

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Diplomová práce

Jméno: Bc. Marek Šorf

Vedoucí práce: Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

5. ledna 2017

.....

podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalu Janderovi, Ph.D. za věnovaný čas a velmi cenné rady a poznatky k diplomové práci. Dále bych velice rád poděkoval firmě ArcelorMittal za věnování trapézových profilů pro experimenty, firmě Hilti za věnování závitových tyčí pro závěsy a předvedení odborné montáže, panu Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D. a panu Jaroslavu Brojovi za pomoc při experimentech. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

Lokálně a liniově zatížené trapézové plechy

Concentrated and linearly distributed loads on
trapezoidal profiles

Anotace:

Cílem diplomové práce je vytvoření několika numerických modelů pro následnou analýzu roznášení lokálního zatížení v příčném směru trapézového profilu. Ty byly vytvořeny v MKP software Abaqus a validovány na dvou provedených zkouškách. Dále je popsán možný postup návrhu pro určení podílu jednotlivých vln na roznosu zatížení. V poslední řadě byl na sérii zkoušek odvozen jednoduchý postup pro stanovení únosnosti přípoje závěsu v trapézovém plechu.

Klíčová slova: *trapézové profily, lokální zatížení, MKP model, za studena tvarovaný profil, ocel*

Abstract:

The aim of this thesis is to create numerical models for analysis of local load distribution on trapezoidal profiles in the transverse direction. They were made using FEM software Abaqus and validated on two tests. A possible proposal for determining the contribution of adjacent ribs of the trapezoidal profile is described later. Finally based on a series of tests, a simple resistance calculation procedure was developed for the hanger connection to the trapezoidal sheet.

Keywords: *-trapezoidal profiles, local load, FEM model, cold-formed section, steel*



Obsah

1	Úvod	1
1.1	Použití trapézových profilů	1
1.2	Výroba trapézových profilů	2
1.3	Návrh trapézových profilů	3
2	Liniově zatížené trapézové profily	4
2.1	Numerický model trapézového plechu pro plošné zatížení.....	4
2.1.1	Použitý materiál.....	4
2.1.2	Zavedení okrajových podmínek	5
2.1.3	Sít' MKP	6
2.1.4	Zatížení modelu.....	8
2.1.5	Zavedení imperfekcí.....	8
2.1.6	Statická analýza.....	13
3	Lokálně zatížené trapézové plechy	16
3.1	Příklady lokálního zatížení, statický návrh	16
3.2	Numerický model trapézového plechu pro lokální zatížení	20
3.2.1	Modelování závěsu.....	20
3.2.2	Použitý materiál.....	21
3.2.3	Zavedení okrajových podmínek	21
3.2.4	Sít' MKP	22
3.2.5	Zatížení modelu.....	23
3.2.6	Zavedení imperfekcí.....	23
3.2.7	Předběžná kontrola výsledků.....	23
3.3	Laboratorní zkoušky.....	25
3.3.1	Statická zkouška – stanovení únosnosti vlny plechu se závěsem.....	25
3.3.1.1	Cíl zkoušky.....	25
3.3.1.2	Průběh zkoušky	25
3.3.1.3	Výsledky zkoušky	28
3.3.1.4	Závěr zkoušky	31
3.3.2	Statická zkouška – analýza roznášení lokálního zatížení	32
3.3.2.1	Cíl zkoušky.....	32
3.3.2.2	Průběh zkoušky	32
3.3.2.3	Výsledky zkoušky	35
3.3.2.4	Závěr zkoušky	37
3.3.3	Doprovodná materiálová zkouška	38



3.3.3.1	Cíl zkoušky.....	38
3.3.3.2	Průběh zkoušky	38
3.3.3.3	Výsledky zkoušky	40
3.3.3.4	Závěr zkoušky	40
3.4	Validace numerického modelu pro lokální zatížení	41
3.5	Návrhový postup pro rozdělení lokálního zatížení do vln trapézových profilů.....	45
3.5.1	Přehled návrhových přístupů.....	45
3.5.1.1	Roznos zatížení podle Germunda Johanssona.....	45
3.5.1.2	Roznos zatížení podle přijaté úpravy normy	48
3.5.1.3	Porovnání vypočtených hodnot s numerickým modelem	48
3.5.2	Parametrická studie	50
3.5.2.1	Přehled výsledků parametrické studie pro TR153-290	51
3.5.2.2	Přehled výsledků parametrické studie pro TR160-250HL.....	55
3.5.2.3	Přehled výsledků parametrické studie pro TR92-275	57
3.5.2.4	Závěr parametrické studie	58
3.5.2.5	Nový návrhový postup rozdělení lokálního zatížení mezi vlny trapézového profilu.....	60
4	Závěr.....	64
4.1	Další výzkum	64
5	Seznam použité literatury	65
	Příloha 1 – Výsledky statické zatěžovací zkoušky pro stanovení únosnosti vlny plechu se závěsem	67
	Příloha 2 – Výsledky doprovodné materiálové zkoušky	81

1 Úvod

1.1 Použití trapézových profilů

V dnešní době patří trapézové profily k běžně využívaným konstrukčním prvkům pro průmyslové, administrativní i občanské stavby. Lze je použít pro vnější vrstvu skládaných obvodových pláštů, pro nezateplené obvodové pláště, pro zateplené i nezateplené střešní pláště nebo jako nosné konstrukční prvky podlah či střeš. Neméně často se trapézové plechy používají jako součást ocelobetonových spřažených konstrukcí nebo pro samonosné obloukové konstrukce.

Hlavní výhodou je vysoká únosnost ve srovnání s vlastní tíhou profilu. Podstatou je vhodné vytvarování tvaru příčného řezu z relativně tenkého plechu, který je následně schopen odolávat poměrně velkému zatížení. Další výhodou je bezpochyby rychlost výroby a v případě kvalitně provedeného statického výpočtu i cena.

Pro výrobu trapézových profilů se běžně používá ocel S280GD, S320GD nebo S350GD s protikorozi ochranou, kterou je nejčastěji zinkování či povlak z duroplastů libovolné barvy. Dalším možným materiálem pro výrobu je například hliník v přírodním či lakovaném provedení nebo měď. Způsob výroby je stručně popsán v kap. 2 *Výroba trapézových profilů*.

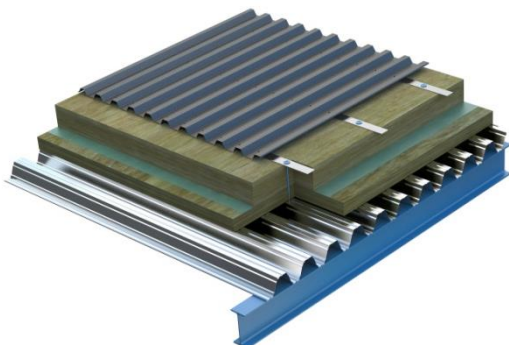
Ze statického hlediska se trapézové profily řadí mezi tenkostěnné za studena tvarované průřezy, což vyžaduje poměrně složitější postup návrhu. V dnešní době ale většina výrobců poskytuje statické tabulky pro návrh trapézových profilů, kde je pro vybraný rozpon uvedena příslušná hodnota zatížení. Tyto hodnoty jsou stanoveny výpočtově nebo ze statistického zpracování statických zatěžovacích zkoušek. Trapézové plechy lze navrhnout jako prosté nosníky o jednom poli nebo spojitě nosníky o dvou a více polích.

Na trhu existuje velké množství trapézových profilů, které se liší zejména geometrií příčného řezu. Pro účely této práce lze trapézové profily rozdělit do dvou skupin – vysoké trapézové profily a nízké trapézové profily.

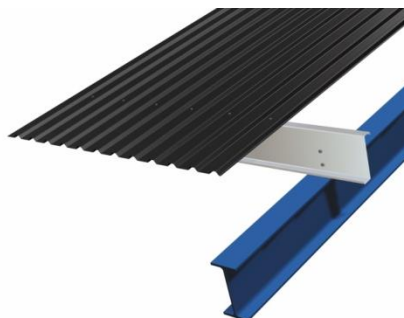
Vysoké trapézové profily, které jsou hlavním tématem této diplomové práce, se primárně používají pro bezvaznicové konstrukční systémy na rozpon 5 až 7 m (viz. *obr. 1*). Výška těchto profilů se běžně pohybuje od 85 mm do 206 mm, tloušťka plechu se pro tyto profily používá od 0,75 mm až 1,50 mm (se započtením povrchové vrstvy).

Nízké trapézové profily se nejčastěji používají pro vnější vrstvu opláštění budov nebo jako nosné profily na malá rozpětí například u vaznicových konstrukčních systémů (viz. *obr. 2*). Výška profilu se pohybuje od 8 do 50 mm, tloušťka plechu se používá od 0,50 mm do 1,00 mm (se započtením povrchové vrstvy). Tvar příčného řezu lze vyrobit ve variantě vlnitého nebo lichoběžníkového profilu.

Mezi hlavní distributory trapézových profilů v České republice patří firmy ArcelorMittal, Kovové profily, CB profily, Lindab, Satjam či Comax.



Obrázek 1: Ukázka typické skladby s použitím vysokého trapézového profilu [1]



Obrázek 2: Ukázka vaznicového konstrukčního systému s využitím nízkého trapézového profilu [1]

1.2 Výroba trapézových profilů

Jak již bylo řečeno, mezi největší výhody trapézových profilů se řadí rychlost výroby. Ve výrobě je připraveno několik svitků plechu, které jsou již na základě požadavku investora opatřeny příslušnou povrchovou úpravou (viz. obr. 3). Šířka svitku se zpravidla pohybuje od 1250 mm (pro tloušťky plechu 0,50 až 1,00 mm) do 1500 mm (pro tloušťky plechu 0,75 mm až 1,5 mm), délka se pohybuje v řádu desítek metrů.

Výroba trapézových profilů probíhá na válcovací lince za pokojové teploty (viz. obr. 4). Každý typ plechu má určenou svojí sadu, která obsahuje válce o různých velikostech a pozicích (viz. obr. 5), proto je nutné před zahájením výroby vše pečlivě zkontrolovat. Po nastavení sady válců je na linku upevněn i příslušný svitek plechu. Následně se svitek plechu pohybuje přes poměrně dlouhou válcovací linku, kde je v každé sadě válců lehce pozměněna geometrie příčného řezu. Na obr. 6 je zobrazen pohled na trapézový profil těsně před dokončením po projetí celé výrobní linky.

Nespornou výhodou tohoto způsobu výroby je přesnost. V rámci jedné sady svitku jsou vyrobené plechy téměř totožné, možná nepřesnost může nastat po opětovném nastavení sad válců.



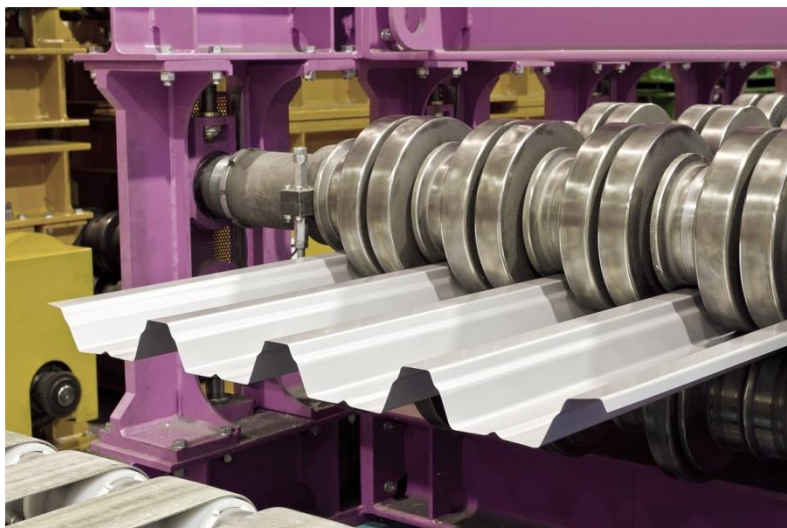
Obrázek 3: Pohled na svitky plechu připravené pro výrobu trapézových plechů [2]



Obrázek 4: Pohled na válcovací linku [2]



Obrázek 5: Pohled na sady válců nastavených pro různé typy profilů [2]



Obrázek 6: Pohled na trapézový plech těsně před dokončením [2]

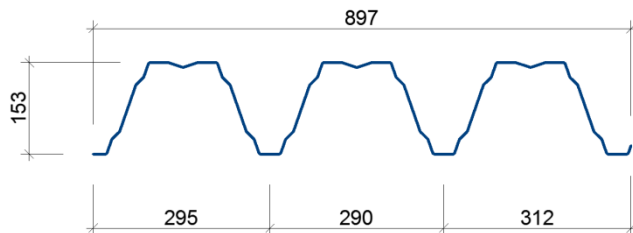
1.3 Návrh trapézových profilů

Únosnost trapézových profilů lze výpočtem stanovit podle normy ČSN EN 1993-1-3. Jak již bylo zmíněno, trapézové profily jsou vyrobeny z tenkého plechu, což je důvod k zařazení těchto profilů do průřezů 4. třídy. Podstatou návrhu je stanovení efektivní plochy průřezu, kdy v tlačené části profilu dochází k vyloučení části průřezu z důvodu boulení stěn. Na velikost efektivní plochy, a tím pádem na únosnost profilu, má poměrně velký vliv přítomnost výztuh. Při výpočtu se předpokládá, že výztuha se chová jako tlačенý prvek se spojitým částečným podepřením, jehož pérová tuhost K závisí na okrajových podmínkách a ohybové tuhosti přilehlých rovinných částí. Efektivní šířka a tloušťka výztuhy se stanoví iteračním výpočtem.

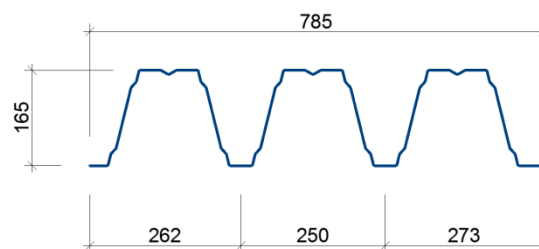
Analýzou chování trapézových profilů se v rámci výzkumu ČVUT Fakulty stavební také zabýval Ing. Aleš Ježek, Ph.D. v disertační práci s názvem *Trapézové plechy působící jako spojitě nosníky*.

2 Liniově zatížené trapézové profily

Cílem této kapitoly je stručný popis vytváření numerického modelu trapézových profilů TR153-290 (obr. 7) a TR160-250HL (obr. 8) včetně ověření správnosti těchto modelů. Následně jsou tyto modely výchozími pro analýzu rozložení lokálního zatížení v další kapitole.



Obrázek 7: Trapézový plech TR 153-290



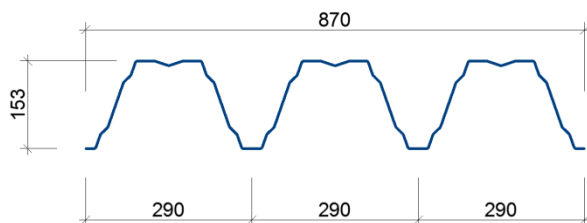
Obrázek 8: Trapézový plech TR 160-250HL

2.1 Numerický model trapézového plechu pro plošné zatížení

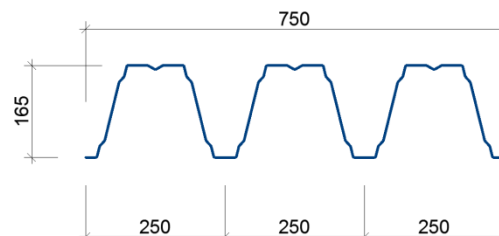
Pro vytvoření modelů je použit software Abaqus CAE Standard založený na metodě konečných prvků. S ohledem na komplikovaný tvar trapézových plechů v příčném směru jsou pro vytvoření modelů použity soubory ve formátu dwg, které jsou do softwaru Abaqus nainportovány ve formátu iges.

Profily jsou vymodelovány pomocí deskostěnového prvku (*Shell*). Tento prvek je vhodný zejména pro modelování štíhlých stěn, u kterých je poměr tloušťky k šířce nižší než 1/10.

Geometrie profilů je lehce upravena na profil symetrický ke svislé ose (obr. 9, 10), zanedbávají se tedy jednotlivé přesahy plechů vyplývající z podélných spojů jednotlivých dílců.



Obrázek 9: Trapézový plech TR 153-290



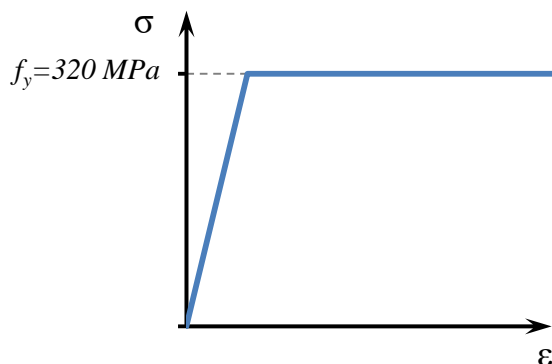
Obrázek 10: Trapézový plech TR 160-250HL

Model je vytvořen pro oba typy trapézových profilů ve dvou tloušťkách 1,25 mm a 0,75 mm. Postup vytváření modelů je téměř totožný, proto je popsán pouze pro trapézový profil TR 153-290, tl. 1,25 mm. Odlišnosti pro jednotlivé trapézové plechy jsou uvedeny v příslušných podkapitolách.

2.1.1 Použitý materiál

Pro model trapézového plechu je použita běžně používaná ocel pro za studena tvarované profily S320GD. V softwaru je pro stabilitní analýzu zjednodušeně definována modulem pružnosti $E = 210$ GPa a součinitelem příčné roztlačnosti $\nu = 0,3$.

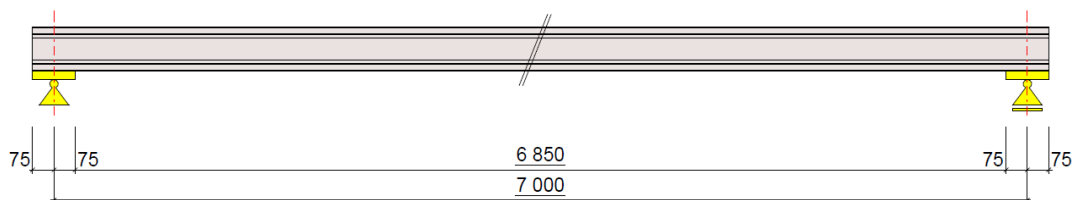
Pro následnou analýzu chování profilu je zapotřebí zohlednit i nelineární chování materiálu, které je v modelu zavedeno bilineárním pracovním diagramem oceli (viz. obr. 11). Takto definovaný pracovní diagram popisuje pružnoplastické chování materiálu bez deformačního zpevnění, což je pro tento případ dostačující. Po dosažení meze kluzu f_y nastane plastizace materiálu, při dalším zatěžování modelu bude narůstat poměrná deformace bez nárůstu napětí.



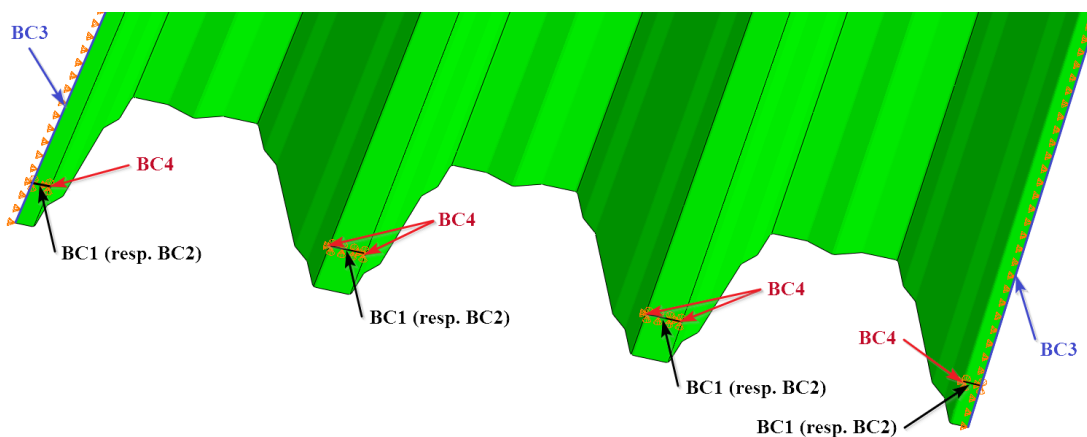
Obrázek 11: Pracovní diagram definované oceli

2.1.2 Zavedení okrajových podmínek

Na obr. 12 je znázorněno statické schéma modelu. Jedná se o prostý nosník uložený na podporách o šířce 150 mm s osovou vzdáleností 7,0 m.



Obrázek 12: Statické schéma numerického modelu



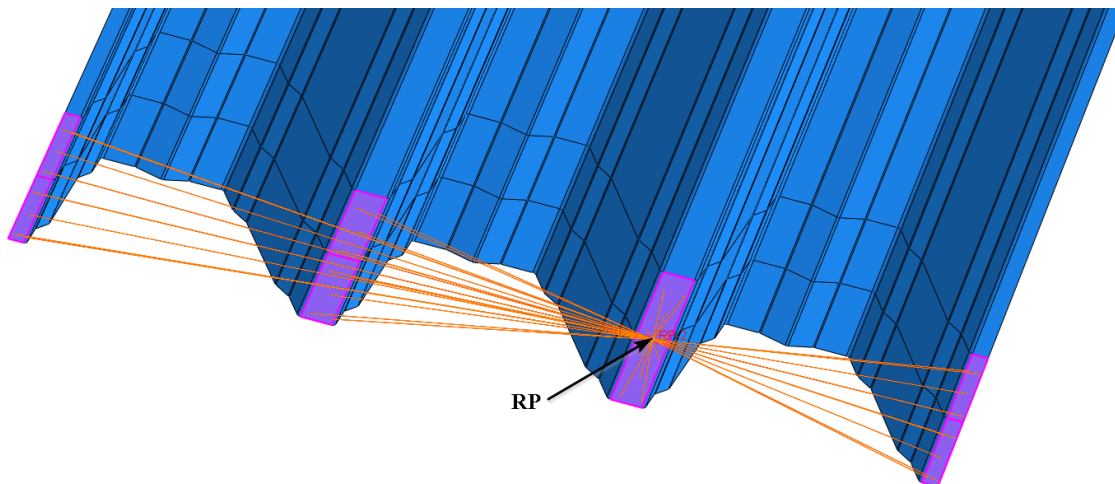
Obrázek 13: Axonometrický pohled s označením definovaných podpor

V modelu jsou celkem definovány 4 typy podpor (obr. 13):

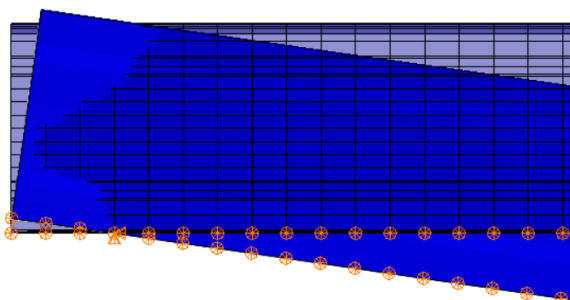
- **BC-1** – levá neposuvná podpora; zamezení posunu ve svislém a podélném směru
- **BC-2** – pravá posuvná podpora; zamezení posunu ve svislém směru
- **BC-3** – podpora na krajích trapézového plechu v celé délce; zamezení posunu v příčném směru
- **BC-4** – podpora u vln trapézového plechu nad podporou; zamezení posunu vln v příčném směru

V oblasti podpor je zapotřebí ještě definovat okrajové podmínky (*Constraints*) zohledňující šířku podpory 150 mm (šířka byla zvolena tak, aby jednoznačně nedocházelo k borcení stojin). V softwaru je

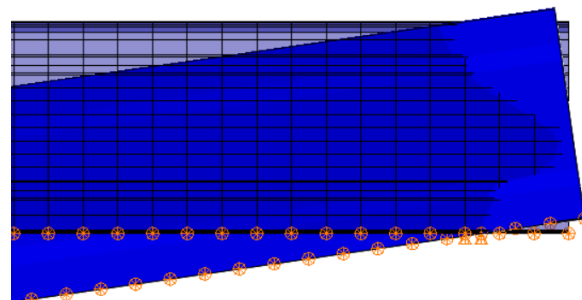
vytvořen referenční bod roviny (*Reference point*) v dolní pásnici mezilehlého žebra TR plechu. K tomuto bodu jsou vztaženy označené plochy (*obr. 14*), pro které je definována okrajová podmínka (*Constraints – Kinematic Coupling*) zajišťující stejné pootočení kolem všech os souřadného systému. Tato podmínka je definována na obou koncích trapézového plechu.



Obrázek 14: Axonometrický pohled znázorňující speciální okrajové podmínky



Obrázek 15: Detail v oblasti levé podpory (deformovaná konstrukce – modrá)

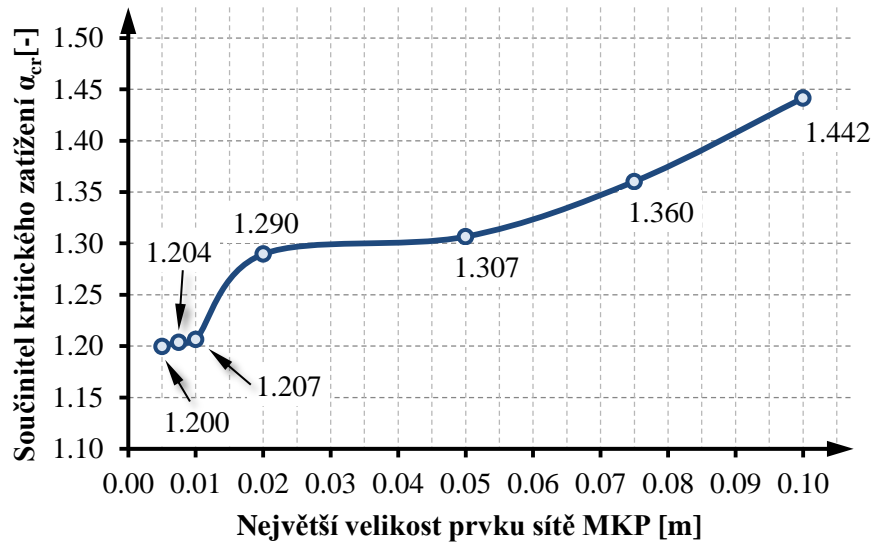


Obrázek 16: Detail v oblasti pravé podpory (deformovaná konstrukce – modrá)

Následně je model zatížen svislým zatížením a je provedena elementární kontrola deformace. Z *obr. 15,16* je patrné, že dochází pouze k natočení obou podpor, přičemž je respektována šířka podpory. U pravé podpory dochází ještě k posunu v podélném směru, což odpovídá definování posuvné podpory (BC-2). V příčném řezu nad levou ani pravou podporou nedochází ke vzájemnému posunutí žebírek trapézového plechu. Na základě této kontroly lze konstatovat, že definování všech okrajových podmínek je provedeno správně.

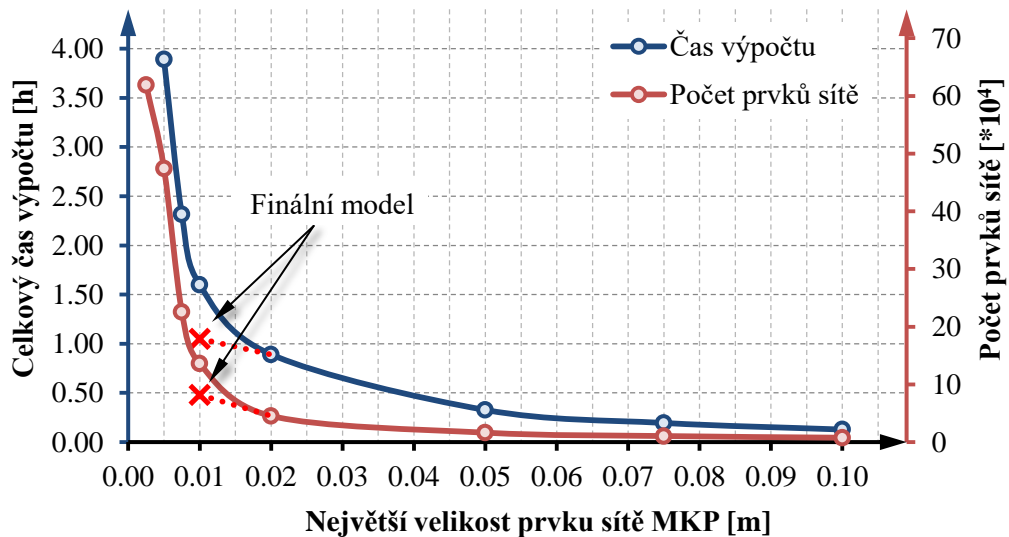
2.1.3 Síť MKP

Důležitým krokem při vytváření modelu je zvolení sítě konečných prvků. Velikost prvku sítě ovlivňuje jak velikost součinitele kritického zatížení (tj. násobku aplikovaného zatížení, které vede k prvnímu vlastnímu tvaru vybočení), tak i výpočet únosnosti trapézového plechu. Na *obr.17* je znázorněna závislost velikosti součinitele kritického zatížení na velikosti prvku sítě vycházející z provedené studie citlivosti pro model trapézového plechu TR153-290, tl. 1,25 mm.



Obrázek 17: Závislosti velikosti součinitele kritického zatížení na velikosti prvku sítě

Z grafu je zřejmé, že přesnost výpočtu se zvyšuje při zmenšování prvku sítě. Pro velikost prvku sítě od 0,1 m do 0,02 m je výpočet poměrně nepřesný, zatímco pro velikost prvku 0,01 m až 0,005 se rozdíl vypočtených hodnot liší pouze o několik tisícín. Velikost prvku sítě ale není jediným kritériem pro volbu sítě. Se snižující se velikostí prvku sítě velice rychle narůstá celkový počet prvků, tím pádem dochází ke zvýšení časové náročnosti výpočtu. Tato závislost je znázorněna na obr. 18. Je třeba podotknout, že výpočty jsou provedeny na výkonném stolním počítači. Na běžném počítači je výpočet minimálně 3x pomalejší.

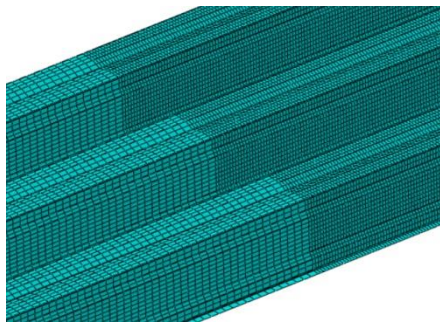


Obrázek 18: Závislost celkového času výpočtu a počtu prvků sítě na velikosti prvku sítě

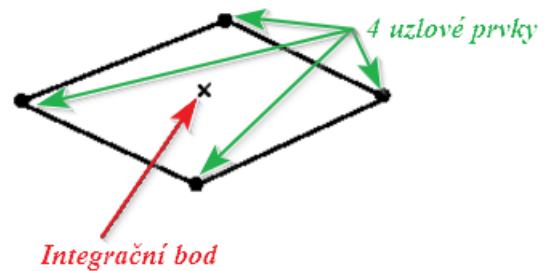
Pro další analýzu chování trapézového plechu je na základě výše uvedených skutečností vybrána největší velikost prvku sítě 0,01 m. Tento rozměr sítě je výhodný z hlediska přesnosti a časové náročnosti výpočtu.

Pro zrychlení výpočtu je provedena další úprava sítě, tj. uprostřed rozpětí je rozměr vzdálenost uzlů sítě čtvercový s délkou hrany 0,01 m, zatímco v ostatních částech modelu je rozměr oka obdélníkový s kratší hranou 0,01 m a delší hranou 0,04 m. Tato úprava sítě je znázorněna na obr. 19, Na obr. 18 je znázorněn čas výpočtu a počet prvků sítě pro tuto variantu (odkaz – finální model).

Pro úplnost je třeba zmínit, že vybraná síť pro MKP využívá deskostěnových prvků typu S4R, tj. 4 uzlových prvků s lineární aproximací a redukovanou integrací (S =stress/displacement shell; 4=number of nodes; R =reduced integration). Schéma prvku je znázorněno na obr. 20.



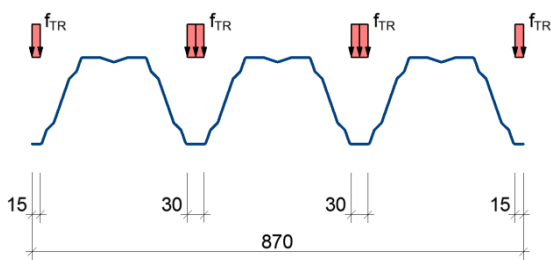
Obrázek 19: Ukázka zhuštění sítě pro MKP



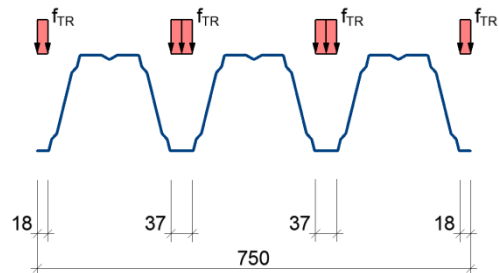
Obrázek 20: Schéma deskostěnového prvku typu S4R

2.1.4 Zatížení modelu

Model je zatížen podle schématu na obr. 21, 22. Záměrně je zatížena pouze dolní pásnice trapézového profilu tak, aby nedocházelo k případnému borcení stojiny. Model je cíleně přetížen hodnotou plošného zatížení $f_{TR} = 100 \text{ kN/m}^2$.



Obrázek 21: Schéma zatížení trapézového plechu TR153-290



Obrázek 22: Schéma zatížení trapézového plechu TR160-250HL

2.1.5 Zavedení imperfekcí

U štíhlých prvků či průřezů je třeba nezbytné zavedení imperfekcí. Ty přímo ovlivňují únosnost TR plechu. Imperfekce jsou do modelu zaváděny podle vlastních tvarů vybočení, které jsou softwarem stanoveny stabilitní analýzou (*Linear perturbation – Buckle*) metodou Lanczos.

Další možností je použití metody iterace podprostoru (*Subspace*). Tato metoda je pro daný typ profilu a jeho orientaci nevhodná, protože jsou nejdříve vypočteny záporné vlastní tvary odpovídající opačnému působení zatížení. Software bohužel u této metody neumožňuje stanovit pouze kladné vlastní tvary, proto byl pro orientaci proveden výpočet 50 vlastních tvarů. Výpočet byl časově mnohem náročnější a všechny vlastní tvary byly záporné, proto byla metoda podprostoru shledána jako nevhodná.

Spolu s určením tvaru imperfekce je důležité stanovení příslušných amplitud. Postup zavedení imperfekcí uváděný v Eurokódech uvádí několik způsobů stanovení amplitudy.

První možností je určení amplitudy podle ČSN EN 1993-1-5 tzv. **ekvivalentní geometrickou imperfekcí**, která lze použít, pokud není provedena podrobnější analýza geometrických a materiálových imperfekcí. Přesná hodnota pro lokální typ imperfekce, pro panel nebo subpanel s krátkou stranou b a pro tvar boulení se má stanovit podle vzorce



$$\delta_1 = \frac{b}{200} \quad (1)$$

kde b je šířka horní pásnice žebra trapézového plechu.

Podle ČSN EN 1993-1-5 lze také amplitudu imperfekce uvažovat jako 80% geometrických výrobních tolerancí. Hodnoty výrobních tolerancí jsou uvedeny v ČSN EN 1090-2 a jsou rozděleny na dva typy – základní výrobní tolerance a funkční výrobní tolerance.

Základní výrobní tolerance uvádí mezní hodnoty pro geometrické tolerance potřebné pro splnění návrhových předpokladů pro navrhování konstrukcí pro mechanickou únosnost a stabilitu. Hodnota dovolené úchytky lze pro za studena tvarované plošné průřezy stanovit podle vzorce

$$\Delta_1 = \pm \frac{b}{50} \quad (2)$$

kde b je opět šířka horní pásnice vlny trapézového plechu. Hodnotu amplitudy imperfekce lze tedy stanovit podle vzorce

$$\delta_2 = \frac{0,8 * b}{50} \quad (3)$$

Funkční výrobní tolerance uvádí hodnoty tolerance, které je možné požadovat pro dosažení jiné funkce než je zahrnuta v základních výrobních tolerancích (např. vzhled, přesnost provedení apod.). Pro stanovení hodnoty dovolené úchytky je zapotřebí konstrukci (nebo její část) klasifikovat do třídy 1 nebo třídy 2. Třída 1 je považována za vhodnou pro běžný návrh konstrukce, zatímco třída 2 je používána v případě vyšších nároků na konstrukci. V našem případě je zvolena třída 1, pro kterou lze hodnotu dovolené úchytky pro za studena tvarované průřezy stanovit podle vzorce

$$\Delta_2 = \pm \frac{D}{50} = \pm \frac{b}{50} \quad (4)$$

kde b je opět šířka horní pásnice vlny trapézového plechu. Ze vzorce je zřejmé, že amplituda imperfekce je po dosazení totožná s amplitudou δ_2 .

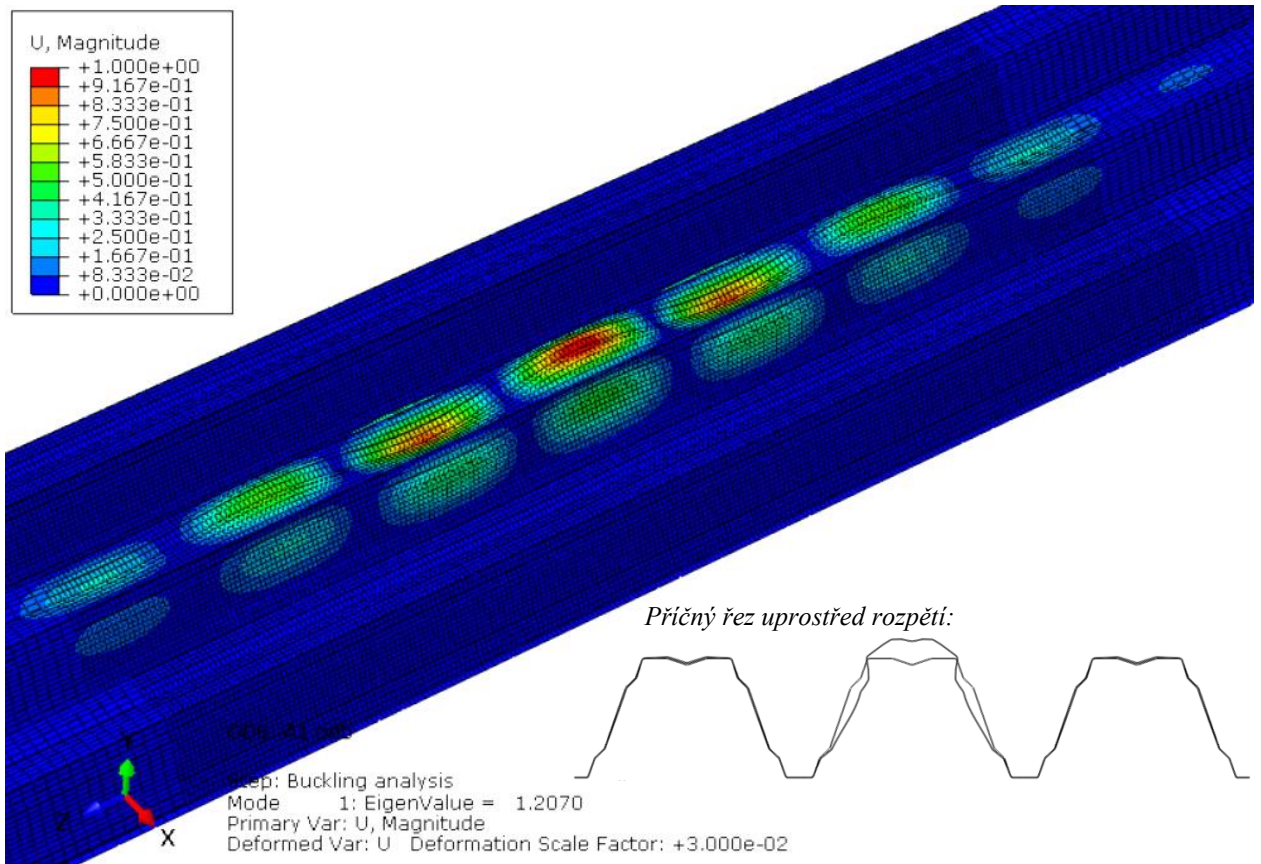
V následující tabulce (*tab. 1*) jsou uvedeny amplitudy imperfekcí pro jednotlivé profily.

Typ plechu	Tloušťka plechu	Šířka pásnice b	Amplituda δ_1	Amplituda δ_2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
TR153-290	1.25	110	0.55	1.76
TR153-290	0.75	110	0.55	1.58
TR160-250HL	1.25	99	0.50	1.58
TR160-250HL	0.75	99	0.50	1.58

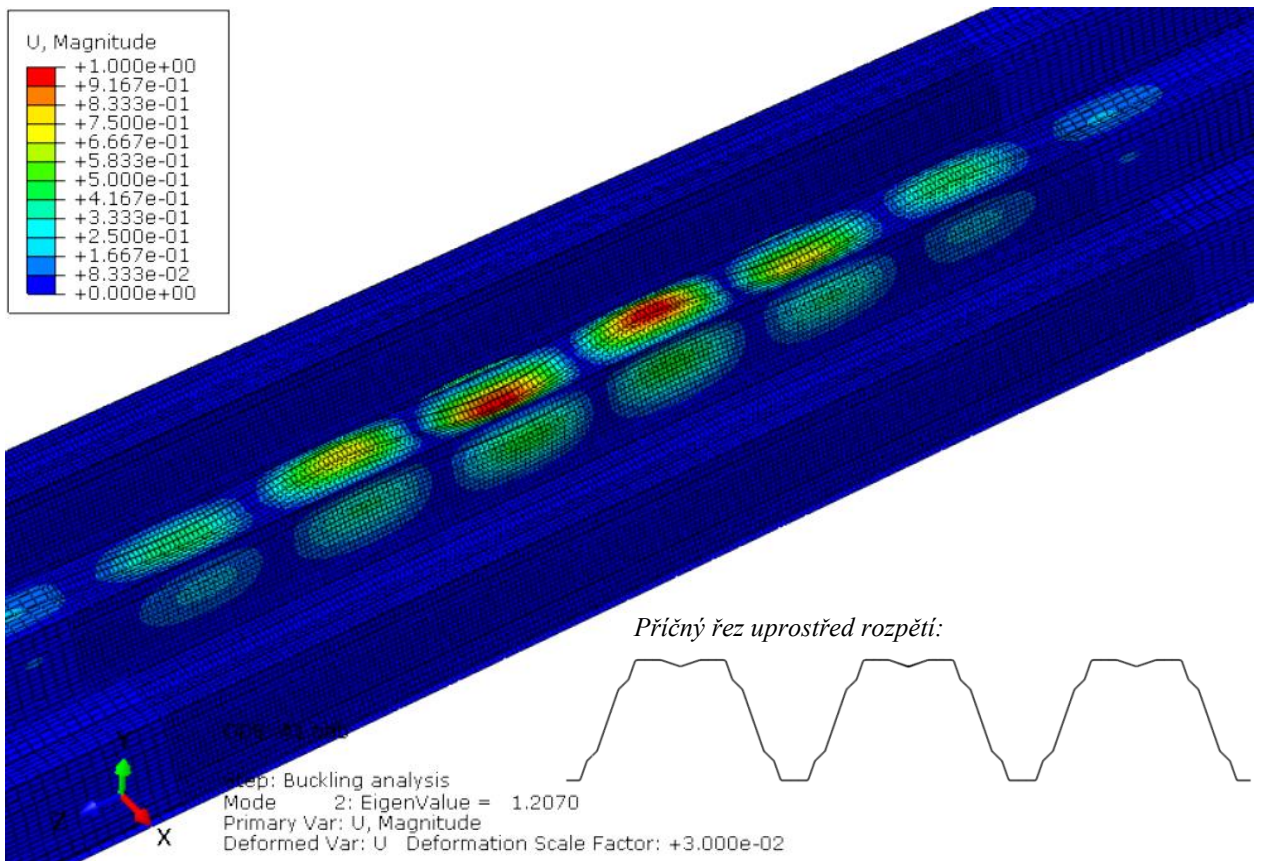
Tabulka 1: Přehled amplitud imperfekcí pro jednotlivé profily

Do softwaru je konzervativně zavedena amplituda imperfekce $\delta_2 = 1,76$ mm do směru tak, aby byla dosažena nejnižší únosnost. Vzhledem k jednoduchosti konstrukce a blízkosti jednotlivých vlastních tvarů (prakticky totožná hodnota α_{cr}) lze s jistotou tvrdit, že nejnepříznivější místo se nachází uprostřed rozpětí. Z tohoto důvodu jsou vlastní tvary vybočení vybírány tak, aby největší pořadnice sinusového průběhu boulení byla situována co nejblíže středu rozpětí (rozdíl v únosnosti ale není zcela zásadní).

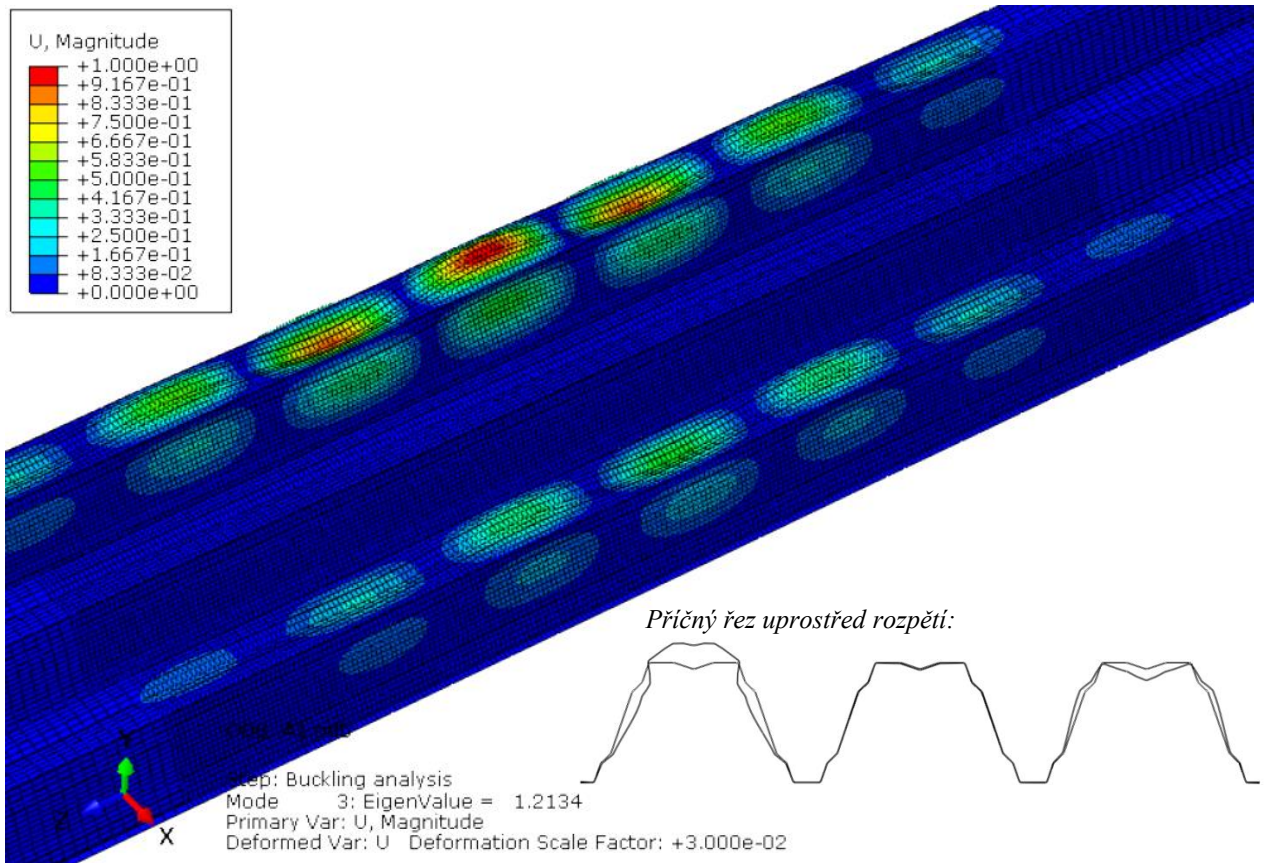
Na obr. 23-28 je znázorněno prvních 6 vlastních tvarů včetně příslušného příčného řezu uprostřed rozpětí



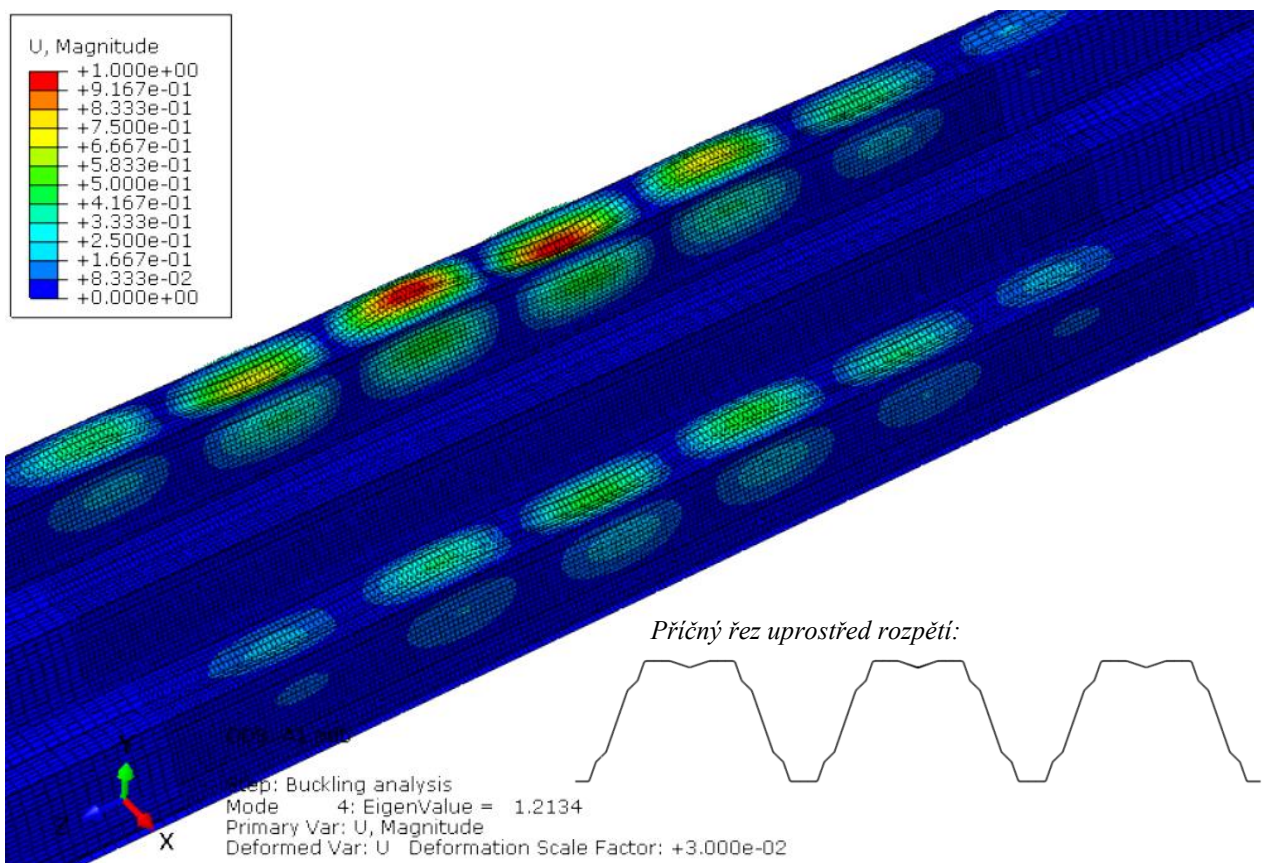
Obrázek 23: 1. vlastní tvar – vhodný tvar pro zavedení imperfekci



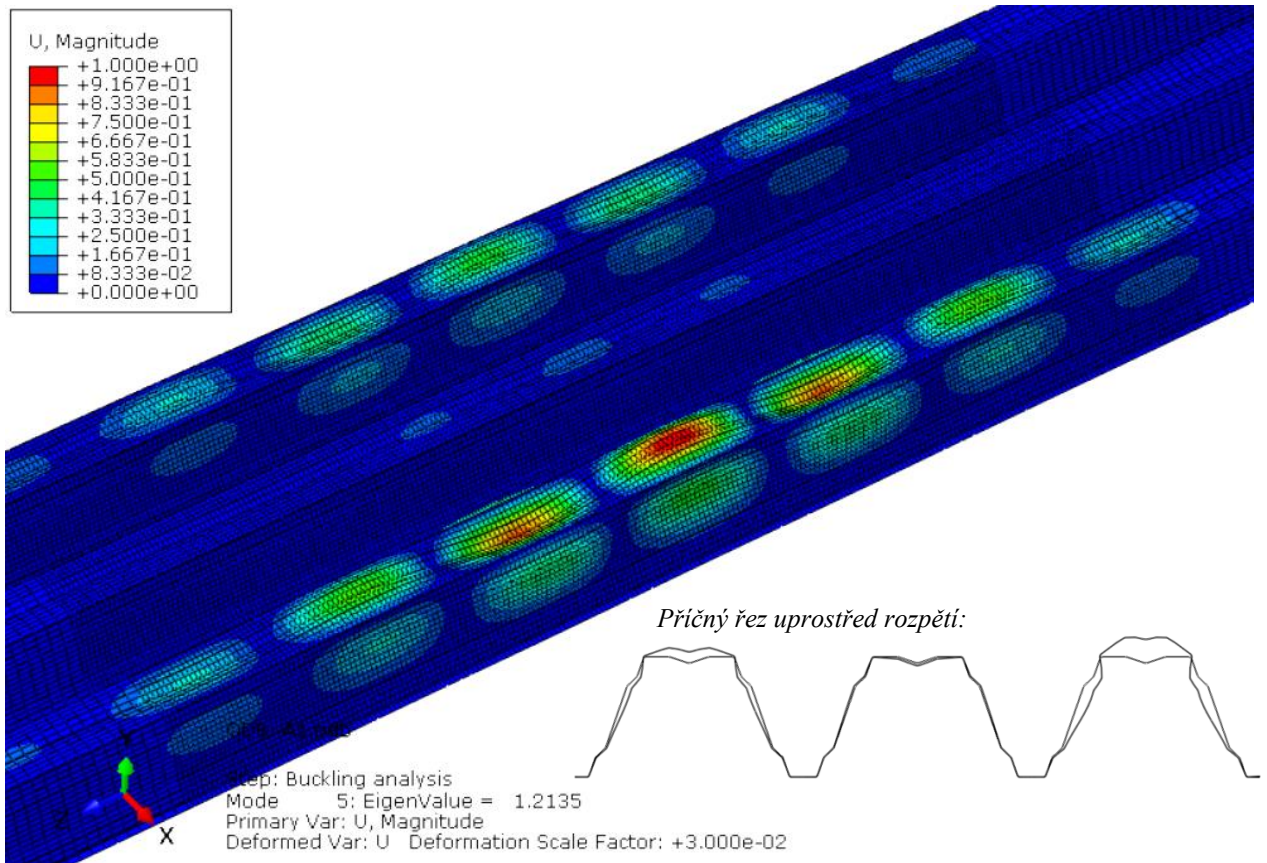
Obrázek 24: 2. vlastní tvar - nevhodný tvar pro zavedení imperfekci



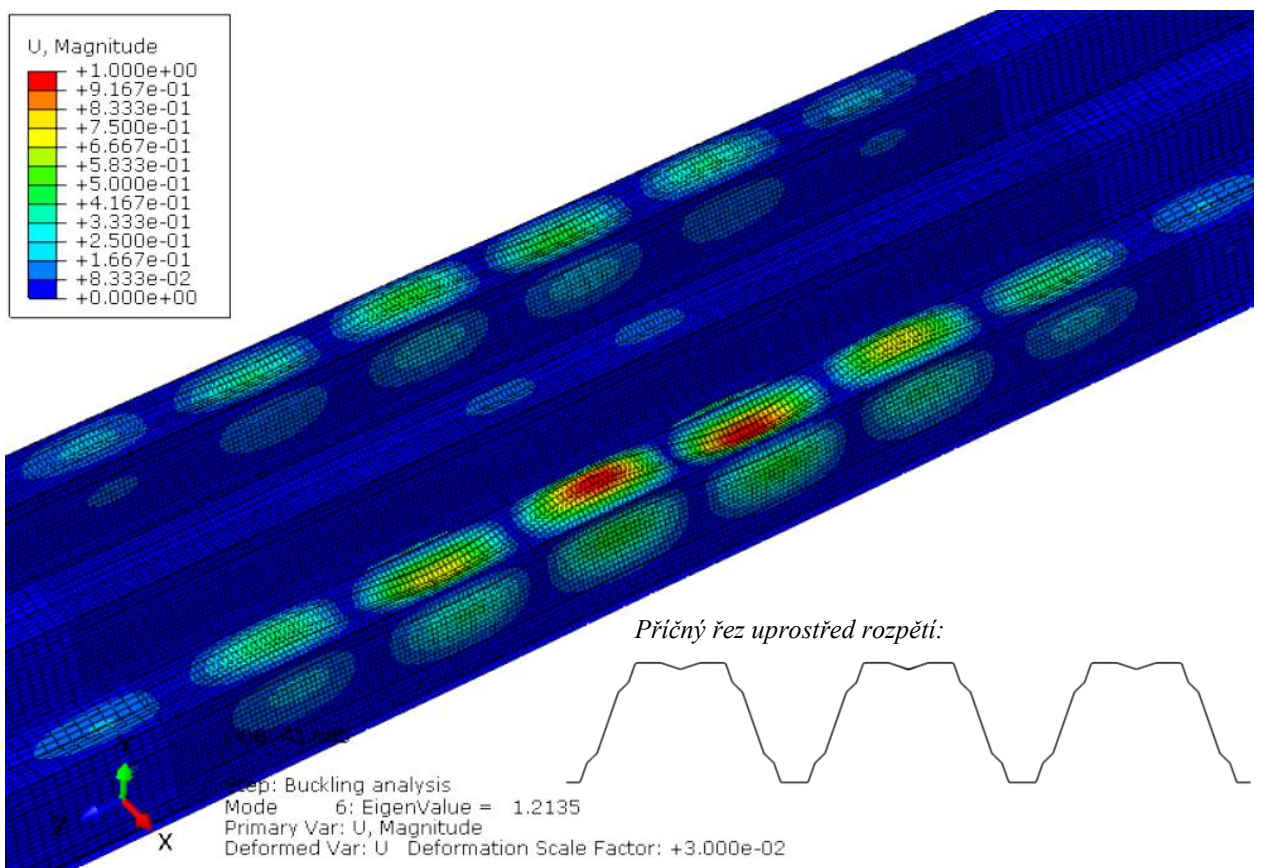
Obrázek 25: 3. vlastní tvar - vhodný tvar pro zavedení imperfekci



Obrázek 26: 4. vlastní tvar - nevhodný tvar pro zavedení imperfekci



Obrázek 27: 5. vlastní tvar - vhodný tvar pro zavedení imperfekcí



Obrázek 28: 6. vlastní tvar - nevhodný tvar pro zavedení imperfekcí

Vlastní tvary označené jako nevhodné pro zavedení imperfekcí (vlastní tvary č. 2, 4, 6) nesplňují podmínku nejvyšší pořadnice sinusového průběhu boulení uprostřed rozpětí, proto pro následné zavádění amplitud imperfekcí nejsou využity a jsou zde pouze zmíněny.

Amplituda imperfekce je do výpočtu zavedena pro vlastní tvary č. 1, 3, 5. Z příčných řezů je patrné, že u těchto vlastních tvarů dochází k distorznímu boulení horní výztuhy trapézového plechu. Jelikož se jedná o první vypočtené vlastní tvary, je zřejmé, že distorzní boulení je rozhodující.

Výpočet je proveden pro 50 vlastních tvarů, z nichž ani v jednom případě nebyl nalezen vlastní tvar odpovídající pouze lokálnímu boulení. Předpokládá se tedy, že lokální boulení nastane při významně vyšší hodnotě kritického napětí, než je hodnota kritického napětí pro distorzní boulení. Proto lze předpokládat velmi malý vliv zavedení tvaru odpovídajícího lokálnímu boulení na výslednou únosnost trapézového plechu.

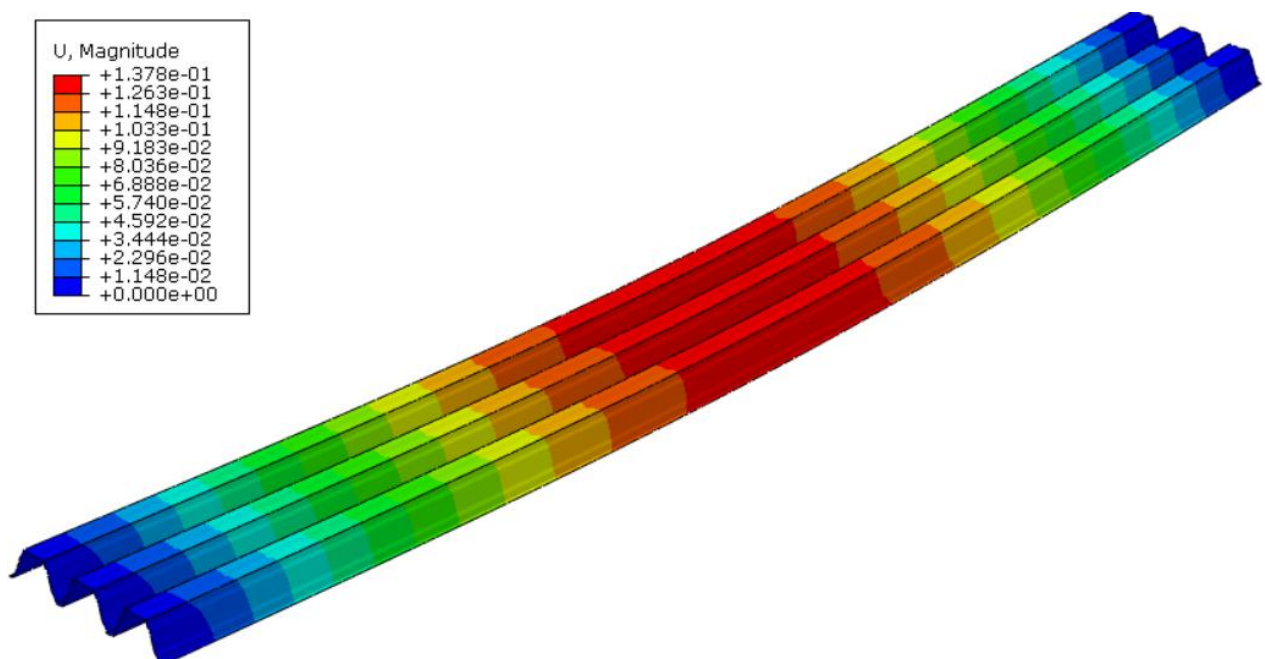
U vlastních tvarů, kde nastává boulení na obou krajních vlnách trapézového plechu najednou, dochází ke sčítání či odčítání amplitud v závislosti na tvaru sinusového průběhu boulení. Je třeba zdůraznit, že ve velikosti boulení obou vln je podstatný rozdíl.

2.1.6 Statická analýza

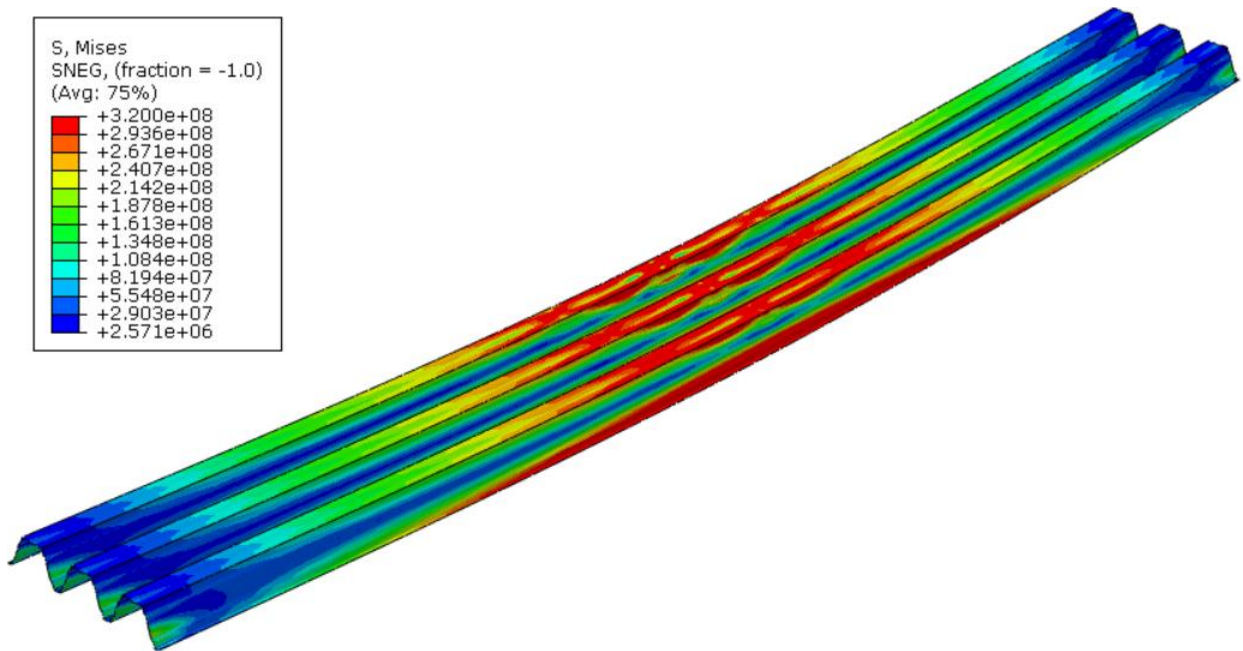
Dalším krokem je statická analýza, která je v odborné literatuře běžně označována jako GMNIA (*Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections*). Použitý software nabízí několik metod řešení.

První metoda je v softwaru označována jako metoda *Static, Riks* (známá rovněž jako metoda oblouku). Tato metoda je časově náročná, proto není pro analýzu použita. Její hlavní výhodou je možnost řešení nestabilních úloh, např. získání i sestupné zatěžovací větve (zatížení může i klesat).

Mnohem efektivnější metoda je v softwaru označována jako metoda *Static, General* (Newton-Raphsonova metoda). Jedná se o iterační výpočet, kdy je zatížení na model aplikováno po jednotlivých přírůstcích (*Increment*) až do dosažení maximální únosnosti konstrukce, kdy je výpočet zastaven. Na obr. 29, 30 jsou zobrazeny průběhy výsledků deformace a napětí pro trapézový plech TR153-290, tl. 1,25 mm.



Obrázek 29: Průběh deformací [m]



Obrázek 30: Průběhu napětí [Pa]

Během statické analýzy je také prověřen vliv zavedení rozdílných amplitud imperfekce do výpočtu (viz. tab. 2). V tabulce jsou uvedeny hodnoty únosností stanovené pomocí softwaru pro obě velikosti amplitud imperfekcí. Dále je provedeno porovnání hodnot únosnosti s vlivem větší amplitudy δ_2 ze softwaru s hodnotami únosností uváděnými výrobcem stanovené pomocí výpočtu dle ČSN EN 1993-1-3, dále je uvedeno porovnání s hodnotami únosností získanými ze statických zkoušek provedených výrobcem (pouze pro profil TR153-290). V numerických modelech je tloušťka uvažována bez povrchových úprav tj. o 0,04 mm menší.

Typ plechu	Tloušťka jádra plechu	Software Abaqus		Podklady výrobce			
		Max. únosnost s vlivem imperfekcí δ_1	Max. únosnost s vlivem imperfekcí δ_2	Max. únosnost - statické tabulky výrobce		Max. únosnost - statické zkoušky provedené výrobcem	
		[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	Rozdíl [%]	[kN/m ²]	Rozdíl [%]
TR153-290	1.21	4.716	4.553	3.560	21.81%	4.840	5.93%
TR153-290	0.71	2.530	2.192	1.920	12.41%	2.680	18.21%
TR160-250HL	1.21	5.779	5.452	5.530	1.40%	-	-
TR160-250HL	0.71	2.950	2.602	2.620	0.69%	-	-

Tabulka 2: Orientační porovnání únosností

Z porovnání výsledků je zřejmé, že použití amplitudy imperfekce δ_2 pro numerický model trapézového profilu TR153-290 je do jisté míry konzervativní, větší shody výsledků by bylo docíleno za použití amplitudy δ_1 . Na druhou stranu je patrné, že použití amplitudy imperfekce δ_2 pro druhý typ trapézového profilu TR160-250HL je poměrně výstižné. Pro oba typy profilů je tedy zvolena amplituda imperfekce δ_2 , která je používána ve všech dalších numerických modelech.

V tab. 3 je provedeno porovnání hodnot průhybů stanovených pomocí softwaru s hodnotami limitního průhybu, pro které jsou známé hodnoty zatížení ze statických tabulek výrobce. Na první pohled je vidět poměrně přesná shoda.



Typ plechu	Tloušťka plechu	Limitní průhyb L/200	Zatížení při průhybu L/200 - statické tabulky výrobce	Hodnota průhybu - software Abaqus	Rozdíl
	[mm]	[mm]	[kN/m ²]	[mm]	[%]
TR153-290	1.21	35	1.410	35.17	0.48%
TR153-290	0.71	35	0.800	35.29	0.82%
TR160-250HL	1.21	35	1.900	34.36	1.83%
TR160-250HL	0.71	35	1.170	36.12	3.10%

Tabulka 3: Orientační porovnání průhybů

3 Lokálně zatížené trapézové plechy

Tato kapitola je zaměřena na analýzu chování nosných trapézových plechů využívaných pro bezvanicové konstrukční systémy při lokálním zatížení. Jsou zde popsány nejčastější možnosti lokálního zatížení a možná úskalí při statickém návrhu, dále je popsán postup vytváření numerického modelu včetně validace se statickou zatěžovací zkouškou a statická zkouška pro ověření únosnosti závěsu ve vlně trapézového plechu. Je zde proveden i rozbor dvou dostupných matematických vztahů pro zjednodušený statický návrh trapézových plechů na lokální zatížení.

3.1 Příklady lokálního zatížení, statický návrh

Nosné trapézové plechy se dnes nejčastěji používají pro halové konstrukce. Jelikož se jedná o tenkostěnné za studena tvarované prvky, jsou konstrukce citlivější na působení lokálního zatížení oproti masivnějším konstrukcím. V praxi jsou trapézové plechy navrhovány z ekonomického důvodu na co možná největší využití (běžně až 100 %), avšak návrhový postup pro lokální zatížení je ještě do určité míry konzervativní – buď se lokální zatížení zjednodušeně nahrazuje konzervativní hodnotou plošného zatížení anebo se lokální zatížení přisuzuje pouze jedné vlně trapézového plechu.

V dnešní době je často kladen požadavek na umístění **solárních panelů** na střešní část konstrukce. Na trhu existuje nepřeberné množství jak liniových tak i bodových úchyťů (viz. obr. 31). Tyto úchyty jsou nejčastěji upevňovány samovrtnými šrouby do trapézových plechů ve spodní vrstvě skladby střechy nebo do pomocných tenkostěnných profilů. Rozteče úchyťů se u jednotlivých výrobců solárních panelů liší. Na obr. 32 je uveden příklad použití solárních panelů na výrobní hale, kdy solární panely zakrývají většinu plochy střechy. Vlastní hmotnost panelů se pohybuje okolo 20 kg, což nepředstavuje nijak velké zatížení po rozpočítání do jednotlivých úchyťů. Je však třeba si uvědomit, že veškeré proměnné zatížení je přenašeno solárními panely do míst úchyťů a tím pádem lokálně zatěžují trapézové plechy. Vzhledem k tomu, že výrobci vyžadují poměrně časté kotvení panelů, lze při statickém návrhu zjednodušeně uvažovat, že veškeré zatížení se přenáší plošně a hmotnost panelů je do výpočtu zavedena konzervativní hodnotou plošného zatížení stanovenou výrobcem. Tato problematika ale není hlavní náplní této práce, proto je zde rozebrána pouze okrajově.



Obrázek 31: Ukázka kotvení solárních panelů na střešní konstrukci [3],[4]



Obrázek 32: Ukázka instalace solárních panelů na halový objekt [5]

Mnohem častější příklad lokálního zatížení je použití **závěsů do vln trapézových plechů** např. pro zavěšení osvětlení, rozvodů vzduchotechniky, požární vody či vytápění nebo podhledových konstrukcí. Závěsy v ČR dodává několik firem, tvarově se ale jedná o téměř stejné výrobky. Jediné v čem se závěsy podstatně liší, je údaj o jejich maximální únosnosti. Například firma HILTI uvádí únosnost závěsu do trapézového profilu MF-TSH M8 $2,0\text{ kN}$ a MF-TSH M10 $3,5\text{ kN}$; firma Koňářik® závěsová technika a.s. uvádí únosnost závěsů TZ M8 i TZ M10 $1,3\text{ kN}$; firma Metalfix s.r.o. uvádí pouze své doporučení, že zatížení závěsu nesmí váhově převýšit povolené zatížení trapézového plechu a zároveň udává, že povolené zatížení je obvykle maximálně $0,6\text{ kN/m}^2$.

Na obr. 33 je zobrazen závěs MF-TSH M8 od firmy HILTI včetně popsání jednotlivých dílů. Tento závěs je použit i pro statické zatěžovací zkoušky.

Montáž těchto závěsů probíhá až po zhotovení hrubé stavby. Pro vytvoření otvorů do trapézového plechu jsou používány pákové kleště s razníky (viz. obr. 34). Zde je nutné podotknout, že pro tloušťky trapézových plechů 1 mm a více je proražení otvorů poměrně fyzicky náročné a pro samotný plech i nešetrné. Po vytvoření otvorů do stojin trapézového plechu je závěs upevněn pomocí závlačí. Jako závlač lze využít běžný šroub či kus závitové tyče. Dolní část závěsu je opatřena přivařenou maticí, do které se upevní závitová tyč.



Obrázek 33: Závěs HILTI MF-TSH M8

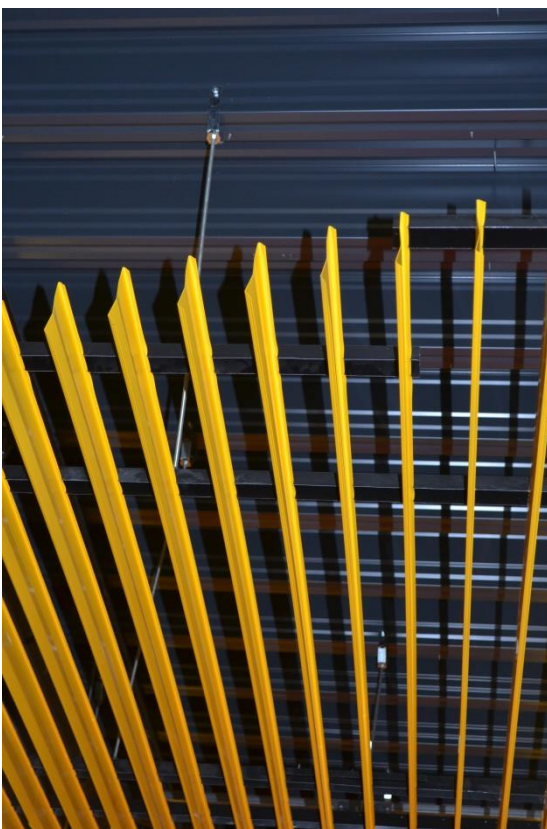


Obrázek 34: Pákové kleště s razníky[6]

Na obr. 35 je ukázka zavěšení podhledové konstrukce v prodejně SIKO Zličín, na obr. 36 je zobrazen detail zavěšení podhledu a jedno z dalších využití.



Obrázek 35: Zavěšení podhledové konstrukce



Obrázek 36: Detail zavěšení podhledové konstrukce a ukázka zavěšení VZT jednotky

Na rozdíl od zatížení solárními panely nebývá toto zatížení v době návrhu trapézových plechů dostatečně specifikováno, tudíž ve statických výpočtech není ani dostatečně zahrnuto.

Na *obr. 37* je znázorněn pohled ve výrobní hale, kde jsou na jedné vlně trapézového plechu zavěšena čtyři čerpadla, jejichž hmotnost je dohromady 100 kg a na sousední vlny trapézového plechu je ještě zavěšena příslušná armatura. Vzhledem k tomu, že během výstavby proběhla změna umístění čerpadel ze stěny do podhledu, není toto zatížení zahrnuto v původním statickém návrhu trapézových plechů. Za předpokladu, že je trapézový plech navržen na 100% využití, je pro něj toto zatížení poměrně významné. Bohužel není známo, zda je provedeno dodatečné posouzení trapézového plechu.

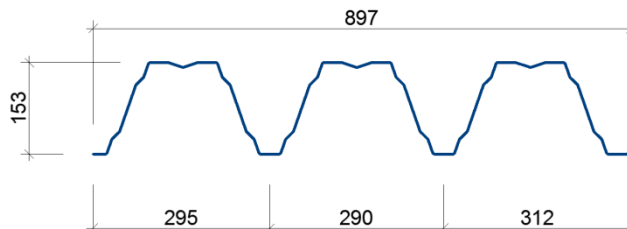


Obrázek 37: Ukázka zavěšení čerpadel o váze 100 kg

3.2 Numerický model trapézového plechu pro lokální zatížení

V první části je nejprve vytvořen numerický model pro trapézový plech TR153-290 tl. 0,75 mm, následně je ověřena správnost modelování validací s provedenou statickou zkouškou a poté jsou vytvořeny numerické modely pro ostatní typy trapézových profilů použitých pro parametrickou studii.

Postup vytvoření numerického modelu trapézového plechu pro lokální zatížení je obdobný jako pro plošné zatížení. Z důvodu následné validace modelu není geometrie profilu TR153-290 nijak upravena (viz. obr. 38), aby bylo dosaženo co možná největší shody výsledků.

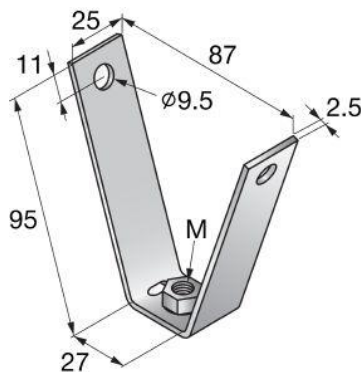


Obrázek 38: Trapézový plech TR 153-290 bez upravené geometrie

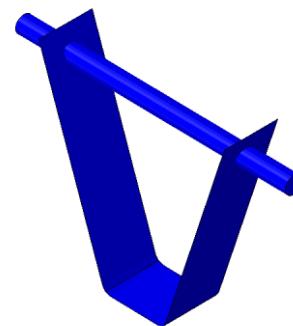
3.2.1 Modelování závěsu

V první části modelování závěsu se jevila jako nejjednodušší varianta nahradit závěs dvojicí sil, z nichž každá působí na příslušnou stojinu jedné vlny trapézového plechu. Dosažené výsledky však úplně neodpovídaly skutečnému chování závěsu ve vlně plechu, proto se ukázalo jako nejjednodušší vytvořit téměř přesnou geometrii závěsu včetně závlače.

Na obr. 39 je znázorněn závěs od firmy HILTI MF-TSH M8 včetně rozměrů, který je použit i pro statické zatěžovací zkoušky. Na obr. 40 je pro porovnání znázorněn model závěsu včetně závlače v softwaru Abaqus.

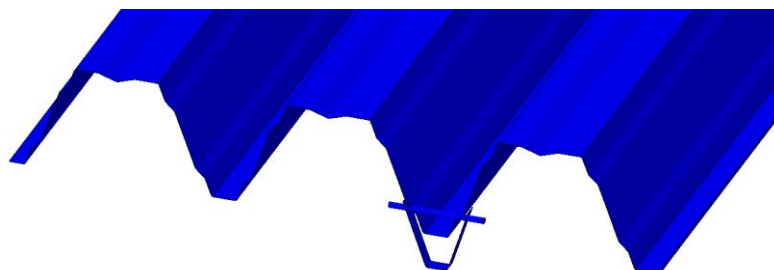


Obrázek 39: Závěs HILTI MF-TSH M8 včetně rozměrů [7]



Obrázek 40: Vytvořený model závěsu

Závěs je modelován pomocí deskostěnového prvku (*shell*) s importovanou geometrií pomocí formátu iges obdobně jako samotný trapézový plech. Závlač je definována jako tuhý prvek (*solid*) válcového tvaru s poloměrem 4 mm a délkou 130 mm odpovídající závitové tyči či šroubu M8. Na obr. 41 je znázorněn výsek trapézového plechu se závěsem v mezilehlé vlně.



Obrázek 41: Výsek trapézového profilu s umístěným závěsem

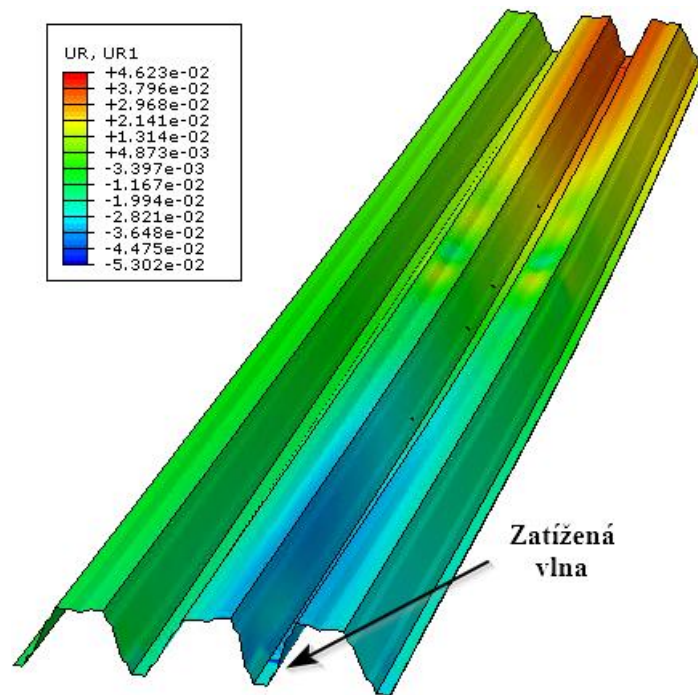
3.2.2 Použitý materiál

Pro trapézový plech je materiál definován stejným způsobem jako v předchozí kapitole (kap. 2.1.1).

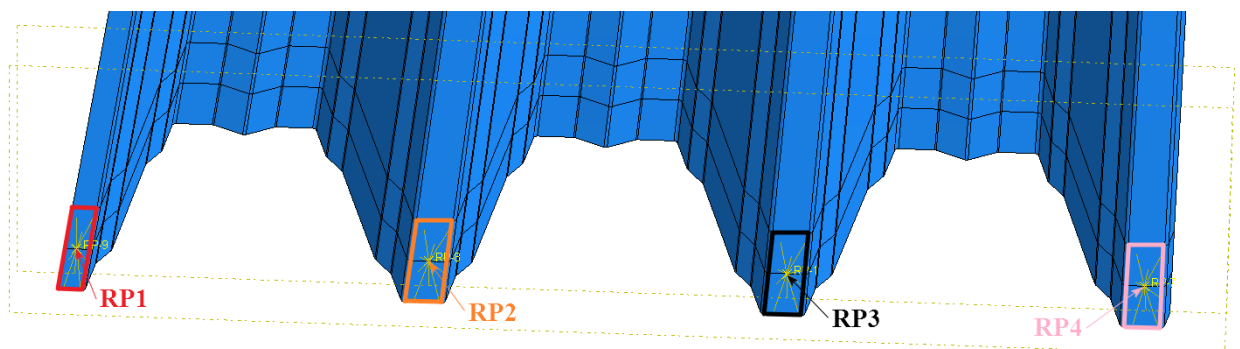
Vzhledem k tomu, že model trapézového plechu se závěsem je určen pouze pro analýzu distribuce zatížení do jednotlivých vln, jsou materiály pro závlač a závěs zjednodušeně definovány modulem pružnosti $E = 210$ GPa a součinitelem příčné roztlačnosti $\nu = 0,3$.

3.2.3 Zavedení okrajových podmínek

Pro model trapézového profilu jsou zavedeny stejné typy podpor jako v kapitole 2.1.2, pouze je zapotřebí předdefinovat speciální okrajové podmínky respektující šířku podpory. Pro model plošně zatíženého trapézového plechu je definováno stejné natočení pro každou vlnu trapézového plechu na obou koncích. Při zatížení modelu lokální silou dochází k různým průhybům jednotlivých vln trapézového plechu, většího průhybu dosahuje přímo zatížená vlna oproti vlnám sousedním, což způsobuje rozdílná natočení v oblasti podpor (viz. obr. 42). Z tohoto důvodu jsou okrajové podmínky (*Constraint – Kinematic Coupling*) předdefinovány odděleně pro každou vlnu (viz. obr. 43).



Obrázek 42: Výsledky natočení kolem příčné osy podpory



Obrázek 43: Ukázka předdefinování okrajové podmínky

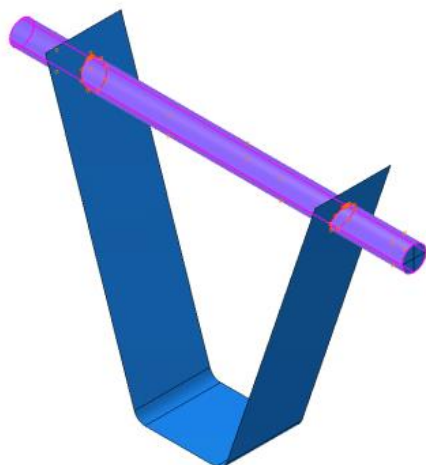
Dále je zapotřebí určit okrajové podmínky pro závěs. Mezi **závlačí a samotný závěsem** je použit další typ okrajových podmínek (*shell-to solid coupling*), kdy pro hrany plochy prvního tělesa (*shell edge surface*) jsou vybrány hrany otvoru v závěsu a pro plochy druhého tělesa (*solid face region*) je vybrána válcová plocha závitové tyče (viz. obr. 44). Toto definování odpovídá neposuvnému spojení mezi závlačí a závěsem, které nemusí ve všech případech odpovídat skutečnosti, ale pro následující analýzu je tento předpoklad vyhovující.

Stejný typ okrajové podmínky je použit i mezi **trapézovým plechem a závlačí**. Pro hrany plochy prvního tělesa jsou vybrány hrany v dolní polovině otvoru trapézového plechu a jim odpovídající část válcové plochy závlače (viz. obr. 45). Takto definovaná okrajová podmínka poměrně přesně vystihuje skutečné chování závlače vůči trapézovému plechu. Při působení zatížení může dojít ke zvětšení otvoru v trapézovém plechu vlivem otlacení závlačí.

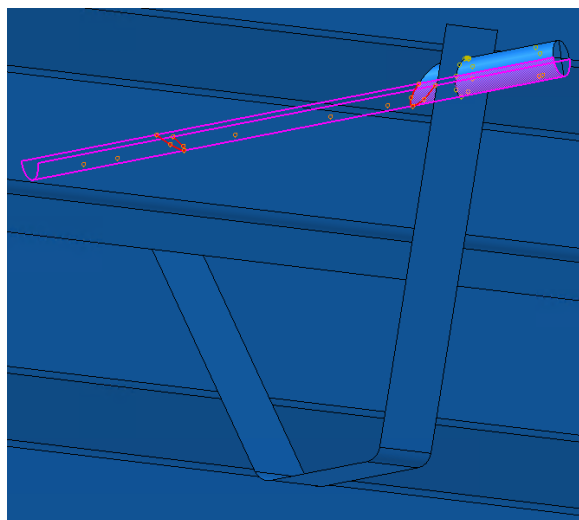
3.2.4 Síť MKP

Pro trapézový plech je vytvořena síť konečných prvků, kde základní velikost prvku sítě 0,02 m. V oblasti závěsu je síť zhuštěna a velikost prvku nepřesahuje velikost 0,01 m (viz. kap. 2.1.3).

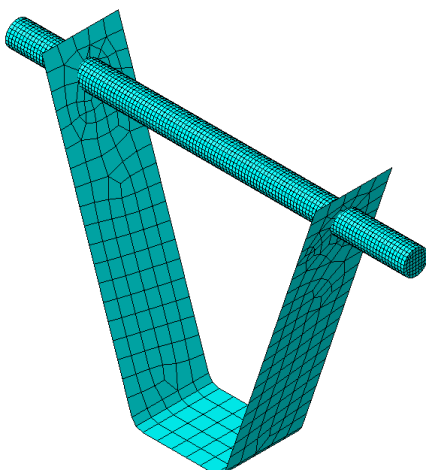
Síť prvků pro závlač je automaticky generována softwarem a její velikost je nastavena na 0,001 m vzhledem k velikosti prvku. Pro závěs je síť taktéž automaticky generována programem s velikostí 0,005 m. Z obr. 46 je patrné, že velikost sítě je dostačující.



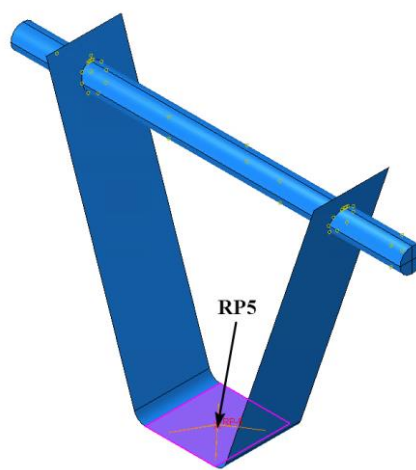
Obrázek 44: Spojení mezi závlačí a závěsem



Obrázek 45: Spojení mezi závlačí a trapézovým plechem



Obrázek 46: Zvolená síť prvků pro závěs



Obrázek 47: Zjednodušení skutečného závěsu

3.2.5 Zatížení modelu

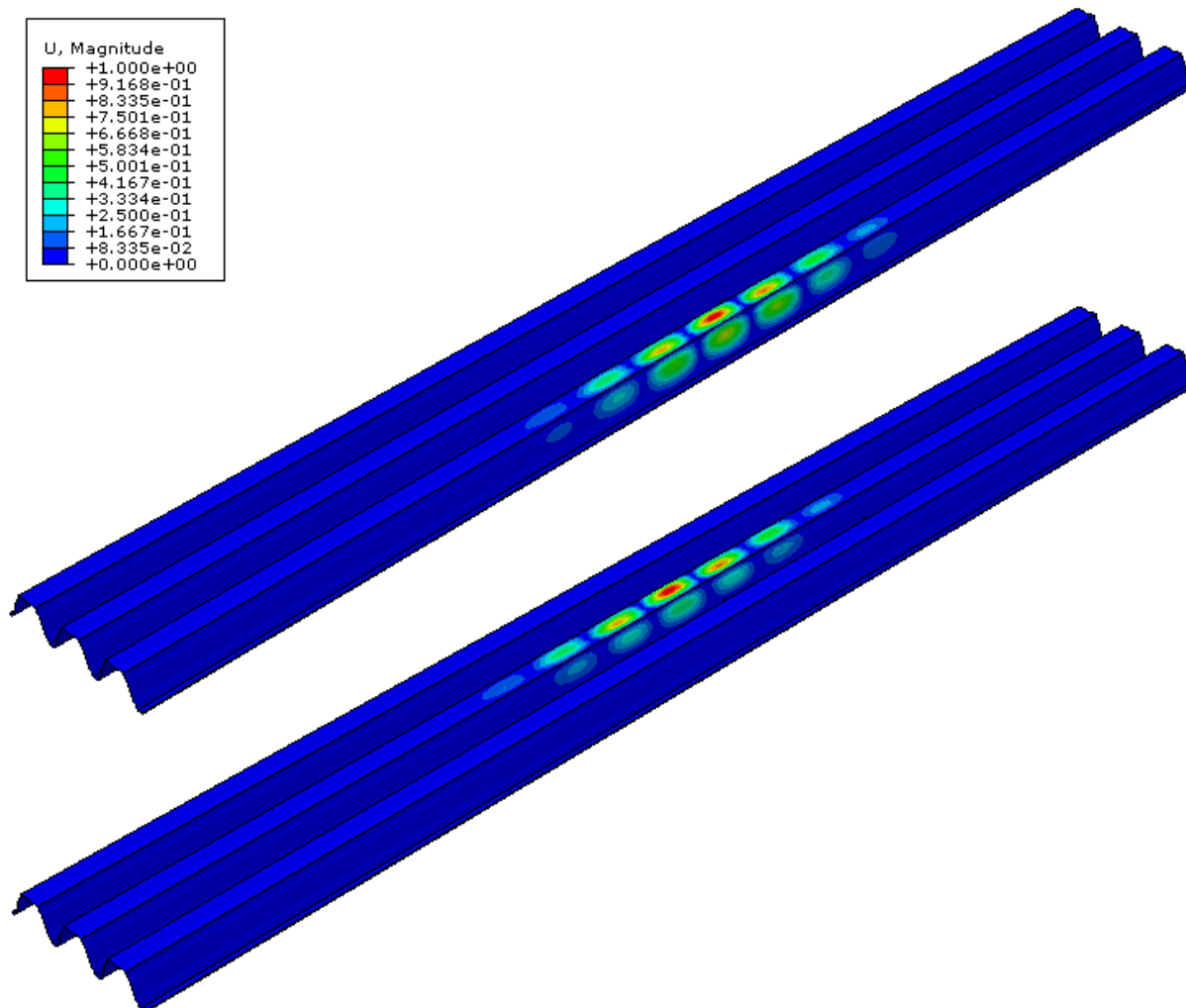
V reálném závěsu je v dolní části přivařena matice, na kterou je následně připevněna závitová tyč nesoucí příslušné zatížení. Proto je v této ploše vytvořen referenční bod roviny (*Reference point – RP5*), ke kterému je vztažena označená plocha (viz. obr. 47). Následně je do modelu zadáváno zatížení pomocí lokální síly (*Concentrated force*) působící právě v tomto bodě.

3.2.6 Zavedení imperfekcí

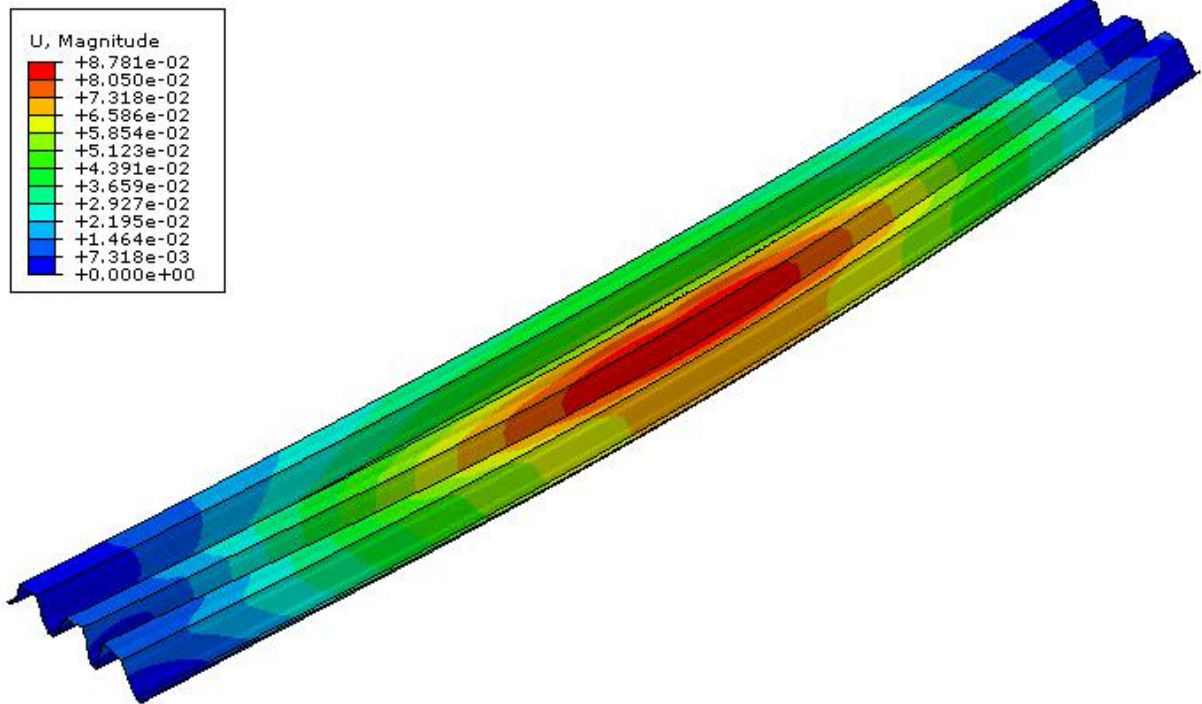
Imperfekce jsou do modelu zavedeny stejným postupem, jaký je uveden u numerického modelu plošně zatíženého trapézového plechu (viz. kap. 2.1.7).

3.2.7 Předběžná kontrola výsledků

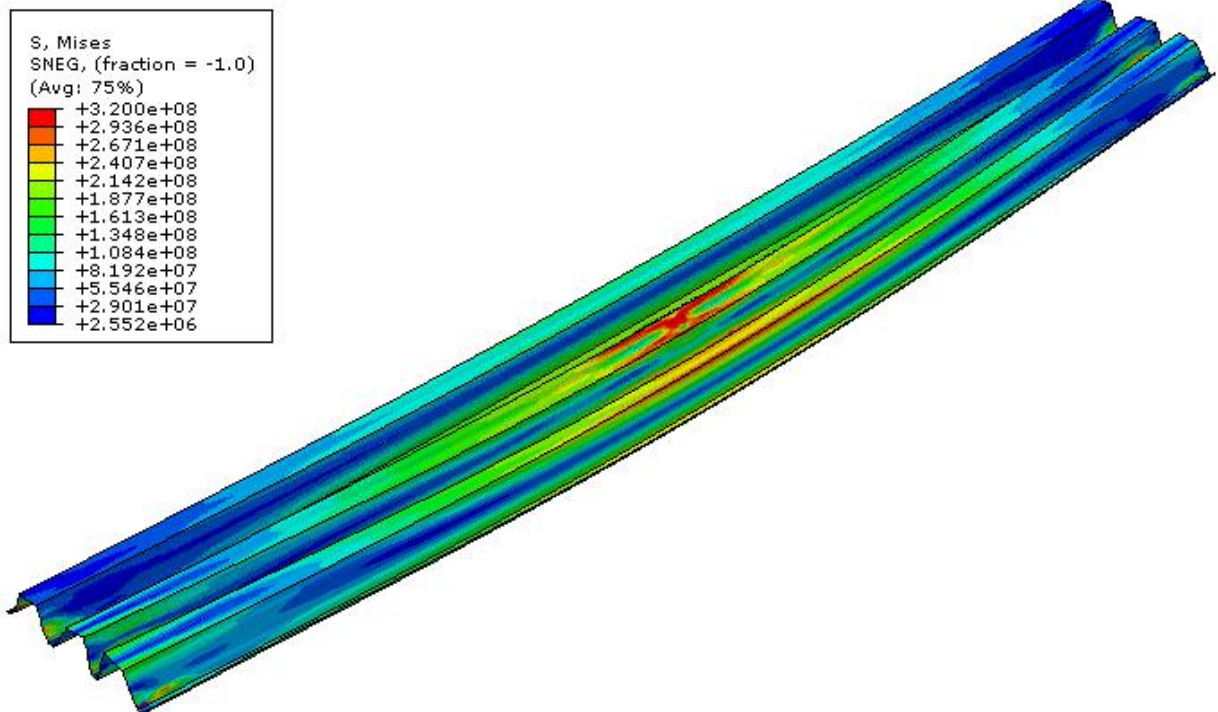
Na obr. 48 jsou znázorněny vhodné vlastní tvary pro zavedení imperfekce. Na obr. 49,50 jsou prezentovány výsledky průhybů a napětí pro model trapézového plechu TR153-290 tl. 0,75 mm se čtyřmi závěsy s roztečí 1,0/0,5/1,0 m umístěnými centricky po délce plechu včetně zavedení příslušných imperfekcí. Z příložených výsledků lze konstatovat, že jsou reálné.



Obrázek 48: Vybrané vlastní tvary 8. a 29. pro zavedení imperfekcí



Obrázek 49: Průběh deformací [m]



Obrázek 50: Průběh napětí [Pa]

3.3 Laboratorní zkoušky

Součástí diplomové práce jsou laboratorní zkoušky. Celkem jsou provedeny dvě statické zatěžovací zkoušky a jedna doprovodná materiálová zkouška. Pro zkoušky jsou použity celkově čtyři typy trapézových plechů o různých tloušťkách od firmy ArcelorMittal. Použité typy plechů jsou rozepsány u příslušných zkoušek v následujících kapitolách.

Všechny zkoušky byly provedeny v Experimentálním centru fakulty stavební ČVUT v prosinci 2016.

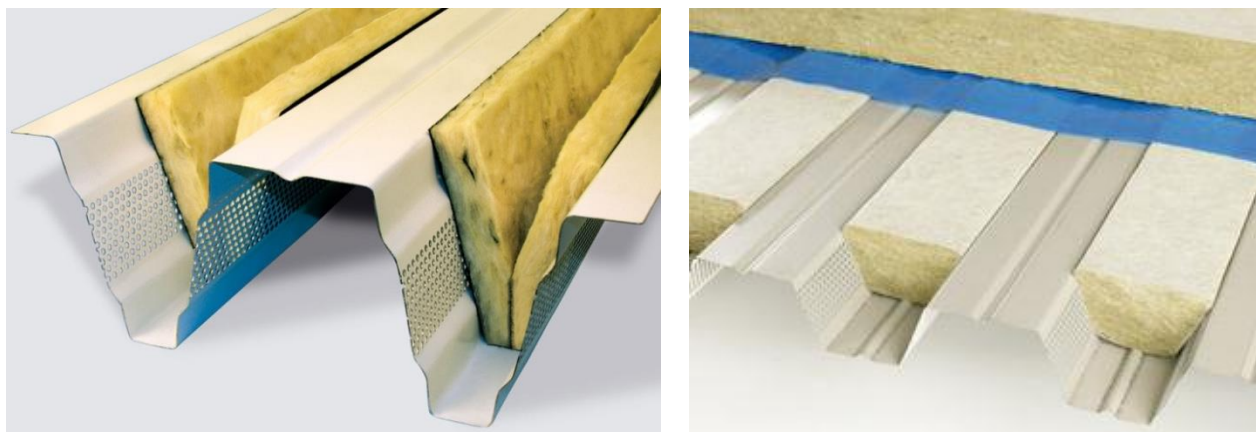
3.3.1 Statická zkouška – stanovení únosnosti vlny plechu se závěsem

3.3.1.1 Cíl zkoušky

Cílem zkoušky je stanovení únosnosti závěsu ve vlně trapézového plechu různých tlouštěk a určení nejslabšího místa samotného závěsu, dále z dosažených výsledků doporučit výpočetní postup pro zjednodušené určení mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti závěsu ve vlně trapézového plechu.

3.3.1.2 Průběh zkoušky

Pro zkoušku jsou použity běžné trapézové profily typu TR153-290 o tloušťce 0,75 mm, 1,00 mm a 1,25 mm a typu TR160-250HL o tloušťce 1,00 mm a 1,25 mm. Dále jsou pro zkoušku použity trapézové profily TR153-290 a TR160-250HL o tloušťce 1,00 mm a 1,25 mm s perforací tzv. *akustické profily*. Akustické profily se používají pro zlepšení akustických vlastností vnitřního prostředí. Jedná se o nosné trapézové plechy s perforovanou stojinou, popřípadě o celoplošně perforované nenosné trapézové plechy (nejsou použity pro laboratorní zkoušku). Podstatou zlepšení akustických vlastností je umístění pohltivého materiálu (např. minerální izolace) do vln trapézového plechu (viz. obr. 51).



Obrázek 51: Ukázka použití trapézových profilů s perforací [8], [9]

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, pro statickou zkoušku jsou použity závěsy od firmy HILTI typ MF-TSH M8 s deklarovanou hodnotou únosnosti 2,0 kN. Jako závlač je použit běžný šroub M8x120 zajištěn maticí M8.

Pro každý typ plechu jsou vyrobeny tři vzorky o délce 550 mm a šířce 290 mm (pro TR153-290) resp. 250 mm (pro TR160-250HL), do kterého je vždy upevněn jeden závěs (viz. obr. 52).

V tab. 4 je uveden přehled jednotlivých vzorků včetně označení, tloušťky, počtu a typu plechu. Perforované plechy jsou navíc označeny písmenem P (červená oblast tabulky).



Obrázek 52: Přípravené vzorky před zkouškou – konkrétně typ TR153-290P tl. 1,25 mm

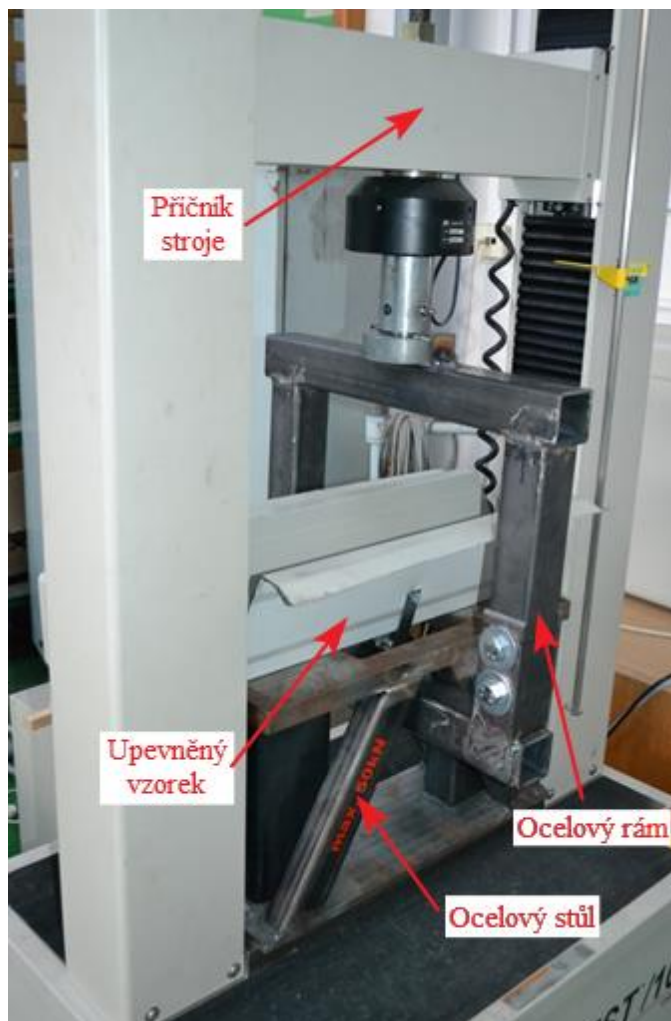
Označení vzorku	Typ plechu	Tloušťka [mm]	Počet [ks]
(1)	TR153-290	1.00	3x
(2)	TR153-290	0.75	3x
(3)	TR153-290	1.25	3x
(4)	TR160-250HL	1.00	3x
(5)	TR160-250HL	1.25	3x
(6)	TR153-290P	1.00	3x
(7)	TR153-290P	1.25	3x
(8)	TR160-250HLP	1.00	3x
(9)	TR160-250HLP	1.25	3x

Tab. 4: Přehled zkoušených vzorků

Vzorky jsou testovány na zkušebním stroji MTS QTEST/100 a výsledky jsou elektronicky zaznamenávány. Zkušební stroj je doplněn o pomocný ocelový stůl s otvorem a dvoudílný ocelový rám upevněný na posuvný příčník stroje (viz. obr. 53-58).



Obrázek 53: Zkušební stroj MTS QTEST/100



Obrázek 54: Uchycení zkušebního vzorku



Obrázek 55: Uchycení zkušební vzorku (pohled z druhé strany)



Obrázek 56: Detail spodní části závěsu



Obrázek 57: Celkový pohled na uchycení zkušební vzorku

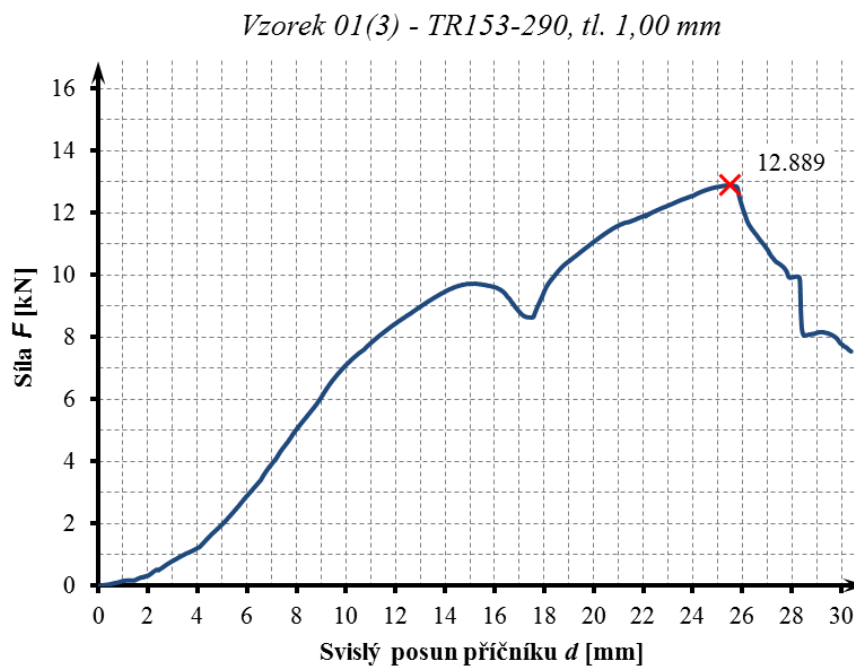


Obrázek 58: Detail uchycení závitové tyče závěsu k pomocnému ocelovému rámu

Na začátku každé zkoušky je vzorek opatřený závěsem centricky umístěn na ocelový stůl s otvorem a poté je upevněn závitovou tyčí M8 našroubovanou zesponu pomocného ocelového rámu do závěsu. Následně je zahájen pohyb příčnicku stroje směrem dolů a tím je na závěs vyvozena tahová síla.

3.3.1.3 Výsledky zkoušky

Na obr. 59 je znázorněn typický průběh výsledků zkoušky (konkrétně pro třetí vzorek trapézového plechu TR 153-290 tl. 1,00 mm). Zpočátku je nárůst působící síly na vzorek pozvolný, což je způsobeno dotlačováním vŕlí ve spojích pomocného ocelového rámu a v místech uchycení závěsu v trapézovém plechu i v ocelovém rámu. Po dotlačení působící tahová síla narůstá mnohem rychleji. Z grafu je patrný náhlý pokles síly, který je způsoben mírným rozevřením vlny plechu. Tento pokles trvá do okamžiku, kdy se vzorek opře o pomocný ocelový rám. Následně dochází k dosažení maximální hodnoty působící síly. Tento bod je označen jako maximální hodnota příslušného vzorku pro mezní stav únosnosti.



Obrázek 59: Typický průběh zkoušky pro stanovení únosnosti závěsu ve vlně plechu

V tab. 5 jsou uvedené maximální hodnoty pro mezní stav únosnosti každého zkoušeného vzorku.

Ozn.	Typ plechu	Tloušťka [mm]	Hodnota pro MSÚ vzorku [kN]		
			01	02	03
(1)	TR153-290	1.00	12.234	11.482	12.889
(2)	TR153-290	0.75	7.939	7.969	8.114
(3)	TR153-290	1.25	15.276	15.558	15.191
(4)	TR160-250HL	1.00	14.422	12.015	12.719
(5)	TR160-250HL	1.25	16.713	16.554	19.435
(6)	TR153-290P	1.00	10.035	9.121	9.59
(7)	TR153-290P	1.25	14.255	14.819	14.504
(8)	TR160-250HLP	1.00	10.234	10.227	10.245
(9)	TR160-250HLP	1.25	16.133	16.028	14.964

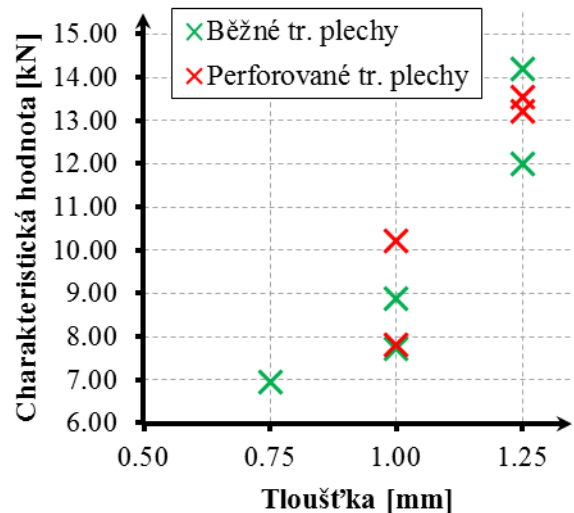
Tab.5: Přehled naměřených hodnot pro jednotlivé typy profilů



Výsledky zkoušky jsou vyhodnoceny podle ČSN EN 1993-1-3. Naměřené hodnoty jsou upraveny tak, aby byly zohledněny rozdíly mezi skutečně změřenými vlastnostmi a jejich jmenovitými hodnotami. Skutečné změřené vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 3.3.3 *Doprovodná materiálová zkouška*. Charakteristická hodnota tahové síly je určena statisticky podle výše zmíněné normy s použitím hodnoty koeficientu kvantilu charakteristické hodnoty k_n pro 5% charakteristickou hodnotu uvedenou v normě ČSN EN 1990 ed.2 pro neznámý variační koeficient veličiny.

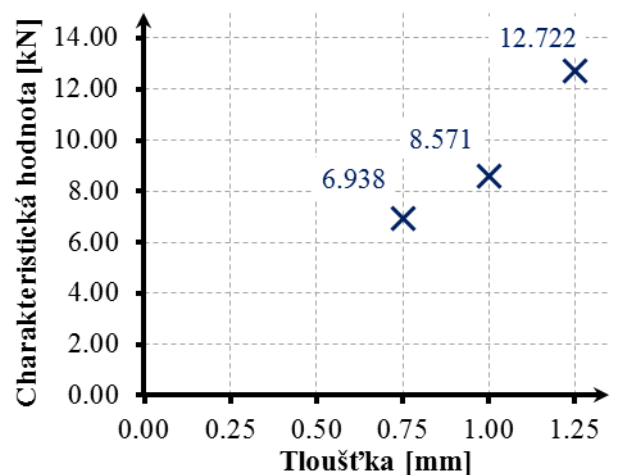
V následující tabulce (viz. obr. 60) jsou uvedeny výsledky vyhodnocení tří vzorků v rámci každého typu trapézového plechu. Z výsledků je patrné, že vliv perforace na únosnost závěsu je zanedbatelný, proto je dále provedeno vyhodnocení výsledků zkoušky v závislosti na tloušťce trapézového plechu (viz. obr. 61).

Ozn.	Typ plechu	Tloušťka [mm]	Char. hodnota [kN]
(1)	TR153-290	1.00	8.880
(2)	TR153-290	0.75	6.938
(3)	TR153-290	1.25	14.190
(4)	TR160-250HL	1.00	7.735
(5)	TR160-250HL	1.25	12.002
(6)	TR153-290P	1.00	7.796
(7)	TR153-290P	1.25	13.225
(8)	TR160-250HLP	1.00	10.205
(9)	TR160-250HLP	1.25	13.529



Obrázek 60: Přehled výsledků vyhodnocených v rámci každého typu trapézového profilu

Ozn.	Typ plechu	Tloušťka [mm]	Char. hodnota [kN]
(2)	TR153-290	0.75	6.938
(1)	TR153-290	1.00	8.571
(4)	TR160-250HL	1.00	
(6)	TR153-290P	1.00	
(8)	TR160-250HLP	1.00	
(3)	TR153-290	1.25	12.722
(5)	TR160-250HL	1.25	
(7)	TR153-290P	1.25	
(9)	TR160-250HLP	1.25	



Obrázek 61: Přehled výsledků vyhodnocených v rámci tlouštěk plechu

Při laboratorních zkouškách u všech vzorků docházelo k otláčení otvoru pro závlač v trapézovém plechu (viz. obr. 62) a k deformaci spodní části závěsu (viz. obr. 63).

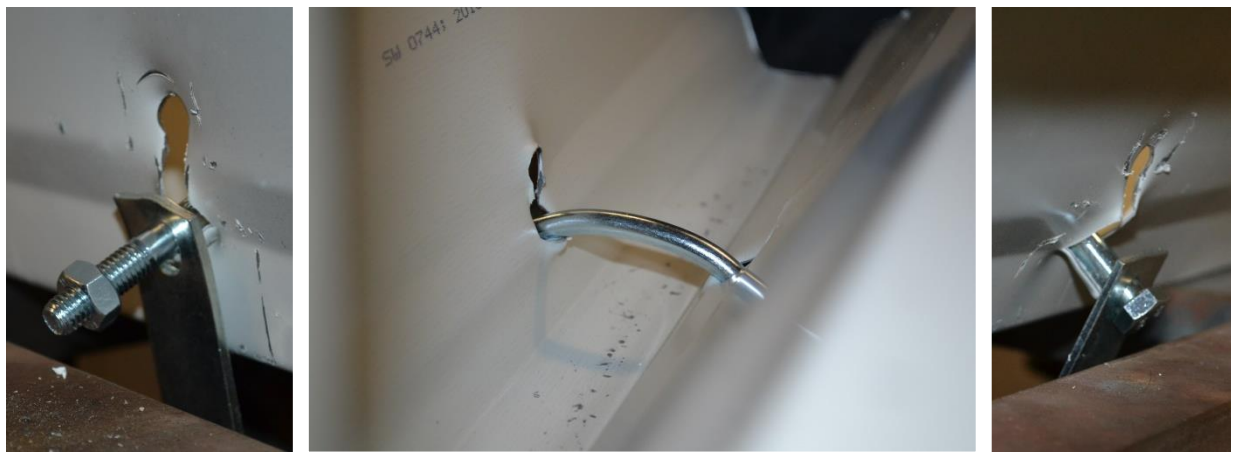
U profilů tloušťky 1,25 mm navíc docházelo k plastické deformaci závlače. Tento stav nastal po předchozím viditelném otláčení otvoru v trapézovém plechu až do úrovně první výztuhy, kdy docházelo ke zvětšení momentového namáhání závlače vlivem zúžení vlny profilu (viz. obr. 64). Ve dvou případech dokonce došlo k vytržení závlače ze závěsu (viz. obr. 65).



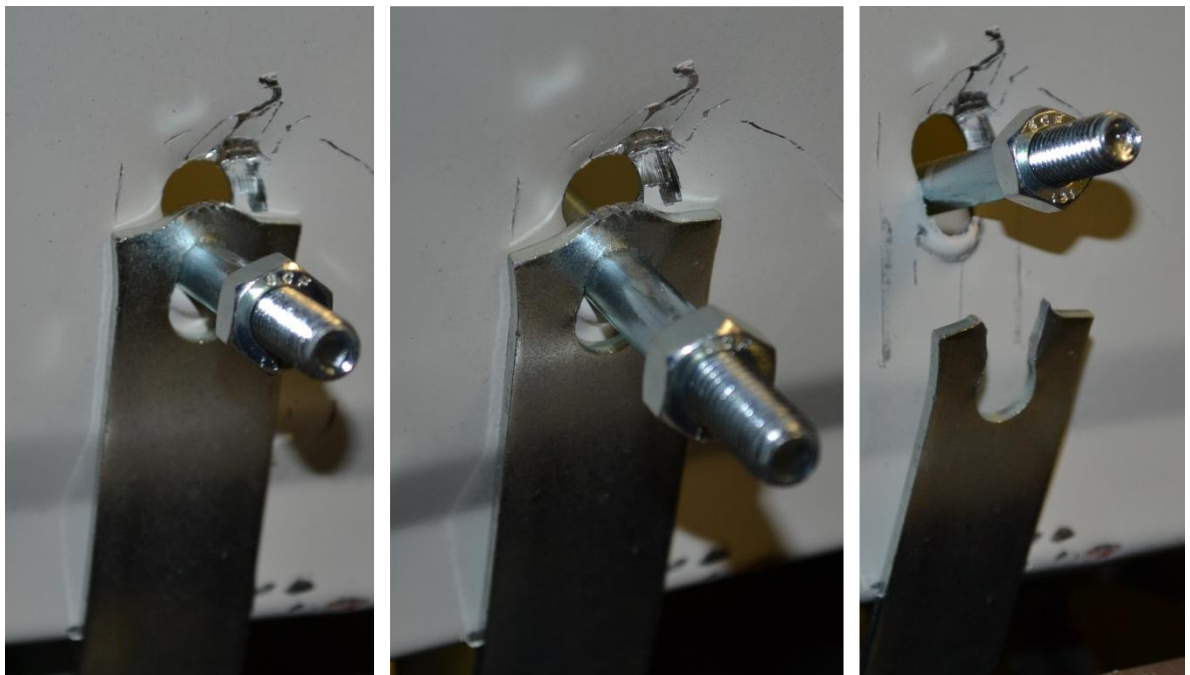
Obrázek 62: Otláčení otvoru pro závač (pohled z obou stran po vyjmutí závlače ze vzorku)



Obrázek 63: Porovnání závěsů před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo)



Obrázek 64: Plastická deformace závlače při zvýšení momentového namáhání



Obrázek 65: Ukázka postupné plastické deformace závěsu až do vytržení závlače

3.3.1.4 Závěr zkoušky

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že výrobcem uváděná **maximální únosnost závěsu HILTI MF-TSH M8 2,0 kN** je ve všech případech bezpečná, dokonce lze tuto hodnotu označit jako značně konzervativní. U laboratorních vzorků tloušťky 1,25 mm, kdy rozhoduje únosnost samotného závěsu, dosahovala působící síla minimálně šestinásobku přípustného namáhání.

Pro mezní stav únosnosti lze charakteristickou hodnotu maximálního dovoleného zatížení stanovit podle vzorce

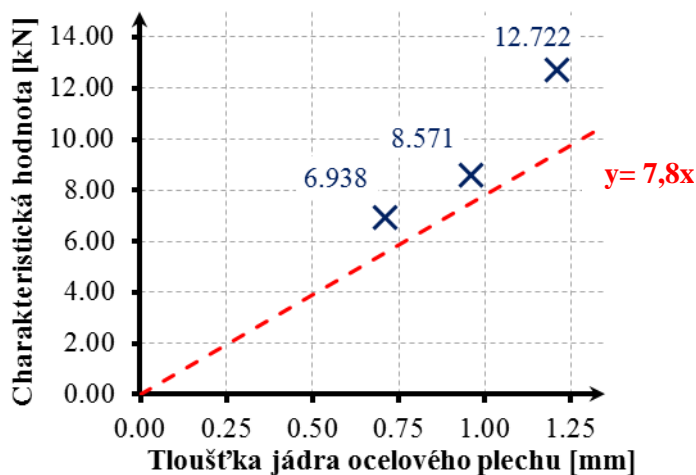
$$F_{b,Rk} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t \quad (5)$$

kde $k_1 = 2,5$ (součinitel pro Hetzovo napětí v soustředěném tlaku)
 $\alpha_b = 1$ (součinitel pro otláčení plechu a bez vlivu rozteče šroubu)
 $f_u = 390 \text{ MPa}$ (mez pevnosti pro ocel S320GD)
 $d = 8 \text{ mm}$ (průměr závlače)
 t (příslušná tloušťka ocelového jádra plechu v mm)

Tento vztah odpovídá únosnosti jedné stojiny trapézového plechu v otláčení. Po dosazení dostáváme vzorec pro stanovení únosnosti závěsu jako funkci závislou na tloušťce plechu

$$F_{b,Rk} = 2,5 * 1,0 * 390 * 8 * 10^{-3} * t = 7,8 * t \quad (6)$$

Jedná se o velice zjednodušený postup návrhu, který je odvozen pro relativně malou skupinu zkušebních vzorků. Z obr. 66 je ale patrné, že pro všechny zkušební vzorky je tento postup návrhu bezpečný.



Obrázek 66: Graf znázorňující bezpečnost zjednodušeného návrhu

Pro mezní stav použitelnosti je taktéž zjednodušeně odvozen vztah jako *0,75 -ti násobek charakteristické hodnoty maximálního zatížení*. Tato hodnota je stanovena jako poměr hodnoty odpovídající prvnímu znatelnému poklesu působící síly ku nejvyšší hodnotě působící síly v rámci jednoho zkušební vzorku.

Z výsledků je možné s jistotou tvrdit, že vliv perforace nemá vliv na únosnost závěsu ve vlně trapézového plechu, což může být způsobeno provedením závěsu až pod perforací resp. v nejnižší části perforace (viz. obr. 66). Dále je s ohledem na pozorovaný ohyb závlače doporučeno pro profily tloušťky 1,25 mm a více použít spíše závlač o průměru 10 mm.

3.3.2 Statická zkouška – analýza roznášení lokálního zatížení

3.3.2.1 Cíl zkoušky

Cílem zkoušky je zjistit skutečný podíl jednotlivých vln trapézového plechu na roznosu lokálního zatížení pomocí měření průhybu. Podle výsledků zkoušky je následně provedena validace numerického modelu lokálně zatíženého trapézového plechu.

3.3.2.2 Průběh zkoušky

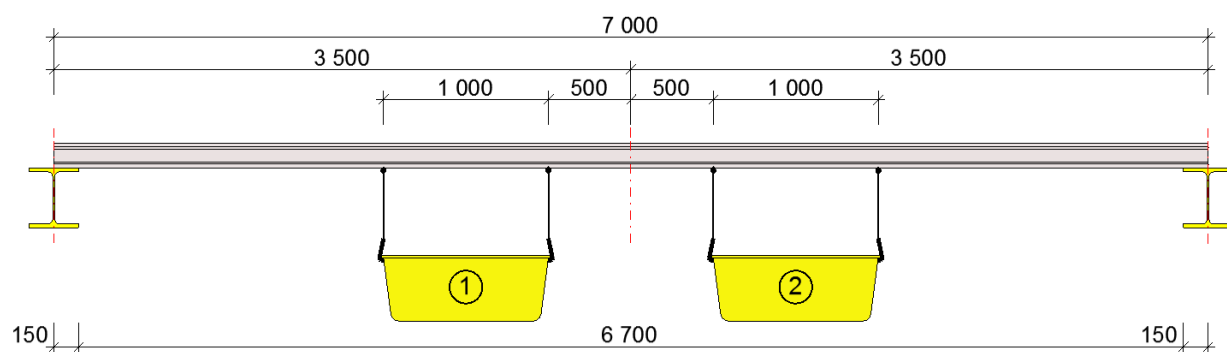
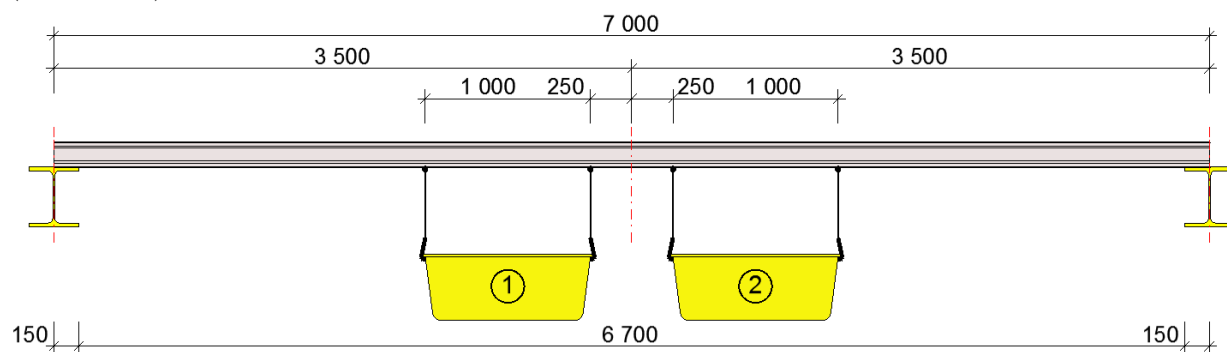
Pro statickou zkoušku jsou použity běžné trapézové profily typu TR153-290 o tloušťce 0,75 mm.

Před zkouškou je trapézový plech o celkové délce 7 m usazen na podpory z HEB profilů o osové vzdálenosti 7 m, světlý rozpon plechu je 6,7 m. Následně jsou na centricky namontované závěsy HILTI MF-TSH M8 v mezilehlé vlně zavěšené dvě transportní vany o hmotnosti 15 kg (viz. obr. 69). U každého závěsu a v těsné blízkosti podpor jsou namontována příčná táhla z ocelové pásoviny tak, aby během zkoušky nedocházelo k rozevření vln trapézového plechu (viz. obr. 71,72). Táhla umístěná v blízkosti podpor jsou prošroubovaná s dolní pásnicí plechu v každé vlně, zatímco táhla u závěsu pouze s dolní pásnicí plechu krajních vln.

Následně jsou na spodní pásnici každé vlny uprostřed rozpětí upevněná lanka pomocí magnetu, která jsou propojena s mechanickými průhyboměry s měřicím rozsahem 100 mm (viz. obr. 70). Napnutí lanka je zajištěno závažím umístěným na jeho konci. Při zvýšení zatížení dojde k poklesu vlny plechu, čímž dochází k pootočení na průhyboměru, které odpovídá příslušné hodnotě svislého průhybu.

V průběhu zkoušky jsou do transportních van umístěvány pytle s olověnými broky (viz. obr. 76). Každý pytel je označen příslušnou hmotností, která se pohybovala od 7,55 do 10,83 kg. Po vložení jednoho pytle do každé vany je zaznamenán příslušný průhyb. Během celé zkoušky je sledována velikost zatížení v obou vanách a zatěžováno tak, aby docházelo k co nejmenším rozdílům zatížení.

Celkově je zkouška provedena dvakrát s rozdílným statickým schématem. V prvním schématu je vzdálenost transportních van 0,5 m (viz. obr. 67), ve druhém schématu je tato vzdálenost rovna 1,0 m (viz. obr. 68).

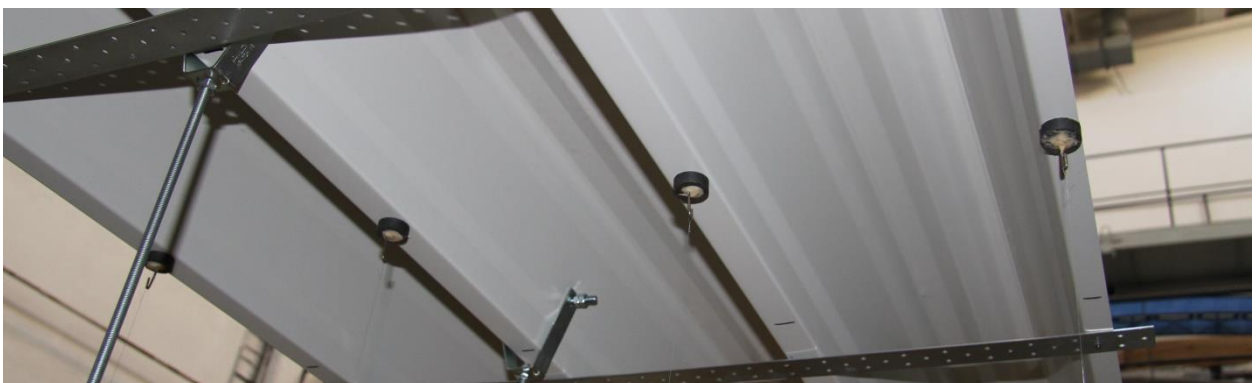




Obrázek 69: Situace těsně před zahájením experimentu



Obrázek 70: Bližší pohled na místo měření



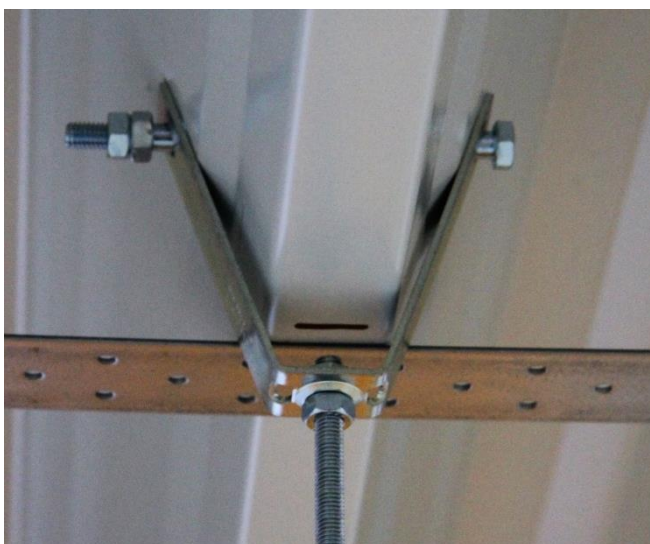
Obrázek 71: Detail upevnění průhyboměrů na spodní líc trapézového plechu uprostřed rozpětí



Obrázek 72: Pohled na spodní líc trapézového plechu s přišroubovanými příčnými táhly



Obrázek 73: Detail podpory



Obrázek 74: Detail závěsu a příčného táhla



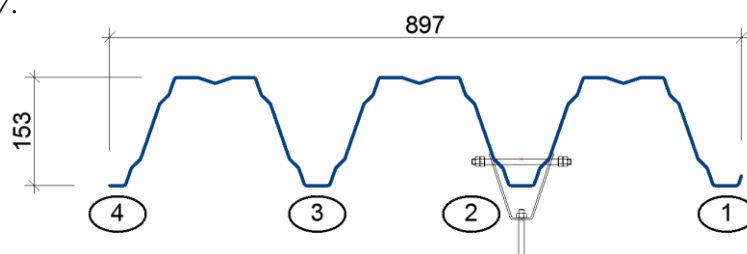
Obrázek 75: Detail uchycení transportních van



Obrázek 76: Postupné zatěžování během zkoušky

3.3.2.3 Výsledky zkoušky

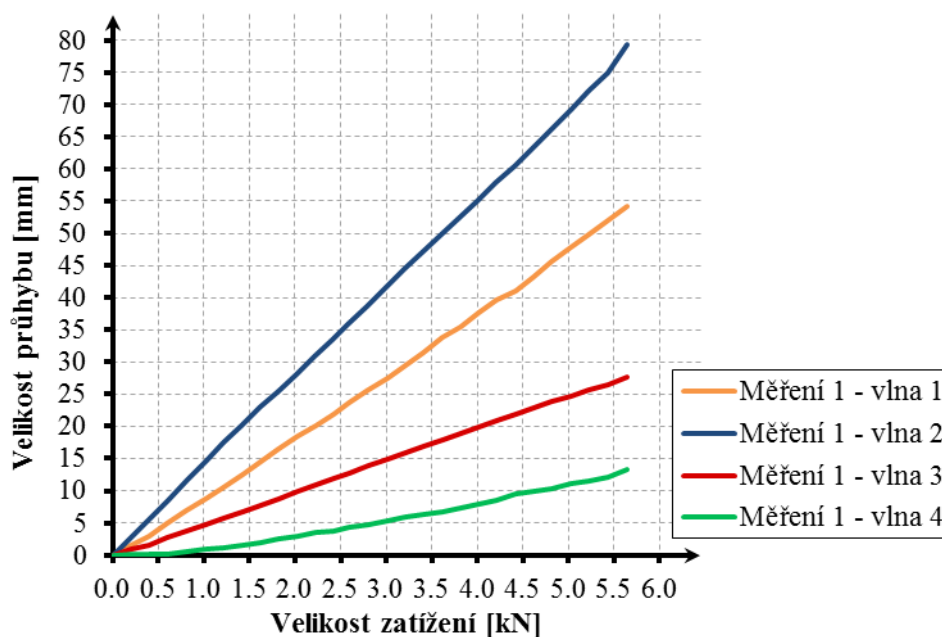
Pro lepší orientaci v naměřených hodnotách jsou jednotlivé vlny trapézového plechu označeny číslem podle obr. 77.



Obrázek 77: Označení jednotlivých vln trapézového profilu

První měření je provedeno pro statické schéma 1, ve kterém je vzdálenost van 0,5 m. Zatížení je postupně přidáváno do obou van až do celkové hmotnosti závaží 563,89 kg, kdy je provedeno poslední odečtení průhybu. Po navýšení zatížení o 19,96 kg dochází k náhlému kolapsu plechu.

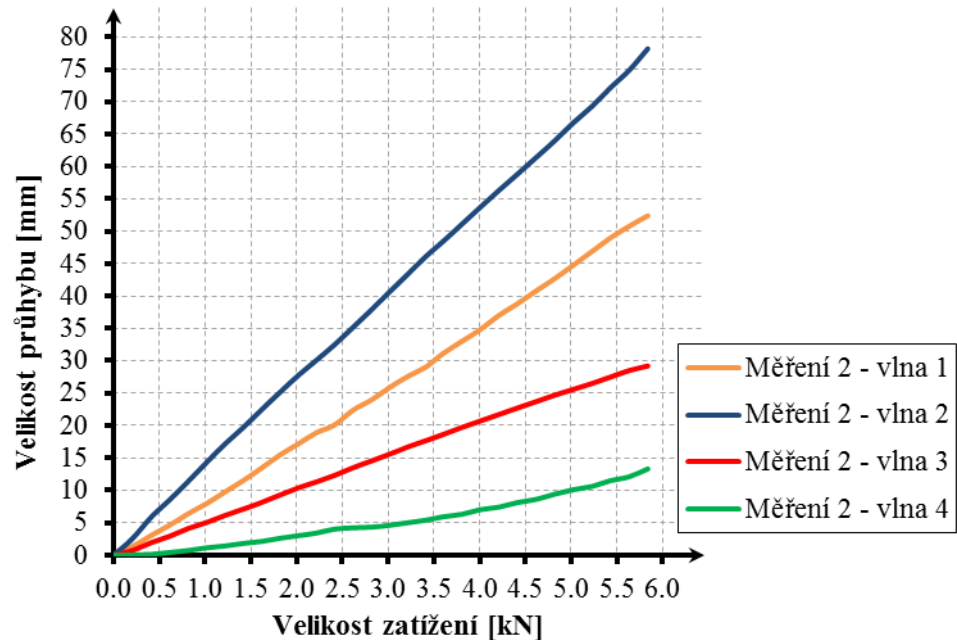
Na obr. 78 jsou znázorněny naměřené hodnoty. Jelikož je měření zahájeno až po usazení plechu na podpory a po zavěšení transportních van, není v grafu zahrnuta hodnota počátečního průhybu od vlastní tíhy trapézového plechu a van. Z výsledků je zřejmý téměř lineární nárůst průhybu každé vlny.



Obrázek 78: Výsledky měření – statické schéma 1

Ve druhém měření pro statické schéma 2 je vzdálenost van 1,0 m. Postup zatěžování je stejný jako při prvním měření. Při aplikovaném zatížení 593,40 kg dochází k náhlému zvýšení průhybu doprovázené výrazným zvukovým projevem. Po bližším prozkoumání je zjištěn kolaps horní pásnice prostřední vlny. Celkový kolaps trapézového plechu nastává po navýšení zatížení o 101,50 kg, aplikované zatížení je tedy rovno 694,90 kg. Maximální únosnost trapézového plechu je stanovena hodnotou 583,80 kg, která odpovídá odečtení průhybu pro zatížení aplikované těsně před kolapsem vlny profilu.

Pro druhé měření jsou výsledky znázorněny na *obr. 79*. V grafu není opět zahrnuta hodnota počátečního průhybu od vlastní tíhy trapézového plechu a van. Z výsledků je zřejmý téměř lineární nárůst průhybu každé vlny jako u prvního měření.

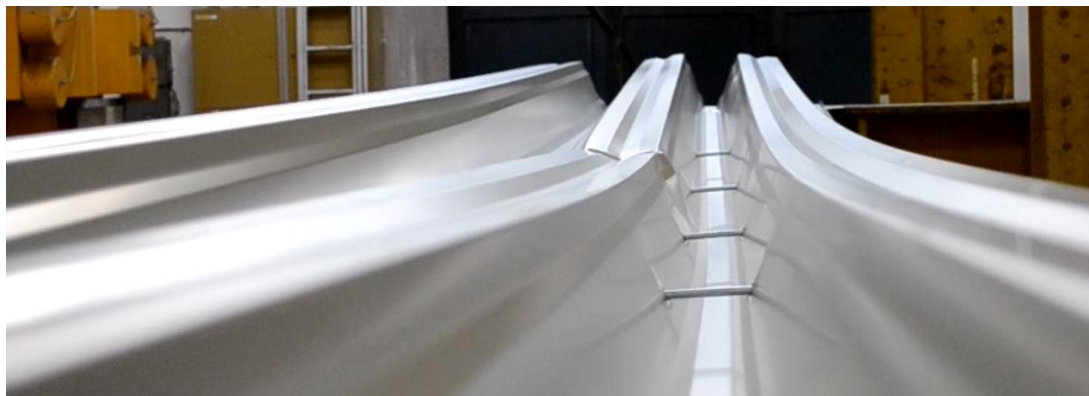


Obrázek 79: Výsledky měření – statické schéma 2

Na *obr. 80* je zdokumentována viditelná deformace trapézového plechu pro první statické schéma těsně před kolapsem. Na *obr. 81* je znázorněn kolaps horní pásnice prostřední vlny. Ukázka kolapsu trapézového profilu je zřejmá z *obr. 82*. Na *obr. 83, 84* jsou znázorněny detaily typického porušení – otlacení plechu v oblasti otvorů pro závlač závěsu a plastická deformace vlny trapézového plechu po jeho kolapsu.



Obrázek 80: Ukázka viditelné deformace trapézového plechu



Obrázek 81: Kolaps horní pásnice prostřední vlny



Obrázek 82: Ukázka kolapsu



Obrázek 83: Detail otlacení otvorů pro závlače



Obrázek 84: Detail plastické deformace vlny trapézového profilu

3.3.2.4 Závěr zkoušky

Naměřené hodnoty odpovídají předpokladům. Stanovená maximální únosnost je větší u statického schématu 2 než u statického schématu 1.

U obou měření je nárůst průhybu téměř lineární. Na roznosu zatížení se podílí všechny vlny trapézového plechu. Největšího průhybu dosahuje přímo zatížená vlna (2), měření prokázalo rozdílný podíl sousedních vln (1,3) na distribuci zatížení. Tento jev lze jednoduše vysvětlit tím, že vlna 3 přímo navazuje na další vlnu 4 na rozdíl od vlny 1 (volný konec). Nejmenší hodnoty průhybu jsou naměřeny na vlně 4, která je nejbližší od vlny přímo zatížené (2).

Výsledky statické zkoušky lze považovat za věrohodné a lze je porovnávat s výsledky získanými z numerického modelu pro lokálně zatížený trapézový plech.

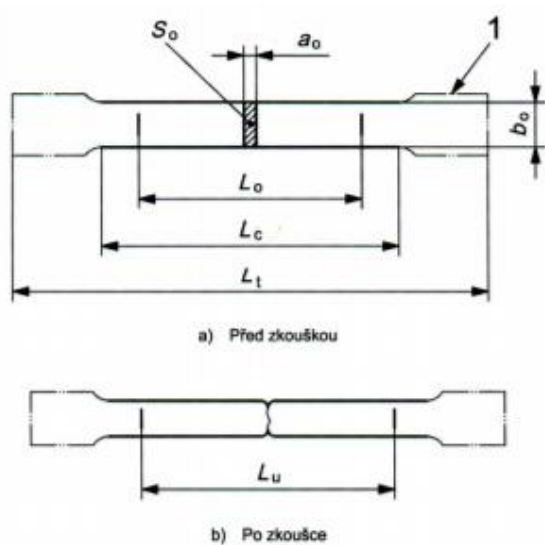
3.3.3 Doprovodná materiálová zkouška

3.3.3.1 Cíl zkoušky

Cílem zkoušky je zjištění skutečné hodnoty meze kluzu a hodnoty meze pevnosti pro následné zohlednění rozdílů mezi skutečně změřenými vlastnostmi a jejich jmenovitými hodnotami při adjustaci výsledků zkoušek únosnosti ve vlně plechu. Pro tento účel je u každého vzorku ještě změřena tloušťka plechu bez povrchové úpravy. Dále je skutečná hodnota meze kluzu použita pro definování vlastností materiálu u numerického modelu lokálně zatíženého trapézového plechu určeného pro validaci modelu.

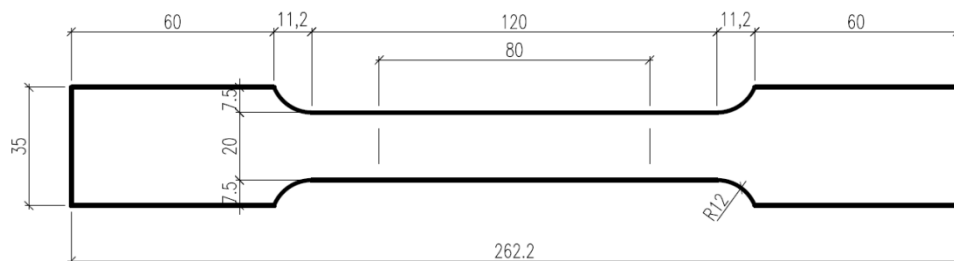
3.3.3.2 Průběh zkoušky

Před začátkem zkoušky jsou připraveny zkušební tělesa v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 (viz obr. 85). Rozměry skutečně vyrobených zkušebních těles jsou znázorněny na obr. 86.



- a_0 počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa
- b_0 počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa
- L_c zkoušená délka
- L_0 počáteční měřená délka
- L_t celková délka zkušebního tělesa
- L_u konečná měřená délka po lomu
- S_0 počáteční průřezová plocha zkoušené délky
- 1 upnuté konce

Obrázek 85: Zkušební těleso podle ČSN EN ISO 6892-1



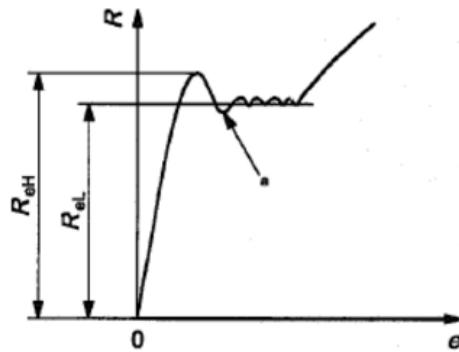
Obrázek 86: Rozměry vyrobených skutečných těles

Ze vzorků trapézových profilů určených pro statickou zkoušku zaměřenou na ověření únosnosti vlny plechu se závěsem je odebrán vždy jeden reprezentativní vzorek pro jeden typ profilu. Z trapézových profilů pro statickou zkoušku zaměřenou na analýzu roznosu lokálního zatížení jsou odebrány dva vzorky z jednoho trapézového plechu – předpokládá se, že jsou dodané plechy vyrobeny z jednoho svitku plechu. Celkem je tedy zkoušeno 11 vzorků.

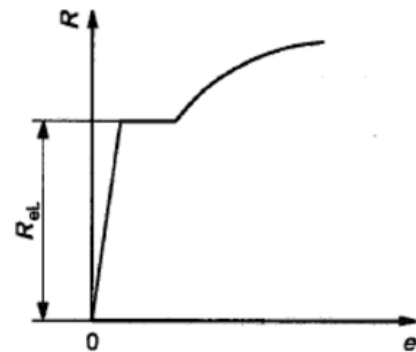
Před zahájením každé zkoušky je z tělesa odstraněna povrchová úprava a je provedeno měření skutečné tloušťky plechu. Poté jsou přeměřeny rozměry zkušebního vzorku. Následně je vzorek centricky

upnut do čelisti zkušebního stroje MTS QTEST/100 tak, aby při následném pohybu příčnicku stroje byla vyvozena pouze tahová síla (viz. obr 89 a). Na zkušební těleso je umístěn extenzometr pro záznam aktuálního prodloužení vzorku během zkoušky (viz. obr 89 b).

Jak již bylo uvedeno, hlavním cílem zkoušky je stanovení meze kluzu. Nabízí se však otázka, zda stanovit horní mez kluzu (R_{eH}) nebo dolní mez kluzu (R_{eL}). Na obr. 87 je ukázka typického průběhu pracovního diagramu v oblasti meze kluzu. V případě reziduálního pnutí nebo opakovaného zatížení se však průběh pracovního diagramu změní (viz. obr. 88). Z tohoto důvodu je tedy vybrána dolní mez kluzu.



Obrázek 87: Typický průběh pracovního diagramu



Obrázek 88: Průběh pracovního diagramu s vlivem reziduálního pnutí či opakovaného zatížení

Rychlost posuvu příčnicku je uvedena v normě ČSN EN ISO 6892-1. Pro stanovení dolní meze kluzu (R_{eL}) je doporučeno použít rozsah rychlostí 2 a pro stanovení meze pevnosti v tahu (R_m) lze rozsah rychlosti zvýšit na stupeň 3. První rychlost je stanovena 0,6 mm/min, druhá rychlost je zvolena 9 mm/min. Hraniční hodnota pro přechod rychlostí je rovna 1% poměrného přetvoření vzorku, což je se značnou rezervou po dosažení dolní meze kluzu.

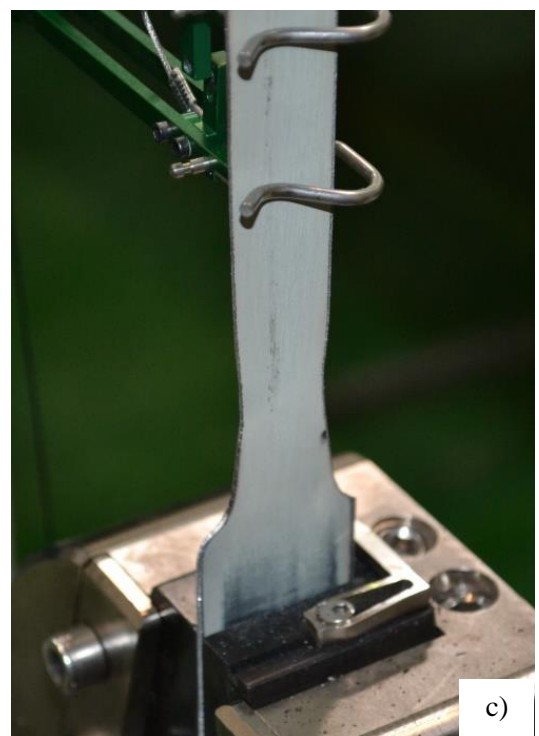
Po spuštění zkušebního stroje dochází k viditelnému protažení vzorku až do okamžiku vytvoření krčku, který signalizuje místo přetržení vzorku a tím pádem ukončení zkoušky. Na obr. 89 c je zachycen zkušební vzorek těsně před přetržením.



a)



b)

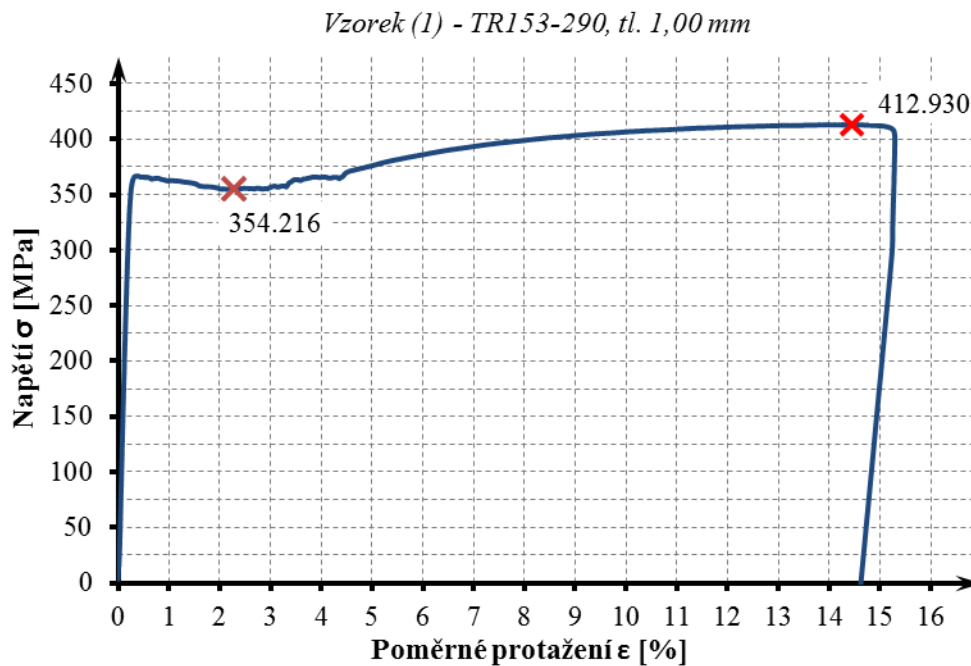


c)

Obrázek 89: a) Zkušební stroj MTS QTEST/100; b) Uchycení vzorků do čelistí a umístění extenzometru; c) vytvoření krčku

3.3.3.3 Výsledky zkoušky

Na obr. 90 je znázorněn typický průběh výsledků zkoušky s vyznačením dolní meze kluzu a meze pevnosti pro zkušební vzorek (1). V tab. 6 jsou uvedeny výsledky pro všechna zkušební tělesa včetně naměřených tloušťek plechu.



Obrázek 90: Typický průběh výsledků zkoušky

Ozn.	Typ profilu	Tloušťka s povrch. úpravou [mm]	Tloušťka bez povrch. úpravy [mm]	Dolní mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
(1)	TR153-290	1.00	0.96	354.216	412.930
(2)	TR153-290	0.75	0.71	354.790	409.071
(3)	TR153-290	1.25	1.21	331.382	403.563
(4)	TR160-250HL	1.00	0.96	367.410	424.617
(5)	TR160-250HL	1.25	1.21	322.885	402.763
(6)	TR153-290P	1.00	0.96	330.074	366.110
(7)	TR153-290P	1.25	1.21	328.426	378.936
(8)	TR160-250HLP	1.00	0.96	319.398	368.550
(9)	TR160-250HLP	1.25	1.21	319.364	373.854
(10)	TR153-290	0.75	0.71	349.432	415.708
(11)	TR153-290	0.75	0.71	349.732	417.535

Tabulka 6: Přehled výsledků zkoušky pro jednotlivé profily

3.3.3.4 Závěr zkoušky

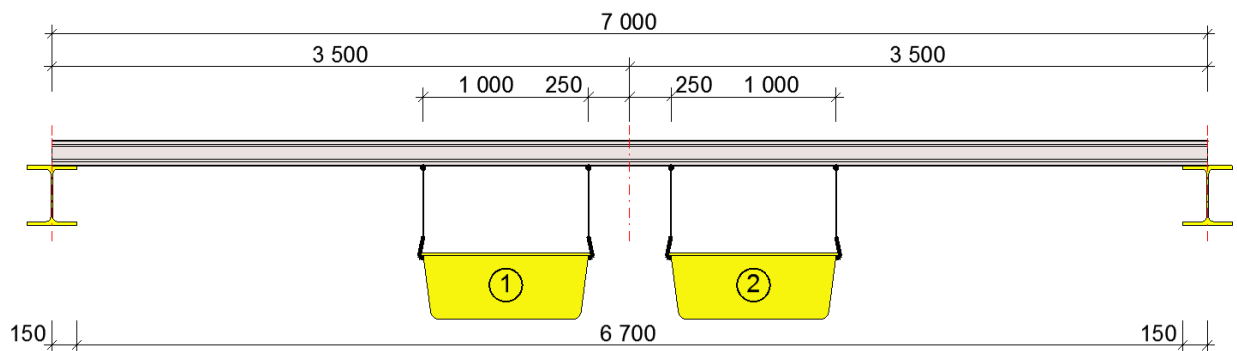
Trapézové profily jsou vyrobeny ze žárově pozinkované oceli S320GD s deklarovanou horní mezí kluzu 320 MPa a mezí pevnosti 390 MPa. Hodnota 320 MPa je u většiny vzorků splněna již pro dolní mez kluzu, u vzorků (8) a (9) je dle požadavků normy deklarovaná mez kluzu splněna při porovnání s hodnotou horní meze kluzu. Ve všech případech je minimální horní mez kluzu 320 MPa splněna. Mez pevnosti je ve čtyřech případech lehce nižší než hodnota 390 MPa, což může být způsobeno i nepřesností při výrobě vzorku (na odměrné délce se může vyskytovat průřez mírně nižší plochy, než pro místo, které

bylo měřeno). Naměřené hodnoty meze kluzu jsou dále použity pro adjustaci výsledků ze statické zkoušky pro ověření únosnosti vlny trapézového plechu se závěsem a pro definování materiálových vlastností numerického modelu trapézového plechu pro validaci. Zároveň je ve všech numerických modelech zadávána tloušťka ocelového jádra plechu odpovídající nominální tloušťce bez povrchové úpravy tj. o 0,04 mm menší.

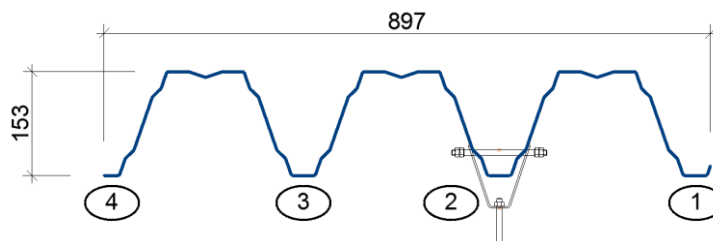
3.4 Validace numerického modelu pro lokální zatížení

Na základě poznatků z provedených laboratorních zkoušek je provedena validace dvou numerických modelů vytvořených podle statické zkoušky popsané v kapitole 3.3.2 *Statická zkouška - analýza roznášení lokálního zatížení*. Cílem validace je zjištění, zda vytvořené numerické modely vystihují skutečné chování trapézových profilů.

Jako první je provedeno srovnání dosažených výsledků pro **statické schéma 1**, které je pro připomenutí znázorněno na *obr. 91*. Na *obr. 92* je také připomenuto označení jednotlivých vln, které je stejné pro obě statická schémata.



Obrázek 91: Statické schéma 1



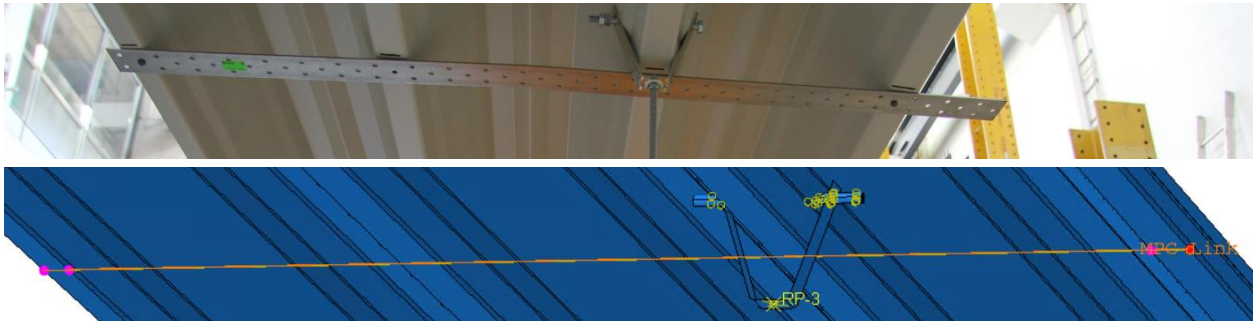
Obrázek 92: Označení vln trapézového profilu

Pro prvotní srovnání výsledků je numerický model vytvořen stejným postupem, jako je popsán v kapitolách 2.1 *Numerický model trapézového plechu pro plošné zatížení* a 3.2 *Numerický model trapézového plechu pro lokální zatížení*. Vlastnosti materiálu jsou upraveny podle výsledků doprovodné materiálové zkoušky.

Po detailnějším prozkoumání výsledků je zjištěna výrazná neshoda, která je způsobena nedostatečným vystižením podpory volných krajů trapézového plechu. V modelu byla tato podpora definována jako posuvná zabraňující posunu v příčném směru, což by odpovídalo v případě umístění více profilů vedle sebe obdobně jako v reálné ocelové konstrukci.

Jelikož se jedná o jeden samostatný trapézový plech, bylo vyzkoušeno úplné odebrání této podpory, což opět neodpovídalo skutečnosti. Při statické zkoušce totiž bylo na spodní líc trapézového plechu připevněno několik příčných táhel z ocelové pásoviny zabraňující rozevření vln.

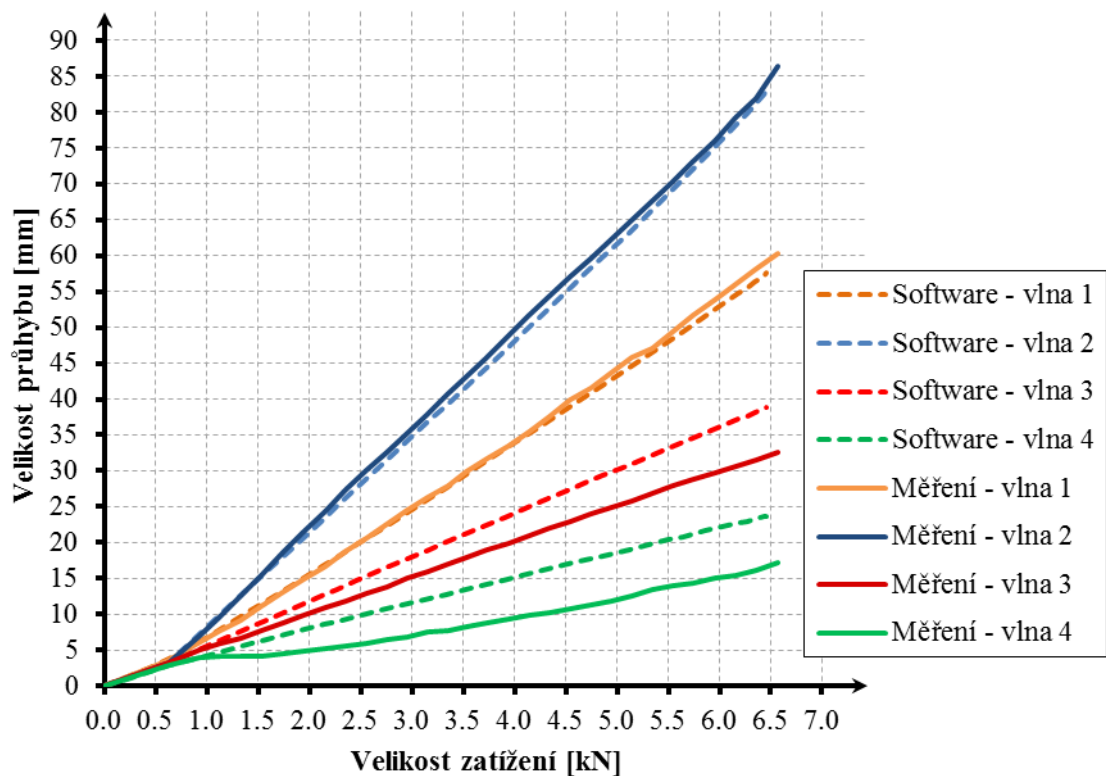
V softwaru bylo proto vyzkoušeno definování několika typů okrajových podmínek vystihujících přítomnost příčných táhel. Největší shody je dosaženo při použití okrajové podmínky, kdy dochází k tuhému spojení dvou zvolených bodů (*MPC Constraint Link* – viz. *obr. 93*).



Obrázek 93: Ukázka definování speciální okrajové podmínky MPC Constraint Link

Tato okrajová podmínka je definována u každého závěsu, použití příčných táhel v těsné blízkosti podpor je zjednodušeně zahrnuto při zadávání hlavních podpor.

Na obr. 94 jsou vyneseny výsledky získané z numerického modelu (označené *Software – vlna s příslušným číslem*) a naměřené hodnoty ze statické zkoušky (označené *Měření – vlna s příslušným číslem*). Pro lepší porovnání výsledků je v grafu zahrnuta hodnota počátečního průhybu trapézového plechu od vlastní tíhy a hodnota průhybu od vlastní tíhy zavěšených van připravených pro závaží. Obě tyto hodnoty jsou stanoveny softwarem Abaqus CAE, proto jsou počáteční hodnoty výsledků totožné.



Obrázek 94: Porovnání výsledků pro statické schéma 1

Z grafu je patrný minimální rozdíl v celkových únosnostech trapézového plechu. Přesná hodnota únosnosti stanovená pomocí softwaru je rovna $6,460 \text{ kN}$, hodnota únosnosti stanovená z výsledků statické zkoušky je $6,568 \text{ kN}$. Uvedené hodnoty se liší o $0,108 \text{ kN}$ ($1,644\%$), tudíž lze tento rozdíl hodnot považovat za uspokojivý.

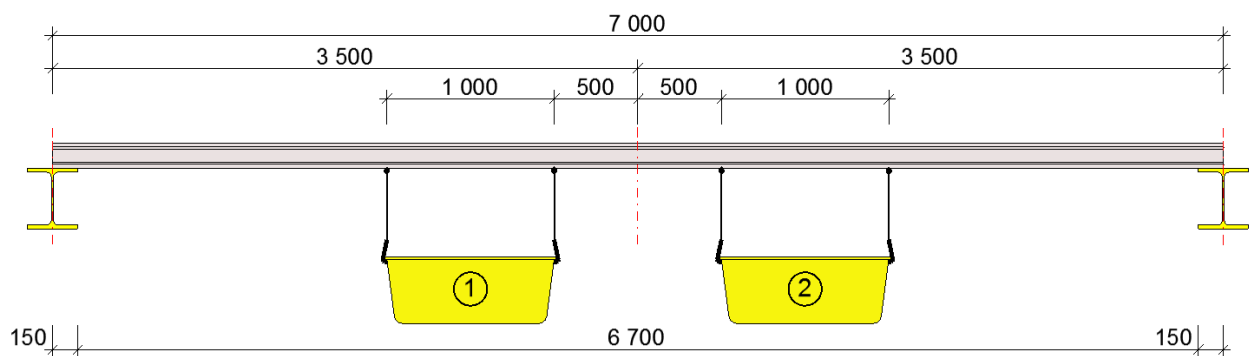
Na první pohled je ale patrný rozdíl mezi hodnotami průhybů jednotlivých vln stanovených přes software a získaných ze statické zkoušky. Přesné hodnoty těchto průhybů jsou vypsány v tab. 7 pro stejnou velikost zatížení odpovídající hodnotě maximální únosnosti ze softwaru.

	Měření [mm]	Software [mm]	Rozdíl [mm]	Rozdíl [%]
Vlna 1	59.20	57.67	1.53	2.66%
Vlna 2	84.50	83.14	1.36	1.64%
Vlna 3	32.30	38.89	6.59	16.94%
Vlna 4	16.90	23.69	6.79	28.66%
Celkem:	192.90	203.38	10.48	5.15%

Tabulka 7: Hodnoty průhybů jednotlivých vln a jejich celkový součet – statické schéma 1

Při porovnání velikostí deformace pro jednotlivé vlny je zřejmé, že pro vlnu 1 a vlnu 2 se hodnoty liší pouze nepatrně, zatímco u vlny 3 a vlny 4 jsou rozdíly znatelně větší. Po provedení celkového součtu průhybů ze statické zkoušky a softwaru je rozdíl pouze 10,48 mm (5,15 %), což činí rozdíl 2,62 mm na každou vlnu. Z této skutečnosti vyplývá, že rozdíl průhybu v rámci jedné vlny 3 nebo vlny 4 je zásadní, v rámci celého plechu je však tato neshoda výsledků přijatelná.

Následně je validace provedena i **pro statické schéma 2**, které je zobrazeno na *obr. 95*. Numerický model je vytvořen stejným způsobem jako pro statické schéma 1 včetně nadefinování speciální okrajové podmínky pro volný okraj plechu (*MPC Constraint Link*).



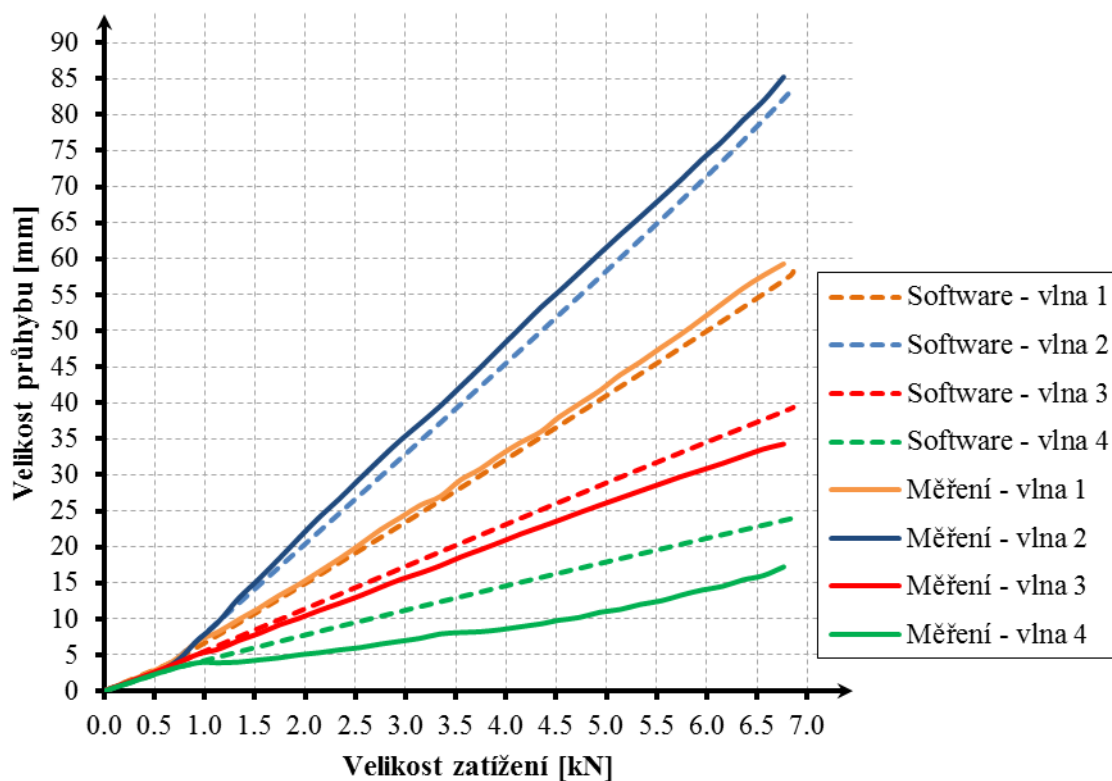
Obrázek 95: Statické schéma 2

Na *obr. 96* jsou znázorněny výsledky získané z numerického modelu (označené *Software – vlna s příslušným číslem*) a naměřené hodnoty ze statické zkoušky (označené *Měření – vlna s příslušným číslem*). Pro lepší porovnání výsledků je opět v grafu zahrnuta hodnota počátečního průhybu trapézového plechu od vlastní tíhy a hodnota průhybu od vlastní tíhy zavěšených van.

Z grafu je opět vidět nepatrný rozdíl v celkových únosnostech trapézového plechu. Přesná hodnota únosnosti stanovená pomocí softwaru je rovna 6,856 kN, hodnota únosnosti stanovená z výsledků statické zkoušky je 6,765 kN. Uvedené hodnoty se liší o 0,091 kN (1,345%), tudíž lze tento rozdíl hodnot považovat za vyhovující.

Podobně jako u první validace je z uvedeného grafu patrný rozdíl v hodnotách průhybu jednotlivých vln. V *tab. 8* jsou vypsány odpovídající hodnoty průhybů pro stejnou velikost zatížení, která v tomto případě odpovídá maximální únosnosti stanovené ze statické zkoušky.

Z celkového součtu je rozdíl průhybů ze statické zkoušky a ze softwaru roven 6,17 mm (3,05 %), což po rozdělení do jednotlivých vln činí 1,54 mm. Shoda mezi naměřenými výsledky ze statické zkoušky a ze softwaru je tedy větší než v prvním případě.



Obrázek 96: Porovnání výsledků pro statické schéma 2

	Měření [mm]	Software [mm]	Rozdíl [mm]	Rozdíl [%]
Vlna 1	59.29	57.10	2.19	3.70%
Vlna 2	85.23	82.50	2.73	3.21%
Vlna 3	34.29	38.90	4.61	11.86%
Vlna 4	17.22	23.70	6.48	27.33%
Celkem:	196.03	202.20	6.17	3.05%

Tabulka 8: Hodnoty průhybů jednotlivých vln a jejich celkový součet – statické schéma 2

V obou případech validace numerického modelu není dosaženo naprosté shody výsledků, nejedná se však o zásadní rozdíl. Určitá část rozdílu může být způsobena mírně odlišnou geometrií průřezu, která je způsobena nepřesností při výrobě. Jistou roli může hrát i lidský faktor.

Z uvedených porovnání lze ale konstatovat, že numerické modely dostatečně vystihují skutečné chování trapézových profilů a lze je použít i pro další účely.

3.5 Návrhový postup pro roznášení lokálního zatížení do vln trapézových profilů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1 *Příklady lokálního zatížení, statický návrh*, hlavním problémem statického návrhu lokálně zatíženého trapézového plechu je určení podílu jednotlivých vln na roznosu lokálního zatížení. Obecně se k této problematice přistupuje tak, že veškeré lokální zatížení je v celé míře přisouzeno jedné vlně trapézového profilu. Není ale známo, do jaké míry je tento zjednodušený postup konzervativní.

V odborné literatuře lze dohledat dva návrhové přístupy, které určují podíl vln na roznášení lokálního zatížení. Tyto přístupy jsou více rozebrány v následujících kapitolách, zároveň je provedeno srovnání výsledků s numerickými modely.

3.5.1 Přehled návrhových přístupů

3.5.1.1 Roznos zatížení podle Germunda Johanssona

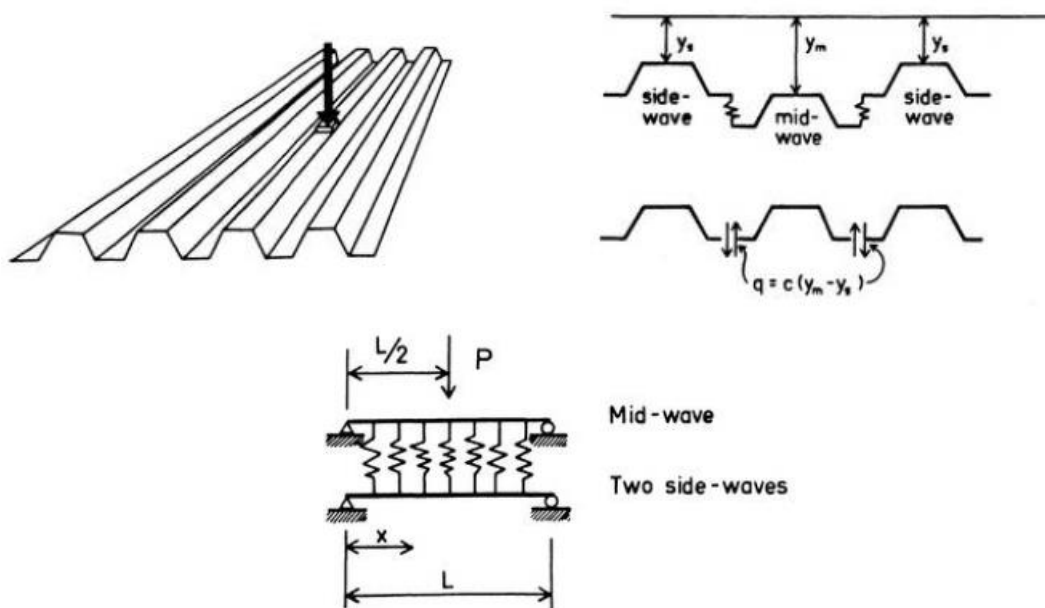
První autorovi známá analýza roznášení lokálního zatížení ve vlnách trapézového profilu byla vytvořena v roce 1986 Germundem Johanssonem. Práce je zaměřena na lokálně zatížené trapézové profily uprostřed rozpětí a obsahuje analytické popsání problematiky včetně ověření správnosti provedením statických zatěžovacích zkoušek. Část této práce je zde uvedena [18]:

V případě jednoduchého modelu lokálně zatíženého trapézového plechu uprostřed rozpětí se na přenosu zatížení podílí pouze tři vlny. Přímou zatíženou vlnu je podporována sousedními vlnami pomocí pružin (viz. obr. 97).

Průhyb prostřední a krajní vlny je označen y_m (mid wave) respektive y_s (side wave). Síla pružiny q působící mezi dvěma „nosníky“ lze určit ze vztahu

$$q = c(y_m - y_s) \quad (7)$$

kde c je tuhost pružiny.



Obrázek 97: Pružinový model pro lokálně zatížený trapézový plech uprostřed rozpětí



Za předpokladu, že se ohybová tuhost EI nemění po celé délce a zatížená i sousední vlna má stejnou tuhost, je vztah mezi silovými účinky a deformací roven

$$\frac{d^2 y_m}{dx^2} = -\frac{M_m}{EI}; \quad \frac{d^2 M_m}{dx^2} = 2q \quad (8)$$

což po dosažení (7) dává pro zatíženou vlnu vztah

$$\frac{d^4 y_m}{dx^4} = -\frac{2c}{EI}(y_m - y_s) \quad (9)$$

a pro sousední vlnu

$$\frac{d^4 y_m}{dx^4} = -\frac{c}{EI}(y_s - y_m) \quad (10)$$

Místo stanovení přesného řešení rovnic (9) a (10) je použita jednoduchá aproximace pro průběh průhybové křivky. Předpokládá se, že průhybová čára může být aproximována použitím Fourierovi řady

$$y = \delta_0 \sin \frac{\pi x}{L} \quad (11)$$

kde jsou splněny okrajové podmínky pro $y=0 \rightarrow x=0$ a $x=L$. Zjednodušení lze považovat za poměrně výstižné, protože je zřejmé, že tvar průhybové čáry pro zatíženou a sousední vlnu je blízký tvaru sinové křivky. Sinovému průběhu průhybu odpovídá i sinový průběh síly v pružině mezi zatíženou a sousední vlnou podle vztahu

$$q = q_0 \sin \frac{\pi x}{L} \quad (12)$$

kde q_0 je velikost síly v pružině pro $x=L/2$. Vztah pro průhyb uprostřed rozpětí způsobený zatížením q je roven

$$\delta_0 = \frac{q_0 L^4}{\pi^4 EI} \quad (13)$$

S výše uvedeným předpokladem pro průhyb zatížené vlny je průhyb sousední vlny a vztah mezi průhybem a silou v pružině následovný

$$\delta_m = \frac{PL^3}{48EI} - \frac{2q_0 L^4}{\pi^4 EI}; \quad \delta_s = \frac{q_0 L^4}{\pi^4 EI}; \quad q_0 = c(\delta_m - \delta_s) \quad (14)$$

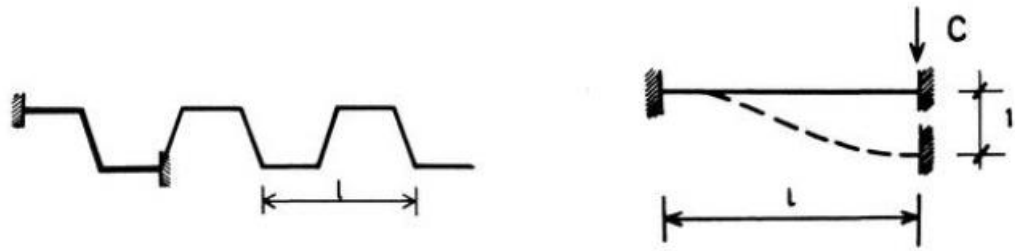
kde δ_m je průhyb zatížené vlny uprostřed rozpětí a δ_s je průhyb sousední vlny uprostřed rozpětí.

Klíčem k úspěšnému řešení je stanovení tuhosti pružiny. Síly mezi zatíženou a sousední (podporující) vlnou jsou přenášeny ohybovým namáháním trapézové plechu v příčném směru. Je ovšem složité rozhodnout, jaká část profilu se bude aktivně podílet na přenášení sil.

Předpokládejme stejné chování pružiny jako na obr. 98. Pružinu lze předpokládat jako oboustranně vetknutou. Pro dokonale rovný pružinový nosník (viz. obr. 98 napravo) lze tuhost pružiny c stanovit podle vztahu

$$c = 12EI_f/l^3 \quad (15)$$

kde $I_f = t^3/12$, kde t je tloušťka trapézového plechu.



Obrázek 98: Zjednodušený model pro výpočet tuhosti pružiny mezi zatíženou a sousední vlnou

Skutečná pružina bude mít inflexní bod ve stojině trapézového plechu a jinou předpokládanou délku. Nicméně deformace stojiny trapézového plechu neovlivňuje celkovou deformaci o víc než několik procent. Vzhledem k tomuto předpokladu lze použít výraz (15), který po dosazení dává

$$c = Et^3/l^3 \quad (16)$$

Po dosazení vztahu (16) do vztahu (14) dostáváme

$$\delta_m = \frac{PL^3}{48EI} * \frac{1}{1 + 2/(1 + \alpha)} \quad (17)$$

$$\delta_s = \frac{\delta_m}{(1 + \alpha)} \quad (18)$$

kde

$$\alpha = \frac{\pi^4 EI}{cL^4} = \frac{\pi^4 l^3 I}{t^3 L^4} \quad (19)$$

Pro $\alpha = 0$, což odpovídá nekonečně velké tuhosti pružin, dostáváme z výrazu (17) a (18)

$$\delta_m = \delta_s = \frac{1}{3} * \frac{PL^3}{48EI} \quad (20)$$

Pro $\alpha \rightarrow \infty$ dostáváme z výrazu (17) a (18)

$$\delta_m = \frac{PL^3}{48EI}; \delta_s = 0 \quad (20)$$

Z uvedené části práce jsou zřejmé matematické vztahy pro výpočet průhybu přímo zatížené a sousední vlny lokálně zatíženého trapézového plechu (rovnice (17) a (18)). Ukázka výpočtu pro zvolený případ trapézového profilu je provedena v kapitole 3.5.1.3 Porovnání vypočtených hodnot s numerickým modelem.

3.5.1.2 Roznos zatížení podle přijaté úpravy normy

Další návrhový přístup je uveden v přijaté úpravě normy ČSN EN 1993-1-3, který je odkazován na práci Germunda Johanssona (uvedené v kapitole 3.5.1.1 této práce). Přehled vzorců je uveden v tab. 9.

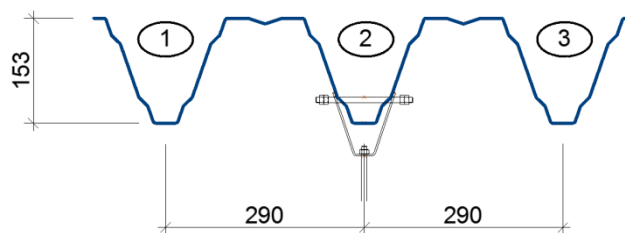
Distribuce lokálního zatížení	Zatížená vlna C1 [%]	Sousední vlna C2 [%]
Mezilehlá vlna	$(352 - 0,8b_R)(x/l - 0,5)^2 + (12 + 0,2b_R)$	$(44 - 0,1b_R)[1 - 4(x/l - 0,5)^2]$
Krajní vlna	$(240 - 0,6b_R)(x/l - 0,5)^2 + (40 + 0,15b_R)$	$(60 - 0,15b_R)[1 - 4(x/l - 0,5)^2]$

kde l je rozpon trapézového plechu v [m]
 x je vzdálenost lokálního zatížení od podpory v [m]
 b_R je osová šířka vlny v [mm]

Tab. 9: Přehled vzorců uvedených v přijaté úpravě normy pro roznos lokálního zatížení

3.5.1.3 Porovnání vypočtených hodnot s numerickým modelem

Pro názornost je ukázán výpočet podle matematických vztahů uvedených v kap. 3.5.1.1 a 3.5.1.2. Výsledky jsou následně porovnány s hodnotami průhybů získanými z numerického modelu trapézového plechu. Numerický model je vytvořen opět stejným postupem, který byl již popsán v předchozích kapitolách, pouze je změněna geometrie příčného řezu (viz. obr. 99). Tato úprava je provedena kvůli možnosti umístění závěsu do prostřední vlny, což umožňuje získat hodnoty průhybů, které nejsou ovlivněné nesymetrickým působením zatížení.



Obrázek 99: Změna geometrie příčného řezu trapézového profilu TR153-290

Výpočet je proveden pro trapézový profil TR153-290 o tloušťce 0,75 mm (resp. 0,71 mm bez povrchové úpravy) a 1,25 mm (resp. 1,21 mm bez povrchové úpravy). Osová vzdálenost podpor je 7,0 m. Lokální zatížení o velikosti $P = 2$ kN působí uprostřed rozpětí.

Výpočet podle Germunda Johanssena:

Pro 0,71 mm:

$$l = 290 \text{ mm (šířka vlny)}$$

$$I_c = 3414312 \text{ mm}^4/\text{m (moment setrvačnosti celého plechu)}$$

$$I = 3414312 * 0,290 = 990150,480 \text{ mm}^4 \text{ (moment setrvačnosti jedné vlny)}$$



$$\alpha = \frac{\pi^4 l^3 I}{t^3 L^4} = \frac{\pi^4 * 290^3 * 990150,480}{0,71^3 * 7000^4} = 2,737$$

$$\delta_m = \frac{PL^3}{48EI} * \frac{1}{1 + \frac{2}{1 + \alpha}} = \frac{2 * 10^3 * 7^3}{48 * 210 * 10^6 * 990150,480 * 10^{-12}} * \frac{1}{1 + \frac{2}{1 + 2,737}} = 44,77 \text{ mm}$$

$$\delta_s = \frac{\delta_m}{(1 + \alpha)} = \frac{44,77}{(1 + 2,737)} = 11,98 \text{ mm}$$

Pro 1,21 mm:

$$l = 290 \text{ mm}$$

$$I_c = 5934200 \text{ mm}^4 / \text{m}$$

$$I = 5934200 * 0,290 = 1720918 \text{ mm}^4$$

$$\alpha = \frac{\pi^4 l^3 I}{t^3 L^4} = \frac{\pi^4 * 290^3 * 1720918}{1,21^3 * 7000^4} = 0,961$$

$$\delta_m = \frac{PL^3}{48EI} * \frac{1}{1 + \frac{2}{1 + \alpha}} = \frac{2 * 10^3 * 7^3}{48 * 210 * 10^6 * 1720918 * 10^{-12}} * \frac{1}{1 + \frac{2}{1 + 0,961}} = 19,58 \text{ mm}$$

$$\delta_s = \frac{\delta_m}{(1 + \alpha)} = \frac{19,58}{(1 + 0,961)} = 9,98 \text{ mm}$$

Výpočet podle přijaté úpravy Eurokódu:

Jedná se o výpočet průhybu pro mezilehlou vlnu (1. řádek vzorců v tab. 9)

Pro 0,71 mm i pro 1,21 mm:

$$b_R = 290 \text{ mm} \text{ (šířka vlny plechu)}$$

$$x = 3,5 \text{ m} \text{ (poloha lokální síly vůči podpoře)}$$

$$l = 7,0 \text{ m} \text{ (rozpon trapézového plechu)}$$

$$C_1 = (352 - 0,8b_R)(x/l - 0,5)^2 + (12 + 0,2b_R) = \\ = (352 - 0,8 * 290)(3,5/7 - 0,5)^2 + (12 + 0,2 * 0,290) = 70 \%$$

$$C_2 = (44 - 0,1b_R)[1 - 4(x/l - 0,5)^2] = (44 - 0,1 * 290)[1 - 4(3,5/7 - 0,5)^2] = 15\%$$

Výsledky průhybů z numerického modelu:

Pro 0,71 mm:

$$\delta_1 = \delta_3 = 18,00 \text{ mm}$$

$$\delta_2 = 33,79 \text{ mm}$$

Pro 1,21 mm:

$$\delta_1 = \delta_3 = 11,35 \text{ mm}$$

$$\delta_2 = 18,55 \text{ mm}$$

V tab. 10, 11 je provedeno porovnání získaných hodnot z předchozích výpočtů pro obě tloušťky trapézového plechu. Z důvodu názornějšího porovnání jsou hodnoty průhybů v milimetrech převedeny na procentuální podíly.

TR153-290 - tl. 0,71 mm			
Vlna	1	2	3
Výpočet podle Johanssona	11.98 17.43%	44.77 65.14%	11.98 17.43%
Výpočet podle Eurokódu	- 15.00%	- 70.00%	- 15.00%
Hodnoty z num. modelu	18.00 25.79%	33.79 48.42%	18.00 25.79%

Tabulka 10: Porovnání výsledků pro tloušťku 0,71 mm

TR153-290 - tl. 1,21 mm			
Vlna	1	2	3
Výpočet podle Johanssona	9.98 25.24%	19.58 49.52%	9.98 25.24%
Výpočet podle Eurokódu	- 15.00%	- 70.00%	- 15.00%
Hodnoty z num. modelu	11.35 27.52%	18.55 44.97%	11.35 27.52%

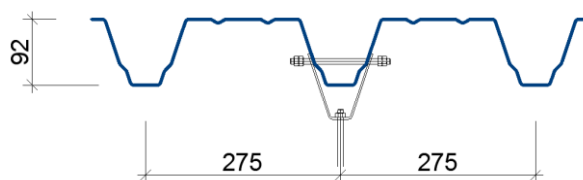
Tabulka 11: Porovnání výsledků pro tloušťku 1,21 mm

Z výsledků jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými návrhovými přístupy. Tento fakt je podnětem pro provedení parametrické studie (viz. kap. 3.5.2 *Parametrická studie*), aby bylo možné s jistotou určit, který postup je konzervativní popřípadě nebezpečný.

Na první pohled se výpočet podle Johanssona jeví pro tloušťku 1,21 mm jako poměrně přesný, přesnost se ale značně zmenšuje pro tloušťku 0,71 mm. Výpočet podle přijaté změny Eurokódu se oproti hodnotám průhybu z numerického modelu jeví jako velmi konzervativní v obou případech.

3.5.2 Parametrická studie

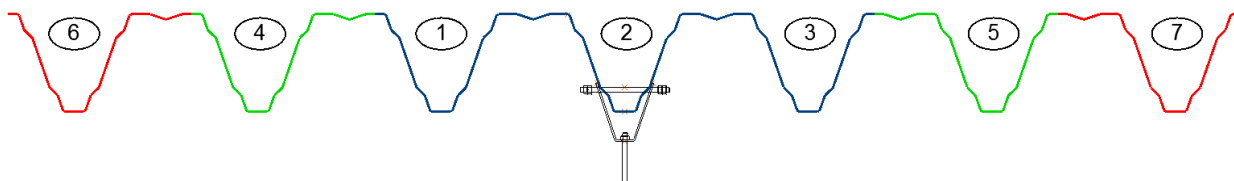
Parametrická studie je provedena pro běžné trapézové profily TR153-290; TR160-250HL a pro nižší profil TR92-275 (viz. obr. 100). Poslední typ profilu je zřejmě nejnižší profil, ve kterém lze namontovat závěs a liší se v geometrii příčného řezu tím, že v oblasti stojiny je pouze jedna výztuha.



Obrázek 100: Příčný řez profilu TR92-275 pro numerický model

Tloušťky profilů jsou reálně zvoleny 0,75 mm (nejnižší používaná tloušťka s ohledem na provedení montáže) a 1,25 mm (v praxi používanější než maximální dostupná tloušťka 1,50 mm). Od obou tlouštěk je odečtena přibližná tloušťka případné povrchové úpravy 0,04 mm

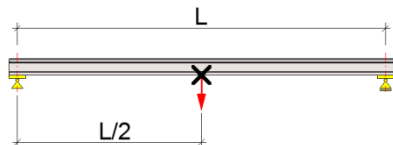
V rámci studie je také prověřen vliv počtu vln na výsledky. Na obr. 101 je ukázka příčných řezů profilu TR153-290 pro model se třemi, s pěti a se sedmi vlnami včetně příslušného číslování vln.



Obrázek 101: Příčné řezy pro vytvoření numerických modelů profilu TR153-290 – 3 vlny (modrá); 5 vln (modrá+zelená); 7 vln (modrá+zelená+červená)

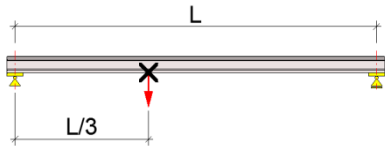
Studie je provedena pro působení jednoho lokálního zatížení o velikosti 2 kN umístěného v polovině, ve třetině, ve čtvrtině rozpětí a ve vzdálenosti 1 m od podpory. V následujících kapitolách jsou uvedeny hodnoty průhybů s vlivem imperfekcí získaných z numerických modelů pro jednotlivé typy profilů. Kromě případu, kdy působí lokální síla uprostřed rozpětí, jsou hodnoty průhybu uvedené celkem dvakrát – přímo pod lokálním zatížením a v místě největšího průhybu. U každé tabulky výsledků je znázorněno jednoduché statické schéma s vyznačením sledovaného místa, dále jsou uvedeny výsledky získané podle Johanssona a podle přijaté změny Eurokódu.

3.5.2.1 Přehled výsledků parametrické studie pro TR153-290

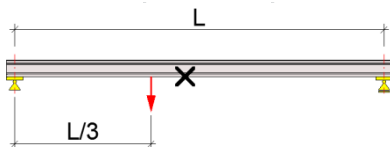


TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	11.35	18.55	11.35	-	-
-	-	27.52%	44.97%	27.52%	-	-
-	3.45	8.40	16.30	8.40	3.45	-
-	8.63%	21.00%	40.75%	21.00%	8.63%	-
1.94	2.73	7.65	15.57	7.65	2.73	1.94
4.82%	6.79%	19.03%	38.72%	19.03%	6.79%	4.82%
Podle Johanssona:		9.98	19.58	9.98		
		25.24%	49.51%	25.24%		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		15.00%	70.00%	15.00%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	18.00	33.79	18.00	-	-
-	-	25.79%	48.42%	25.79%		
-	5.22	13.75	30.85	13.75	5.22	-
-	7.59%	19.99%	44.85%	19.99%	7.59%	-
3.00	3.94	12.70	30.00	12.70	3.94	3.00
4.33%	5.69%	18.33%	43.30%	18.33%	5.69%	4.33%
Podle Johanssona:		11.98	44.77	11.98		
		17.43%	65.14%	17.43%		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		15.00%	70.00%	15.00%		

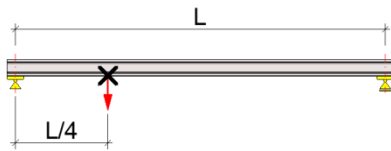
Pozn.: Z tabulky je zřejmé, že analýza modelu se sedmi vlnami je v podstatě nezajímavá, protože průhyb krajních vln je minimální. Z tohoto důvodu jsou v dalších tabulkách uvedeny hodnoty průhybů pouze pro model se třemi a pěti vlnami.



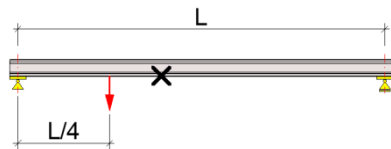
TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	8.59	14.53	8.59	-	-
-	-	27.09%	45.82%	27.09%	-	-
-	3.19	6.60	12.32	6.60	3.19	-
-	10.00%	20.69%	38.62%	20.69%	10.00%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		13.34%	73.32%	13.34%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	14.30	26.76	14.30	-	-
-	-	25.83%	48.34%	25.83%		-
-	4.81	10.80	24.04	10.80	4.81	-
-	8.70%	19.54%	43.50%	19.54%	8.70%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		13.34%	73.32%	13.34%		



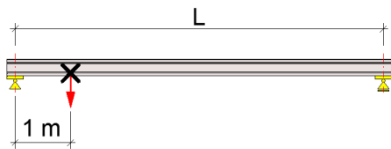
TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	10.52	17.24	10.52	-	-
-	-	27.48%	45.04%	27.48%	-	-
-	3.30	7.25	13.10	7.25	3.30	-
-	9.65%	21.20%	38.30%	21.20%	9.65%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		13.34%	73.32%	13.34%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	15.74	27.84	15.74	-	-
-	-	26.53%	46.93%	26.53%		-
-	5.06	11.80	25.47	11.80	5.06	-
-	8.55%	19.94%	43.03%	19.94%	8.55%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		13.34%	73.32%	13.34%		



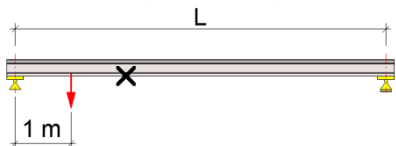
TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	5.87	9.85	5.87	-	-
-	-	27.19%	45.62%	27.19%	-	-
-	2.44	4.60	8.67	4.60	2.44	-
-	10.73%	20.22%	38.11%	20.22%	10.73%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		11.25%	77.50%	11.25%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	11.63	18.86	11.63	-	-
-	-	27.61%	44.78%	27.61%		-
-	3.71	7.40	17.34	7.40	3.71	-
-	9.38%	18.71%	43.83%	18.71%	9.38%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		11.25%	77.50%	11.25%		



TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	7.12	12.36	7.12	-	-
-	-	26.77%	46.47%	26.77%	-	-
-	2.94	5.92	10.39	5.92	2.94	-
-	10.46%	21.06%	36.96%	21.06%	10.46%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		11.25%	77.50%	11.25%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	13.24	23.83	13.24	-	-
-	-	26.32%	47.37%	26.32%		-
-	4.48	9.70	20.22	9.70	4.80	-
-	9.16%	19.84%	41.35%	19.84%	9.82%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		11.25%	77.50%	11.25%		



TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	2.26	5.39	2.26	-	-
-	-	22.81%	54.39%	22.81%	-	-
-	0.55	1.75	5.02	1.75	0.55	-
-	5.72%	18.19%	52.18%	18.19%	5.72%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		7.35%	85.31%	7.35%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	3.33	10.26	3.33	-	-
-	-	19.68%	60.64%	19.68%		-
-	0.87	2.60	9.78	2.60	0.87	-
-	5.20%	15.55%	58.49%	15.55%	5.20%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		7.35%	85.31%	7.35%		

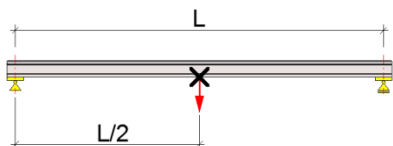


TR153-290 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	4.68	8.09	4.68	-	-
-	-	26.82%	46.36%	26.82%	-	-
-	1.31	3.50	7.24	3.50	1.31	-
-	7.77%	20.76%	42.94%	20.76%	7.77%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		7.35%	85.31%	7.35%		
TR153-290 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	7.45	14.94	7.45	-	-
-	-	24.97%	50.07%	24.97%		-
-	1.94	5.50	13.93	5.50	1.94	-
-	6.73%	19.09%	48.35%	19.09%	6.73%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		7.35%	85.31%	7.35%		

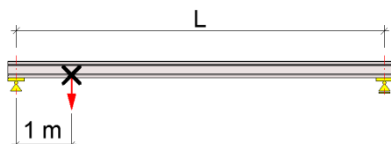


Pozn.: Z výsledků vyplývá, že lze parametrickou studii pro další typy plechů zúžit pouze na dva případy zatížení vzhledem k procentuálnímu podílu vln na roznosu zatížení. Pro další analýzu je použit případ, kdy je trapézový plech zatížen uprostřed rozpětí, protože procentuální podíl vln je téměř totožný jako pro případ umístění zatížení ve třetině či čtvrtině rozpětí. Jako druhý je vybrán případ, kdy je lokální zatížení umístěno 1 m od podpory.

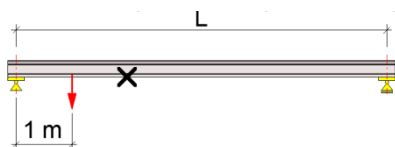
3.5.2.2 Přehled výsledků parametrické studie pro TR160-250HL



TR160-250HL tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	9.55	15.24	9.55	-	-
-	-	27.81%	44.38%	27.81%	-	-
-	3.00	7.05	13.27	7.05	3.00	-
-	8.99%	21.13%	39.77%	21.13%	8.99%	-
Podle Johanssona:		8.92	15.45	8.92		
		26.79%	46.41%	26.79%		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		19.00%	62.00%	19.00%		
TR160-250HL tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	15.20	27.95	15.20	-	-
-	-	26.05%	47.90%	26.05%		
-	4.50	11.40	25.35	11.40	4.50	-
-	7.87%	19.95%	44.36%	19.95%	7.87%	-
Podle Johanssona:		11.27	34.92	11.27		
		19.61%	60.77%	19.61%		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		19.00%	62.00%	19.00%		



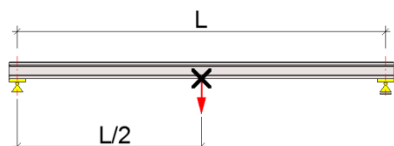
TR160-250HL tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	2.6	4.19	2.6	-	-
-	-	27.69%	44.62%	27.69%	-	-
-	1.07	1.77	3.48	1.77	1.07	-
-	11.68%	19.32%	37.99%	19.32%	11.68%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		9.31%	81.39%	9.31%		
TR160-250HL tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	4.02	8.11	4.02	-	-
-	-	24.89%	50.22%	24.89%		-
-	1.64	2.80	7.06	2.80	1.64	-
-	10.29%	17.57%	44.29%	17.57%	10.29%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		9.31%	81.39%	9.31%		



TR160-250HL tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	4.67	6.38	4.67	-	-
-	-	29.71%	40.59%	29.71%	-	-
-	1.80	3.25	5.21	3.25	1.80	-
-	11.76%	21.23%	34.03%	21.23%	11.76%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		9.31%	81.39%	9.31%		
TR160-250HL tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	7.50	11.87	7.50	-	-
-	-	27.91%	44.18%	27.91%		-
-	2.77	5.35	10.20	5.35	2.77	-
-	10.48%	20.23%	38.58%	20.23%	10.48%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		9.31%	81.39%	9.31%		



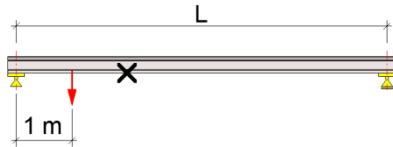
3.5.2.3 Přehled výsledků parametrické studie pro TR92-275



TR92-275 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	37.55	51.65	37.55	-	-
-	-	29.63%	40.75%	29.63%	-	-
-	11.10	26.80	43.27	26.80	11.10	-
-	9.32%	22.51%	36.34%	22.51%	9.32%	-
Podle Johanssona:		43.99	54.03	43.99		
		30.98%	38.05%	30.98%		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		16.50%	67.00%	16.50%		
TR92-275 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	62.85	98.17	62.85	-	-
-	-	28.07%	43.85%	28.07%		-
-	13.75	46.50	86.25	46.50	13.75	-
-	6.65%	22.49%	41.72%	22.49%	6.65%	-
Podle Johanssona:		70.58	114.82	70.58		
		27.57%	44.86%	27.57%		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		16.50%	67.00%	16.50%		



TR92-275 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	8.63	12.72	8.63	-	-
-	-	28.79%	42.43%	28.79%	-	-
-	3.61	5.91	10.36	5.91	3.61	-
-	12.28%	20.10%	35.24%	20.10%	12.28%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		8.08%	83.84%	8.08%		
TR92-275 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	13.75	25.30	13.75	-	-
-	-	26.04%	47.92%	26.04%		-
-	5.25	10.17	22.32	10.17	5.25	-
-	9.88%	19.13%	41.99%	19.13%	9.88%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		8.08%	83.84%	8.08%		



TR92-275 tl. 1.21 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	16.32	20.55	16.32	-	-
-	-	30.68%	38.64%	30.68%	-	-
-	6.30	11.30	16.15	11.30	6.30	-
-	12.27%	22.01%	31.45%	22.01%	12.27%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		8.08%	83.84%	8.08%		
TR92-275 tl. 0.71 mm						
6	4	1	2	3	5	7
-	-	26.55	39.16	26.55	-	-
-	-	28.78%	42.45%	28.78%		-
-	9.10	20.03	33.75	20.03	9.10	-
-	9.89%	21.77%	36.68%	21.77%	9.89%	-
Podle Johanssona:		-	-	-		
Podle Eurokódu:		-	-	-		
		8.08%	83.84%	8.08%		

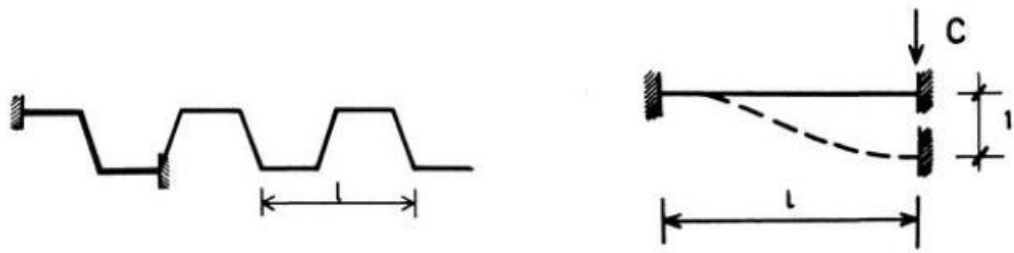
3.5.2.4 Závěr parametrické studie

Z provedené parametrické studie lze konstatovat, že numerický model se třemi vlnami je vždy bezpečný, pro přesnější analýzu je vhodnější použití modelu s pěti vlnami.

Dále lze tvrdit, že návrhový přístup **podle Germunda Johanssona** je v téměř všech případech bezpečný. Výjimkou je výpočet pro trapézový profil TR92/275 tl. 1,25 mm, kde podíl zatížení sousedních vln je podle tohoto vztahu stanoven větší než z numerického modelu, rozdíl je však v řádu několika procent. Tento rozdíl je nejspíš způsoben výrazně jinou geometrií příčného řezu v oblasti horní pásnice trapézového profilu. Oproti zbylým profilům je pásnice výrazně širší a jsou v ní vyválcovány dvě výztuhy oproti jedné, což naráží na určitý problém tohoto přístupu. Ze studie je patrný rozdíl přesnosti výpočtu pro tloušťky trapézového profilu 1,25 mm a 0,75 mm. Tento fakt je nejspíš způsoben zavedením zjednodušení pro výpočet tuhosti pružiny mezi přímo zatíženou a sousední vlnou (vysvětleno v kapitole 3.5.1.1.) podle vztahu

$$c = 12EI_f/l^3, \quad (15)$$

který odpovídá tuhosti oboustranně vetknutého nosníku při vynucené deformaci jedné podpory. Toto zjednodušení je pro připomenutí znázorněno na obr. 102, na kterém stojí za povšimnutí rozpor mezi délkou vyznačeného oboustranně vetknutého nosníku v příčném řezu profilu a délkou (resp. šířkou vlny) uvažovanou pro výpočet (pozn.: pro výpočet průhybů v parametrické studii je používána délka oboustranně vetknutého nosníku rovna šířce vlny).



Obrázek 102: Zjednodušení pro výpočet tuhosti pružiny mezi zatíženou a sousední vlnou

V tab. 11 je uvedeno porovnání skutečných tuhostí a tuhostí stanovených podle zjednodušeného postupu. Tuhosti jsou stanoveny pro dvě tloušťky a pro tři různá zakřivení trapézové profily s půdorysným průmětem 120 mm, odpovídající vzdálenosti okraje dolní pásnice k výztuze horní pásnice. Skutečné tuhosti (k_{D1} , k_{D2}) jsou stanoveny pomocí softwaru Dlubal RFEM. V první části byl vytvořen daný tvar o šířce 1000 mm a následně byl zatížen vynuceným posunem podpory o velikosti 1 mm. Tuhost je vypočtena jako podíl silové reakce v podpoře a vynuceným posunem podpory. Tuhosti c_1 , c_2 jsou stanoveny pole vztahu (15).

		1	2	3	4
tl. 0.71	k_{D1} [N/m]	43497.000	665350.000	571510.000	704470.000
	c_1 [N/m]	43496.128	43496.128	43496.128	43496.128
tl. 1.21	k_{D2} [N/m]	215180.000	3279400.000	2819100.000	3473000.000
	c_2 [N/m]	215250.000	215250.000	215250.000	215250.000

Tab. 11: Porovnání skutečných tuhostí (k_{D1} , k_{D2}) s výsledky ze zjednodušeného postupu (c_1 , c_2)

Z výsledku jasně vyplývá, že tuhost stanovená pro výsek trapézového profilu TR153-290 (model 4) je řádově odlišná oproti tuhosti vypočtené ze zjednodušeného vztahu (model 1). Tuhosti uvedené v tab. 11 jsou pro názornost stanoveny pro výsek půdorysné délky 120 mm, otázkou ale je, jak velkou část vlny by bylo zapotřebí uvažovat pro stanovení skutečné tuhosti pružiny. Tento problém ale již není řešen v rámci této diplomové práce.

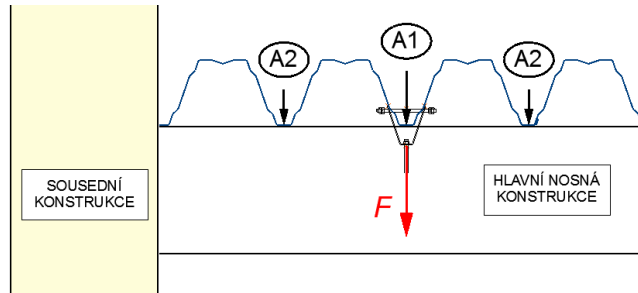
Další nevýhodou vztahu podle Germunda Johanssona je možnost využití pouze pro trapézové profily zatížené lokální silou uprostřed rozpětí. Ve výpočtech nijak nelze zohlednit jiné umístění zatížení, čímž je využitelnost tohoto vztahu v praxi značně omezená. Na druhou stranu je postup odvozen analyticky na poměrně jednoduchém principu.

Parametrická studie také potvrdila předpoklad, že návrhový postup podle **přijaté úpravy normy** je ve všech případech konzervativní. Tento fakt vede k prozkoumání těchto vzorců.

3.5.2.5 Nový návrhový postup rozdělení lokálního zatížení mezi vlny trapézového profilu

V následující části práce je popsán návrhový postup, který přímo vychází z provedené parametrické studie a teoreticky je vhodný pro použití v praxi. Z uvedených vzorců lze poměrně jednoduše stanovit podíl jednotlivých vln na roznosu zatížení a není tedy třeba používat konzervativní postup, ve kterém se veškeré lokální zatížení přisuzuje jedné vlně. S ohledem na možné umístění zatížení je postup rozdělen pro tři případy:

1. případ – umístění zatížení dle obr. 103



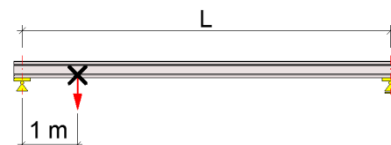
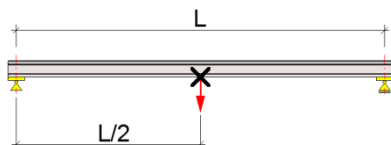
Obrázek 103: Umístění lokálního zatížení pro první případ

Lokální zatížení F lze rozložit na jednotlivé složky sil $A_i \cdot F$ podle vztahů:

$$A_1 = [(352 - 0,8b_R)(x/l - 0,5)^2 + (12 + 0,2b_R)] - 14 \quad (21)$$

$$A_2 = \{(44 - 0,1b_R)[1 - 4(x/l - 0,5)^2]\} + 7 \quad (22)$$

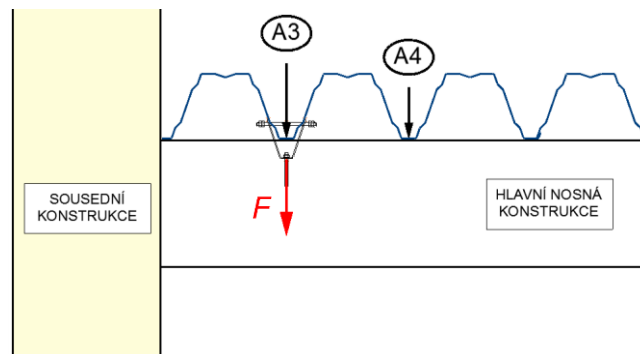
kde b_R je šířka vlny v [mm]; x je vzdálenost lokální síly od podpory v [m] a l je rozpon profilu v [m]. Funkčnost vztahů je ověřena v následujících tabulkách:



TR153-290				
Označení vln		1	2	3
Upravený vzorec		22.00%	56.00%	22.00%
Původní vzorec		15.00%	70.00%	15.00%
Numerický model	tl. 1.21 mm	27.52%	44.97%	27.52%
	tl. 0.71 mm	25.79%	48.32%	25.79%
TR160-250HL				
Označení vln		1	2	3
Upravený vzorec		26.00%	48.00%	26.00%
Původní vzorec		19.00%	62.00%	19.00%
Numerický model	tl. 1.21 mm	27.81%	44.38%	27.81%
	tl. 0.71 mm	26.05%	47.90%	26.05%
TR92-275				
Označení vln		1	2	3
Upravený vzorec		23.50%	53.00%	23.50%
Původní vzorec		16.50%	67.00%	16.50%
Numerický model	tl. 1.21 mm	29.63%	40.75%	29.63%
	tl. 0.71 mm	28.07%	43.85%	28.07%

TR153-290				
Označení vln		1	2	3
Upravený vzorec		14.35%	71.31%	14.35%
Původní vzorec		7.35%	85.31%	7.35%
Numerický model	tl. 1.21 mm	22.81%	54.39%	22.81%
	tl. 0.71 mm	19.68%	60.64%	19.68%
TR160-250HL				
Označení vln		1	2	3
Upravený vzorec		16.31%	67.39%	16.31%
Původní vzorec		9.31%	81.39%	9.31%
Numerický model	tl. 1.21 mm	27.69%	44.62%	27.69%
	tl. 0.71 mm	24.89%	50.22%	24.89%
TR92-275				
Označení vln		1	2	3
Upravený vzorec		15.08%	69.84%	15.08%
Původní vzorec		8.08%	83.84%	8.08%
Numerický model	tl. 1.21 mm	28.79%	42.43%	28.79%
	tl. 0.71 mm	26.04%	47.92%	26.04%

2. případ – umístění zatížení dle obr. 104



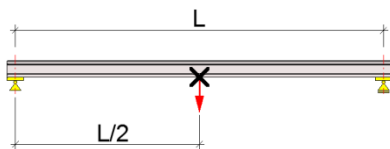
Obrázek 104: Umístění lokálního zatížení pro druhý případ

Lokální zatížení F lze rozložit na jednotlivé složky sil $A_i * F$ podle vztahů:

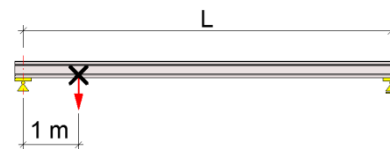
$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (23)$$

$$A_4 = A_2 \quad (24)$$

Tento případ nebyl detailně prověřován pomocí numerických modelů, ale předpokládá se, že je návrh jednoznačně konzervativní. Jedná se navíc o výrazné zjednodušení postupu, který je uveden v přijaté úpravě normy. V následujících tabulkách je dokázáno, že tento postup je vždy bezpečný (v porovnání s původním vztahem) a dosažené výsledky nejsou příliš odlišné.

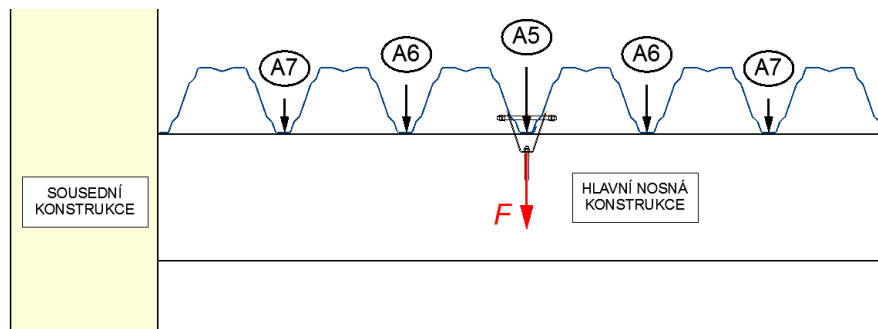


TR153-290		
Označení vln	2	3
Nový vzorec	85.00%	15.00%
Původní vzorec	83.50%	16.50%
TR160-250HL		
Označení vln	2	3
Nový vzorec	81.00%	19.00%
Původní vzorec	77.50%	22.50%
TR92-275		
Označení vln	2	3
Nový vzorec	83.50%	16.50%
Původní vzorec	81.25%	18.75%



TR153-290		
Označení vln	2	3
Nový vzorec	92.65%	7.35%
Původní vzorec	91.92%	8.08%
TR160-250HL		
Označení vln	2	3
Nový vzorec	90.69%	9.31%
Původní vzorec	88.98%	11.02%
TR92-275		
Označení vln	2	3
Nový vzorec	91.92%	8.08%
Původní vzorec	90.82%	9.18%

3. případ – umístění zatížení dle obr. 105



Obrázek 105: Umístění lokálního zatížení pro třetí případ

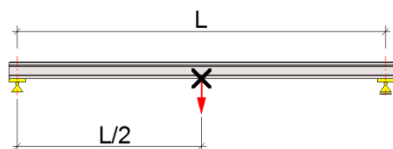
Lokální zatížení F lze rozložit na jednotlivé složky sil $A_i * F$ podle vztahů:

$$A_5 = [(352 - 2,7 * x/l * b_R)(x/l - 0,33)^2 + (12 + 0,195b_R)] - 11 \quad (25)$$

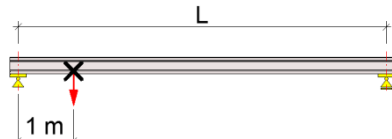
$$A_6 = (100 - A_5 - 2 * A_7)/2 \quad (26)$$

$$A_7 = A_5/6,55 - l/x * 0,85 * b_R/290 \quad (27)$$

kde b_R je šířka vlny v [mm]; x je vzdálenost lokální síly od podpory v [m] a l je rozpon profilu v [m]. Funkčnost vztahů je ověřena v následujících tabulkách:



TR153-290						
Označení vln		4	1	2	3	5
Nový vzorec		6.91%	14.88%	56.41%	14.88%	6.91%
Numerický model	tl. 1.21 mm	8.63%	21.00%	40.75%	21.00%	8.63%
	tl. 0.71 mm	7.59%	19.99%	44.85%	19.99%	7.59%
TR160-250HL						
Označení vln		4	1	2	3	5
Nový vzorec		6.19%	18.72%	50.17%	18.72%	6.19%
Numerický model	tl. 1.21 mm	8.99%	21.13%	39.77%	21.13%	8.99%
	tl. 0.71 mm	7.87%	19.95%	44.36%	19.95%	7.87%
TR92-275						
Označení vln		4	1	2	3	5
Nový vzorec		6.64%	14.88%	56.41%	14.88%	6.64%
Numerický model	tl. 1.21 mm	9.32%	22.51%	36.34%	22.51%	9.32%
	tl. 0.71 mm	6.65%	22.49%	41.72%	22.49%	6.65%



TR153-290						
Označení vln		4	1	2	3	5
Nový vzorec		4.12%	12.90%	65.96%	12.90%	4.12%
Numerický model	tl. 1.21 mm	5.72%	18.19%	52.18%	18.19%	5.72%
	tl. 0.71 mm	5.20%	15.55%	58.46%	15.55%	5.20%
TR160-250HL						
Označení vln		4	1	2	3	5
Nový vzorec		3.83%	16.82%	58.70%	16.82%	3.83%
Numerický model	tl. 1.21 mm	11.68%	19.32%	37.99%	19.32%	11.68%
	tl. 0.71 mm	10.29%	17.57%	44.29%	17.57%	10.29%
TR92-275						
Označení vln		4	1	2	3	5
Nový vzorec		4.01%	12.90%	65.96%	12.90%	4.01%
Numerický model	tl. 1.21 mm	12.28%	20.10%	35.24%	20.10%	12.28%
	tl. 0.71 mm	9.88%	19.13%	41.99%	19.13%	9.88%

Vzorce pro třetí případ zatížení jsou stanovené na základě výsledků z parametrické studie a nejsou vyzkoušeny pro jiné typy profilů. Jedná se o možný návrhový postup pro roznoš lokálního zatížení do dvou sousedních vln, vzorce jsou zde stanoveny pouze pro názornost řešení. V některých případech jsou poměrně konzervativní a bylo by vhodné je příslušně upravit. Zároveň je třeba dodat, že rozložení lokálního zatížení připadá na druhou sousední vlnu přibližně 5 - 10 %, což není zdaleka zanedbatelné. Podmínkou roznoš lokálního zatížení do dvou sousedních vln je důkladné prošroubování spojů trapézových profilů mezi sebou.



4 Závěr

V rámci diplomové práce je popsán postup vytvoření numerického modelu plošně i lokálně zatíženého trapézového plechu v programu Abaqus. Dále je práce zaměřena na analýzu chování trapézového plechu při lokálním zatížení závěsem.

Výhradně na základě zkoušek je odvozen jednoduchý postup pro stanovení únosnosti přípoje závěsu do vlny trapézového plechu.

Největším dílem je práce zaměřena na roznos lokálního zatížení mezi jednotlivými vlnami trapézového plechu. Za tímto účelem je vytvořen numerický model, jehož správnost je ověřena validací s dvěma statickými zatěžovacími zkouškami. V závěru práce jsou prověřeny dostupné analytické vztahy pro stanovení podílu jednotlivých vln na roznosu zatížení, které byly podnětem k provedení parametrické studie. Na jejím základě jsou vztahy upraveny a je navržen postup pro určení podílu jednotlivých vln pro tři případy umístění lokálního zatížení.

4.1 Další výzkum

Na práci by bylo možné navázat zejména zpřesněním postupu v případech, kdy je zatížena krajní vlna plechu a kde lze předpokládat konzervativnost předloženého návrhu. Dále by bylo vhodné experimentálně potvrdit, že zatížení je roznášeno mezi vlnami i běžně prováděnými podélnými spoji mezi jednotlivými plechy.

V neposlední řadě může být omezením, že práce se zabývá pouze případy plechů navržených jako prosté nosníky. Chování plechů navržených spojitě přes více polí, překonzolovaných a podobných méně častých případů by bylo vhodné alespoň na některých případech ověřit.



5 Seznam použité literatury

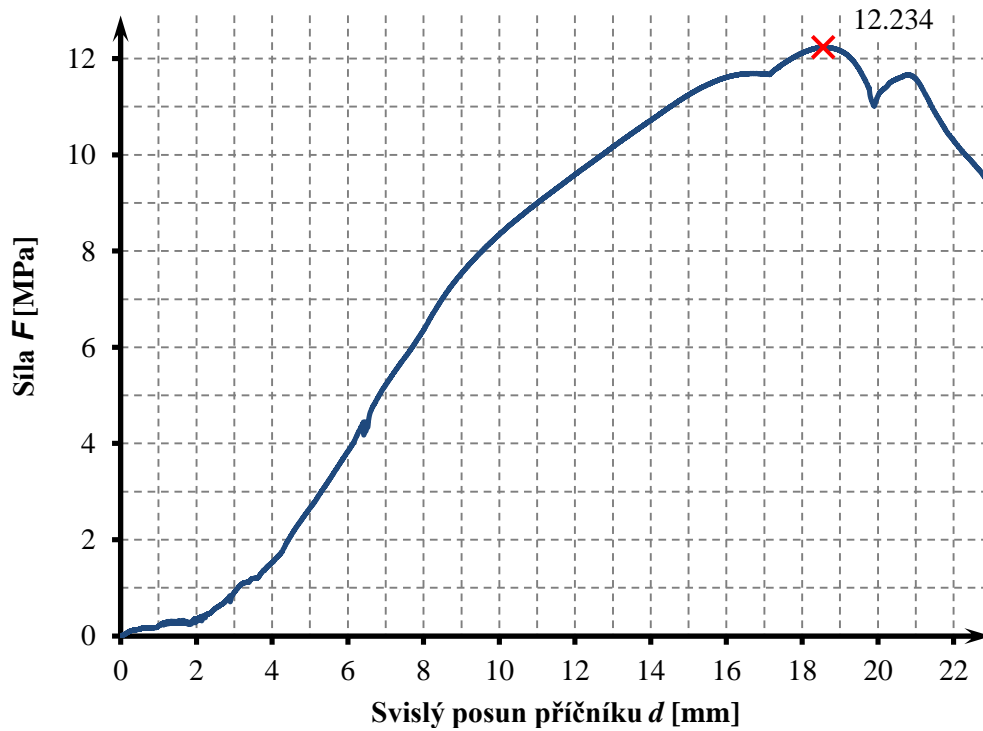
- [1] **Webové stránky firmy Lindab** [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.lindab-designer.cz/konstrukcni-trapezove-plechy>
- [2] **Webové stránky firmy CB profil** [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.cbprofil.cz/fotogalerie/>
- [3] **Webové stránky firmy Renusol** [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.renusol.com/en/service/news-press/press-release/article/363-new-solution-for-vertical-mounting-of-solar-modules.html>
- [4] **Webové stránky firmy BNRG Distribution** [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.bnrgdistribution.ie/van-der-valk-solar-systems/>
- [5] **Webové stránky firmy Belectric** [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.belectric.co.uk/portfolio/pitched-solar-roof-cuts-electricity-bill/>
- [6] **Webové stránky firmy Berner** [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: https://shop.berner.eu/at-de/p/59516-trapezblechzange-werkzeug.html?article_id=59516
- [7] **Webové stránky firmy Hilti** [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <https://www.hilti.cz/>
- [8] **Webové stránky firmy ISO CHEMIE** [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <https://www.iso-chemie.eu/en/sealing-solutions/sealing-products/acoustic-insulating-strips/iso-acoustic-insulating-strips/#pictures>
- [9] **Webové stránky firmy Archi EXPO** [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.archiexpo.com/prod/rockwool/product-53914-1370635.html>
- [10] **Webové stránky firmy Koňářik závěšová technika a.s.** [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.konarik.cz/>
- [11] **Webové stránky firmy Metalfix s.r.o.** [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.metalfix.cz/>
- [12] **Webové stránky firmy ArcelorMittal** [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://corporate.arcelormittal.com/>
- [13] **Webové stránky firmy Kovové profily** [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://kovprof.cz/hlavni-stranka/trapezove-profily/>
- [13] **Webové stránky firmy Satjam** [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.satjam.cz/>
- [14] **Webové stránky firmy Dlubal** [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs>
- [15] **Webové stránky firmy Abaqus** [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [16] **Webové stránky** [online]. [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: <http://www.steelconstruction.info/>



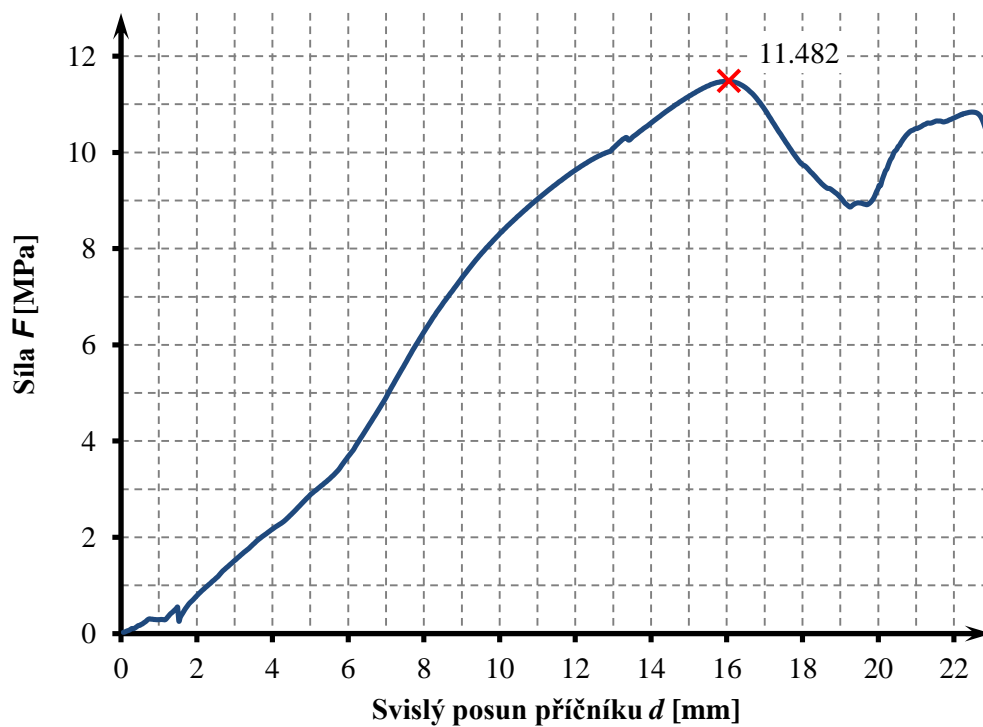
- [17] **Webové stránky** [online]. [cit. 2016-01-01]. Dostupné z:
<https://www.steelconstruction.org/custom/uploads/2016/04/SIGNS-SN32.pdf>
- [18] **Článek G. Johansson – Single load on trapezoidal steel sheet** [online]. [cit. 2016-01-01].
Dostupné z:
<http://www.eperiodica.ch/digbib/dossearch;jsessionid=26F74F5F1FA1128EA82CB089160C58A4>
- [19] **Macháček J. – přednášky Ocelové konstrukce 01** [online]. [cit. 2016-01-01]. Dostupné z:
<http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyOK01/>
- [20] **Jandera M. – přednášky a cvičení Tenkostěnné a spřažené konstrukce** [online] [cit. 2016-01-01].
Dostupné z:
<http://people.fsv.cvut.cz/~xjanderm/>
- [21] **DUBINA, Dan., R. LANDOLFO a Viorel. UNGUREANU.** *Design of cold-formed steel structures.: Eurocode 3 : design of steel structures.* S.l.: ECCS, 2012. ECCS Eurocode design manuals. ISBN 3433029792.
- [22] **ČSN EN 1993-1-3:** Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-3: Obecná pravidla -
Doplňující pravidla pro za studena tvarované prvky a plošné profily
- [23] **ČSN EN 1993-1-5 ed. 2:** Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn
- [24] **ČSN EN ISO 6892-1:** Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za
pokojové teploty
- [25] **ČSN EN 1090-1:** Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 1: Požadavky
na posouzení shody konstrukčních dílců
- [26] **ČSN EN 1090-2:** Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické
požadavky na ocelové konstrukce

Příloha 1 – Výsledky statické zatěžovací zkoušky pro stanovení únosnosti vlny plechu se závěsem

Vzorek 01(1) - TR153-290, tl. 1,00 mm

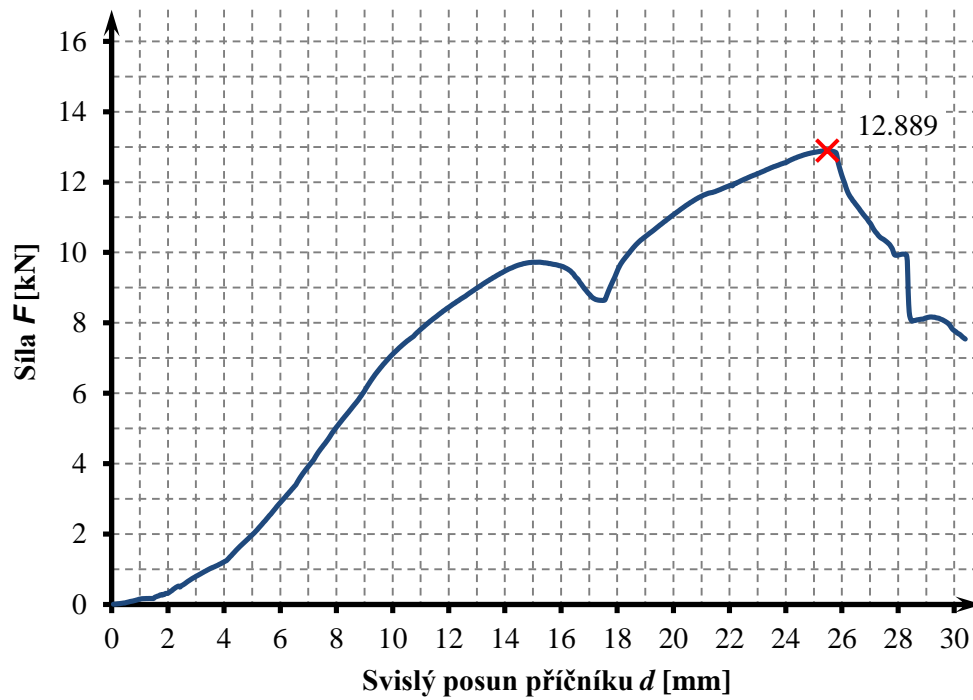


Vzorek 02(1) - TR153-290, tl. 1,00 mm

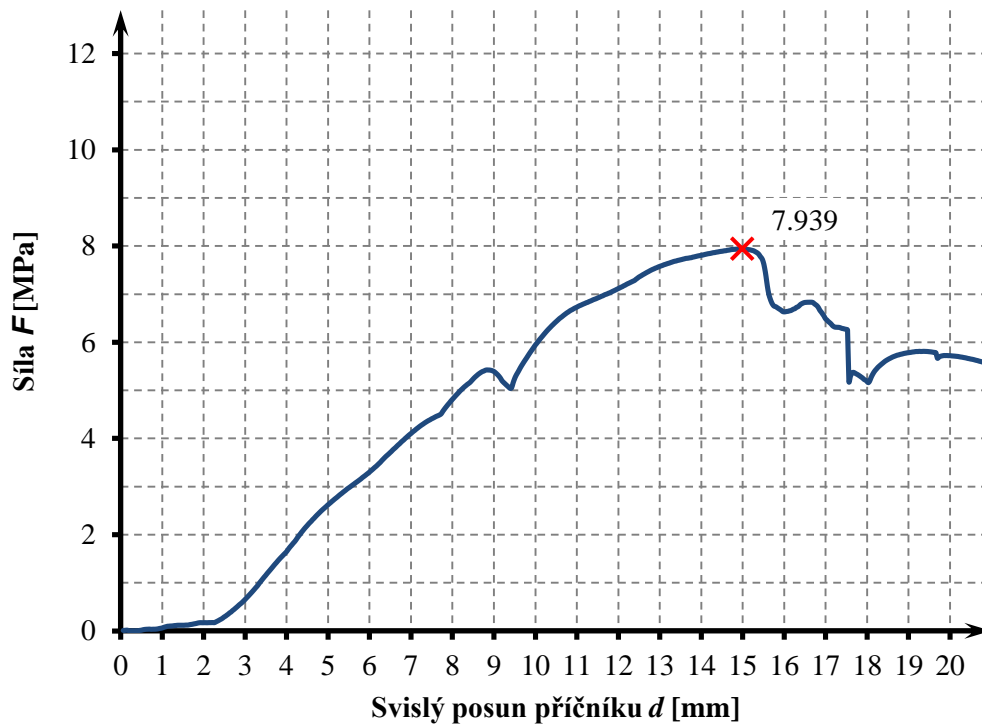




Vzorek 03(1) - TR153-290, tl. 1,00 mm

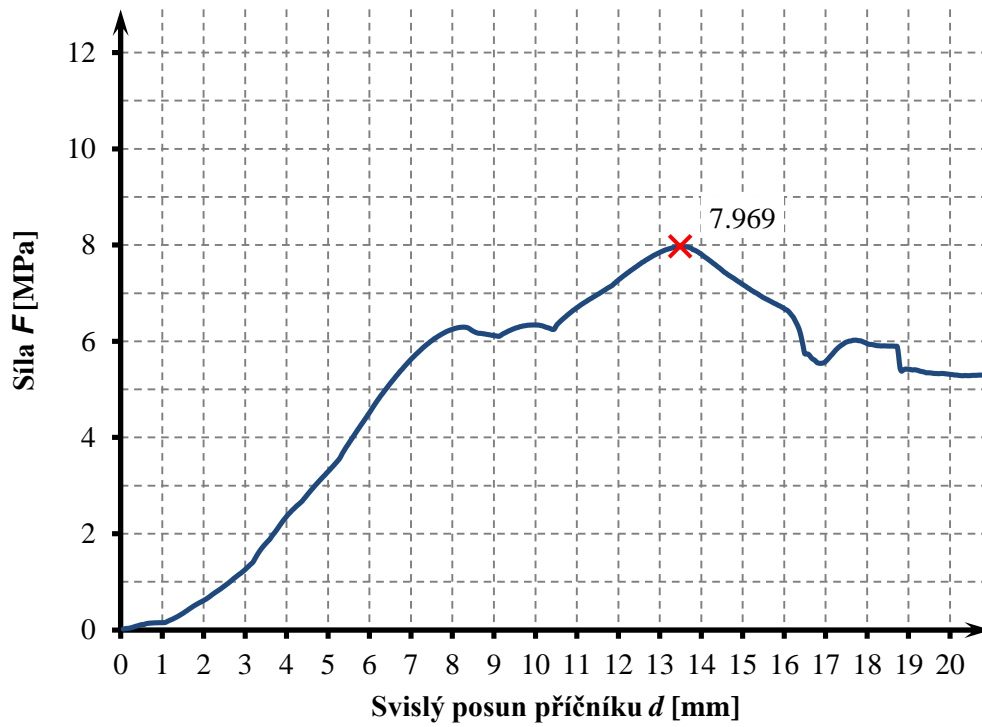


Vzorek 01(2) - TR153-290, tl. 0,75 mm

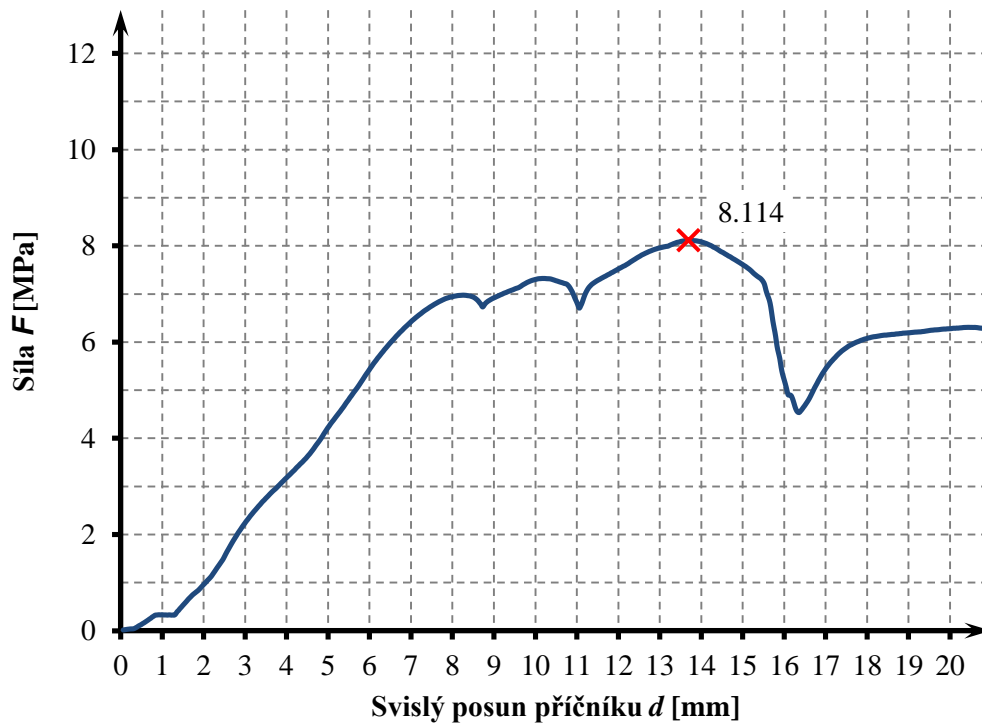




Vzorek 02(2) - TR153-290, tl. 0,75 mm

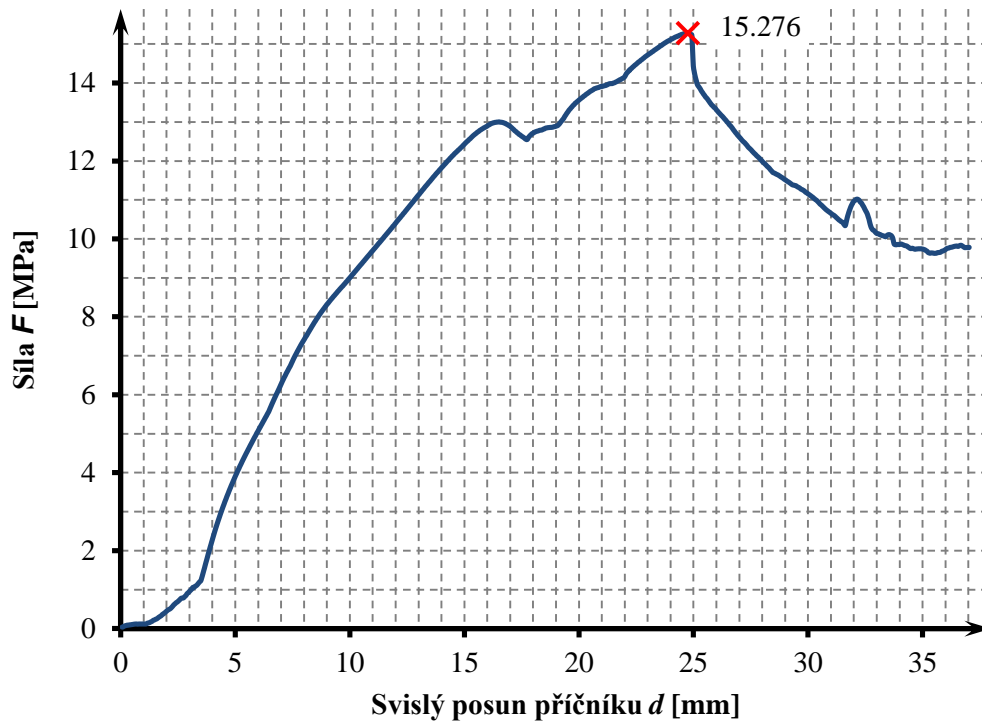


Vzorek 03(2) - TR153-290, tl. 0,75 mm

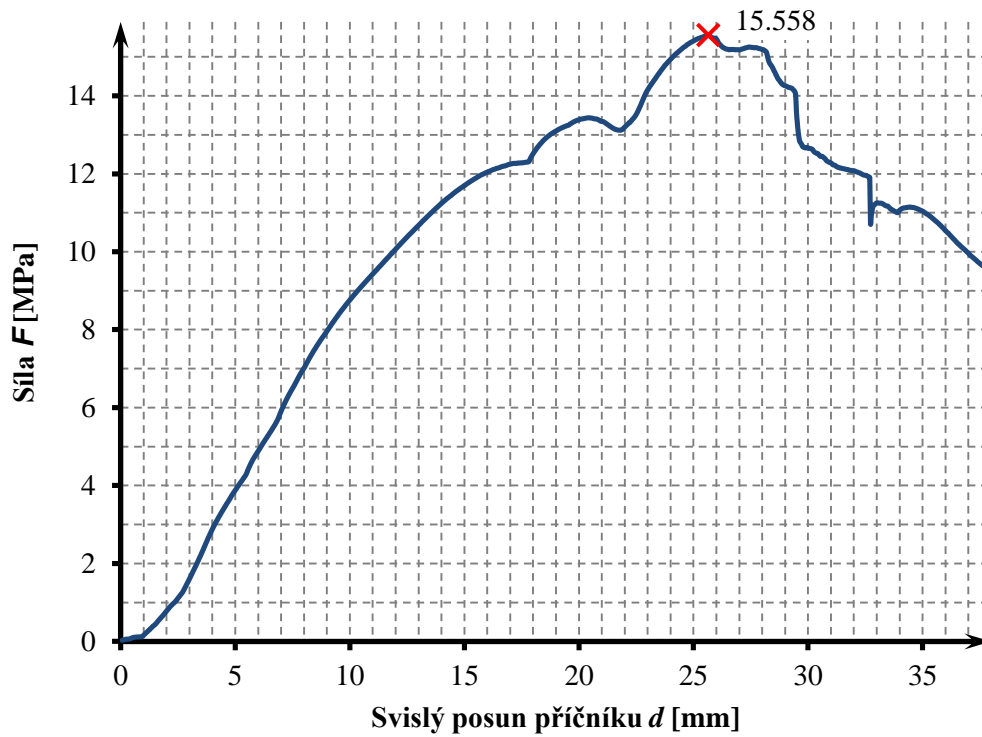




Vzorek 01(3) - TR153-290, tl. 1,25 mm

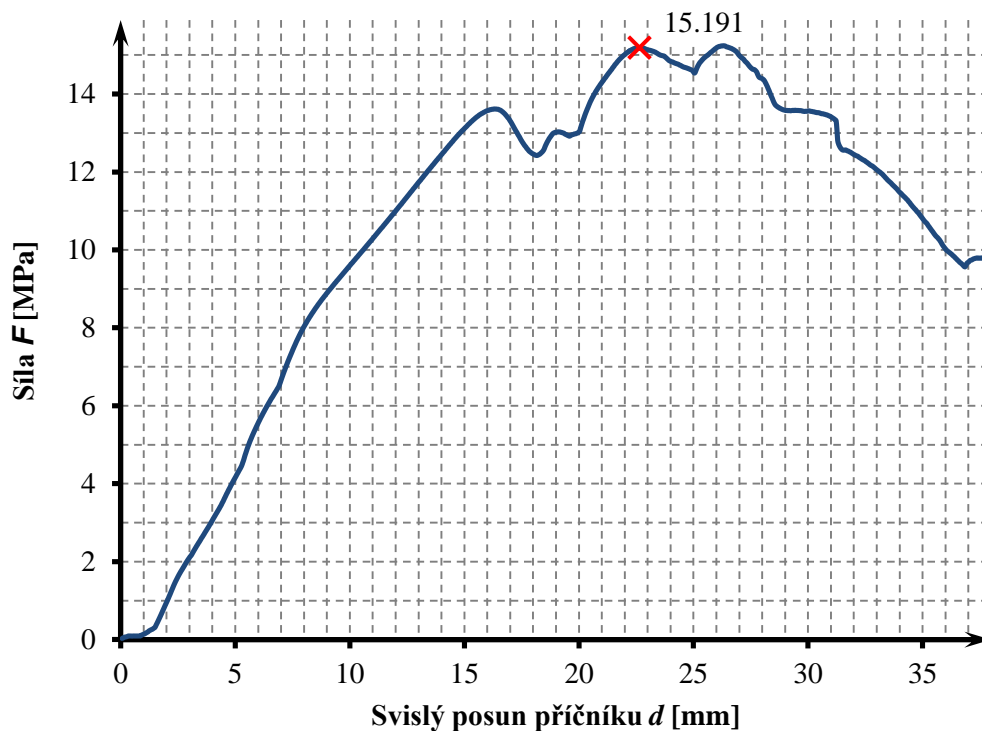


Vzorek 02(3) - TR153-290, tl. 1,25 mm

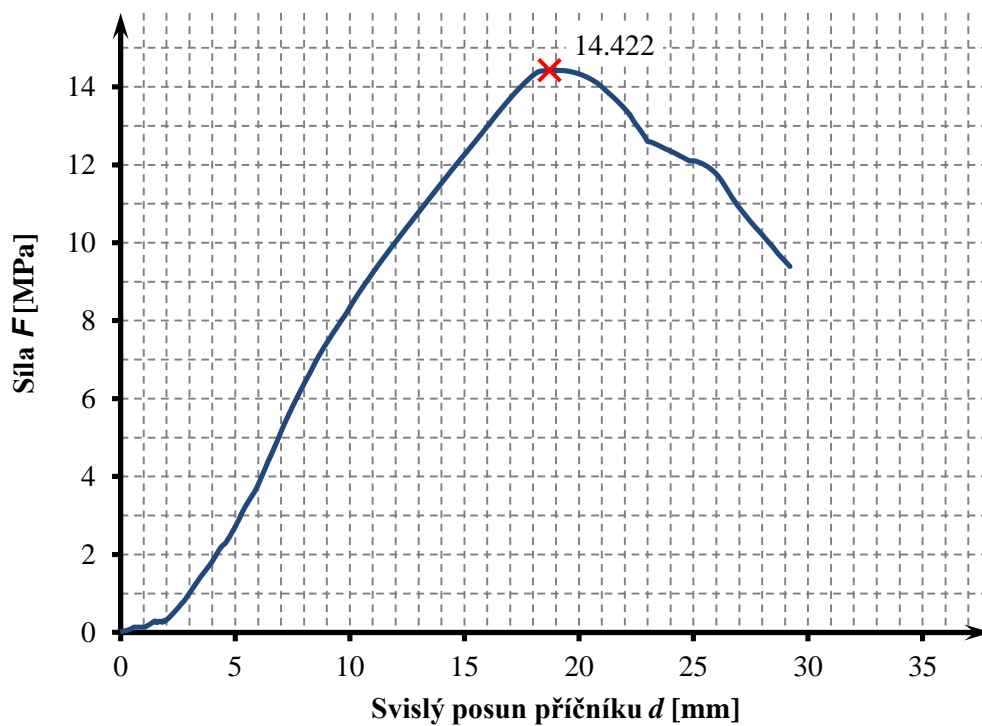




Vzorek 03(3) - TR153-290, tl. 1,25 mm

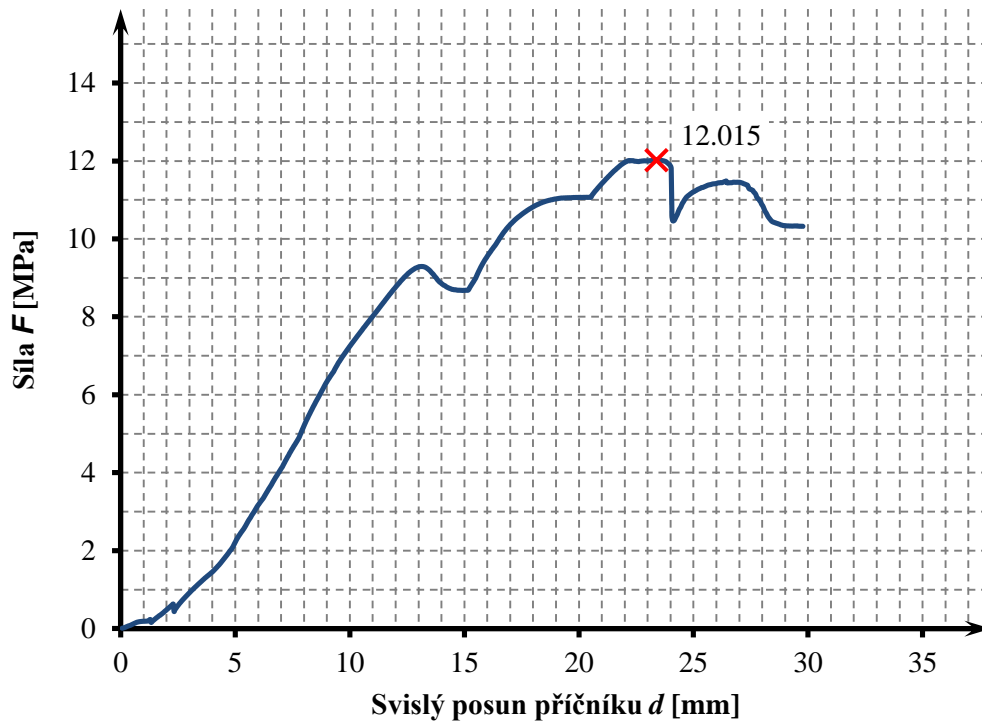


Vzorek 01(4) - TR160-250HL, tl. 1,00 mm

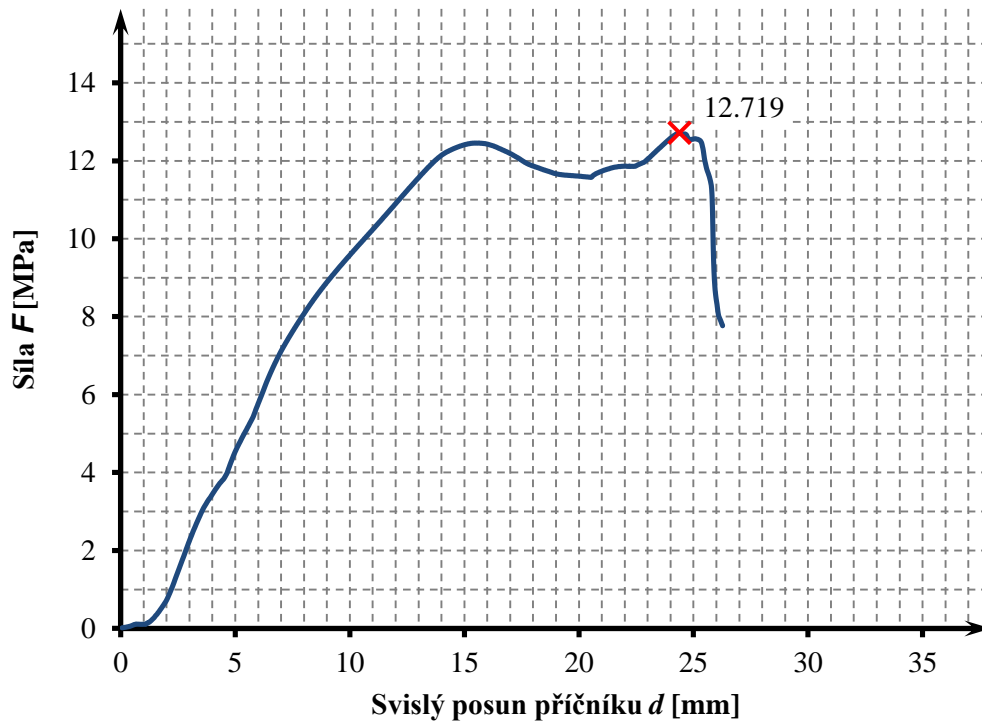




Vzorek 02(4) - TR160-250HL, tl. 1,00 mm

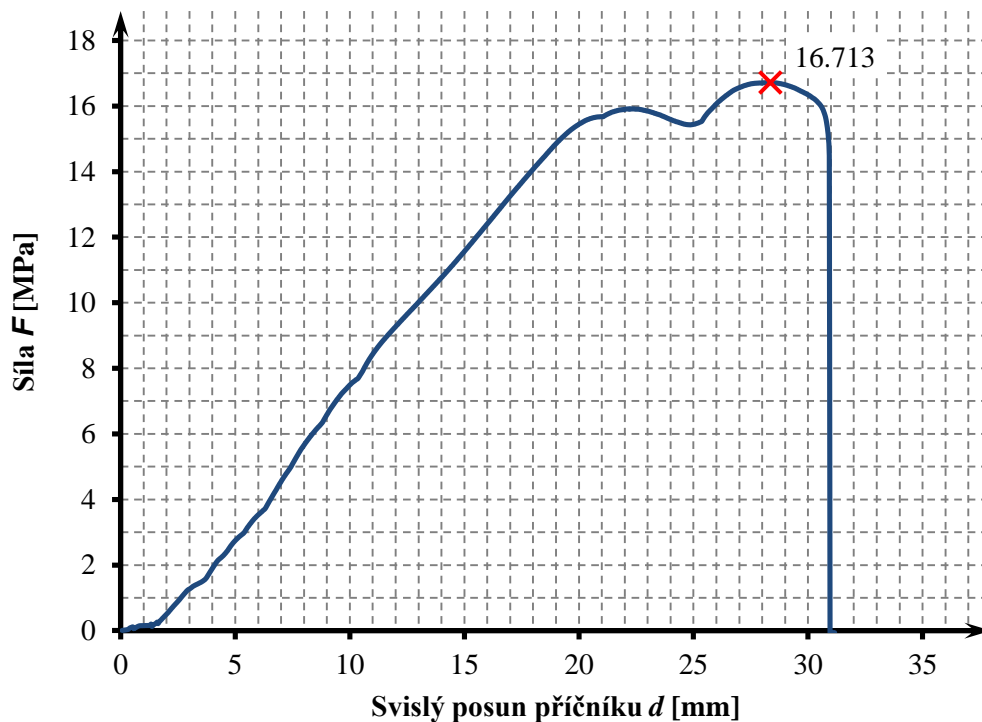


Vzorek 03(4) - TR160-250HL, tl. 1,00 mm

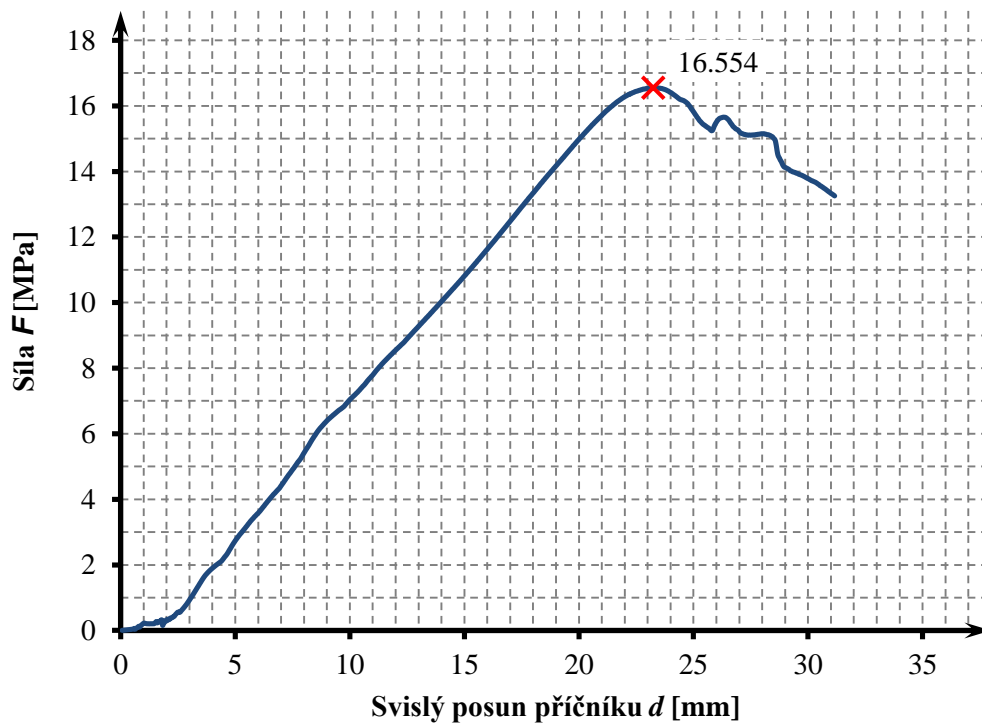




Vzorek 01(5) - TR160-250HL, tl. 1,25 mm

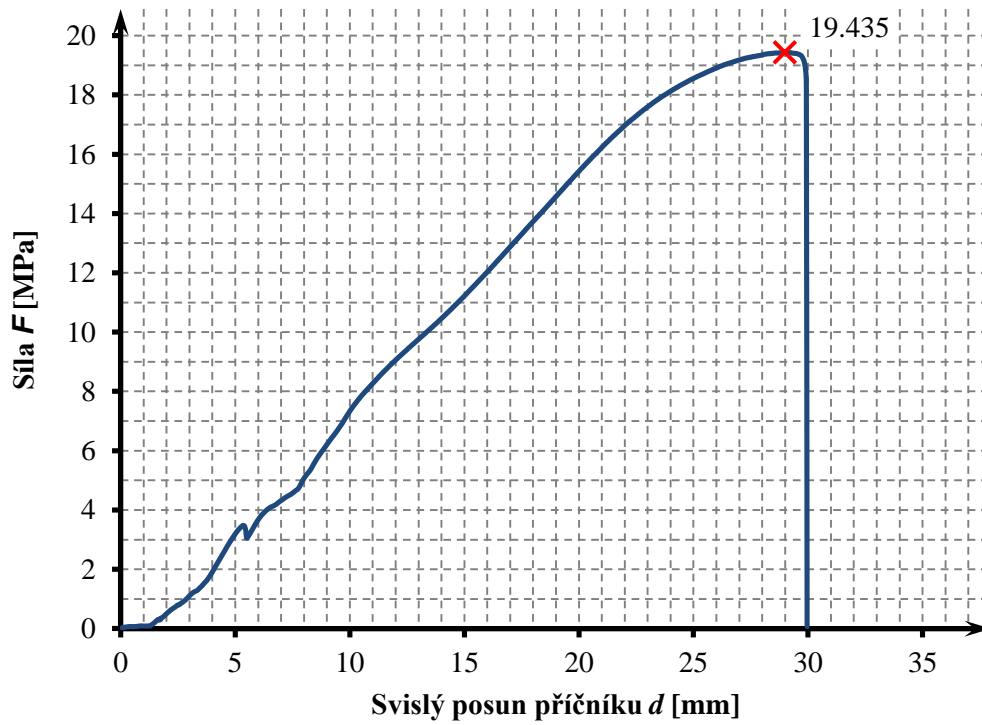


Vzorek 02(5) - TR160-250HL, tl. 1,25 mm

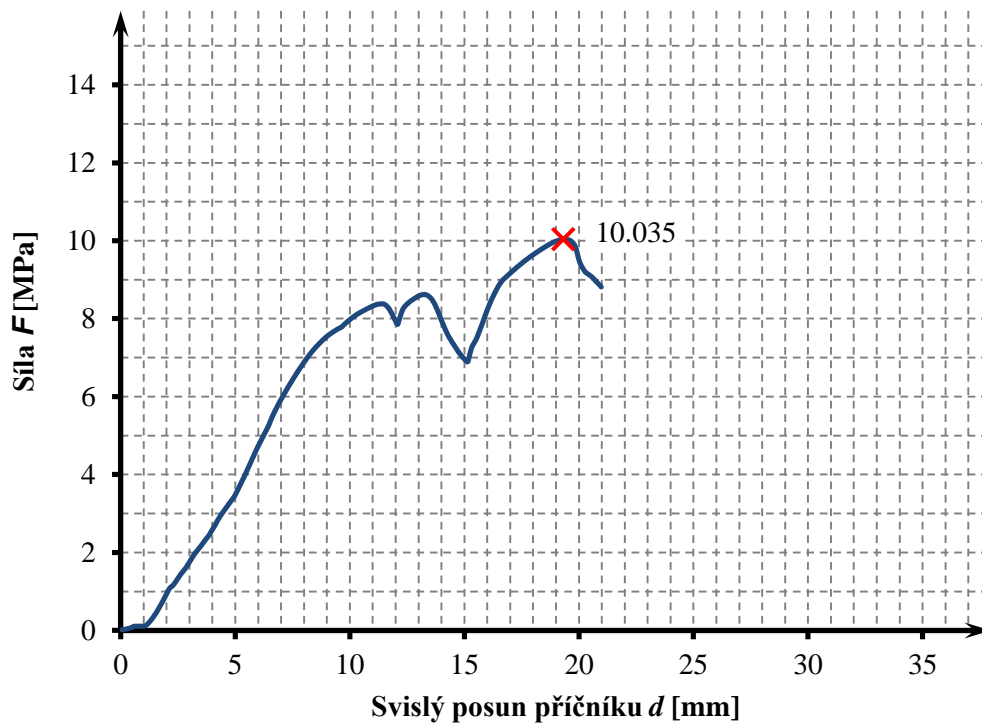




Vzorek 03(5) - TR160-250HL, tl. 1,25 mm

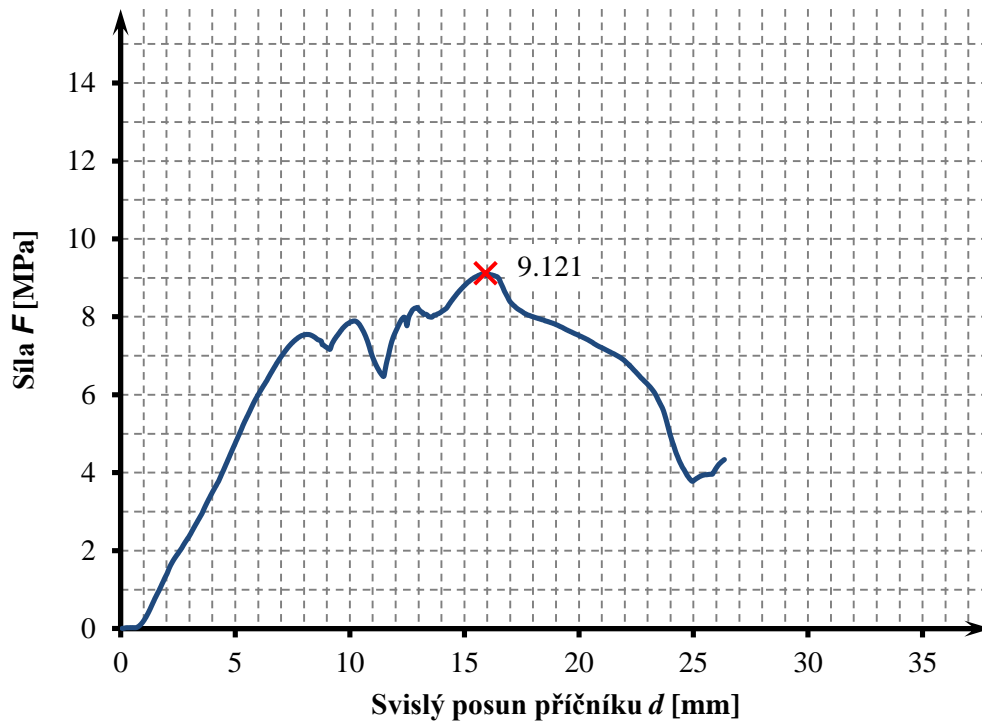


Vzorek 01(6) - TR153-290P, tl. 1,00 mm

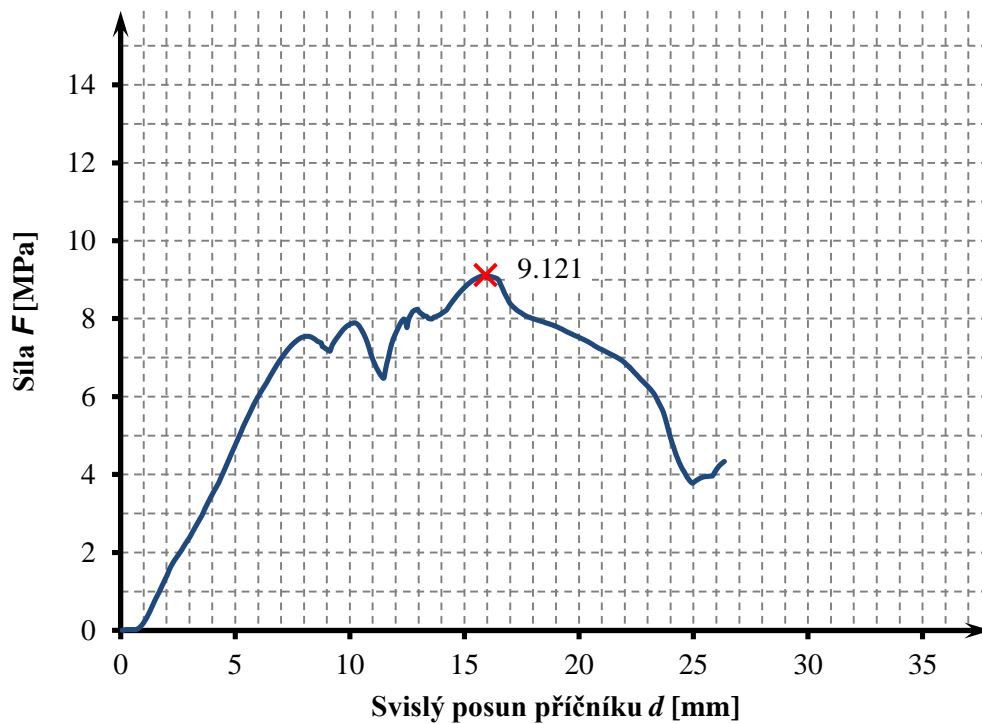




Vzorek 02(6) - TR153-290P, tl. 1,00 mm

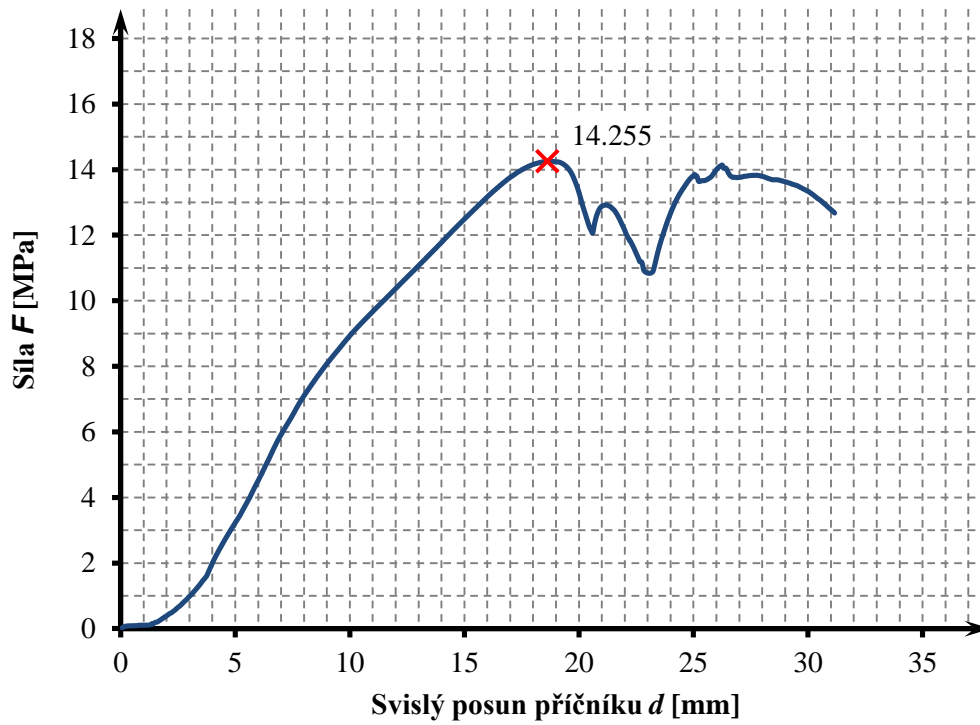


Vzorek 02(6) - TR153-290P, tl. 1,00 mm

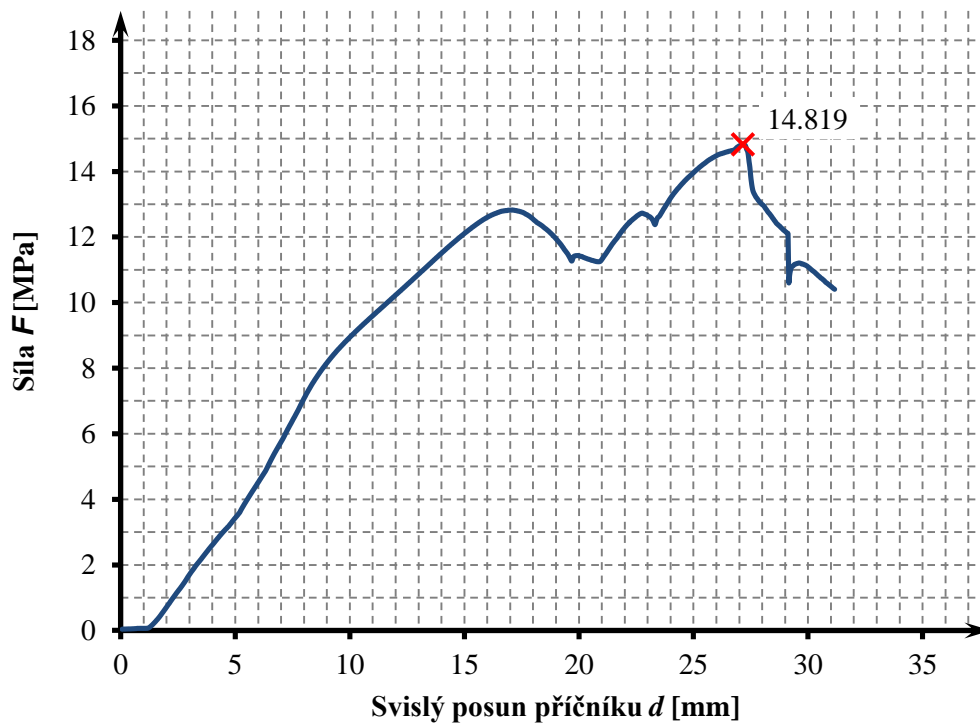




Vzorek 01(7) - TR153-290P, tl. 1,25 mm

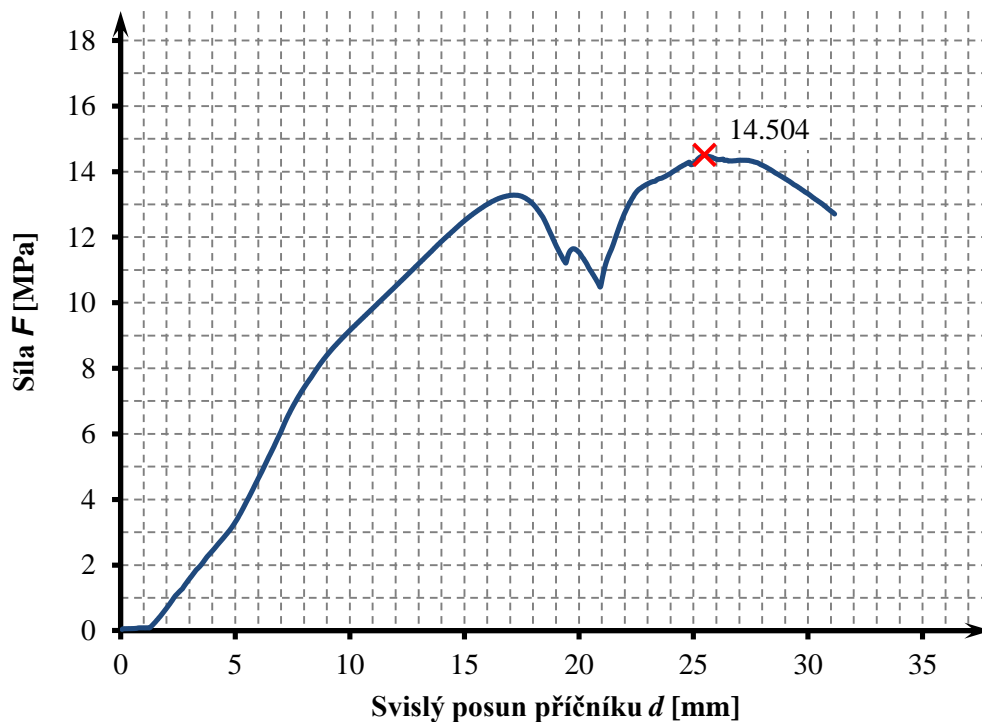


Vzorek 02(7) - TR153-290P, tl. 1,25 mm

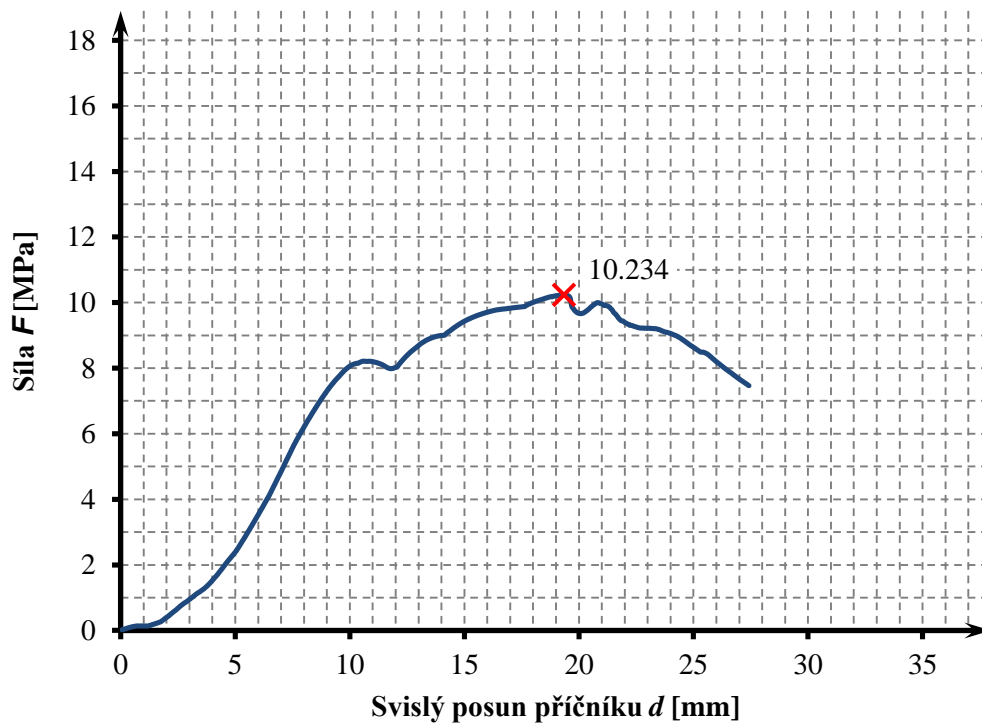




Vzorek 03(7) - TR153-290P, tl. 1,25 mm

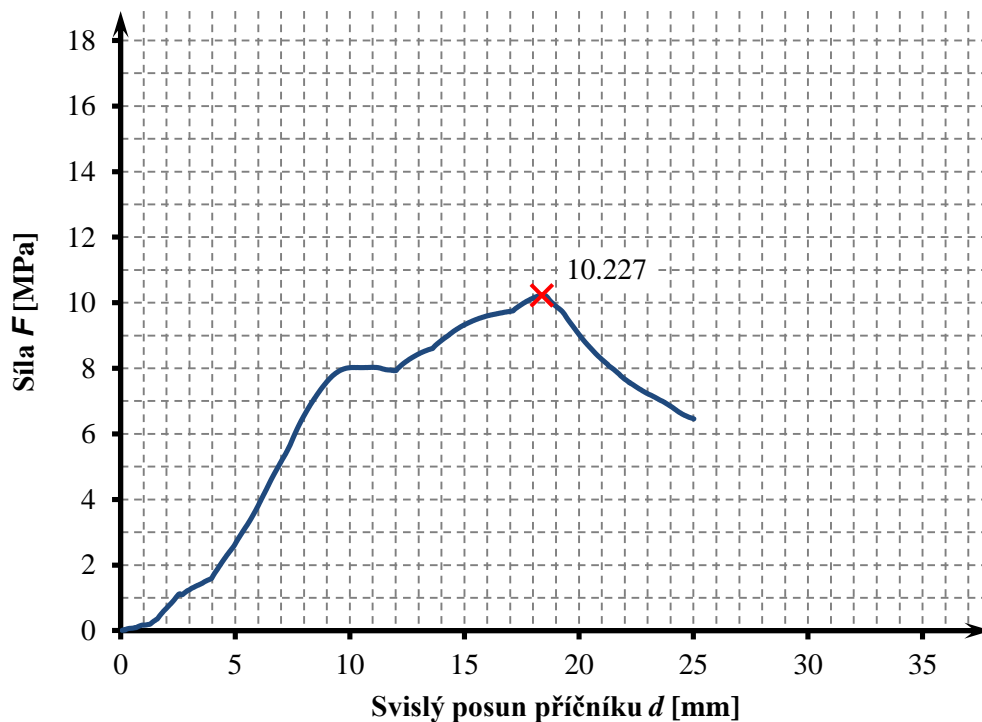


Vzorek 01(8) - TR160-250HLP, tl. 1,00 mm

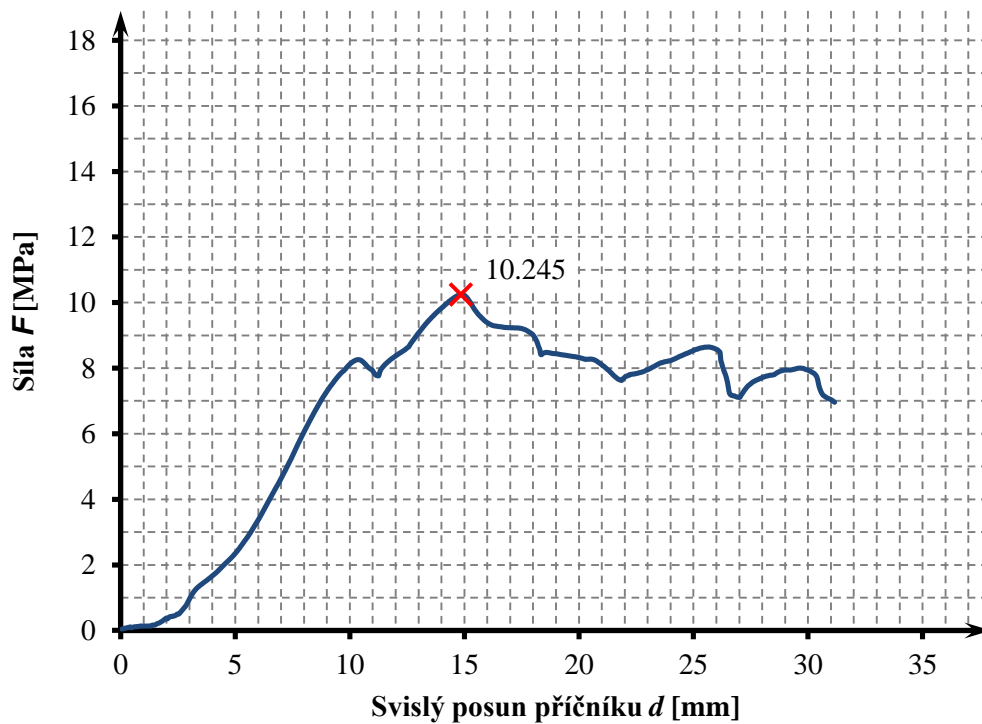




Vzorek 02(8) - TR160-250HLP, tl. 1,00 mm

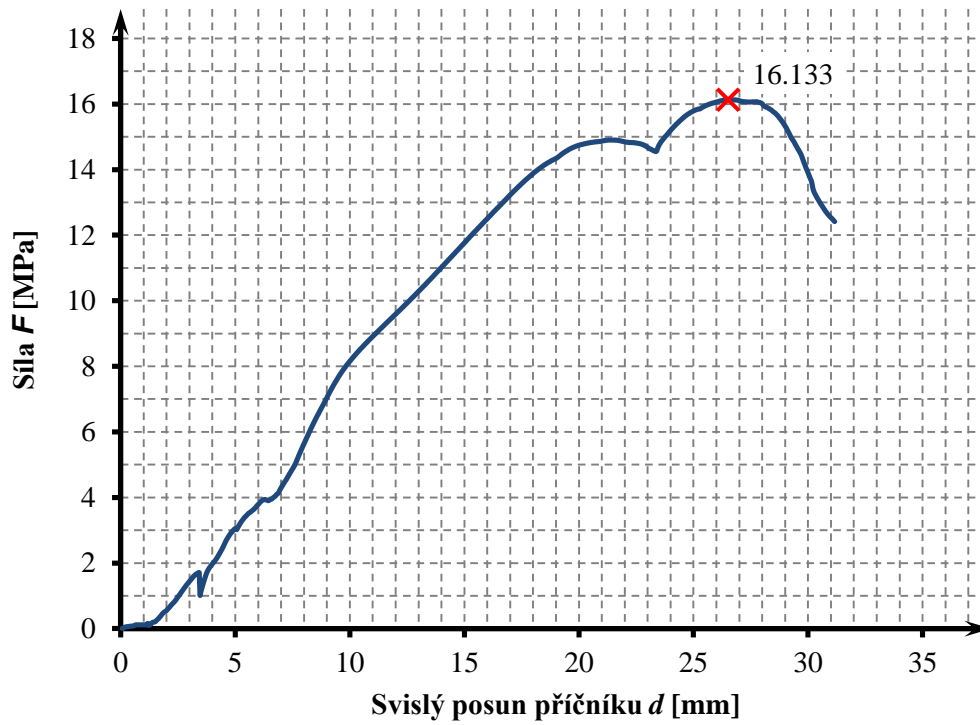


Vzorek 03(8) - TR160-250HLP, tl. 1,00 mm

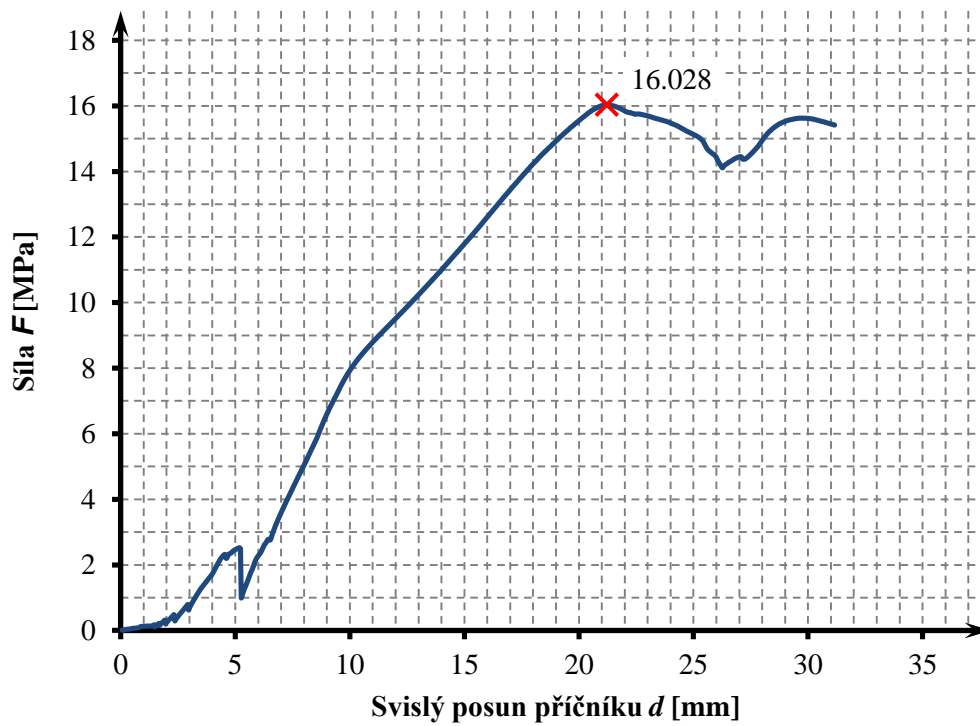




Vzorek 01(9) - TR160-250HLP, tl. 1,25 mm

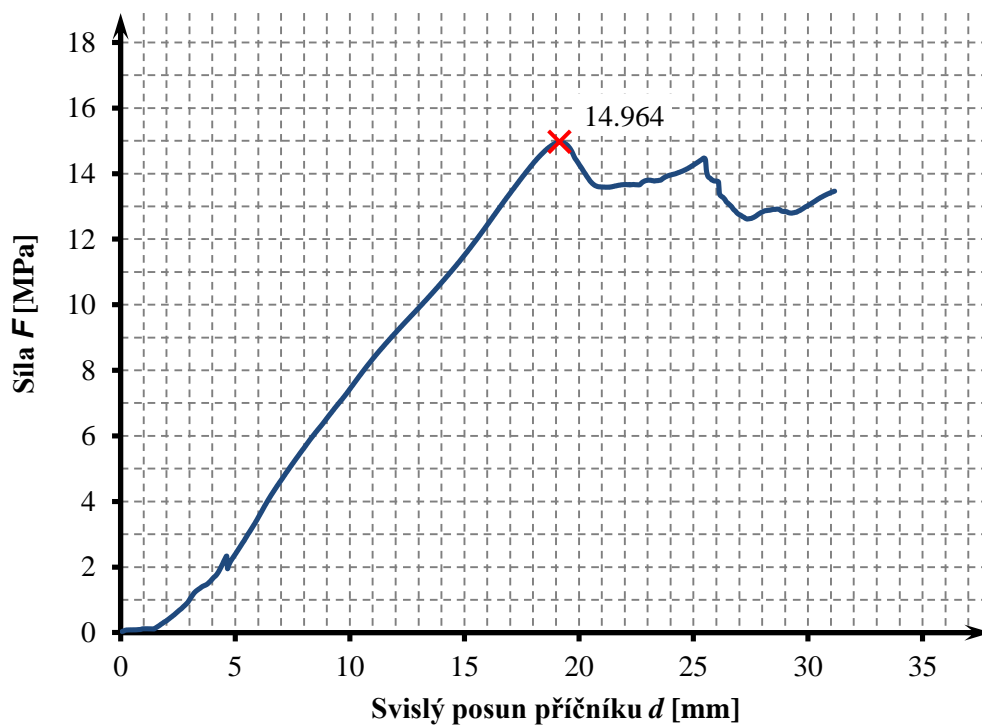


Vzorek 02(9) - TR160-250HLP, tl. 1,25 mm



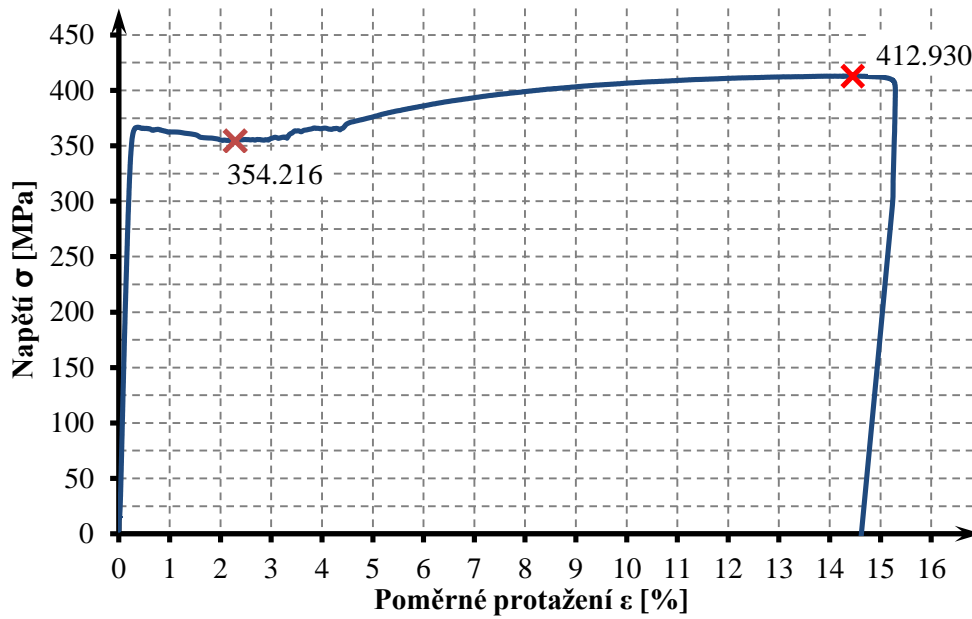


Vzorek 03(9) - TR160-250HLP, tl. 1,25 mm

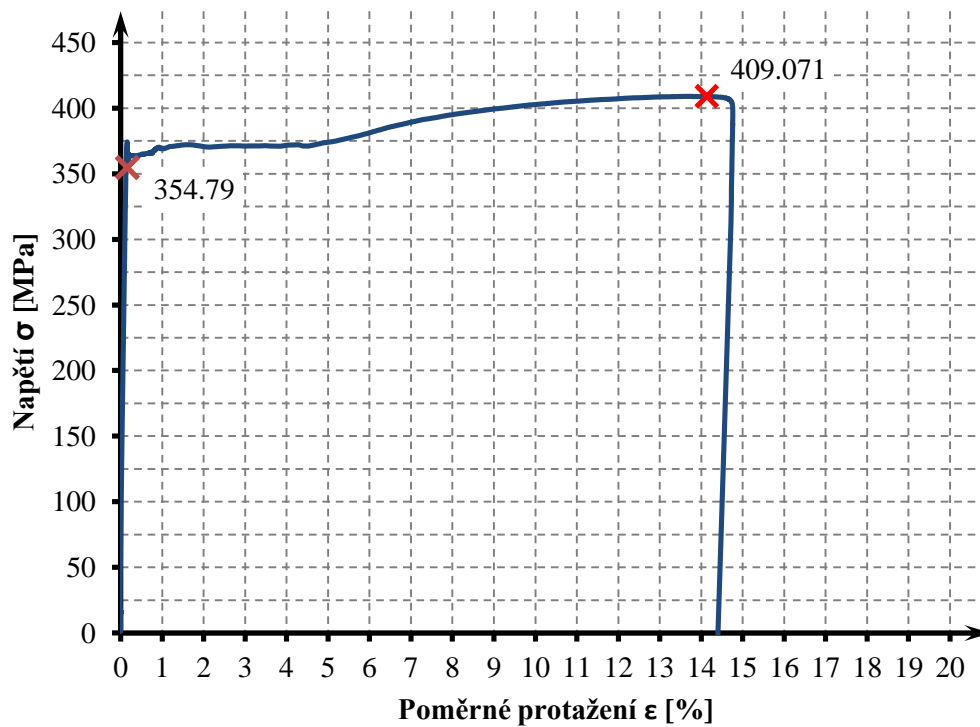


Příloha 2 – Výsledky doprovodné materiálové zkoušky

Vzorek (1) - TR153-290, tl. 1,00 mm

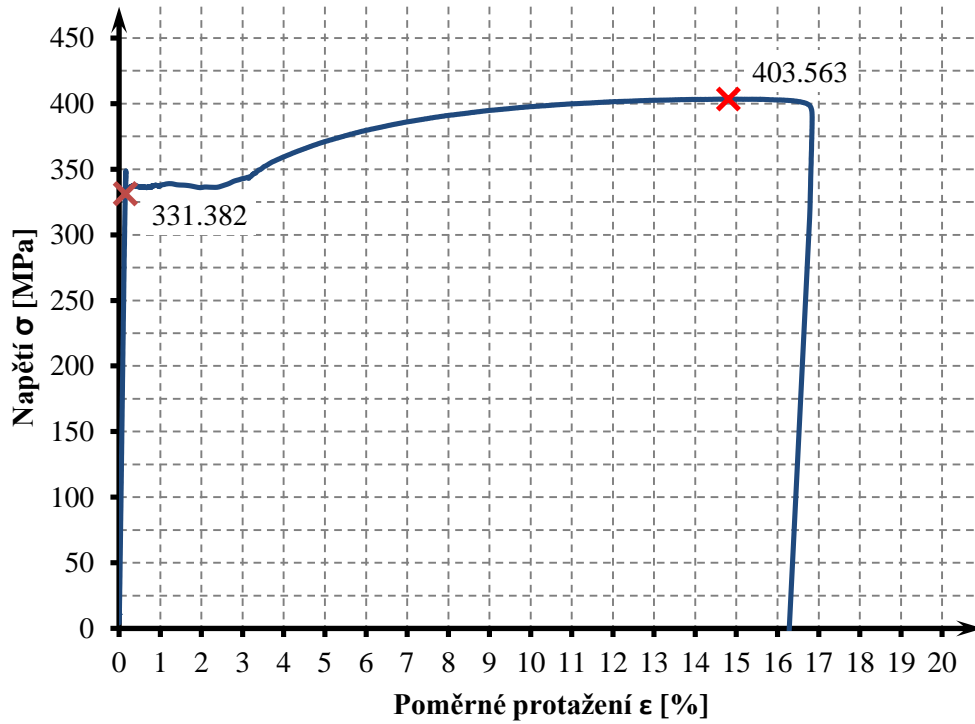


Vzorek (2) - TR153-290, tl. 0,75 mm

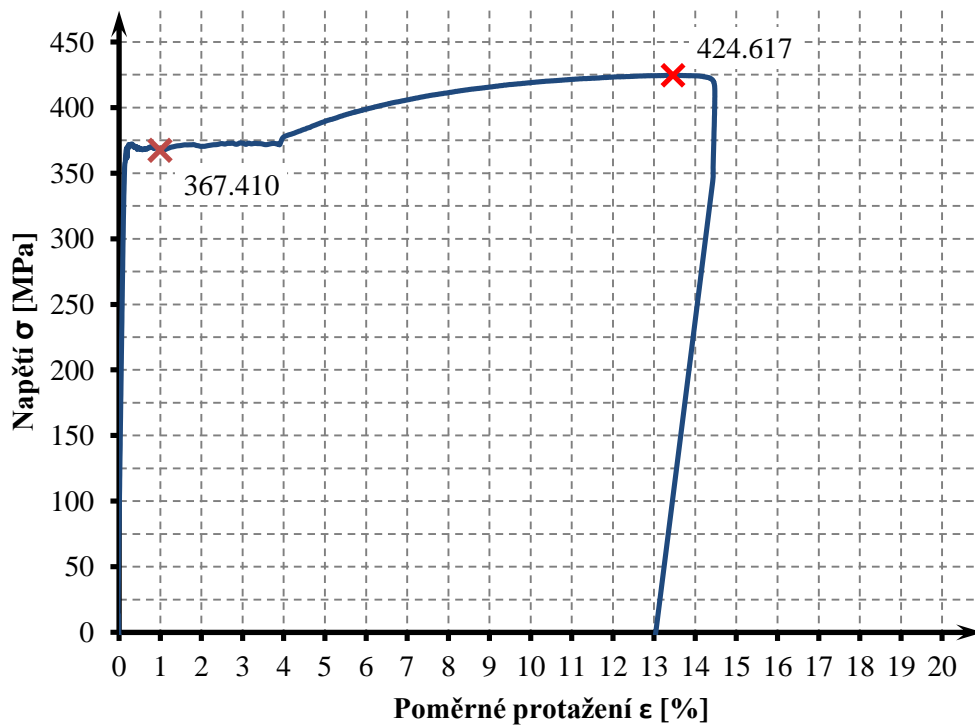




Vzorek (3) - TR153-290, tl. 1,25 mm

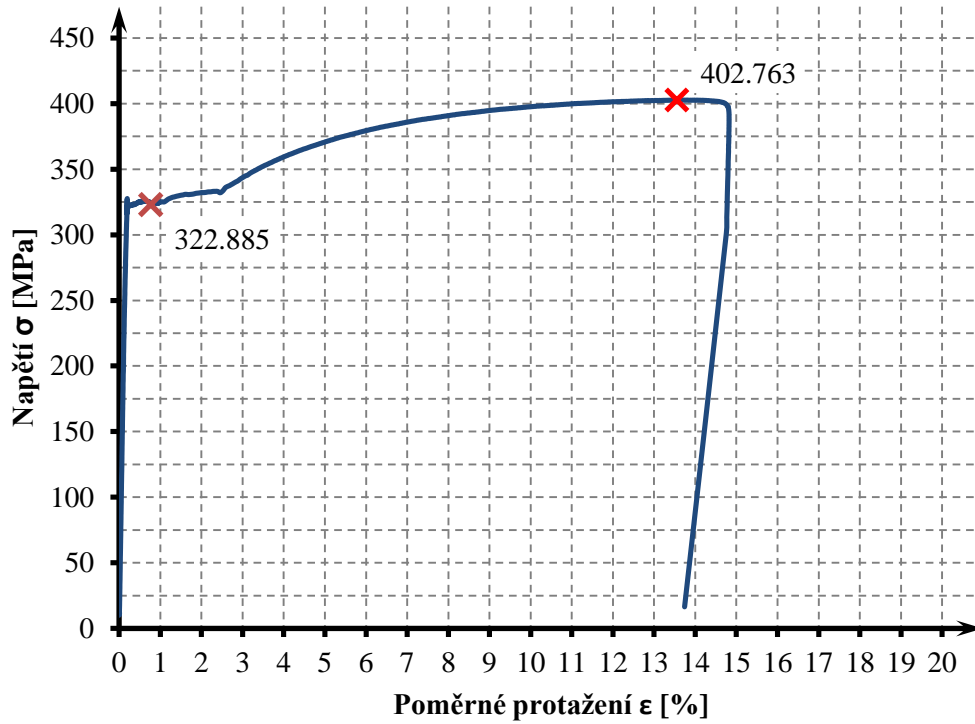


Vzorek (4) - TR160-250, tl. 1,00 mm

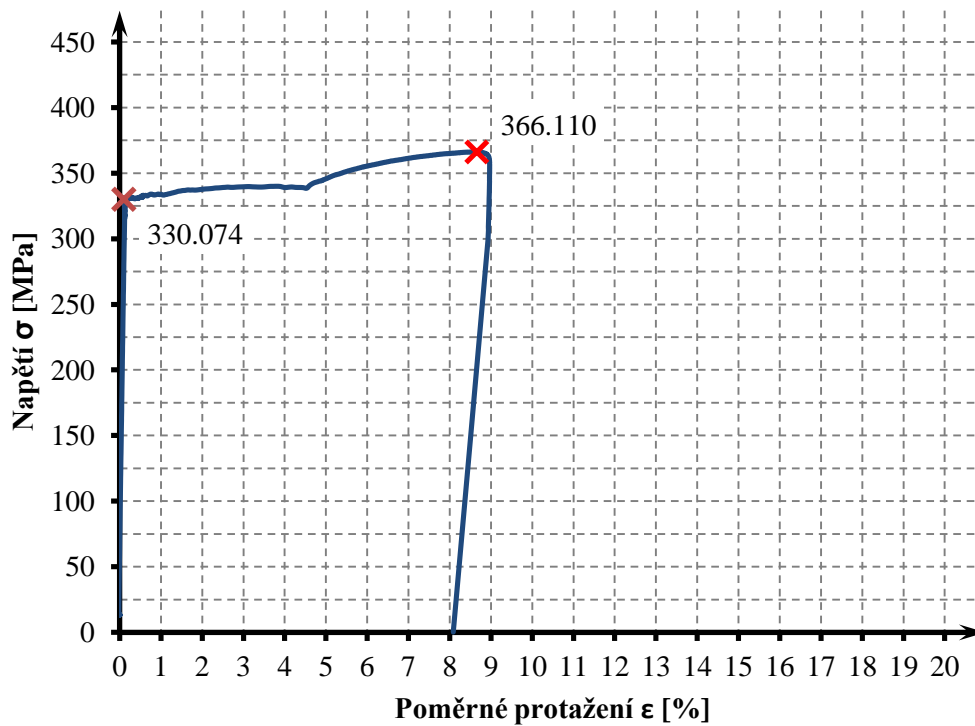




Vzorek (5) - TR160-250, tl. 1,25 mm

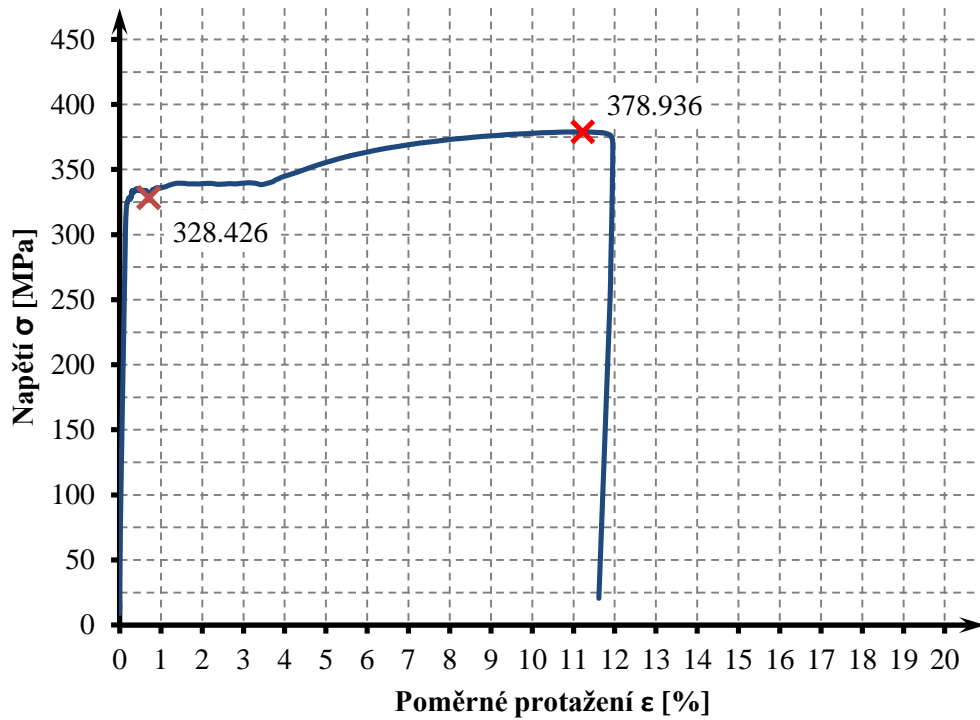


Vzorek (6) - TR153-290P, tl. 1,00 mm

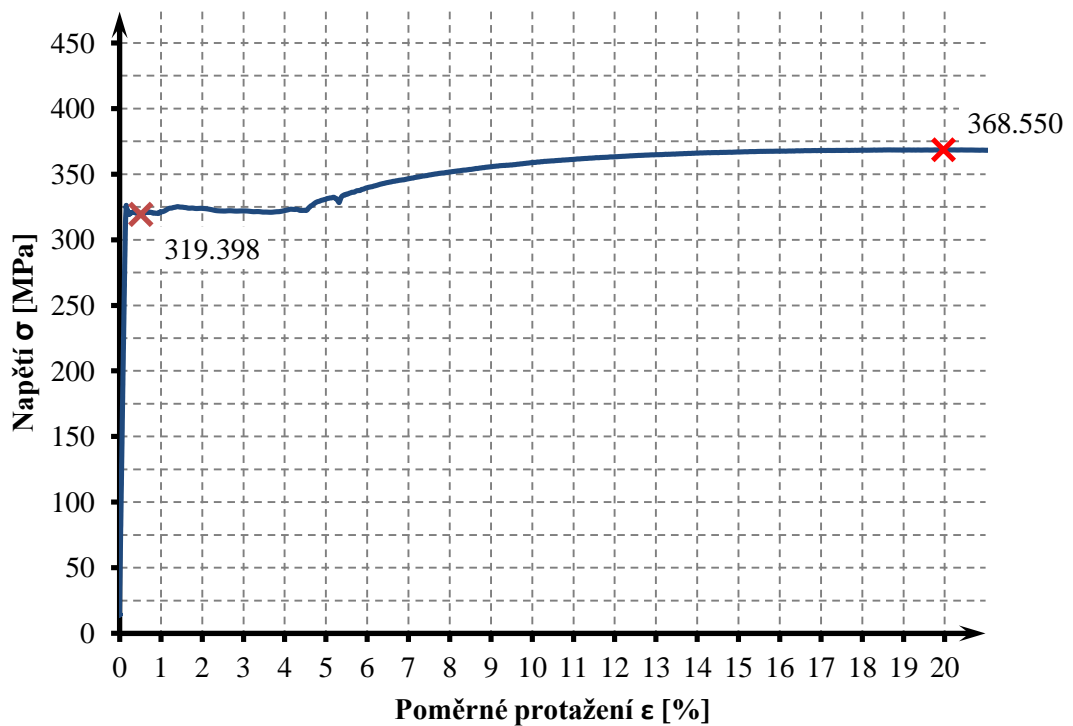




Vzorek (7) - TR153-290P, tl. 1,25 mm

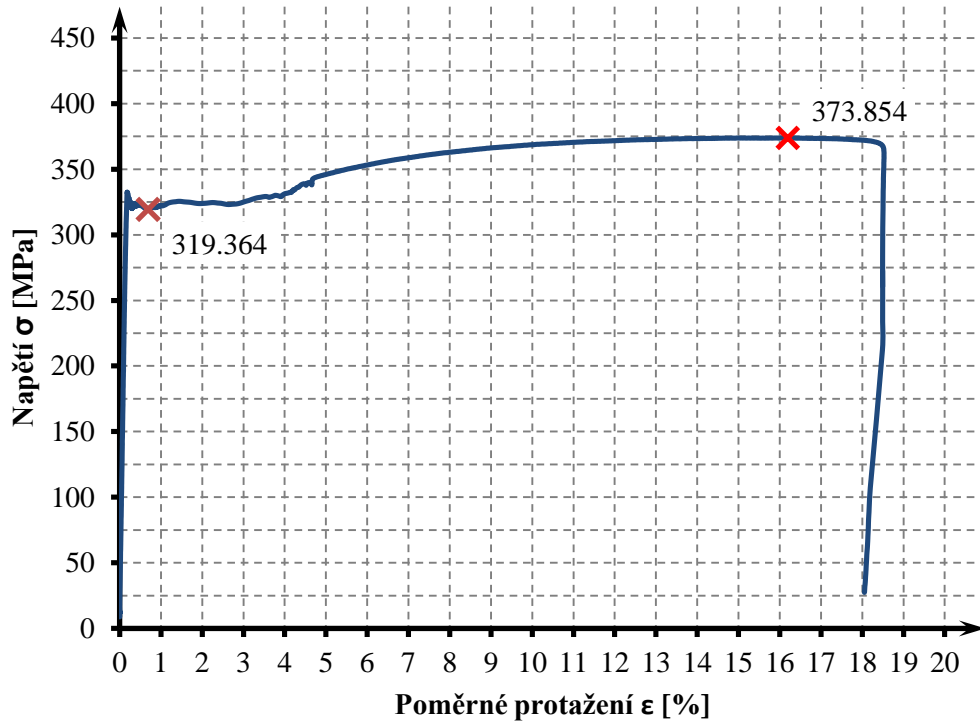


Vzorek (8) - TR160-250P, tl. 1,00 mm

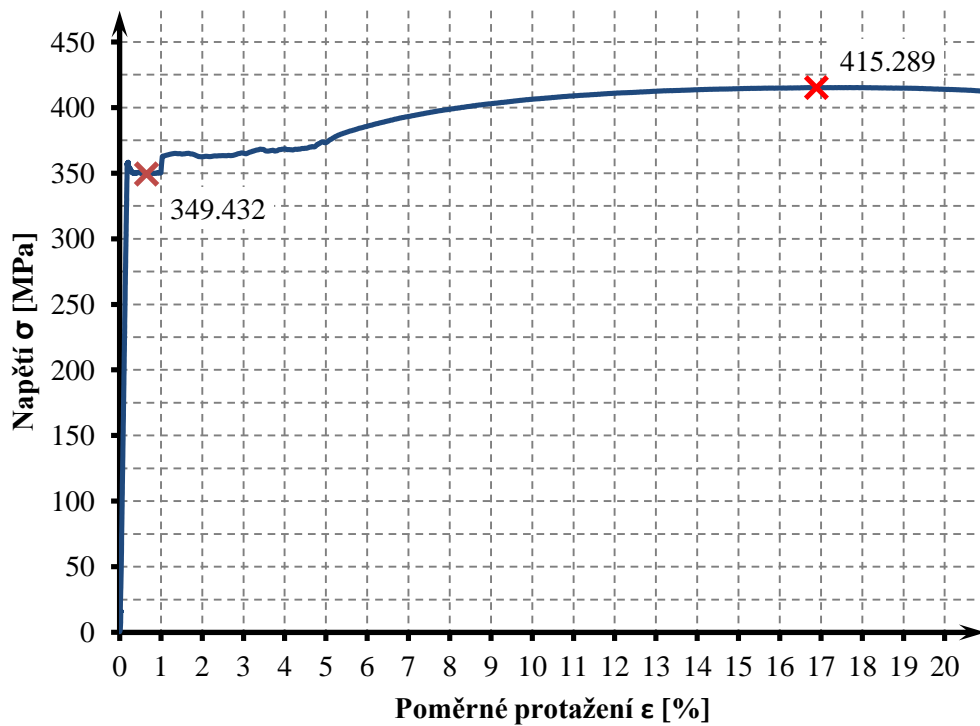




Vzorek (9) - TR160-250P, tl. 1,25 mm



Vzorek (10) - TR153-290, tl. 0,75 mm





Vzorek (11) - TR153-290, tl. 0,75 mm

