

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

Prostorová tuhost systémových fasádních lešení

Spatial rigidity of façade scaffolding systems

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Pavla Ornstová

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Pozemní stavby

Školitel: doc. Dr. Ing. Jakub Dolejš, IWE

Praha, listopad 2023

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracovala samostatně. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Pavla Ornstová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala v první řadě svému školiteli, docentu Jakobovi Dolejšovi, za jeho odborné rady, cenné poznámky, podporu a nesmírnou trpělivost, díky kterým jsem mohla tuto práci úspěšně dokončit.

Současně též velice děkuji profesoru Jaroslavu Kruisovi za odborné informace a vedení při určení tuhosti numerických modelů.

Dále bych ráda poděkovala členům katedry ocelových a dřevěných konstrukcí za podnětné připomínky k práci a zvláště bych chtěla poděkovat Ing. Anně Kuklíkové PhD. za laskavou pomoc při řešení finančních a administrativních záležitostí na grantu, jehož jsem byla hlavní řešitelkou.

Závěrem též děkuji za poskytnutou finanční podporu Studentské grantové soutěži ČVUT (SGS16/137/OHK1/2T/11, SGS18/119/OHK1/2T/11 a SGS19/150/OHK1/3T/11) a Technologické agentuře ČR spolu s katedrou ODK za finanční podporu z grantu TAČR Zéta (TJ04000305), ze kterého byly financovány experimenty a má výzkumná činnost.

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá problematikou prostorového modelování fasádních rámových lešení se zaměřením na vývoj metodiky pro modelování podkladních prvků. Je zde popsán experiment na standardní základní sestavě lešení o dvou polích. Provedené experimenty (zkouška kolmo a rovnoběžně s fasádou) byly v rámci měření posunů oproti standardnímu postupu doplněny o další měřící body. Z naměřených hodnot byla odvozena nelineární matice tuhosti numerických modelů podlahových dílců pro každou zkoušku (kolmo a rovnoběžně s fasádou) zvlášť. Dále byly vytvořeny dva rovinné modely podlahových dílců lešení, které byly validovány na základě experimentů. Z toho byla navržena výsledná tuhost lešení ve vodorovném směru (kolmo a rovnoběžně s fasádou). Oba modely byly transformovány do jediného rovinného modelu. Výsledný rovinný model podlahového dílce lze použít v plném prostorovém modelu lešení.

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of spatial modelling of façade frame scaffolding, with the focus on developing a methodology for modelling subfloor components. A laboratory experiment on a standard scaffold base assembly consisting of two spans is described. Load tests (perpendicular to the façade and parallel to the façade) were carried out, and additional measuring points were added to the measuring apparatus compared to the standard procedure. The nonlinear stiffness of the two numerical models of the scaffold subfloors was derived from the measured value for each load test separately (perpendicular and parallel to the façade). Furthermore, planar models of the scaffold subfloors were created and validated against experiments. Finally, scaffold stiffness in the horizontal direction (perpendicular to the façade and parallel to the façade) was designed. Both models were transformed into a single planar model. Resulting planar model of the scaffold subfloors can be used in a full spatial member of the scaffold model.

OBSAH

1 Úvod	9
1.1 Dočasné stavební konstrukce	9
2 Současný stav problematiky	10
2.1 Dílcová fasádní lešení	11
2.1.1 Dílcová rámová fasádní lešení	11
2.1.2 Dílcová rámová lešení	13
Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,732 m.	14
Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m.	14
Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,65 m.	14
Další rámová lešení certifikovaná v ČR.	20
2.2 Podlahy dílcového rámového fasádního lešení	22
2.3 Únosnost a stabilita fasádního lešení	23
2.4 Statické posouzení dílcového fasádního lešení	24
2.5 Numerické modely	25
2.5.1 Náhradní dvojrozměrné systémy	26
2.5.2 Prostorové modely	27
3 Cíle práce	30
3.2 Cíle experimentální části	30
3.3 Cíle numerické části	31
4 Experimentální část	32
4.1 Popis použitého lešení pro experiment	32
4.2 Zkoušky tuhostí podlah	33
4.2.1 Zkouška podlahy kolmo k fasádě	36
4.2.2 Zkouška podlahy rovnoběžně s fasádou	38
4.3 Vyhodnocení experimentu	39
4.3.1 Vyhodnocení experimentu podle ČSN EN 12 811-3	39
4.3.1.1 Výsledky vyhodnocení zkoušky kolmo k fasádě	40
4.3.1.2 Výsledky vyhodnocení zkoušky rovnoběžně s fasádou	42
4.3.1.3 Shrnutí	43
4.3.2 Vyhodnocení experimentu graficky	44
4.3.3 Vyhodnocení experimentu numericky	54
4.3.3.1 Určení tuhosti numerického modelu	54
4.4 Shrnutí experimentální části	55
5 Numerická část	56
5.1 Předběžné rovinné modely	56
5.2 Validace rovinných modelů	57
5.2.1 Chování lešení kolmo k fasádě	57
5.2.2 Chování lešení rovnoběžně s fasádou	60

5.3 Model podlahového dílce	63
5.3.1 Nastavení připojení podlahových dílců	65
5.4 Verifikace modelu podlahového dílce	68
5.5 Shrnutí numerické části	71
6 Závěr	72
6.1 Přínos disertační práce	75
6.2 Náměty na další výzkum	75
Literatura	76
Obrázky	79
Tabulky	80

1 ÚVOD

Podpěrné a fasádní dílcové lešení patří mezi nepoužívanější dočasné stavební konstrukce a v poslední době se stává také velmi oblíbeným předmětem výzkumu. Lešení je specifické zejména tím, že s ním přichází do styku nejen specializovaní pracovníci, ale i veřejnost. Nedostatečné statické posouzení spolu s nedbalostí a neodbornou manipulací s lešením jsou hlavními příčinami havárií lešení.

Základním problémem při statickém návrhu dílcového lešení je vytvoření výstižného prostorového modelu. Prakticky se dosud používají jen zjednodušené rovinné modely, které nepostihují všechny konfigurace leševných sestav. To je s ohledem na výrazně nelineární chování podlahových dílců, spojů apod. velmi obtížné [1]. Problematika stanovení únosnosti, závislosti pootočení na namáhání a rotační kapacity styčníků se stále zdokonaluje, nicméně chování podlážek u leševných konstrukcí je stále nedostatečně prozkoumané.

1.1 DOČASNÉ STAVEBNÍ KONSTRUKCE

Mezi dočasné stavební konstrukce se řadí takové konstrukce, které nejsou trvalou součástí stavby. Spadá mezi ně pracovní a podpěrné lešení, ale i konstrukce určené pro pažení výkopů a systémová bednění. Lešení je nejběžněji používaný typ dočasných stavebních konstrukcí. Lešení lze dělit na mnoho způsobů, např. podle uspořádání, rozměrů, zatížení podlahy, podle zakrytí, podle materiálu, z hlediska funkce, z hlediska systému apod.

Z hlediska materiálu nepoužívanějším materiálem pro lešení u nás je ocel, dále se používají systémy vyrobené z hliníkových slitin, kde se využívá nižší hmotnosti konstrukce oproti ocelovému lešení. Pro konstrukce lešení v Asijských státech jako je Čína, Indie, Filipíny, Indonésie (obr. 1), ale také v Latinské Americe, je hojně využíván bambus. I přes velkou konkurenci ocelového a hliníkového lešení po celém světě, je stále bambusové lešení v Asijských zemích nejrozšířenější, a to pro jeho snadnou dostupnost [2]-[6].

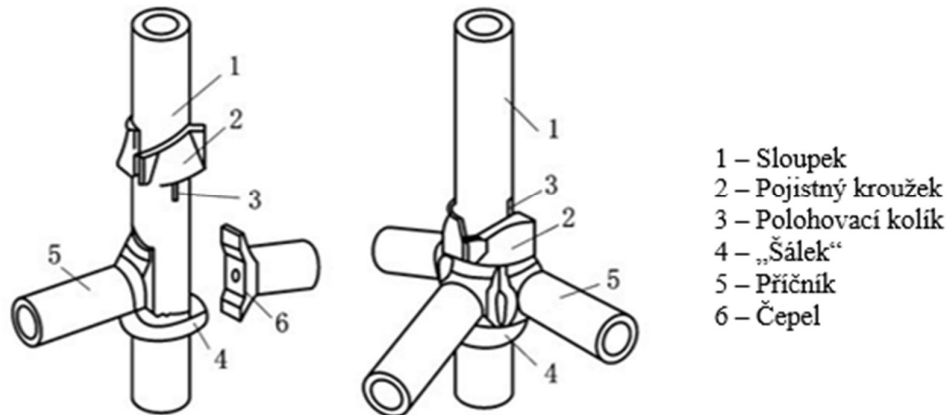


Obr. 1: Fotografie bambusového lešení, Lombok, Indonésie (2015)

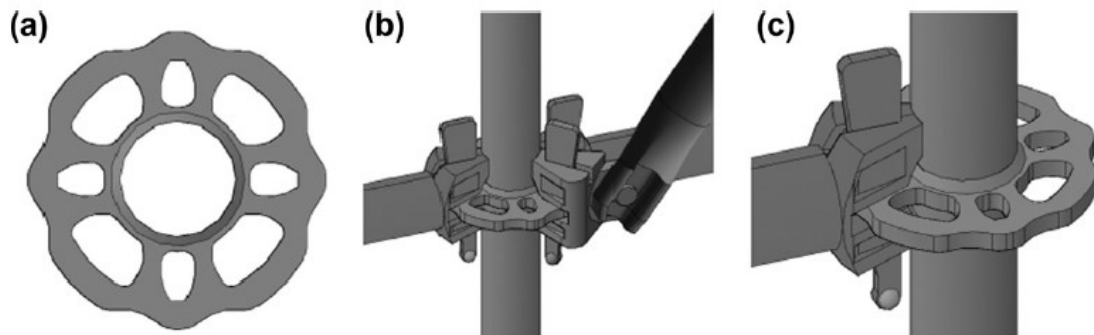
Podle způsobu použití lze lešení rozdělit do kategorií jako pracovní, ochranné, podpěrné a jiného účelu. Do kategorie pracovní lešení pak spadá fasádní lešení, na které je zaměřena tato práce. Podpěrné lešení si lze představit jako lešení, které se používá pod bednění na tekutý beton např. při výstavbě mostů apod. Z hlediska systému rozlišujeme lešení nesystémové a systémové. Mezi nesystémové lešení řadíme lešení trubkové, které je v České republice stále hojně využíváno, dále pak lešení dřevěné a z dřevěných prvků. Systémová nebo také dílcová lešení se rozlišují na modulové (viz obr. 2, obr. 3), která jsou z tyčových dílců, rámová, z plošných dílců a lešení z prostorových dílců. Tato práce je tedy zaměřena na fasádní dílcová lešení.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Nejstarší dohledatelné výzkumy zabývající se numerickou analýzou konstrukce lešení se datují do roku 1975. Autoři se ve svých pracích zabývají převážně tuhostí a pevností spojů a jednotlivých prvků lešení či kotvením, dále numerickou analýzou konstrukce lešení (zavedení imperfekcí, stabilita a únosnost konstrukce apod.) [7], [8]. Ve svých pracích se většinou zaměřují na konkrétní typ lešení s konkrétním druhem spoje, jako například na modulové lešení CUPLOCK [9]-[11] či modulové lešení s rozetami ve spojích [12]. Oba typy spojů jsou znázorněny na obr. 2 a obr. 3.



Obr. 2: Konstrukce lešenařských prvků typu cuplock [11]



Obr. 3: Modulové lešení s rozetou: (a) rozeta; (b) spoj s podélným vodorovným prvkem a ztužidlem; (c) spoj s podélným vodorovným prvkem [12]

Významným trendem dnešní doby je snaha o snižování nákladů na stavbu, což se potom projevuje i u dočasných konstrukcí jako je lešení. Neopodstatněné šetření u těchto typů konstrukce může vést k haváriím a v nejhorším případě i ke ztrátám na životech. Příčinami zřícení a poškození lešení se zabývá celá řada publikací např. [13]-[16]. Peng a kol. [13] si vzali za cíl provést testy únosnosti lešení a na jejich základě provést optimalizaci diagonálního ztužení s ohledem na výrobní náklady. Robak a kol. [14] založili svůj výzkum na zkoumání sestav lešení přímo na stavbě. Za dva roky prozkoumali více jak 100 lešenařských sestav a formulovali obecné závěry o technickém stavu jednotlivých typů rámových lešení a o jeho vlivu na únosnost lešení. Hoła a kol. [15] provedli analýzu rizik, která

zvyšují nebezpečí havárie lešení. Data, která shromáždili, zahrnovala analýzu pracovních úrazů, úrazy třetích osob a poruchy lešení. Příspěvek uvádí konkrétní příklady těchto událostí. Blazik-Borowa a kol. [16] ve svém výzkumu prezentovali příčiny vzniku havárií lešení, které ohrožují bezpečnost pracovníků i veřejnosti vyskytující se v jeho okolí. Věnovali se výzkumu pravděpodobnosti vzniku nebezpečných situací, kontrole technického stavu lešení a porušování předpisů BOZP. A také analýze jednotlivých fází životnosti lešení se zvláštním zřetelem na návrhové postupy a jejich chyby. Dále studovali systém výběru prvků lešení a postupy montáže a demontáže.

Vzhledem k velkému množství běžně používaných typů lešení, ať už z hlediska materiálu, typu konstrukce nebo způsobu použití apod., existuje v odborné literatuře také velké množství publikací, kde se autoři zaměřují na jednotlivé konkrétní typy. Menší zastoupení v literatuře mají výzkumy, které jsou zaměřeny na lešení z hliníkových slitin. Např. Blazik-Borowa a kol. [17] se ve své publikaci věnují modelování spojů typu sloupek-podélník pro modulové hliníkové lešení. Nejčastější zastoupení v odborné literatuře má výzkum zabývající se ocelovým trubkovým lešením, což je dáno zejména tím, že se řadí mezi nejstarší typy lešení [7],[8]. Např. Prabhakaran a kol. [18] se zabývali tuhostí spojů trubkového fasádního lešení a jejich modelováním. Autoři se zaměřili na zkoumání přípoje sloup-příčník a uvádí, že výsledky lze použít i pro typ spoje sloup-příčník pro některá modulová lešení.

2.1 DÍLCOVÁ FASÁDNÍ LEŠENÍ

Do roku 1990 se v České republice používalo jen trubkové lešení, případně dílcové lešení HAKI. Výroba lešení HAKI byla v České republice zahájena v roce 1968. Po podepsání licenční dohody mezi Švédskem a tehdeším Československem dále probíhal konstrukční a technologický vývoj lešení nezávisle na Švédsku a vzniklo HAKI ČR [19].

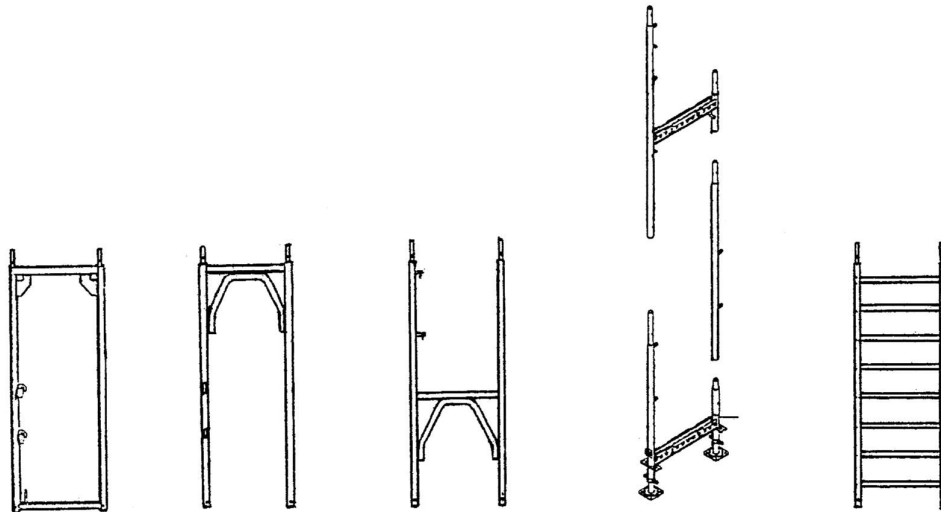
Dnes se u nás běžně používají dílcová lešení široké škály od řady evropských výrobců. To má své výhody v podobě téměř neomezeného výběru, ale samozřejmě i nevýhody v tom, že každá konstrukce má své specifické vlastnosti a požadavky na provedení. To je nutné brát v potaz především při jejím návrhu [20].

Dílcová lešení nesou svůj název podle toho, že se jedná o lešení sestavená z lešeňových dílců. Jak už bylo zmíněno v předešlé kapitole, dělíme dílcová lešení podle typu dílců na modulová, prostorová a rámová.

2.1.1 DÍLCOVÁ RÁMOVÁ FASÁDNÍ LEŠENÍ

Předmětem této práce jsou lešení z plošných dílců, tedy lešení rámová. Základním prvkem těchto lešení je příčný rám, který může mít různá provedení a patří mezi hlavní rozlišovací znaky typu lešení. Příklady příčných rámu jsou na obr. 4. Tato práce se zaměřuje na uzavřené rámy (obr. 4 první zleva), které se používají nejčastěji. Jejich hlavní výhodou je garantovaná tuhost rámu a současné zajišťování pracovních podlah dolním příčnickem [20].

Mezi hlavní výhody dílcových lešení oproti lešením trubkovým spadá jejich větší rychlost montáže a demontáže, záruka dodržení rozměrů konstrukce, lepší povrchová úprava, větší prostorová tuhost konstrukce a zpravidla také vyšší nosnost. Nevýhody lze spatřovat zpravidla v horší adaptabilitě, náročnosti na skladování, dopravě a manipulaci, ve větší citlivosti na mechanické poškození a bezesporu také vyšší ceně [20].



Obr. 4: Typy příčných rámu – zleva: uzavřený rám, otevřený rám, H-rám, T-rám, žebříkový rám [20]

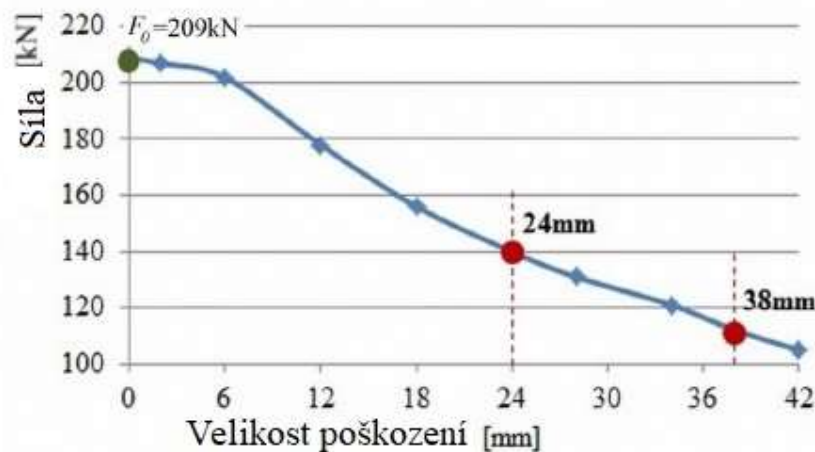
Cimallaro a kol. [21] se ve svém článku zabývali stabilitní analýzou třech nejpoužívanější typů lešení (v Itálii): trubková lešení, modulová lešení s rozetou a rámová lešení. Provedli několik simulací metodou konečných prvků při různých podmínkách zatížení, přičemž byly zohledněny deformace dílců a prvků, které vznikly během montáže na staveništi, okrajové podmínky (imperfekce) a účinky od uspořádání kotevního rastru. Numerické výsledky ukázaly, že trubková lešení a modulová lešení mají podobné chování, protože mají podobnou geometrii a rozměry. Namísto toho dílcová rámová lešení vykazovala jiné výsledky z důvodu odlišného konstrukčního řešení a rozměrů. Výsledky ukázaly, že dílcová rámová lešení jsou excentricitou působících sil ovlivněny více než zbývající dva typy.



Obr. 5: Fotografie rámu ze zkoušky [22]

Robak a kol. [22] zkoumali, jaký má dopad použití poškozeného rámu dílčového lešení na celkovou únosnost konstrukce rámu. Ověřovali, zda přítomnost vad snižuje reálnou pevnost materiálu v porovnání s teoretickou pevností. Laboratorní test provedli na reálném rámu (obr. 5).

Bylo zjištěno, že při deformaci poškozením do 6 mm je vliv na únosnost zanedbatelný. Únosnost rámu odpovídá maximálnímu zatížení a ztrátu únosnosti způsobí vybočení rámu. Při poškození nad 6 mm došlo k prudšímu poklesu únosnosti, jak je patrné v grafu na obr. 5. Únosnost prudce klesala až do poškození o velikosti 24 mm a dále byla závislost únosnosti na velikosti poškození prakticky lineární. Maximální únosnost rámu souvisí s pevností materiálu rámu, tj. s dosažením meze kluzu v prvcích rámu. Pro další rozsah poškození je ztráta únosnosti rámu způsobena překročením meze kluzu. Mezní hodnota závisí na geometrických vlastnostech průřezů a vlastnostech materiálu. Pozornost by měla být také věnována místu, kde se vada na rámu nachází, protože stejný rozsah poškození na různých místech konstrukce může mít jiný dopad na únosnost.



Obr. 6: Vztah velikosti poškození k max. síle způsobující ztrátu stability prvku [22]

2.1.2 DÍLCOVÁ RÁMOVÁ LEŠENÍ

Typy dílčových fasádních lešení na trhu ČR se detailně věnovala Bukovská v publikaci [23]. Na trhu se vyskytuje velké množství výrobců rámového lešení. Jednotlivé rámy se mezi sebou liší nejen tvarem, ale i rozměry. Ne každý výrobce však vyrábí unikátní výrobek a tudíž, může být mezi jednotlivými rámy lešení od různých výrobců shledána jistá kompatibilita.

U lešení od různých výrobců, která se svými rozměry shodují, lze hovořit o třech případech:

1. Existují na trhu nezávisle na sobě, mají svou dokumentaci, návody apod.;
2. Jsou technicky kompatibilní, což znamená, že kombinace dvou nebo více lešení je ověřena výpočtem a/nebo zkouškou;
3. Jsou kompatibilní i právně, tj. více výrobců se dohodne a odsouhlasí, že je možno používat kombinace jimi vyráběných lešení. Předpokladem právní kompatibility je kompatibilita technická.

Na základě těchto tří případů jednotlivá rámová lešení můžeme rozdělit podle osové šířky rámu na:

- A. Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,732 m a základní délkou pole v modulu 2,07 m, 2,57 m, 3,07 m;
- B. Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m;
- C. Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,65 m;
- D. Další rámová lešení certifikovaná v ČR.

Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,732 m.

Na obr. 7 a obr. 8 jsou rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,732 m a základní délkou pole v modulu 2,07 m, 2,57 m a 3,07 m. Všechna tato lešení mají uzavřený rám s rohovými výztuhami, svislé sloupky mají průměr 48,3 mm a tloušťku stěny 2,7 mm (nebo 3,2 mm). Spodní část sloupku je zúžena ve většině případů na vnitřní průměr 40,9 mm.

Dalším společným znakem lešení z obr. 7 a obr. 8 je, že horní příčel je z U profilu o rozměrech 48 (49) x 53 (60) x 2 – 3 mm a dolní příčel je obdélníkového průřezu 40 x 20 x 2 mm. Úchyty pro osazení zábradlí jsou na jednom sloupku rámu a ve většině případů je druhý sloupek rámu opatřen otvorem pro možné připevnění úchyty. Svislé diagonály se osazují jedním koncem do styčnickového plechu a druhý konec se připevňuje integrovanou klínovou půlspojkou.

Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m.

Na obr. 9 až obr. 11 jsou rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m. Všechna tato lešení mají uzavřený rám bez rohových výztuh, svislé sloupky mají průměr 48,3 mm a tloušťku stěny 2,7 mm (nebo 3,2 mm). Spodní část sloupku je zúžena jen při tloušťkách stěny 2,7 mm na vnitřní průměr 40,9 mm.

Horní příčel má profil o rozměrech 50 x 30 (35) x 2 – 3 mm a je opatřena navařenými trny, které slouží k osazení podlahových dílců. Dolní příčel tvoří trubka o průměru 33,7 mm a tloušťce stěny 2,6 mm. Úchyty pro osazení zábradlí jsou na jednom sloupku rámu a v některých případech je druhý sloupek rámu opatřen otvorem pro možné připevnění úchyty. Zábradlí se osazuje na trny se sklopnou pojistkou. Svislé diagonály se osazují také na trny se sklopnou pojistkou. Ve spodním poli je spodní část diagonály osazena na samostatný dílec s trnem, umístěným na patce.

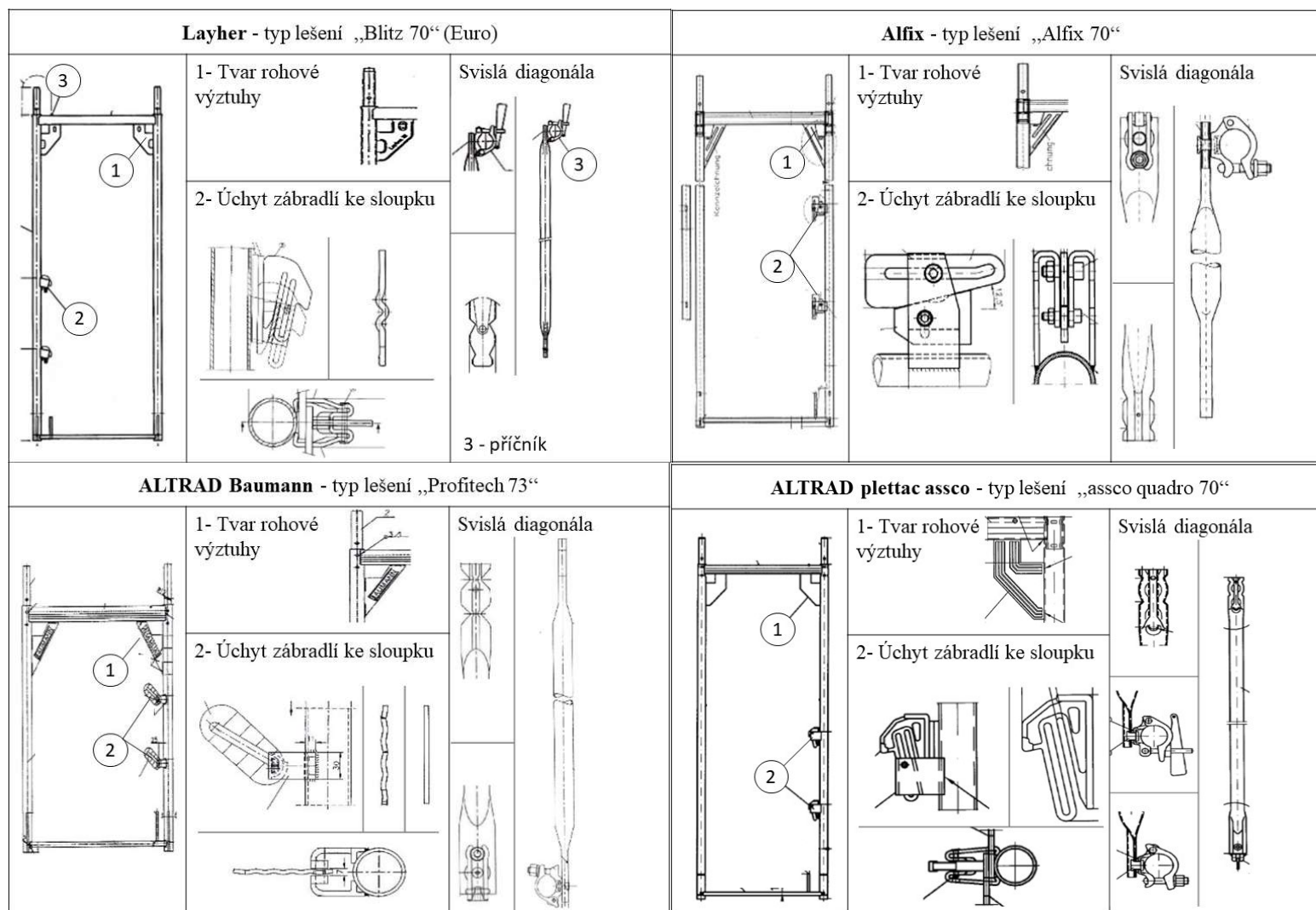
Všechny tyto konstrukční typy mají nerovnost na podlaze cca 42 mm. Norma ČSN 73 8101 předepisuje maximální povolenou nerovnost na podlahovém dílci 30 mm. Tato skutečnost (pro Českou republiku) je pak uvedena v technických listech výrobce.

Rámová lešení s osovou šířkou rámu 0,65 m.

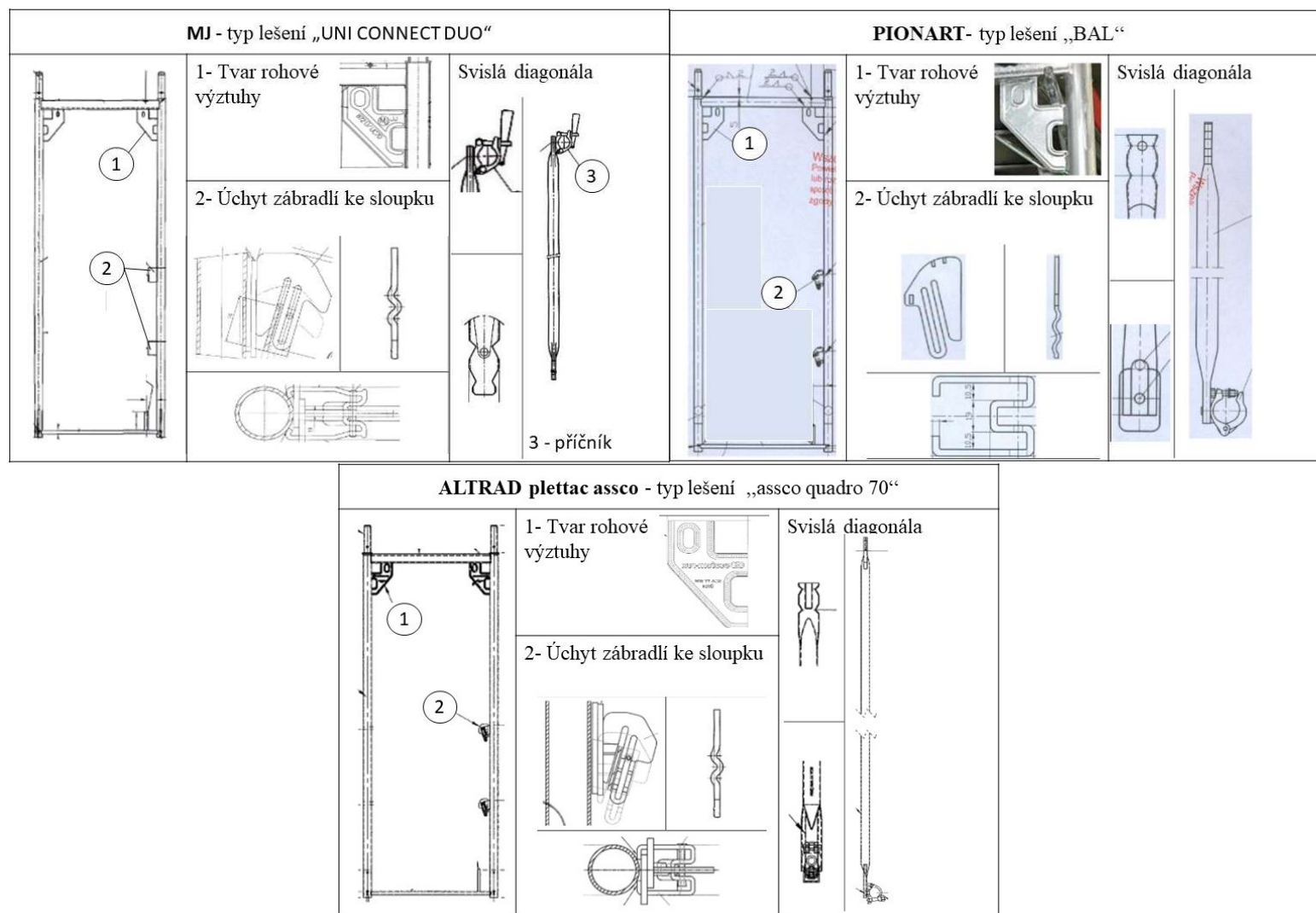
Kategorie rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,65 m zahrnuje dva typy lešení od dvou výrobců, jejichž příklady jsou na obr. 12 a obr. 13. Tento typ lešení s uzavřenými rámy se vyznačuje tím, že jejich rámy jsou nebo nejsou opatřeny rohovými výztuhami, a to s ohledem na způsob připevnění zábradlí. Sloupky mají opět průměr 48,3 mm a tloušťku stěny 3,2 mm. Horní příčel obsahuje navařené trny pro osazení a má profil 52x40x2 mm a dolní příčel je tvořená T profilem o rozměrech 35x35x4,5 mm.

Zábradlí se osazuje buď na trny se sklopnou pojistkou nebo do ocelových destiček s otvorem. Úchyty pro osazení zábradlí jsou u prvního typu rámu navrženy na jednom sloupku a druhý sloupek je s otvorem pro možné osazení úchyty. U tohoto typu rámu absentuje rohová výztuha.

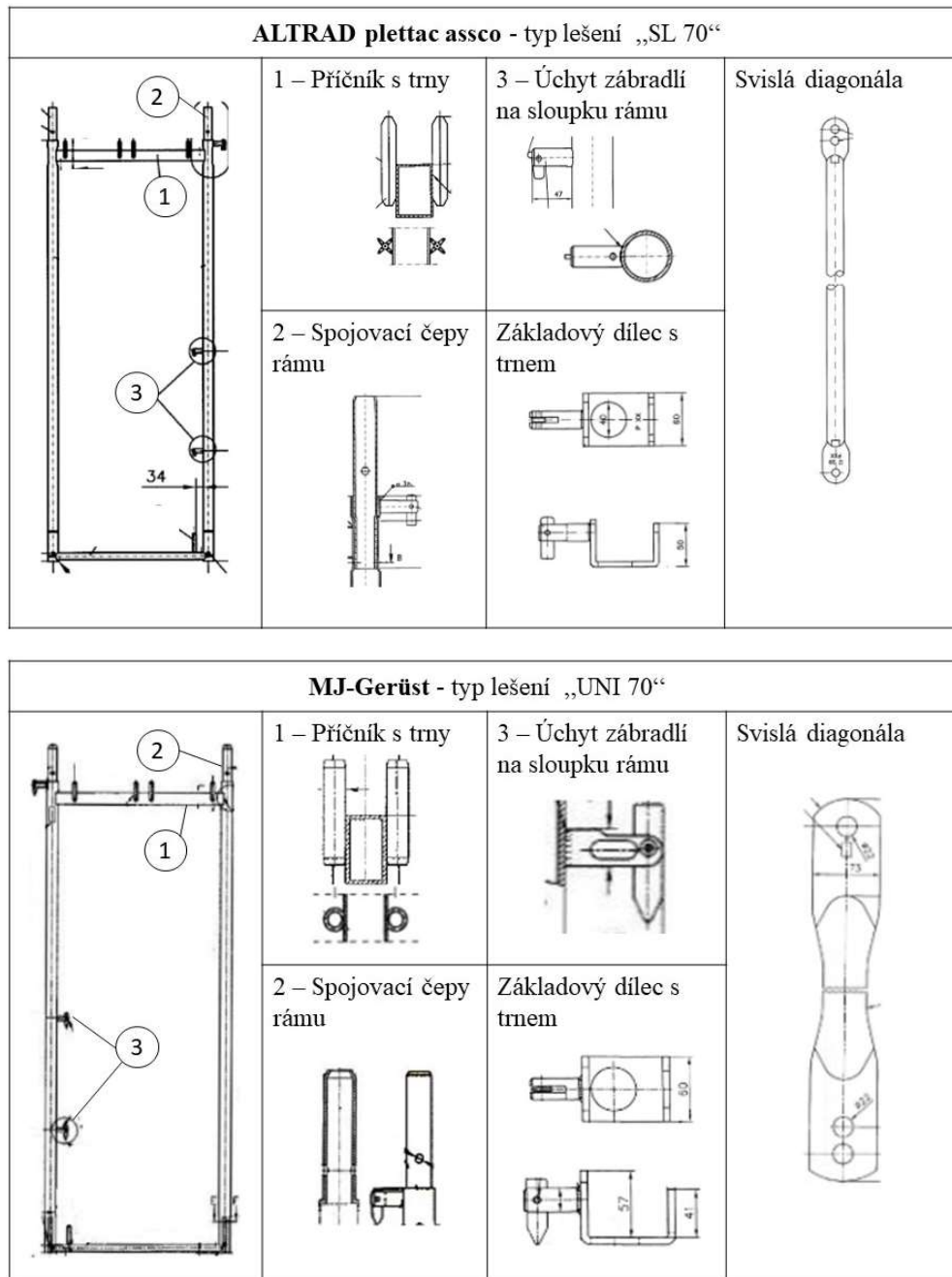
U druhého typu rámu jsou úchyty na obou sloupcích a rámy jsou opatřeny rohovou výztuhou, jak je ostatně patrné z obr. 12 a obr. 13. Svislé diagonály se osazují na trny se sklopnou pojistkou. Na patky je osazen základový příčník, který je opatřen na jedné straně pojistkou, která slouží pro osazení diagonály.



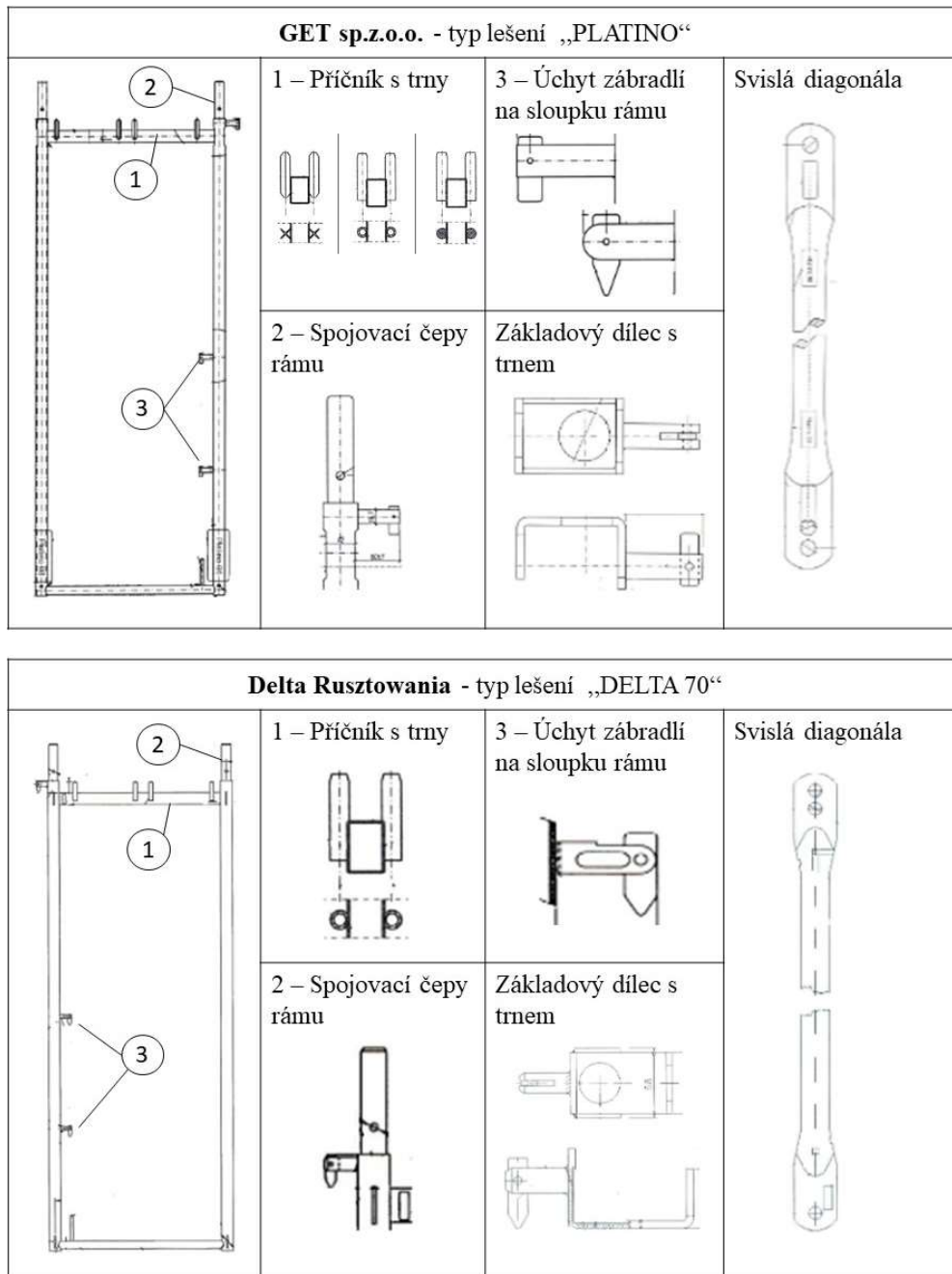
Obr. 7: Typy rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,732 m [23]



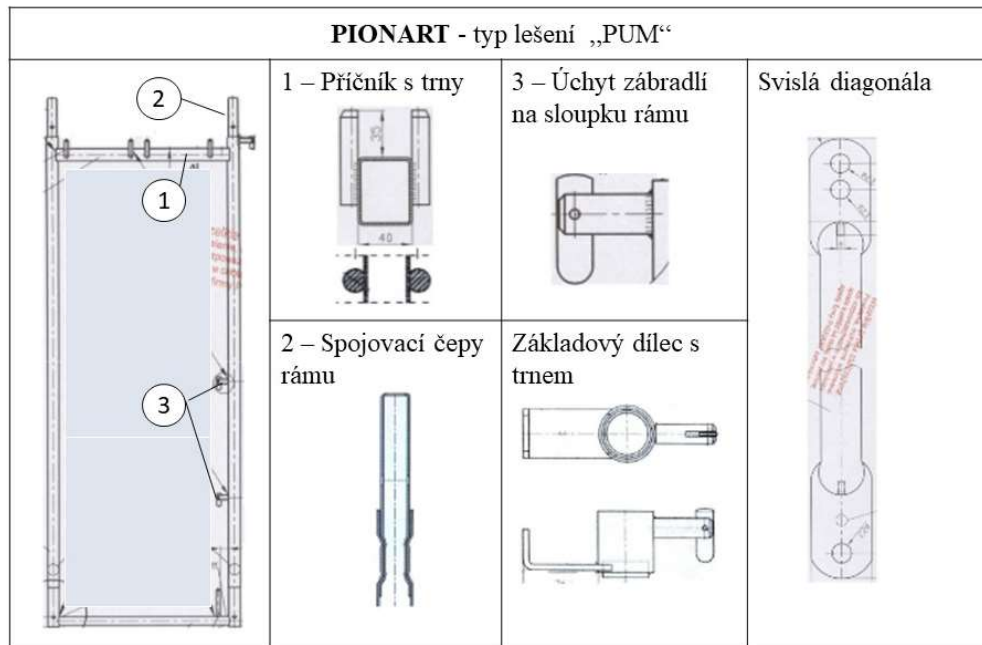
Obr. 8: Typy rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,732 m [23]



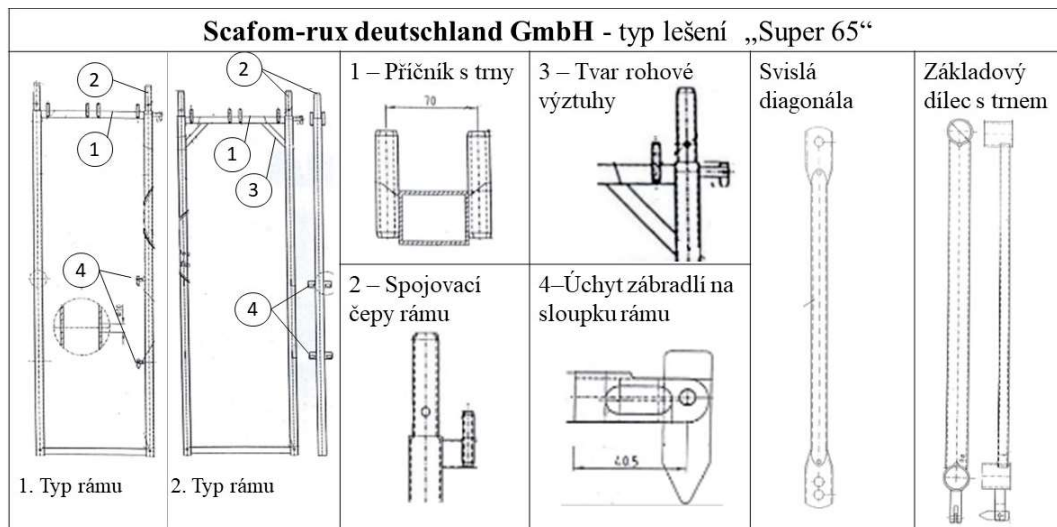
Obr. 9: Typy rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m [23]



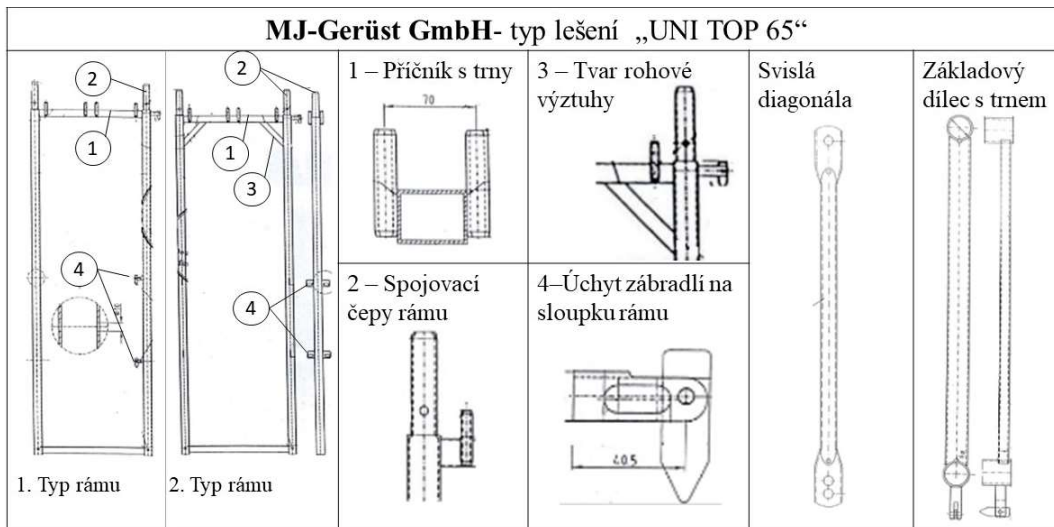
Obr. 10: Typy rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m [23]



Obr. 11: Typ rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,739 m [23]



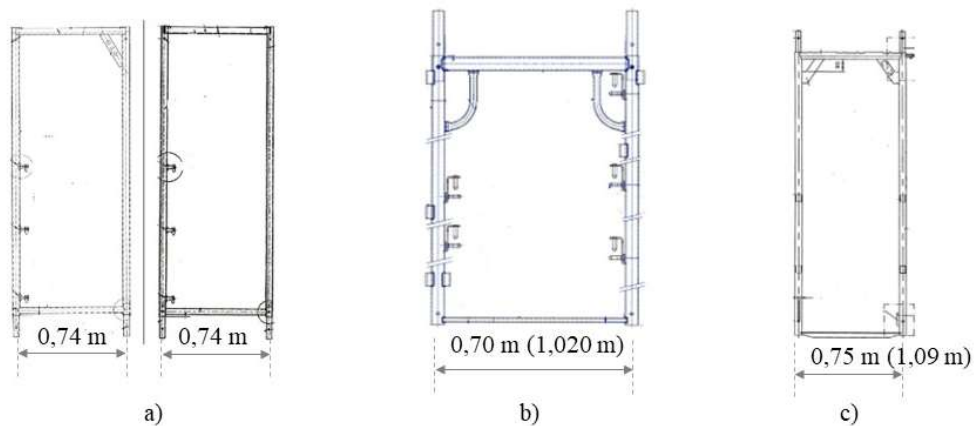
Obr. 12: Typ rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,65 m [23]



Obr. 13: Typ rámových lešení s osovou šířkou rámu 0,65 m [23]

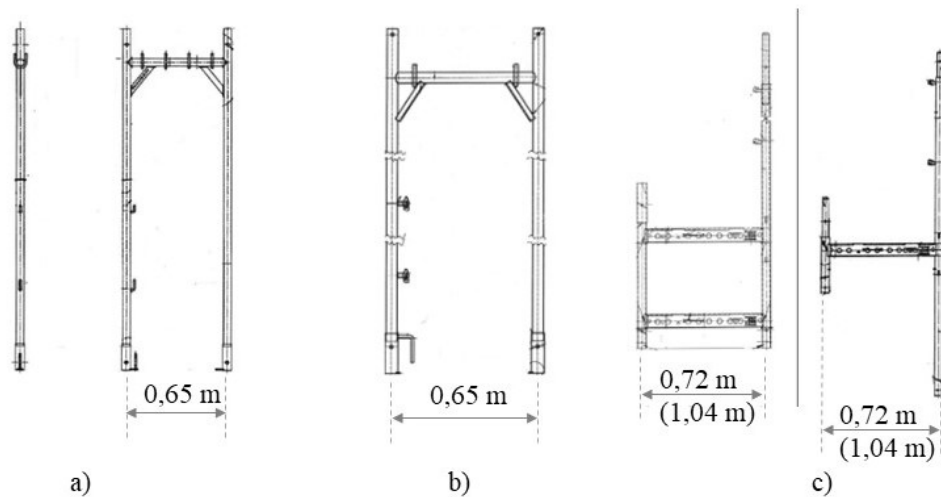
Další rámová lešení certifikovaná v ČR.

Další rámová lešení certifikovaná v České republice lze rozdělit na lešení s uzavřenými rámy (obr. 14) otevřenými rámy (obr. 15), rámy s rohovou výztuhou nebo bez rohové výztuhy.



Obr. 14: Rámová lešení s uzavřenými rámy: a) HUNNEBECK (Harsco) - typ lešení „BOSTA 70“; b) ULMA C y E, S. Coop - typ lešení „DORPA 700 (resp. 1020)“; c) SCASERV a.s.- typ lešení „SPRINT 75 (109)“ [21]

Horní příčel tvoří buď trubka nebo U profil. Dolní příčel (jen u uzavřených rámu) je buď trubka, T profil nebo pásnice. Zábradlí se osazuje na trny nebo do úchytů. Zábradlí u rámu na obr. 15 a), b) je rámové s diagonálním ztužením, které se osazuje na trny a toto zábradlí také tvoří podélné ztužení konstrukce lešení.



Obr. 15: Rámová lešení s otevřenými rámy: a) Ringer KG, - typ lešení „Doppelgeländergerüst DG 0,65 m“; b) GRAF Baugerätehandel GmbH & Co.KG - typ lešení „GRAF“, 0,65“; c) PERI GmbH - typ lešení „PERI UP T 70 (resp. PERI UP T 100)“ [23]

V této práci bylo použito lešení „SPRINT 75“, jehož konstrukce bude podrobněji popsána v kapitole 4.1. Na obr. 16 a obr. 17 jsou fotografie lešení Sprint 75 použitého v praxi.



Obr. 16: Lešení Sprint 75 - objekt DOCK 05, Praha (2021) [24]



Obr. 17: Lešení Sprint 75 – vodojem Hošťálkovic (vlevo) výstavba bytových domů DOMEQ (Brno) (vpravo) [24]

2.2 PODLAHY DÍLCOVÉHO RÁMOVÉHO FASÁDNÍHO LEŠENÍ

Rozdíly mezi jednotlivými typy dílcových lešení jsou především v provedení svislé konstrukce. Naopak konstrukce podlah se příliš neodlišují. Dnes jsou preferované především systémové podlahové dílce, nesystémové (tzv. fošnové) jsou používány spíše výjimečně. Podlahové dílce jsou téměř vždy situované v podélném směru a jejich délka odpovídá délce polí příslušného typu lešení. V praxi se používají dvě rozměrové řady tzv. „metrická“ (1 m, 1,50 m, 2 m až 4 m) a „Layher“ (1,09 m, 1,57 m, 2,07 m až 4,14 m). Standardní šířky dílců jsou cca 0,3 m nebo cca 0,6 m. Případně se ještě používají doplňkové šířky (0,15 – 0,2 m) pro vykrytí vzniklých mezer [25][24].



Obr. 18: Ocelové podlahy s prolisy [26]

Podlahové dílce jsou buďto ocelové, hliníkové, dřevěné nebo kombinací jednotlivých materiálů. Lešenářské konstrukce využívají obvykle dva typy podlah: kovové desky s prolisy (obr. 18) nebo dřevěné podlahy.

Tento výzkum je zaměřen výhradně na systémy s kovovými deskami. Kovové podlahové dílce jsou k ráámům připojeny zpravidla pomocí ocelových háků, které jsou zajištěny proti samovolnému vypadnutí, přesto téměř ve všech případech vykazují ve vodorovném směru významné vůle. Právě modelování vodorovné tuhosti podlahy představuje při výpočtech největší obtíž.

2.3 ÚNOSNOST A STABILITA FASÁDNÍHO LEŠENÍ

Na celkovou únosnost a stabilitu lešňové konstrukce má vliv celá řada faktorů, jako jsou počáteční imperfekce, nastavení délky stavitelných základových patek, vliv excentricity působícího zatížení a vliv poddajnosti spojů [9], [10]. Testy, které provedli autoři Vaux a kol. [9], prokázaly významný vliv prodloužení stavitelné základové patky na celkovou stabilitu konstrukce. Zvyšování patky na maximum způsobilo výrazné snížení únosnosti konstrukce. Také samotné zanedbání excentricity může značně zkreslovat výslednou únosnost. V případě rámu, který byl zatížen centricky, byla vypočtená únosnost oproti skutečnosti o 10% vyšší.

Beale a kol. [27] ve své publikaci uvádějí, že kritické zatížení je silně ovlivněno tuhostí spojů (vykazují polotuhé chování), ovlivňující distribuci sil v prutech i stabilitu celé konstrukce. Svě závěry ověřili na čtyřech numerických modelech a vyhotovených experimentech. První tři modely byly identické a čtvrtý měl zrcadlově obrácený systém ztužení a poslední patro bylo o 0,2 m nižší. Výsledky prezentovaly citlivost analýzy i na malé změny. Výzkum ukázal, že hlavní příčinou odlišného chování lešení je přerozdělení zatížení do sloupků v závislosti na použitém schématu ztužení (kotvení), další příčinou rozdílného chování jsou pak vlastnosti spojů.

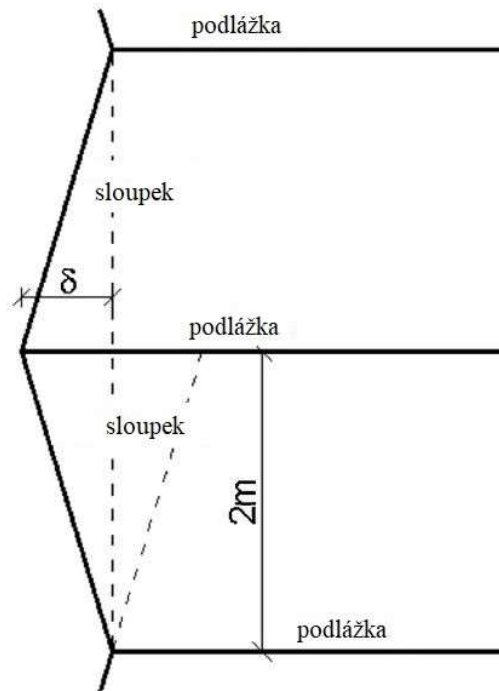
Stabilitu celé konstrukce mohou (většinou příznivě) ovlivňovat i prvky, jejichž tuhosti bývaly dříve ve výpočtech často zanedbávány, např. podlahové dílce. Blazik-Borowa a kol. [28] se zabývali mimo jiné jejich vlivem na únosnost konstrukce (více k této publikaci v kapitole 2.2.3).

Autoři Blazik-Borowa a kol. [29] popsali vliv imperfekcí na vnitřní síly v jednotlivých prvcích lešení. Normy ČSN EN 12 811-1 [30] a ČSN EN 1993-1-1 [31] definují tři metody, jak aplikovat počáteční deformace:

1. aplikace horizontálního náhradního zatížení [31],
2. zohlednění posunu uzlů na jednom patře, kde posun podlah po sobě následujících musí být v opačném směru a směr posunu by měl být stejný jako horizontální zatížení, obvykle vítr [30],
3. aplikace imperfekcí podle tvaru plynoucího z lineární stabilitní analýzy [30],[31].

Ve svém výzkumu porovnávali vliv imperfekcí uvažovaných pomocí 2. a 3. metody (1. a 2. přinášely podobné výsledky). Autoři se zabývali pouze sloupký a ztužidly, neboť napětí v ostatních prvcích vykazovalo zanedbatelné hodnoty nebo nevykazovalo žádnou citlivost na imperfekce. Provedením nelineární statické analýzy došli k závěrům, že imperfekce téměř nemají vliv na normálové síly, ale mají významný vliv na ohybové momenty (imperfekce způsobují excentricitu zatížení normálovými silami, to pak vede ke zvyšování ohybových momentů). Vnitřní síly ve ztužení lešení jsou citlivé na imperfekce ve všech situacích.

Obě metody modelování imperfekcí na lešení o výšce až 24 m vedly k podobným výsledkům, proto autoři doporučili ve fázi návrhu lešení použít metodu modelování imperfekcí, která je pro zvolený software jednodušší. Kromě toho prokázali, že největší vliv na vnitřní síly mají imperfekce u spodních prvků lešení, které jsou namáhány největšími osovými silami. S nárůstem zatížení se zvyšuje citlivost vnitřních sil na imperfekce. Na obr. 19 je schéma modelování geometrických imperfekcí zavedením posunu uzlu δ .



Obr. 19: Schéma modelování geometrických imperfekcí pomocí posunu δ [29]

Peng a kol. [32] se zabývali vlivem excentricity od zatížení, která působí na vzpěrnou únosnost konstrukce. Ve výzkumu se zabývali ocelovým fasádním rámovým lešením (tvar: door-type). Ve své práci zohledňovali vliv přítomnosti a nepřítomnosti ztužení v dolních patrech a vliv založení lešení. Vliv kotvení a spojů zde nebyl brán v potaz. Jako nejdůležitější poznatek této publikace lze uvést vliv založení lešení na vzpěrnou únosnost. Založení konstrukce na pevném podkladě může vést k výraznému zvýšení únosnosti celé konstrukce (u osmipatrového lešení může být vzpěrná únosnost 2,4x větší).

2.4 STATICKÉ POSOUZENÍ DÍLCOVÉHO FASÁDNÍHO LEŠENÍ

Dílcová fasádní lešení mají do výšky 24 m zpravidla zpracovanou typovou dokumentaci. Pro větší výšky konstrukce už mají být lešení staticky posouzena [33].

Lineární globální analýza poskytuje spíše konzervativní výsledky pro posouzení únosnosti konstrukce a je vhodná pouze pro předběžný návrh nebo pro provádění počátečních analýz, například pro určení, v jakých prvcích je třeba očekávat největší napětí. Pro určení únosnosti a pro získání reálnějších a přesnějších výsledků je nutné použít geometricky nelineární globální analýzu [7], [28].

Pro statický výpočet fasádního lešení se v běžné praxi používají normy ČSN EN 12 811-1 [30] a ČSN EN 12 810-2 [34]. Norma [34] udává postup statického výpočtu, který je založen na kombinaci dvou rovinných modelů (více v kapitole 2.6.1).

Postup statického návrhu rámového fasádního lešení lze rozdělit na dva druhy výpočtu: přístup 1 a přístup 2, nebo se také používá označení cesta 1 a cesta 2. Rozdíl mezi nimi spočívá v provedení globální analýzy pro výpočet vnitřních sil. Přístup 2 předpokládá výpočet prvním řádem, přístup 1 výpočet druhým řádem [34], [35]. Následující tabulka demonstruje návrh dílcového lešení pro oba přístupy.

Tab. 1: Etapy navrhování konstrukce dílcového lešení [34][33].

Etapa řešení	Přístup 1		Přístup 2	
	Modulové a rámové systémy		Pouze rámové systémy	
1	Zkoušky sestav, spojovacích prostředků a dílců			
2/3	Výpočet všech systémových sestav typového provedení			
2			Stanovení α_{cr}	
			Pokračování v cestě 2 pouze jestliže $\alpha_{cr} \geq 2$; jestliže $\alpha_{cr} < 2$ přejít na cestu 1	
3	3a	Řešení konstrukce pro určení rozdělení používaných sil a momentů		
		Teorie druhého řádu	Teorie prvního řádu se součinitelem zesílení na základě α_{cr}	
	3b	Řešení jednotlivých dílců a spojů k ověření odpovídající únosnosti		
4	Jedna zkouška na reprezentativní části systémové sestavy			
	Typ 1 Pro ověření chování při významných posunech pod zatížením		Typ 2 Pro ověření α_{cr}	
α_{cr} je nejnižší součinitel pružného vzpěrného zatížení aplikovaný na návrhové zatížení				

V obou případech je nejprve nutné provést zkoušku tuhosti podlah a poté vytvořit rovinné modely, na nichž se stanoví vnitřní síly. Pro řadu konstrukcí zejména s komplikovanější dispozicí je ovšem tento způsob jen velmi těžko použitelný [35].

2.5 NUMERICKÉ MODELKY

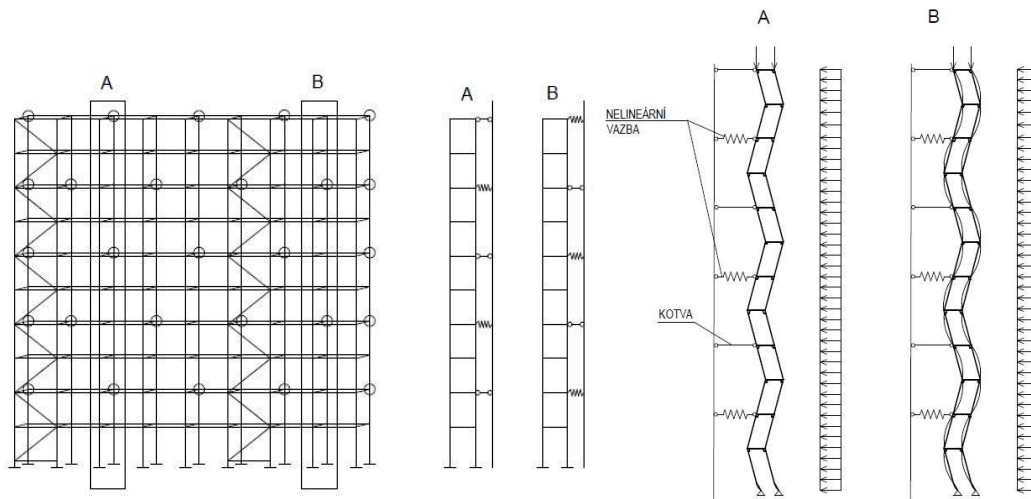
Nedostatečné statické posouzení spolu s nedbalostí a neodbornou manipulací s lešením jsou hlavními příčinami havárií lešení. Problematika stanovení únosnosti, závislosti pootočení na namáhání a rotační kapacity styčnicků se postupně zdokonaluje, nicméně chování styčnicků u lešeňových konstrukcí je stále nedostatečně prozkoumané. Základním problémem při statickém návrhu dílcového lešení je vytvoření prostorového modelu. Jeho vytvoření je s ohledem na nelineární chování převážně podlahových dílců a styčnicků obtížné. Prakticky se dosud používají jen zjednodušené rovinné modely, které nepostihují všechny konfigurace lešeňových sestav [1].

Samotné vyhotovení numerického modelu závisí na řadě proměnných a okrajových podmínek. Jak modelovat spoje mezi jednotlivými prvky konstrukce je alfou omegou celé problematiky. Také je důležité uvážení počátečních deformací, geometrických a materiálových imperfekcí a správné určení jejich velikostí.

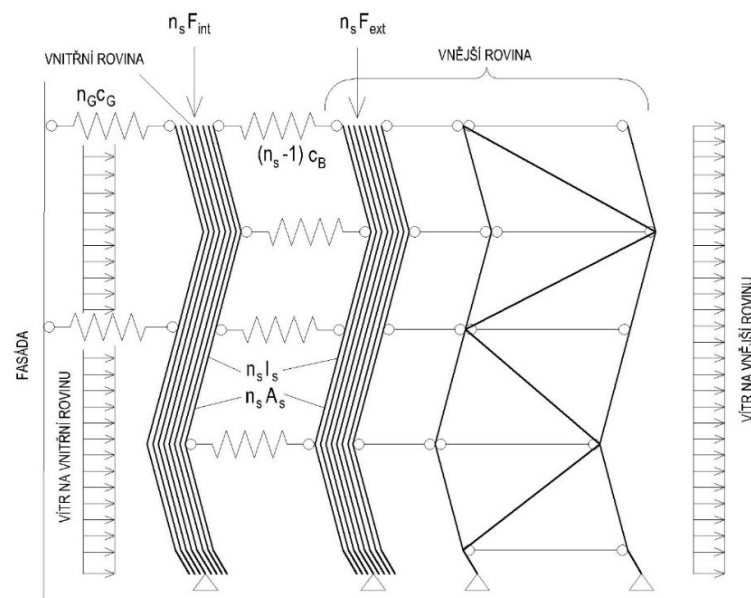
2.5.1 NÁHRADNÍ DVOJROZMĚRNÉ SYSTÉMY

Bamm [38], Nather a kol. [39] vytvořili metodiku využívající rovinné modely. Tuto metodiku také převzala norma [33]. Využívá principu spolupůsobení dvou rovin rovnoběžných s fasádou (rovina vnější a vnitřní) a zakládá se na tom, že obě roviny jsou modelovány vedle sebe a jsou propojeny vazbou.

Cílem je nahradit prostorové spolupůsobení vazbami zohledňujícími tuhost navazujících částí lešení. Zohledňují se roviny kolmo k fasádě a roviny rovnoběžné s fasádou. Na obr. 20 je příklad systému kolmo k fasádě. Provede se výsek rámové roviny lešení a spolupůsobení sousedních rámtů, které jsou často kotveny v jiných úrovních, se zohlední pomocí vazeb v jejich rovinách. Chování těchto vazeb je téměř vždy nelineární a odpovídá vodorovným tuhostem podlahových systémů [35].



Obr. 20: Příklad náhradních rovinných systémů v rovině kolmo k fasádě [35]

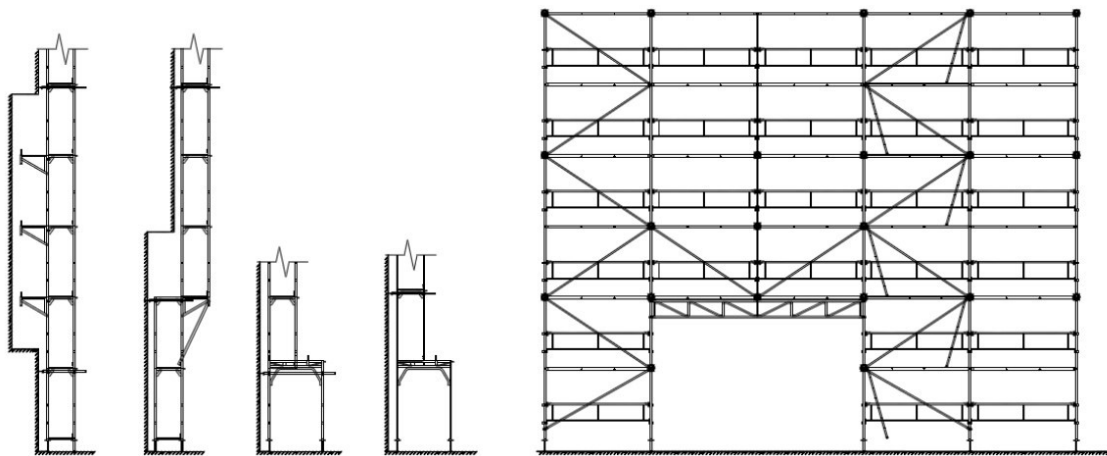


Obr. 21: Příklad systému podél fasády [35]

Podobný princip je použit u systému rovnoběžného s fasádou, ale tento případ je trochu komplikovanější. Obě roviny vstupující do modelu mají výrazně odlišnou tuhost. Vnitřní rovina sloupků je opřena do fasády pomocí kotev, které musí být schopné přenášet vodorovné síly. Vnější rovina je zpravidla doplněna diagonálním ztužidlem. Obě roviny jsou propojeny podlahovými dílci, které mají nelineární tuhost [35]. Příklad náhradního rovinného systému rovnoběžně s fasádou podle [38] je na obr. 21.

Významný vliv na velikost vnitřních sil mají imperfekce. U dílcových lešení zpravidla není možné zanedbat vůle v uložení podlahových dílců a v nastavení ráků, popř. v upevnění zábradlí [35].

Tento přístup statického výpočtu fasádního lešení je velmi komplikovaný a časově náročný. Je třeba provádět velký počet výpočtů rovinných modelů a v případě, kdy je posuzována např. stabilita sloupku v rovinném systému kolmo k fasádě, je nutné uvažovat i vybočení sloupku podél fasády (vybočení z roviny). Tento výpočet se provede zohledněním dalšího rovinného modelu. V některých případech je obtížné nastavit lokální imperfekci prutů a pro některé komplikovanější případy není provedení 2D modelů vůbec možné, viz obr. 22 [37].



Obr. 22: Příklady sestav, kde není možné vytvořit rovinné modely [35]

Dolejš [37] uvádí další obtíže při modelování rovinných modelů a to ty, že rovinné modely podél fasády nezohledňují příznivý vliv dlouhých kotev, které používá řada systémů.

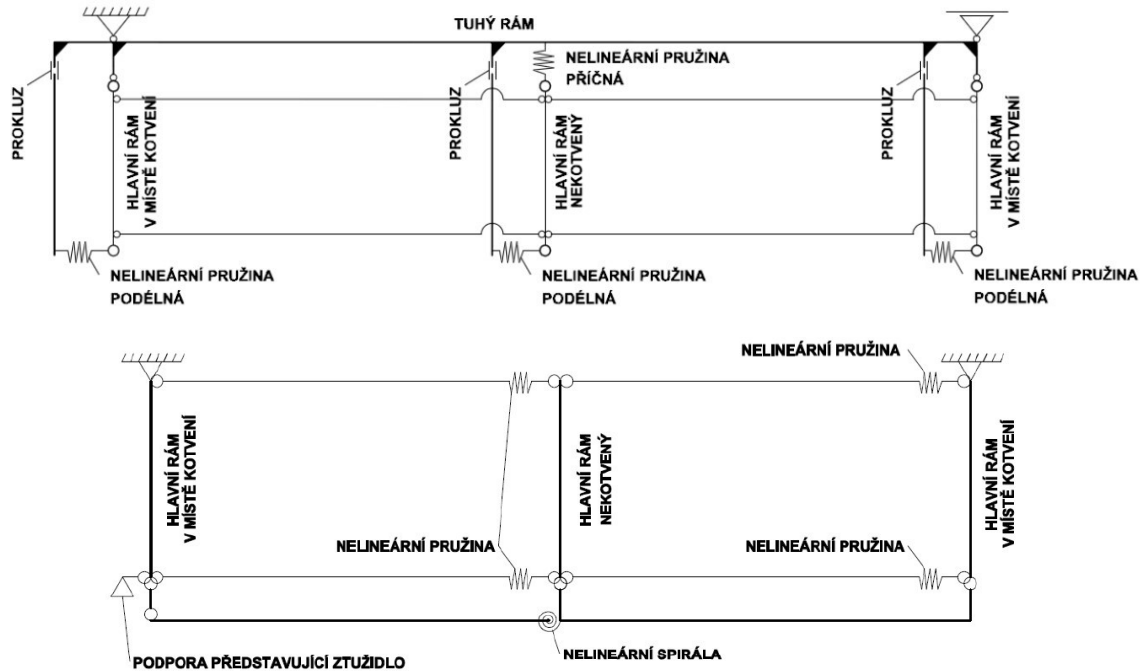
2.5.2 PROSTOROVÉ MODEL Y

Problematikou vytvoření výstižného prostorového modelu se zabýval Dolejš [1], [37]. Prezentoval dva způsoby modelování podlah – označení DOBR, DODR (obr. 23), které uvedené potíže částečně odstraňují, ovšem nejsou použitelné ve všech případech.

Model DODR (obr. 23 nahoře) využíval kloub s nelineární tuhostí v pootočení (nelineární spirálu) i nelineární pružiny v posunutí. Rovina podlah byla podepřena ve třech uzlech a byla doplněna o další pruty v podélném směru. Ne zcela v souladu s dispozicí zkoušky byla v modelu použita také podpora představující podélné ztužidlo na vnějším líci lešení. Nelineární pružiny sloužily k simulaci tuhosti podlahových dílců při zatížení v podélném směru, nelineární spirály simulovaly tuhost při příčném zatížení. Veškerou reakci deformace vnitřního rámu přebírala podpora, která představovala podélné ztužidlo, které ale chybělo při zkoušce [37].

Model DOBR (obr. 23 dole) vycházel z obdobných principů jako model DODR. Nelineární pružiny byly pouze posuvné, systém byl od počátku doplněn o kotvený tuhý vnější rám, v podélném

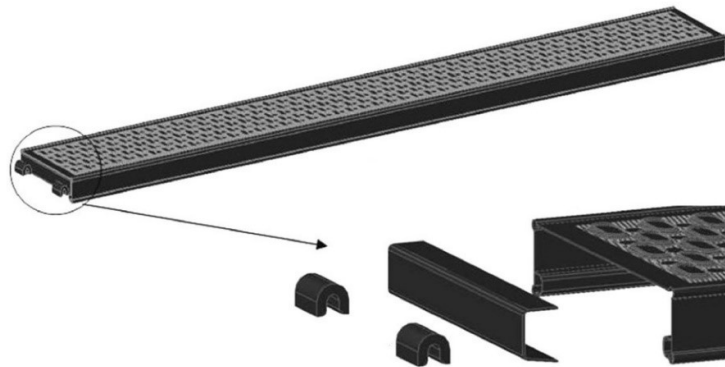
směru měl systém tři nelineární pružiny, jejichž pracovní diagram byl náležitě upraven. Podobně jako model DODR i model DOBR byl vytvořen tak, aby odpovídal provedeným zkouškám. V publikaci [37] se uvádí, že zabudování tohoto modelu do konstrukce kompletního fasádního systému má řadu omezení. Chování podlahy se významně změní použitím dlouhých kotev a zejména zatěžováním vnitřních sloupků (které jsou zde fixní) [37].



Obr. 23: Model DODR (nahore), model DOBR (dole) [37].

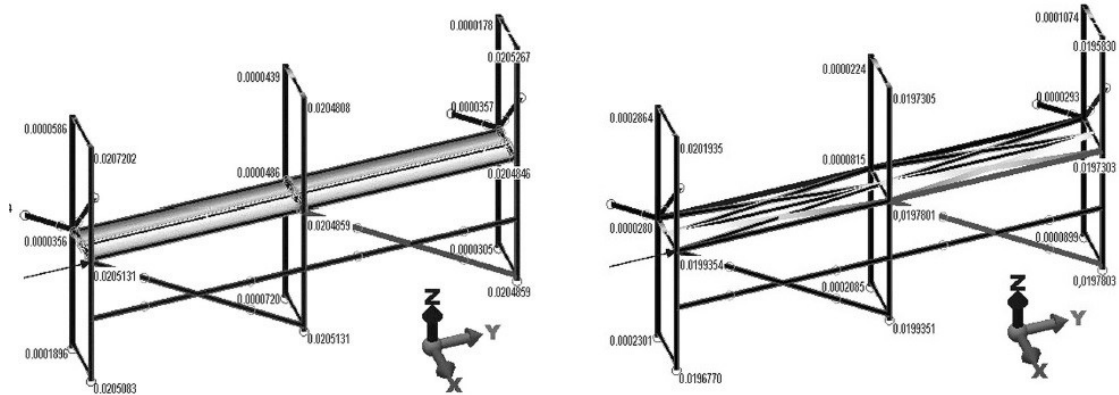
Některé výsledky ze zkoušek neodpovídaly zcela skutečnému chování konstrukce. To bylo způsobeno hlavně nedostatkem vstupních informací (nedostatek měřících bodů), protože posuny se při zkouškách standardně měří pouze u dvojice podpor a v místě působící síly.

Blazik-Borowa a kol. [28] pro svůj výzkum definovali tři typy možností modelování podlahových dílců. První byl prostorový model jedné desky (obr. 24), kde byla perforovaná deska modelována pomocí skořepinového nosníku. V tomto případě bylo možné použít lineární i nelineární analýzu za předpokladu, že napětí v modifikovaných deskových elementech nedosáhne meze kluzu.



Obr. 24: Ocelová perforovaná podlážka [28]

Druhý model je rovinný model desky (zjednodušený model), ve kterém jsou aplikované prvky skořepin a nosníků (obr. 25 vlevo). Poslední, třetí model podlahy, je složený z příhradových nosníků. Příhradový nosník sloužil pouze pro simulování tuhosti desky a nepřenášel žádná zatížení (obr. 25 vpravo). V posledních dvou případech se jednalo pouze o lineární statický výpočet. Z výzkumu vyplývá, že v případě rozsáhlejších modelů fasádního lešení je vhodné kombinovat druhý a třetí model podlah. V místech, kde je uvažováno zatížení, např. od uskladněného materiálu, autoři doporučují použít model č. 2 a pro zbylé podlážky bez zatížení model č.3.



Obr. 25: Model č. 2 (vlevo) a model č. 3 (vpravo) [28]

Problematikou se také začaly zabývat některé statické softwarové firmy např. SCIA A NEMETSCHek COMPANY [40], která začátkem roku 2020 vydala update manuálu pro modelování lešení v jejich softwaru. V publikaci upozorňují na důležitost zohlednění nelineárního chování konstrukce při vytváření modelu lešení a popisují, jak tuto konstrukci modelovat. Nezaměřují se jen na modelování podlah, ale i na ostatní prvky a spoje konstrukce lešení. V publikaci není ale jednoznačně uvedeno, že je do výpočtu nelineární chování podlahových dílců zavedeno. Z obrázků, a také webinarů [41] je patrné, že chování podlahových dílců je zohledněno pomocí přidání mezery o velikosti 17 mm.

3 CÍLE PRÁCE

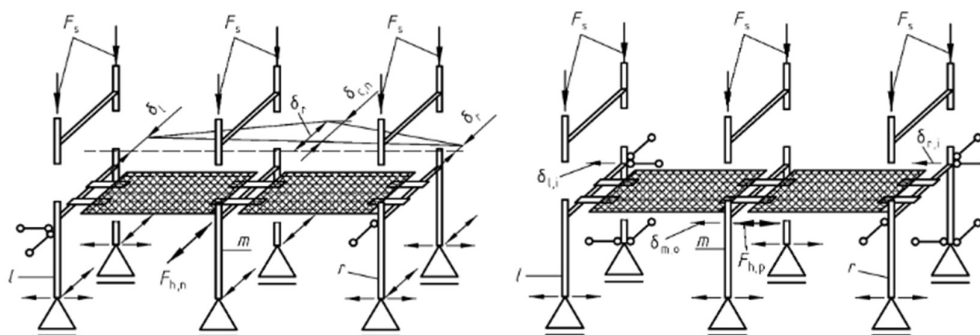
Cílem této disertační práce je připravit metodiku pro modelování fasádních dílcových lešení s využitím funkčního prostorového modelu podlahového dílce.

Výstupy (metodika modelování systémových fasádních lešení) budou připraveny pro implementaci do existujícího inženýrského softwaru. Tím bude výsledek využitelný pro široké spektrum uživatelů – projektantů lešení, zejména pro netypické sestavy lešení (s odskoky kolem říms, průjezdy a jinými netypickými konfiguracemi).

Práce navazuje na habilitační práci Dolejše [1]. Ten se zabýval problematikou vytvoření prostorového modelu, prezentoval dva způsoby modelování podlah (modely DOBR a DODR), viz kapitola 2.5.2. Některé výsledky zkoušek nevypovídaly zcela o skutečném chování konstrukce. To bylo způsobeno hlavně nedostatkem vstupních informací (nedostatkem měřících bodů). Proto předložená práce vychází z nového experimentu na standardní základní sestavě s doplněním nových měřících bodů.

3.2 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Hlavním cílem experimentální části je snaha o co nejpřesnější popis chování lešení v rovině podlahy. Na obr. 26 je znázorněno běžně používané uspořádání zkušební sestavy podle normy [34], δ_i představuje měřené posuny. Oba experimenty byly doplněny o další měřící body, které se běžně u zkoušky tuhosti podlah lešení nepoužívají. Tyto doplňkové měřící body zaznamenávaly posuny ve směru kolmém na působící zatěžování.



Obr. 26: Typické zkušební uspořádání pro zkoušku kolmo k fasádě (vlevo) a rovnoběžně s fasádou (vpravo) [34]

Dalším cílem je vyhodnocení zkoušek (kolmo a rovnoběžně s fasádou) numericky a tím i určení tuhosti podlahového systému pomocí nelineární matice tuhosti, která bude použita v numerickém modelu lešení.

Cíle experimentální části:

- Provedení experimentů tuhosti podlah ve směru kolmo k fasádě;
- Provedení experimentů tuhosti podlah ve směru rovnoběžně s fasádou;
- Vyhodnocení experimentu podle ČSN EN 12 811-3, pro získání představy o tuhosti systému a určení vůle podlahových dílců;
- Vyhodnocení zkoušek graficky, pro znázornění reálného chování podlahového systému pro obě zkoušky;

- Vyhodnocení zkoušek numericky pro získání nelineární matice tuhosti podlahového systému pro obě zkoušky, která bude použita v numerickém modelu.

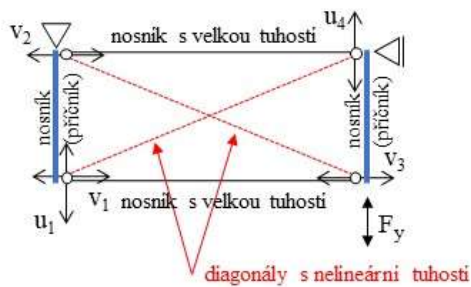
3.3 CÍLE NUMERICKÉ ČÁSTI

Numerická část práce byla provedena v inženýrské softwaru RFEM 5 od společnosti Dlubal Software s.r.o. Původní plán bylo vytvořit komponentu podlahy jako stěnový prvek, ten byl nakonec nahrazen funkčnějším řešením příhradového modelu s dvojicí diagonál s nelineárními tuhostmi (obr. 27).

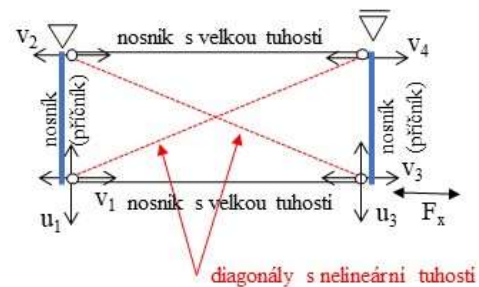
Cíle numerické části:

- Předběžné modely podlahového systému pro každou zkoušku zvlášť (kolmo a rovnoběžně s fasádou);
- Validace obou modelů (kolmo a rovnoběžně s fasádou) – získání tuhosti a vůle podlahových systému pro oba směry;
- Model podlahového dílce, který bude použitelný pro prostorové modelování rámového fasádního lešení;
- Verifikace modelu na prostorovém modelu o dvou polích.

KOLMO K FASÁDĚ



ROVNOBĚŽNĚ S FASÁDOU



Obr. 27: Schéma 2D modelů podlahových dílců pro odvození nelineární matice tuhosti

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola popisuje experimentální část práce. Popisuje provedení a vyhodnocení experimentu na standardní základní sestavě lešení.

Experiment vycházel z normy [36] a výzkumu Dolejše [1]. Norma [36] předepisuje schéma zkoušky, počet a umístění měřících bodů, které zaznamenávají průběh deformace (posunů) sestavy v rovině podlahy. Podle výzkumu Dolejše [1] je měření posunů podle [36] nedostačující pro získání přesné představy o průběhu deformací (posunů) podlahových dílců. Na tomto základě bylo schéma upraveno a doplněno o další měřící body.

Výsledky měření byly následně vyhodnoceny několika metodami: standardně podle normy [42], vytvořením animace průběhu zatěžování a numericky.

4.1 POPIS POUŽITÉHO LEŠENÍ PRO EXPERIMENT

Pro tyto zkoušky bylo použito lešení „Sprint 75“.

Základním prvkem lešení SPRINT jsou uzavřené svařované ocelové rámy o osové šířce 0,75 m nebo 1,09 m. Výška jednoho patra může být 0,66 m, 1,0 m nebo 2,0 m a délka jednoho pole 0,75 m, 1,09 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m nebo 3,0 m. [43]

Seznam komponentů lešení Sprint použitých pro zkoušku:

- Rám pevný;
- Podlážka ocelová;
- Zábradlí jednoduché;
- Stavitelná patka.

SPRINT Rám pevný

Bylo použito celkem 6 kusů rámu s osovou šířkou 0,75 m a výškou 1,0 m. Sloupky jsou z trubek o průměru 48,3 mm a tloušťce stěny 3,2 mm z žárově zinkované oceli S235JR. Rám obsahuje přípojné místa pro boční a koncové zarážky a také pro vnější a vnitřní zábradlí a úhlopříčné podélné ztužení.

Rám pevný je na obr. 28 a).

SPRINT podlážka ocelová

Ocelová podlážka je tenkostěnný děrovaný profil opatřený čely a háky, které slouží k uložení podlážky do příčnicku rámu. Povrch je upraven žárovým zinkováním. Podlážka také obsahuje dvě madla a háky pro snazší manipulaci.

Ocelová podlážka má šířku 335 mm. Do jednoho pole se umísťují dvě ocelové podlážky. Pro zkoušku na standardní základní sestavě byla uvažovaná délka pole 3,0 m, tudíž byla použita podlážka o délce 3,0 m.

Ocelová podlážka je na obr. 28 b).

SPRINT zábradlí jednoduché

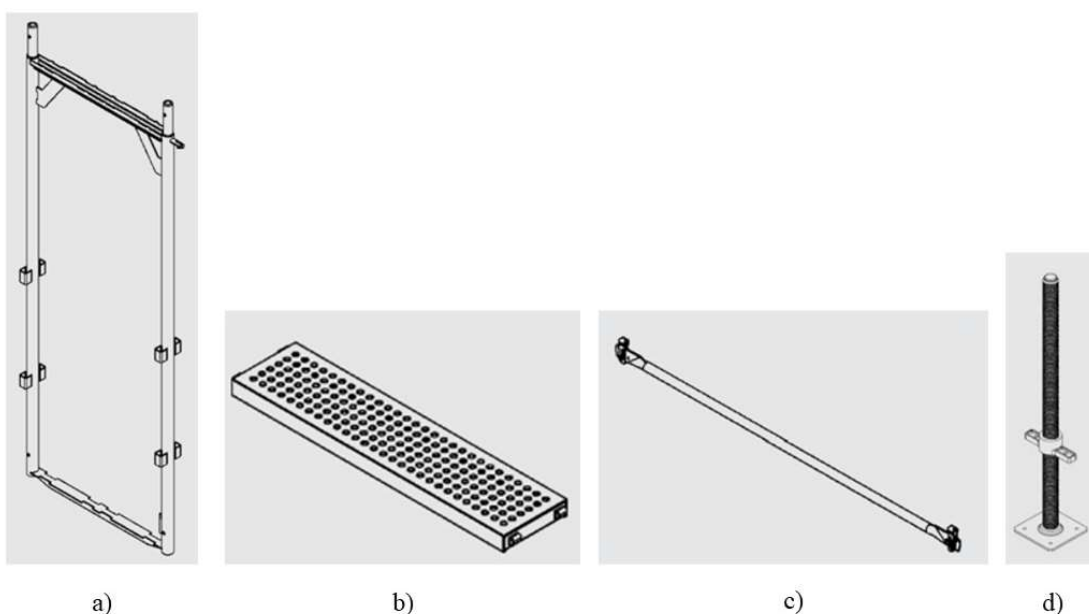
Byly použity 4 kusy jednoduchého zábradlí o délce 3 m. Madlo zábradlí je z trubky o průměru 40 mm a tloušťce stěny 2,0 mm. Povrchová úprava je provedena žárovým zinkováním.

Zábradlí jednoduché je na obr. 28 c).

SPRINT stavitelná patka

Stavitelná patka slouží k výškovému vyrovnání rámu při založení na nerovném terénu. Velikost rozpětí, ve kterém se dá nastavit výška patky je od 65 mm do 345 mm. Matice stavitelné patky je opatřena madly. Povrchová úprava je provedena žárovým zinkováním. [43]

Stavitelná patka je na obr. 28 d).



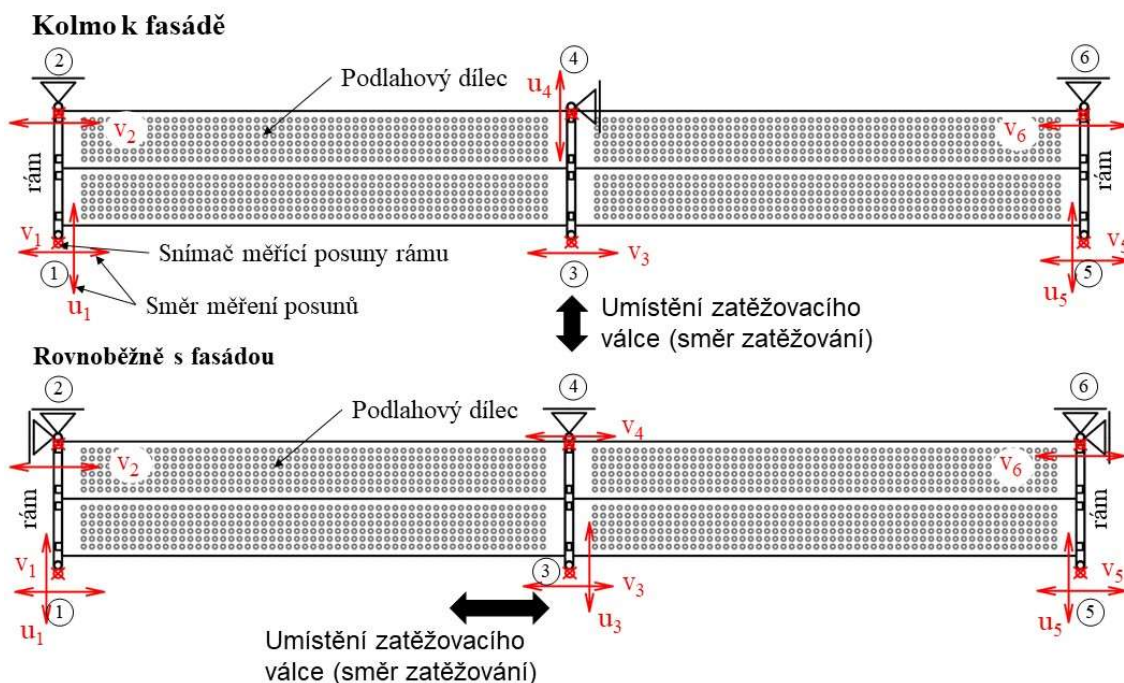
Obr. 28: Použité komponenty lešení SCARSEV „Sprint 75“ [43]

4.2 ZKOUŠKY TUHOSTÍ PODLAH

Byly provedeny celkem dva experimenty na standardní základní sestavě lešení. Cílem měření bylo co nejlépe popsat chování podlah lešení ve dvou vzájemně kolmých směrech (směr podélný a příčný). Měření tuhostí a vůlí podlahových dílců lešení vycházelo z předešlého výzkumu Dolejše [1] a z normy [33].

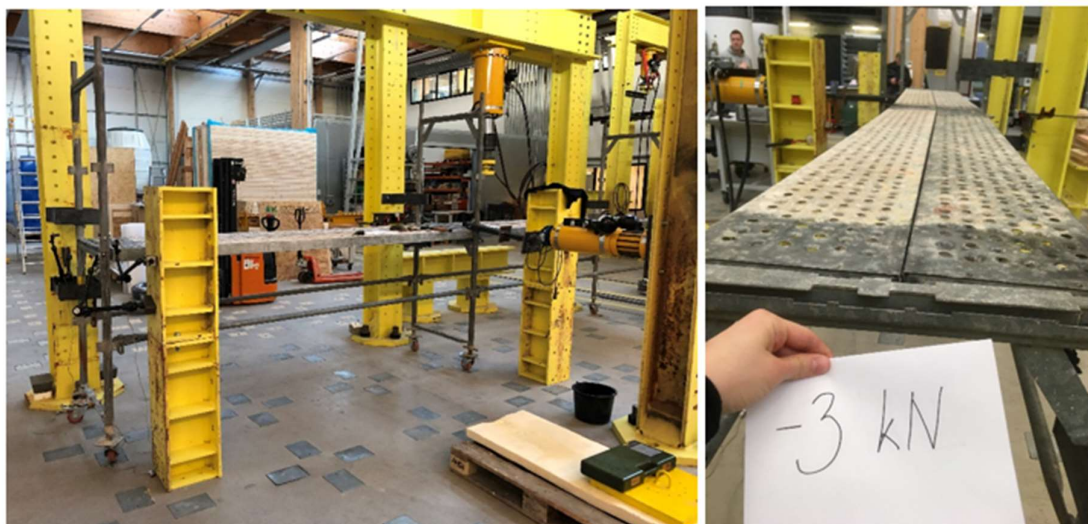
Jako výchozí byla použita normová schémata dle normy [33], která byla pro potřeby výzkumu upravena a byla doplněna dalšími měřicími body. Pro tyto zkoušky bylo použito lešení SPRINT 75 a byly použité snímače typu NOVOTECHNIK TRS 0100 a lankové snímače wireSENSOR WDS-P60.

Směry namáhání při zkouškách jsou vztaženy k fasádě, konkrétně zkouška kolmo k fasádě a zkouška rovnoběžně s fasádou (příčně, podélně). Na obr. 29 jsou znázorněna schémata zkoušek pro zjištění tuhosti a vůlí podlahových dílců. Tyto zkoušky byly provedeny na standardní základní sestavě lešení o dvou polích (tři rámy), které jsou propojené podlážkami. Červeně, šipkou a písmeny *u* a *v* jsou vyznačeny posuny sloupků rámu, které byly měřeny.



Obr. 29: Schéma měřících bodů pro obě zkoušky.

Norma [33] doporučuje měření posunů jen ve směru působícího zatěžování. Kvůli výrazně nelineárnímu chování podlahy v obou směrech (které vzniká díky způsobu uložení podlahy do kapsy příčle rámu) byly experimenty doplněny o další měřící body, které měřily posuny ve směru kolmém na zatěžovací sílu. Snímače byly umístěny na sloupcích rámu co nejblíže k podlaze lešení. Zatěžování bylo provedeno pomocí válce v rovině podlahy. Rámy lešení byly chyceny vždy ve dvou bodech, nad a pod úrovní podlahy.



Obr. 30: Fotografie ze zkoušky tuhosti podlahy lešení kolmo k fasádě

Zatěžování se provádělo v cyklech, kde zatěžovací síla i posuny v rámci jednoho cyklu měnily orientaci a vždy vycházely a končily v nulové pozici (zatížení – odlehčení). Lešeňová sestava nebyla při zkouškách jinak zatížena. Na základě materiálů od výrobce [41] byla zvolena maximální zatěžovací síla na ± 5 kN pro zkoušku kolmo k fasádě.

Zkouška kolmo k fasádě (obr. 30) probíhala v šesti zatěžovacích cyklech. První cyklus se zatěžovalo do 1 kN, následně se odtížilo do nulové pozice a pak se zatěžovalo do -1 kN a opět odtížilo do nulové pozice. Tento postup byl obdobný i pro další cykly v hodnotách $\pm 1,5$ kN, ± 2 kN, ± 3 kN, ± 4 kN a ± 5 kN.



Obr. 31: Fotografie ze zkoušky tuhosti podlahy lešení rovnoběžně s fasádou.

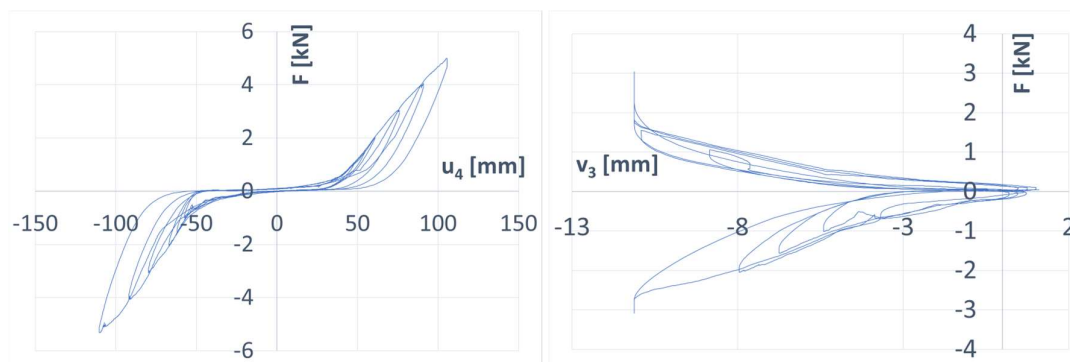


Obr. 32: Osmý zatěžovací cyklus, vpravo – deformace středního rámu.

Pro zkoušku rovnoběžně s fasádou (obr. 31) nebyly k dispozici podklady od výrobce, proto zkouška probíhala až do vzniku plastické deformace. Plastická deformace vznikla při 8. zatěžovacím cyklu (± 7 kN) na středním rámu (obr. 32), kdy se začal deformovat příčník rámu. Pro vyhodnocení zkoušky rovnoběžně s fasádou bylo použito sedm zatěžovacích cyklů do hodnoty ± 6 kN. Zatěžovací cykly pro zkoušku rovnoběžně s fasádou probíhaly v hodnotách ± 1 kN, $\pm 1,5$ kN, ± 2 kN, ± 3 kN, ± 4 kN, ± 5 kN, 6 kN a 7 kN.

4.2.1 ZKOUŠKA PODLAHY KOLMO K FASÁDĚ

Naměřená data ze zkoušky byla následně přenesena do grafů. Na obr. 33 jsou znázorněny záznamy měření posunů v závislosti na zatěžovací síle F [kN] na středním rámu, vlevo jsou deformace ve směru příčném u_4 [mm] měřené na předním sloupku, vpravo jsou deformace ve směru podélném v_3 [mm] měřené na zadním sloupku středního rámu.

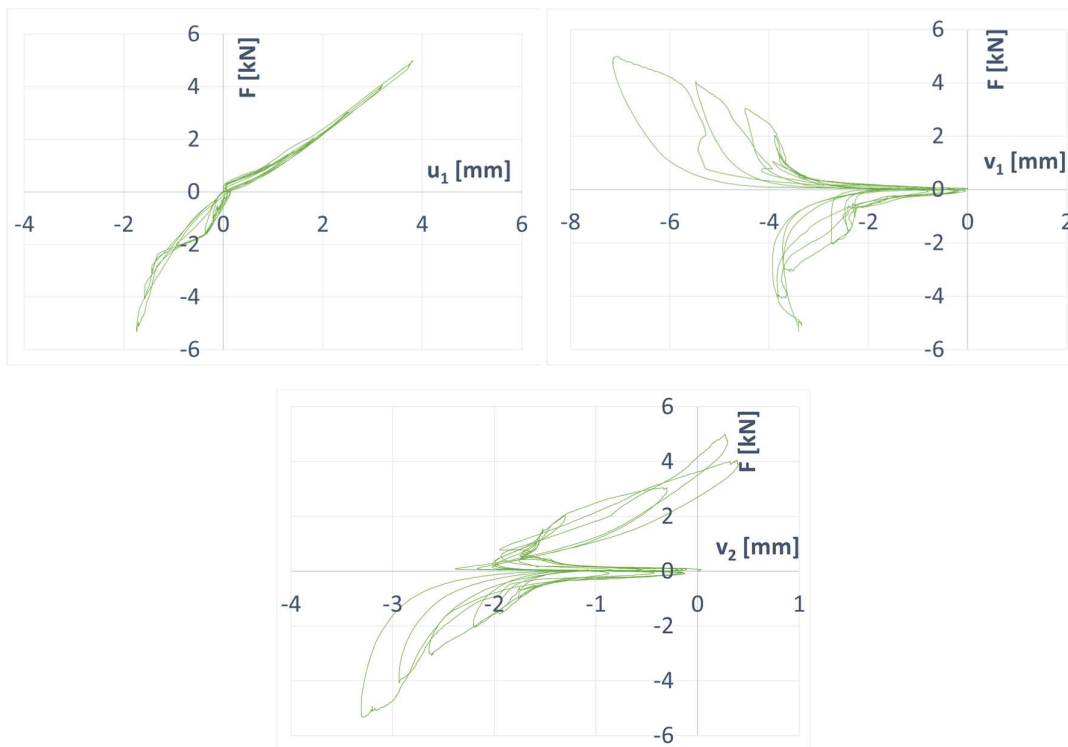


Obr. 33: Záznam měření posunů u_4 (vlevo) a posunů v_3 (vpravo) na středním rámu

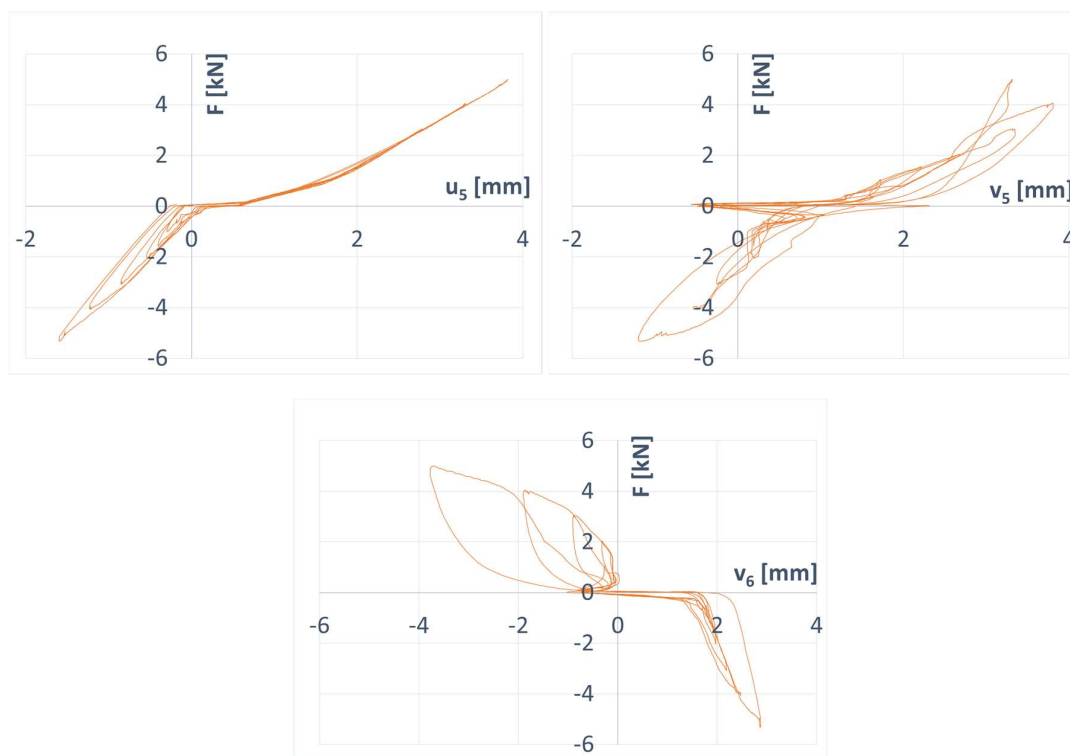
Jak již bylo zmíněno, norma [33] doporučuje měření posunů v příčném směru (u_i). Pro získání přesnější představy o chování lešení v rovině podlahy, byly zkoušky doplněny o měřící body v podélném směru (v_i).

Na grafu vlevo (obr. 33) je vidět, že pro posun menší jak 40 mm, je tuhost prakticky nulová. K aktivaci tuhosti dojde až při větších deformacích. Deformace v podélném směru (obr. 33 vpravo) je výrazně menší než v příčném směru. V praxi se pak průběh deformací zjednodušuje trilineární funkcí [1]. Na obr. 33 na grafu vpravo jsou znázorněny jen první čtyři cykly, protože během zkoušky došlo k odpadnutí snímače na středním předním sloupku. Pro další postupy, jako je určení volnosti a tuhosti budou pro vyhodnocení použity první čtyři zatěžovací cykly u všech deformací.

Na obr. 34 a obr. 35 jsou záznamy měření posunů na rámech vlevo a vpravo. Posuny u_i jsou posuny působící ve směru působící síly (příčný posun), měřené na předních sloupcích levého (u_1) a pravého (u_5) rámu. Posuny v_i jsou posuny působící ve směru kolmém na zatěžovací sílu (podélný posun), v_1 a v_5 jsou posuny na předních sloupcích levého (v_1) a pravého (v_5) rámu, v_2 a v_6 jsou posuny na zadních sloupcích levého (v_5) a pravého (v_6) rámu. Viz také schéma na obr. 29.



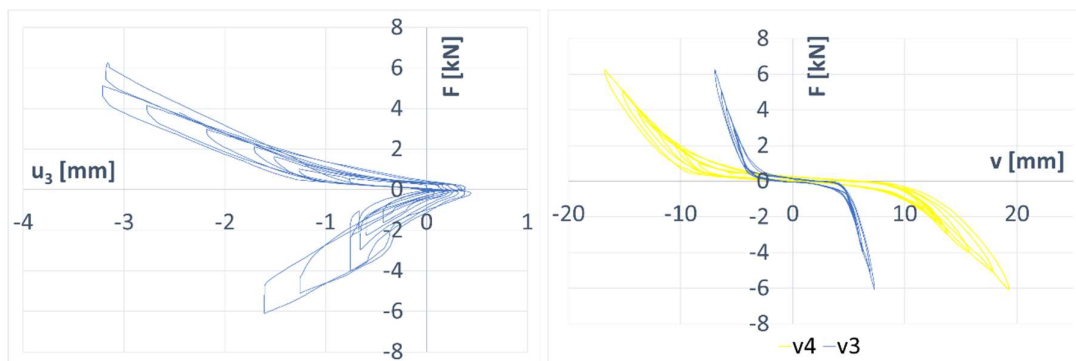
Obr. 34: Záznam měření posunů ze zkoušky kolmo k fasádě (pravý rám)



Obr. 35: Záznam měření posunů ze zkoušky kolmo k fasádě (levý rám)

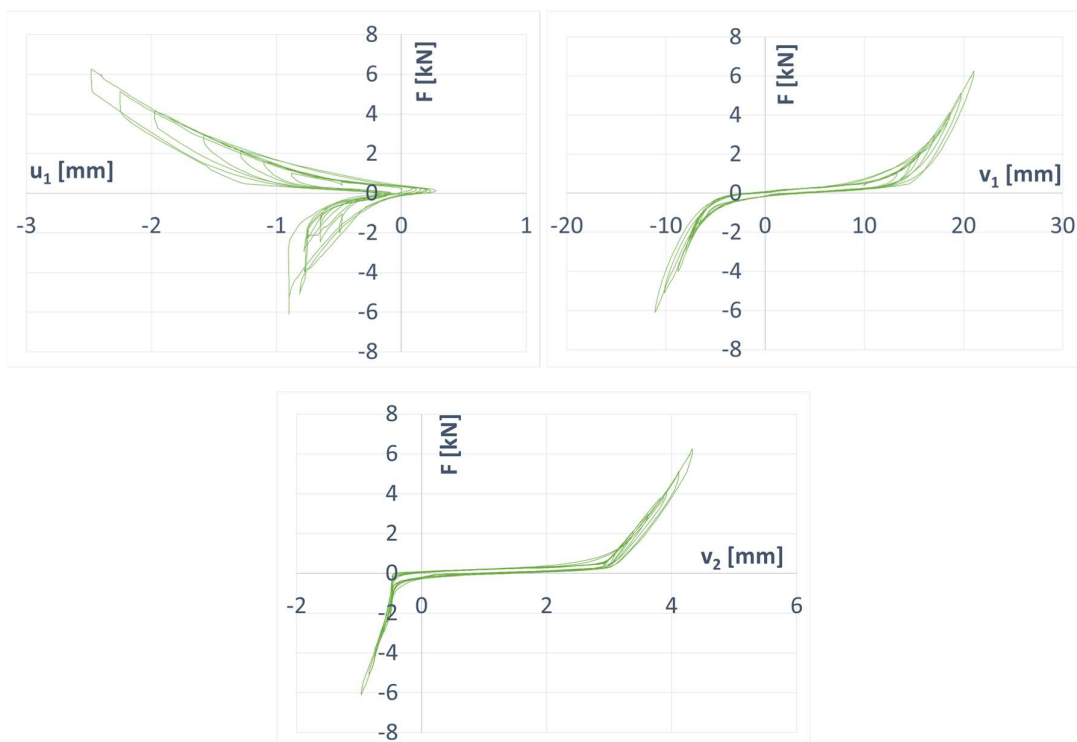
4.2.2 ZKOUŠKA PODLAHY ROVNOBĚŽNĚ S FASÁDOU

Na obr. 36 jsou znázorněny záznamy měření posunů v závislosti na zatěžovací síle F [kN] na středním rámu, vlevo jsou posuny ve směru příčném u_3 [mm] měřené na předním sloupku, vpravo jsou posuny ve směru podélném v_3 [mm] měřené na předním sloupku a v_4 [mm] měřené na zadním sloupku.

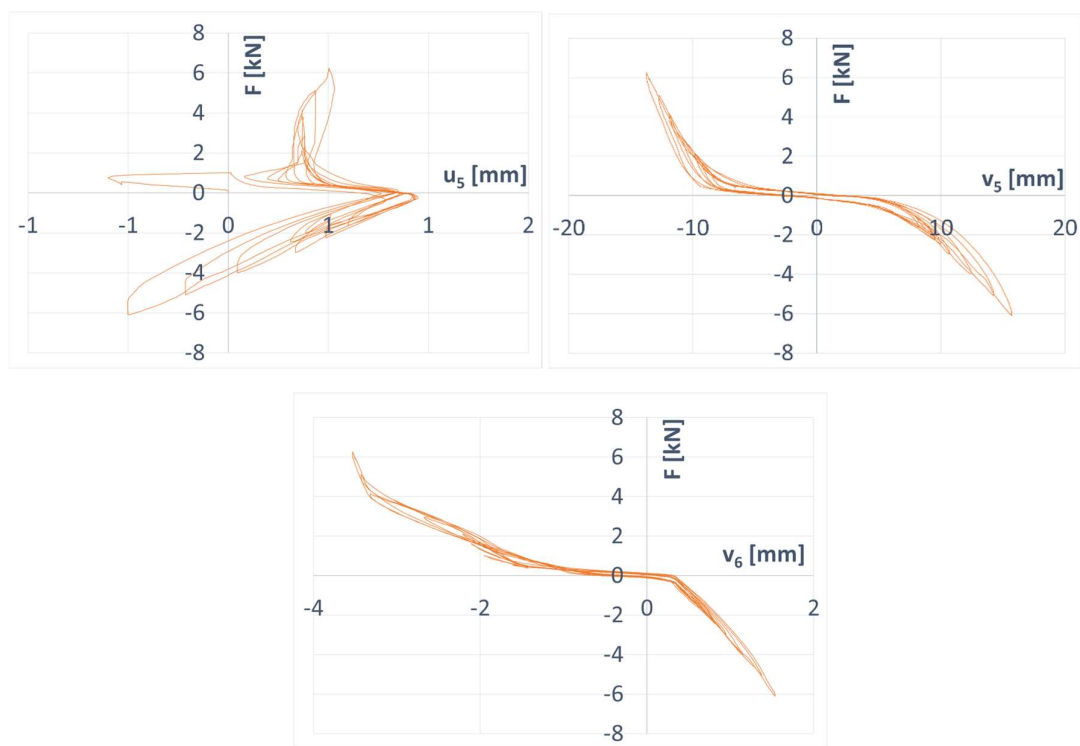


Obr. 36: Záznam měření posunů u_3 (vlevo), v_3 a v_4 (vpravo) na středním rámu.

Na obr. 37 a obr. 38 jsou zbývající záznamy měření posunů na rámech vlevo a vpravo. Posuny v_i jsou posuny působící ve směru síly (podélný posun) měřené na předních sloupcích levého (v_1) a pravého (v_5) rámu a zadních sloupcích levého (v_2) a pravého (v_6) rámu. Posuny u_1 a u_5 působí ve směru kolmém na zatěžovací sílu (příčný posun) měřené na předních sloupcích levého (u_1) a pravého (u_2) rámu. Viz také schéma na obr. 29.



Obr. 37: Záznam měření posunů ze zkoušky rovnoběžně s fasádou (pravém rámu)



Obr. 38: Záznam měření posunů ze zkoušky rovnoběžně s fasádou (levém rámu)

Z hodnot naměřených deformací u zkoušky rovnoběžně s fasádou je patrné, že pro tento směr zatěžování je lešení v rovině podlah výrazně tužší než pro směr zatížení kolmo na fasádu.

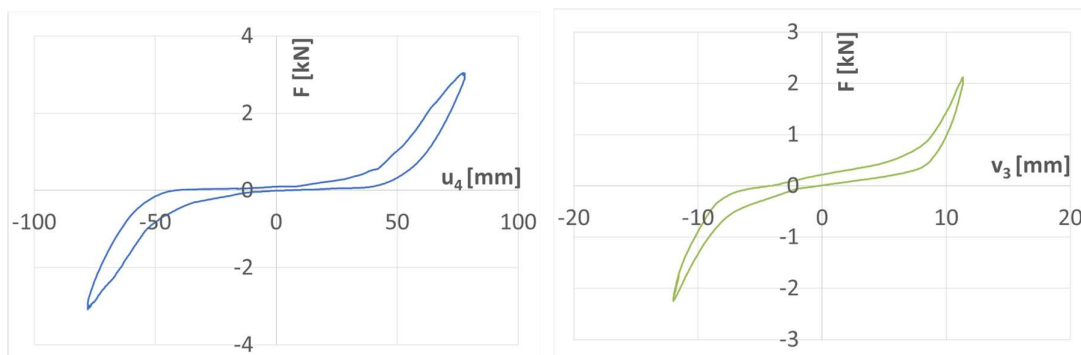
4.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

4.3.1 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU PODLE ČSN EN 12 811-3

Výsledkem zkoušky je pracovní diagram podlahy zobrazující i volnosti spojovacích prostředků mezi podlahovou rovinou a rámy. Zkoušky tuhosti podlahových dílců lešení se vyhodnocují podle normy ČSN EN 12 811-3 [42], kde se získají hodnoty tuhosti a únosnosti podlahového systému. [1]

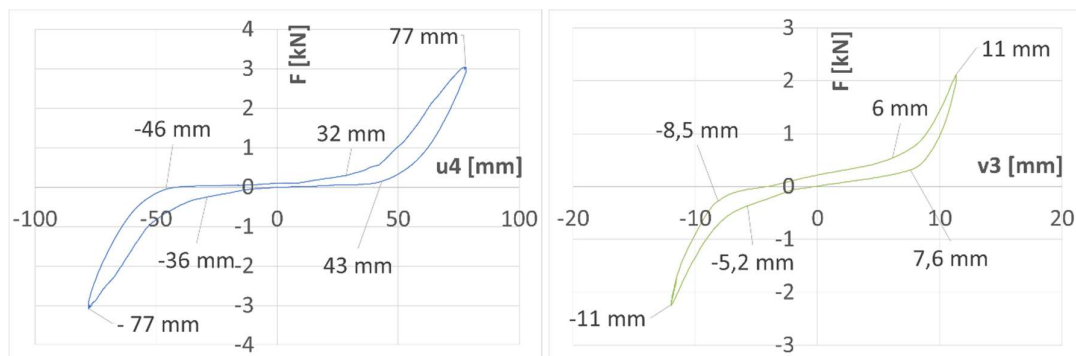
Vyhodnocení tuhostí podlahy je provedeno na středním rámu (na který působilo zatížení) pro deformaci ve směru zatěžovací síly. V normě [42] je doporučeno pro vyhodnocení použít třetího nebo následujícího zatěžovacího cyklu. Vyhodnocení bylo provedeno pro 4. zatěžovací cyklus.

V normě [42] se uvádí, že pro znázornění chování, v našem případě při posunech, které byly zjištěny během zkoušek zatěžováním a odlehčováním, se upřednostňuje vhodná aproximační funkce pomocí metody nejmenších čtverců chyb. Aproximační funkce může být použita, jestliže korelační součinitel je $R^2 \geq 0,95$. V případech, ve kterých není možné popsat celou křivku jedinou funkcí, může být určena více než jedna aproximační funkce. [1]



Obr. 39: Záznam měření posunů kolmo k fasádě (vlevo) a rovnoběžně s fasádou (vpravo) pro 4. zatěžovací cyklus.

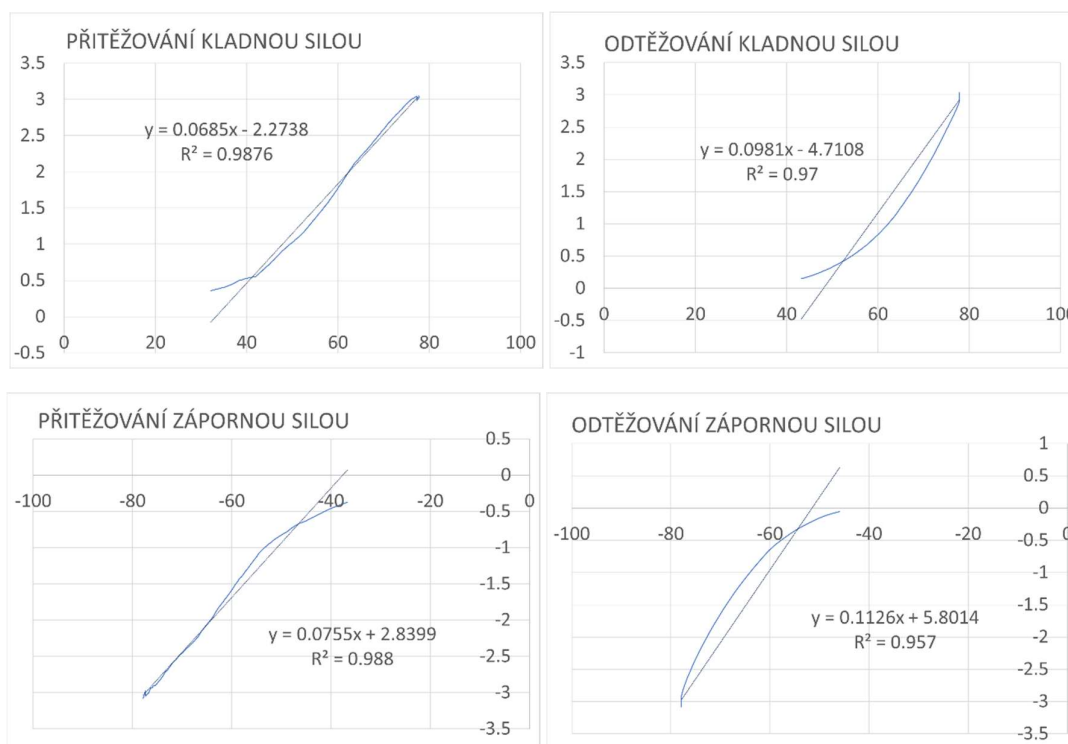
Grafy zatěžovacích cyklů byly rozděleny na několik částí, které odpovídají průběhu zkoušky: volnost, přitěžování a odtižení. Tyto průběhy se ještě rozdělily zvlášť pro kladné a záporné zatěžování/odtižení [1]. Na obr. 40 jsou znázorněny hraniční hodnoty pro tyto části. Pro zkoušku kolmo k fasádě je volnost při kladném zatěžování 0 až 32 mm, přitěžování kladnou silou probíhá od 32 mm do 77 mm, odtěžování kladnou silou probíhá od 77 mm do 43 mm. Volnost při záporném zatěžování je potom od 43 mm do -36 mm, přitěžování zápornou silou je od -36 mm do -77 mm, odlehčení je od -77 mm do -46 mm. Obdobně je to pro zkoušku rovnoběžně s fasádou podle grafu na obr. 40 vpravo.



Obr. 40: Znázornění hraničních hodnot posunů pro jednotlivé části zkoušky (vlevo kolmo k fasádě, vpravo rovnoběžně s fasádou)

4.3.1.1 Výsledky vyhodnocení zkoušky kolmo k fasádě

Části grafů pro zatěžování a odlehčení kladnou/zápornou silou se nahradily lineárními aproximačními funkcemi. Na obr. 41 jsou znázorněné linearizované části grafu pro přitěžování/odtěžování kladnou silou (nahore) a pro přitěžování/odtěžování zápornou silou (dole).



Obr. 41: Linearizace části grafů pro zkoušku kolmo k fasádě.

Korelační součinitel ve všech případech překročil požadovanou hodnotu 0,95. Podle [42] lze použít průměrnou tuhost v kladném a záporném směru zatěžování, pokud se neliší sklon linearizovaných křivek o více jak 10 %. V tab. 2 jsou hodnoty pro výpočet linearizace sklonu.

Tab. 2: Linearizovaný sklon.

	Kladný směr zatížení	Záporný směr zatížení
Zatížení	$\bar{c}_{pp} = 0,0685$	$\bar{c}_{mm} = 0,0755$
Odtížení	$\bar{c}_{pm} = 0,0981$	$\bar{c}_{mo} = 0,1261$

Podmínka velikosti linearizovaného sklonu je:

$$\frac{|\bar{c}_{pp}| - |\bar{c}_{mm}|}{|\bar{c}_{pp}| + |\bar{c}_{mm}|} \times 100 \leq 10 \quad (1)$$

$$\frac{\frac{0,0685 + 0,0981}{2} - \frac{0,0755 + 0,1261}{2}}{\frac{0,0685 + 0,0981}{2} + \frac{0,0755 + 0,1261}{2}} = 6,01\% < 10\% \quad (2)$$

Podmínka je splněna, střední tuhost soustavy \bar{c} se stanoví jako průměrná hodnota tuhostí pro přitěžování a odtížení v kladné a záporné větvi:

$$\bar{c} = \frac{\bar{c}_{pp} + \bar{c}_{pm} + \bar{c}_{mm} + \bar{c}_{mo}}{4} = 0,089 \text{ kN/mm} \quad (3)$$

Základní volnost d_0 se při trilineárním zjednodušení stanoví jako průměrná hodnota vzdáleností průsečíků linearizovaných funkcí. Norma [42] uvádí použít průměrnou hodnotu \bar{d}_0 , která se stanoví

na základě alespoň pěti zkoušek. Tyto hodnoty (volnost, tuhost, únosnost) jsou pro jednotlivé rámy stejného systému velmi podobné a mohou být dohledatelné. V našem případě bude použita hodnota ze čtvrtého zatěžovacího cyklu jedné zkoušky. Průsečíky aproximačních funkcí s osou x ($y = 0$) potřebné pro stanovení základní volnosti jsou v tab. 3.

Tab. 3: Průsečíky aproximačních funkcí s osou x ($y = 0$).

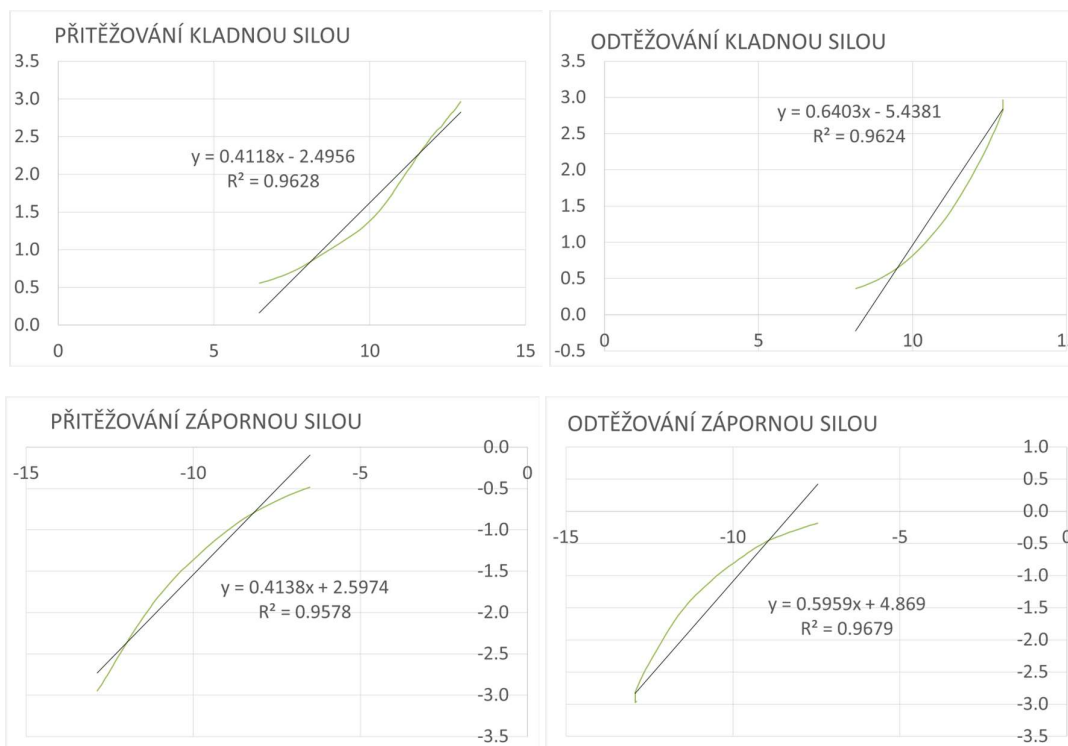
	Kladná část	Záporná část
Zatížení	$x = 33,19$ mm	$x = -37,61$ mm
Odtížení	$x = 48,02$ mm	$x = -51,52$ mm

Protože nemá význam rozlišování kladné a záporné části cyklu, použije se průměrná hodnota všech oblastí [1]. Výsledná volnost pro zkoušku podlahy kolmo k fasádě je:

$$d_0 = \frac{33,19+48,02+|-37,61|+|-51,52|}{4} = 42,6 \text{ mm} \quad (4)$$

4.3.1.2 Výsledky vyhodnocení zkoušky rovnoběžně s fasádou

Části grafů pro zatěžování a odlehčení kladnou/zápornou silou se nahradily lineárními aproximačními funkcemi. Na obr. 42 jsou znázorněny linearizované části grafu pro přitěžování/odtěžování kladnou silou (nahore) a pro přitěžování/odtěžování zápornou silou (dole).



Obr. 42: Linearizace částí grafů pro zkoušku rovnoběžně s fasádou.

Korelační součinitel ve všech případech překročil požadovanou hodnotu 0,95. Podle [42] lze použít průměrnou tuhost v kladném a záporném směru zatěžování, pokud se neliší sklon linearizovaných křivek o více jak 10 %.

Postup stanovení střední tuhost a volnosti soustavy je obdobná jako v předešlé kapitole. Linearizovaný sklon je v tab. 4.

Tab. 4: Linearizovaný sklon.

	Kladný směr zatížení	Záporný směr zatížení
Zatížení	$\bar{c}_{pp} = 0,4118$	$\bar{c}_{mm} = 0,4138$
Odtížení	$\bar{c}_{pm} = 0,6403$	$\bar{c}_{mo} = 0,5959$

Podmínka velikosti linearizovaného sklonu se stanoví podle rovnice (1) a v tomto případě je rovna 2,06 % což je menší jak 10 %. Podmínka je splněna, střední tuhost soustavy stanovená podle rovnice (3) je $\bar{c} = 0,515$ kN/mm. Průsečíky aproximačních funkcí s osou x ($y = 0$) potřebné pro stanovení základní volnosti jsou v tab. 5.

Tab. 5: Průsečíky aproximačních funkcí.

	Kladná část	Záporná část
Zatížení	x = 6,06 mm	x = -6,28 mm
Odtížení	x = 8,49 mm	x = -8,17 mm

Výsledná volnost pro zkoušku podlahy rovnoběžně s fasádou po dosazení do rovnice (4) je $d_0 = 7,3$ mm.

4.3.1.3 Shrnutí

Vyhodnocení zkoušek, které vycházely z normy [42], bylo upraveno pro potřeby práce na modelu lešení. V tabulce jsou shrnuty výsledky měření:

Tab. 6: Výsledky zkoušek.

Zkouška	Volnost	Tuhost
	d_0 [mm]	c [kN/mm]
Kolmo	42,6	0,089
Rovnoběžně	7,3	0,515

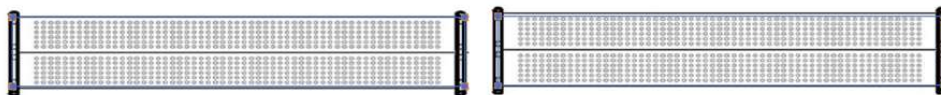
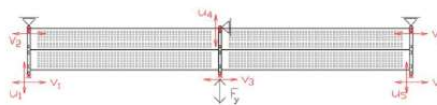
Tyto hodnoty jsou pak pro jednotlivé rámy stejného systému velmi podobné. Tento přístup podle normy [42] však není plně dostačující pro potřeby tohoto výzkumu, kde je hlavním cílem popsat tuhosti a vůle pro oba směry tak, aby výsledné chování numerického modelu odpovídalo co nejlépe skutečnosti.

4.3.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU GRAFICKY

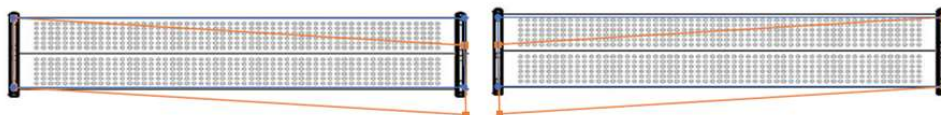
Hlavním cílem měření bylo popsat tuhosti a vůle podlahy pro oba směry a získat tím představu o chování podlažek lešení. Pro lepší představu chování podlažek byla vytvořena animace průběhu zatěžování v MS Excel. Na následujících obrázcích (

obr. 43 až obr. 52) jsou příklady animací průběhu deformace podlažek při zatěžování pro zkoušku kolmo k fasádě a rovnoběžně s fasádou.

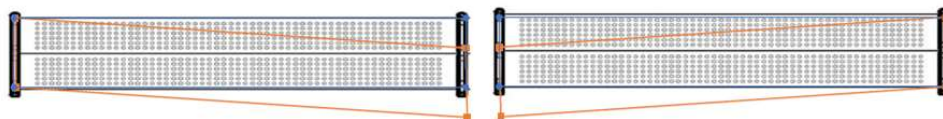
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



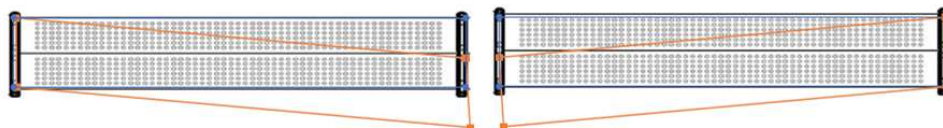
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.10	0.02	0.94	0.65	1.08	-29.53	0.00	-0.26	-0.88



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.20	0.02	1.16	0.84	1.10	-32.48	0.03	-0.34	-1.30

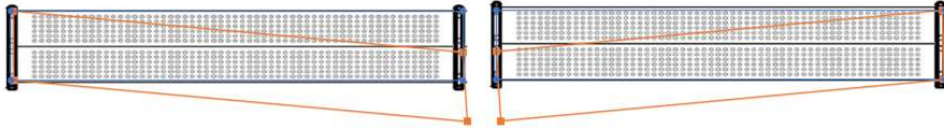


F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.30	-0.06	1.83	1.38	2.98	-43.50	-0.08	-0.58	-1.64

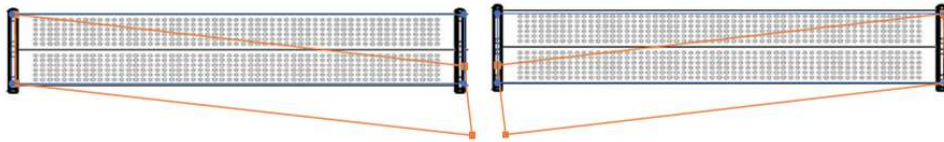


Obr. 43: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení 0 kN až -0,3 kN.

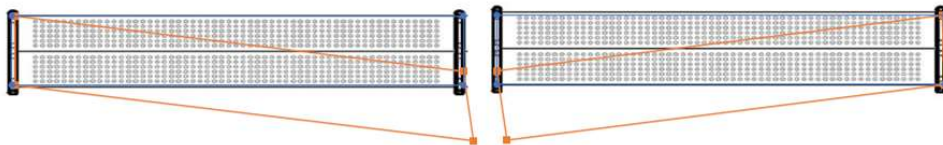
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.50	-0.05	1.84	1.54	3.06	-44.57	-0.11	-0.69	-1.62



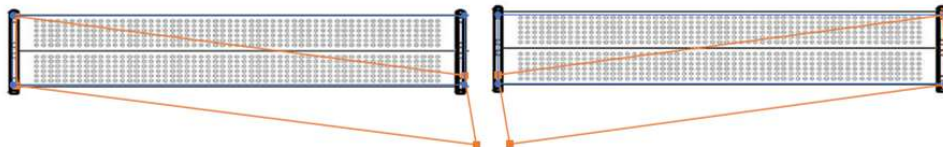
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-1.00	-0.23	2.45	1.84	5.51	-55.91	-0.26	-0.21	-1.83



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-1.50	-0.37	2.41	1.95	6.75	-60.18	-0.40	-0.19	-1.96

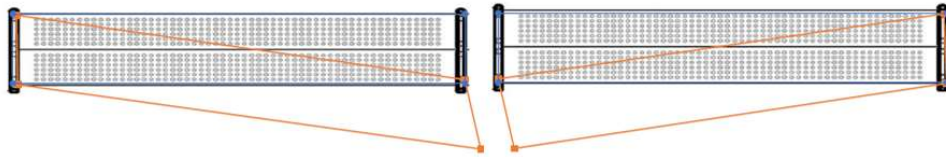


F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-2.00	-0.92	2.72	2.19	7.91	-64.99	-0.53	-0.20	-1.97

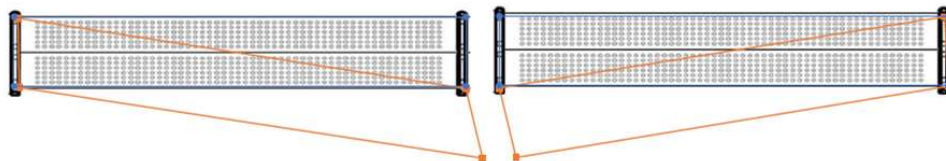


Obr. 44: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení -0,5 kN až -2,0 kN.

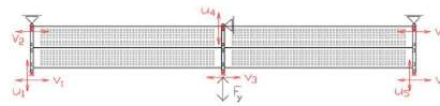
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-2.50	-1.35	3.19	2.43	10.69	-71.05	-0.68	-0.07	-2.00



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-3.00	-1.44	3.59	2.62	11.12	-77.72	-0.84	0.24	-2.19



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.10	0.05	1.31	0.64	1.07	9.33	0.42	-0.05	0.55

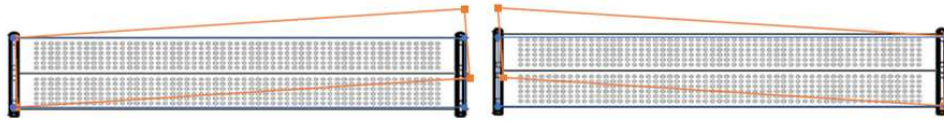


Obr. 45: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení -2,5 kN až -3,0 kN a 0 kN až 0,1 kN.

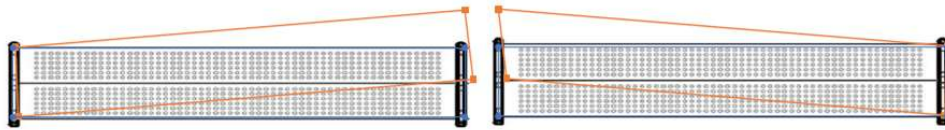
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.20	0.09	2.23	1.33	2.52	24.81	0.70	-1.11	0.45



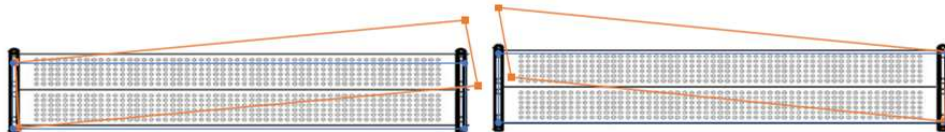
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.30	0.15	2.82	1.56	3.64	31.47	0.81	-1.38	0.20



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.50	0.39	3.37	1.64	5.57	40.80	1.05	-1.50	0.14

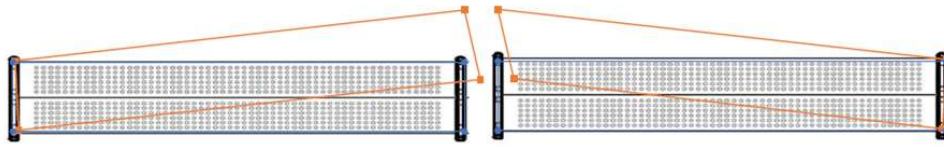


F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.00	0.92	3.79	1.60	8.61	49.36	1.61	-1.78	0.19

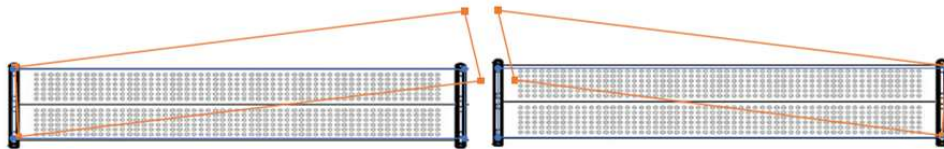


Obr. 46: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení 0,2 kN až 1,0 kN.

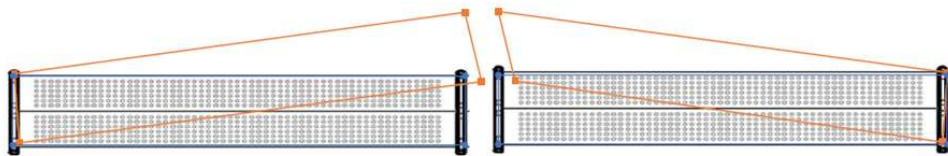
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.50	1.37	3.81	1.51	10.68	56.15	1.96	-2.18	0.13



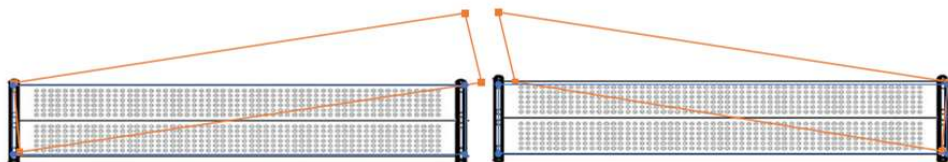
F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2.00	1.79	3.87	1.31	11.12	62.34	2.26	-2.65	0.31



F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2.50	2.17	4.01	1.01	11.12	68.59	2.50	-3.05	0.56

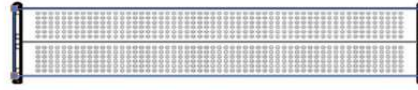
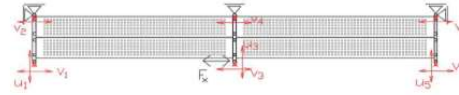


F_y	u_1	v_1	v_2	v_3	u_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
3.00	2.49	4.48	0.30	11.12	77.85	2.78	-3.34	0.89

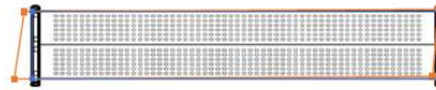
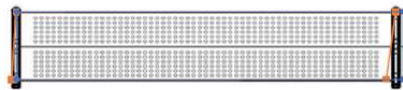


Obr. 47: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení 1,5 kN až 3,0 kN.

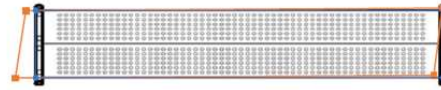
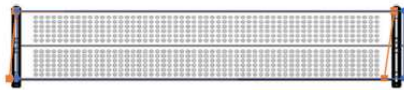
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



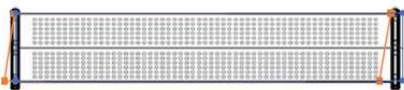
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.10	-0.14	-1.24	-0.05	-0.07	-4.40	-1.98	0.84	-1.68	-0.21



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.20	-0.20	-1.87	-0.16	-0.08	-5.02	-2.45	0.85	-2.33	-0.28

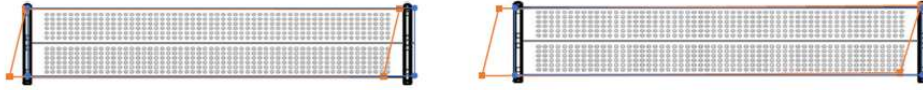


F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.30	-0.26	-2.85	-0.29	-0.13	-6.00	-3.01	0.84	-3.32	-0.34

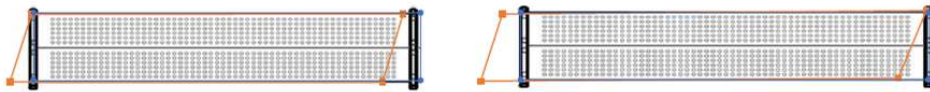


Obr. 48: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení 0 kN až -0,3 kN.

F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-0.50	-0.44	-4.67	-0.45	-0.30	-8.06	-3.94	0.80	-5.46	-0.41



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-1.00	-0.57	-6.07	-0.49	-0.56	-9.85	-4.54	0.63	-7.36	-0.53



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-1.50	-0.61	-6.78	-0.50	-0.69	-10.95	-4.81	0.53	-8.52	-0.66



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-2.00	-0.68	-7.30	-0.53	-0.76	-11.77	-5.03	0.47	-9.38	-0.78



Obr. 49: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení -0,5 kN až -2,0 kN.

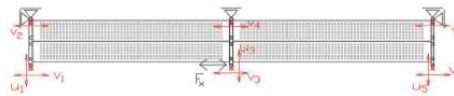
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-2.50	-0.77	-7.57	-0.57	-0.70	-12.19	-5.20	0.43	-9.98	-0.86



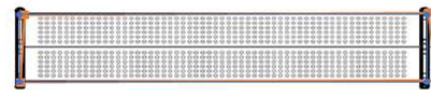
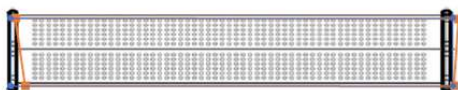
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-3.00	-0.78	-8.01	-0.63	-0.80	-12.92	-5.42	0.34	-10.69	-0.97



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

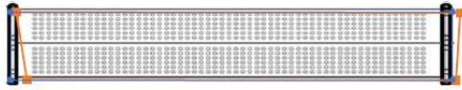


F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.10	-0.07	3.29	1.07	-0.21	0.23	1.26	0.58	2.23	0.37

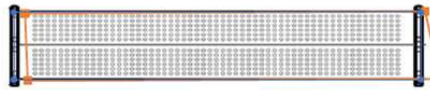
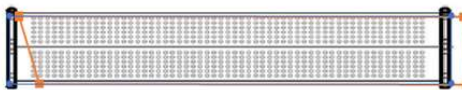


Obr. 50: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení -2,5 kN až -3,0 kN a 0 kN až 0,1 kN.

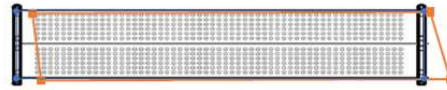
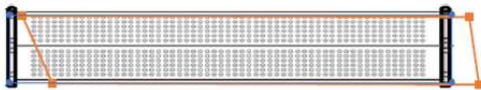
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.20	-0.07	3.73	1.28	-0.24	0.76	1.76	0.11	2.73	0.69



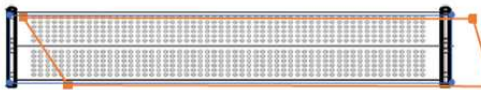
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.30	-0.18	6.78	2.18	-0.43	3.40	2.76	0.28	4.64	0.98



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.50	-0.41	9.69	2.91	-0.81	6.11	3.92	-0.32	6.43	1.52

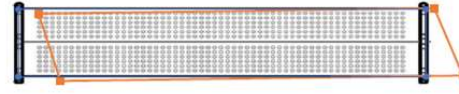


F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.00	-0.88	13.23	3.07	-1.41	9.20	4.76	0.01	8.35	1.92

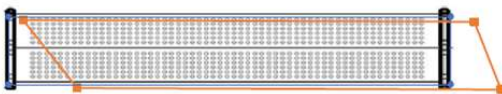


Obr. 51: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení 0,2 kN až 1,0 kN.

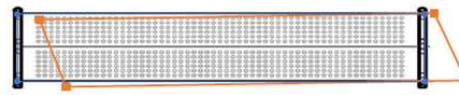
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.50	-1.06	14.44	3.22	-1.61	10.27	4.98	0.38	9.06	2.04



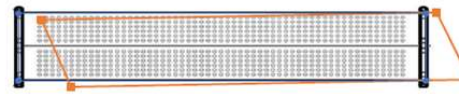
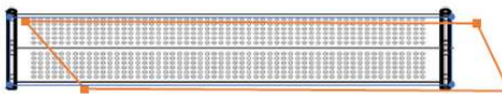
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2.00	-1.29	15.55	3.36	-1.85	11.33	5.30	0.37	9.78	2.16



F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2.50	-1.41	16.19	3.46	-2.01	11.98	5.45	0.36	10.19	2.33



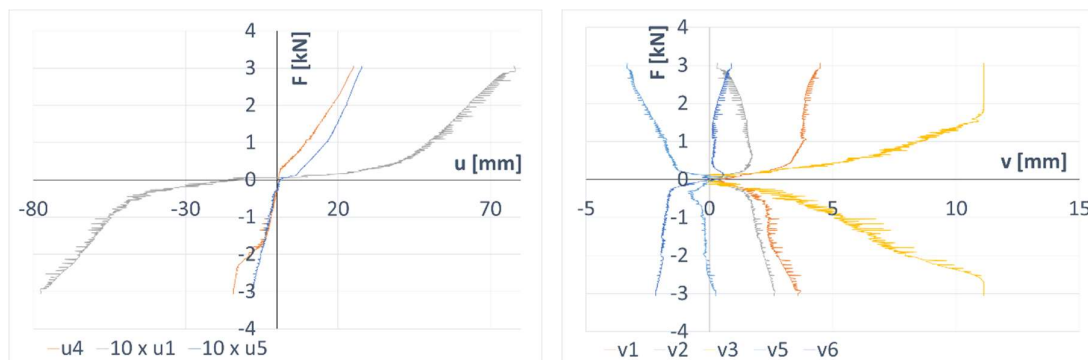
F_x	u_1	v_1	v_2	u_3	v_3	v_4	u_5	v_5	v_6
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
3.00	-1.58	17.04	3.60	-2.33	12.93	5.67	0.38	10.78	2.65



Obr. 52: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení 1,5 kN až 3,0 kN.

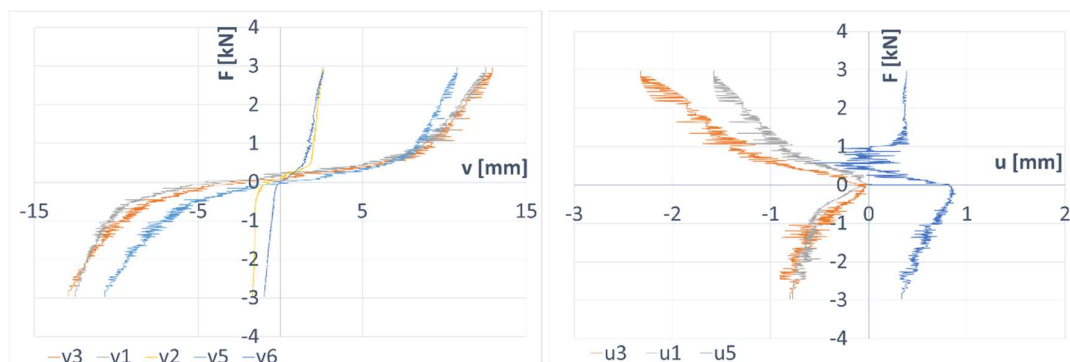
4.3.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU NUMERICKY

Pro potřeby výzkumu byla data dále vyhodnocována a upravována. Data z původních grafů (obr. 33-obr. 37) byla převedena na střední hodnoty posunů v závislosti na působící síle (obr. 53 a obr. 54).



Obr. 53: Upravené závislosti posunů na síle pro zkoušku kolmo k fasádě

Pro vyhodnocení tuhostí podlahového systému lešení byla z dat na obr. 53 a obr. 54 odvozena nelineární matice tuhostí. Tato matice byla stanovena pomocí metody nejmenších čtverců, která je založena na principu minimalizace součtu reziduálních čtverců a používá se u soustav rovnic, kde je více neznámých než rovnic. Vůle systému byla stanovena pomocí normového postupu [42] a odečtením z grafů (obr. 53 a obr. 54).



Obr. 54: Upravené závislosti posunů na síle pro zkoušku rovnoběžně s fasádou

4.3.3.1 Určení tuhosti numerického modelu

Zásadním problémem při modelování rovinných a prostorových lešení je určení jejich tuhostí zejména kvůli vůlím v uložení podlažek do rámu lešení. Pro určení tuhosti numerického modelu byly obě zkoušky (kolmo a rovnoběžně s fasádou) simulovány pomocí rovinné příhradové konstrukce. V modelu se uvažují dva neznámé parametry, a to tuhosti diagonál k_{D1} a k_{D2} .

Numerický model má tvar

$$\mathbf{K}(k_{D1}, k_{D2})\mathbf{d} = \mathbf{f} \quad (5)$$

kde $\mathbf{K}(k_{D1}, k_{D2})$ je matice tuhosti závislá na dvou neznámých tuhostech diagonál, \mathbf{d} je vektor uzlových posunutí a \mathbf{f} vektor předepsaných uzlových sil. K určení tuhostí diagonál se používá metoda nejmenších čtverců, která minimalizuje funkci

$$F(k_{D1}, k_{D2}) = (\mathbf{K}(k_{D1}, k_{D2})\mathbf{d} - \mathbf{f})^T (\mathbf{K}(k_{D1}, k_{D2})\mathbf{d} - \mathbf{f}) \quad (6)$$

Minimum splňuje tyto podmínky

$$\frac{\partial F}{\partial k_{D1}} = \mathbf{d}^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D1}} \mathbf{K} \mathbf{d} - \mathbf{f}^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D1}} \mathbf{d} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial k_{D2}} = \mathbf{d}^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D2}} \mathbf{K} \mathbf{d} - \mathbf{f}^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D2}} \mathbf{d} = 0 \quad (8)$$

Rovnice (6) platí pro zadaná uzlová zatížení \mathbf{f} a k tomu odpovídající uzlová posunutí \mathbf{d} . Během zkoušek tuhosti podlahového lešení na standardní základní sestavě byly naměřeny stovky dvojic $\mathbf{f} - \mathbf{d}$, tak že funkce F ze vztahu (6) má tvar

$$F = \sum_{i=1}^n (\mathbf{K} \mathbf{d}_i - \mathbf{f}_i)^T (\mathbf{K} \mathbf{d}_i - \mathbf{f}_i) \quad (9)$$

kde \mathbf{d}_i a \mathbf{f}_i jsou uzlová posunutí a síly v i -tém odečtu, n je počet odečtů během zkoušky a kvůli stručnosti byly vypuštěny argumenty k_{D1} a k_{D2} . Tím se změní vztahy (7-8) na

$$\frac{\partial F}{\partial k_{D1}} = \sum_{i=1}^n \left(\mathbf{d}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D1}} \mathbf{K} \mathbf{d}_i - \mathbf{f}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D1}} \mathbf{d}_i \right) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial k_{D2}} = \sum_{i=1}^n \left(\mathbf{d}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D2}} \mathbf{K} \mathbf{d}_i - \mathbf{f}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D2}} \mathbf{d}_i \right) = 0 \quad (11)$$

Rovnice (10-11) představují soustavu dvou algebraických rovnic pro dvě neznámé k_{D1} a k_{D2} . Jejich řešením se získají odhady tuhostí diagonál v rovinném příhradovém modelu podlažky v jednom poli lešení.

4.4 SHRnutí EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

V rámci výzkumu byly provedeny celkem dva experimenty na standardní základní sestavě lešení. Cílem měření bylo co nejlépe popsat chování podlah lešení ve dvou vzájemně kolmých směrech (směr podélný a příčný) pro každou zkoušku. Měření tuhostí a vůlí podlahových dílců lešení vycházelo z normy [36] a výzkumu Dolejše [1], podle nichž bylo upraveno schéma pro zkoušky.

Norma doporučuje měření posunů jen ve směru působícího zatěžování, experimenty byly však doplněny o další měřicí body zaznamenávajícími posuny ve směru kolmém na zatěžovací sílu. Pro zkoušku bylo použito rámové lešení SPRINT 75.

Výsledky měření byly následně vyhodnoceny několika metodami: standardně podle normy [42], vytvořením animace průběhu zatěžování a numericky.

Pro další část práce je použito numerické vyhodnocení experimentu, kde byly odvozeny rovnice jejichž řešením jsou tuhosti pružin, které simulují chování podlah lešení.

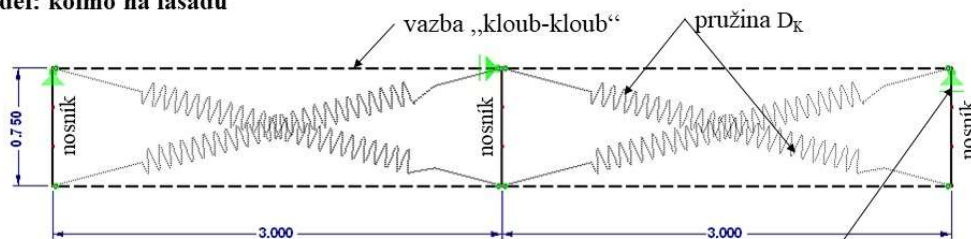
5 NUMERICKÁ ČÁST

Numerická část práce obsahuje popis numerického modelu vytvořeného metodou konečných prvků, jeho validaci a parametrickou studii. Modely byly vytvořeny v inženýrském softwaru RFEM 5, výpočet byl prováděn Newton-Raphsonovou metodou.

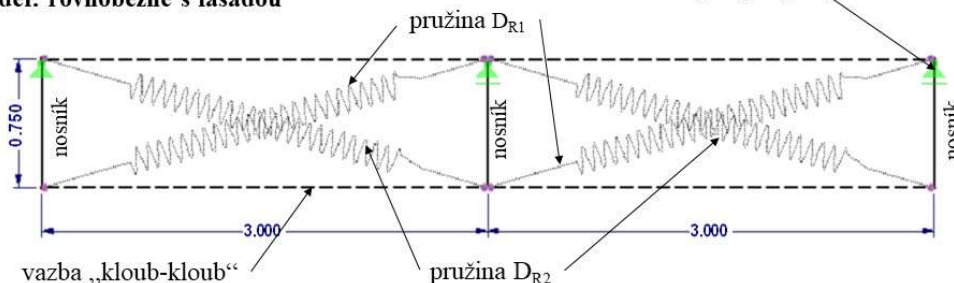
5.1 PŘEDBĚŽNÉ ROVINNÉ MODEL Y

V průběhu provádění analýz modelování podlahových dílců byly nejprve vytvořeny rovinné příhradové modely pro každou provedenou zkoušku zvlášť (modely kolmo k fasádě a modely rovnoběžně s fasádou). Rovinné modely jsou zobrazeny na obr. 55.

2D model: kolmo na fasádu



2D model: rovnoběžně s fasádou



Obr. 55: Rovinné modely podlahových dílců pro jednotlivé zkoušky

Hlavním prvkem modelů jsou diagonální pružiny s nelineární tuhostí, jejichž teoretické stanovení je popsáno v kapitole 4.3.3.1.

Tyto prutové, příhradové modely svým tvarem i rozměry odpovídají provedeným zkouškám. Modely se sestávají z tří typů prutů: nosník, vazba kloub-kloub a pružina. „Nosník“ představuje příčel rámu systémového lešení. Jednotlivé rámy v rovině podlahy propojuje vazba „kloub-kloub“. Jedná se o tuhé spojení s kloubovým připojením na obou koncích (přenášejí se pouze normálové a posouvající síly, nikoli momenty). [45]

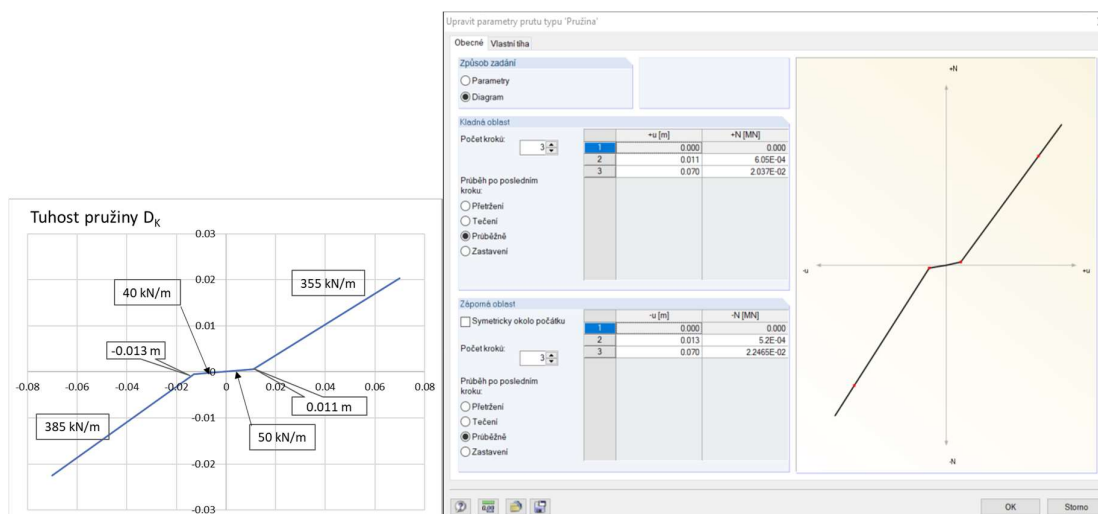
Mezi těmito pruty v úrovni podlahy jsou umístěny „Pružiny“, které svojí tuhostí a vůlí simulují nelineární chování lešeňové sestavy v rovině podlahy. Zobrazené kloubové podpory představují podepření lešení v průběhu zkoušky tuhosti podlah.

5.2 VALIDACE ROVINNÝCH MODELŮ

Po zhotovení rovinných příhradových modelů podlahy a získání odhadů tuhosti diagonál v jednom poli pro tyto modely (kap. 4.3.3.1) byla následně provedena validace těchto modelů. V rámci validace byla provedena linearizace jednotlivých částí pracovních diagramů modelů v obou směrech tak, aby se výsledky výpočtů co nejvíce přiblížily experimentům.

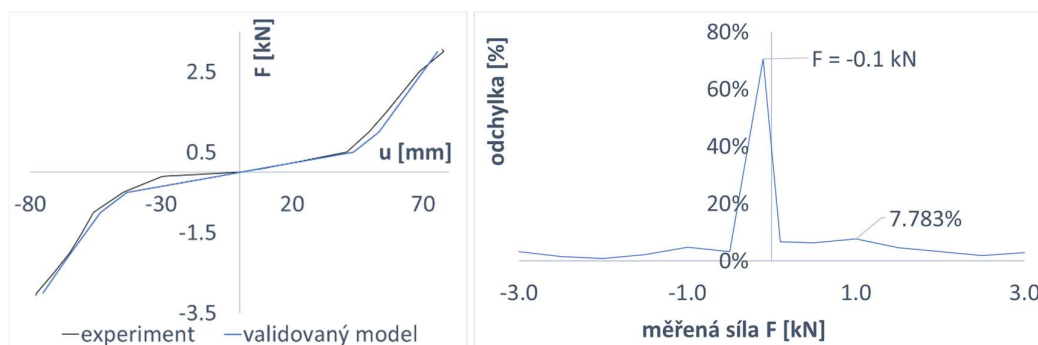
5.2.1 CHOVÁNÍ LEŽENÍ KOLMO K FASÁDĚ

Z rovnic z kapitoly 4.3.3.1, byly odvozeny tuhosti pro numerický model. Na obr. 56 vlevo jsou uvedeny odvozené tuhosti a vůle pro rovinný model podlahového dílce.



Obr. 56: Tuhosti podlahového dílce pro zkoušku kolmo k fasádě (vlevo) a nastavení pružiny pro zkoušku kolmo k fasádě v RFEM (vpravo)

Tyto tuhosti byly následně dosazeny do diagramu pružiny, na obr. 56 vpravo je ukázka nastavení „pružiny“. Výsledné deformace modelu byly zaneseny do grafu a porovnány s naměřenými zprůměrovanými hodnotami z experimentu. Postupně byly tuhosti a vůle modelů upravovány a zpřesňovány za účelem co nejvyšší shody.



Obr. 57: Validace 2D modelů pro zkoušku kolmo k fasádě

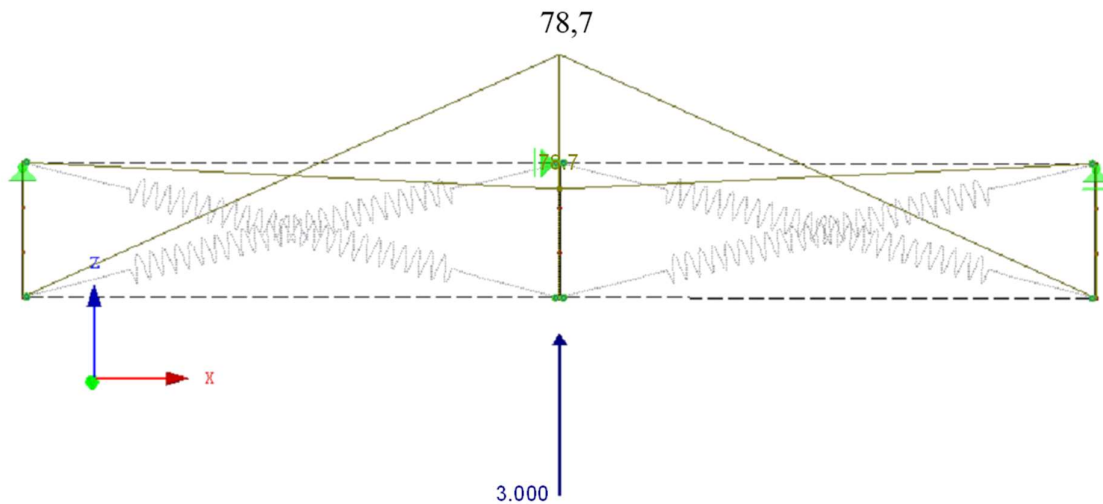
Na obr. 57 je znázorněn výsledek validace rovinných modelů pro zkoušku kolmo k fasádě, vlevo je upravená závislost síly F na posunu u_4 (střední rám), vpravo jsou znázorněny odchylky validovaného

modelu od experimentu v procentech. Průměrná odchylka od experimentu je 3,85 %, tato hodnota ovšem nezahrnuje odchylku, která vznikla pro zatížení okolo počátku systému (cca od -0,1 do 0,1 kN), což je oblast velmi citlivá na drobné výchytky, které ale prakticky nijak výrazně tuhost podlahového systému neovlivní.

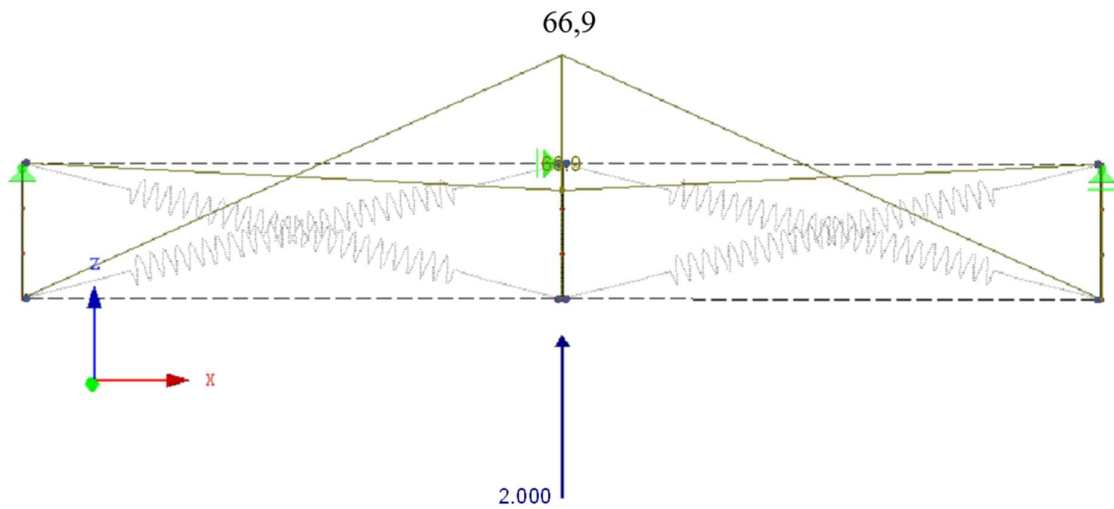
Na obr. 58 až obr. 61 jsou pro příklad znázorněné deformace modelu pro vybraná zatížení. Tyto hodnoty byly již porovnány v grafu na obr. 57 vlevo, ale pro bližší představu jsou deformace z výše uvedených výsledků z RFEM porovnány s naměřenými zprůměrovanými hodnotami v tab. 7.

Tab. 7: Porovnání naměřených a vypočtených deformací

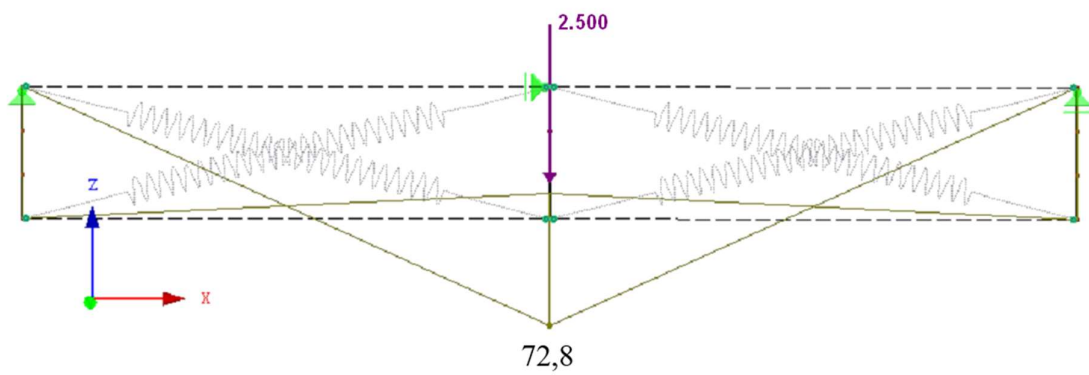
Zatížení	Posuny - experiment	Globální posun modelu ve směru osy Z
F [kN]	u_4 [mm]	U [mm]
3	77.85	78,7
2	68.6	66,9
-0.5	-44.6	-44,7
-2.5	-71.05	-72,8



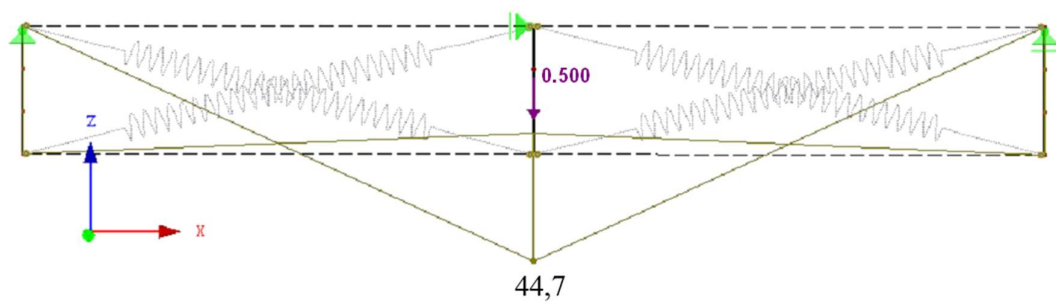
Obr. 58: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení 3,0 kN.



Obr. 59: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení 2,0 kN.



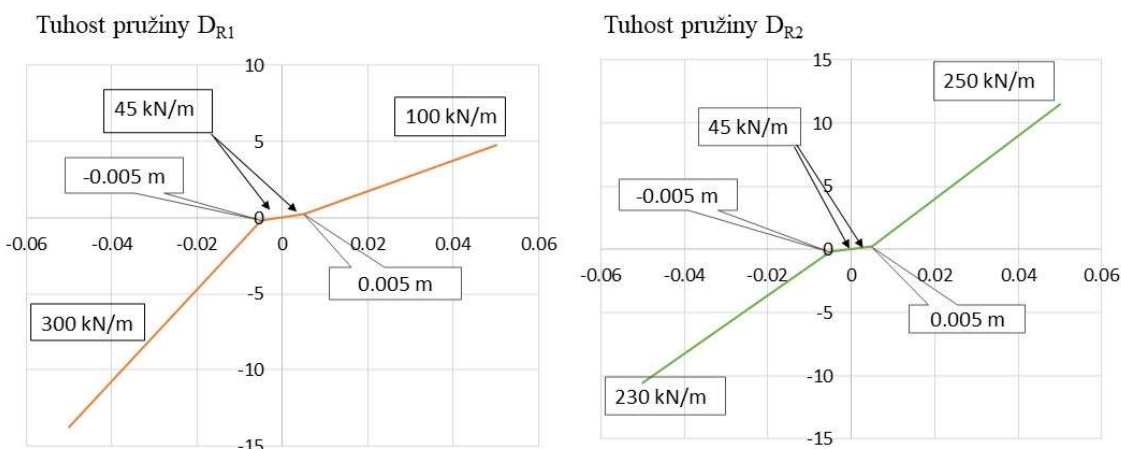
Obr. 60: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení.



Obr. 61: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení.

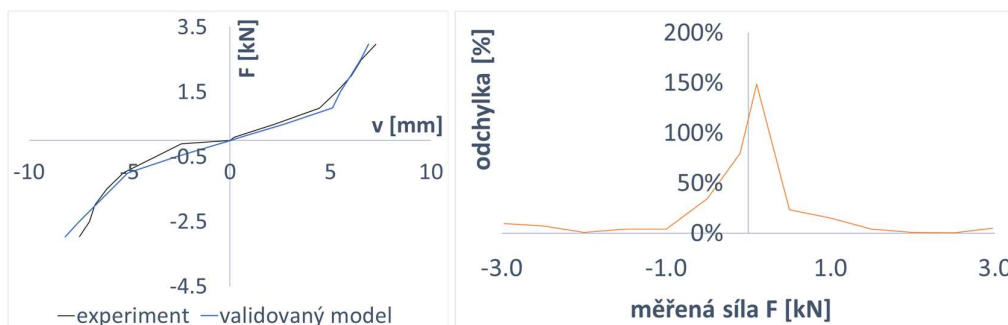
5.2.2 CHOVÁNÍ LEŠENÍ ROVNOBĚŽNĚ S FASÁDOU

Obdobný postup byl proveden i pro modely působící ve směru rovnoběžně s fasádou. Na obr. 62 vlevo jsou uvedeny odvozené tuhosti a vůle pro rovinný model podlahového dílce.



Obr. 62: Tuhosti podlahového dílce pro zkoušku rovnoběžně s fasádou

Tyto tuhosti byly následně dosazeny do diagramu pružiny a výsledné deformace modelu byly zaneseny do grafu a porovnány s naměřenými zprůměrovanými hodnotami z experimentu. Postupně byly tuhosti a vůle modelů upravovány a zpřesňovány za účelem nalezení co možná nejlepší shody.



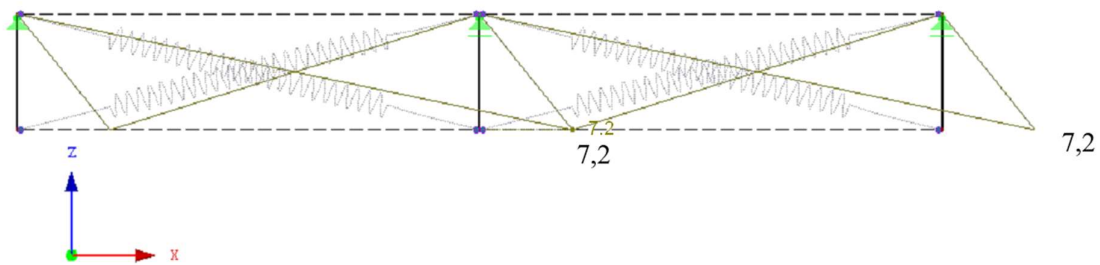
Obr. 63: Validace 2D modelů pro zkoušku rovnoběžně s fasádou

Obdobně, jako v předešlé kapitole, jsou na obr. 63 znázorněny výsledky validace rovinných modelů pro zkoušku rovnoběžně s fasádou. Vlevo jsou opět porovnány závislosti síly F na posunu v_3 v úrovni podlahy systému lešení. Porovnání bylo provedeno pro rozdíl vodorovných posunů na středním rámu ve směru působícího zatížení, rozdíl mezi posuny (v_3 a v_4) představuje vůli, kterou vykazuje uložení podlahových dílců. Na Obr. 63 vpravo jsou opět znázorněny odchylky modelu od experimentu, průměrná odchylka je 4,96 %. Tato hodnota nezahrnuje odchylku, která vznikla pro zatížení v oblasti od -0,5 kN do 0,5 kN, která je pro výsledné chování podlahy nepodstatná. Vzhledem k tomu, že je lešení ve vodorovném směru podél fasády obecně tužší, je potom tato špička ve srovnání s předchozím případem širší.

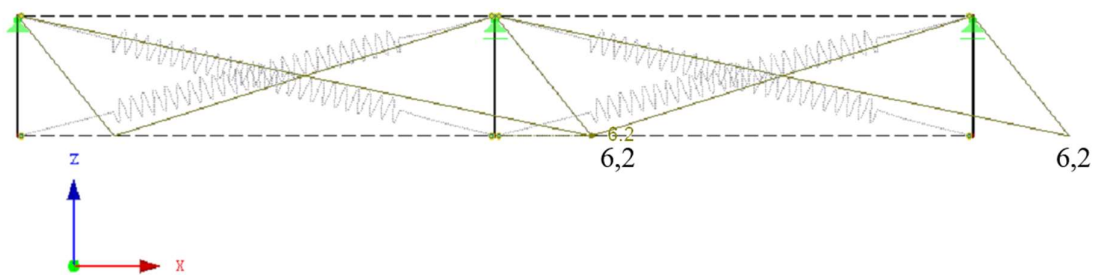
Na obr. 64 až obr. 67 jsou pro příklad znázorněné deformace modelu pro vybraná zatížení. Tyto hodnoty byly již porovnány v grafu na obr. 63 vlevo, ale pro bližší představu jsou deformace z výše uvedených výsledků z RFEM porovnány s naměřenými zprůměrovanými hodnotami v tab. 8.

Tab. 8: Porovnání naměřených a vypočtených deformací.

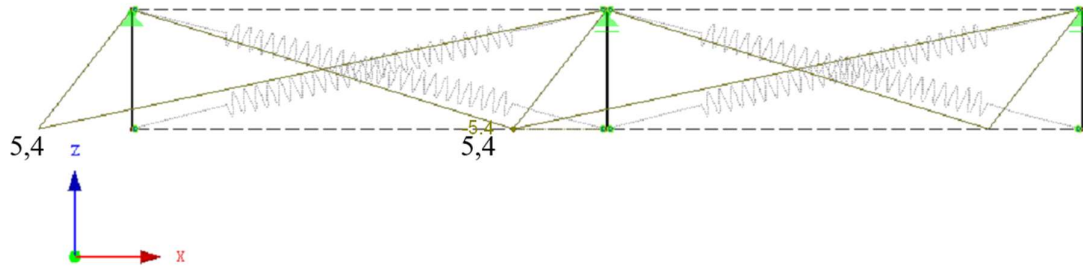
Zatížení	Posuny - experiment	Globální posun modelu ve směru osy X
F [kN]	(v_3-v_4) [mm]	V [mm]
2.97	7.25	7,2
2	6.03	6,2
-1	-5.3	- 5,4
-1.5	-6.14	- 6,2



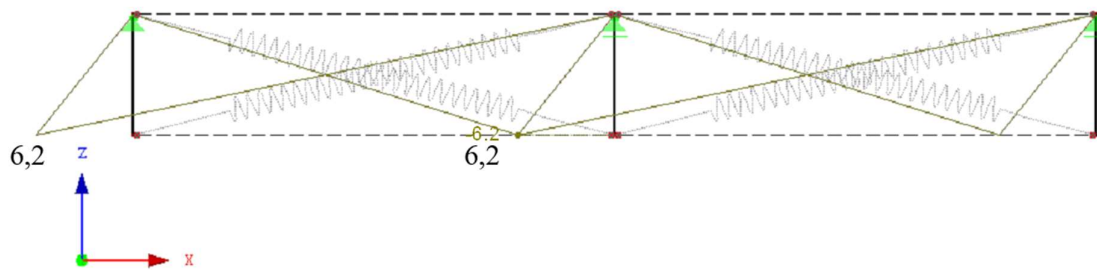
Obr. 64: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení 2,97 kN.



Obr. 65: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení 2,0 kN.



Obr. 66: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení -1,0 kN.

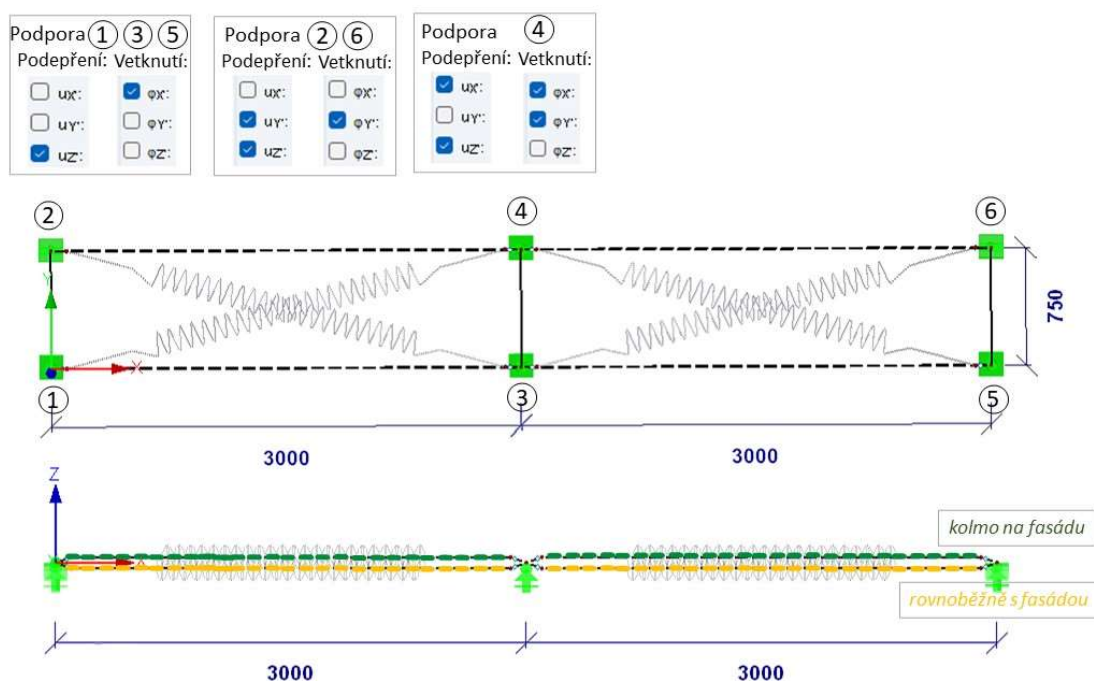


Obr. 67: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení -1,5 kN.

5.3 MODEL PODLAHOVÉHO DÍLCE

Po úspěšné validaci rovinných modelů byly tyto modely transformovány do jediného rovinného modelu. Oba systémy byly propojeny a okrajové podmínky nastaveny tak, aby pro jednotlivé směry zatěžování působila pouze příslušná část modelu.

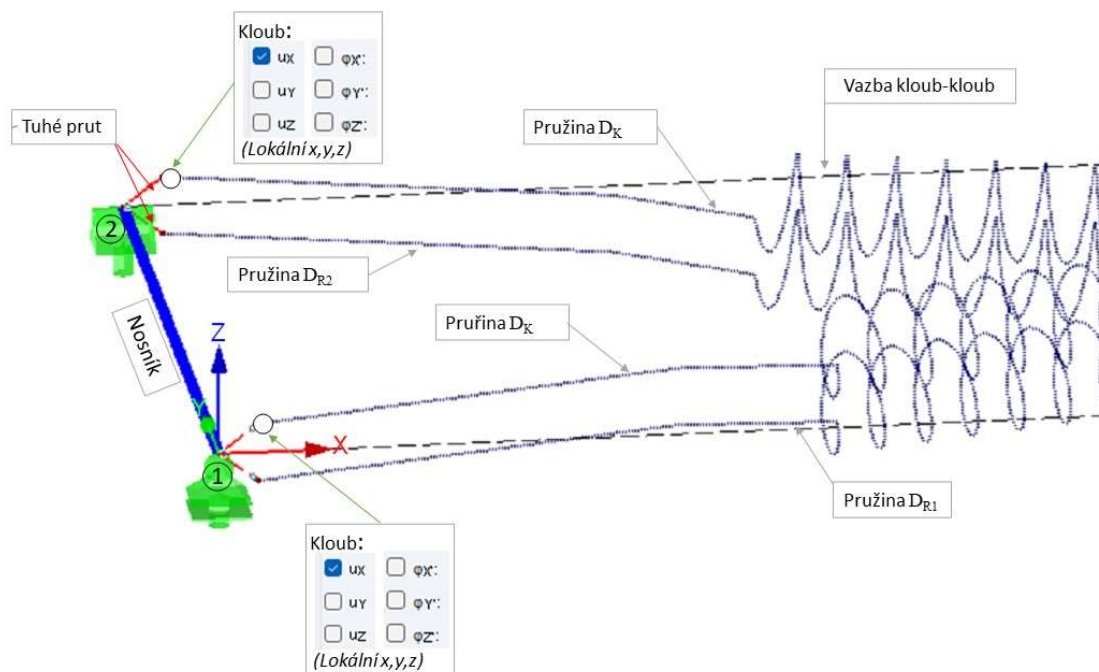
Na obr. 68 je model podlahového dílce s propojením rovin. Podlahový dílec se nachází v rovině x-y souřadného systému x-y-z. Na obr. 68 nahoře je pohled v rovině x-y a dole je pohled v rovině x-z. Černá čárkovaná čára znázorňuje vazbu „kloub-kloub“, která propojuje svislé rámy. Na obr. 68 dole je zelenou čárkovanou čarou znázorněna podlahová rovina působící kolmo na fasádu a žlutou čárkovanou čarou podlahová rovina působící rovnoběžně s fasádou. V horní části jsou tabulky, které představují nastavení vnějších podpor modelu.



Obr. 68: Schéma modelu podlahového dílce

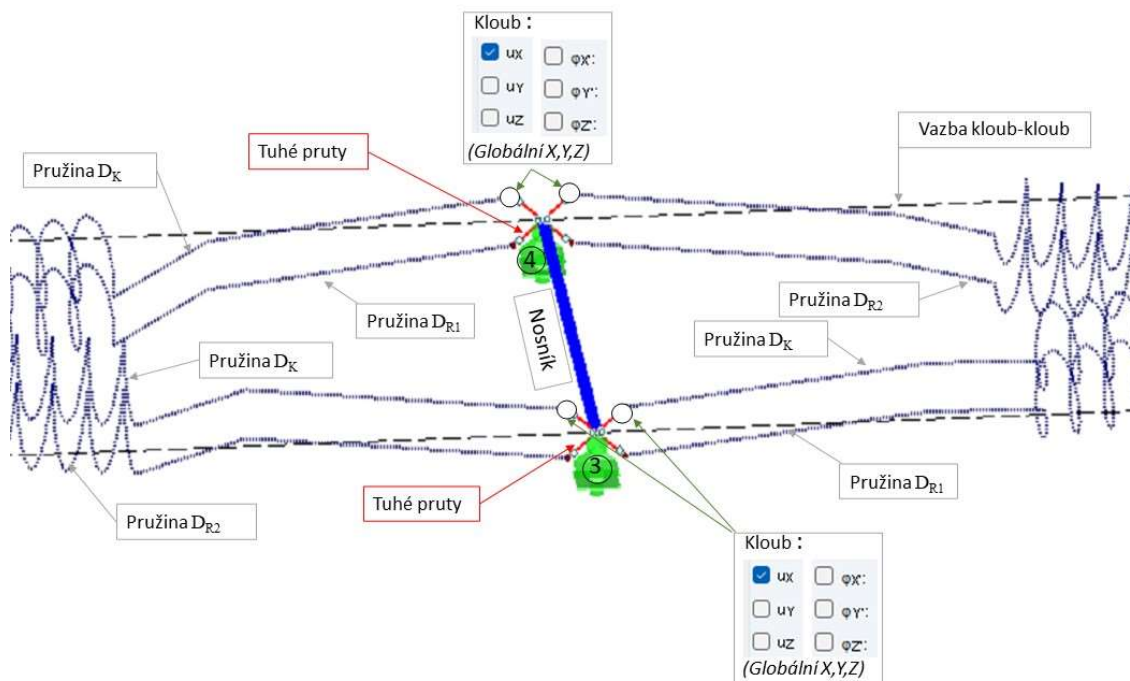
Na obr. 69 a obr. 70 jsou zobrazeny detaily připojení rovin podlahy a znázorněna nastavení okrajových podmínek pro roviny působící kolmo na fasádu a rovnoběžně s fasádou. Okrajové podmínky prutů jsou nastaveny pomocí kloubů na konci prutu. U každého kloubu jsou opět znázorněny odpovídající podporové podmínky.

Na obr. 69 je detail připojení podlahového dílce k levému nosníku (příčnick rámu) tento detail je totožný i u pravého nosníku (příčnicku rámu). Čárkovaně je znázorněna vazba „kloub-kloub“. Jedná se o tuhé spojení s kloubovým připojením na obou koncích prutu a propojuje podlahové roviny s rámy. Podlahové roviny jsou připojeny k nosníku pomocí „tuhého prutu“ (červená čárkovaná čára). Tento typ prutu se ve výpočtu svojí tuhostí přizpůsobí zbytku konstrukce. Pomocí kloubů na konci prutu jsou pro rovinu nastaveny příslušné okrajové podmínky.



Obr. 69: Detail připojení podlahového systému na krajní nosník (příčník rámu)

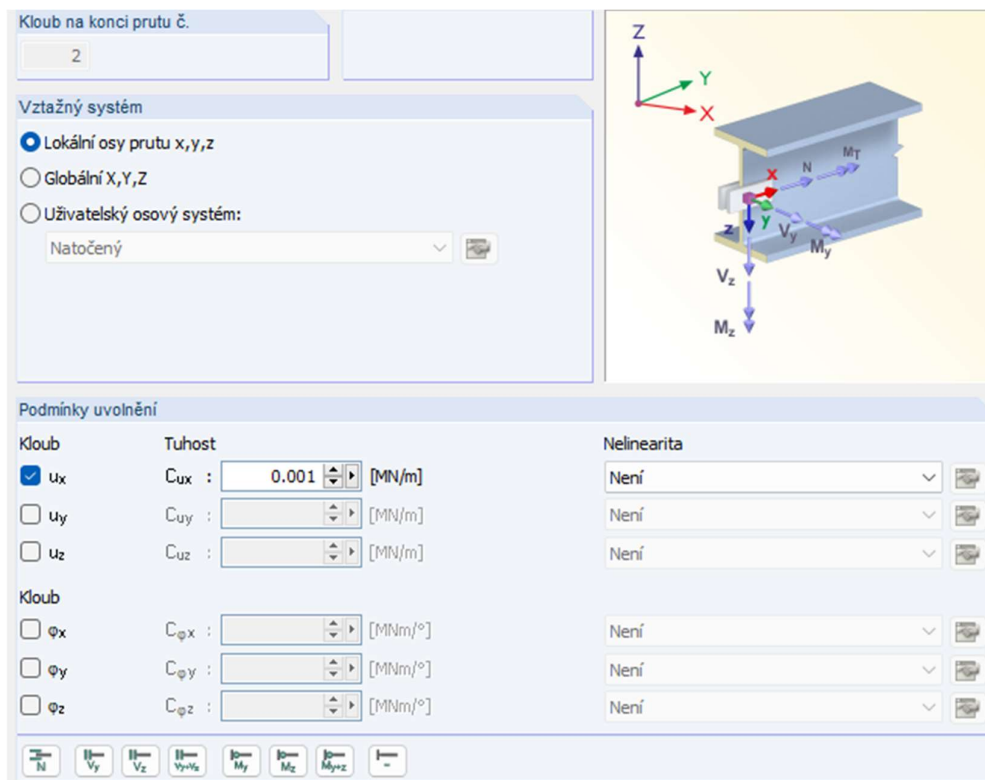
Na obr. 70 je detail připojení podlahového dílce ke střednímu nosníku (příčník rámu).



Obr. 70: Detail připojení podlahového systému na střední nosník (příčník rámu)

5.3.1 NASTAVENÍ PŘIPOJENÍ PODLAHOVÝCH DÍLCŮ

Cílem bylo, aby jednotlivé podlahové dílce přebíraly pouze zatížení, pro které byly navrženy, a vzájemně se ovlivňovaly minimálně. To znamená, že podlahový dílec pro zatížení ve směru kolmo na fasádu (ve směru osy y) přebírá zatížení působící ve směru osy y . Totéž platí pro rovinu působící ve směru rovnoběžně s fasádou (ve směru osy x), ten přebírá zatížení ve směru osy x .

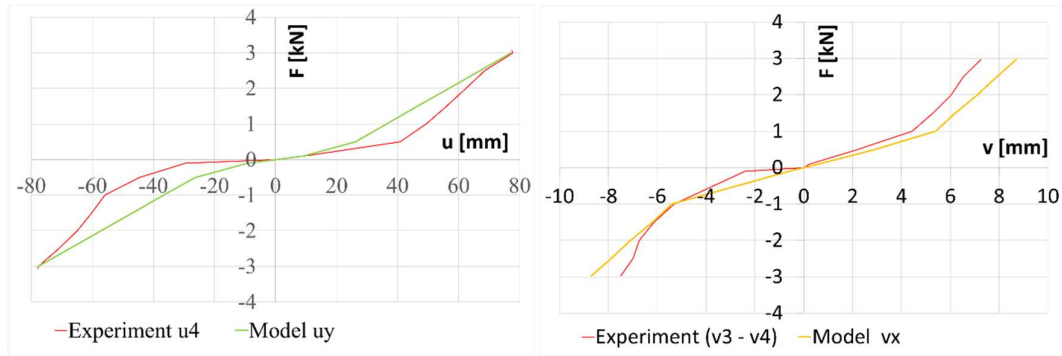


Obr. 71: Nastavení kloubu na konci prutu

Jak je patrné z obr. 69 a obr. 70, rovina rovnoběžně s fasádou je připojena k nosníku (příčníku rámu) tuze pomocí „tuhého prutu“. Rovina pro směr kolmo k fasádě je rovněž připojena pomocí „tuhého prutu“, ten je na konci opatřen „vnitřním kloubem“. Kvůli zajištění numerické stability modelu musela být nastavena (minimální) tuhost kloubu na konci tuhého prutu, viz obr. 71.

Koncové klouby prutů omezují vnitřní síly, které se přenášejí z prutu na okolní části konstrukce. Kloub pro normálovou nebo posouvající sílu se zadává v dialogu nebo v tabulce zaškrtnutím příslušného posunu. Označení políčka přitom znamená, že daná normálová, resp. posouvající síla na konci prutu se nebude přenášet, protože zde bude umístěn kloub. Klouby pro kroučící nebo ohybové momenty se zadávají podobně. I v tomto případě zaškrtnutí políčka znamená, že natočení je možné a příslušná vnitřní síla se nebude přenášet. [45]

Na obr. 72 jsou grafy, které znázorňují posuny podlahových dílců naměřených během zkoušek (experiment – červená) a posuny modelu (model kolmo – zelená a model rovnoběžně - oranžová) pro zkoušky kolmo na fasádu a rovnoběžně s fasádou.



Obr. 72: Porovnání posunů mezi modelem a experimentem

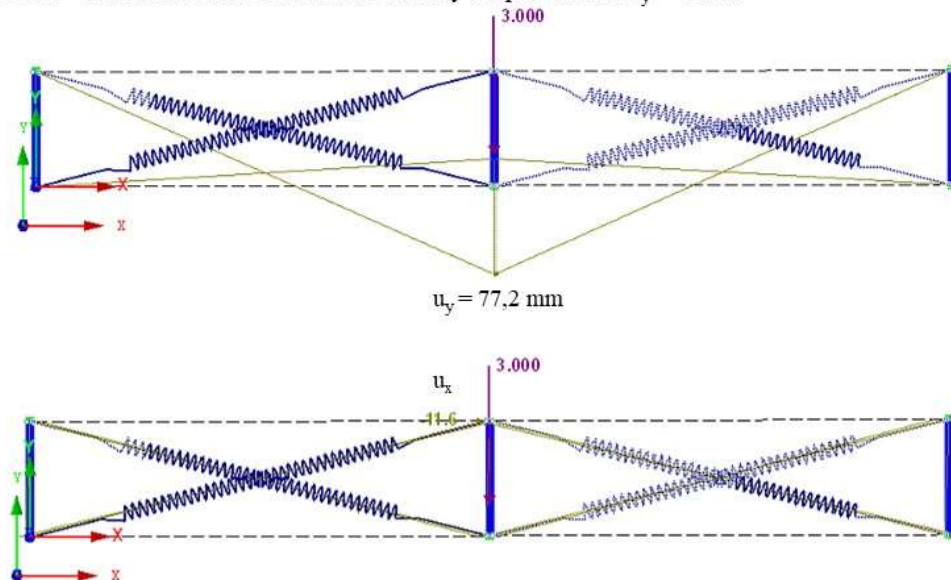
Přes maximální snahu minimalizovat rozdíly mezi modelem a experimentem je z grafů na obr. 72 je patrné, že v průběhu posunů dochází k jistým nepřesnostem. Pro směr kolmo na fasádu (obr. 72 vlevo) jsou limitní hodnoty prakticky shodné, ale uprostřed grafu dochází k mírnému narovnání křivky. Průměrná odchylka experimentu od modelu pak činí 8,4 mm. Pro směr rovnoběžně s fasádou (obr. 72 vpravo) je patrná největší odchylka u limitních hodnot a v prostředku grafu se křivky k sobě výrazně přiblíží, průměrná celková odchylka experimentu od modelu činí 0,8 mm. V obou případech je zachován tvar průběhu křivky deformace. Pro výsledný model bylo upřednostněno chování podlahového systému pro směr kolmo k fasádě.

Na obrázcích obr. 73 až obr. 76 jsou vybrané výstupy ze softwaru, které představují posuny modelu pro vybraná zatížení ve směru osy x a y. V horní části každého obrázku je tabulka, ve které jsou příslušné posuny naměřené v průběhu zkoušek.

Experiment kolmo k fasádě – výstupy:

F_y	u_4	v_3
[kN]	[mm]	[mm]
-3,00	-77,7	11,1

Model DOOR – celková deformace modelu ve směru y a x pro zatížení $F_y = -3$ kN:

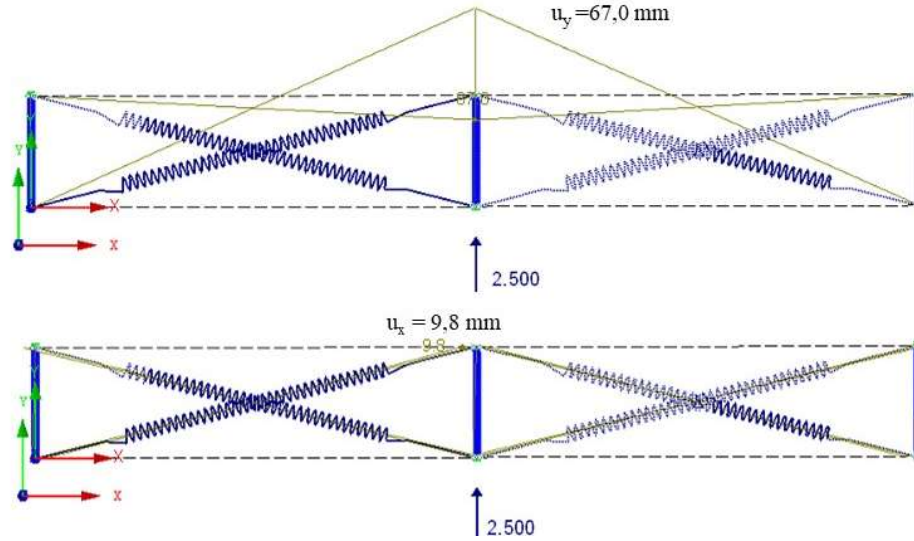


Obr. 73: Celkové posuny pro zatížení $F_y = -3,0$ kN

Experiment kolmo k fasádě – výstupy:

F_y	u_4	v_3
[kN]	[mm]	[mm]
2,50	68,59	11,1

Model DOOR – celková deformace modelu ve směru y a x pro zatížení $F_y = 2,5$ kN:

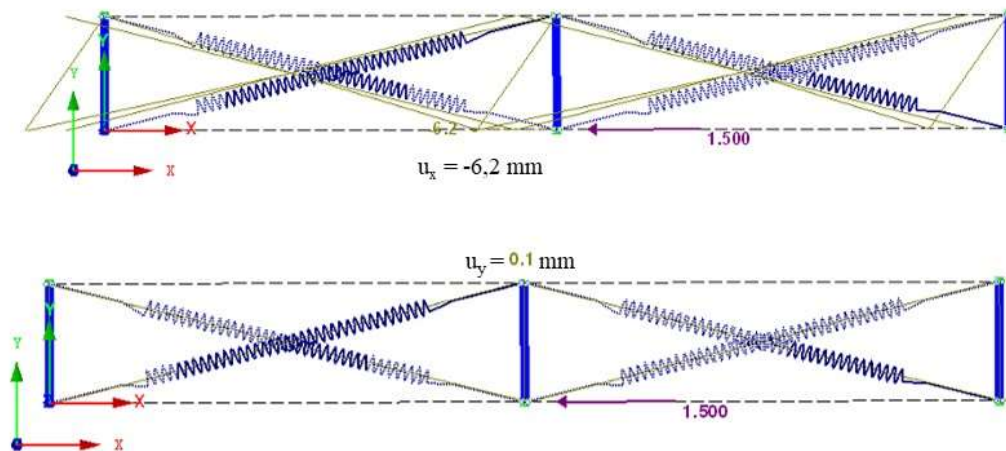


Obr. 74: Celkové posuny pro zatížení $F_y = 2,5$ kN

Experiment rovnoběžně s fasádou – výstupy:

F_x	u_3	$v_3 - v_4$
[kN]	[mm]	[mm]
-1,50	-0,69	-6,14

Model DOOR – celková deformace modelu ve směru x a y pro zatížení $F_x = -1,5$ kN:

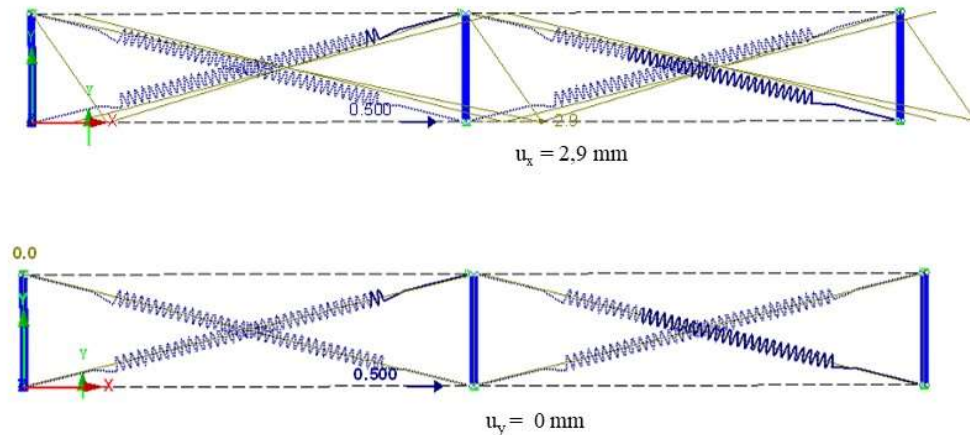


Obr. 75: Celkové posuny pro zatížení $F_x = -1,5$ kN

Experiment rovnoběžně s fasádou – výstupy:

F_x	u_3	$v_3 - v_4$
[kN]	[mm]	[mm]
0,50	-0,8	2,2

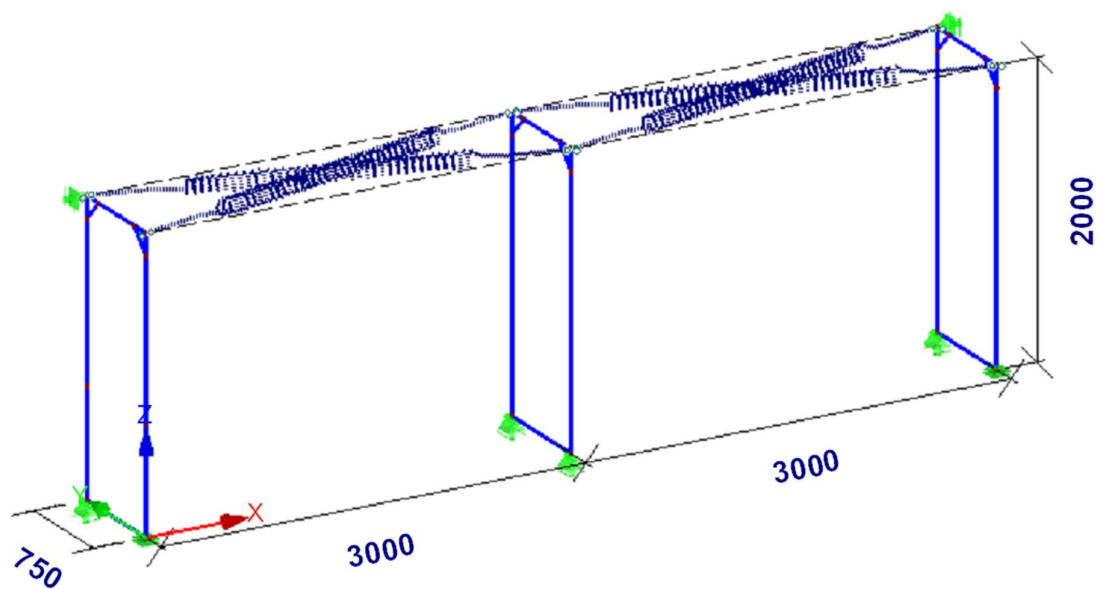
Model DOOR – celková deformace modelu ve směru x a y pro zatížení $F_x = 0,5$ kN:



Obr. 76: Celkové posuny pro zatížení $F_x = 0,5$ kN

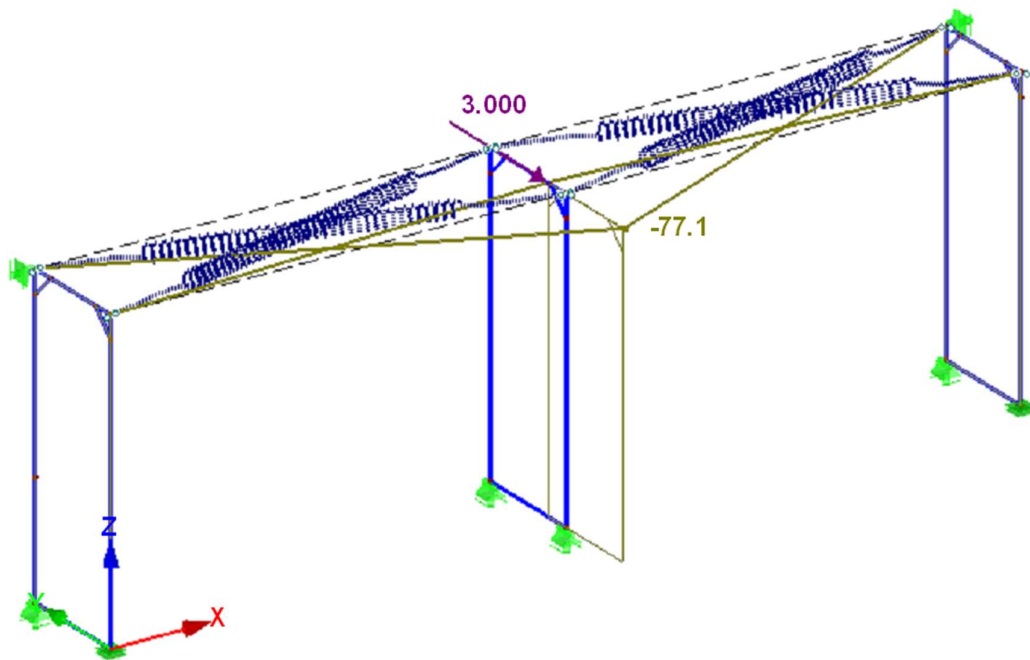
5.4 VERIFIKACE MODELU PODLAHOVÉHO DÍLCE

Použití numerického modelu obou podlahových dílců bylo ověřeno na modelu lešení, které se skládalo ze tří ráků (dvě pole). Model odpovídá provedeným experimentům. Na obr. 77 je schéma konstrukce lešení. Podlahové dílce jsou k rákům lešení připojeny podle detailu z obr. 69 a obr. 70.

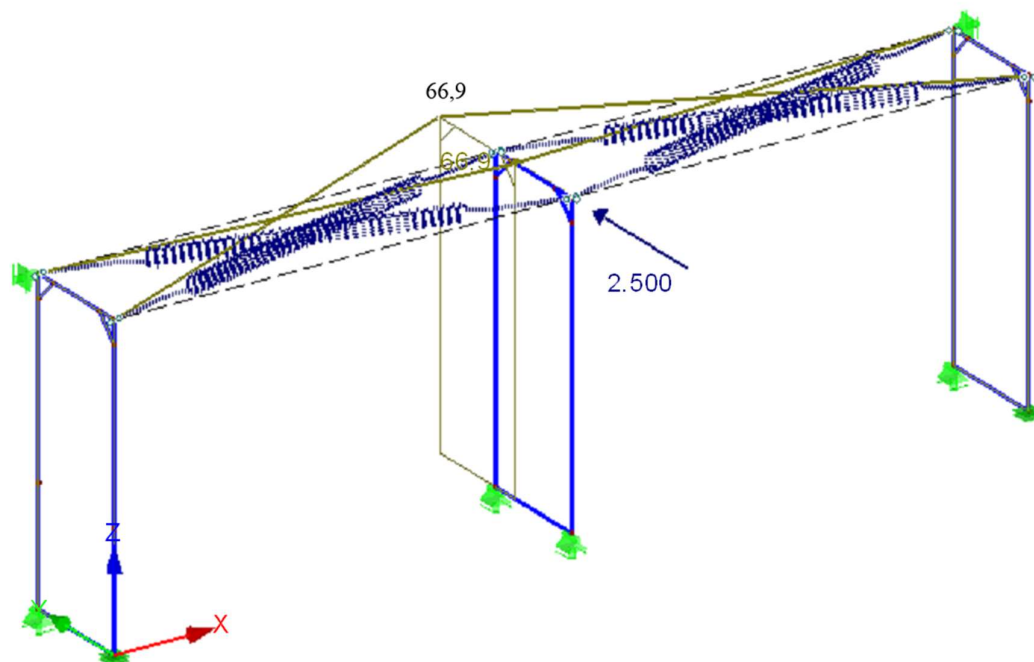


Obr. 77: Schéma prostorového modelu

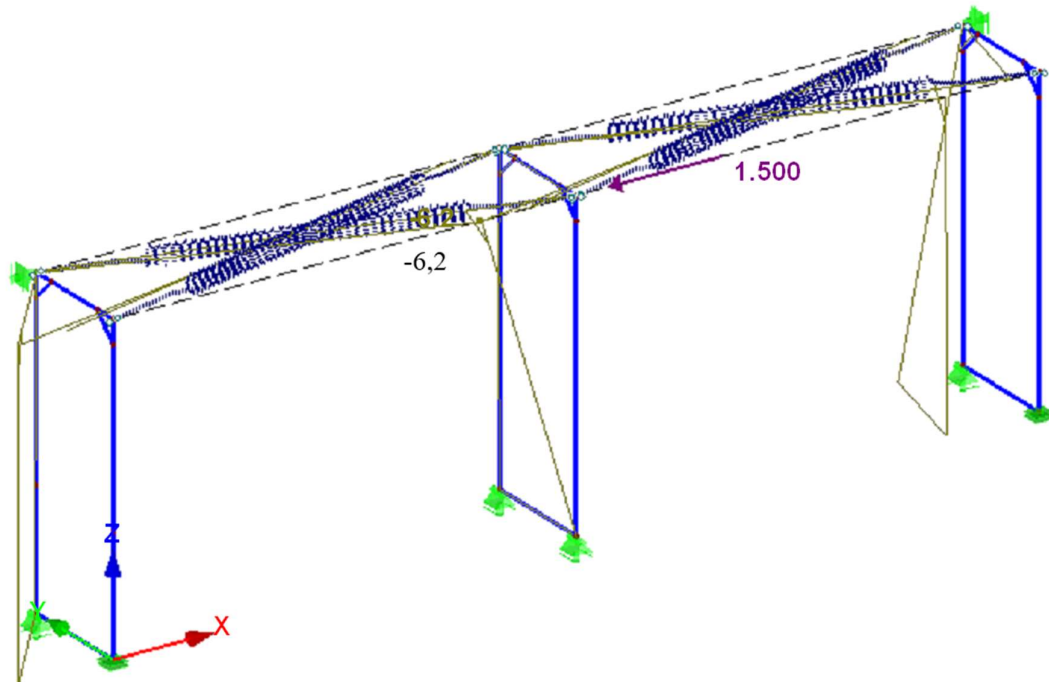
Na obr. 78 až jsou uvedené vybrané výstupy ze softwaru pro některá zatížení.



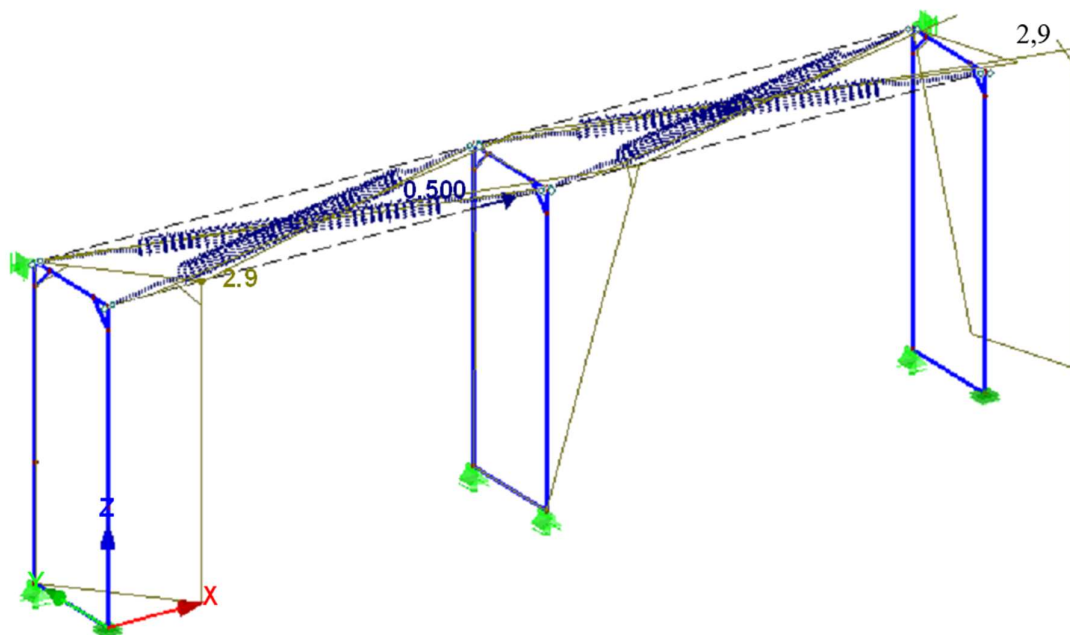
Obr. 78: Celkový posun ve směru osy Y pro zatížení $F_y = -3,0$ kN; $u_y = -77,1$ mm



Obr. 79: Celkový posun ve směru osy Y pro zatížení $F_y = 2,5$ kN



Obr. 80: Celkový posun ve směru osy X pro zatížení $F_x = 1,5$ kN



Obr. 81: Celkový posun ve směru osy X pro zatížení $F_x = 0,5$ kN

5.5 SHRnutí NUMERICKÉ ČÁSTI

V numerické části této práce byly nejprve odvozeny předběžné rovinné příhradové modely pro každou provedenou zkoušku zvlášť (modely kolmo k fasádě a modely rovnoběžně s fasádou). Ty byly následně validovány. V rámci validace byly jednotlivé části pracovních diagramů modelů linearizovány v obou směrech tak, aby se výsledky výpočtů co nejvíce přiblížily experimentům.

Po úspěšné validaci byly jednotlivé modely transformovány do jediného rovinného modelu, modelu podlahových dílců. Cílem bylo, aby jednotlivé podlahové dílce přebíraly zatížení, pro které byly navrženy a vzájemně se ovlivňovaly jen minimálně. Výsledné deformace modelu obsahují drobné nepřesnosti v porovnání s předběžnými rovinnými modely však výsledky mohou být použitelné.

Následně byla provedena verifikace na prostorovém modelu rámového lešení o dvou polích, jehož okrajové podmínky odpovídaly provedeným zkouškám. Výsledky verifikace jsou srovnatelné s rovinným modelem podlahového dílce.

6 ZÁVĚR

V rámci této práce byly provedeny celkem dva experimenty na standardní základní sestavě lešení. Cílem měření bylo co nejlépe popsat chování podlah lešení ve dvou vzájemně kolmých směrech (směr podélný a příčný) pro každou zkoušku. Měření tuhostí a vůlí podlahových dílců lešení vycházelo z výzkumu Dolejš [1] a normy [34], podle nichž bylo upraveno schéma pro zkoušky.

Norma doporučuje měření posunů jen ve směru působícího zatěžování, ale experimenty byly doplněny o další měřicí body zaznamenávajícími posuny ve směru kolmém na zatěžovací sílu. Pro zkoušku bylo použito rámové lešení SPRINT 75.

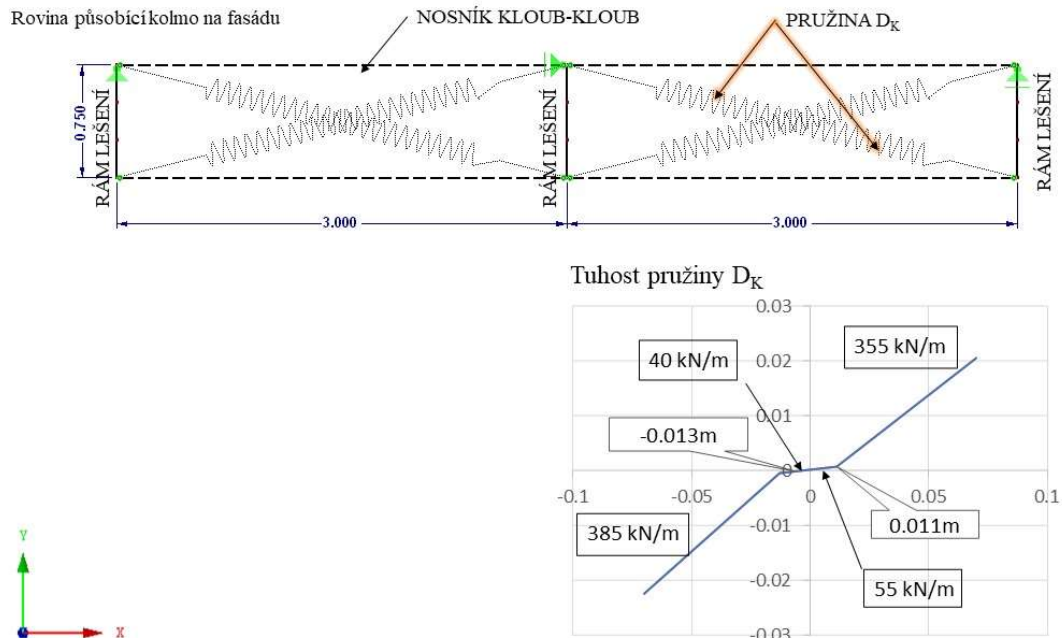
Výsledky měření byly následně vyhodnoceny několika metodami: standardně podle normy [42], vytvořením animace průběhu zatěžování a numericky.

Pro další část práce bylo použito numerické vyhodnocení experimentu, kde byly odvozeny rovnice jejichž řešením jsou tuhosti pružin, které simulují chování podlah lešení. Rovnice mají tvar

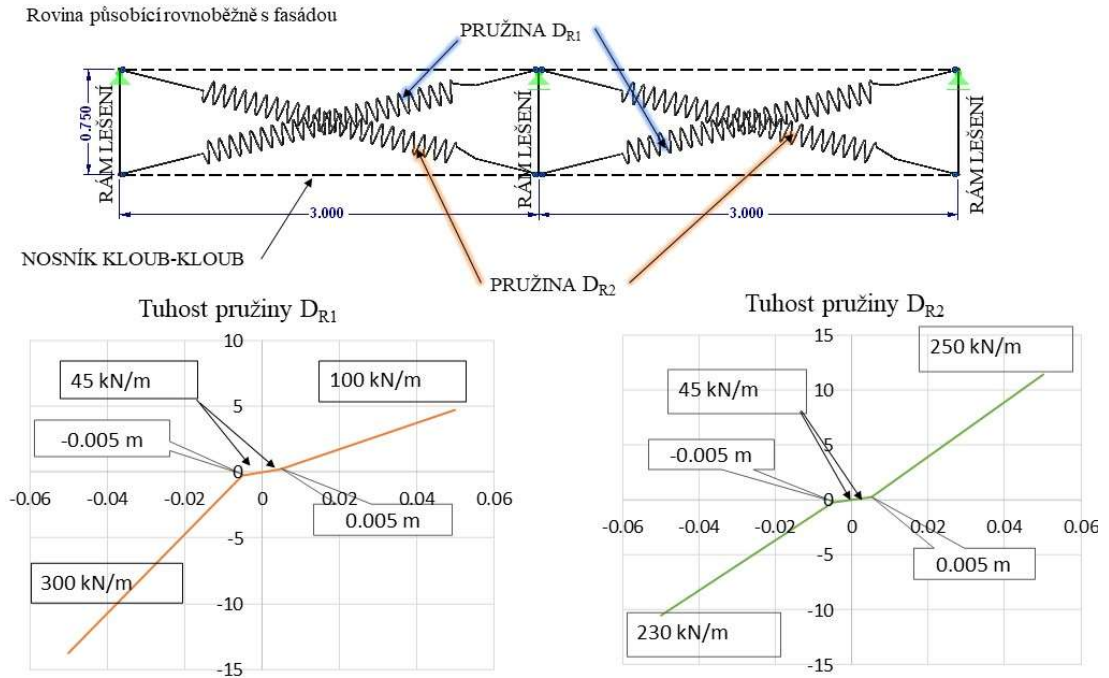
$$\frac{\partial F}{\partial k_{D1}} = \sum_{i=1}^n \left(\mathbf{d}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D1}} \mathbf{K} \mathbf{d}_i - \mathbf{f}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D1}} \mathbf{d}_i \right) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial k_{D2}} = \sum_{i=1}^n \left(\mathbf{d}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D2}} \mathbf{K} \mathbf{d}_i - \mathbf{f}_i^T \frac{\partial \mathbf{K}^T}{\partial k_{D2}} \mathbf{d}_i \right) = 0 \quad (13)$$

Vyřešením soustavy těchto rovnic byly získány odhady tuhostí diagonál v rovinném příhradovém modelu podlahy v jednom poli lešení. Po dosazení odvozených tuhostí do modelů a jejich odborné validaci jsou výsledné tuhosti a vůle podlahového systému pro zatížení působící kolmo na fasádu prezentovány na obr. 82 a na obr. 83 jsou uvedeny výsledné odvozené tuhosti a vůle pro druhý směr (rovnoběžně s fasádou).



Obr. 82: Tuhosti podlahového dílce - kolmo k fasádě.



Obr. 83: Tuhosti podlahového dílce – rovnoběžně s fasádou.

V numerické části práce byly nejprve vytvořeny předběžné rovinné příhradové modely podlahových dílců pro každou zkoušku zvlášť. Schéma modelů odpovídalo provedeným experimentům. Tyto modely byly vytvořeny v software RFEM 5. Modely se sestávají z tří typů prutů: nosník (příčel rámu), vazba kloub-kloub a pružiny. Pružiny jsou základním prvkem modelů, které zohledňují tuhosti a vůle podlahového systému a tím je zohledněno nelineární chování lešení ve vodorovném směru.

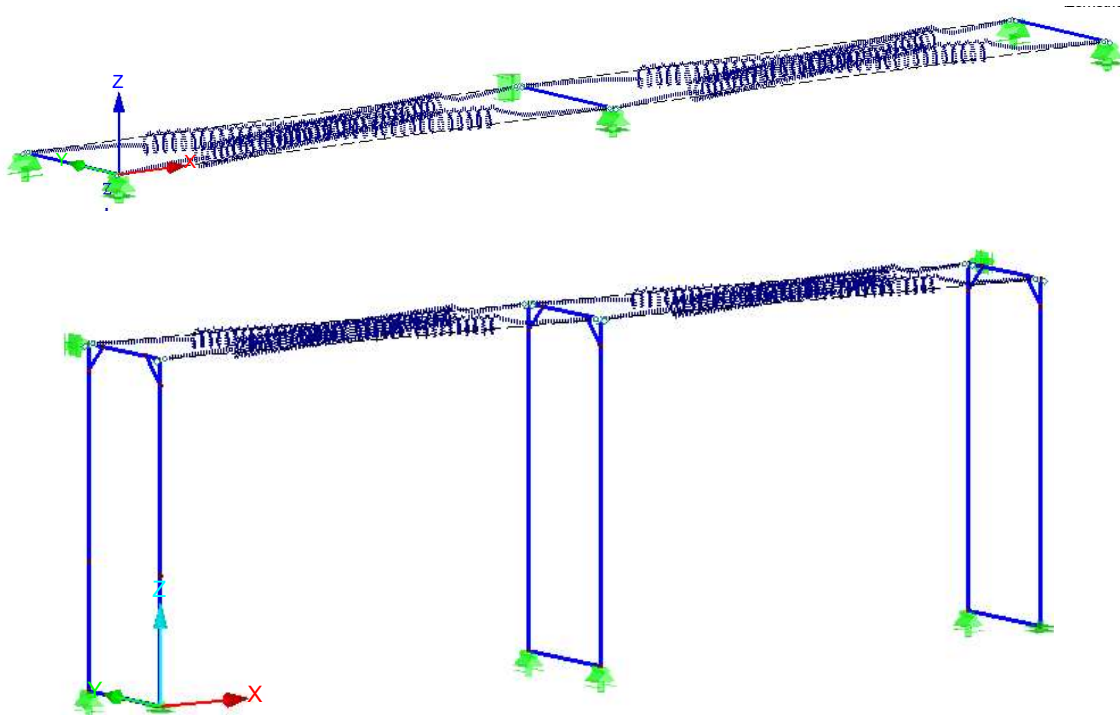
Postup nastavení prutu „Pružina...“ (v RFEM 5):

1. V okně *Nový prut* zvolíme *Typ prutu* „Pružina“.
2. Rozklikneme *Upravit typ prutu...* a v okně *Upravit parametry prutu typu „Pružina“* nastavíme v liště *Obecné*, způsob zadání „Diagram“.
3. Počet kroků pro kladnou i zápornou oblast jsou 3.
4. Průběh po posledním kroku je nastaven „Průběžně“.
5. V tab. 9 jsou uvedené parametry pro nastavení diagramu $\pm u$ a $\pm N$, které zohledňují tuhost pružiny.

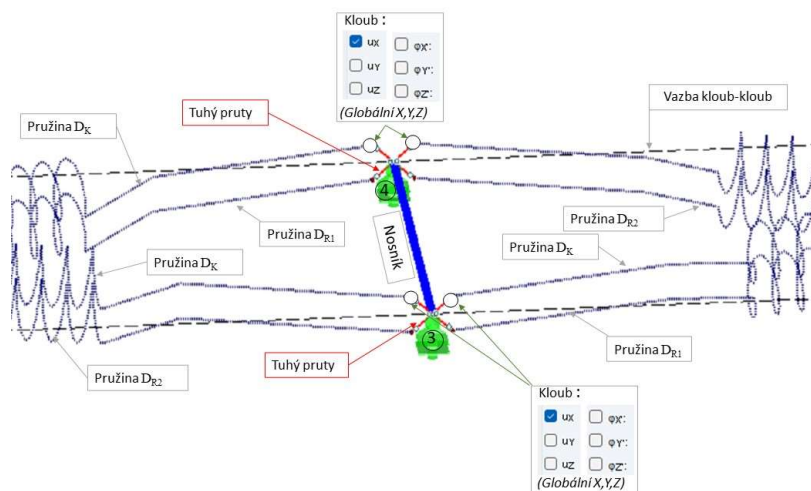
Tab. 9: Nastavení tuhosti pružin.

Nastavení D_K		Nastavení D_{R1}		Nastavení D_{R2}	
Kladná oblast diagramu		Kladná oblast diagramu		Kladná oblast diagramu	
+u [m]	+N [MN]	+u [m]	+N [MN]	+u [m]	+N [MN]
0.011	0.000605	0.005	0.000225	0.005	0.000225
0.07	0.02037	0.05	0.004725	0.05	0.011475
Záporná oblast diagramu		Záporná oblast diagramu		Záporná oblast diagramu	
-u [m]	-N [MN]	-u [m]	-N [MN]	-u [m]	-N [MN]
-0.013	-0.00052	-0.005	-0.000225	-0.005	-0.000225
-0.07	-0.022465	-0.05	-0.013725	-0.05	-0.010575

Oba systémy byly propojeny a okrajové podmínky nastaveny tak, aby pro jednotlivé směry zatěžování působila vždy příslušná část modelu. Výsledný model podlahy, který zohledňuje odlišné chování v obou vodorovných směrech, bude sloužit jako komponenta univerzálně použitelná v prostorovém prutovém modelu libovolné sestavy fasádního lešení. Pro jiné typy rámových lešení, které byly popsány v kapitole 2.1.2 bude nutné nejprve provést zkoušku na standardní základní sestavě lešení o dvou polích.



Obr. 84: Nahoře rovinný model podlahového dílce, dole prostorový model lešení.



Obr. 85: Detail připojení podlahového systému na střední nosník (příčník rámu)

Na obr. 84 je uvedeno schéma výsledného modelu podlahových dílců, nahoře je rovinný model podlahového dílce, dole prostorový model. Jednotlivé podlahové roviny jsou k ráům připojeny pomocí „tuhých prutů“.

Rovina rovnoběžně s fasádou je připojena k příčníku rámu tuze pomocí „tuhého prutu“. Rovina pro směr kolmo k fasádě je rovněž připojena pomocí „tuhého prutu“, který je na konci opatřen „vnitřním kloubem“. Kvůli zajištění numerické stability modelu musela být nastavena (minimální) tuhost kloubu na konci tuhého prutu. Detail připojení podlahového systému na střední rám je uveden na obr. 85.

6.1 PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

Jak bylo zjištěno během řešení této práce, doposud žádný výzkum ve svých pracích dostatečně nezohledňuje nelineárního chování lešení ve vodorovné rovině (rovina podlahy). Tato skutečnost vede k nepřesným výsledkům praktické aplikace těchto modelů. V rámci této disertační práce by navržen model, který reaguje na nedostatky stávajících výzkumných prací a zapojením nelinearit umožňuje dosáhnout přesnějších výsledků.

V rámci této práce byl vytvořen prostorový model podlahového dílce, který zohledňuje odlišné chování v obou vodorovných směrech, bude sloužit jako komponenta univerzálně použitelná v prostorovém prutovém modelu libovolné sestavy fasádního lešení.

Pro jiné typy rámových lešení, než je SPRINT 75, bude nutné nejprve provést zkoušku na standardní základní sestavě lešení o dvou polích a následně výsledná upravená data a dosadit do odvozené matice tuhosti (viz rovnice (10-11) v kapitole 4.3.3.1).

Výsledky této práce byly také aplikovány v ověřené technologii: Pokročilá metodika pro statické modelování konstrukcí systémových lešení.

6.2 NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝZKUM

Pro ověření chování podlahového dílce se doporučuje provést kompletní model na konkrétní fasádě včetně měření odezvy. Výsledky potom porovnat s prostorovým numerickým modelem, který bude obsahovat podlahové dílce z této práce. Tyto výsledky také porovnat se známými postupy návrhu lešení podle normy ČSN EN 12 810-1 [36].

LITERATURA

- [1] DOLEJŠ, J. Prostorové spolupůsobení prvků a dílců fasádního lešení. *Habilitační práce*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. 2012. 127 s.
- [2] CHUNG, K.F., YU, W.K. Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffolding. *Engineering Structures* 24. 429-442. 2002. DOI 10.1016/S0141-0296(01)00110-9. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029601001109>
- [3] YU, W.K., CHUNG, K.F., CHAN, S.L. Column buckling of structural bamboo. *Engineering Structures* 25. 755–768. 2003. DOI 10.1016/S0141-0296(02)00219-5. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029602002195>
- [4] FANG, D., SHEN, Q., WU, S., LIUD, G. A comprehensive framework for assessing and selecting appropriate scaffolding based on analytic hierarchy process. *Journal of Safety Research* 34. 589– 596. 2003. DOI 10.1016/j.jsr.2003.05.008. ISSN 00224375. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002243750300080X>
- [5] YU, W.K., CHUNG, K.F., CHAN, S.L. Axial buckling of bamboo columns in bamboo scaffolds. *Engineering Structures* 27. 61–73. 2005. DOI 10.1016/j.engstruct.2004.08.011. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029604002883>
- [6] ALBERMANI, F., GOH, G. Y., CHAN, S. L. Lightweigh bamboo double layer grid system. *Engineering Structures* 29. 1499-1506. 2007. DOI 10.1016/j.engstruct.2006.09.003. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029606003762>
- [7] BEALE, R. G. Scaffold research – A review. *Journal of Constructional Steel Research* 98. 2014. 188-200. DOI 10.1016/j.jsr.2014.01.016. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X14000388>
- [8] CHANDRANGSU, T., RASMUSSEN, K. Review of Past Research on Scaffold Systems. *Research report No R905*. The University of Sydney. 2009. ISSN 1833-2781
- [9] VAUX, S., WONG, C., HANCOCK G. Sway stability of steel scaffolding and formwork systems. *Advances in Steel Structures*, Vol. 1. pp. 311-319. 2002. ISBN 978-08-044017-0. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080440170500366>
- [10] ZHANG, H., RASMUSSEN, K. J. R. System-based design for steel scaffold structures using advanced analysis. *Journal of Constructional Steel Research*. 89. pp. 1-8. 2013. DOI 10.1016/j.csr.2013.05.014. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X13001557>
- [11] ZHANK, L., WANG, CH., SONG, G. Health Status Monitoring of Cuplock Scaffold Joint Connection Based on Wavelet Packte Analysis. *Shock and Vibration*. 2015. Vol. 7. pp 1-7. DOI: 10.1155/2015/695845. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029612004701>
- [12] PIENKO, M., BŁAZIK-BOROWA, E. Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes. *Engineering Structures*, 48. pp. 1-9. 2013. DOI 10.1016/j.engstruct.2012.08.028. ISSN 01410296. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/277341586_Health_Status_Monitoring_of_Cuplock_Scaffold_Joint_Connection_Based_on_Wavelet_Packet_Analysis#fullTextFileContent
- [13] PENG, J.L., WU, C.W. CHAN, S.L., HUANG, C.H., Experimental and numerical studies of practical systém scaffolds. *Journal of Constructional Steel Research* 91. pp. 64-75. 2013. DOI 10.1016/j.csr.2013.07.028. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X13002216>
- [14] ROBAK, A., PIENKO, M., BŁAZIK-BOROWA, E., BĘC, J., SZER, I., KASZYNSKA, M. Analysis of Exploitation Damages of the Frame Scaffolding. *MATEC Web of Conferences*. Ročník 284. 2019. DOI 10.1051/mateconf/201928408008. ISSN 2261-236X.
- [15] HOŁA, B., NOWOBILSKI, T., RUDY, J., BŁAZIK-BOROWA, E. Dangerous events related to the use of scaffolding. *Czasopismo Techniczne*. Ročník 7. 2017. DOI 10.4467/2353737XCT.17.106.6647. ISSN 2353737X.
- [16] BŁAZIK-BOROWA, E., SZER, J. The analysis of the stages of scaffolding “life” with regard to the decrease in the hazard at building works. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Ročník 15. 516-524. 02/2015. DOI 10.1016/j.acme.2014.09.009. ISSN 16449665.

- [17] BŁAZIK-BOROWA, E., PIENKO, M., ROBAK, A., BOROWA, A., JAMIŃSKA-GADOMSKA, P. Analysis of Ledger-Stand Joints in the Aluminum Modular Scaffold. *Archives of Civil Engineering*. 63. 17-31. 2017. DOI 10.1515/ace-2017-0002. ISSN 1230-2945.
- [18] PRABHAKARAN, U., BEALE, R. G., GODLEY, M. H. R. Analysis of scaffolds with connections containing looseness. *Computers & Structures*. 89. 1944-1955. 2011. DOI 10.1016/j.compstruc.2011.03.016. ISSN 00457949.
- [19] CAHYNA, P. Dílcové lešení HAKI dříve a dnes. *Nepravidelný bulletin Českomoravské komory lešenářů*, z.s. 23. Březen 2023. Dostupné také z: <https://www.komoralesenaru.cz/sites/default/files/pdf/casopis-lesenar-23.pdf>
- [20] DOLEJŠ, J., ILČÍK, J., KUNST, I., PICEK, Z., ŠKRÉTA, K., VLASÍK, S. Lešení v zrcadle norem. Vydalo České vysoké učení technické v Praze. 192 s. 2015. ISBN 978-80-01-05706-3.
- [21] CIMELLARO, G. P., DOMANESCHI, M. Stability analysis of different types of steel scaffolds. *Engineering Structures*. 152. 535-548. 2017. DOI 10.1016/j.engstruct. 2017.07.091. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617325142>
- [22] ROBAK, A., BŁAZIK-BOROWA, E., BEĆ, J. Influence of exploitation damage on the capacity of scaffolding frame standards. *COMPUTER METHODS IN MECHANICS (CMM2017): Proceedings of the 22nd International Conference on Computer Methods in Mechanics*. Lublin, Poland. 2018. DOI 10.1063/1.5019165. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5019165>
- [23] BUKOVSKÁ, M. Zkoušení a certifikace dočasných stavebních konstrukcí. *Česká komora lešenářů. Technická normalizační komise č. 92 – seminář*. (nepublikováno) Listopad 2013.
- [24] Webové stránky SCARSEV: <https://www.scaserv.cz/projekty>
- [25] VLASÁK, S. Lešení (TP 3.7). Internetové stránky: *PROFESIS: Profesní informační systém ČKAIT*. 2019. Available also from: <https://profesis.ckait.cz/dokumenty-ckait/tp-3-7/#1-2>
- [26] Webové stránky SERWIS BUDOWY: https://www.serwisbudowy.com/cs_CZ/p/Varsavska-lesenarska-plosina/200
- [27] BEALE, R.G., GODLEY, M.H.R. Numerical modelling of full-scale tube and fitting scaffold tests. *7th EUROMECH Solid Mechanics Conference*. Lisbon, Portugal. 2009.
- [28] BŁAZIK-BOROWA, E., ROBAK, A. Numerical Models of Scaffolding Decks and Their Applications. *Int J Civ Eng* 15. 2017. 979-989. Dostupné také z: https://www.scia.net/en/system/files/documents/wp-scaffolding_update2020.pdf
- [29] BŁAZIK-BOROWA, E., GONTARZ, J. The influence of the dimension and configuration of geometric imperfections on the static strength of a typical façade scaffolding, *Archive of Civil and Mechanical Engineering* 16. pp. 269-281. 2016. DOI 10.1016/j.acme.2015.11.003. ISSN 16449665. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1644966515001090>
- [30] ČSN EN 12 811-1 (73 8123): Dočasné stavební konstrukce – Část 1: Pracovní lešení – Požadavky na provedení a obecný návrh. ČNI 2004.
- [31] ČSN EN 1993-1-1: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby.
- [32] PENG, J.L., CHEN, K.H, CHEN, W.T. Experimental and analytical studies on steel scaffolds under eccentric loads. *Journal of Constructional Steel Research*. 65. 422-435. 2009. DOI 10.1016/j.jcsr.2008.03.024. ISSN 0143974X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X08001090>
- [33] VLASÁK, S. Technická dokumentace lešení. *Nepravidelný bulletin Českomoravské komory lešenářů*, z.s. 2013. Dostupné také z: <file:///D:/Users/pavla/Documents/%C5%A0kola/ Ph.D/ %C4%8D%C3%AInky,literatura/ %C4%8D%C3%AInky/%C4%8D%C3%AInky%20v%20zotero/storage/AS79R7AD/10539766 3-Nepravidelny-bulletin-ceskomoravske-komory-lesenaru-o-s-c-8-2013.html>
- [34] ČSN EN 12 810-2 (73 8111): Fasádní dílcová lešení – Část 2: Zvláštní postupy při navrhování konstrukce. ČNI 2004.

- [35] DOLEJŠ, J., Rovinné modely pro statické výpočty dílcových fasádních lešení. *Nepravidelný bulletin Českomoravské komory lešenářů*, z.s. 13. Duben 2017. Dostupné také z: <https://www.komoralesenaru.cz/sites/default/files/pdf/casopis-lesenar-13.pdf>
- [36] ČSN EN 12 810-1 (73 8111): Fasádní dílcová lešení – Část 1: Požadavky na výrobky. ČNI 2004.
- [37] DOLEJŠ, J., Vývoj prostorového modelu pro dílcové lešení. *Nepravidelný bulletin Českomoravské komory lešenářů*, z.s. 14. Únor 2018. Dostupné také z: <https://www.komoralesenaru.cz/sites/default/files/pdf/casopis-lesenar-14.pdf>
- [38] BAMM, D. Zur Wahl der Rechenmodellen bei der Berechnung von Fassadengerüsten. *Vortragsmanuskript*. Berlin 1993.
- [39] NATHER, F., LINDNES, J., HERTLE, R. Handbuch des Gerüstbau, *Erst & Sohn*. Berlin, 2005. 518 s., ISBN 978-3-433-01323-6.
- [40] TENDELOO, P.V. Providing an accurate design and time-saving workflow. *White Paper Scia Scaffolding*. 2020. 35 s. Dostupné také z: https://www.scia.net/en/system/files/documents/wp-scaffolding_update2020.pdf
- [41] SCIA nv, webinář: Designing scaffolding in SCIA Engineer according to EN 12811-1 [on-line]; *YouToBe.com*, 7. 11. 2019, Dostupné také z: https://www.youtube.com/watch?v=vGPTNwB6tfE&ab_channel=SCIANv
- [42] ČSN EN 12 811-3 (73 8123): Dočasné stavební konstrukce – Část 3: Zatěžovací zkoušky. ČNI 2004.
- [43] SCASERV a.s.: Fasádní rámové lešení SPRINT 75/109. Technické listy výrobce: návod na sestavení a použití. 02/2018. Dostupné také z: <https://cdn1.idek.cz/dek/document/1123146810-scaserv-sprint-75>
- [44] WOLFS, K. Horizontale stijffheid sprint 75 met stalen delen. *Sprint Horizontal Stiffness Test Report (unpublished text)*. Netherlands. 2006.
- [45] Dlubal.com: Online manuál. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/stahovani-a-informace/dokumenty/online-manualy>

OBRÁZKY

Obr. 1: Fotografie bambusového lešení, Lombok, Indonésie (2015)	9
Obr. 2: Konstrukce lešenářských prvků typu cuplock [11]	10
Obr. 3: Modulové lešení s rozetou: (a) rozeta; (b) spoj s podélným vodorovným prvkem a ztužidlem; (c) spoj s podélným vodorovným prvkem [12]	10
Obr. 4: Typy příčných ráků – zleva: uzavřený rám, otevřený rám, H-rám, T-rám, žebříkový rám [20]	12
Obr. 5: Fotografie ráku ze zkoušky [22]	12
Obr. 6: Vztah velikosti poškození k max. síle způsobující ztrátu stability prvku [22]	13
Obr. 7: Typy rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,732 m [23]	15
Obr. 8: Typy rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,732 m [23]	16
Obr. 9: Typy rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,739 m [23]	17
Obr. 10: Typy rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,739 m [23]	18
Obr. 11: Typ rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,739 m [23]	19
Obr. 12: Typ rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,65 m [23]	19
Obr. 13: Typ rámových lešení s osovou šířkou ráku 0,65 m [23]	20
Obr. 14: Rámová lešení s uzavřenými ráky: a) HUNNEBECK (Harsco) - typ lešení „BOSTA 70“; b) ULMA C y E, S. Coop - typ lešení „DORPA 700 (resp. 1020)“; c) SCASERV a.s.- typ lešení „SPRINT 75 (109)“ [21]	20
Obr. 15: Rámová lešení s otevřenými ráky: a) Ringer KG, - typ lešení „Doppelgeländergerüst DG 0,65 m“; b) GRAF Baugerätehandel GmbH & Co.KG - typ lešení „GRAF“, 0,65“; c) PERI GmbH - typ lešení „PERI UP T 70 (resp. PERI UP T 100)“ [23]	21
Obr. 16: Lešení Sprint 75 - objekt DOCK 05, Praha (2021) [24]	21
Obr. 17: Lešení Sprint 75 – vodojem Hošťálkovice (vlevo) výstavba bytových domů DOMEQ (Brno) (vpravo) [24]	22
Obr. 18: Ocelové podlahy s prolisy [26]	22
Obr. 19: Schéma modelování geometrických imperfekcí pomocí posunu δ [29]	24
Obr. 20: Příklad náhradních rovinných systémů v rovině kolmo k fasádě [35]	26
Obr. 21: Příklad systému podél fasády [35]	26
Obr. 22: Příklady sestav, kde není možné vytvořit rovinné modely [35]	27
Obr. 23: Model DODR (nahore), model DOBR (dole) [37].	28
Obr. 24: Ocelová perforovaná podlaha [28]	28
Obr. 25: Model č. 2 (vlevo) a model č. 3 (vpravo) [28]	29
Obr. 26: Typické zkušební uspořádání pro zkoušku kolmo k fasádě (vlevo) a rovnoběžně s fasádou (vpravo) [34]	30
Obr. 27: Schéma 2D modelů podlahových dílců pro odvození nelineární matice tuhosti	31
Obr. 28: Použité komponenty lešení SCARSEV „Sprint 75“ [43]	33
Obr. 29: Schéma měřících bodů pro obě zkoušky.	34
Obr. 30: Fotografie ze zkoušky tuhosti podlahy lešení kolmo k fasádě	34
Obr. 31: Fotografie ze zkoušky tuhosti podlahy lešení rovnoběžně s fasádou.	35
Obr. 32: Osmý zatěžovací cyklus, vpravo – deformace středního ráku.	35
Obr. 33: Záznam měření posunů u_4 (vlevo) a posunů v_3 (vpravo) na středním ráku	36
Obr. 34: Záznam měření posunů ze zkoušky kolmo k fasádě (pravý rám)	37
Obr. 35: Záznam měření posunů ze zkoušky kolmo k fasádě (levý rám)	37
Obr. 36: Záznam měření posunů u_3 (vlevo), v_3 a v_3 (vpravo) na středním ráku.	38
Obr. 37: Záznam měření posunů ze zkoušky rovnoběžně s fasádou (pravém ráku)	38
Obr. 38: Záznam měření posunů ze zkoušky rovnoběžně s fasádou (levém ráku)	39
Obr. 39: Záznam měření posunů kolmo k fasádě (vlevo) a rovnoběžně s fasádou (vpravo) pro 4. zatěžovací cyklus.	40
Obr. 40: Znázornění hraničních hodnot posunů pro jednotlivé části zkoušky (vlevo kolmo k fasádě, vpravo rovnoběžně s fasádou)	40
Obr. 41: Linearizace části grafů pro zkoušku kolmo k fasádě.	41
Obr. 42: Linearizace části grafů pro zkoušku rovnoběžně s fasádou.	42
Obr. 43: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení 0 kN až -0,3 kN.	44
Obr. 44: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení -0,5 kN až -2,0 kN.	45
Obr. 45: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení -2,5 kN až -3,0 kN a 0 kN až 0,1 kN.	46
Obr. 46: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení 0,2 kN až 1,0 kN.	47
Obr. 47: Zkouška kolmo k fasádě: zatížení 1,5 kN až 3,0 kN.	48

Obr. 48: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení 0 kN až -0,3 kN.	49
Obr. 49: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení -0,5 kN až -2,0 kN.	50
Obr. 50: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení -2,5 kN až -3,0 kN a 0 kN až 0,1 kN.	51
Obr. 51: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení 0,2 kN až 1,0 kN.	52
Obr. 52: Zkouška rovnoběžně s fasádou: zatížení 1,5 kN až 3,0 kN.	53
Obr. 53: Upravené závislosti posunů na síle pro zkoušku kolmo k fasádě	54
Obr. 54: Upravené závislosti posunů na síle pro zkoušku rovnoběžně s fasádou	54
Obr. 55: Rovinné modely podlahových dílců pro jednotlivé zkoušky	56
Obr. 56: Tuhosti podlahového dílce pro zkoušku kolmo k fasádě (vlevo) a nastavení pružiny pro zkoušku kolmo k fasádě v RFEM (vpravo)	57
Obr. 57: Validace 2D modelů pro zkoušku kolmo k fasádě	57
Obr. 58: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení 3,0 kN.	58
Obr. 59: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení 2,0 kN.	59
Obr. 60: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení.	59
Obr. 61: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy Z pro zatížení.	59
Obr. 62: Tuhosti podlahového dílce pro zkoušku rovnoběžně s fasádou	60
Obr. 63: Validace 2D modelů pro zkoušku rovnoběžně s fasádou	60
Obr. 64: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení 2,97 kN.	61
Obr. 65: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení 2,0 kN.	61
Obr. 66: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení -1,0 kN.	62
Obr. 67: Výsledky z RFEM - celkový posun modelu ve směru osy X pro zatížení -1,5 kN.	62
Obr. 68: Schéma modelu podlahového dílce	63
Obr. 69: Detail připojení podlahového systému na krajní nosník (příčnick rámu)	64
Obr. 70: Detail připojení podlahového systému na střední nosník (příčnick rámu)	64
Obr. 71: Nastavení kloubu na konci prutu	65
Obr. 72: Porovnání posunů mezi modelem a experimentem	66
Obr. 73: Celkové posuny pro zatížení $F_y = -3,0$ kN	66
Obr. 74: Celkové posuny pro zatížení $F_y = 2,5$ kN	67
Obr. 75: Celkové posuny pro zatížení $F_x = -1,5$ kN	67
Obr. 76: Celkové posuny pro zatížení $F_x = 0,5$ kN	68
Obr. 77: Schéma prostorového modelu	68
Obr. 78: Celkový posun ve směru osy Y pro zatížení $F_y = -3,0$ kN; $u_y = -77,1$ mm	69
Obr. 79: Celkový posun ve směru osy Y pro zatížení $F_y = 2,5$ kN	69
Obr. 80: Celkový posun ve směru osy X pro zatížení $F_x = 1,5$ kN	70
Obr. 81: Celkový posun ve směru osy X pro zatížení $F_x = 0,5$ kN	70
Obr. 82: Tuhosti podlahového dílce - kolmo k fasádě.	72
Obr. 83: Tuhosti podlahového dílce – rovnoběžně s fasádou.	73
Obr. 84: Nahoře rovinný model podlahového dílce, dole prostorový model lešení.	74
Obr. 85: Detail připojení podlahového systému na střední nosník (příčnick rámu)	74

TABULKY

Tab. 1: Etapy navrhování konstrukce dílcového lešení [34][33].	25
Tab. 2: Linearizovaný sklon.	41
Tab. 3: Průsečíky aproximačních funkcí s osou x ($y = 0$).	42
Tab. 4: Linearizovaný sklon.	43
Tab. 5: Průsečíky aproximačních funkcí.	43
Tab. 6: Výsledky zkoušek.	43
Tab. 7: Porovnání naměřených a vypočtených deformací	58
Tab. 8: Porovnání naměřených a vypočtených deformací.	61
Tab. 9: Nastavení tuhosti pružin.	73