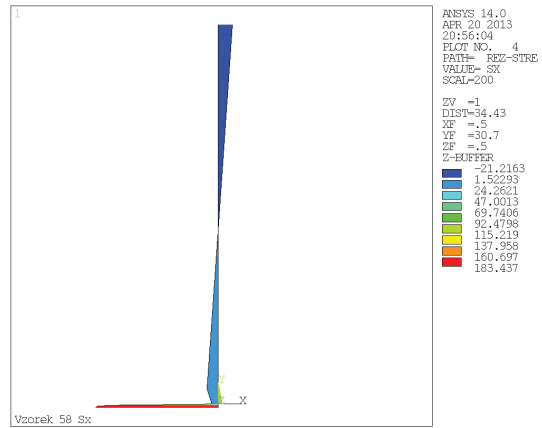


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 58

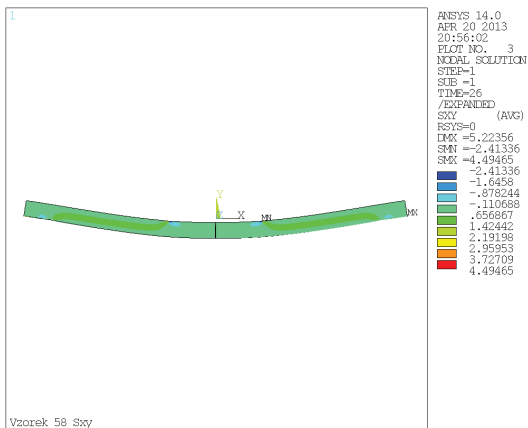
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



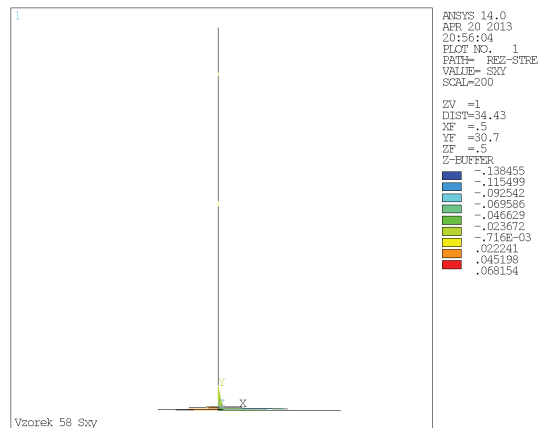
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



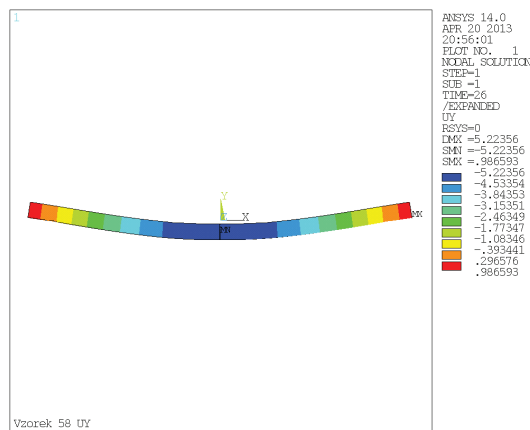
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

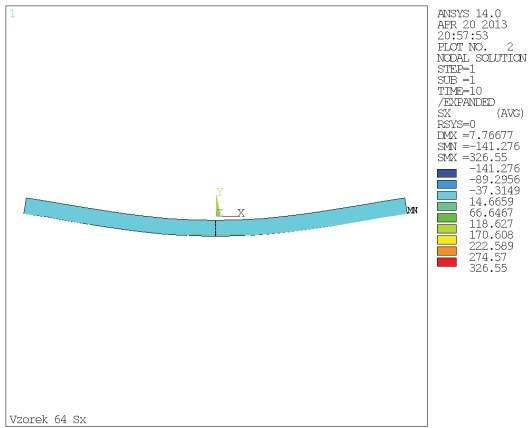


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

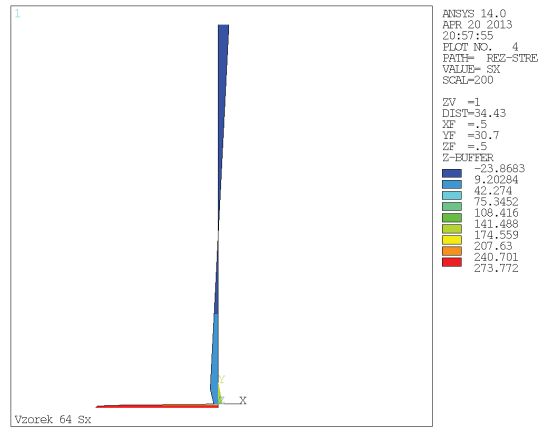


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 64

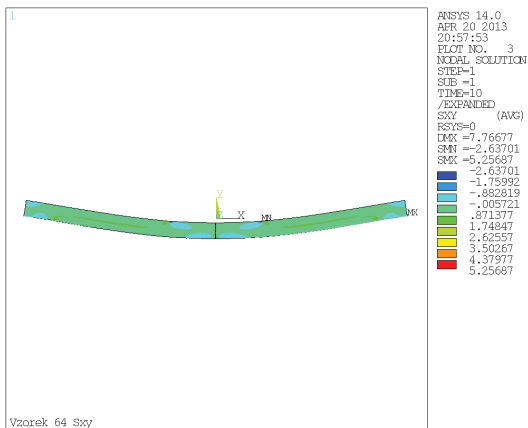
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



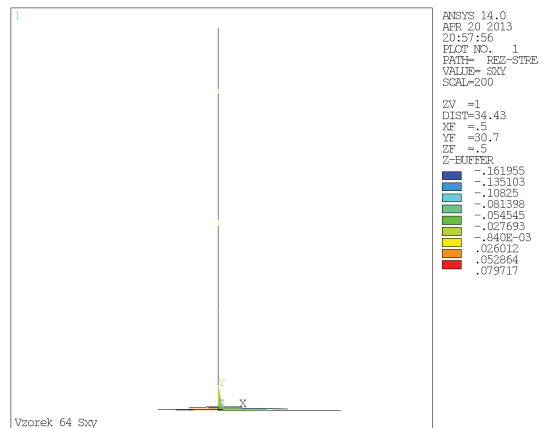
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



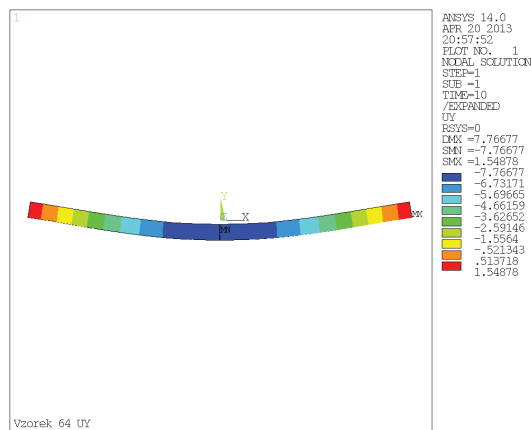
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

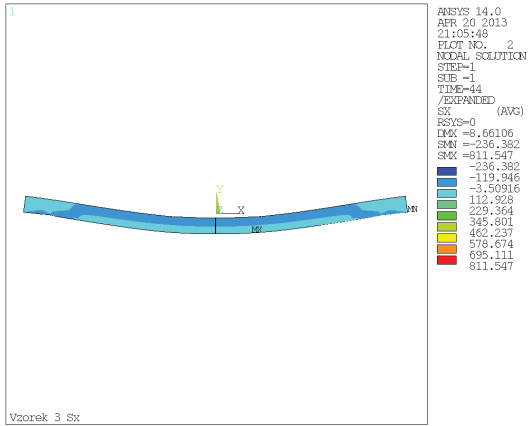


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

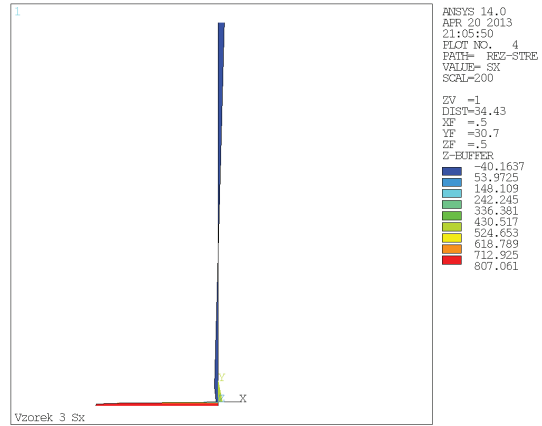


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 3

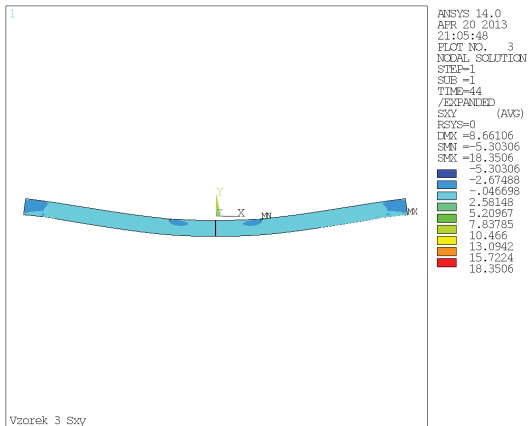
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



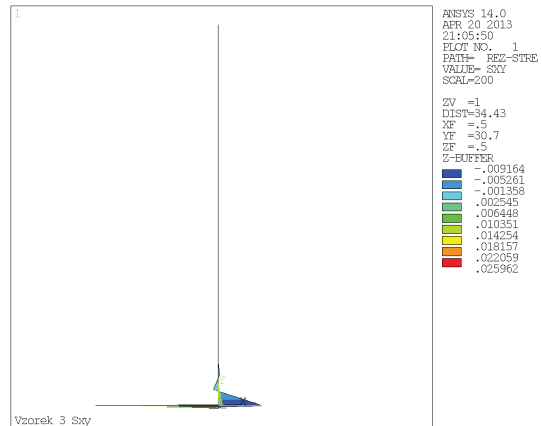
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



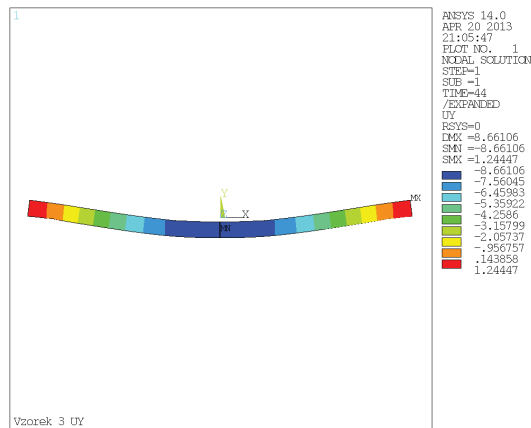
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

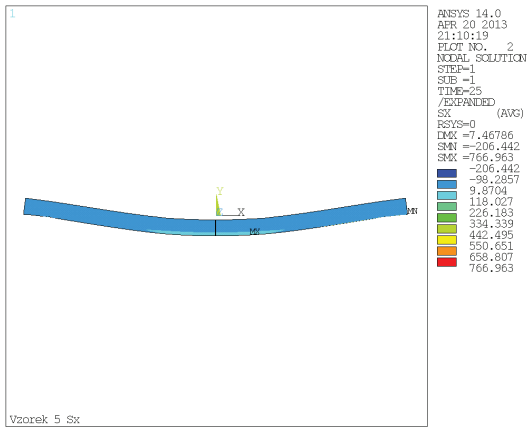


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

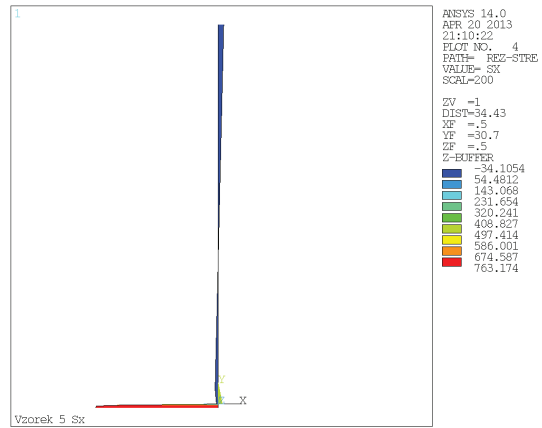


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 5

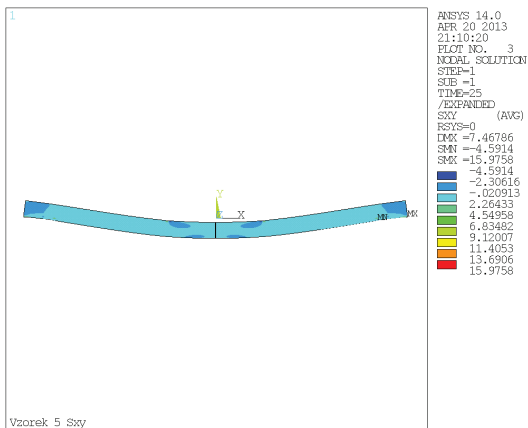
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



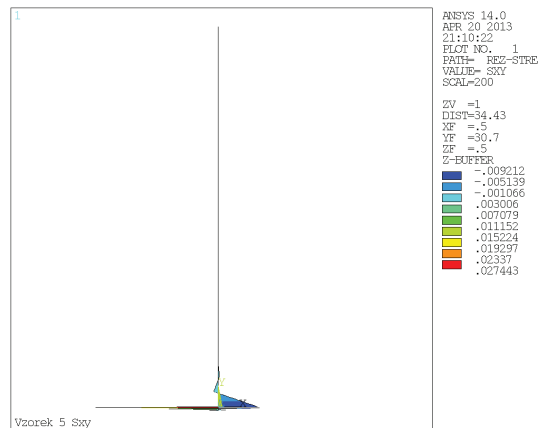
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



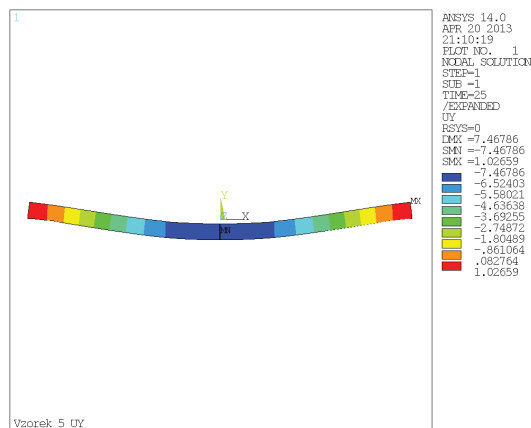
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

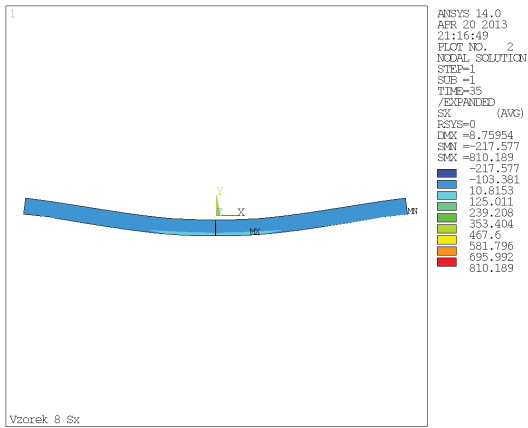


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

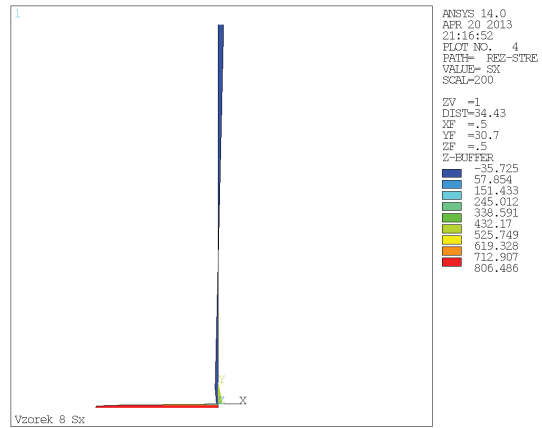


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 8

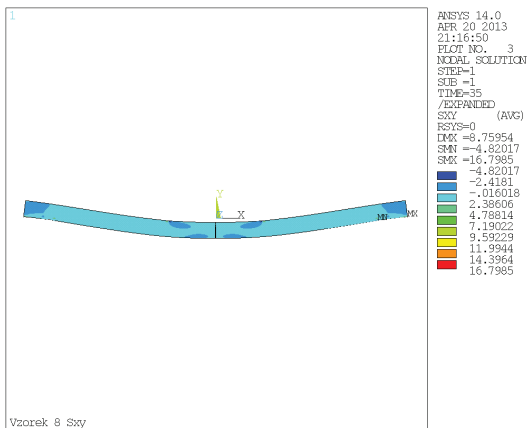
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



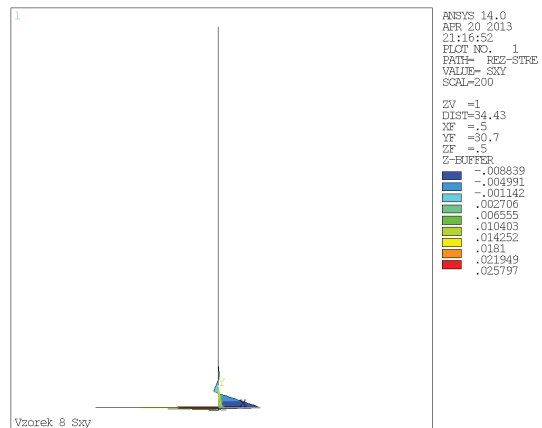
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



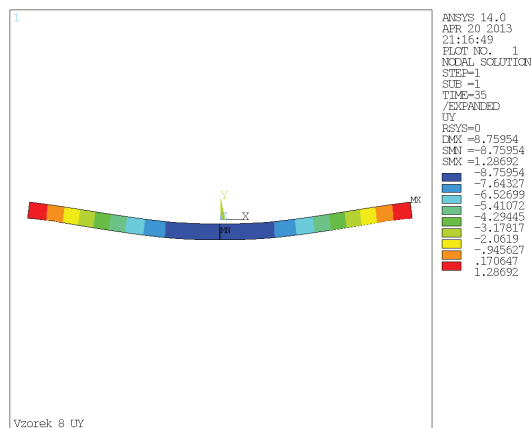
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

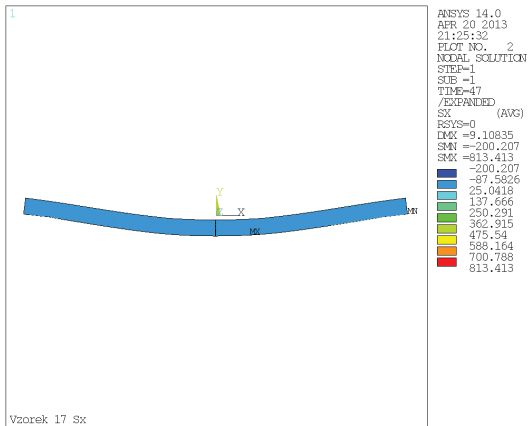


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

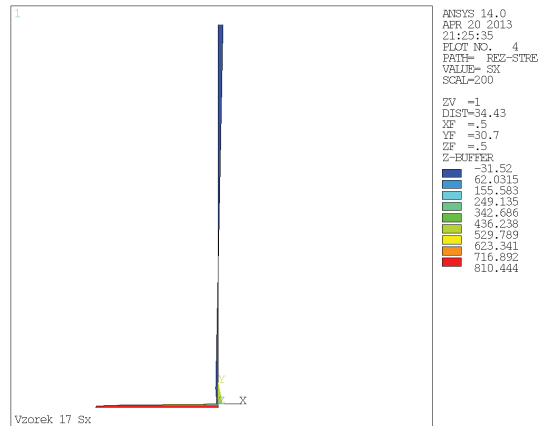


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 17

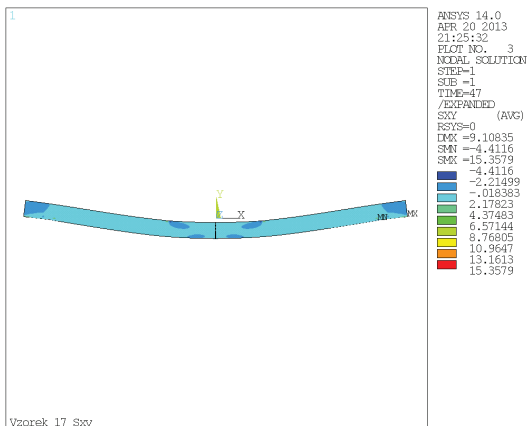
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



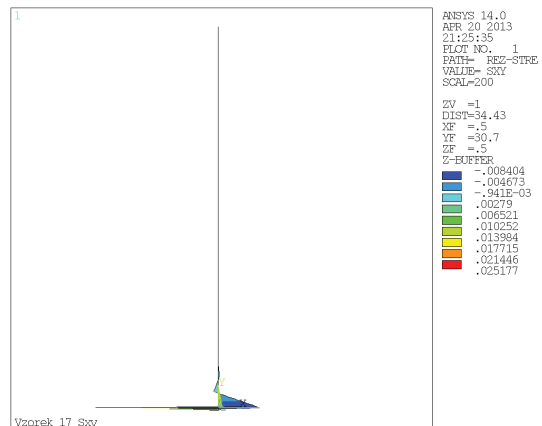
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



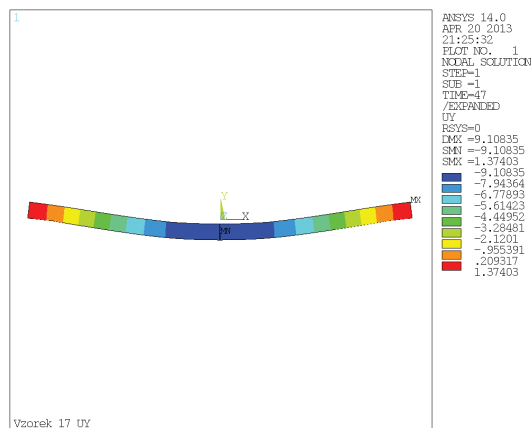
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

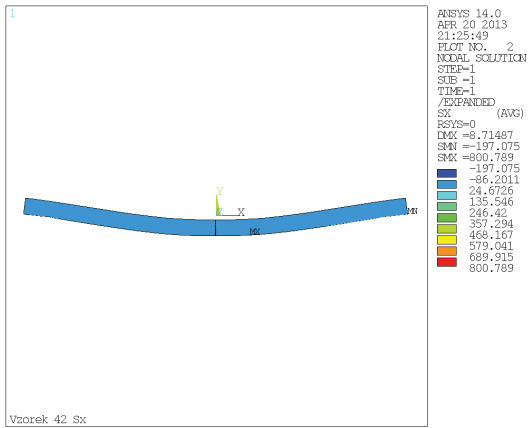


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

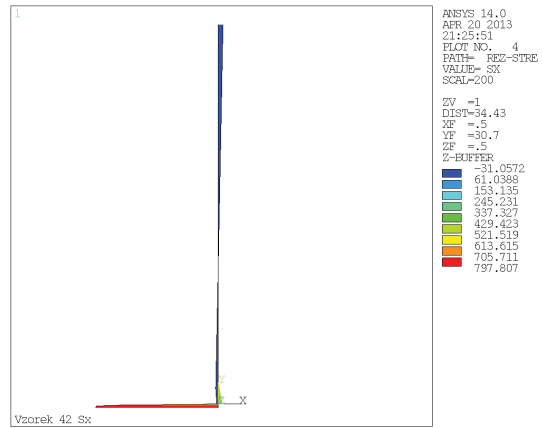


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 42

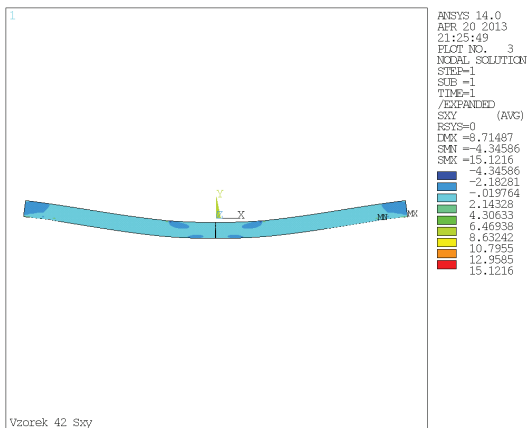
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



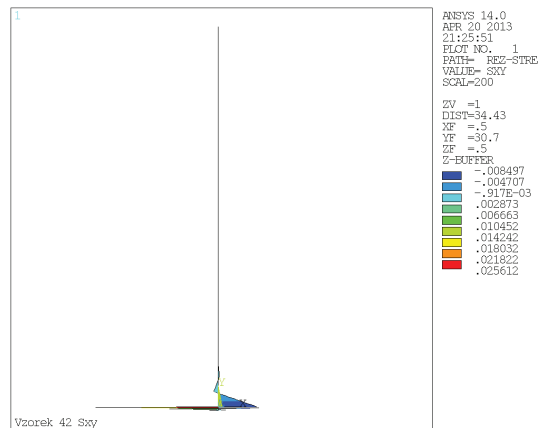
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



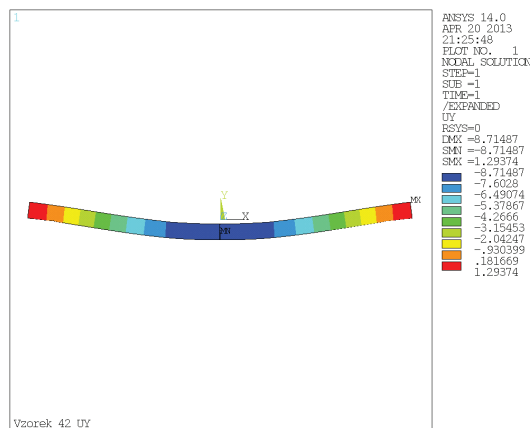
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

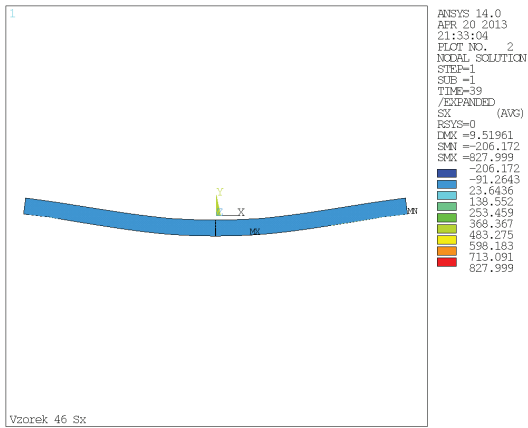


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

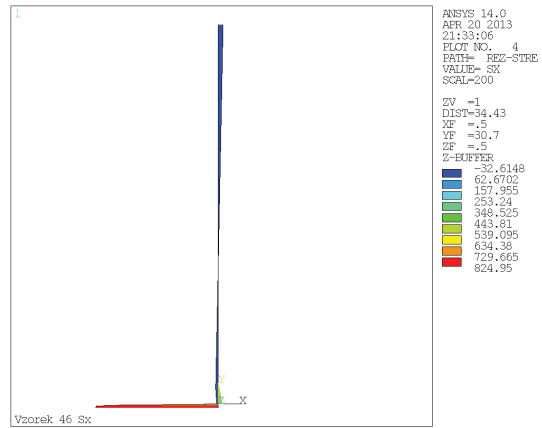


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 46

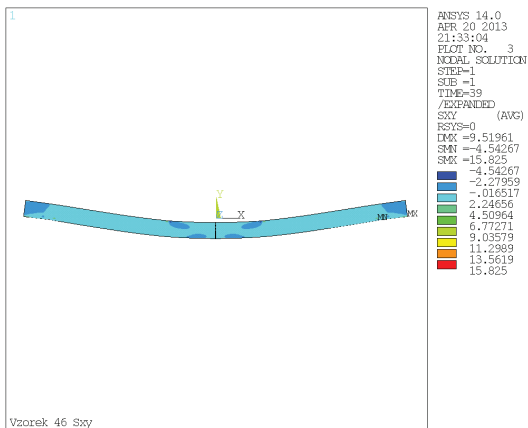
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



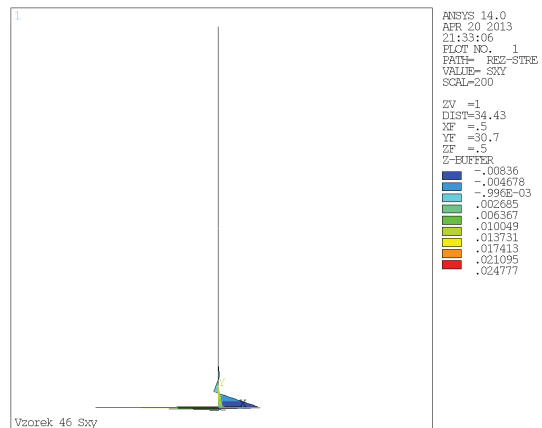
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



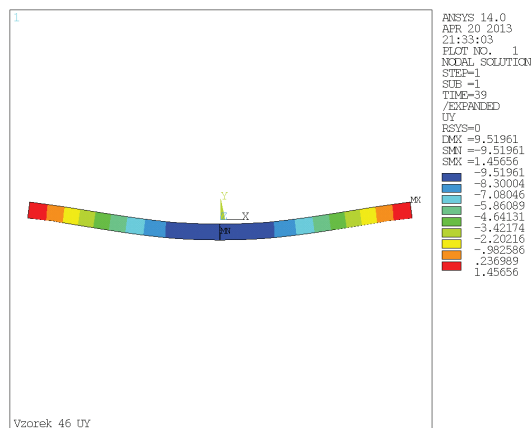
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

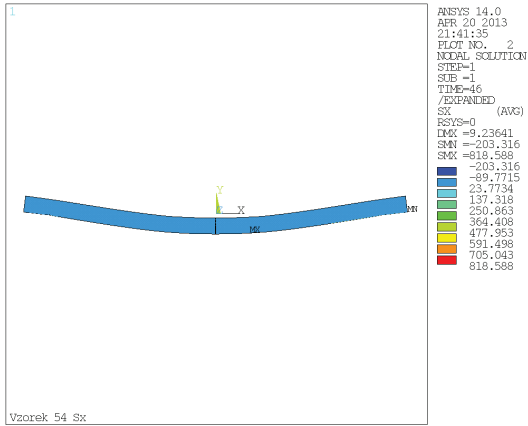


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

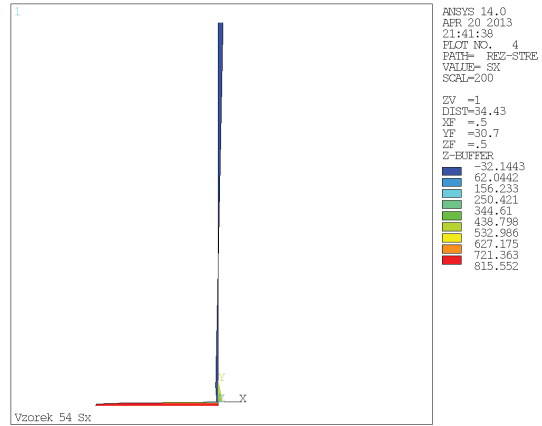


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 54

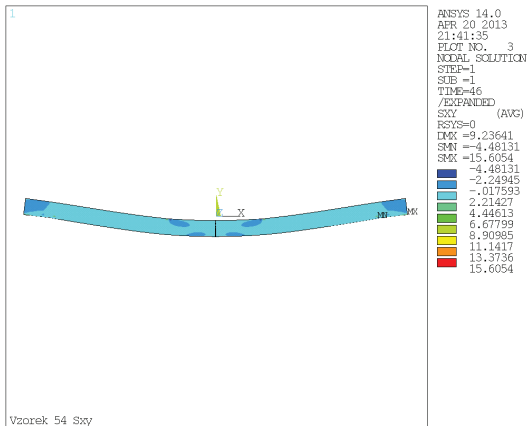
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



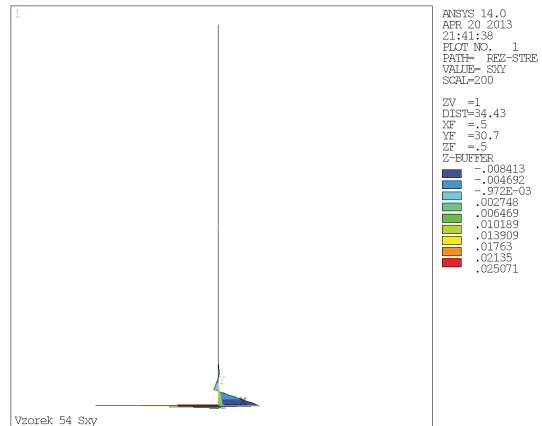
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



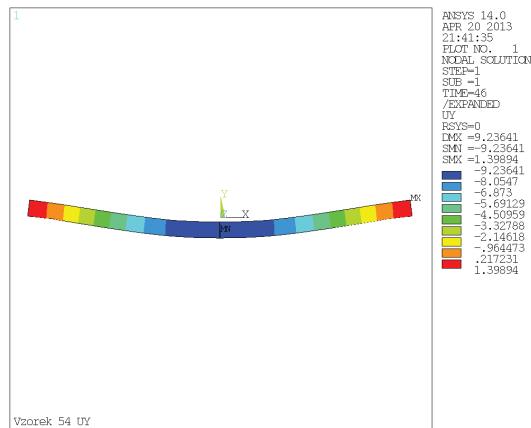
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

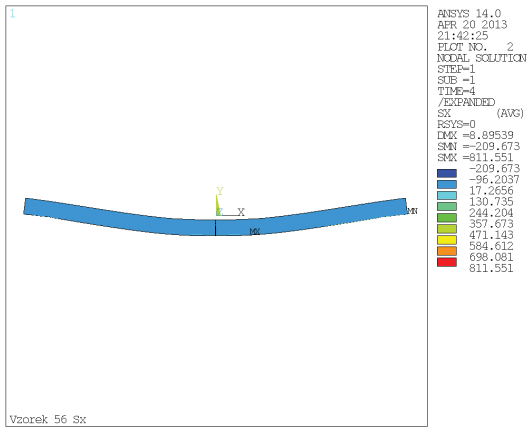


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

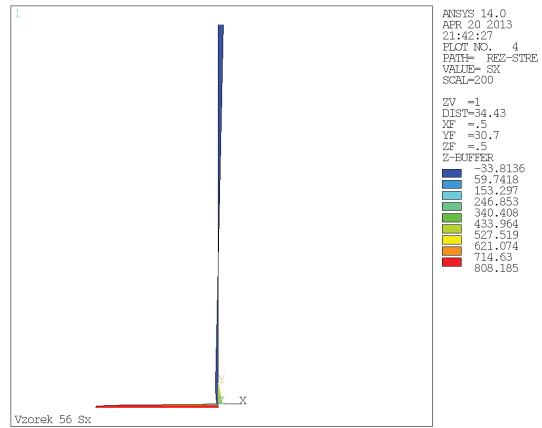


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 56

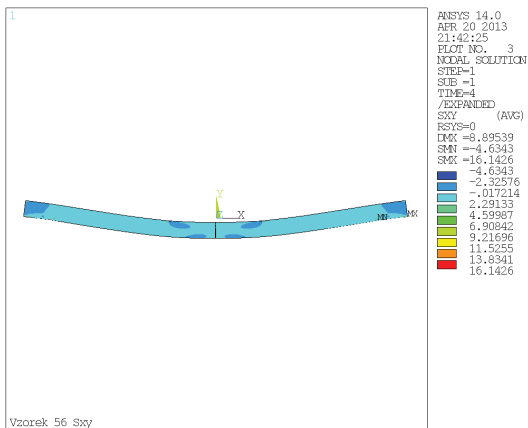
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



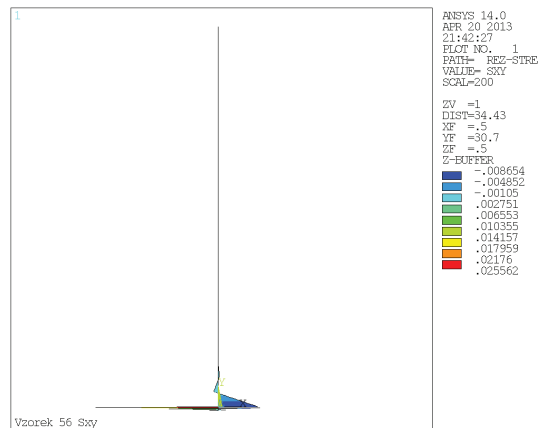
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



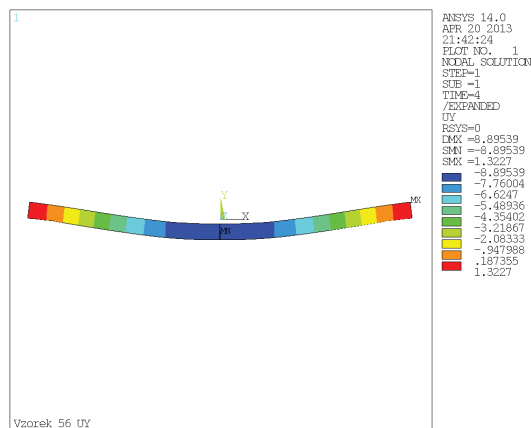
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

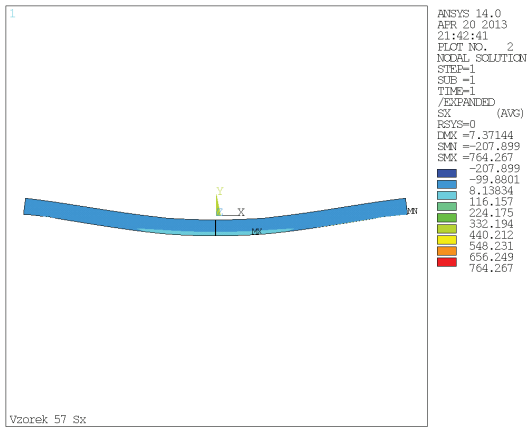


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

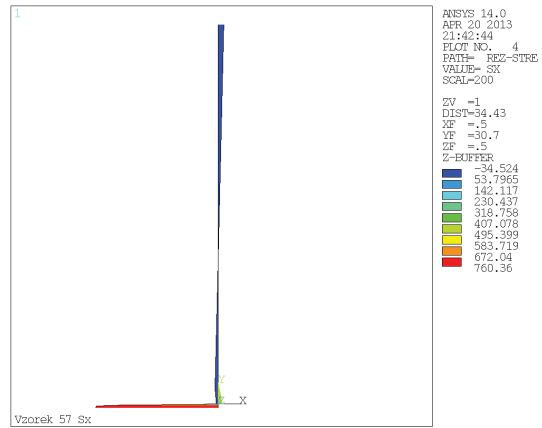


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 57

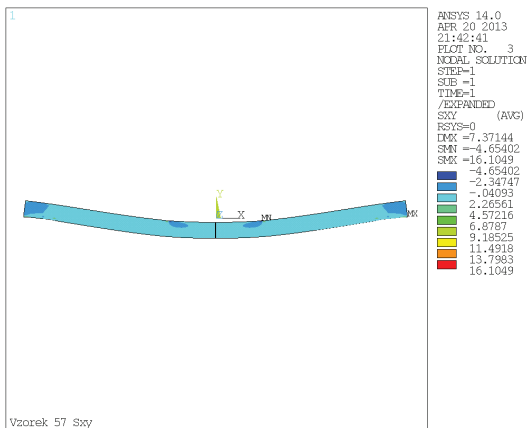
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



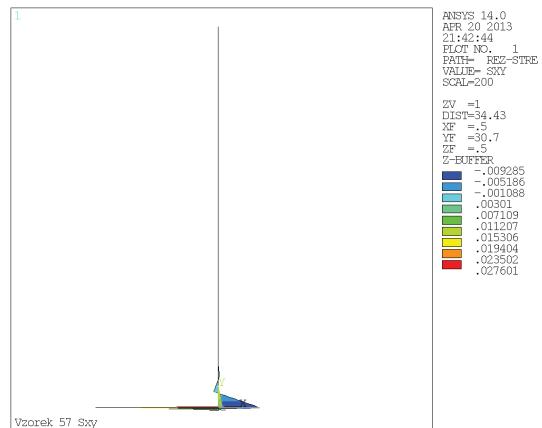
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



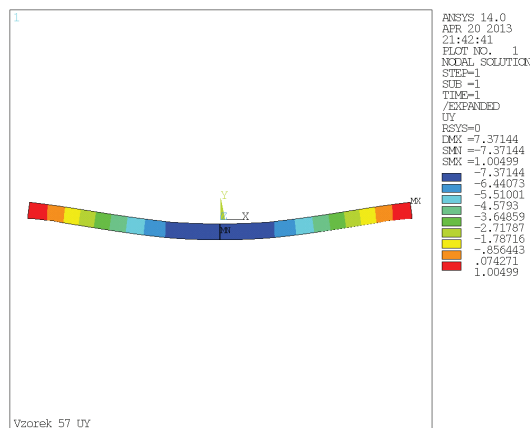
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

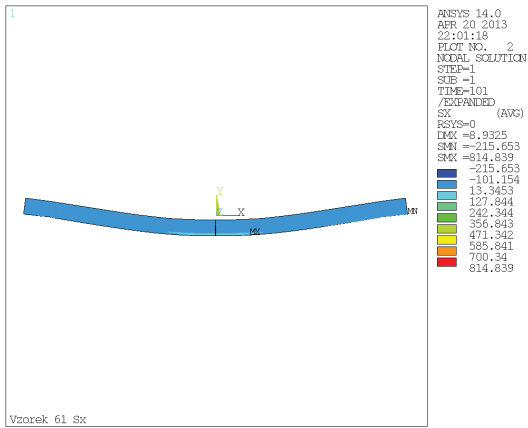


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

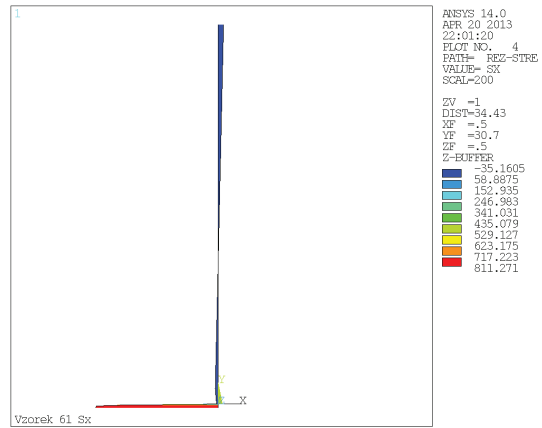


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 61

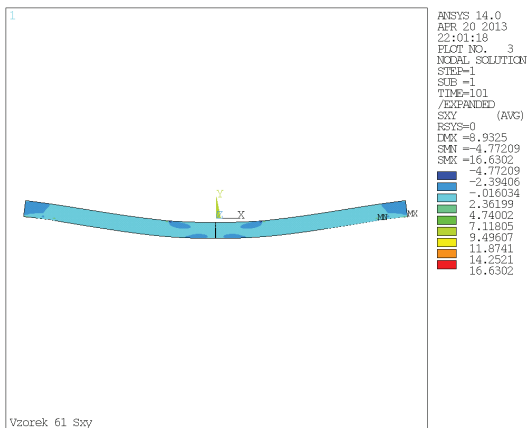
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



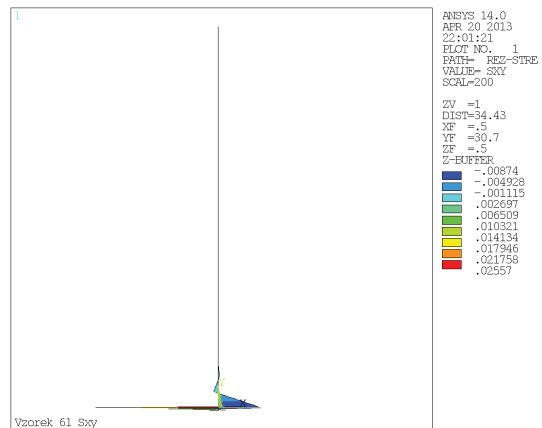
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



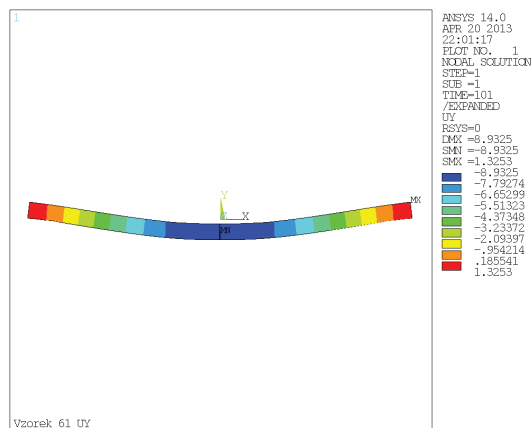
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

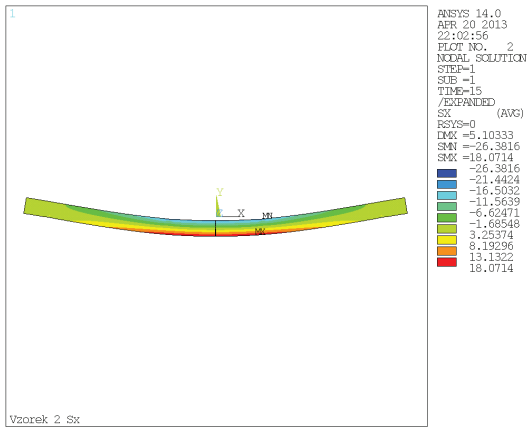


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

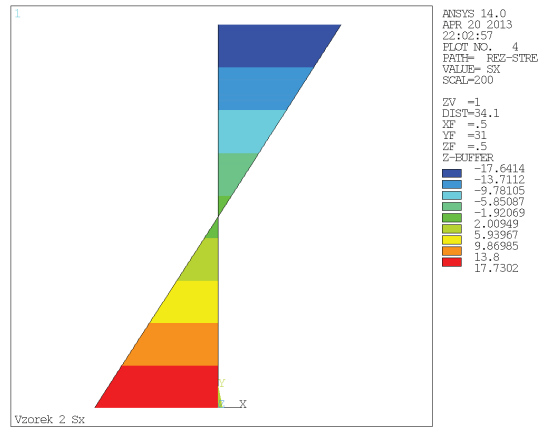


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 2

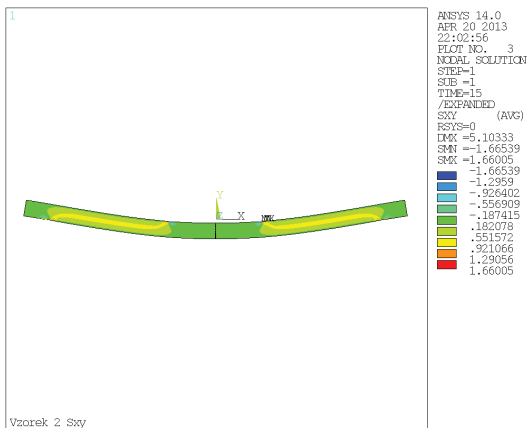
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



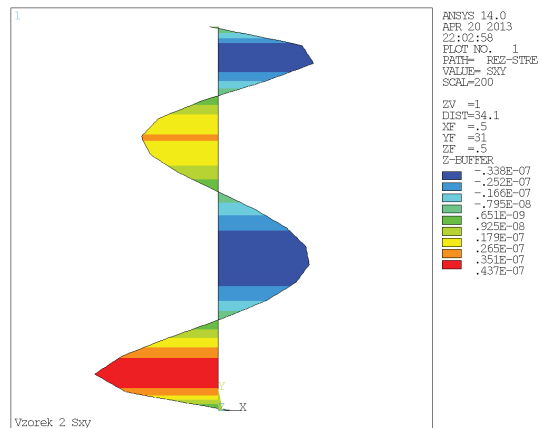
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



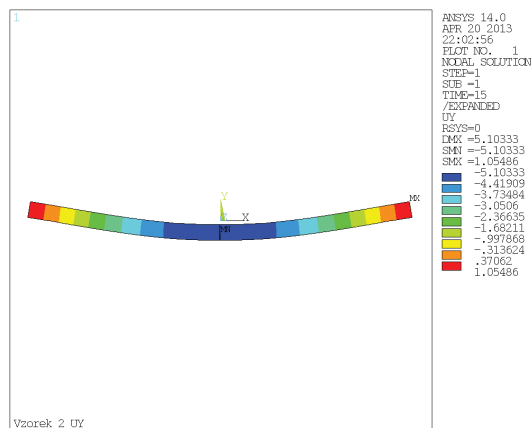
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

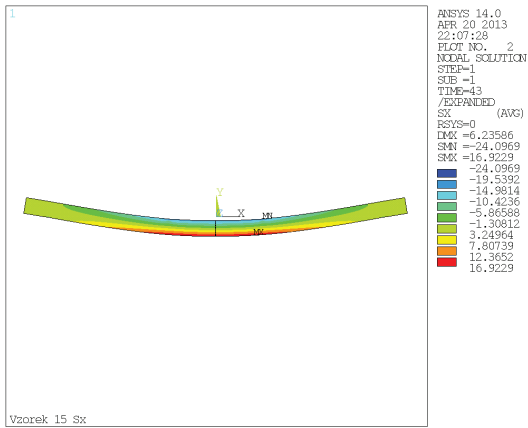


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

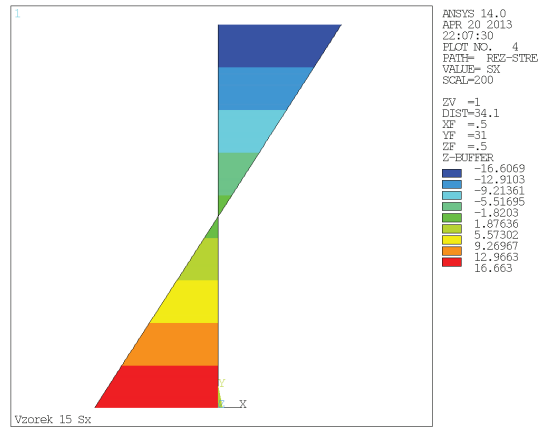


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 15

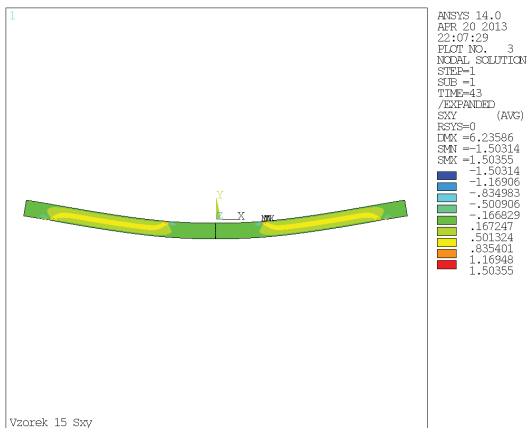
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



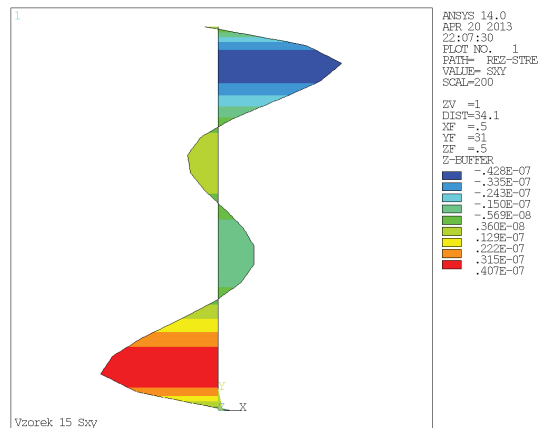
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



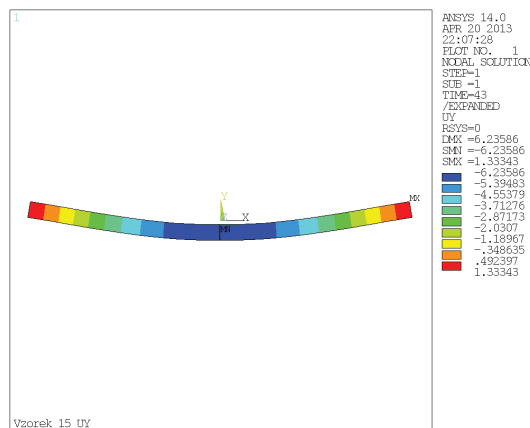
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

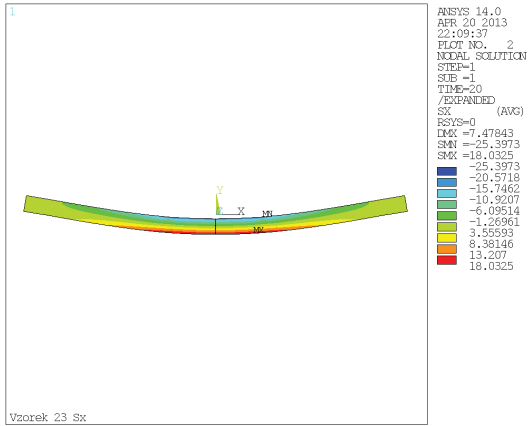


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

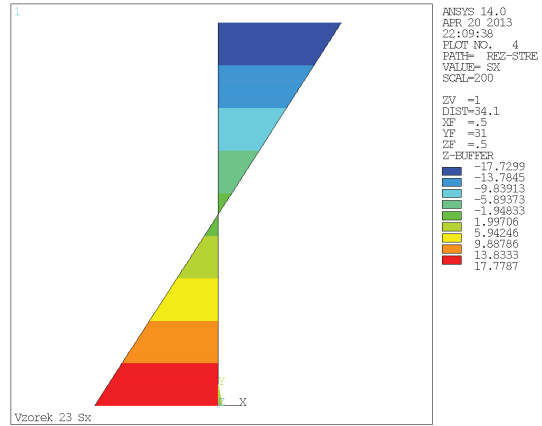


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 23

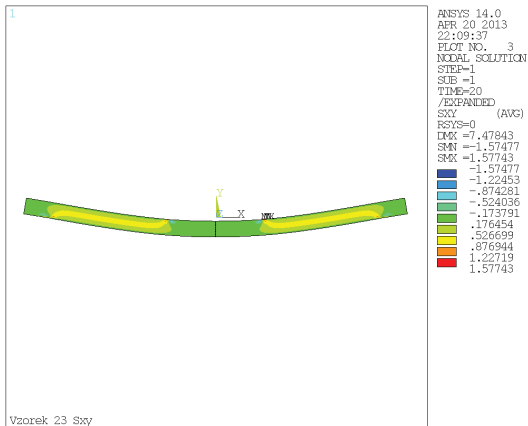
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



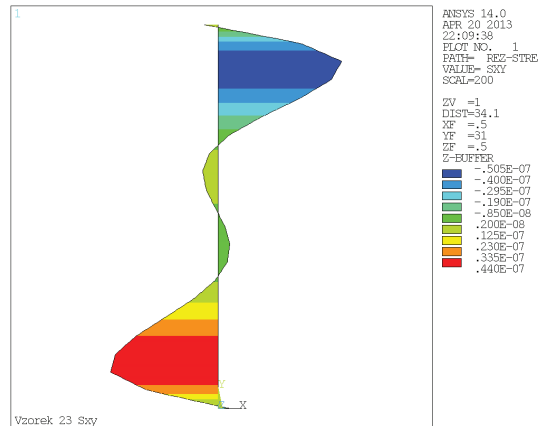
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



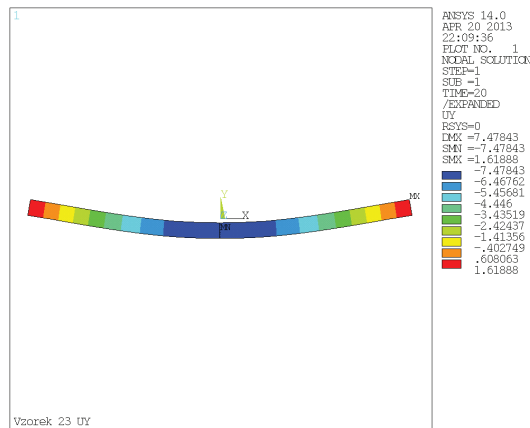
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

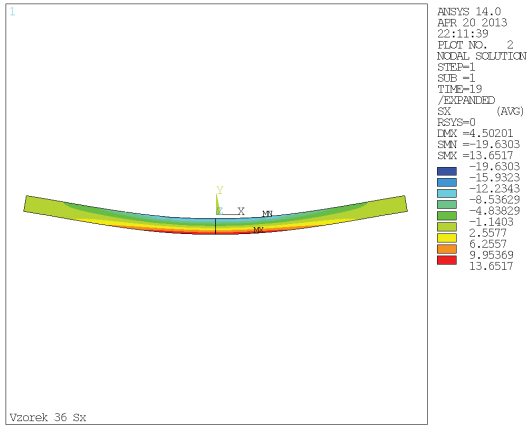


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

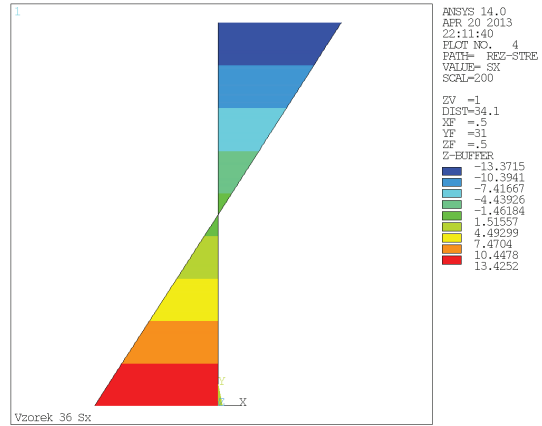


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 36

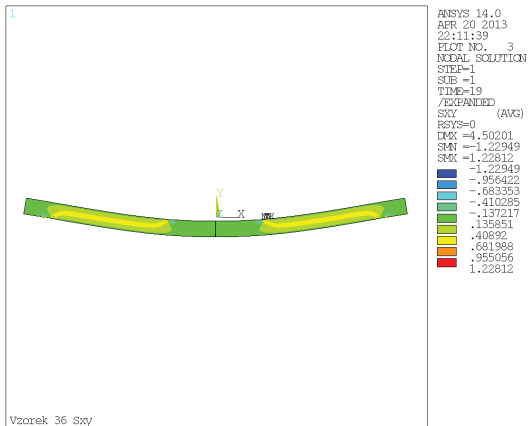
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



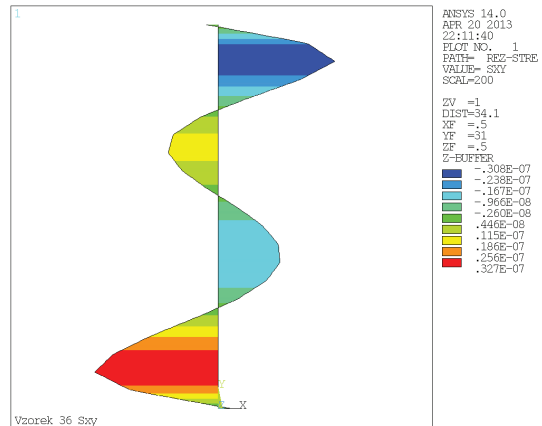
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



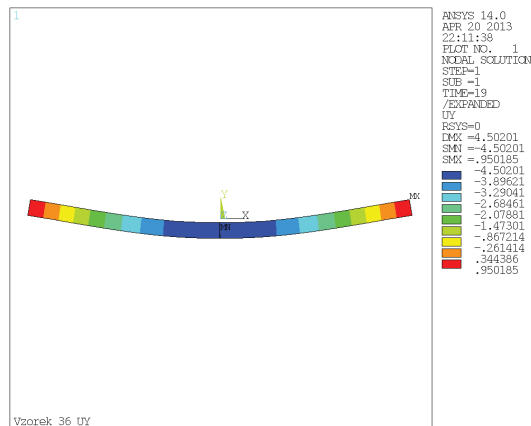
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

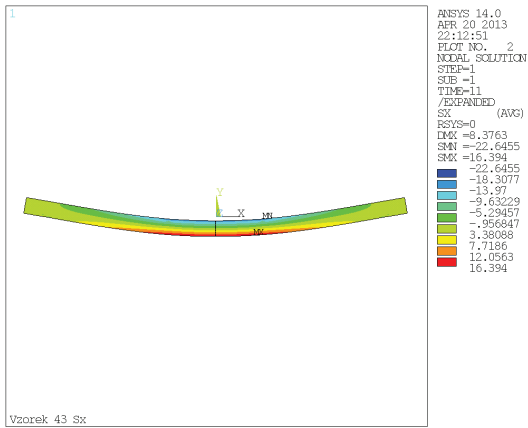


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

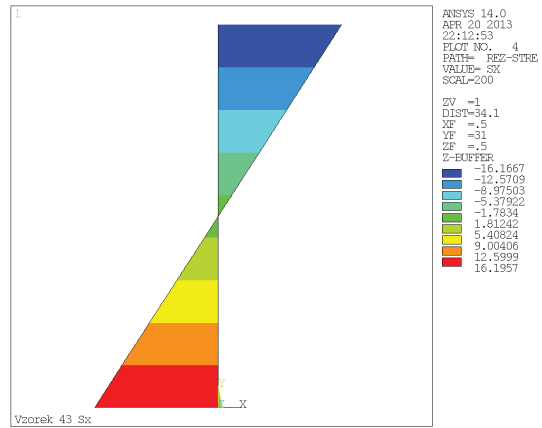


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 43

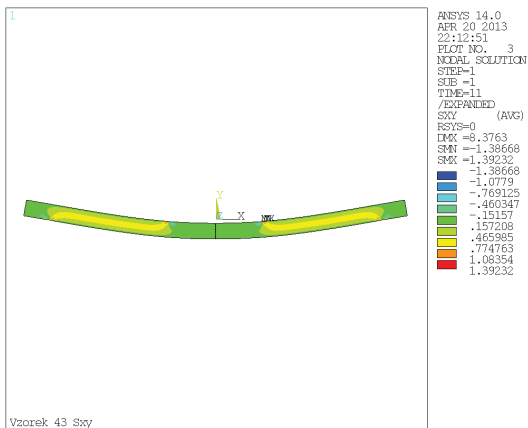
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



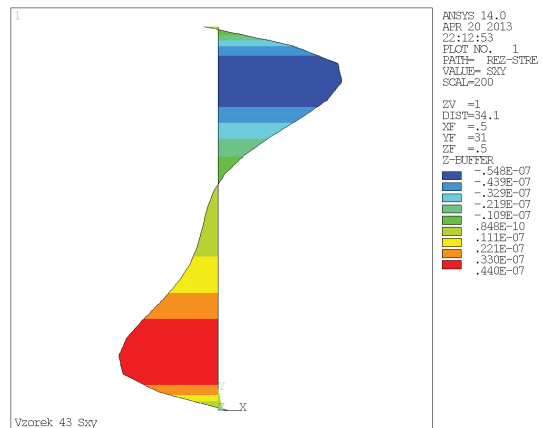
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



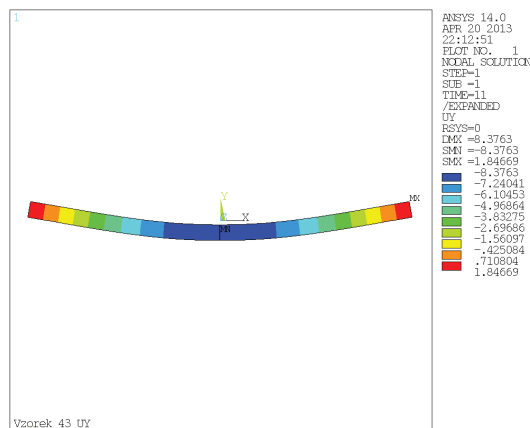
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

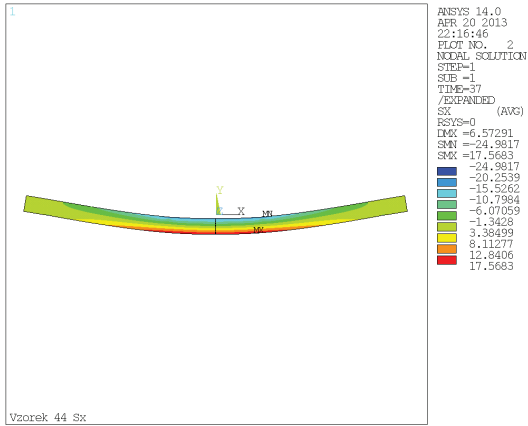


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

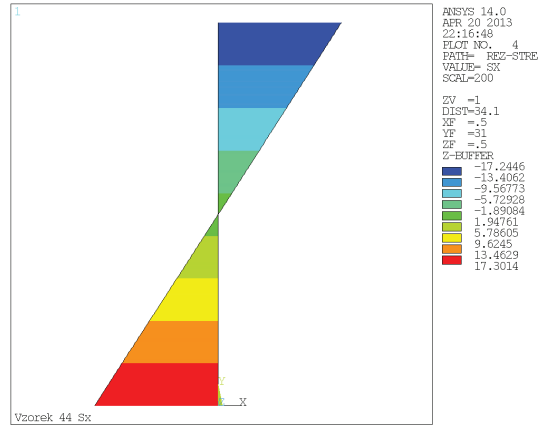


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 44

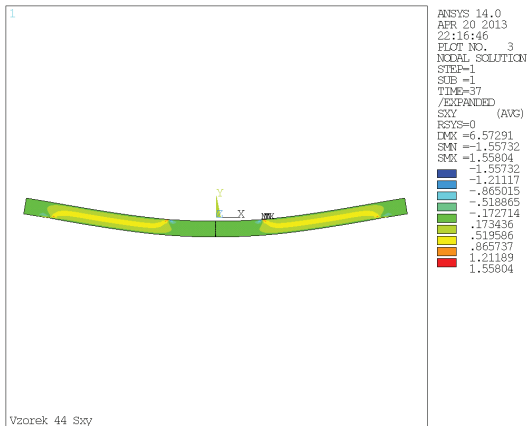
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



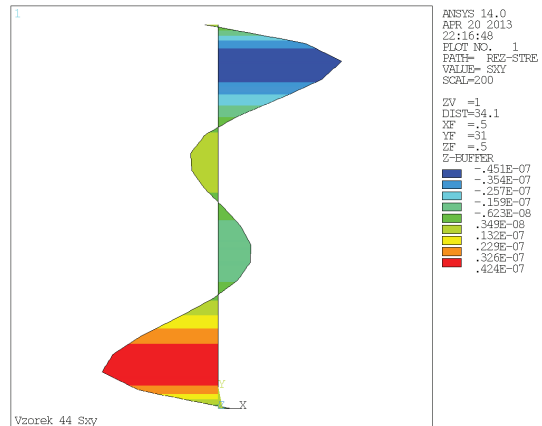
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



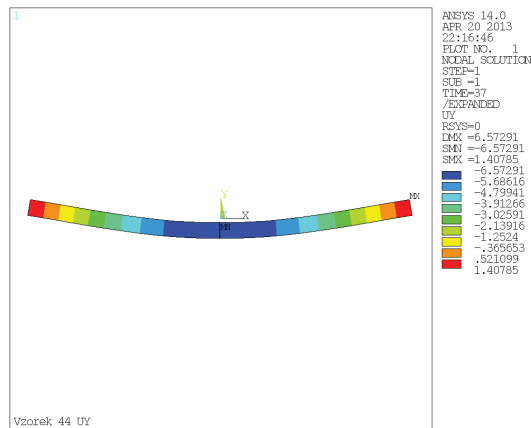
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

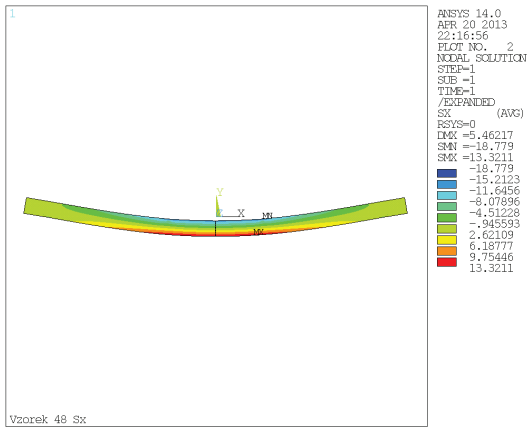


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

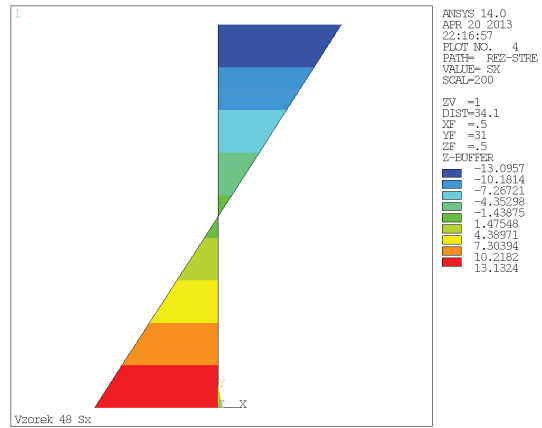


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 48

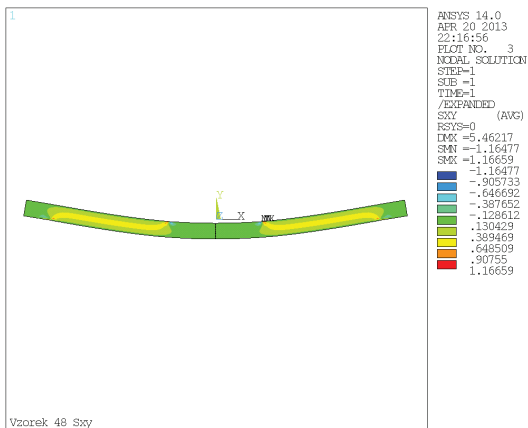
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



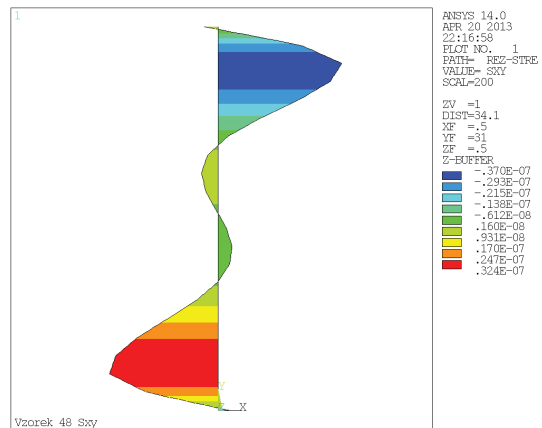
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



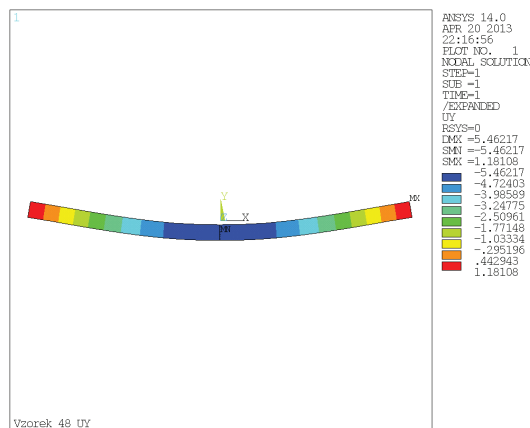
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

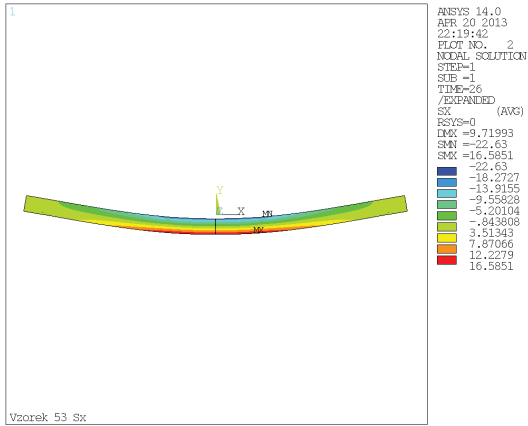


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

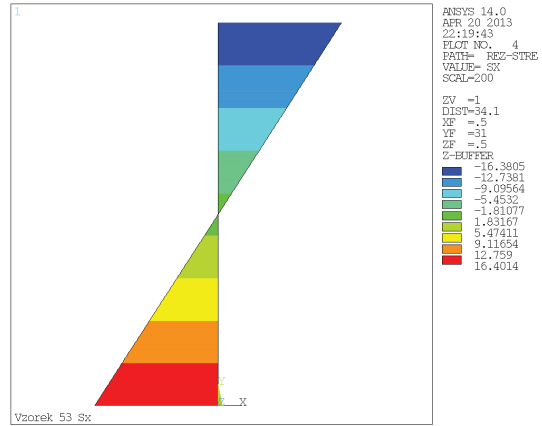


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 53

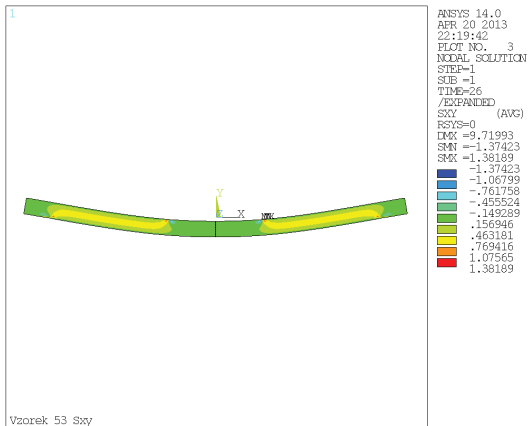
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



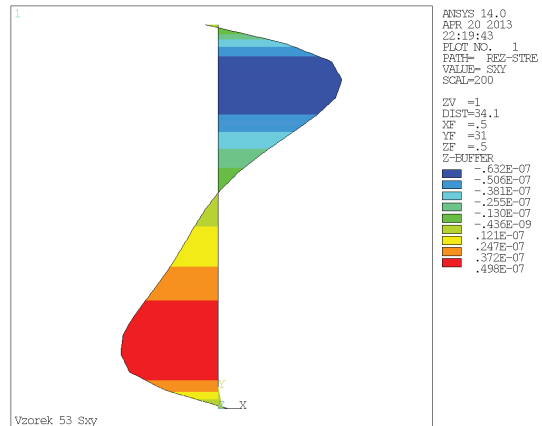
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



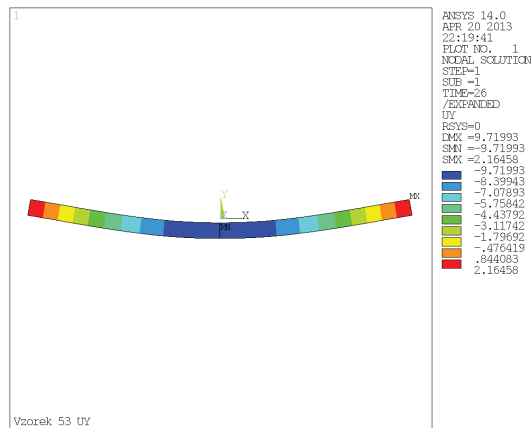
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

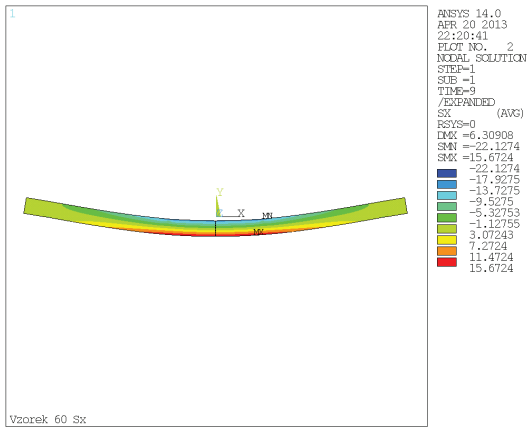


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

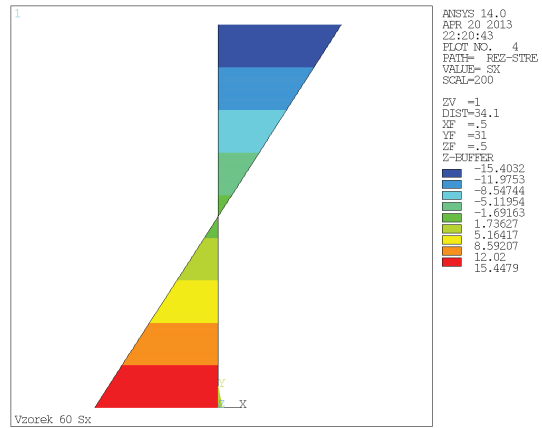


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 60

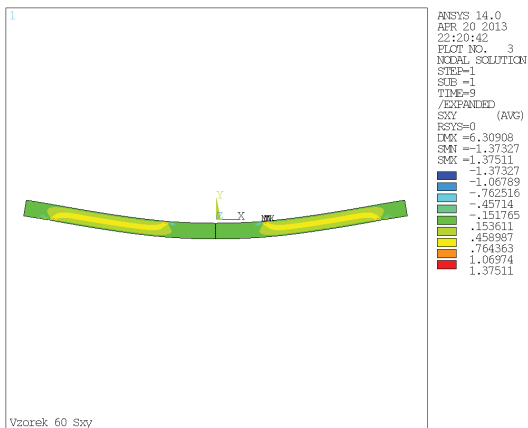
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



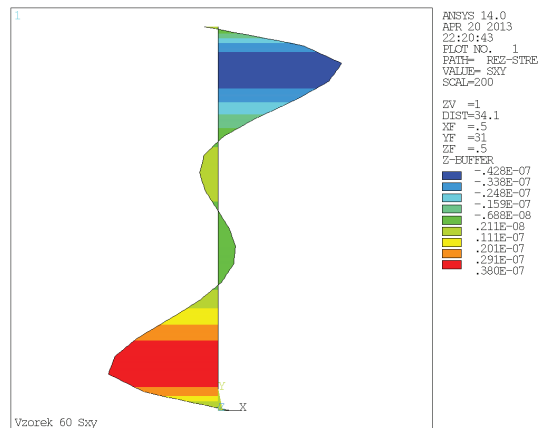
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



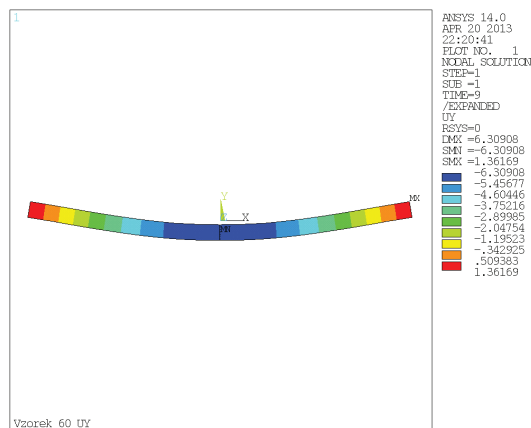
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

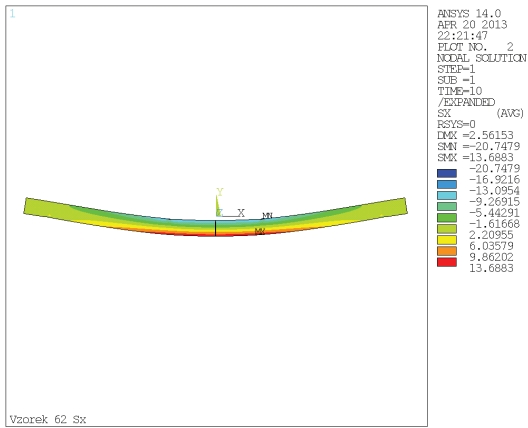


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

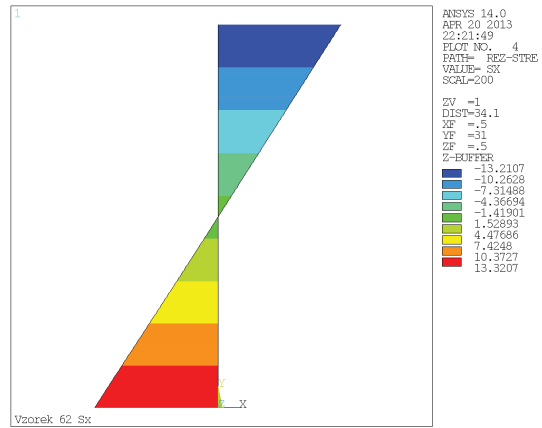


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 62

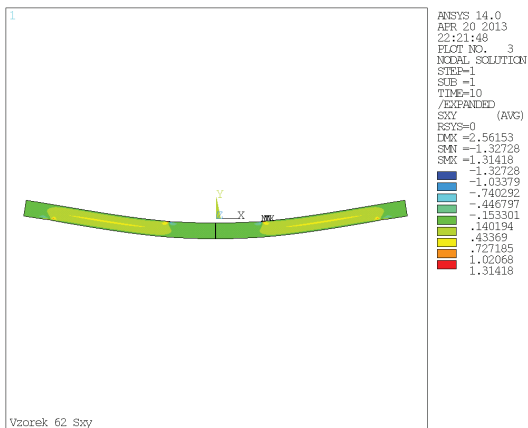
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



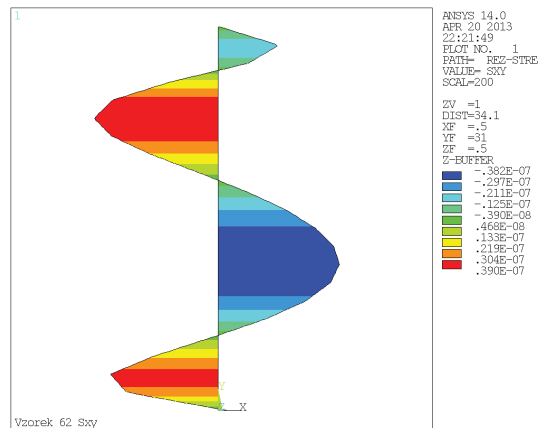
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



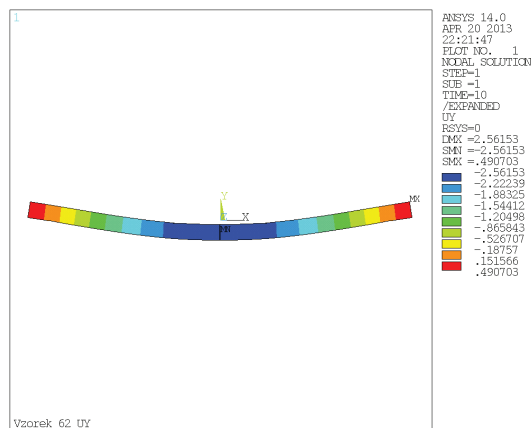
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

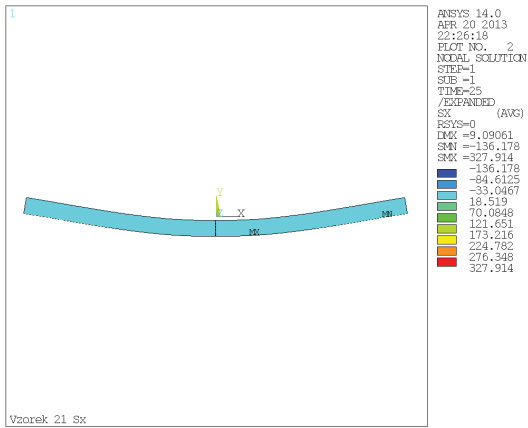


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

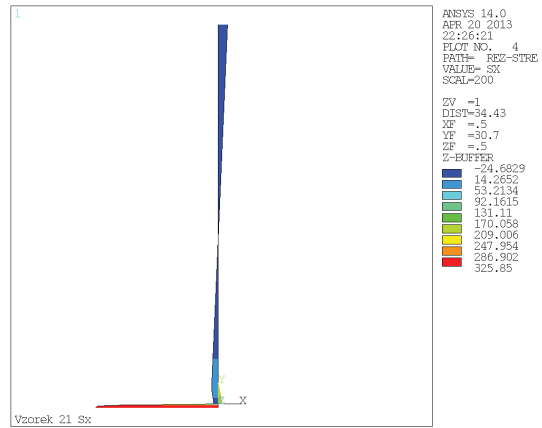


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 21

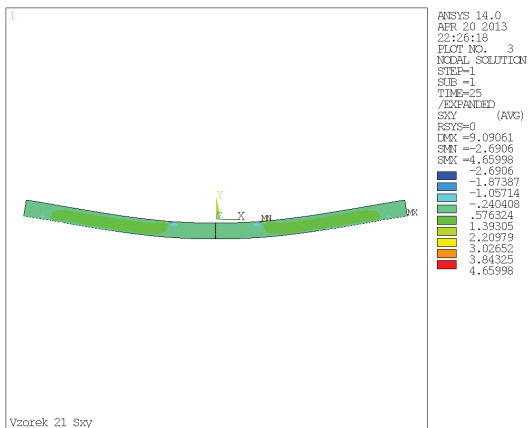
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



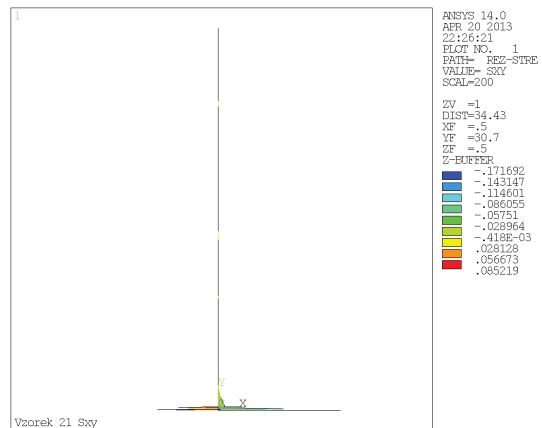
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



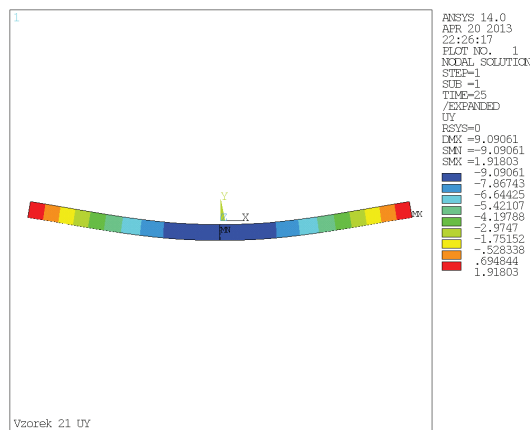
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

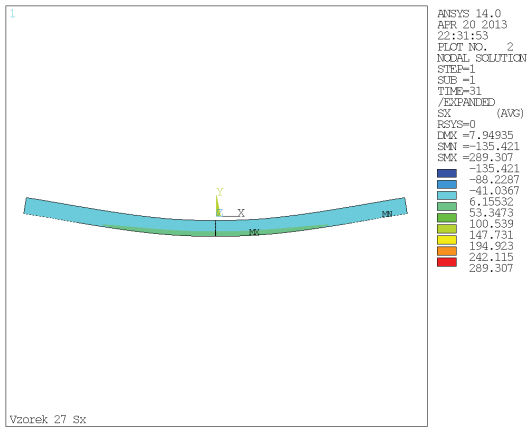


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

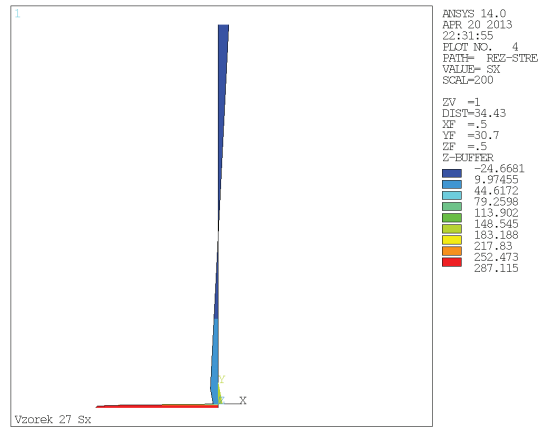


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 27

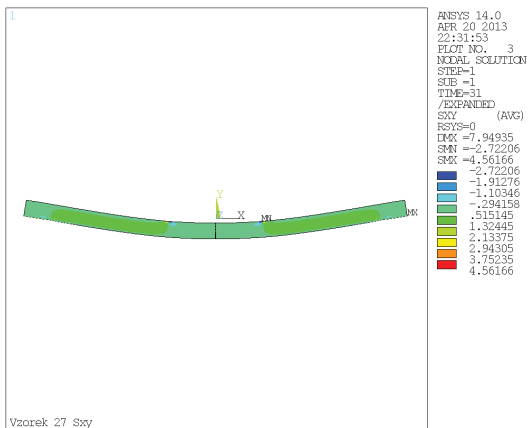
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



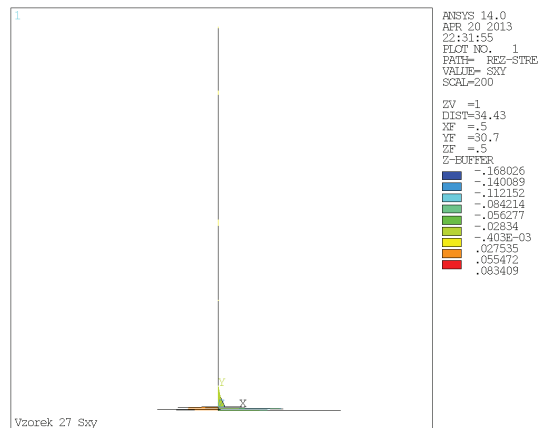
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



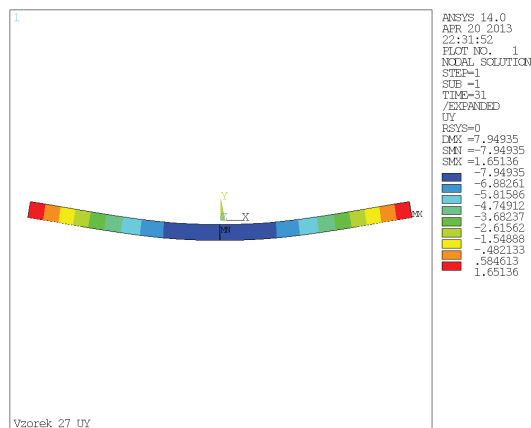
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

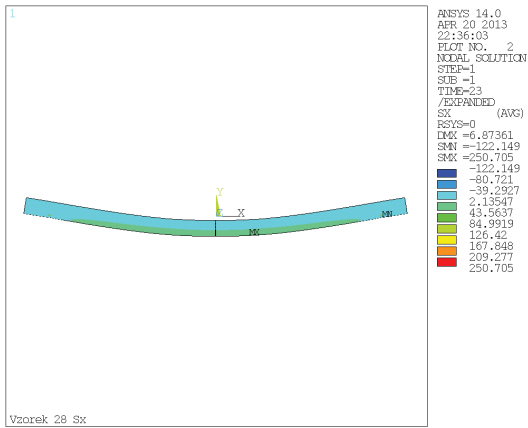


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

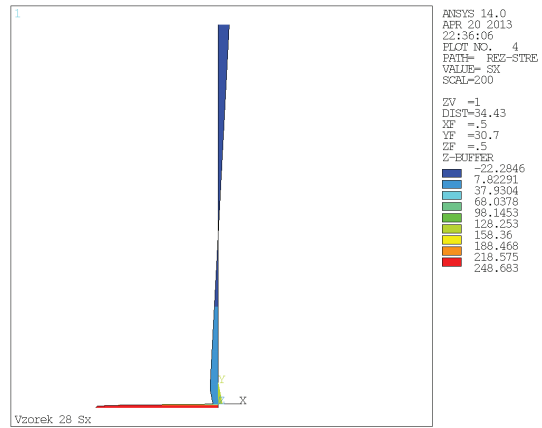


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 28

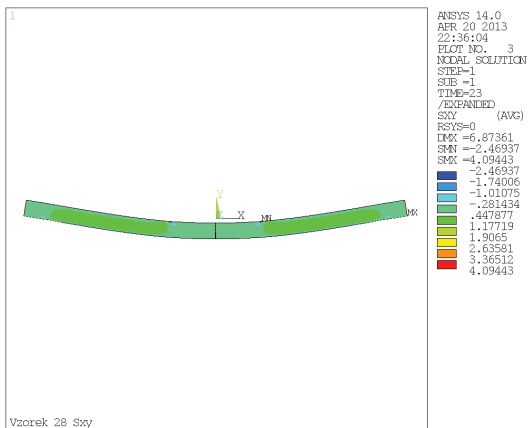
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



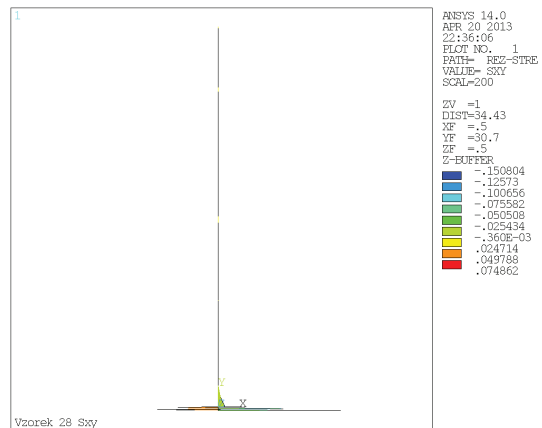
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



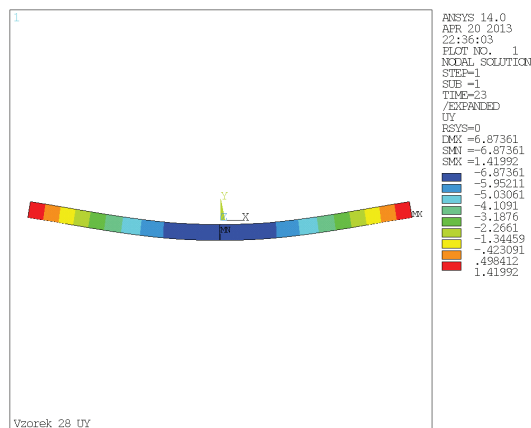
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

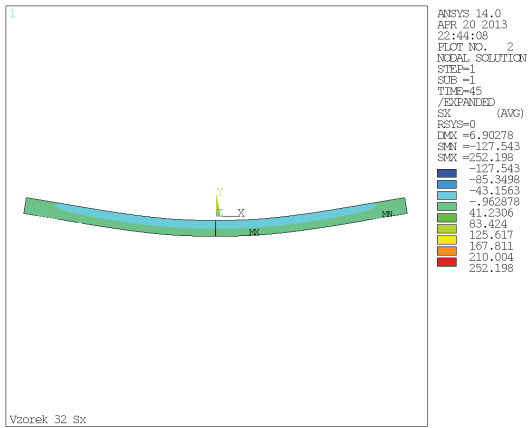


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

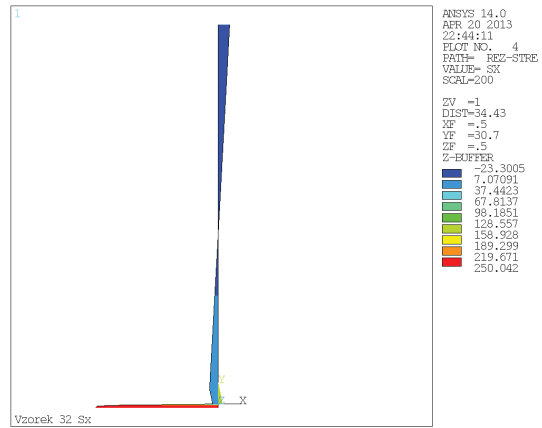


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 32

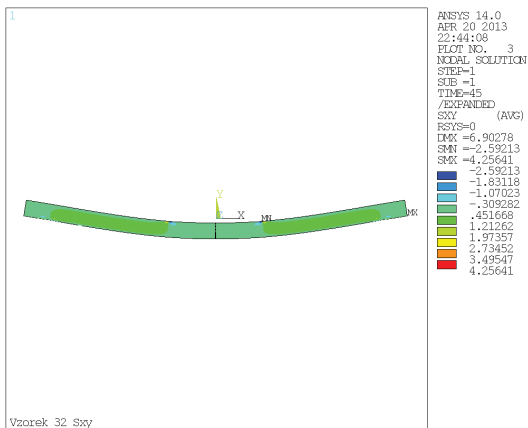
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



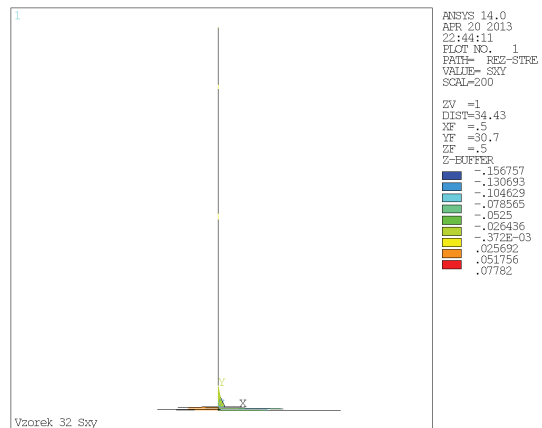
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



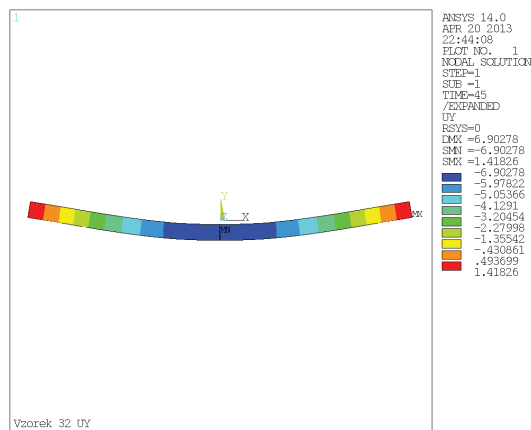
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

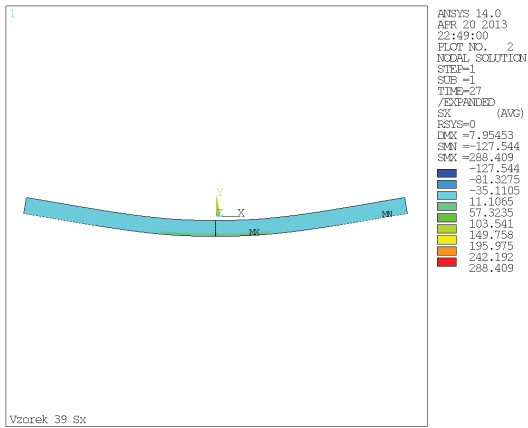


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

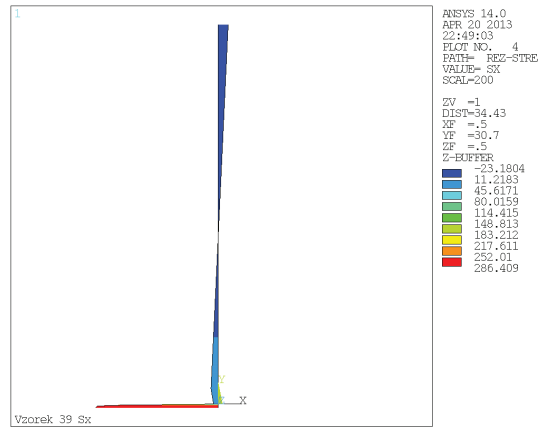


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 39

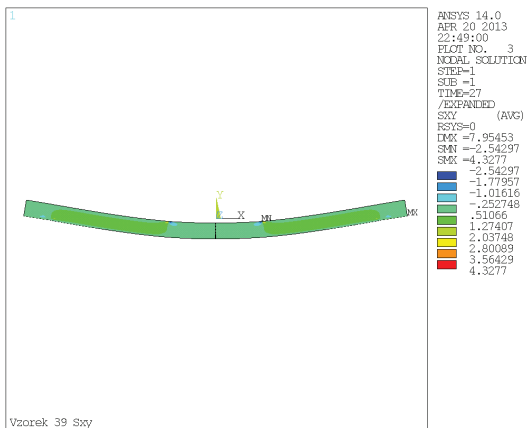
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



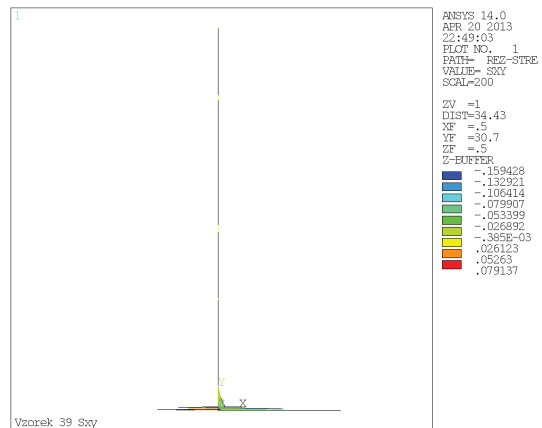
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



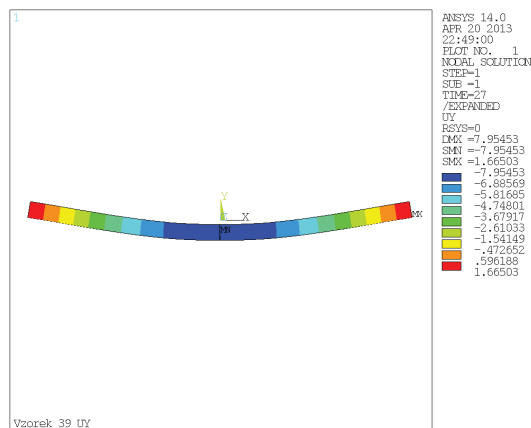
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

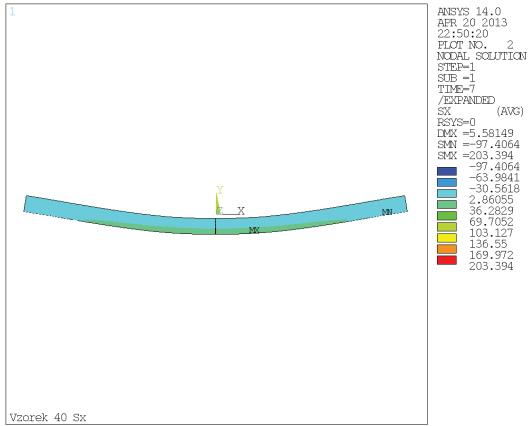


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

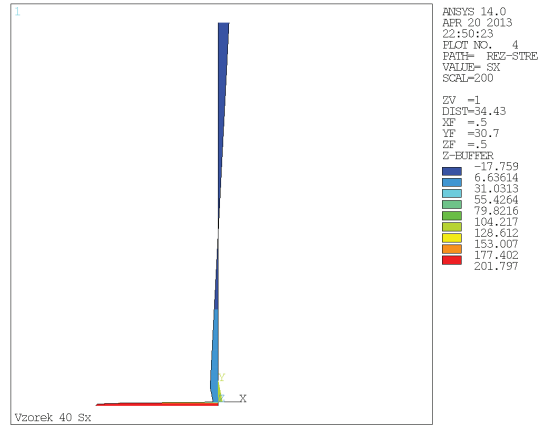


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 40

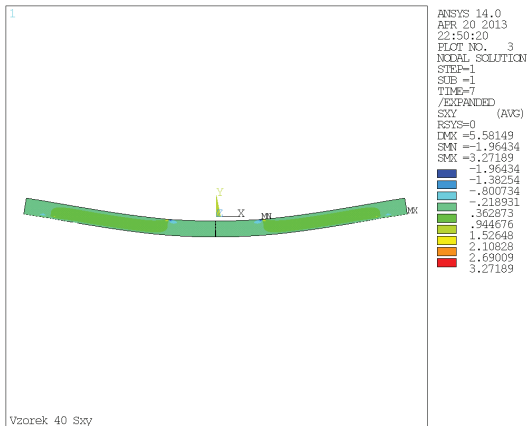
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



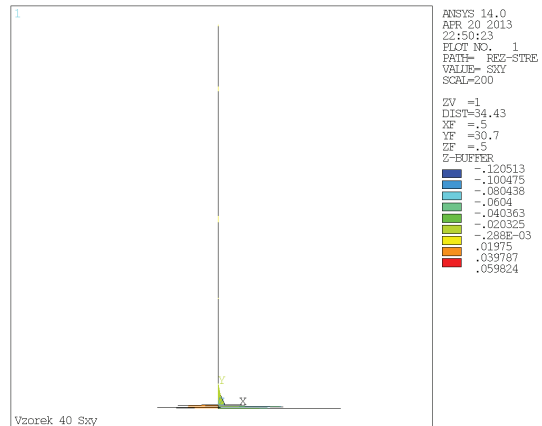
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



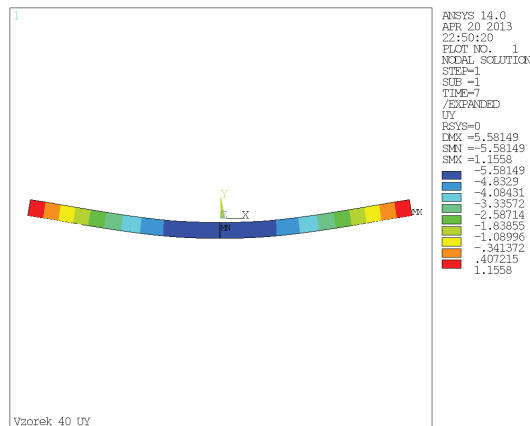
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

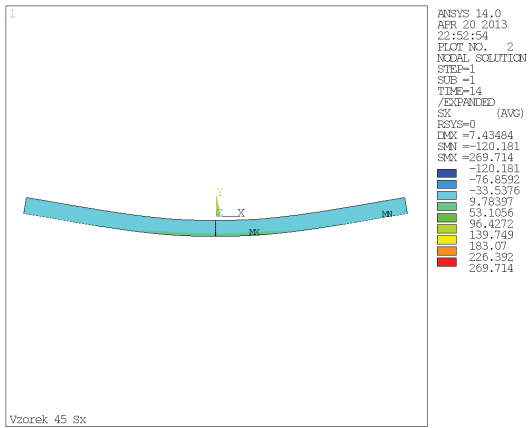


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

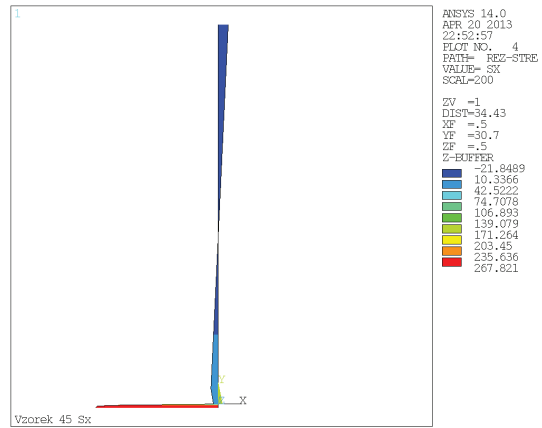


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 45

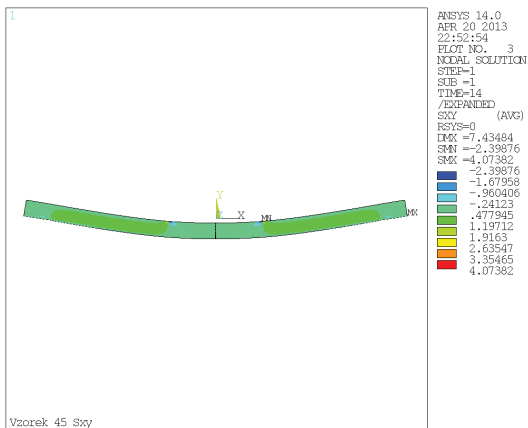
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



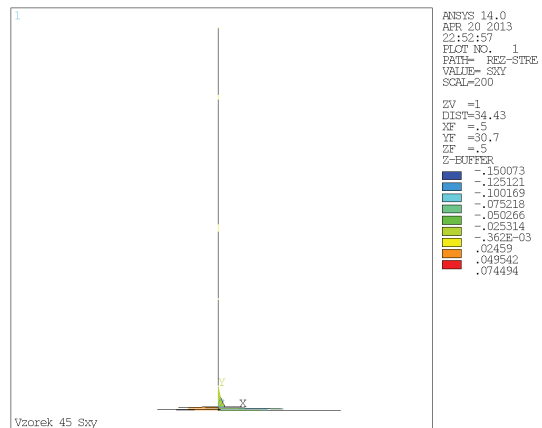
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



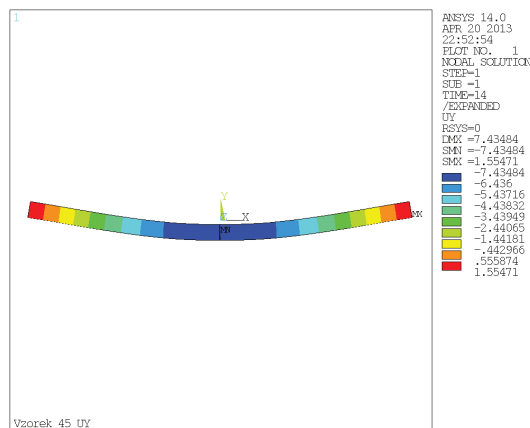
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

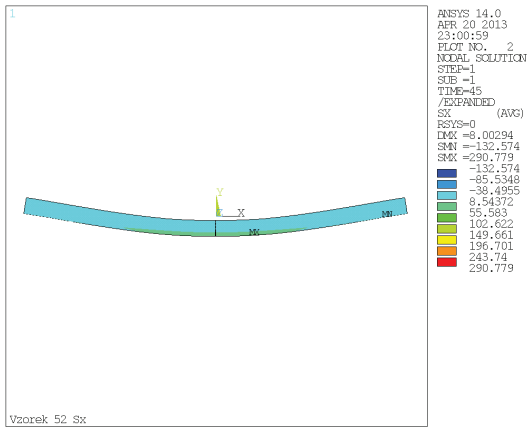


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

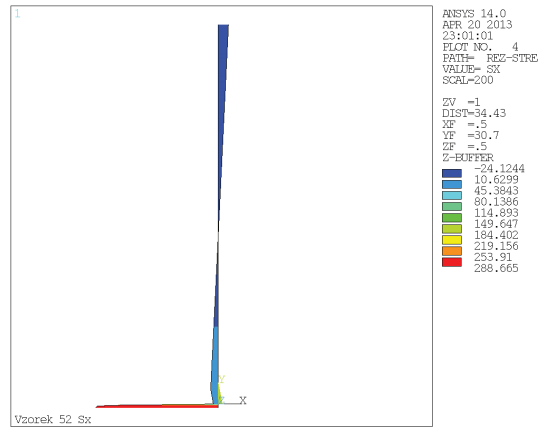


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 52

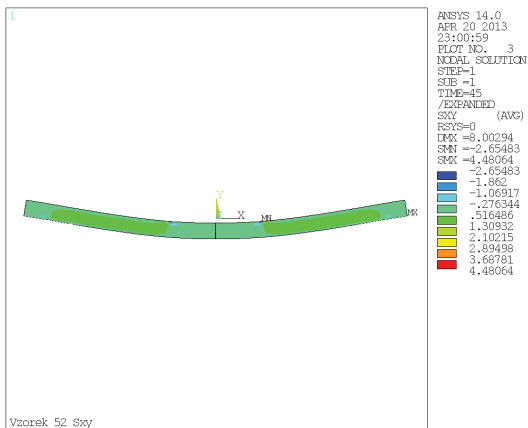
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



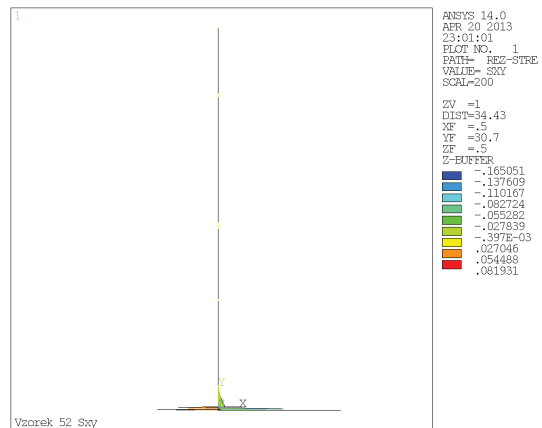
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



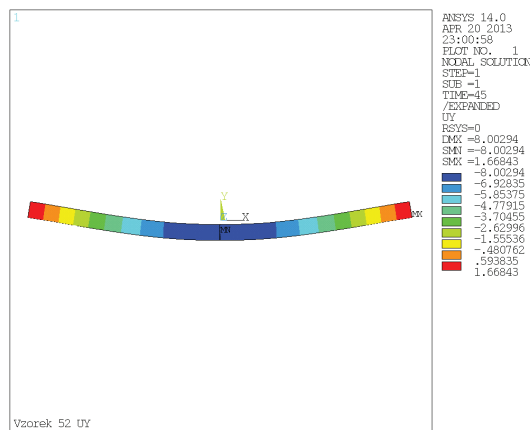
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

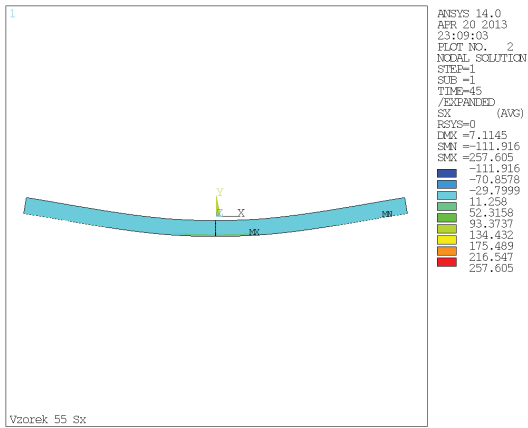


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

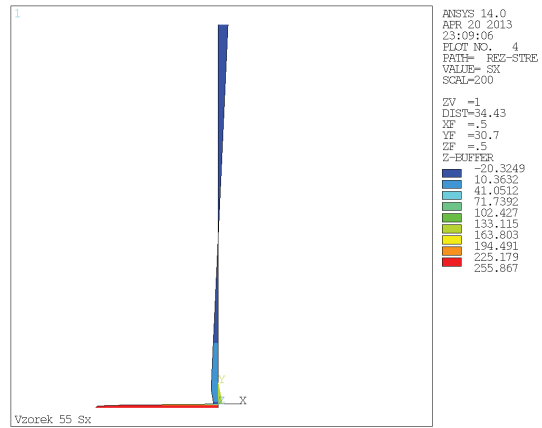


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 55

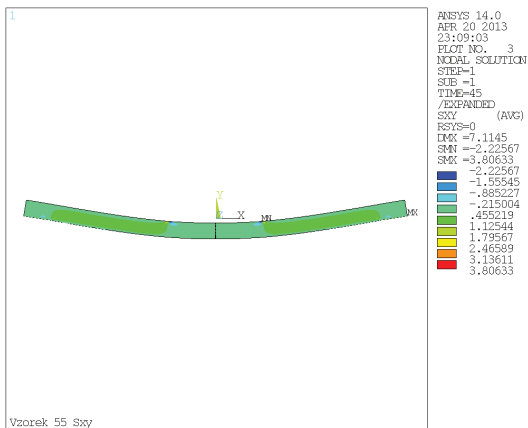
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



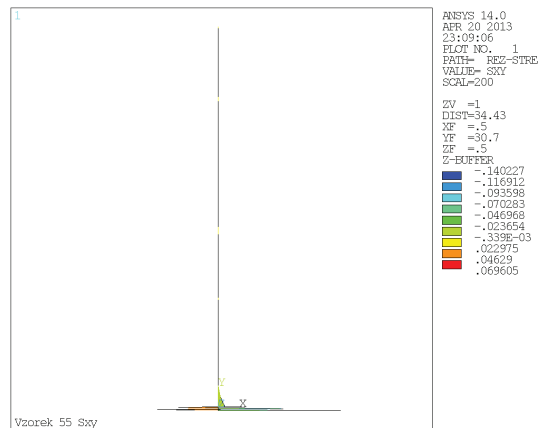
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



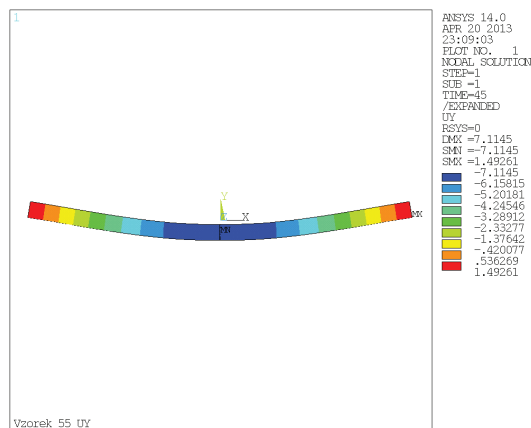
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

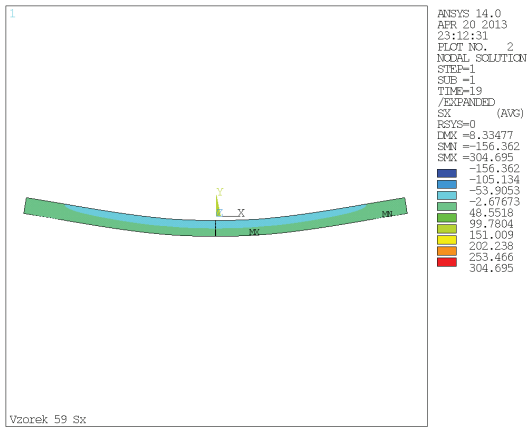


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

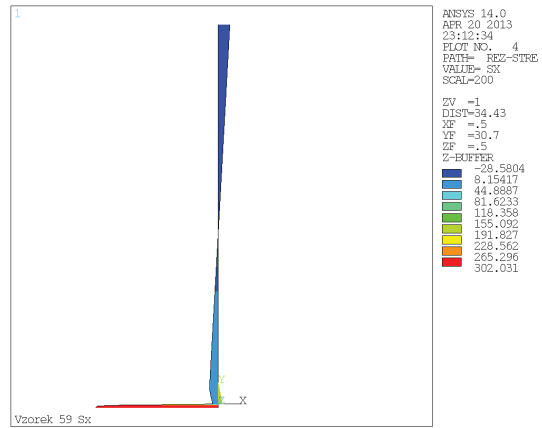


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 59

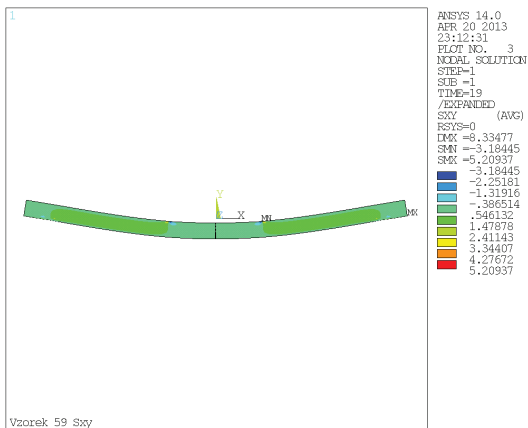
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



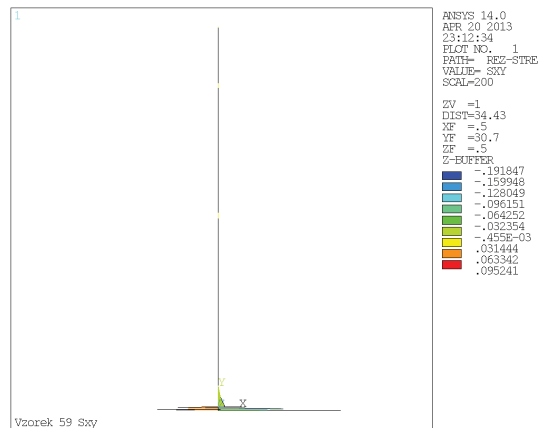
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



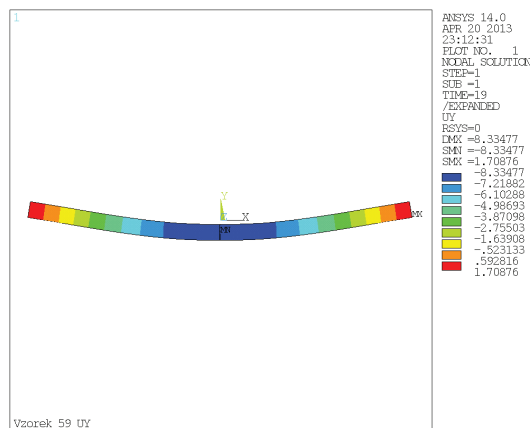
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

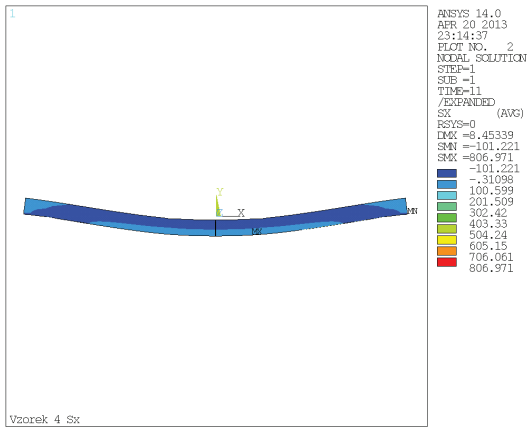


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

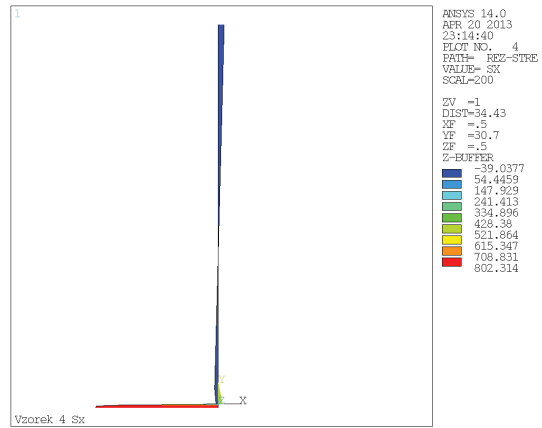


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 4

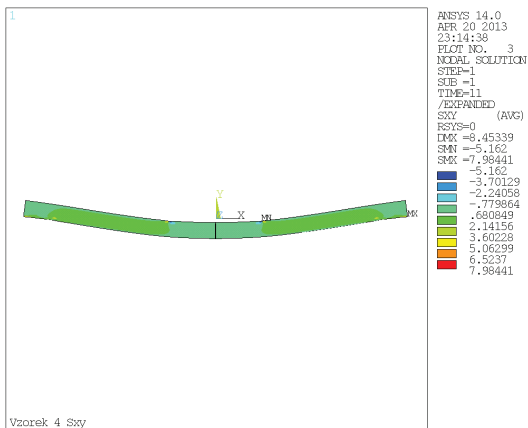
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



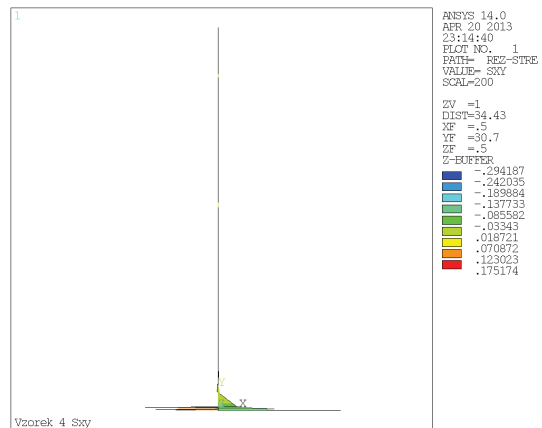
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



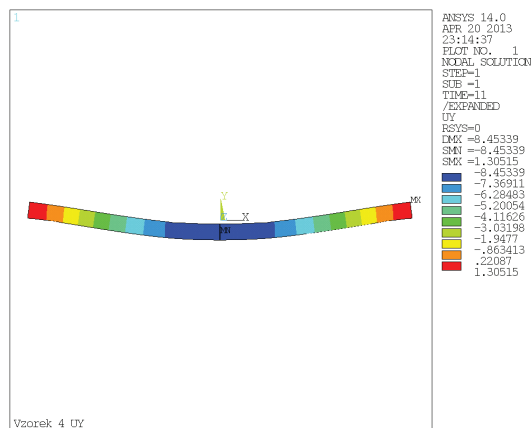
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

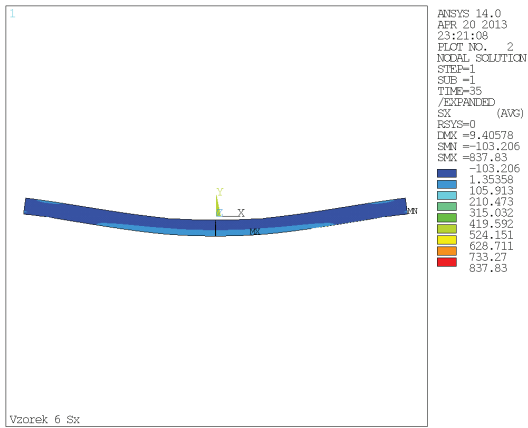


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

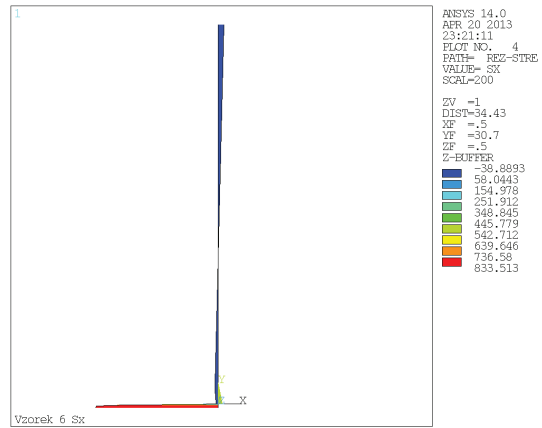


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 6

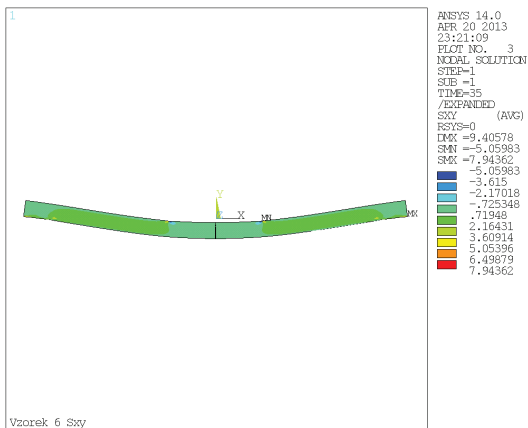
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



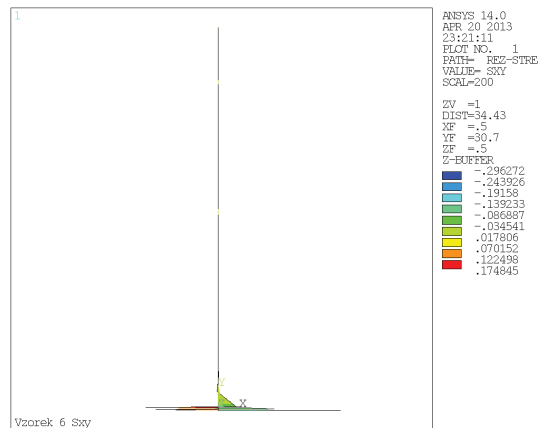
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



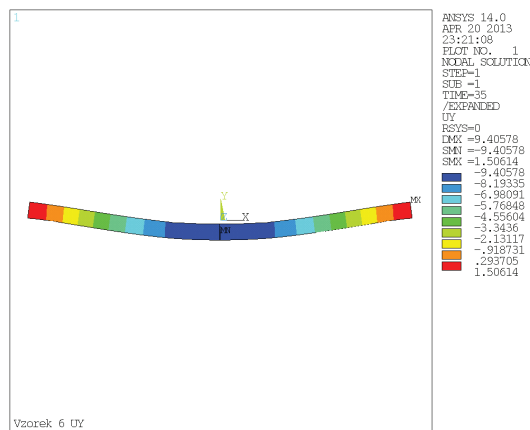
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

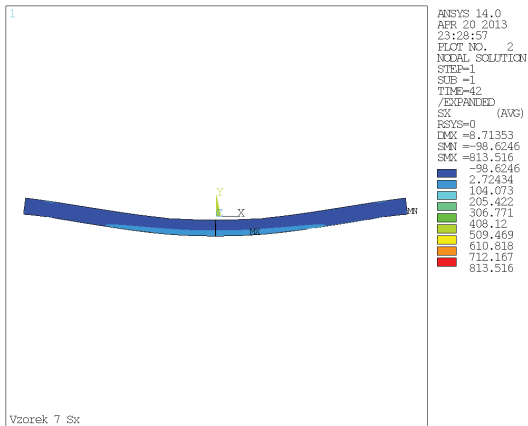


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

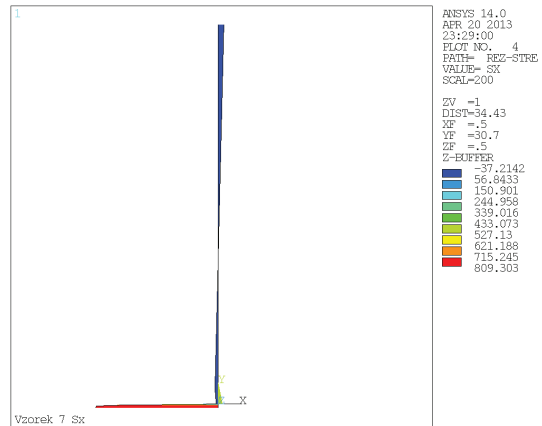


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 7

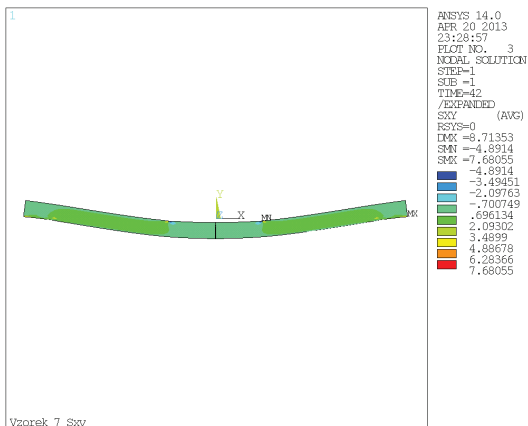
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



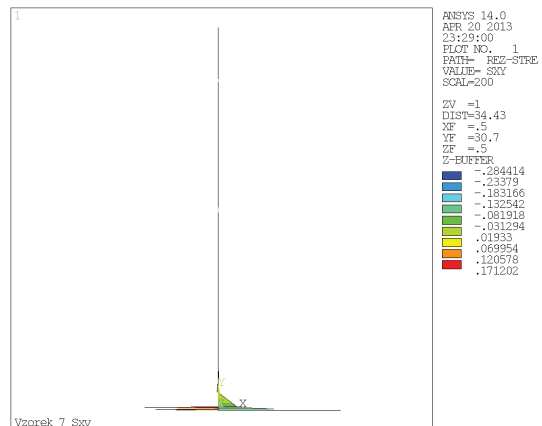
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



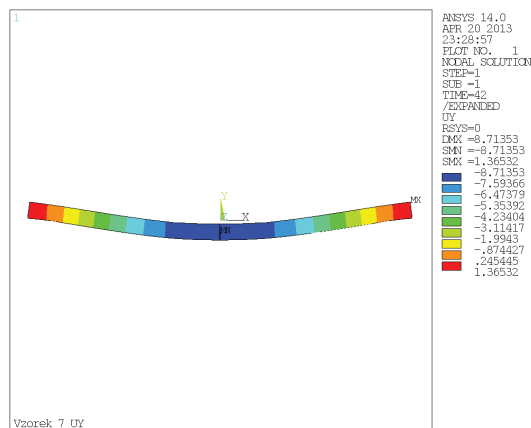
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

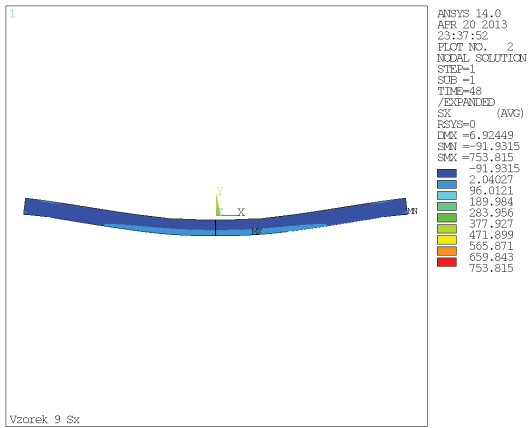


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

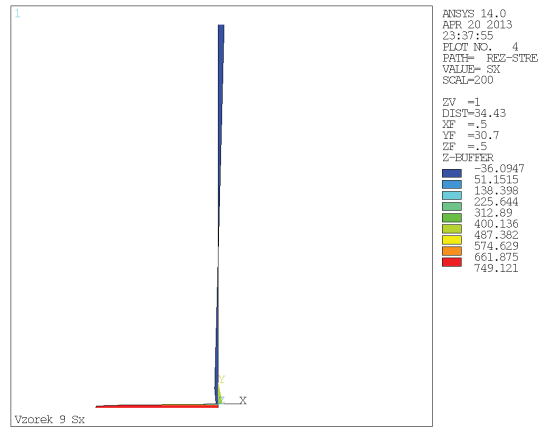


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 9

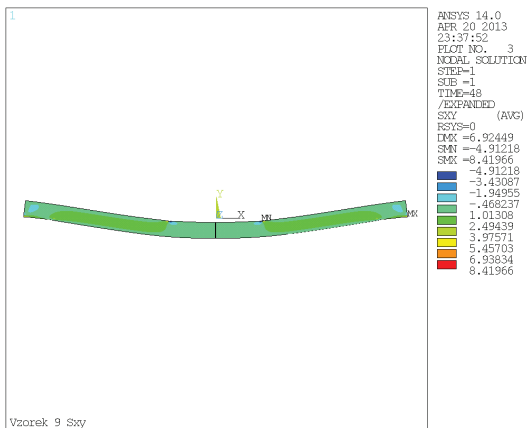
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



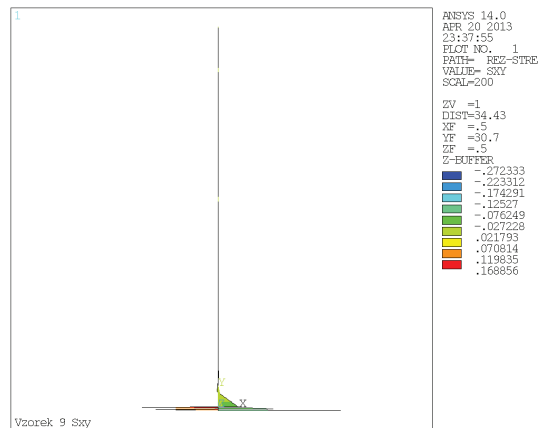
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



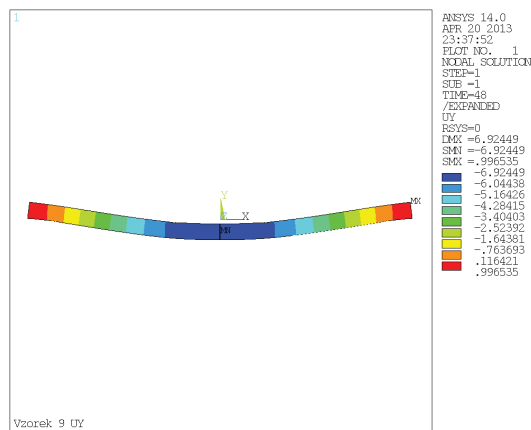
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

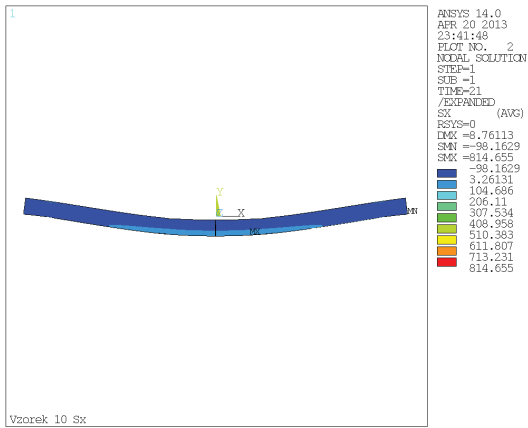


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

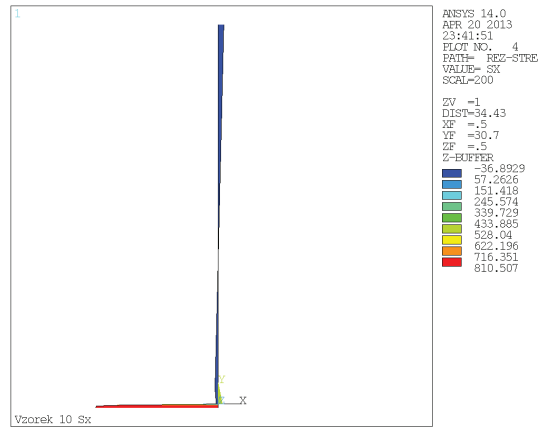


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 10

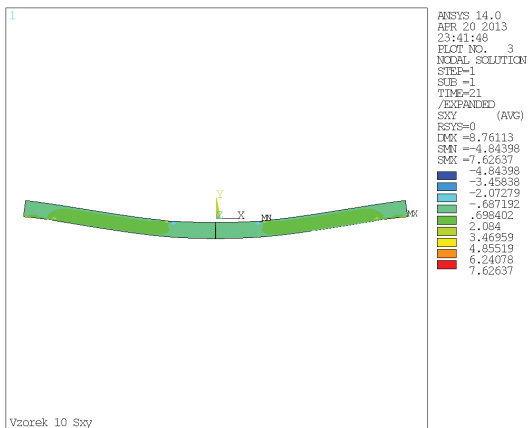
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



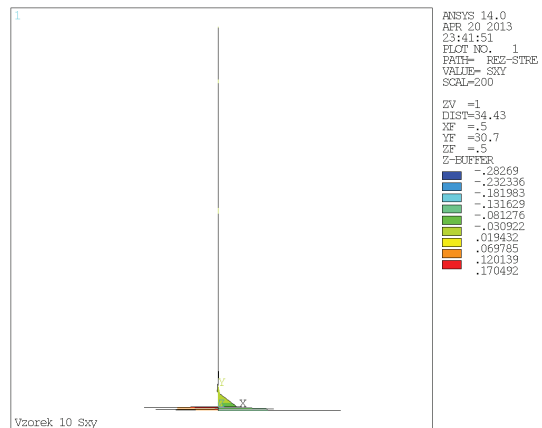
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



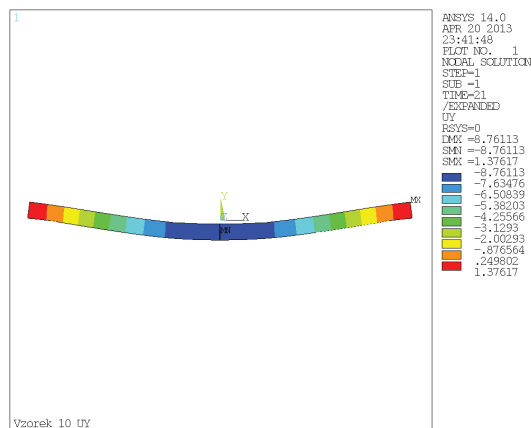
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

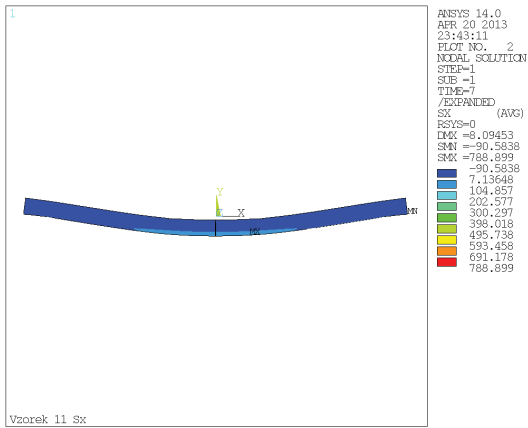


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

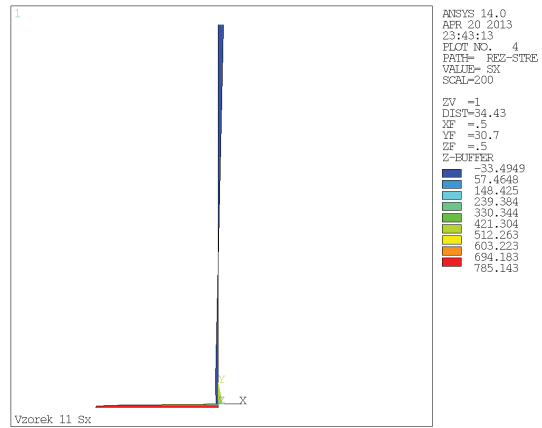


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 11

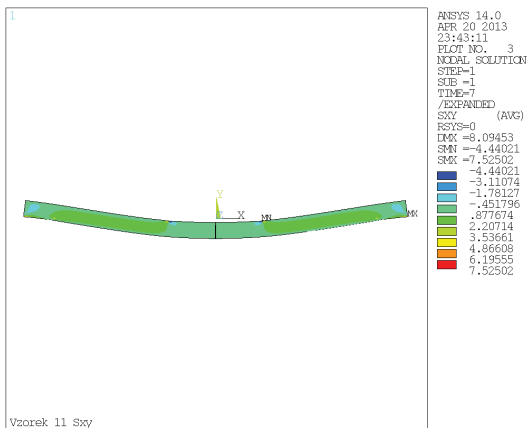
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



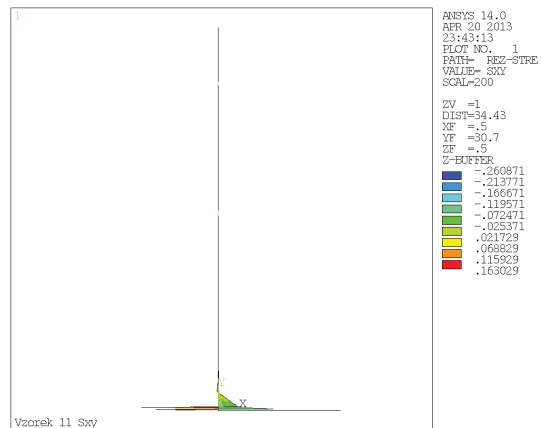
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



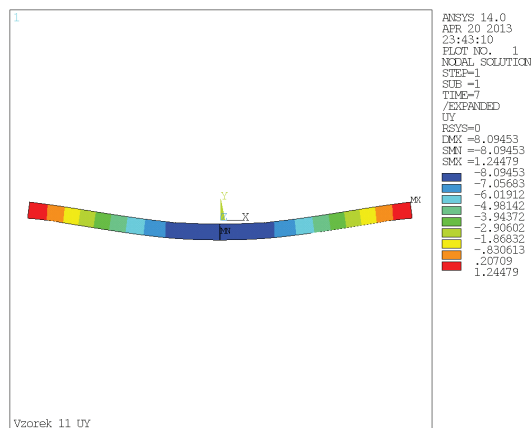
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

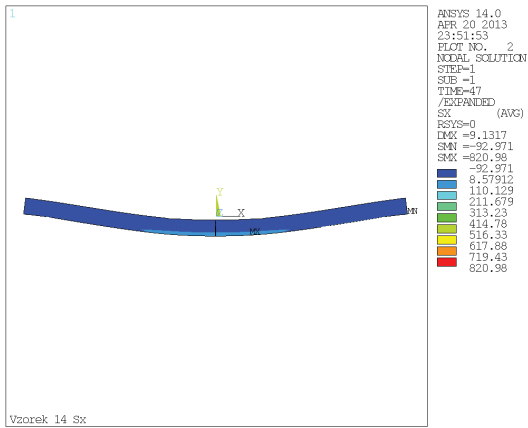


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

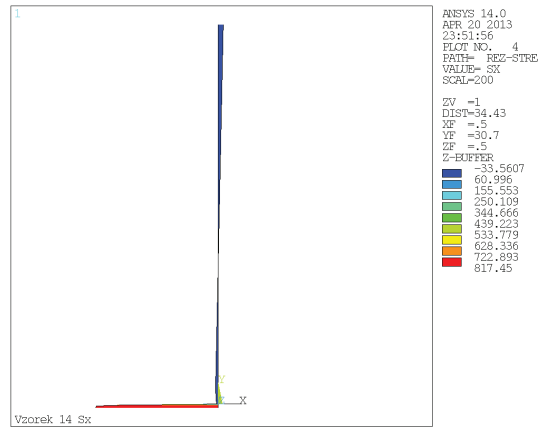


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 14

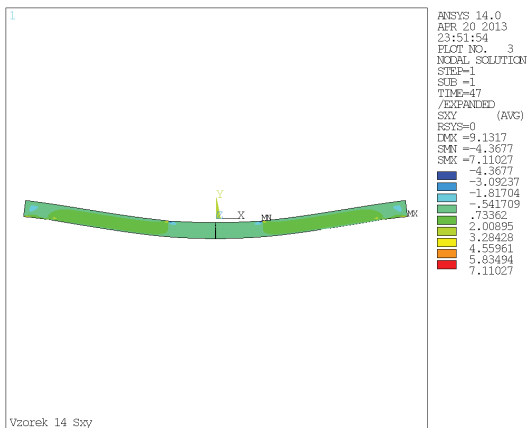
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



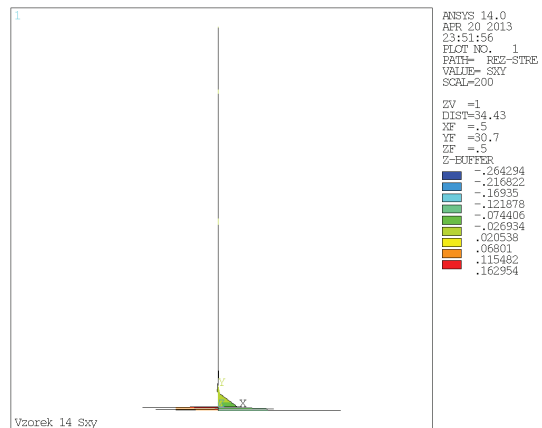
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



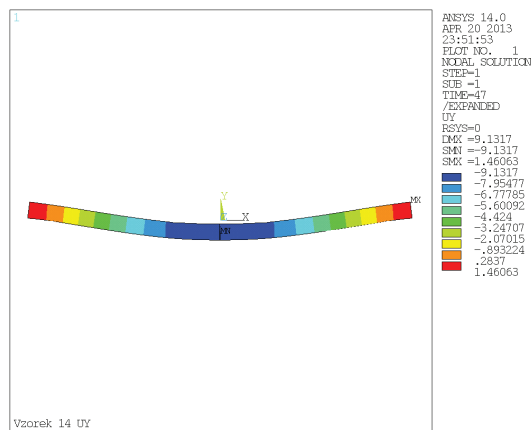
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

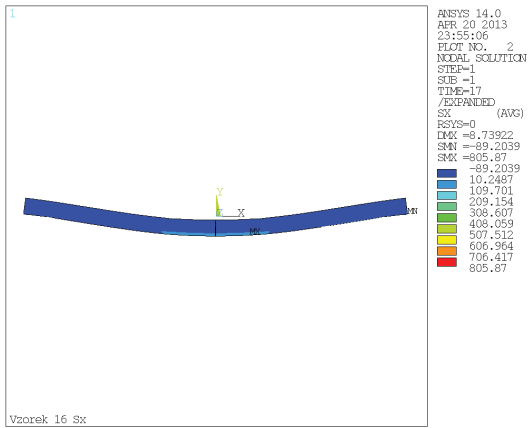


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

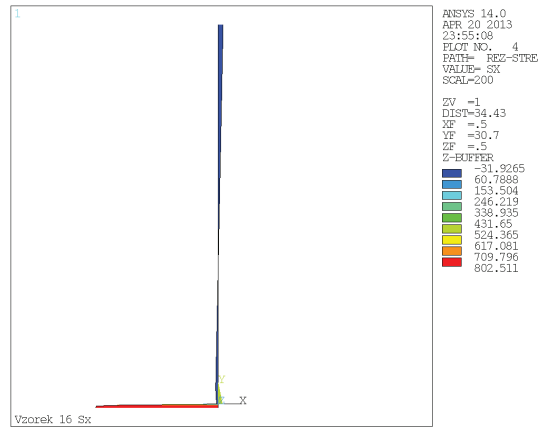


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 16

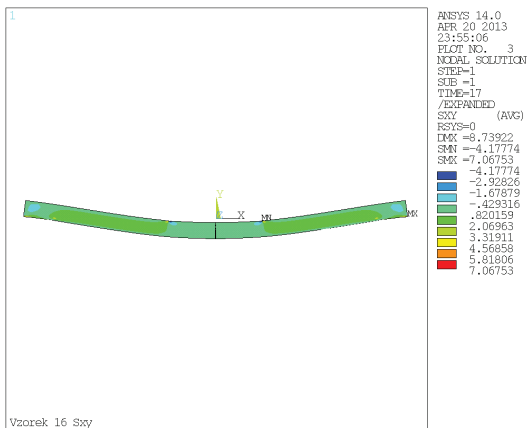
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



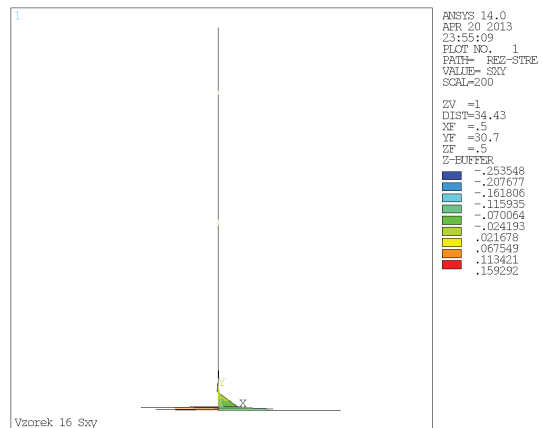
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



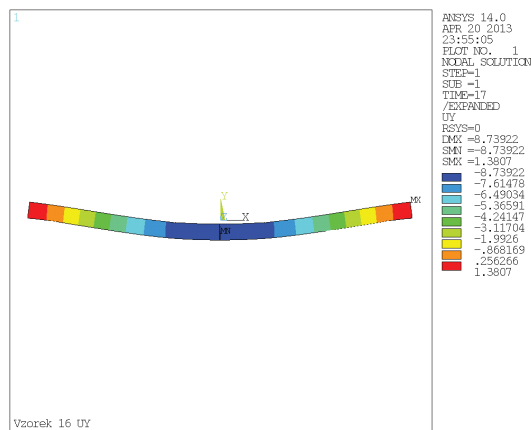
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

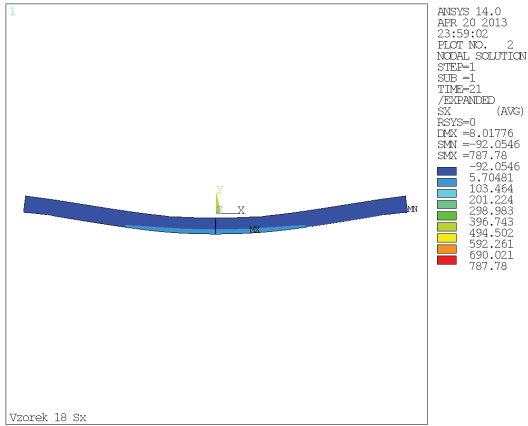


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

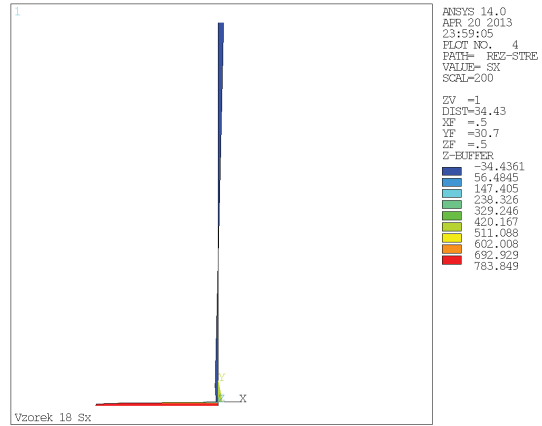


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 18

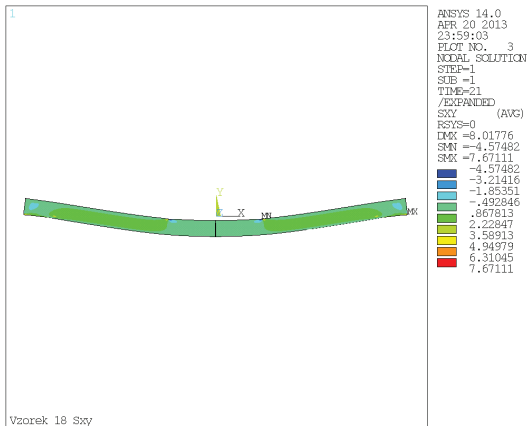
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



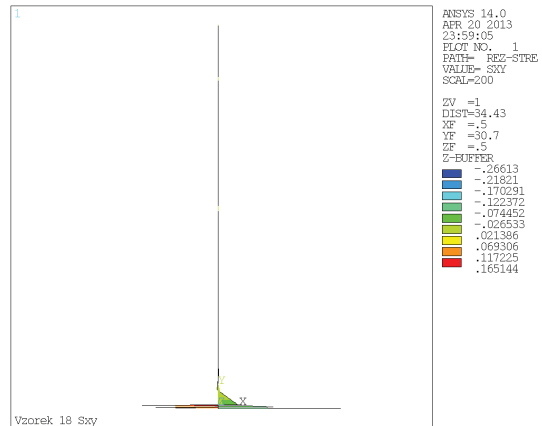
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



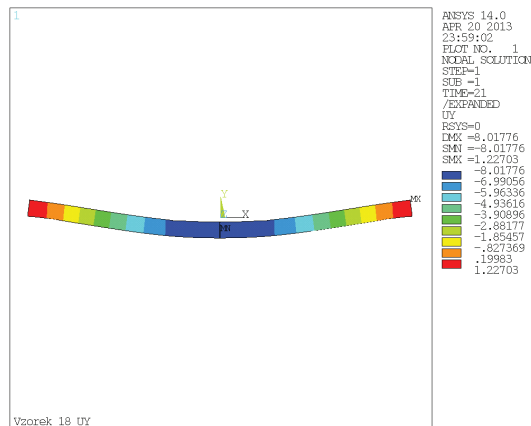
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku

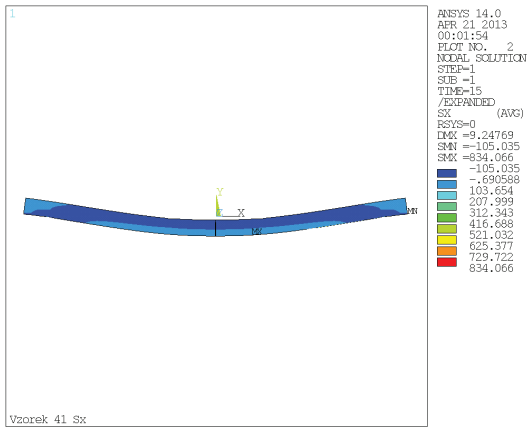


Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku

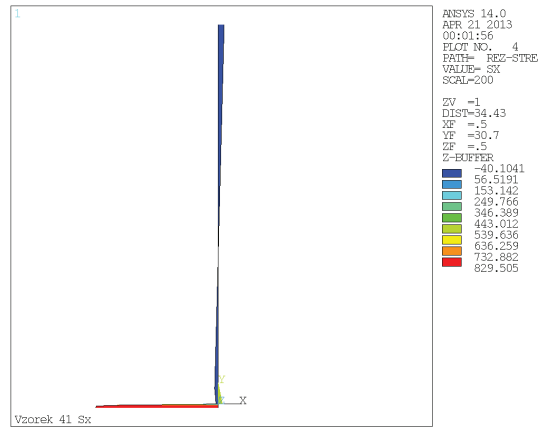


Příloha č. 1
Konstrukční prvek č. 41

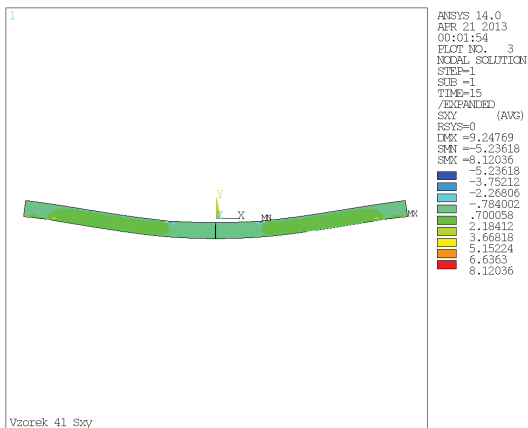
Hodnoty a průběh normálového napětí S_x a deformovaný tvar konstrukčního prvku



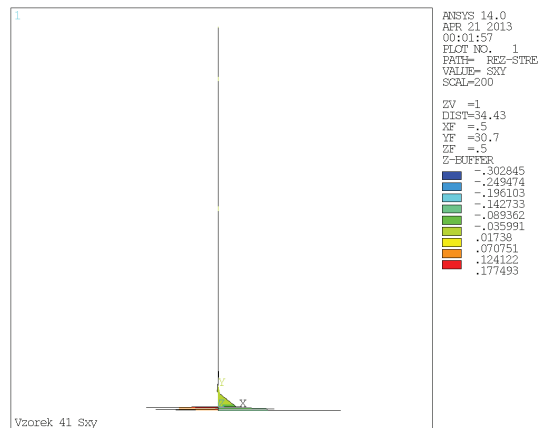
Hodnoty a průběh napětí S_x v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



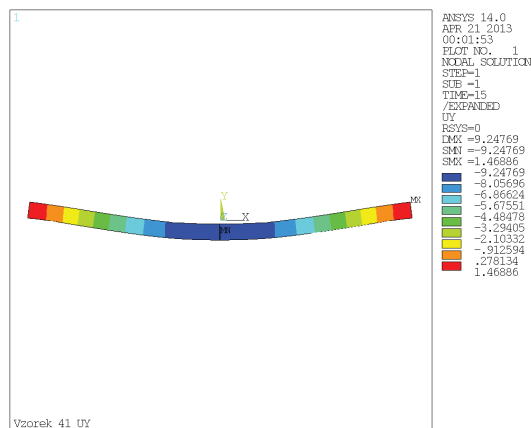
Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Hodnoty a průběh smykového napětí S_{xy} v transverzální rovině uprostřed konstrukčního prvku



Hodnoty průhybu a deformovaný tvar konstrukčního prvku



Příloha č. 2

Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro nevyztužené nosníky z modelu MKP

č.	typ	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
2	nevyztužené	1 214	5,096	3 114	31,3
15	nevyztužené	1 142	6,227	2 397	29,5
23	nevyztužené	1 219	7,468	2 134	31,5
36	nevyztužené	918	4,496	2 669	23,7
43	nevyztužené	1 110	8,365	1 735	28,7
44	nevyztužené	1 186	6,564	2 362	30,6
48	nevyztužené	900	5,455	2 157	23,2
53	nevyztužené	1 125	9,706	1 515	29,0
60	nevyztužené	1 058	6,3	2 195	27,3
62	nevyztužené	909	2,558	4 645	23,5
průměrná hodnota		1 078,10	6,22	2 492	27,8
směrodatná odchylka		126,32	2,02	878	3,3
variační koeficient		11,72%	32,43%	35,23%	11,72%

Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky uhlíkovou tkaninou s EP adhezivem z modelu MKP

č.	typ	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
21	EP	2 074	9,076	2 987	53,5
27	EP	2 030	7,937	3 343	52,4
28	EP	1 822	6,863	3 470	47,0
32	EP	1 894	6,892	3 592	48,9
39	EP	1 926	7,942	3 170	49,7
40	EP	1 456	5,573	3 415	37,6
45	EP	1 813	7,423	3 193	46,8
52	EP	1 994	7,99	3 262	51,5
55	EP	1 694	7,103	3 118	43,7
59	EP	2 318	8,322	3 641	59,8
průměrná hodnota		1 902,10	7,51	3 319	49,1
směrodatná odchylka		232,05	0,97	212	6,0
variační koeficient		12,20%	12,89%	6,38%	12,20%

Příloha č. 2

Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou s EP adhezivem z modelu MKP

č.	typ	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
4	EP+	3 610	8,438	5 592	93,2
6	EP+	3 634	9,388	5 060	93,8
7	EP+	3 491	8,697	5 247	90,1
9	EP+	3 347	6,912	6 330	86,4
10	EP+	3 470	8,744	5 187	89,6
11	EP+	3 206	8,078	5 188	82,8
14	EP+	3 246	9,113	4 656	83,8
16	EP+	3 116	8,721	4 671	80,5
18	EP+	3 270	8,002	5 342	84,4
41	EP+	3 714	9,23	5 260	95,9
průměrná hodnota		3 410,40	8,53	5 253	88,1
směrodatná odchylka		203,11	0,73	474	5,2
variační koeficient		5,96%	8,55%	9,03%	5,96%

Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky uhlíkovou tkaninou s PU adhezivem z modelu MKP

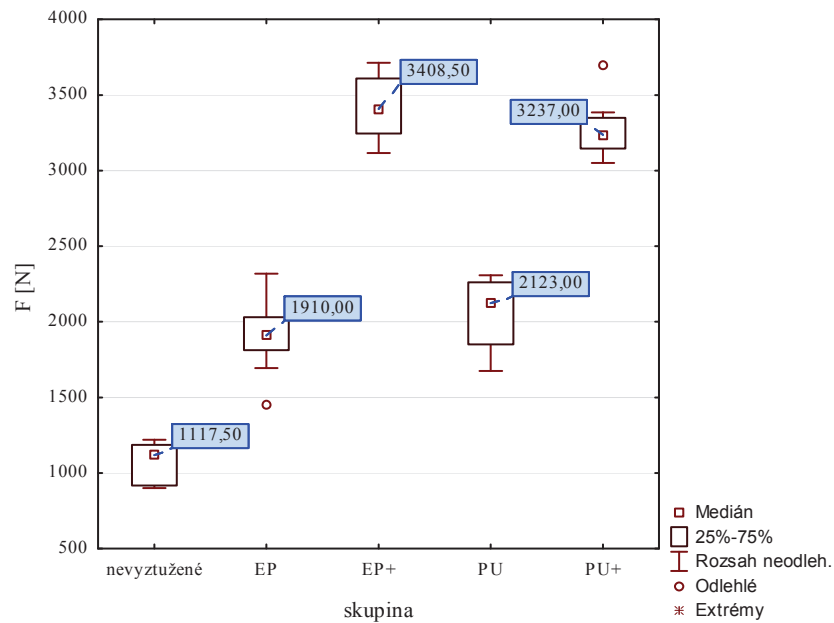
č.	typ	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
20	PU	2 220	7,922	3 663	57,3
24	PU	1 795	7,246	3 238	46,3
25	PU	1 850	8,869	2 727	47,8
29	PU	2 261	9,247	3 196	58,4
31	PU	2 286	10,223	2 923	59,0
34	PU	2 257	10,829	2 724	58,3
35	PU	2 307	12,478	2 417	59,6
50	PU	2 026	7,895	3 354	52,3
58	PU	1 675	5,216	4 198	43,2
64	PU	1 959	7,755	3 302	50,6
průměrná hodnota		2 063,60	8,77	3 174	53,3
směrodatná odchylka		233,49	2,05	514	6,0
variační koeficient		11,31%	23,38%	16,20%	11,31%

Příloha č. 2

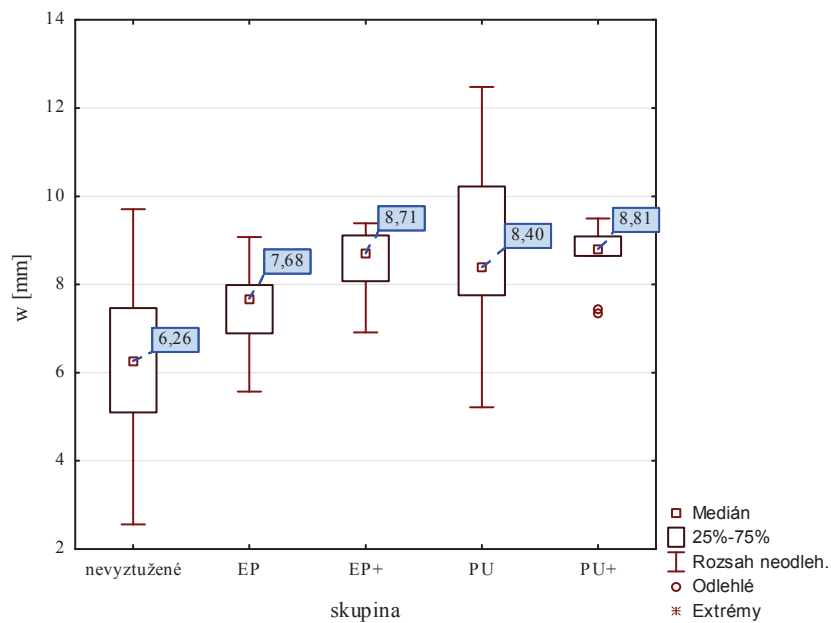
Naměřené hodnoty síly, průhybu, modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro vyztužené nosníky předepjatou uhlíkovou tkaninou s PU adhezivem z modelu MKP

č.	typ	F [N]	w [mm]	E_m [MPa]	σ_m [MPa]
3	PU+	3 693	8,645	5 584	95,3
5	PU+	3 224	7,453	5 655	83,2
8	PU+	3 384	8,742	5 060	87,4
17	PU+	3 096	9,089	4 453	79,9
42	PU+	3 050	8,696	4 585	78,7
46	PU+	3 188	9,495	4 389	82,3
54	PU+	3 145	9,217	4 460	81,2
56	PU+	3 253	8,877	4 790	84,0
57	PU+	3 250	7,357	5 775	83,9
61	PU+	3 350	8,915	4 912	86,5
průměrná hodnota		3 263,30	8,65	4 966	84,3
směrodatná odchylka		183,09	0,70	532	4,7
variační koeficient		5,61%	8,14%	10,72%	5,61%

Příloha č. 3

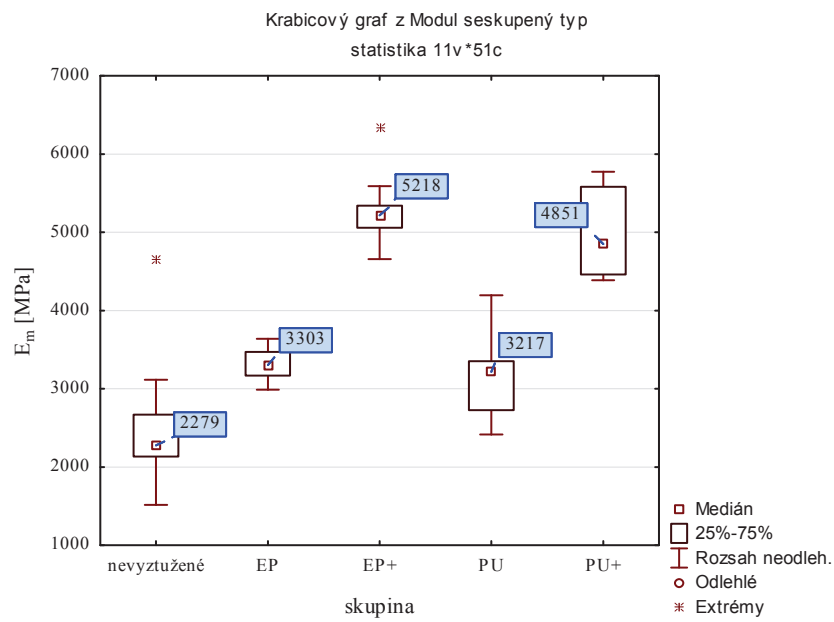


Porovnání hodnot zatěžovací síly F [N] pro skupiny nosníků z modelu MKP

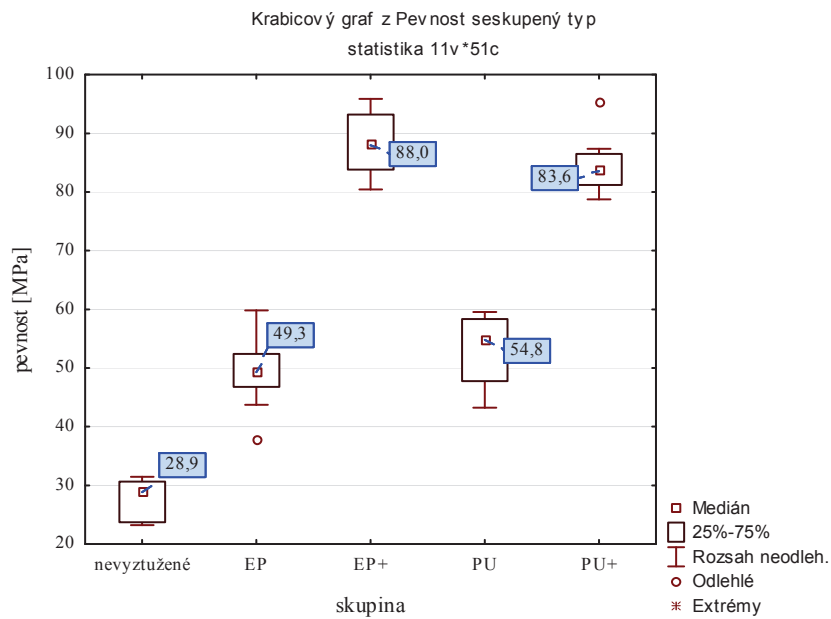


Porovnání hodnot průhybu w [mm] pro skupiny konstrukčních nosníků MKP

Příloha č. 3

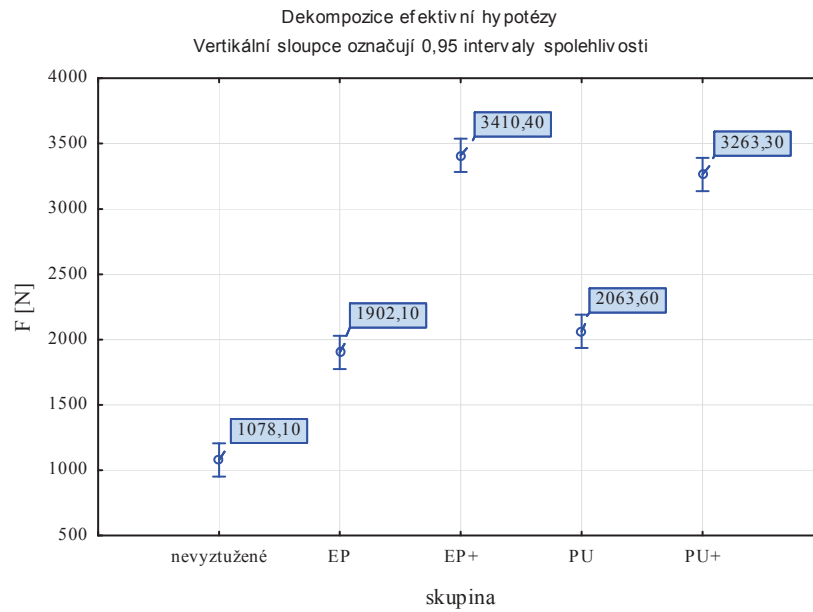


Porovnání hodnot modulu pružnosti E_m [MPa] pro skupiny nosníků



Porovnání hodnot pevnosti v ohybu σ_m [MPa] pro skupiny nosníků

Příloha č. 4

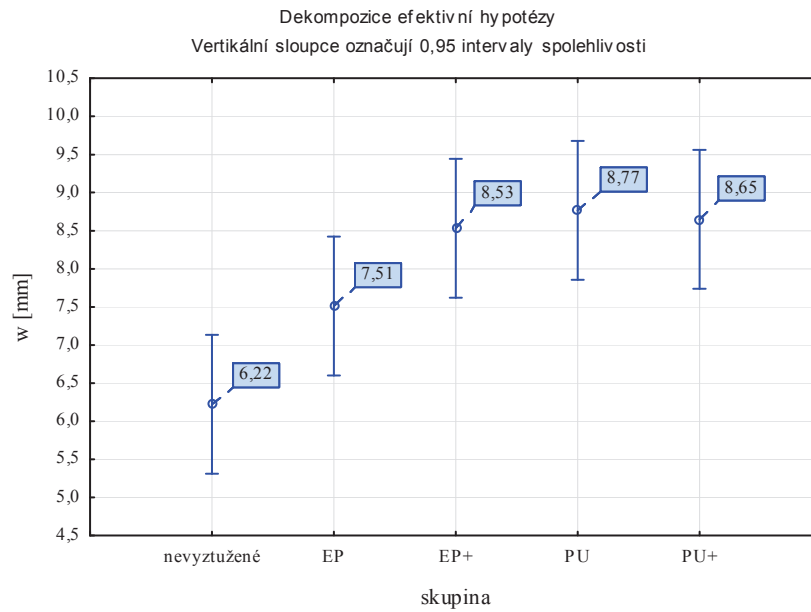


Zatěžovací síla F [N] ve skupinách nosníků z modelu MKP

Tukeyův HSD test s proměnnou F [N] z modelu MKP

Tukeyův HSD test; proměnná síla (statistika) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 39820,, sv = 45,000						
Č. buňky	typ	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		1078,1	1902,1	3410,4	2063,6	3263,3
1	nevyztužené		0,000134	0,000134	0,000134	0,000134
2	EP	0,000134		0,000134	0,380931	0,000134
3	EP+	0,000134	0,000134		0,000134	0,475499
4	PU	0,000134	0,380931	0,000134		0,000134
5	PU+	0,000134	0,000134	0,475499	0,000134	

Příloha č. 4

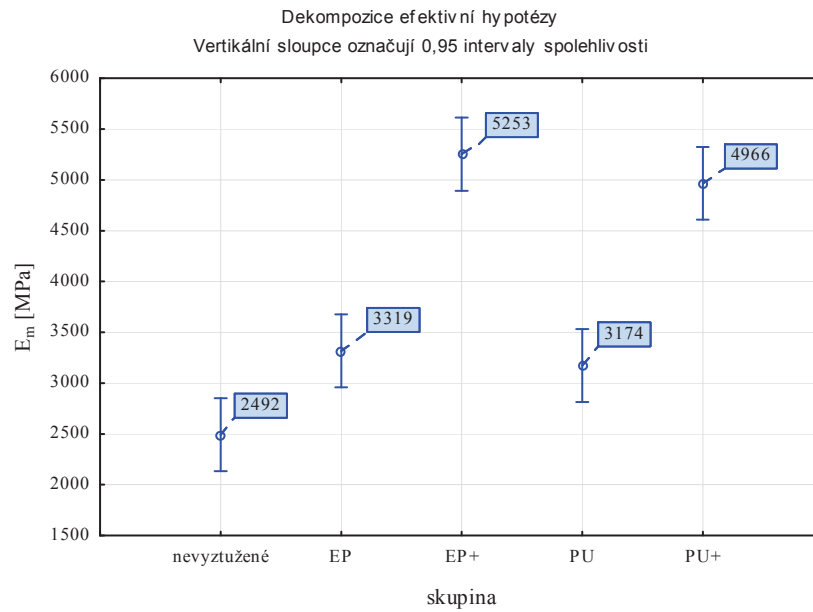


Průhyb w [mm] ve skupinách nosníků z modelu MKP

Tukeyův HSD test s proměnnou w [mm] z modelu MKP

		Tukeyův HSD test; proměnná průhyb (statistika) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 2,0480, sv = 45,000				
Č. buňky	typ	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
1	nevyztužené	6,2235	0,276382	0,006714	0,002341	0,004020
2	EP	0,276382	7,5121	0,508928	0,300772	0,400069
3	EP+	0,006714	0,508928	8,5323	0,996003	0,999771
4	PU	0,002341	0,300772	0,996003	8,7680	0,999746
5	PU+	0,004020	0,400069	0,999771	0,999746	8,6486

Příloha č. 4

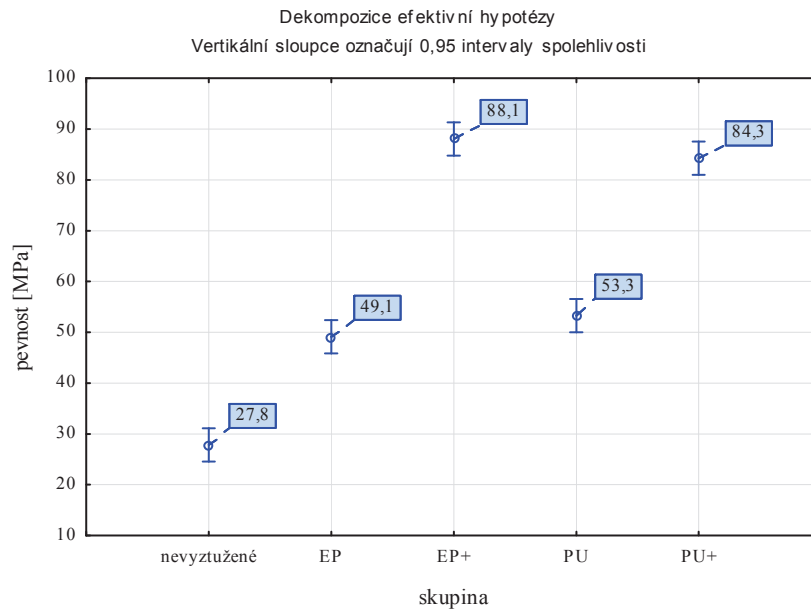


Modul pružnosti E_m [MPa] ve skupinách nosníků z modelu MKP

Tukeyův HSD test s proměnnou E_m [MPa] z modelu MKP

Tukeyův HSD test; proměnná Modul (statistika) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 3176E2, sv = 45,000						
Č. buňky	typ	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		2492,3	3319,2	5253,3	3174,3	4966,2
1	nevyztužené		0,016419	0,000134	0,068906	0,000134
2	EP	0,016419		0,000134	0,978150	0,000134
3	EP+	0,000134	0,000134		0,000134	0,785127
4	PU	0,068906	0,978150	0,000134		0,000134
5	PU+	0,000134	0,000134	0,785127	0,000134	

Příloha č. 4



Pevnost v ohybu σ_m [MPa] ve skupinách nosníků z modelu MKP

Tukeyův HSD test s proměnnou σ_m [MPa] z modelu MKP

		Tukeyův HSD test; proměnná Pevnost (statistika) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 26,544, sv = 45,000				
Č. buňky	typ	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		27,835	49,110	88,053	53,280	84,255
1	nevyztužené		0,000134	0,000134	0,000134	0,000134
2	EP	0,000134		0,000134	0,380931	0,000134
3	EP+	0,000134	0,000134		0,000134	0,475499
4	PU	0,000134	0,380931	0,000134		0,000134
5	PU+	0,000134	0,000134	0,475499	0,000134	

Příloha č. 5

Technické listy:

- ICEMA_R_145_Professional
- SikaWrap 330
- SikaWrap 300C60

Technická specifikace produktu



H. B. Fuller, GmbH
Kaplanstraße 30
A – 4600 Wels
Austria

ICEMA[®] R 145 Professional

1 složkové PU lepidlo vytvrzující vlhkostí

Druh produktu : 1-složkové PU-lepidlo neobsahující rozpouštědla vytvrzující vzdušnou vlhkostí

Oblast použití : montážní lepení různých druhů materiálů. ICEMA[®] R 145 Professional drží velmi dobře na předupravených kovech jako pozink, nerez, legovaná ocel, eloxovaný hliník, jako i na duroplastických umělých hmotách, DKS, PS, GF-polyester, tvrzené PVC, ABS, dřevěných a cementových materiálech.

Pokyny : Z důvodů velké různorodosti materiálů a jejich možné rozdílnosti v adhesivitě je potřebné provést odpovídající zkoušky.

Technické údaje :

Hustota (20 °C)	: 1,12 g/cm ³
Viskozita (20°C)	: 7.000 mPas
Otevřená doba (20 °C, 50 % rel. vlhkost vzd.)	
bez postřikání vodou	: cca 40 min
po nastříkání vodou	: cca 16 min
Barva	: žlutá
Bezpečnostní pokyny	: viz Bezpečnostní list
Čistící prostředek	: ISA - Verdünner 1 (Čištění nástrojů)
Spotřeba	: 100 – 200 g/m ² dle druhu použití
Teplota zpracování	: minimálně + 10 °C
Ředidlo	: zpracovává se bez ředidla
Skladování	: 12 měsíců skladovatelný při teplotě +5 až + 25 °C v uzavřených baleních. Použité balení vzduchotěsně uzavřeme. Chránit před vlhkostí, dle možnosti rychle spotřebovat.

Všeobecně :

ICEMA[®] R 145 Professional vytvrzuje působením vlhkosti za vzniku pevného, dlouho elastického filmu. Vlhkost obsažená ve vzduchu popř. v lepených dílech může být pro tento účel dostatečná. Obvykle se však dodává vlhkost lehkým postřikáním vodou. Zjišťování vlivu teploty a vlhkosti na pevnost plně vytvrzeného spojení se provádí ve specifických případech použití.

Vyšší vlhkost a vyšší teplota urychluje vytvrzování. Ovlivňuje i schopnost skladování, otevřený čas a čas vytvrzování. Proto jsou údaje uvedené v technickém listu pouze směrodatné i s ohledem na variabilnost předložených podmínek.

Zvláštní pokyny

Při vytvrzovací reakci vzniká oxid uhličitý, takže lepidlo v závislosti na nánosu lepidla,

lepené spáře, teplotě a tlaku více či méně napění a vyplní lepenou spáru. Tato schopnost je při mnoha použití požadována a je výhodou. V některých případech však může být tato vlastnost překážkou.

Při lepení porézních materiálů vzájemně je vznikající pěna nezávislá na zpracovatelské viskozitě a vnikne do podkladu.

Toto platí i pro EPS-tvrzenou pěnu (styropor, polystyren) dokud je viskozita lepidla nižší než 8.000 mPa.s. Při vyšší viskozitě již není vniknutí nebezpečné. Zůstává však nebezpečí vytvoření boulí na vrchní ploše.

Při lepení těsných materiálů, např. hliníkový plech s extrudovaným polystyrenem nebo PU-tvrzenou pěnou vzniká nebezpečí vytváření boulí z vypěněného lepidla, neboť nemůže volně expandovat. Odpomoci mohou od vzdušňovací kanálky, které mohou být vyrobeny 1-2mm hluboko pilovým řezem.

Nános lepidla

Lepidlo je jednostranně naneseo. Vhodné jsou Pfohl-váleček, špachtle, válcové nanášedky nebo „airless – Air-Kombi stříkací zařízení. Při stříkání je bezpodmínečně nutné odsávání.

Dodání vlhkosti

Pro rychlejší vytvrzení lepidla a nezávislosti na přirozené vlhkosti může být vlhkost dodána dodatečně lehkým postříkáním. Obvykle se voda nastříká na nanesený film lepidla – v ojedinělých případech lze navlhčit i druhou stranu. Množství vody cca 5 – 10 % naneseného množství lepidla je dostačující.

Příložení a lisování dílů

Díly jsou ihned po nánosu lepidla, eventuelně po nástřiku vodou, složeny k sobě a stlačeny. Toto musí být učiněno v průběhu otevřené doby. Do vytvrzení lepidla jsou lepené díly stlačeny tlakem, aby vznikla kontaktní plocha. Velikost postačujícího tlaku je určena velikostí a druhem materiálu.

Lepidlo nepotřebuje pro vytvrzení tlak, ten slouží k tomu, aby lepené díly byly spojeny až do doby vytvrzení lepidla.

Lisovací čas

Lisovací čas je závislý na vlhkosti a teplotě. Pokud bude dodána voda, platí následující hodnoty :

Při	+ 20 °C	cca 90 minut
	+ 40 °C	cca 60 minut
	+ 60 °C	cca 30 minut

Po tomto čase je ve všeobecnosti dosaženo pevnosti, která umožňuje další zpracování.

Konečná pevnost lepení je dosažena teprve po několika dnech.

<p>Technický stav :15.04.2010.....</p> <p>Od tohoto data jsou odlišné údaje uvedené v dříve vydaných technických specifikacích neplatná.</p> <p>Důležité upozornění :</p> <p>Speciální produkt k použití jen po technickém obeznámení zpracovanými odbornými pracovníky za přísného dodržování údajů v technických specifikacích.</p> <p>Chraňte před dětmi! Neskladovat společně s potravinami. Nádoby dobře uzavřít, dobře uložit!</p> <p>Naše písemné pokyny, technické specifikace, návod k užívání a jiné tištěné specifikace jsou sestaveny na základě našich nejlepších vědomostí, vlastních pokusů, výsledků našich výzkumů a našich praktických zkušeností.</p> <p>Současně platí námi předané ústní informace.</p> <p>Zaručujeme stálou kvalitu našich produktů. Výsledek jejich použití a zpracování závisí na dodržení podmínek, neboť naše produkty podléhají faktorům, které nemůžeme ovlivnit a v jejich celistvosti posoudit.</p> <p>Naše technické poradenství slovní, písemné a zkoušky je nezávazného charakteru - také se zřetelem na právní ochranu a je osvobozeno od postačujících zkoušek našich produktů na jejich vhodnost pro zamýšlené cíle a postupy.</p> <p>Ve zbývajícím platí přiměřeně naše všeobecné prodejní a expediční podmínky.</p>

Technický list
Vydání 23/12/2008
Identifikační č.:
02 04 01 04 001 0 000004
Sikadur®-330

Sikadur®-330

2-komponentní epoxidová impregnační pryskyřice

Popis výrobku	Sikadur®-330 – 2-komponentní tixotropní impregnační / laminační pryskyřice na epoxidové bázi.
Použití	<ul style="list-style-type: none">■ impregnační / laminační pryskyřice pro SikaWrap® vyztužovací tkaniny určené pro suchý způsob aplikace■ základní pryskyřice pro mokrý způsob aplikace■ konstrukční lepidlo na lepení CarboDur® lamel na rovné povrchy
Vlastnosti / výhody	<ul style="list-style-type: none">■ jednoduché míchání a aplikace pomocí zednické lžice a impregnačního válečku■ speciálně vytvořena pro ruční aplikaci■ vynikající aplikace i na svislé plochy a plochy nad hlavou■ dobrá přilnavost k různým povrchům■ dobré mechanické vlastnosti■ nevyžaduje použití speciálního základního nátěru■ bez rozpouštědel
Zkušební zprávy	SOCOTEC (France): Cahier des charges Sika® CarboDur, SikaWrap®. Road and Bridges Research Institute (Poland): IBDiM No AT/2003-04-336. Vyhovuje požadavkům EN 1504-4: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 4: Konstrukční spojování.

Údaje o výrobku

Vzhled

Vzhled / barva	Komponent A – pryskyřice: pasta Komponent B – tvrdidlo: pasta
	Barva: Komponent A: bílá Komponent B: šedá Směs A+B: světle šedá

Balení

Standard:
5 kg (A+B) předem dávkované nevratné obaly
Pro průmysl:
Komponent A: 24 kg
Komponent B: 6 kg

Skladování

Podmínky skladování / Trvanlivost 24 měsíců od data výroby v neporušeném originálním balení v suchu a při teplotách +5°C až +25°C.
Chraňte před přímým slunečním zářením.



Technické údaje

Chemická báze Epoxidová pryskyřice.

Objemová hmotnost 1,30 kg/l ± 0,1 kg/l (směs A+B) (při teplotě +23°C)

Viskozita rychlost smyku: 50 /s

teplota	viskozita
+10°C	~ 10000 mPas
+23°C	~ 6000 mPas
+35°C	~ 5000 mPas

Koeficient teplotní roztažnosti $4,5 \times 10^{-5}$ na °C (-10°C do +40°C)

Teplotní stabilita Heat Distortion Temperature (HDT) – teplotní deformace ASTM D648

Doba zrání	Teplota	HDT
7 dní	+10°C	+36°C
7 dní	+23°C	+47°C
7 dní	+35°C	+53°C
7 dní (při +10°C) + 7 dní (při 23°C)	-	+43°C

Pracovní teplota -40°C do +45°C.

Mechanické / fyzikální vlastnosti

Pevnost v tahu 30 N/mm² (po 7 dnech zrání, při teplotě 23°C) DIN 53455

Přidrženost porušení v betonu (> 4 N/mm²) na pískovaném podkladu: > 3 dny EN 24624

Modul pružnosti
V ohybu:
3800 N/mm² (po 7 dnech, při teplotě 23°C) DIN 53452
V tahu:
4500 N/mm² (po 7 dnech, při teplotě 23°C) DIN 53455

Protážení při přetržení 0,9% (po 7 dnech, při teplotě 23°C) DIN 53455

Odolnost

Chemická odolnost Tento produkt není odolný vůči chemickému zatížení.

Teplotní odolnost Dlouhodobě odolává teplotnímu zatížení +45°C.

Informace o systému

Složení systému
Základní nátěr - Sikadur®-330.
Impregnační / laminační pryskyřice - Sikadur®-330.
Tkanina pro zesilování konstrukcí – SikaWrap® - typ dle požadavků.

Aplikační podrobnosti

Spotřeba Spotřeba je závislá na drsnosti a nerovnosti podkladu a na typu tkaniny SikaWrap®. Viz. technický list příslušné tkaniny pro zesilování konstrukcí SikaWrap®.
Přibližně: 0,7 – 1,5 kg/m².

Kvalita podkladu	<p>Podklad musí být pevný a musí mít dostatečnou pevnost pro zajištění minimální pevnost v tahu $1,0 \text{ N/mm}^2$ nebo podle konkrétního projektu pro zesilování.</p> <p>Povrch musí být suchý, zbaven veškerých nečistot jako jsou oleje, mastnoty, původní nátěry, ochranné nátěry atd.</p> <p>Povrch betonu musí být vyrovnaný (maximální přípustná odchylka povrchu je 2 mm na délce 0,3 m), při použití bednění nesmí být větší než 0,5 mm. Větší nerovnosti odstraňte tryskáním nebo obroušením povrchu.</p> <p>Vyztužené rohy musí být zaobleny s minimálním poloměrem 20 mm (závisí na typu použité vyztužovací tkaniny SikaWrap®) nebo podle konkrétního projektu pro zesilování. Toho lze dosáhnout broušením rohů, popř. použitím malty Sikadur.</p>
-------------------------	---

Příprava podkladu	<p>Betonové a cihelné podklady musí být připraveny mechanickým tryskáním nebo obroušováním, aby byly odstraněny veškeré volné částice, uvolněný a drobný materiál, a aby byla mechanicky otevřena povrchová struktura.</p> <p>Dřevěné podklady musí být ohoblované nebo pískované.</p> <p>Veškerý prach, volné částice a drobný materiál musí být před aplikací Sikadur®-330 dokonale odstraněny např. kartáčem, popř. průmyslovým vakuovým vysavačem. Nekvalitní beton / zdvo musí být opraveny a povrchové poruchy (např. štěrby, hnízda, kaverny) musí být zcela odkryty.</p> <p>Na opravy podkladu, vyplnění dutin na povrchu betonu, štěrby, hnízda, povrchové vyrovnání atd. doporučujeme použít Sikadur®-41 nebo směs Sikadur®-30 a Sikadur®-501 s křemičitým pískem (poměr míchání 1 : 1).</p> <p>Musí být provedeny zkoušky přídržnosti ke zjištění dostatečné přípravy povrchu.</p> <p>Trhliny širší než 0,25 mm vyplňte pomocí Sikadur®-52 nebo jinou vhodnou Sikadur® injektážní pryskyřicí.</p>
--------------------------	--

Aplikační podmínky / Omezení

Teplota podkladu	+10°C min. / +35°C max.
Teplota prostředí	+10°C min. / +35°C max.
Vlhkost podkladu	≤ 4%. Testovací metoda: Sika-Tramex.
Rosný bod	<p>Pozor na kondenzaci!</p> <p>Teplota podkladu během aplikace musí být alespoň o 3°C vyšší než je teplota rosného bodu.</p>

Návod k aplikaci

Mísící poměr	<p>Komponent A : komponent B = 4 : 1 (hmotnostně)</p> <p>Při míchání většího množství směsi musí být přesně hmotnostně nadávkován každý komponent.</p>
---------------------	--

Míchání	<p>Předem nadávkované množství:</p> <p>Míchejte komponenty A+B dohromady minimálně 3 minuty elektrickým míchadlem (při nízkých otáčkách, max. 600 ot./min.) tak dlouho, až má hmota jednotnou konzistenci a nejsou patrné žádné barevné šmouhy. Vyvarujte se provzdušnění během míchání. Následně přemístěte celý obsah směsi do čisté nádoby a ještě jednou promíchejte nízkou rychlostí, aby došlo k odstranění vzduchu ze směsi. Namíchejte pouze takové množství, které jste schopni spotřebovat před zatuhnutím.</p>
----------------	---



doporučené míchadlo	<p>Nenadávkované množství:</p> <p>Nejprve důkladně promíchejte každý komponent zvlášť. Nadávkujte jednotlivé složky ve správném poměru do přiměřené velké nádoby a následně míchejte elektrickým míchadlem při nízké rychlosti dokud nebude mít hmota jednotnou konzistenci a bude bez barevných šmouh.</p>
----------------------------	---

Aplikace / Nářadí



Příprava:

Před samotnou aplikací je třeba znát vlhkost podkladu, relativní vlhkost prostředí a teplotu rosného bodu.

Ustříhňte předepsanou SikaWrap[®] tkaninu požadovaných rozměrů.

Aplikace pryskyřice:

Aplikujte Sikadur[®]-330 na připravený podklad použitím stěrky, válečku nebo štětky.

Kladení a vrstvení tkaniny:

Předepsanou tkaninu SikaWrap[®] umístěte v požadovaném směru na vrstvu pryskyřice Sikadur[®]-330. Pečlivě vtačte tkaninu SikaWrap[®] do lepidla pružným laminačním válečkem souběžně ve směru vláken dokud lepidlo nepronikne skrz vlákna tkaniny a dokud se na celém povrchu nevytvoří vrstva samotného lepidla.

Dodatečná vrstva tkaniny:

Nanášíte-li více než jednu vrstvu tkaniny (max. 3), aplikujte další vrstvu lepidla Sikadur[®]-330 metodou „vlhké do vlhkého“ během 60 minut (při teplotě +23°C) po nanesení předchozí vrstvy.

Pokud není možné lepit další vrstvu do 60 min. je nutno dodržet čekací dobu nejméně 12 hod.

Krycí vrstva:

Jako krycí vrstvu naneste vrstvu pryskyřice Sikadur[®]-330 v množství 0,5 kg/m², na kterou můžeme přidat křemičitý písek sloužící jako podklad pro následující vrstvy na bázi cementu (omítka).

Překrývání:

Směr vláken:

Překrytí SikaWrap[®] tkanin musí být minimálně 100 mm (závisí na typu vyztužovací tkaniny SikaWrap[®]) nebo podle konkrétního projektu pro zesilování.

Vedle sebe:

Jednosměrné tkaniny: při nanášení více jednosměrných tkanin SikaWrap[®] vedle sebe není překrytí požadováno pokud není uvedeno ve speciálních požadavcích v projektu.

Vícesměrné tkaniny: je požadováno minimální překrytí 100 mm (závisí na typu vyztužovací tkaniny SikaWrap[®]) nebo podle speciálních požadavcích v projektu.

Čištění nářadí

Očistěte veškeré použité nářadí ihned po ukončení práce pomocí Sika[®] Colma Cleaner. Zatvrdlý materiál lze odstranit pouze mechanicky.

Doba zpracovatelnosti

Doba zpracovatelnosti:

Teplota	Čas
+10°C	90 minut (5kg)
+35°C	30 minut (5kg)

Doba zpracovatelnosti začíná smícháním obou komponentů (pryskyřice a tvrdidla). Při nižších teplotách dochází k prodloužení doby zpracovatelnosti, naopak při vyšších teplotách dochází ke zkrácení doby zpracovatelnosti.

Čím je větší množství namíchaného materiálu Sikadur[®]-330, tím je kratší doba zpracovatelnosti. K dosažení delší doby zpracovatelnosti za vyšších teplot, míchejte menší množství materiálu nebo ochlaďte jednotlivé komponenty před mícháním. Minimálně na +5°C.

Otevřená doba:

Teplota	Čas
+10°C	60 minut
+35°C	30 minut

Čekací doba / Převrstvení

Produkt	Teplota povrchu	Minimum	Maximum
Sikadur®-330 x Sikadur®-330	+10°C	24 hodin	Vytvrzená pryskyřice starší než 7 dní může být odmaštěna pomocí Sika® Colma Cleaner a jemně obroušena smirkovým papírem před dalším nátěrem.
	+23°C	12 hodin	
	+35°C	6 hodin	

Produkt	Teplota povrchu	Minimum	Maximum
Sikadur®-330 x Sikagard®- barevné nátěry	+10°C	5 dnů	Vytvrzená pryskyřice starší než 7 dní může být odmaštěna pomocí Sika® Colma Cleaner a jemně obroušena smirkovým papírem před dalším nátěrem.
	+23°C	3 dny	
	+35°C	1 den	

Časy jsou přibližné a mohou být ovlivněny okolními podmínkami.

Poznámky k aplikaci / Omezení

Tento produkt je určen do rukou zkušených profesionálů.

Sikadur®-330 musí být ochráněn před deštěm minimálně 24 hodin po aplikaci.

Zajistěte rozmístění tkaniny a laminační pryskyřice během otevřeného času.

SikaWrap® tkanina musí být opatřena ochranou vrstvou na bázi cementu, nebo pokryta estetickým či ochranným nátěrem. Výběr je závislý na daných požadavcích konečné vrstvy. Pro základní ochranu před UV zářením použijte Sikagard®-550W Elastic, Sikagard® ElastoColor-675W nebo Sikagard®-680S.

Při nízkých teplotách a/nebo vysoké relativní vlhkosti vzduchu, se mohou na povrchu vytvrzené pryskyřice Sikadur®-330 objevit lepivé zbytky pryskyřice. Při aplikaci další vrstvy tkaniny SikaWrap® nebo nátěru musí být tyto lepivé pozůstatky nejdříve odstraněny, aby bylo dosaženo požadované pevnosti povrchu. Tyto zbytky mohou být odstraněny pomocí vody. V tomto případě musí být povrch před aplikací další vrstvy tkaniny SikaWrap® dostatečně vysušený.

Pro aplikaci za nižších nebo vyšších teplot je třeba zajistit po dobu 24 hod skladování materiálů v kontrolovaných podmínkách, popřípadě upravit míchání, aplikaci a dobu zpracovatelnosti.

Počet dalších vrstev tkanin aplikovaných mokřím způsobem musí být důkladně sledován před nechtěným smrštěním, mačkáním nebo klouzáním vyztužovací tkaniny během vytvrzování pryskyřice Sikadur®-330. Počet vrstev vyztužovacích tkanin závisí na typu použité tkaniny a na okolních klimatických podmínkách.

Detaily vytvrzování

Doba vytvrzení

Teplota	Plně vytvrzené
+10°C	7 dní
+23°C	5 dní
+35°C	2 dny

Časy vytvrzení jsou přibližné a mohou být ovlivněny okolními podmínkami.

Platnost hodnot

Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.

Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz.

Bezpečnostní předpisy

Ochranná opatření

- Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.
- Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice.
- Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.
- Odstraňování odpadu
- Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci. Fólie je možné recyklovat.

Místní omezení

V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplné informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému zaručujícímu posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na www.sika.cz.

CE značení

CE	
0921	
Sika Schweiz AG Tueffenwies 16-22 CH - 8048 Zuerich 1001	
08	
0921-CPD-2054	
EN 1504-4	
Výrobky pro konstrukční lepení externích příložek na povrch betonové konstrukce za účelem zesílení.	
Soudržnost:	≥ 14 N/mm ²
Pevnost v šikmém smyku:	≥ 50 N/mm ²
50°	≥ 60 N/mm ²
60°	≥ 70 N/mm ²
70°	≥ 12 N/mm ²
Pevnost ve smyku:	≥ 30 N/mm ²
Pevnost v tlaku:	≥ 0,1%
Smrštění / roztažnost:	65 min. při +23°C
Doba zpracovatelnosti:	vyhovuje
Citlivost na vodu:	≥ 2000 N/mm ²
Modul pružnosti v tlaku:	≤ 100 * 10 ⁻⁶
Koeficient teplotní roztažnosti:	≥ 40°C
Teplota skelného přechodu:	třída E
Reakce na oheň:	vyhovuje
Trvanlivost:	vyhovuje
Uvolňování nebezpečných látek: (vyhovuje 5.4)	vyhovuje



Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36,
CZ 624 00 Brno

tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com
<http://www.sika.cz>



Technický list
Vydání 09/09/2008
Identifikační č.:
02 04 01 02 001 0 000017
SikaWrap®-300 CZ/60

SikaWrap®-300 CZ/60

Prošívaná tkanina z uhlíkových vláken pro zesilování konstrukcí

Popis výrobku

SikaWrap®-300 CZ/60 je jednosměrně tkaná prošívaná tkanina z uhlíkových vláken (rohoží) pro suchý nebo mokry způsob aplikace.



Použití

Zesilování konstrukcí z armovaného betonu, cihelného zdiva a dřeva pro zatížení v ohybu a ve smyku v důsledku:

- zvýšení odolnosti cihelných zdí při zemětřesení
- náhrada chybějící, zkorodované výztuže
- zesílení a zvýšení únosnosti sloupů
- zvýšení celkového zatížení konstrukčních prvků
- při změně využití stavby
- chybného návrhu konstrukce
- prevence před poruchami způsobené zemětřesením
- prodloužení životnosti a provozuschopnosti
- zvýšení únosnosti konstrukce dle platných předpisů

Vlastnosti / výhody

- útek z teplem tvrdnoucích vláken zajišťuje stabilitu vláken
- vhodné pro všechny zesilovací práce
- vhodné pro různé tvarované podklady (trámy, sloupy, komíny, piloty, zdi, sila)
- nízká hmotnost – nezvyšuje přídatné zatížení konstrukce
- oproti tradičním technikám finančně méně náročná metoda zesilování

Zkušební zprávy

ITC Zlín, AO č. 224 - Certifikát č. 07 0305 V/AO/a

ITC Zlín, AO č. 224 - Stavebně technické osvědčení STO-AO224-79/2007/a s platností do 31.5.2010

Údaje o výrobku

Druh vláken

Uhlíková vlákna střední pevnosti.

Konstrukce tkaniny

Osnova:	0°	černá uhlíková vlákna	309 g/m ² (min.-max.: 294-324 g/m ²)
	90°	skelné prošíání	9,4 g/m ²
Prošivací nit:		polyester	6,3 g/m ²
Pojivo:		EP prášek	7,5 g/m ²

Balení

	délka tkaniny / role	šířka tkaniny
2 role v lepenkové krabici	100 m	300 mm

Construction



Skladování

Podmínky skladování / Trvanlivost	24 měsíců od data výroby v neporušeném originálním balení v suchu a při teplotách +5°C až +35°C. Chraňte před přímým slunečním zářením.
--	--

Technické údaje

Gramáž	309 g/m ² ± 15 g/m ²
Tloušťka tkaniny	0,171mm (závisí na obsahu vláken).
Hustota vláken	1,81 g/cm ³

Mechanické / Fyzikální Vlastnosti

Vlastnosti „suchého“ vlákna	Pevnost v tahu: 3800 N/mm ² (přibližně) Modul pružnosti v tahu: 242000 N/mm ² (přibližně) Protažení při přetržení: 1,55% (přibližně)
------------------------------------	---

Vlastnosti laminátu	Tloušťka laminované vrstvy: 1,0 mm na vrstvu (impregnovaná Sikadur [®] -330) Mezní zatížení: 470 kN/m šířky na vrstvu Modul pružnosti v tahu: 36,0 kN/mm ² (platí pro běžnou tloušťku laminované vrstvy 1,0 mm) Poznámka: Výše uvedené hodnoty jsou pouze orientační. Získané údaje o vlastnostech laminované vrstvy během zkoušky napětí závisí na druhu použité impregnační / laminační pryskyřice a způsobu provedení zkoušky. Zohledněte redukující materiálové faktory podle relevantních návrhových norem.
----------------------------	---

Návrh	Návrh napětí: Protažení max. 0,60% (závisí na druhu zatížení; hodnotu je nutné přizpůsobit místním návrhovými normám). Pevnost v tahu: (teoretická pevnost v tahu pro návrh): <ul style="list-style-type: none">- při protažení 0,4%: 135 kN/m šířky (= 40 kN / 30 cm)- při protažení 0,6%: 200 kN/m šířky (= 60 kN / 30 cm)
--------------	---

Informace o systému

Složení systému	Dodržujte uvedenou skladbu systému, v žádném případě nesmí být měněna. Primer pro beton - Sikadur [®] -330 nebo Sikadur [®] -300 se Sikadur [®] -513. Impregnační / laminační pryskyřice - Sikadur [®] -330 / Sikadur [®] -300. Tkanina pro konstrukční zesílení - SikaWrap [®] -300 CZ/30. Podrobnosti o vlastnostech pryskyřice, aplikaci tkaniny a další informace naleznete v technickém listu Sikadur [®] -330 nebo Sikadur [®] -300.
------------------------	--

Aplikační podrobnosti

Spotřeba	Suchý způsob aplikace: <ul style="list-style-type: none">- impregnace první vrstvy včetně primeru (závisí na nerovnosti podkladu): ~ 1,0 – 1,5 kg/m² (Sikadur[®]-330)- impregnace dalších vrstev: ~ 0,8 kg/m² (Sikadur[®]-330)
-----------------	---

	<p>Mokrý způsob aplikace:</p> <p>Primer na připravený podklad (závisí na nerovnosti podkladu):</p> <ul style="list-style-type: none"> - hladký povrch: ~ 0,5 kg/m² (Sikadur[®]-300 nebo Sikadur[®]-330) - nerovný povrch: ~ 0,5 – 1,0 kg/m² (Sikadur[®]-330 nebo Sikadur[®]-300 smíchaný s maximálně 5-ti% Sikadur[®]-513) <p>Impregnace pryskyřice na každou vrstvu:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ~ 0,6 kg/m² (Sikadur[®]-300)
Kvalita podkladu	<p>Specifické požadavky:</p> <p>Minimální pevnost v tahu: 1,0 N/mm² nebo podle konkrétního projektu pro zesilování.</p>
Příprava podkladu	<p>Beton a zdivo.</p> <p>Podklad musí být pevný, suchý, zbavený nečistot a cementového šlemu, ledu, stojaté vody, mastnoty, olejů, starých nátěrů a všech ostatních nesoudržných a volných částic.</p> <p>Povrch musí být důkladně očištěný a musí být mechanicky otevřena povrchová struktura.</p> <p>Opravy a vyrovnání: Pokud je beton zasažen karbonatácí (popř. je křehký), nebo pokud je povrch nestejný, je třeba aplikovat tyto systémy:</p> <p>(Aplikační podrobnosti naleznete v příslušných technických listech.)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ochrana zkorodované výztuže: SikaTop[®] Armatec[®] 110 EpoCem[®] • Konstrukční opravy: Sikadur[®]-41 epoxidová opravná malta, Sikadur[®]-30 lepicí malta nebo cementová správková malta řady Sika[®] MonoTop[®] (např. Sika[®] MonoTop[®]-412 pro práce horizontální, vertikální a nad hlavou, nebo Sika[®] MonoTop[®]-438).
Aplikace	
Způsob aplikace / Nástroje	<p>Tkaninu stříhejte speciálními nůžkami nebo nožem na koberce. Tkaninu nikdy nepřehýbejte!</p> <p>Informace o impregnaci/laminaci jsou uvedené v technickém listu Sikadur[®]-330 nebo Sikadur[®]-300.</p>
Poznámky k aplikaci / Omezení	<p>Tento výrobek patří pouze do rukou zkušených profesionálů.</p> <p>Minimální poloměr zaoblení rohu: > 10 mm. Nevhodné rohy lze obrousit, nebo vyplnit maltou Sikadur[®].</p> <p>Překrytí pásů ve směru vláken musí být minimálně 100 mm – konkrétní hodnota závisí na druhu tkaniny SikaWrap[®] nebo na speciálních pravidlech pro zesilování.</p> <p>Při aplikaci několika pásů vedle sebe není překrývání nutné. Místa překrývání následujících vrstev musí být rovnoměrně rozdělena po celém obvodu sloupu.</p> <p>Zesilovací práce představují zásah do konstrukce, proto musí být prováděny pouze zkušenými pracovníky.</p> <p>Tkanina SikaWrap[®]-300 CZ/30 je přetírána impregnačními/laminačními pryskyřicemi, které zajistí optimální adhezi/lepivost a trvanlivost. Dodržujte pořadí aplikace jednotlivých prvků zesilovacího systému.</p> <p>Z estetických důvodů nebo kvůli ochraně může být tkanina SikaWrap[®]-300 CZ/30 opatřena maltou na cementové bázi nebo nátěrem. Výběr závisí na místních vnějších podmínkách. Pro základní ochranu proti UV záření použijte Sikagard[®]-550 W Elastic, Sikagard[®] ElastoColor-675 W nebo Sikagard[®]-680 S.</p>
Platnost hodnot	<p>Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.</p> <p>Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.</p>

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz.

Bezpečnostní předpisy

Ochranná opatření

- Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.
- Při aplikaci použijte ochranný oděv, brýle a rukavice.
- Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.
- Odstraňování odpadu
- Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci. Fólie je možné recyklovat.

Místní omezení

V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplně informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému zaručujícímu posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na www.sika.cz.

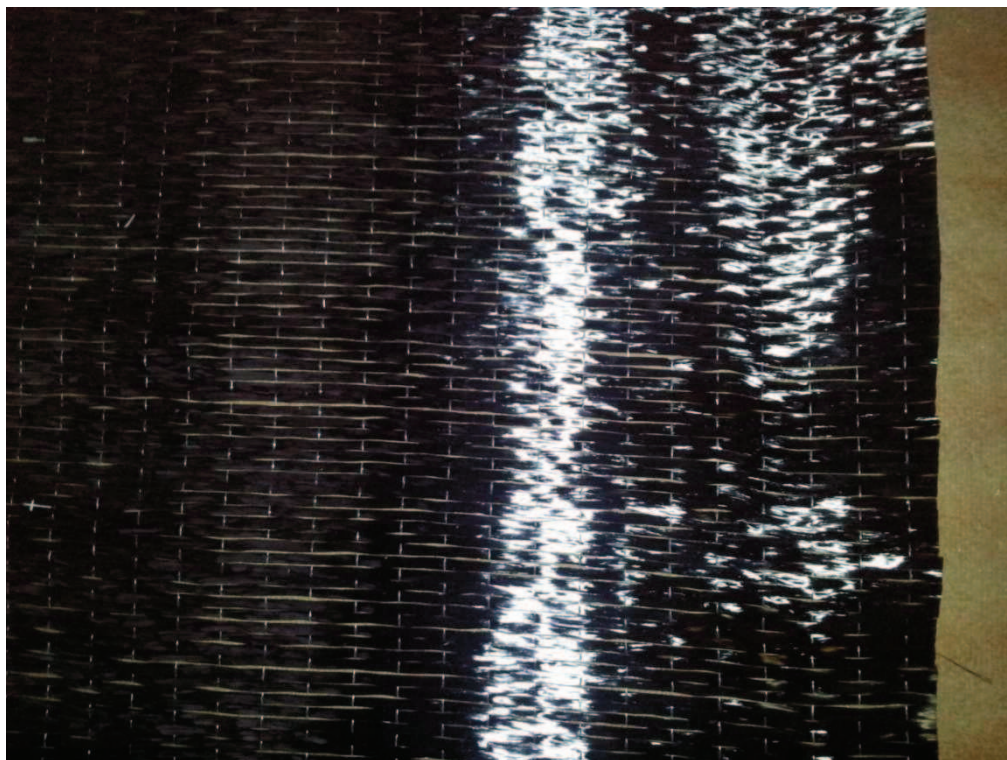


Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36,
CZ 624 00 Brno

tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com
<http://www.sika.cz>



Příloha č. 6



Vzor uhlíkové tkaniny



Přilepená uhlíková tkanina epoxidovým adhezivem

Příloha č. 6

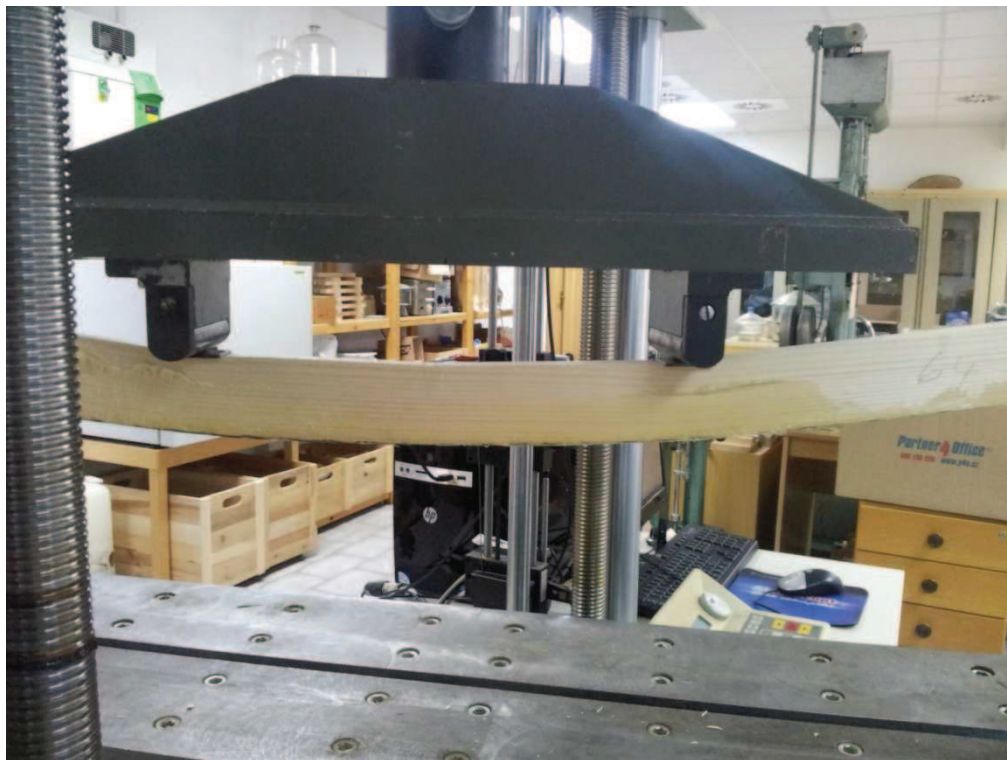


Předeprtá a přilepená uhlíková tkanina epoxidovým adhezivem



Umístění nosníku do zkušebního stroje

Příloha č. 6

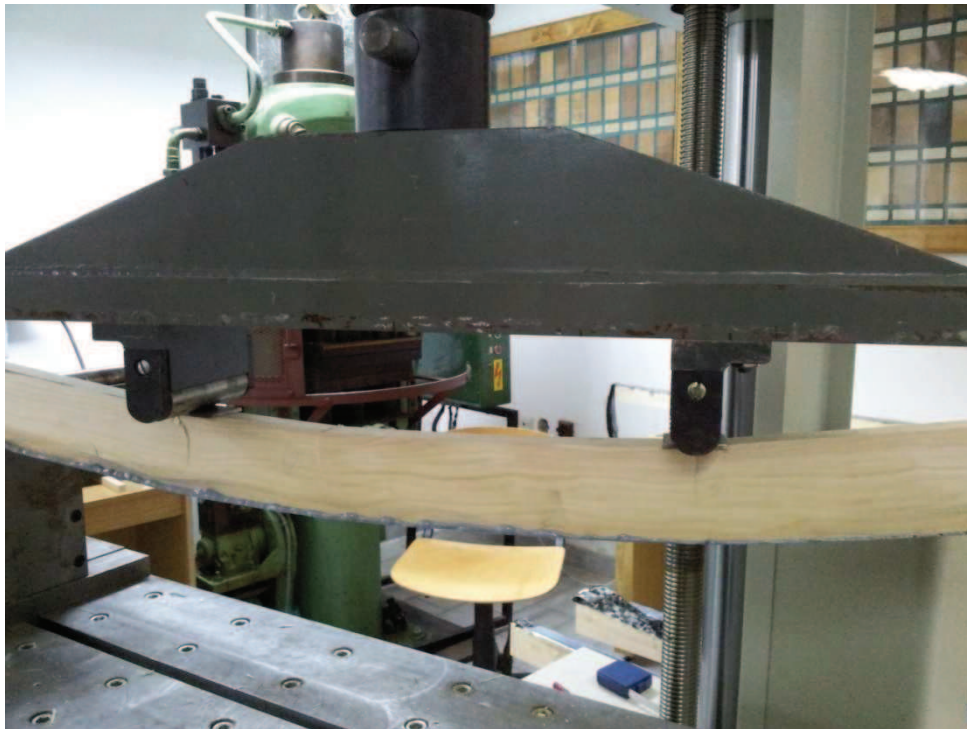


Průhyb nosníku při zatížení

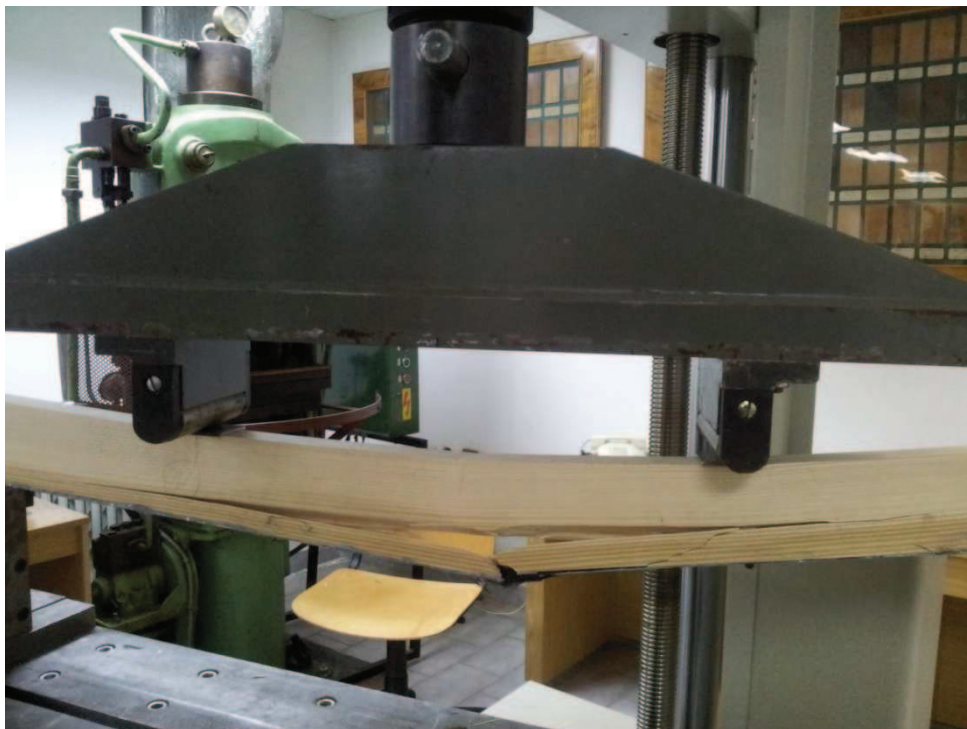


Porušení v tažené zóně nosníku vyztuženého uhlíkovou tkaninou s použitím polyuretanového adheziva

Příloha č. 6



Deformace vláken ve vyztuženém nosníku předepjatou uhlíkovou tkaninou s epoxidovým adhezivem s náznaky tečení dřeva



Porušení nosníku vyztuženého předepjatou uhlíkovou tkaninou s epoxidovým adhezivem