

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Bakalářská práce

**Přípoje sendvičových panelů**

Connections of sandwich panels

Vypracovala: Jana Kovandová

Vedoucí práce: Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Praha, 2023

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kovandová	Jméno: Jana	Osobní číslo: 494276
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor/specializace: Konstrukce pozemních staveb		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Přípoje sendvičových panelů	
Název bakalářské práce anglicky: Connections of sandwich panels	
Pokyny pro vypracování: Naplánování a provedení zkoušek přípojů sendvičových panelů a jejich vyhodnocení. Naplánování a provedení materiálových zkoušek, včetně vyhodnocení. Stanovení únosností a tuhosti přípojů.	
Seznam doporučené literatury: ECCS TC7 TWG 7.9 - Preliminary European Recommendations for the testing and Design of Fastenings for Sandwich Panels (ECCS N° 127; CIB° 320) ECCS TC7 TWG 10 - The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections (N° 124)	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Břetislav Židlický	
Datum zadání bakalářské práce: 21.2.2023	Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.5.2023 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak.roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21.2.2023	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze na základě odborných konzultací a s použitím uvedených zdrojů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 18. května 2023

Jana Kovandová

## **Poděkování**

Ráda bych moc poděkovala Ing. Břetislavu Židlickému, Ph.D. za odborné vedení, poskytnutí věcných konzultací a vstřícnost během zpracovávání této bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat celému týmu z Katedry ocelových a dřevěných konstrukcí za poskytnutí prostor k provádění experimentů, přípravu zkušebních vzorků a za možnost zpracovávat téma, které vyžadovalo pokročilé technické zázemí. Zároveň děkuji firmám Promstal Engineering, Nordec a Hilti za poskytnutí komponent, které byly použity v experimentech.

V neposlední řadě děkuji své rodině a příteli za to, že mi byli velkou oporou během psaní této práce.



# Abstrakt

Sendvičové panely patří mezi jeden z nejčastěji používaných typů obvodových plášťů ocelových konstrukcí. Plášť jako takový disponuje jistou smykovou tuhostí, při jejímž zohlednění během návrhu konstrukce by plášť mohl sloužit jako ztužující prvek této konstrukce nebo její části. V minulosti bylo prokázáno, že klíčovým faktorem určujícím smykovou tuhost obvodového pláště ze sendvičových panelů je tuhost a únosnost přípoju k podpůrné konstrukci. Právě problematika přípoju je náplní této práce.

Cílem teoretické části práce je představení technologie a variantních řešení sendvičových panelů, shrnutí v současnosti platných analytických postupů pro stanovování tuhosti a únosnosti přípoju a popis doporučených postupů zkoušek.

Praktická část se věnuje provedeným experimentům, konkrétně zkouškám přípoju, a také materiálovým zkouškám, jejichž výsledky jsou nedílnou součástí vyhodnocení. Experimentálně zjištěná smyková tuhost a únosnost vybraného přípoje je nakonec aplikována ve výpočtu, který demonstruje praktické použití těchto hodnot.

Hlavním cílem práce je porovnat výsledky (hodnoty smykové tuhosti a únosnosti řešených přípoju) získané z provedených zkoušek s výsledky stanovenými analyticky a ověřit tak bezpečnost a přesnost doporučených analytických postupů.

## Klíčová slova

Sendvičový panel, přípoj, smyková tuhost, smyková únosnost, zkouška přípoje, tahová zkouška, plášťové chování.

# **Abstract**

Sandwich panels are one of the most commonly used types of cladding systems for steel structures. As the cladding itself possesses some shear stiffness, it would be beneficial to take it into consideration during the steel structure design. As a result, it could serve as a stiffening element of the structure or its part. Recently, it was proved that the key factor governing the sandwich panels shear stiffness is the connection to sub-structure, namely load-bearing capacity and shear stiffness. These two connection properties are investigated in this Thesis.

The aim of the theoretical part is to introduce the sandwich panels technology and to provide background of currently valid methods for analytical determination of stiffness and resistance of connections and a description of the recommended experimental setting.

The experimental part of the Thesis describes conducted tests, specifically shear tests of connections, material tensile tests and the results. The experimentally obtained shear stiffness and shear resistance of the selected connection are finally applied in an example that demonstrates the practical use of these values and the whole stress-skin design.

The main goal of the thesis is to compare the results (shear stiffness and resistance) obtained from the tests with the results calculated analytically and thus verify the safety and accuracy of the recommended analytical procedures.

# **Keywords**

Sandwich panel, connection, shear stiffness, shear resistance, testing of connections, tensile test, stressed skin action.

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Technologie sendvičových panelů.....	9
2.1	Tloušťka panelu.....	9
2.2	Varianty profilace plechů .....	11
2.3	Materiálové varianty.....	12
2.3.1	Izolační jádro .....	12
2.3.2	Ocelové plechy .....	13
3	Současný stav problematiky .....	15
3.1	Působení sendvičových panelů ve smyku.....	15
3.2	Smyková tuhost a únosnost přípoje .....	17
3.2.1	Analytické stanovení tuhosti a únosnosti přípoje .....	17
3.2.2	Experimentální stanovení tuhosti přípoje .....	20
4	Zkoušky přípojů sendvičových panelů.....	23
4.1	Použitá měřicí zařízení .....	23
4.2	Zkušební sestava.....	28
4.3	Příprava zkoušek .....	30
4.4	Nastavení a průběh zkoušek .....	33
4.5	Získaná data z provedených zkoušek .....	34
5	Materiálové zkoušky .....	45
5.1	Rozměry zkušebních těles .....	45
5.2	Měřicí technika.....	47
5.3	Získaná data z provedených materiálových zkoušek.....	50
6	Vyhodnocení zkoušek .....	55
6.1	Statistické vyhodnocení zkoušek přípojů .....	55
6.2	Analyticky stanovené hodnoty tuhosti a únosnosti přípojů.....	58
6.3	Porovnání naměřených a analyticky stanovených hodnot.....	60
7	Aplikace naměřených hodnot ve výpočtu .....	62
7.1	Mezní stav únosnosti .....	63
7.2	Mezní stav použitelnosti.....	64
	Závěr.....	66
	Použité zdroje .....	68
	Příloha A.....	71
	Příloha B.....	77

# 1 Úvod

Sendvičové panely jsou považovány za moderní řešení obvodového pláště budov, zejména sportovních, průmyslových, zemědělských, obchodních a výrobních objektů. Jedná se o prefabrikované prvky složené z vnitřního a vnějšího ocelového plechu a izolačního jádra. Panely vynikají tepelně izolačními vlastnostmi, dlouhou životností, jednoduchou montáží, estetickými vlastnostmi a minimálními nároky na údržbu.

Kromě svých základních funkcí, kterými jsou oddělení budovy od okolního prostředí (vytvoření tepelně izolační a akustické obálky) a přenos ohybových namáhání (vzniklých v důsledku působení zatížení sněhem a větrem) do primárních nosných prvků stavby, mohou být sendvičové panely využity i pro stabilizační funkci. Panely mohou zvyšovat odolnost jednotlivých prvků nosné konstrukce (vaznice, paždíku, sloupu, nosníku) proti vybočení z roviny a omezit klopení, ale také zvyšovat horizontální tuhost celé konstrukce. Míra této stabilizace, případně ztužení konstrukce, závisí jednak na tuhosti samotného panelu, avšak klíčovým faktorem je tuhost přípoje k danému prvku.

Při znalosti tuhosti přípojů sendvičových panelů a následně stanovené smykové tuhosti obvodového pláště lze stanovit a zahrnout plynoucí horizontální ztužení do návrhu konstrukce. Tím může být docíleno značné úspory materiálu při návrhu konstrukce, zejména na jejích ztužujících prvcích, nebo, v případě rámových konstrukcí, na dimenzích nosných prvků rámové vazby.

Doposud bylo k tématu tuhosti přípojů sendvičových panelů provedeno několik výzkumných projektů a experimentů, jejichž výsledkem bylo odvození vzorců pro výpočet tuhosti a únosnosti přípojů v závislosti na parametrech panelu a samotného upevnění. Náplní této práce bude experimentální ověření vztahů pro smykovou tuhost a únosnost přípoje sendvičového panelu. Získaná data budou porovnána s výsledky analytických postupů pro stanovení tuhosti a únosnosti přípoje. Zkoušky přípojů budou provedeny tak, aby bylo docíleno co možná největšího přiblížení skutečného chování na reálné konstrukci.

## 2 Technologie sendvičových panelů

Zaměříme-li se na stěnové a střešní sendvičové panely, zjistíme, že se vyrábí v mnoha variantách lišících se v rozměrech, použitých materiálech, vizuální podobě povrchu a dalších faktorech ovlivňujících konečné vlastnosti prvku. Pro výběr správného typu panelu pro konkrétní konstrukční řešení je nutno znát řadu okrajových podmínek, jako je požadovaný součinitel prostupu tepla, minimální požární odolnost konstrukce, vzdálenosti nosných prvků (vaznic, paždíků, příclí, sloupů apod.), ale i architektonické požadavky nebo ekonomické faktory.

Dle oblasti použití lze panely rozdělit, jak již bylo zmíněno, na střešní a stěnové. Setkáme se však i s případy, kdy je možné tentýž sendvičový panel použít jak pro stěny, tak jako střešní plášť. Další základní dělení lze provést dle tloušťky panelu, typu použité izolace, typu oceli použité pro interiérové a exteriérové plechy, tloušťky a profilace těchto plechů, případně dle způsobu kotvení (přiznané nebo skryté) [1].

Faktory, jakými jsou tloušťka panelu, tloušťka vnitřního a vnějšího plechu, použité materiály (izolačního jádra i povrchových plechů) a typy profilace plechů, budou detailně popsány dále. Jedná se totiž o klíčové parametry, které je nutno znát pro obecné pochopení technologie sendvičových panelů a rozmanitosti těchto výrobků. Zároveň i v rámci praktické části bude použito více typů panelů, které se mezi sebou budou lišit právě v těchto parametrech, a budou tak představovat řešené proměnné.

### 2.1 Tloušťka panelu

Většina výrobců zhotovuje sendvičové panely o minimálních tloušťkách cca 25 nebo 30 mm a maximálních tloušťkách 200 mm. Větší tloušťky mohou být použity například pro obvodové pláště mrazírenských hal, ale v základní výrobní řadě je většinou nenajdeme.

Například univerzální panel pro opláštění šikmých střech Kingspan KS1000 RW je dle technických informací [2] vyráběn v tloušťkách 80; 100; 120; 140; 160 mm.

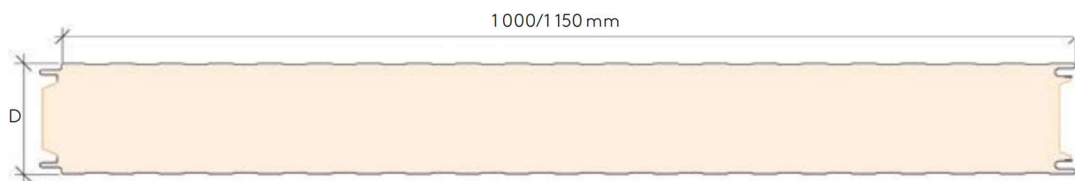
Širší výrobní řada je uvedena například pro panel Kingspan KS1000/1500 NF, který je určen pro opláštění obvodových i vnitřních stěn nebo podhledů. Dle podkladů výrobce [3] je tento produkt dodáván v tloušťkách 40; 60; 80; 100; 120; 150; 170; 200 mm.

Tento rozměr je základní charakteristikou panelu, která je uvedena v technickém listu pod pojmem „tloušťka panelu“ a slouží k jasné identifikaci daného výrobku. Je však potřeba si

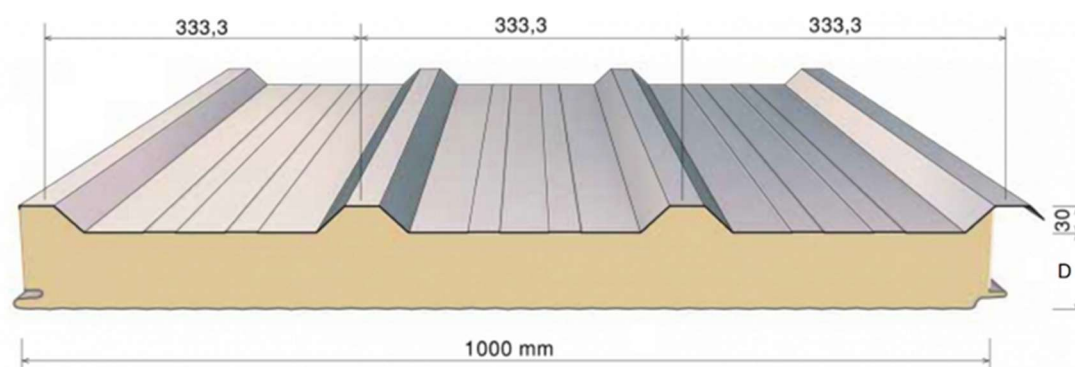
uvědomit, že zvláště u střešních panelů s vyšší profilací vnějšího plechu plechů najdeme v příčném řezu základní tloušťky dvě – celkovou tloušťku včetně profilace vnějšího plechu a převažující tloušťku panelu. Pro správný návrh je nutné vědět, který z těchto rozměrů je považován za tloušťku panelu uvedenou v technických informacích o výrobku.

Dle normy ČSN EN 14509 ed. 2 [4] je jmenovitá vzdálenost mezi vnějšími rovnými, mírně profilovanými nebo mikroprofilovanými povrchy plechů (včetně tloušťky těchto plechů) značena symbolem  $D$ . U panelů s touto profilací plechů (typicky stěnové panely) tedy uvedená tloušťka reprezentuje celkovou tloušťku výrobku včetně tloušťky případného mírného profilování (viz Obr. 1).

Naproti tomu u panelů s výrazněji profilovanými povrchovými plechy (typicky střešní panely) se měření vzdálenosti  $D$  provádí v místě s převažující tloušťkou, viz Obr. 2. V takových případech tedy hodnota označená jako tloušťka panelu reprezentuje majoritní vzdálenost povrchů vnitřního a vnějšího plechu. Hodnota maximální tloušťky panelu, tedy včetně navýšení v důsledku profilace vnějšího plechu, je následně uváděna v technickém listu.



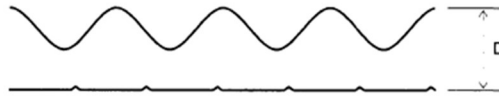
Obr. 1 Příčný řez panelem s mírným profilováním, zdroj: [3]



Obr. 2 Příčný řez panelem s profilací, zdroj: [5], upraveno

Zvláštním případem jsou panely s povrchovými plechy, jejichž profilace je výrazná, avšak nelze jednoznačně určit převažující tloušťku výrobku. Dle ČSN EN 14509 ed. 2 [4] se pak pro určení hodnoty  $D$  používá vzdálenost k vnějšímu povrchu pravidelně profilovaného plechu (viz Obr. 3). V technických listech se ale pro pořádek můžeme setkat s označením panelů, které uvádí

minimální i maximální tloušťku panelu, např. pro prvek s výškou sinusového profilu 20 mm jsou vyráběny profily označeny jako 50/70, 80/100 nebo 100/120 [6].



Obr. 3 Jmenovitá tloušťka panelu s použitím plechu s výraznou pravidelnou profilací, zdroj: [4]

## 2.2 Varianty profilace plechů

Dle normy ČSN EN 14509 ed. 2 [4] je základní dělení povrchových plechů na ploché, mírně profilované nebo profilované. Vždy se jedná o tenké plechy pevně spojené s jádrem panelu.

Ploché (rovinný) plech (*flat facing*) se vyznačuje absencí válcované nebo lisované profilace nebo ztužujícího žebra.



Obr. 4 Rovinný plech bez profilace, zdroj: [10]

Mírně profilovaný povrchový plech (*lightly profiled facing*) je plech s válcovanou nebo lisovanou profilací o výšce nepřesahující 5 mm [4]. Mírná profilace má více variant provedení, např. lineární profilace (v případě stěnových panelů nejčastější), mikroprofilace (plisování) nebo drážkování.



Obr. 5 Lineární profilace, zdroj: [10]

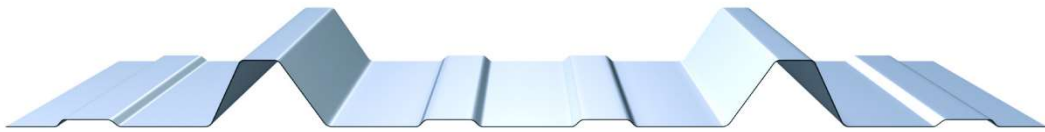


Obr. 6 Mikroprofilace (plisování, mikrovlnná profilace), zdroj: [10]



Obr. 7 Drážkování, zdroj: [10]

Ostatní plechy používané pro sendvičové panely patří mezi výrazně profilované. Nejčastěji se setkáme s trapézovými plechy se specifikovaným počtem a výškou vln na 1 m šířky plechu (např. trapéz s výškou vlny 30 mm o 3 vlnách na 1 metr).



Obr. 8 Profilace trapézového plechu, zdroj: [11]

## 2.3 Materiálové varianty

Základní části sendvičového panelu tvoří tepelně izolační jádro a povrchové plechy (interiérový a exteriérový). Obě tyto části mohou být tvořeny různými materiály, které zásadně ovlivňují konečné vlastnosti produktu.

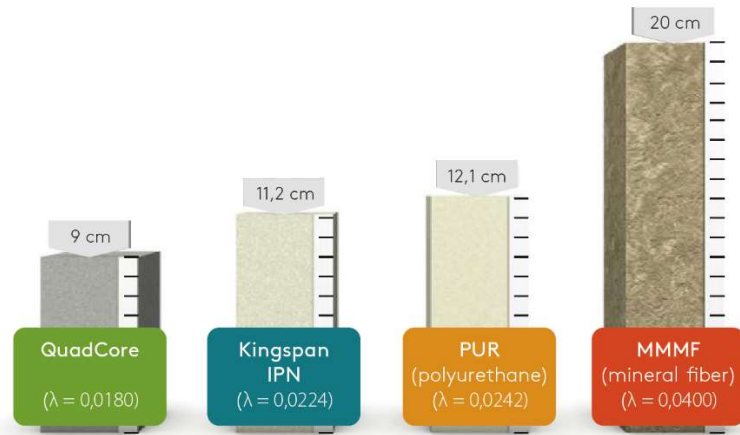
### 2.3.1 Izolační jádro

Dle výrobce Kingspan® [7] jsou primárně používány následující typy izolačních jader:

- PIR (polyisokyanurát, na Obr. 9 vyobrazen jako jádro QuadCore)
- IPN (druh polyisokyanurátu – „Isophenic“)
- PUR (polyuretan)
- MMMF (minerální vata)

V současnosti jsou pak konkrétně používány zejména typy PIR, IPN a MMMF, tyto materiály nahradily v minulosti hojně používaný polystyren a polyuretan.





Obr. 9 Typy izolačních jader s vyobrazenými tloušťkami, pro které mají jednotlivé materiály shodný součinitel prostupu tepla, zdroj: [7]

První zmíněný materiál (PIR, konkrétně QuadCore®) disponuje vynikajícími tepelně-technickými vlastnostmi (viz Obr. 9), které si díky své struktuře udržuje i ve vlhkém prostředí. Materiál vyniká také pevností v tlaku, proto lze sendvičové panely s jádrem PIR aplikovat na větší rozpory.

IPN a PUR jsou příbuzné materiály patřící do skupiny termosetických materiálů. Jejich obdobné složení odráží téměř srovnatelné izolační vlastnosti. IPN má však lepší požární vlastnosti než PUR.

Minerální vata má z uvedených materiálů sice nejméně příznivé tepelně-technické vlastnosti, ale klíčovou vlastností tohoto materiálu je jeho nehořlavost (třída reakce na oheň A). Panely s tímto izolačním jádrem se tedy používají zejména v místech se zvýšenými nároky na požární bezpečnost [7].

### 2.3.2 Ocelové plechy

Zaměříme-li se na povrchové plechy vyrobené z oceli, pak se setkáme se dvěma základními variantami. Nejběžnějším materiálem je ocelový pozinkovaný plech potažený duroplastem, mnoho výrobců ale nabízí i sendvičové panely s plechy z korozivzdorné oceli [8].

Tloušťka plechu se obvykle pohybuje od 0,4 do 0,6 mm, přičemž standardně bývá vnější plech tlustší než plech vnitřní. Dle tabulek únosnosti od výrobce Kingspan® [9], ve kterých jsou uvedeny standardní kombinace tloušťek plechů, se u stěnových panelů nejčastěji setkáme s tloušťkami plechů vnější/vnitřní 0,6/0,4 mm pro panely s jádrem IPN nebo QuadCore®, 0,6/0,5 mm pro panely s jádrem z minerální vlny, případně s poměrem 0,6/0,6 mm pro zajištění větší únosnosti (pro všechny typy jader). V případě panelů určených pro opláštění šikmých střech jsou standardní tloušťky plechů 0,5/0,4 mm pro jádro IPN/QuadCore® a 0,6/0,5 mm

v případě minerální vlny. Výběrová tloušťka plechů pro střešní sendvičové panely pak je 0,6/0,4 mm, která se používá při potřebě zvýšit únosnost panelů s jádrem IPN nebo QuadCore®.

Nejen estetické nebo korozní vlastnosti, ale i únosnost, a tudíž i maximální rozpon, ovlivňuje povrchová úprava, konkrétně barevnost exteriérové strany panelu. Vlivem slunečního záření jsou panely zahřívány a následkem tepelné roztažnosti je ovlivněna pevnost povrchu i celého panelu. Nejpříznivěji tedy v tomto ohledu působí světlé odstíny (barevná skupina I), menší únosnost pak přísluší tmavším odstínům (skupina II, resp. III). [9]

### 3 Současný stav problematiky

Myšlenka zohlednění smykové tuhosti pláště budovy při návrhu hlavní nosné konstrukce vznikla již ve druhé polovině 20. století, avšak v devadesátých letech minulého století její rozvoj upadl. V dnešní době, kdy budovy dosahují stále větších výšek, je myšlenka zohlednění plášťového chování opět oživena, jelikož plášť může významně přispět k horizontální tuhosti konstrukce. Díky rostoucí výšce budov je stále častěji rozhodujícím faktorem návrhu mezní stav použitelnosti, a právě navýšení jejich horizontální tuhosti může vést k efektivnějšímu návrhu hlavní nosné konstrukce.

Nejvýznamnější poznatky byly získány v rámci projektu EASIE (*Ensuring Advancement in Sandwich construction through Innovation and Exploitation*), na kterém se podílelo 18 účastníků z 10 evropských zemí. V rámci projektu bylo potvrzeno, že klíčovým faktorem plášťového chování jsou přípoje sendvičových panelů, respektive jejich tuhost a únosnost. Projekt následně vyšetřoval právě tyto dva faktory. Na základě provedených zkoušek byly odvozeny analytické vztahy pro výpočet jak tuhosti, tak únosnosti přípoje sendvičového panelu k podpůrné konstrukci. Výstupy projektu sloužily dále jako podklad pro publikace vydané organizací ECCS (*European Convention for Constructional Steelwork*) obsahující doporučení k výpočtům tuhosti a únosnosti přípojů a metodice zkoušení. Základními výstupy jsou:

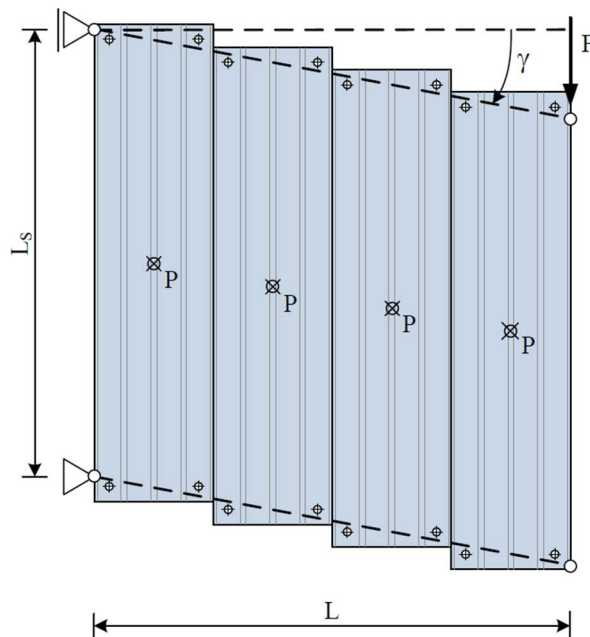
- *European recommendations on the stabilization of steel structures by sandwich panels* (Evropská doporučení pro stabilizaci ocelových konstrukcí sendvičovými panely) [12]
- *Preliminary European Recommendations for the Testing and Design of Fastenings for Sandwich Panels* (Předběžná evropská doporučení pro testování a návrh přípojů sendvičových panelů) [13]
- *The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections* (Testování přípojů s mechanickými spojovacími prvky v ocelových plechách a profilech) [14]

#### 3.1 Působení sendvičových panelů ve smyku

Sendvičové panely jsou běžně používány jako sekundární konstrukční prvky, které přenášejí zatížení sněhem a větrem na nosnou konstrukci. V takovém případě je jejich primárním účelem přenést vzniklá ohybová namáhání. Inovativní možností je použití panelů pro stabilizaci jednotlivých prvků (nosníky, sloupy) nebo ztužení konstrukce. Pro tento způsob aplikace musí být panely navrženy pro přenos smykového namáhání a je potřeba definovat jejich smykovou tuhost v rovině [15].

Sendvičové panely jsou nejčastěji situovány jako rovnoběžné, jednosměrně pnuté prvky. K podpůrné konstrukci jsou připojeny pomocí samovrtných samořezných šroubů umístěných rovnoběžně s kratšími hranami panelu. Kotevní šrouby se typicky umísťují na krajích panelu (připojení k první/poslední vaznici/příčli) do každé vlny (v případě panelů bez výrazné vlny v příslušných vzdálenostech), směrem ke středu panelu u mezilehlých podpor se pak připoje prostřídávají (v jedné řadě umístění např. do 1. a 3. vlny, ve druhé řadě do 2. a 4. vlny). Podélné propojení panelů je konstrukčně zajištěno kotevním šroubem, který obvykle prochází vnějším plechem jednoho panelu a následně vnitřním plechem sousedního panelu. Vzhledem k faktu, že mezi vnitřním a vnějším plechem je umístěna poddajná tepelně izolační vrstva a v místě šroubu procházejícím vnitřním plechem a podpůrnou konstrukcí může dojít k pootočení, nelze propojení panelů považovat za tuhé.

Od výše zmíněného se odvíjí skutečnost, že panely působí jako jednotlivá pole, a nikoliv jako celistvé diafragma. Jak uvádí postup ECCS (CIB 379) [12], při zatížení rovinnými smykovými silami se pak každý panel otáčí kolem referenčního bodu  $P$ , který odpovídá středu panelu a zároveň i těžišti upevňovacích prvků. Panely, resp. jejich podélné hrany, tak zůstávají vzájemně rovnoběžné (viz Obr. 10).



Obr. 10 Přemístění skupiny panelů zatížených smykovou silou v rovině, zdroj: [12]

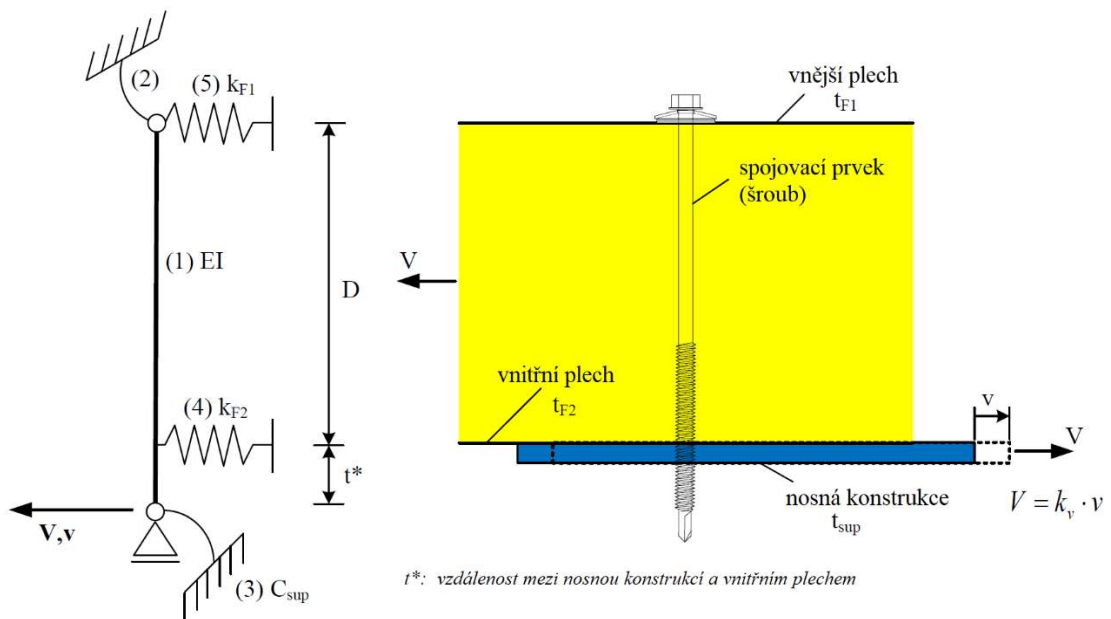
Základním faktorem určujícím celkovou tuhost sendvičových panelů v rovině je tuhost přípoje (větší flexibilita přípoje znamená snížení celkové efektivní smykové tuhosti [12]). V následujících kapitolách tedy budou řešeny pouze parametry přípojů.

## 3.2 Smyková tuhost a únosnost přípoje

Na základě předpokladů uvedených v projektu EASIE [16] je tuhost upevnění sendvičového panelu k nosné konstrukci ovlivněna následujícími parametry:

- (1) Tuhost v ohybu  $EI$  spojovacího prvku
- (2) Vetknutí hlavy šroubu (spojovacího prvku) do vnějšího plechu (rotační podepření)
- (3) Vetknutí šroubu (spojovacího prvku) do nosné konstrukce (rotační podepření o tuhosti  $C_{sup}$ )
- (4) Otláčení vnitřního povrchového plechu (tuhost  $k_{F2}$ )
- (5) Otláčení vnějšího povrchového plechu (tuhost  $k_{F1}$ )

Na Obr. 11 je zobrazeno schéma přípoje a odpovídající mechanický model zobrazující jeho statické schéma. Vzhledem k možnému porušení plechu otláčením je působení plechů reprezentováno podélnými pružinami o určité tuhosti. Pootočení šroubu na vnitřní i vnější straně je zohledněno pomocí rotační tuhosti. Působení podpůrné konstrukce je pak v místě upevnění reprezentováno posuvným kloubem.



Obr. 11 Komponenty přípoje, zdroj:[12], přeloženo

### 3.2.1 Analytické stanovení tuhosti a únosnosti přípoje

Na základě provedených zkoušek v rámci projektu EASIE byly v publikaci ECCS [12] odvozeny vztahy pro výpočet tuhosti přípoje při znalosti příslušných parametrů (mez pevnosti materiálů, průměr spojovacího prvku, tloušťky plechů apod.).

Výsledná tuhost přípoje se samovrtným nebo samořezným šroubem se dle této metodiky vypočítá jako:

$$k_v = \frac{1}{\frac{x_F}{k_{F2}} + \frac{t_{cor,sup}^2 + 2 \cdot (1 - x_F) \cdot D \cdot t_{cor,sup}}{4 \cdot C_{sup}} + \frac{3 \cdot (1 - x_F) \cdot D \cdot t_{cor,sup}^2 + t_{cor,sup}^3}{24 \cdot EI}} \quad (1)$$

a zároveň

$$x_F = 1 - \frac{\frac{1}{k_{F2}} - \frac{D \cdot t_{cor,sup}}{2 \cdot C_{sup}} - \frac{D \cdot t_{cor,sup}^2}{8 \cdot EI}}{\frac{1}{k_{F2}} + \frac{D^2}{C_{sup}} + \frac{D^2 \cdot (2 \cdot D + 3 \cdot t_{cor,sup})}{6 \cdot EI}} \quad (2)$$

kde:

$t_{cor,sup}$       tloušťka jádra prvku podpůrné konstrukce  
 $D$               tloušťka sendvičového panelu v místě přípoje

Další dosazené parametry jsou následující:

Ohybová tuhost spojovacího prvku:

$$EI = 200\,000 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} \quad (3)$$

kde:

$d_s$               průměr dřívku spojovacího prvku

Tuhost rotačního podepření v místě upnutí do nosné konstrukce:

$$C_{sup} = 2400 \text{ N/mm}^2 \cdot \sqrt{t_{cor,sup} \cdot d_1^5} \quad (4)$$

kde:

$d_1$               nejmenší průměr v závitové části spojovacího prvku

Tuhost vnitřního povrchového plechu (namáhán na otláčení):

$$k_{F2} = 6,93 \cdot \frac{f_{u,F2} \cdot \sqrt{t_{cor,F2}^3 \cdot d_1}}{0,26 \text{ mm} + 0,8 \cdot t_{F2}} \quad (5)$$

pro  $0,4 \text{ mm} \leq t_{cor,F2} \leq 0,7 \text{ mm}$

kde:

$f_{u,F2}$             pevnost v tahu (mez pevnosti) vnitřního plechu  
 $t_{cor,F2}$         tloušťka jádra vnitřního plechu sendvičového panelu

$t_{F2}$  tloušťka vnitřního plechu sendvičového panelu

resp.

$$k_{F2} = 4,2 \cdot \frac{f_{u,F2} \cdot \sqrt{t_{\text{cor},F2}^3 \cdot d_1}}{0,373 \text{ mm}} \quad (6)$$

pro  $0,7 \text{ mm} \leq t_{\text{cor},F2} \leq 1,0 \text{ mm}$ .

Tyto parametry a rovnice platí a mohou být použity pro výpočet, pokud je splněno:

- jmenovitý průměr spojovacího prvku:  $5,5 \text{ mm} \leq d \leq 8,0 \text{ mm}$
- tloušťka panelu:  $40 \text{ mm} \leq D$
- tloušťka jádra povrchových plechů:  $0,4 \text{ mm} \leq t_{\text{cor},F2} \leq 1,0 \text{ mm}$
- tloušťka jádra prvku podpůrné konstrukce:  $1,5 \text{ mm} \leq t_{\text{cor},\text{sup}} \leq 10,0 \text{ mm}$

V případě výskytu vyšších hodnot  $d$ ,  $t_{F2}$  nebo  $t_{\text{sup}}$  lze použít uvedený výpočetní postup, avšak hodnoty by měly být sníženy na horní limity aplikačního rozsahu.

Jak je patrné, v uvedených vztazích není zahrnut vliv vnějšího plechu. Bylo prokázáno, že tuhost uložení spojovacího prvku na vnějším povrchovém plechu panelu, stejně tak jeho otlačení, má pouze zanedbatelný vliv na tuhost a únosnost přípoje.

Tuhost přípoje  $k_v$  vypočítaná pomocí vztahu (1) odpovídá úrovni zatížení v mezním stavu použitelnosti, kdy se předpokládá, že nebude překročena polovina hodnoty charakteristické smykové únosnosti vnitřního povrchového plechu  $V_{Rk}$ . Tato únosnost může být vypočítána jako:

$$V_{Rk} = 4,2 \cdot \sqrt{t_{\text{cor},F2}^3 \cdot d_1 \cdot f_{u,F2}} \quad (7)$$

Návrhová hodnota smykové únosnosti následně je:

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (8)$$

Dílčí součinitel  $\gamma_{M2}$  uvádí norma ČSN EN 1993-1-8 [17] a pro tento případ, konkrétně únosnost plechů v otlačení, je doporučena hodnota součinitele  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

Pro zjednodušení a možnost provedení výpočtu bez nutnosti vyjádření tuhosti  $k_v$  ze vzorce (1) byly konzervativně stanoveny hodnoty tuhosti přípojů pro různé tloušťky a třídy oceli vnitřního plechu. Tyto hodnoty tuhosti (viz Tab. 1) lze uvažovat, pokud je tloušťka prvku podpůrné konstrukce  $1,5 \text{ mm} \leq t_{\text{cor},\text{sup}} \leq 4,0 \text{ mm}$ .

Tab. 1 Tuhost přípoje  $k_v$  [kN/mm] [12], přeloženo

Nominální tloušťka vnitřního povrchového plechu $t_{F2}$	S220GD	S280GD	S320GD
0,40 mm	1,6	1,9	2,0
0,50 mm	2,0	2,3	2,5
0,63 mm	2,4	2,9	3,1
0,75 mm	2,8	3,3	3,6

### 3.2.2 Experimentální stanovení tuhosti přípoje

Doporučené postupy zkoušení přípojů sendvičových panelů a následného vyhodnocení výsledků jsou uvedeny v publikacích ECCS [13] [14] a vychází z projektů EASIE [15] [16].

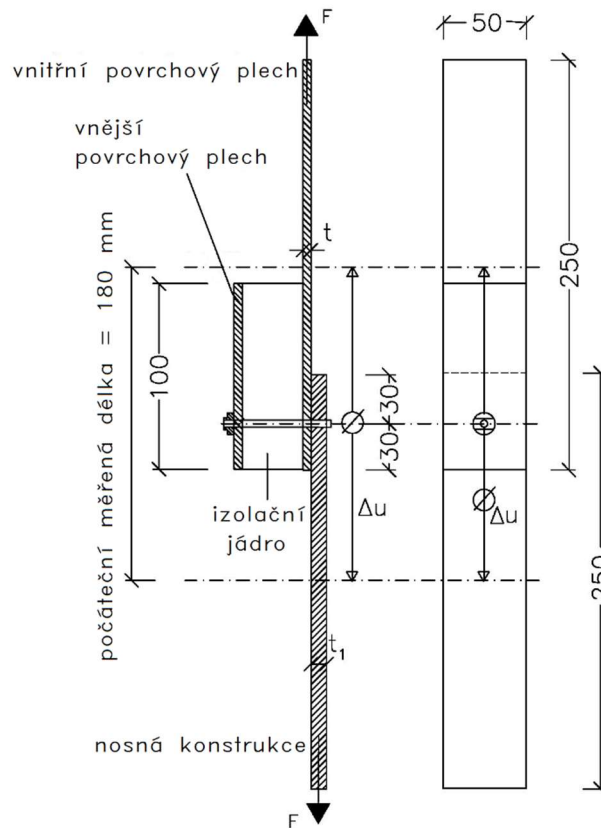
Základním faktorem určujícím způsob provedení celého experimentu je skutečnost, že únosnost přípoje je posuzována pro působení zatížení vlastní tíhou, užitným zatížením, případně zatížením vyplývajícím z plášťového působení smykového pole. Není zde tedy uvažováno porušení v případě cyklického zatížení (únava materiálu), ani není bráno v potaz nelineární rozložení sil při působení skupiny více panelů.

Předpokládané způsoby porušení jsou otláčení vnitřního plechu sendvičového panelu, otláčení podpůrné konstrukce nebo porušení samotného spojovacího prvku.

Testování má dle doporučení [13] probíhat na malých vzorcích sendvičových panelů, přičemž šířka vzorku musí být zvolena tak, aby vzdálenost přípoje od podélných hran neovlivňovala výsledky zkoušky. Zároveň je doporučena minimální vzdálenost přípoje od (ve zkušební sestavě spodního) okraje panelu 30 mm – pokud je zvolena vzdálenost menší, mají se provést zkoušky i pro větší vzdálenost od okraje, aby bylo ověřeno, jestli má tato proměnná vliv na tuhost a únosnost. Příručka [12] uvádí, že vzdálenost přípoje od okraje má být obecně větší nebo rovna 20 mm. Zkoušky, které budou provedeny v laboratoři, budou v souladu s oběma těmito doporučeními. Zkoušky budou provedeny pro vzdálenost přípoje od okraje 20 mm, tudíž pro nejméně příznivou, ale zároveň dostatečnou hodnotu.

Schéma zkušební sestavy navržené a použité v rámci projektu EASIE [13] je znázorněno na Obr. 12. Podoba této sestavy byla navržena s ohledem na fakt, že klíčovým faktorem je tuhost přípoje vnitřního plechu k podpůrné konstrukci. Schéma zkoušky tedy odpovídá spíše zkoušce přípoje dvou samostatných plechů (resp. vnitřního plechu sendvičového panelu a profilu reprezentující podpůrnou konstrukci), nikoliv podpůrné konstrukce a sendvičového panelu s určitou mocností (jejíž působení je v případě takové zkoušky zanedbáno).





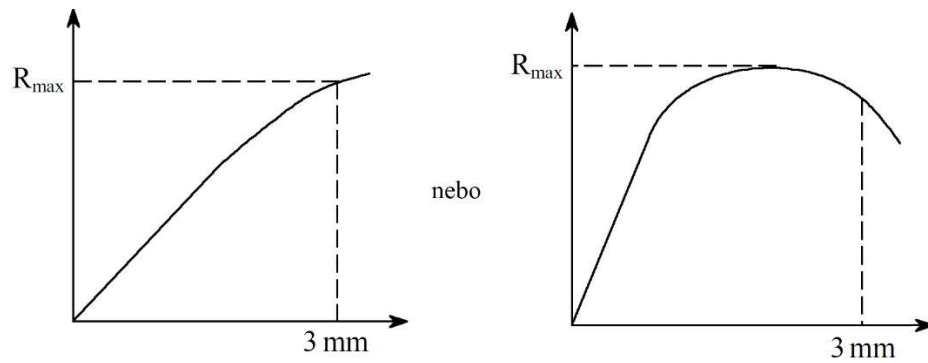
Obr. 12 Schéma zkoušky smykové únosnosti přípoje dle ECCS, zdroj:[13], přeloženo

Zatížení má být během zkoušky řízeno posunem, který má být zvětšován monotónně až do mezního zatížení. Rychlost zatěžování má být taková, aby k dosažení mezního zatížení došlo mezi třemi a pěti minutami po zahájení zkoušky [13]. Zároveň je dána maximální hodnota rychlosti zatěžování, která byla stanovena na 1 mm/min [14]. Během zkoušky je vždy nutno zaznamenávat jak sílu, tak odpovídající posun. Pro každou zkoušku musí být zaznamenán i způsob porušení.

Mezní zatížení je definováno jako nejmenší z hodnot:

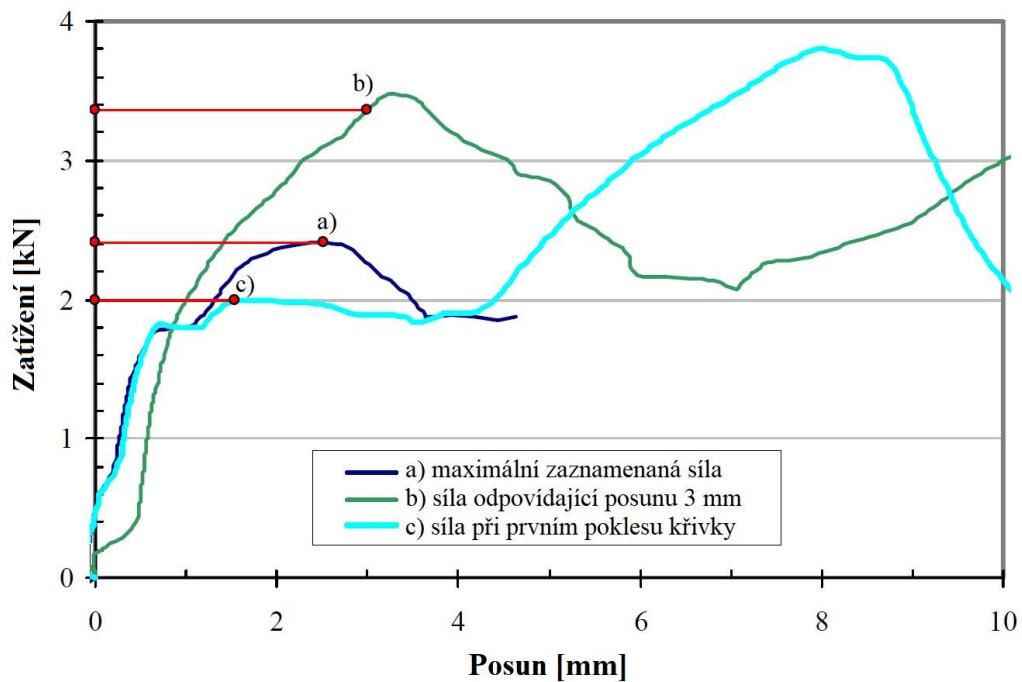
- maximální síla zaznamenaná během zkoušky (pokud bylo této síly dosaženo před posunem 3 mm)
- síla zaznamenaná před prvním poklesem křivky závislosti zatížení-posun
- síla odpovídající posunu 3 mm, pokud se tento bod nachází na stoupající části křivky zatížení-posun

Obr. 13 ukazuje, že pokud má křivka stoupající trend do hodnoty posunu 3 mm a dále, je za mezní zatížení považována síla příslušná právě posunu 3 mm (Obr. 13 vlevo). V případě, že je maximální síly dosaženo ještě před mezní hodnotou posunu 3 mm a křivka má následně klesající trend, je mezní zatížení rovno právě této maximální síle (Obr. 13 vpravo).



Obr. 13 Určení mezního zatížení v závislosti na průběhu křivky, zdroj: [14], upraveno a přeloženo

V případě, že rozhodujícím kritériem je první pokles křivky, doporučuje se brát v úvahu pokles minimálně o 10 % (tedy globální pokles křivky). Vzhledem k jisté duktilitě přípoje a možnosti výskytu lokálních minim a maxim zatížení není vhodné uvažovat drobné lokální poklesy křivky jako rozhodující a odpovídající zatížení před těmito poklesy považovat za mezní.



Obr. 14 Varianty průběhu závislosti síly a posunu při experimentu a určení maximální síly, zdroj: [13], přeloženo

## 4 Zkoušky přípojů sendvičových panelů

### 4.1 Použitá měřicí zařízení

Experimentální sestava pro zkoušky přípojů sendvičových panelů se skládá ze dvou základních částí – elektromechanického statického zkušebního stroje (tzv. trhací stroj) a laserového extenzometru. Obě tyto komponenty jsou připojeny ke vzájemně nezávislým počítačům se softwary umožňujícími nastavení experimentu, ovládání přístrojů a export výsledků.

Konkrétní typ zkušebního stroje, který byl použit pro experimentální část této práce, je MTS QTest 100 Elite Controller. Tento stroj je klíčovým prvkem v celé sestavě, neboť právě zde dochází k samotnému upevnění vzorku a následnému vystavení působící síle, která je iniciována posunem příčnicku. Jedná se o stroj rámového typu s předpokládaným uložením na podlahu. Tento model disponuje vlastnostmi dostačujícími pro provádění experimentů s požadovanými vysokými hodnotami působící síly, jako je zkoušení kovů, spojovacích prvků nebo vyztužených plastů. Použití právě tohoto přístroje pro plánované zkoušky se tak jeví jako ideální. Dle údajů výrobce [18] má přístroj následující charakteristiky:

Tab. 2 Charakteristiky zkušebního stroje MTS QTest 100 Elite

Charakteristika	Hodnota pro MTS QTest 100
Kapacita	100 kN
Funkční dráha stroje	1219 mm
Vnitřní rozteč mezi sloupy	558 mm
Maximální rychlost	508 mm/min
Minimální rychlost	0,005 mm/min
Kapacita při maximální rychlosti	100%
Odchylka rychlosti od nastavené	0,25%
Tuhost rámu	210 kN/mm
Výška přístroje	2336 mm
Šířka přístroje	965 mm
Hloubka přístroje	660 mm
Hmotnost přístroje	676 kg
Napájení	220/230 VAC, 47-63 Hz

K tomuto přístroji je připojen rozvaděč MTS QTest Elite Controller, odkud probíhá komplexní řízení stroje a zpracování dat. Proto je rozvaděč dále připojen jak k počítači se softwarem TestWorks 4, který slouží k bezprostřednímu ovládní zkušebního stroje a sběru dat, tak ale

i k systému sběru dat Spider8, který je sice primárně propojen s laserovým extenzometrem (a připojen k druhému počítači), ale z přístroje MTS zaznamenává sílu během experimentu.

Ke zkušebnímu stroji je také připojen ovladač, pomocí kterého je zapínán, resp. vypínán celý přístroj, a také slouží k regulování pozice příčnicku např. během instalování vzorku do sestavy.

Jak již bylo zmíněno, druhou klíčovou komponentou experimentální sestavy je laserový extenzometr s připojeným počítačem. Tento snímač zaznamenává vzájemný posun dvou bodů během zkoušky – tyto body jsou při každé zkoušce definovány umístěním magnetů s reflexními pásky, případně nalepením těchto pásek na zkušební vzorek. Jeden bod se vždy nachází na plechu reprezentujícím nosnou konstrukci a druhý na samotném panelu. Posun naměřený extenzometrem je brán jako směrodatný, neboť je zaznamenávána přímá změna vzdálenosti dvou měřených bodů a posun není zkreslen aktivací celé zkušební sestavy (např. z důvodu vůle ve šroubech). Každá zkouška je ukončena po změně vzdálenosti těchto bodů o 15 mm naměřené extenzometrem.

Během zkoušky je sice zaznamenáván také posun příčnicku zkušebního stroje MTS, ale tento posun není pro vyhodnocování ani určení okamžiku ukončení zkoušky použit z výše uvedeného důvodu.

Použitým typem laserového extenzometru je EIR – model LE-05. Parametry snímače jsou dle dostupných údajů [19] následující:

*Tab. 3 Parametry laserového extenzometru EIR LE-05*

<b>Charakteristika</b>	<b>Hodnota pro EIR LE-05</b>
Rozsah měření	8–127 mm
Rozlišení	0,001 mm
Odchylka od linearity	0,01 mm
Max. frekvence záznamu dat	100 Hz
Vzdálenost měřených bodů od přístroje	305 nebo 381 mm
Rozměry	38,1 x 18 x 11,4 cm
Hmotnost	6 kg
Třída laseru	II
Napájení	115 VAC, 50/60 Hz nebo 230 VAC, 50/60 Hz
Vybavení	Digitální displej, 4tlačítková klávesnice, analogový výstup

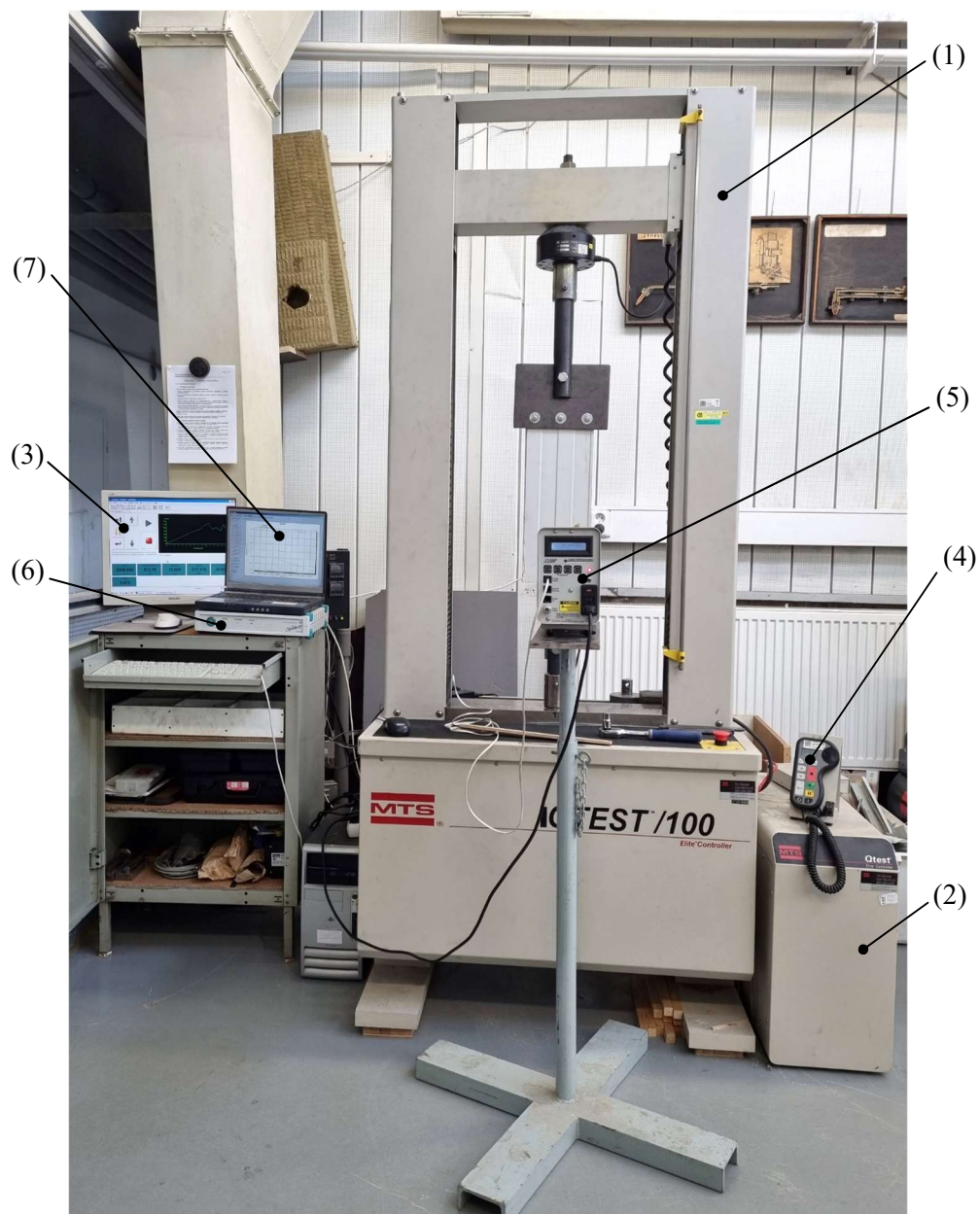
Přístroj je pro účely plánovaných zkoušek umístěn na teleskopický podstavec.

Laserový extenzometr je připojen k notebooku komunikujícím se systémem sběru dat Spider8. Tento systém zaznamenává vzájemný posun definovaných bodů v čase během zkoušky. V každém okamžiku má tento systém k dispozici i údaj o působící síle na hlavním zkušebním přístroji. Tato data jsou v notebooku zobrazena pomocí programu Catman 3.1 a je možno je exportovat do souboru MS Excel. Vzhledem k tomu, že právě závislost posunu a působící síly je pro vyhodnocení zkoušek přípojů sendvičových panelů klíčová, jsou pro následující analýzu použita právě tato data shromážděná systémem Spider8 a exportovaná pomocí programu Catman. Data ze zkušebního stroje MTS (síla, posun příčnicku, čas) slouží pouze jako kontrolní.

Na Obr. 15 jsou vyobrazeny všechny přístroje potřebné k provedení experimentu a sběru dat, konkrétní označení použité techniky je následující:

- (1) zkušební stroj MTS QTest 100
- (2) rozvaděč
- (3) počítač + software TestWorks 4
- (4) ovladač zkušebního stroje
- (5) laserový extenzometr EIR LE-05
- (6) systém sběru dat Spider8
- (7) notebook + software Catman 3.1

Vzájemné propojení jednotlivých komponent a schéma přenosu dat během zkoušek je pro přehlednost vyobrazeno na Obr. 16.



Obr. 15 Použitá měřicí technika

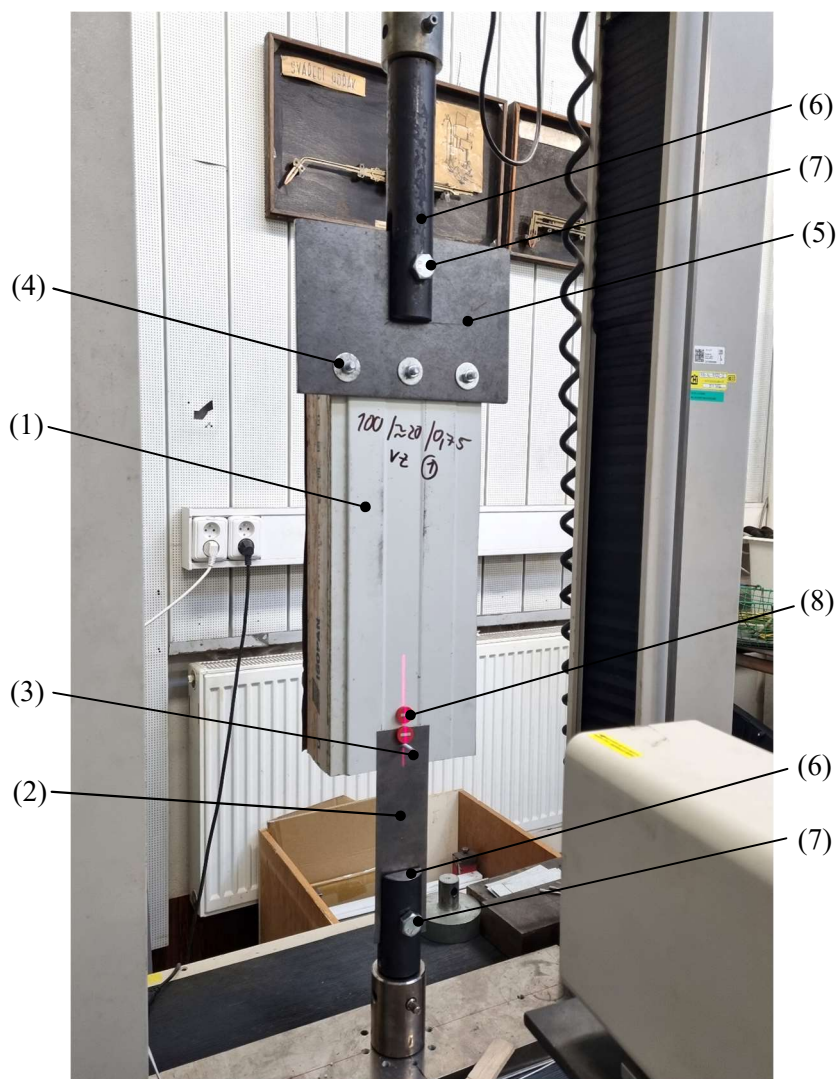


Obr. 16 Schéma propojení přístrojů a přenosu dat, zdroje obrázků: [18] [20] [21]

## 4.2 Zkušební sestava

Každý zkušební vzorek reprezentující sendvičový panel a jeho přípoj k podpůrné konstrukci je nutné upevnit do zkušebního stroje. Zkušební sestava se skládá z následujících komponent:

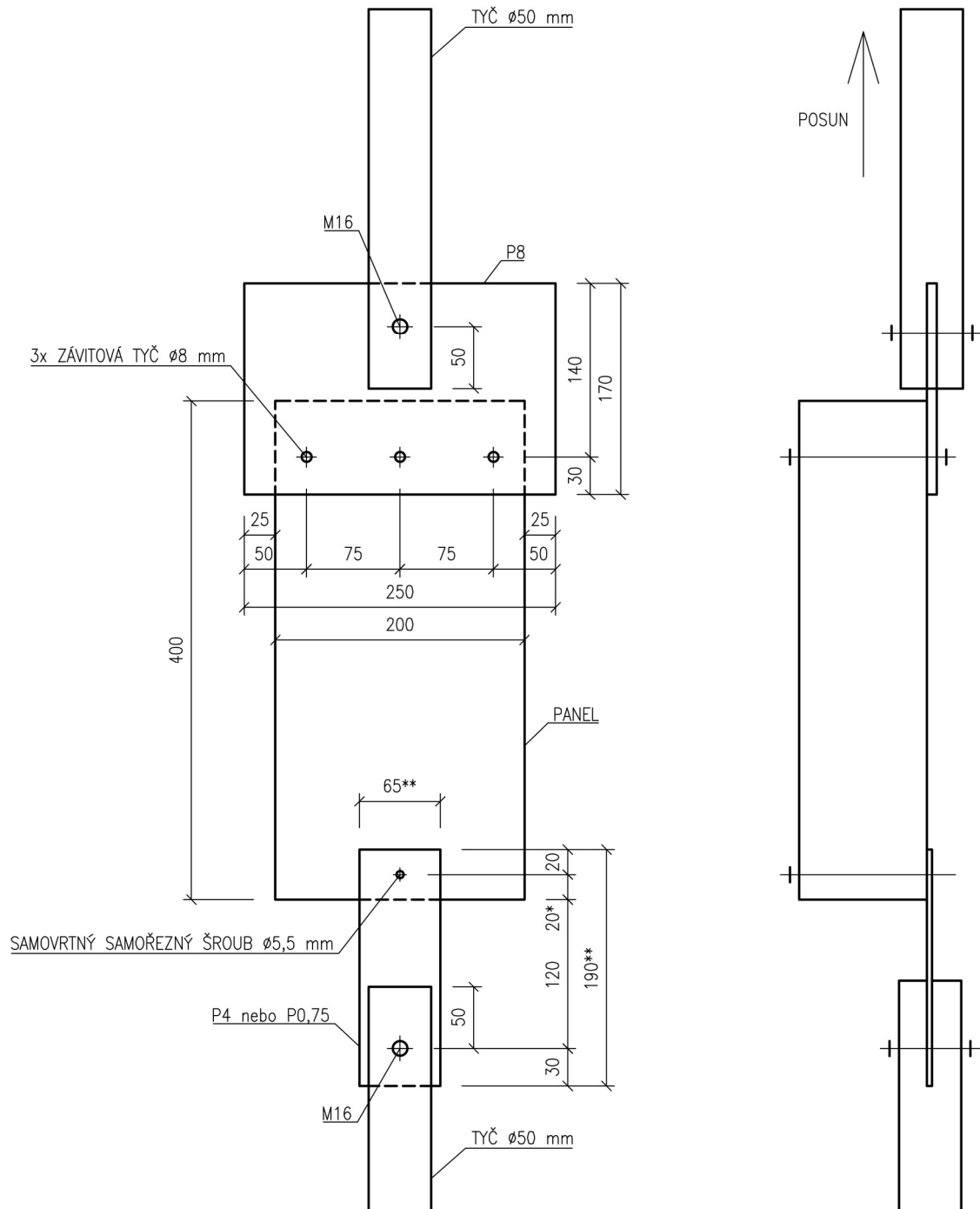
- (1) vzorek sendvičového panelu
- (2) plech tl. 0,75 mm nebo 4 mm reprezentující podpůrnou konstrukci (sloup, vaznici, pažďík atd.)
- (3) samovrtný samořezný šroub  $\varnothing 5,5$  mm (spojovací prvek přípoje)
- (4) 3 závitové tyče připojující panel k plechu v horní části
- (5) plech tl. 8 mm spojující panel a pohyblivou čelist přístroje
- (6) 2x tyč průměru 50 mm – trvale upevněné do zkušebního stroje
- (7) 2x šroub + matice spojující tyče  $\varnothing 50$  mm s plechy v horní a dolní části
- (8) reflexní pásky (umístěné na magnetech) – jejich vzájemný posun měřen extenzometrem



Obr. 17 Součásti zkušební sestavy



Schéma upevnění vzorku včetně konkrétních rozměrů, roztečí a dalších údajů potřebných ke zhotovení sestavy vyobrazuje čelní a boční pohled na Obr. 18.



\* VZHLEDEM K NEPŘESNOSTI VÝROBY SE OD TÉTO VZDÁLENOSTI VYSKYTOVALY ODCHYLKY

\*\* ROZMĚRY PLECHŮ SE PRO NĚKTERÉ ZKOUŠKY LIŠILY

Obr. 18 Schéma mechanických součástí nutných k upevnění vzorku do zkušebního stroje

V rámci úspory materiálu bylo přistoupeno k opětovnému používání plechů reprezentujících podpůrnou konstrukci. Prvním způsobem úpravy plechu umožňujícím jeho recyklaci bylo

podélné rozříznutí a znovuvytvoření přípoje i otvoru pro šroub M16. Tato úprava byla možná v případě plechů P4 o původních rozměrech 150x165 mm. Druhou použitou možností bylo uříznutí horní části tenkého plechu (místa přípoje) a opětovné použití stejného, jen zkráceného plechu.

Nepřesnost výroby, konkrétně obtížná realizace požadavku na vzdálenost přípoje od okraje sendvičového panelu 20 mm, měla na interiérovém plechu za následek odchylky této skutečné vzdálenosti oproti požadované. Konkrétní hodnoty těchto vzdáleností pro jednotlivé zkoušky budou uvedeny později.

Vzhledem k tomu, že pro zkoušky bylo k dispozici více typů panelů o různých tloušťkách, je mocnost panelu vyobrazená na bočním pohledu pouze ilustrativní.

Obecně je tento způsob upevnění vzorku a zkoušení přípoje navržen tak, aby bylo působení panelu co možná nejbližší reálnému chování. Díky upevnění panelu v horní části pomocí závitových tyčí lze předpokládat, že při zatěžování se na přenosu síly podílí celá hmota sendvičového panelu. V případě těchto zkoušek se tak jedná skutečně o přípoj celého panelu k podpůrné konstrukci.

### 4.3 Příprava zkoušek

Pro plánované zkoušky byly k dispozici celkem čtyři typy sendvičových panelů disponující vzájemně různými vlastnostmi, jako jsou tloušťka panelu, tloušťka a materiál povrchových plechů, jejich profilace nebo typ izolačního jádra. Konkrétní přehled vlastností uvádí Tab. 4.

V závislosti na dostupném materiálu byly pro zkoušky zhotoveny vzorky panelů o šířce 200 mm a délce 400, případně 500 mm. Konkrétní počet vzorků je taktéž uveden v Tab. 4.

Tab. 4 Vlastnosti sendvičových panelů určených k provedení zkoušek, rozměry v [mm]

Tloušťka panelu	Výrobce	Tloušťka plechu A	Tloušťka plechu B	Profilace plechu A	Profilace plechu B	Izolační jádro	Počet vzorků
60	Isobox	0,5 nerez		lineární		PUR	8
80	Kovové profily	0,5		lineární		skelná vata	5
100	Isobox	0,4		lineární		PUR	10
200	Ruuki	0,5	0,6	lineární	plisování	čedičová vata	5

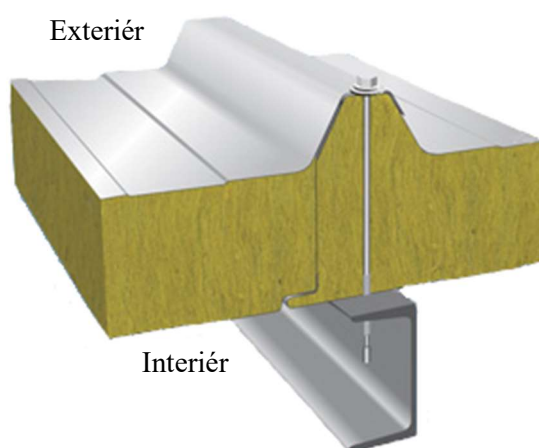
Kromě proměnných, které byly dány rozdílnými vlastnostmi různých typů sendvičových panelů, byl zkoumán také vliv tloušťky připojeného plechu (podpůrné konstrukce) na tuhost a únosnost přípoje. Konkrétně byly zkoušky rozvrhnuty tak, že pro každý panel byly provedeny tři zkoušky přípoje na tenký plech (tloušťky 0,75 mm) a tři zkoušky při použití tlustého plechu

(tloušťky 4 mm). Je tedy evidentní, že každý panel měl být vyzkoušen celkem šestkrát, tedy od každého typu panelu bylo potřeba 6 vzorků. Výjimkou byl panel tloušťky 200 mm, kde vzhledem k odlišnosti povrchových plechů bylo potřeba těchto šest zkoušek provést z každé strany panelu, tudíž od tohoto typu panelu bylo požadováno dokonce 12 vzorků. Dle Tab. 4 nebyl tento požadovaný počet splněn právě v případě panelu tloušťky 200 mm, a také panelu o mocnosti 80 mm. Řešení bylo poměrně jednoduché a snadno realizovatelné, a to uříznutí spodní části panelu (oblasti s přípojem), vytvoření nového přípoje a opětovné použití téhož vzorku. Toto řešení zajistilo, že mohl být jeden panel vyzkoušen vícekrát a tím bylo umožněno zrealizovat plánované zkoušky v plném rozsahu, viz Tab. 5.

Tab. 5 Rozvrh zkoušek přípojů sendvičových panelů

Tloušťka panelu	Počet zkoušek s P4	Počet zkoušek s P0,75	Počet zkoušek celkem
60	3	3	6
80	3	3	6
100	3	3	6
200	6	6	12
			<b>30</b>

Součástí procesu přípravy zkoušek, resp. vzorků, je zhotovení samotného přípoje navrtáním samořezného šroubu skrz panel a spojení s plechem tloušťky 4 mm nebo 0,75 mm. Hlava šroubu se vždy nachází na netestovaném plechu (na reálné konstrukci by se tento plech nacházel na exteriérové straně). Přímou vystavený působícímu zatížení a nacházející se v kontaktu s podpůrnou konstrukcí je ale druhý plech (na skutečné konstrukci vnitřní), viz Obr. 19.



Obr. 19 Schéma přípoje sendvičového panelu na reálné konstrukci, zdroj: [22]

Jak bylo řečeno v kap. 4.2, požadovaná vzdálenost osy samořezného šroubu od okraje vzorku byla 20 mm, nicméně skutečná vzdálenost byla ovlivněna výrobními nepřesnostmi. Problémem bylo zejména požadované rovné provrtání sendvičového panelu bez vychýlení z osy. Pro každou

zkoušku byla proto změřena skutečná osová vzdálenost otvoru od okraje panelu – viz Tab. 6. V případě, že by následně některé výsledky zkoušek vykazovaly abnormální hodnoty únosnosti, bylo by případné šikmé provedení přípoje bráno v potaz jako parametr v diskuzi.

Tab. 6 Osová vzdálenost přípoje od okraje panelu v jednotlivých zkouškách, hodnoty v [mm]

Pořadové č. zkoušky	Panel-plech-vzorek	Vzdál. od okraje vnitřní plech (přípoj)	Vzdál. od okraje vnější plech (hlava šroubu)
1	100-0,75-1	25,5	20,7
2	100-0,75-2	35,0	21,5
3	100-0,75-3	25,2	21,3
4	100-4-1	30,2	19,3
5	100-4-2	28,2	20,0
6	100-4-3	27,3	21,0
7	60-0,75-1	20,0	21,5
8	60-0,75-2	20,2	20,2
9	60-0,75-3	20,0	20,0
10	60-4-1	20,0	20,0
11	60-4-2	20,0	18,0
12	60-4-3	20,7	22,0
13	80-0,75-1	25,0	21,8
14	80-0,75-2	24,0	20,0
15	80-0,75-3	20,0	20,0
16	80-4-1	25,0	20,0
17	80-4-2	31,0	20,0
18	80-4-3	22,5	21,0
19	200-lin-0,75-1	10,0	20,0
20	200-lin-0,75-2	30,0	20,5
21	200-lin-0,75-3	32,0	20,0
22	200-lin-4-1	21,0	22,5
23	200-lin-4-2	20,5	20,0
24	200-lin-4-3	22,0	20,0
25	200-plis-0,75-1	20,0	20,0
26	200-plis-0,75-2	20,0	24,0
27	200-plis-0,75-3	17,0	20,0
28	200-plis-4-1	23,0	20,0
29	200-plis-4-2	20,0	20,0
30	200-plis-4-3	20,0	20,0

## 4.4 Nastavení a průběh zkoušek

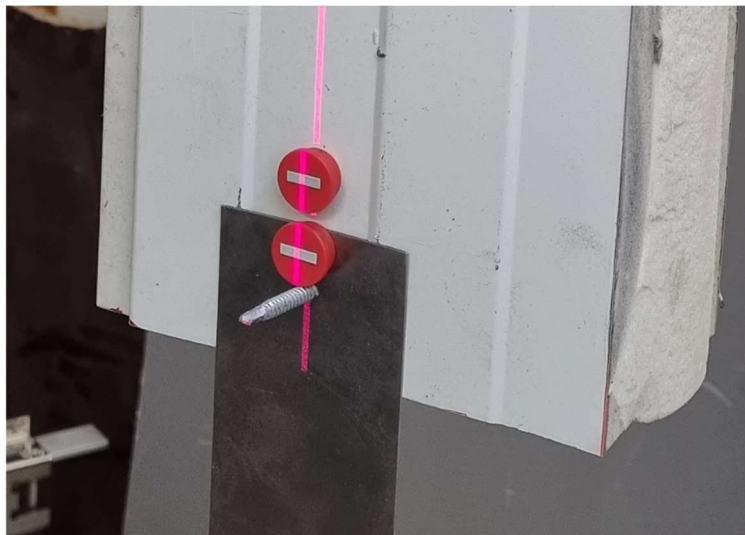
Před zahájením zkoušek bylo nutné nastavit přístroje tak, aby správně probíhal samotný proces zatěžování a sběr dat. V prvním kroku bylo nutné zvolit pro zkušební stroj metodu tahové zkoušky, tj. během experimentu probíhá posun příčnicku směrem nahoru. Základním faktorem určujícím průběh zkoušky pak je rychlost posunu příčnicku. Doporučení [13] [14] uvádí, že rychlost posunu příčnicku by po celou dobu zkoušky měla být konstantní, a to zejména v intervalu od zahájení zkoušky po hodnotu posunu 3 mm, který je pro následné vyhodnocení výsledků klíčový. Nastavení zkoušek požadavku zcela odpovídalo, neboť rychlost zatěžování byla stanovena na 0,4 mm/min po celou dobu zkoušky. Uvažovaná maximální dosažená síla sice odpovídá posunu menšímu nebo rovnému 3 mm, ale po dosažení tohoto posunu zkouška vždy dále pokračovala. Konkrétně bylo ukončení zkoušky vždy provedeno po dosažení celkové změny vzdálenosti měřených bodů o 15 mm (naměřené laserovým extenzometrem). Pro vyhodnocení tedy slouží úsek grafu pro posun do 3 mm a zbylá část grafu slouží pouze k celkovému dokreslení průběhu zkoušky.

Frekvence záznamu dat (času, síly, posunu měřených bodů a posunu příčnicku) byla na všech přístrojích jednotně nastavena na 10 Hz.

Po upevnění vzorku do zkušebního přístroje bylo před zahájením každé zkoušky nutné posunout příčnick tak, aby došlo k aktivaci spojů a následné zatěžování přístrojem již vyvinulo sílu na zkoušený přípoj. K tomuto posunu byl použit ovladač zkušebního stroje MTS. Ve většině případů byl upevněný vzorek aktivován na působící zatížení přibližně 70 N (včetně působení vlastní tíhy).

Po aktivaci sestavy bylo před zahájením každé zkoušky nutné provést poslední krok, a to zaznamenání počáteční vzdálenosti dvou měřených bodů (umístění viz Obr. 20). Tato vzdálenost byla vždy odečtena z displeje na laserovém extenzometru. Znalost této hodnoty byla nezbytná pro stanovení požadovaného posunu, při jehož dosažení má být zkouška ukončena, tedy *počáteční posun + 15 mm*.

Při spuštění zkoušky byl zahájen jednak záznam z laserového extenzometru, jednak posun příčnicku na zkušebním stroji prostřednictvím připojených softwarů Catman 3.1, resp. TestWorks 4. Toto spuštění bylo vždy provedeno pro oba přístroje současně. Po dosažení požadovaného posunu měřených bodů byla zkouška ukončena.



Obr. 20 Pozice měřených bodů před započatím zkoušky

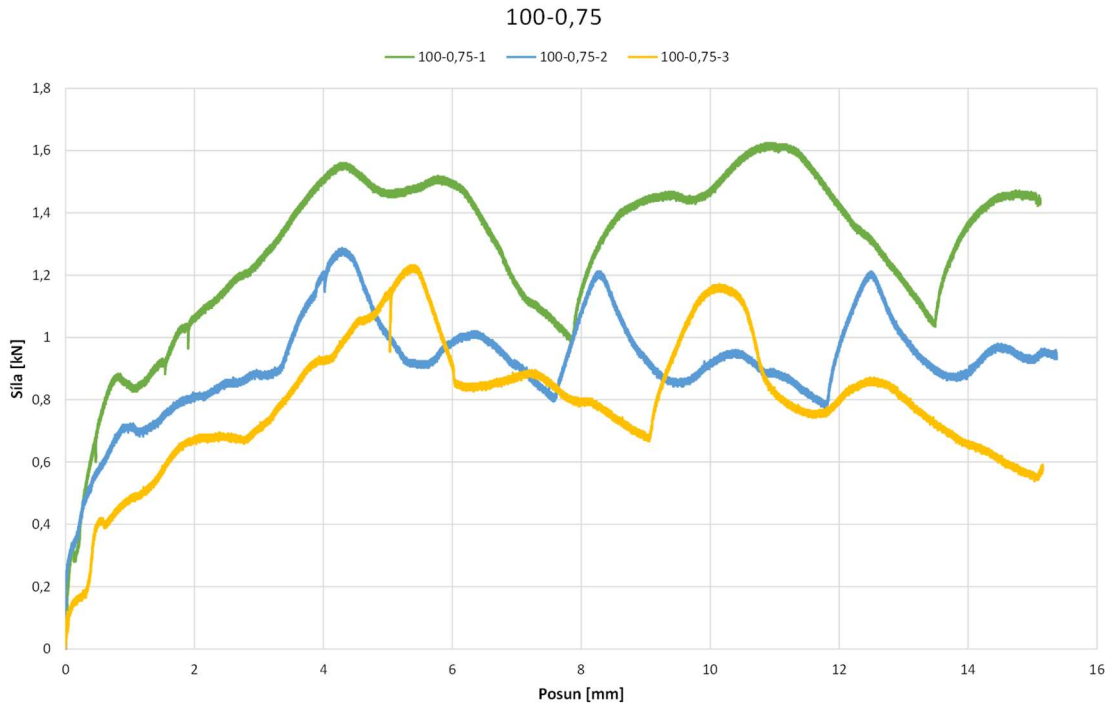
## 4.5 Získaná data z provedených zkoušek

Vzhledem k možnosti provést statistické vyhodnocení zkoušek byly provedeny vždy tři zkoušky se stejnými parametry zkušební sestavy (typ panelu, typ povrchového plechu daného panelu, tloušťka připojeného plechu). Těchto trojic bylo vyzkoušeno 10, celkem bylo tedy provedeno 30 zkoušek, viz Tab. 6. Každá zkoušená sada (trojice) je označena jako „tloušťka panelu - (v případě odlišnosti stran typ povrchového plechu) - tloušťka připojeného plechu“, tedy např. „100-0,75“ pro sadu vzorků sendvičového panelu tl. 100 mm s připojeným plechem tl. 0,75 mm, případně „200-lin-0,75“ pro zkoušku panelu tloušťky 200 mm, plechu s lineární profilací a připojeného plechu tl. 0,75 mm. Jednotlivé vzorky v každé trojici jsou pak označeny pořadovým číslem, např. „100-0,75-1“.

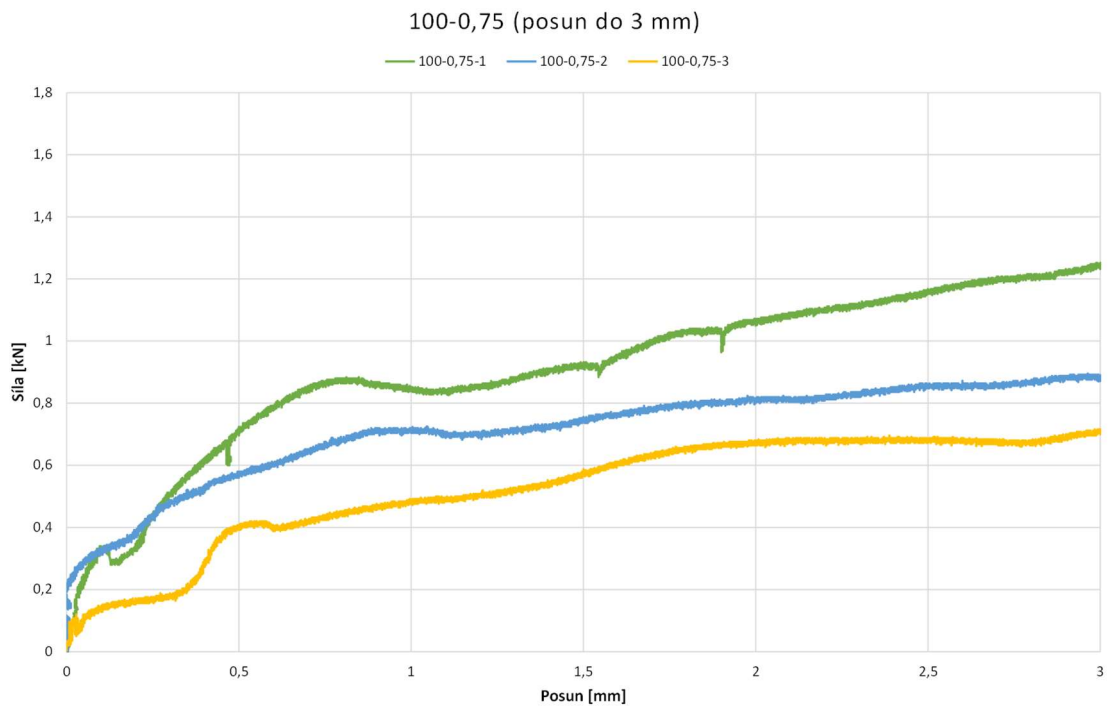
Pro každou zkoušenou trojici vzorků jsou výsledky vyhodnocovány společně, a proto i všechny tři křivky z této sady se nachází v jednom společném grafu. Konkrétně je pro každou trojici vytvořen graf celého průběhu zkoušky pro posun od 0 do 15 mm, a následně graf detailněji zobrazující posun od 0 do 3 mm. Tento graf je pro každou zkoušku vyobrazen proto, že právě závislost zatížení a posunu do 3 mm je rozhodující pro určení únosnosti.

Součástí výsledků je i tabulka obsahující označení každé zkoušky, maximální zatížení a odpovídající posun. Maximální zatížení vždy odpovídá největší dosažené síle v intervalu posunu od 0 do 3 mm. Není tak brán ohled na případné poklesy křivky (doporučení dle ECCS [13] uvádí, že síla před prvním poklesem křivky by měla být uvažována jako maximální, pokud je následný pokles o více než 10 % po dosažení této síly), tyto poklesy ale nejsou významné a skutečná únosnost přípoje je vždy evidentně vyšší.

Fotodokumentace zobrazující způsob porušení pro jednotlivé zkoušky viz Příloha A.



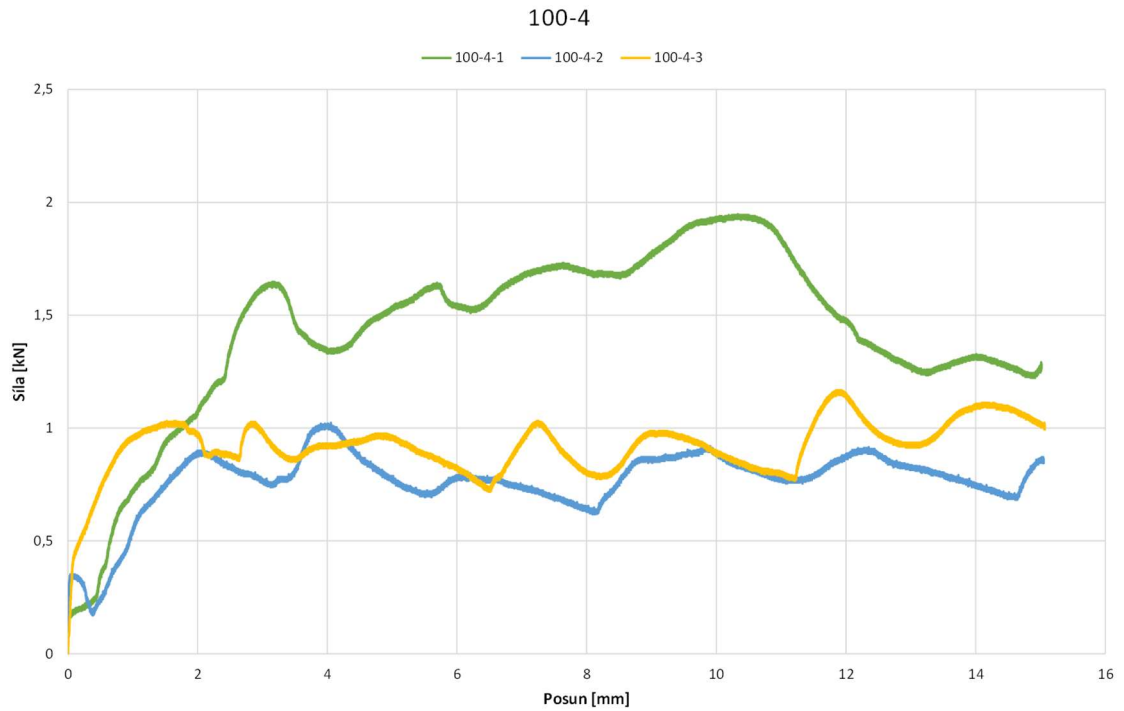
Obr. 21 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 100-0,75



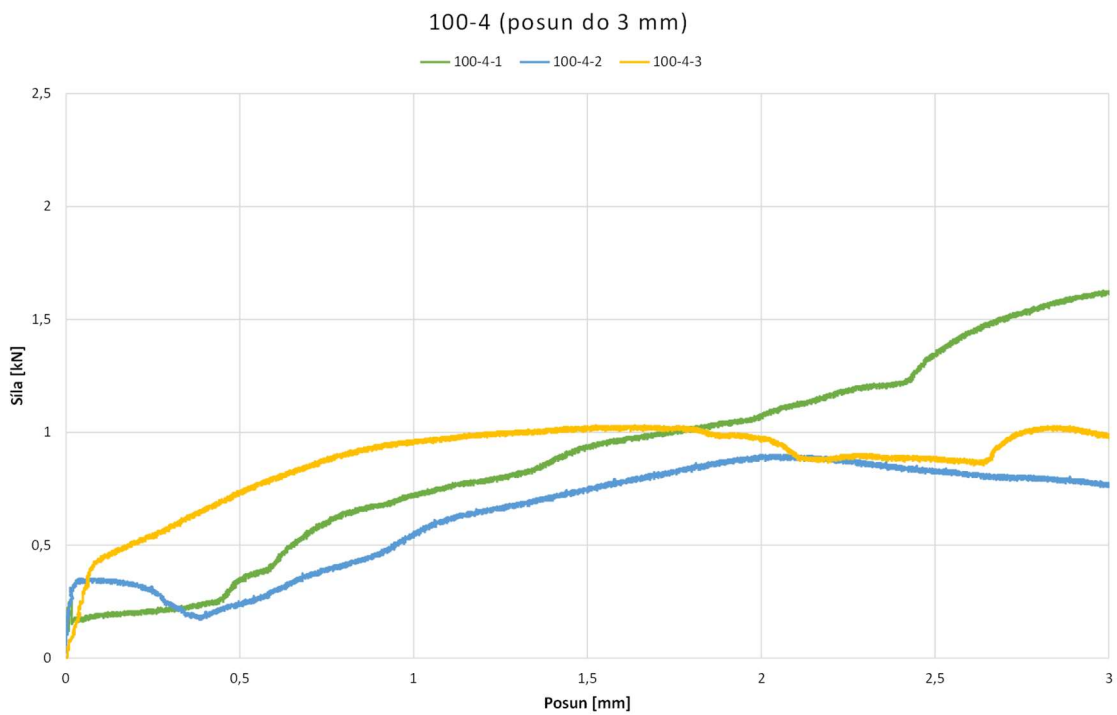
Obr. 22 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 100-0,75

Tab. 7 Vyhodnocení zkoušek 100-0,75

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
100-0,75-1	1,252	3,00
100-0,75-2	0,896	2,96
100-0,75-3	0,716	3,00



Obr. 23 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 100-4

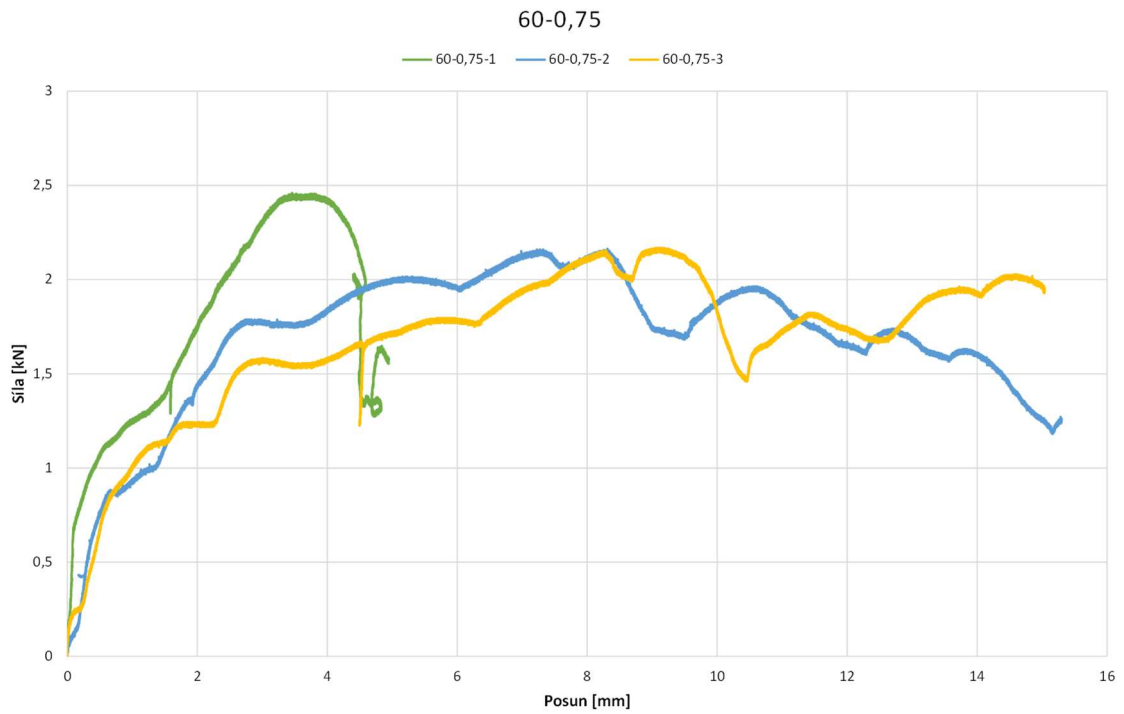


Obr. 24 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 100-4

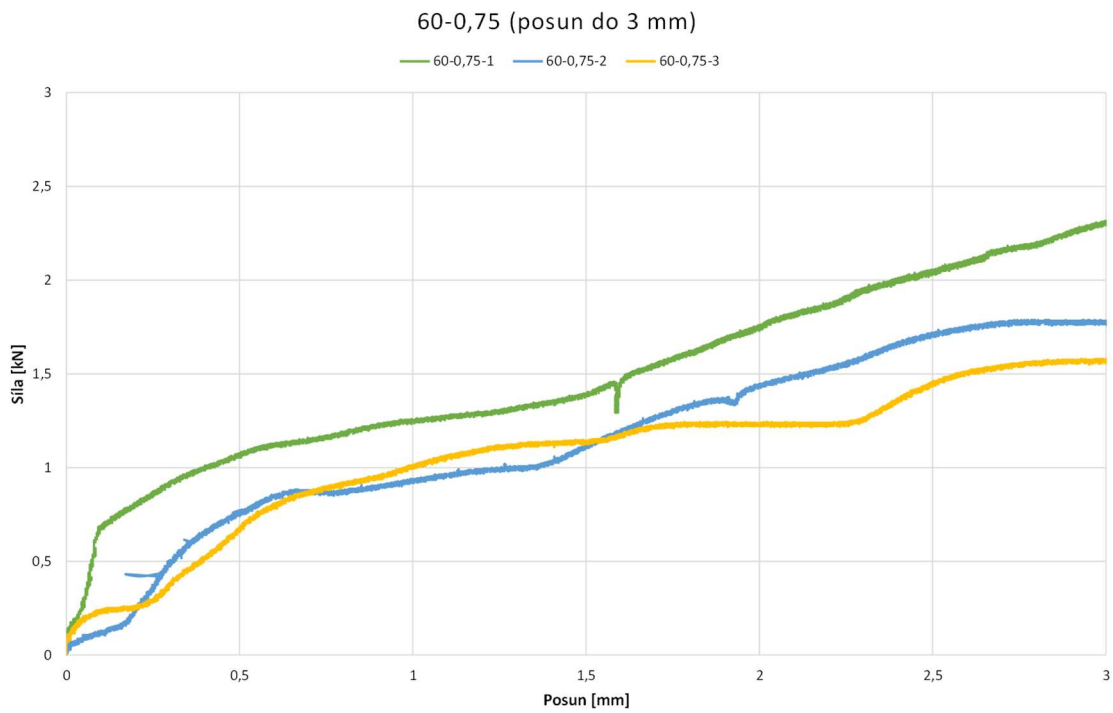
Tab. 8 Vyhodnocení zkoušek 100-4

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
100-4-1	1,628	2,98
100-4-2	0,904	2,10
100-4-3	1,032	1,52





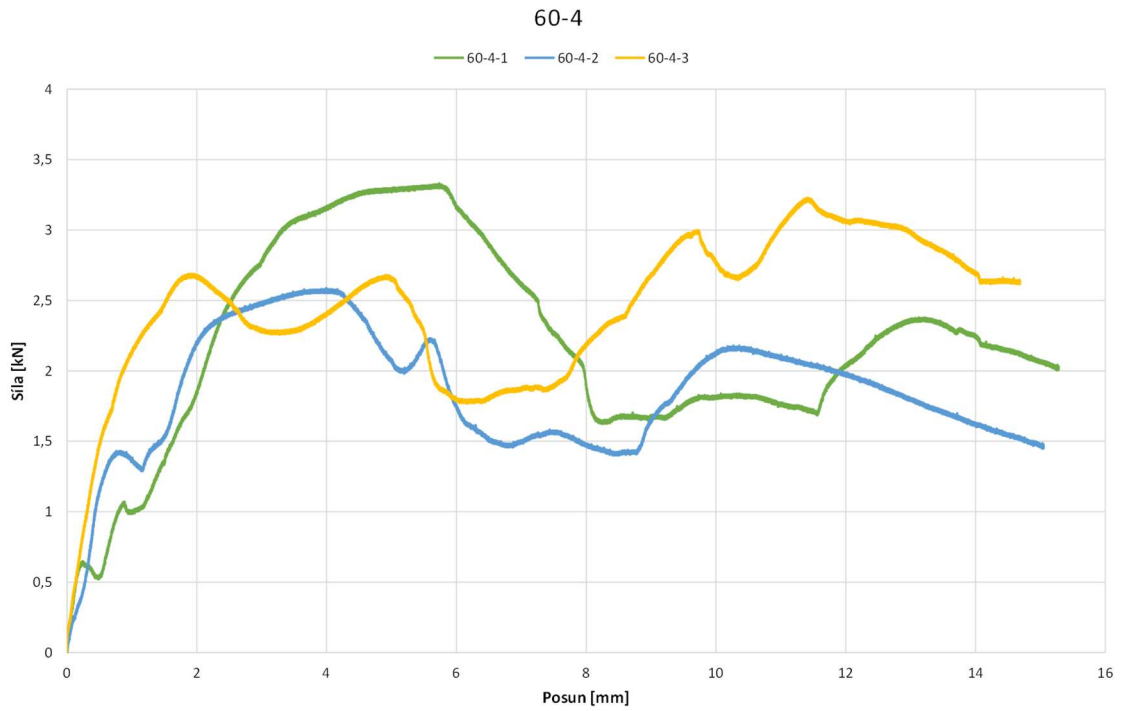
Obr. 25 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 60-0,75 (výsledky zkoušky 60-0,75-1 zkreslené, viz Příloha A)



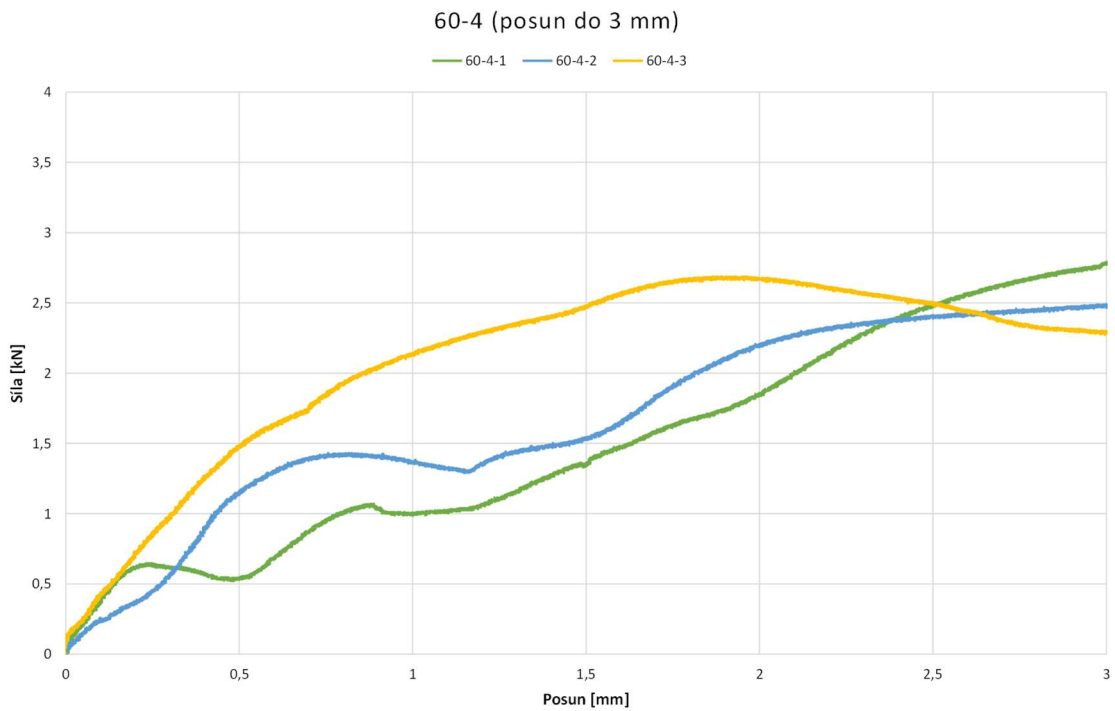
Obr. 26 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 60-0,75

Tab. 9 Vyhodnocení zkoušek 60-0,75

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
60-0,75-1	2,316	3,00
60-0,75-2	1,788	2,74
60-0,75-3	1,580	3,00



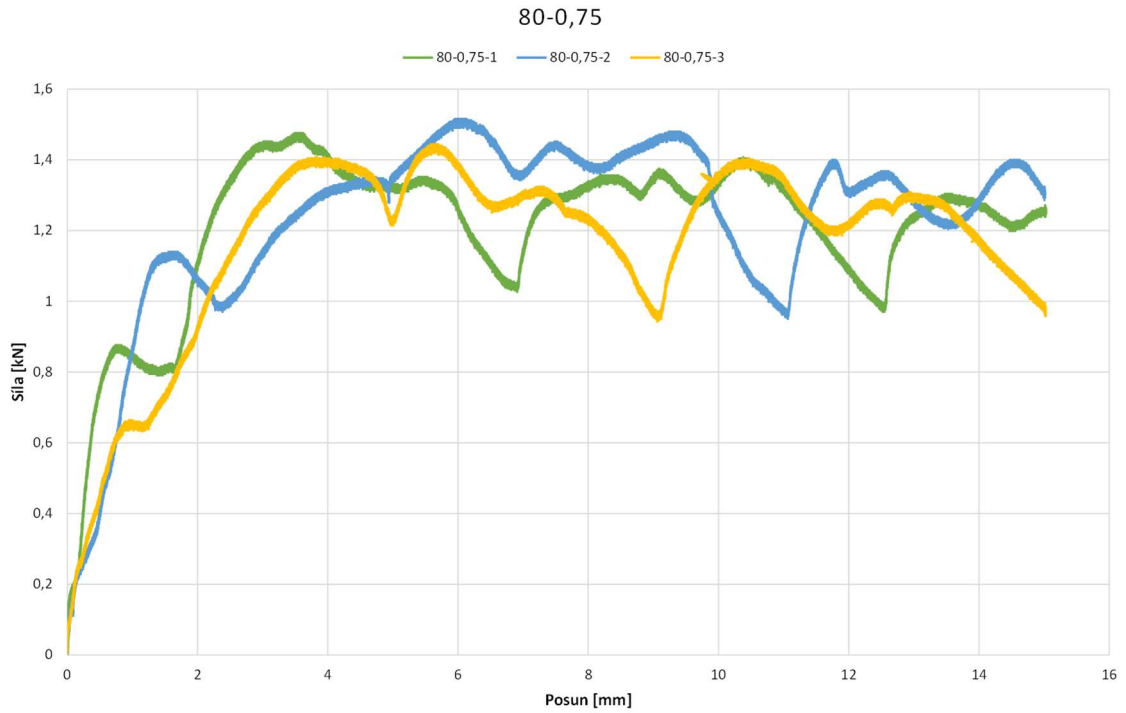
Obr. 27 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 60-4



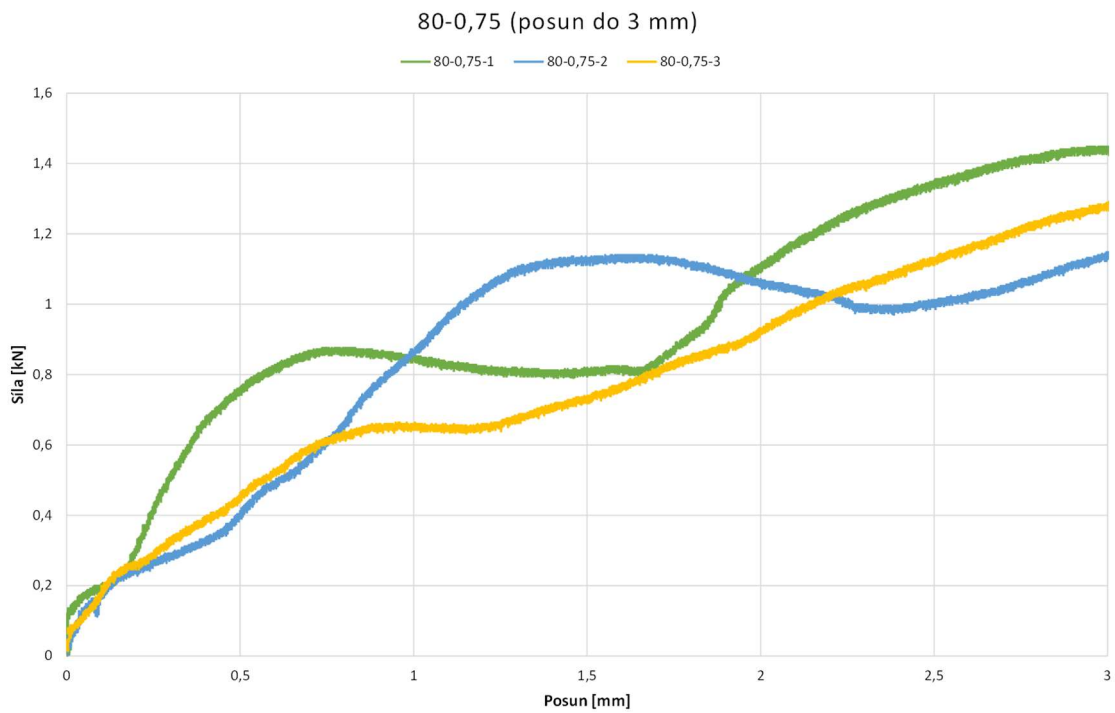
Obr. 28 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 60-4

Tab. 10 Vyhodnocení zkoušek 60-4

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
60-4-1	2,792	3,00
60-4-2	2,492	3,00
60-4-3	2,688	1,86



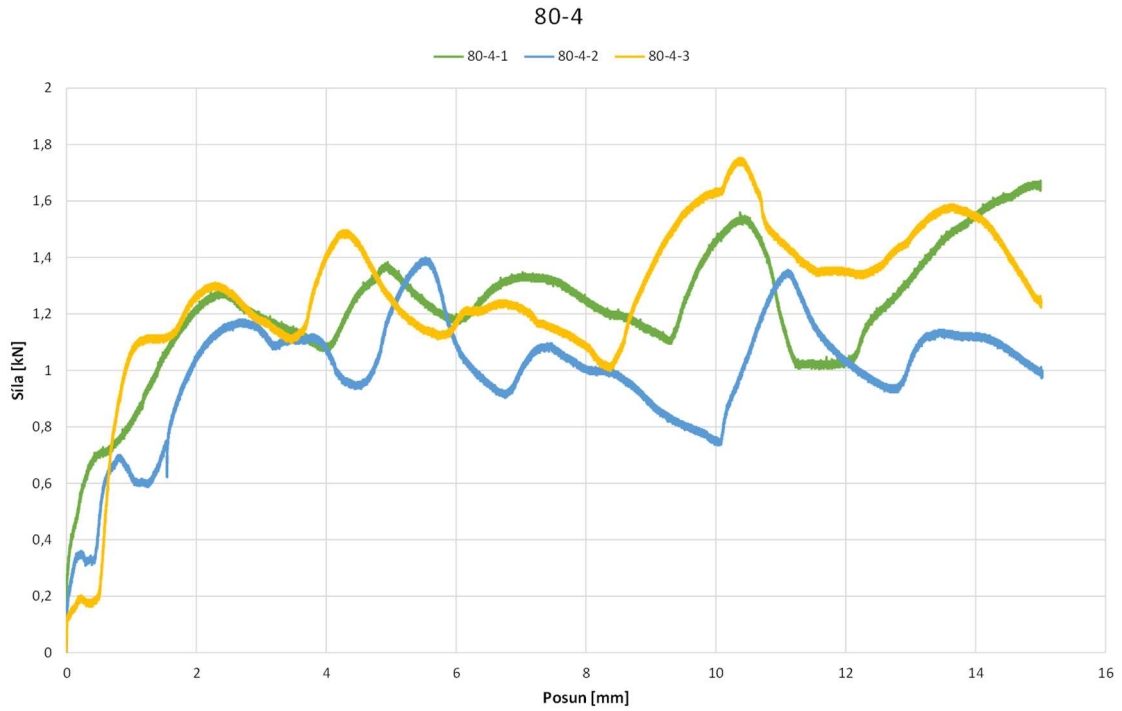
Obr. 29 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 80-0,75



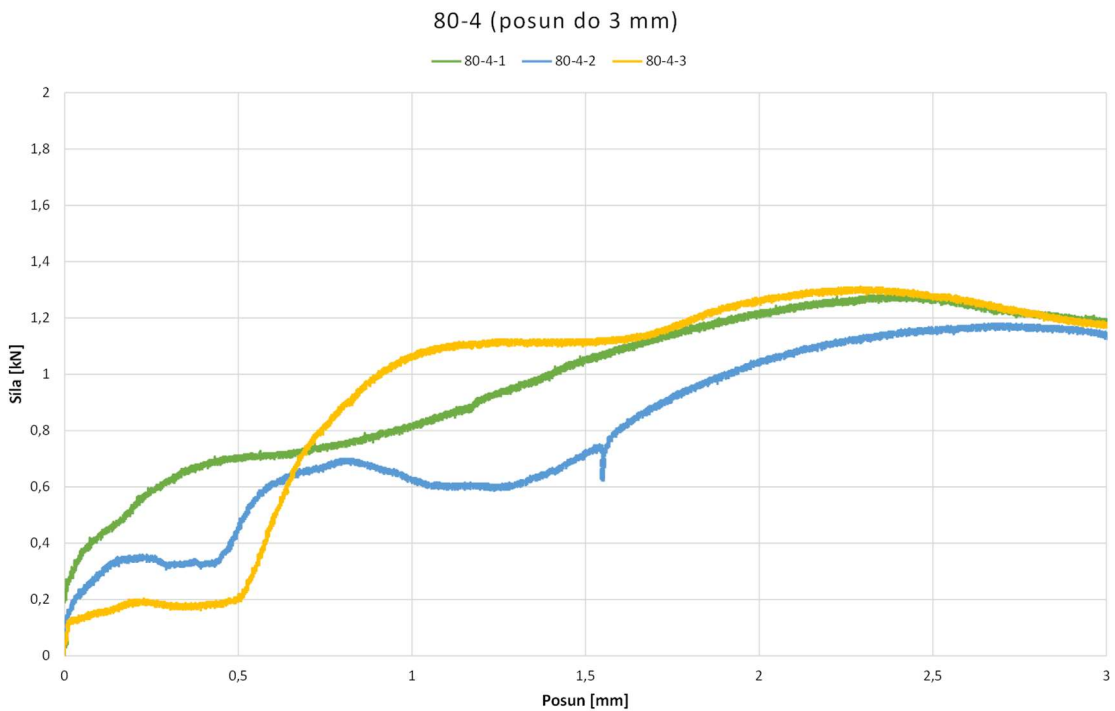
Obr. 30 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 80-0,75

Tab. 11 Vyhodnocení zkoušek 80-0,75

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
80-0,75-1	1,448	3,00
80-0,75-2	1,148	3,00
80-0,75-3	1,288	3,00



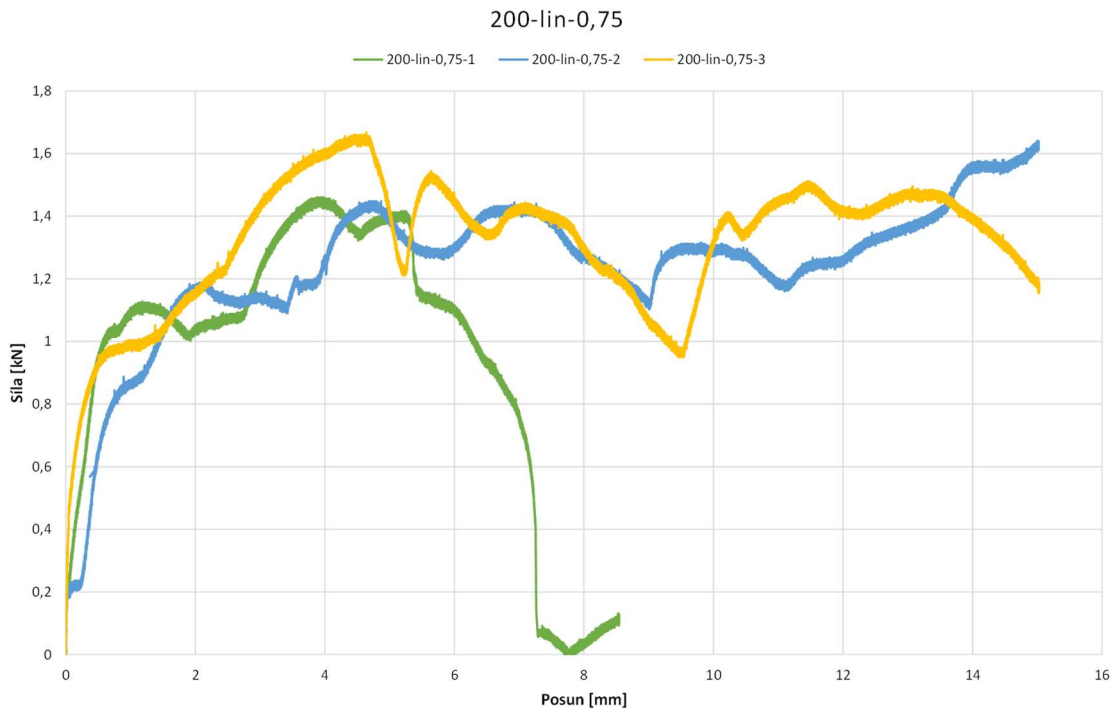
Obr. 31 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 80-4



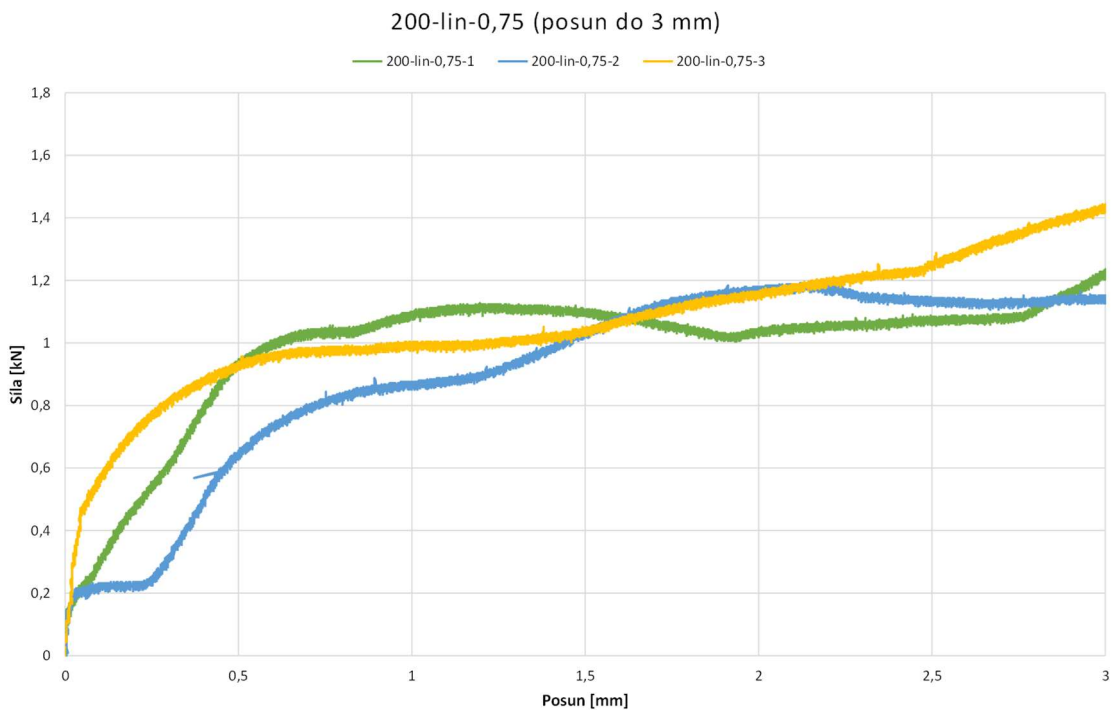
Obr. 32 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 80-4

Tab. 12 Vyhodnocení zkoušek 80-4

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
80-4-1	1,288	2,31
80-4-2	1,180	2,65
80-4-3	1,312	2,29



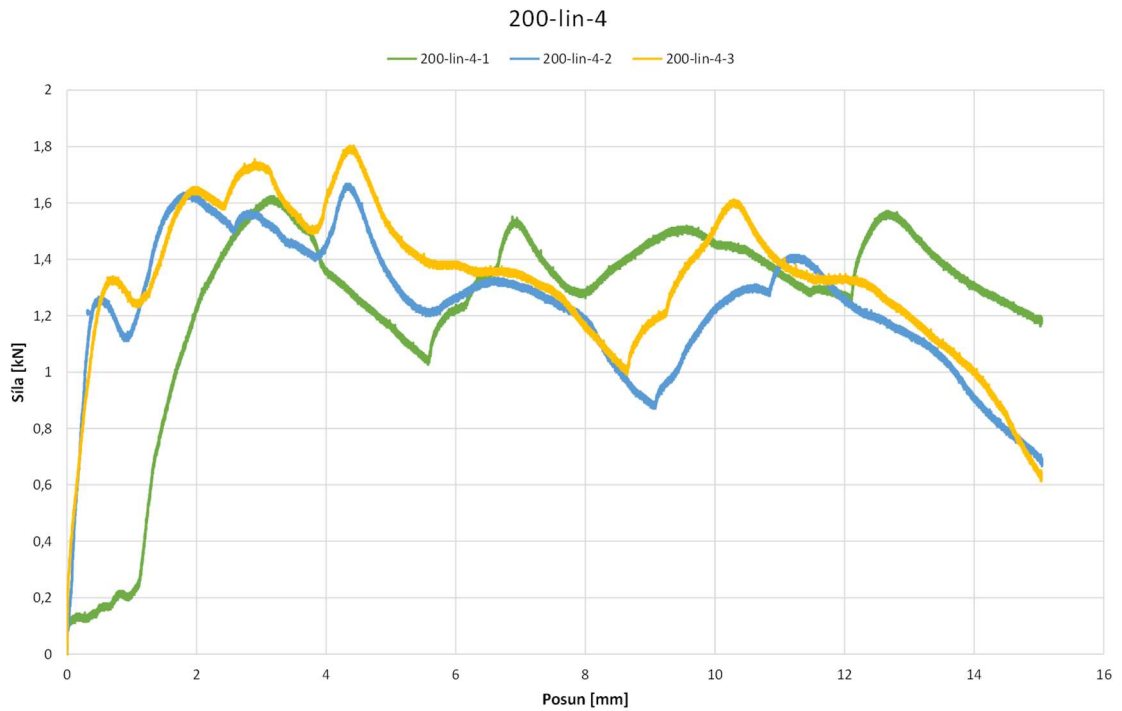
Obr. 33 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 200-lin-0,75 (kolaps přípoje 200-lin-0,75-1 viz Příloha A)



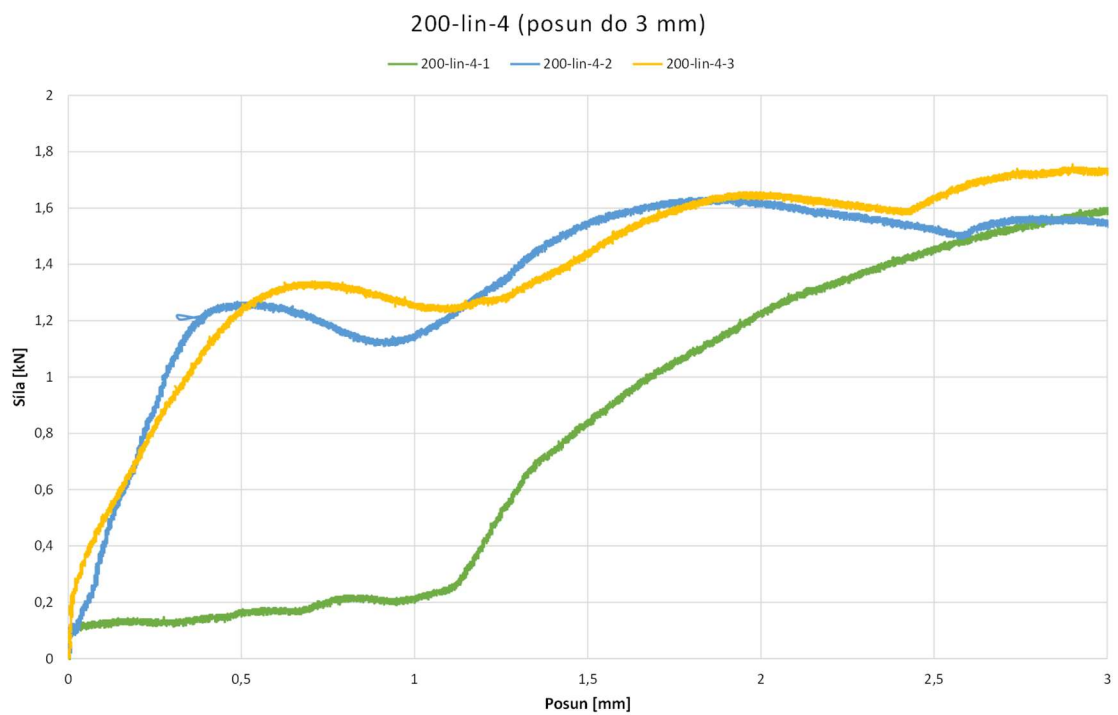
Obr. 34 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 200-lin-0,75

Tab. 13 Vyhodnocení zkoušek 200-lin-0,75

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
200-lin-0,75-1	1,236	3,00
200-lin-0,75-2	1,192	2,12
200-lin-0,75-3	1,444	3,00



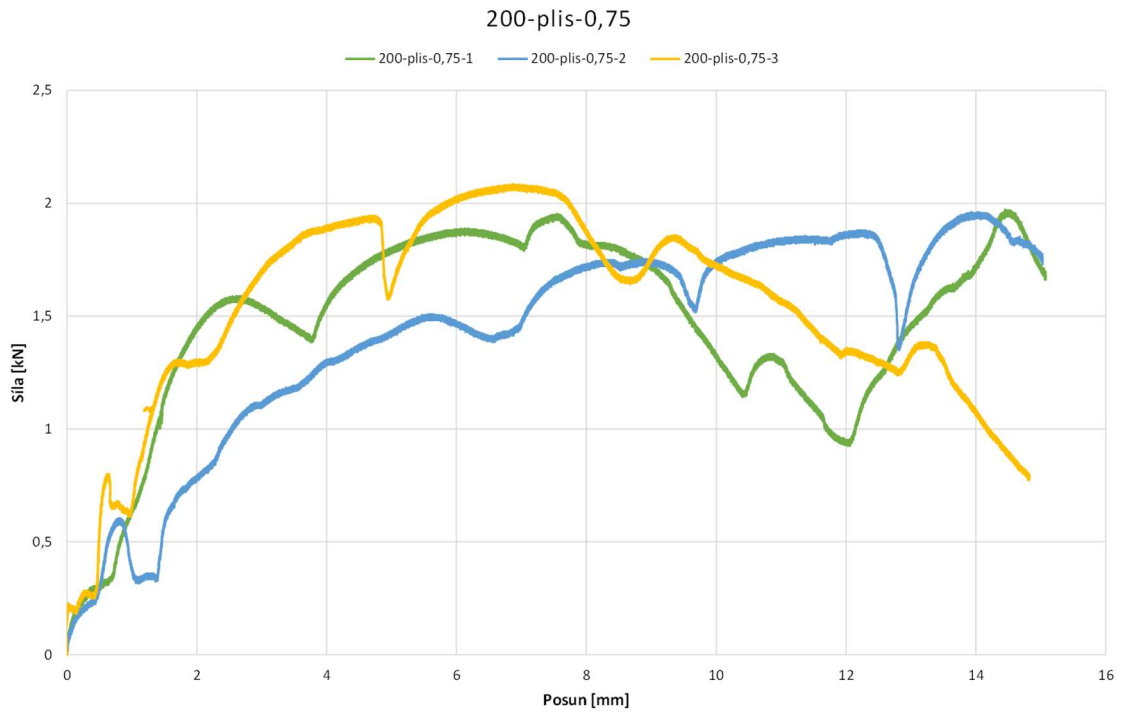
Obr. 35 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 200-lin-4



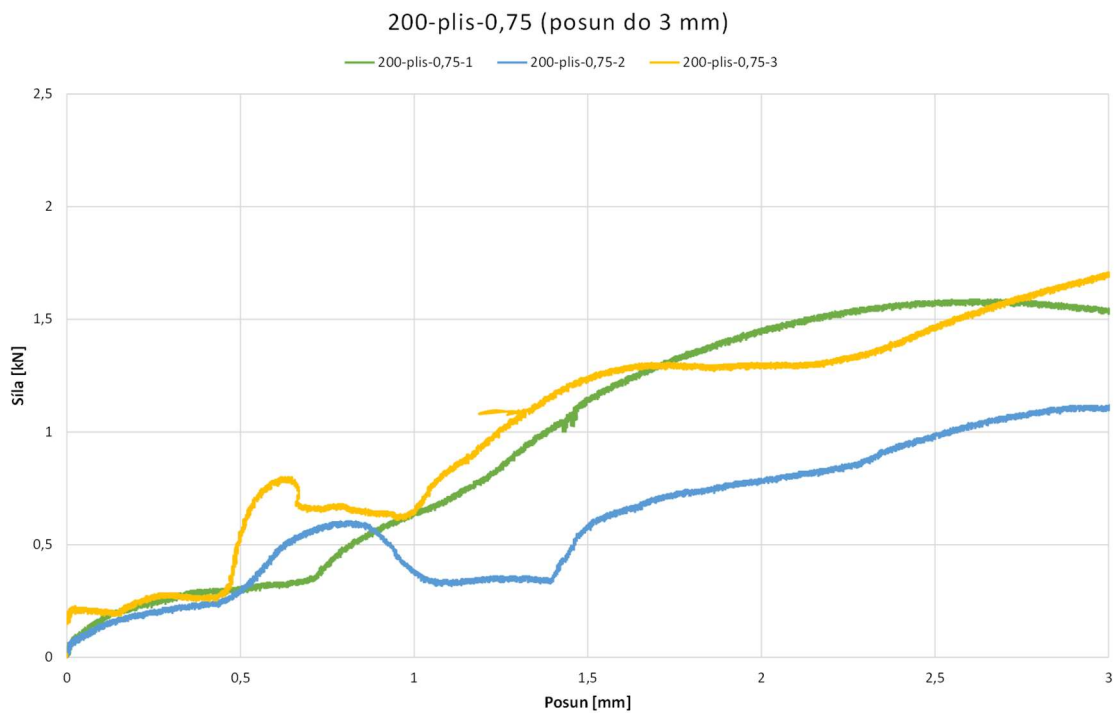
Obr. 36 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 200-lin-4

Tab. 14 Vyhodnocení zkoušek 200-lin-4

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
200-lin-4-1	1,600	3,00
200-lin-4-2	1,640	1,89
200-lin-4-3	1,756	2,90



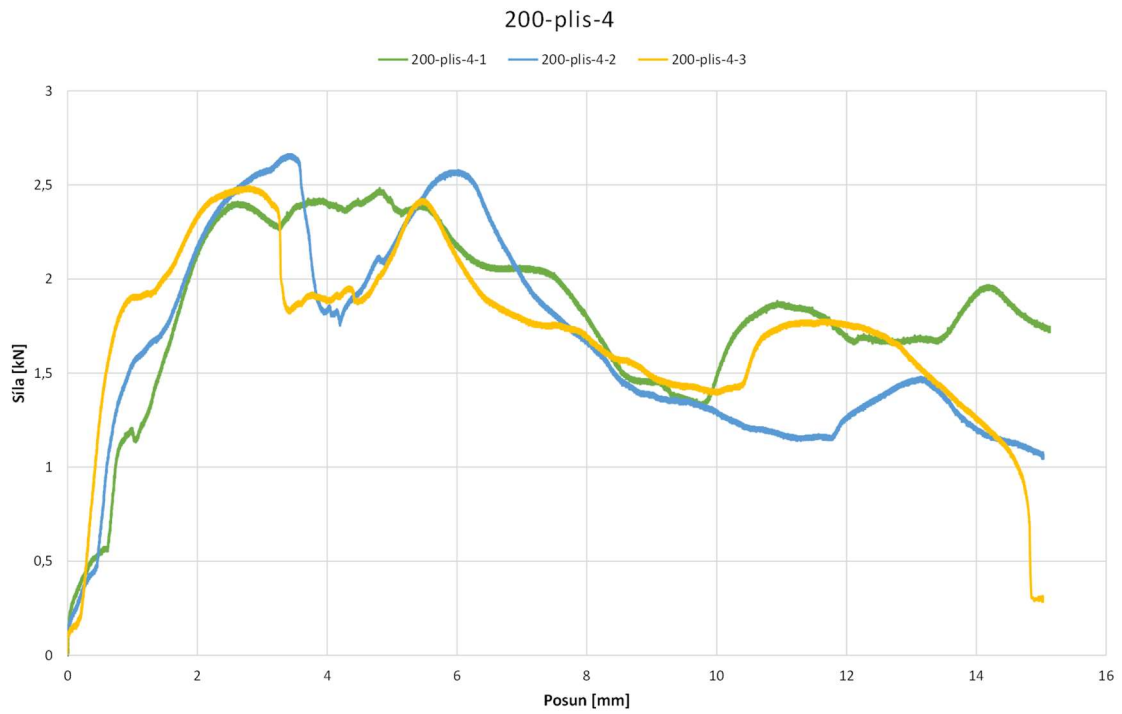
Obr. 37 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušky 200-plis-0,75



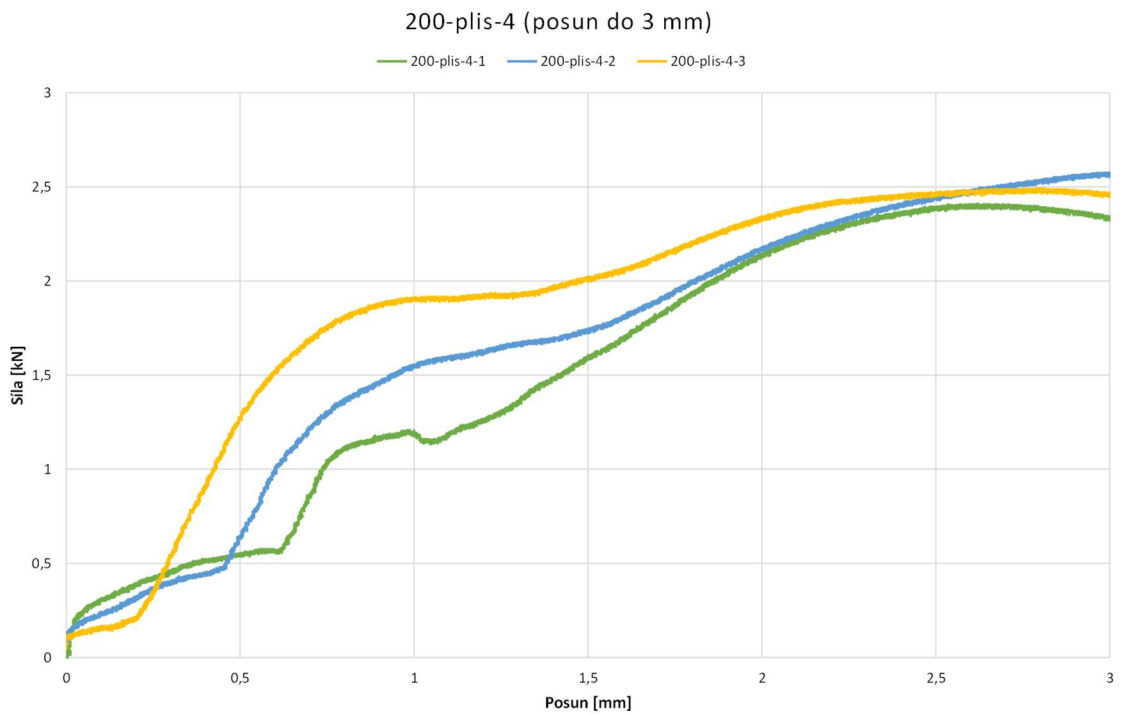
Obr. 38 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušky 200-plis-0,75

Tab. 15 Vyhodnocení zkoušek 200-plis-0,75

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
200-plis-0,75-1	1,588	2,55
200-plis-0,75-2	1,116	3,00
200-plis-0,75-3	1,708	3,00



Obr. 39 Graf závislosti zatížení–posun pro zkoušku 200-plis-4



Obr. 40 Graf závislosti zatížení–posun do 3 mm pro zkoušku 200-plis-4

Tab. 16 Vyhodnocení zkoušky 200-plis-4

Zkouška	Mezní zatížení [kN]	Odpovídající posun [mm]
200-plis-4-1	2,412	2,62
200-plis-4-2	2,576	3,00
200-plis-4-3	2,492	2,75



## 5 Materiálové zkoušky

Aby bylo možné vyhodnotit výsledky zkoušek přípojů sendvičových panelů, bylo nutné provést zkoušky v tahu ocelových plechů a získat jejich materiálové charakteristiky, zejména mez pevnosti  $f_u$ . Zkušební tělesa byla vytvořena po důkladném odstranění vrstvy tepelné izolace z původního tělesa sendvičového panelu. Materiálovým zkouškám v tahu byly podrobeny všechny plechy, které při zkouškách přípojů představovaly vnitřní (interiérový) plech. Konkrétní přehled jednotlivých plechů je uveden v Tab. 17.

Tab. 17 Přehled typů plechů pro zkoušky v tahu, rozměry v [mm]

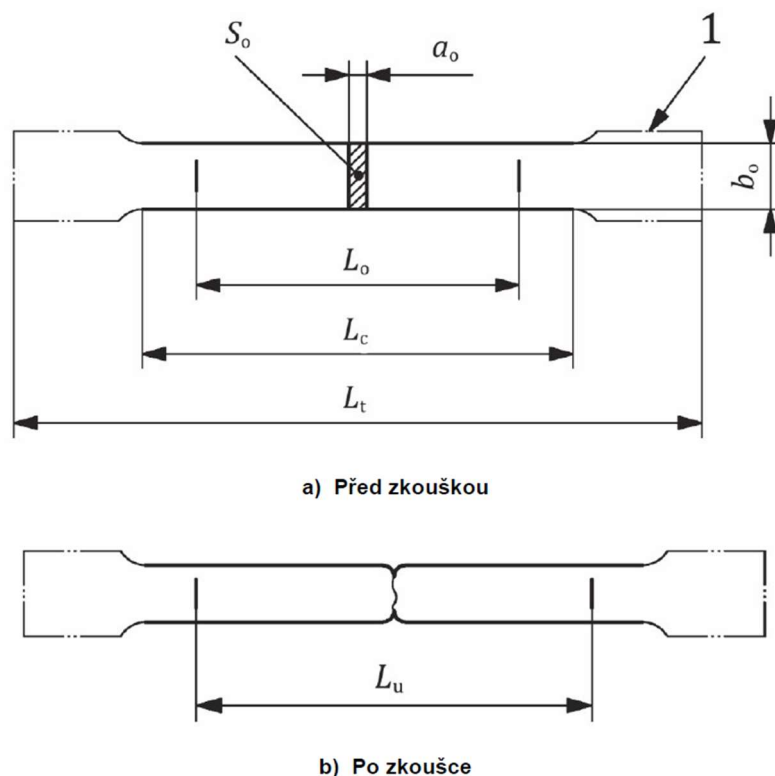
Tloušťka příslušného panelu	Nominální tloušťka plechu	Typ oceli	Třída oceli	Profilace plechu
60	0,5	korozivzdorná	1.4301	lineární
80	0,5	uhlíková	S280GD + Z*	lineární
100	0,4	uhlíková	S250GD + Z	lineární
200	0,5	uhlíková	S280GD + Z*	lineární
200	0,6	uhlíková	S280GD + Z*	plisování

\* Původní třída oceli nebyla známa a byla zpětně odvozena na základě výsledků tahových zkoušek.

### 5.1 Rozměry zkušebních těles

Rozměry zkušebních těles byly stanoveny v souladu s ČSN EN ISO 6892-1 [23]. Jedná se o tělesa pravoúhlého průřezu o tloušťce od 0,1 do 3 mm, rozměry tedy vychází z požadavků na tvar zkušebních těles zhotovených z těchto výrobků. Na každém zkušebním tělese jsou definovány základní rozměry, jak je ukázáno na Obr. 41. Označení jednotlivých rozměrů a částí zkušebního tělesa je následující:

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



Obr. 41 Obecný tvar obrobeného zkušebního tělesa, zdroj: [23]

Pro plechy a obecně tenké výrobky se obecně používají tři odlišné geometrie zkušebních těles, volba varianty závisí na dostupnosti materiálu nebo náročnosti výroby. Vzhledem k tomu, že vzdálenost jednotlivých úseků na řezu některých plechů s lineární profilací byla poměrně malá, bylo přistoupeno k výrobě nejmenších možných vzorků (typ zkušebního tělesa 1). V opačném případě by povrch zkušebního vzorku vykazoval tvar profilace původního plechu a neměl tak čistě obdélníkový průřez. Uvedený typ zkušebního tělesa byl v rámci zjednodušení výroby zvolen pro všechny typy zkoušených plechů. Rozměry zkušebního tělesa jsou dle ČSN EN ISO 6892-1 [23] následující:

Tab. 18 Rozměry zkušebního tělesa typu 1, rozměry v [mm] [23]

Typ zkušebního tělesa	Šířka $b_0$	Počáteční měřená délka $L_0$	Zkoušená délka $L_c$	
			Minimální	Doporučená
1	$12,5 \pm 1$	50	57	75

Poloměr přechodových křivek, kterými zkoušená délka přechází do upínacích konců, je minimálně 20 mm. Šířka upínacích konců je pak větší nebo rovna  $1,2b_0$  [23].

Z každého typu plechu byly vyrobeny tři vzorky vyrobené dle těchto požadavků. Pro každé zkušební těleso bylo nutné změřit skutečné rozměry, konkrétně počáteční tloušťku  $a_0$  a počáteční šířku  $b_0$ . Tyto rozměry byly měřeny vždy kolmo k podélné ose ve třech různých

průřezových plochách na zkoušené délce  $L_c$ . Pro oba rozměry byla následně vypočítány průměrné hodnoty, na základě kterých byla stanovena počáteční průřezová plocha  $S_0$ . Zjištěné průměrné hodnoty  $a_0$ ,  $b_0$  a z nich vypočítané průřezové plochy jednotlivých zkušebních těles  $S_0$  jsou uvedeny v Tab. 19., kde je každý vzorek označen dvěma číslicemi, z nichž první odpovídá tloušťce příslušného sendvičového panelu a druhé pořadovému číslu zkoušky pro tento typ plechu. V případě odlišnosti vnitřního a vnějšího plechu (sendvičový panel tl. 200 mm) je poznamenán i typ profilace plechu.

Tab. 19 Naměřené rozměry zkušebních těles

Označení vzorku	Průměrná hodnota $a_0$	Průměrná hodnota $b_0$	Poč. průřezová plocha $S_0$
60.1	0,467	12,490	5,833
60.2	0,500	12,420	6,210
60.3	0,490	12,493	6,122
80.1	0,400	12,443	4,977
80.2	0,390	12,453	4,857
80.3	0,390	12,513	4,880
100.1	0,357	12,427	4,436
100.2	0,360	12,407	4,466
100.3	0,363	12,403	4,502
200.lin.1	0,460	12,380	5,695
200.lin.2	0,460	12,373	5,692
200.lin.3	0,460	12,373	5,692
200.plis.1	0,560	12,320	6,899
200.plis.2	0,550	12,337	6,785
200.plis.3	0,550	12,443	6,844

## 5.2 Měřicí technika

Klíčovým přístrojem v sestavě určené pro tahové zkoušky je zkušební stroj MTS QTest 100 Elite Controller, který je podrobněji popsán v kapitole 4.1. Přístroj je pro účely provedení tahových zkoušek osazen klínovými čelistmi umožňujícími upnutí zkušebního tělesa. Stejně jako v případě zkoušek přípojů sendvičových panelů, i pro materiálové zkoušky je připojen k tomuto přístroji ovladač, rozvaděč a počítač se softwarem TestWorks 4. Pomocí tohoto softwaru je nastavena zkušební metoda a rychlost zatěžování. Skrze software jsou zkoušky zahajovány i ukončovány a probíhá zde záznam a ukládání získaných dat.

Důležitou veličinou pro vyhodnocení těchto zkoušek je naměřená poměrná deformace zkušebních těles. Přístroj snímající deformaci je odlišný oproti snímači použitému pro zkoušky přípojů. Pro měření deformace při zkouškách v tahu je použit kontaktní axiální extenzometr Epsilon 3542-025M-100-ST s plochými bríty. Principem tohoto snímače je pohyb brítů během

zatěžování společně s materiálem a následný převod naměřeného odporu proti tomuto pohybu na poměrnou deformaci. Vlastnosti přístroje dle údajů výrobce [24] jsou uvedeny v Tab. 20.

Tab. 20 Parametry axiálního extenzometru Epsilon 3542-025M-100-ST

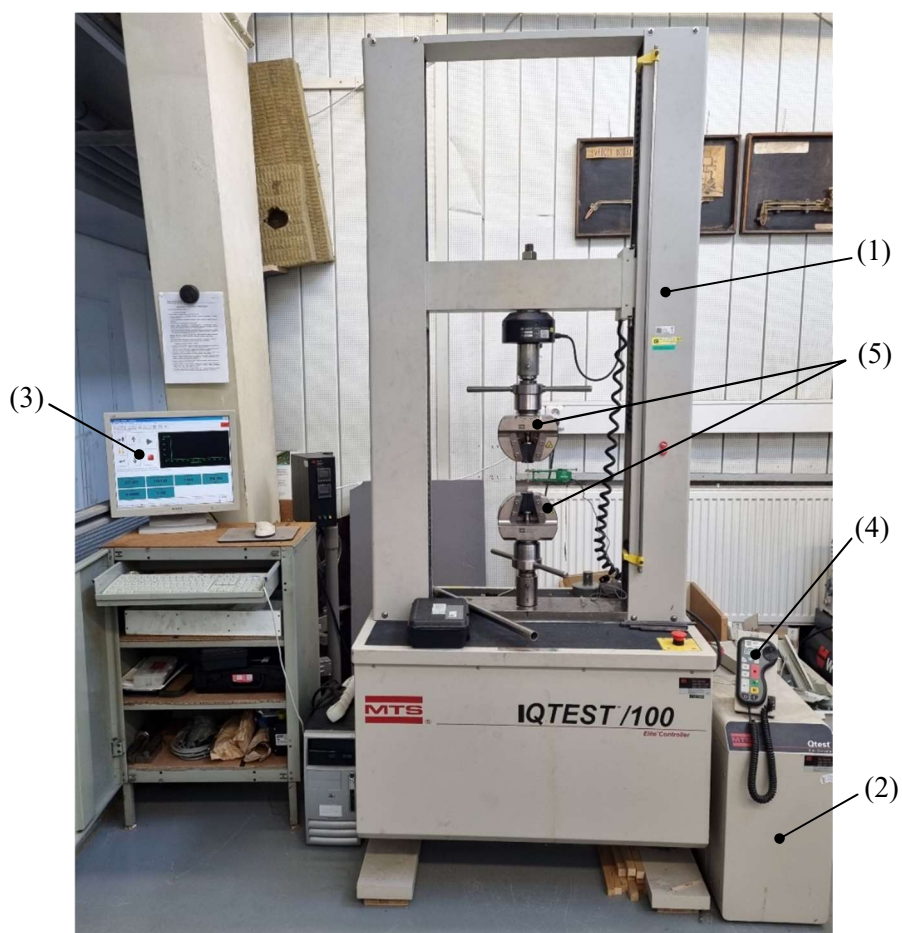
Charakteristika	Hodnota
Počáteční měrná délka	25 mm
Měřicí rozsah	+ 100 % / -5 %
Provozní teplota	-40 °C až 100 °C
Odchylka od linearity	≤0,15%

Další odlišností oproti měřicí technice použité pro zkoušky přípojů ve smyku je skutečnost, že v případě zkoušek v tahu je zkušební stroj i extenzometr propojen pouze s jedním počítačem. Údaje o působící síle během zkoušky a hodnoty poměrné deformace jsou tak zaznamenávány společně, z každé zkoušky vždy do jednoho datového souboru. Na rozdíl od zkoušek přípojů, kde sloužila data exportovaná systémem TestWorks 4 pouze jako kontrolní, jsou pro tahové zkoušky k dispozici pouze data zaznamenaná právě tímto systémem, a tudíž jsou používána pro vyhodnocování.

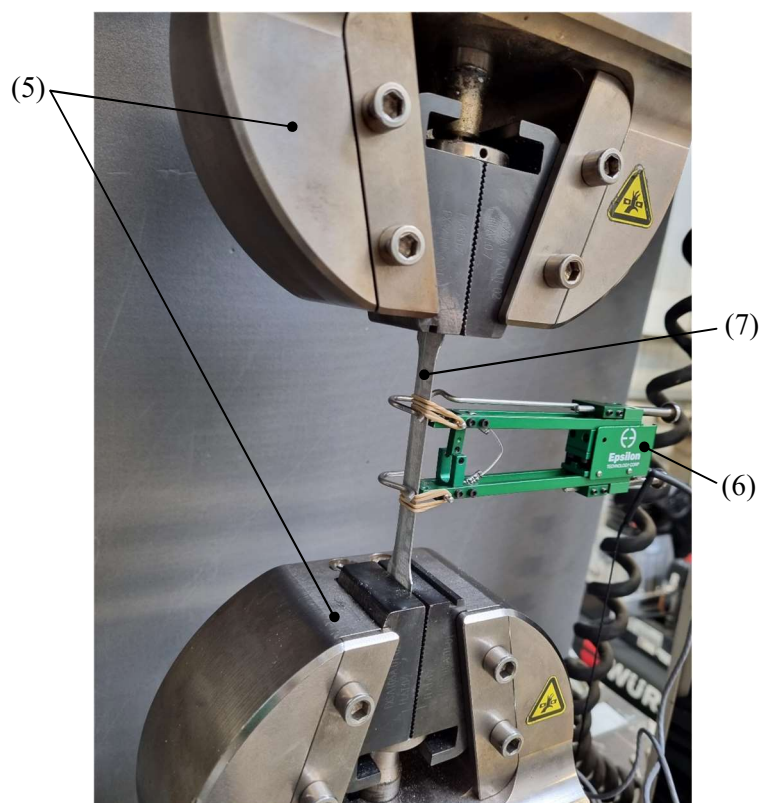
Zkušební sestava je vyobrazena na Obr. 42 a detailní pohled na vzorek s připevněným extenzometrem na Obr. 43. Použité označení jednotlivých komponent je:

- (1) zkušební stroj MTS QTest 100
- (2) rozvaděč
- (3) počítač + software TestWorks 4
- (4) ovladač zkušebního stroje
- (5) čelisti zkušebního stroje
- (6) axiální extenzometr Epsilon 3542
- (7) zkušební těleso

Kromě základního nastavení techniky, kterým byl např. výběr metody (tahová zkouška – pohyb příčnicku směrem nahoru) nebo nastavení frekvence záznamu, bylo zejména potřeba definovat rychlost zatěžování. Zatížení bylo opět řízeno posunem příčnicku, tedy deformací. ČSN EN ISO 6892-1 [23] uvádí postupy pro určení deformační rychlosti v různých fázích zatěžování. Pro realizované zkoušky v tahu byly stanoveny dva různé stupně rychlosti. První rychlost byla určena pro fázi od zahájení zkoušky po dosažení 1,5% přetvoření dle extenzometru, konkrétně se jednalo o rychlost  $\dot{\epsilon}_{L_e} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Tento rozsah bezpečně pokrýval mez kluzu. Pro následující fázi byla deformační rychlost zvýšena na  $\dot{\epsilon}_{L_e} = 25 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Vynásobením vzdálenosti čelistí zkušebního stroje a deformační rychlosti byla pro každou zkoušku získána výsledná nastavená rychlost posunu příčnicku.



Obr. 42 Použitá měřicí technika pro zkoušky v tahu



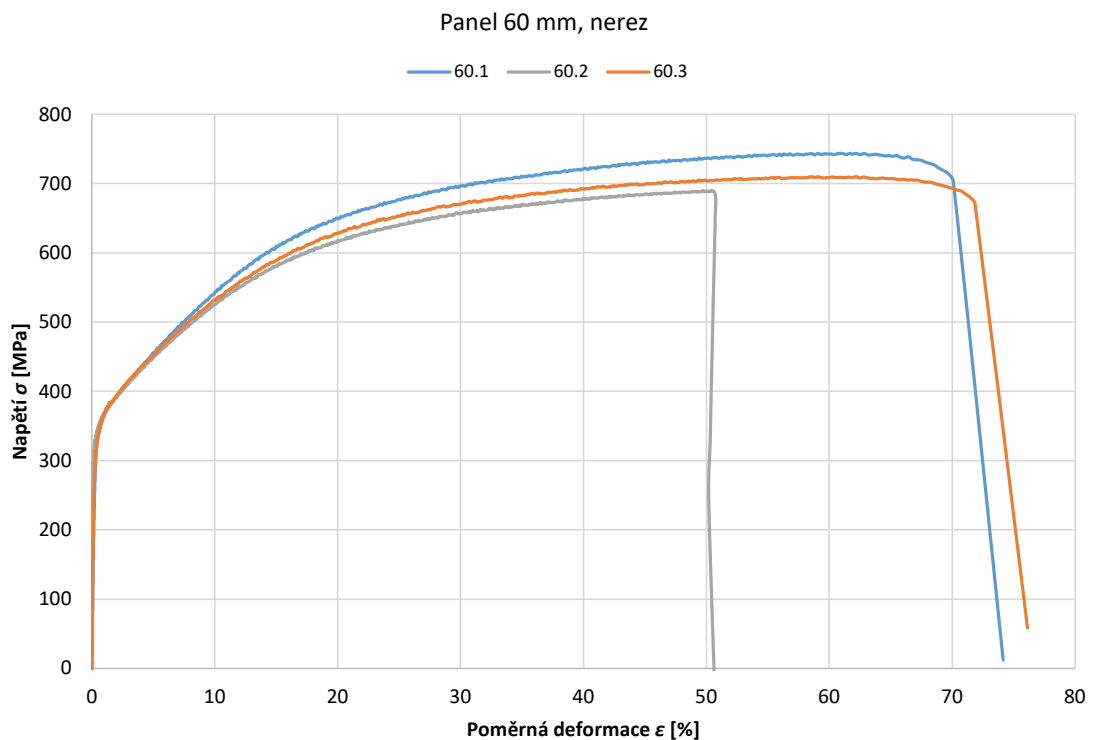
Obr. 43 Zkušební těleso při zkoušce v tahu s připevněným axiálním extenzometrem

### 5.3 Získaná data z provedených materiálových zkoušek

Výstupem z každé zkoušky je pracovní diagram, tedy vztah mezi napětím a poměrnou deformací. Jelikož byly pro každý typ plechu zkoušeny tři vzorky stejných parametrů, je tato trojice křivek vždy zobrazena v jednom grafu. Ke každé zkoušce je rovněž uvedena zjištěná mez kluzu  $f_{y,obs}$  a mez pevnosti  $f_{u,obs}$ .

Hodnoty meze kluzu a pevnosti jsou přímo určovány z grafů, přičemž pro uhlíkovou ocel (plechy ze sendvičových panelů tloušťek 80; 100; 200 mm) je uvažována horní mez kluzu [25]. V případě korozivzdorné oceli (sendvičový panel tloušťky 60 mm) je uvažována smluvní mez kluzu, konkrétně napětí odpovídající 0,2 % plastické deformace určené pomocí 1. stupně Ramberg-Osgoodova diagramu dle následující rovnice [26]:

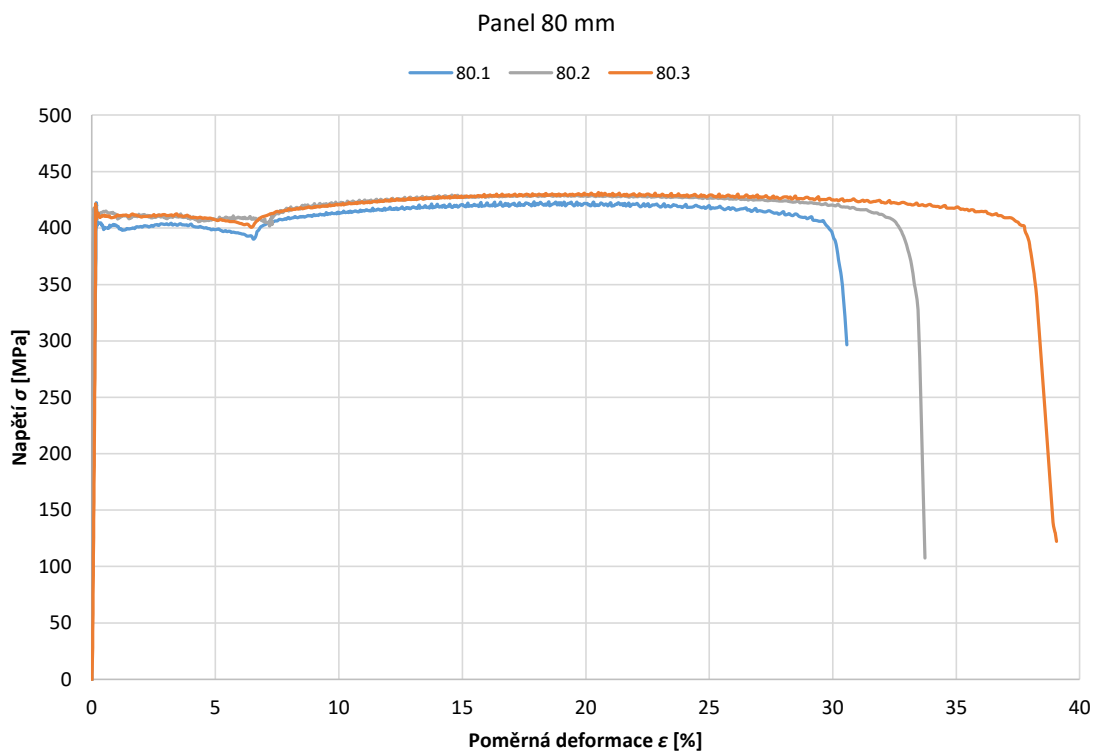
$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_0} \quad (9)$$



Obr. 44 Graf závislosti napětí–přetvoření pro vzorky 60.1–60.3

Tab. 21 Zjištěná mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušek 60.1–60.3

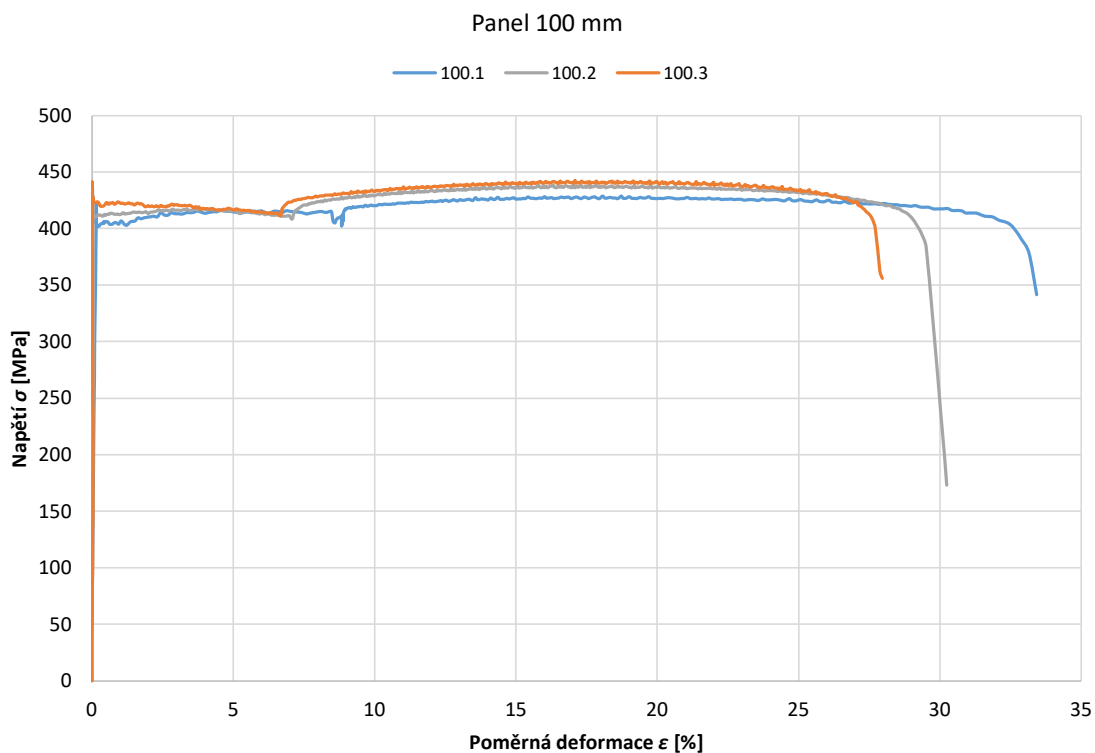
Označení vzorku	$f_{y,obs}$ [MPa]	$f_{u,obs}$ [MPa]
60.1	325,01	743,71
60.2	340,70	690,13
60.3	321,00	710,16



Obr. 45 Graf závislosti napětí–přetvoření pro vzorky 80.1–80.3

Tab. 22 Zjištěná mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušek 80.1–80.3

Označení vzorku	$f_{y,obs}$ [MPa]	$f_{u,obs}$ [MPa]
80.1	422,38	423,15
80.2	417,45	429,87
80.3	418,24	431,50

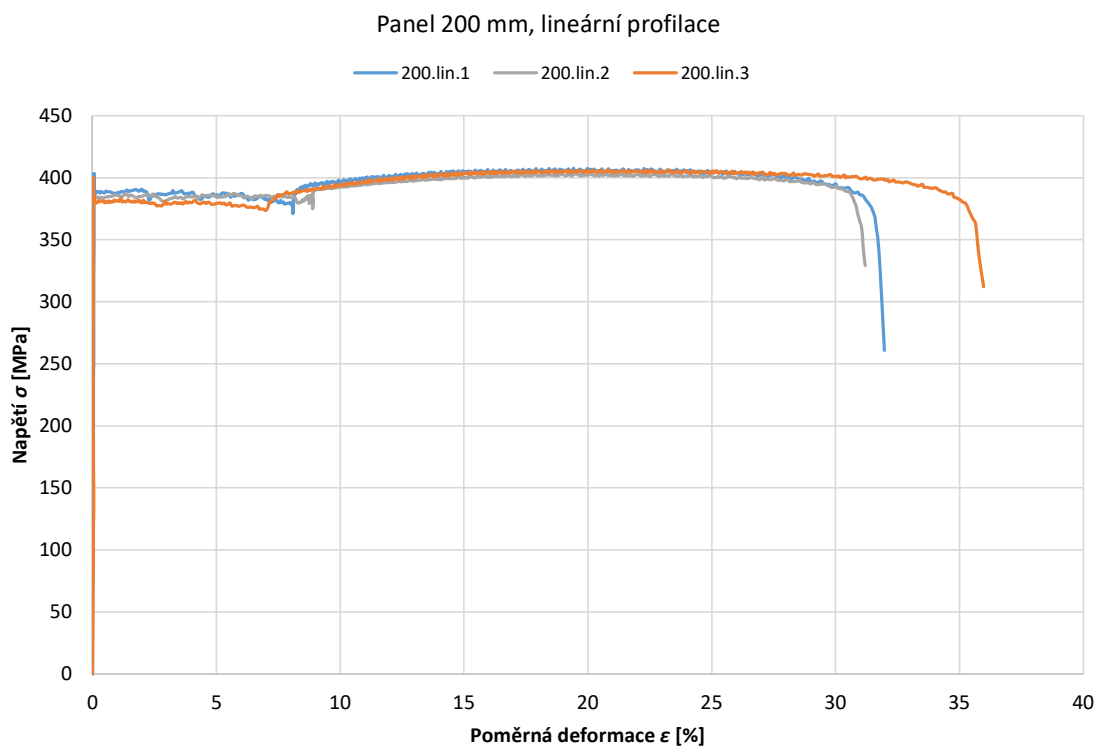


Obr. 46 Graf závislosti napětí–přetvoření pro vzorky 100.1–100.3

Tab. 23 Zjištěná mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušek 100.1–100.3

Označení vzorku	$f_{y,obs}$ [MPa]	$f_{u,obs}$ [MPa]
100.1	423,12	428,77
100.2	428,74	438,77
100.3	425,63	442,51

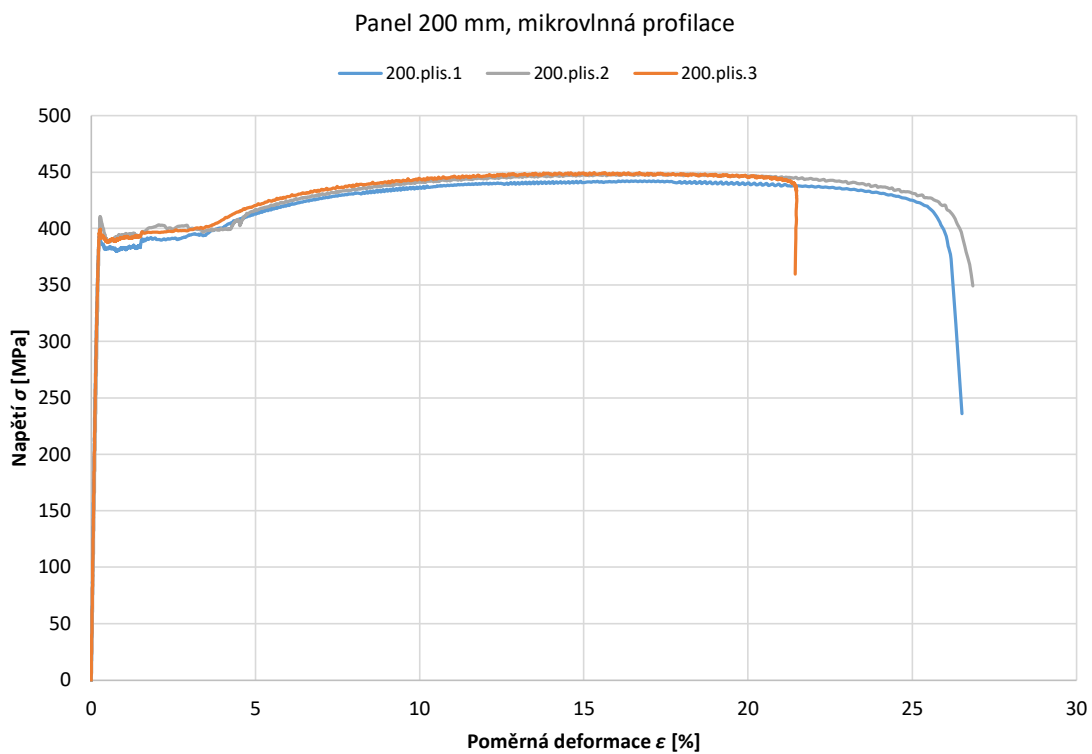




Obr. 47 Graf závislosti napětí–přetvoření pro vzorky 200.lin.1–200.lin.3

Tab. 24 Zjištěná mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušek 200.lin.1–200.lin.3

Označení vzorku	$f_{y,obs}$ [MPa]	$f_{u,obs}$ [MPa]
200.lin.1	403,15	407,45
200.lin.2	393,31	404,06
200.lin.3	400,03	406,63



Obr. 48 Graf závislosti napětí–přetvoření pro vzorky 200.plis.1–200.plis.3

Tab. 25 Zjištěná mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušek 200.plis.1–200.plis.3

Označení vzorku	$f_{y,obs}$ [MPa]	$f_{u,obs}$ [MPa]
200.plis.1	394,15	442,17
200.plis.2	410,69	448,32
200.plis.3	399,12	449,46

## 6 Vyhodnocení zkoušek

### 6.1 Statistické vyhodnocení zkoušek přípoju

Prvním krokem vyhodnocení zkoušek přípoju sendvičových panelů je určení průměrných hodnot vycházejících z materiálových zkoušek ocelových plechů, tj. průměrná tloušťka jádra příslušného plechu  $t_{\text{obs,cor}}$ , mez kluzu  $f_{y,\text{obs}}$  a mez pevnosti  $f_{u,\text{obs}}$ . Tyto hodnoty jsou vždy určeny z naměřených hodnot pro danou trojici zkušebních těles a jsou uvedeny v Tab. 26.

Tloušťka jádra plechu  $t_{\text{cor}}$  je vypočítána jako:

$$t_{\text{cor}} = t_{\text{nom}} - t_{\text{zinc}} \quad (10)$$

kde:

$t_{\text{nom}}$  nominální tloušťka plechu udaná výrobcem

$t_{\text{zinc}}$  tloušťka pozinkování, uvažováno jednotně  $t_{\text{zinc}} = 0,04 \text{ mm}$  [12]

Tab. 26 Tloušťka a materiálové vlastnosti plechů příslušných sendvičových panelů

Označení vzorku	$t_{\text{cor}}$ [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$t_{\text{obs,cor},i}$ [mm]	$f_{y,\text{obs},i}$ [MPa]	$f_{u,\text{obs},i}$ [MPa]	$t_{\text{obs,cor}}$ [mm]	$f_{y,\text{obs}}$ [MPa]	$f_{u,\text{obs}}$ [MPa]
60.1	0,5	230	540	0,467	325,01	743,71	0,486	328,9	714,7
60.2				0,500	340,70	690,13			
60.3				0,490	321,00	710,16			
80.1	0,46	280	360	0,400	422,38	423,15	0,393	419,4	428,2
80.2				0,390	417,45	429,87			
80.3				0,390	418,24	431,50			
100.1	0,36	250	330	0,357	423,12	428,77	0,360	425,8	436,7
100.2				0,360	428,74	438,77			
100.3				0,363	425,63	442,51			
200.lin.1	0,46	280	360	0,460	403,15	407,45	0,460	398,8	406,0
200.lin.2				0,460	393,31	404,06			
200.lin.3				0,460	400,03	406,63			
200.plis.1	0,56	280	360	0,560	394,15	442,17	0,553	401,3	446,7
200.plis.2				0,550	410,69	448,32			
200.plis.3				0,550	399,12	449,46			

Vyhodnocení tuhosti a únosnosti přípoje je pro každou sadu smykových zkoušek (např. „100-0,75“, „200-lin-4“ apod. – celkem 10 sad zkoušek) provedeno následujícím způsobem, který vychází z obecného postupu dle ECCS [14].

Pro každý typ plechu je určen adjustační koeficient  $\mu_R$ :

$$\mu_R = \left( \frac{f_{u,\text{obs}}}{f_u} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{t_{\text{cor,obs}}}{t_{\text{cor}}} \right) \quad (11)$$

kde:

$f_{u,obs}$	naměřená mez pevnosti materiálu plechu
$f_u$	nominální mez pevnosti materiálu plechu
$t_{cor,obs}$	změřená tloušťka jádra plechu
$t_{cor}$	tloušťka jádra plechu
$\alpha$	= 1, pokud $f_{u,obs} > f_u$ (platí pro všechny zkoušky) = 0, pokud $f_{u,obs} \leq f_u$

Následně je tento koeficient aplikován na jednotlivé naměřené hodnoty maximálního zatížení ze zkoušek přípojů  $R_{obs,i}$  a výsledkem je adjustovaná hodnota mezního zatížení  $R_{adj,i}$ :

$$R_{adj,i} = \frac{R_{obs,i}}{\mu_R} \quad (12)$$

Z těchto hodnot adjustovaných maximálních sil je pro každou sadu (trojici) zkoušek přípojů vypočítána průměrná hodnota  $R_m$ .

Následující část výpočtu vychází z návrhu technické normy FprEN 1993-1-3:2022 (E) [27]. Aby bylo možné vyjádřit charakteristickou hodnotu únosnosti pro danou sadu zkoušek, je nejprve nutné každou adjustovanou hodnotu  $R_{adj,i}$  normalizovat, tj. vydělit průměrnou hodnotou adjustovaných hodnot maximálních sil  $R_m$ .

$$x_i = \frac{R_{adj,i}}{R_m} \quad (13)$$

kde:

$R_m$  aritmetický průměr adjustovaných hodnot maximální síly

Dále jsou zkoušky rozděleny dle charakteru porušení. V případě realizovaných zkoušek se jako logické jeví zkoušky rozdělit dle tloušťky plechu simulujícího podpůrnou konstrukci, tj. na skupinu 15 zkoušek s tloušťkou plechu 0,75 mm a 15 zkoušek s plechem tloušťky 4 mm. Proměnnými v rámci těchto skupin mohou být tloušťka porušeného plechu i pevnost materiálu. Pro každou z těchto dvou skupin je vyjádřena výběrová směrodatná odchylka  $s_x$  a také koeficient kvantilu charakteristické hodnoty  $k_n$ , který závisí pouze na počtu zkoušek (v obou skupinách 15 zkoušek) a je stanoven dle ČSN EN 1990 [28]. Hodnoty těchto veličin jsou použity k výpočtu charakteristické únosnosti přípoje  $R_k$ .

$$R_k = R_m \cdot (1 - k_n \cdot s_x) \quad (14)$$

kde:

$k_n$  koeficient kvantilu charakteristické hodnoty – hodnota pro počet zkoušek = 15, variační koeficient neznámý, pro obě skupiny  $k_n = 1,82$  [28]

$s_x$  výběrová směrodatná odchylka z normalizovaných hodnot  $x_i$  pro danou skupinu

Návrhová únosnost přípoje  $R_d$  se následně, již dle doporučení ECCS [14], vypočítá jako:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_{M2}} \quad (15)$$

kde:

$R_k$  charakteristická hodnota únosnosti přípoje, viz (14)

$\gamma_{M2}$  materiálový součinitel spolehlivosti,  $\gamma_{M2} = 1,25$ , dle ČSN EN 1993-1-3 [17]

Z vypočítané hodnoty návrhové únosnosti přípoje lze určit jeho smykovou poddajnost  $c_h$ :

$$c_h = \frac{1}{R_d/\gamma_1} \cdot \frac{\sum a_h}{n} \quad (16)$$

kde:

$R_d$  návrhová hodnota únosnosti přípoje

$\gamma_1$  dílčí součinitel, pro zkoušky s jedním přípojem uvažováno  $\gamma_1 = 1,5$ , dle ECCS [12]

$a_h$  posun odpovídající síle  $R_d/\gamma_1$

$n$  počet zkoušek (pro všechny sady zkoušek  $n = 3$ )

Posledním krokem je výpočet smykové tuhosti přípoje  $k_v$  z již známé hodnoty poddajnosti:

$$k_v = \frac{1}{c_h} \quad (17)$$

Výpočet únosnosti přípoju pro jednotlivé sady zkoušek je uveden v Tab. 27 a Tab. 28 a následné dopočítání tuhosti v Tab. 29.

Tab. 27 Výpočet únosnosti přípojů na základě provedených zkoušek – 1. část

Sada zkoušek	$t_{cor}$ [mm]	$f_u$ [MPa]	$t_{cor,obs}$ [mm]	$f_{u,obs}$ [MPa]	$\mu_R$ [-]	$R_{obs,1}$ [kN]	$R_{obs,2}$ [kN]	$R_{obs,3}$ [kN]
60-0,75	0,5	540	0,486	714,67	1,285	2,316	1,788	1,580
60-4	0,5	540	0,486	714,67	1,285	2,792	2,492	2,688
80-0,75	0,46	360	0,393	428,17	1,017	1,448	1,148	1,288
80-4	0,46	360	0,393	428,17	1,017	1,288	1,180	1,312
100-0,75	0,36	330	0,360	436,68	1,323	1,252	0,896	0,716
100-4	0,36	330	0,360	436,68	1,323	1,628	0,904	1,032
200-lin-0,75	0,46	360	0,460	406,05	1,128	1,244	1,192	1,444
200-lin-4	0,46	360	0,460	406,05	1,128	1,600	1,640	1,756
200-plis-0,75	0,56	360	0,553	446,65	1,226	1,588	1,116	1,708
200-plis-4	0,56	360	0,553	446,65	1,226	2,412	2,576	2,492

Tab. 28 Výpočet únosnosti přípojů na základě provedených zkoušek - 2. část

$R_{adj,1}$ [kN]	$R_{adj,2}$ [kN]	$R_{adj,3}$ [kN]	$x_1$ [-]	$x_2$ [-]	$x_3$ [-]	$R_m$ [kN]	$s$ [-]	$R_k$ [kN]	$R_d$ [kN]
1,802	1,391	1,229	1,222	0,944	0,834	1,474	0,1652	1,031	0,825
2,172	1,939	2,091	1,051	0,938	1,012	2,068	0,1285	1,584	1,267
1,424	1,129	1,266	1,118	0,887	0,995	1,273	0,1652	0,890	0,712
1,266	1,160	1,290	1,022	0,937	1,041	1,239	0,1285	0,949	0,759
0,946	0,677	0,541	1,311	0,939	0,750	0,721	0,1652	0,505	0,404
1,230	0,683	0,780	1,370	0,761	0,869	0,898	0,1285	0,688	0,550
1,103	1,057	1,280	0,962	0,922	1,116	1,147	0,1652	0,802	0,642
1,419	1,454	1,557	0,961	0,985	1,054	1,476	0,1285	1,131	0,905
1,295	0,910	1,393	1,080	0,759	1,161	1,200	0,1652	0,839	0,671
1,967	2,101	2,033	0,967	1,033	0,999	2,034	0,1285	1,558	1,246

Tab. 29 Výpočet tuhosti přípojů na základě provedených zkoušek

Sada zkoušek	$R_d$ [kN]	$R/\gamma_1$ [kN]	$a_{h,1}$ [mm]	$a_{h,2}$ [mm]	$a_{h,3}$ [mm]	$\Sigma a_h/n$ [mm]	$c_h$ [mm/kN]	$k_v$ [kN/mm]
60-0,75	0,825	0,550	0,08	0,332	0,42	0,277	0,504	1,983
60-4	1,267	0,845	0,688	0,388	0,248	0,441	0,522	1,914
80-0,75	0,712	0,475	0,284	0,576	0,52	0,460	0,969	1,032
80-4	0,759	0,506	0,184	0,528	0,604	0,439	0,867	1,154
100-0,75	0,404	0,269	0,068	0,036	0,388	0,164	0,609	1,641
100-4	0,550	0,367	0,516	0,688	0,06	0,421	1,149	0,871
200-lin-0,75	0,642	0,428	0,176	0,356	0,044	0,192	0,449	2,227
200-lin-4	0,905	0,603	1,30	0,16	0,148	0,536	0,889	1,125
200-plis-0,75	0,671	0,447	0,78	0,60	0,484	0,621	1,389	0,720
200-plis-4	1,246	0,831	0,692	0,56	0,376	0,543	0,653	1,531

## 6.2 Analyticky stanovené hodnoty tuhosti a únosnosti přípojů

Dosazením do rovnic (1) až (8) jsou doporučeným analytickým postupem vypočítány hodnoty tuhosti a únosnosti zkoušených přípojů. Veškeré vypočítané hodnoty včetně mezivýsledků jsou uvedeny v Tab. 30.

Tab. 30 Analytické stanovení tuhosti a únosnosti zkoušených přípojů

Sada zkoušek	$t_{\text{cor},F2}$ [mm]	$t_{F2}$ [mm]	$t_{\text{cor},\text{sup}}$ [mm]	$d_1$ [mm]	$d_s$ [mm]	$f_{u,F2}$ [MPa]	$D$ [mm]	$k_{F2}$ [N/mm]	$C_{\text{sup}}$ [Nmm/rad]	$EI$ [Nmm <sup>2</sup> ]	$x_F$ [-]	$k_v$ [kN/mm]	$V_{Rk}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]
60-0,75	0,5	0,5	0,75	4,1	4,45	540	60	4059,10	70745,9	3849816	1,0010	4,028	1,624	1,299
60-4	0,5	0,5	4	4,1	4,45	540	60	4059,10	163380,7	3849816	1,0121	3,770	1,624	1,299
80-0,75	0,46	0,5	0,75	4,1	4,45	360	80	2387,92	70745,9	3849816	1,0000	2,377	0,955	0,764
80-4	0,46	0,5	4	4,1	4,45	360	80	2387,92	163380,7	3849816	1,0069	2,274	0,955	0,764
100-0,75	0,36	0,4	0,75	4,1	4,45	330	100	1724,51	70745,9	3849816	0,9998	1,719	0,606	0,485
100-4	0,36	0,4	4	4,1	4,45	330	100	1724,51	163380,7	3849816	1,0045	1,661	0,606	0,485
200-lin-0,75	0,46	0,5	0,75	4,1	5,1	360	200	2387,92	70745,9	6641721	1,0007	2,379	0,955	0,764
200-lin-4	0,46	0,5	4	4,1	5,1	360	200	2387,92	163380,7	6641721	1,0032	2,288	0,955	0,764
200-plis-0,75	0,56	0,6	0,75	4,1	5,1	360	200	2860,74	70745,9	6641721	1,0007	2,849	1,283	1,026
200-plis-4	0,56	0,6	4	4,1	5,1	360	200	2860,74	163380,7	6641721	1,0033	2,722	1,283	1,026

**Poznámka:** Pro zkoušky přípojů panelu tloušťky 200 mm byly použity jiné samovrtné samořezné šrouby než v případě ostatních panelů, proto se v Tab. 30 vyskytují dvě různé kombinace rozměrů  $d_1$  a  $d_s$ . Jmenovitý průměr obou typů spojovacích prvků (šroubů od firmy Hilti použitých pro panely tl. 60, 80 a 100 mm i šroubů od výrobce SFS Intec použitých pro panely tl. 200 mm) je  $d = 5,5$  mm. Průměr dřívku  $d_s$  bylo nutné změřit a z této hodnoty je dle EASIE [16] možné stanovit nejmenší průměr v místě závitu  $d_1$  jako:

$$d_1 = 0,9 \cdot d_s \quad (18)$$

Nejmenší průměr šroubu v místě závitu  $d_1$  byl rovněž změřen a naměřeno bylo  $d_1 = 4,1$  mm pro oba typy šroubů. Tato hodnota odpovídá reálnému rozměru použitých šroubů, a proto byla i pro oba případy aplikována do výpočtu. Navíc v případě šroubů SFS Intec je dosažením do vztahu (18) získána větší než skutečná hodnota tohoto rozměru ( $d_1 = 0,9 \cdot 5,1$  mm = 4,59 mm). Pro tento typ šroubu se tak jeví použití vzorce (18) jako mírně nebezpečné.

### 6.3 Porovnání naměřených a analyticky stanovených hodnot

V této kapitole jsou porovnána výsledná data získaná z provedených zkoušek a následného statistického vyhodnocení s výsledky získanými pomocí analytických postupů dle ECCS [12]. Na základě přímého porovnání je možné ověřit bezpečnost a přesnost těchto analytických vztahů. Porovnání experimentálně zjištěných ( $k_{v,Exp}$ ,  $V_{Rd,Exp}$ ) a analyticky stanovených ( $k_{v,ECCS}$ ,  $V_{Rd,ECCS}$ ) hodnot tuhosti a únosnosti je znázorněno v Tab. 31.

Tab. 31 Porovnání experimentálně získaných a analyticky vypočítaných hodnot tuhosti a únosnosti přípojů

Sada zkoušek	Tuhost přípoje $k_v$ [kN/mm]			Smyková únosnost přípoje $V_{Rd}$ [kN]		
	$k_{v,Exp}$	$k_{v,ECCS}$	$k_{v,ECCS}/k_{v,Exp}$	$V_{Rd,Exp}$	$V_{Rd,ECCS}$	$V_{Rd,ECCS}/V_{Rd,Exp}$
60-0,75	1,983	4,028	2,032	0,825	1,299	1,575
60-4	1,914	3,770	1,970	1,267	1,299	1,025
80-0,75	1,032	2,377	2,303	0,712	0,764	1,073
80-4	1,154	2,274	1,970	0,759	0,764	1,006
100-0,75	1,641	1,719	1,047	0,404	0,485	1,202
100-4	0,871	1,661	1,908	0,550	0,485	0,881
200-lin-0,75	2,227	2,379	1,068	0,642	0,764	1,191
200-lin-4	1,125	2,288	2,033	0,905	0,764	0,844
200-plis-0,75	0,720	2,849	3,956	0,671	1,026	1,529
200-plis-4	1,531	2,722	1,778	1,246	1,026	0,823

Při zaměření na tuhosti přípojů  $k_v$  lze vyčíst, že všechny hodnoty získané analytickým výpočtem jsou vyšší než vyhodnocené výsledky ze zkoušek. Tato skutečnost je jasně patrná z poměru  $k_{v,ECCS}/k_{v,Exp}$ , kde hodnota větší než 1 značí nadhodnocené výsledky analytických postupů, a tedy nebezpečnou predikci tuhosti. Téměř ve shodě jsou pouze hodnoty tuhosti ze zkoušek 100-0,75



a 200-lin-0,75, kde jsou hodnoty získané analytickým postupem vyšší pouze o jednotky procent. Většina zkoušek ale vykazuje značně výraznější rozdíl, který se v několika případech pohyboval okolo 100% i více. Tyto skutečnosti pravděpodobně svědčí o nepřesnosti analytického postupu, jehož výsledky jsou nadhodnocené, a tedy nebezpečné.

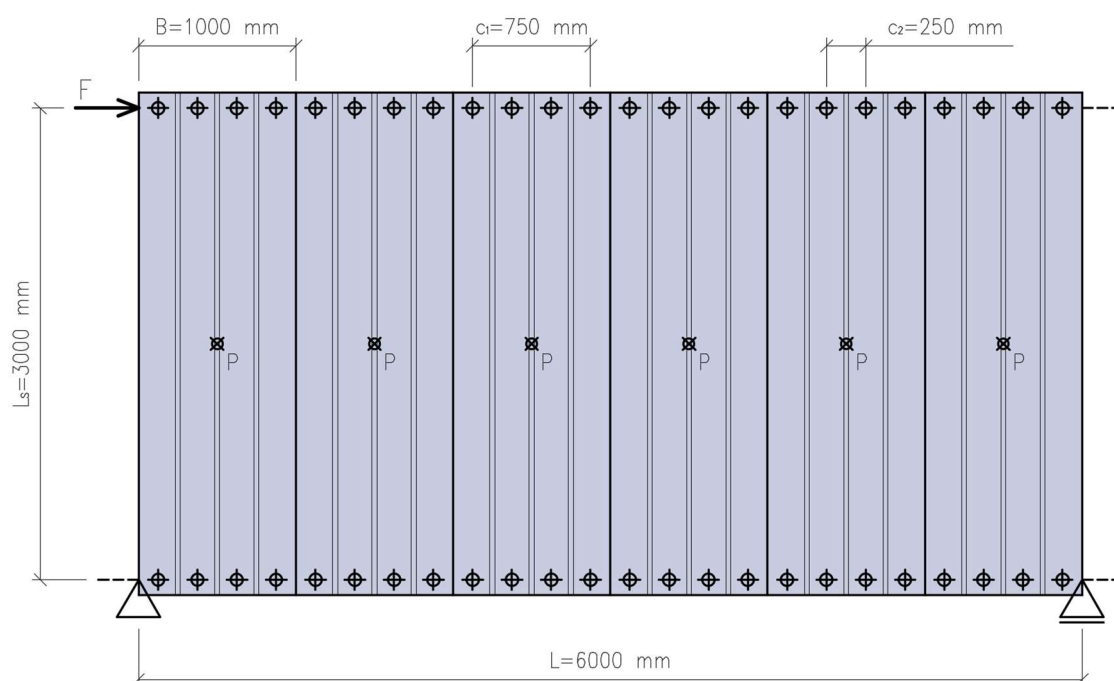
V případě smykové únosnosti  $V_{Rd}$  lze pozorovat obecně menší procentuální rozdíly mezi porovnávanými hodnotami. Na rozdíl od smykové tuhosti figurují mezi poměry analyticky stanovených a experimentálně zjištěných hodnot smykové únosnosti i hodnoty menší než 1. Výsledek těchto porovnání značí konzervativní analyticky stanovené hodnoty. Tento případ nastává celkem třikrát a je patrné, že se pokaždé jednalo o zkoušku s plechem reprezentujícím podpůrnou konstrukci tloušťky 4 mm. Pro dvě z pěti sad zkoušek, kde byl použit plech tloušťky 4 mm, je analyticky stanovená hodnota smykové únosnosti vyšší než hodnota získaná z experimentu, ale pouze o 0,6 a 2,5 %, tudíž v těchto případech lze hovořit téměř o shodě. Naproti tomu, v případě zkoušek s použitím tenkého plechu (tloušťky 0,75 mm) jsou všechny analyticky stanovené hodnoty vyšší než experimentálně zjištěné, a to v rozmezí 7 % až téměř 57 %. Obecně lze usoudit, že analytický postup pro stanovení smykové únosnosti je konzervativní a téměř odpovídá skutečným hodnotám, pouze pokud je sendvičový panel připojen na masivnější podpůrnou konstrukci.

Analytický postup pro výpočet únosnosti nezohledňuje tloušťku podpůrné konstrukce. Tento fakt se při porovnání výsledků analytického postupu a dat získaných z provedených zkoušek jeví jako nedostatek. Pokud jsou vzájemně porovnány sady zkoušek přípojů stejného typu sendvičového panelu i interiérového plechu, avšak za použití dvou různých tlouštěk plechu reprezentujícího podpůrnou konstrukci, je evidentní, že smyková únosnost je při použití tenkého plechu (zde tloušťky 0,75 mm) vždy nižší. Analytický postup výpočtu smykové únosnosti by tedy potenciálně mohl být zpřesněn například stanovením minimálního poměru tloušťky podpůrné konstrukce a vnitřního plechu, pro který by se vztah pro výpočet únosnosti nezměnil. Pokud by se ale jednalo o poměr nižší (tj. tloušťka podpůrné konstrukce se blíží tloušťce vnitřního plechu), nabízelo by se získanou únosnost snížit o určitý koeficient zohledňující tuto skutečnost. Analyticky stanovené hodnoty by se tak přiblížily hodnotám naměřeným, čímž by mohlo být docíleno vyšší přesnosti a bezpečnosti analytického postupu.

## 7 Aplikace naměřených hodnot ve výpočtu

Následující výpočet demonstruje možné využití smykové tuhosti soustavy sendvičových panelů. Ve výpočtu budou použity experimentálně zjištěné hodnoty tuhosti a únosnosti přípoje. Úkolem je stanovit maximální hodnotu síly  $F$  působící v příčném směru na soustavu šesti sendvičových panelů, a to z hlediska MSÚ i MSP. Geometrie soustavy je zobrazena na Obr. 49. Pro aplikaci ve výpočtu byly vybrány hodnoty, které odpovídají sadě zkoušek přípojů 80-4, tedy parametry sendvičového panelu tloušťky 80 mm a tuhost a únosnost získaná z této sady zkoušek (viz Tab. 27, Tab. 28 a Tab. 29). Tyto a další doplňující vstupní parametry jsou:

- nominální průměr spojovacího prvku  $d_s = 5,5 \text{ mm}$
- nominální tloušťka vnitřního plechu  $t_{F2} = 0,5 \text{ mm}$
- materiál vnitřního plechu ocel třídy S280GD+Z
- mez pevnosti vnitřního plechu  $f_{u,F2} = 360 \text{ MPa}$
- tloušťka podpůrné konstrukce  $t_{\text{cor,sup}} = t_{\text{sup}} = 4 \text{ mm}$
- tuhost přípoje  $k_v = 1,154 \text{ kN/mm}$
- návrhová únosnost přípoje  $V_{Rd} = 0,759 \text{ kN}$



Obr. 49 Schéma soustavy sendvičových panelů

Postup výpočtu a uvedené vzorce vychází z publikace ECCS [12].

V prvním kroku je nutno dle následujícího vztahu stanovit smykovou tuhost  $S$  celé soustavy.

$$S = \frac{k_v}{2 \cdot L_s} \cdot n \cdot m \cdot \sum_{k=1}^{n_k} c_k^2 \quad (19)$$

kde:

$k_v$	tuhost přípoje
$L_s$	délka sendvičového panelu
$n$	počet sendvičových panelů
$m$	počet stabilizovaných prvků
$c_k$	vzdálenost mezi dvěma přípojemi v rámci jednoho páru

Po dosažení:

$$S = \frac{1,154}{2 \cdot 3000} \cdot 6 \cdot 2 \cdot (750^2 + 250^2) = 1442,5 \text{ kN}$$

Smyková tuhost jednoho panelu se vyjádří zjednodušeně pomocí smykové tuhosti celé soustavy:

$$S_i = \frac{S}{n} = \frac{1442,5}{6} = 240,42 \text{ kN}$$

## 7.1 Mezní stav únosnosti

Pro určení sil ve spojovacích prostředcích při působení síly  $F$  je nutno vyjádřit ohybový moment působící na jeden sendvičový panel. Ten je vyjádřen dle vztahu (20), kde vnější síla  $F$  vystupuje jako proměnná.

$$M_{S,\max} = \frac{F \cdot L_s}{n} \quad (20)$$

Tento vztah je použit pro výpočet maximální vnitřní smykové síly v podélném směru (vzhledem k sendvičovému panelu)  $V_{S,\max}^M$ :

$$V_{S,\max}^M = \frac{F \cdot L_s}{\sum \frac{c_k^2}{c_1}} \quad (21)$$

kde:

$c_1$	vzdálenost v rámci páru nejvzdálenějších přípojí na panelu
-------	--

Maximální smyková síla v příčném směru (složka vyvolaná posouvající silou) na spojovací prostředek se stanoví dle zjednodušeného vztahu (22).

$$V_{S,\max}^Q = \frac{F}{n \cdot n_f} \quad (22)$$

kde:

$n_f$  počet spojovacích prostředků na panel a podporu

Výsledná síla v nejvíce namáhaném přípoji se stanoví jako výslednice obou dílčích smykových sil:

$$V_{S,\max} = \sqrt{(V_{S,\max}^M)^2 + (V_{S,\max}^Q)^2} \quad (23)$$

$$V_{S,\max} = \sqrt{\left(\frac{\frac{F \cdot L_s}{n}}{\sum \frac{c_k^2}{c_1}}\right)^2 + \left(\frac{F}{n \cdot n_f}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\frac{F \cdot L_s}{n}}{\frac{c_1^2}{c_1} + \frac{c_2^2}{c_1}}\right)^2 + \left(\frac{F}{n \cdot n_f}\right)^2} \quad (24)$$

Dle principu navrhování podle mezních stavů má být únosnost větší nebo rovna namáhání, z této nerovnice tak lze vyjádřit maximální hodnotu zatěžovací síly  $F_{\max,MSÚ}$ . Tato síla je následně vyjádřena z rovnice, kde vystupuje jako jediná neznámá.

$$V_{Rd} \geq \sqrt{\left(\frac{\frac{F_{\max,MSÚ} \cdot L_s}{n}}{\frac{c_1^2}{c_1} + \frac{c_2^2}{c_1}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\max,MSÚ}}{n \cdot n_f}\right)^2} \quad (25)$$

$$0,759 = \sqrt{\left(\frac{\frac{F_{\max,MSÚ} \cdot 3000}{6}}{\frac{750^2}{750} + \frac{250^2}{750}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\max,MSÚ}}{6 \cdot 4}\right)^2}$$

$$F_{\max,MSÚ} = 1,262 \text{ kN}$$

Z hlediska mezního stavu únosnosti je maximální možná hodnota působící síly  $F_{\max,MSÚ} = 1,262 \text{ kN}$ .

## 7.2 Mezní stav použitelnosti

Pro vyjádření maximální hodnoty zatěžovací síly z hlediska mezního stavu použitelnosti  $F_{\max,MSP}$  bude použit vztah pro stanovení maximálního úhlu pootočení mezi sendvičovým

panelem a stabilizovaným prvkem  $\gamma_{\max}$ . Tento úhel bude dán do rovnovážčchy s limitním pootočením 1/750. Vztah (26) vychází ze skutečnosti, že smyková tuhost celé soustavy reprezentuje sílu působící proti pootočení v důsledku smykového namáhání o 1 rad.

$$S = \frac{F}{\gamma} \quad (26)$$

Z této rovnice již lze vyjádřit maximální úhel pootočení  $\gamma_{\max}$  a následně maximální působící sílu z hlediska MSP:

$$\gamma_{\max} = \frac{F_{\max, \text{MSP}}}{S} \quad (27)$$

$$F_{\max, \text{MSP}} = \gamma_{\max} \cdot S = \frac{1}{750} \cdot S \quad (28)$$

$$F_{\max, \text{MSP}} = \frac{1}{750} \cdot S = \frac{1}{750} \cdot 1442,5 = 1,923 \text{ kN}$$

Z hlediska mezního stavu použitelnosti je maximální možná hodnota působící síly  $F_{\max, \text{MSP}} = 1,923 \text{ kN}$ . Je tedy patrné, že rozhodujícím mezním stavem je MSÚ. Maximální možná působící síla je tedy limitována MSÚ a odpovídá hodnotě  $F_{\max} = 1,262 \text{ kN}$ .

Jako doplňující informace je stanovena horizontální deformace soustavy při působení maximální možné síly  $F_{\max}$ . Z definice smykové tuhosti (26) a zároveň ze skutečnosti, že pro velmi malé úhly platí  $\text{tg} \alpha \approx \alpha$ , lze vyjádřit:

$$\gamma = \frac{F}{S} = \frac{u}{L_s} \quad (29)$$

$$u_{F_{\max}} = \frac{F_{\max} \cdot L_s}{S} \quad (30)$$

$$u_{F_{\max}} = \frac{1,262 \cdot 3000}{1442,5} = 2,62 \text{ mm}$$

Při působení maximální možné síly  $F_{\max}$  je horizontální deformace soustavy  $u_{F_{\max}} = 2,62 \text{ mm}$ .

Z uvedeného příkladu je patrné, že soustava sendvičových panelů vyobrazená na Obr. 49 je schopna přenést zatěžovací sílu o hodnotě 1,262 kN, bez nutnosti dalšího ztužení hlavní nosné ocelové konstrukce.

## Závěr

V rámci bakalářské práce byly představeny doporučené analytické postupy k výpočtu smykové tuhosti a únosnosti přípojů sendvičových panelů. Následně byly naplánovány a provedeny zkoušky těchto přípojů za účelem ověření přesnosti a bezpečnosti analytických postupů. Celkem bylo provedeno 30 zkoušek přípojů, a to vždy po trojicích zkoušek disponujících stejnými parametry. Mezi řešené proměnné patřily tloušťka panelu, tloušťka vnitřního plechu panelu a tloušťka podpůrné konstrukce. Dohromady bylo tedy statisticky vyhodnoceno 10 sad zkoušek, pro které byla zjištěna smyková tuhost a únosnost přípoje. Dále byly provedeny materiálové zkoušky v tahu za účelem zjištění materiálových charakteristik vnitřních plechů z jednotlivých panelů. Celkem bylo provedeno 15 materiálových zkoušek. Výsledky byly využity ke statistickému vyhodnocení tuhosti a únosnosti řešených přípojů. Výsledné hodnoty byly následně porovnány s predikcí dle analytických postupů.

Na základě porovnání experimentálně zjištěných a analyticky vypočítaných hodnot lze obecně říci, že analytické postupy k výpočtům tuhosti a únosnosti přípojů jsou nadhodnocené, a tedy nebezpečné. Tato skutečnost se obecně jeví jako problém a vzniká tak podnět k určitému zpřesnění příslušných vztahů, včetně zohlednění tloušťky podpůrné konstrukce pro výpočet únosnosti přípoje – v současné době tento faktor ve výpočtu zahrnut není, z výsledků zkoušek se však jeví jako evidentní, že tato proměnná má na únosnost vliv. Právě výpočet smykové únosnosti přípoje analytickým způsobem jako jediný vykazoval v několika případech konzervativní hodnoty, a to při použití masivnější podpůrné konstrukce. Na základě provedených zkoušek lze usoudit, že použití subtilnější podpůrné konstrukce má za následek snížení únosnosti přípoje. Tento fakt ale kvůli absenci tloušťky podpůrné konstrukce v analytickém vztahu není zohledněn a únosnost tedy zůstává pro všechny tloušťky neměnná. Z tohoto důvodu by bylo zahrnutí vlivu tloušťky podpůrné konstrukce do analytických postupů relevantní.

Jednou z možných příčin této nepřesnosti analytického postupu může být skutečnost, že uvedené vzorce vychází z hodnot získaných ze zkoušek, při kterých bylo použito schéma zkoušky nezahrnující vliv mocnosti sendvičového panelu. Z tohoto důvodu bylo schéma realizovaných zkoušek mírně pozměněno, aby bylo docíleno co možná nejrelevantnějších (avšak méně příznivých) výsledků.

Obecně by bylo žádoucí, aby výsledky z analytických postupů byly vždy mírně konzervativní a na straně bezpečné. Hlavním důvodem je skutečnost, že při výpočtu ztuzujícího efektu obvodového pláště nejsou ve většině případů k dispozici výsledky zkoušek a dosazené pevnostní parametry přípojů jsou právě vypočítané hodnoty z analytických postupů. Pokud bude vstupní

---

tuhost a únosnost přípojů nadhodnocená, bude nadhodnoceno i maximální vypočítané zatížení, které daný obvodový plášť přenesse bez nutnosti dalšího ztužení.

Z této práce vychází i řada dílčích poznatků. Například se ukázalo jako rozumné uvažovat kritérium pro určení maximální síly ze zkoušky pouze maximální dosažené zatížení pro posun do 3 mm a nebrat ohled na dílčí poklesy křivky v tomto intervalu. Tyto hodnoty by evidentně byly příliš konzervativní a zbytečně vytvářely nekonzistentní výsledky. Dalším poznatkem je jistá nepřesnost vzorce pro výpočet nejmenšího průměru spojovacího prvku v místě závitu. Není-li tento údaj znám od výrobce, a zároveň není možné tuto vzdálenost změřit, je nutné ji stanovit výpočtem. Ten by však měl být rovněž nastaven konzervativně. Pro jeden ze dvou použitých typů šroubů byla ale změřená vzdálenost výrazně nižší a jako přesnější se ukázalo obecně uvažovat pro šrouby průměru 5,5 mm nejmenší průměr v místě závitu roven 4,1 mm.

Tato práce podněcuje řadu rozšíření, a to zejména ve smyslu provedení dalších zkoušek a rozšíření vyhodnocovaných trojic zkoušek např. na pětice, a to z důvodu zvýšení přesnosti statistického vyhodnocení. Dále by bylo velmi příhodné obdobným způsobem zkoumat smykovou tuhost a plášťové chování dalšího hojně používaného konstrukčního řešení obvodových plášťů, a to trapézových plechů.

## Použité zdroje

- [1] Panel Selector | KINGSPAN. *Panel Selector | KINGSPAN* [online]. Copyright © Kingspan Group [cit. 27.02.2023]. Dostupné z: <https://www.kingspanpanel.info/>
- [2] KS 1000 RW – Quadcore®. 302 *Found* [online]. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/cz/cs/produkty/izolacni-sendvicove-panely/stresni-izolacni-panely/ks1000-rw-quadcore/>
- [3] KS 1000/1150 NF – IPN. 302 *Found* [online]. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/cz/cs/produkty/izolacni-sendvicove-panely/stenove-izolacni-panely/ks1000-1150-nf/>
- [4] ČSN EN 14509 ed. 2. *Samonosné izolační sendvičové panely s povrchovými plechy – Průmyslově vyráběné výrobky – Specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 150 s. Třídící znak 74 7725.
- [5] Novopanel Roof Sandwich Panels Abidjan Côte d'Ivoire. *Novopanel panneaux sandwich | Abidjan Côte d'Ivoire* [online]. Copyright © 2023. all rights reserved. Site by MIP [cit. 01.03.2023]. Dostupné z: <https://www.novopanel.com/product/2/InsulatedPanels/Roof-Sandwich-Panels>
- [6] H-WALL 8P. *Metecno Bausysteme GmbH – Pioneer of Sandwich Construction* [online]. Copyright © [cit. 01.03.2023]. Dostupné z: <https://en.metecno.de/products/h-wall-8p.html>
- [7] 1. *Kingspan – Úvod* [online]. Copyright © Kingspan group [cit. 01.03.2023]. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/content/dam/kingspan/kip-ceer/documents/czech-republic/kingspan-uvod-01-cz.pdf>
- [8] Sendvičové panely – Kovové profily – Váš partner pro opláštění budov. *Kovové profily, spol. s r. o. - trapézové plechy* [online]. Dostupné z: <https://kovprof.cz/hlavni-stranka/sendvicove-panely/>
- [9] 4. *Kingspan – Tabulky únosnosti* [online]. Copyright © Kingspan group [cit. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/content/dam/kingspan/kip-ceer/documents/czech-republic/kingspan-tabulky-unosnosti-04-cz.pdf>
- [10] Stěnový sendvičový panel PIR Plus stěnový (polyuretan) skryté kotvení. *Balex Metal – płyty warstwowe, pokrycia dachowe, termoizolacja, rynny* [online]. Copyright © Copyright [cit. 05.03.2023]. Dostupné z: <https://balex.eu/cz/produkty/sendvicove-panely/stenovy-sendvicovy-panel-pir-plus-stenovy-polyuretan-skryte-kotveni>



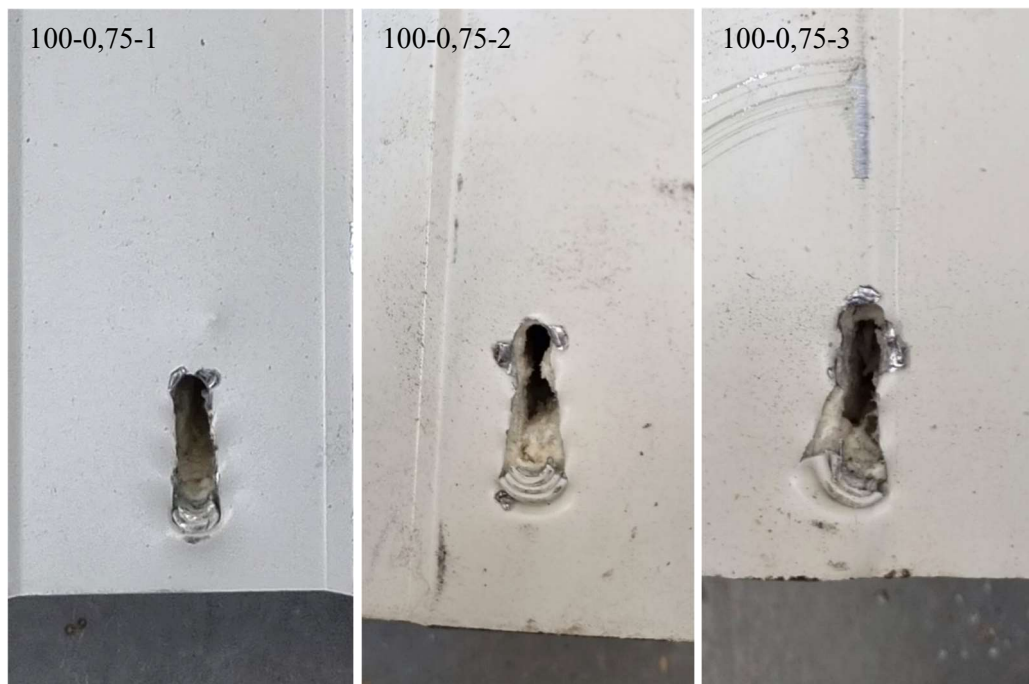
- [11] Střešní sendvičový panel PIR Alu (polyuretan). *Balex Metal – płyty warstwowe, pokrycia dachowe, termoizolacja, rynny* [online]. Copyright © Copyright [cit. 05.03.2023]. Dostupné z: <https://balex.eu/cz/produkty/sendvicove-panely/stresni-sendvicovy-panel-pir-alu-polyuretan>
- [12] *European recommendations on the stabilization of steel structures by sandwich panels: [technical working group 7.9, sandwich panels and related structures, CIB working commission WO56, sandwich panels]*. [Brussels]: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2014. ISBN 978-92-9147-118-8.
- [13] *Preliminary European recommendations for the testing and design of fastenings for sandwich panels*. Brussels: ECCS, 2009.
- [14] *The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections*. Brussels: ECCS, 2009.
- [15] Käßplein, S. a Misiak, T. (2011). *EASIE – Calculation example – Design of frameless structures made of sandwich panels*.
- [16] Käßplein, S. a Misiak, T. (2011). *Connections of sandwich panels, EASIE report D3.3 – part 3*.
- [17] ČSN EN 1993-1-3. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla – Doplňující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované profily a plošné profily*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008, 118 s. Třídící znak 73 1401.
- [18] [artisanng.com. artisanng.com](https://www.artisanng.com/info/MTS_Qtest_Datasheet.pdf) [online]. [cit. 09.04.2023]. Dostupné z: [https://www.artisanng.com/info/MTS\\_Qtest\\_Datasheet.pdf](https://www.artisanng.com/info/MTS_Qtest_Datasheet.pdf)
- [19] *Test Systems – Máquinas y equipos para el ensayo de materiales y componentes* [online]. Copyright © [cit. 19.04.2023]. Dostupné z: <https://test-systems.es/wp-content/uploads/2016/10/Modelo-Extensometro-laser-Epsilon.pdf>
- [20] *METU | Aerospace Engineering* [online]. Copyright © [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <http://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/Day2/spider8.pdf>
- [21] EIR LE Model Laser Extensometer : Quote, RFQ, Price and Buy. *Material Science | News | Materials Engineering | News* [online]. Copyright © 2000 [cit. 22.04.2023]. Dostupné z: <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=108>
- [22] Panel MINERAL R01 - BUILDING Holding, a.s.. *Komplexní dodávky technologických celků – BUILDING Holding, a.s.* [online]. Copyright © BUILDING Holding a.s. [cit. 23.04.2023]. Dostupné z: <https://buildingholding.cz/panel-r01>

- [23] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 76 s. Třídící znak 42 0310.
- [24] *Epsilon Tech Home – Epsilon Tech* [online]. Copyright © [cit. 30.04.2023]. Dostupné z: <https://www.epsilontech.com/wp-content/uploads/product-specs/3542.pdf>
- [25] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006, 96 s. Třídící znak 73 1401.
- [26] Hill, H. N. *Determination of stress-strain relations from the offset yield strength values*, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No. 927, Washington, United States of America, 1944.
- [27] FprEN 1993-1-3:2022 (E). *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: Cold-formed members and sheeting*.
- [28] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004, 76 s. Třídící znak 73 0002.

## Příloha A

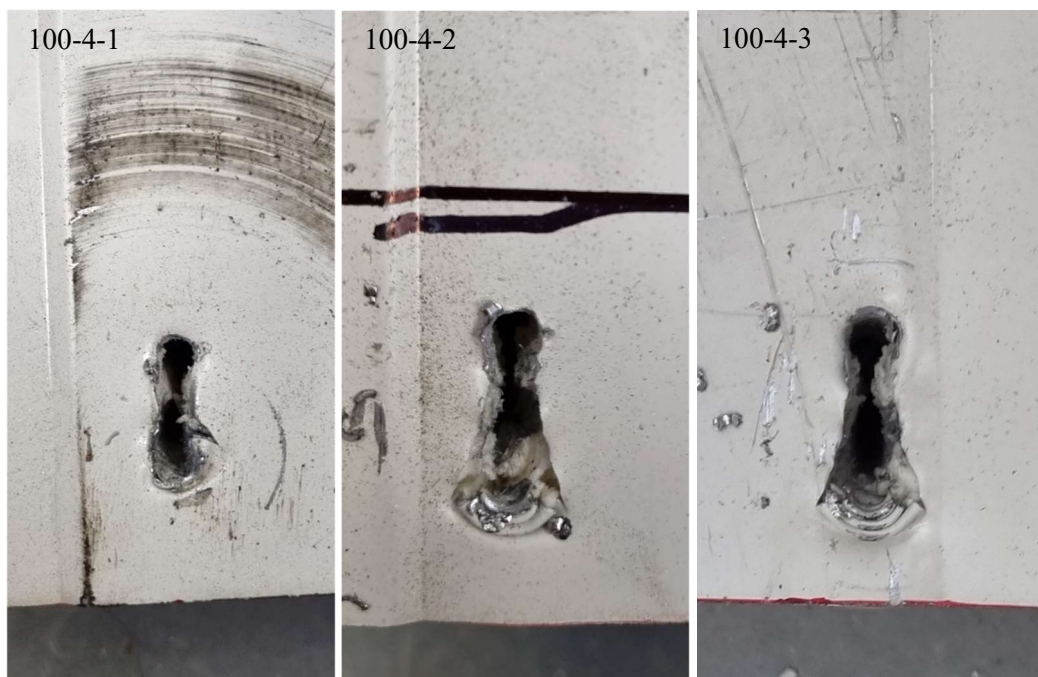
Tato příloha obsahuje fotodokumentaci ke zkouškám přípojů sendvičových panelů. Pro každou zkoušku je zobrazen rozhodující způsob porušení přípoje, případně jiné zásadní okolnosti.

### Zkoušky 100-0,75



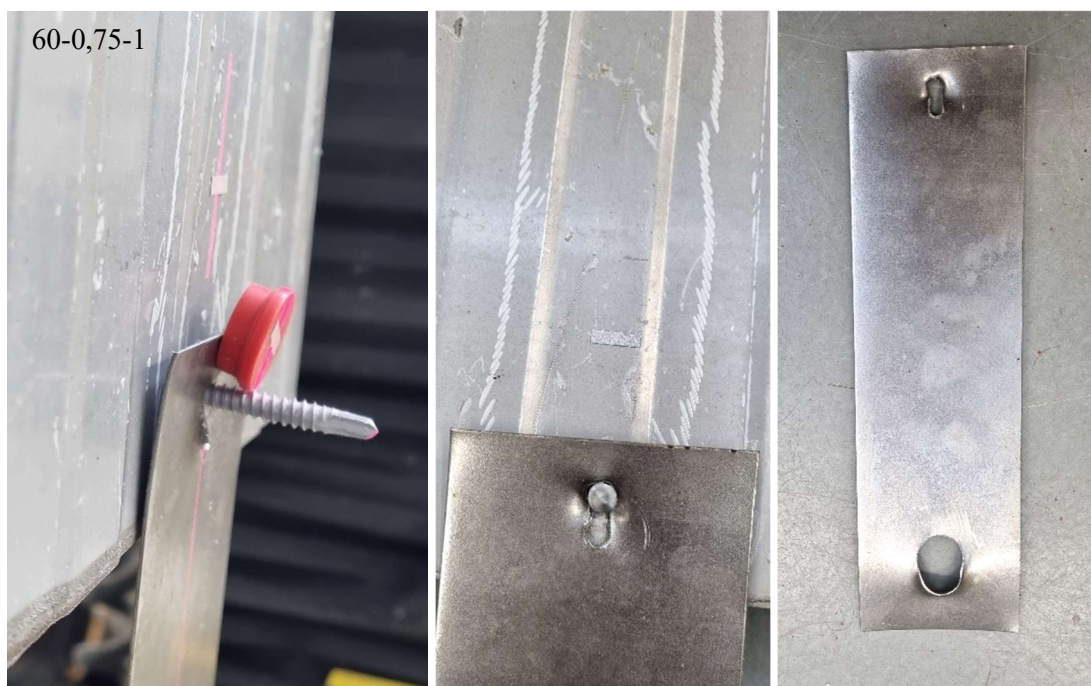
Obr. 50 Porušení panelu – zkoušky 100-0,75

### Zkoušky 100-4



Obr. 51 Porušení panelu – zkoušky 100-4

## Zkoušky 60-0,75



*Obr. 52 Zkouška 60-0,75-1 – pootočení magnetu (důvod zkreslených výsledků), otláčení připojeného plechu*



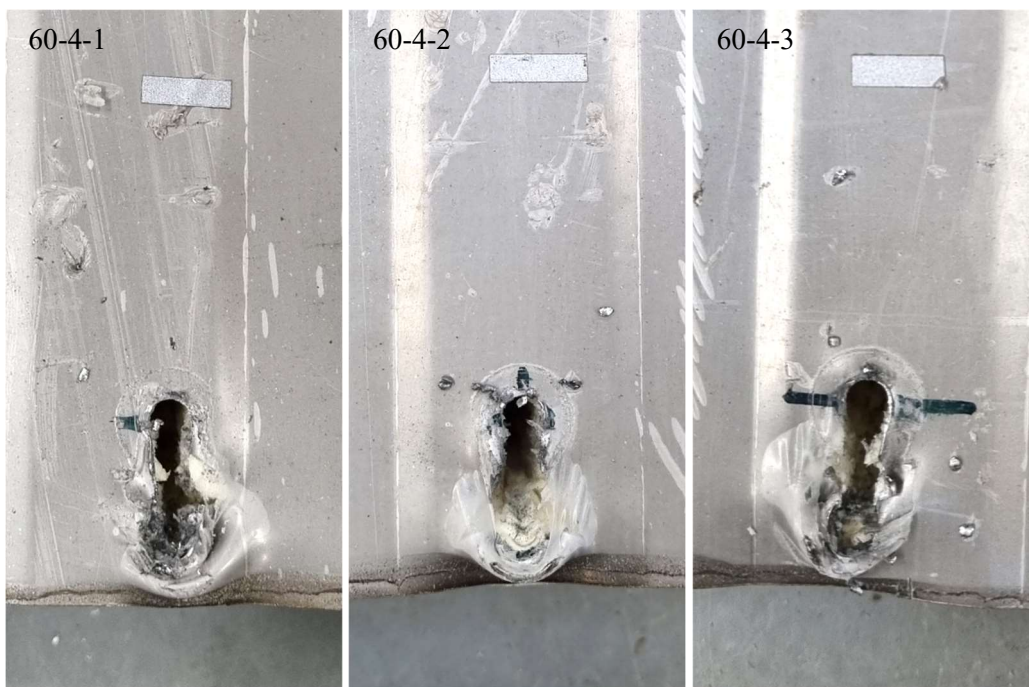
*Obr. 53 Porušení přípoje – zkouška 60-0,75-2*



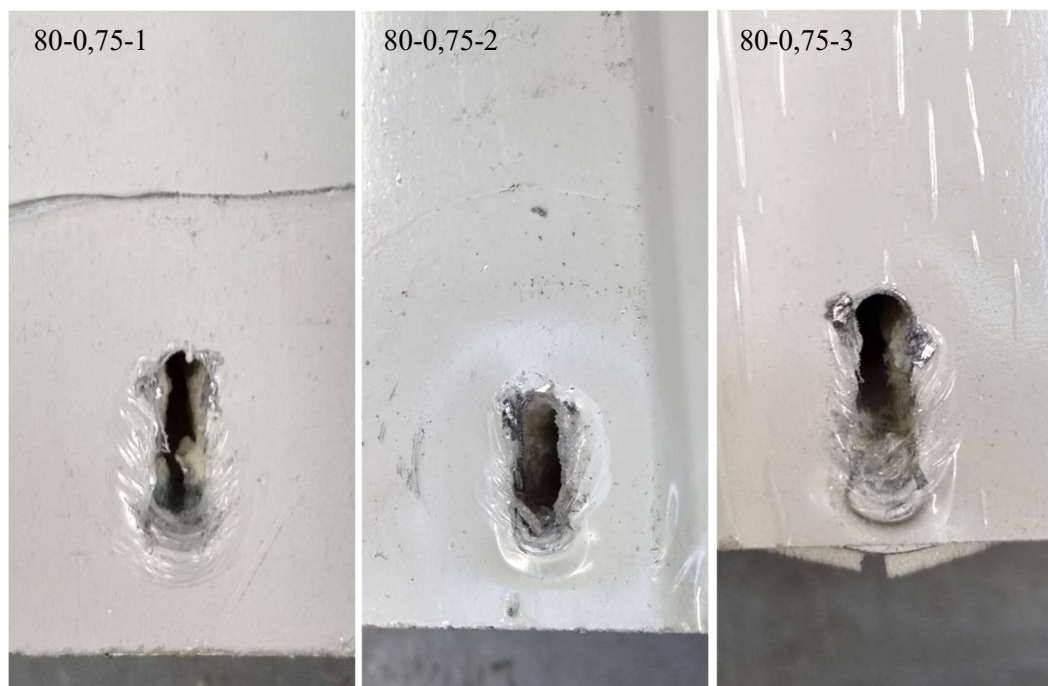


Obr. 54 Zkouška 60-0,75-3 – způsob porušení

#### Zkoušky 60-4

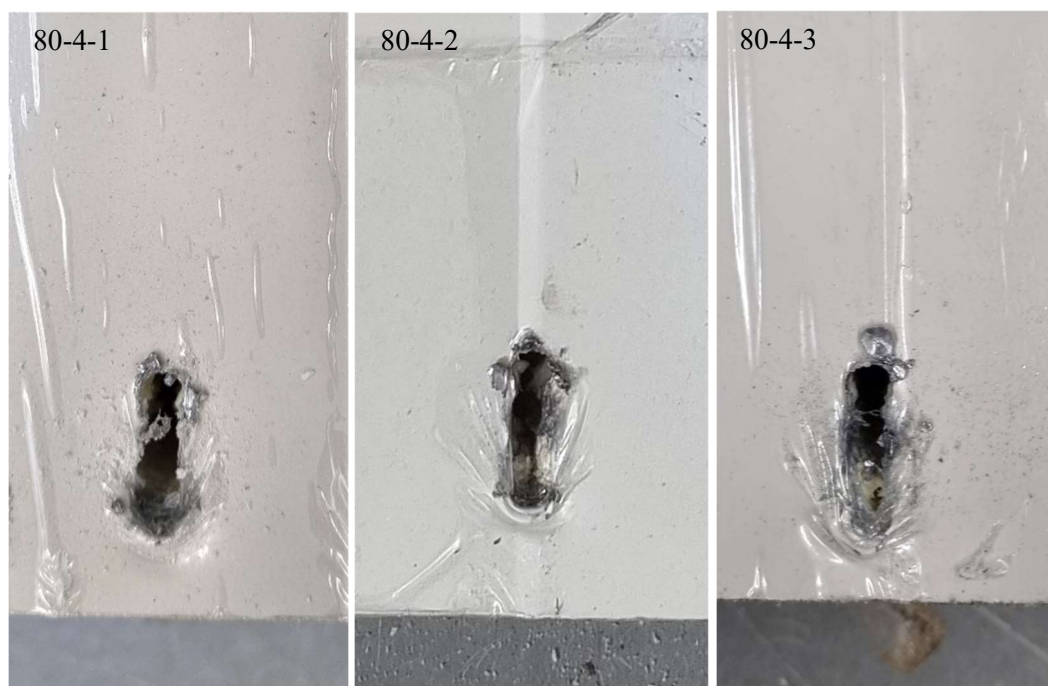


### Zkoušky 80-0,75



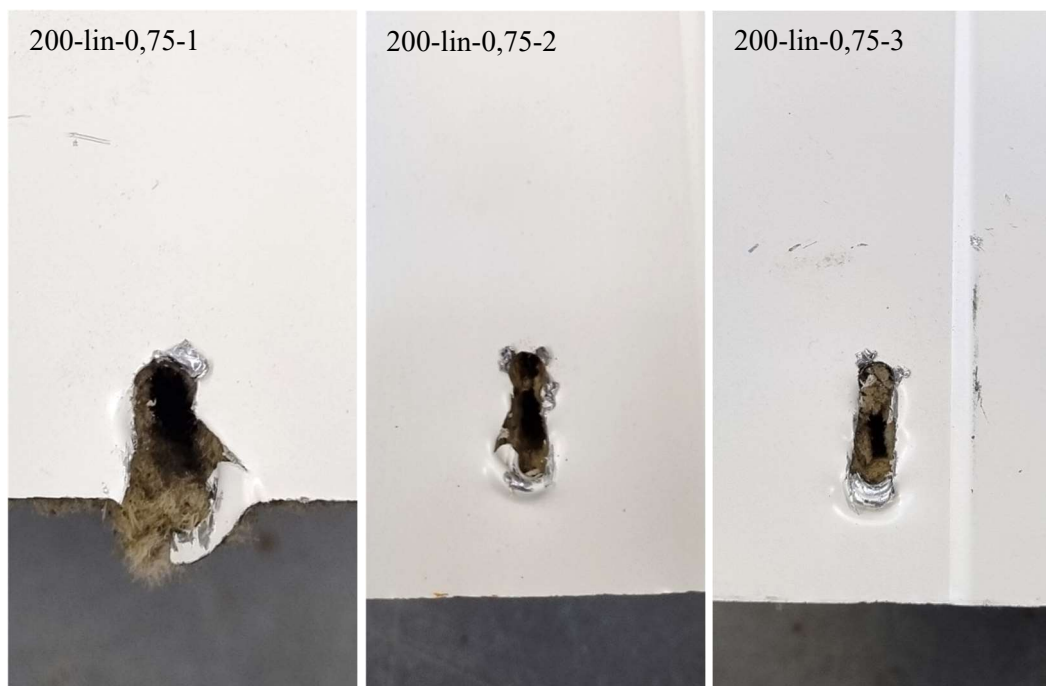
*Obr. 55 Porušení panelu – zkoušky 80-0,75*

### Zkoušky 80-4



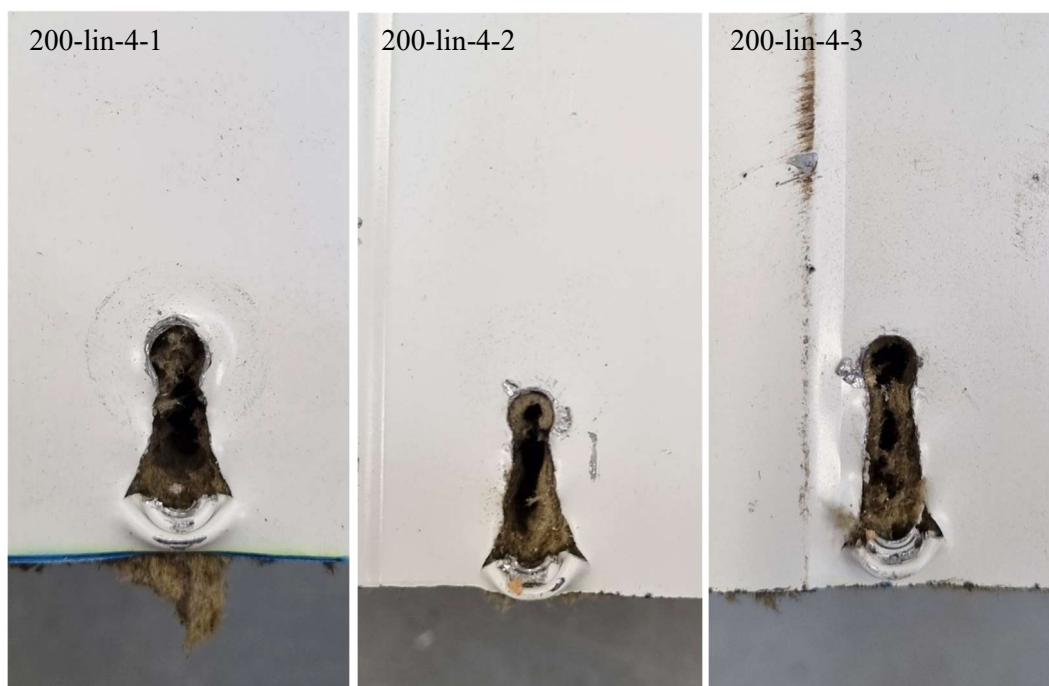
*Obr. 56 Porušení panelu – zkoušky 80-4*

### Zkoušky 200-lin-0,75



Obr. 57 Porušení panelu – zkoušky 200-lin-0,75

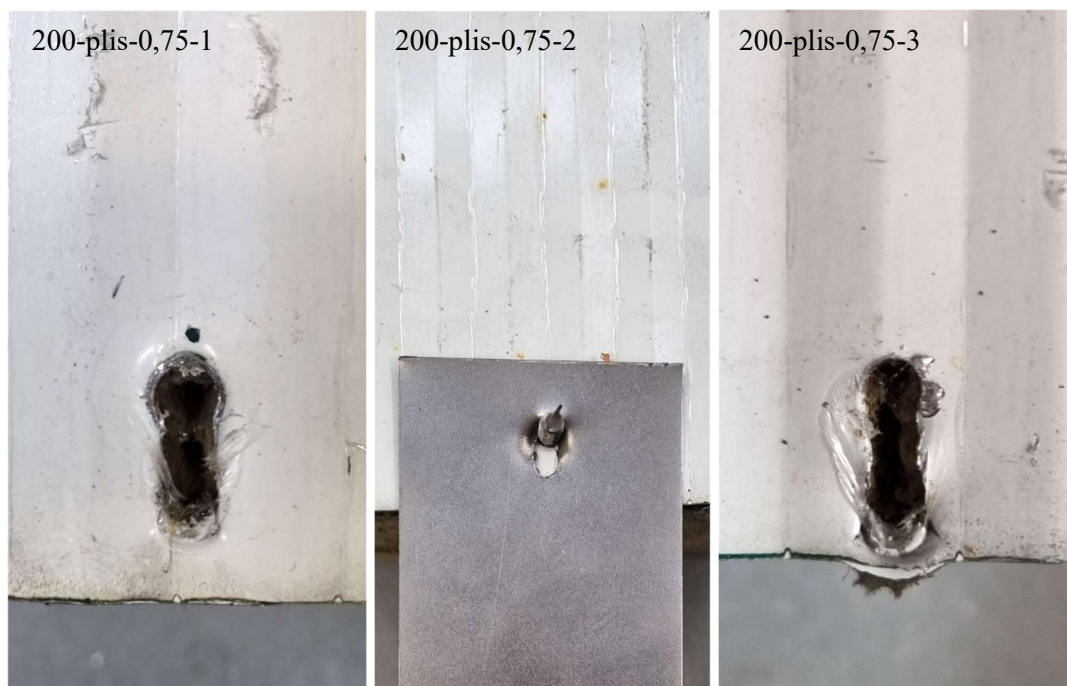
### Zkoušky 200-lin-4



Obr. 58 Porušení panelu – zkoušky 200-lin-4



### Zkoušky 200-plis-0,75



*Obr. 59 Porušení panelu/plechu – zkoušky 200-plis-0,75*

### Zkoušky 200-plis-4



*Obr. 60 Porušení panelu – zkoušky 200-plis-4*

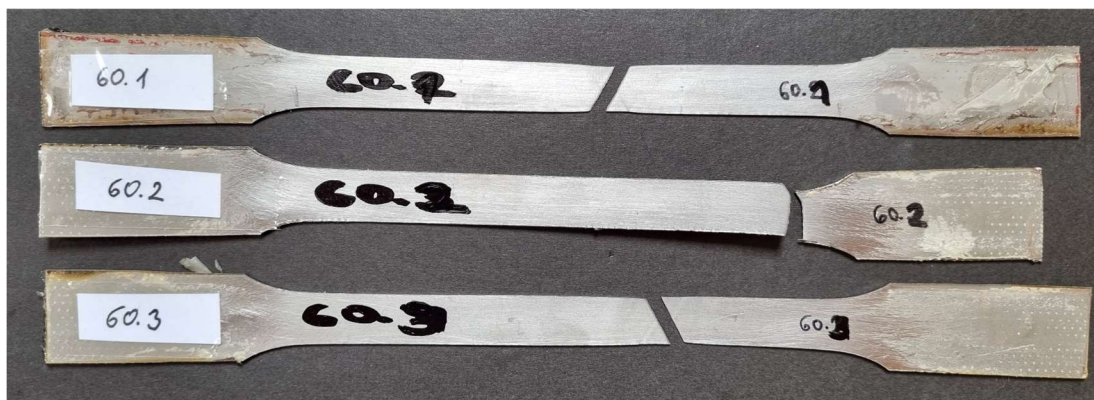


## Příloha B

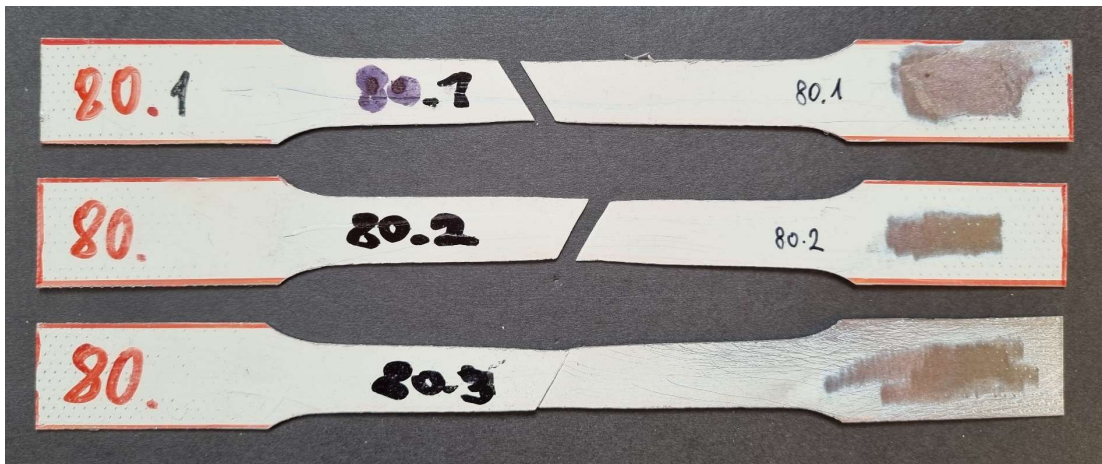
Tato příloha obsahuje fotodokumentaci k materiálovým zkouškám.



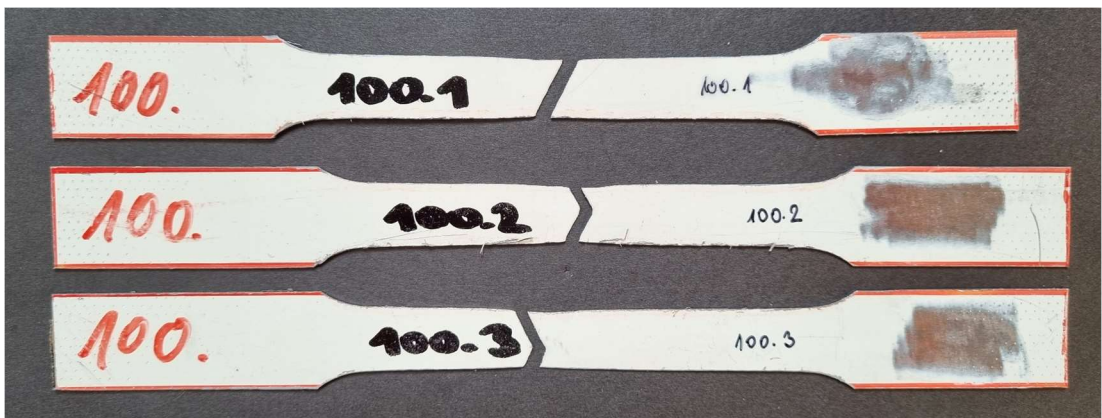
Obr. 61 Zkušební tělesa před provedením zkoušek



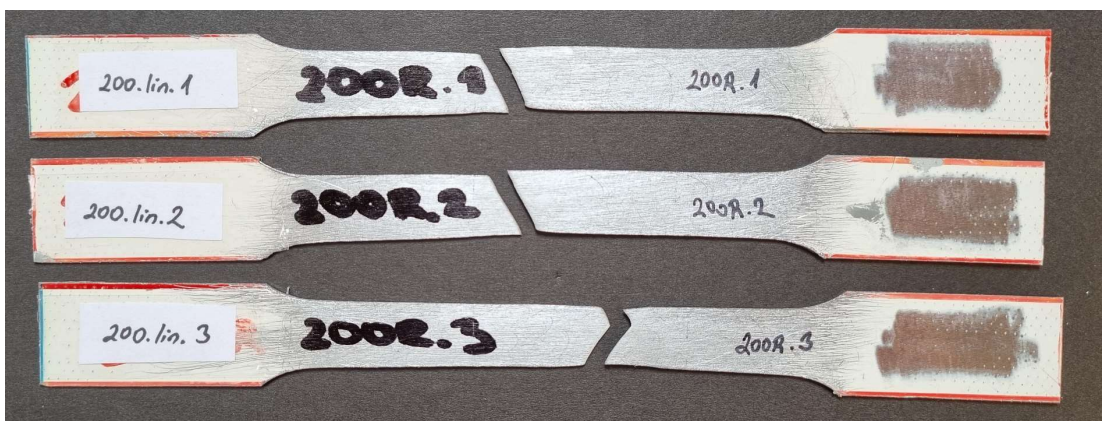
Obr. 62 Porušení zkušebních těles 60.1–60.3



Obr. 63 Porušení zkušebních těles 80.1–80.3



Obr. 64 Porušení zkušebních těles 100.1–100.3



Obr. 65 Porušení zkušebních těles 200.lin-1–200.lin.3





Obr. 66 Porušení zkušebních těles 200.plis.1–200.plis.3