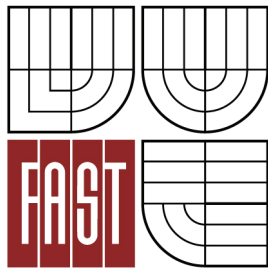




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV KOVOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF METAL AND TIMBER STRUCTURES

# ZESILOVÁNÍ OCELOVÝCH NOSNÍKŮ VÝZTUŽÍ NA BÁZI FRP

STRENGTHENING STEEL BEAMS USING REINFORCEMENT BASED ON FRP

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

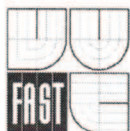
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ BLÁHA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. MARCELA KARMAZÍNOVÁ, CSc.

BRNO 2013



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** N3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby  
**Pracoviště** Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Diplomant** Bc. Tomáš Bláha

**Název** Zesilování ocelových nosníků výztuží na bázi FRP

**Vedoucí diplomové práce** Doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc.

**Datum zadání diplomové práce** 31. 3. 2012

**Datum odevzdání diplomové práce** 11. 1. 2013

V Brně dne 31. 3. 2012

  
.....  
Doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc. vedoucí ústavu

  
.....  
Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

1. Dokumentace sortimentu a materiálových parametrů použité CFRP výztuže.
2. Technické normativní dokumenty.
3. Literatura podle pokynů vedoucí diplomové práce (včetně firemních studií a podkladů zpracovaných firmami zabývajícími se touto problematikou).

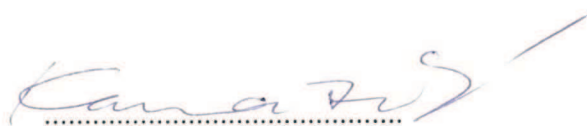
## **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

Vypracujte studii založenou na teoretické a experimentální analýze únosnosti ocelových nosníků zesílených externí lepenou výztuží tvořenou lamelami na bázi polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny (CFRP). Analýza bude zaměřena na zjištění vlivu CFRP výztuže na únosnost a použitelnost ve srovnání s ocelovými nosníky bez výztuže, s ohledem na efektivnost použití. Pozornost bude věnována ocelovým profilům s rozměry typickými pro stropní konstrukce (IPE 120 až IPE 200) zesíleným lamelami dostupného sortimentu.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná část VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc.  
vedoucí diplomové práce

**LICENČNÍ SMLOUVA**  
**POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO**

uzavřená mezi smluvními stranami:

**1. Pan/paní**

Jméno a příjmení:

Bytem:

Narozen/a (datum a místo):

(dále jen „autor“)

a

**2. Vysoké učení technické v Brně**

Fakulta .....

se sídlem .....

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

**Čl. 1**  
**Specifikace školního díla**

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: \_\_\_\_\_

Vedoucí/ školitel VŠKP: \_\_\_\_\_

Ústav: \_\_\_\_\_

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů .....
- elektronické formě – počet exemplářů .....

---

\* hodící se zaškrtněte



2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečně zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt**

Studie vlivu zesílení ocelových nosníků pomocí výztuže na bázi FRP na momentovou únosnost a ohybovou tuhost. Zhodnocení teoretických výpočetních postupů na základě provedeného experimentálního ověření. Popis postupu výroby uhlíkových vláken a kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken.

## **Klíčová slova**

uhlík, vlákno, ocel, lamela, epoxid, polymer, moment, únosnost, zesílení, ohybová tuhost, deformace, ideální průřez, plasticita, pružnost

## **Abstract**

A study of an influence of strengthening steel beams using reinforcement based on FRP on a moment bearing resistance and bending stiffness. Evaluation of the theoretical calculation methods based on the performed experimental verification. Description of the production of carbon fibres and composite materials on the basis of carbon fibres.

## **Key words**

carbon, fiber, steel, lamella, epoxid, polymer, moment, bearing resistance, strengthening, bending stiffness, deformation, ideal cross section, plasticity, elasticity

### **Bibliografická citace VŠKP**

BLÁHA, Tomáš. *Zesilování ocelových nosníků výztuží na bázi FRP*. Brno, 2013. 73 s., 36 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí. Vedoucí práce doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11.1.2013

.....  
podpis autora  
Bc. Tomáš Bláha



## **Poděkování**

Děkuji doc. Ing. Marcele Karmazínové, CSc. za vynikající odborné vedení diplomové práce, za její zkušenosti, jimiž tuto práci a mě obohatila, a za cenné rady, které mi při jejím vytváření poskytovala. Dále děkuji zaměstnancům Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí Stavební fakulty VUT v Brně, jmenovitě panu Ing. Jiřímu Veselému, Miloši Minaříkovi, Miloslavu Ledinovi, Erichu Mokrošovi, za přípravu experimentů a jejich provádění. Děkuji také společnosti Prefa KOMPOZITY a.s., jmenovitě Ing. Janu Prokešovi za vstřícnost a poskytnutí technických podkladů. V neposlední řadě děkuji své přítelkyni Ing. Janě Nejezchlebové za trpělivost a korekci práce po stránce formální a gramatické.



# Obsah

<b>1. Úvod</b>	4
<b>2. Cíl práce</b>	5
<b>3. Výroba uhlíkových vláken</b>	6
3.1. Mikrotextura uhlíkových vláken	6
3.2. Uhlíková vlákna na bázi PAN	7
3.3. Postup výroby uhlíkových vláken na bázi PAN	7
<b>4. Výroba kompozitů z uhlíkových vláken</b>	12
4.1. Rozmístění vláken v matrici	13
4.2. Kompozity s uhlíkovými vlákny a polymerní matricí z epoxidové pryskyřice	15
<b>5. Sortiment kompozitních uhlíkových lamel od vybraných výrobců ČR</b>	17
<b>6. Konkrétní způsob použití lamel</b>	20
<b>7. Aplikace</b>	21
7.1. Lepící hmota	21
7.2. Příprava povrchu a postup lepení	21
<b>8. Specifikace zesilovaných prvků a zesilujících kompozitních lamel</b>	22
8.1. Zesilované ocelové nosníky	22
8.2. Kompozitní uhlíkové lamely	24
<b>9. Teoretická část</b>	24
9.1. Předpoklady výpočtu	24
9.1.1. Výpočetní model	24
9.1.2. Okrajové podmínky	26
9.2. Odvození výpočtu momentové únosnosti v plastickém oboru zesíleného nosníku (kompozitu)	29
9.2.1. Poloha neutrální osy prochází stojinou ocelového nosníku	30
9.2.2. Poloha neutrální osy prochází pásnicí ocelového nosníku	33
9.3. Odvození výpočtu momentové únosnosti v pružném oboru zesíleného nosníku (kompozitu)	34



9.4. Momentová únosnost v plastickém a pružném oboru samotného ocelového nosníku .....	36
9.5. Stanovení momentové únosnosti jednotlivých nosníků v plastickém a pružném oboru .....	37
<b>10. Experimentální část .....</b>	<b>39</b>
10.1. Experimentálně ověřené materiálové charakteristiky .....	39
10.1.1. Ocel .....	39
10.1.2. Uhlíkové lamely .....	40
10.2. Popis zkušebního zařízení .....	40
10.3. Zatěžování a jeho průběh .....	48
10.4. Výsledky experimentálního ověření .....	49
<b>11. Vyhodnocení .....</b>	<b>56</b>
11.1. Porovnání experimentálních a teoretických výsledků .....	56
11.2. Vliv zesílení na ohybovou tuhost nosníku .....	59
11.2.1. Stanovení ohybové tuhosti experimentálně ověřených nosníků .....	59
11.2.2. Stanovení ohybové tuhosti teoreticky .....	60
11.3. Posouzení z hlediska deformační podmínky .....	66
11.3.1. Stanovení limitního teoretického ohybového momentu .....	67
11.3.2. Určení limitního experimentálního ohybového momentu .....	67
<b>12. Závěry .....</b>	<b>69</b>
12.1. Zhodnocení základních předpokladů .....	69
12.2. Zvýšení momentové únosnosti .....	69
12.3. Ohybová tuhost .....	70
12.4. Mezní stav použitelnosti – deformační podmínky .....	70
12.5. Doporučení pro další posouzení .....	71
Seznam použité literatury a zdrojů .....	72
Seznam příloh .....	73

# 1. Úvod

Problematice zesilování konstrukcí při sanacích a rekonstrukcích za pomoci externí lepené výztuže je v dnešní době věnována stále větší pozornost. Vzhledem k tomu, že jsou na konstrukce v dnešní době kladeny větší nároky z hlediska zatížení, deformací a životnosti, je potřeba zesilování těchto konstrukcí žádaná. Materiálů a způsobů jakými lze konstrukce zesilovat je celá řada a jejich použití se odvíjí od konkrétního typu zesilované konstrukce z hlediska materiálového a z hlediska požadovaných výsledků. V této diplomové práci je však věnována pozornost zejména zesilování ocelových konstrukcí pomocí materiálů na bázi uhlíkových vláken. Většinou se s tímto zesilujícím prvkem setkáváme pod označením CFRP (carbon fiber reinforce polymer). V češtině lze toto označení přeložit jako polymer zesílený uhlíkovými vlákny. Tento pojem však zahrnuje velkou škálu zesilujících prostředků, jako jsou např. rohože, tkaniny, tyče nebo lamely. V tomto konkrétním případě se dále zaměřuji pouze na zesilování uhlíkovými lamelami, přesněji řečeno lamelami z uhlíkových vláken s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice. Z hlediska zesilované konstrukce je obzor rovněž velice široký. Každá konstrukce má specifické požadavky na zesílení z hlediska materiálu, typu nebo druhu porušení, docilovaného výsledku atd. Pro účely této diplomové práce bylo uvažováno zesilování ocelových konstrukcí běžných v pozemním stavitelství, které ještě stále není v praxi tak rozšířené jako např. zesilování betonových konstrukcí. V současnosti na Fakultě stavební VUT v Brně na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí probíhá souběžně s touto studií výzkum zesilování dřevěných nosníků rovněž těmito lamelami. Zesilovanými konstrukcemi jsou ocelové válcované tyče typu IPE, které v praxi pozemního stavitelství zastupují běžně používané stropní nosníky, průvlaky nebo překlady. Při zesilování konstrukcí je celá řada možností použití těchto zesilujících prvků. Lze je aplikovat při zvyšování smykové nebo momentové únosnosti, případně s nimi lze sanovat porušené části konstrukcí. Je patrné, že sortiment zesilujících prvků, zesilovaných konstrukcí a možností použití je tak obrovský, že ho nelze v této práci vystihnout, a proto je dále pozornost věnována pouze konkrétnímu druhu namáhání. Zesilující uhlíkové lamely jsou dále použity při zvyšování momentové únosnosti prostě uložených ocelových nosníků. Nosníky jsou zatěžovány prostým jednoosým ohybem se zamezením klopení nosníků.

## 2. Cíl práce

Předložená diplomová práce je ve své podstatě studií zkoumající vliv zesilování ocelových nosníků lamelami z uhlíkových vláken při působení ohybového momentu a pojednávající o výrobě uhlíkových vláken a lamel. Cílem práce je na základě experimentálního ověření stanovit vliv zesílení na ohybovou únosnost a ohybovou tuhost ocelových nosníků lepením uhlíkových lamel a následně ověřit vhodnost použití nasazených výpočetních metod pro stanovení teoretické momentové únosnosti a ohybové tuhosti těchto nosníků.

### 3. Výroba uhlíkových vláken

Výroba uhlíkových vláken je rozdílná v závislosti na použitém prekurzoru, ze kterého uhlíková vlákna vznikají. Rozdílné výrobní postupy jsou u uhlíkových vláken na bázi syntetických polymerních prekurzorů PAN (polyakrylonitrilu), smoly a mezofáze, celulózy, whiskerů a nově z vláken novoloidu – vláken fenol-aldehydových. Prekurzor je, zjednodušeně řečeno, základní komponentou pro výrobu uhlíkového vlákna, ze kterého se technologickým postupem těží co největší podíl uhlíku ve vlákne. Uhlíková vlákna jsou vyráběna např. řízenou pyrolýzou organických prekurzorů nebo katalitickým rozkladem plynných uhlovodíků. [3, 9]

#### 3.1. Mikrotextura uhlíkových vláken

Krystal grafitu je silně anizotropní. V kolmém směru k bazálním rovinám šesticelové mřížky působí slabé Van der Waalsovy síly. Naproti tomu v bazálních vrstvách - „aromatické“ roviny, působí silné kovalentní vazby mezi atomy. Grafitový monokrystal má teoretickou pevnost v tahu při namáhání v rovině bazálních vrstev asi 100 GPa, teoretický Youngův modul pružnosti v tahu asi 1000 GPa. Uspořádání krystalů rozhoduje o fyzikálně mechanických vlastnostech. Například polykrystalický grafit s náhodně orientovanými krystaly je velice měkký a drobivý v důsledku nepevné vazby mezi rovinami. Tohoto jevu je využito u grafitu pro mazání mechanických třecích spojů v důsledku možného posouvání rovin vůči sobě. Teoretický Youngův modul pružnosti v tahu u takového polykrystalického grafitu je asi 10 GPa a pevnost v tahu asi 20 MPa.

Vysoké pevnosti aromatických rovin je využito u uhlíkových vláken. Bazální roviny jsou orientovány zpravidla rovnoběžně s podélnou osou uhlíkového vlákna. Aromatické roviny nejsou na rozdíl od krystalu grafitu uspořádány pravidelně, ale jsou vedle sebe umístěny nahodile. Takové uspořádání nazýváme turbostratické uspořádání. Toto uspořádání má větší vzdálenost aromatických rovin, než je tomu u mřížky grafitu.

V současné době se k výrobě uhlíkových vláken používá zejména vláken polyakrylonitrilových označovaných jako PAN, a proto je v této diplomové práci dále popsána pouze výroba těchto uhlíkových vláken. [3, 9]

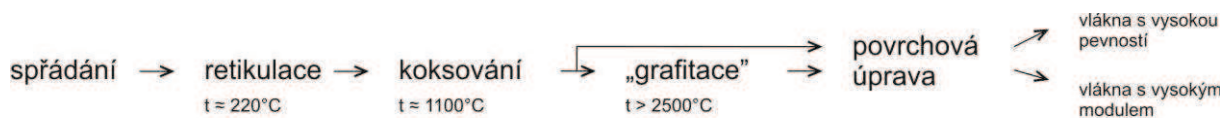


### 3.2. Uhlíková vlákna na bázi PAN

Výroba uhlíkových vláken na bázi PAN patří v současné době k nejrozšířenějším způsobům výroby uhlíkových vláken a současně nabízí největší škálu vlastností koncového produktu a patří mezi nejvýznamnější část produkce uhlíkových vláken. Pro tento způsob výroby je použito akrylové vlákno. Pro získání největší pevnosti v tahu a modulu pružnosti je zapotřebí během výrobního procesu uspořádat silné kovalentní vazby v aromatických rovinách rovnoběžně v podélném směru výsledného uhlíkového vlákna. Ve skutečnosti nejsou mikrokrystaly zcela rovnoběžné s podélnou osou uhlíkového vlákna, ale jsou v podélném směru vlákna vzájemně natočeny pod malými úhly. Pás rovnoběžných aromatických rovin je díky tomu zvlněný. Vlákno také obsahuje mikroskopické póry a trhliny protažené ve směru podélné osy vlákna a vedle toho i submikroskopické dutiny mezi mikrokrystaly. Důsledkem malého odklonu těchto aromatických rovin mikrokrystalů od podélné osy vlákna a existence mikroskopických dutin a pórů vlákna vyrobeného na bázi PAN je, že tyto vlákna nedosahují tak vysokých pevností a modulů pružnosti v tahu. Youngův modul pružnosti mají ale i přes to větší než ocel. Pro zajištění vysoké pevnosti musí být mezi jemnými mikrokrystaly minimum defektů. [3, 9]

### 3.3. Postup výroby uhlíkových vláken na bázi PAN

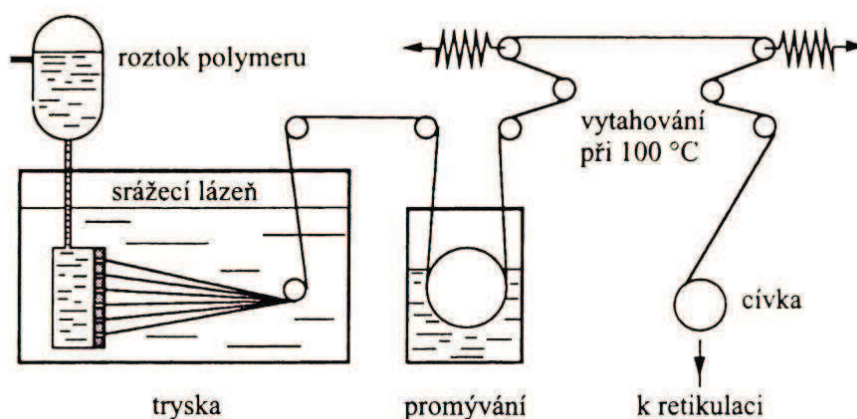
Postup výroby uhlíkových vláken můžeme rozdělit do pěti jednotlivých fází, které jsou znázorněné na obrázku č. 3.1.



Obr. 3.1 Postup výroby uhlíkových vláken [3]

#### Spřádání vláken:

Na technologické lince se polymer rozpustí v rozpouštědle na roztok, který je vtlačován do trubice, která je osazena tryskou slouženou z 1000 až 300 000 otvorů o průměru v řádech desetin milimetru. Roztok polymeru se za výstupem z trysky vysráží ve srážecí lázni nebo v proudu teplého vzduchu, čímž se odpaří rozpouštědlo. Po vysrážení následuje promývání z důvodu odstranění zbytků rozpouštědla. Důležitou procedurou je následné vytahování v atmosféře vodní páry. Touto procedurou dochází k lepšímu orientování vrstev mikrokrystalů do polohy rovnoběžné s podélnou osou vlákna. Dalším krokem v této výrobní fázi je sušení a relaxace vlákna. Schéma spřádací procedury je zobrazeno na obr. č. 3.2. [3, 9]



Obr. 3.2 Schéma spřádací procedury [3]

### Stabilizace – retikulace:

Účelem stabilizace je vlákno stabilizovat a zajistit, aby bylo dále karbonizovatelné s dostatečným ziskem uhlíku s vyloučením poškození vlastního vlákna. Stabilizace probíhá při teplotách 200 – 300 °C za působení tahového napětí v oxidačním prostředí. Dojde k vytvoření žebříkových makromolekul a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky, které stabilizují strukturu a zamezí měknutí vlákna během karbonizace, které by mohlo vést až k nežádoucímu spojení vláken. V této fázi se vlákno stane netavitelným a zčerná. [3, 9]

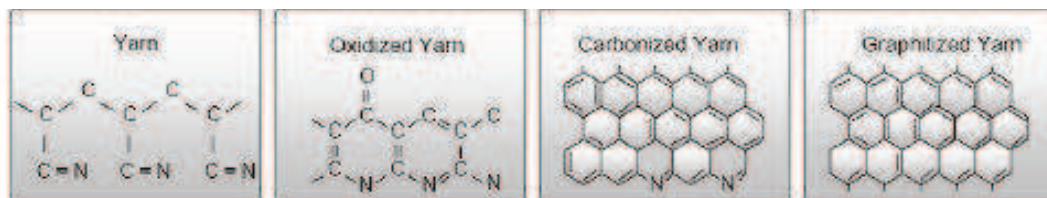
### Karbonizace:

Vlákna jsou dále pyrolyzována při teplotách v rozmezí 1000 – 1800 °C v interní atmosféře (čistý dusík), kdy ve vláknu dojde ke karbonizaci. V této fázi dojde k odstranění vodíku a sníží se obsah dusíku. Následně tvoří 80 – 95% hmoty uhlík. Tímto je docíleno maximální pevnosti vlákna v tahu. [3, 9]

### Grafitace:

Grafitace probíhá při teplotách do 3000 °C v inertním prostředí z argonu. Důsledkem toho je ještě zvýšen obsah uhlíku a vzniknou dokonalejší mikrokrystaly. Vznik dokonalejších mikrokrystalů vede k zvýšení tuhosti vlákna (Youngova modulu pružnosti v tahu). U vláken vyrobených z PAN však v této fázi dochází k poklesu pevnosti v tahu. Snížení pevnosti je zapříčiněno vznikem defektů mezi mikrokrystalami. Pro zvýšení pevnosti se provádí tzv. dloužení, při kterém dojde k zmenšení úhlu odklonu „napřímění“ mikrokrystalů od podélné

osy vlákna a tím vnikají vysokomodulární vlákna (UHM – Ultra High Modulus). Strukturální změny během těchto procesů jsou patrné z obrázku č. 3.3. [3, 9]



Obr. 3.3 Strukturální změny [9]

### Povrchová úprava uhlíkových vláken:

Ve většině případů tvoří uhlíková vlákna výztuž obklopenou matricí ve výsledném kompozitním materiálu. Povrchovou úpravou uhlíkových vláken je třeba zajistit spojení (vazbu) mezi uhlíkovou lamelou a samotnou matricí, která zajistí roznos namáhání do jednotlivých vláken a ochranu vláken před nežádoucími účinky prostředí jako je např. mechanické poškození. Pokud je vazba mezi matricí a uhlíkovým vláknem slabá, výsledný kompozitní materiál má horší mechanické vlastnosti. Pokud je však vazba mezi matricí a uhlíkovými vlákny příliš silná, výsledný kompozitní materiál je velice křehký. Povrchové úpravy uhlíkových vláken lze rozdělit do dvou skupin na oxidační a neoxidační metodu.

Účelem úpravy povrchu tedy je:

- odstranit z povrchu vlákna látky bránící kontaktu s matricí,
- eliminovat další adsorpci plynů na povrchu vláken,
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím,
- chránit vlákna před vzájemnou abrazí.

Nejčastěji se vyráběná vlákna chrání polymerními povlaky na bázi epoxidů (epoxidové pryskyřice) nebo polyamidů. Cílem je zamezit adsorpci látek a zajistit ochranu před vzájemnou abrazí. U uhlíkových vláken na bázi PAN je vhodné reaktivitu povrchu zvýšit a povrch zdrsňit. Nejčastěji se používá mokvý způsob, který je založen na chemickém působení oxidačních látek, jako jsou např.  $\text{HNO}_3$ , chromová kyselina, chlornatan sodný nebo elektrický způsob založený na anodické oxidaci v elektrolytu, kde samotné uhlíkové vlákno tvoří anodu. Jako elektrolyt se používá např. sulfid amonný.

V současné době se používá metoda úpravy povrchu studeným vysokofrekvenčním plazmatem, který je vytvořen reaktorem pracujícím při frekvenci střídavého proudu 15 MHz.

Touto metodou se povrch uhlíkového vlákna upravuje pod ochrannou atmosférou tvořenou různými plyny. V závislosti na použitém plynu (kyslík, argon, čpavek) se dá dosáhnout rozdílných výsledků jako je:

- leptání a zdrsňování povrchu, doprovázené často poklesem pevnosti (pod ochrannou atmosférou z kyslíku),
- očištění vlákna, což vede k zvýšení povrchové energie a k zlepšení smáčivosti pryskyřicí,
- implantace funkčních skupin na očištěný povrch (při použití čpavku, jde o aminové skupiny),
- polymerace monomeru na povrchu vláken, jestliže se do proudu plynu přidává vhodný monomer, lze reakcemi atomů plynu a monomeru docílit připojení vznikajícího polymeru na povrch vlákna. [3, 9]

VÝROBCE VLÁKEN	ZEMĚ, STÁT	OBCHODNÍ OZNAČENÍ	POUŽITÉ PREKURZORY
Grafil, Inc.	USA	Grafil	PAN
Mitsubishi Rayon, Co.	Japonsko	Pyrofil	PAN
Hexcel, Co.	USA	Magnamite	PAN, textilní PAN, mezifázové dehty
Cytec Engineered Materials	USA	Thornel	PAN, mezifázové dehty
Mitsubishi Chemical, Co.	Japonsko, USA	Dialead	Uhelný mezifázový dehet
Nippon Graphit Carbon Fiber, Co.	Japonsko	Granoc	Uhelný mezifázový dehet
Hkureha Chemical Industries	Japonsko	Kreca	Ropný mezifázový dehet
Petoca, Ltd.	Japonsko	Cabonic	Ropný mezifázový dehet
Sumitomo Chemical	Japonsko, USA		PAN, Uhelný a ropný mezifázový dehet
Toray Industries	Japonsko, USA	Torayca	PAN
Toho Tenax GmbH	Německo	Tenax	PAN
Toho Tenax	USA	Tenax	PAN
Formosa Plastics	Tchaj-wan		PAN
Teijin	Japonsko	Tenax	PAN

SGL Group	Německo, USA	Panox, Sigrafil T, Sigrafil C	PAN, textilní PAN
Aldila	USA	Panox, Sigrafil T, Sigrafil C	PAN, textilní PAN
Technical Fibre Products	UK	Optimat 203	PAN
Zoltek Companies	USA	Panex 30, Panex 33	PAN, textilní PAN
Pyrograf Products, Inc.	USA	Pyrograf I-III	krátká vlákna vyráběná z par uhlovodíků
Du Pont	USA	E-130	mezofázový dehet
AKSA	Turecko	Aksaca	PAN
Hyosung Corp.	Jižní Korea		PAN
Khimvolokno Svetlogorsk	Bělorusko	Ural	viskóza
Argon	Rusko		PAN
Carbon and Composite Materials Plant	Rusko		PAN
Lirsot	Rusko	Koulon, Granite, UOL, LU Elur	PAN
Uvicom, Co.	Rusko	LU Elur, LZH-M, Grapan, UKN-H, UK	PAN, viskóza
Taiwan Engineering Plastics, Co.	Čína		PAN
Dalian Xingke China Carbon, Co.	Čína		PAN
Yingyou Group, Co.	Čína		PAN
Zhongfu Shenying Carbon Fiber, Co.	Čína		PAN
Gansu Hao Shi Carbon Fiber, Co.	Čína		PAN
Anshan East Asia Carbon Fibers, Co.	Čína		PAN
Yixing Huaheng Carbon nad Aramid Fiber Product, Co.	Čína		PAN
Sinosteel Jilin Carbon Fiber, Co.	Čína		PAN
Sinosteel Jiangcheng Carbon Fiber, Co.	Čína		PAN
Jilin Tangu Carbon Fiber, Co.	Čína		PAN
Kemrock Industries	Indie	Jaitec	PAN
Muktagiri Industrial, Co.	Indie		PAN

Tab. 3.1 Světoví výrobci uhlíkových vláken [9]



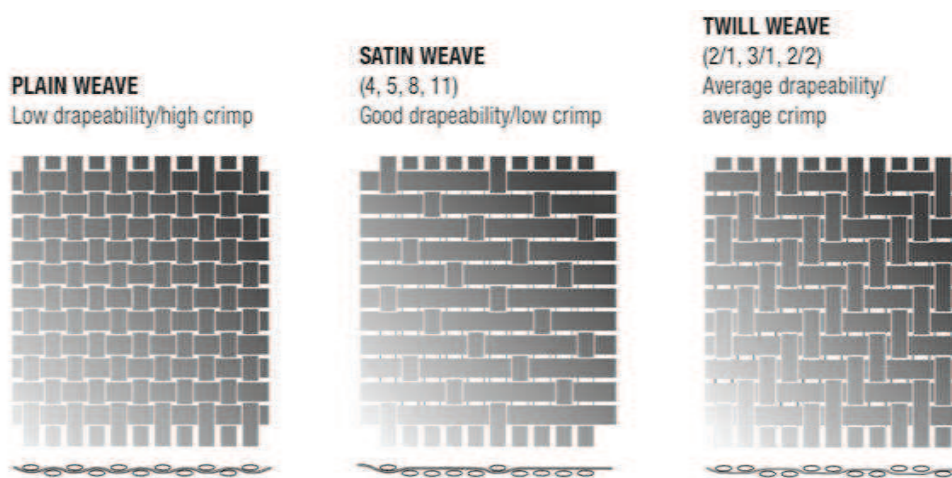
## 4. Výroba kompozitů z uhlíkových vláken

Nejčastěji se uhlíková vlákna používají pro výrobu kompozitních materiálů. Již při samotné výrobě uhlíkových vláken, respektive při provádění povrchové úpravy, je důležitá volba metody a typu úpravy vycházející z předpokladu, jakým způsobem bude samotné uhlíkové vlákno dále využíváno a za jakým účelem je vyráběno. Jelikož je problematika samotné výroby kompozitních materiálů velice široká a svým rozsahem daleko převyšuje výrobu samotných uhlíkových vláken, bude v této práci věnována pozornost hlavně výrobě kompozitních materiálů z uhlíkových vláken s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice. Do výroby kompozitních materiálů již zasahuje veliké množství vlivů jako např. postup výroby samotného uhlíkového vlákna, základní materiál pro vytvoření uhlíkového vlákna, způsob povrchové úpravy, způsob tkaní, druh použité matrice, vytvrzení za pomoci různých látek zajišťujících odlišné vlastnosti a v neposlední řadě velká škála typů výrobních procesů těchto kompozitních materiálů. Konkrétně se v této diplomové práci jedná o výrobu kompozitních uhlíkových lamel, se kterými je i dále uvažováno při teoretických výpočtech a následným experimentálním ověřením. Tyto faktory zároveň poukazují na fakt, že každý výrobce kompozitních materiálů dosahuje jiných výsledků a většina společností si vede vlastní výzkum a svoje výrobní technologie si pečlivě chrání před konkurencí. V současné době neexistují jednotné výrobní postupy tak, aby bylo dosahováno stejných parametrů. Rovněž ani označování výrobků není nijak řízeno a každá společnost má v tomto směru zatím velice volné ruce.

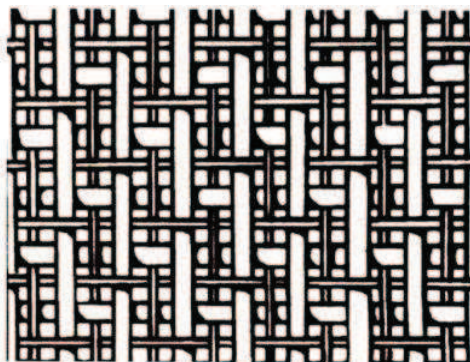
Jak již bylo zmíněno, uhlíková vlákna tvoří v kompozitním materiálu výztuž, která vzájemně spolupůsobí a je chráněna okolní matricí, která je v tomto případě tvořena polymerní epoxidovou pryskyřicí. Výsledné parametry kompozitního materiálu významně ovlivňuje uspořádání uhlíkových vláken v matrici. Je důležité zmínit, že matrice zajišťuje i další funkce jako je ochrana před vzájemnou abrazí samotných vláken, mechanickým poškozením a v neposlední řadě chrání (izoluje) spolu s naneseným lepidlem kovové konstrukce. Je známo, že uhlík ve styku s méně ušlechtilým kovem vytváří galvanický článek a způsobuje elektrochemickou korozi, při níž koroduje právě kov. [3, 9]

#### 4.1. Rozmístění vláken v matrici

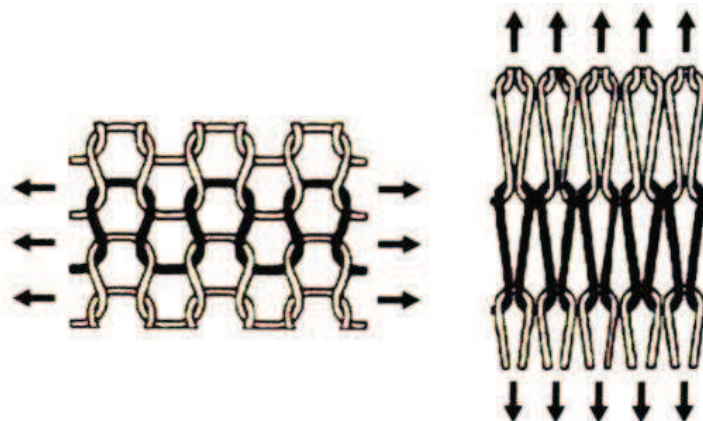
Samotné rozmístění vláken v matrici má veliký vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. Výrobně nejjednodušší se jeví náhodné rozptýlení nasekaných vláken. Tímto způsobem však nelze dosáhnout požadovaných vlastností kompozitů pro konstrukční účely. Namáhání je přenášeno spíše matricí a uhlíková vlákna jsou pouze jako jakési plnivo. Jiným poměrně jednoduchým způsobem uspořádání je jednosměrné uspořádání (UD – Unidirectional). Kompozit dosahuje v tomto případě vysokých pevností ve směru rovnoběžném s vlákny, ale při namáhání kolmo na vlákna opět působí pouze matrice a pevnost je diametrálně odlišná. Z tohoto důvodu se uhlíková vlákna systematicky uspořádávají dle potřeby tak, aby byla zajištěna pevnost v žadáných směrech. Uhlíková vlákna se tkají nebo pletou a zajišťují rozložení sil do různých směrů. Existuje nespočet vzorů, které se liší svojí složitostí. Jsou to např. vzory dvousměrných textilií až po pětisměrně zaplétané textilie. Anglická literatura rozeznává pojmy jako je „crimp“ (zvlnění) a „drapeability“ (splývavost). Velké zvlnění má za následek snížení pevnosti a tuhosti kompozitu, naopak rovná vlákna mají pevnost vysokou a značně se využívá jejich potenciál. Běžné způsoby tkaní jsou znázorněny na obr. 4.1 – 4.5. [3, 9]



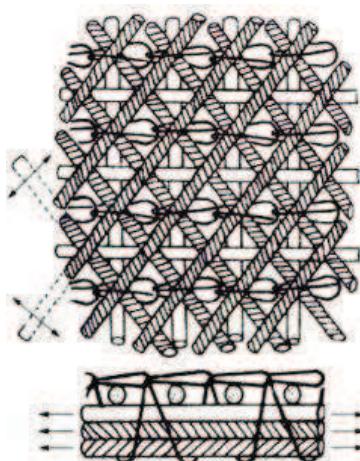
Obr. 4.1 – Běžné způsoby provedení dvousměrného tkaní [3]



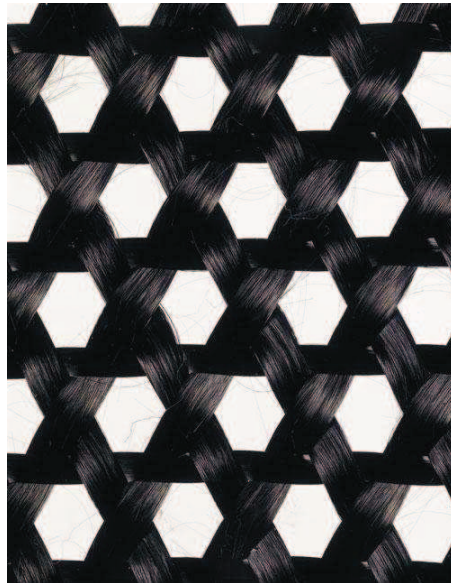
Obr. 4.2 – Příklad tkaní bez zvlnění. Tkanina obsahuje dvě tloušťky vláken – silnější nejsou zprohýbána, a tudíž lépe přenášejí zatížení a dávají kompozitu vysokou tuhost, tenčí jsou protkaná skrz a drží textilii pohromadě, aniž by výrazně přispívali k pevnosti. [3]



Obr. 4.3 Příklad pletené textilie a jejího chování při zatížení z různých směrů [3]



Obr. 4.4 Příklad složitějšího tkaní – jednotlivé vrstvy nezprohýbaných vláken položených v různých směrech jsou drženy na místě zapletením pomocí tenčího vlákna [3]



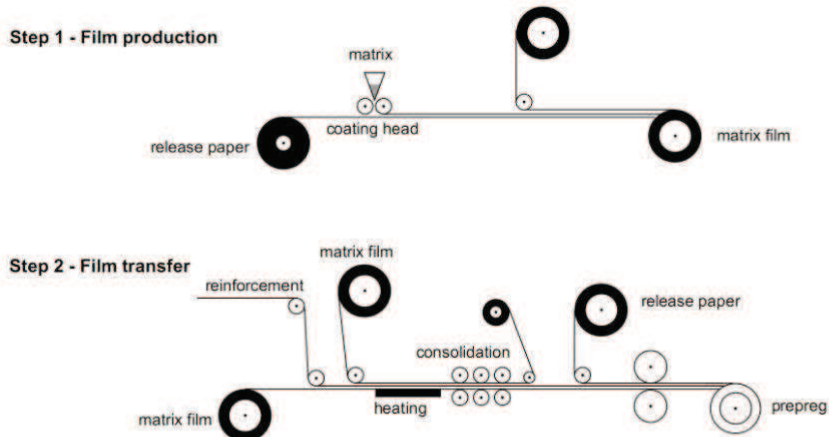
Obr. 4.5 Ukázka pokročilé textilie z uhlíkových vláken vyrobené trojosým tkaním japonskou firmou Sakase Adtech [3]

#### **4.2. Kompozity s uhlíkovými vlákny a polymerní matricí z epoxidové pryskyřice**

Pro výrobu kompozitu s polymerní matricí se nejčastěji používá předimpregnovaných textilií, kterým se říká „prepregy“. Jsou to předpřipravené tkaniny s uspořádanými vlákny, které jsou předimpregnovány materiálem budoucí matrice a vytvrzeny. Výhodné je, že takovéto tkaniny lze skladovat i několik měsíců a regulovat tak potřebu výroby konečného kompozitu. Pro účely skladování a lepší manipulaci většinou prepregy bývají ještě ochráněny povlakem polyetylenu nebo papírem na povrchu. Ochranná vrstva se odstraní před dalším zpracováním. Výroba prepregu je patrná z obrázků 4.6. Při dalším zpracování se nanese vrstva polymerní matrice tloušťky v řádech milimetrů a vzniká např. kompozitní lamela z uhlíkových vláken s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice. [3]

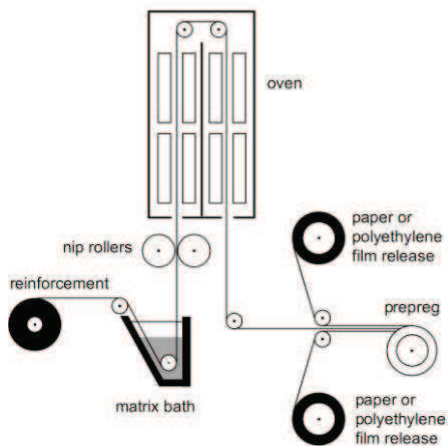
### MANUFACTURING TECHNIQUES

#### Film transfer route : 2 steps process

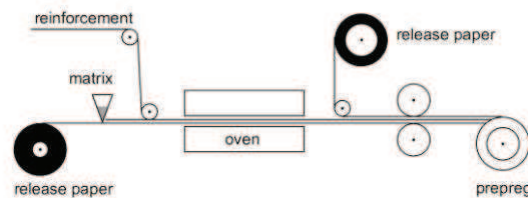


#### Solution route

##### VERTICAL (TOWER)



##### HORIZONTAL



Obr. 4.6 Schéma výroby prepregu (Manufacturing techniques – technologie výroby, Film transfer route: 2 steps process – Výroba nanášením filmu: proces o 2 krocích, Step 1 – Film production – Krok 1 – výroba filmu, release paper – odejmutelný papír, matrix – materiál matrice, coating head – ústrojí pro nanášení povlaku, matrix film – film s materiálem matrice Step 2 – Film transfer – Krok 2 – Nanesení filmu, reinforcement – výztuha, heating – vyhřívání, consolidation – vytvrzení. Solution route – výroba pomocí roztoku, Vertical (tower) – vertikální (věž), matrix bath – lázeň s materiálem matrice, nip rollers – lisovací válce, oven – pec, paper or polyethylene film release – zařízení pro nanášení papírové nebo polyethylenové fólie, Horizontal – horizontální [3]





Obr. 4.7 Lamely z uhlíkových vláken s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice [10]

## 5. Sortiment kompozitních uhlíkových lamel od vybraných výrobců ČR

V současné době působí na českém trhu dvě významné společnosti zabývající se výrobou a distribucí kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken. Konkrétně se jedná o společnosti PREFA KOMPOZITY a.s. a Sika CZ s.r.o., které nabízejí poměrně široký sortiment těchto produktů. Mezi produkty z kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken patří nejrůznější prvky pro odlišné způsoby použití při zesilování konstrukcí, jako jsou např. kompozitní tyče, rohože, tkaniny, sítě nebo lamely. Pro účely této diplomové práce a v souvislosti se způsobem namáhání nosníků, které je popsáno dále, bude uveden pouze sortiment kompozitních lamel s výztuží z vysokopevnostních uhlíkových vláken s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice. Pro účely experimentu obsaženého v této diplomové práci byl použit produkt společnosti PREFA KOMPOZITY a.s. a konkrétně se jedná o kompozitní uhlíkové lamely s obchodním označením PREFACARB - L. Níže jsou uvedeny materiálové a mechanické vlastnosti vybraných dostupných kompozitních lamel od obou výrobců pro vzájemné porovnání.

Výrobce: PREFA KOMPOZITY, a.s.		
<b>PREFACARB-L</b>		
Šířka	Tloušťka	Průřezová plocha
[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
50	1,4	70,0
50	1,2	60,0
30	1,0	30,0

Tab. 5.1 Rozměry uhlíkových lamel od výrobce Prefa KOMPOZITY a.s. [10]

Výrobce: SIKA CZ, s.r.o.			
<b>Sika CarboDur S, XS</b>			
Typ	šířka	tloušťka	Průřezová plocha
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
Sika CarboDur S1.525/60	15	2,5	37,5
Sika® CarboDur® S2.025/80	20	2,5	50,0
Sika® CarboDur® S512/80	50	1,2	60,0
Sika® CarboDur® S613/100	60	1,3	78,0
Sika® CarboDur® S812/120	80	1,2	96,0
Sika® CarboDur® S912/140	90	1,2	108,0
Sika® CarboDur® S1012/160	100	1,2	120,0
Sika® CarboDur® S1014/180	100	1,4	140,0
Sika® CarboDur® S1213/200	120	1,3	156,0
Sika® CarboDur® S1214/220	120	1,4	168,0
Sika® CarboDur® S1512/240	150	1,2	180,0

Tab. 5.2 Rozměry uhlíkových lamel od výrobce SIKA CZ s.r.o. [11]

<b>Sika CarboDur M</b>			
Typ	šířka	tloušťka	Průřezová plocha
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
Sika® CarboDur® M614/110	60	1,4	84
Sika® CarboDur® M914/170	90	1,4	126
Sika® CarboDur® M1214/230	120	1,4	168

Tab. 5.3 Rozměry uhlíkových lamel od výrobce SIKA CZ s.r.o. [11]

<b>Sika CarboDur H</b>			
Typ	šířka	tloušťka	Průřezová plocha
	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
Sika® CarboDur® H514/50	50	1,4	70

Tab. 5.4 Rozměry uhlíkových lamel od výrobce SIKA CZ s.r.o. [11]

<b>Základní materiálové charakteristiky</b>				
Označení	$E_c$ - modul pružnosti v tahu	$f_c$ - pevnost v tahu	obsah vláken	$\rho_c$ - objemová hmotnost
	[GPa]	[MPa]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
PREFACARB-L	> 150	3000	70	1,6
CARBODUR S, XS	165	3100	> 68	1,6
CARBODUR M	210	3200	> 68	1,6
CARBODUR H	300	1500	> 68	1,6

Pozn.: uvedeny jsou střední hodnoty modulů pružnosti a pevností v tahu dodané výrobcem

Tab. 5.5 Porovnání vlastností uhlíkových lamel od obou výrobců [10, 11]

Z tabulky je patrné, že každý výrobce dosahuje při výrobě kompozitních uhlíkových lamel rozdílných výsledků. Tuto skutečnost lze přisoudit rozličným výrobním procesům od samotné výroby uhlíkového vlákna až po konečnou výrobu uhlíkové lamely s polymerní epoxidovou maticí. Faktory vstupující do výroby a ovlivňující výrobu jsou uvedeny v předchozí kapitole a je patrné, že výroba je značně rozmanitá. Každý z výrobců si vlastní postup výroby pečlivě chrání před konkurencí a ani pro účely této diplomové práce nebylo možné zjistit technologický postu při výrobě konkrétně použité kompozitní uhlíkové lamely PREFACARB – L.

## 6. Konkrétní způsob použití kompozitních lamel

V kapitole 3. bylo pojednáno o možném širokém použití kompozitních lamel z uhlíkových vláken v různých oborech a různých způsobech použití v závislosti na druhu namáhání. Náplní této diplomové práce je však studie použití této externí lepené výztuže z kompozitních lamel vyztužených uhlíkovými vlákny s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice za účelem zvýšení momentové únosnosti, případně i tuhosti typických válcovaných ocelových nosníků z běžně dostupného sortimentu výrobních programů společností produkujících hutní materiál. Předmětem studie jsou zejména válcované tyče typu IPE typické pro stropní konstrukce, průvlaky a překlady pozemních staveb. Tato studie prověřuje vliv zesílení externí výztuží z kompozitních lamel na momentovou únosnost zesilovaného prvku při namáhání prostým ohybem. Kompozitní lamely jsou tedy v tomto případě aplikovány do tažené oblasti zkušebního prvku. V konkrétním případě se jedná o aplikaci na spodní líc pásnice ocelových profilů typu IPE.

Pro teoretické posouzení jsou aplikovány vztahy analogické s výpočtem ocelobetonových spřažených konstrukcí a tyto výsledky jsou dále porovnány s experimentálně ověřenými hodnotami na vybraných nosnících. Správnost nasazeného výpočetního postupu je dále ověřena.



Obr. 6.1 Experimentální ověření – zatěžování ocelového nosníku s nalepenou uhlíkovou lamelou na spodní pásnici

## 7. Aplikace

### 7.1. Lepící hmota

Pro lepení uhlíkových lamel na ocelový nosník byla použita lepicí hmota na bázi epoxidových pryskyřic bez rozpouštědel od výrobce PREFA KOMPOZITY a.s. s výrobním označením PREFEPOX L. Lepící hmota je dvousložková se složkou A - bílá, B – černá a dobou zpracovatelnosti 30 minut. Hmotnostní poměr míšení je A:B – 1:1 s povolenou odchylkou 10%. Spotřeba lepidla činí přibližně 0,5 kg/bm lamely. Pevnost lepicí hmoty ve smyku je  $> 8$  MPa. [10]

### 7.2. Příprava povrchu a postup lepení

Před samotným nanesením lepidla musí být povrch očištěn, odmaštěn a zbaven rzi. Povrch oceli je vhodné tryskat na Sa 2,5. V případě většího porušení povrchu je doporučeno povrch brousit. Povrch musí být rovný. V tomto konkrétním případě byl povrch broušen, což představuje nadstandardní řešení s ohledem na to, že ocelové nosníky byly nové.

Při aplikaci se nanáší lepicí hmota na samotný ocelový nosník tak, že musí vyplnit veškeré póry (poruchy) a musí být nanesena v min. tl. 1,0 mm. Lepící hmota se nanáší i na samotnou lamelu. Následně se lamela přitiskne na nosník a přitlačí v celé délce gumovým válečkem. Po přitlačení musí být v celé délce vytlačena lepicí hmota, což je znamení, že nikde není dutina. Přebytečné lepidlo je nutné odstranit. Po vytvrzení lepidla se poklepáním nebo jinou nedestruktivní přístrojovou metodou vyzkouší přilnavost lamely. [10, 11]



Obr. 7.1 Uhlíková lamela po nalepení a vytvrzení lepicí hmoty

## 8. Specifikace zesilovaných prvků a zesilujících kompozitních lamel

### 8.1. Zesilované ocelové nosníky

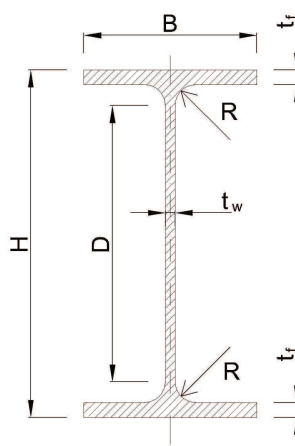
Experimentální ověření teoretického výpočtu momentové únosnosti kompozitního prvku (ocelový nosník zesílený externí výztuží z kompozitní lamely vyztužené uhlíkovými vlákny s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice) vycházející z pružného a plastického působení, je uvažováno a experimentálně ověřeno na běžně dostupných ocelových tyčích, které patří mezi běžně nabízený sortiment společností zabývajících se výrobou a produkcí hutního materiálu. Konkrétně se jedná o ocelové tyče válcované za tepla typu: IPE 120, 140, 160, 180 a 200 z běžné oceli jakosti S235JR (1.0038) dle ČSN EN 10025-2. Jedná se o běžně používané profily pro stropní konstrukce, průvlaky a překlady u pozemních staveb. Rozměry, průřezové charakteristiky a materiálové charakteristiky pro celou škálu tyčí IPE jsou patrné z tabulky 8.1 a 8.2.

Materiálové charakteristiky oceli			
označení oceli	Mez kluzu	Mez pevnosti	Youngův Modul pružnosti
	$f_y$ [MPa]	$f_r$ [MPa]	$E_a$ [GPa]
S235JR (1.0038)	235	360	210

Tab. 8.1 Materiálové charakteristiky oceli

Rozměry a průřezové charakteristiky										
označení	Rozměry						Průřezové charakteristiky			
	$H$	$B$	$t_w$	$t_f$	$r$	$d$	$A$	$I$	$W_{el,a}$	$W_{pl,a}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]
	-	-	-	-	-	-	-	.10 <sup>6</sup>	.10 <sup>3</sup>	.10 <sup>3</sup>
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7,0	74,6	1032,0	1,7	34,2	39,4
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7,0	93,4	1321,0	3,2	53,0	60,7
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7,0	112,2	1643,0	5,4	77,3	88,3
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9,0	127,2	2009,0	8,7	109,0	123,9
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9,0	146,0	2395,0	13,2	146,0	166,4
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12,0	159,0	2848,0	19,4	194,0	220,6
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12,0	177,6	3337,0	27,7	252,0	285,4
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15,0	190,4	3912,0	38,9	324,0	366,6
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15,0	219,6	4594,0	57,9	429,0	484,0
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15,0	248,6	5381,0	83,6	557,0	628,4
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18,0	271,0	6261,0	117,7	713,0	804,3
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18,0	298,6	7273,0	162,7	904,0	1019,0
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21,0	331,0	8446,0	231,3	1157,0	1307,0
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21,0	378,8	9882,0	337,4	1500,0	1702,0
IPE 500	500	200	10,2	16,0	21,0	426,0	11550,0	482,0	1930,0	2194,0
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24,0	467,6	13440,0	671,2	2440,0	2787,0
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24,0	514,0	15600,0	920,8	3070,0	3512,0

Tab. 8.2 Geometrické charakteristiky oceli



Obr. 8.1 Geometrie ocelových nosníků typu IPE

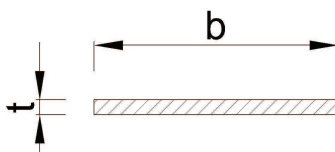


## 8.2. Kompozitní uhlíkové lamely

Pro zesilování ocelových nosníků byla zvolena externí výztuž z kompozitních lamel vyztužených uhlíkovými vlákny s polymerní matricí z epoxidové pryskyřice aplikované lepením pomocí epoxidového dvousložkového lepidla. Konkrétně byla použita lamela společnosti PREFA KOMPOZITY a.s. s obchodním označením PREFACARB – L o rozměrech  $b = 50$ ,  $t = 1,2$  mm. Materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 8.3.

Materiálové charakteristiky lamely		
Pevnost v tahu	$f_c$ [MPa]	3000
Youngův modul pružnosti v tahu	$E_c$ [GPa]	155
Obsah vláken	[%]	70
Objemová hmotnost	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,6
Teplotní roztažnost v podélném směru	[-]	$6 \times 10^{-6}$
Teplotní roztažnost v příčném směru	[-]	$3 \times 10^{-5}$
Typ vláken	[-]	HS (typ PAN)
Matrice	[-]	epoxidová pryskyřice

Tab. 8.3 Materiálové charakteristiky uhlíkové lamely [10]



Obr. 8.2 Geometrie uhlíkové lamely

## 9. Teoretická část

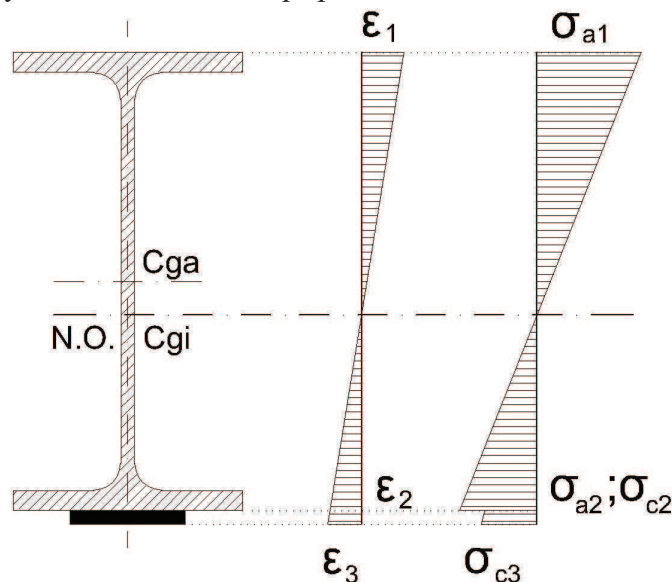
### 9.1. Předpoklady výpočtu

#### 9.1.1.1. Výpočetní model

V tomto případě bylo vycházeno z předpokladu, že se uvažovaný kompozit (zesílený ocelový nosník externí výztuží z uhlíkových vláken) bude chovat podobně, jako se chová ocelobetonový spřažený průřez při namáhání prostým ohybem s tuhým smykovým spojením.

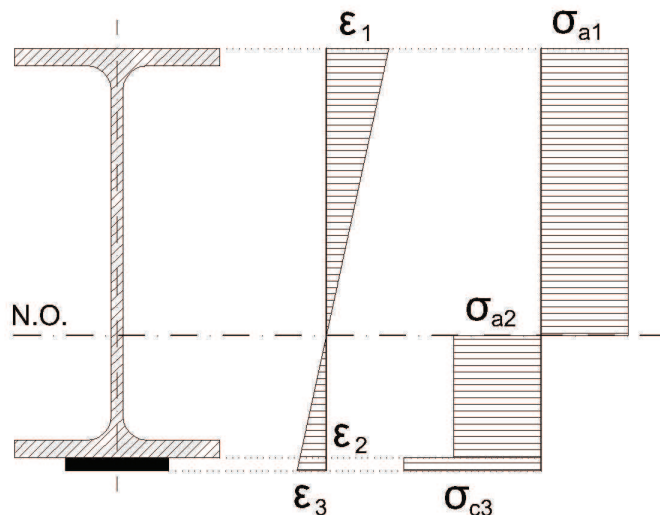


Tento postup uvádí a opírá se o něj i jiná odborná literatura týkající se problematiky zesilování dřevěných, betonových nebo ocelových prvků. U materiálů jako je dřevo, beton a ocel víme, že lze aplikovat za určitých okolností (většina běžných případů) výpočet v plastickém oboru. To znamená, že materiál umožňuje zplastizování s nímž je spojeno přerozdělování vnitřních sil na průřezu a vznik plastických kloubů (neplatí Hookův zákon – pohybujeme se na plastické větvi pracovních diagramů). Uvažované zesilované ocelové IPE nosníky, které spadají do I. třídy průřezů pro namáhání ohybem (zatřídění dle ČSN EN 1993-1-1), tedy nejsou náchylné k boulení a je u nich zaručena plastizace. Kompozitní uhlíková lamela má však odlišné vlastnosti od oceli a je patrné, že v ní nedojde k zplastizování. Tento závěr nasvědčuje tomu, že ocelový průřez zesílený externí výztuží z uhlíkových vláken se bude chovat pružno-plasticky. Uhlíkové lamely však dosahují obrovských pevností a lze tedy předpokládat, že než dojde k porušení lamely, ocelový IPE profil zplastizuje a překročí svoji únosnost. V textu je dále při stanovování teoretické momentové únosnosti zesíleného ocelového IPE nosníku externí výztuží z uhlíkových lamel s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice postupováno analogicky jako při výpočtu momentové únosnosti ocelobetonového spráženého průřezu v plastickém oboru a v pružném oboru (aplikován ideální průřez) pro srovnání obou postupů. Správnost těchto úvah je ověřena praktickým experimentem. Základní vztahy pro výpočet momentové únosnosti ocelobetonových sprážených prvků jsou dále v textu přizpůsobeny tomto konkrétnímu případu.



Obr. 9.1 Schéma průběhu poměrného přetvoření a napětí na průřezu v pružném oboru.

Z obrázku 9.1 je patrné, že připojením lamely dojde k posunu neutrální osy směrem k dolním vláknům. Výpočetně to vede na vytvoření ideálního průřezu zohledňujícího rozdílné moduly pružnosti obou materiálů. V důsledku rozdílných modulů pružnosti jsou v úrovni připojení lamely při stejném poměrném přetvoření  $\varepsilon_2$  různá napětí  $\sigma_{a2}$  a  $\sigma_{c2}$ , která se liší v poměru obou modulů pružnosti. Ohybová únosnost je dána dosažením meze kluzu jednoho z materiálů v krajních vlákněch. Zpravidla budou v tomto případě rozhodovat horní ocelová krajní vlákna.



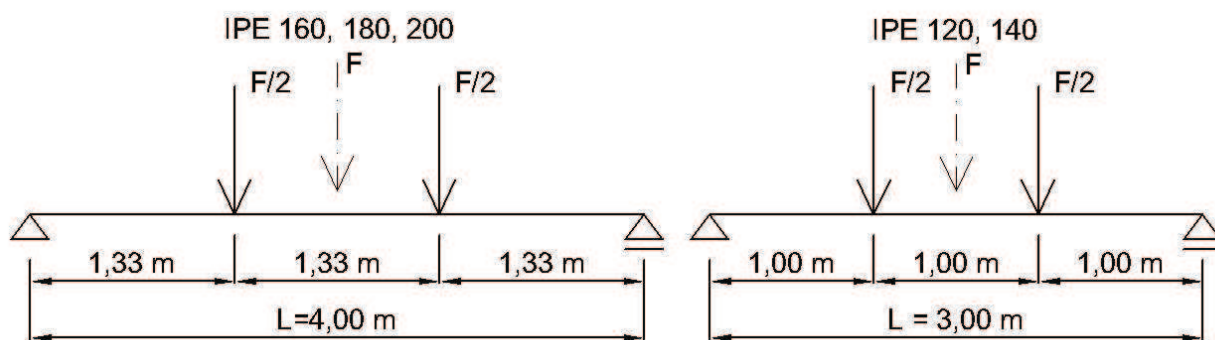
Obr. 9.2 Schéma průběhu poměrného přetvoření a napětí na průřezu v plastickém oboru.

Na obrázku 9.2 je naznačen ideální stav (předpoklad výpočtu) kde plně zplastizují oba materiály a tím je dána plastická momentová únosnost. Z materiálových charakteristik lamely je však patrné, že se lamela nebude chovat plasticky a dávno před tím než by bylo dosaženo meze pevnosti lamely, (3000 MPa) dojde k překročení únosnosti ocelového nosníku. Tudíž při vyčerpání plastické únosnosti ocelového nosníku nebude napětí v lamelle na mezi únosnosti, jak je uvažováno ve výpočtech. Tento předpoklad se potvrdil i při experimentálním ověření. Správně by tedy měl být uvažován lineární nárůst napětí po výšce lamely, což by vedlo na pružně-plastické schéma. Výška lamely je však 1,2 mm, a proto je tento faktor zanedbán a uvažováno je konstantní napětí po výšce lamely.

### 9.1.2. Okrajové podmínky

#### Statické schéma:

Statické schéma předpokládá ve všech případech prostě podepřený nosník o rozpětí  $L$ . Rozpětí  $L$  je uvažováno v hodnotách  $L = 3,0$  m pro ocelové nosníky IPE 120, 140 a  $L = 4,0$  m pro ocelové nosníky IPE 160, 180, 200.

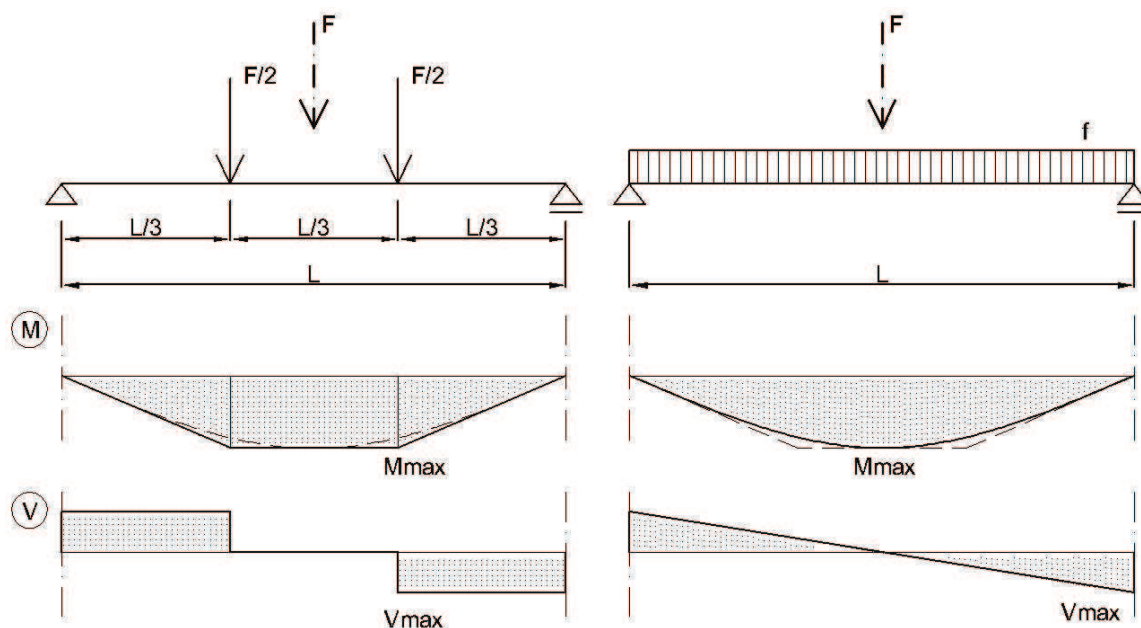


Obr. 9.3 Schéma statického působení pro jednotlivé nosníky

### Zatížení:

V ideálním případě by bylo voleno rovnoměrné spojitě zatížení po celé délce nosníku tak, aby to odpovídalo nejčastějším případům z praxe a nevyskytovaly se extrémní vnitřní síly, které by mohly zkreslovat výsledky. Vyvodit rovnoměrné spojitě zatížení je však pro experimentální ověření velice náročné a špatně proveditelné. Jedna z možností by byla zatížit nosníky metodou tzv. vakuování. Experiment by byl však nákladný a za těchto podmínek těžko realizovatelný. V těchto případech se tedy běžně postupuje tak, že se nosník zatěžuje dvojicí sil, jejichž působíště jsou umístěna do třetin rozpětí nosníků. Tento způsob je snadno realizovatelný v laboratoři i v praxi a zároveň dává výsledky přibližující se spojitěmu rovnoměrnému zatížení. Co se týče ohybových momentů, tak dvojice sil vyvodí namáhání, jemuž odpovídá lichoběžníkový tvar momentového obrazce, kdy je zajištěno, že uprostřed rozpětí je maximální ohybový moment konstantní. Lichoběžníkový tvar zároveň svým tvarem připomíná právě momentový obrazec od spojitěho rovnoměrného zatížení, jemuž odpovídá parabola 2<sup>o</sup>.

Celé zatěžovací a statické schéma pro teoretické a experimentální ověření je patrné z obr. 9.4.



Obr. 9.4 Statické a zatěžovací schéma s porovnáním momentových obrazců a obrazců posouvajících sil pro zatížení dvojicí osamělých břemen a zatížení spojitým rovnoměrným zatížením.

### Teplota:

Pro teoretické výpočty nebyla teplota brána v úvahu. Předpokladem bylo, že oba materiály mají stejnou teplotu a ta se v čase nemění. V případě experimentálního ověření tomu bylo rovněž tak. Teplota obou materiálů byla vyrovnána temperancí během doby uložení zkušebních vzorků v laboratoři, kdy byla teplota okolního vzduchu konstantní a během zatěžování byla teplota rovněž neměnná. Teplota činila přibližně 18 °C. Údaj je orientační, jelikož ztrácí na významu, pokud nedocházelo k namáhání změnou okolní teploty a teploty obou materiálů, případně změnou teploty povrchu jednoho z materiálů (např. sluneční záření na vrchní části zkušebního vzorku), což by zapříčinilo nerovnoměrné oteplení po výšce průřezu. Z toho však plyne, že v návaznosti na tuto studii by měla být při dalším zkoušení změna teploty uvažována a to z toho důvodu, že tepelná roztažnost oceli a kompozitní lamely z uhlíkových vláken může být odlišná. V tomto případě nelze říci striktně, že je odlišná, jelikož tepelná roztažnost uhlíkových lamel se liší v závislosti na postupu výroby, a tudíž je závislá na výrobcí té které lamely. Rozmanitost výrobních procesů a faktorů ovlivňujících vlastnosti byla věnována pozornost v předchozích kapitolách. Pro přehlednost lze uvést, že samotné uhlíkové vlákno má dokonce záporný charakter teplotní roztažnosti oproti oceli. Konečný výrobek (např. uhlíková lamela) dostává díky matici z epoxidové pryskyřice jiné

vlastnosti než samotné vlákno a teplotní roztažnost je kladná (případně nulová), je tedy stejného charakteru (znaménka) jako u oceli.

Teplotní roztažnosti v podélném směru:

Uhlíkové vlákno bez matrice	
- High-strength (HS)	$-0,38 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- High modulus (HM)	$-0,83 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Ultra-high modulus (UHM)	$-1,10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
[1]	
- Lamela PREFACARB – L (výrobce Prefa Brno a.s.)	$6,00 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Ocel	$1,10 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
[1]	

### Stabilitní předpoklad:

Uvažované ocelové válcované profily typu IPE jsou velmi náchylné na klopení. Klopení je ve své podstatě ztráta stability způsobující vybočení tlačného pásu (analogie vzpěru). Pro teoretické posouzení s tímto jevem nebylo uvažováno, respektive bylo uvažováno, že nosníku je bráněno ve vybočení tlačného pásu. To odpovídá i většině případů na reálných stavbách a v reálných konstrukcích. Během experimentu musel být tento předpoklad dodržen, a proto bylo klopení během zatěžování bráněno speciální konstrukcí (podrobně znázorněno v 10. kapitole). U experimentu by klopení při uvažovaném rozpětí nastalo velice brzy a znehodnotilo by výsledky zkoušek.

## 9.2. Odvození výpočtu momentové únosnosti v plastickém oboru zesíleného nosníku (kompozitu)

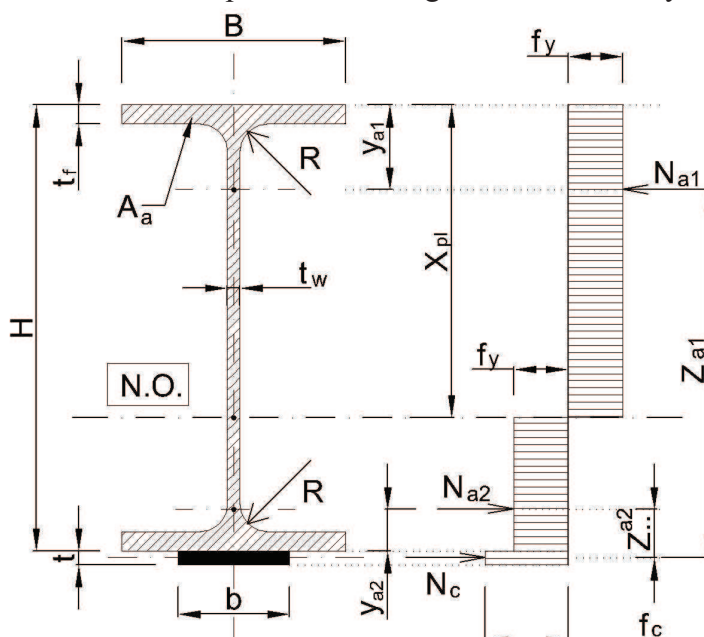
Za „idealizovaného“ předpokladu, že průřez plně zplastizuje a smykové spojení mezi uhlíkovou lamelou a ocelovým nosníkem je úplné (tuhé), můžeme analogicky při odvozování pro tento případ vyjít z plastické momentové únosnosti ocelobetonového spřaženého průřezu. Je však důležité už v první fázi odvozování odlišit dva případy možné polohy neutrální osy průřezu:

- poloha neutrální osy prochází stojinou ocelového nosníku
- poloha neutrální osy prochází pásnicí ocelového nosníku

Případ, kdy by neutrální osa procházela samotnou lamelou se nepředpokládá, a proto budou dále odvozeny výpočetní vztahy pouze pro tyto dva případy.

### 9.2.1. Poloha neutrální osy prochází stojinou ocelového nosníku

Schéma rozložení vnitřních sil na průřezu – analogie s ocelobetonovým spřaženým průřezem



Obr. 9.5 Schéma silového působení na průřezu v plastickém oboru s neutrální osou ve stojině nosníku.

Při respektování označení na 9.5 můžeme psát základní součtovou podmínku rovnováhy sil, která musí být vždy splněna,

$$N_{a1} - N_{a2} - N_c = 0 \quad (1.1)$$

Odtud:

$$N_{a1} = N_{a2} + N_c \quad (1.2)$$

$N_{a1}, N_{a2}$  ..... Normálové síly na ocelovém průřezu

$N_c$  ..... Normálová síla v uhlíkové lamelě

Normálové síly na průřezu lze jednoduše vypočítat z plochy průřezu vynásobené pevnostní charakteristikou. Plocha průřezu je:

$$A_a = A_{a1} + A_{a2} \quad (1.3)$$

$$A_{a1} = B \cdot t_f + \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2} + t_w \cdot (x_{pl} - t_f) \quad (1.4)$$

$$A_{a2} = B \cdot t_f + \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2} + t_w \cdot (H - x_{pl} - t_f) \quad (1.5)$$

$$A_c = b \cdot t$$

$A_a$  ..... Celková průřezová plocha ocelového nosníku

$A_{a1}, A_{a2}$  ..... Dílčí průřezové plochy ocelového nosníku

$A_c$  ..... Průřezová plocha uhlíkové lamely

Normálové síly působící na průřezu získáme jednoduchým vynásobením pevnostní charakteristikou:

$$N_{a1} = f_y \cdot B \cdot t_f + f_y \cdot \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2} + f_y \cdot t_w \cdot (x_{pl} - t_f) \quad (1.6)$$

$$N_{a2} = f_y \cdot B \cdot t_f + f_y \cdot \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2} + f_y \cdot t_w \cdot (H - x_{pl} - t_f) \quad (1.7)$$

$$N_c = f_c \cdot b \cdot t \quad (1.8)$$

$f_y$  ..... Tabulková mez kluzu oceli

$f_c$  ..... Tabulková pevnost uhlíkové lamely v tahu

Když dosadíme rovnice 1.6, 1.7, 1.8 do základní rovnice 1.1, tak po úpravě získáme vztah pro výpočet polohy neutrální osy ozn.  $x_{pl}$

$$x_{pl} = \frac{H}{t_w} + \frac{t \cdot b \cdot f_c}{2t \cdot f_y} \quad (1.9)$$

Nyní známe polohu neutrální osy, známe velikost normálových sil na průřezu a pro výpočet momentu únosnosti musíme z geometrických vlastností podle schématu na obrázku 9.5 určit polohy těžišť dílčích částí průřezu a z toho stanovit velikost ramen, na kterých působí normálové síly. Polohu těžiště vypočítáme pomocí statického momentu vztaženého k zvolenému bodu.

Obecně pro polohu těžiště platí, že:

$$y_t = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1.10)$$

Převedeno na tento případ dostaneme po úpravě vztah pro výpočet polohy těžiště:

$$y_{ta1} = \frac{\frac{1}{2} \cdot B \cdot t_f^2 + t_w \cdot (x_{pl} - t_f) \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (x_{pl} - t_f) + t_f \right] + \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2} \cdot (t_f + 0,223R)}{B \cdot t_f + t_w \cdot (x_{pl} - t_f) + \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2}} \quad (1.11)$$

$$y_{ta2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot B \cdot t_f^2 + t_w \cdot (H - x_{pl} - t_f) \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (H - x_{pl} - t_f) + t_f \right] + \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2} \cdot (t_f + 0,223R)}{B \cdot t_f + t_w \cdot (H - x_{pl} - t_f) + \frac{R^2 \cdot (4 - \pi)}{2}} \quad (1.12)$$

$y_{a1}, y_{a2}$  ..... poloha těžiště části ocelového průřezu vztažená k pomocnému bodu.

Nyní je možné z geometrie stanovit ramena vnitřních sil za podmínky, že ramena vnitřních sil jsou vztažena k paprsku síly  $N_c$ .

$$z_{a1} = H - y_{a1} + \frac{t}{2} \quad (1.13)$$

$$z_{a2} = y_{a2} + \frac{t}{2} \quad (1.14)$$

$z_{a1}, z_{a2}$  ..... ramena vnitřních sil na průřezu vztažená k paprsku síly  $N_c$

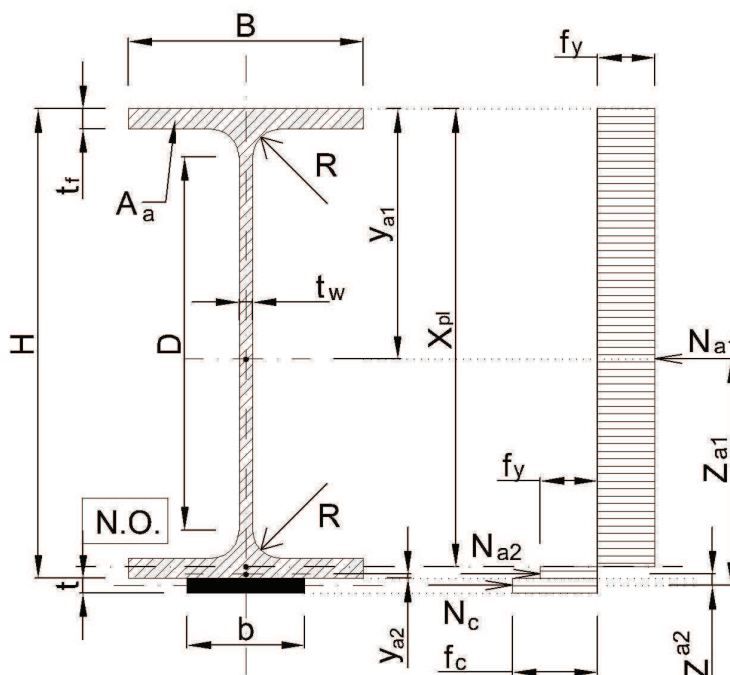
Jestli že platí součtová podmínka rovnováhy vnitřních sil, musí platit i momentová podmínka vnitřních sil. Bod otáčení je pro zjednodušení výpočtu zvolen v místě působišť paprsku síly  $N_c$  a pak platí:

$$M_{pl,R,komp} = N_{a1} \cdot z_{a1} - N_{a2} \cdot z_{a2} \quad (1.15)$$



## 9.2.2. Poloha neutrální osy prochází pásnicí ocelového nosníku

Schéma rozložení vnitřních sil na průřezu – analogie s ocelobetonovým spřaženým průřezem



Obr. 9.6 Schéma silového působení na průřezu v plastickém oboru s neutrální osou v pásnici .

V tomto případě lze vycházet ze základních předpokladů, které jsou uvedeny v odstavci 10.1.1, rovnice 1.1, 1.2, 1.3 platí i pro tento případ. Z důvodu posunu neutrální osy do pásnice se však již bude lišit výpočet jednotlivých průřezových ploch. Označení zůstává stejné.

$$A_{a1} = B \cdot t_f + t_w \cdot (H - 2t_f) + R^2 \cdot (4 - \pi) + B \cdot (x_{pl} - t_f - 2R - D) \quad (2.1)$$

$$A_{a2} = B \cdot (H - x_{pl}) \quad (2.2)$$

Normálové síly působící na průřezu určíme rovněž pouhým vynásobením pevnostní charakteristikou a dostaneme:

$$N_{a1} = f_y \cdot B \cdot t_f + f_y \cdot t_w \cdot (H - 2t_f) + f_y \cdot R^2 \cdot (4 - \pi) + f_y \cdot B \cdot (x_{pl} - t_f - 2R - D) \quad (2.3)$$

$$N_{a2} = f_y \cdot B \cdot (H - x_{pl}) \quad (2.4)$$

$$N_c = f_c \cdot b \cdot t \quad (2.5)$$

Když dosadíme rovnice 2.3, 2.4, 2.5 do základní rovnice 1.1, tak po úpravě získáme vztah pro výpočet polohy neutrální osy ozn.  $x_{pl}$

$$x_{pl} = \frac{-B \cdot t_f - t_w \cdot (H - 2t_f) - R^2 \cdot (4 - \pi) + B \cdot t_f + 2B \cdot R + B \cdot D + B \cdot H}{2B} + \frac{f_c \cdot b \cdot t}{2f_y \cdot B} \quad (2.6)$$

Nyní známe polohu neutrální osy, známe velikost normálových sil na průřezu a pro výpočet momentu únosnosti musíme z geometrických vlastností podle schématu na obrázku 9.6 určit polohy těžišť dílčích částí průřezu a z toho stanovit velikost ramen, na kterých působí normálové síly. Polohu těžiště vypočítáme pomocí statického momentu vztaženého k zvolenému bodu.

$$y_{ta1} = \frac{A_a \cdot \frac{H}{2} - B \cdot (H - x_{pl}) \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{2} \cdot (H - x_{pl}) \right] + x_{pl} \right\}}{A_a - B \cdot (H - x_{pl})} \quad (2.7)$$

$$y_{ta2} = \frac{H - x_{pl}}{2} \quad (2.8)$$

Nyní je možné z geometrie stanovit ramena vnitřních sil za podmínky, že ramena vnitřních sil jsou vztažena k paprsku síly  $N_c$ .

$$z_{a1} = H - y_{a1} + \frac{t}{2} \quad (2.9)$$

$$z_{a2} = y_{a2} + \frac{t}{2} \quad (2.10)$$

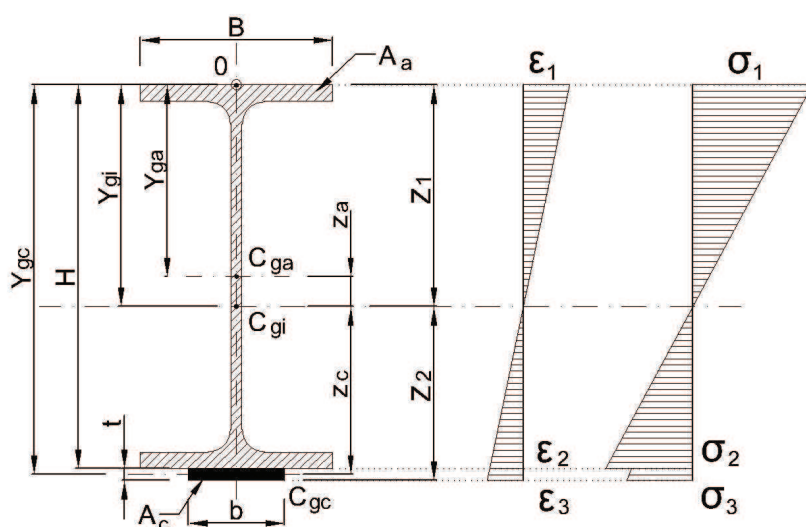
Jestli že platí součtová podmínka rovnováhy vnitřních sil, musí platit i momentová podmínka vnitřních sil. Bod otáčení je pro zjednodušení výpočtu zvolen v místě působíště paprsku síly  $N_c$ , pak platí:

$$M_{pl,R,komp} = N_{a1} \cdot z_{a1} - N_{a2} \cdot z_{a2} \quad (2.11)$$

### 9.3. Odvození výpočtu momentové únosnosti v pružném oboru zesíleného nosníku (kompozitu)

Při výpočtu momentové únosnosti v pružném oboru, kdy platí Hookův zákon a je zajištěno úplné (tuhé) spojení mezi materiály, je nutné zohlednit odlišné moduly pružnosti

obou materiálů. Tento faktor je ve výpočtu zohledněn vytvořením tzv. ideálního průřezu, který zajišťuje celistvost. V důsledku to znamená, že se oba materiály převedou na jeden materiál pomocí pracovního součinitele  $n$ , který je určen poměrem obou modulů pružnosti. Pracovní součinitel pak redukuje plochu jednoho z materiálů. V důsledku různých modulů pružnosti pak stejnému přetvoření odpovídají různá napětí právě v závislosti na modulu pružnosti konkrétního materiálu. V tomto případě se jedná o ocelový nosník a lamelu z uhlíkových vláken s matricí z polymerní epoxidové pryskyřice. Tato lamela se pro výpočet převede na ocel a vytvoří se ideální průřez zohledňující příspěvek přilepené lamely. Při výpočtu lze opět vycházet z principu ocelobetonových spřažených nosníků.



Obr. 9.7 Schéma silového působení a poměrné přetvoření na ideálním průřezu v pružném oboru.

Pracovní součinitel v tomto případě je:

$$n = \frac{E_a}{E_c} \quad (3.1)$$

Lamela bude pomocí pracovního součinitele převedena na ocel, šířku lamely  $b$  pak lze upravit na ideální šířku  $b_i$ :

$$b_i = \frac{1}{n} \cdot b \quad (3.2)$$

Celkovou plochu ideálního průřezu pak lze psát jako:

$$A_i = A_a + b_i \cdot t \quad (3.3)$$

Zohledněním lamely v ideálním průřezu dojde k posunu neutrální osy. Nová poloha neutrální osy se stanoví ze vztahu:

$$y_{g,i} = \frac{A_a \cdot y_{g,a} + b_i \cdot t_f \cdot y_{g,c}}{A_i} \quad (3.4)$$

Dále je možné vypočítat moment setrvačnosti ideálního průřezu  $I_i$ :

$$I_i = I_a + A_a \cdot (y_{g,i} - y_{g,a})^2 + \frac{1}{12} \cdot b_i \cdot t^3 + b_i \cdot t \cdot (y_{g,c} - y_{g,i})^2 \quad (3.5)$$

Momentová únosnost kompozitního nosníku v pružném oboru se pak stanoví z následující podmínky

$$M_{el,R,komp} = \min \left\{ f_y \cdot \frac{I_i}{z_1}; n \cdot f_c \cdot \frac{I_i}{z_2} \right\} \quad (3.6)$$

V tomto případě zpravidla vždy rozhoduje dovršení napětí na mezi kluzu na straně horních vláken u oceli, a proto bude minimální první z momentových únosností.

#### 9.4. Momentová únosnost v plastickém a pružném oboru samotného ocelového nosníku

Z důvodu porovnání teoretických výsledků je nutné stanovit teoretickou momentovou únosnost v plastickém a pružném oboru samotného ocelového IPE nosníku bez zesílení. V tomto případě je situace velice jednoduchá. Pro výpočet v plastickém oboru lze vycházet z toho, že veškeré IPE profily od IPE 80 až po IPE 600 spadají do I. třídy průřezů (při namáhání ohybovým momentem!!!) a můžeme využít opět plastický výpočet. Pro stanovení momentu únosnosti využijeme plastický průřezový modul  $W_{pl,a}$ . Pro výpočet v pružném oboru pak použijeme příslušný pružný (elastický) průřezový modul  $W_{el,a}$ .

Moment únosnosti je pak roven:

$$M_{pl,R,a} = f_y \cdot W_{pl,a} \quad (4.1)$$

$$M_{el,R,a} = f_y \cdot W_{el,a} \quad (4.2)$$

Pozn.:

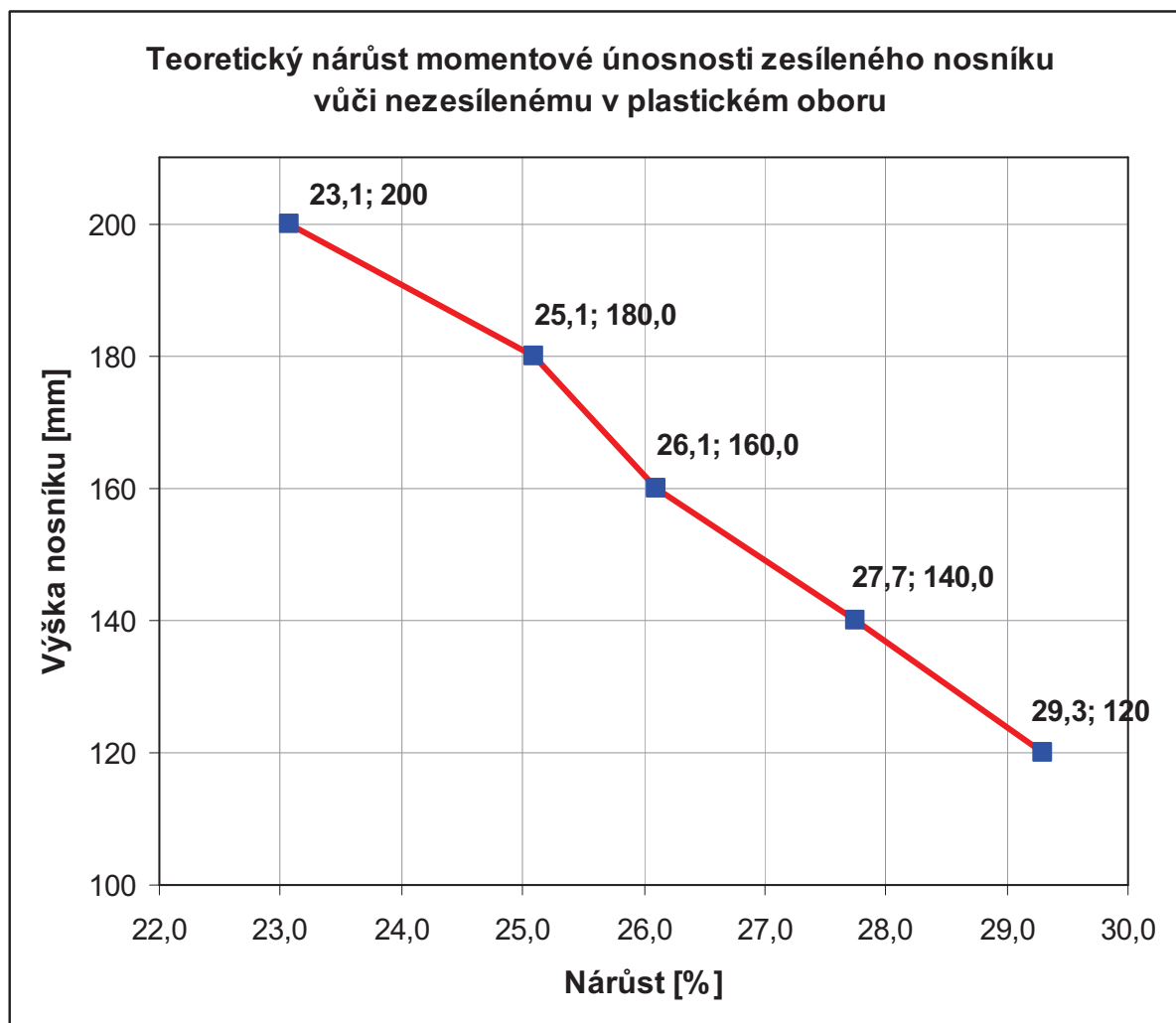
Vzhledem k tomu, že je IPE profil symetrický, není nutné při pružném výpočtu rozlišovat vzdálenosti krajních vláken, jako tomu bylo u ideálního průřezu.

## 9.5. Stanovení momentové únosnosti jednotlivých nosníků v plastickém a pružném oboru

Pro zjednodušení a urychlení výpočtů hodnot momentových únosností zesílených a nezesílených ocelových nosníků byly do tabulkového procesoru MS Excel nadefinovány výše odvozené výpočetní vztahy a geometrické a materiálové charakteristiky. Teoreticky jsou posouzeny zesílené a nezesílené ocelové profily typu: IPE 120, 140, 160, 180 a 200. Výstupy z této aplikace jsou níže doloženy v přehledném provedení ve formě tabulky s uvedením momentových únosností a procentuálnímu nárůstu teoretické momentové únosnosti zesíleného nosníku vůči nezesílenému. V teoretických výpočtech je uvažována charakteristická mez kluzu oceli  $f_y = 235$  MPa. Kompletní výpočty teoretických momentových únosností se všemi parametry jsou doloženy v příloze.

<b>Teoretické momentové únosnosti nosníků v plastickém oboru</b>			
ozn.	$M_{pl,R,a}$	$M_{pl,R,kompozit}$	nárůst únosnosti
	[kNm]	[kNm]	[%]
IPE 120	14,27	18,45	29,3
IPE 140	20,76	26,52	27,7
IPE 160	29,12	36,72	26,1
IPE 180	39,10	48,91	25,1
IPE 200	51,84	63,80	23,1

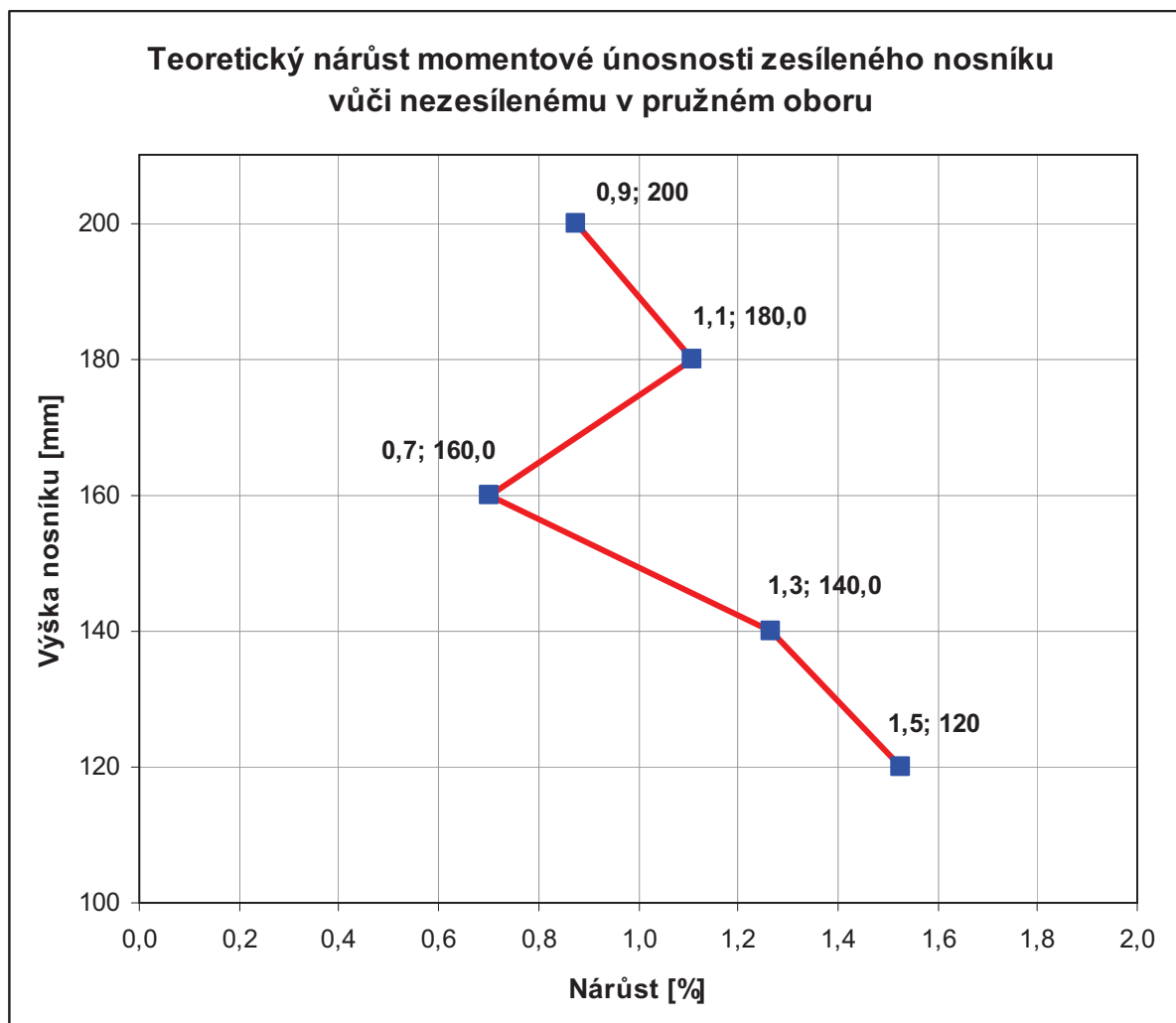
Tab. 9.1 Teoretické momentové únosnosti nosníků v plastickém oboru



Graf. 9.1 Teoretický nárůst momentové únosnosti zesíleného nosníku vůči nezesílenému v plastickém oboru

<b>Teoretické momentové únosnosti nosníků v pružném oboru</b>			
ozn.	$M_{el,R,a}$	$M_{el,R,kompozit}$	nárůst únosnosti
	[kNm]	[kNm]	[%]
IPE 120	12,46	12,65	1,5
IPE 140	18,17	18,40	1,3
IPE 160	25,62	25,80	0,7
IPE 180	34,31	34,69	1,1
IPE 200	45,59	45,99	0,9

Tab. 9.2 Teoretické momentové únosnosti nosníků v pružném oboru



Graf. 9.2 Teoretický nárůst momentové únosnosti zesíleného nosníku vůči nezesílenému v pružném oboru

## 10. Experimentální část

### 10.1. Experimentálně ověřené materiálové charakteristiky

#### 10.1.1. Ocel

Z každé série experimentálně ověřených nosníků byl vybrán jeden nosník, ze kterého byly vyrobeny dva zkušební vzorky pro zjištění materiálových charakteristik. Jeden vzorek byl vždy vyroben z pásnice a druhý ze stojiny nosníku. Na základě tahových zkoušek provedených dle ČSN EN ISO 6892-1 v laboratoři Univerzity obrany v Brně, byly vyhodnoceny pevnostní charakteristiky oceli (mez kluzu, mez pevnosti) a Youngův modul

pružnosti v tahu. Tyto hodnoty jsou uvedeny souhrnně v tabulce 10.1 a podrobné záznamy ze zkoušek včetně pracovních diagramů jsou doloženy v příloze ve formě protokolů o zkoušce.

<b>Experimentálně ověřené materiálové charakteristiky oceli</b>				
vzorek ze série	Youngův modul pružnosti v tahu	mez kluzu		mez pevnosti
	$E$	$R_{eH}$	$R_{p,0,2}$	$R_m$
	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
IPE 120	206,19	344,68	-	480,52
IPE 140	215,02	347,48	-	460,09
IPE 160	201,99	-	290,91	401,09
IPE 180	209,40	315,38	-	456,79
IPE 200	193,00	374,16	301,99	457,56

Tab. 10.1 Experimentálně ověřené materiálové charakteristiky oceli

Z tabulky 10.1 je patrné, že u některých vzorků nebyl znatelný prokluz na mezi kluzu  $R_{eH}$  (horní mez kluzu) a proto byla vyhodnocena i hodnota smluvní meze kluzu  $R_{p,0,2}$ . Uvedeny jsou průměrné hodnoty ze dvou vzorků (pásnice a stojina) v jednotlivé sérii.

### 10.1.2. Uhlíkové lamely

Zkoušky za účelem zjištění materiálových charakteristik uhlíkové lamely se během zpracování a vyhodnocení experimentu nepodařilo provést z důvodu komplikovaného uchycení zkušební vzorku z lamely proti vytržení z čelistí zkušebního zařízení při vyvinutí síly potřebné k přetržení lamely, a proto je zde čerpáno pouze z experimentálně ověřených materiálových charakteristik deklarovaných výrobcem PREFA KOMPOZOTY a.s. Tyto hodnoty jsou uvedeny v kapitole 8.

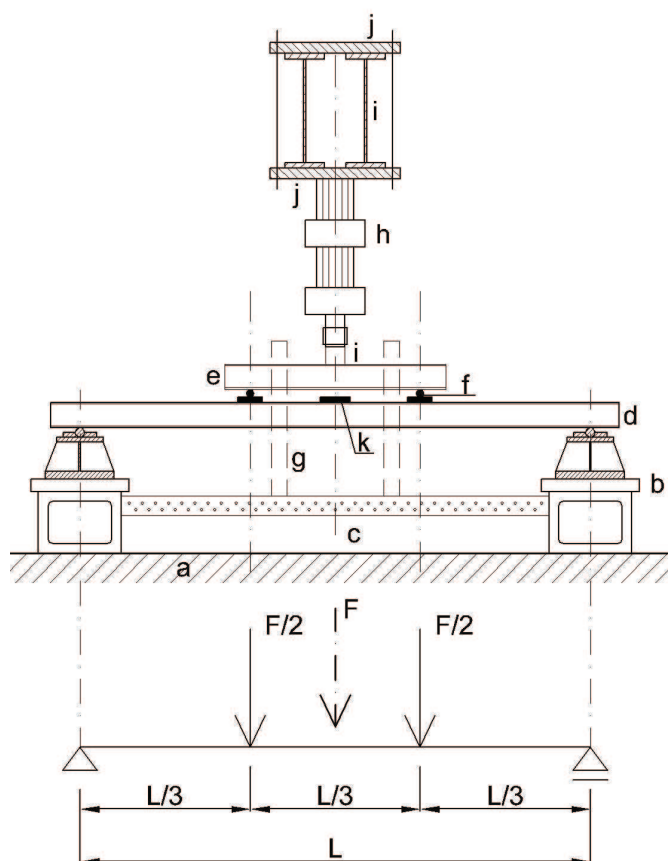
## 10.2. Popis zkušebního zařízení

Zkušební nosníky (zesílené a nezesílené ocelové nosníky) byly experimentálně ověřeny v laboratoři Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební VUT v Brně. Zkušební zařízení sestávalo z následujících částí:

- podpory
- rám
- hydromotor



- roznášecí konstrukce
- konstrukce bránící klopení nosníku
- průhyboměry
- tenzometry
- ovládací zařízení



Obr. 10.1 Schéma zkušebního zařízení a statického působení.

**a** - betonová podlaha, **b** - litinový blok s ocelovým nástavcem, **c** - ocelový pomocný nosník pro kotvení konstrukce bránící klopení, **d** - experimentálně ověřovaný nosník, **e** - roznášecí nosník, **f** - ocelová roznášecí destička, **g** - konstrukce bránící klopení nosníku, **h** - přímočarý hydromotor, **i** - příčel ocelového rámu, **j** - příruby hydromotoru, **k** - pomocná destička pro měření průhybů

#### a) Podpory

Podpory sestávaly z litinových bloků s ocelovým vyztuženým nástavcem s navařenou kruhovou tyčí působící jako líniová podpora pro uložení nosníků, která zároveň umožňovala natočení nosníku v podpoře. Bloky byly posunovatelné a bylo možné přesně nastavit potřebné

rozpětí  $L = 3,0$  pro nosníky IPE 120, 140 a  $L = 4,0$  m pro nosníky IPE 160, 180, 200 a zároveň vystředit experimentálně ověřovaný nosník vůči zkušebnímu (nepohyblivému) rámu s hydromotorem.



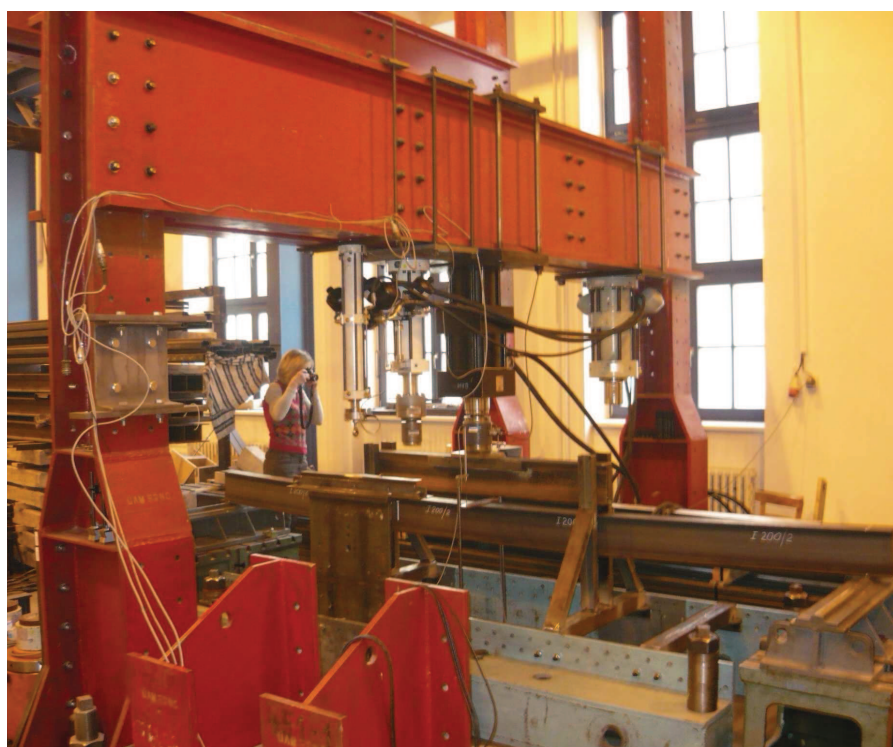
Obr. 10.2 Úložný blok s experimentálně ověřovaným nosníkem

### b) Rám

Zkušební zařízení sestává z tuhé víceúčelové ocelové rámové konstrukce, která je pevně kotvena do země a pro potřeby tohoto experimentu byla využita při zatěžování nosníků shora jako podpora (opora) pro hydromotor, kterým se na experimentálně ověřovaný nosník vnášelo zatížení. Vzhledem k rozměrům ocelové rámové konstrukce a její tuhosti vůči tuhosti zkušebních nosníků, nebyla brána v úvahu zanedbatelná deformace ocelového rámu během samotného zatěžování.



Obr. 10.3 Pohled na zkušební ocelový rám.



Obr. 10.4 Pohled na zkušební ocelový rám.

### c) Hydromotor

Za účelem zatěžování nosníků byl použit přímočarý hydromotor AG 100-100, INOVA Praha s maximálním silovým rozpětím  $\pm 100$  kN a maximálním zdvihem 100 mm. Hydromotor byl zavěšen a upevněn ocelovými přírubami na spodní líc příčnicku ocelové rámové konstrukce tak, aby bylo možné experimentálně ověřovaný nosník zatěžovat shora přes roznášecí konstrukci.



Obr. 10.5 První zleva je vyobrazen použitý přímočarý hydromotor AG 100-100, INOVA Praha

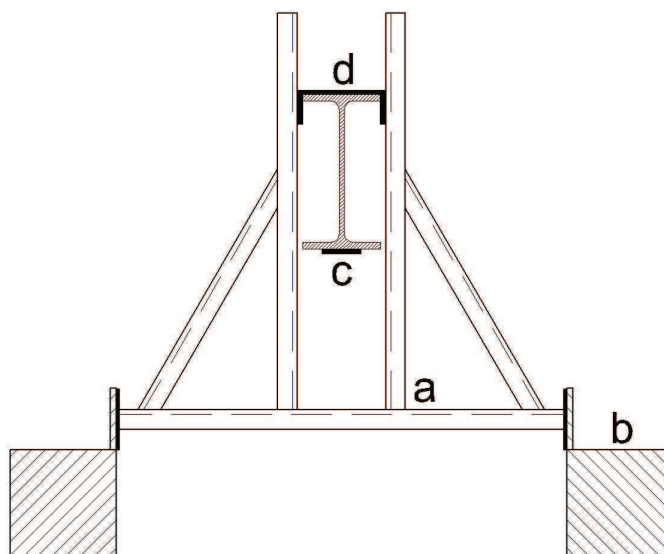
### d) Roznášecí konstrukce

Pro splnění teoretického předpokladu zatěžování dvojicí osamělých břemen ve třetinách rozpětí experimentálně ověřovaného nosníku, které svým tvarem momentového obrazce nejlépe vystihuje spojité rovnoměrné zatížení a zároveň je lehce proveditelné v laboratorních podmínkách, bylo nutné osadit roznášecí konstrukci. Roznášecí konstrukce sestávala z ocelového válcovaného IPE profilu délky přibližně 1,5 m a roznášecích ocelových destiček s navařenou kruhovou tyčí sloužící jako liniová podpora umožňující volné natočení roznášecího nosníku.



### e) Konstrukce bránící klopení nosníku

Vzhledem k tomu, že v teoretickém výpočtu byl brán v úvahu předpoklad, že je bráněno klopení nosníku, bylo nutné tento předpoklad zajistit i při experimentálním ověření. Během prvních dvou zkoušek, kdy nebylo zařízení bránící klopení nosníku instalováno, se potvrdilo, že jsou válcované profily (jednalo se o 2 nosníky IPE 180) při velkém rozpětí (konkrétně  $L = 4,0$  m) na klopení velmi citlivé. Konstrukce bránící klopení nosníku je schematicky znázorněna na obrázku 10.6. Tato konstrukce svírala experimentálně ověřovaný nosník z obou stran a její poloha v podélném směru byla volitelná. Kotvena byla pomocí šroubových spojů do pomocných značně hmotných nosníků položených na podlaze. Tato konstrukce byla umístěna symetricky vůči středu rozpětí experimentálně ověřovaného nosníku. Kontaktní (třecí) plocha mezi konstrukcí bránící klopení nosníku a zkušebním prvkem (případně ocelovou vložkou) byla promazávána grafitovou vazelínou pro snížení tření mezi těmito plochami a zajištění co nejplynulejšího průběhu během zatěžování. Mezera vzniklá mezi konstrukcí bránící klopení nosníku a svíranou pásnicí, která měla proměnnou šířku, byla vyplňována ocelovými vložkami, aby nemohlo vlivem větší mezery dojít k naklopení nosníku během zatěžování.

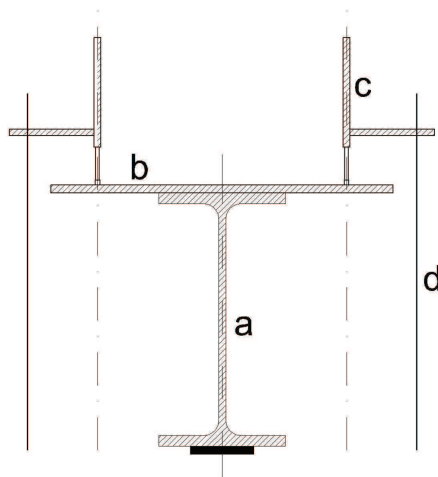


Obr. 10.6 Schéma konstrukce bránící klopení nosníku

**a** – konstrukce bránící klopení nosníku, **b** - ocelový pomocný nosník pro kotvení konstrukce bránící klopení, **c** - experimentálně ověřovaný nosník, **d** – kompenzační vložka vyplňující prostor mezi pásnicí a svislou částí konstrukce bránící klopení

## f) Průhyboměry

Průhyb zkušebního nosníku se měřil na obou stranách nosníku uprostřed rozpětí na horní pásnici. Pro měření bylo použito průhyboměru pracujícího na základě elektrického odporu sestávajícího z trubice a pohyblivé tyčinky. Během vysouvání tyčinky při zatěžování a deformaci nosníku docházelo ke změně elektrického odporu a tyto hodnoty byly zaznamenávány a následně zpracovány počítačem.



Obr. 10.7 Schéma rozmístění průhyboměrů

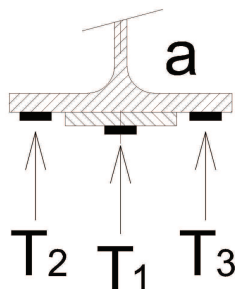
**a** – experimentálně ověřovaný nosník, **b** – pomocná destička pro měření průhybů, **c** – průhyboměr, **d** – stojan průhyboměru



Obr. 10.8 Průhyboměr v konečné poloze v závěru zatěžování

### g) Tenzometry

Poměrné přetvoření bylo měřeno třemi odporovými tenzometry nalepenými na spodní pásnici zkušebního nosníku. Tenzometry pracují na základě elektrického odporu, který se v důsledku změny průřezu měděných vodičů uvnitř tenzometru během zatěžování (protažení dolní pásnice) mění. Měření poměrného přetvoření bylo prováděno pro orientaci jen na jednom zkušebním prvku příslušné série.



Obr. 10.9 Schéma rozmístění tenzometrů na spodní pásnici nosníku

**a** – dolní pásnice experimentálně ověřovaného nosníku, **T<sub>1</sub>**, **T<sub>2</sub>**, **T<sub>3</sub>** – odporové tenzometry



Obr. 10.10 Nalepené tenzometry na spodní pásnici na začátku zatěžování

### h) Ovládací zařízení

Zatěžování hydromotorem bylo kompletně řízeno počítačem, který rovněž zaznamenával vyvozenou sílu hydromotoru (zatížení) a zpracovával výstupy z průhyboměrů a tenzometrů.



Kompletní výstupy ze zkoušek byly převedeny do tabulkového procesuru MS Excel a jsou v přehledné formě doloženy v následujícím textu.



Obr. 10.11 Ovládací zařízení ve velíně

### 10.3. Zatěžování a jeho průběh

Experimentálně ověřený nosník byl před zahájením zatěžování osazen na podpory (bloky) a byl vystředěn vůči zatěžovacímu zařízení (přímočarý hydromotor). To znamená, že svislou osou válce hydromotoru procházel průsečík podélné osy nosníku s přímkou procházející polovinou rozpětí nosníku. Tímto způsobem bylo docíleno rovnoměrného rozložení sil vyvozených hydromotorem přes roznášecí konstrukci. Nosníky byly zatěžovány na základě teoretických předpokladů dvojicí osamělých břemen stejné velikosti umístěných ve třetinách rozpětí nosníků. Následně byla osazena konstrukce bránící klopení nosníku a byly namontovány průhyboměry. V některých případech byly před osazením nosníku do zkušebního zařízení nalepeny tenzometry na spodní líc dolní pásnice nosníku.

Během prvních dvou zkoušek u nezesíleného a zesíleného nosníku IPE 180 nebylo zařízení bránící klopení nosníku instalováno a velice rychle se potvrdilo, že válcované ocelové nosníky jsou při velkých rozpětích s příspěvkem destabilizační síly na horní pásnici

od hydromotoru velmi náchylné na klopení. Z tohoto důvodu byla následně vyrobena a osazena konstrukce bránící klopení nosníku. Nejprve byla během zkoušení první série nosníků IPE 180 konstrukce namontována do třetin rozpětí, ale následně byla poloha upravena posunutím blíže ke středu rozpětí. Konečná poloha byla stanovena na 0,5 m od poloviny rozpětí na obě strany symetricky, což se ukázalo jako účinnější oproti původní poloze. Třecí plochy byly před samotným zatěžováním vyvločkovány a promazány grafitovou vazelínou.

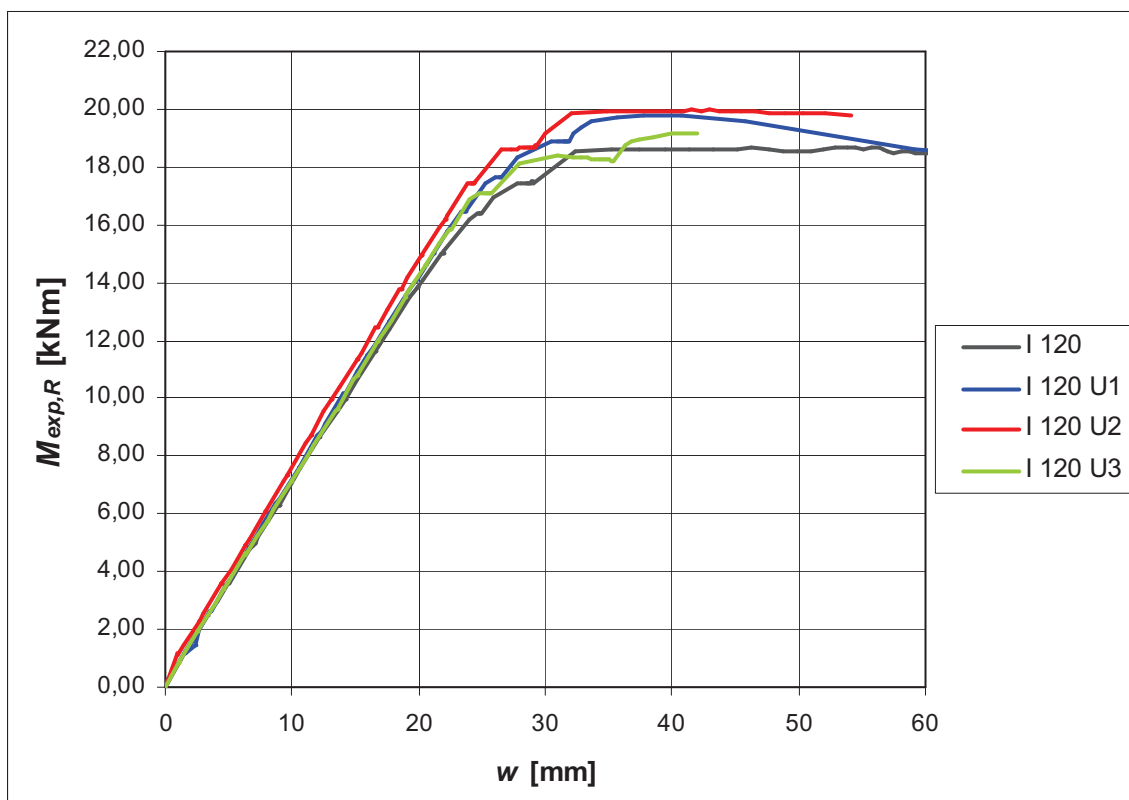
Samotné zatěžování probíhalo plynule s plynulým nárůstem zatížení a se snímáním hodnot řídicím počítačem v intervalu poloviny sekundy. Rychlost nárůstu zatížení se během zkoušky mírně měnila, ale pro orientaci lze uvažovat, že rychlost nárůstu zatížení byla přibližně 0,2 kN/s. Jeden zatěžovací cyklus proto trval přibližně 10 – 20 minut s přičtením času potřebného k najetí válce hydromotoru a vystředění. Nosníky byly zatěžovány až do jejich porušení zapříčiněného zplastizováním oceli a následným vybočením z roviny průřezu. V některých případech došlo k vyčerpání maximálního zdvihu hydromotoru a zatěžovací cyklus byl přerušen před úplným kolapsem nosníku. I to však stačilo k vyhodnocení experimentu.

#### 10.4. Výsledky experimentálního ověření

Výsledky z provedeného experimentálního ověření v laboratoři jsou níže doloženy ve formě grafů ( $M_{exp,R/w}$ ) znázorňujících závislost vyvozeného momentového zatížení a odpovídající deformace (průhybu) a tabulkami s uvedením maximálních dosažených hodnot zatížení, vyvozeného ohybového momentu, odpovídajícího průhybu a nárůstu momentové únosnosti oproti nezesílenému nosníku. V každém grafu a tabulce jsou znázorněny jednotlivé nosníky ze série. Nosníky označené písmenem „U“ jsou zesíleny uhlíkovou lamelou. Porovnání nárůstu momentové únosnosti je ukázáno rovněž na grafu na konci této kapitoly.

Experimentální ověření série IPE 120				
ozn.	$F_{MAX}$	$M_{exp,R,MAX}$	$w$	nárůst únosnosti
	[kN]	[kNm]	[mm]	[%]
IPE 120	37,35	18,67	53,83	-
IPE 120 U1	39,6	19,8	40,78	6,1
IPE 120 U2	39,95	19,97	41,53	7,0
IPE 120 U3	38,38	19,19	41,93	2,8

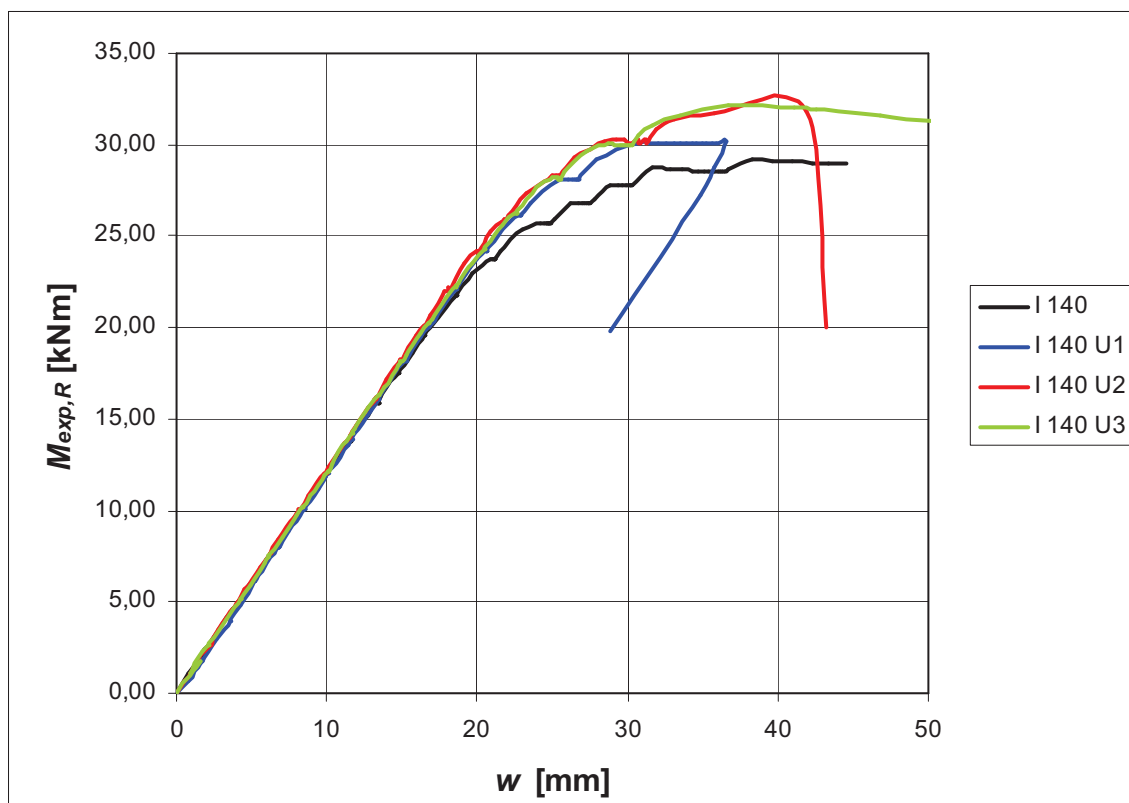
Tab. 10.2 Experimentální ověření série IPE 120



Graf. 10.1 Průběh zatěžování nosníku IPE 120 při experimentálním ověření

Experimentální ověření série IPE 140				
ozn.	$F_{MAX}$	$M_{exp,R,MAX}$	$w$	nárůst únosnosti
	[kN]	[kNm]	[mm]	[%]
IPE 140	58,3	29,15	38,27	-
IPE 140 U1	60,35	30,18	36,57	3,5
IPE 140 U2	63,67	31,84	41,91	9,2
IPE 140 U3	64,3	32,15	36,77	10,3

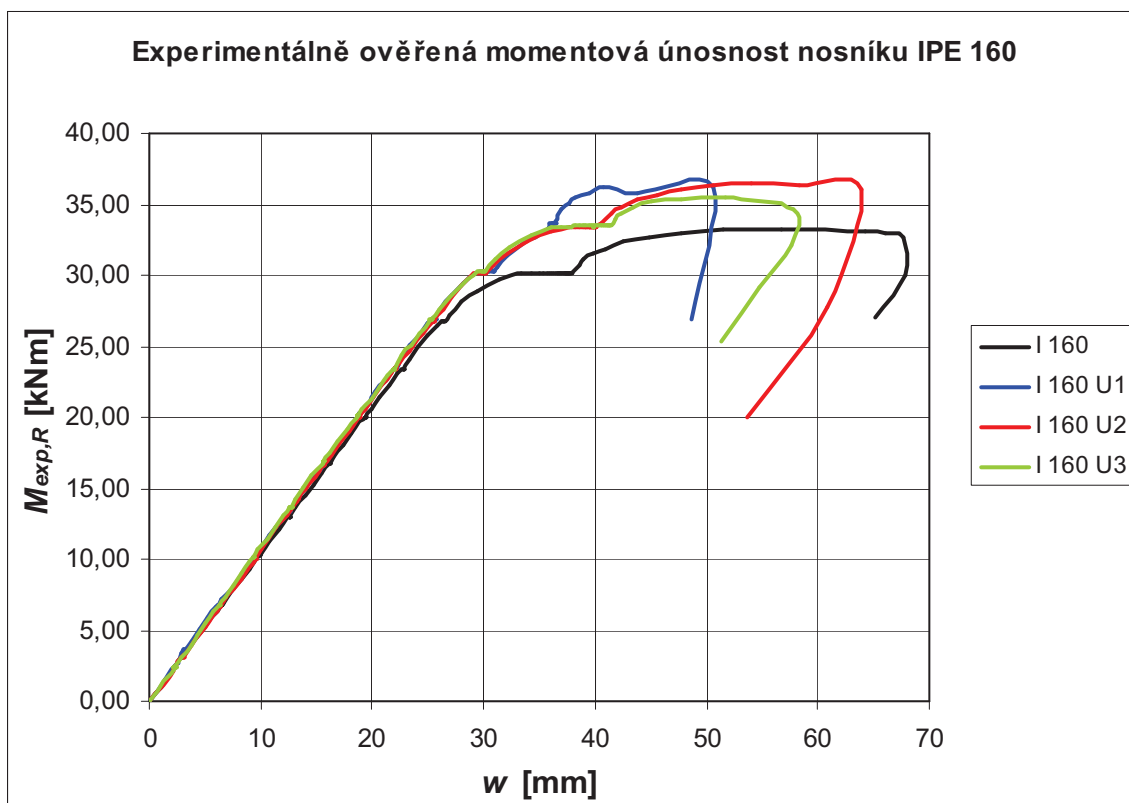
Tab. 10.3 Experimentální ověření série IPE 140



Graf. 10.2 Průběh zatěžování nosníku IPE 140 při experimentálním ověření

Experimentální ověření série IPE 160				
ozn.	$F_{MAX}$	$M_{exp,R,MAX}$	$w$	nárůst únosnosti
	[kN]	[kNm]	[mm]	[%]
IPE 160	49,85	33,23	56,74	-
IPE 160 U1	54,35	36,23	40,66	9,0
IPE 160 U2	54,75	36,5	54,11	9,8
IPE 160 U3	53,16	35,44	51,77	6,7

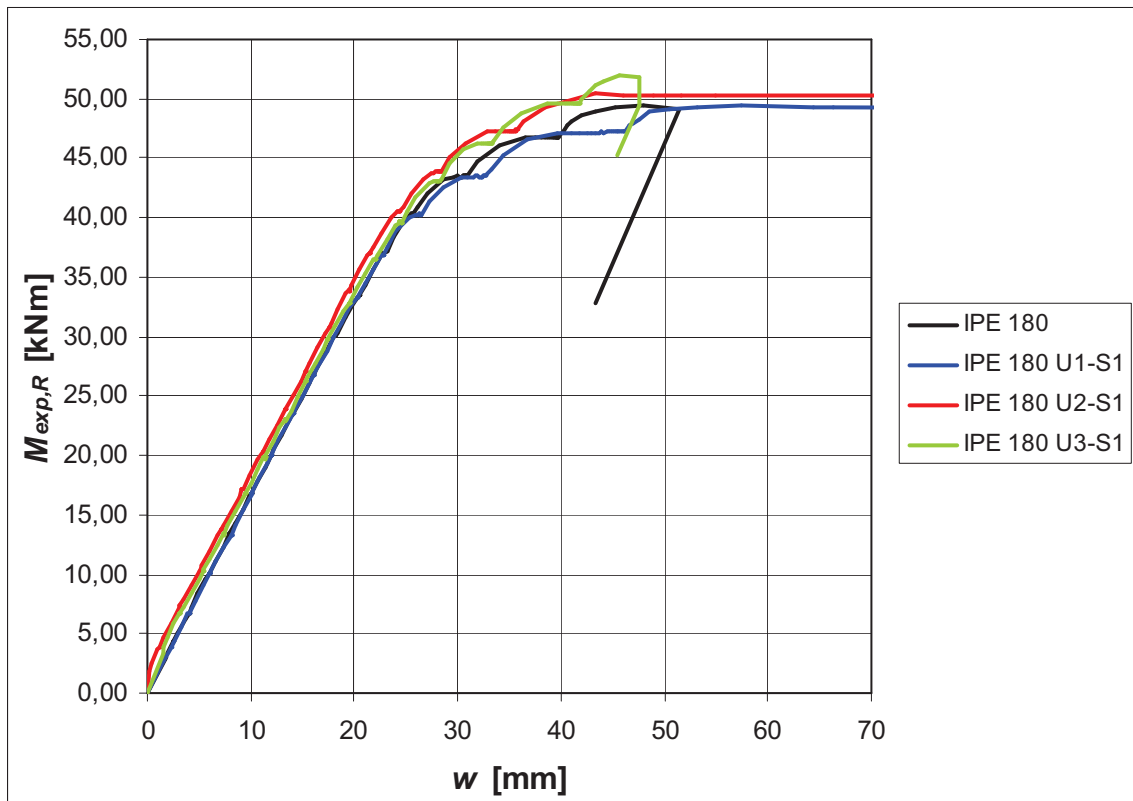
Tab. 10.4 Experimentální ověření série IPE 160



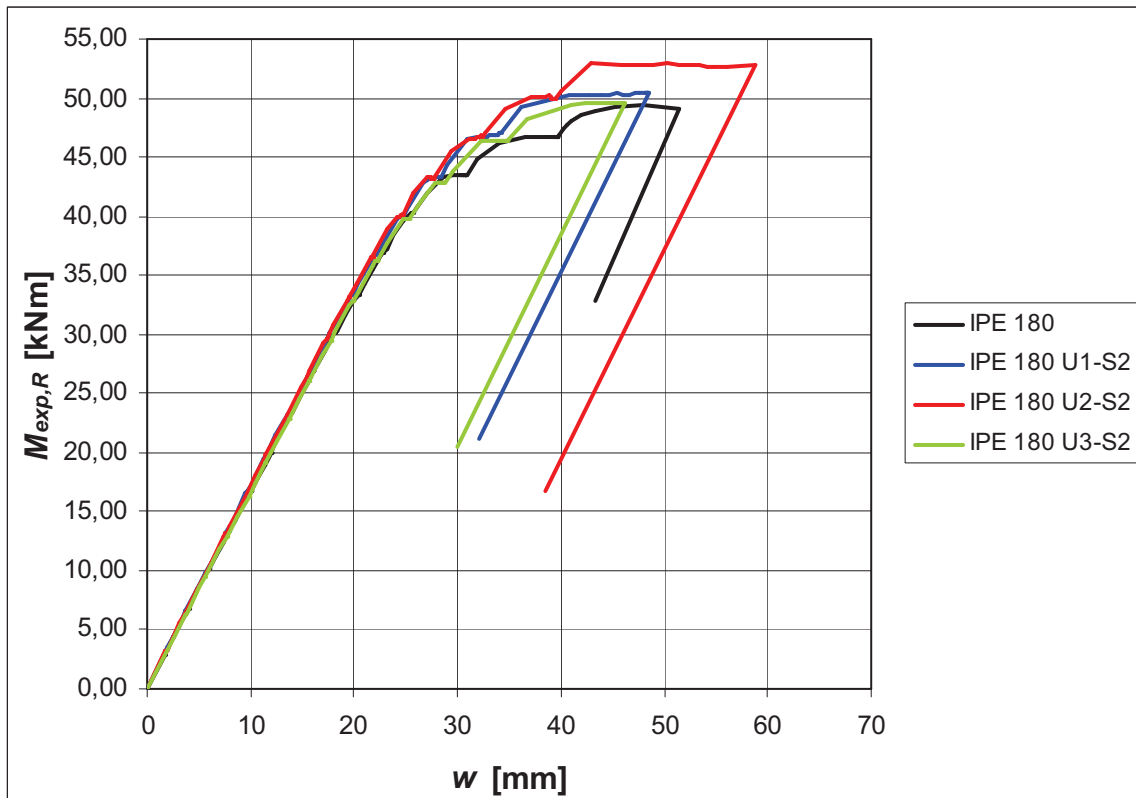
Graf. 10.3 Průběh zatěžování nosníku IPE 160 při experimentálním ověření

<b>Experimentální ověření série IPE 180</b>				
ozn.	$F_{MAX}$	$M_{exp,R,MAX}$	$w$	nárůst únosnosti
	[kN]	[kNm]	[mm]	[%]
IPE 180	74,19	49,46	47,98	-
IPE 180 U1-S1	74,08	49,39	57,5	-0,1
IPE 180 U2-S1	75,74	50,49	43,39	2,1
IPE 180 U3-S1	77,91	51,94	45,73	5,0
IPE 180 U1-S2	75,58	50,39	47,61	1,9
IPE 180 U2-S2	79,41	52,94	42,94	7,0
IPE 180 U3-S2	74,32	49,55	46,13	0,2

Tab. 10.5 Experimentální ověření série IPE 180



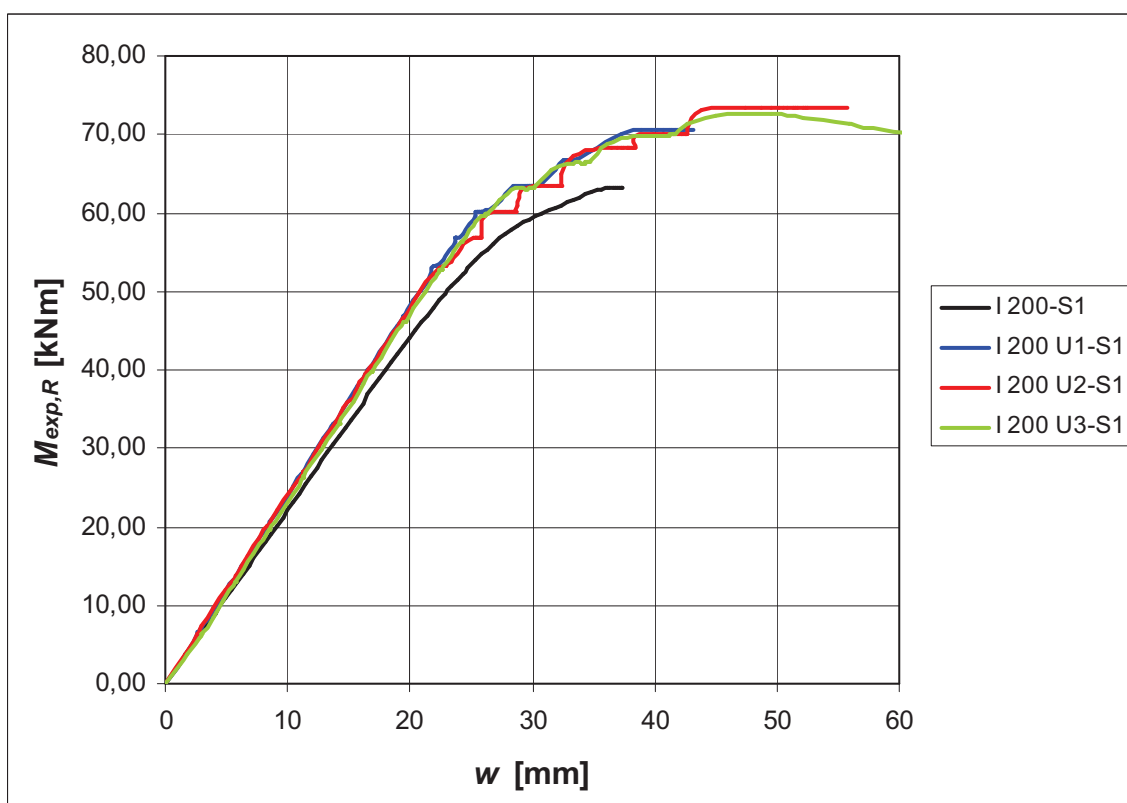
Graf. 10.4 Průběh zatěžování nosníku IPE 180 při experimentálním ověření



Graf. 10.5 Průběh zatěžování nosníku IPE 180 při experimentálním ověření

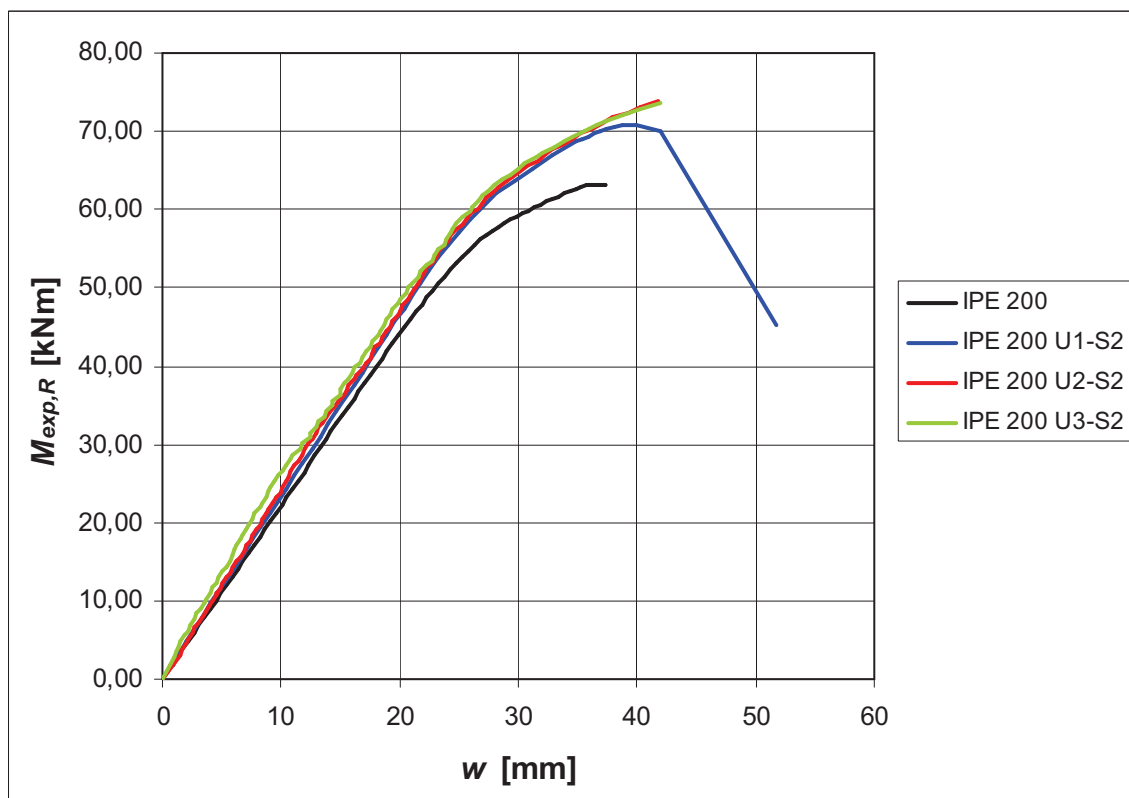
Experimentální ověření série IPE 200				
ozn.	$F_{MAX}$	$M_{exp,R,MAX}$	$w$	nárůst únosnosti
	[kN]	[kNm]	[mm]	[%]
IPE 200	94,76	63,18	36,6	-
IPE 200 U1-S1	105,99	70,66	38,95	11,8
IPE 200 U2-S1	110,16	73,44	47,36	16,2
IPE 200 U3-S1	108,83	72,55	49,52	14,8
IPE 200 U1-S2	106,22	70,81	39,91	12,1
IPE 200 U2-S2	110,64	73,76	41,73	16,7
IPE 200 U3-S2	110,2	73,49	42	16,3

Tab. 10.6 Experimentální ověření série IPE 200

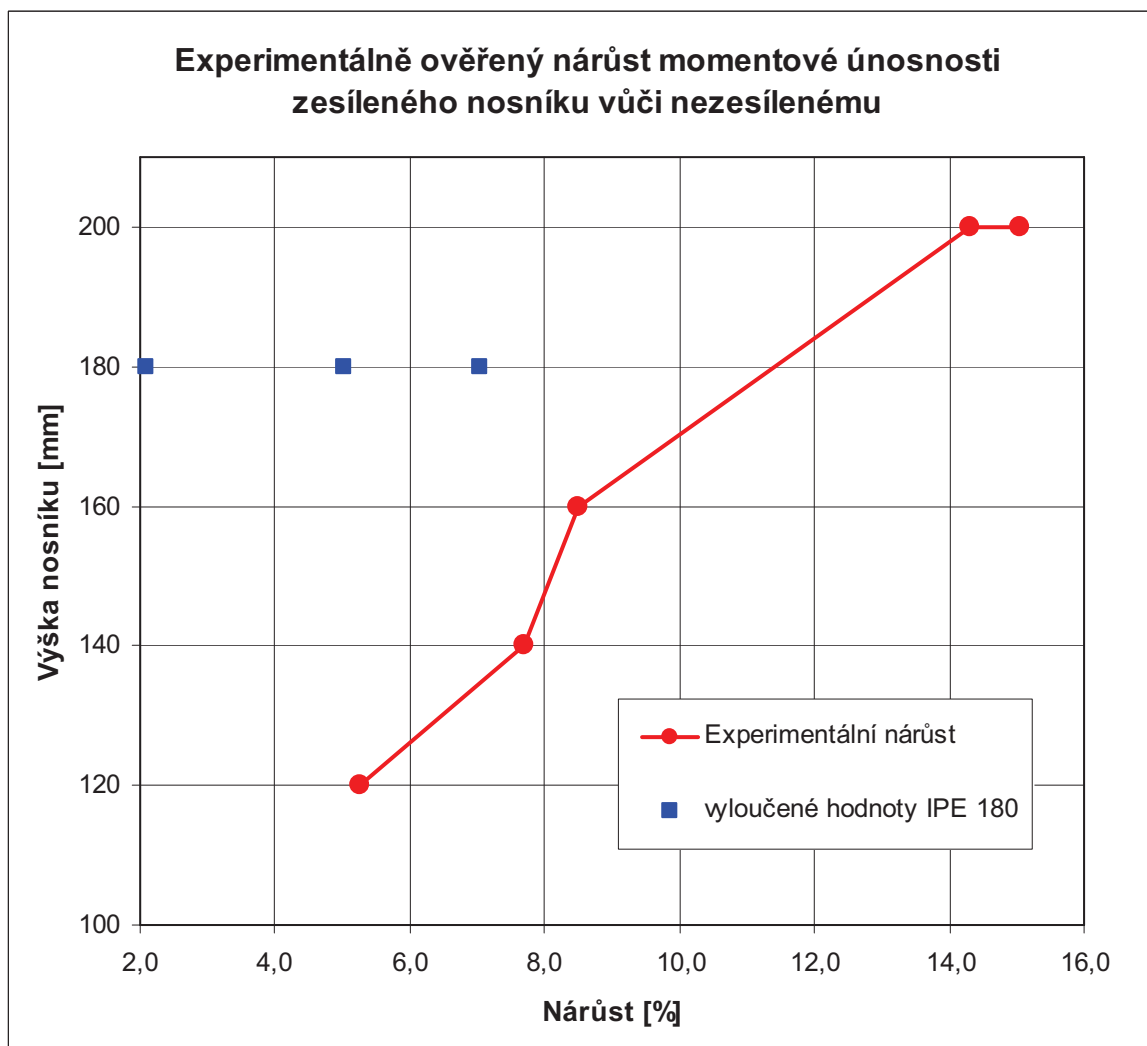


Graf. 10.6 Průběh zatěžování nosníku IPE 200 při experimentálním ověření





Graf. 10.7 Průběh zatěžování nosníku IPE 200 při experimentálním ověření



Graf. 10.8 Experimentálně ověřený nárůst momentové únosnosti zesíleného nosníku vůči nezesílenému

Z grafu je patrná křivka znázorňující nárůst experimentálně ověřené momentové únosnosti zesílených nosníků vůči nezesíleným. Série nosníků IPE 180 však byla z tohoto grafu vyloučena z důvodu zkreslení naměřených hodnot.

## 11. Vyhodnocení

### 11.1. Porovnání experimentálních a teoretických výsledků

Vhodnost použité výpočetní metody bude posouzena na základě porovnání teoretických a experimentálních hodnot v diagramu  $M_{exp,R} - M_{th,R}$ . Vztah mezi experimentálními a teoretickými hodnotami je vyjádřen souřadnicemi  $(M_{exp,R,i}; M_{th,R,i})$ . Experimentální hodnoty odpovídají skutečně naměřeným hodnotám a teoretické hodnoty

odpovídají hodnotám vypočteným z posuzovaného výpočetního modelu s dosazením experimentálně zjištěných vlastností. V tomto případě se jedná o experimentálně ověřené pevnosti oceli a moduly pružnosti. Geometrie ocelových nosníků nebyla přeměřována z důvodu malých výrobních odchylek.

Z výše uvedených důvodů je potřeba stanovit momentové únosnosti v plastickém a pružném oboru zesílených nosníků s dosazením experimentálně ověřených pevností oceli, v případě pružného výpočtu rovněž s experimentálně ověřenými moduly pružnosti, které jsou uvedeny v kapitole 10. v tabulce 10.1. Hodnoty pevností a modulů pružnosti jsou podrobně doloženy ve formě protokolů o zkoušce v příloze této práce. Podrobnosti výpočtů teoretických momentových únosností s experimentálně ověřenými pevnostmi a moduly pružnosti oceli jsou rovněž doloženy v příloze ve formě protokolů. Experimentálně ověřené momentové únosnosti jednotlivých nosníků jsou převzaty z kapitoly 10, tabulky 10.2 až 10.6 a dosazeny do diagramu.

<b>Teoretická momentová únosnost v plastickém oboru s dosazením experimentálně ověřených pevností oceli</b>					
ozn.	$E$	$R_{eH}, R_{p;0,2}$	$M_{pl,R,a}$	$M_{pl,R,kompozit}$	nárůst
	[GPa]	[MPa]	[kNm]	[kNm]	[%]
IPE 120	206,19	344,68	20,93	26,57	26,93
IPE 140	215,02	347,48	30,70	38,45	25,26
IPE 160	201,99	290,91	36,04	44,97	24,77
IPE 180	209,40	315,38	52,48	63,95	21,86
IPE 200*	193,00	338,08	74,58	88,41	18,54

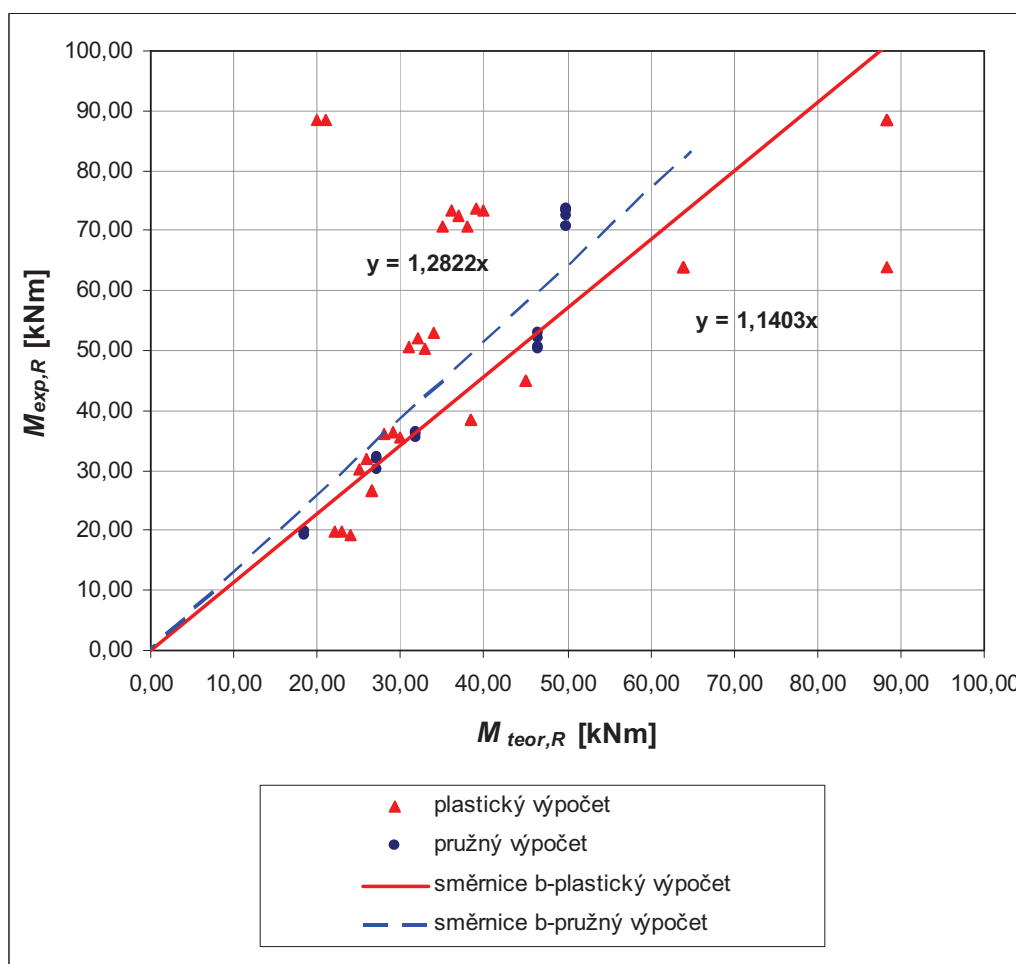
\* Uvedena průměrná hodnota  $R_{eH}, R_{p;0,2}$

Tab. 11.1 Teoretická momentová únosnost v plastickém oboru s dosazením experimentálně ověřených pevností oceli

Teoretická momentová únosnost v pružném oboru s dosazením experimentálně ověřených pevností oceli					
ozn.	$E$	$R_{eH}, R_{p;0,2}$	$M_{el,R,a}$	$M_{el,R,kompozit}$	nárůst
	[GPa]	[MPa]	[kNm]	[kNm]	[%]
IPE 120	206,19	344,68	18,27	18,56	1,60
IPE 140	215,02	347,48	26,86	27,20	1,27
IPE 160	201,99	290,91	31,71	31,95	0,76
IPE 180	209,40	315,38	46,05	46,55	1,10
IPE 200*	193,00	338,08	65,59	66,20	0,93

\* Uvedena průměrná hodnota  $R_{eH}, R_{p;0,2}$

Tab. 11.2 Teoretická momentová únosnost v pružném oboru s dosazením experimentálně ověřených pevností oceli



Graf. 11.1 Porovnání teoretických a experimentálních výsledků

Z grafu 11.1 je patrné, že nasazený pružný výpočet je přiléhavější než výpočet v plastickém oboru, kdy dochází k velkému rozptylu hodnot kolem směřnice  $b$ .

## 11.2. Vliv zesílení na ohybovou tuhost nosníku

Při posuzování vlivu zesílení na ohybovou tuhost nosníku je vycházeno z předpokladů pružného výpočtu, jelikož musí platit Hookův zákon  $\sigma = E \varepsilon$  (v pracovním diagramu se pohybujeme na pružné větvi). Níže jsou porovnány experimentálně ověřené ohybové tuhosti nosníků nezesílených a zesílených uhlíkovou lamelou a je tak stanoven skutečný procentuální nárůst ohybové tuhosti. Ohybová tuhost je definována součinem Youngova modulu pružnosti a momentu setrvačnosti průřezu tedy  $EI$ .

Pro ověření je rovněž stanovena teoretická ohybová tuhost nezesíleného nosníku a ta je srovnána s ohybovou tuhostí experimentálně ověřeného nosníku. Pro teoretický výpočet je použito experimentálně ověřených materiálových charakteristik.

### 11.2.1. Stanovení ohybové tuhosti experimentálně ověřených nosníků

Při stanovení ohybové tuhosti je vycházeno z předpokladu Hookova zákona, kdy pracujeme s pružnou větví pracovního diagramu. Pracovní diagramy z experimentálního ověření se závislostí  $M_{exp,R}/w$  obsažené v kapitole 10 jsou dále upraveny pro stanovení ohybové tuhosti následovně. U pracovních diagramů jednotlivých nosníků je odstraněna plastická větev a je ponechána pouze pružná. V každém diagramu je zobrazena jedna série nosníků. Vždy se jedná o tři nosníky zesílené a jeden bez zesílení. Veškerými body se souřadnicí ( $w ; M_{exp,R}$ ) zesílených nosníků v diagramu je vedena směrnice  $b$ , která reprezentuje všechny tři zesílené nosníky. Druhá směrnice reprezentuje jeden nezesílený nosník. Dále je možné na základě odklonu směrnic od vodorovné osy po dalších úpravách stanovit ohybovou tuhost nosníků. Při odvození výpočetního vztahu pro ohybovou tuhost je vycházeno z předpokladu, že ohybový moment je funkcí průhybu a to následovně:

$$M_{exp,R} = b \cdot w \quad (5.1)$$

$M_{exp,R}$  ..... moment únosnosti nosníku

$b$  ..... směrnice

$w$  ..... průhyb nosníku

do tohoto základního vztahu lze dosadit vztah pro výpočet momentu za předpokladu statického schématu se zatížení dvojicí sil ve třetinách rozpětí viz. výše.

$$M_{exp,R} = \frac{F \cdot L}{6} \quad (5.2)$$

a

$$w = \frac{23}{648} \cdot \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \quad (\text{vztah pro výpočet průhybu stanoven ze statických tabulek}) \quad (5.3)$$

$F$  ..... působící síla

$L$  ..... rozpětí nosníku

$E$  ..... Youngův modul pružnosti v tahu

$I$  ..... moment setrvačnosti nosníku

Pozn.:

Za sílu  $F$  ve vztahu pro průhyb  $w$  je nutno v tomto případě dosazovat sílu  $F/2$ .

Po dosazení do základního vztahu lze psát:

$$\frac{F \cdot L}{6} = b \cdot \frac{23}{1296} \cdot \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \quad (5.5)$$

z této rovnice potřebujeme vyjádřit ohybovou tuhost  $EI$ , která odpovídá experimentálně ověřené ohybové tuhosti nosníku. Po vyjádření  $EI$  a úpravě ze vztahu dostaneme:

$$EI = \frac{23}{216} \cdot b \cdot L^2 \quad (5.6)$$

Vzhledem k tomu, že v diagramu figuroval ohybový moment  $M_{exp,R}$  v jednotkách kNm a průhyb  $w$  v milimetrech, je nutné jednotky upravit a ohybovou tuhost vynásobit tisícem. Finální vztah pro výpočet experimentální ohybové tuhosti  $EI$  je po úpravách:

$$EI = \frac{2875}{27} \cdot b \cdot L^2 \quad [\text{kNm}^2] \quad (5.7)$$

### 11.2.2. Stanovení ohybové tuhosti teoreticky

#### a) stanovení ohybové tuhosti pro nezesílený nosník

Teoretická ohybová tuhost nezesíleného nosníku je stanovena jednoduše vynásobením Youngova modulu pružnosti oceli v tahu a momentu setrvačnosti nosníku. Za modul

pružnosti je dosazen experimentálně ověřený modul pružnosti oceli a moment setrvačnosti je brán tabulkový (přeměření geometrie nosníků nebylo provedeno).

Výsledná ohybová tuhost je pak dána součinem  $EI$ .

### b) stanovení ohybové tuhosti pro zesílený nosník

Teoretickou ohybovou tuhost zesíleného nosníku lze určit za pomoci ideálního průřezu s použitím pracovního součinitele viz. kapitola 9. Ideální průřez je charakterizován ideálním momentem setrvačnosti  $I_i$  a opět prostým vynásobením Youngova modulu pružnosti oceli v tahu a ideálního momentu setrvačnosti nosníku dostaneme teoretickou ohybovou tuhost. Vzhledem k tomu, že je ideální průřez převeden na ocelový nosník, tak za modul pružnosti je dosazen experimentálně ověřený modul pružnosti oceli.

Do výpočetních vztahů bylo dosazeno a v následujícím textu jsou zobrazeny jednotlivé grafy s příslušnými hodnotami směrnic  $b$  a výsledné hodnoty v tabulkách s uvedením experimentálních tuhostí, procentuálním nárůstem tuhosti a teoretické hodnoty pro ověření výpočtu. Pro rozlišení zesílených a nezesílených experimentálně ověřených a teoreticky stanovených ohybových tuhostí je voleno označení:

- $EI_{a,exp}$  ..... ohybová tuhost nezesíleného nosníku z experimentu
- $EI_{komp,exp}$  ..... ohybová tuhost zesíleného nosníku z experimentu
- $EI_{a,teor}$  ..... ohybová tuhost nezesíleného nosníku stanovená teoreticky
- $EI_{komp,teor}$  ..... ohybová tuhost zesíleného nosníku stanovená teoreticky
- $b_a$  ..... směrnice přímký pro ocelový nosník
- $b_{komp}$  ..... směrnice přímký pro zesílený nosník

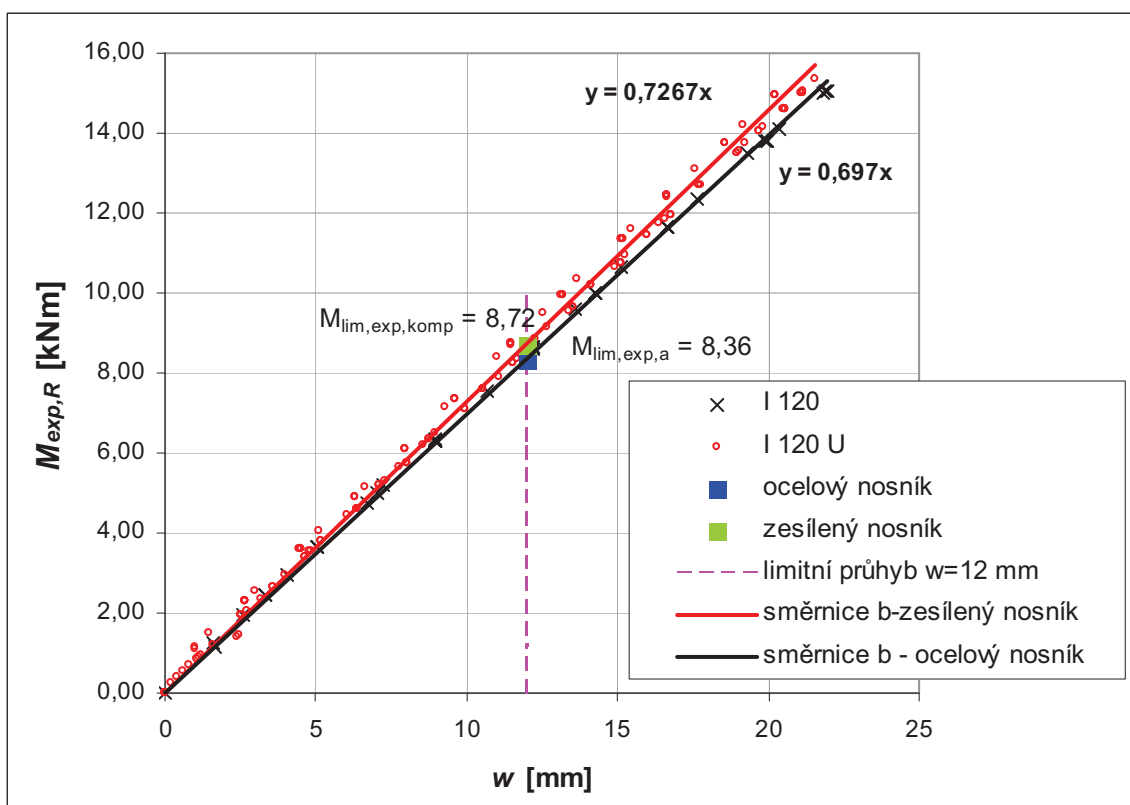
Stanovení ohybové tuhosti experimentálně ověřených nosníků					
	$b_a$	$b_{komp}$	$EI_{a,exp}$	$EI_{komp,exp}$	nárůst tuhosti
	[-]	[-]	[kNm <sup>2</sup> ]	[kNm <sup>2</sup> ]	[%]
IPE 120	0,697	0,727	667,96	696,71	4,30
IPE 140	1,192	1,208	1142,33	1157,67	1,34
IPE 160	1,036	1,071	1765,04	1824,67	3,38
IPE 180-S1	1,658	1,746	2824,74	2974,67	5,31
IPE 180-S2	1,658	1,706	2824,74	2906,52	2,90
IPE 200-S1	2,220	2,382	3782,22	4058,22	7,30
IPE 200-S2	2,220	2,422	3782,22	4126,37	9,10

Tab. 11.3 Stanovení ohybové tuhosti experimentálně ověřených nosníků

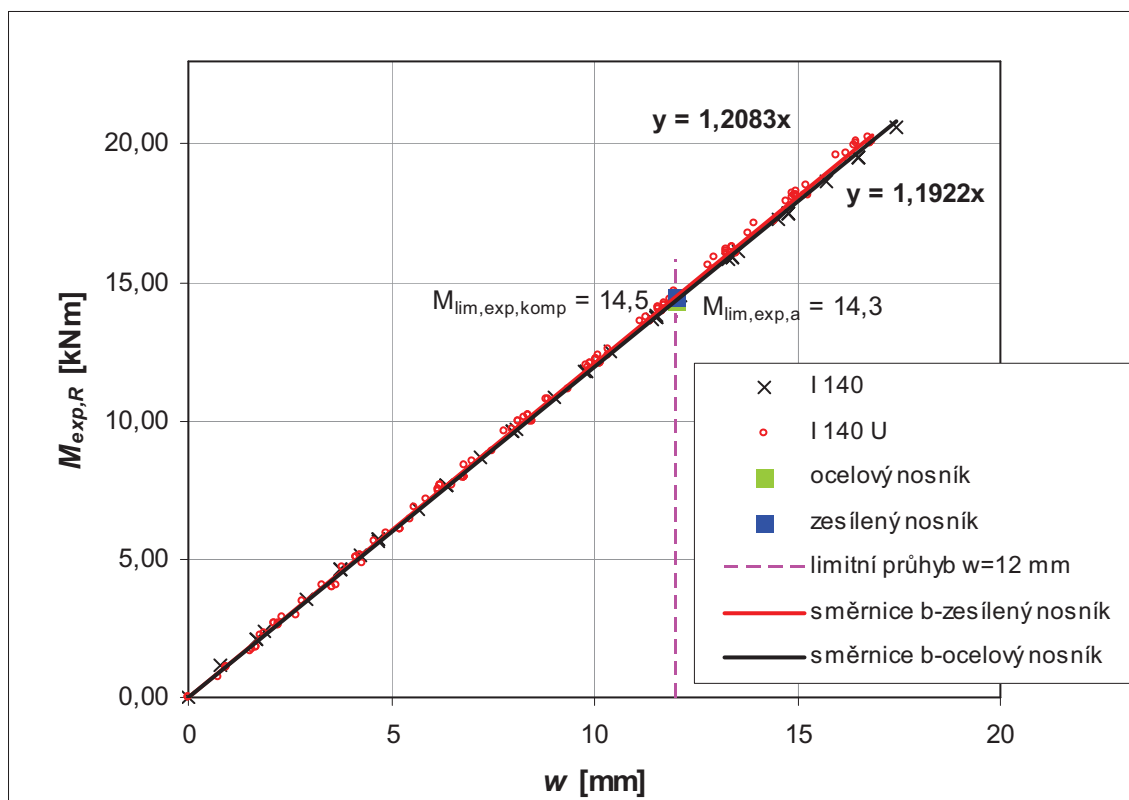


Stanovení ohybové tuhosti teoreticky					
	$E$	$EI_{a,teor}$	$I_i$	$EI_{komp,teor}$	nárůst tuhosti
	[GPa]	[kNm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[kNm <sup>2</sup> ]	[%]
IPE 120	206,19	655,27	3,338E+06	688,30	5,04
IPE 140	215,02	1163,69	5,622E+06	1208,86	3,88
IPE 160	201,99	1755,9	8,985E+06	1814,96	3,36
IPE 180	209,40	2757,8	1,353E+07	2832,76	2,72
IPE 200	193,00	3750	1,991E+07	3842,63	2,47

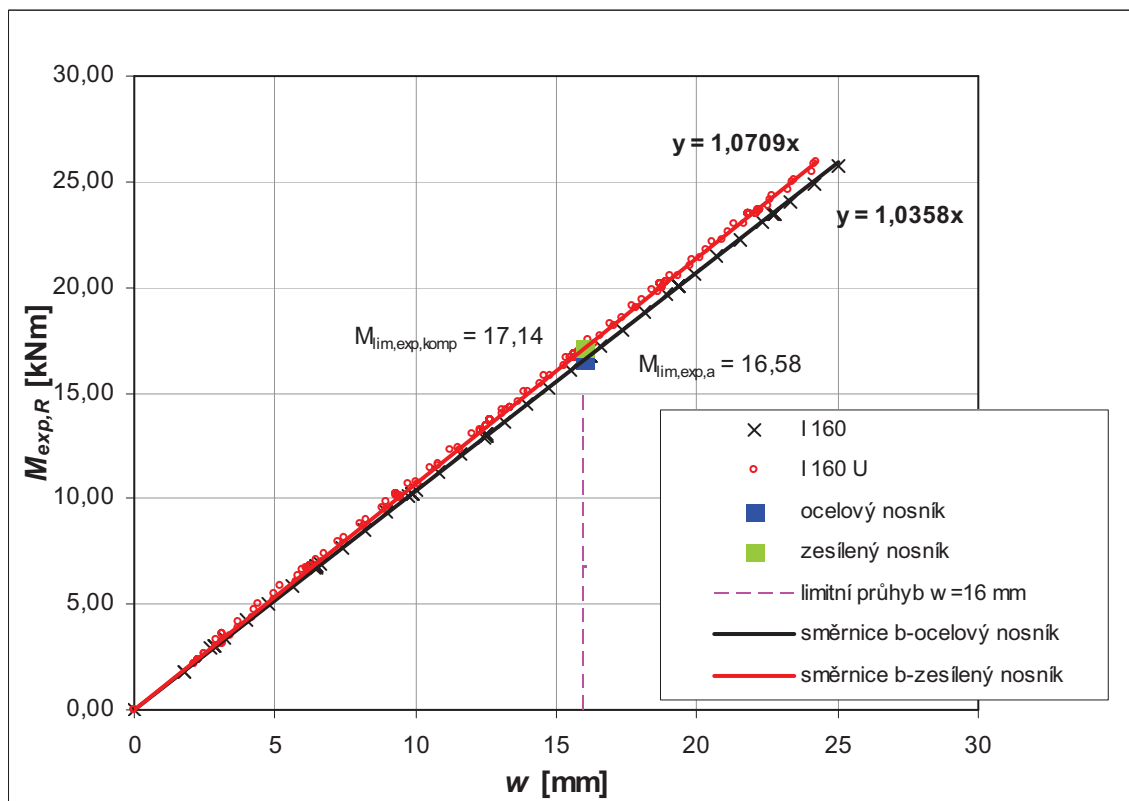
Tab. 11.4 Stanovení ohybové tuhosti teoreticky



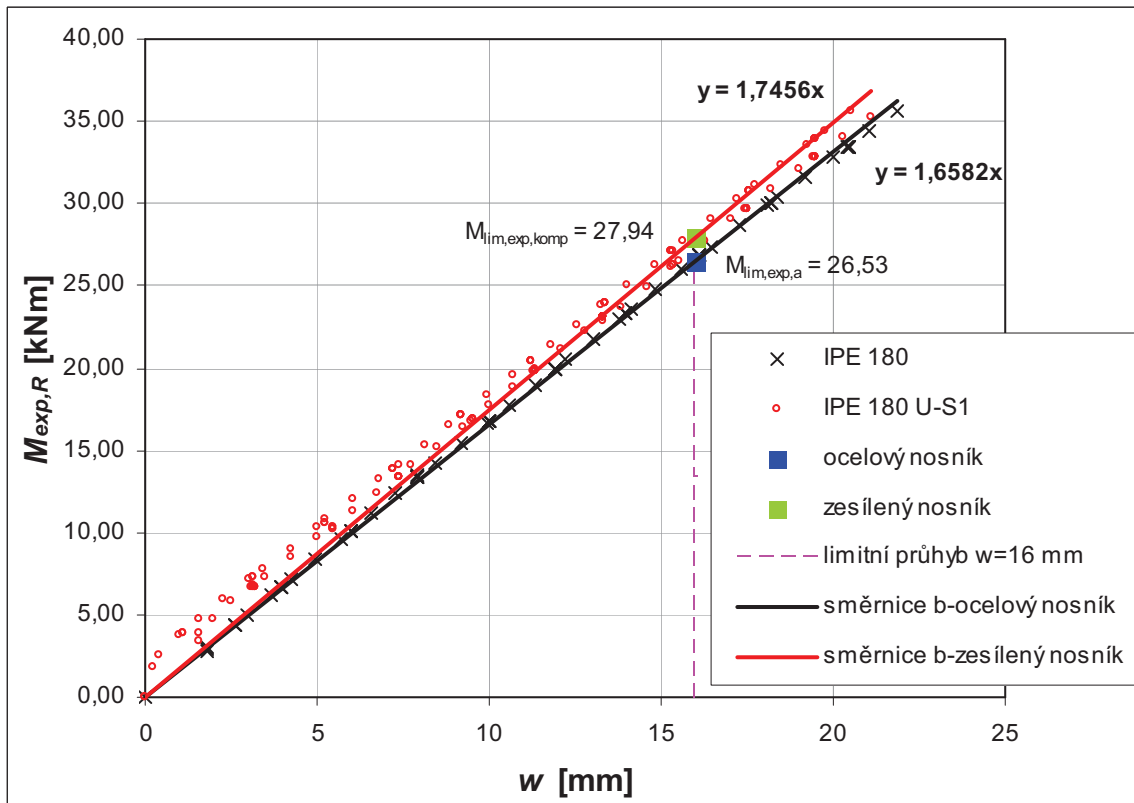
Graf. 11.2 Plastické větve nosníku IPE 120 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



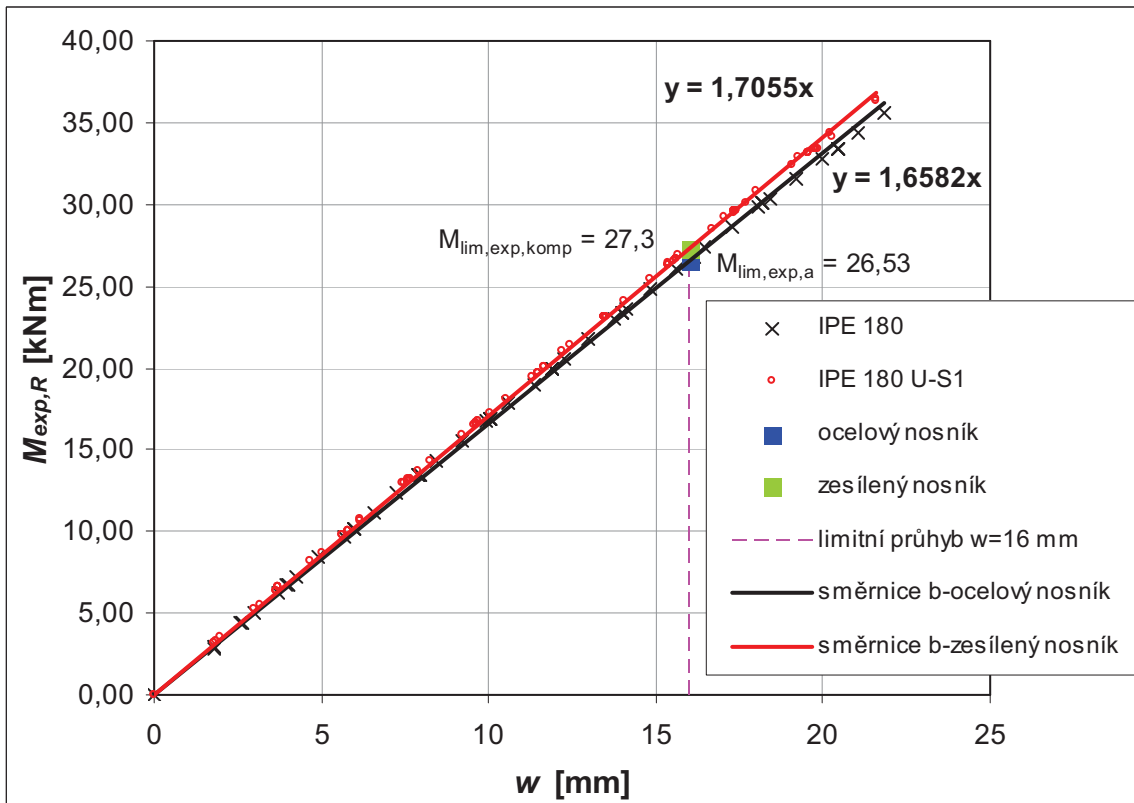
Graf. 11.3 Plastické větve nosníku IPE 140 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



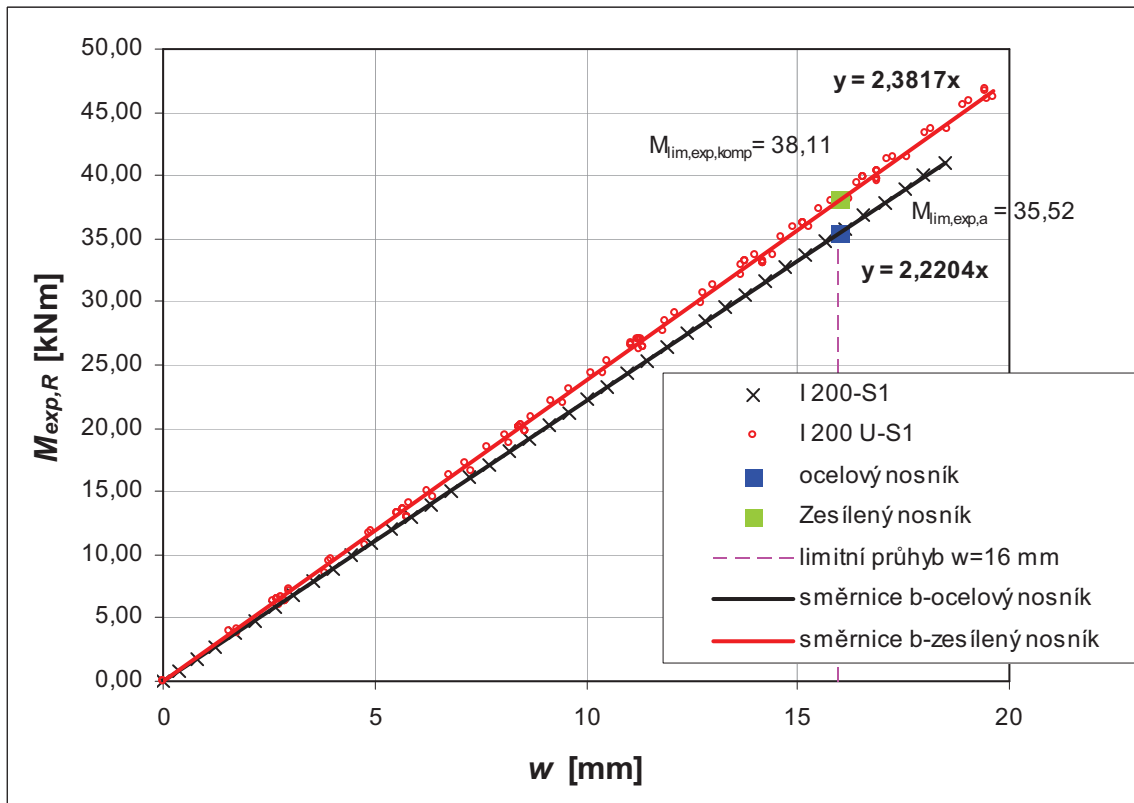
Graf. 11.4 Plastické větve nosníku IPE 160 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



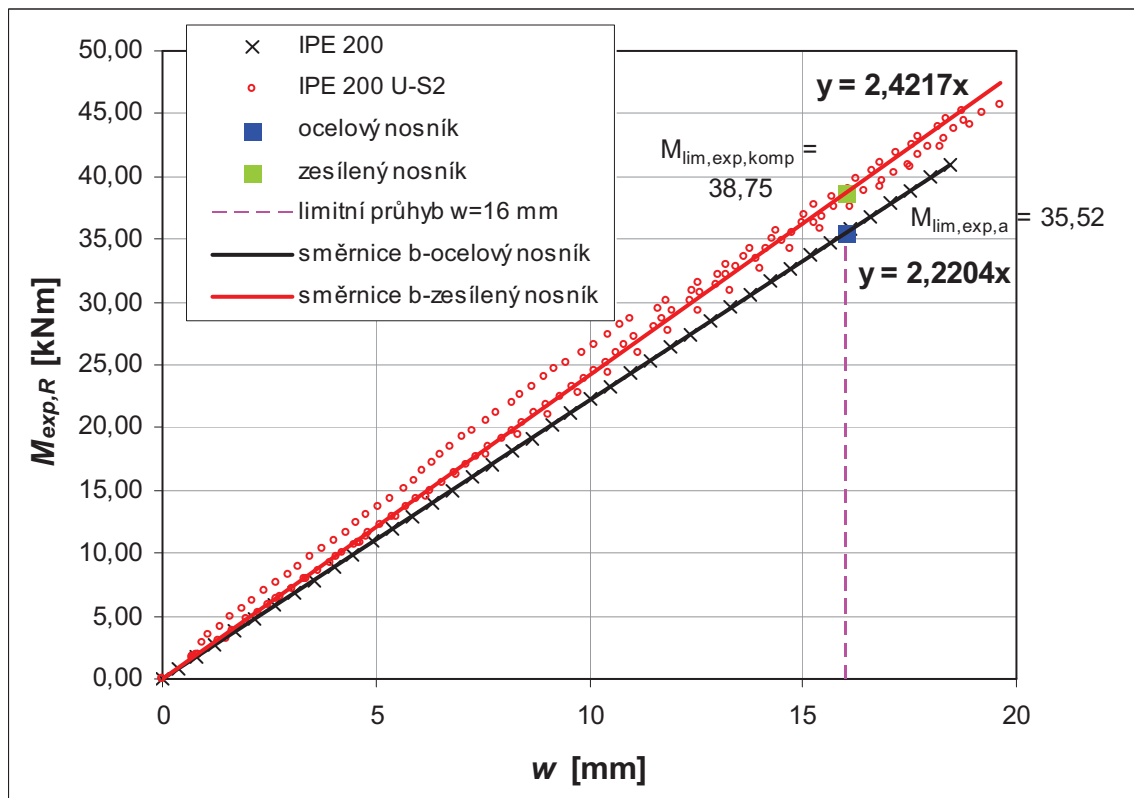
Graf. 11.5 Plastické větve nosníku IPE 180 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



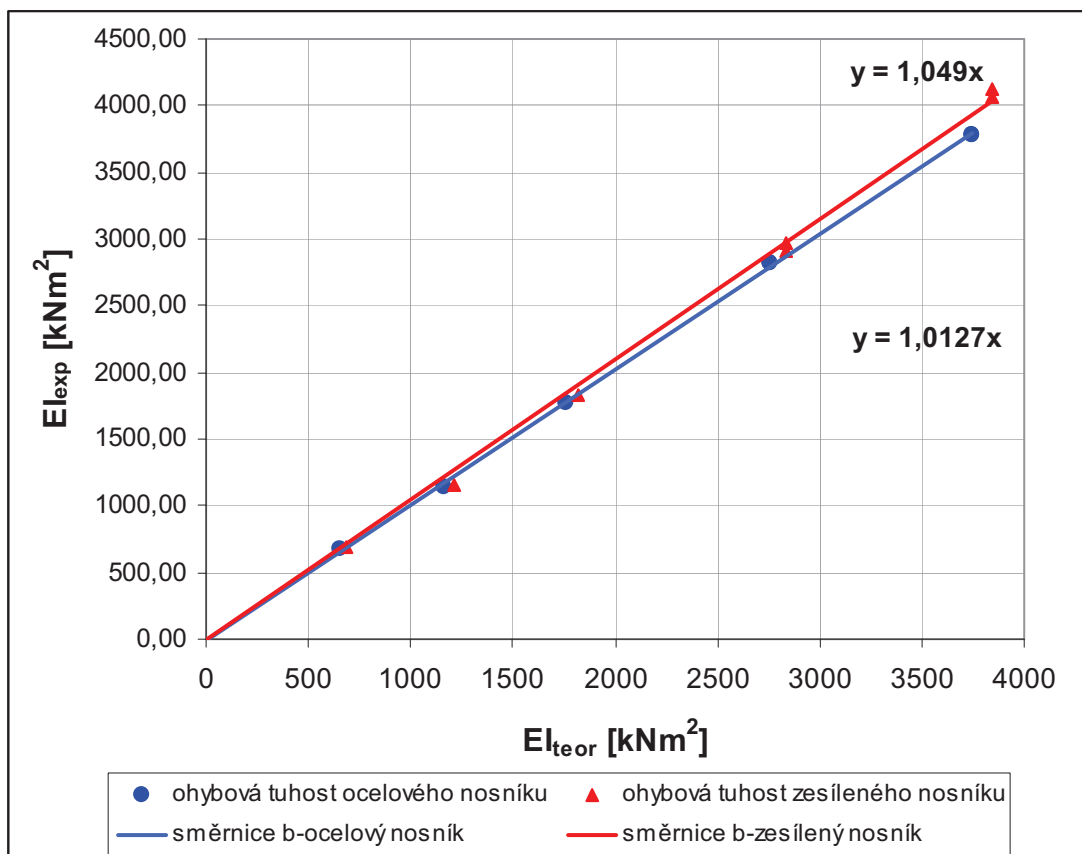
Graf. 11.6 Plastické větve nosníku IPE 180 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



Graf. 11.7 Plastické větve nosníku IPE 200 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



Graf. 11.8 Plastické větve nosníku IPE 200 z experimentálního ověření s vyznačením mezního průhybu a jemu odpovídajících limitních ohybových momentů



Graf. 11.9 Porovnání teoretické a experimentální ohybové tuhosti

### 11.3. Posouzení z hlediska deformační podmínky

Vzhledem k tomu, že v praxi se při navrhování nosníků, zejména ocelových, vychází z předpokladu limitní hodnoty svislé deformace nosníku (průhybu), je nutné prověřit také zvýšení únosnosti zesíleného nosníku vůči nezesílenému nosníku i s ohledem na svislé deformace. Posouzení je provedeno na experimentálně ověřených nosnicích a pro stanovení limitní hodnoty svislé deformace (průhybu) je vycházeno z normy ČSN EN 1993-1-1, která uvádí, že svislá deformace se stanoví pro každý projekt individuálně po dohodě s objednatelem. Tato norma odkazuje na ČSN EN 1990, ve které je v informativní národní příloze tabulka s uvedením největších doporučených hodnot. Pro běžné účely použití nosníků v pozemním stavitelství bude dále uvažováno, že limitní průhyb je:

$$w_{\text{lim}} = \frac{1}{250} \cdot L \quad (6.1)$$

- pro nosníky IPE 120 a 140 s rozpětím  $L = 3,0$  m je limitní průhyb  $w_{lim} = 12$  mm
- pro nosníky IPE 160, 180 a 200 s rozpětím  $L = 4,0$  m je limitní průhyb  $w_{lim} = 16$  mm

Na základě limitního průhybu lze stanovit ohybový moment odpovídající tomuto průhybu a ten porovnat s teoretickým ohybovým momentem odpovídajícím limitnímu průhybu. Hodnoty jsou názorně zobrazeny v grafech 11.2 - 11.8 a číselné výsledky včetně odpovídajících napětí a poměrných přetvoření v oceli a v lamele jsou v tabulkách 11.5 a 11.6.

### 11.3.1. Stanovení limitního teoretického ohybového momentu

Pro stanovení teoretického ohybového momentu odpovídajícího limitnímu průhybu, je vycházeno tentokrát ze vztahu pro výpočet maximálního průhybu od spojitě rovnoměrného zatížení, které je v praxi obvyklé. Vzhledem k tomu, že momentové obrazce od spojitě rovnoměrného zatížení a zatížení dvojicí osamělých břemen ve třetinách rozpětí jsou velice podobné, lze tento krok učinit:

$$w = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I} \quad (7.1)$$

Ze vztahu je třeba vyjádřit spojitě rovnoměrné zatížení  $q$  a po úpravě lze zapsat:

$$q_{lim} = \frac{384}{5} \cdot \frac{w_{lim} \cdot E \cdot I}{L^4} \quad (7.2)$$

Po dosazení lze spojitě rovnoměrné zatížení  $q$  dosadit do vztahu pro výpočet ohybového momentu. Výsledkem je teoretický ohybový moment odpovídající limitní hodnotě průhybu  $w_{lim}$ . Pro stanovení teoretického ohybového momentu pro nezesílený nosník je dále dosazen experimentálně ověřený modul pružnosti a pro zesílený nosník je dosazen rovněž experimentálně ověřený modul pružnosti a ideální moment setrvačnosti.

$$M_{lim,teor} = \frac{1}{8} \cdot q_{lim} \cdot L^2 \quad (7.3)$$

### 11.3.2. Určení limitního experimentálního ohybového momentu

Určení experimentálně ověřeného ohybového momentu odpovídajícího limitnímu průhybu  $w_{lim}$  lze určit z geometrické podmínky za pomoci směrnice  $b$  pružné větve v grafech 11.2 - 11.8 s využitím závislosti:

$$M_{lim,exp} = b \cdot w_{lim} \quad (8.1)$$

Pro odlišení výstupních hodnot je dále uvažováno následující značení:

- $M_{lim,exp,a}$  ..... skutečný ohybový moment při limitním průhybu pro ocelový nosník  
 $M_{lim,exp,komp}$  ..... skutečný ohybový moment při limitním průhybu pro zesílený nosník  
 $M_{lim,teor,a}$  ..... teoretický ohybový moment při limitním průhybu pro ocelový nosník  
 $M_{lim,teor,komp}$  ..... teoretický ohybový moment při limitním průhybu pro zesílený nosník  
 $\sigma_{s,komp}$  ..... napětí na dolní pásnici v oceli  
 $\sigma_{c,komp}$  ..... napětí na dolní pásnici v uhlíkové lameli  
 $\epsilon_{c,komp}$  ..... poměrné přetvoření uhlíkové lamely  
 $\epsilon_{s,komp}$  ..... poměrné přetvoření oceli  
 $b_a$  ..... směrnice přímky pro ocelový nosník  
 $b_{komp}$  ..... směrnice přímky pro zesílený nosník

Experimentální ohybové momenty pro limitní průhyb $w_{lim}$							
ozn.	$M_{lim,exp,a}$	$M_{lim,exp,komp}$	nárůst	$\sigma_{s,komp}$	$\sigma_{c,komp}$	$\epsilon_{s,komp}$	$\epsilon_{c,komp}$
	[kNm]	[kNm]	[%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]
IPE 120	8,36	8,72	4,30	-*	106,8	-*	0,0007
IPE 140	14,30	14,50	1,34	173,6	120,1	0,0008	0,0008
IPE 160	16,58	17,14	3,38	138,7	104,1	0,0007	0,0007
IPE 180-S1	26,53	27,94	5,31	169,4	115,3	0,0007	0,0008
IPE 180-S2	26,53	27,30	2,90	170,0	126,6	0,0008	0,0008
IPE 200-S1	35,52	38,11	7,30	178,2	146,0	0,0009	0,0009
IPE 200-S2	35,52	38,75	9,10	172,9	140,4	0,0009	0,0009

Pozn.:  
 $\sigma_{s,komp}$  je stanovena z průměrných hodnot poměrného přetvoření z tenzometrů T2 a T3  
 \* vzhledem k šířce pásnice byl osazen pouze tenzometr na uhlíkové lameli

Tab. 11.5 Experimentální ohybové momenty pro limitní průhyb  $w_{lim}$



Teoretické ohybové momenty pro limitní průhyb $w_{lim}$					
ozn.	$q_{lim,a}$	$M_{lim,teor,a}$	$q_{lim,komp}$	$M_{lim,teor,komp}$	nárůst
	[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[%]
IPE 120	7,46	8,39	7,83	8,81	1,05
IPE 140	13,24	14,90	13,75	15,47	1,04
IPE 160	8,43	16,86	8,71	17,42	1,03
IPE 180	13,24	26,47	13,60	27,19	1,03
IPE 200	18,00	36,00	18,44	36,89	1,02

Tab. 11.6 Teoretické ohybové momenty pro limitní průhyb  $w_{lim}$

## 12. Závěry

### 12.1. Zhodnocení základních předpokladů

Základním předpokladem pro výpočet momentové únosnosti ocelových IPE nosníků zesílených externí lepenou výztuží z uhlíkových vláken s polymerní matricí z epoxidové pryskyřice bylo použití upravených výpočetních vztahů, ze kterých je vycházeno při posuzování ocelobetonových spřažených konstrukcí dle ČSN EN 1994-1-1. Výpočet byl proveden v pružném i plastickém oboru. Základním předpokladem pro výpočet zesílených nosníků (kompozitů) je v tomto případě úplné (tuhé) smykové spojení mezi zesilující lamelou a ocelovým nosníkem. Tento předpoklad byl splněn a průřez lze považovat za tuhý. Z tab. 11.5 vyplývá, že poměrná přetvoření mezi lamelou a ocelí, tedy v místě lepeného spoje, jsou totožná a tím je dokázáno, že v pružné oblasti je předpoklad splněn. Druhým předpokladem pro provedení použitých výpočtů bylo vyloučení klopení nosníků během zatěžování. Klopení nosníků bylo během experimentálního ověření bráněno instalovanou konstrukcí.

### 12.2. Zvýšení momentové únosnosti

Pro stanovení momentu únosnosti zesíleného (kompozitního) nosníku bylo použito dvou postupů. Oba postupy byly založeny na výpočetních vztazích pro ocelobetonové spřažené konstrukce s uvažováním pružného a plastického působení. Teoretické nárůsty momentové únosnosti zesílených nosníků vůči nezesíleným jsou při výpočtu v plastickém oboru přibližně 20 % a při výpočtu v pružném oboru přibližně 1 %. Experimentálně ověřený nárůst momentové únosnosti zesílených nosníků vůči nezesíleným je pak pro nosníky:

- IPE 120 U průměrně 5,3 %
- IPE 140 U průměrně 7,7 %
- IPE 160 U průměrně 8,5 %
- IPE 180 U – S1 průměrně 3,5 %
- IPE 180 U – S2 průměrně 4,5 %
- IPE 200 U – S1 průměrně 14,3 %
- IPE 200 U – S2 průměrně 15,0 %

Z hlediska vhodnosti výpočetního postupu, se dle grafu 11.1 jeví výstižnější pružný výpočet s využitím ideálního průřezu, kdy je uhlíková lamela převedena na ocelový nosník pomocí pracovního součinitele.

Lze také vidět, že je teoretický nárůst momentové únosnosti v plastickém oboru v závislosti na výšce nosníku opačného charakteru, než je tomu u experimentálně ověřených nosníků. Experimentálně ověřené nosníky mají řádově menší momentovou únosnost než vychází z teoretického výpočtu v plastickém oboru. Toto může být následkem přiblížení neutrální osy průřezu blízko k samotné lamelle do spodní pásnice nosníku. Převážná část nosníku je pak tlačena, tažená oblast má výšku jen několika milimetrů a nosník se tak může chovat částečně jako při vzpěru. Únosnost pak může být ovlivněna například zkroucením nosníku.

### 12.3. Ohybová tuhost

Zesílení ocelového nosníku uhlíkovou lamelou má vliv na celkovou tuhost kompozitního nosníku v řádech jednotek procent. Konkrétní nárůsty ohybové tuhosti jsou patrné z tabulky 11.3. Z grafu 11.9 vyplývá, že teoretické stanovení ohybové tuhosti na základě pružného výpočtu téměř odpovídá experimentálně ověřené ohybové tuhosti.

### 12.4. Mezní stav použitelnosti – deformační podmínky

Z hlediska použitelnosti zesilování ocelových nosníků v praxi je nutné přihlídnout k limitujícím deformačním podmínkám. Vzhledem k tomu, že při porušení nosníku překročením meze kluzu oceli a následným zplastizováním, svislá deformace nosníku (průhyb) nabývá značných hodnot, bylo třeba ověřit, zda zesílení ocelového nosníku uhlíkovou lamelou přinese při limitním průhybu nějaký nárůst momentové únosnosti.

Experimentem se ukázalo, že z hlediska deformačních podmínek, je zvýšení momentové únosnosti při limitním průhybu následující:

- IPE 120 U průměrně 4,3 %
- IPE 140 U průměrně 1,3 %
- IPE 160 U průměrně 3,4 %
- IPE 180 U – S1 průměrně 5,3 %
- IPE 180 U – S2 průměrně 2,9 %
- IPE 200 U – S1 průměrně 7,3 %
- IPE 200 U – S2 průměrně 9,1 %

Z výše uvedeného plyne, že kompozitní nosník se nechová ani plasticky ani pružně. Chování by se dalo nejlépe přirovnat k pružno-plastickému působení s tím, že nejlépe chování vystihuje opravdu pružný výpočet.

## 12.5. Doporučení pro další posouzení

Pro další pokračování ve výzkumu v této oblasti použití externí výztuže z uhlíkových lamel při zesilování doporučuji pro zesílení použít širší sortiment uhlíkových lamel. Nabízí se například použití uhlíkových lamel od výrobce Sika CZ s.r.o., který nabízí pro ocelové konstrukce výhodnější uhlíkové lamely s vysokým modulem pružnosti (210 nebo 300 GPa). Tyto lamely sice dosahují nižších pevností v tahu, ale experimentem se ukázalo, že vysoká pevnost v tahu (až 3000 MPa) není rozhodující. Při použití uhlíkových lamel s vysokým modulem pružnosti lze očekávat větší vliv na přírůstek ohybové tuhosti, což se jeví jako rozhodujícím aspektem. Dalším doporučením je lepší zajištění nosníku proti klopení. Ideálně by měla konstrukce bránící klopení nosníku zajistit vedení nosníku při zatěžování v celé jeho délce s vyloučením vůlí mezi konstrukcí bránící klopení a nosníkem samotným. Vzhledem ke zjištění, že přiléhavější je výpočet v pružném oboru, bude třeba lépe zmapovat chování nosníku z hlediska poměrných přetvoření a normálových napětí na obou pásnicích. V tomto experimentu byly tenzometry umístěny pouze na dolní pásnici.

Z experimentu je patrné, že mnohem větší uplatnění bude mít zesilování v kombinaci s uhlíkovými lamelami s velkým modulem pružnosti při sanacích historických konstrukcí z dřívějších, ocelí jako jsou například konstrukce z plávkové oceli.

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] J.M.C. Cadei, T.J. Stratford, L.C. Hollaway and W.G. Duckett, *Strengthening metaloid structures using externally-bonded fibrereinforced-polymers*, CIRIA: London, 2004.
- [2] ŠMIRÁK Svatopluk, HLAVINKOVÁ Bohuslava.: *Pružnost a plasticita I, příklady*, Brno, 2000, CERM. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 217 s. ISBN 80-214-1623-8.
- [3] HRAZDÍRA M.: *Materiály na bázi uhlíku a jejich využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lenka Klakurková, Ph.D.
- [4] ČSN ISO 6892-1-*Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, PRAHA, 2010, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 64 s.
- [5] ČSN EN 10025-2- *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*, PRAHA, 2005, Český normalizační institut, 36 s.
- [6] ČSN EN 1990 *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*, PRAHA, 2004, Český normalizační institut, 76 s.
- [7] ČSN EN 1993-1-1 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí-Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, PRAHA, 2006, Český normalizační institut, 96 s.
- [8] ČSN EN 1994-1-1 *Eurokód 4: Navrhování spřežených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, PRAHA, 2006, Český normalizační institut, 102 s.
- [9] KOŘÍNEK Zdeněk.: *Kompozity*, web: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [10] PREFA KOMPOZITY a.s.: *Kompozitní výztuže, beta tecnických listů*, BRNO, 2012
- [11] SIKA CZ s.r.o.: *Technický list, systém Sika CarboDur Lamely*, BRNO, 2010, identifikační číslo: 02 04 01 01



## Seznam příloh

**Příloha č. 1** - Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v plastickém oboru s použitím charakteristických pevností oceli

**Příloha č. 2** - Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v plastickém oboru s použitím experimentálně ověřených pevností oceli

**Příloha č. 3** - Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v pružném oboru s použitím charakteristických pevností oceli a modulu pružnosti

**Příloha č. 4** - Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v pružném oboru s použitím experimentálně ověřených pevností oceli a modulů pružnosti

**Příloha č. 5** - Protokoly o zkouškách oceli

**Příloha č. 6** - Fotodokumentace experimentálního ověření



## PŘÍLOHA Č. 1

**Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v plastickém  
oboru s použitím charakteristických pevností oceli**

**VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 120**  
(plně zplastizovaný průřez)

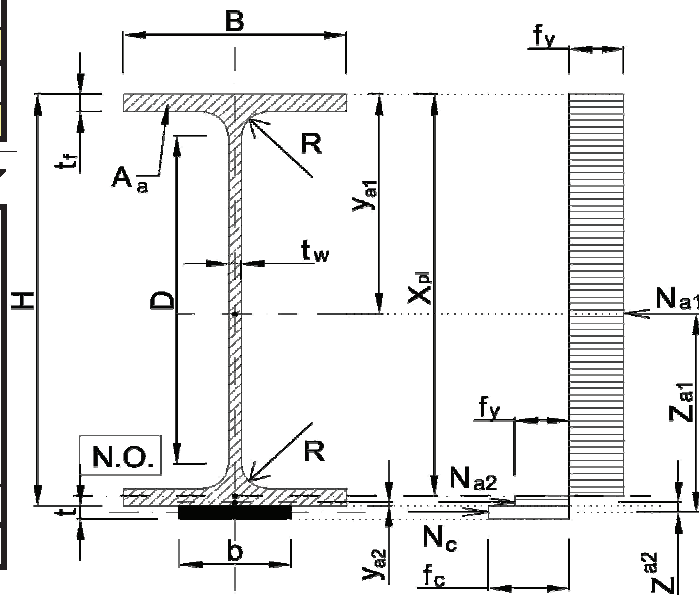
**MATERIÁL:**

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

**GEOMETRIE (IPE):**

IPE 120

$H$	120,0	[mm]
$B$	64,0	
$R$	7,0	
$D$	93,4	
$t_f$	6,3	
$t_w$	4,4	
$t$	1,2	
$b$	50,0	
$A_a$	1321,0	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{pl,y}$	6,07E+04	[mm <sup>3</sup> ]



**POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:**

(předpokládaná poloha N.O. v dolní pásnici nosníku)

$$X_{pl} = 115,66 \text{ [mm]}$$

**Poloha neutrální osy leží v pásnici nosníku (předpoklad SPLNĚN)**

**TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:**

$y_{t,a,1}$	44,62	[mm]
$y_{t,a,2}$	2,17	[mm]

**RAMENA VNITŘNÍCH SIL:**

**VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:**

$Z_{a,1}$	75,98	[mm]	$N_{a,1}$	245,21	[kN]
$Z_{a,2}$	2,77	[mm]	$N_{a,2}$	65,22	[kN]

**PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:**

$$M_{pl,R,kompozit} = 18,45 \text{ [kNm]}$$

**PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:**

$$M_{pl,R,a} = 14,27 \text{ [kNm]}$$

**NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 29,3 [%]**

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 140 (plně zplastizovaný průřez)

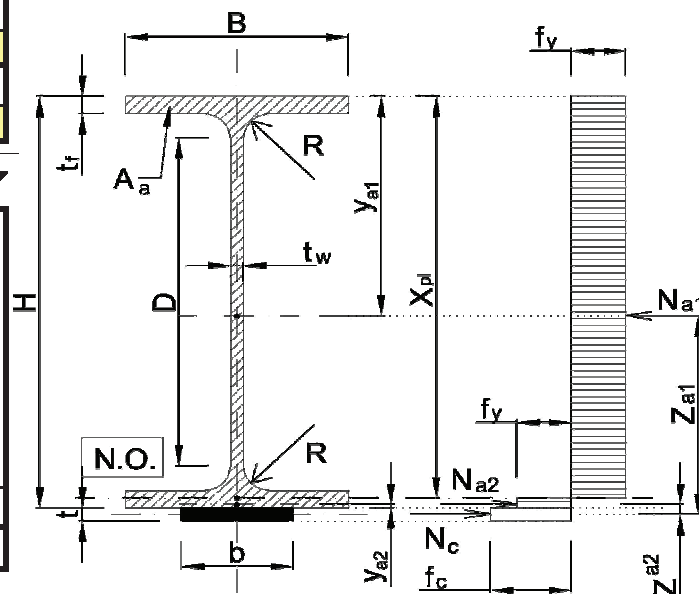
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 140

$H$	140,0	[mm]
$B$	73,0	
$R$	7,0	
$D$	112,2	
$t_f$	6,9	
$t_w$	4,7	
$t$	1,2	
$b$	50,0	
$A_a$	1643,0	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{pl,y}$	8,83E+04	[mm <sup>3</sup> ]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. v dolní pásnici nosníku)

$$X_{pl} = 134,00 \text{ [mm]}$$

**Poloha neutrální osy leží v pásnici nosníku (předpoklad SPLNĚN)**

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	45,62	[mm]
$y_{t,a,2}$	3,00	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	94,98	[mm]	$N_{a,1}$	283,10	[kN]
$Z_{a,2}$	3,60	[mm]	$N_{a,2}$	103,01	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 26,52 \text{ [kNm]}$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 20,76 \text{ [kNm]}$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 27,7 [%]



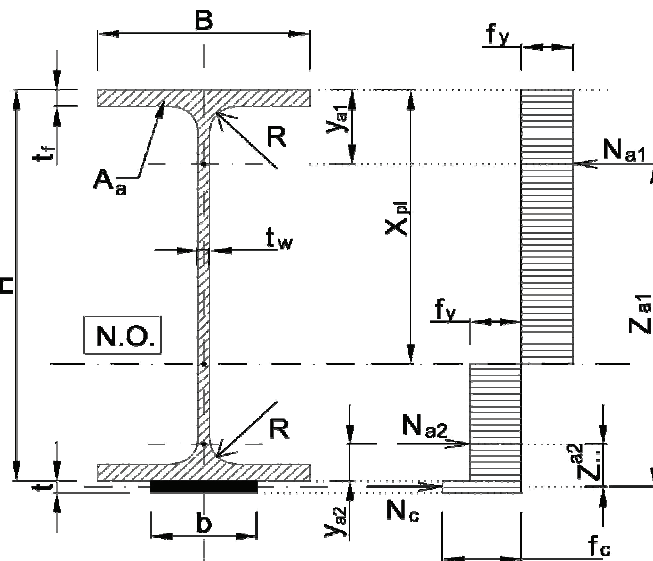
**VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 160**  
(uvažován plně zplastizovaný průřez)

**MATERIÁL:**

OCEĽ	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

**GEOMETRIE (IPE):** IPE 160

$H$	160,0	[mm]
$B$	82,0	
$R$	9,0	
$t_f$	7,4	
$t_w$	5,0	
$t$	1,2	
$W_{pl,y}$	1,24E+05	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	127,2	[mm]



**POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:**

(předpokládaná poloha N.O. ve stojině nosníku)

$$X_{pl} = 156,60 \text{ [mm]}$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojině nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

**TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:**

$y_{t,a,1}$	45,94	[mm]
$y_{t,a,2}$	3,96	[mm]

**RAMENA VNITŘNÍCH SIL:**

**VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:**

$Z_{a,1}$	114,66	[mm]	$N_{a,1}$	326,07	[kN]
$Z_{a,2}$	4,56	[mm]	$N_{a,2}$	146,07	[kN]

**PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:**

$$M_{pl,R,kompozit} = 36,72 \text{ [kNm]}$$

**PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:**

$$M_{pl,R,a} = 29,12 \text{ [kNm]}$$

**NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:** 26,1 [%]

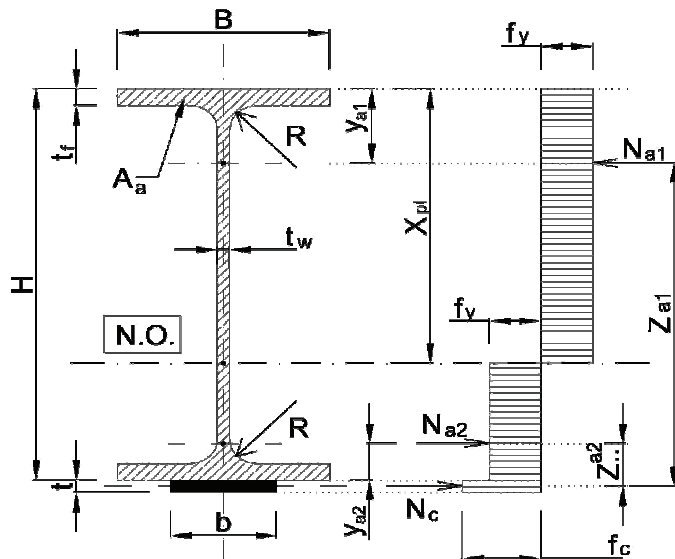
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 180 (uvažován plně zplastizovaný průřez)

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE): IPE 180

$H$	180,0	[mm]
$B$	91,0	
$R$	9,0	
$t_f$	8,0	
$t_w$	5,3	
$t$	1,2	
$b$	50,0	
$W_{pl,y}$	1,66E+05	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	146,0	[mm]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. ve stojině nosníku)

$$X_{pl} = 162,26 \text{ [mm]}$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojině nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	46,10	[mm]
$y_{t,a,2}$	4,82	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	134,50	[mm]	$N_{a,1}$	371,38	[kN]
$Z_{a,2}$	5,42	[mm]	$N_{a,2}$	191,38	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 48,91 \text{ [kNm]}$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 39,10 \text{ [kNm]}$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 25,1 [%]

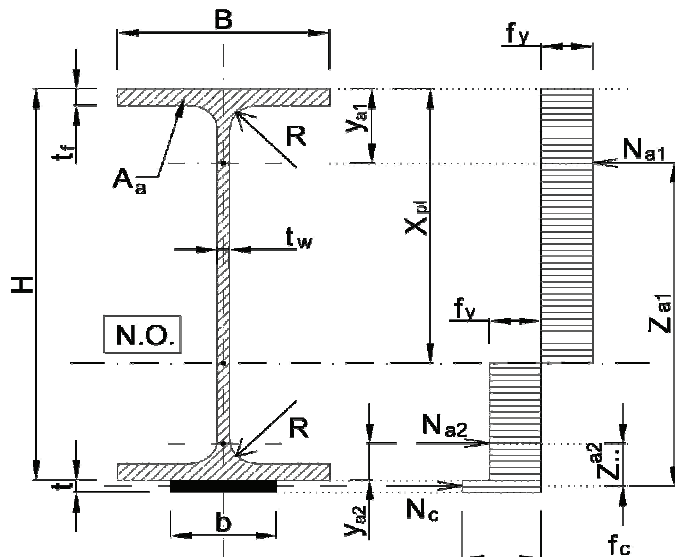
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 200 (uvažován plně zplastizovaný průřez)

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE): IPE 200

$H$	200,0	[mm]
$B$	100,0	
$R$	12,0	
$t_f$	8,5	
$t_w$	5,6	
$t$	1,2	
$b$	50,0	
$W_{pl,y}$	2,21E+05	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	159,0	[mm]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. ve stojině nosníku)

$$X_{pl} = 168,39 \text{ [mm]}$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojině nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	46,20	[mm]
$y_{t,a,2}$	6,63	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	154,40	[mm]	$N_{a,1}$	424,69	[kN]
$Z_{a,2}$	7,23	[mm]	$N_{a,2}$	244,69	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 63,80 \text{ [kNm]}$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 51,84 \text{ [kNm]}$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 23,1 [%]



## PŘÍLOHA Č. 2

**Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v plastickém  
oboru s použitím experimentálně ověřených pevností oceli**

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 120 (plně zplastizovaný průřez)

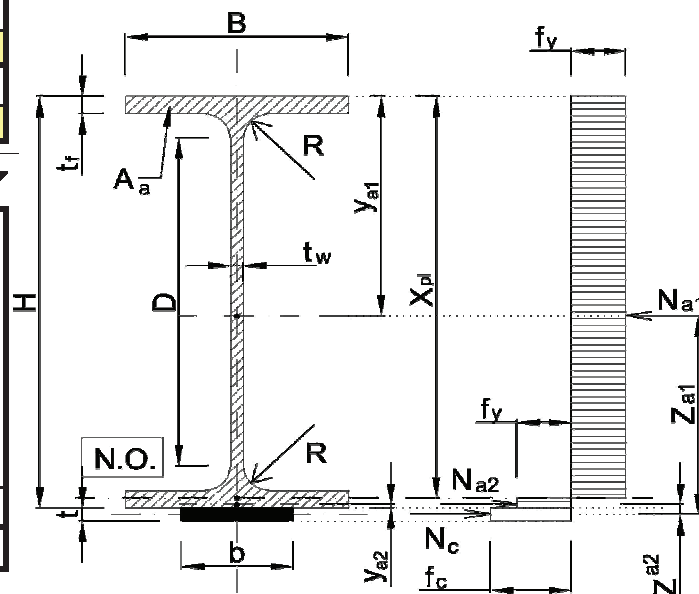
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	206190	344,68
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 120

$H$	120,0	[mm]
$B$	64,0	
$R$	7,0	
$D$	93,4	
$t_f$	6,3	
$t_w$	4,4	
$t$	1,2	
$b$	50,0	
$A_a$	1321,0	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{pl,y}$	6,07E+04	[mm <sup>3</sup> ]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. v dolní pásnici nosníku)

$$X_{pl} = 113,76 \text{ [mm]}$$

**Poloha neutrální osy leží v pásnici nosníku (předpoklad SPLNĚN)**

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	35,35	[mm]
$y_{t,a,2}$	3,12	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	85,25	[mm]	$N_{a,1}$	317,66	[kN]
$Z_{a,2}$	3,72	[mm]	$N_{a,2}$	137,66	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 26,57 \text{ [kNm]}$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 20,93 \text{ [kNm]}$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 26,9 [%]

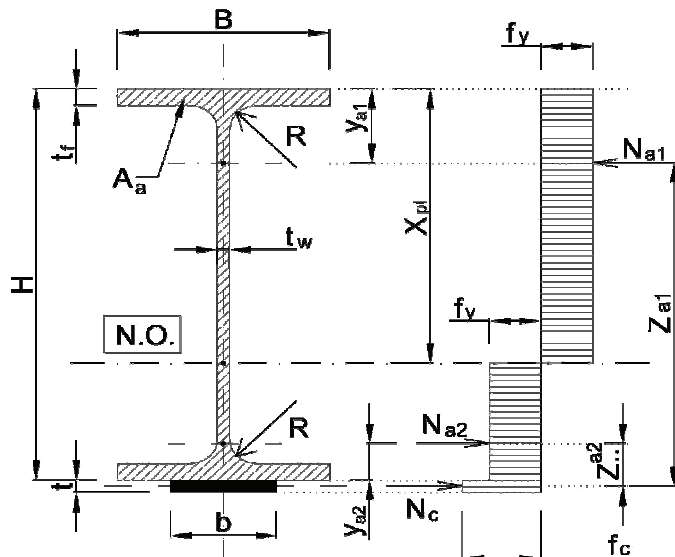
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 140 (uvažován plně zplastizovaný průřez)

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	215020	347,48
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE): IPE 140

$H$	140,0	[mm]
$B$	73,0	
$R$	7,0	
$t_f$	6,9	
$t_w$	4,7	
$t$	1,2	
$W_{pl,y}$	8,83E+04	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	112,2	[mm]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. ve stojině nosníku)

$$X_{pl} = 125,11 \quad [\text{mm}]$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojině nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	35,72	[mm]
$y_{t,a,2}$	4,13	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	104,88	[mm]	$N_{a,1}$	375,39	[kN]
$Z_{a,2}$	4,73	[mm]	$N_{a,2}$	195,39	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 38,45 \quad [\text{kNm}]$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 30,70 \quad [\text{kNm}]$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 25,2 [%]

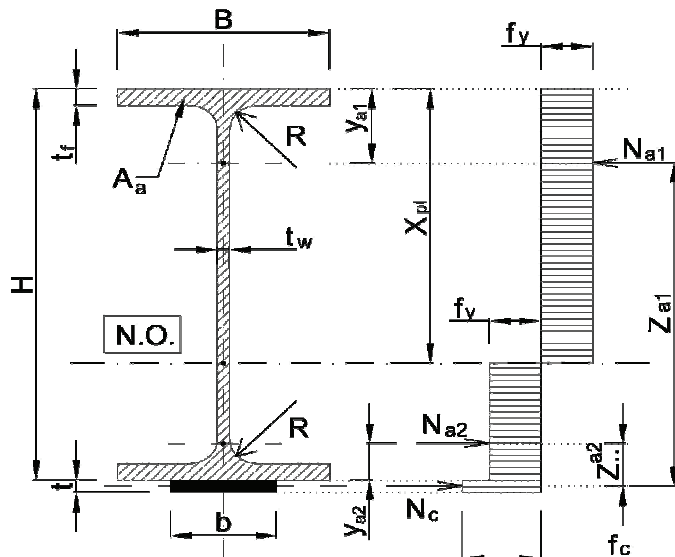
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 160 (uvažován plně zplastizovaný průřez)

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	201990	<b>290,91</b>
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE): IPE 160

$H$	160,0	[mm]
$B$	82,0	
$R$	9,0	
$t_f$	7,4	
$t_w$	5,0	
$t$	<b>1,2</b>	
$b$	<b>50,0</b>	
$W_{pl,y}$	1,24E+05	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	127,2	[mm]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. ve stojině nosníku)

$$X_{pl} = \mathbf{141,87} \quad [\text{mm}]$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojině nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	40,15	[mm]
$y_{t,a,2}$	4,68	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	120,45	[mm]	$N_{a,1}$	382,24	[kN]
$Z_{a,2}$	5,28	[mm]	$N_{a,2}$	202,24	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = \mathbf{44,97} \quad [\text{kNm}]$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = \mathbf{36,04} \quad [\text{kNm}]$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:  $\mathbf{24,8}$  [%]



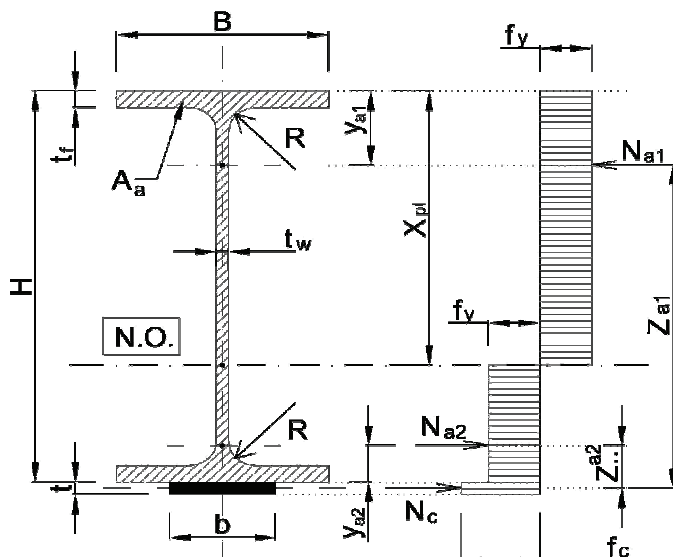
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 180 (uvažován plně zplastizovaný průřez)

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	209400	315,38
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE): IPE 180

$H$	180,0	[mm]
$B$	91,0	
$R$	9,0	
$t_f$	8,0	
$t_w$	5,3	
$t$	1,2	
$b$	50,0	
$W_{pl,y}$	1,66E+05	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	146,0	[mm]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. ve stojině nosníku)

$$X_{pl} = 143,84 \quad [\text{mm}]$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojině nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	39,06	[mm]
$y_{t,a,2}$	7,19	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	141,54	[mm]	$N_{a,1}$	467,63	[kN]
$Z_{a,2}$	7,79	[mm]	$N_{a,2}$	287,63	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 63,95 \quad [\text{kNm}]$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 52,48 \quad [\text{kNm}]$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 21,9 [%]

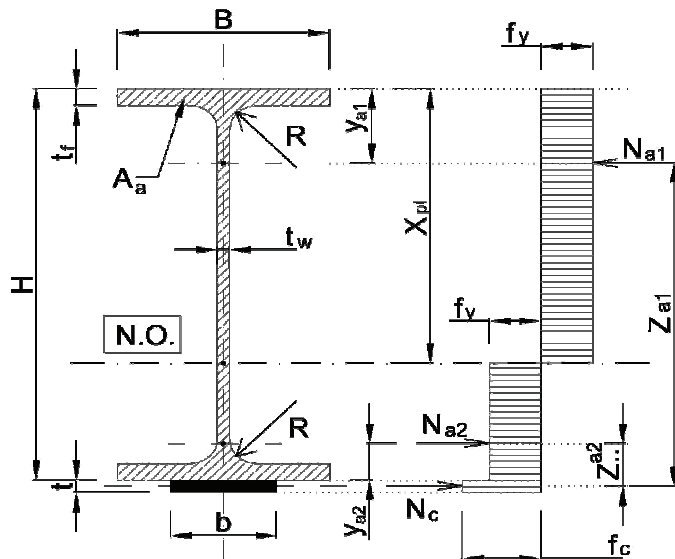
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PLASTICKÉM OBORU - IPE 200 (uvažován plně zplastizovaný průřez)

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	193000	374,16
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000

### GEOMETRIE (IPE): IPE 200

$H$	200,0	[mm]
$B$	100,0	
$R$	12,0	
$t_f$	8,5	
$t_w$	5,6	
$t$	1,2	
$W_{pl,y}$	2,21E+05	[mm <sup>3</sup> ]
$D$	159,0	[mm]



### POLOHA NEUTRÁLNÍ OSY:

(předpokládaná poloha N.O. ve stojně nosníku)

$$X_{pl} = 142,95 \quad [\text{mm}]$$

*Poloha neutrální osy leží ve stojně nosníku (předpoklad SPLNĚN)*

### TĚŽIŠTĚ TLAČENÉ A TAŽENÉ OBLASTI OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$y_{t,a,1}$	36,83	[mm]
$y_{t,a,2}$	11,16	[mm]

### RAMENA VNITŘNÍCH SIL:

### VNITŘNÍ SÍLY NA PRŮŘEZU:

$Z_{a,1}$	163,77	[mm]	$N_{a,1}$	622,88	[kN]
$Z_{a,2}$	11,76	[mm]	$N_{a,2}$	442,88	[kN]

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{pl,R,kompozit} = 96,80 \quad [\text{kNm}]$$

### PLASTICKÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{pl,R,a} = 82,54 \quad [\text{kNm}]$$

NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU: 17,3 [%]



## PŘÍLOHA Č. 3

**Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v pružném oboru s použitím charakteristických pevností oceli a modulu pružnosti**

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 120

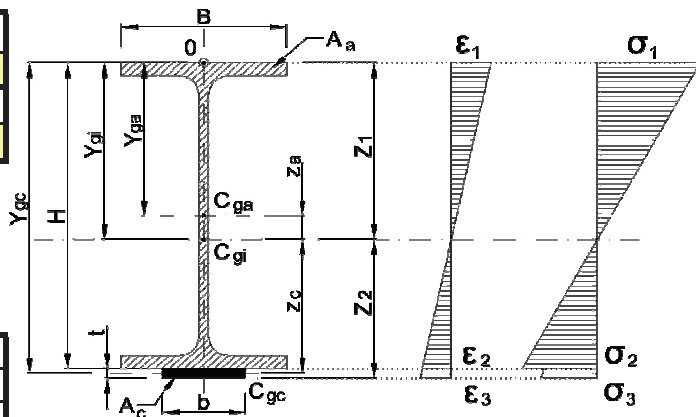
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,35	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 120

$H$	120,0	[mm]
$B$	64,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	1,32E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	3,18E+06	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	5,30E+04	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	60,00	[mm]	$z_a$	1,97	[mm]
$y_{g,c}$	120,60	[mm]	$z_c$	58,63	[mm]
$y_{g,i}$	61,97	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	61,97	[mm]	$A_i$	1365,29	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	58,03	[mm]	$I_i$	3,34E+06	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 12,65 \\ 233,60 \end{matrix} = 12,65 \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = 12,46 \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$1,6 \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 140

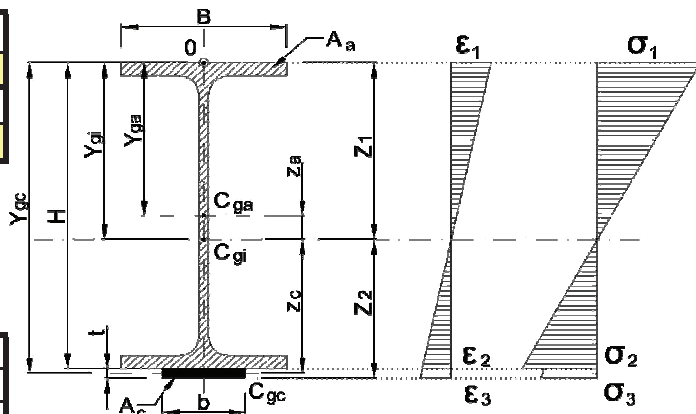
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,35	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 140

$H$	140,0	[mm]
$B$	73,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	1,64E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	5,41E+06	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	7,73E+04	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	70,00	[mm]	$z_a$	1,85	[mm]
$y_{g,c}$	140,60	[mm]	$z_c$	68,75	[mm]
$y_{g,i}$	71,85	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	71,85	[mm]	$A_i$	1687,29	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	68,15	[mm]	$I_i$	5,63E+06	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 18,40 \\ 335,61 \end{matrix} = \mathbf{18,40} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{18,17} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{1,3} \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 160

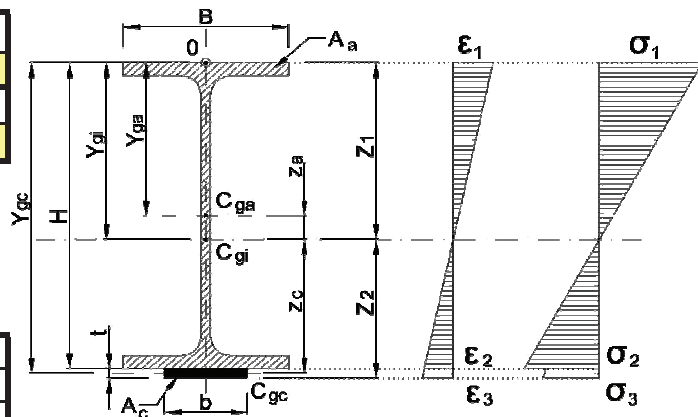
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,35	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 160

$H$	160,0	[mm]
$B$	82,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	2,01E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	8,69E+06	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	1,09E+05	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	80,00	[mm]	$z_a$	1,74	[mm]
$y_{g,c}$	160,60	[mm]	$z_c$	78,86	[mm]
$y_{g,i}$	81,74	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	81,74	[mm]	$A_i$	2053,29	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	78,26	[mm]	$I_i$	8,97E+06	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 25,80 \\ 466,09 \end{matrix} = \mathbf{25,80} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{25,62} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{0,7} \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 180

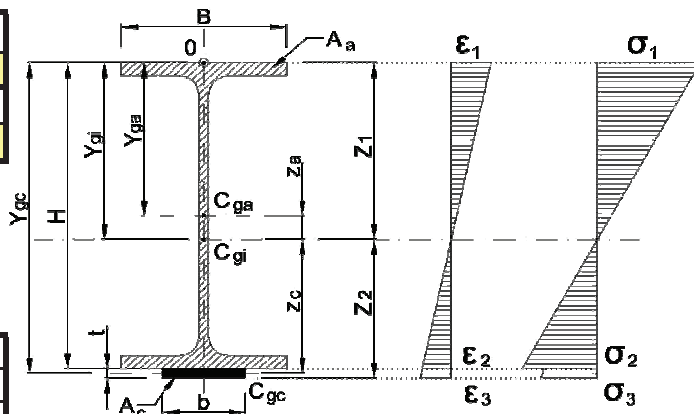
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,35	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 180

$H$	180,0	[mm]
$B$	91,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	2,40E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	1,32E+07	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	1,46E+05	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	90,00	[mm]	$z_a$	1,64	[mm]
$y_{g,c}$	180,60	[mm]	$z_c$	88,96	[mm]
$y_{g,i}$	91,64	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	91,64	[mm]	$A_i$	2439,29	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	88,36	[mm]	$I_i$	1,35E+07	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 34,69 \\ 622,27 \end{matrix} = \mathbf{34,69} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{34,31} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{1,1} \text{ [%]}$$



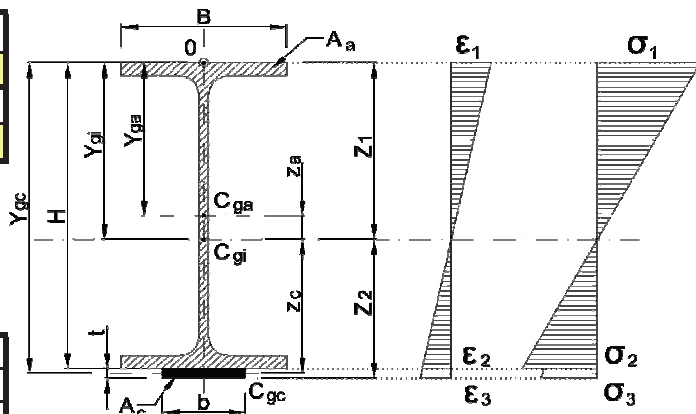
## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 200

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	210000	235
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,35	

### GEOMETRIE (IPE): IPE 200

$H$	200,0	[mm]
$B$	100,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	2,85E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	1,94E+07	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	1,94E+05	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	100,00	[mm]	$z_a$	1,54	[mm]
$y_{g,c}$	200,60	[mm]	$z_c$	99,06	[mm]
$y_{g,i}$	101,54	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	101,54	[mm]	$A_i$	2892,29	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	98,46	[mm]	$I_i$	1,99E+07	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 45,99 \\ 820,31 \end{matrix} = \mathbf{45,99} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{45,59} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{0,9} \text{ [%]}$$



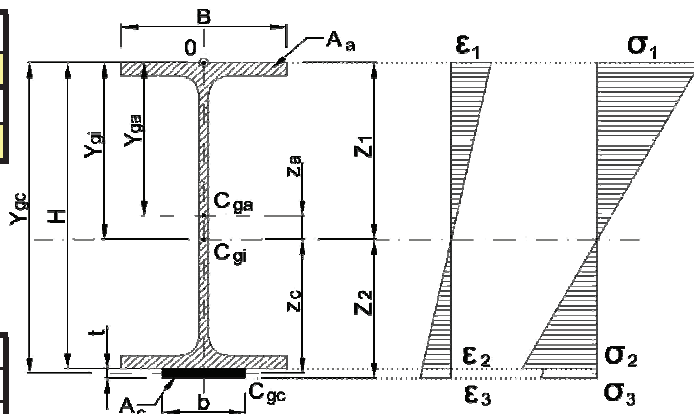
## **PŘÍLOHA Č. 4**

**Protokoly s výpočty teoretické momentové únosnosti nosníků v pružném  
oboru s použitím experimentálně ověřených pevností oceli a modulů  
pružnosti**

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 120

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	206190	344,68
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,33	



### GEOMETRIE (IPE):

IPE 120

$H$	120,0	[mm]
$B$	64,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	1,32E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	3,18E+06	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	5,30E+04	[mm <sup>3</sup> ]

### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	60,00	[mm]	$z_a$	2,00	[mm]
$y_{g,c}$	120,60	[mm]	$z_c$	58,60	[mm]
$y_{g,i}$	62,00	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	62,00	[mm]	$A_i$	1366,10	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	58,00	[mm]	$I_i$	3,34E+06	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 18,56 \\ 229,69 \end{matrix} = \mathbf{18,56} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{18,27} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{1,6} \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 140

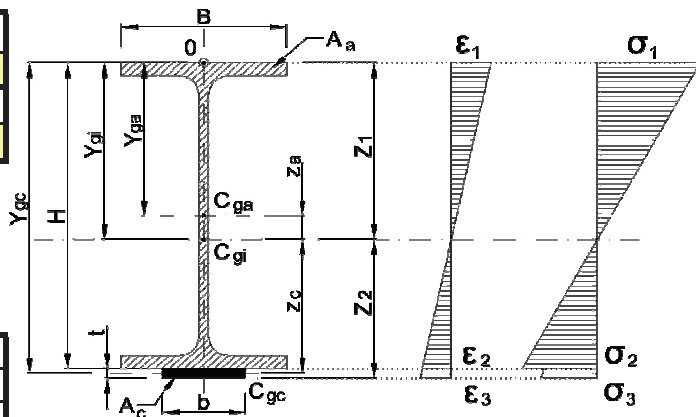
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	215020	347,48
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,39	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 140

$H$	140,0	[mm]
$B$	73,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	1,64E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	5,41E+06	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	7,73E+04	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	70,00	[mm]	$z_a$	1,81	[mm]
$y_{g,c}$	140,60	[mm]	$z_c$	68,79	[mm]
$y_{g,i}$	71,81	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	71,81	[mm]	$A_i$	1686,25	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	68,19	[mm]	$I_i$	5,62E+06	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 27,20 \\ 343,12 \end{matrix} = \mathbf{27,20} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{26,86} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{1,3} \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 160

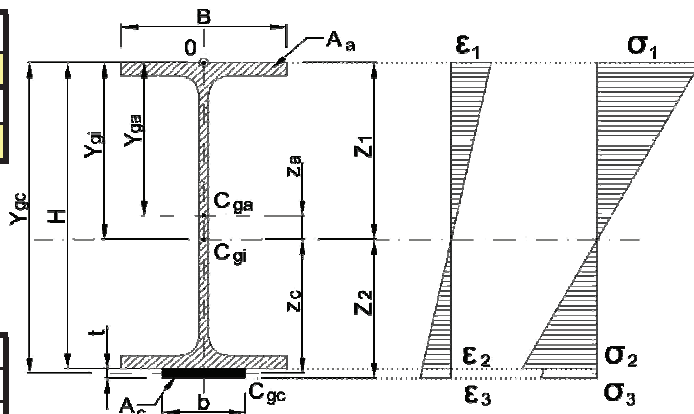
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	201990	290,91
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,30	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 160

$H$	160,0	[mm]
$B$	82,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	2,01E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	8,69E+06	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	1,09E+05	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	80,00	[mm]	$z_a$	1,81	[mm]
$y_{g,c}$	160,60	[mm]	$z_c$	78,79	[mm]
$y_{g,i}$	81,81	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	81,81	[mm]	$A_i$	2055,04	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	78,19	[mm]	$I_i$	8,99E+06	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 31,95 \\ 449,24 \end{matrix} = \mathbf{31,95} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{31,71} \text{ [kNm]}$$

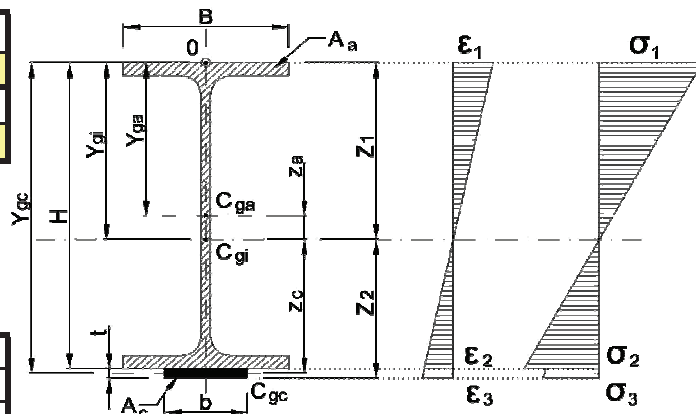
### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{0,8} \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 180

### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	209400	315,38
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,35	



### GEOMETRIE (IPE):

IPE 180

$H$	180,0	[mm]
$B$	91,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	2,40E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	1,32E+07	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	1,46E+05	[mm <sup>3</sup> ]

### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	90,00	[mm]	$z_a$	1,65	[mm]
$y_{g,c}$	180,60	[mm]	$z_c$	88,95	[mm]
$y_{g,i}$	91,65	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	91,65	[mm]	$A_i$	2439,41	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	88,35	[mm]	$I_i$	1,35E+07	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 46,55 \\ 620,57 \end{matrix} = \mathbf{46,55} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{46,05} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{1,1} \text{ [%]}$$

## VÝPOČET TEORETICKÉ MOMENTOVÉ ÚNOSNOSTI V PRUŽNÉM OBORU - IPE 200

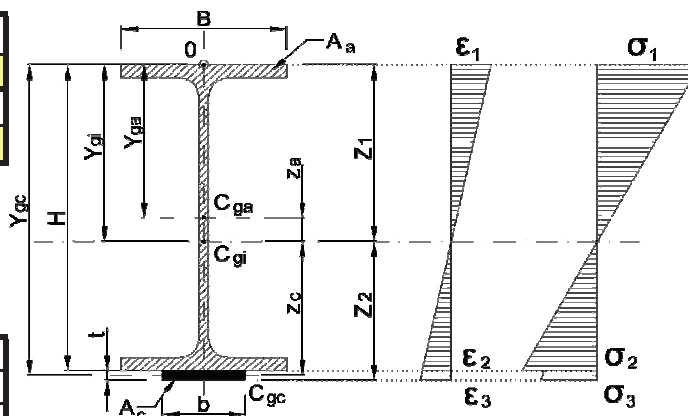
### MATERIÁL:

OCEL	$E_a$ [MPa]	$f_y$ [MPa]
	193000	374,16
UHLÍKOVÁ LAMELA	$E_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
	155000	3000
PRACOVNÍ SOUČINITEL	$n$ [-]	
	1,25	

### GEOMETRIE (IPE):

IPE 200

$H$	200,0	[mm]
$B$	100,0	[mm]
$t$	1,2	[mm]
$b$	50,0	[mm]
$A_c$	60,0	[mm <sup>2</sup> ]
$I_c$	7,2	[mm <sup>4</sup> ]
$A_a$	2,85E+03	[mm <sup>2</sup> ]
$I_a$	1,94E+07	[mm <sup>4</sup> ]
$W_{el,y}$	1,94E+05	[mm <sup>3</sup> ]



### STANOVENÍ POLOHY NEUTRÁLNÍ OSY IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU:

$y_{g,a}$	100,00	[mm]	$z_a$	1,67	[mm]
$y_{g,c}$	200,60	[mm]	$z_c$	98,93	[mm]
$y_{g,i}$	101,67	[mm]			

### VZDÁLENOST KRAJNÍCH VLÁKEN: IDEÁLNÍ PRŮŘEZ:

$Z_1$	101,67	[mm]	$A_i$	2896,19	[mm <sup>2</sup> ]
$Z_2$	98,33	[mm]	$I_i$	1,99E+07	[mm <sup>4</sup> ]

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI KOMPOZITU:

$$M_{el,R,kompozit} = \min \begin{matrix} 73,27 \\ 756,38 \end{matrix} = \mathbf{73,27} \text{ [kNm]}$$

### PRUŽNÝ MOMENT ÚNOSNOSTI SAMOTNÉHO OCELOVÉHO NOSNÍKU:

$$M_{el,R,a} = \mathbf{72,59} \text{ [kNm]}$$

### NÁRŮST ÚNOSNOSTI ZESÍLENÉHO NOSNÍKU:

$$\mathbf{0,9} \text{ [%]}$$





## **PŘÍLOHA Č. 5**

### **Protokoly o zkouškách oceli**



# PROTOKOL O ZKOUŠCE:

16.01.12

## Podmínky zkoušky:

Zkoušel(a): Pospíchal  
Norma : CSN EN 10002-1  
Materiál : I 120

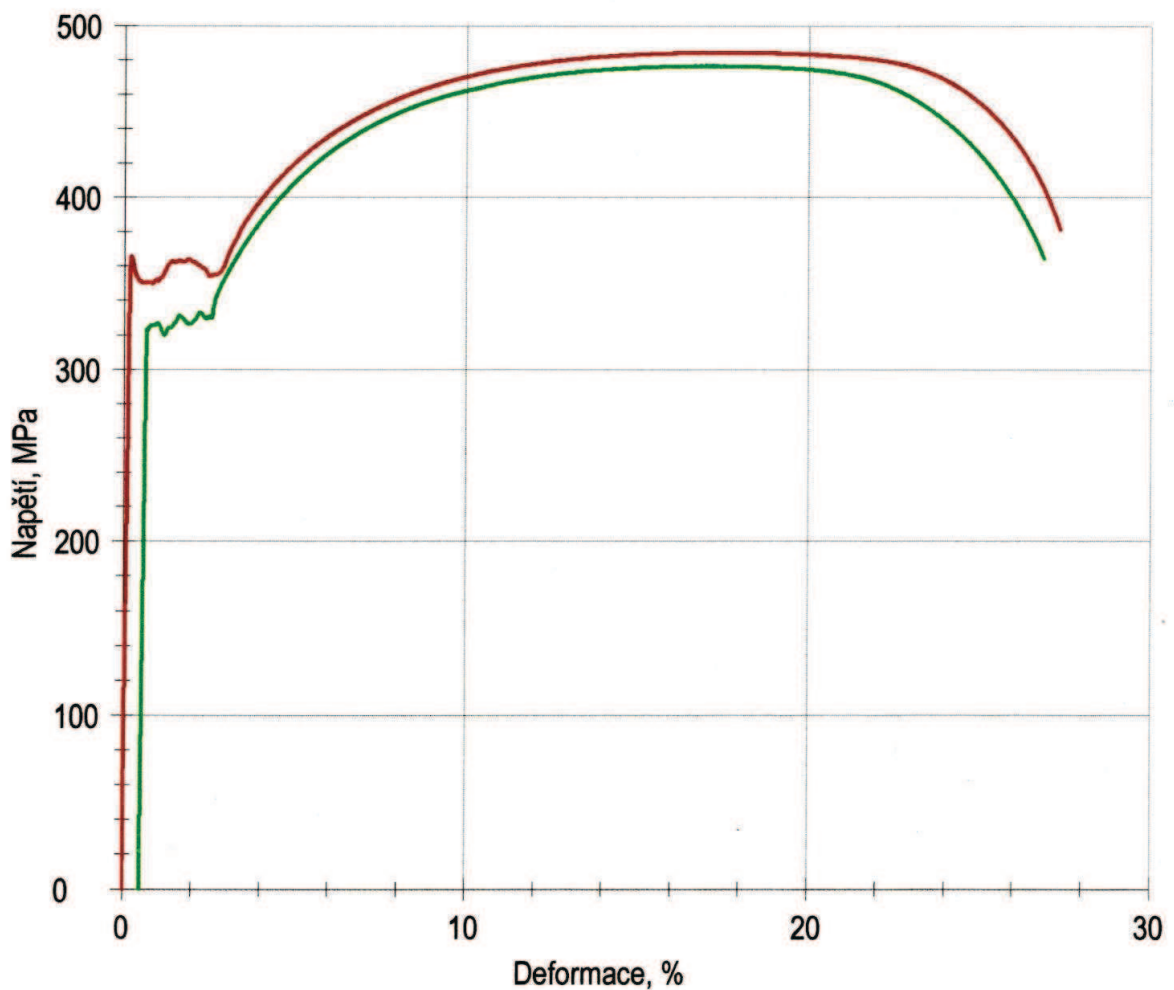
## Výsledky:

Ozn.vz.	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A %
1	80,00	92,00	213,00	365,95	484,48	17,56	27,35
2	80,00	123,38	199,39	323,40	476,56	16,65	26,37

## Statistika:

Série n = 2	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A %
$\bar{x}$	80,00	107,69	206,19	344,68	480,52	17,10	26,86
s	0,00	22,19	9,62	30,08	5,60	0,64	0,69
v	0,00	20,60	4,67	8,73	1,17	3,76	2,57

## Tahové diagramy:





# PROTOKOL O ZKOUŠCE:

16.01.12

## Podmínky zkoušky:

Zkoušel(a): Pospíchal  
Norma : CSN EN 10002-1  
Materiál : I 140

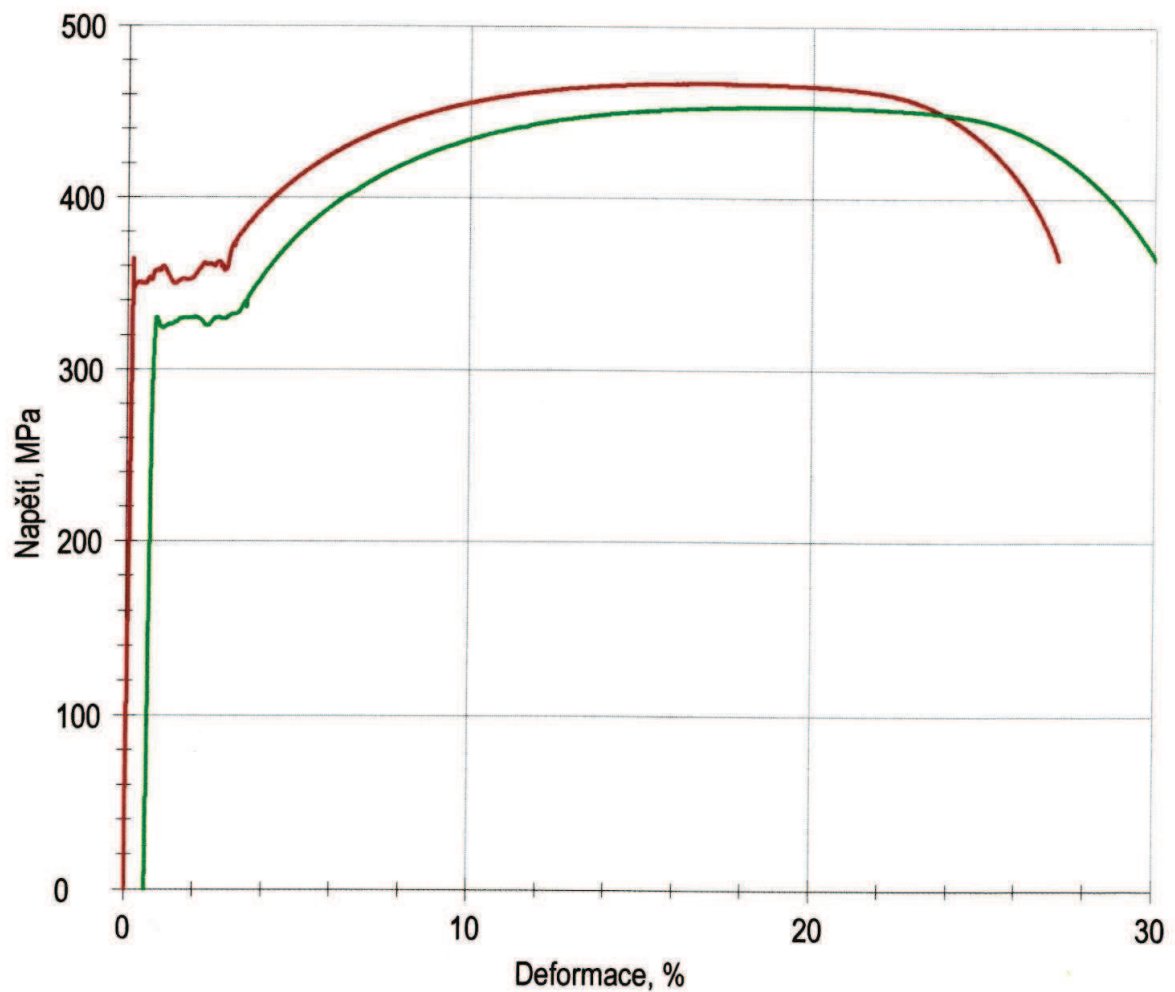
## Výsledky:

Ozn.vz.	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A %
1	80,00	99,10	210,96	364,63	466,90	16,70	27,19
2	80,00	133,40	219,07	330,34	453,28	18,48	29,99

## Statistika:

Série n = 2	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A %
x	80,00	116,25	215,02	347,48	460,09	17,59	28,59
s	0,00	24,25	5,73	24,25	9,63	1,26	1,98
v	0,00	20,86	2,67	6,98	2,09	7,16	6,93

## Tahové diagramy:





# PROTOKOL O ZKOUŠCE:

16.01.12

## Podmínky zkoušky:

Zkoušel(a): Pospíchal  
Norma : CSN EN 10002-1  
Materiál : I 160

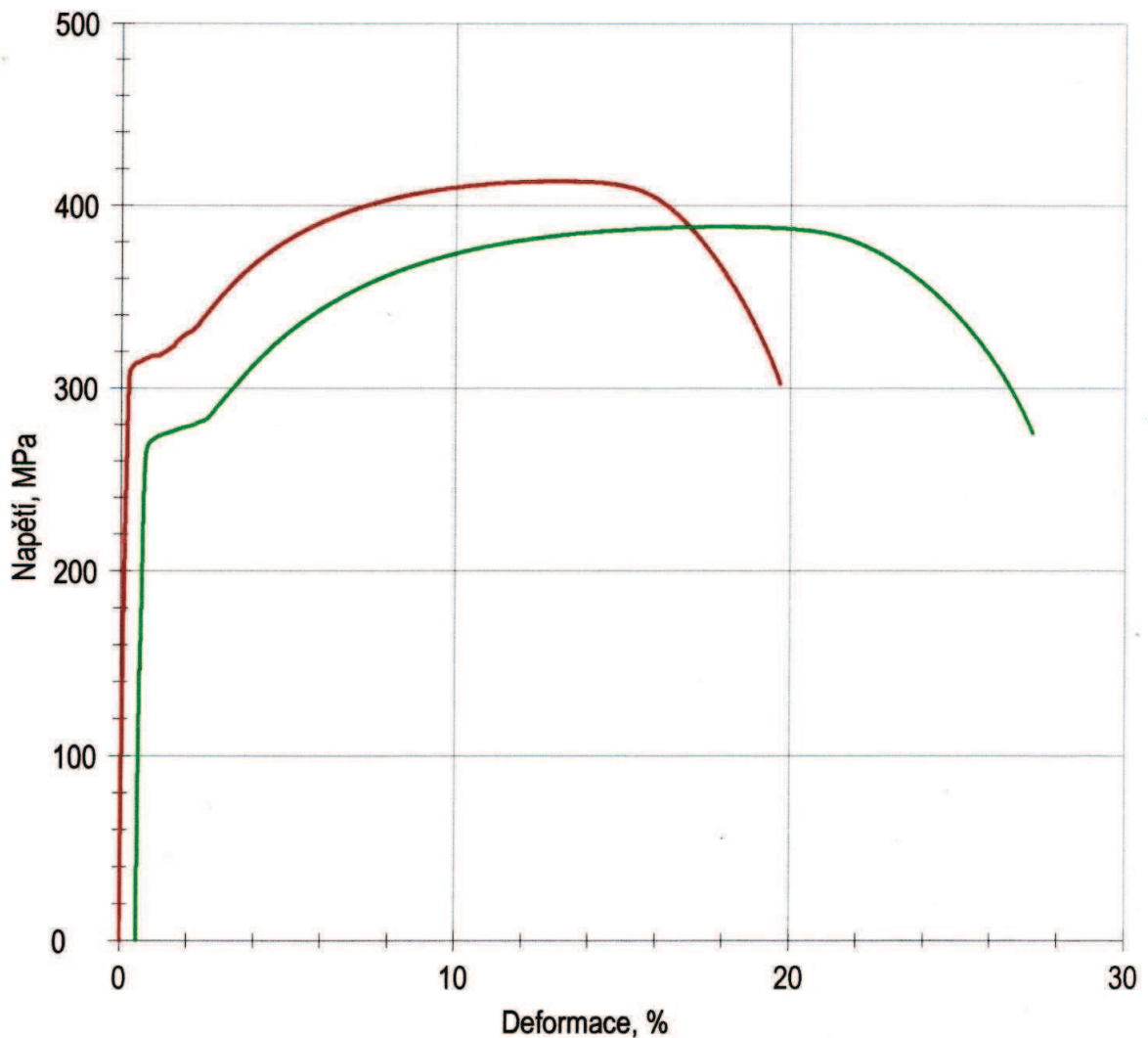
## Výsledky:

Ozn.vz.	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A %
1	80,00	104,60	201,01	312,16	413,57	13,02	19,69
2	80,00	152,00	202,98	269,66	388,60	17,59	26,73

## Statistika:

Série n = 2	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A %
$\bar{x}$	80,00	128,30	201,99	290,91	401,09	15,31	23,21
s	0,00	33,52	1,39	30,05	17,66	3,23	4,98
v	0,00	26,12	0,69	10,33	4,40	21,12	21,44

## Tahové diagramy:







# PROTOKOL O ZKOUŠCE:

16.01.12

## Podmínky zkoušky:

Zkoušel(a): Pospíchal  
Norma : CSN EN 10002-1  
Materiál : I 180

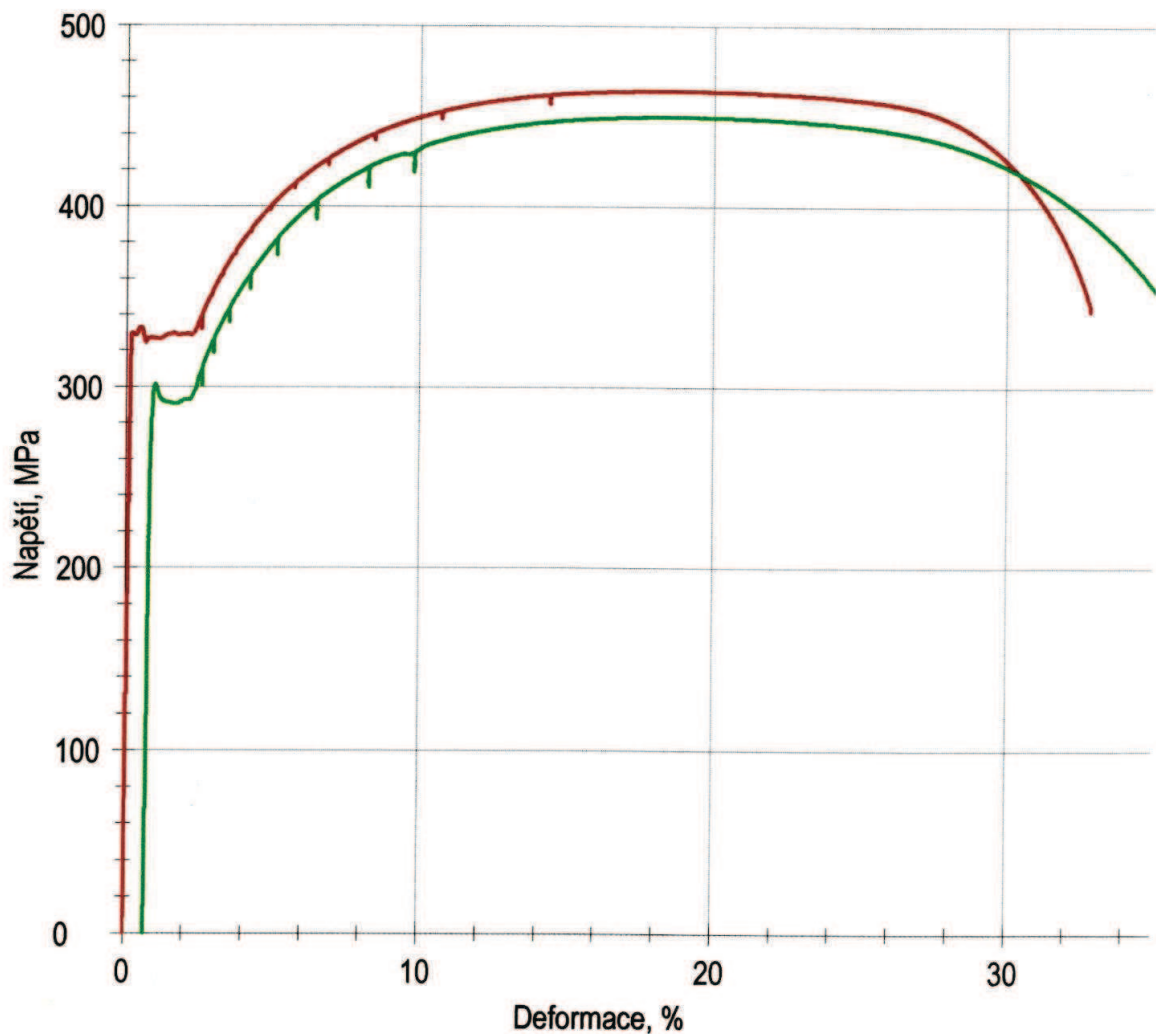
## Výsledky:

Ozn.vz.	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A %
1	80,00	106,00	217,79	329,31	464,01	18,49	32,86
2	60,00	147,38	201,01	301,46	449,56	17,98	35,54

## Statistika:

Série n = 2	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A %
x	70,00	126,69	209,40	315,38	456,79	18,24	34,20
s	14,14	29,26	11,86	19,69	10,22	0,36	1,90
v	20,20	23,10	5,67	6,24	2,24	1,98	5,55

## Tahové diagramy:





# PROTOKOL O ZKOUŠCE:

16.01.12

## Podmínky zkoušky:

Zkoušel(a): Pospíchal  
Norma : CSN EN 10002-1  
Materiál : I 200

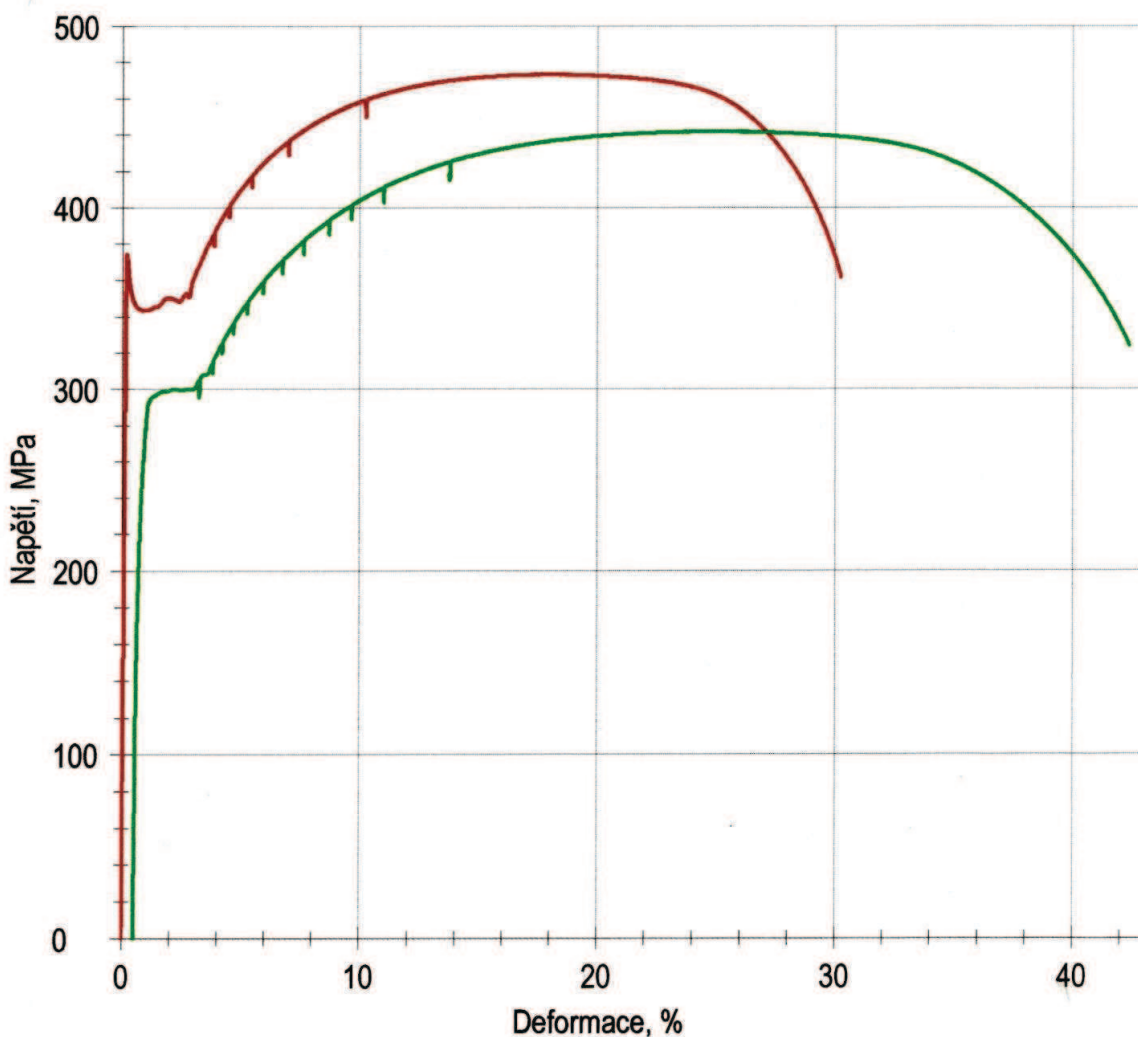
## Výsledky:

Ozn.vz.	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A %
1	80,00	115,88	210,47	374,16	354,16	473,28	18,12	30,22
2	60,00	162,00	175,54	-	249,81	441,84	24,38	41,88

## Statistika:

Série n = 2	Lo mm	So mm <sup>2</sup>	E-Modul GPa	ReH MPa	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A %
$\bar{x}$	70,00	138,94	193,00	374,16	301,99	457,56	21,25	36,05
s	14,14	32,61	24,70	-	73,79	22,23	4,43	8,24
v	20,20	23,47	12,80	-	24,43	4,86	20,84	22,87

## Tahové diagramy:





## **PŘÍLOHA Č. 6**

### **Fotodokumentace experimentálního ověření**



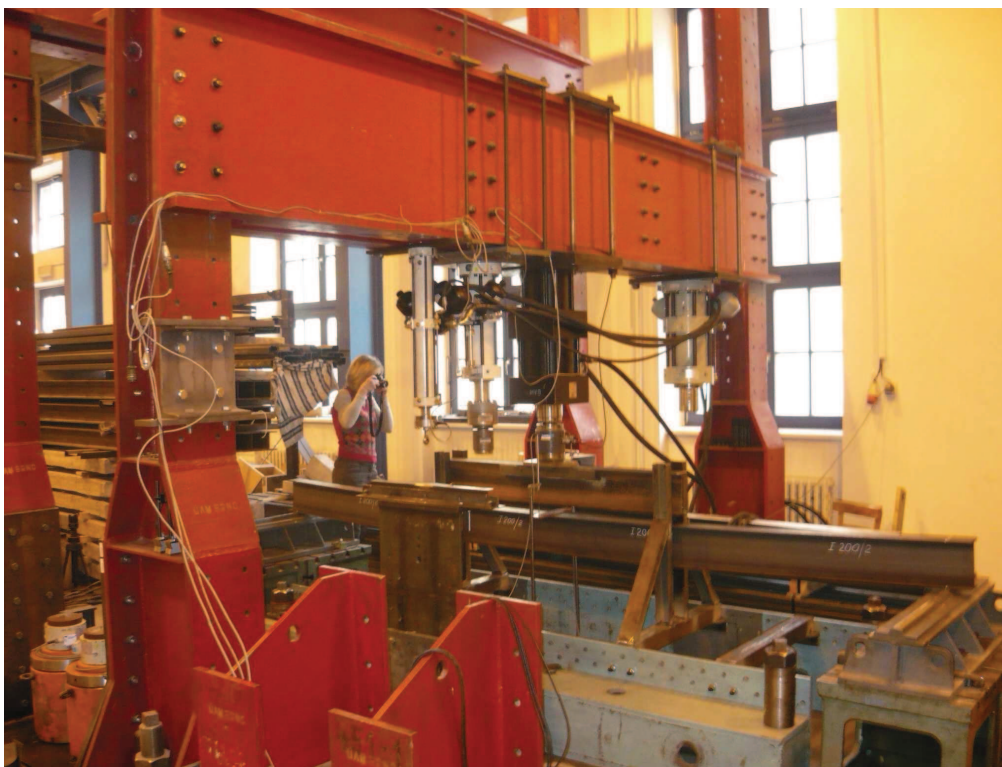


Obr. 13.1 Zatěžovací sestava se zesíleným nosníkem po překročení únosnosti. Z obrázku je patné příčné vybočení horní pásnice nosníku.



Obr. 13.2 Detailní zobrazení kontaktního místa mezi roznášecí konstrukcí a ověřovaným nosníkem přes roznášecí segment. Nosník je zobrazen po překročení únosnosti. V místě působení síly je patná deformace horní pásnice.





Obr. 13.3 Pohled na celou zatěžovací sestavu včetně ocelového zkušebního rámu. Nosník je zachycen v průběhu zatěžování.



Obr. 13.7 Zatěžovací sestava s připraveným zkušebním nosníkem před zahájením zatěžování



Obr. 13.6 Ukázka nosníku u kterého nebyla instalována konstrukce bránící klopení. Ve srovnání s předchozími obrázky je patrné, že k vybočení došlo mnohem dříve než bylo dosaženo zplastizování.





Obr. 13.4 Zkušební nosník po překročení únosnosti s přetažením zatěžování. V této fázi již docházelo k trhání horní pásnice.



Obr. 13.5 Na obrázku je zobrazen připravený nosník s nalepenou uhlíkovou lamelou a zničený nosník. Zničení bylo způsobeno závadou na ovládacím zařízení, kdy se nepodařilo včas zastavit pohyb hydromotoru.