

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza vlivů na poškození laku karoserie od těsnění dveří

Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Grulich**
Osobní číslo: **D23450**
Studijní program: **N0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Stavba vozidel**
Téma práce: **Analýza vlivů na poškození laku karoserie od těsnění dveří**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů**

Zásady pro vypracování

Diplomová práce vzniká ve spolupráci s firmou Škoda Auto a.s. Hlavním cílem je analýza příčin poškození karoserie v místě těsnění dveří. Dlouhodobé jízdní zkoušky, popř. dlouhodobá zkouška zavírání dveří, slouží mimo jiné k ověření funkce těsnění dveří. Těsnění někdy při těchto zkouškách odírá lak karoserie nebo dveří, což se vykazuje jako závada související s korozní odolností vozu. Součástí práce je analyzovat síly od těsnění na konkrétním případě nejdříve pomocí MKP výpočtového modelu a poté provedením experimentu (měření pomocí snímače Tekscan). Na závěr budou definována opatření, která by mohla vést k odstranění závady.

Vypracovat:

- Rešerše provedení těsnění částí karoserie v automotive.
- Popis analyzovaného dílu včetně materiálu.
- Vytvoření MKP výpočtového modelu konkrétní varianty provedení těsnění v místě dveří.
- Návrh experimentu a následné vyhodnocení výsledků. Pro měření použijte sérii zjednodušených vzorků.
- Vyhodnocení výsledků experimentu a verifikace (porovnání) s výsledky MKP modelu.
- Definice opatření za cílem odstranění závady. V případě konstrukční změny provést ověřovací MKP analýzy nového konstrukčního uzlu.
- Závěr

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] Interní materiály a modely ŠKODA Auto.
- [2] Shigley, J., E., Mischke, Ch., R., Budynas, R., G. *Konstruování strojních součástí*. Nakladatelství VUTIUM, VUT Brno, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] Bauman, Judson T. *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components – A Guide for Design Engineers*, Hanser Publishers, 2008.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Tomek, Ph.D.**
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: **7. února 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petr Tomek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 7. února 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Analýza vlivů na poškození laku karoserie od těsnění dveří jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 5. května 2025

Bc. Ondřej Grulich v. r.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Tomkovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při práci na výpočtových modelech těsnění v programu SolidWorks Simulation. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D. za realizaci výroby přípravku a asistenci při tahových zkouškách. Mé poděkování patří rovněž všem zaměstnancům společnosti Škoda Auto, zejména pak panu Ing. Jaroslavu Ciprovi a panu Ing. Květoslavu Zdražilovi za ochotu, vstřícnost a předání důležitých informací a poznatků, které mi pomáhaly při vypracování této práce. V neposlední řadě bych chtěl vyjádřit vděčnost své rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole a byla mi oporou po celou dobu studia.

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá problematikou poškození laku karoserie způsobeného kontaktem s těsněním dveří. V teoretické části je uveden přehled těsnících systémů karoserie osobních automobilů, a to včetně jejich konstrukce, materiálového složení, metod montáže a výrobních technologií. Praktická část je zaměřena na zkoumání příčného rozložení kontaktního tlaku mezi těsněním dveří a postranicí karoserie při různých tloušťkách spáry. Pro analýzu byly použity numerické simulace MKP v programu SolidWorks Simulation. Výsledky simulací byly následně ověřeny experimentálním měřením pomocí snímače Tekscan. Na základě zjištěných poznatků byly navrženy možnosti konstrukčních a technologických úprav s cílem snížit riziko vzniku poškození laku karoserie.

KLÍČOVÁ SLOVA

těsnění karoserie, těsnění dveří, poškození laku, kontaktní tlak, metoda konečných prvků (MKP), experimentální měření, snímač Tekscan

TITTLE

Analysis of the effects on the damage to the body paint from the door seal.

ANNOTATION

This thesis deals with the issue of body paint damage caused by contact with the door seal. The theoretical part provides an overview of body sealing systems used in passenger cars, including their structure, material composition, assembly methods and production technologies. The practical part focuses on investigating the transverse distribution of contact pressure between the door seal and the body side panel at various gap thicknesses. The analysis was carried out using FEM simulations in SolidWorks Simulation software. The simulation results were subsequently verified by experimental measurements using a Tekscan sensor. Based on the findings, possible design and technological modifications were proposed to reduce the risk of body paint damage.

KEYWORDS

body sealing, door seal, paint damage, contact pressure, finite element analysis (FEA), experimental measurement, Tekscan sensor

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	16
Seznam symbolů	17
Seznam zkratk	19
1 Úvod	21
2 Těsnící systémy karoserie osobních automobilů	22
2.1 Druhy těsnění.....	22
2.1.1 Statická těsnění.....	22
2.1.2 Dynamická těsnění	28
2.1.3 Obšťihky skel.....	32
2.2 Montáž těsnění.....	33
2.2.1 Klipování	33
2.2.2 Lepení.....	34
2.2.3 Roll-forming	35
2.3 Technologie výroby těsnění.....	36
2.3.1 Výroba profilů – extruze.....	36
2.3.2 Dělení profilů.....	40
2.3.3 Spojování profilů	42
2.3.4 Výroba profilů – vstřikování	44
2.4 Povrchové úpravy těsnění.....	45
2.4.1 Sametování (flocking)	45
2.4.2 Slip-coating.....	47
2.4.3 Lakování	47
2.5 Materiály těsnění	48
2.5.1 Tvrdost polymerů	49
2.5.2 Výztuhy v těsněních	50

2.5.3	EPDM	50
2.5.4	Termoplastické elastomery	51
2.5.5	Polypropylen.....	52
2.6	Parametry ovlivňující kvalitu těsnění	53
3	Popis analyzovaného těsnění	55
4	MKP simulace	57
4.1	Tahová zkouška EPDM materiálů	57
4.1.1	Popis zkoušky a její průběh	57
4.1.2	Výpočet parametrů	58
4.1.3	Vyhodnocení tahové zkoušky.....	59
4.2	MKP výpočtové modely	61
4.2.1	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 10,77 mm (nominál)	63
4.2.2	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 11,77 mm	66
4.2.3	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 12,77 mm	69
4.2.4	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 9,77 mm	72
4.2.5	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 8,77 mm	75
4.2.6	Celková síla působící v kontaktech	78
5	Experiment se zjednodušenými vzorky	80
5.1	Návrh přípravku.....	80
5.1.1	Popis přípravku.....	80
5.1.2	Tuhostní analýza.....	81
5.2	Měřicí zařízení	87
5.2.1	I-Scan systém.....	87
5.2.2	Snímač Tekscan	88
5.3	Příprava měření.....	90
5.4	Kalibrace snímače.....	91
5.5	Průběh experimentu a naměřená data	93

5.5.1	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 10,77 mm (nominál)	93
5.5.2	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 11,77 mm	95
5.5.3	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 12,77 mm	97
5.5.4	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 9,77 mm	100
5.5.5	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 8,77 mm	102
5.5.6	Vyhodnocení experimentu	105
6	Vyhodnocení výsledků a návrh možných opatření	106
6.1	Porovnání výsledků MKP simulací a experimentu	106
6.1.1	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 10,77 mm (nominál)	106
6.1.2	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 11,77 mm	107
6.1.3	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 12,77 mm	108
6.1.4	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 9,77 mm	109
6.1.5	Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 8,77 mm	110
6.1.6	Celková síla působící v kontaktu	111
6.2	Návrh možných opatření	112
6.2.1	Zvětšení tloušťky spáry	113
6.2.2	Úprava tvaru profilu a materiálových vlastností	113
6.2.3	Zvýšení adheze těsnění	114
6.2.4	Ochrana proti vnikání nečistot	115
6.2.5	Použití ochranné fólie (PPF)	115
6.2.6	Opatření pro vstříkované koncovky	116
7	Závěr	117
	Použitá literatura	118
	Seznam příloh	122
	Příloha A: Redukované napětí těsnění	123
	Příloha B: Síť konečných prvků	128
	Příloha C: Výkresová dokumentace	129

Seznam obrázků

Obr. 1:	Technologické otvory v podlaze. Upraveno [4]	22
Obr. 2:	Metody utěsnění technologických otvorů při výrobě: (a) záplata, (b) zátka, (c) termoformovaný materiál [4]	23
Obr. 3:	Příklad vzniku větší mezery mezi plechy karoserie – tzv. „myší díra“. Upraveno [4]	23
Obr. 4:	Statická těsnění: (1) – Vedení skla, (2) – Vnější stírací těsnění, (3) – Vnitřní stírací těsnění [1]	24
Obr. 5:	Spojení profilů vedení skla předních dveří [1]	24
Obr. 6:	Vedení skla předních dveří [1]	25
Obr. 7:	Příklad koncepce těsnění s viditelným rámečkem [1]	25
Obr. 8:	Příklad koncepce těsnění se skládaným rámečkem [1]	26
Obr. 9:	Příklad koncepce těsnění u bezrámečkových dveří [1]	26
Obr. 10:	Vnější stírací těsnění [1]	27
Obr. 11:	Montovaná hliníková lišta u vnějšího stíracího těsnění [1]	27
Obr. 12:	Lišta z nerez oceli jako součást výztuhy vnějšího stíracího těsnění [1]	28
Obr. 13:	Vnější stírací těsnění s chromovou termoplastickou folií [1]	28
Obr. 14:	Dynamická těsnění: (1) – Těsnění kapoty, (2) – Těsnění vodní přepážky, (3) – Vnější těsnění dveří, (4) – Vnitřní těsnění dveří, (5) – Těsnění víka pátých dveří [1]	29
Obr. 15:	Vnitřní těsnění dveří [1]	30
Obr. 16:	Těsnění víka pátých dveří [1]	31
Obr. 17:	Příklad koncepce těsnění u vozidla kategorie SUV nižší třídy [1]	32
Obr. 18:	Obstříky skel: (1) – Pevné sklo ve dveřích, (2) – Boční pevné sklo v postranici [1]	33
Obr. 19:	Pevné sklo ve dveřích [1]	33
Obr. 20:	Montáž vnějšího těsnění dveří pomocí klipů [6]	34
Obr. 21:	Profil těsnění opatřený samolepicí páskou [14]	34
Obr. 22:	Profil těsnění před montáží (vlevo) a po montáží (vpravo) metodou roll-forming [5]	35
Obr. 23:	Zařízení pro montáž těsnění technologií roll-forming. Upraveno [5]	36
Obr. 24:	Schéma extruzní linky (bez přídavných zařízení) [1]	37
Obr. 25:	Podtlaková kalibrace [17]	37

Obr. 26:	Příklad extruzní hubice – střešní profil vedení skla [1].....	38
Obr. 27:	Extruze EPDM profilu – iniciace síťování (vulkanizace) na výstupu z extruzní hubice [1]	39
Obr. 28:	Vybavení linky pro koextruzi [1]	39
Obr. 29:	Koextrudovaný PP/TPV profil [1].....	40
Obr. 30:	Jednopolohová sekačka [1].....	40
Obr. 31:	Příklad profilu pro sekání na jednopolohovém stroji [1].....	41
Obr. 32:	Taktová (transferová) sekačka [1]	41
Obr. 33:	Příklad profilu pro sekání na transferu [1]	41
Obr. 34:	Vertikální vstřikovací stroj [1]	42
Obr. 35:	Pohled do otevřené vstřikovací formy [1]	43
Obr. 36:	Detail formového dílu (B-sloupek horní) [1]	43
Obr. 37:	Proces vstřikování [17].....	44
Obr. 38:	Proces online flockování. Upraveno [13].....	46
Obr. 39:	Profil těsnění s flockovací páskou [15]	46
Obr. 40:	Profil těsnění s povrchovou úpravou slip-coating [14]	47
Obr. 41:	Základní rozdělení polymerů [23]	49
Obr. 42:	Měření tvrdosti metodou Shore [23]	49
Obr. 43:	Příklad prosekávané výztuhy (vlevo) a drátové výztuhy (vpravo) [26].....	50
Obr. 44:	Mikrostruktura pěnové EPDM pryže [25].....	51
Obr. 45:	Morfologie TPV [1].....	52
Obr. 46:	Přírodní minerál talek [23]	53
Obr. 47:	Příklad uchycení těsnění při měření CLD [29].....	53
Obr. 48:	Kompresní zatížení při deformaci (CLD). Upraveno [4]	54
Obr. 49:	Těsnění podběhu zadního kola v řezu. Upraveno [1].....	55
Obr. 50:	Postranice karoserie a přilehlá oblast kontaktu těsnění po jízdách zkouškách	56
Obr. 51:	Profil těsnění podběhu zadního kola	56
Obr. 52:	Detail vstřikované koncovky z EPDM 60ShA	56
Obr. 53:	Zkušební stroj (vlevo) a přetržený vzorek mikroporézního EPDM (vpravo)	58
Obr. 54:	Zkušební vzorky po tahové zkoušce.....	59
Obr. 55:	Tahový diagram homogenního EPDM.....	59
Obr. 56:	Tahový diagram mikroporézního EPDM	60
Obr. 57:	Popis výpočtového modelu těsnění	62

Obr. 58:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko	64
Obr. 59:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm.....	64
Obr. 60:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko	65
Obr. 61:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm.....	66
Obr. 62:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko	67
Obr. 63:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm.....	67
Obr. 64:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko	68
Obr. 65:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm.....	69
Obr. 66:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko	70
Obr. 67:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm.....	70
Obr. 68:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko	71
Obr. 69:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm.....	72
Obr. 70:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko	73
Obr. 71:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm.....	73
Obr. 72:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko	74
Obr. 73:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm.....	75
Obr. 74:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko	76

Obr. 75:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm.....	76
Obr. 76:	Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko	77
Obr. 77:	Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm.....	78
Obr. 78:	Model sestavy přípravku včetně analyzovaného těsnění.....	80
Obr. 79:	Okrajové podmínky pro tuhostní analýzu přípravku.....	82
Obr. 80:	Silové působení ve šroubech bez předpětí.....	83
Obr. 81:	Deformovaný model při nulovém předpětí šroubů (měřítko M 100:1).....	83
Obr. 82:	Silové působení ve šroubech s nastaveným předpětím 3 kN	86
Obr. 83:	Rozložení redukovaného napětí v konstrukci při předpětí 3 kN	86
Obr. 84:	Deformovaný model při nastaveném předpětí šroubů 3 kN (měřítko M 100:1).....	87
Obr. 85:	Základní konfigurace systému I-Scan [33].....	87
Obr. 86:	Konfigurace systému I-Scan použitá při měření. Upraveno [33].....	88
Obr. 87:	Konstrukce snímače Tekscan. Upraveno [33].....	88
Obr. 88:	Snímač 6300/10 použitý při měření [34].....	89
Obr. 89:	Vzorky těsnění použité při měření	90
Obr. 90:	Sestava s elektrickým válcem (vlevo) a detail přípravku se vzorkem těsnění (vpravo)	90
Obr. 91:	Měřicí ústředna IMC CS7008-1-ET-124910 (vlevo) a ovládací panel elektrického válce (vpravo)	91
Obr. 92:	Kalibrační křivka využitá při měření.....	92
Obr. 93:	Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 10,77 mm)	93
Obr. 94:	Naměřený kontaktní tlak při spáře 10,77 mm	94
Obr. 95:	Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 10,77 mm	94
Obr. 96:	Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 10,77 mm	95
Obr. 97:	Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 10,77 mm	95
Obr. 98:	Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 11,77 mm)	95
Obr. 99:	Naměřený kontaktní tlak při spáře 11,77 mm	96
Obr. 100:	Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 11,77 mm	96
Obr. 101:	Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 11,77 mm	97
Obr. 102:	Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 11,77 mm	97
Obr. 103:	Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 12,77 mm)	97

Obr. 104: Naměřený kontaktní tlak při spáře 12,77 mm	98
Obr. 105: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 12,77 mm	99
Obr. 106: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 12,77 mm	99
Obr. 107: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 12,77 mm	99
Obr. 108: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 9,77 mm)	100
Obr. 109: Naměřený kontaktní tlak při spáře 9,77 mm	101
Obr. 110: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 9,77 mm	101
Obr. 111: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 9,77 mm	102
Obr. 112: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 9,77 mm	102
Obr. 113: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 8,77 mm)	102
Obr. 114: Naměřený kontaktní tlak při spáře 8,77 mm	103
Obr. 115: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 8,77 mm	104
Obr. 116: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 8,77 mm	104
Obr. 117: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 8,77 mm	104
Obr. 118: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 10,77 mm	107
Obr. 119: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 11,77 mm	108
Obr. 120: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 12,77 mm	109
Obr. 121: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 9,77 mm	110
Obr. 122: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 8,77 mm	111
Obr. 123: Porovnání tvaru těsnění při spáře 10,77 mm (vlevo) a 11,77 mm (vpravo). Červeně označeno možné místo hromadění nečistot.	113
Obr. 124: Řez analyzovaným těsněním s návrhem prodloužení obkladu dveří (vyznačeno čárkovaně)	115
Obr. 125: Příklad aplikace PPF folie na karoserii vozidla [36]	116
Obr. 126: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko	123
Obr. 127: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko	123

Obr. 128: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko	124
Obr. 129: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko	124
Obr. 130: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko	125
Obr. 131: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko	125
Obr. 132: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko	126
Obr. 133: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko	126
Obr. 134: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko	127
Obr. 135: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko	127
Obr. 136: Síť konečných prvků pro výpočtové modely těsnění	128
Obr. 137: Síť konečných prvků pro tuhostní analýzu přípravku	128

Seznam tabulek

Tab. 1:	Materiálové parametry zkušebních vzorků [1].....	57
Tab. 2:	Výsledky tahové zkoušky – homogenní EPDM.....	60
Tab. 3:	Výsledky tahové zkoušky – mikroporézní EPDM	60
Tab. 4:	Celková síla působící na postranici – porovnání dat z MKP modelů a CLD křivky od dodavatele	78
Tab. 5:	Celková síla působící na obklad dveří – porovnání materiálových modelů.....	79
Tab. 6:	Přehled zvolených polotovarů pro výrobu přípravku [31]	81
Tab. 7:	Mechanické a fyzikální charakteristiky hliníku a jeho slitin [30]	81
Tab. 8:	Přehled naměřené celkové síly působící v kontaktu.....	105
Tab. 9:	Celková síla působící na postranici – porovnání dat z MKP modelů a experimentu.....	111

Seznam symbolů

Latinská abeceda

Symbol	Jednotka	Význam
A	–	koeficient vyjadřující sklon kalibrační křivky
Aš	mm ²	výpočtový průřez šroubu
b	–	exponent určující zakřivení kalibrační křivky
D ₁	mm	vnitřní průměr dosedací plochy podložky
D ₂	mm	vnější průměr dosedací plochy podložky
d _{stř}	mm	střední průměr závitu
d ₀	mm	střední třecí průměr dosedací plochy podložky
E	MPa	Youngův modul, modul pružnosti v tahu
F	N	síla při dvojnásobku délky
f	–	součinitel smykového tření
F _D	N	maximální dovolená osová síla ve šroubu
F _D [*]	N	dovolená osová síla pro předpětí šroubu (zohledňující moment při utahování)
F _m	N	maximální naměřená síla během tahové zkoušky
Force	N	aplikovaná kalibrační síla
F _u	N	síla pro předpětí (utahovací síla)
i	–	index kalibračního bodu
j	–	index snímacího bodu (senselu)
m	–	počet aktivních snímacích bodů (senselů)
M _u	Nm	utahovací moment šroubu
n	–	počet kalibračních bodů
P	mm	rozteč (stoupání) závitu
R _m	MPa	mez pevnosti
S	mm ²	plocha průřezu po natažení na dvojnásobek délky
S ₀	mm ²	počáteční plocha průřezu
Sensel	–	surová (nekalibrovaná) hodnota naměřená snímačem

Řecká abeceda

Symbol	Jednotka	Význam
β	–	součinitel vlivu výroby šroubu (např. válcování $\beta = 1$)
ε	–	poměrné prodloužení
μ_m	–	parciální součinitel spolehlivosti šroubu
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota
μ	–	Poissonův poměr
φ	rad	úhel stoupání závitu
ψ	rad	třecí úhel závitu

Seznam zkratek

AST	Advanced Sensor Technic GmbH (výrobce snímačů a měřicí techniky)
ASTM	American Society for Testing Materials (americká společnost pro zkoušení materiálů)
BIW	Body-in-White (surová karoserie vozu před lakováním a montáží komponent)
CLD	Compression Load Deflection (kompresní zatížení při deformaci)
EPDM	Etylen-propylen-dienový monomer
EPR	Etylen-propylenový elastomer
IMC	Integrated Measurement & Control (název měřicího systému / společnosti IMC Test & Measurement GmbH)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)
MKP	Metoda konečných prvků
PA	Polyamid
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PE	Polyetylen
PES	Polyester
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPF	Paint Protection Film (film na ochranu laku)
PTFE	Polytetrafluorethylen (teflon)
PU	Polyuretan
SD	Secure Digital (typ paměťové karty)
ShA	Shore A (jednotka tvrdosti materiálu)
ShD	Shore D (jednotka tvrdosti materiálu)
SUV	Sport Utility Vehicle (sportovní užitkové vozidlo)
SW	Software
TPE	Termoplastický elastomer
TPO	Termoplastický olefinový elastomer
TPS	Termoplastický styrenový elastomer
TPV	Termoplastický vulkanizát
UHF	Ultra high-frequency (ultra vysokofrekvenční)

UHMWPE	Ultra-vysokomolekulární polyetylen
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
UV	Ultraviolet (ultrafialový)
VW	Volkswagen
Wi-Fi	Wireless Fidelity (komunikační standard pro bezdrátový přenos dat)
2D	Dvourozměrné

1 Úvod

Těsnění karoserie představuje důležitý konstrukční prvek automobilu, který přispívá k jeho celkové funkčnosti, komfortu a bezpečnosti během provozu. Hlavním úkolem těsnění je zabránit pronikání vody, vzduchu, prachu a dalších nečistot do interiéru, čímž chrání nejen cestující, ale i citlivé elektronické a mechanické systémy. Kromě toho těsnění pomáhá snižovat hlučnost, tlumit vibrace a přispívá také k lepší aerodynamice.

V automobilovém průmyslu se využívá celá řada typů těsnění lišících se svou funkcí, konstrukcí a materiálovým složením. Těsnění lze dělit na statická a dynamická, přičemž každá skupina má specifické požadavky s ohledem na provozní podmínky. Klíčovými vlastnostmi těsnění jsou zejména odolnost vůči klimatickým a mechanickým vlivům, dlouhodobá stabilita a schopnost zachovat těsnicí funkci i při opakovaném zatížení.

Mezi nejvíce namáhané těsnicí prvky patří těsnění dveří. Jejich funkčnost se v praxi ověřuje prostřednictvím dlouhodobých jízdních zkoušek nebo testů opakovaného zavírání dveří. V některých případech dochází během těchto zkoušek k odírání laku karoserie nebo dveří v místech kontaktu s těsněním. Tento jev může být způsoben třením, a to zejména tehdy, pokud jsou v kontaktu přítomny abrazivní nečistoty. Jedním z faktorů, který může vznik tohoto poškození ovlivňovat, je příčné rozložení kontaktního tlaku.

Cílem této diplomové práce je analyzovat příčiny zmíněného poškození a navrhnout opatření, která by mohla přispět k jeho omezení nebo odstranění. Na základě podkladů poskytnutých společností Škoda Auto budou provedeny numerické simulace metodou konečných prvků (dále jen MKP) v programu SolidWorks Simulation. Pomocí simulací bude zkoumáno příčné rozložení tlaku v kontaktu mezi těsněním dveří a postranicí karoserie při různých tloušťkách spáry. Součástí analýzy bude také vyhodnocení celkové síly působící v kontaktu. Následně bude proveden experiment se zjednodušenými vzorky těsnění, jenž bude sloužit k verifikaci simulovaných výsledků.

Práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část je věnována charakteristice těsnících systémů karoserie osobních automobilů. Podrobněji jsou popsány druhy těsnění, metody jejich montáže, výrobní technologie, povrchové úpravy a používané materiály. Pozornost je věnována také parametrům ovlivňujícím kvalitu těsnění. V praktické části je nejprve popsáno konkrétní analyzované těsnění, dále jsou prezentovány výsledky MKP simulací a experimentálního měření. Na závěr jsou navržena možná konstrukční a technologická opatření, která by mohla vést ke snížení rizika poškození laku karoserie.

2 Těsnící systémy karoserie osobních automobilů

2.1 Druhy těsnění

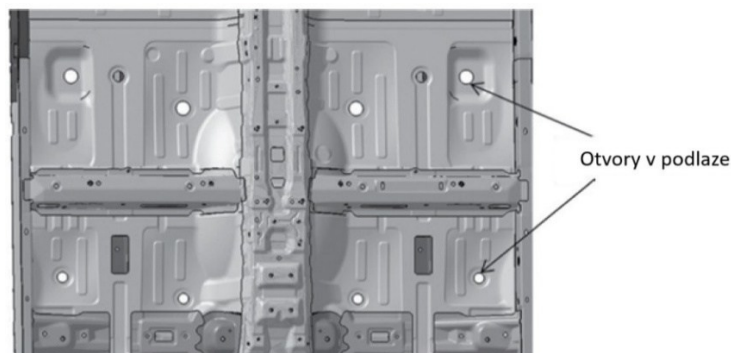
Karoserie vozidla je utěsněna různými typy těsnění, která se dělí na statická a dynamická. Kromě nich existuje ještě samostatná kategorie v podobě obstrůvků skel. [1], [2]

2.1.1 Statická těsnění

Do této kategorie lze zařadit všechna těsnění, která jsou navržena tak, aby odolávala převažujícím statickým zatížením působícím na funkční těsnící prvky. [2]

Jedním z důležitých úkolů statických těsnění je uzavření funkčních otvorů, například průchodu pro sloupek řízení na přístrojové desce. Tyto otvory musejí být důkladně utěsněny, aby zabránily pronikání vody, prachu či hluku do interiéru, a zároveň musí zajistit plynulou funkčnost příslušných komponent. [4]

Další významnou funkcí statických těsnění je utěsnění technologických otvorů, které jsou nezbytnou součástí výrobního procesu karoserie. Tyto otvory se vytvářejí zejména za účelem zajištění určitých technologických kroků, jako například odvodnění elektroforetické kapaliny po ponoření karoserie ve fázi „Body-in-White“ (BIW) do lázně během procesu elektroforézy. Jejich velikost je optimalizována tak, aby byla co nejmenší, ale zároveň dostatečná pro splnění požadavků výroby. Typickým příkladem jsou otvory umístěné v podlaze karoserie, jak ukazuje Obr. 1. [4]



Obr. 1: Technologické otvory v podlaze. Upraveno [4]

Po dokončení procesu elektroforézy se tyto otvory důkladně uzavírají, aby byla zajištěna dlouhodobá těsnost a odolnost vůči vnějším vlivům. K tomu se využívají tři základní metody těsnění: aplikace záplat, osazení zátkových prvků nebo použití termoformovacích materiálů. Jednotlivé způsoby utěsnění jsou znázorněny na Obr. 2. [4]



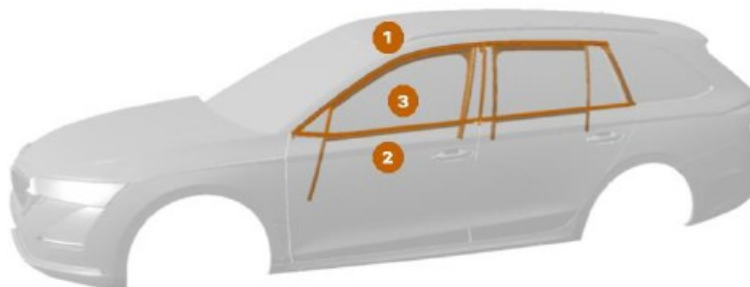
Obr. 2: Metody utěsnění technologických otvorů při výrobě: (a) záplata, (b) zátká, (c) termoformovaný materiál [4]

Statická těsnění jsou často využívána také k eliminaci větších otvorů a mezer, které mohou vzniknout u některých dílů karoserie. Tyto otvory se někdy označují jako „myší díry“, protože jejich velikost může být natolik výrazná, že by jimi teoreticky mohla projít myš. Příklad takové situace lze nalézt u spojení tří plechů, kde provedení spoje může vést ke vzniku mezer mezi plechy, jak znázorňuje Obr. 3. Podobné mezery se mohou objevit také například kolem kliky dveří, pokud není její usazení zcela přiléhavé k tělu dveří. Pro utěsnění těchto otvorů se běžně používají těsnicí lepidla. [4]



Obr. 3: Příklad vzniku větší mezery mezi plechy karoserie – tzv. „myší díra“. Upraveno [4]

Do skupiny statických těsnění patří také těsnění používaná ke spouštění skel, jako je vedení skel a stírací těsnění. Tato těsnění zajišťují správnou polohu skla a brání pronikání vnějších vlivů, jako je voda, prach nebo aerohluk, do interiéru vozidla. Na Obr. 4 je znázorněno jejich umístění na vozidle. [1]

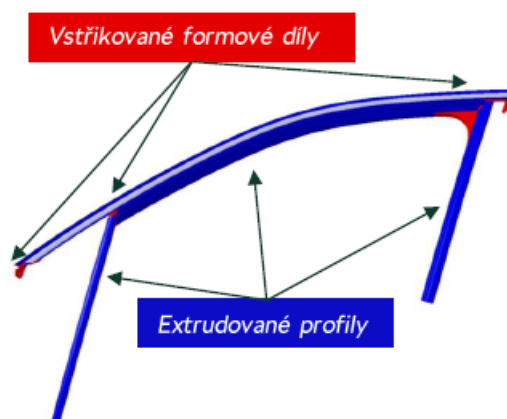


Obr. 4: Statická těsnění: (1) – Vedení skla, (2) – Vnější stírací těsnění, (3) – Vnitřní stírací těsnění [1]

Těsnění používaná ke spouštění skel plní nejen těsnící a estetickou funkci, ale také významně přispívají k ochraně vozu před neoprávněným vniknutím. Vedení skla a vnější stírací těsnění musí být navrženy tak, aby odolávala pokusům o násilné vytlačení skla a zabránila vniknutí předmětů mezi sklo a těsnění. Bezpečnost této funkce se ověřuje pomocí speciálních zkoušek, při nichž se na sklo připevní přísavka, prostřednictvím které je na sklo vyvíjena síla směrem dolů. Měří se, jaký pohyb skla je možný, aniž by vznikl prostor umožňující přístup dovnitř vozu. Pryžové těsnění může do jisté míry povolit, avšak nikdy nesmí dojít k takovému uvolnění, které by umožnilo otevření vozu tímto způsobem. [1]

2.1.1.1 Vedení skel

Vedení skel hraje důležitou roli při zajištění těsnosti spouštěcích skel a jejich správné funkčnosti. Tento díl je složen z několika koktrudovaných profilů, které jsou propojeny vstříkovanými formovými díly (viz Obr. 5). Profily i formové díly se vyrábějí z materiálů EPDM nebo TPE. Pro zvýšení pevnosti mohou profily obsahovat kovové výztuže či polypropylenové prvky. [1], [2]

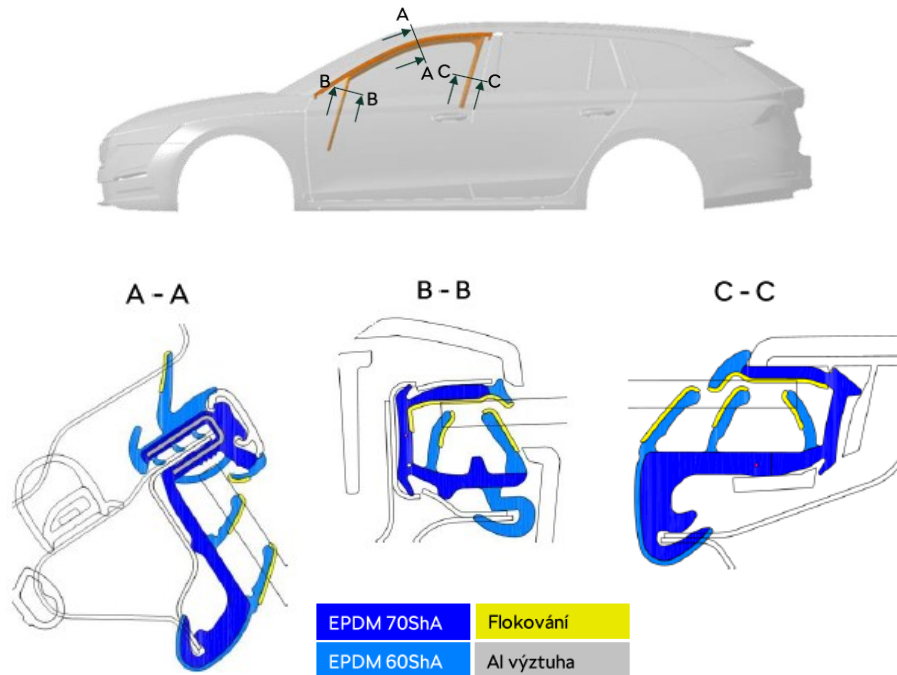


Obr. 5: Spojení profilů vedení skla předních dveří [1]

U profilů se používají povrchové úpravy podle místa použití – části, které jsou v kontaktu s pohyblivými skly, jsou opatřeny kluznými vrstvami, jako je slip-coating nebo flockování,

zatímco plochy přiléhající k laku karoserie bývají flockované. Tyto vrstvy zlepšují funkčnost těsnění a zabraňují opotřebení. [1], [2]

Kromě těsnění proti vodě, hluku a nečistotám plní vedení skel také podpůrnou funkci. Součástí profilů jsou těsnící prvky, označované jako jazyky, které pomáhají udržet rovnováhu sil potřebnou pro hladký pohyb skel. Tvary a vlastnosti těchto prvků se optimalizují pomocí MKP simulací a následně se testují na prototypích. Na Obr. 6 je zobrazen příklad konstrukce vedení skla předních dveří. [2]

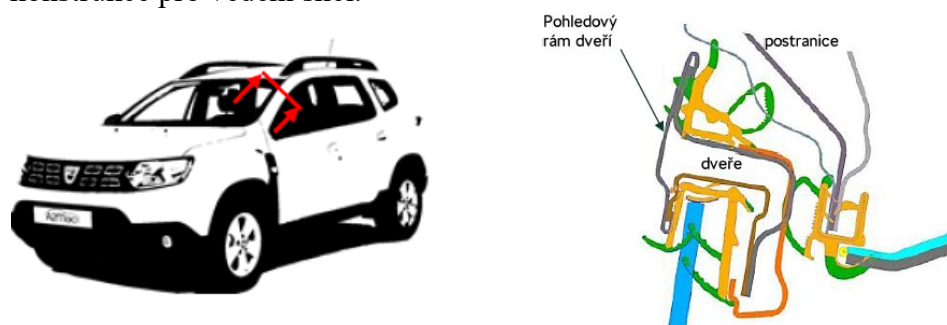


Obr. 6: Vedení skla předních dveří [1]

Vedení skel je pohledový díl, jehož pohledové plochy významně ovlivňují celkový design vozu. Zároveň může sloužit jako nosič dekorativní lišty. [1], [2]

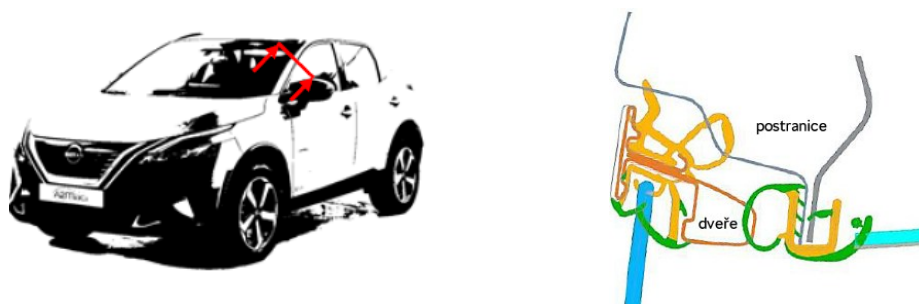
Konstrukce vedení skel se liší v závislosti na typu dveří a jejich koncepci [1]:

- **Dveře s viditelným rámečkem:** Tento typ koncepce je typický pro vozy nižší a střední třídy, kde je rámeček kolem skla jasně definovaný a slouží jako nosná konstrukce pro vedení skel.



Obr. 7: Příklad koncepce těsnění s viditelným rámečkem [1]

- **Dveře se skládaným rámečkem:** Jde o krytý rámeček umožňující hladší přechod mezi sklem a karoserií, což přispívá k lepší aerodynamice a modernímu vzhledu.



Obr. 8: Příklad koncepce těsnění se skládaným rámečkem [1]

- **Bezrámečkové dveře:** Toto provedení je typické pro sportovní a luxusní vozy, kde chybí rámeček kolem skla. Vedení skel je integrováno přímo do postranice karoserie.



Obr. 9: Příklad koncepce těsnění u bezrámečkových dveří [1]

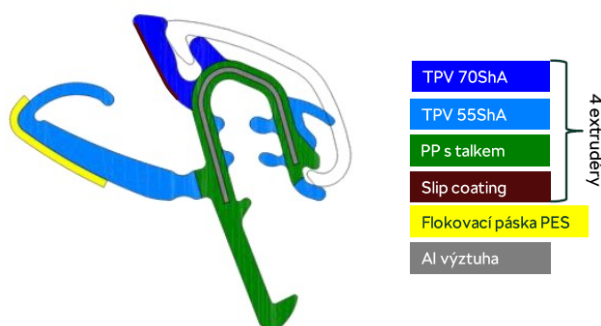
2.1.1.2 Stírací těsnění

Stírací těsnění se dělí na vnější a vnitřní (viz Obr. 4). Vnější stírací těsnění je umístěno na vnější hraně dveří a má za úkol utěsnit prostor mezi dveřmi a spouštěcím sklem. Tento prostor se označuje, jako tzv. dveřní šachta. Hlavní součástí stíracího těsnění je těsnící jazyk, který je opatřen kluznou vrstvou – obvykle semišovým povrchem vytvořeným pomocí flockovací pásky z polyesterových vláken (PES). Tato vrstva zajišťuje hladký pohyb skla, snižuje tření a zároveň minimalizuje riziko vzniku hluku vlivem vibrací při jízdě vozidla. Při spouštění skla tyto jazyky zároveň stírají vodu z jeho povrchu. [1]

Vnitřní stírací těsnění zajišťuje správnou funkci těsnění z vnitřní strany dveřní šachty, kde přiléhá ke sklu. Společně s vnějším těsněním pomáhá udržovat stabilitu skla při jeho pohybu nahoru a dolů. [2]

Vnější stírací těsnění je nejčastěji vyrobeno z TPV profilu s polypropylenovým jádrem, které obsahuje hliníkovou prosekávanou výtuhu zajišťující délkovou stabilitu při změnách

teplot (viz Obr. 10). Některé automobilky však stále preferují EPDM profily, které jsou rovněž opatřeny hliníkovou výztuhou. [2], [3]



Obr. 10: Vnější stírací těsnění [1]

Těsnící jazyk u stíracího těsnění musí být vyvíjen s ohledem na toleranci polohy skla. Konstrukce těsnění se liší podle umístění – například u předních dveří bývá profil ukončen tvarovými díly na obou stranách a montován na narážecí stojinu dveří v oblasti šachty. Zadní stírací těsnění může obsahovat další prvky, jako je pěnová ucpávka z EPDM v oblasti pomocného sloupku zadního pevného skla. [3]

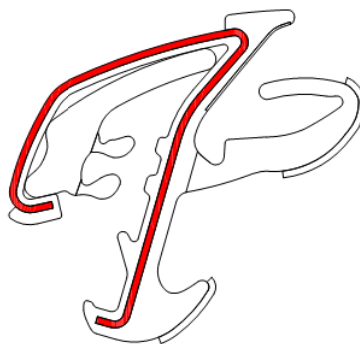
Stejně jako vedení skel, i vnější stírací těsnění mohou sloužit jako nosiče dekorativních lišt. Tyto lišty významně ovlivňují celkový design vozidla. Používají se tři hlavní technologie [1]:

- **Hliníková lišta** – Montovaná lišta z hliníku, která je dodatečně vsazená do profilu. Toto řešení je technicky i cenově náročnější, a proto se nejčastěji používá u vozidel střední třídy.



Obr. 11: Montovaná hliníková lišta u vnějšího stíracího těsnění [1]

- **Nerezová lišta** – Lišta z nerezové oceli, která tvoří součást výztuhy. Konstrukce je založena na ohnutém nerezovém plechu, kolem něhož je koextrudovaný materiál, přičemž povrch plechu slouží jako pohledová část lišty. Tato technologie je relativně nová a cenově výhodnější ve srovnání s hliníkovými lištami. Bývá součástí vozidel vyšší třídy.



Obr. 12: Lišta z nerez oceli jako součást výztuhy vnějšího stíracího těsnění [1]

- **Chromová termoplastická fólie** – Polypropylenový základ s koextrudovanou chromovou fólií, která může být černá nebo stříbrná v závislosti na výbavě vozu. Toto řešení je cenově nejvýhodnější a nejčastěji se používá u vozidel nižší třídy.



Obr. 13: Vnější stírací těsnění s chromovou termoplastickou folií [1]

Lišty do vedení skel se instalují přímo na výrobní lince automobilky, zatímco lišty na stíracím těsnění jsou většinou dodávány jako součást příslušného těsnicího dílu. [1]

Z hlediska životnosti může stírací těsnění časem ztrácet účinnost, zejména kvůli deformaci těsnicího jazyka. Ta vede k nedostatečnému přitlaku na sklo, což omezuje schopnost těsnění efektivně stírat vodu. Tento problém bývá výraznější u starších dílů, které již nejsou schopny kompenzovat nerovnoměrný odstup skla při jeho pohybu. [2], [3]

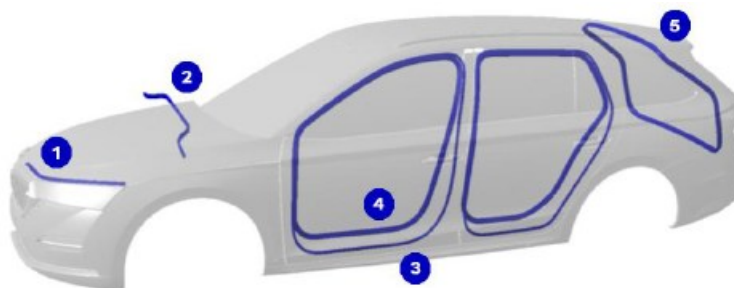
2.1.2 Dynamická těsnění

Do kategorie dynamických těsnění jsou zahrnuty těsnicí prvky, které plní svou funkci při vzájemném pohybu jednotlivých částí karoserie. Tato těsnění musí reagovat na deformace a změny tloušťky spár mezi díly, které mohou být způsobeny například vibracemi od motoru, nerovnostmi povrchu vozovky či působením aerodynamických sil. Jejich hlavním úkolem je zabránit pronikání vody, prachu a aerohluky do interiéru vozidla a současně zajistit plynulou funkčnost pohyblivých komponent, jako jsou dveře a kapota. [1], [4]

Funkčnost dynamických těsnění je založena na jejich elastických vlastnostech a specifickém předpětí, které vzniká při jejich stlačení mezi kontaktními plochami. Díky tomu umožňují kompenzovat změny tloušťky spár a zachovat těsnost i při relativním pohybu jednotlivých částí během jízdy. [4]

Typickým tvarem dynamického těsnění je uzavřený profil, označovaný jako „bublina“. Tento profil musí být dostatečně pružný, aby co nejlépe kopíroval tvar dosedací plochy. Jeho konstrukce se proto přizpůsobuje konkrétnímu použití ve vozidle. [1], [4]

Dynamických těsnění existuje celá řada v závislosti na jejich umístění a funkci. Na Obr. 14 jsou uvedeny příklady hlavních typů.



Obr. 14: Dynamická těsnění: (1) – Těsnění kapoty, (2) – Těsnění vodní přepážky, (3) – Vnější těsnění dveří, (4) – Vnitřní těsnění dveří, (5) – Těsnění víka pátých dveří [1]

Některé části dynamických těsnění mají vliv na pasivní bezpečnost vozidla. Mezi takové prvky patří těsnění kapoty, těsnění vodní přepážky a vnitřní těsnění dveří. [1]

Těsnění kapoty hraje důležitou roli při ochraně chodců v případě srážky. Konstrukce kapoty a přilehlých částí musí být navržena tak, aby poskytovala deformační zónu v místě nárazu chodce. Z tohoto důvodu se plochy kapoty v těchto oblastech zeslabují a prvky pod kapotou nesmějí být vyztužovány, aby byla kapota snadno deformovatelná. [1]

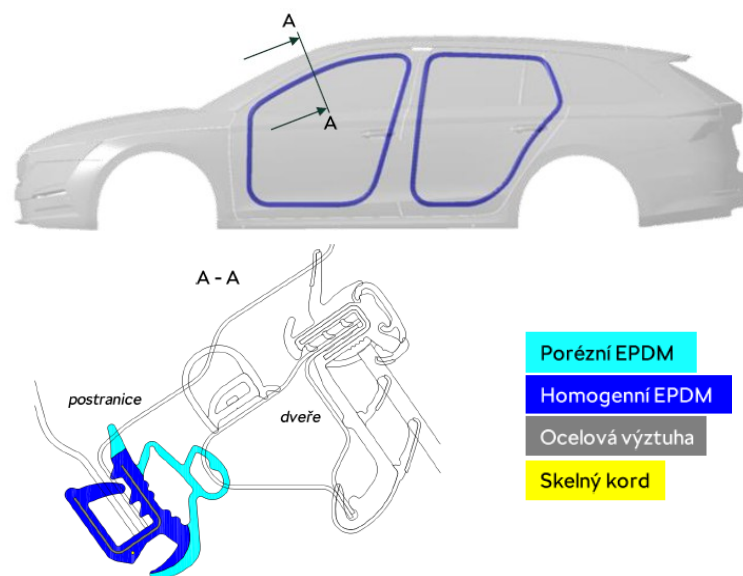
Těsnění kapoty se proto často navrhuje vyšší, aby poskytlo dostatečnou výšku deformační zóny. Pokud je těsnění kapoty připevněno pomocí klipování, musí být návrh klipů koncipován tak, aby při srážce s chodcem umožňoval jejich vmáčknutí do karoserie. Tím se zvyšuje účinnost deformační zóny a zároveň se minimalizuje riziko zranění chodce. [1]

2.1.2.1 Vnitřní těsnění dveří

Vnitřní těsnění dveří je považováno za hlavní těsnící prvek dveří. Z tohoto důvodu se u něj používá větší předpětí, aby byly vyrovnány všechny výrobní tolerance, jako jsou rozměry těsnění, plechů, dveří i jejich samotné montáže. Toto větší předpětí zvyšuje ochranu proti vnikání vody, prachu a aerohluky do interiéru. Předpětí však nesmí být příliš velké, aby bylo zajištěno snadné zavírání dveří. Důležitou roli v tomto ohledu hraje tuhost těsnění. [1]

Montáž vnitřního těsnění dveří se provádí na postranici karoserie metodou roll-forming. K výrobě se používá materiál EPDM s kovovou prosekávanou výztuží. Pro zvýšení odolnosti v kritických oblastech se často využívá technologie variabilní extruze, která umožňuje měnit tloušťku stěny profilu podle konkrétního tvaru dveří. U vnitřního těsnění dveří zpravidla bývá použita povrchová úprava lakováním, která zlepšuje kluzné vlastnosti těsnění, chrání jeho povrch proti poškození a zajišťuje, že těsnění zůstane funkční i při dlouhodobém namáhání. [1], [2]

Na Obr. 15 je uveden příklad konstrukce vnitřního těsnění dveří. Dalším stupněm ochrany je vnější těsnění dveří, které se používá zejména u vozidel střední a vyšší třídy. Tato těsnění jsou buď klipovaná, nebo lepená přímo na dveře. [1], [2]



Obr. 15: Vnitřní těsnění dveří [1]

2.1.2.2 Těsnění víka pátých dveří

Účelem těsnění víka pátých dveří je utěsnit zavazadlový prostor vozidla. Tento prvek je, podobně jako vnitřní těsnění dveří, upevněn na stojině karoserie. [1]

Pro zajištění spolehlivého upevnění těsnění na stojinu se obecně v místě montáže používají speciální jazýčky. Tyto jazýčky nejen zajišťují pevné uchycení těsnění, ale zároveň vyrovnávají výrobní tolerance, čímž se předchází vzniku mezer mezi těsněním a karoserií, které by mohly narušit jejich funkčnost. [1]

Stejně jako u vnitřního těsnění dveří je u těsnění víka pátých dveří běžně aplikována povrchová úprava lakováním. U tohoto těsnění však kluzná vrstva nemusí být vždy nutná, protože těsnění víka dokáže plnit svou funkci i bez ní. Pokud je kluzná vrstva aplikována, zajišťuje hladké přizpůsobení těsnění při pohybu víka a pomáhá těsnění přizpůsobit se

případným nesprávným nastavením víka. Po korekci nastavení umožňuje těsnění snadno vrátit do původního tvaru a polohy, aniž by došlo k jeho deformaci. Povrchová úprava navíc chrání těsnění před poškozením způsobeným dlouhodobým používáním, například při opakovaném zavírání víka. Na Obr. 16 je znázorněn příklad konstrukce těsnění víka pátých dveří. [1]



Obr. 16: Těsnění víka pátých dveří [1]

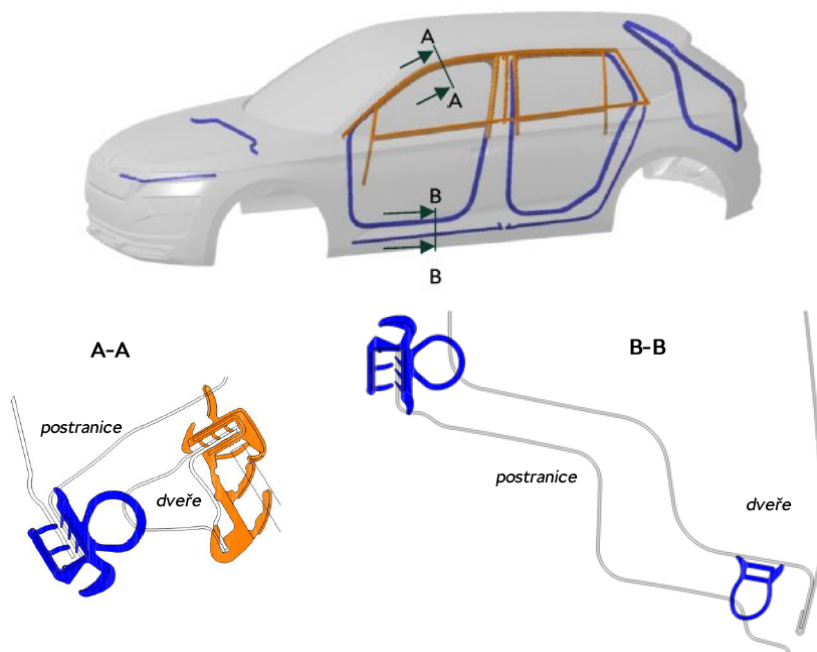
2.1.2.3 Prahové těsnění

Prahové těsnění je speciální těsnicí prvek, který se nachází v oblasti prahu vozidla. Používá se zejména u vozidel kategorie SUV a vozidel střední či vyšší třídy, kde slouží k ochraně před pronikáním prachu, vody a dalších vnějších vlivů do spáry mezi spodní částí dveří a karoserií. [1], [2]

Jeho použití závisí na tvaru a velikosti této spáry. U některých automobilů, zejména nižší střední třídy, prahové těsnění zcela chybí. Naopak u prémiových značek bývá tento prvek často doplněn tvarovými nebo vstřikovanými koncovkami. Některé luxusní modely vozidel využívají dvoukomponentní vstřikované díly. Vozidla střední třídy mívají prahové těsnění jednodušší konstrukce, obvykle bez koncovek. [2]

Prahové těsnění může být umístěno buď na dveřích, nebo na karoserii. Upevňuje se pomocí plastových klipů, lepením nebo metodou roll-forming. V případě vozidel s vnějším těsněním dveří se prahové těsnění obvykle nepoužívá. [1], [2]

Na Obr. 17 je znázorněn příklad koncepce těsnících systémů u vozidla kategorie SUV nižší třídy, včetně prahového těsnění. V řezu A je oranžovou barvou označeno vedení skla předních dveří a modrou barvou vnitřní těsnění dveří. V řezu B je vlevo znázorněno vnitřní těsnění dveří a vpravo prahové těsnění, které je v tomto případě umístěno na dveřích vozidla.



Obr. 17: Příklad koncepce těsnění u vozidla kategorie SUV nižší třídy [1]

2.1.3 Obstříky skel

Obstřík skel, označovaný také jako enkapsulace, je technologie používaná v automobilovém průmyslu k integraci skleněných modulů s karoserií vozidla. Tento proces zahrnuje vstřikování termoplastických elastomerů (TPE) nebo polyuretanových (PU) systémů kolem okrajů skleněných panelů, čímž se vytváří pevné a těsné spojení mezi sklem a karoserií. [7]

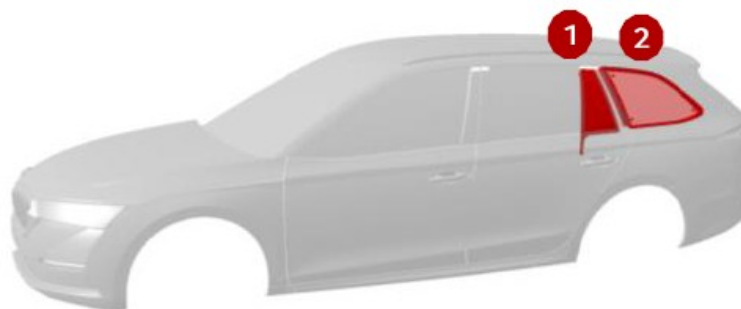
Nejpoužívanějšími materiály jsou vulkanizovaný termoplastický elastomer (TPV), spadající do skupiny TPE, a samotné TPE směsi. Tyto materiály kombinují vlastnosti pryže a plastu, což umožňuje výrobu složitých tvarů, vysokou odolnost vůči UV záření a přispívá ke snížení hmotnosti celého dílu. Zároveň jsou recyklovatelné, čímž pomáhají snižovat ekologickou stopu výroby. [3], [9], [10]

Technologie obstříku skel také zlepšuje estetiku vozidla díky hladkým a bezespárovým přechodům mezi sklem a karoserií. Pevná skla, stejně jako vedení skel a vnější stírací těsnění, mohou sloužit jako nosiče dekorativních lišt. [1], [8]

Proces výroby obstříků skel probíhá v několika krocích. Nejprve je ořezaná tabule skla přesně polohována ve vstřikovací formě spolu s dalšími komponenty, jako jsou dělicí sloupky, plastové klipy nebo vymezozače polohy. Následně je okolo skla vstřikován TPE nebo PU materiál, který po ztuhnutí vytváří pevné spojení. U některých verzích obstříků se navíc vkládá nasekaný profil, například vnější stírací těsnění. [2], [3], [7]

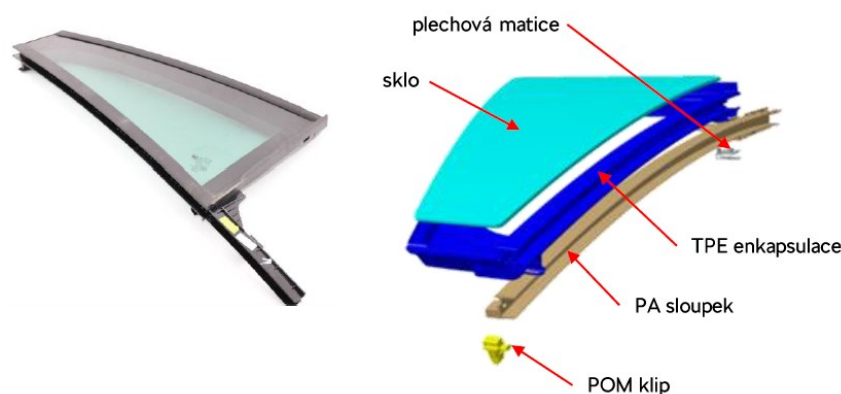
Obstříky skel lze rozdělit do dvou základních kategorií (viz Obr. 18):

- **Pevná skla ve dveřích** – Jedná se o skla, která jsou součástí zadních dveří vozidla. Na karoseriích typu „liftback“ bývají pevná skla spojena s vnějším stíracím těsněním, zatímco u karoserií typu „kombi“ tvoří tyto komponenty samostatné díly. [1], [2]
- **Boční pevná skla** – Tato skla jsou lepena přímo do postranice karoserie za C-sloupek. Výroba bočních skel umožňuje vysokou míru automatizace, kdy procesy, jako je zakládání skla do formy a odformování dílu, jsou plně automatizovány. [2], [3]



Obr. 18: Obstříky skel: (1) – Pevné sklo ve dveřích, (2) – Boční pevné sklo v postranici [1]

Na Obr. 19 je znázorněn příklad konstrukce obstříku pevného skla ve dveřích bez napojení na vnější stírací těsnění.



Obr. 19: Pevné sklo ve dveřích [1]

2.2 Montáž těsnění

Montáž těsnění na karoserii vozidla lze provádět několika způsoby. Mezi nejčastěji využívané metody patří klipování, lepení a roll-forming. Každá z těchto technologií má své výhody i nevýhody a jejich volba závisí na konkrétní aplikaci.

2.2.1 Klipování

Klipování patří mezi nejčastěji používané metody montáže těsnění, a to především díky své jednoduchosti a rychlosti. Tato metoda nachází uplatnění zejména ve velkosériové výrobě,

kde je zásadní dosáhnout maximální efektivity při minimalizaci časové náročnosti jednotlivých operací. Princip klipování spočívá v upevnění těsnění do předem připravených otvorů pomocí plastových klipů, jak je znázorněno na Obr. 20. Tento způsob montáže nejen zjednodušuje celý proces, ale zároveň snižuje nároky na přesné umístění těsnění během instalace. [1]



Obr. 20: Montáž vnějšího těsnění dveří pomocí klipů [6]

2.2.2 Lepení

Lepení představuje další metodu montáže těsnění, která se však využívá méně často, zejména kvůli své časové a finanční náročnosti. Proces lepení vyžaduje čisté prostředí, důkladně očištěný a odmaštěný povrch karoserie. Náročnost této metody spočívá především v požadavku na vysokou přesnost. Těsnění je nutné připevnit na přesně stanovené místo, což celý proces zpomaluje. Na rozdíl od klipování, kde jsou v karoserii předem připravené otvory pro klipy, a těsnění lze jednoduše zacvaknout, lepení vyžaduje pečlivé umístění a kontrolu, aby byla zajištěna správná funkčnost těsnění. [1]

Těsnění určená k lepení se obvykle dodávají navinutá na rolích včetně samolepicí pásky, což usnadňuje manipulaci při instalaci (viz Obr. 21). [1]

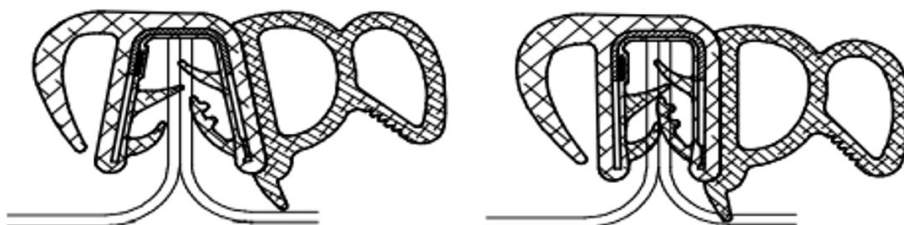


Obr. 21: Profil těsnění opatřený samolepicí páskou [14]

2.2.3 Roll-forming

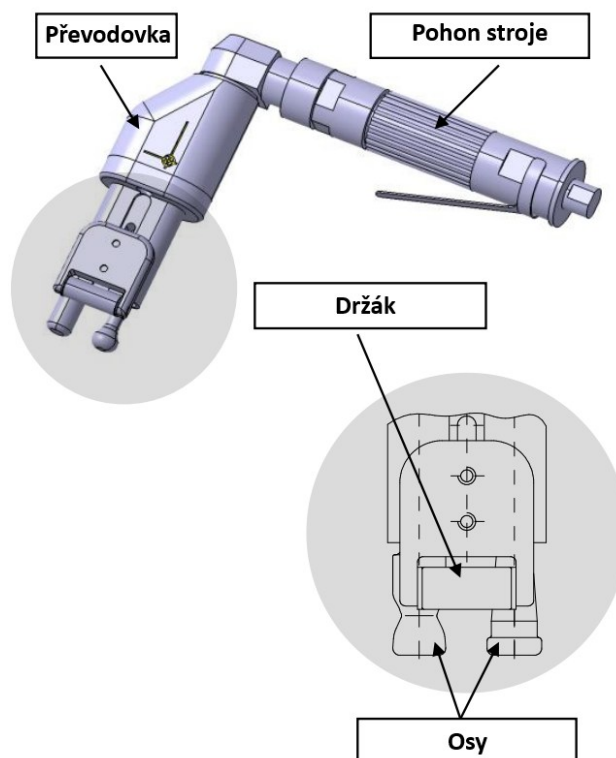
Roll-forming je technologie používaná pro montáž těsnění, která se upevňují na rovný plech karoserie, označovaný jako „stojina“. Těsnění určená pro montáž na stojinu jsou vybavena kovovou výztuží nebo polypropylenovým U profilem. Tato metoda se provádí pomocí speciálního zařízení a nachází široké uplatnění zejména v sériové výrobě. [1]

Proces roll-formingu spočívá v nasazení těsnění v rozevřeném stavu na stojinu karoserie, kde následně prochází zařízením s rolňičkami, které nohy profilu stlačí do finálního tvaru písmene „U“ (viz Obr. 22). Tento postup zajišťuje pevné a spolehlivé uchycení těsnění, a to i na nerovných površích. Tato technologie se nejčastěji používá pro montáž vnitřního těsnění dveří a těsnění víka zavazadlového prostoru. Roll-forming se uplatňuje ve fázi „Body-in-White“, tedy během montáže surové karoserie. [1], [5]



Obr. 22: Profil těsnění před montáží (vlevo) a po montáží (vpravo) metodou roll-forming [5]

Zařízení pro roll-forming je přizpůsobeno instalačním podmínkám a tvaru profilu. Stroje mohou být vybaveny různě dlouhými osami přizpůsobenými konkrétním požadavkům, přičemž pohon je realizován stlačeným vzduchem nebo bezdrátovým elektrickým šroubovákem. Klíčovou součástí zařízení je držák, který zajišťuje přesné umístění těsnění vůči stojině a jeho přitlačení na místo. Osy zařízení následně tvarují nohy výztuhy do finální podoby. Na Obr. 23 je uveden příklad zařízení pro roll-forming, včetně jeho hlavních komponent, jako je převodovka, pohon, držák a osy. [5]



Obr. 23: Zařízení pro montáž těsnění technologií roll-forming. Upraveno [5]

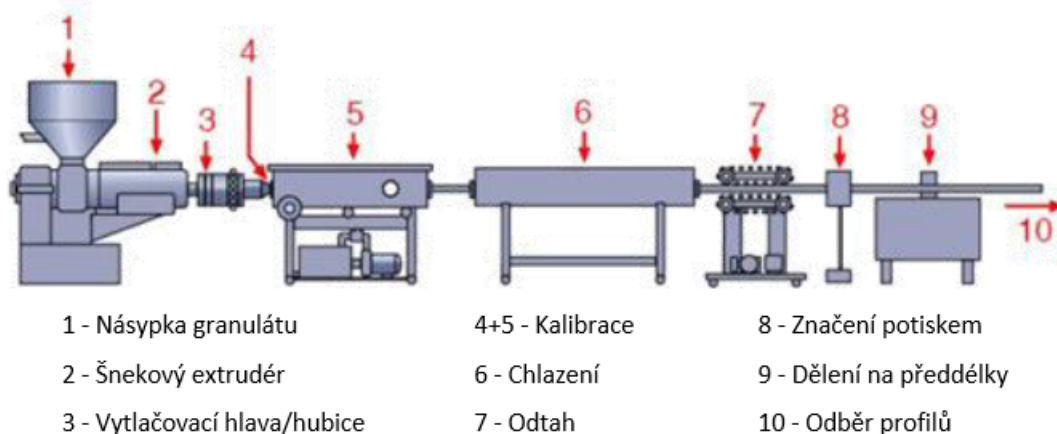
V autoservisech se těsnění montuje manuálně pomocí gumové palice, kdy se nabouchává na stojinu. Díky tomu odpadá nutnost skladování různých typů zařízení pro roll-forming, přizpůsobených jednotlivým modelům vozidel. Náhradní díly určené pro tento způsob montáže se dodávají v sevřeném stavu. [1], [5]

2.3 Technologie výroby těsnění

Profily těsnění se vyrábějí dvěma způsoby: pomocí extruze nebo vstřikováním. V případě extrudovaných profilů následují další operace, jako je dělení profilů a jejich spojování.

2.3.1 Výroba profilů – extruze

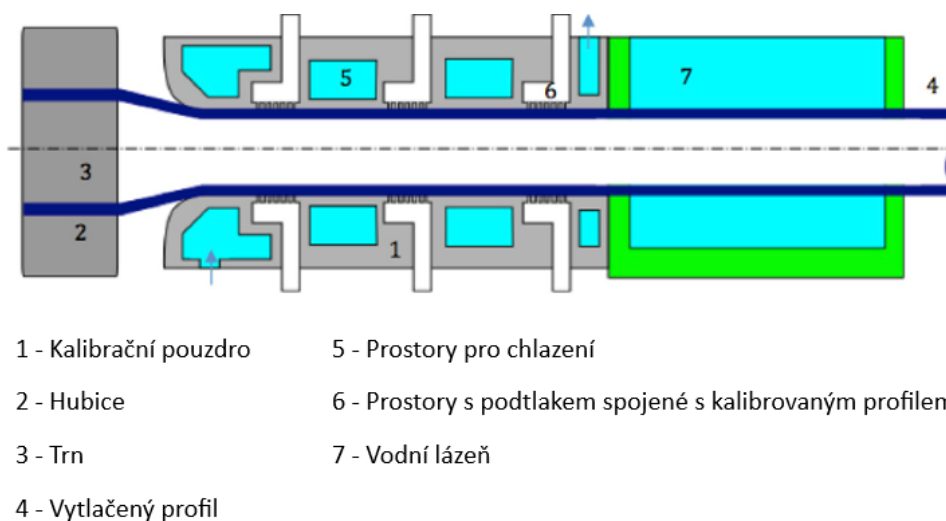
Extruze je kontinuální výrobní proces, při kterém dochází k vytlačování materiálu skrze extruzní hubici za účelem vytvoření profilů s požadovaným průřezem. Proces extruze probíhá na extruzní lince, jak znázorňuje Obr. 24. Složení extruzní linky se liší v závislosti na složitosti vyráběného profilu a použitých technologií. Linka je tvořena specializovanými stroji, jejichž hlavní části zahrnují plastikační jednotku, vytlačovací hlavu, kalibrační a chladicí sekci, odtahové zařízení a dělení profilů. Některé linky mohou být navíc vybaveny přídatnými zařízeními, jako je tvarování a navádění kovové výztuže, flokovací kabiny, sekce lakování, vrtání otvorů nebo aplikace tmelu. [1]



Obr. 24: Schéma extruzní linky (bez přidavných zařízení) [1]

Proces začíná v plastikační jednotce, která obsahuje násypku na granulát. Materiál je podáván do šnekového extrudéru, kde se pod tlakem zahřívá a homogenizuje. Tento šnek nejen dopravuje materiál, ale také zajišťuje jeho promíchání a rovnoměrné rozložení teploty. [1], [17]

Poté je roztavený materiál protlačován skrz vytlačovací hlavu (hubici), která formuje profil do požadovaného tvaru. Profil následně prochází kalibrací, jejímž účelem je zajistit přesný rozměr a tvar profilu. Kalibrace probíhá při teplotách kolem 200 °C. Existuje několik metod kalibrace, jako je průvlaková nebo přetlaková, přičemž nejpoužívanější metodou je vakuová (podtlaková) kalibrace, která je znázorněna na Obr. 25. Při této metodě dochází k přisátí profilu ke kalibračnímu pouzdru pomocí podtlaku, což zajišťuje přesné usazení a rovnoměrné chlazení materiálu. Profil se tímto způsobem stabilizuje v požadovaném tvaru, čímž se zabrání případným deformacím. [1], [17]



Obr. 25: Podtlaková kalibrace [17]

Po kalibraci následuje chlazení, obvykle ve vodní lázni, kde dochází k postupnému snižování teploty materiálu. Chlazený profil je poté tažen odtahovým zařízením, které reguluje

rychlost posunu výrobní linky a zabraňuje deformacím. Tento proces zajišťují rolničky, které profil stabilizují během pohybu linkou. [1], [16]

Následuje značení, kde je na profil aplikováno číslo výroby, datum nebo jiné identifikační údaje. Na konci linky dochází k dělení na definované délky, které jsou potřebné pro další zpracování. Profily jsou nařezány na požadované rozměry a skladovány pro následné použití. [1], [16]

Extruzní hubice se konstruuje jako segmentové (viz Obr. 26), kde mezi segmenty dochází k postupnému tvarování taveniny do požadovaného tvaru finálního profilu. [17]



Obr. 26: Příklad extruzní hubice – střešní profil vedení skla [1]

Extruze se využívá pro výrobu těsnicích profilů z různých materiálů, jako jsou elastomery (EPDM) nebo termoplastické elastomery (TPE). [1]

Při výrobě EPDM profilů se používají speciální metody vulkanizace, které umožňují chemické zesíťování struktury materiálu. Tento proces probíhá ihned za extruzní hubicí a zajišťuje konečné vlastnosti profilu (viz Obr. 27). Proces zesíťování spočívá ve spojování polymerních řetězců do dlouhých makromolekul, čímž se zlepšují mechanické, chemické a teplotní vlastnosti materiálu. Výsledkem je vyšší tvarová stabilita, odolnost proti chemikáliím a snížená rozpustnost či tavitelnost. [2], [17]

Vulkanizace může probíhat několika způsoby, například smykovou hlavou, solnou lázní, UHF ohřevem, fluidním ložem nebo horkovzdušným ohřevem. Tyto metody mají své specifické výhody a nevýhody, například rychlost vulkanizace, požadovanou přesnost regulace teploty nebo energetickou náročnost. Vulkanizace probíhá v několika fázích, nejprve je směs zahřáta na vulkanizační teplotu (může přesahovat 180 °C) a poté se po určitou dobu udržuje, aby došlo k dokonalému zesíťování materiálu. [2], [17]



Obr. 27: Extruze EPDM profilu – iniciace sířování (vulkanizace) na výstupu z extruzní hubice [1]

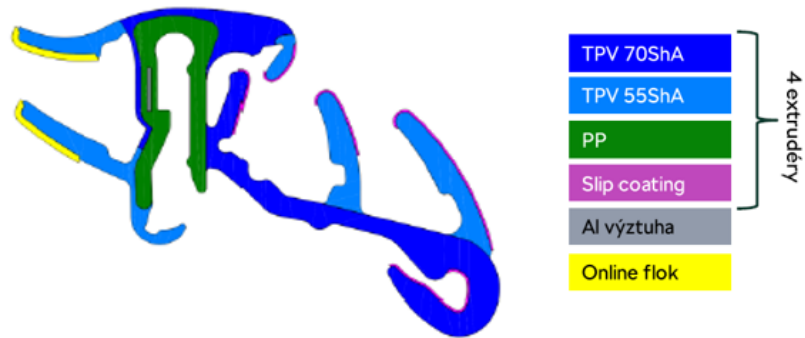
Výroba TPE profilů je jednodušší než u EPDM, protože zde není nutná vulkanizace ani složitá kalibrace. Materiál je po extruzi okamžitě ochlazován, což umožňuje kratší výrobní linky a nižší energetickou náročnost. [1]

Pro výrobu profilů z více materiálů se využívá tzv. koextruze, která se uplatňuje téměř u většiny profilů dynamických i statických těsnění. Tento proces umožňuje současné vytlačování dvou nebo více materiálů za účelem vytvoření vícevrstvého profilu s kombinací různých vlastností. Díky tomu lze spojit materiály s odlišnou tvrdostí či mechanickými vlastnostmi, což je důležité pro správnou funkci těsnění. [2]



Obr. 28: Vybavení linky pro koextruzi [1]

V koextruzním procesu jsou k vytlačovací hlavě připojeny dva nebo více extrudérů, které dodávají různé polymery do společné formovací trysky, jak ukazuje Obr. 28. Například nosná vrstva profilu může být tvořena pevným materiálem, jako je polypropylen (PP) a tvrdší typ TPV 70ShA, zatímco těsnicí část profilu je vyrobena z měkčího, pružného materiálu TPV 55ShA pro zajištění optimálního utěsnění (viz Obr. 29). [1], [3]



Obr. 29: Koextrudovaný PP/TPV profil [1]

Koextruze je využívána i pro výrobu dvoubarevných profilů, kde se kombinují různé barevné složky v rámci jednoho výlisku. [16]

2.3.2 Dělení profilů

Po extruzi následuje dělení profilů, jehož způsob závisí na tvarové složitosti těsnění. Dynamická těsnění, jako například vnitřní těsnění dveří, jsou zakončena jednoduchými normálovými plochami a sekají se již v rámci extruzní linky. Naopak statická těsnění určená pro spouštění skel mají složitější tvarové zakončení a jejich sekání probíhá v následných operacích. Nejnáročnější na zpracování jsou profily pro vedení skel, které obsahují velké množství seků (viz Obr. 31 a Obr. 33). Tyto seký musí být provedeny s maximální přesností, aby v další operaci vstřikovávání rohů došlo ke správnému spojení profilů a těsnění dosahovalo optimálního tlaku na karoserii. [1], [2]

Dělení profilů se provádí pomocí sekacích nástrojů, mezi které patří jednoplohové a taktové (transferové) sekačky. Jednoplohové sekačky jsou jednodušší zařízení, kde se profil vloží, provede se několik základních seků, obvykle dva nebo tři, a díl se poté vyjme, jak znázorňuje Obr. 30. Tento způsob se využívá zejména u méně složitých profilů, kde není potřeba velkého počtu seků. [1]



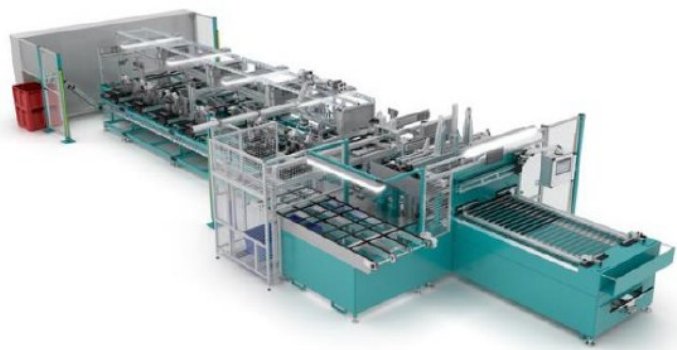
Obr. 30: Jednoplohová sekačka [1]

Na Obr. 31 je uveden příklad profilu vedení skla, který je dělený na jednoplohové sekačce.



Obr. 31: Příklad profilu pro sekání na jednoplohovém stroji [1]

Taktové (transferové) sekačky jsou složitější zařízení používaná především pro statická těsnění s vyšším počtem seků. Toto zařízení umožňuje automatizované sekání ve více krocích. Profil se vloží do sekačky, kde následně automaticky prochází několika sekacími stanicemi, jak znázorňuje Obr. 32. V každé stanici jsou postupně vykonány jednotlivé seky, přičemž na konci procesu se vrací kompletně nasekaný profil. [1]



Obr. 32: Taktová (transferová) sekačka [1]

Obr. 33 ukazuje příklad profilu vedení skla, který je dělený na transferové sekačce.



Obr. 33: Příklad profilu pro sekání na transferu [1]

2.3.3 Spojování profilů

Posledním procesem při výrobě těsnicích profilů je jejich spojování. Mezi nejběžnější metody patří vstřikování spojovacích prvků a svařování. Volba spojovací technologie závisí na typu materiálu, mechanických požadavcích na spoj a způsobu použití těsnění. [1]

Nejpoužívanější metodou spojování profilů je vstřikování elastomerů. Při vstřikování se nasekané profily vkládají do formy se stavitelnými dorazy pro jejich přesné polohování. Po zavření formy je do dutiny vstříknut elastomer pod vysokým tlakem, kde ztuhne a vytvoří pevné spojení mezi jednotlivými částmi profilu. Po ochlazení je výlisek opatrně vyjmut z formy. Proces probíhá na vertikálních vstřikovacích strojích (viz Obr. 34), přičemž kvůli složitosti forem je automatizace často omezená. Výjimkou jsou některé typy dynamických těsnění, kde lze proces částečně automatizovat. [1], [2]



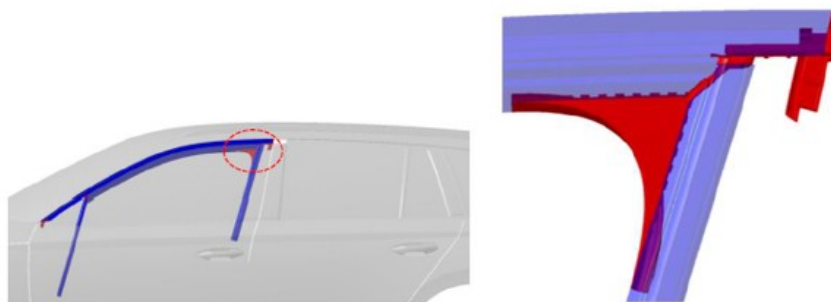
Obr. 34: Vertikální vstřikovací stroj [1]

Vstřikování se využívá zejména pro spojování profilů vedení skel. Profily se vkládají do formy zvlášť pro levou a pravou stranu, jak ukazuje Obr. 35. Po jejich umístění se forma uzavře a spojovací materiál (EPDM nebo TPE) je vstříknut do dutiny. Pokud se používá EPDM, musí po vstřiku proběhnout zesíťování materiálu, což prodlužuje celý cyklus. Naopak při použití TPE je proces rychlejší, protože zde není nutné zesíťování, a tím se zkracuje výrobní čas přibližně na polovinu. [1]



Obr. 35: Pohled do otevřené vstřikovací formy [1]

Na Obr. 36 je znázorněn příklad spojení profilů vedení skla. Modře jsou vyznačeny profily, které se umístí do formy, a v dutině formy se k nim dostříkne spojovací materiál znázorněný červenou barvou.



Obr. 36: Detail formového dílu (B-sloupek horní) [1]

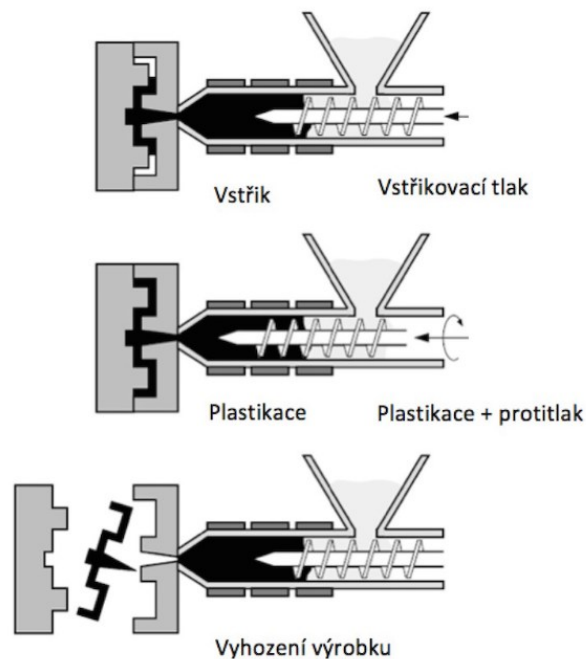
Další běžnou metodou spojování profilů je svařování, které se využívá především u dynamických těsnění, jako jsou vnitřní a vnější těsnění dveří nebo těsnění víka pátých dveří. Nejčastěji se používá metoda svařování pomocí EPDM pásky nebo polyetylenové (PE) fólie. Tento proces se používá zejména u hadicových profilů, kde je třeba zajistit pružnost a současně pevné spojení. Svařování probíhá tak, že se na konce spojovaných profilů nanese PE fólie nebo EPDM páska, která se následně zahřeje na vysokou teplotu a spojí se s materiálem profilu. [1], [2]

U některých typů těsnění se kromě spojování profilů provádí také vstřikování koncovek. Ty slouží k přesnému zakončení těsnicích prvků a zajišťují jejich lepší upevnění i funkčnost v daném místě. Příkladem je prahové těsnění, u něhož mohou být koncovky vstřikovány zejména u prémiových vozidel. [1]

2.3.4 Výroba profilů – vstřikování

Kromě extruze se těsnící profily mohou vyrábět také vstřikováním, což umožňuje produkci složitějších tvarů s vysokou přesností. Tato technologie je vhodná pro kratší a tvarově náročnější díly. Příkladem může být těsnění spáry A-sloupku, které se využívá u prémiových vozidel. [2], [20]

Vstřikování probíhá na strojích s horizontální nebo vertikální vstřikovací jednotkou, kde se plastifikovaný materiál pod vysokým tlakem vstřikuje do uzavřené formy a chladnutím získává finální tvar. Materiál se nejprve zahřeje, homogenizuje a následně vytvaruje ve formě. Po ochlazení je vylisek připraven k dalšímu zpracování. Princip vstřikování je znázorněn na Obr. 37. [19], [20]



Obr. 37: Proces vstřikování [17]

Pro spojení dvou a více různých materiálů se využívá tzv. vícekomponentní vstřikování. Tento proces, podobně jako koextruze, umožňuje kombinaci materiálů s různými mechanickými vlastnostmi, například tvrdého plastu a měkkého těsnicího materiálu, v jednom výrobním kroku. [18]

V porovnání s extruzí je vstřikování vhodnější pro složitější tvary a umožňuje vyšší přesnost. Extruze je naopak výhodnější pro dlouhé, kontinuální profily. Z hlediska nákladů je extruze levnější, zatímco vstřikování je dražší kvůli složitější technologii a vyšším nákladům na formy. [19]

2.4 Povrchové úpravy těsnění

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, povrchové úpravy těsnění slouží především ke snížení tření a ochraně proti mechanickému opotřebení či vlivům prostředí. Mezi nejčastěji používané technologie patří sametování (flocking), slip-coating a lakování.

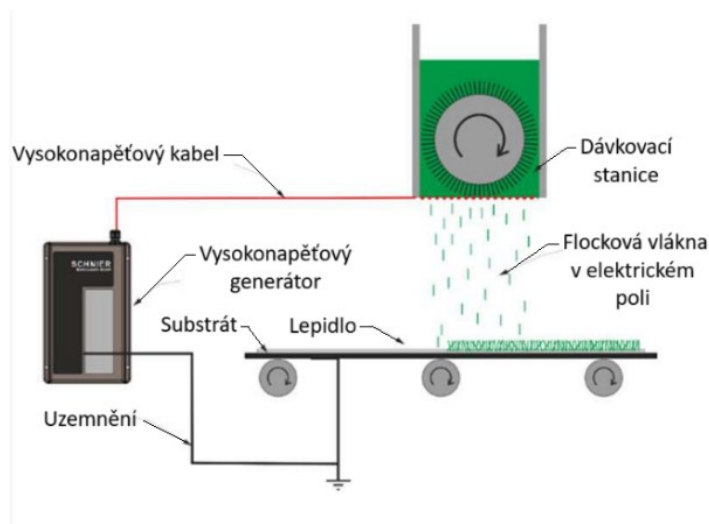
2.4.1 Sametování (flocking)

Sametování, neboli flocking, je proces, při kterém jsou na povrch těsnění nanášena krátká monofilní syntetická vlákna pomocí elektrostatického pole a lepidla. Tato technologie slouží ke snížení tření mezi těsněním a okolními povrchy, jako jsou skla nebo lak karoserie, a zároveň zlepšuje odolnost vůči opotřebení a povětrnostním vlivům. [3], [11], [12]

K sametování se nejčastěji používají polyesterová (PES) a polyamidová (PA) syntetická vlákna. Lepidla používaná pro flocking bývají nejčastěji na bázi polyuretanu, který zajišťuje dobrou adhezi k podkladovým materiálům, jako jsou EPDM a TPE/TPV. Klíčovým faktorem úspěšné aplikace je správná úprava povrchu, optimální složení lepidla a kontrola podmínek během výroby, zejména teploty a vlhkosti. [3], [12]

Během procesu sametování se vlákna aplikují kolmo na povrch pokrytý lepidlem, přičemž se obvykle zakotví jednou třetinou své délky, zatímco zbytek tvoří funkční vrstvu. Délka vláken se pohybuje od 0,3 do 3 mm a jejich hustota dosahuje hodnoty 8–10 %, což znamená, že 90–92 % flockované plochy tvoří vzduch. Aby bylo dosaženo požadované adheze, je nutné povrch před aplikací důkladně očistit, odmastit a případně mechanicky upravit. [3], [12]

Existují dvě hlavní metody tzv. sametování těsnících profilů. První je tzv. online flocking, kde proces probíhá přímo na výrobní lince, jak je znázorněno na Obr. 38. Nejprve je na povrch vyextrudovaného profilu nanesen primer, což je speciální adhezivní prostředek, většinou na bázi polyuretanu, který zvyšuje přilnavost lepidla a zajišťuje pevné spojení s podkladem. Po aplikaci primeru je nanášeno jednosložkové polyuretanové lepidlo, do kterého jsou elektrostaticky zakotvena vlákna. Elektrostatické pole způsobí, že se vlákna orientují kolmo k povrchu a rovnoměrně se rozprostřou. Celý proces je zakončen vytvrzením lepidla při zvýšené teplotě, tím je dosažena pevná fixace vláken. [3], [12]



Obr. 38: Proces online flockování. Upraveno [13]

Druhá metoda je tzv. flock tape. Jedná se o flockovací pásku, na kterou jsou vlákna nanášena ještě před samotnou aplikací na těsnění. Tato páska se během extruze přitlačuje na roztavený materiál profilu. Páska se tímto způsobem pevně integruje do povrchu těsnění. Proces flockování pásky je obdobný jako při online flockingu. Na podkladový film je nanášeno lepidlo a elektrostaticky fixovaná vlákna, která jsou následně vysušena a připravena k navinutí na cívky. Tyto role jsou poté dodávány do výrobních závodů pro výrobce těsnění. Na Obr. 39 je ilustrován příklad profilu těsnění opatřený flockovací páskou. [3], [11], [12]



Obr. 39: Profil těsnění s flockovací páskou [15]

Hlavní výhodou sametovaných povrchů je nízký součinitel smykového tření, který umožňuje plynulý pohyb skla v kontaktních plochách. Součinitel smykového tření u sametovaných povrchů dosahuje hodnot 0,2 – 0,3, což je výrazně méně než u nesametovaných povrchů (0,6 a více). Dalšími přínosy jsou vyšší odolnost proti opotřebení, estetický vzhled, příjemný omak a tlumení hluku a vibrací. Sametování rovněž chrání těsnění proti oděru, povětrnostním vlivům a chemické degradaci, čímž prodlužuje jejich životnost. [3], [12], [13]

2.4.2 Slip-coating

Slip-coating je metoda povrchové úpravy těsnění, při níž se na povrch profilu nanáší kluzná vrstva, která snižuje tření a zabraňuje mechanickému opotřebení. Tato technologie se běžně aplikuje na těsnění, která přicházejí do kontaktu se skly nebo lakovanými částmi karoserie. Na rozdíl od flockování, kde jsou nanášena syntetická vlákna, slip-coating vytváří homogenní a hladkou povrchovou vrstvu, jak je znázorněno na Obr. 40. [1]



Obr. 40: Profil těsnění s povrchovou úpravou slip-coating [14]

Tato úprava zabraňuje oděru těsnění, například při častém pohybu skel, a zároveň poskytuje ochranu proti vlivům prostředí, jako jsou čisticí prostředky, UV záření a povětrnostní podmínky. [14]

Aplikace slip-coatingu probíhá přímo během extruze těsnícího profilu. Obvykle se využívá koextruze vrstvy termoplastického elastomeru (TPE) nebo termoplastického vulkanizátu (TPV), přičemž se do materiálu přidávají složky zajišťující požadované kluzné vlastnosti. Mezi běžně používané přísady patří například silikon, teflon (PTFE), polyuretan nebo ultra-vysokomolekulární polyetylen (UHMWPE). Na rozdíl od flockování tento postup nevyžaduje předchozí úpravy povrchu, jako jsou korona nebo plazmové ošetření, a obejde se i bez primeru. K aplikaci slip-coatingu postačuje přídatné dávkovací zařízení pro TPV. [11]

Velkou výhodou této technologie je možnost aplikace i na složitější tvary bez nutnosti použití elektrostatického nanášení, což zjednodušuje výrobní proces a přispívá ke snížení nákladů oproti flockování. Povrch vytvořený slip-coatingem je hladký a neobsahuje texturu, což přispívá ke snížení přilnavosti nečistot. [11], [14]

2.4.3 Lakování

Lakování se používá především u těsnění, která přicházejí do kontaktu s lakovanými částmi karoserie. Nejčastěji se aplikuje na vnitřní těsnění dveří, ale v některých případech bývá

využíváno i u těsnění víka pátých dveří, zejména u vozidel vyšší třídy. Kromě snížení tření poskytuje lak ochranu proti mechanickému opotřebení a přispívá k delší životnosti těsnění. [1]

Pro dosažení správné adheze laku k podkladu je klíčová důkladná předúprava povrchu, která zahrnuje odstranění nečistot a zajištění optimální smáčivosti. Materiály, které mají nižší povrchovou energii, často vyžadují předúpravu pomocí plazmy, plamene nebo korónového výboje, což zlepšuje přilnavost laku a zajišťuje jeho dlouhodobou trvanlivost. [3]

Z hlediska složení se pro lakování těsnění nejčastěji používají polyuretanové laky, které se aplikují v jedné nebo více vrstvách. Základní jednovrstvý systém obvykle zahrnuje nanesení primeru o tloušťce 12–20 μm a dvousložkového krycího laku s tloušťkou 25–50 μm . Pro dosažení vyšší odolnosti se někdy aplikuje trojvrstvý systém, kde se mezi primer a krycí lak vkládá ještě vrstva základního laku o tloušťce 15–25 μm . Každá z těchto vrstev přispívá k ochraně povrchu a zajišťuje lepší mechanické vlastnosti těsnění. [3]

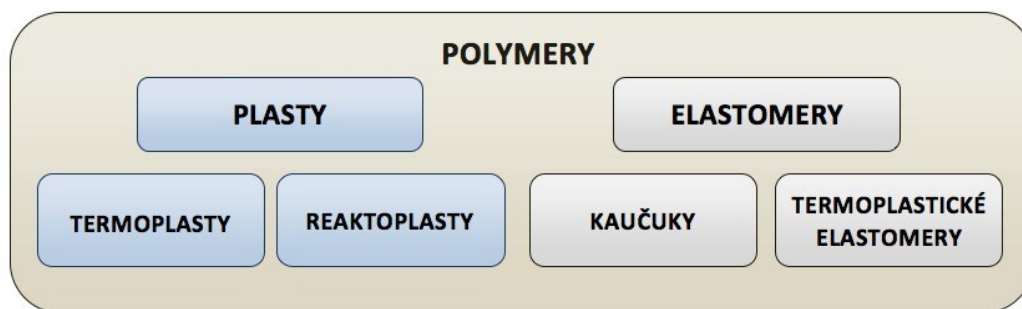
Tradiční laky často obsahují vysoké množství organických rozpouštědel, která mohou zatěžovat životní prostředí i samotný substrát, proto dochází k jejich postupnému nahrazování laky na vodní bázi. Tyto moderní lakovací systémy jsou šetrnější k životnímu prostředí, ale jejich aplikace vyžaduje přesné dodržení podmínek, zejména pokud jde o vlhkost a povrchovou energii podkladu. [3]

Lakování nejen zlepšuje vzhled těsnění, ale zároveň mu poskytuje ochranu proti chemickému a mechanickému opotřebení. Ve srovnání se sametováním, které vytváří povrch s texturou, má lakování homogenní, hladkou vrstvu podobně jako slip-coating. Oproti němu však může poskytovat vyšší mechanickou odolnost a lepší ochranu vůči vnějším vlivům, jako jsou UV záření a chemikálie. Výhodou je také snadná údržba a možnost aplikace na širokou škálu těsnících materiálů. [1], [3]

2.5 Materiály těsnění

Základ automobilových těsnění tvoří polymery, které lze obecně rozdělit na plasty a elastomery (viz Obr. 41). [23]

Plasty se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty se zahřátím měknou a lze je opakovaně tvarovat. Naopak reaktoplasty po vytvrzení zůstávají pevné a nelze je znovu přetavit. Elastomery jsou vysoce pružné materiály, které se mohou výrazně deformovat a následně se vrátit do původního tvaru. Do této skupiny patří kaučuky a termoplastické elastomery (TPE). [23]



Obr. 41: Základní rozdělení polymerů [23]

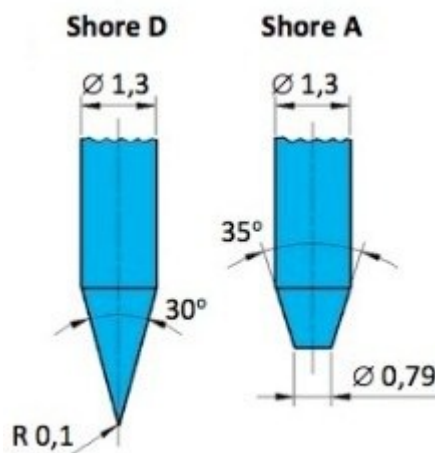
Pro výrobu těsnění karoserie se nejčastěji používají zesíťované elastomery (EPDM), termoplastické elastomery (TPV, TPS) a polypropylen (PP). Tyto materiály se často upravují přidáním různých přísad, které zlepšují jejich mechanické, tepelné a chemické vlastnosti. Kromě toho se u některých těsnění aplikují výztužné prvky z oceli nebo hliníku, které zajišťují tvarovou stabilitu a pevnost profilu. [1], [23]

2.5.1 Tvrdost polymerů

Tvrdost je jednou z důležitých mechanických vlastností polymerů. Určuje jejich odolnost vůči vtlačení jiného tělesa. Měří se metodou Shore, která se dělí na dvě základní varianty [23]:

- Shore A – pro měkčí polymery
- Shore D – pro tvrdší polymery

Měření tvrdosti se provádí vtlačněním hrotu do povrchu materiálu pod definovaným zatížením. U metody Shore A se používá tupý hrot a přitlačná síla 10 N, zatímco u metody Shore D se využívá hrot se špičkou a zatížení 50 N. Naměřené hodnoty se udávají na stupnici od 0 do 100. [23]

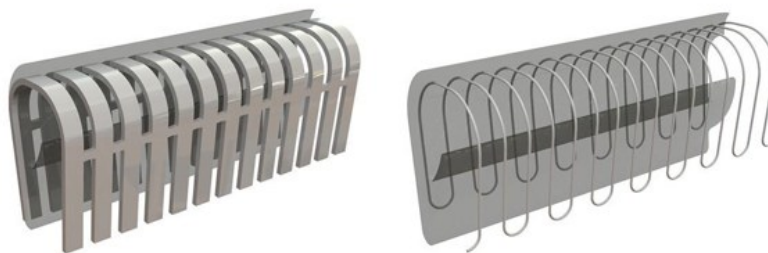


Obr. 42: Měření tvrdosti metodou Shore [23]

2.5.2 Výztuhy v těsněních

U profilů těsnění se běžně využívají kovové výztuhy z hliníku nebo oceli. Nejčastěji se aplikují u těsnění montovaných na stojinu, kde zajišťují správné upevnění na karoserii. Ocelové výztuhy se často používají například pro vnitřní těsnění dveří, zatímco hliníkové výztuhy se uplatňují u vedení skel. U některých dílů, jako je například těsnění vodní přepážky, se v zádržné oblasti využívají ocelové drátové výztuhy. [1]

Výztuhy mohou být prosekávané nebo neprosekávané. Prosekávání se u výztuh provádí z několika důvodů. Prvním je zlepšení flexibility, protože prosekávané výztuhy umožňují lepší tvarovatelnost profilů do rádiusů, například kolem dveří nebo jiných zakřivených částí karoserie při montáži. Dalším důvodem je zlepšení spojení výztuhy s pryžovým materiálem. Během výroby těsnění pronikne pryž (např. EPDM) skrz otvory ve výztuze, což vede k pevnější fixaci výztuhy uvnitř profilu. [1]



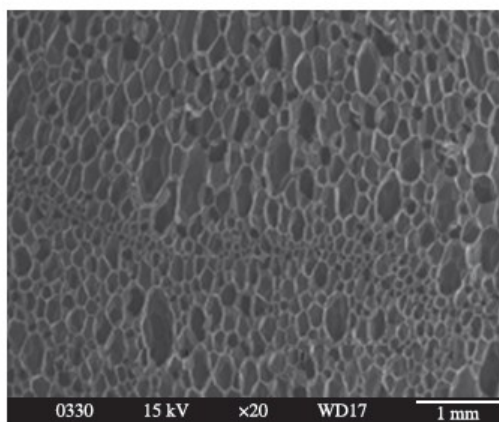
Obr. 43: Příklad prosekávané výztuhy (vlevo) a drátové výztuhy (vpravo) [26]

2.5.3 EPDM

EPDM neboli etylen-propylen-dienový monomer je syntetický kaučuk patřící do skupiny etylen-propylenových elastomerů (EPR). Díky své chemické struktuře, která obsahuje dvojné vazby pouze v postranních řetězcích, vyniká vysokou odolností vůči povětrnostním vlivům, ozonu a stárnutí. Tento materiál je téměř nepolární, což mu poskytuje vynikající odolnost vůči vodě, páře, zředěným kyselinám a zásadám, avšak neodolává benzínu a minerálním olejům. [1], [21]

EPDM se využívá pro výrobu statických i dynamických těsnění. Podle tvrdosti a struktury se EPDM dělí na homogenní a mikroporézní variantu. Homogenní EPDM je tvrdší a používá se tam, kde je nutná tvarová stabilita, často s výztuží uvnitř profilu. Naproti tomu mikroporézní EPDM, jehož strukturu tvoří uzavřené vzduchové bubliny (viz Obr. 44), je měkčí a pružnější. Díky tomu se lépe přizpůsobuje nerovnostem povrchu a je zvláště vhodný pro funkční části dynamických těsnění, která dosedají na povrch karoserie. [1], [22]

U homogenní EPDM se tvrdost pohybuje v rozmezí 65ShA (nejměkčí) až 90ShA (nejtvrdší). Pro mikroporézní EPDM se místo tvrdosti udává hustota, protože její mechanické vlastnosti jsou silně ovlivněny podílem vzduchových bublin ve struktuře. [1]



Obr. 44: Mikrostruktura pěnové EPDM pryže [25]

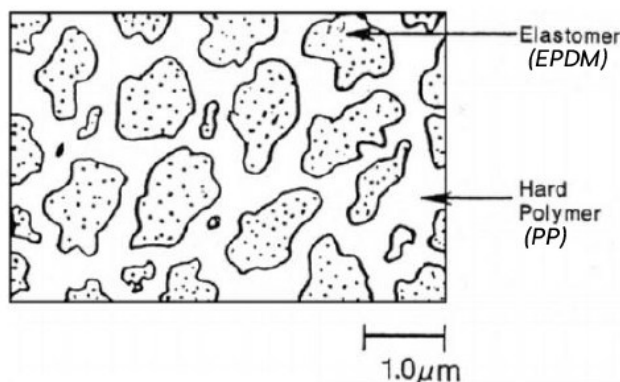
Do homogenního EPDM se obvykle přidává skelné vlákno, které má vysokou pevnost v tahu. Skelné vlákno zabraňuje deformacím profilu při průchodu odtahovým zařízením během extruze, kdy dochází v materiálu k velkému tahovému napětí. Další běžně používanou přísadou do EPDM jsou saze, které zlepšují odolnost vůči stlačení, tvrdost materiálu a pevnost v tahu. Přídavek sazí navíc zvyšuje tepelnou stabilitu a odolnost vůči UV záření. [1], [23]

Vzhledem ke svým elastickým vlastnostem, širokému rozsahu tvrdostí a pracovních teplot (-50 °C až 177 °C) se EPDM řadí mezi nejpoužívanější elastomery pro automobilová těsnění. Z ekologického hlediska je však tento materiál obtížně recyklovatelný. [1], [21]

2.5.4 Termoplastické elastomery

Termoplastické elastomery (TPE) jsou skupinou polymerních materiálů, které kombinují vlastnosti elastomerů a termoplastů. Při zvýšené teplotě se chovají jako termoplasty, což umožňuje jejich snadné zpracování vstřikováním nebo vytlačováním. Při pokojové teplotě vykazují elastické vlastnosti podobné vulkanizovaným kaučukům. [23], [24]

Jedním z nejvýznamnějších typů TPE jsou termoplastické vulkanizáty (TPV), které patří do skupiny termoplastických olefinů (TPO). TPV jsou mikroheterogenní směsi, kde maticí tvoří polypropylen (PP) s jemně rozptýlenými částicemi vulkanizovaného EPDM (viz Obr. 45). TPE vykazují větší trvalou deformaci ve srovnání s EPDM a jsou vhodné zejména pro výrobu statických těsnění, jako jsou vedení skel, vnější a vnitřní stírací těsnění, a také pro enkapsulaci skel. [1], [23]



Obr. 45: Morfologie TPV [1]

Termoplastické elastomery (TPE) se vyznačují vysokou odolností vůči zředěným kyselinám, zásadám, ozónu, povětrnostním vlivům a UV záření. Na rozdíl od EPDM, jsou TPE běžně recyklovatelné. Díky těmto vlastnostem se termoplastické elastomery stále více prosazují jako alternativa k tradičním elastomerům v automobilovém i průmyslovém sektoru. [23], [24]

2.5.5 Polypropylen

Polypropylen (PP) je semikrystalický termoplast patřící do skupiny polyolefinů. Vyznačuje se nízkou hustotou, vysokou pevností a odolností vůči chemikáliím. Díky své tvrdosti, tuhosti a tvarové stabilitě za zvýšených teplot se hojně využívá v průmyslových aplikacích, včetně výroby těsnění. Jeho vysoká chemická odolnost a nízká nasákavost jej činí vhodným pro prostředí s agresivními látkami, jako jsou kyseliny a zásady. [21], [23]

V oblasti těsnění karoserie se polypropylen používá především jako nosná část vnějších a vnitřních stíracích těsnění, kde zajišťuje mechanickou pevnost a rozměrovou stabilitu. Často je plněn talkem, který zlepšuje jeho pevnost, krystalizaci a tepelnou odolnost. Obsah talku se běžně pohybuje kolem 20 %, ale může dosahovat až 60 %. Na rozdíl od polypropylenu plněného skelnými vlákny poskytuje talk nižší mechanické zpevnění, avšak nabízí lepší zpracovatelnost. [1], [23]



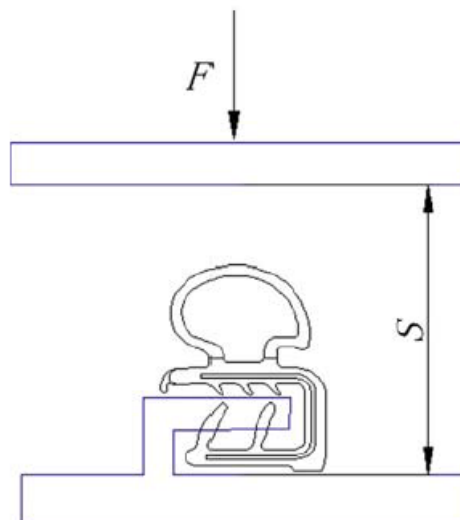
Obr. 46: Přírodní minerál talek [23]

Nevýhodou polypropylenu je jeho hořlavost a zvýšená křehkost při teplotách pod $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, což omezuje jeho použití v extrémně chladných podmínkách. Jeho teplotní rozmezí použitelnosti je přibližně $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro aplikace v exteriéru je nezbytné jeho stabilizování proti UV záření, jinak rychle degraduje. Přídavek 2,5 % sazí může polypropylen chránit před UV zářením až na šest let. [23]

PP není tak pružný jako ostatní elastomery nebo termoplastické elastomery, ale díky své pevnosti, chemické odolnosti a nízké absorpci vlhkosti nachází široké uplatnění nejen v automobilovém průmyslu, ale i v chemickém a potravinářském průmyslu. [21], [23]

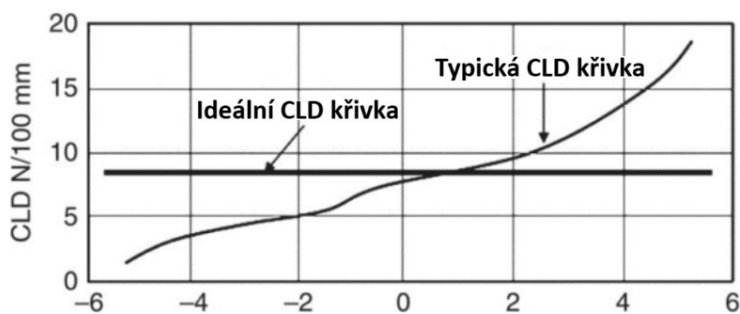
2.6 Parametry ovlivňující kvalitu těsnění

Jedním z klíčových ukazatelů kvality těsnění je index označovaný jako kompresní zatížení při deformaci (Compression Load Deflection – CLD), který vyjadřuje odporovou sílu těsnění na jednotku délky. Pro jeho určení se využívá zkušební přípravek, který simuluje reálné uchycení těsnění na vozidle (viz schéma na Obr. 47 níže). [4]



Obr. 47: Příklad uchycení těsnění při měření CLD [29]

Vzorky těsnění jsou stlačovány konstantní rychlostí a poté rychle uvolněny. Během stlačování se měří síla, kterou těsnění působí, a zároveň se sleduje tloušťka spáry. Výsledné hodnoty jsou následně vyneseny do grafu, jak je znázorněno na následujícím obrázku. [1]



Obr. 48: Kompresní zatížení při deformaci (CLD). Upraveno [4]

Ideální CLD křivka má tvar vodorovné přímky, což znamená, že zatížení působící na těsnění je konstantní bez ohledu na míru jeho stlačení. V praxi však CLD křivky často vykazují nelineární průběh. Takové chování může negativně ovlivnit těsnicí funkci profilu i akustický komfort při zavírání dveří. [4]

Vyšší hodnota CLD značí, že těsnění je stlačeno větší silou, což obecně přispívá k vyšší těsnicí účinnosti. Zároveň ale zvyšuje sílu potřebnou pro otevření a zavření dveří, což může být pro uživatele nepohodlné. V extrémních případech může dojít i k deformaci dveří nebo postranice. [4]

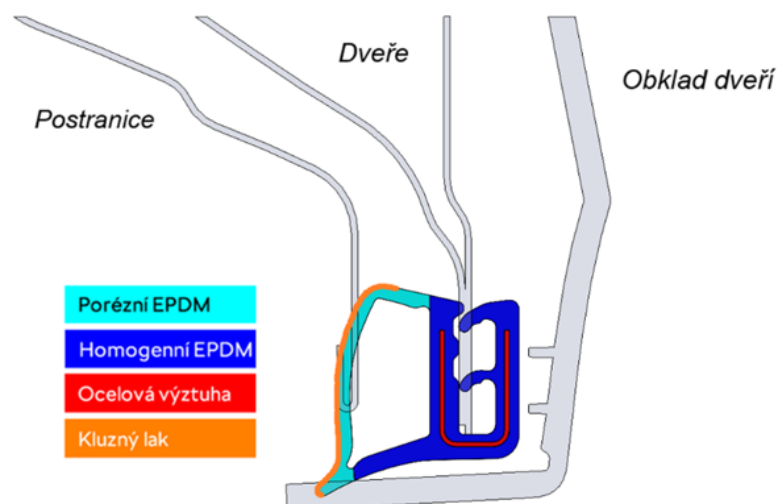
Naopak nízká hodnota CLD znamená, že k deformaci těsnění je zapotřebí menší síla, což výrazně zvyšuje komfort uživatele při zavírání dveří. Tento jev bývá často vnímán jako známka vyšší kvality a pohodlí. [4]

Dalším důležitým ukazatelem kvality těsnění je rovnoměrnost deformace po celé délce těsnění. Právě rovnoměrná deformace je klíčová pro dosažení stabilního těsnicího tlaku a celkové funkčnosti systému. Chování těsnění se však v čase mění, protože vlastnosti pryže se liší v závislosti na jejím stáří. Nové těsnění se chová jinak než to, které je vystaveno stárnutí. Starší těsnění může vykazovat nižší pružnost, což vede k nerovnoměrnému rozložení tlaku. Tím se snižuje těsnicí schopnost a zároveň může docházet ke zvýšené hlučnosti při zavírání dveří. [27]

3 Popis analyzovaného těsnění

Předmětem analýzy v praktické části této práce je profil těsnění podběhu zadního kola. Jedná se o dynamické těsnění, které je umístěno na zadních dveřích vozidla a při jejich zavření doléhá na postranici karoserie. Jeho primární funkcí je zabránit vnikání vody, nečistot a hluku z prostoru kola do interiéru.

Těsnění je uchyceno metodou roll-forming na stojinu dveří a je vyrobeno koextruzí z několika materiálů. Nosnou část tvoří homogenní EPDM s tvrdostí 65ShA, vyztužený prosekávanou výztuhou z hlubokotažné oceli DC03-C590. Část těsnění, která přiléhá ke karoserii, je vyrobena z mikroporézního EPDM o hustotě $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Povrch profilu je opatřen vodou ředitelným dvousložkovým lakem STAHL W91-023 o tloušťce přibližně $12 \text{ }\mu\text{m}$, který slouží ke snížení tření a ochraně povrchu těsnění. Konce profilu jsou zakončeny vstříkovanými díly z homogenního EPDM o tvrdosti 60ShA, které jsou rovněž lakované. Na Obr. 49 je znázorněn příčný řez analyzovaným těsněním včetně všech přilehlých částí. [1]



Obr. 49: Těsnění podběhu zadního kola v řezu. Upraveno [1]

Po jízdách zkouškách bylo v oblasti přibližně 10 mm od okraje lemu karoserie zaznamenáno opotřebení laku po celé délce postranice, jak je patrné z fotografie na levé straně Obr. 50. Tento jev může souviset se zvýšeným tlakovým namáháním v dané oblasti. Na pravé straně obrázku je pak zachyceno samotné těsnění upevněné na dveřích. Obě fotografie byly pořízeny po provedené jízdě zkoušce, přičemž je na nich patrná přítomnost usazených nečistot jak na těsnění, tak i na postranici. Nečistoty v místě kontaktu mohou působit abrazivně, a tím přispívat k oděru laku během provozu.



Obr. 50: Postranice karoserie a přilehlá oblast kontaktu těsnění po jízdních zkouškách

Kromě hlavního kontaktu v oblasti bubliny byla stopa opotřebení pozorována také v místě dotyku vstřikovaných koncovek, které se rovněž dostávají do kontaktu s lakovaným povrchem karoserie. Tato oblast je přitom méně přizpůsobivá změnám geometrie a může generovat vyšší kontaktní tlak, což se může projevit na intenzitě opotřebení.

Na Obr. 51 níže je znázorněn analyzovaný profil těsnění s vyznačením vstřikovaných koncovek. Detailní pohled na jednu z těchto koncovek je zobrazen na Obr. 52.

Vstřikované koncovky z EPDM 60ShA



Obr. 51: Profil těsnění podběhu zadního kola



Obr. 52: Detail vstřikované koncovky z EPDM 60ShA

Na základě zjištěného opotřebení bylo rozhodnuto provést detailní analýzu příčného rozložení kontaktního tlaku v oblasti dotyku těsnění a karoserie pomocí MKP simulací.

4 MKP simulace

V následující kapitole je věnována pozornost simulacím pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP), kdy byl simulován stav po zavření dveří.

Předmětem simulací byla pouze koextrudovaná část analyzovaného těsnění tvořená homogenním EPDM, mikroporézním EPDM a ocelovou výztuhou, bez uvažování vstříkovaných koncovek.

Cílem MKP simulací bylo analyzovat příčné rozložení tlaku v kontaktu mezi těsněním a postranicí karoserie při různých tloušťkách spáry, které zohledňují vliv montáže dveří. Sledována byla také celková síla působící v kontaktu.

4.1 Tahová zkouška EPDM materiálů

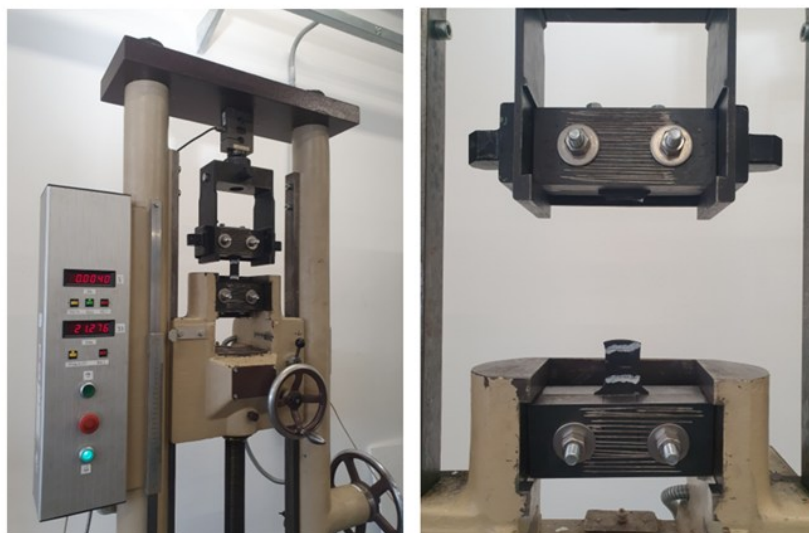
Před samotnou realizací MKP simulací bylo nutné stanovit základní mechanické vlastnosti použitých pryžových materiálů. Za tímto účelem byla provedena jednoosá tahová zkouška na připravených zkušebních vzorcích. Materiálové parametry vzorků jsou uvedeny v následující tabulce. Jejich hodnoty jsou v rozmezí udávaném výrobcem.

Tab. 1: Materiálové parametry zkušebních vzorků [1]

Materiál	Tvrдость [ShA]	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Homogenní EPDM	70	1320
Mikroporézní EPDM	–	580

4.1.1 Popis zkoušky a její průběh

Vzorky pro tahovou zkoušku byly vyřezány z platniček obdélníkového tvaru pomocí nože a ocelové šablony. Jejich povrch byl následně vybroušen. Pro každý typ EPDM byla připravena tři zkušební tělesa ve tvaru tzv. oboustranných lopatek, celkem tedy šest vzorků. Každý vzorek byl upnut do čelistí zkušebního stroje (viz Obr. 53) a natahován rychlostí 25 mm/min až do přetržení. Z důvodu omezení zkušebního zařízení nebyla dodržena norma, podle které by rychlost deformace měla činit až 500 mm/min (např. dle ASTM D412 nebo ISO 37). [28] Rychlost zatěžování i rozměry zkušebních těles proto byly přizpůsobeny možnostem laboratoře.



Obr. 53: Zkušební stroj (vlevo) a přetržený vzorek mikroporézního EPDM (vpravo)

4.1.2 Výpočet parametrů

Před zahájením tahové zkoušky byla na každém vzorku vyznačena redukovaná délka a změřena počáteční plocha průřezu. Po natažení na dvojnásobek této délky (tj. při poměrném prodloužení $\varepsilon = 1$) byla zaznamenána odpovídající síla a deformovaná plocha průřezu. Na základě těchto údajů byly spočteny následující materiálové parametry potřebné pro numerické výpočty:

- Poissonův poměr [-]:

$$\mu = \frac{(S_0 - S) \cdot \varepsilon}{S_0} \quad (4.1)$$

- Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]:

$$E = \frac{F \cdot \varepsilon}{S} \quad (4.2)$$

- Mez pevnosti [MPa]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (4.3)$$

Kde:

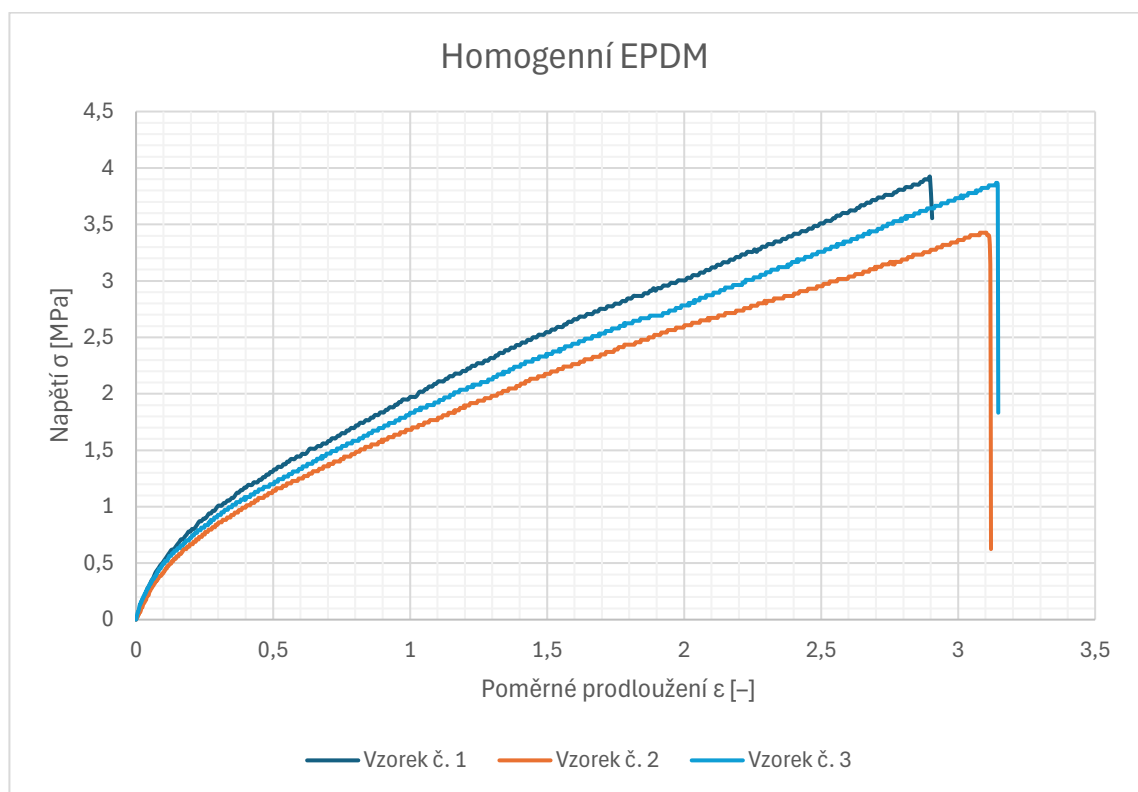
S_0	[mm ²]	počáteční plocha průřezu
S	[mm ²]	plocha průřezu po natažení na dvojnásobek délky
ε	[-]	poměrné prodloužení
F	[N]	síla při dvojnásobku délky
F_m	[N]	maximální naměřená síla během tahové zkoušky

4.1.3 Vyhodnocení tahové zkoušky

Na Obr. 54 jsou znázorněny zkušební vzorky po přetržení – vlevo homogenní EPDM, vpravo mikroporézní EPDM. Na Obr. 55 a Obr. 56 jsou pak zobrazeny jednotlivé tahové diagramy.



Obr. 54: Zkušební vzorky po tahové zkoušce

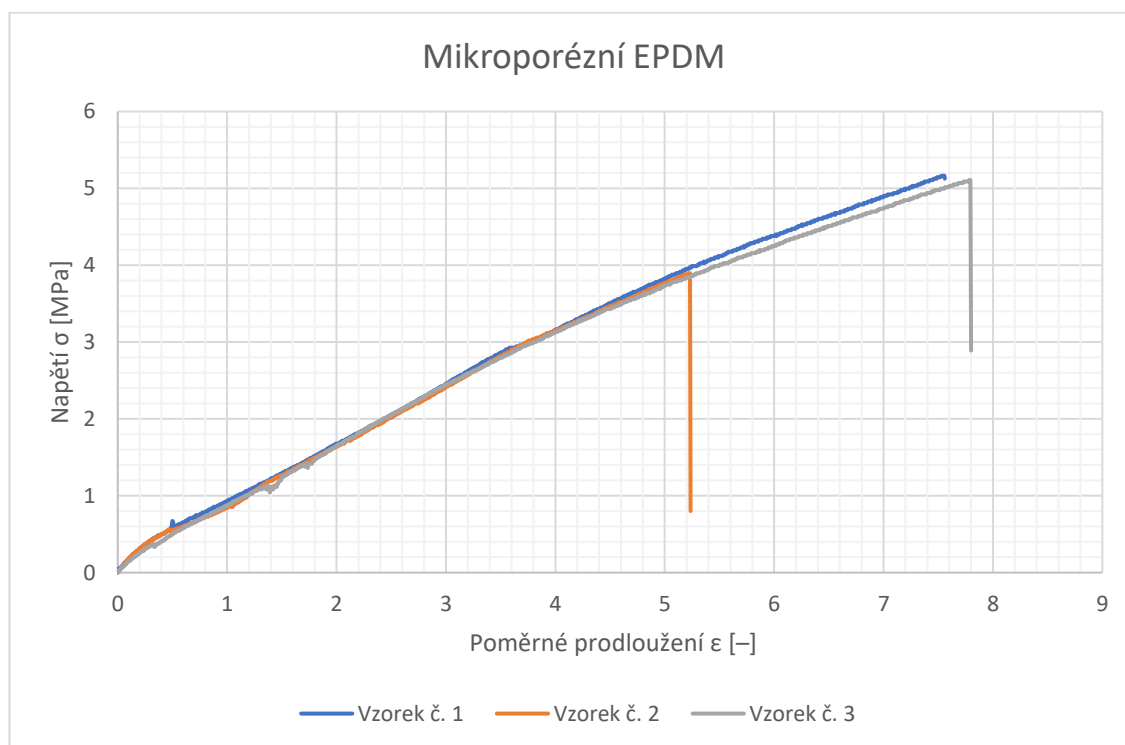


Obr. 55: Tahový diagram homogenního EPDM

Výsledky tahových zkoušek homogenního EPDM jsou shrnuty v Tab. 2. Mez pevnosti se u jednotlivých vzorků pohybovala v rozmezí 3,43 až 3,92 MPa. U vzorku č. 2 byla ve srovnání se vzorky č. 1 a 3 mírně nižší, což mohlo být způsobeno drobným poškozením okraje vzniklým při vyřezávání vzorku. Poissonův poměr byl u všech vzorků konstantní a dosáhl hodnoty 0,49. Youngův modul pružnosti v tahu se u všech vzorků pohyboval přibližně okolo 6 MPa.

Tab. 2: Výsledky tahové zkoušky – homogenní EPDM

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3
R_m [MPa]	3,92	3,43	3,87
μ [-]	0,49	0,49	0,49
E [MPa]	5,93	5,91	6,00



Obr. 56: Tahový diagram mikroporézního EPDM

Hodnoty pro mikroporézní EPDM jsou uvedeny v Tab. 3. Mez pevnosti dosahovala hodnot 5,16 MPa a 5,11 MPa u vzorků č. 1 a 3, zatímco u vzorku č. 2 byla výrazně nižší (3,90 MPa). Tento rozdíl pravděpodobně souvisí s tím, že povrch vzorku nebyl vybroušen. V důsledku toho na něm mohly zůstat drobné povrchové nerovnosti nebo trhliny, které vedly k lokálnímu zvýšení napětí a mohly tak přispět k předčasnému porušení materiálu.

Tab. 3: Výsledky tahové zkoušky – mikroporézní EPDM

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3
R_m [MPa]	5,16	3,90	5,11
μ [-]	0,55	0,52	0,57
E [MPa]	3,55	3,49	3,64

Poissonův poměr se pohyboval v rozsahu 0,52 až 0,57, tedy nad teoretické maximum 0,5 pro ideální izotropní elastomery. [23] Zvýšené hodnoty lze vysvětlit změnou objemu během deformace způsobenou porézní strukturou materiálu. Výsledky byly i přesto považovány za relevantní a byly použity při následných MKP simulacích. Youngův modul pružnosti v tahu byl u všech vzorků přibližně 3,60 MPa.

Vzájemným porovnáním obou materiálů lze konstatovat, že mikroporézní EPDM vykazuje vyšší hodnotu meze pevnosti, ale nižší tuhost než homogenní EPDM. Toto zjištění odpovídá předpokladu, jelikož mikroporézní EPDM má nižší hustotu a obsahuje vzduchové dutiny, které snižují jeho odpor vůči deformaci.

4.2 MKP výpočtové modely

Na základě výsledků z tahové zkoušky byly vytvořeny výpočtové modely analyzovaného těsnění v programu SolidWorks Simulation. Pro definici nelineárního hyperelastického modelu chování materiálu byl u homogenního EPDM použit vzorek č. 3 a u mikroporézního EPDM vzorek č. 1. Do programu byly zadány příslušné parametry uvedené v Tab. 2 a Tab. 3, doplněné o odpovídající tahové diagramy těchto vzorků (viz Obr. 55 a Obr. 56).

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 4, simulován byl stav po zavření dveří pro různé tloušťky spáry mezi dveřmi a postranicí karoserie, konkrétně pro: 10,77 mm (nominální stav), 11,77 mm, 12,77 mm, 9,77 mm a 8,77 mm. Pro každý z těchto případů byly vytvořeny dvě varianty MKP simulací. Tyto varianty se lišily použitým nelineárním modelem chování materiálu pryže pro mikroporézní EPDM, přičemž celkem bylo sestaveno 10 výpočtových modelů.

Pro popis nelineárního chování pryžových materiálů se běžně používají tzv. hyperelastické materiálové modely. Tyto modely umožňují simulaci velkých deformací a jejich volba závisí především na rozsahu deformací, ve kterém se materiál v provozním stavu pohybuje. Jednotlivé modely vykazují různou přesnost v různých rozsazích deformace. [28]

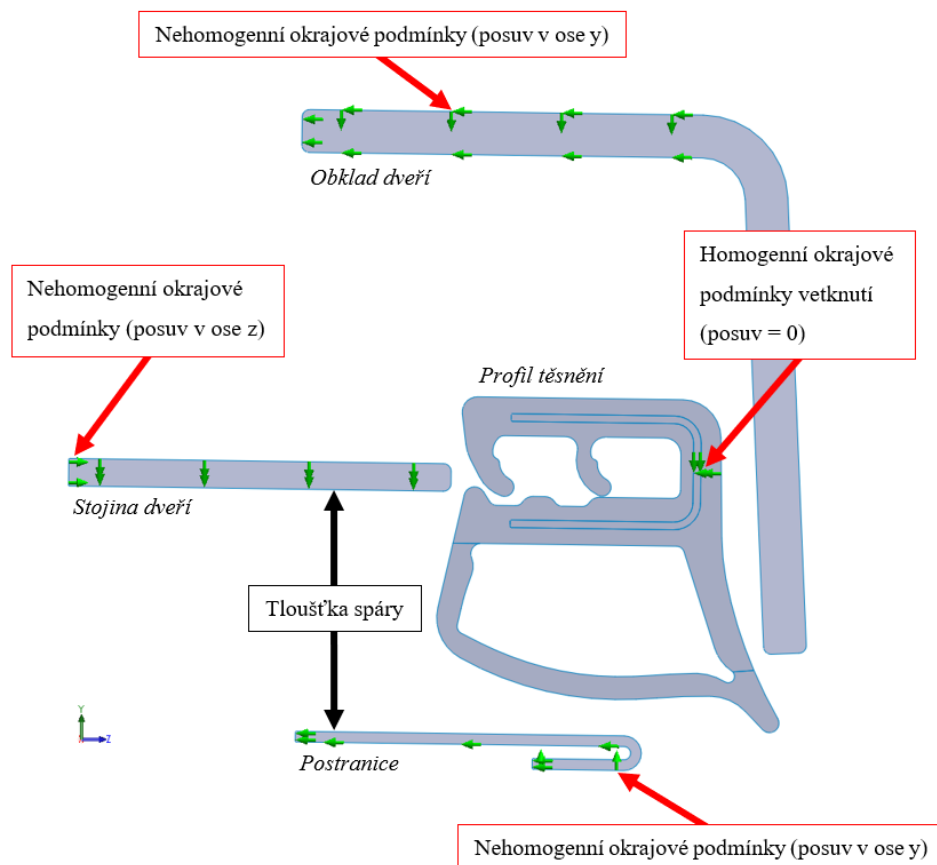
První varianta numerického výpočtu využívá dvouparametrový model Mooney-Rivlin pro oba pryžové materiály (homogenní i mikroporézní EPDM). Tento model je poměrně univerzální z hlediska deformací a často se používá pro simulaci elastomerů v technické praxi. Druhá varianta kombinuje Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogdenův model (také dvouparametrový) pro mikroporézní EPDM.

Použití Ogdenova modelu pro mikroporézní EPDM vycházelo z předpokladu většího rozsahu deformací tohoto materiálu, což bylo potvrzeno tahovými zkouškami, kdy

mikroporézní EPDM vykazovalo více než dvojnásobnou tažnost (cca 750 %) v porovnání s homogenním EPDM (cca 300 %). Byl tedy předpoklad, že mikroporézní EPDM se bude při reálném stlačování deformovat více než homogenní EPDM, a proto byl u něj použit materiálový model Ogden, který je vhodný právě pro popis většího rozsahu deformací. [28]

Ocelová výztuha byla v modelu uvažována jako plná, bez prosekávání. Toto zjednodušení nemá významný vliv na výsledky simulace v oblasti kontaktu. Ačkoli je obklad dveří ve skutečnosti vyroben z plastu, byl v rámci modelu z důvodu zjednodušení nahrazen ocelí. Toto nahrazení je opodstatněné, protože se obklad dveří v průběhu výpočtu chová jako tuhý prvek a nedochází u něj k významné deformaci. Pro definici materiálu ocelové výztuhy, stojiny dveří, postranice karoserie a obkladu dveří byly použity mechanické vlastnosti běžné konstrukční oceli ($E = 210\,000\text{ MPa}$, $\mu = 0,3$). U všech těchto částí byl model chování materiálu uvažován jako lineární elastický a izotropní.

Výpočtové modely zahrnovaly nehomogenní okrajové podmínky, které byly zavedeny pro stojinu dveří, obklad dveří a postranici karoserie. Tyto podmínky umožňují simulaci pohybu jednotlivých částí vůči těsnění. Těsnění samotné bylo uprostřed výztuhy vetknuto, a tedy v modelu nehybné. Schéma modelu včetně znázornění okrajových podmínek je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 57: Popis výpočtového modelu těsnění

Pro numerické výpočty byla vytvořena časová křivka, pomocí které výpočet probíhal ve dvou fázích. V první fázi došlo k zasunutí stojiny dveří do profilu těsnění. Obklad dveří a postranice byly v této fázi nehybné. Po zasunutí stojiny následovala druhá fáze, ve které docházelo k posuvu obkladu dveří a postranice směrem k těsnění, čímž bylo těsnění stlačováno.

Výpočty byly provedeny jako statické nelineární analýzy ve 2D zjednodušení. Délka těsnění byla uvažována 100 mm a pro výpočet byly použity stěnové elementy. Do modelu byla zahrnuta materiálová i geometrická nelinearita. Dále byly zohledněny tzv. velké deformace. Všechny kontakty byly definovány se součinitelem smykového tření 0,2.

V oblasti kontaktu bubliny s postranicí karoserie byla provedena konvergence sítě, přičemž konečná velikost elementu zde činila 0,02 mm. Síť konečných prvků je zobrazena na Obr. 136 v příloze B.

Pryžové materiály vykazují hysterezní chování zejména při cyklickém zatěžování. V této práci byla analyzována pouze okamžitá deformace po zavření dveří, kdy se spára ustálí na výsledné hodnotě. Jelikož se jedná o jeden cyklus zatížení (tzv. kvazistatické zatížení), byl vliv hystereze zanedbán.

Ve všech simulovaných případech bylo zjištěno, že redukované napětí u pryžových materiálů bylo hluboko pod mezí pevnosti a u ocelové výztuhy hluboko pod mezí kluzu. Tyto výsledky potvrzují, že při běžném provozu nedochází k trvalým deformacím. Pro úplnost je rozložení redukovaného napětí uvedeno v příloze A.

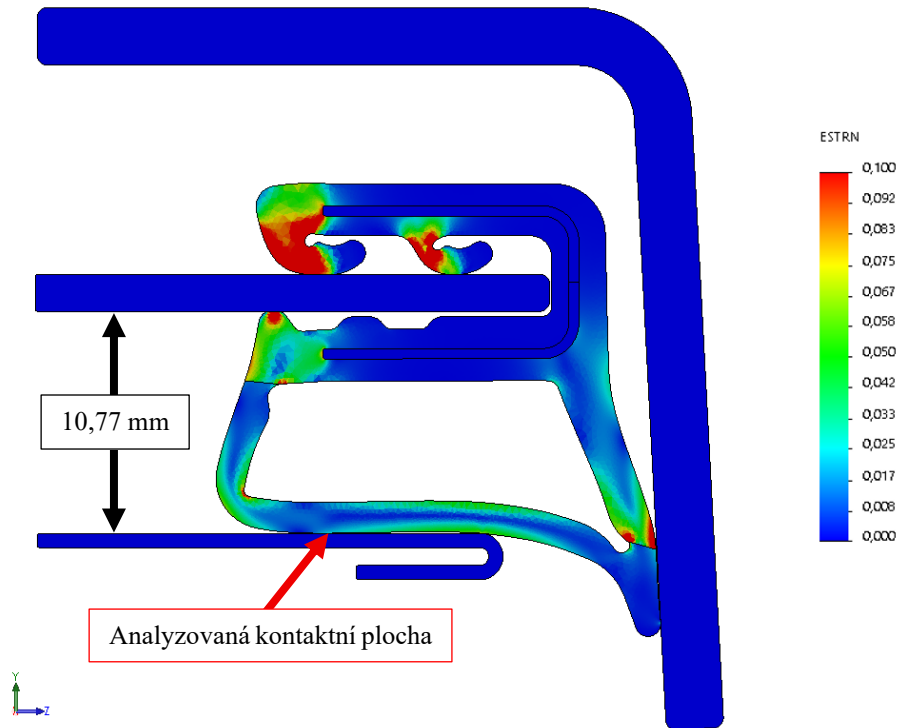
4.2.1 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 10,77 mm (nominál)

4.2.1.1 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin

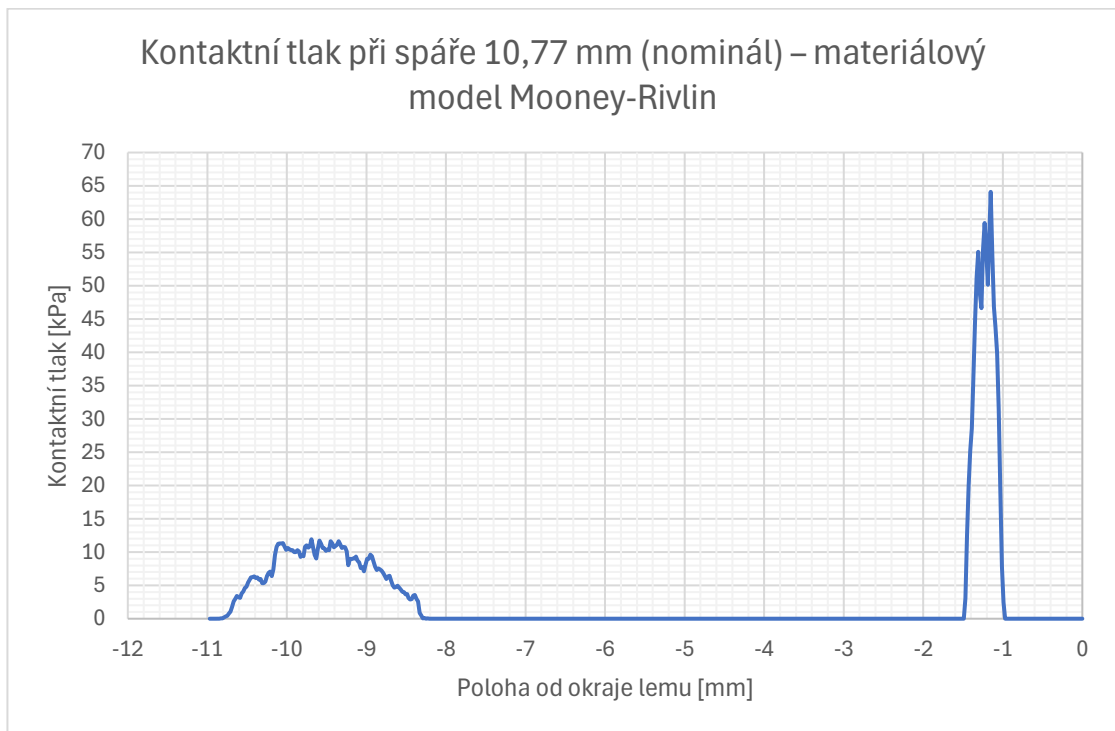
Na Obr. 58 je znázorněno výsledné rozložení poměrné deformace těsnění při nominální tloušťce spáry 10,77 mm. Z obrázku je patrné, že k největší deformaci v oblasti styku mikroporézní části s postranicí karoserie dochází v blízkosti okraje lemu postranice, kde poměrná deformace dosahuje přibližně 5 %. Tato oblast odpovídá hlavnímu kontaktnímu místu, vzdálenému 1 mm od okraje lemu, kde vzniká nejvyšší zatížení, jak ukazuje graf na Obr. 59. Maximální kontaktní tlak zde dosahuje hodnoty přibližně 65 kPa, přičemž šířka oblasti kontaktu činí přibližně 0,5 mm.

Druhá oblast kontaktu se nachází ve vzdálenosti přibližně 8,2 mm od okraje lemu postranice. Tato oblast má šířku asi 2,5 mm a kontaktní tlak je zde rozložen rovnoměrněji, bez výrazné špičky jako v prvním kontaktu. Maximální hodnota tlaku zde dosahuje přibližně 12 kPa, což odpovídá dotyku spodní části bubliny, kde je deformace nižší, přibližně 1,7 %.

V místě přechodu mezi homogenním a mikroporézním EPDM na straně kontaktu s obkladem dveří dochází k výraznější deformaci v oblasti homogenní části, kde poměrná deformace lokálně dosahuje hodnoty až 10 %.



Obr. 58: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko



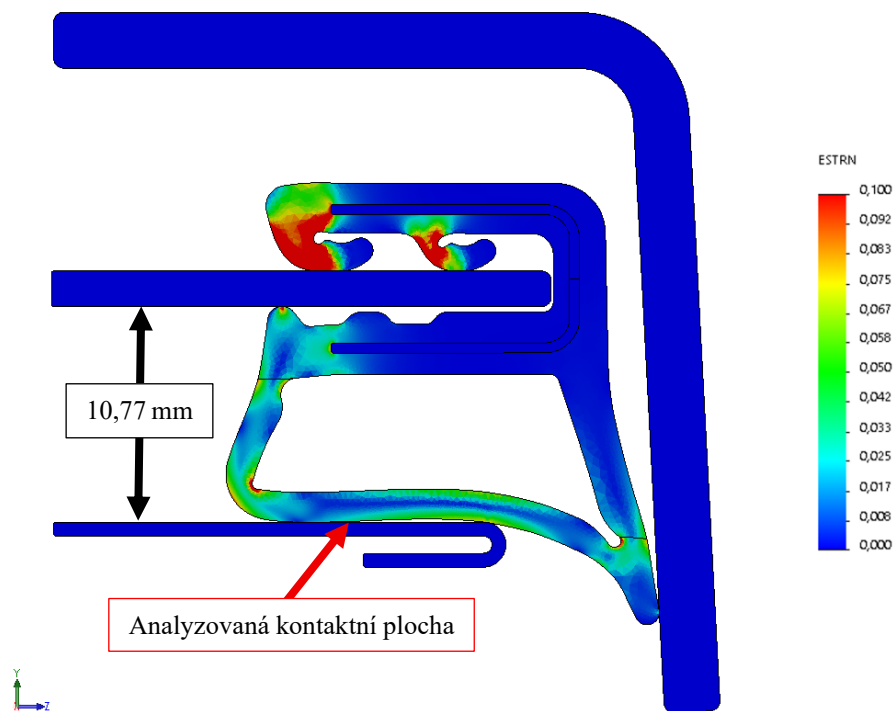
Obr. 59: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm

4.2.1.2 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin a Ogden

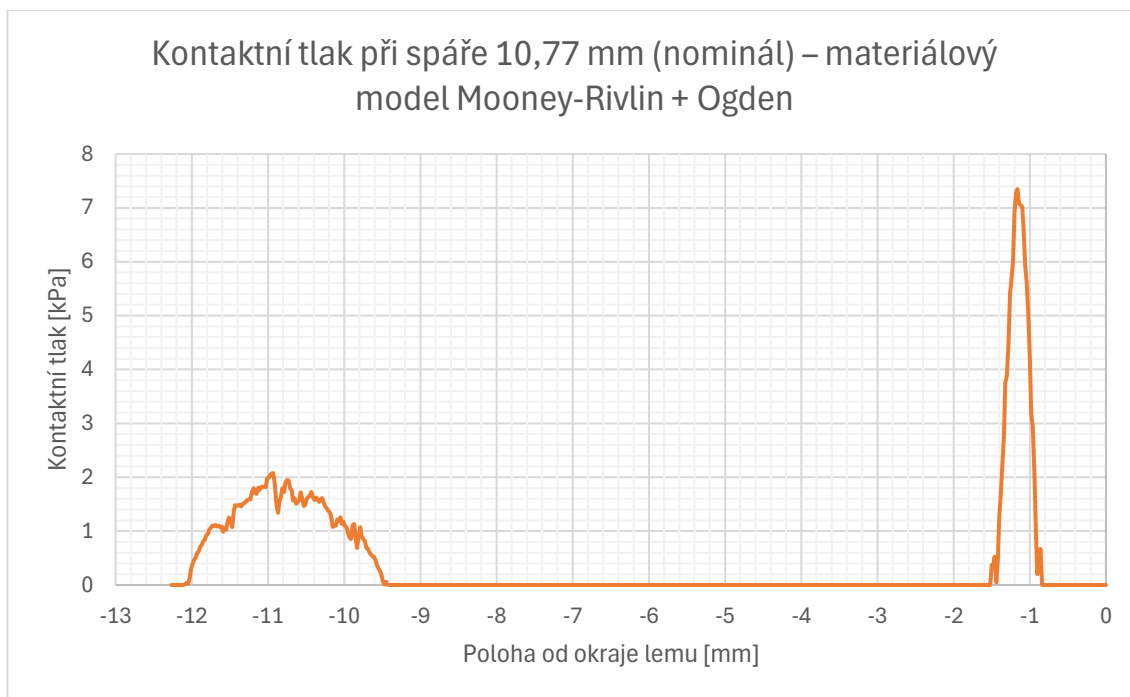
Další simulace při stejné tloušťce spáry 10,77 mm byla provedena s odlišným materiálovým modelem pro mikroporézní část, kdy byl místo modelu Mooney-Rivlin použit Ogdenův model. Rozložení deformace v oblasti hlavního kontaktu s karoserií je obdobné jako v předchozím případě. V oblasti okraje lemu postranice deformace dosahuje hodnoty přibližně 6,7 %.

Z grafu na Obr. 60 je patrné, že maximální kontaktní tlak je výrazně nižší než u předchozí varianty. Dosahuje hodnoty přibližně 7 kPa. Tlaková špička se opět nachází přibližně 1 mm od okraje lemu. Stejně jako v předchozí variantě je zde pozorována i druhá oblast kontaktu, která je vzdálena 9,4 mm od okraje lemu. Šířka plochy kontaktu zde dosahuje velikosti 2,6 mm. Kontaktní tlak se pohybuje okolo 2 kPa. Deformace v této oblasti je přibližně stejná, cca 1,7 %.

Na rozhraní mezi mikroporézní a homogenní EPDM v místě kontaktu s obkladem dveří dochází k větší deformaci mikroporézní části. Deformace zde dosahuje hodnoty okolo 4,2 %.



Obr. 60: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko



Obr. 61: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm

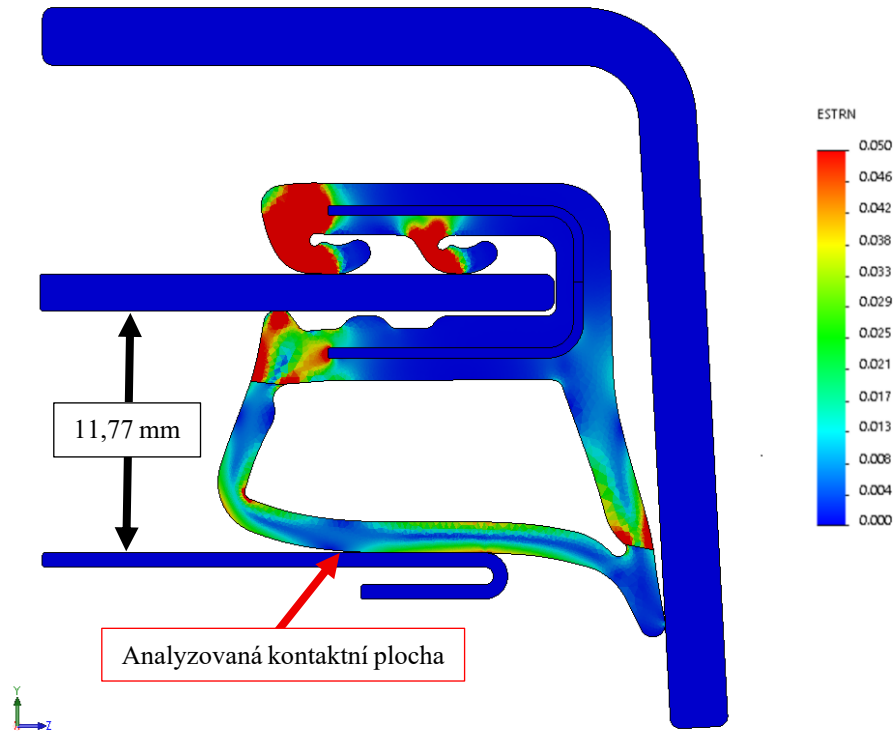
4.2.2 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 11,77 mm

4.2.2.1 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin

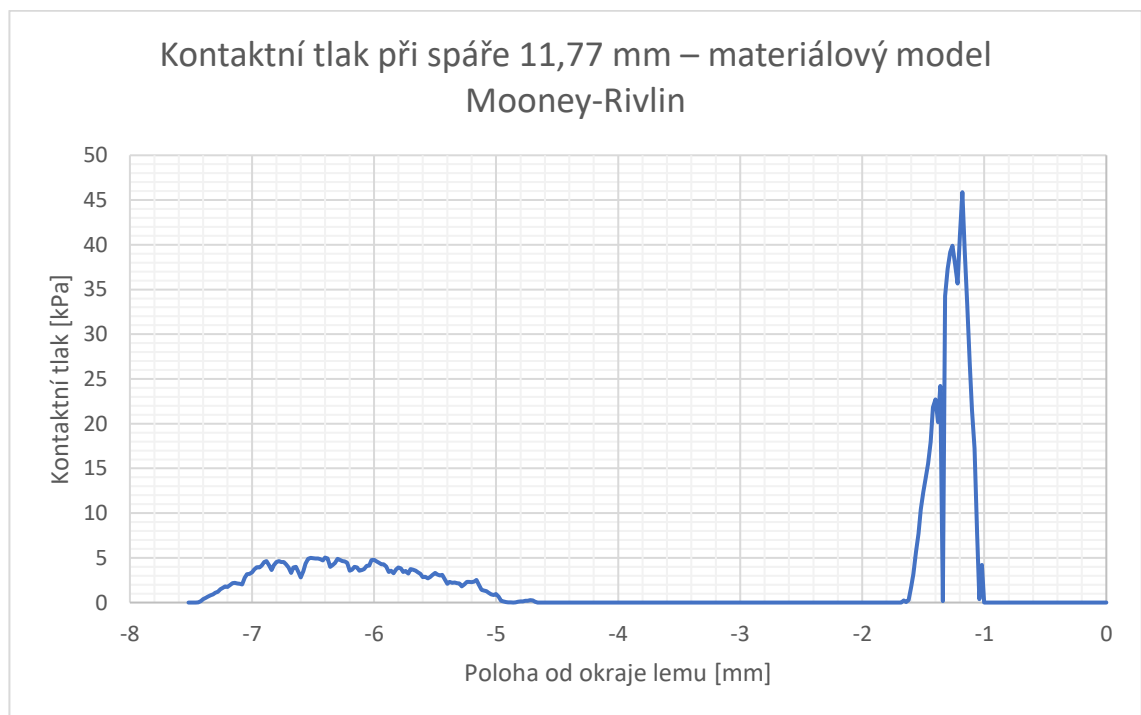
Na Obr. 62 je zachyceno výsledné rozložení poměrné deformace těsnění při zvětšení tloušťky spáry na hodnotu 11,77 mm, kdy byl pro oba pryžové materiály použit dvouparametrový model Mooney-Rivlin. Největší deformace se opět vyskytuje v místě kontaktu bubliny s postranicí, v oblasti okraje lemu postranice, kde činí přibližně 3,8 %. Tato oblast tvoří hlavní kontaktní místo, jehož poloha zůstává nezměněna. Leží přibližně 1 mm od okraje lemu. Kontaktní tlak zde dosahuje hodnoty přibližně 45 kPa a šířka kontaktní plochy činí 0,6 mm.

Druhá oblast kontaktu se oproti předchozímu stavu mírně posunula směrem k okraji lemu, a to na vzdálenost cca 4,6 mm. Šířka kontaktní plochy zůstala prakticky stejná (cca 2,6 mm), avšak tlak zde klesl přibližně na 5 kPa.

V místě přechodu mezi homogenní a mikroporézní EPDM na straně obkladu dveří dochází opět k výraznější deformaci homogenní části, která zde dosahuje hodnoty až 5 %.



Obr. 62: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko



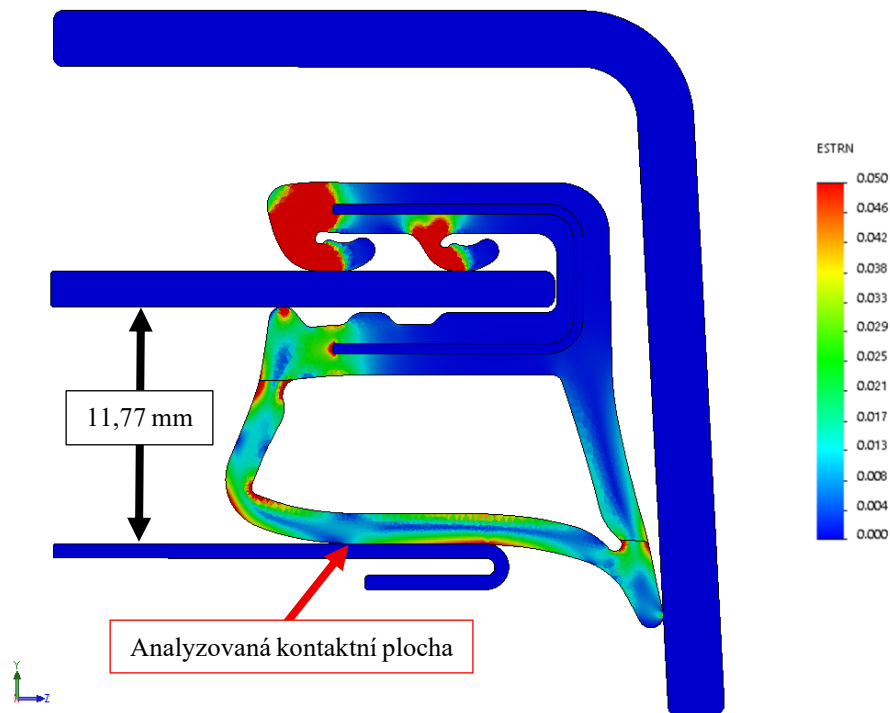
Obr. 63: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm

4.2.2.2 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin a Ogden

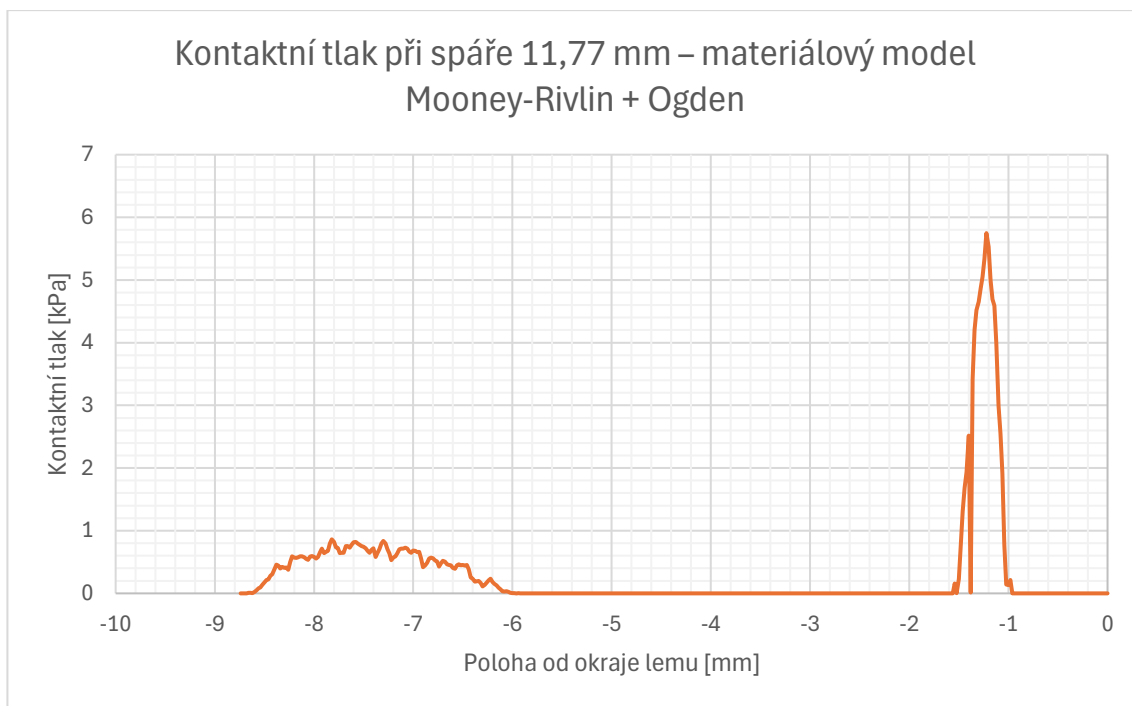
Při použití materiálového modelu Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogdenova modelu pro mikroporézní EPDM dochází oproti předchozí variantě k větší deformaci v oblasti mikroporézní části bubliny, jak je patrné z Obr. 64. Nejvyšší deformace je opět soustředěna do oblasti okraje lemu postranice, kde dosahuje hodnoty přibližně 4,6 %. Tomuto místu odpovídá i maximální kontaktní tlak, který činí přibližně 5,8 kPa. Šířka kontaktní plochy je zhruba 0,6 mm.

Druhá oblast kontaktu se, stejně jako v předchozím případě, nachází blíže k okraji lemu postranice, konkrétně ve vzdálenosti přibližně 6 mm. Šířka kontaktní plochy zde činí přibližně 2,6 mm a kontaktní tlak dosahuje hodnoty okolo 1 kPa.

Na rozhraní mezi mikroporézní a homogenní EPDM v oblasti kontaktu s obkladem dveří dochází k výraznější deformaci mikroporézní části. Deformace zde dosahuje přibližně 2,5 %.



Obr. 64: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko



Obr. 65: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm

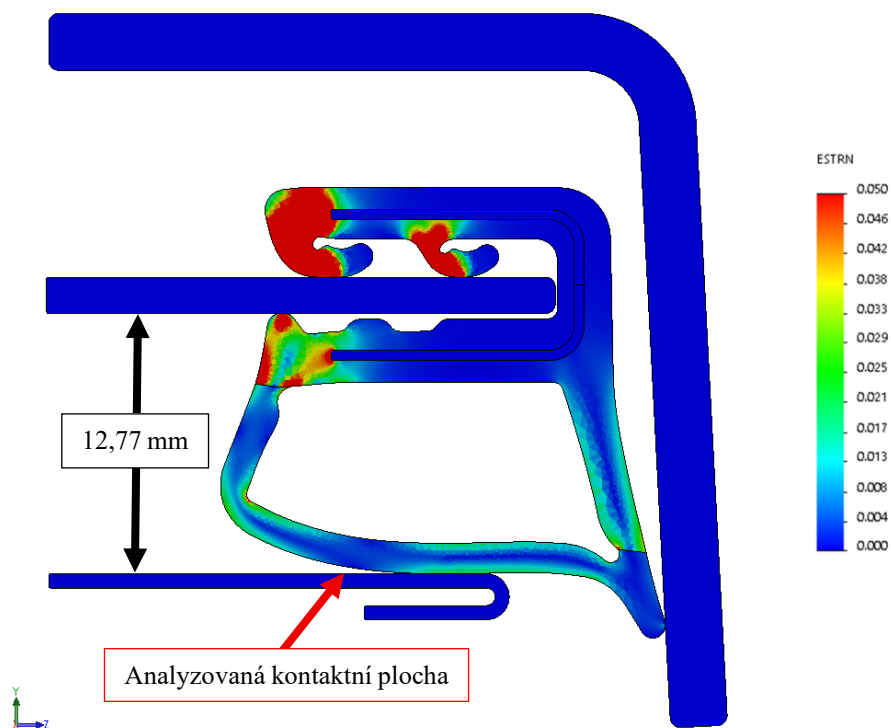
4.2.3 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 12,77 mm

4.2.3.1 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin

Při dalším zvětšení tloušťky spáry na hodnotu 12,77 mm dochází u varianty s materiálovým modelem Mooney-Rivlin pro obě pryže v oblasti styku mikroporézní části s postranicí karoserie ke vzniku pouze jedné kontaktní oblasti. Tento kontakt se nachází ve vzdálenosti přibližně 2,8 mm od okraje lemu postranice. Poměrná deformace mikroporézní části zde dosahuje hodnoty kolem 2,1 %.

Z grafu na Obr. 67 vyplývá, že kontaktní tlak v tomto místě dosahuje hodnoty přibližně 8 kPa, přičemž šířka kontaktní plochy činí cca 1,8 mm.

V místě přechodu mezi homogenní a mikroporézní EPDM na straně kontaktu s obkladem dveří dochází opět k výraznější deformaci homogenní části, která zde dosahuje hodnoty okolo 2,5 %.



Obr. 66: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko



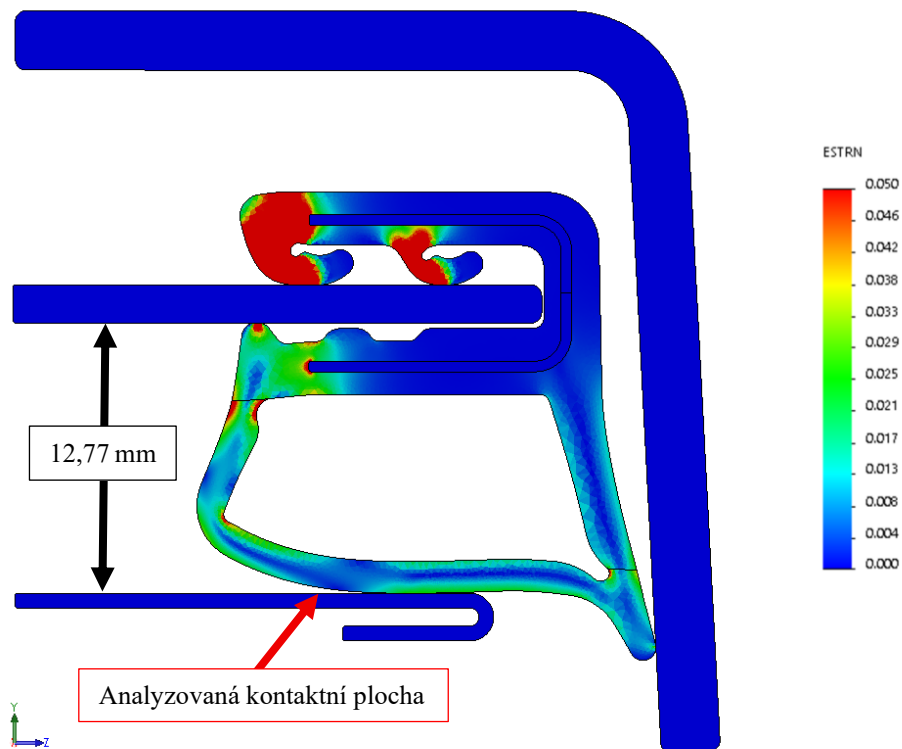
Obr. 67: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm

4.2.3.2 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin a Ogden

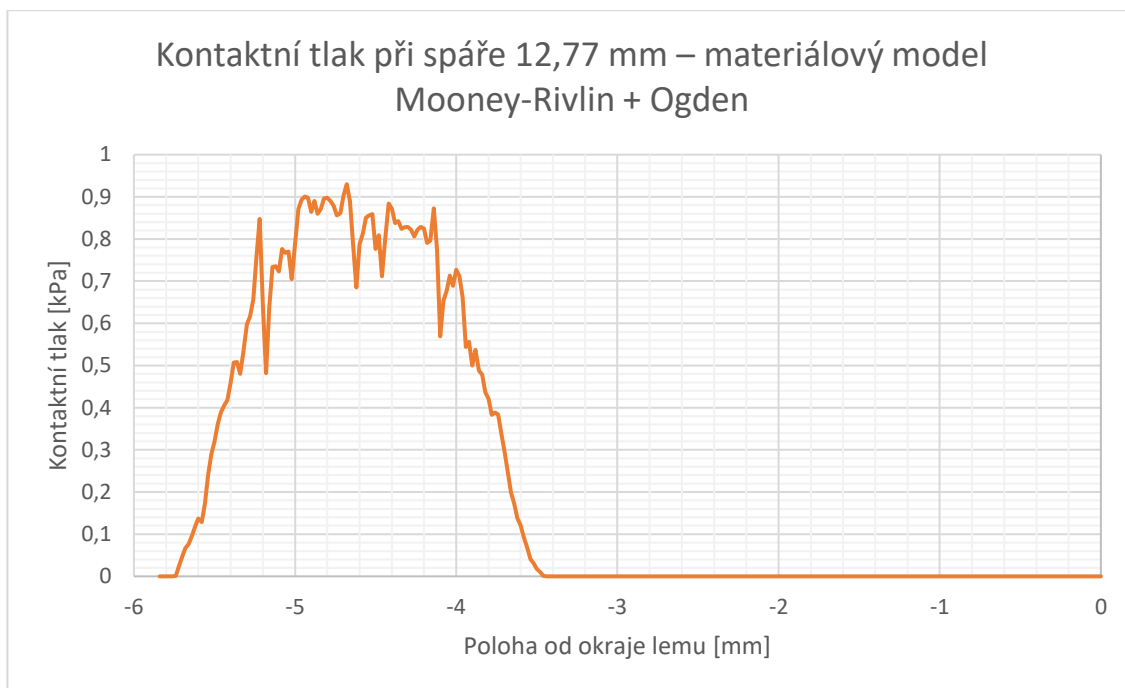
Při použití kombinace materiálových modelů Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM je situace obdobná jako v předchozím případě. V oblasti kontaktu mikroporézní části s postranicí karoserie dosahuje poměrná deformace hodnoty přibližně 2,1 %.

Z grafu na Obr. 69 je patrné, že kontaktní tlak se oproti předchozí variantě vyskytuje ve větší vzdálenosti od okraje lemu, konkrétně cca ve 3,4 mm. Šířka kontaktní plochy činí zhruba 2,2 mm a tlak v této oblasti dosahuje maximální hodnoty okolo 0,9 kPa,

Na rozhraní mezi mikroporézní a homogenní EPDM, v místě kontaktu s obkladem dveří, dochází opět k větší deformaci mikroporézní části. Poměrná deformace zde dosahuje hodnoty přibližně 2,1 %.



Obr. 68: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko



Obr. 69: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm

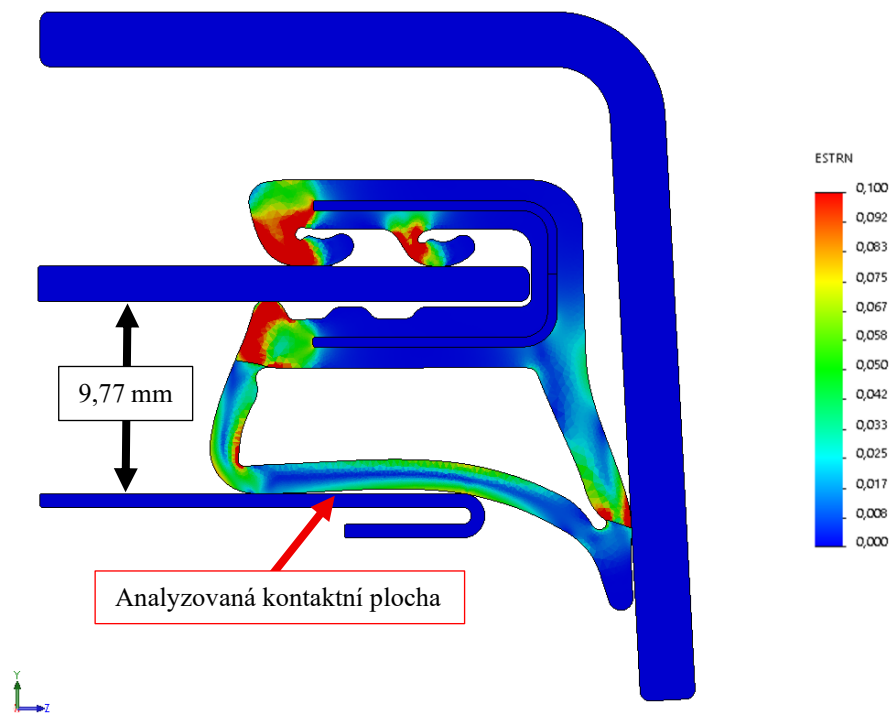
4.2.4 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 9,77 mm

4.2.4.1 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin

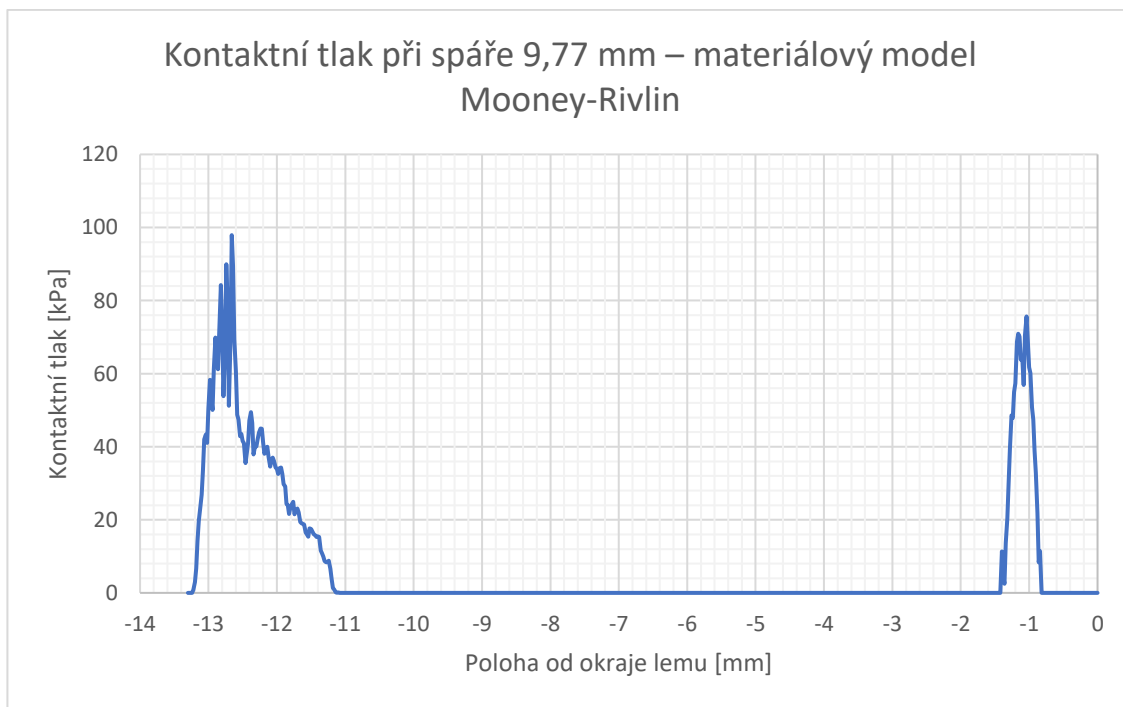
Při zmenšení tloušťky spáry na hodnotu 9,77 mm dochází oproti nominálu u varianty s materiálovým modelem Mooney-Rivlin pro obě pryže k nárůstu deformace těsnění v místě kontaktu s okrajem postranice. Jak je patrné z Obr. 70, poměrná deformace zde dosahuje přibližně 6,7 %. Tato oblast zároveň tvoří první kontaktní místo, které se nachází ve vzdálenosti přibližně 0,8 mm od okraje lemu. Šířka kontaktní plochy činí zhruba 0,6 mm a kontaktní tlak zde oproti nominálu vzrostl na hodnotu přibližně 76 kPa.

Druhá oblast kontaktu se nachází ve větší vzdálenosti než u nominální spáry, konkrétně přibližně 11 mm od okraje. Šířka kontaktní plochy je 2 mm. V této oblasti tlak pozvolna narůstá až na maximální hodnotu přibližně 96 kPa, což je výrazně více než v případě nominálu, kdy byl tlak cca 10 kPa. Následně tlak prudce klesá.

V místě přechodu homogenní a mikroporézní EPDM v místě kontaktu s obkladem dveří dochází opět k výraznější deformaci homogenní části. Poměrná deformace zde dosahuje hodnoty až 10 %.



Obr. 70: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko



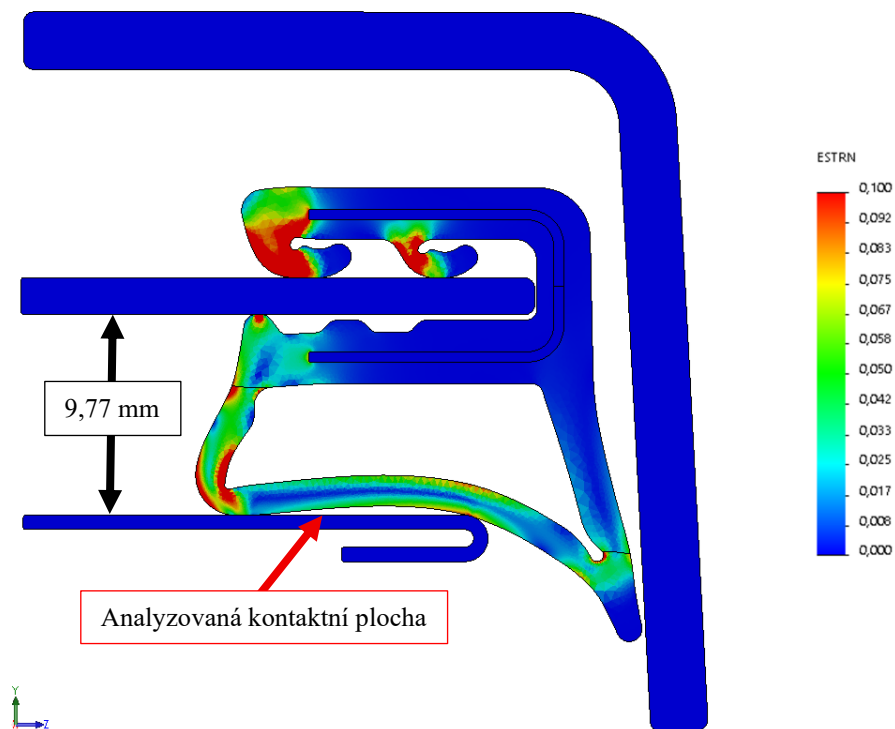
Obr. 71: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm

4.2.4.2 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin a Ogden

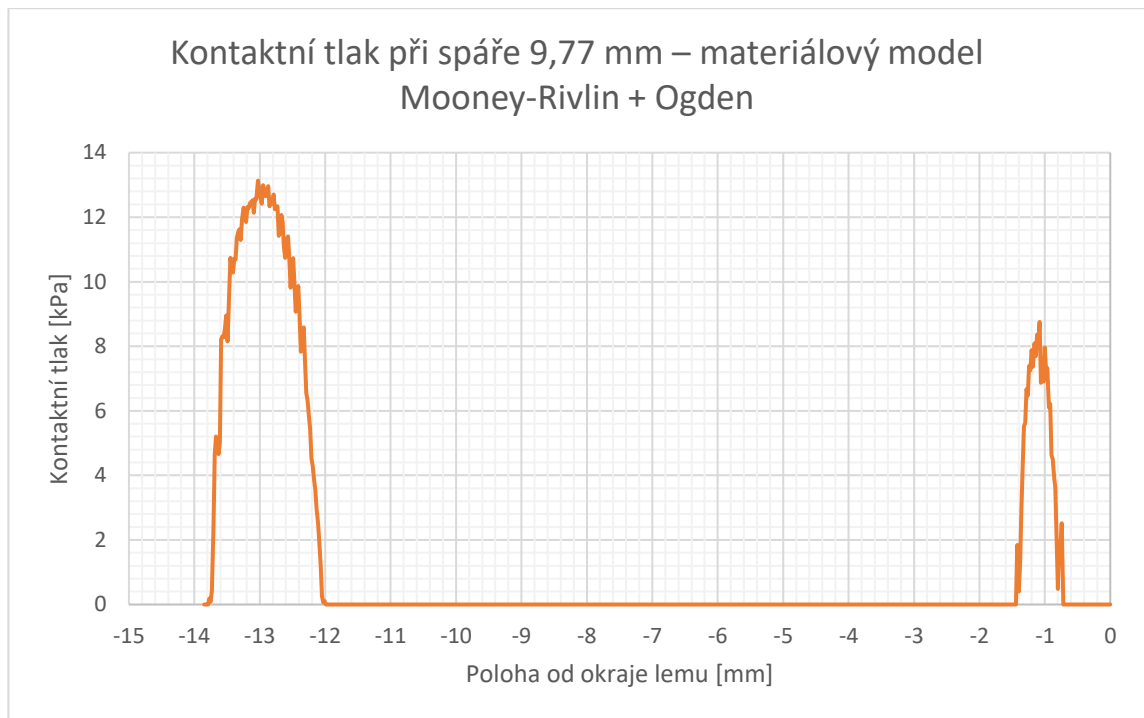
Při použití materiálového modelu Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM dochází k výraznější deformaci bubliny v místě kontaktu s postranicí. Jak ukazuje Obr. 72, poměrná deformace zde dosahuje přibližně 7,5 %, přičemž největší hodnoty jsou v blízkosti okraje lemu postranice.

Z grafu na Obr. 73 je patrné, že rozložení kontaktního tlaku je podobné jako v případě použití modelu Mooney-Rivlin pro oba materiály. První oblast kontaktu se nachází ve vzdálenosti přibližně 0,8 mm od okraje lemu a její šířka činí 0,6 mm. Tlak v tomto místě dosahuje hodnoty zhruba 8,8 kPa. Druhá kontaktní oblast leží přibližně 12 mm od okraje lemu a má šířku 1,8 mm, přičemž tlak zde dosahuje maximální hodnoty kolem 13,2 kPa.

Na rozdíl od předchozího výpočtového modelu zde již nedochází ke kontaktu jazyka těsnění s obkladem dveří. Na rozhraní mezi mikroporézní a homogenní EPDM v této oblasti je pozorována výraznější deformace mikroporézní části, která dosahuje přibližně 4,2 %.



Obr. 72: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko



Obr. 73: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm

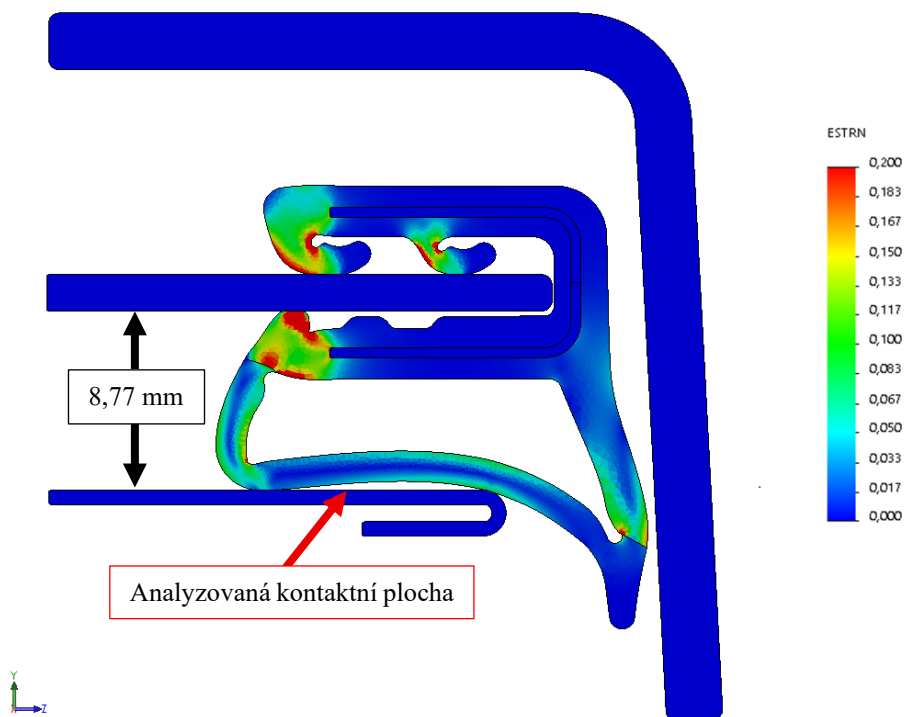
4.2.5 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 8,77 mm

4.2.5.1 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin

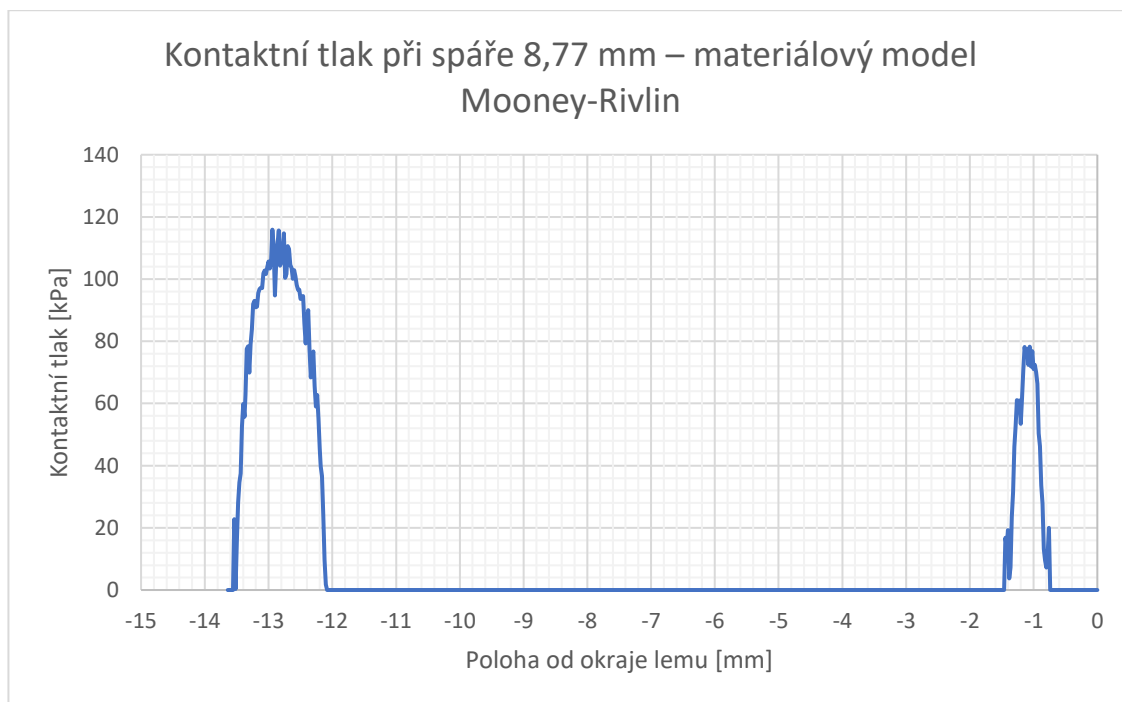
Při dalším zmenšení tloušťky spáry na hodnotu 8,77 mm dochází u varianty s použitím materiálového modelu Mooney-Rivlin pro homogenní i mikroporézní EPDM ke zvýšení deformace těsnění v oblasti kontaktu bubliny s postranicí karoserie. Jak ukazuje Obr. 74, poměrná deformace v místě kontaktu s okrajem lemu dosahuje přibližně 8,3 %. V tomto bodě se nachází první kontaktní oblast, vzdálená přibližně 0,8 mm od okraje lemu. Šířka kontaktní plochy činí cca 0,6 mm a kontaktní tlak zde dosahuje přibližně 80 kPa, tedy hodnoty podobné jako u tloušťky spáry 9,77 mm.

Druhá oblast kontaktu se nachází ve vzdálenosti přibližně 12 mm od okraje lemu postranice. Šířka kontaktní plochy zde činí asi 1,4 mm a kontaktní tlak dosahuje hodnoty kolem 116 kPa, jak je patrné z grafu na Obr. 75.

V důsledku většího stlačení těsnění dochází rovněž k vyšší deformaci v oblasti přechodu mezi homogenním a mikroporézním EPDM na straně kontaktu s obkladem dveří. Výrazněji se zde deformuje homogenní část, přičemž poměrná deformace dosahuje hodnoty okolo 11,7 %. Jazyk těsnění zde opět nepřichází do kontaktu s obkladem dveří a výrazněji se od obkladu dveří oddaluje.



Obr. 74: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko



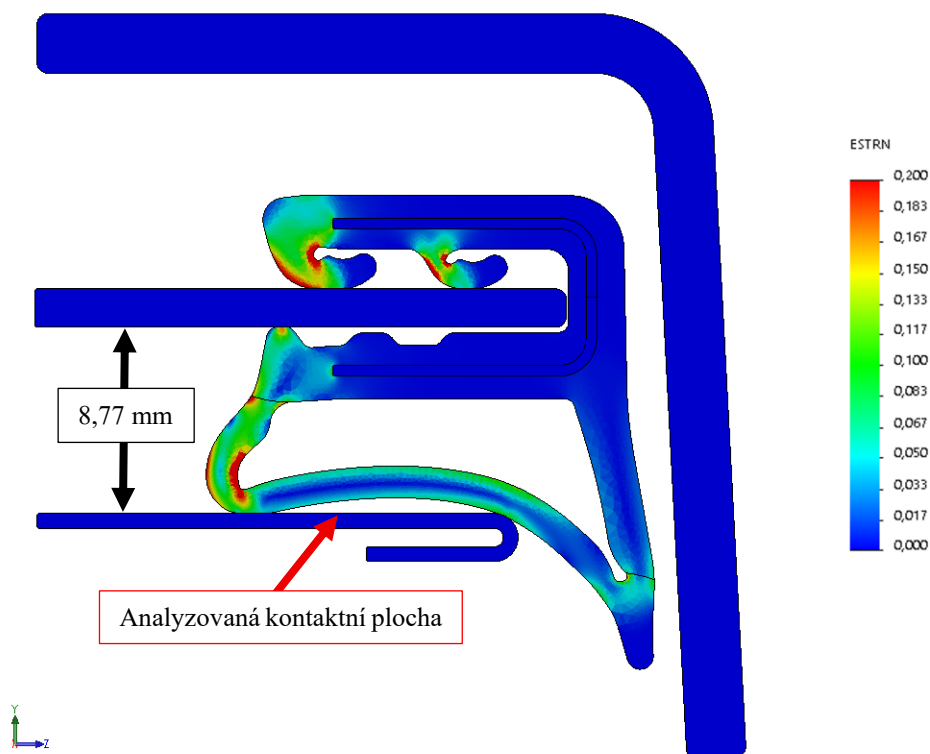
Obr. 75: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm

4.2.5.2 Simulace s materiálovým modelem Mooney-Rivlin a Ogden

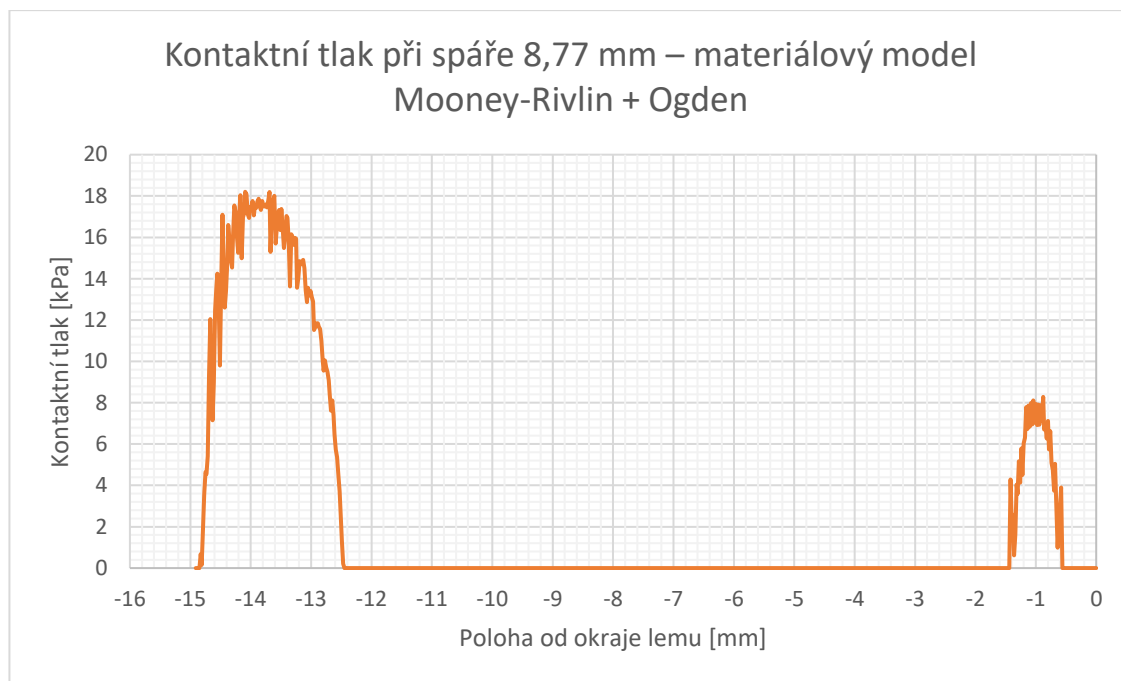
Při použití materiálového modelu Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogdenova modelu pro mikroporézní EPDM dochází k větší deformaci bubliny než v případě, kdy byl pro oba pryžové materiály použit model Mooney-Rivlin. Jak je patrné z Obr. 76, nejvyšší poměrná deformace se opět vyskytuje v oblasti kontaktu s okrajem postranice, kde dosahuje přibližně 11,7 %. Tato oblast představuje první kontaktní místo, které se nachází ve vzdálenosti přibližně 0,6 mm od okraje lemu. Šířka kontaktní plochy zde činí 0,8 mm a kontaktní tlak dosahuje hodnoty přibližně 8 kPa, což je opět podobná hodnota jako u spáry 9,77 mm.

Druhá kontaktní oblast se nachází ve vzdálenosti 12,4 mm od okraje lemu postranice a její šířka je zhruba 2,2 mm. Kontaktní tlak zde dosahuje maximální hodnoty přibližně 18 kPa.

V oblasti rozhraní mezi mikroporézním a homogenním EPDM nedochází ke kontaktu jazyka těsnění s obkladem dveří. Výraznější deformace zde nastává u mikroporézní části, kde poměrná deformace dosahuje hodnoty okolo 6,7 %.



Obr. 76: Výsledná poměrná deformace těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko



Obr. 77: Průběh kontaktního tlaku – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm

4.2.6 Celková síla působící v kontaktech

V Tab. 4 je uvedeno porovnání celkové síly působící v kontaktu mezi těsněním a postranicí karoserie pro jednotlivé tloušťky spáry. Hodnoty byly získány z výpočtových modelů a doplněny o údaje z CLD křivky od dodavatele. Měření CLD křivky vychází z normy VW PV 3364, která předepisuje délku těsnění 200 mm. Z tohoto důvodu jsou výsledky dle normy uváděny v jednotkách N/200 mm. V rámci této práce se však používá jednotka N/100 mm, a proto byly hodnoty z normy přepočteny na tuto jednotku.

Tab. 4: Celková síla působící na postranici – porovnání dat z MKP modelů a CLD křivky od dodavatele

Velikost spáry [mm]	Celková síla [N/100 mm]		
	MKP simulace		Hodnota z CLD křivky od dodavatele [1]
	Mooney-Rivlin	Mooney-Rivlin + Ogden	
12,77	0,5	0,07	0,5
11,77	1,05	0,14	1,16
10,77*	1,88	0,28	2,27
9,77	5,13	1,04	6,34
8,77	7,79	1,93	17

*Pozn.: Nominální hodnota

V Tab. 5 jsou pak uvedeny hodnoty celkové síly působící na obklad dveří. I zde jsou patrné vyšší hodnoty u materiálového modelu Mooney-Rivlin pro obě pryže. U spáry 9,77 mm při použití Ogdenova modelu a u spáry 8,77 mm u obou modelových variant došlo k úplné ztrátě kontaktu mezi jazykem těsnění a obkladem dveří, což se projevuje nulovou hodnotou síly. Tento výsledek odpovídá předchozím pozorováním v rámci simulací, kde bylo zaznamenáno oddálení jazyka od obkladu dveří při vyšším stlačení.

Tab. 5: Celková síla působící na obklad dveří – porovnání materiálových modelů

Velikost spáry [mm]	Síla působící na obklad dveří [N/100 mm]	
	Mooney-Rivlin	Mooney-Rivlin + Ogden
12,77	0,34	0,09
11,77	0,33	0,09
10,77*	0,35	0,08
9,77	0,3	0
8,77	0	0

**Pozn.: Nominální hodnota*

5 Experiment se zjednodušenými vzorky

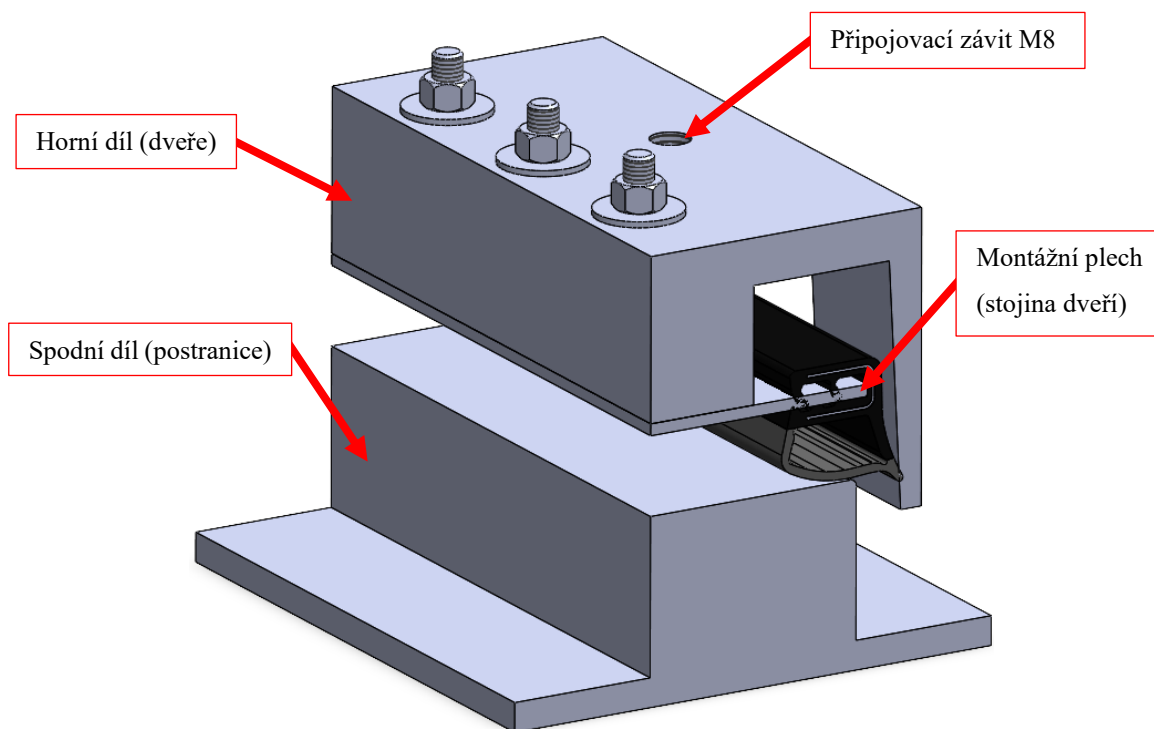
Tato kapitola se věnuje experimentálnímu měření, které bylo provedeno za účelem získání průběhů příčného rozložení kontaktního tlaku a hodnot celkové síly mezi postranicí karoserie a analyzovaným těsněním. Naměřená data následně slouží k verifikaci výsledků z MKP simulací.

Měření bylo realizováno pomocí fóliového tlakového snímače Tekscan 6300/10 a systému I-Scan od téhož výrobce. Před samotným měřením bylo nezbytné provést kalibraci snímače. Zároveň bylo potřeba zajistit možnost přesného nastavení tloušťky spáry, což na vozidle nebylo možné. Z těchto důvodů bylo měření realizováno na speciálně navrženém přípravku za použití zatěžovacího stroje.

5.1 Návrh přípravku

5.1.1 Popis přípravku

Přípravek slouží k simulaci reálného uchycení těsnění na vozidle. Skládá se ze tří hlavních částí, jak je znázorněno na Obr. 78. Spodní díl reprezentuje postranici karoserie. Těsnění je nasazeno na montážní plech, který představuje stojinu dveří. Tento plech je připevněn třemi šrouby M5 s pevnostní třídou 8.8 k hornímu dílu přípravku, jenž je dále spojen šroubem M8 se siloměrem zatěžovacího stroje.



Obr. 78: Model sestavy přípravku včetně analyzovaného těsnění

Přípravek byl vyroben obráběním z hliníkových slitin. V následující tabulce je uveden seznam všech zvolených polotovarů pro jednotlivé díly.

Tab. 6: Přehled zvolených polotovarů pro výrobu přípravku [31]

Součást přípravku	Polotovar	Materiál	Mez kluzu Re [MPa]
Spodní díl	PLO 100 x 32 – 100	EN-AW 6063 T66	200
Montážní plech	P 2 – 100 x 40	EN-AW 6060 T66	160
Horní díl	4HR 50 – 100	EN-AW 6063 T66	200

5.1.2 Tuhostní analýza

Při návrhu přípravku bylo nutné provést jeho tuhostní analýzu, která je v tomto případě reprezentována průhybem narážecího plechu těsnění. Pokud by byl průhyb příliš velký, mohlo by dojít k výraznému ovlivnění výsledků měření. Tuhostní analýza byla provedena pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP) v programu SolidWorks Simulation. Součástí výpočtu bylo také stanovení potřebného utahovacího momentu pro spojovací šrouby M5.

Předmětem tuhostní analýzy byl horní díl a narážecí plech přípravku. Výpočet byl proveden jako nelineární statická analýza, kdy byla uvažována nelinearita pouze v podobě kontaktu mezi oběma díly. Součinitel smykového tření byl pro všechny plochy nastaven na 0,2. Velikost elementu byla po provedené konvergenci sítě zvolena 3 mm. Síť konečných prvků je zobrazena na Obr. 137 v příloze B.

Pro oba díly byly nejprve definovány příslušné materiálové parametry z Tab. 6 a Tab. 7. Model chování materiálu byl uvažován jako lineární elastický a izotropní.

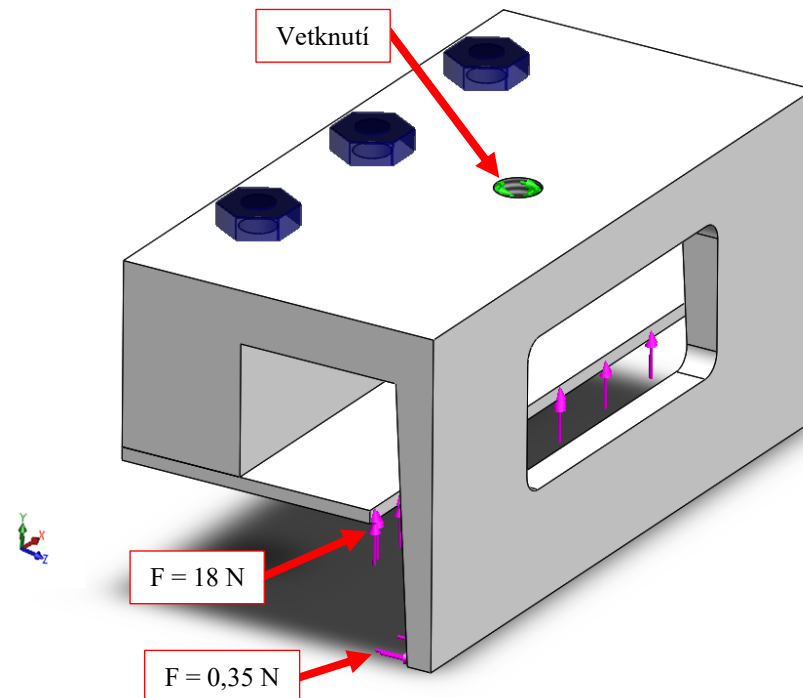
Tab. 7: Mechanické a fyzikální charakteristiky hliníku a jeho slitin [30]

E [MPa]	μ [-]	ρ [kg·m ⁻³]
71 700	0,333	2 712

Dále byly definovány okrajové podmínky. Horní část přípravku byla vetknuta v místě závitu pro připojení k siloměru, jak je znázorněno na Obr. 79.

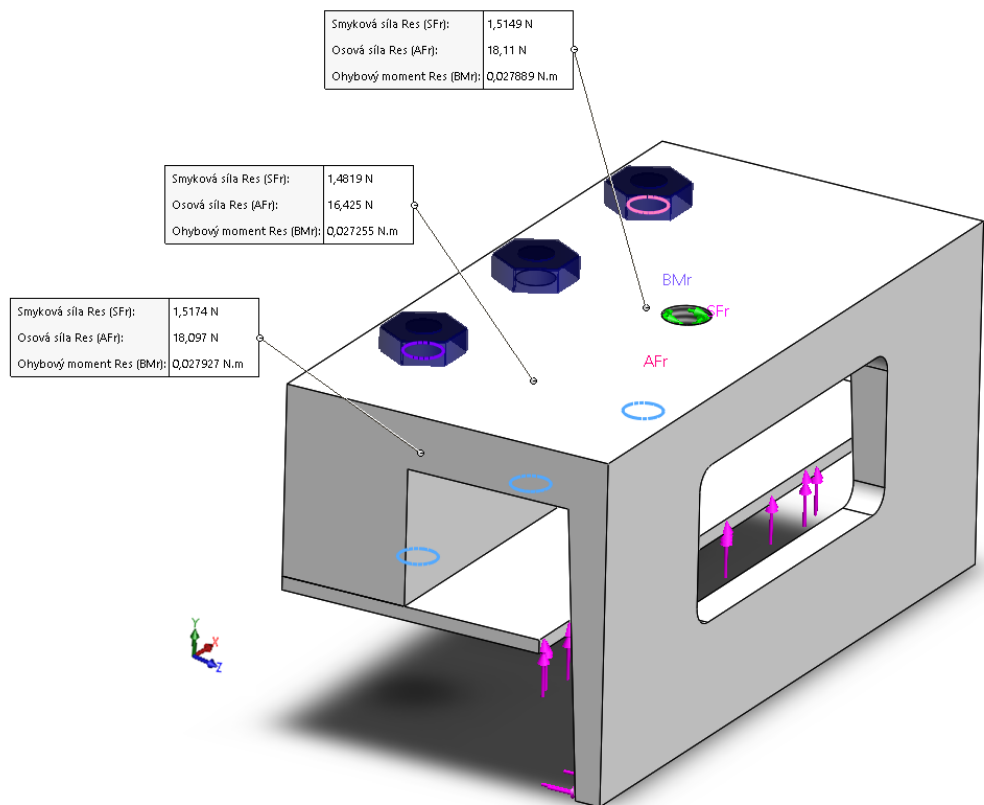
Maximální zatížení přípravku během kalibrace snímače Tekscan bylo uvažováno 18 N. Tato hodnota vychází z nejvyšší celkové síly uvedené v Tab. 4, která odpovídá tloušťce spáry 8,77 mm a činí přibližně 17 N. Z důvodu jisté rezervy při návrhu byla kalibrační síla zaokrouhlena na 18 N. Toto zatížení bylo rozloženo na plochu průřezu narážecího plechu těsnění (viz Obr. 79).

Horní díl přípravku je rovněž vystaven síle v místě kontaktu s jazykem těsnění. Velikost této síly byla uvažována 0,35 N, což odpovídá nejvyšší hodnotě získané z MKP simulací (viz Tab. 5). Toto zatížení bylo rozloženo na plochu průřezu konce horního dílu (viz Obr. 79).



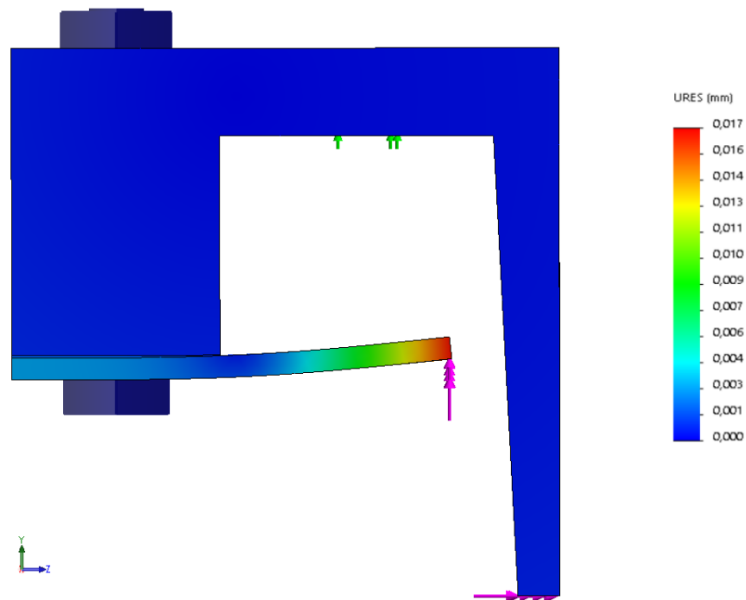
Obr. 79: Okrajové podmínky pro tuhostní analýzu přípravku

V další fázi bylo nutné určit velikost osových sil působících ve šroubech bez předpětí. Pro tento účel byly v prostředí programu SolidWorks využity tzv. „fiktivní šrouby“, což je nástroj umožňující definici parametrů šroubového spoje a následné zobrazení silového zatížení. Jak je patrné z Obr. 80, maximální osová síla ve šroubech bez předpětí dosahuje hodnoty přibližně 18 N. Na Obr. 81 je pak znázorněn deformovaný tvar konstrukce ve stavu bez předpětí.



Obr. 80: Silové působení ve šroubech bez předpětí

Měřítko M 100:1



Obr. 81: Deformovaný model při nulovém předpětí šroubů (měřítko M 100:1)

Následně byla stanovena maximální dovolená osová síla ve šroubech, která je dána vztahem [30]:

$$F_D = \frac{0,9 \cdot A_\xi \cdot R_m}{\mu_m} \cdot \beta \quad (5.1)$$

Kde:

$A_\xi = 14,2 \text{ mm}^2$	výpočtový průřez šroubu
$R_m = 800 \text{ MPa}$	mez pevnosti šroubu
$\mu_m = 1,45$	parciální součinitel spolehlivosti šroubu
$\beta = 1$	šroub vyroben válcováním

$$F_D = \frac{0,9 \cdot 14,2 \cdot 800}{1,45} \cdot 1$$

$$F_D = 7\,051 \text{ N}$$

Dovolená osová síla pro předpětí šroubu zohledňující moment při utahování:

$$F_D^* = 0,7 \cdot F_D \quad (5.2)$$

$$F_D^* = 0,7 \cdot 7\,051$$

$$F_D^* = 4\,935,7 \text{ N}$$

Pro všechny šrouby bylo zvoleno stejné předpětí s ohledem na podmínku, aby osová síla ve šroubech (F_u) byla větší než osová síla ve šroubech bez předpětí (18 N) a zároveň byla menší než dovolená osová síla pro přepětí F_D^* .

Zvolená síla pro předpětí (utahovací síla):

$$F_u = 3000 \text{ N}$$

Pro zvolenou utahovací sílu byl poté vypočten utahovací moment [30]:

Úhel stoupání závitu:

$$\varphi = \tan^{-1}(f) \quad (5.3)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(0,2)$$

$$\varphi = 0,1974 \text{ rad}$$

Třecí úhel závitu:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{P}{\pi \cdot d_{stř}} \right) \quad (5.4)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{0,8}{\pi \cdot 4,48} \right)$$

$$\psi = 0,057 \text{ rad}$$

Kde:

$P = 0,8 \text{ mm}$ rozteč (stoupání) závitu

$d_{stř} = 4,48 \text{ mm}$ střední průměr závitu

Střední třecí průměr dosedací plochy podložky:

$$d_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (5.5)$$

Kde:

$D_1 = 5,3 \text{ mm}$ vnitřní průměr dosedací plochy podložky

$D_2 = 15 \text{ mm}$ vnější průměr dosedací plochy podložky

$$d_0 = \frac{5,3 + 15}{2}$$

$$d_0 = 10,15 \text{ mm}$$

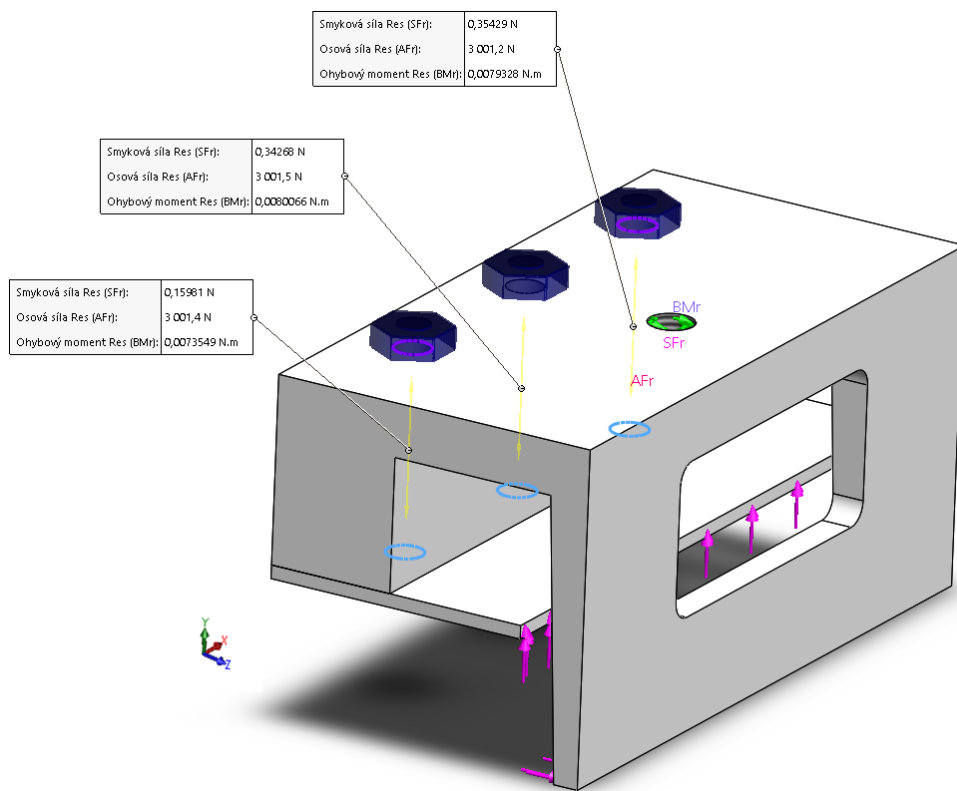
Utahovací moment:

$$M_u = \frac{d_{stř}}{2} \cdot F_u \cdot \tan(\varphi + \psi) + \frac{F_u \cdot f \cdot d_0}{2} \quad (5.6)$$

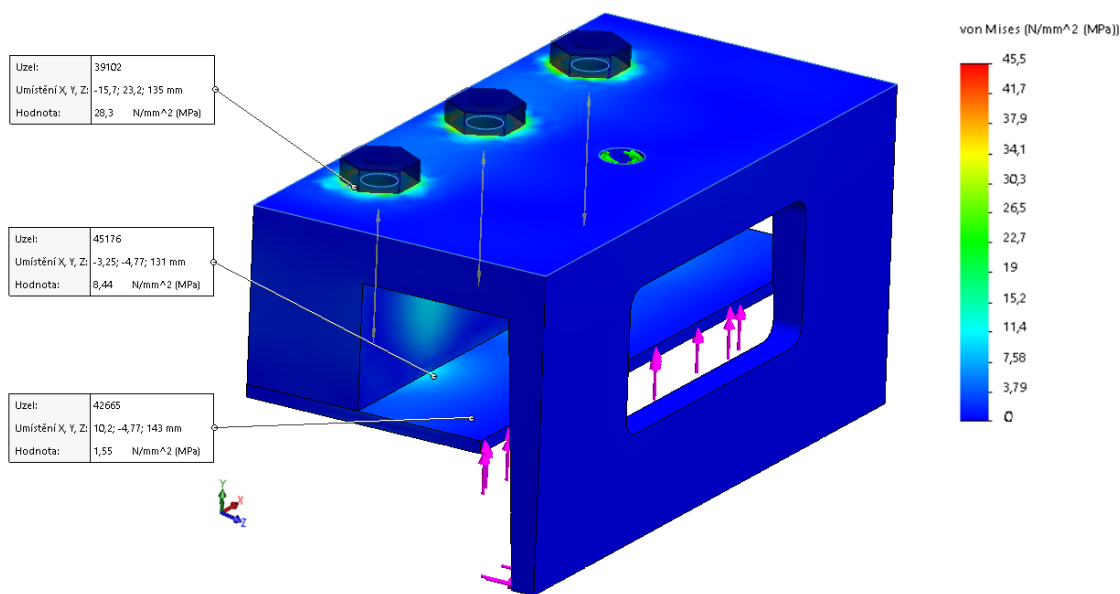
$$M_u = \frac{4,48 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 3000 \cdot \tan(0,1974 + 0,057) + \frac{3000 \cdot 0,2 \cdot 10,15 \cdot 10^{-3}}{2}$$

$$\mathbf{M_u = 4,8 Nm}$$

Na Obr. 82 je znázorněno silové působení ve šroubech při nastaveném předpětí. Následné rozložení redukovaného napětí v konstrukci po utažení šroubů ukazuje Obr. 83. Z výsledků je patrné, že napětí ve všech částech přípravku zůstává výrazně pod mezí kluzu u obou použitých materiálů. Z hlediska pevnosti tedy konstrukce přípravku vyhovuje.

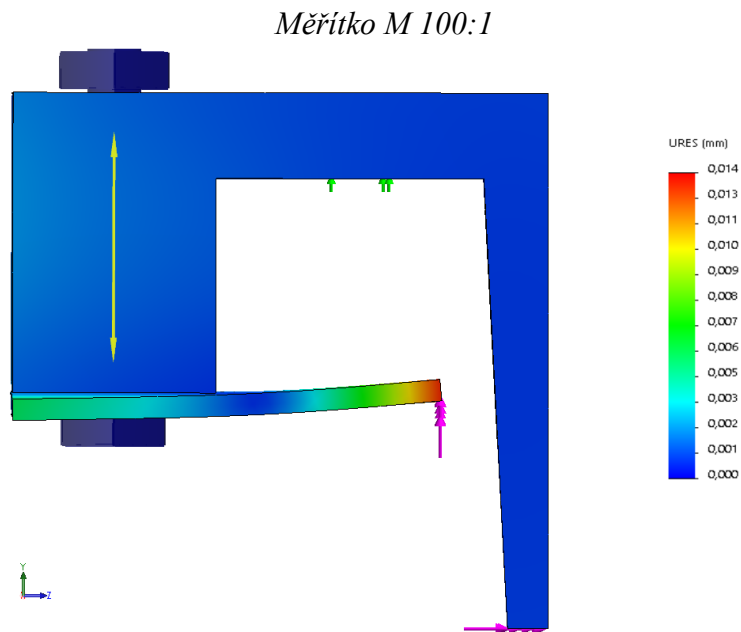


Obr. 82: Silové působení ve šroubech s nastaveným předpětím 3 kN



Obr. 83: Rozložení redukovaného napětí v konstrukci při předpětí 3 kN

Průhyb narážecího plechu po předepnutí šroubů dosahuje hodnoty 0,014 mm (viz Obr. 84). Ačkoliv je tloušťka spáry stanovena v setinách milimetru, lze tento průhyb považovat za přijatelný. Vzhledem k rozlišovací schopnosti snímače Tekscan lze očekávat, že daná odchylka nebude mít na výsledky měření žádný vliv.

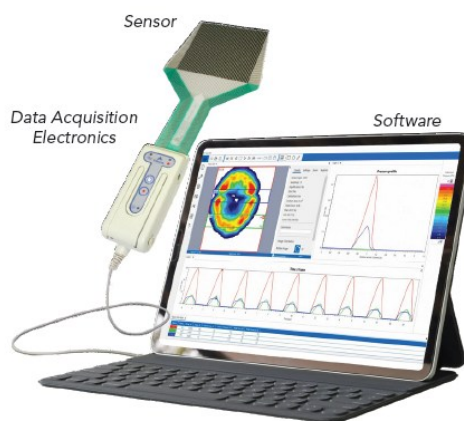


Obr. 84: Deformovaný model při nastaveném předpětí šroubů 3 kN (měřítko M 100:1)

5.2 Měřicí zařízení

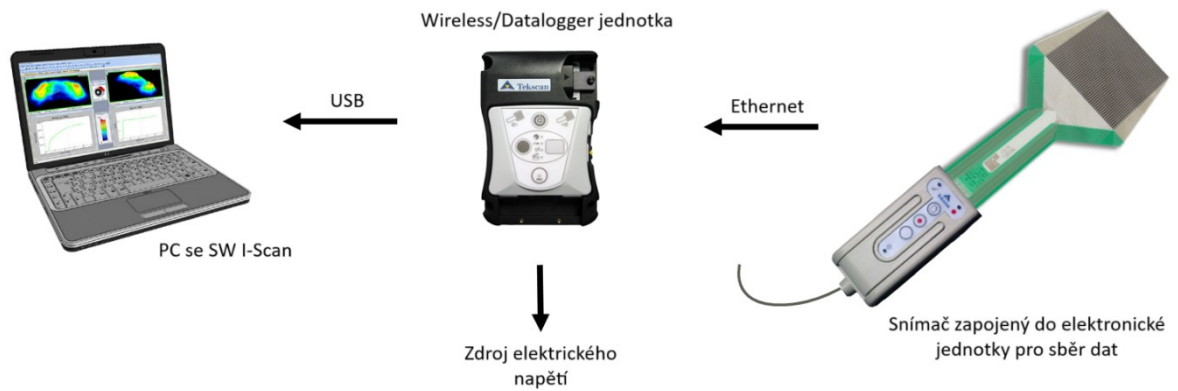
5.2.1 I-Scan systém

Pro experiment byl použit systém I-Scan od společnosti Tekscan, který umožňuje měřit a analyzovat kontaktní tlak mezi dvěma povrchy. Základní konfigurace tohoto systému je tvořena snímačem, elektronickou jednotkou pro sběr dat a SW I-Scan instalovaným na PC. Tato sestava je znázorněna na Obr. 85.



Obr. 85: Základní konfigurace systému I-Scan [33]

Použitá konfigurace byla doplněna o Wireless/Datalogger jednotku, která umožňuje připojení až dvou snímačů současně, bezdrátovou komunikaci s PC přes Wi-Fi a záznam dat na micro SD kartu. Těchto funkcí však během měření nebylo využito. Elektronická jednotka se snímačem byla připojena k dataloggeru přes ethernet, a ten byl propojen s PC pomocí USB (viz Obr. 86).

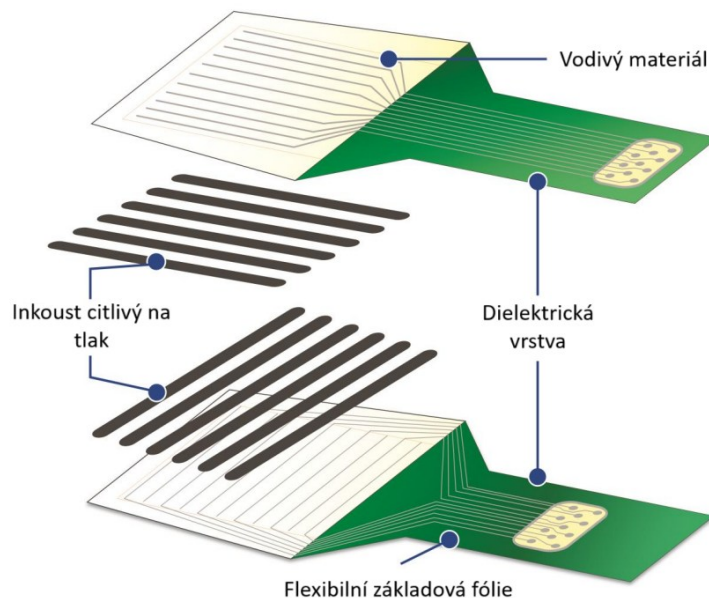


Obr. 86: Konfigurace systému I-Scan použitá při měření. Upraveno [33]

5.2.2 Snímač Tekscan

5.2.2.1 Princip funkce snímače

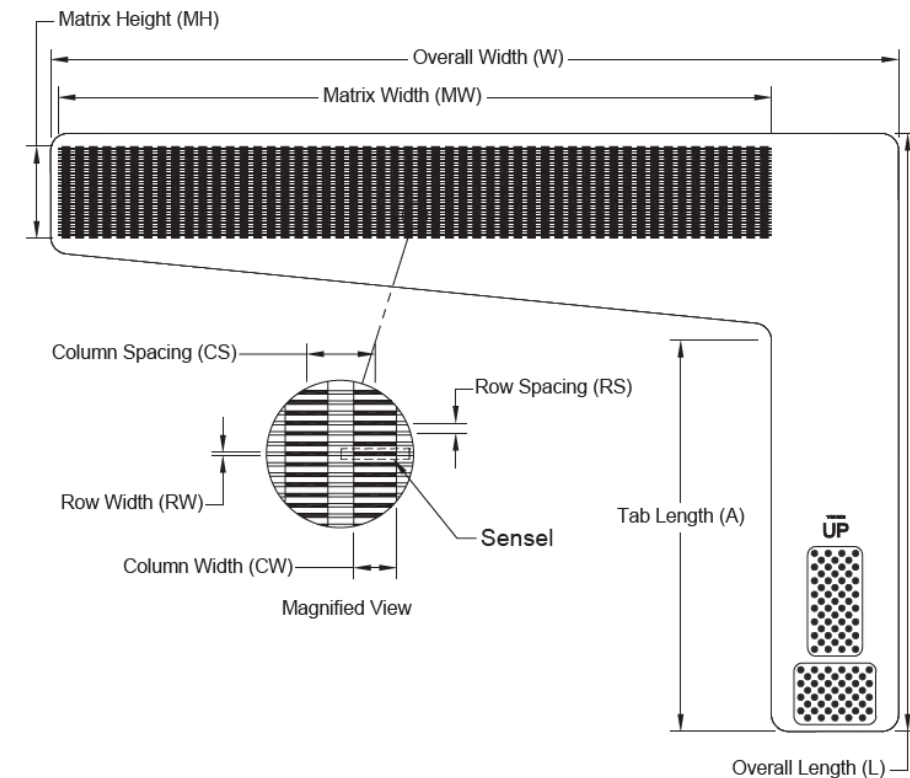
Snímač se skládá ze dvou tenkých, ohebných polyesterových fólií, na které jsou naneseny elektricky vodivé materiály v řadách a sloupcích, jak je znázorněno na Obr. 87. Na vnitřní stranu každé z těchto vrstev je aplikován vodivý inkoust citlivý na tlak. Vzniklá mřížka tvoří snímací body označované jako „sensely“. Při působení tlaku na snímač dochází ke změně elektrického odporu inkoustu. Tato změna odporu je zaznamenána elektronickou jednotkou, která ji převede na digitální signál. Výsledná data jsou následně zpracována v SW na PC, kde se zobrazují jako barevná mapa rozložení tlaku.



Obr. 87: Konstrukce snímače Tekscan. Upraveno [33]

5.2.2.2 Volba snímače

Společnost Tekscan nabízí širokou škálu snímačů lišících se rozměry, tvarem, rozlišením a měřicím rozsahem. Pro potřeby experimentu bylo zapotřebí zvolit snímač s dostatečnou citlivostí pro zaznamenání sil v řádu jednotek newtonů, odpovídajícími rozměry a vysokým rozlišením. Na základě těchto požadavků byl vybrán snímač s označením 6300/10. Poslední číslo udává maximální rozsah tlaku, který byl zvolen 10 psi (69 kPa). Tvar a parametry snímače jsou znázorněny na Obr. 88.



General Dimensions					Sensing Region Dimensions							Summary	
Overall Length L	Overall Width W	Tab Length A	Matrix Width MW	Matrix Height MH	Columns			Rows				Total No. of Sensels	Sensel Spatial Resolution
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	CW	Pitch CS	Qty.	RW	Pitch RS	Qty.			
221.7	314.6	145.0	264.2	33.5	3.2	5.1	52	0.3	0.8	44	2,288	(sensel per sq-cm) 25.8	
8.73	12.39	5.71	10.40	1.32	0.125	0.200	52	0.010	0.030	44	2,288	(sensel per sq-in) 166.7	

Pressure Ranges					
kPa	69	345	690	6,895	68,950
psi	10	50	100	1,000	10,000

Obr. 88: Snímač 6300/10 použitý při měření [34]

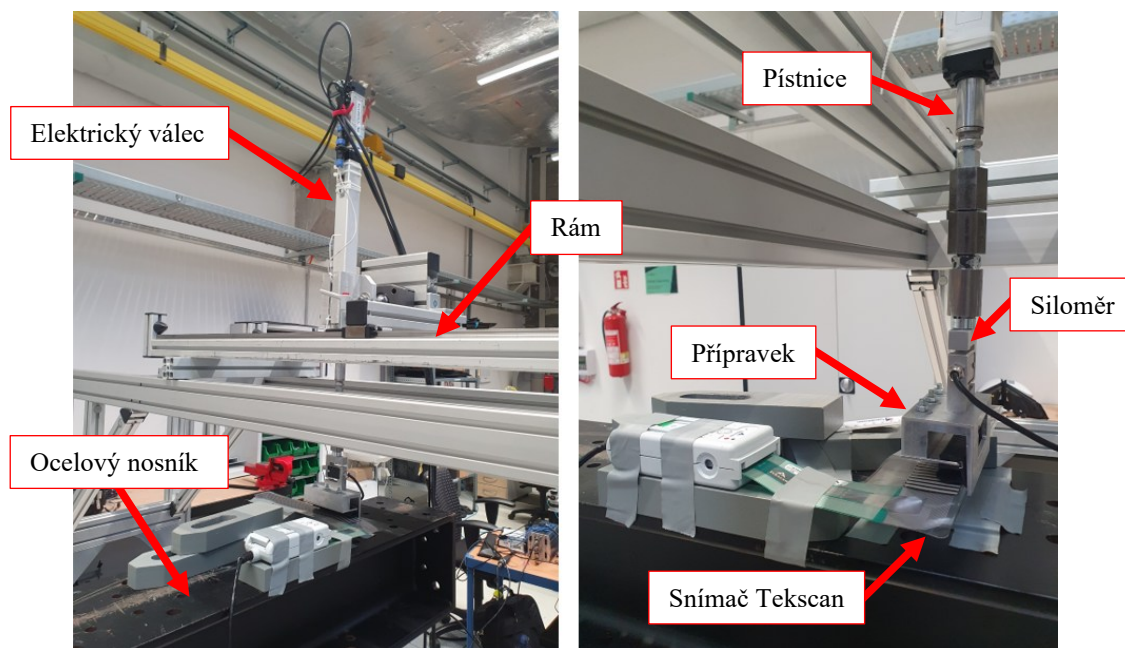
5.3 Příprava měření

Pro experiment byly použity tři vzorky těsnění o délce 100 mm, jak je znázorněno na Obr. 89. Všechny vzorky byly vytvořeny z jednoho extrudovaného dílu. Každý vzorek byl nasazen na montážní plech, který byl následně přišroubován k hornímu dílu přípravku. Šrouby byly utaženy na požadovaný utahovací moment dle kapitoly 5.1.2.



Obr. 89: Vzorky těsnění použité při měření

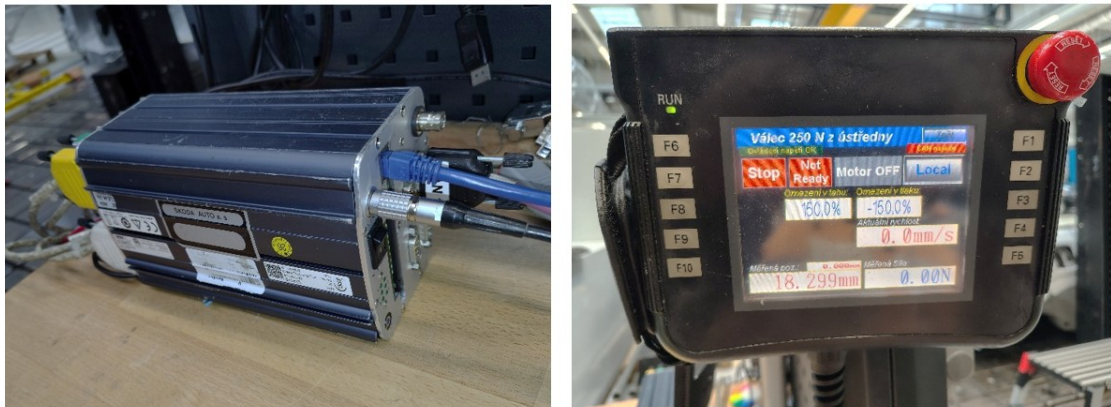
Měření bylo realizováno na zatěžovacím stroji tvořeném sestavou s elektrickým válcem umístěným na rámu. Konec pístnice elektrického válce byl opatřen siloměrem KAP-S/100 N od společnosti AST, ke kterému byl pomocí šroubu M8 připojen horní díl přípravku. Utahovací moment pro tento šroub byl dle [35] stanoven na 15 Nm. Spodní díl přípravku byl umístěn na ocelovém nosníku. Před samotným měřením byl spodní díl přípravku srovnán s horní částí přípravku do jedné roviny a zajištěn lepicí páskou proti případnému pohybu. Celkové uspořádání měřicí sestavy je patrné z následujícího obrázku.



Obr. 90: Sestava s elektrickým válcem (vlevo) a detail přípravku se vzorkem těsnění (vpravo)

Mezi kontaktní plochy profilu těsnění a spodního dílu přípravku byl uložen snímač Tekscan. Vzhledem k tomu, že snímač přesahoval délku spodního dílu, bylo nutné jej vypodložit, aby nedocházelo k jeho deformaci a tím i ke vzniku šumu. K tomu byly použity tzv. upínky. Snímač byl rovněž fixován lepicí páskou, aby nedocházelo k jeho posunu během měření. Poté byl snímač propojen s elektronickou jednotkou a PC se SW I-Scan.

Elektrický válec a siloměr byly propojeny s měřicí ústřednu, která byla dále spojena přes PC se SW IMC Studio. Pomocí tohoto SW bylo možné ovládat posuv pístnice elektrického válce, zobrazovat její aktuální polohu a vyvíjenou sílu. K měřicí ústředně byl rovněž připojen ovládací panel, jenž umožňoval ovládání elektrického válce přímo v jeho blízkosti, bez nutnosti obsluhy přes PC. Panel zároveň poskytoval přehled o aktuální poloze pístnice a velikosti síly. Obě zařízení jsou zachycena na Obr. 91.



Obr. 91: Měřicí ústředna IMC CS7008-1-ET-124910 (vlevo) a ovládací panel elektrického válce (vpravo)

5.4 Kalibrace snímače

Snímač při zatížení zobrazuje rozložení tlaku v surových jednotkách („raw sum“), které samy o sobě nemají přímou fyzikální interpretaci. Aby bylo možné tato data převést na skutečné tlakové hodnoty, bylo nutné snímač nejprve zkalibrovat pomocí známé celkové síly působící na jeho plochu.

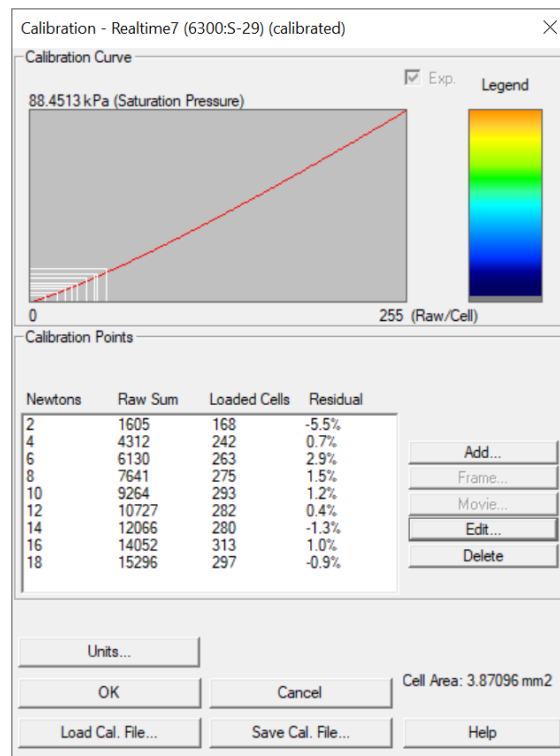
V systému I-Scan byla použita tzv. vícebodová kalibrace. Tato metoda využívá až 10 kalibračních bodů. Algoritmus vícebodové kalibrace se snaží nalézt nejlepší aproximaci kalibračních bodů minimalizací zbytkových hodnot (tzv. reziduí) podle vztahu (4.7). Reziduum představuje rozdíl mezi skutečnou aplikovanou silou a hodnotou vypočtenou snímačem na základě vstupních dat. [32]

$$\min \sum_{i=1}^n \left| Force_i - \sum_{j=1}^m A \cdot Sensel_{i,j}^b \right| \quad (5.7)$$

Kde:

n	[-]	počet kalibračních bodů
i	[-]	index kalibračního bodu
m	[-]	počet aktivních snímacích bodů (senselů)
j	[-]	index snímacího bodu (senselu)
Force	[N]	aplikovaná kalibrační síla
A	[-]	koeficient vyjadřující sklon kalibrační křivky
b	[-]	exponent určující zakřivení kalibrační křivky
Sensel	[-]	surová (nekalibrovaná) hodnota naměřená snímačem

Kalibrace byla provedena v rozsahu od 2 do 18 N s krokem 2 N, což odpovídá celkem 9 kalibračním bodům. Pomocí ovládacího panelu zatěžovacího stroje byla nastavena poloha horní části přípravku těsně před dotyk těsnění se snímačem Tekscan umístěným na spodní částí přípravku. V tomto okamžiku byl vynulován siloměr. Následně byla pomocí zatěžovacího stroje postupně aplikována příslušná síla, která byla vždy zadána do softwaru I-Scan jako odpovídající kalibrační bod. Výsledkem byla kalibrační křivka společná pro všechny tři vzorky těsnění, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



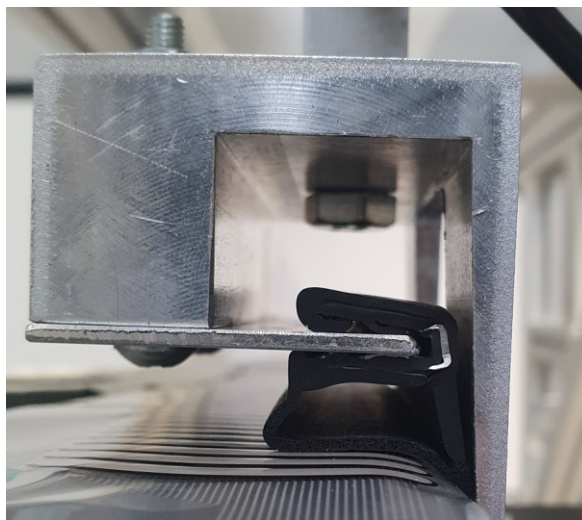
Obr. 92: Kalibrační křivka využitá při měření

5.5 Průběh experimentu a naměřená data

Po provedené kalibraci snímače následovalo samotné měření. Nejprve byla pomocí posuvného měřítka změřena tloušťka spáry mezi horním a spodním dílem přípravku. Této hodnotě odpovídala konkrétní poloha pístnice elektrického válce, která byla následně během měření nastavována pomocí ovládacího panelu zatěžovacího stroje.

Pro každou tloušťku spáry byl zaznamenán průběh příčného rozložení kontaktního tlaku a odpovídající zatížení snímače. Naměřená data jsou uvedena v následujících podkapitolách.

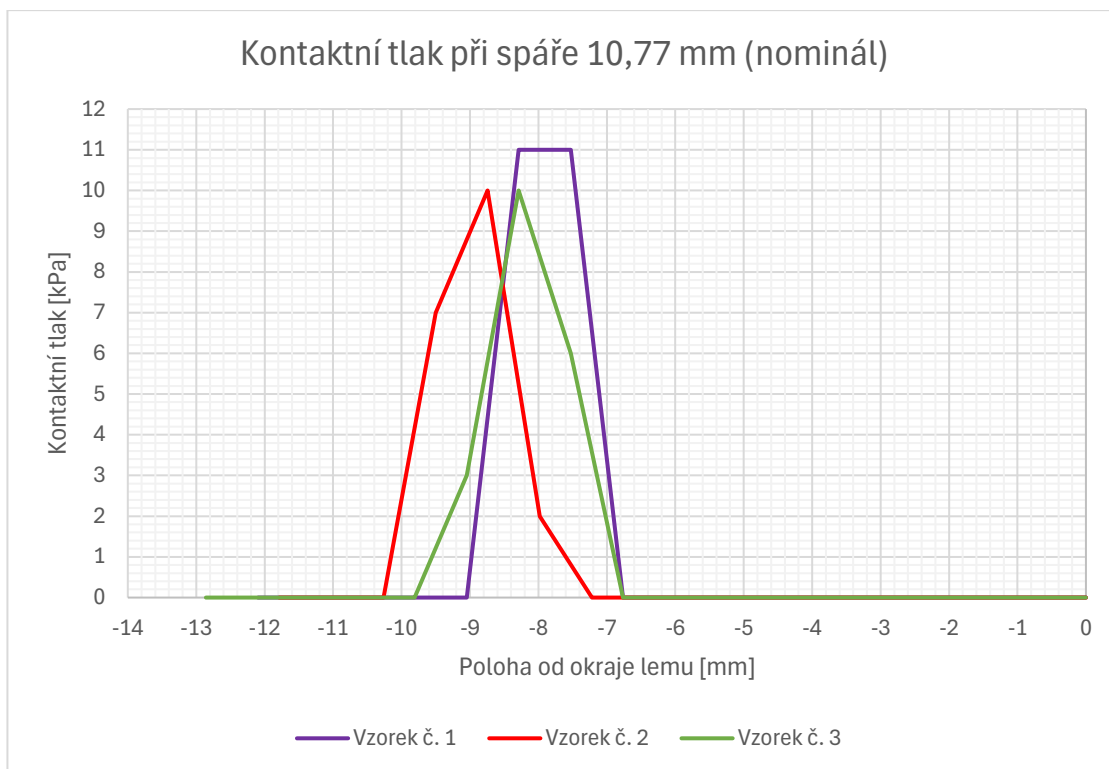
5.5.1 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 10,77 mm (nominál)



Obr. 93: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 10,77 mm)

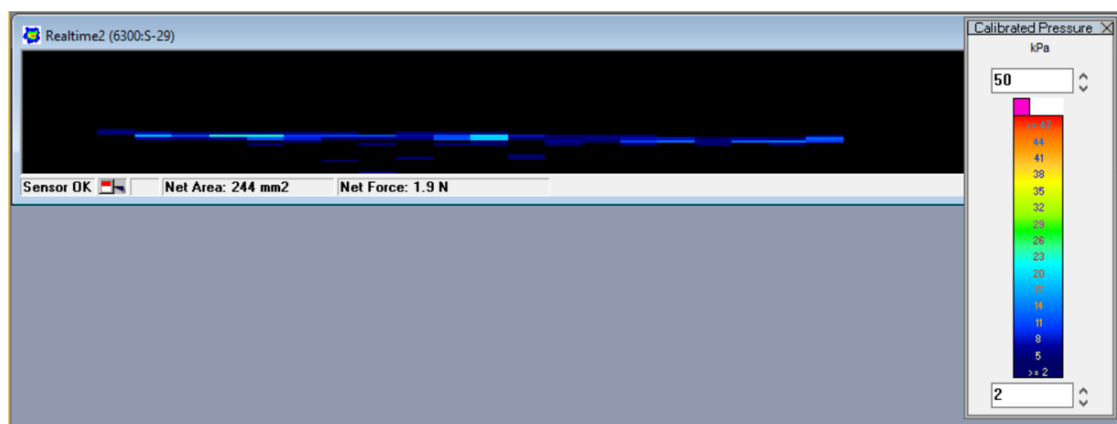
Z grafu kontaktního tlaku na Obr. 94 je patrné, že hlavní kontaktní oblast se nachází přibližně ve vzdálenosti 7 mm od okraje lemu postranice. Vzorek č. 2 má ve srovnání s ostatními vzorky mírně posunutý kontakt dále od okraje, což může souviset s drobnou odchylkou v osazení těsnění na přípravku. Šířka kontaktní plochy je u vzorku č. 1 přibližně 2,2 mm, zatímco u vzorků č. 2 a 3 činí přibližně 3 mm.

Maximální kontaktní tlak dosahuje u vzorku č. 1 hodnoty 11 kPa. U vzorků č. 2 a 3 je tato hodnota o něco nižší, a to 10 kPa.

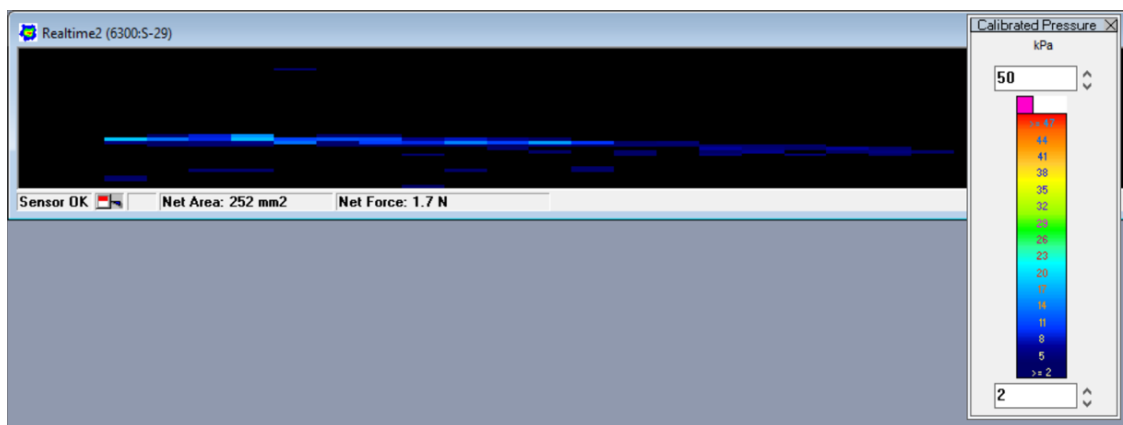


Obr. 94: Naměřený kontaktní tlak při spáře 10,77 mm

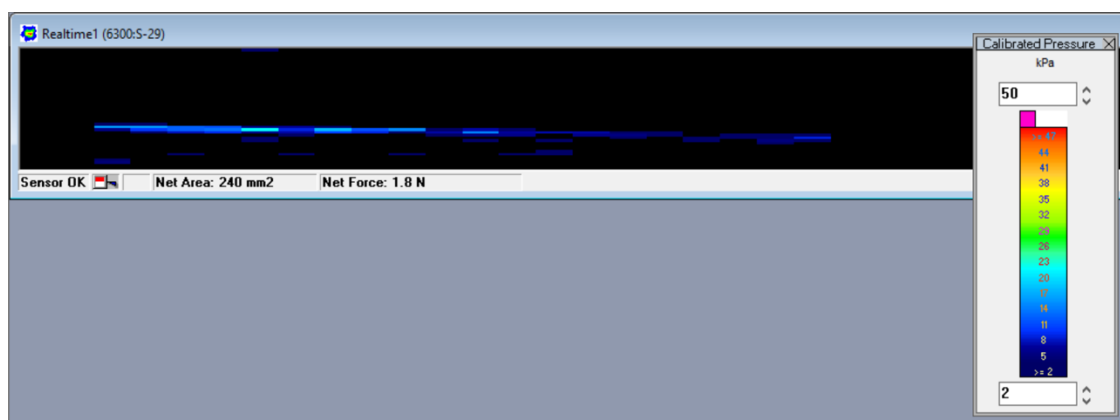
Z map zatížení snímače (viz Obr. 95 až Obr. 97) je zřejmé, že u vzorku č. 1 je zatížení rozloženo rovnoměrně v podélném směru. Naopak u vzorků č. 2 a 3 je patrné vyšší zatížení na levé straně snímače, což může být způsobeno mírnou nerovností povrchu těsnění. Celková síla působící na snímač dosahuje přibližně 2 N.



Obr. 95: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 10,77 mm

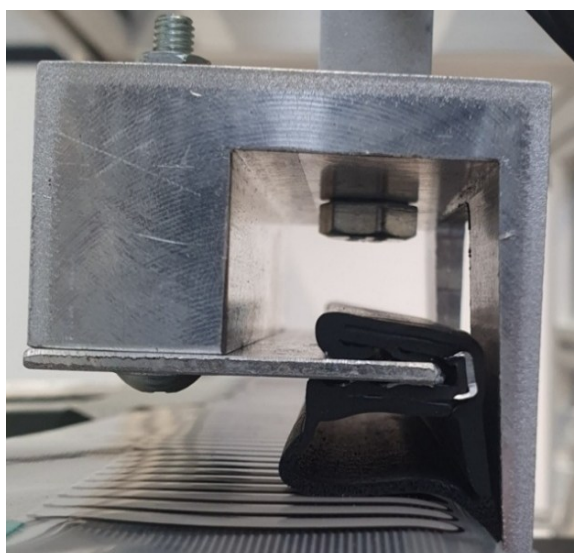


Obr. 96: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 10,77 mm



Obr. 97: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 10,77 mm

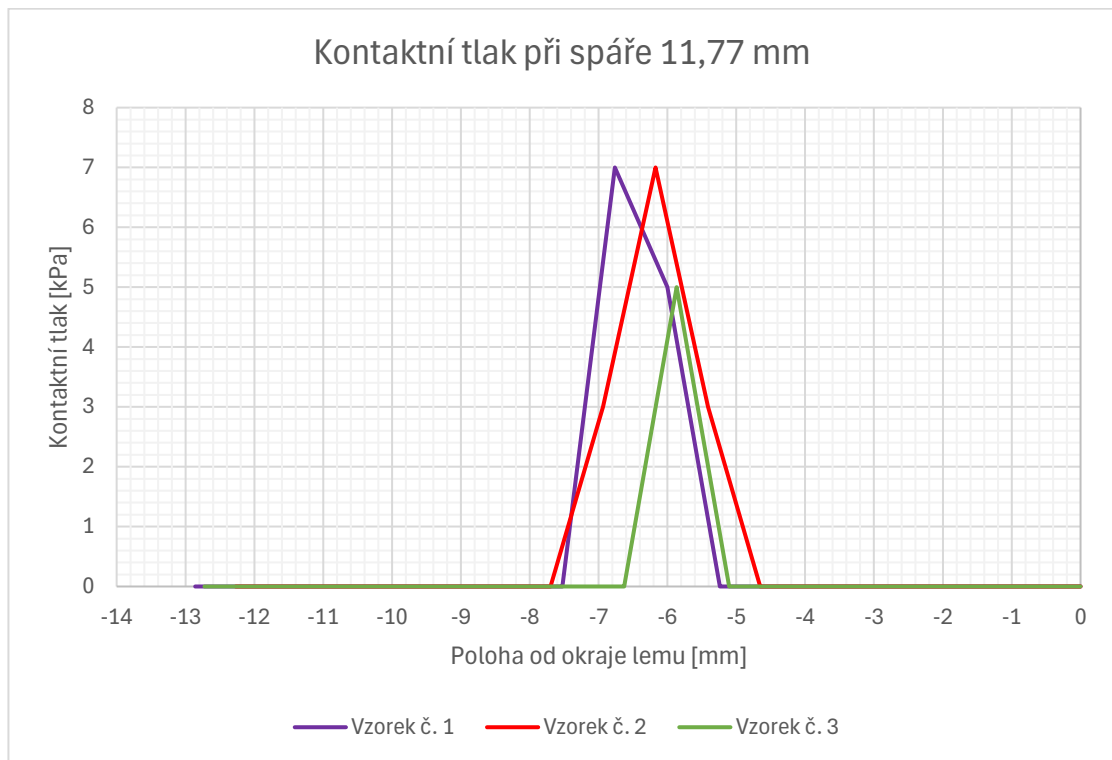
5.5.2 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 11,77 mm



Obr. 98: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 11,77 mm)

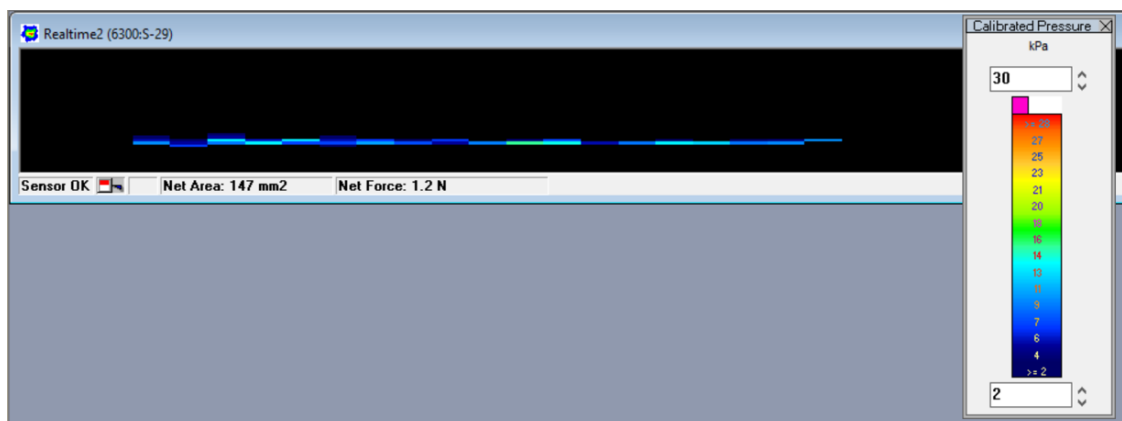
Při zvětšení tloušťky spáry na hodnotu 11,77 mm se hlavní oblast kontaktu posunula blíže k okraji lemu, a to na vzdálenost přibližně 5 mm (viz Obr. 99). Poloha kontaktu je u vzorku č. 2 mírně blíže k okraji lemu, což může být způsobeno vlivem drobné odchylky při montáži vzorku. Šířka kontaktní plochy činí u vzorku č. 1 přibližně 2,4 mm, u vzorku č. 2 cca 3,2 mm a u vzorku č. 3 přibližně 1,4 mm.

Maximální kontaktní tlak dosahuje u vzorků č. 1 a 2 hodnoty 7 kPa. U vzorku č. 3 je tato hodnota nižší, přibližně 5 kPa.

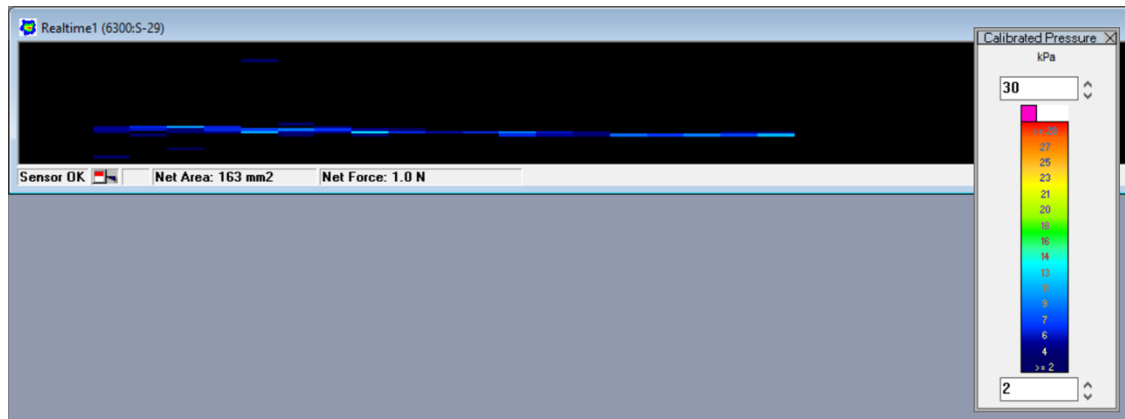


Obr. 99: Naměřený kontaktní tlak při spáře 11,77 mm

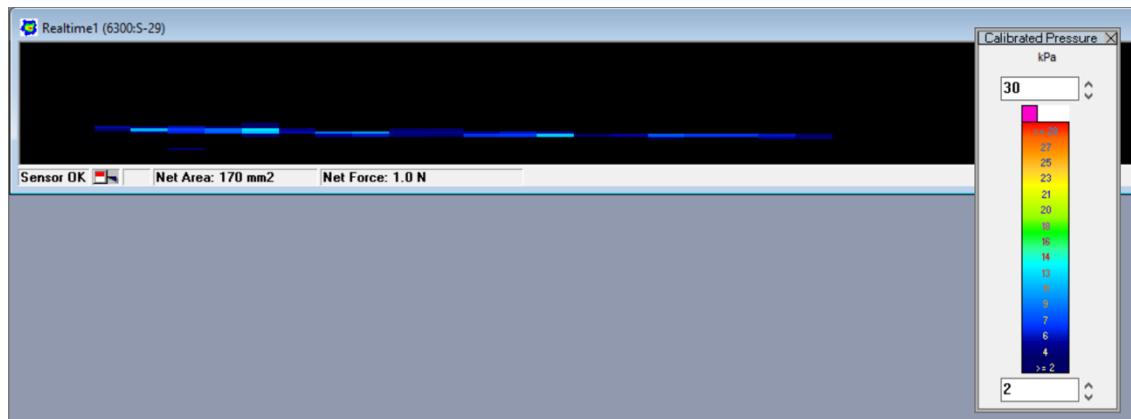
Z map zatížení snímače (viz Obr. 100 až Obr. 102) vyplývá, že u všech vzorků je zatížení v podélném směru rozloženo rovnoměrně. Celková síla působící na snímač se pohybuje kolem 1 N.



Obr. 100: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 11,77 mm

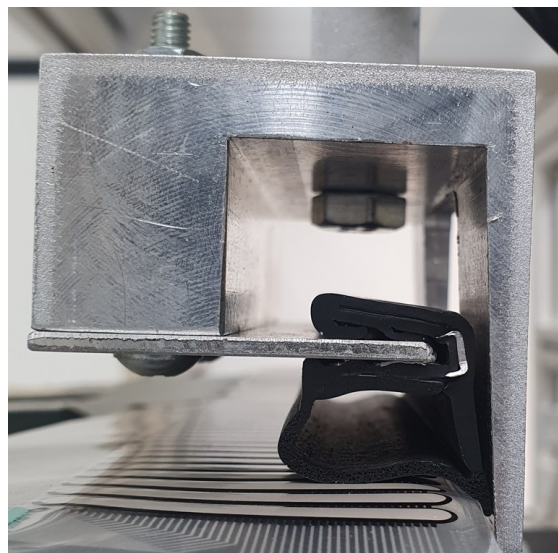


Obr. 101: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 11,77 mm



Obr. 102: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 11,77 mm

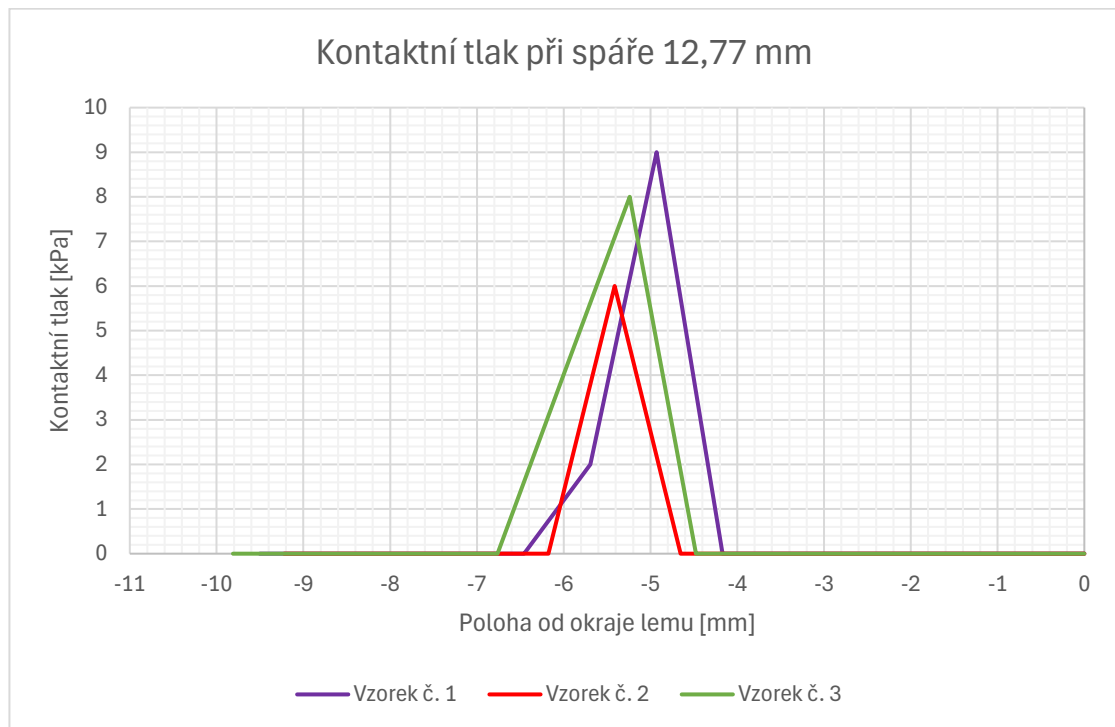
5.5.3 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 12,77 mm



Obr. 103: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 12,77 mm)

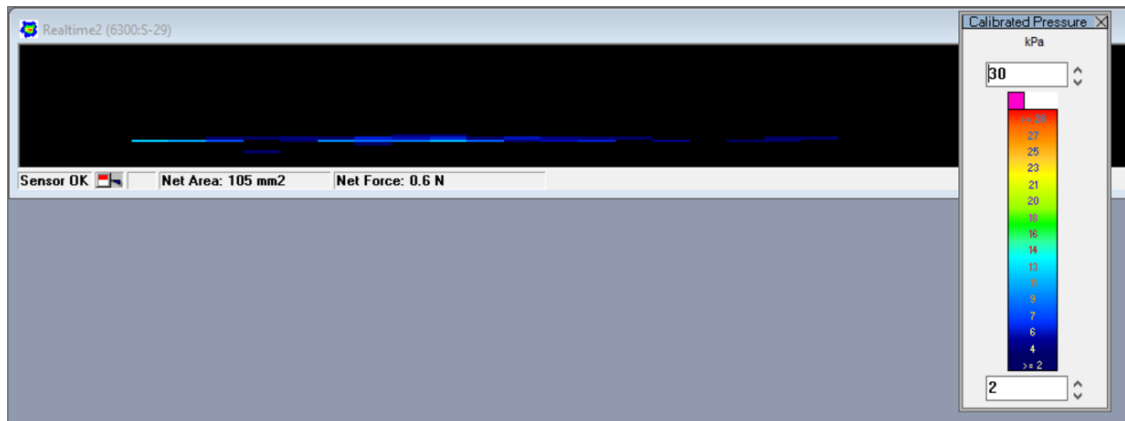
Při dalším zvětšení tloušťky spáry na hodnotu 12,77 mm se hlavní kontaktní oblast ještě mírně posunula k okraji lemu, přibližně na vzdálenost 4,5 mm, jak je patrné z Obr. 104. U vzorku č. 1 se kontakt nachází o něco blíže k okraji než u ostatních vzorků, což může být způsobeno drobnou nepřesností při jeho montáži na stojinu. Kontaktní plocha má u vzorků č. 1 a 3 šířku přibližně 2,3 mm, zatímco u vzorku č. 2 činí pouze 1,6 mm.

Maximální kontaktní tlak dosahuje u vzorků č. 1 a 3 hodnoty 9 kPa a 8 kPa. U vzorku č. 2 je tlak mírně nižší, přibližně 6 kPa.

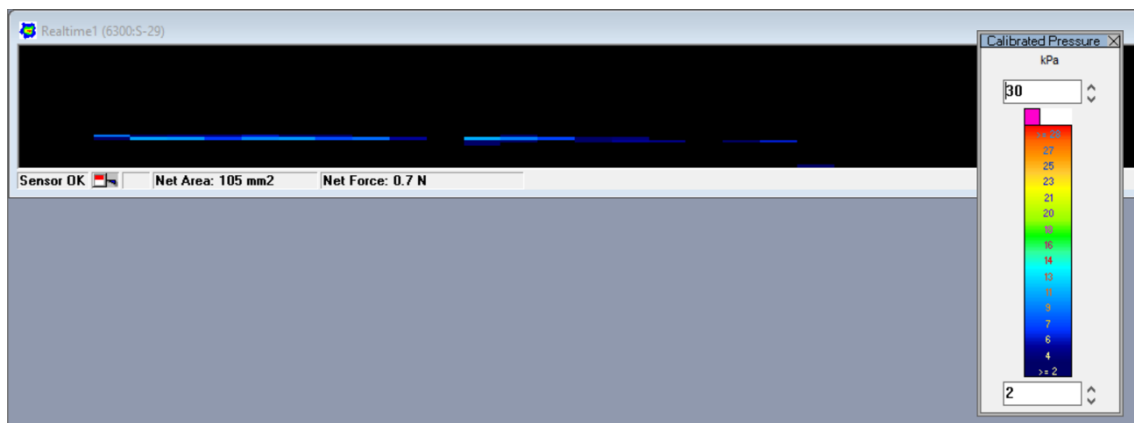


Obr. 104: Naměřený kontaktní tlak při spáře 12,77 mm

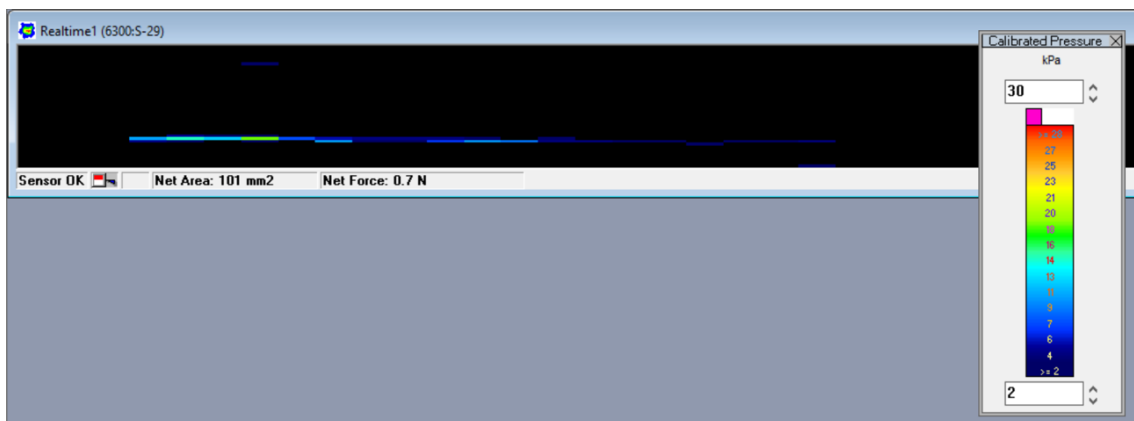
Mapy zatížení snímače u jednotlivých vzorků (viz Obr. 105 až Obr. 107) ukazují, že při této velikosti spáry se celkové zatížení snižuje natolik, že již dochází ke zhoršení detekce kontaktu. U všech vzorků jsou však zatěžované oblasti stále patrné. Celková síla působící na snímač dosahuje hodnoty 0,6 a 0,7 N.



Obr. 105: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 12,77 mm

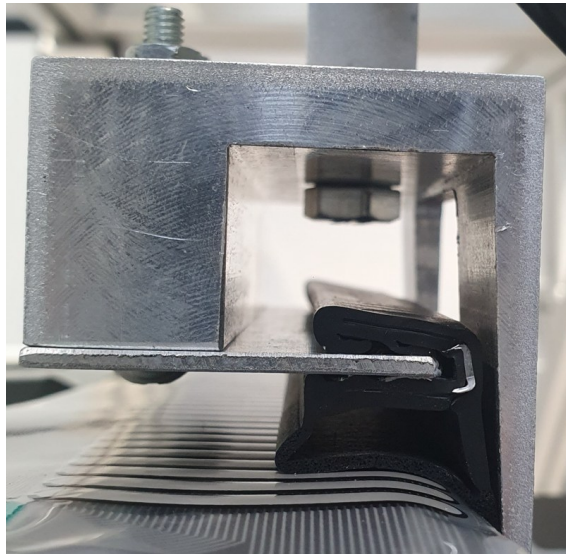


Obr. 106: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 12,77 mm



Obr. 107: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 12,77 mm

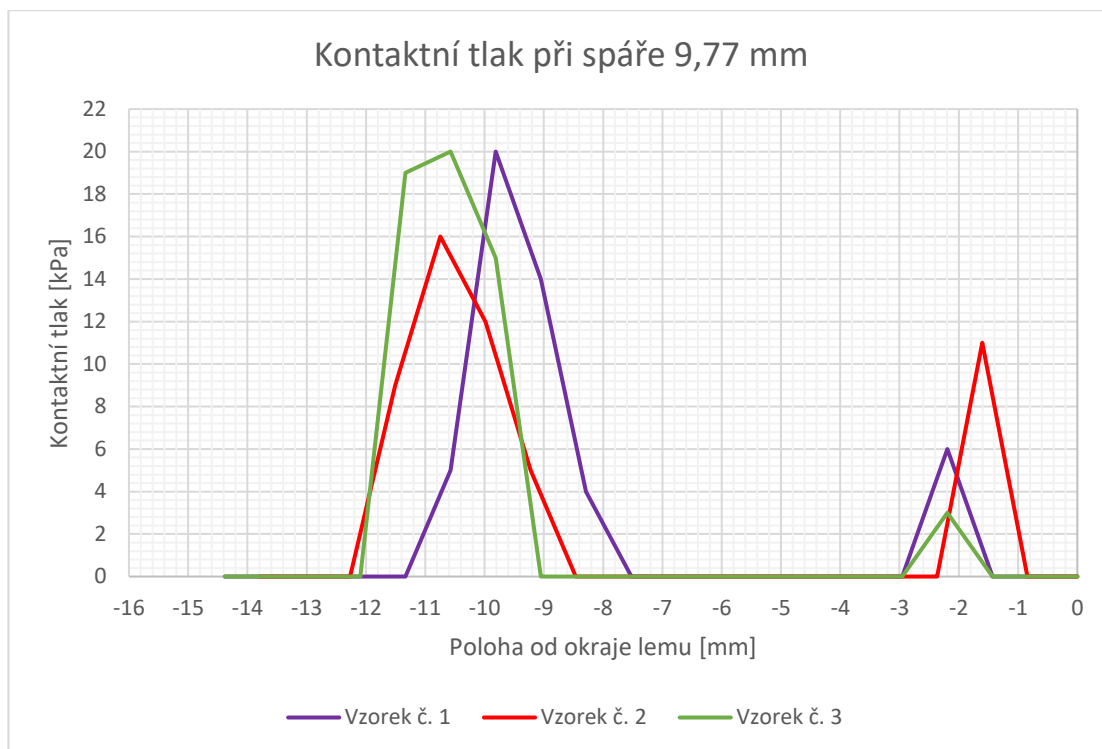
5.5.4 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 9,77 mm



Obr. 108: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 9,77 mm)

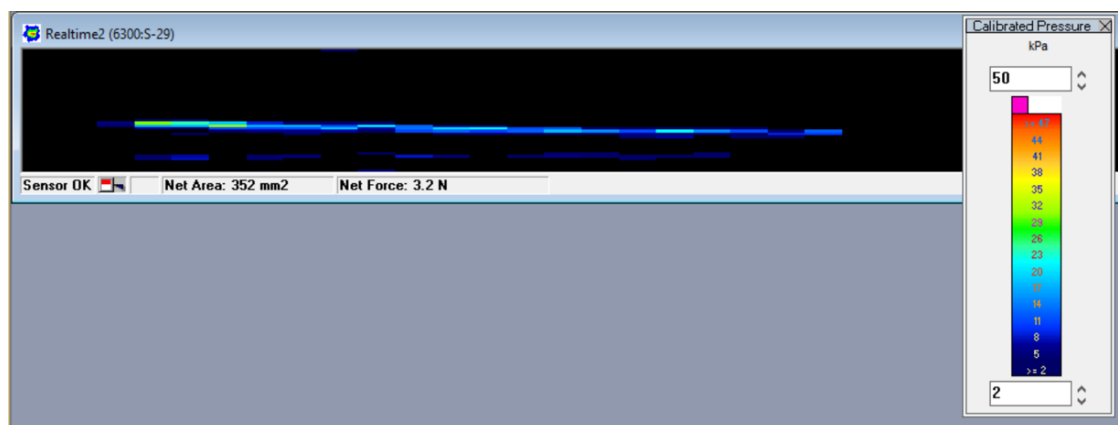
Při zmenšení tloušťky spáry na hodnotu 9,77 mm dochází oproti nominálu ke vzniku dvou kontaktních oblastí (viz Obr. 109). První oblast kontaktu se u vzorků č. 1 a 3 nachází přibližně 1,4 mm od okraje lemu postranice. U vzorku č. 2 je tato vzdálenost menší, kolem 0,8 mm. Kontaktní plocha má ve všech případech přibližně stejnou šířku, a to 1,6 mm. Maximální tlak v tomto místě dosahuje u vzorků č. 1 a 3 hodnoty přibližně 6 kPa a 3 kPa. U vzorku č. 2 je špička tlaku o něco vyšší, cca 11 kPa.

Druhá kontaktní oblast se nachází dále od okraje lemu, přičemž u vzorku č. 3 je její vzdálenost přibližně 9 mm, u vzorku č. 2 asi 8,5 mm a u vzorku č. 1 přibližně 7,5 mm. Šířka kontaktní plochy dosahuje u vzorků č. 1 a 2 hodnoty okolo 3,8 mm, zatímco u vzorku č. 3 činí přibližně 3,1 mm. Kontaktní tlak v této oblasti dosahuje u vzorků č. 1 a 3 hodnoty 20 kPa. U vzorku č. 2 je maximální tlak nižší, přibližně 16 kPa.

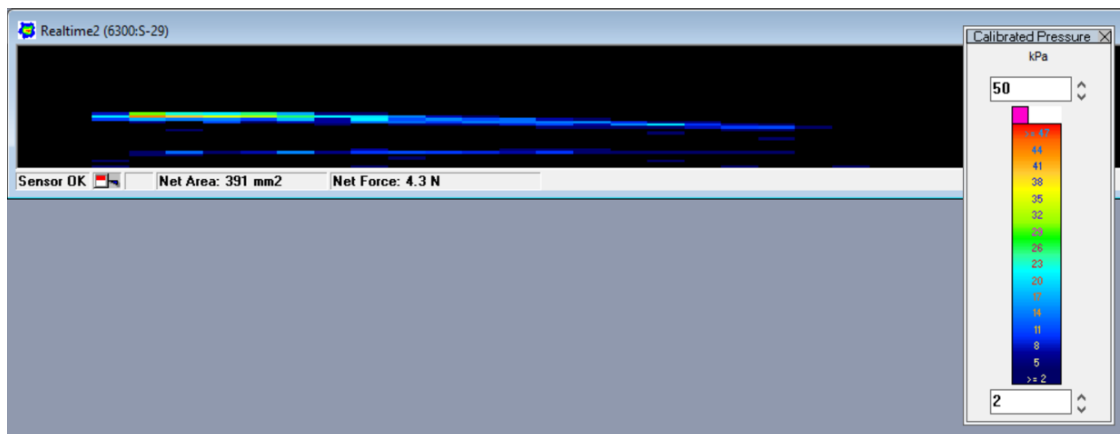


Obr. 109: Naměřený kontaktní tlak při spáře 9,77 mm

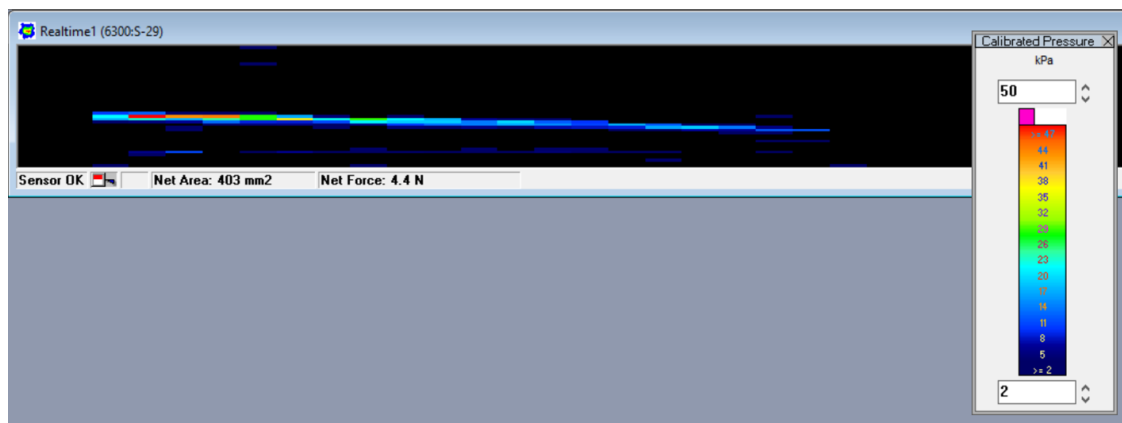
Z map zatížení snímače (viz Obr. 110 až Obr. 112) vyplývá, že u vzorků č. 2 a 3 jsou zatěžované oblasti na pravé straně mírně zešikmené, což může být způsobeno drobnou odchylkou při montáži vzorků na stojinu. U těchto vzorků je navíc patrné mírně vyšší zatížení na levé straně snímače, pravděpodobně vlivem lokálních nerovností povrchu těsnění. Celková síla působící na snímač dosahuje u vzorku č. 1 přibližně 3,2 N, zatímco u vzorků č. 2 a 3 dosahuje hodnoty 4,3 a 4,4 N.



Obr. 110: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 9,77 mm

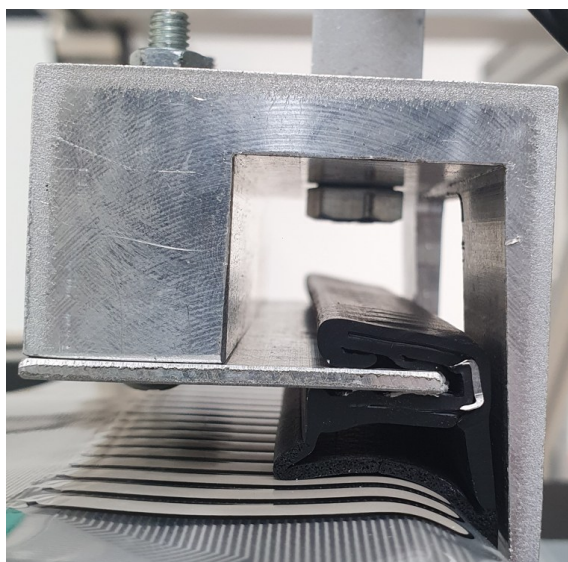


Obr. 111: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 9,77 mm



Obr. 112: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 9,77 mm

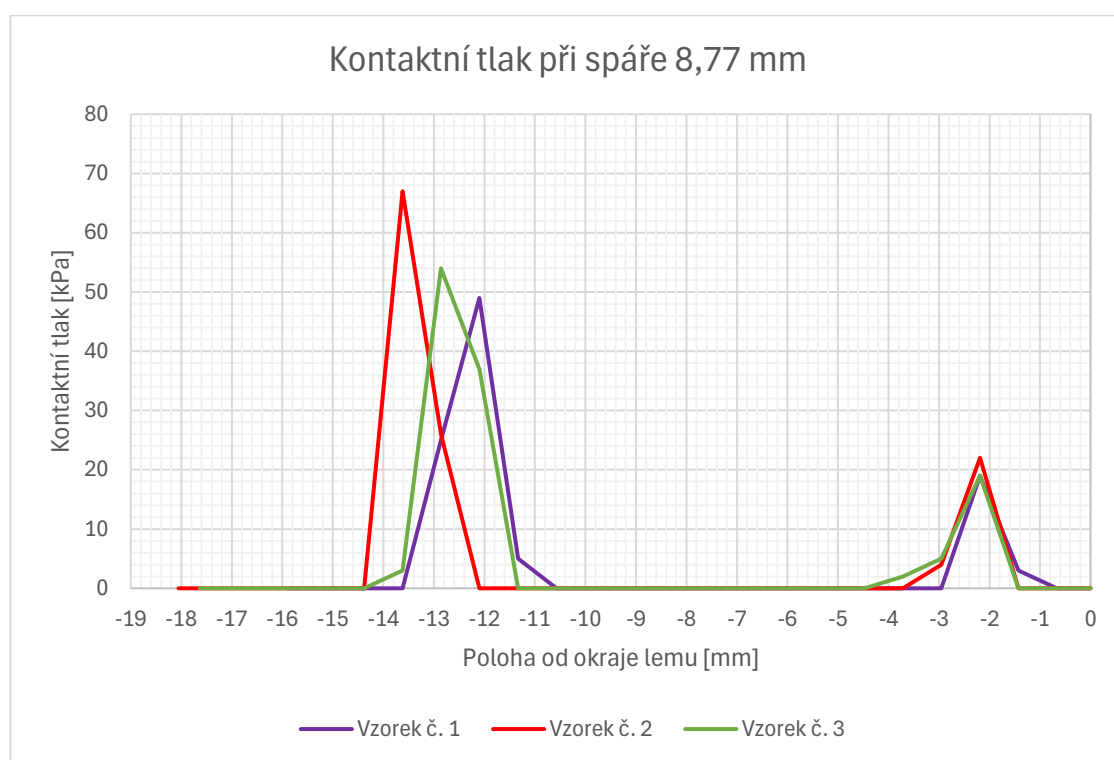
5.5.5 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 8,77 mm



Obr. 113: Vzorek č. 1 během měření kontaktního tlaku (spára 8,77 mm)

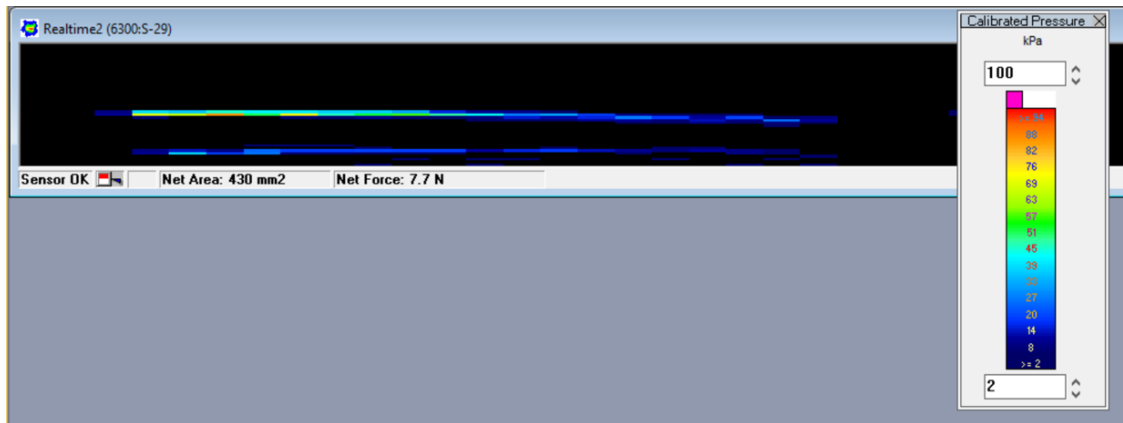
Při dalším zmenšení tloušťky spáry na hodnotu 8,77 mm zůstává poloha první kontaktní oblasti podobná jako u předchozího stavu. U vzorku č. 2 a 3 je její vzdálenost od okraje lemu přibližně 1,4 mm, u vzorku č. 1 okolo 0,8 mm. Kontaktní plocha má u vzorků č. 1 a 2 šířku cca 2,3 mm, zatímco u vzorku č. 3 činí přibližně 3 mm. Tlak v této oblasti dosahuje u všech vzorků hodnoty přibližně 20 kPa.

V případě druhé oblasti kontaktu došlo k jejímu posunu směrem od okraje lemu postranice. U vzorku č. 1 je tato vzdálenost přibližně 10,6 mm, u vzorku č. 2 cca 12 mm a u vzorku č. 3 okolo 11,4 mm. Šířka kontaktní plochy je v případě vzorků č. 1 a 3 přibližně 3 mm. U vzorku č. 2 pak činí 2,3 mm. V této oblasti dosahuje maximální kontaktní tlak u vzorku č. 1 hodnoty 50 kPa, u vzorku č. 2 přibližně 67 kPa a u vzorku č. 3 cca 54 kPa.

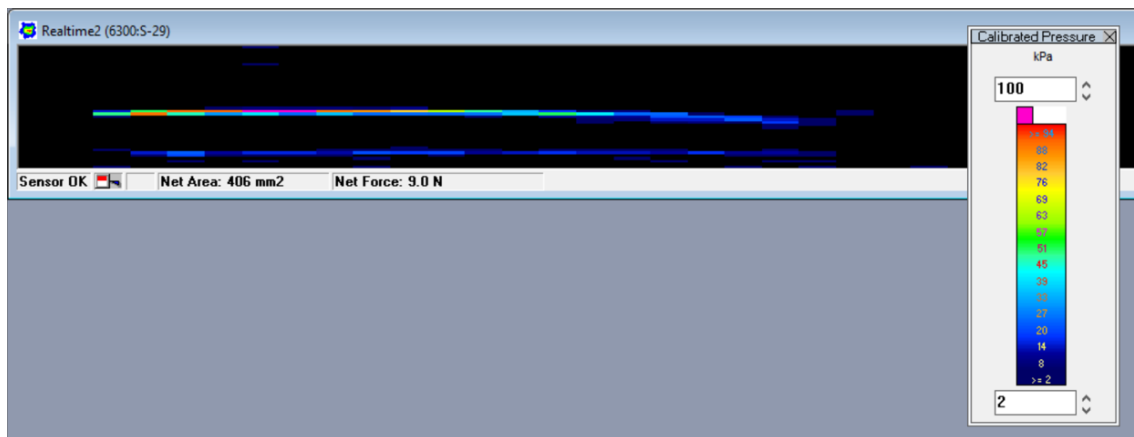


Obr. 114: Naměřený kontaktní tlak při spáře 8,77 mm

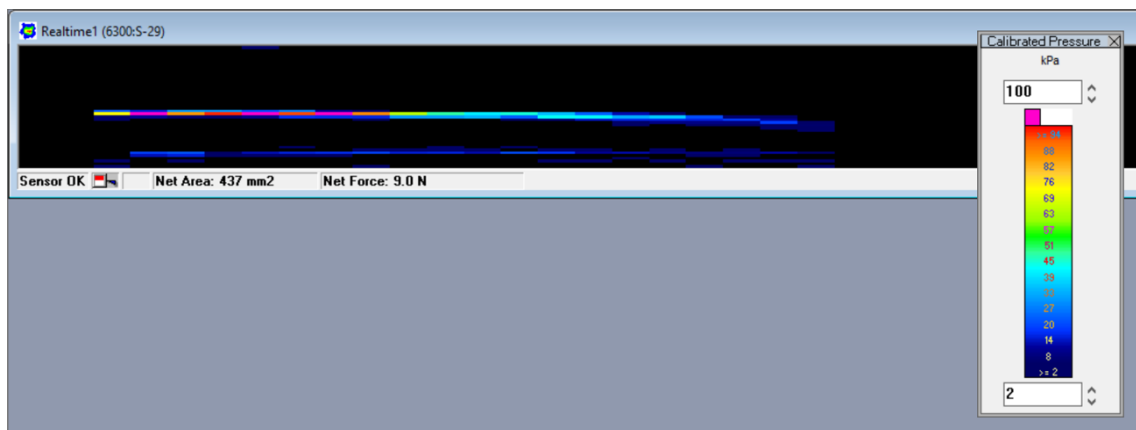
Mapy zatížení snímače (viz Obr. 115 až Obr. 117) ukazují, že zatěžované oblasti jsou u všech vzorků na pravé straně mírně zešikmené, což může souviset s drobnými odchylkami při montáži vzorků na stojinu. U všech vzorků je zároveň patrné zvýšené zatížení na levé straně snímače, přičemž u vzorků č. 2 a 3 se v této oblasti vyskytují místa označená fialovou barvou, což pravděpodobně naznačuje lokální přetížení mimo rozsah snímače. U vzorku č. 1 je zatížení levé strany rovněž vyšší, ale zůstává v měřicím rozsahu. Celková síla působící na snímač dosahuje u vzorku č. 1 hodnoty 7,7 N, zatímco vzorků č. 2 a 3 činí přibližně 9 N.



Obr. 115: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 1, spára 8,77 mm



Obr. 116: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 2, spára 8,77 mm



Obr. 117: Mapa zatíženého snímače – vzorek č. 3, spára 8,77 mm

5.5.6 Vyhodnocení experimentu

Z výsledků experimentu je patrné, že tloušťka spáry má významný vliv jak na rozložení kontaktního tlaku, tak na celkovou sílu působící na snímač. Jak ukazuje Tab. 8, při větších spárách (11,77 mm a 12,77 mm) dochází k poklesu sil působících v kontaktu, což je dáno menším stlačením těsnění. Naopak při menších spárách (9,77 mm a 8,77 mm) dochází k výraznému nárůstu tlakových špiček i celkového zatížení. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při spáře 8,77 mm, kdy síla dosáhla až 9 N a tlak dosahoval hodnoty až 67 kPa, což vedlo i k lokálnímu přetížení snímače.

Tab. 8: Přehled naměřené celkové síly působící v kontaktu

Velikost spáry [mm]	Celková síla [N/100 mm]		
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3
12,77	0,6	0,7	0,7
11,77	1,2	1	1
10,77*	1,9	1,7	1,8
9,77	3,2	4,3	4,4
8,77	7,7	9	9

*Pozn.: Nominální hodnota

Kontaktní tlak byl u menších spár výrazně vyšší nejen z pohledu maximálních hodnot, ale také z hlediska rozsahu kontaktní plochy. V těchto případech se navíc objevily dvě oddělené kontaktní oblasti, přičemž tlakové maximum se nacházelo ve druhé z nich, vzdálenější od okraje lemu postranice. Naopak u větších spár (např. 12,77 mm) byly kontaktní tlaky nízké (většinou pod 10 kPa) a kontaktní plocha byla úzká a posunutá blíže k okraji postranice.

6 Vyhodnocení výsledků a návrh možných opatření

6.1 Porovnání výsledků MKP simulací a experimentu

V rámci simulací metodou konečných prvků (dále jen MKP) bylo analyzováno příčné rozložení tlaku a celková síla působící v kontaktu mezi těsněním a postranicí karoserie. Simulace zohledňovaly různé tloušťky spáry mezi dveřmi a postranicí (10,77 mm, 11,77 mm, 12,77 mm, 9,77 mm a 8,77 mm), které představují vliv montáže dveří. Pro každý z těchto případů byly vytvořeny dvě varianty MKP simulací, které se lišily použitým materiálovým modelem pro mikroporézní EPDM. První varianta výpočtového modelu zahrnovala použití dvouparametrového modelu Mooney-Rivlin pro oba pryžové materiály (homogenní i mikroporézní EPDM). Ve druhé variantě byl pro homogenní EPDM použit Mooney-Rivlin a pro mikroporézní EPDM Ogdenův model (také dvouparametrový).

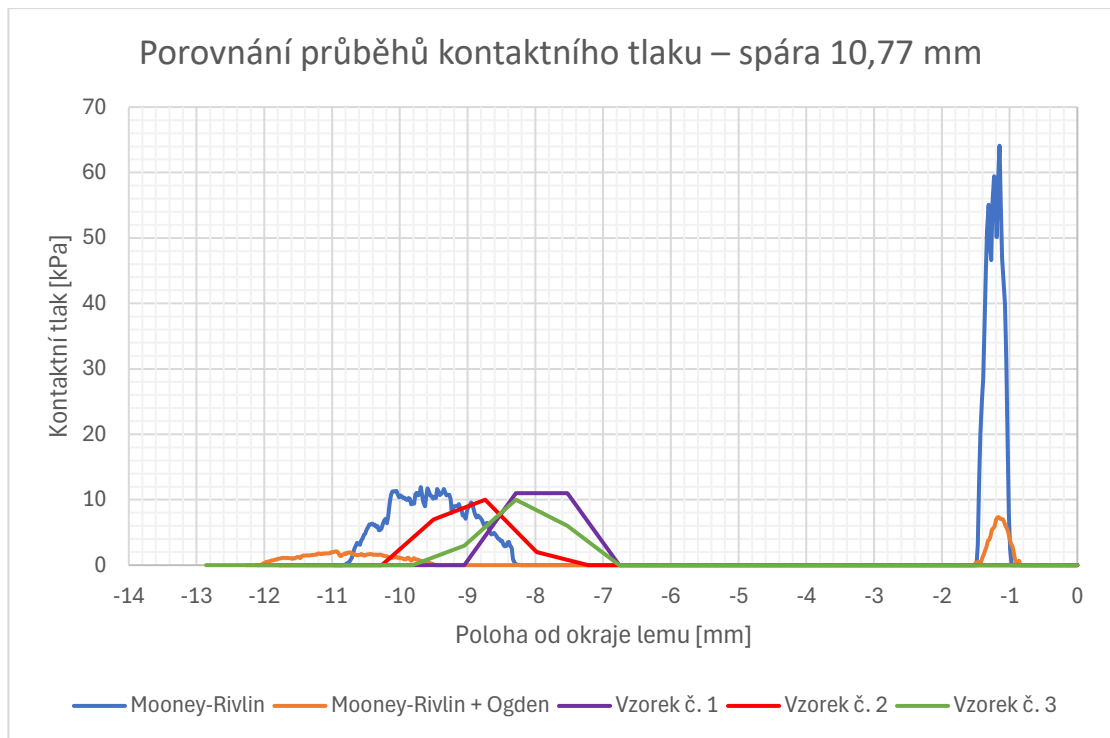
Následně byl proveden experiment se zjednodušenými vzorky těsnění za použití fóliového tlakového snímače Tekscan. Cílem bylo ověření výsledků numerických simulací, přičemž byly zaznamenány průběhy kontaktního tlaku i celková síla pro jednotlivé tloušťky spáry. Měření proběhla úspěšně a poskytla relevantní data, která lze porovnat s výstupy z MKP simulací.

6.1.1 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 10,77 mm (nominál)

Při nominální tloušťce spáry 10,77 mm se u naměřených průběhů kontaktního tlaku objevuje jedna hlavní kontaktní oblast, která se nachází přibližně 7 mm od okraje lemu postranice. Průběhy všech tří vzorků jsou tvarově velmi podobné a maximální hodnota tlaku se pohybuje kolem 10 kPa.

U obou výpočtových modelů se objevují dvě kontaktní oblasti. V první z nich, vzdálené přibližně 1 mm od okraje lemu postranice, dochází k výrazné tlakové špičce, která se u naměřených průběhů neprojeví (viz Obr. 118). Tento jev je patrně způsobený výrobními tolerancemi těsnění (tvarová odchylka průřezu může dosahovat až $\pm 1,4$ mm). U materiálového modelu Mooney-Rivlin dosahuje tlak v této oblasti hodnoty přes 60 kPa. Druhá kontaktní oblast, vzdálená zhruba 8 mm od okraje lemu postranice, vykazuje velmi dobrou shodu jak z hlediska polohy, tak z hlediska velikosti tlaku s naměřenými hodnotami.

Výpočtový model kombinující Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM má výrazně nižší kontaktní tlaky v obou oblastech a poloha druhého kontaktu je ve srovnání s experimentem méně přesná.



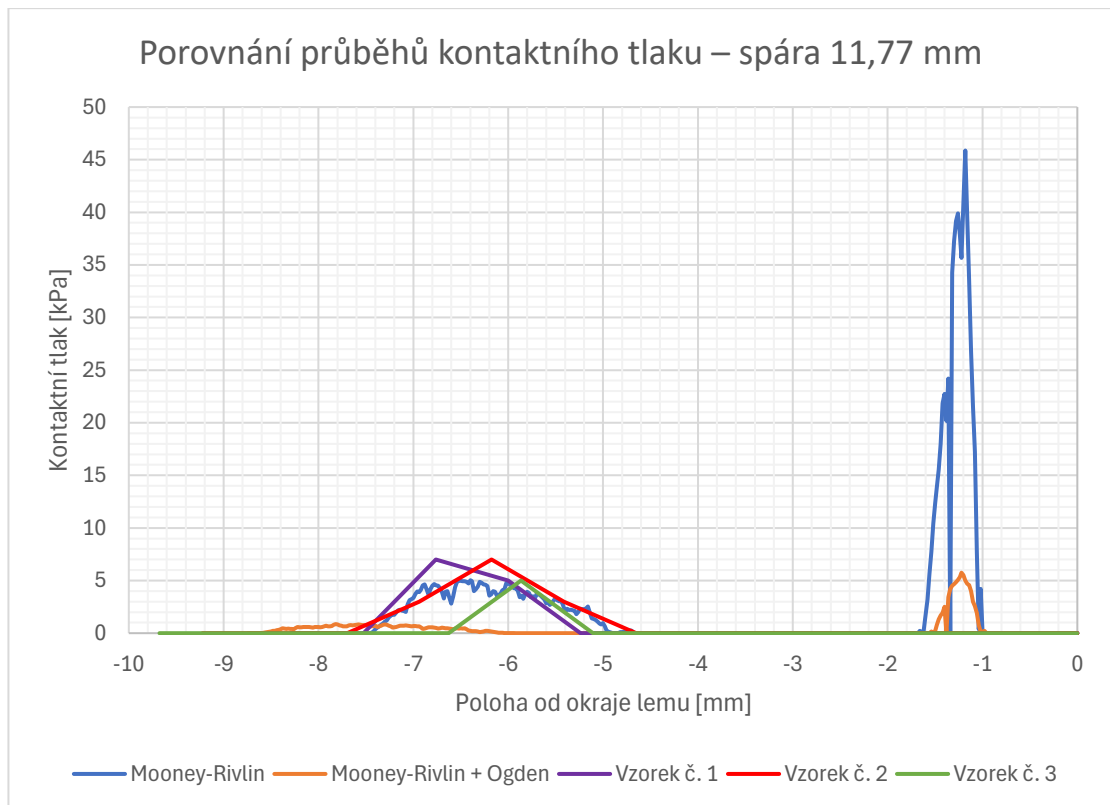
Obr. 118: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 10,77 mm

6.1.2 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 11,77 mm

Při zvětšené tloušťce spáry na hodnotu 11,77 mm vykazují naměřené průběhy kontaktního tlaku jednu hlavní kontaktní oblast, která se nachází přibližně 5 mm od okraje lemu postranice. Maximální hodnota tlaku zde dosahuje přibližně 6 kPa a tvar průběhů je u jednotlivých vzorků velmi podobný.

Oba výpočtové modely naproti tomu opět předpokládají dvě kontaktní oblasti. V první z nich, vzdálené přibližně 1 mm od okraje lemu postranice, vzniká výrazná tlaková špička, která se v experimentu neprojevila (viz Obr. 119). Stejně jako u nominální spáry je tato odchylka pravděpodobně způsobena odlišnou geometrií průřezu zkušebních vzorků oproti výpočtovému modelu těsnění v důsledku výrobních tolerancí. U materiálového modelu Mooney-Rivlin dosahuje kontaktní tlak hodnoty okolo 45 kPa. Druhá kontaktní oblast se z hlediska polohy téměř shoduje s experimentem a tlak v této oblasti činí přibližně 5 kPa.

Výpočtový model využívající Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM opět vykazuje v obou oblastech výrazně nižší kontaktní tlaky.

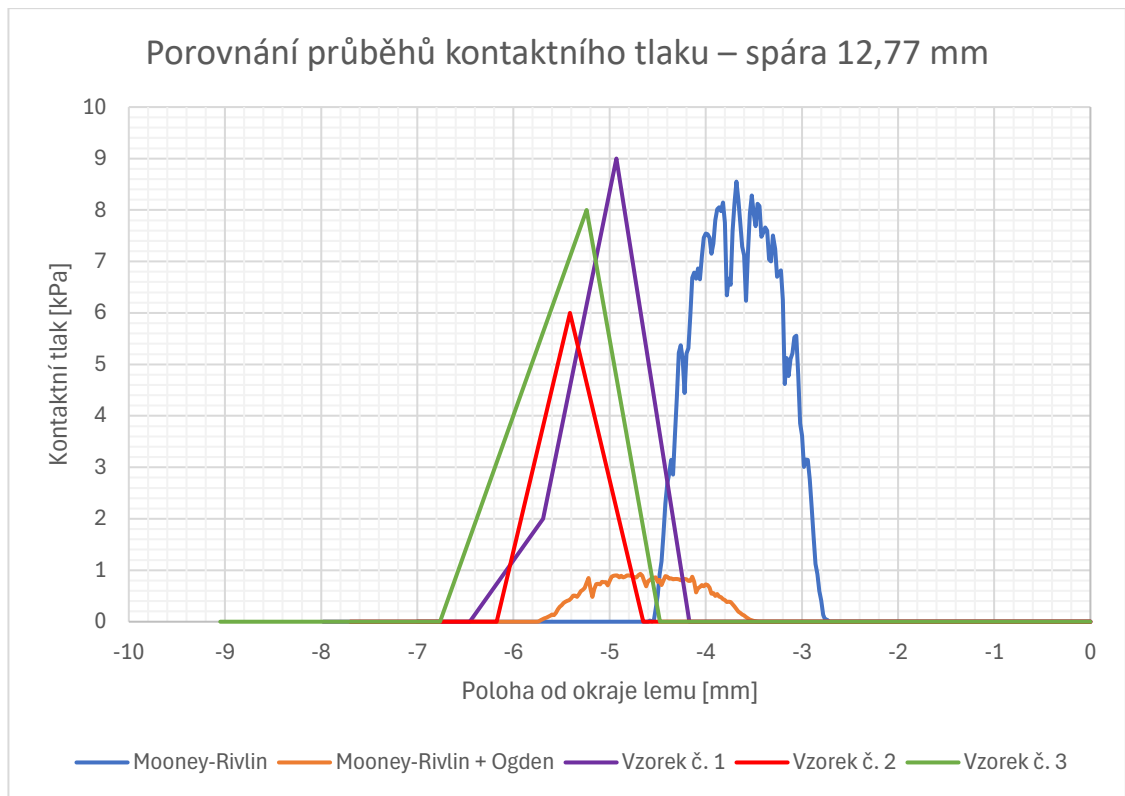


Obr. 119: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 11,77 mm

6.1.3 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 12,77 mm

Při zvětšené spáře na hodnotu 12,77 mm se jak u naměřených průběhů, tak u obou výpočtových modelů vyskytuje pouze jedna kontaktní oblast. Naměřené průběhy kontaktního tlaku jsou vzdáleny přibližně 4,5 mm od okraje lemu postranice a velikost tlaku se u jednotlivých vzorků pohybuje mezi 6 a 9 kPa

Průběh tlaku u výpočtového modelu využívající Mooney-Rivlin pro obě pryže odpovídá těmto hodnotám lépe, ovšem poloha kontaktní oblasti je u něj posunuta blíže k okraji lemu postranice. Naopak model kombinující Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM je naměřeným hodnotám z hlediska polohy blíže, ale opět vykazuje výrazně nižší hodnoty kontaktního tlaku (viz Obr. 120).

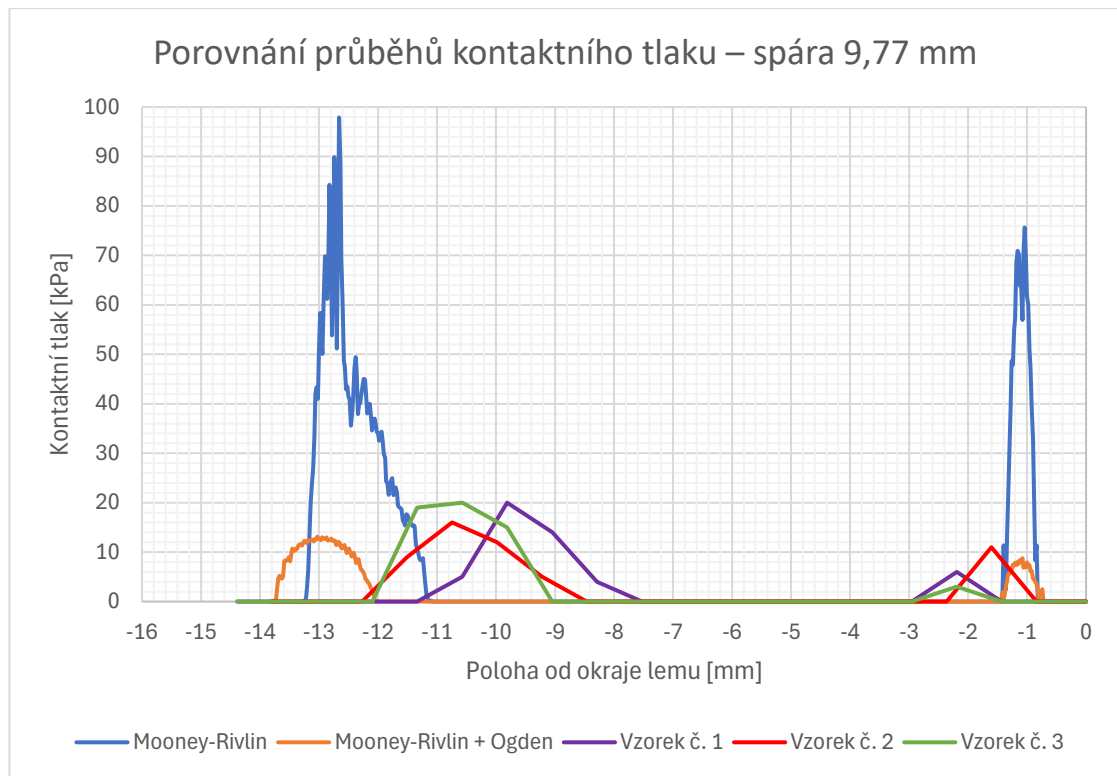


Obr. 120: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 12,77 mm

6.1.4 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 9,77 mm

Při zmenšené tloušťce spáry na hodnotu 9,77 mm se ve všech případech objevují dvě kontaktní oblasti. První z nich se u naměřených průběhů nachází přibližně 1,4 mm od okraje lemu postranice, zatímco u obou výpočtových modelů je tato oblast posunuta ještě blíže k okraji. Z hlediska velikosti kontaktního tlaku v této oblasti lépe odpovídá model využívající kombinaci Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM.

Druhá oblast kontaktu je v případě dat z experimentu ve vzdálenosti zhruba 8 mm od okraje lemu postranice. Tomuto umístění se lépe blíží výpočtový model, který využívá Mooney-Rivlin pro oba pryžové materiály. Naopak z pohledu velikosti kontaktního tlaku v této oblasti více odpovídá model kombinující Mooney-Rivlin a Ogden (viz Obr. 121).

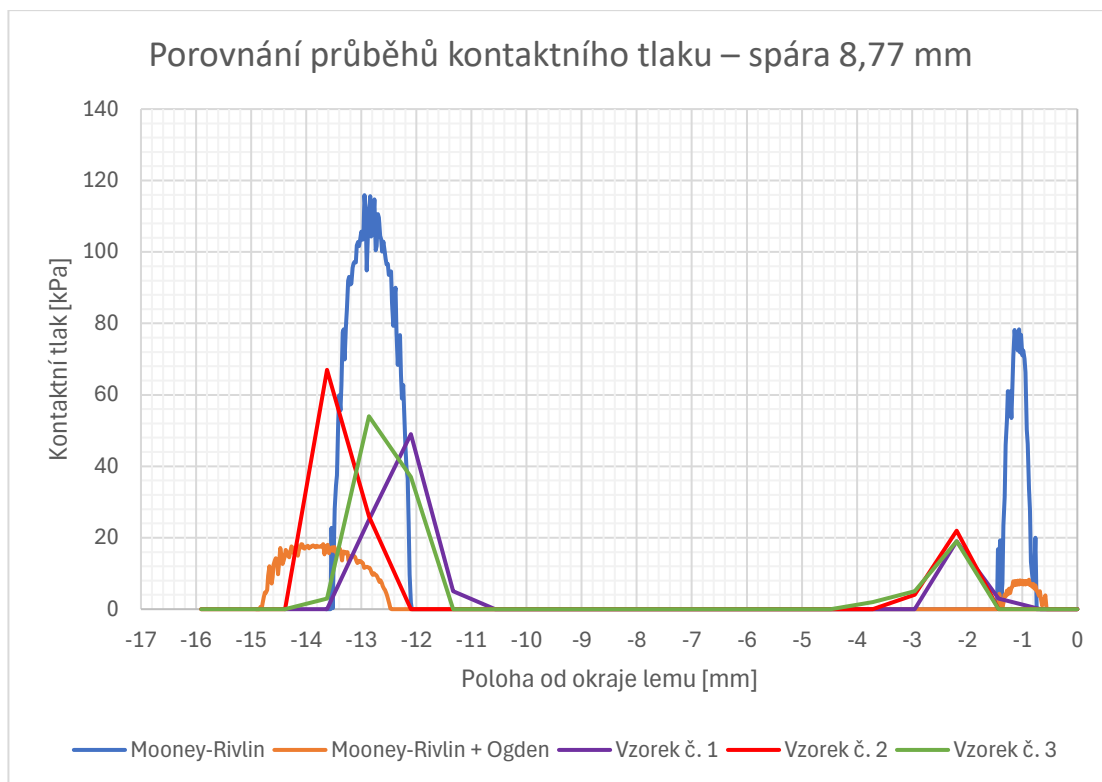


Obr. 121: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 9,77 mm

6.1.5 Tloušťka spáry mezi dveřmi a postranicí: 8,77 mm

Při zmenšené tloušťce spáry na hodnotu 8,77 mm se ve všech případech opět vyskytují dvě kontaktní oblasti. První z nich se u naměřených průběhů nachází přibližně 1,4 mm od okraje lemu postranice, zatímco u obou výpočtových modelů je tato oblast posunuta blíže k okraji. Průběhy tlaku u všech tří vzorků jsou prakticky identické a z hlediska velikosti tlaku se více přibližují modelu kombinujícímu Mooney-Rivlin pro homogenní EPDM a Ogden pro mikroporézní EPDM.

Poloha druhé oblasti kontaktu je u naměřených průběhů více podobná výpočtovému modelu využívajícímu Mooney-Rivlin pro obě pryže a nachází se ve vzdálenosti přibližně 11 mm od okraje lemu postranice. Z hlediska velikosti kontaktního tlaku však nelze jednoznačně určit, který z modelů lépe odpovídá experimentu, neboť naměřené hodnoty se nacházejí mezi výsledky obou variant (viz Obr. 122).



Obr. 122: Porovnání kontaktního tlaku z MKP simulací a experimentu při spáře 8,77 mm

6.1.6 Celková síla působící v kontaktu

V Tab. 9 jsou shrnuty výsledky celkové síly působící v kontaktu mezi těsněním a postranicí karoserie, získané z výpočtových modelů a z experimentálního měření. Z porovnání vyplývá, že naměřeným hodnotám se nejvíce blíží výpočtové modely, u kterých byl pro obě pryže použit materiálový model Mooney-Rivlin. Tato varianta dosahuje ve všech případech velmi podobných hodnot jako naměřená data.

Tab. 9: Celková síla působící na postranici – porovnání dat z MKP modelů a experimentu

Velikost spáry [mm]	Celková síla [N/100 mm]				
	MKP simulace		Naměřená hodnota		
	Mooney-Rivlin	Mooney-Rivlin + Ogden	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3
12,77	0,5	0,07	0,6	0,7	0,7
11,77	1,05	0,14	1,2	1	1
10,77*	1,88	0,28	1,9	1,7	1,8
9,77	5,13	1,04	3,2	4,3	4,4
8,77	7,79	1,93	7,7	9	9

*Pozn.: Nominální hodnota

Při srovnání výsledků z MKP simulací s hodnotami uvedenými v Tab. 4, které vycházejí z CLD křivky od dodavatele těsnění, je patrné, že tyto hodnoty rovněž vykazují nejlepší shodu s výpočtovými modely používajícími model chování materiálu Mooney-Rivlin pro homogenní i mikroporézní EPDM. U nominální tloušťky spáry (10,77 mm) a u větších spár (11,77 mm a 12,77 mm) je shoda velmi dobrá. Výraznější rozdíl se objevuje až při vyšším stlačení, zejména u spáry 8,77 mm, kde se hodnota z výpočtového modelu využívající Mooney-Rivlin pro obě pryže pohybuje přibližně na polovině hodnoty z CLD křivky. Přepočtení na jiné jednotky nemusí být při větších deformacích zcela přesný vzhledem k nelineárnímu chování pryže. K rozdílům mohou přispět i další faktory, například odlišný tvar průřezu zkušebních vzorků v důsledku výrobních tolerancí nebo rozdílné podmínky zatěžování.

6.2 Návrh možných opatření

Na základě výsledků MKP simulací a provedených měření lze konstatovat, že pozorované opotřebení laku karoserie v oblasti přibližně 10 mm od okraje lemu postranice je s největší pravděpodobností způsobené vlivem lokální koncentrace tlaku (viz Obr. 118). Z měření realizovaných společností Škoda Auto je známo, že v této oblasti dochází ke kmitání dveří vůči postranici během jízdy vozidla v ose z a y. Maximální amplituda v ose z dosahuje hodnoty přibližně 0,4 mm a v ose y hodnoty okolo 0,6 mm.

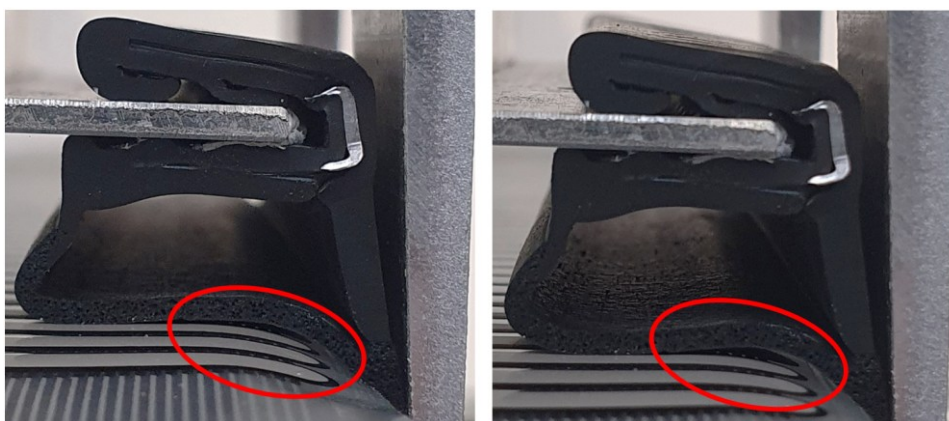
Tyto relativní pohyby mohou vést ke vzniku třecí síly, která v kombinaci s nečistotami jako je prach, písek či sůl, působícími jako abrazivum, způsobuje odírání povrchu karoserie, zejména v místech s vyšším kontaktním tlakem. Za hlavní příčinu tohoto jevu tedy lze považovat tření v kontaktu během jízdy vozidla. K odírání laku může částečně přispívat i samotné zavírání dveří, při němž dochází k výrazným výkmitům v ose y a následnému stlačení těsnění. Pokud jsou kontaktní plochy znečištěné, může dojít k zatlačení pevných částic (např. prachu nebo písku) do povrchové vrstvy laku, což zvyšuje lokální mechanické namáhání povrchu a může vést k jeho postupnému narušení abrazivním mechanismem.

Na základě těchto poznatků byla formulována následující opatření, která by mohla přispět k odstranění nebo alespoň zmírnění tohoto typu závady. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé návrhy rozčleněny do podkapitol.

6.2.1 Zvětšení tloušťky spáry

Jedním z možných opatření je zvětšení tloušťky spáry mezi dveřmi a postranicí na hodnotu 11,77 mm. Jak ukazují výsledky MKP simulací, při této hodnotě dochází ke snížení kontaktního tlaku v oblasti přibližně 10 mm od okraje lemu postranice zhruba na polovinu, tedy z původních cca 10 kPa na hodnotu kolem 5 kPa (viz Obr. 118 a Obr. 119). Nižší tlak v tomto místě může vést ke snížení třecí síly během kmitání za jízdy, což může přispět ke snížení opotřebení laku karoserie.

Nicméně zvětšení spáry je spojeno i s určitými riziky. Snížené předpětí může při dlouhodobém provozu, zejména vlivem stárnutí pryže, vést k poklesu její pružnosti, a tím i ke zhoršení těsnicí schopnosti. Dále bylo při měření pozorováno, že v oblasti okraje postranice nebyl oproti výsledkům z MKP simulací zajištěn kontakt, což bylo pravděpodobně způsobeno výrobními tolerancemi. V této části vznikla kapsa, která by mohla sloužit jako prostor pro usazování nečistot. Tento jev byl zaznamenán nejen při spáře 11,77 mm, ale do určité míry i u nominální spáry 10,77 mm (viz Obr. 123). Za těchto podmínek může docházet ke zvýšení pravděpodobnosti oděru laku, a to i přesto, že je kontaktní tlak v daném místě relativně nízký.



Obr. 123: Porovnání tvaru těsnění při spáře 10,77 mm (vlevo) a 11,77 mm (vpravo). Červeně označeno možné místo hromadění nečistot.

6.2.2 Úprava tvaru profilu a materiálových vlastností

Další možností je optimalizace tvaru průřezu stávajícího profilu těsnění nebo volba měkčího materiálu, například mikroporézního EPDM s nižší hustotou, případně homogenního EPDM s nižší tvrdostí. Cílem této úpravy by bylo dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení kontaktního tlaku napříč průřezem těsnění při nominální tloušťce spáry a hodnotách jí blízkých. Homogennější rozložení tlaku může přispět k omezení lokálních tlakových špiček a ke zlepšení přilnavosti těsnění k postranici, což může pomoci snížit tření.

Je však třeba poznamenat, že toto opatření samo o sobě pravděpodobně nepostačí k úplnému odstranění opotřebení. I rovnoměrně přitlačené těsnění může při dlouhodobém kontaktu se znečištěným povrchem přispívat k pozvolnému odírání laku, a to zejména vlivem přítomnosti abrazivních nečistot.

Významným omezením této varianty opatření jsou výrobní tolerance, především tvarové odchylky průřezu samotného profilu. U analyzovaného těsnění mohou tyto odchylky dosahovat až $\pm 1,4$ mm, což je hodnota, která může zásadním způsobem ovlivnit skutečné rozložení kontaktního tlaku. Pokud by byl tvar těsnění optimalizován pomocí MKP simulací, ale následná výroba by neumožnila držet geometrické odchylky v patřičném rozsahu, nemusely by být přínosy této optimalizace v praxi realizovatelné. V takovém případě by se skutečné rozložení tlaku mohlo od výsledků simulací výrazně lišit, což se částečně potvrdilo i v rámci této práce, kde bylo patrně v důsledku výrobních odchylek zaznamenáno odlišné rozložení kontaktního tlaku oproti MKP simulacím u spáry 10,77 mm a 11,77 mm (viz kapitola 6.1).

Možným řešením by bylo snížení výrobních tolerancí například změnou technologie výroby. Pokud by byl profil vyráběn místo extruze jako vstřikovaný díl, mohlo by být možné dosáhnout vyšší geometrické přesnosti (viz kapitola 2.3.4). Tato varianta by však byla spojena s vyššími výrobními náklady a technologickou náročností.

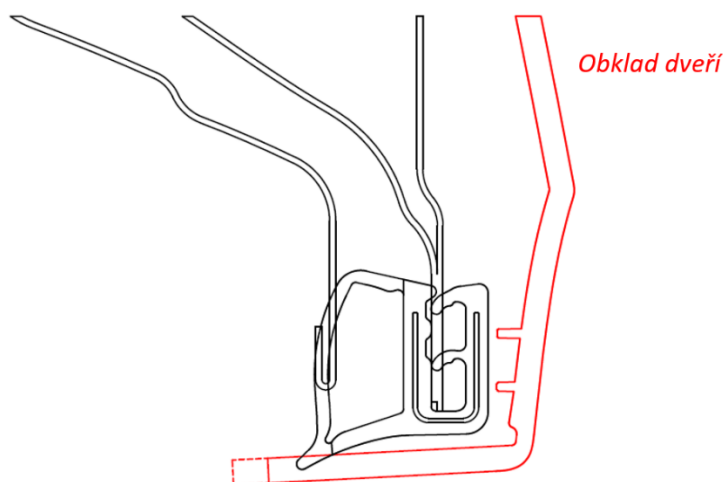
6.2.3 Zvýšení adheze těsnění

Za účelem omezení relativních pohybů mezi povrchem těsnění a karoserie lze také uvažovat o zvýšení adheze mezi těmito dvěma prvky. Cílem tohoto opatření by bylo, aby těsnění po zavření dveří přilnulo k postranici karoserie a veškeré relativní pohyby dveří vůči postranici při jízdě se odehrávaly pouze deformací bubliny. Toho by se dalo dosáhnout vyšším přepětím, tedy zmenšením tloušťky spáry, ale za předpokladu, že tlak v kontaktu bude rozložen rovnoměrně a obě kontaktní plochy, jak postranice, tak těsnění, budou čisté.

Další možností by bylo integrovat do profilu těsnění magnetické pásky, podobně jako je tomu u těsnění chladniček. Díky magnetické síle by bylo možné dosáhnout většího přitlaku na postranici, a tedy i větší adheze. Nevýhodou tohoto řešení je složitost výroby a cena, protože výroba těsnění s integrovanou magnetickou výplní může být technologicky náročnější. Další omezení představuje fakt, že karoserie musí být z feromagnetického materiálu. Navíc vyšší přitlak vede ke zvýšení CLD hodnoty, tedy i ke zvýšené síle nutné k otevření dveří, což může mít negativní vliv na uživatelský komfort, jak je zmíněno v kapitole 2.6.

6.2.4 Ochrana proti vnikání nečistot

Vzhledem k tomu, že přítomnost nečistot v kontaktu sehrává významnou roli při vzniku abrazivního opotřebení, dalším doporučeným opatřením je omezit jejich vnikání do dané oblasti. Toho by šlo dosáhnout například konstrukční úpravou obkladu dveří, konkrétně prodloužením dílu v místě kontaktu jazyka (viz Obr. 124), čímž by se mohl částečně omezit přímý tok nečistot od kola směrem do prostoru kontaktu těsnění a postranice.



Obr. 124: Řez analyzovaným těsněním s návrhem prodloužení obkladu dveří (vyznačeno čárkovaně)

Alternativně by bylo vhodné zvážit i uživatelské doporučení, například v rámci manuálu k vozidlu, s výzvou k pravidelnému čištění obou kontaktních ploch. Pravidelná údržba těchto míst by mohla přispět k prodloužení životnosti jak laku karoserie, tak samotného těsnění.

Je však třeba dodat, že k opotřebení laku karoserie může docházet i bez přítomnosti nečistot, jelikož samotný materiál těsnění obsahuje různé příměsi, jako například saze, které mohou vlivem tření zanechávat otěr na karoserii. Jakékoliv zašpinění karoserie je stejně jako poškození laku neakceptovatelné. V tomto případě by bylo vhodné se zaměřit například na materiálové složení laku těsnění nebo zvážit jinou povrchovou úpravu. Touto problematikou se podrobněji zabývá práce [11].

6.2.5 Použití ochranné fólie (PPF)

Dalším možným opatřením je ochrana povrchu postranice pomocí průhledné fólie PPF (Paint Protection Film), tedy speciální ochranné vrstvy určené k ochraně laku. Tento typ fólie se v automobilovém průmyslu běžně využívá k ochraně lakovaných částí karoserie proti odletujícím kamínkům, hmyzu nebo UV záření. Její aplikace by mohla zabránit přímému poškození laku v důsledku kontaktu s těsněním.

Výhodou této fólie je její schopnost tzv. samoregenerace, což znamená, že drobné škrábance se díky působení tepla samovolně vyhlazují. [36]

Nevýhodou PPF fólie je poměrně vysoká cena, a tím i potenciální zvýšení výrobních nákladů samotného vozidla. Dalším negativem je omezená životnost, která se pohybuje okolo 8 až 10 let. [36] Vzhledem k přítomnosti abrazivních nečistot v kontaktu by navíc mohlo docházet k narušení této vrstvy a ke zkrácení její životnosti. Účinnost tohoto opatření by bylo vhodné ověřit například prostřednictvím laboratorního experimentu na vibračním zařízení (tzv. shakeru), které by simulovalo provozní podmínky při kontaktu těsnění s lakovaným povrchem postranice chráněným fólií, a to za současné přítomnosti abrazivních částic.



Obr. 125: Příklad aplikace PPF fólie na karoserii vozidla [36]

6.2.6 Opatření pro vstříkované koncovky

V případě vstříkovaných koncovek bylo rovněž pozorováno opotřebení v místě jejich kontaktu s postranicí karoserie. Podobně jako u extrudované části těsnění je i zde pravděpodobnou příčinou zvýšená koncentrace tlaku, která při jízdě vozidla může vést ke vzniku třecích sil. V kombinaci s přítomností nečistot v kontaktu, které působí jako abrazivum, pak může docházet k lokálnímu poškození povrchové vrstvy laku.

Jedním z možných řešení by bylo použít materiál s nižší tvrdostí – místo EPDM 60ShA zvolit například variantu EPDM 50ShA. Měkčí materiál by se mohl lépe přizpůsobit povrchu postranice a tím by se snížila pravděpodobnost vzniku nežádoucích tlakových špiček. Zároveň by bylo vhodné udržovat kontaktní plochy čisté, aby se minimalizoval abrazivní účinek nečistot. Další možností je aplikace ochranné PPF fólie i v této oblasti karoserie.

7 Závěr

Předmětem této diplomové práce byla analýza příčin poškození laku karoserie v místě kontaktu s těsněním dveří. V teoretické části byla provedena rešerše zaměřená na těsnicí systémy karoserie osobních automobilů. Byly popsány jednotlivé druhy těsnění, jejich konstrukce, způsoby montáže, používané materiály, výrobní technologie i povrchové úpravy. Pozornost byla věnována také parametrům, které ovlivňují funkčnost a kvalitu těsnění v provozních podmínkách.

Praktická část se zabývala analýzou příčného rozložení kontaktního tlaku mezi těsněním podběhu zadního kola a postranicí karoserie. Zkoumána byla také celková síla působící v kontaktu. Nejprve byla provedena jednoosá tahová zkouška pryžových materiálů (homogenního a mikroporézního EPDM), jejímž cílem bylo získání mechanických vlastností potřebných pro numerické simulace. Na základě těchto údajů byly v programu SolidWorks Simulation vytvořeny výpočtové modely těsnění, které simulovaly stav po zavření dveří. Simulace byly provedeny pro různé tloušťky spáry, které reprezentovaly vliv montážních odchylek dveří. Pro každý z těchto případů byly vytvořeny dva výpočtové modely těsnění, lišící se použitým hyperelastickým materiálovým modelem mikroporézního EPDM. Následně byl proveden experiment na speciálně navrženém přípravku se zjednodušenými vzorky těsnění, který sloužil k ověření výsledků numerických simulací.

Získané výsledky potvrdily, že velikost spáry významně ovlivňuje jak příčné rozložení kontaktního tlaku, tak celkovou sílu působící v kontaktu. Bylo prokázáno, že v oblasti pozorovaného poškození dochází ke zvýšené koncentraci tlaku, která může být, v kombinaci s přítomností abrazivních nečistot, jedním z hlavních faktorů vedoucích k oděru laku karoserie. Dále se ukázalo, že na příčné rozložení kontaktního tlaku mohou mít výrazný vliv i výrobní tolerance profilu těsnění.

Na základě provedených analýz byly formulovány návrhy opatření, které by mohly přispět ke snížení rizika poškození laku karoserie. Jejich účinnost by bylo vhodné dále ověřit, například pomocí laboratorních experimentů.

Tato diplomová práce může sloužit jako výchozí bod pro další výzkum při řešení této problematiky. Dalším postupem by mohla být úprava numerického MKP modelu těsnění za účelem dosažení rovnoměrnějšího rozložení kontaktního tlaku nebo podrobnější analýza vlivu výrobních tolerancí na výstupy simulací.

Použitá literatura

- [1] Škoda Auto a. s. *Firemní materiály*. 2024.
- [2] HUŠEK, Jan. *Výroba a ověření prototypu dvoukomponentního dílu pro těsnění spáry A-sloupku*. Online, Diplomová práce, vedoucí prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní., 2018. Dostupné z: https://theses.cz/id/b56yd4/J_Husek_diplomova_prace_2018.pdf. [cit. 2024-10-27].
- [3] HNÍDEK, Karel. *Vyhodnocení deformací těsnicích elementů u automobilového těsnění*. Online, Diplomová práce, vedoucí prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní., 2015. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/25f815db-1947-441f-bc4c-8d9f6df95695/content>. [cit. 2024-10-27].
- [4] PANG, Jian. *Noise and Vibration Control in Automotive Bodies*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. ISBN 978-1-119-51549-4.
- [5] CADWELL GmbH. *CADWELL_P_REV_10_english.pdf*. Online. Dostupné z: https://www.cadwell.de/download/CADWELL_P_REV_10_english.pdf. [cit. 2024-11-01].
- [6] STREETMACHINE. *How to replace worn car door weatherseals – Tech DIY tips*. [online]. Dostupné z: <https://www.streetmachine.com.au/features/how-to-replace-worn-car-door-weatherseals-tech-diy-tips>. [cit. 2024-11-01].
- [7] COPPENS, P. a W. De VOS. *Trends and developments in Automotive Glass Encapsulation with PUR materials*. SAE Technical Paper 2003-01-2854 [online]. 2003 Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2003-01-2854>. [cit. 2024-12-12].
- [8] BERNARD, J., M. BARBOTEAU a L. COLLET. *Window Encapsulation in Car Industry by Using the 50 Ω RF Technology*. *MRS Online Proceedings Library*. Sv. 430, s. 41–44, 1996 [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1557/PROC-430-41>. [cit. 2024-12-12].

- [9] ZBINDEN, L. Chapter 9 - Moldings, Encapsulation, and Related Opportunities. In: *Glass Engineering: Design Solutions for Automotive Applications*. SAE, 2014, s. 33–45 [online]. ISBN 978-0-7680-7999-9. Dostupné z: <https://www.sae.org/publications/books/content/r-433/>. [cit. 2024-12-13].
- [10] ŠOLTÝS, Jan. *Návrh konstrukce spoje pro upevnění skla na rám dveří osobního automobilu*. Online, Diplomová práce, vedoucí prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní., 2015. Dostupné z: https://theses.cz/id/dqusrm/DIPLOMOVA_PRACE_Bc._Jan_Soltys_2015-05-25.pdf. [cit. 2024-12-27].
- [11] HUŠEK, Jan. *Výzkum vlivu povrchové úpravy TPV těsnění na otěr laku karoserie vozu*. Online, Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní., 2012. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/c372096d-52f1-4148-b1c0-23cf40f2276a/content>. [cit. 2024-10-27].
- [12] SPECTRO COATING. *An Easy and Cost Effective Way to Apply Flocking – Flock Tape for Window Sealing Rubber Profiles*. Online. Dostupné z: <https://www.spectrocoating.com/flock-window-seals/>. [cit. 2025-01-07].
- [13] SCHNIER-Flock. *Basics of Flocking*. Online. Dostupné z: <https://schnier-flock.de/media/pages/produkte/flockgeraete/mini-flocker-evo-set/6e5c3191db-1680249302/basics-of-flocking.pdf>. [cit. 2025-01-07].
- [14] GEMINI GROUP. *Seal Slip Coat, Flocking, Tape, Attachments, & Adhesion Promoters: Which Should You Choose?* Online. Dostupné z: <https://geminigroup.net/seal-slipcoat-flocking-tape-attachments-adhesion-and-promoters/>. [cit. 2025-01-08].
- [15] SPECTRO COATING. *Flock Tape*. Online. Dostupné z: <https://www.spectrocoating.com/flock-tape/>. [cit. 2025-02-08].
- [16] GEMINI GROUP. *Plastic Extrusion Design Guide*. Online. Gemini Group, 2023 Dostupné z: <https://geminigroup.net/resources/plastic-extrusion-design-guide/>. [cit. 2025-02-10].

- [17] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-88058-75-5. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/183-technologie-zpracovani-plastu>. [cit. 2025-02-20].
- [18] BEX, G.J., DE KEYZER, J., DESPLENTERE, F., VAN BAEL, A. *Two-Component Injection Moulding of Thermoplastics with Thermoset Rubbers: Process Development*. [online]. KU Leuven, 2023. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316189904_Two-component_injection_moulding_of_thermoplastics_with_thermoset_rubbers_Process_development. [cit. 2025-02-20].
- [19] YE, Ronan. *Injection molding vs Extrusion: Differences and Comparison*. Online. 3erp. 2024. Dostupné z: <https://www.3erp.com/blog/injection-molding-vs-extrusion-differences-and-comparison/>. [cit. 2025-02-22].
- [20] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-88058-72-4. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/184-technologie-vstrikovani>. [cit. 2025-02-22].
- [21] GREEN, Mark M. a WITTCOFF, Harold A. *Organic Chemistry Principles and Industrial Practice*. Wiley-VCH, 2003. ISBN 978-3-527-30289-5.
- [22] BRADY, George S.; CLAUSER, Henry R. a VACCARI, John A. *Materials handbook*. 15th edition. McGraw-Hill Education – Europe, 2002. ISBN 978-0-07-136076-0.
- [23] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/180-polymery>. [cit. 2025-02-25].
- [24] DUCHÁČEK, Vratislav. *Termoplastické elastomery – moderní polymerní materiály*. Chemické listy 91. Roč. 1997, s. 23-29.
- [25] UEDA, Rafael H. T.; BRANDÃO, Lincoln Cardoso a LAURO, Carlos Henrique. *Analysis of Automotive Liftgate Seals Using Finite Element Analysis*. Online. Polimeros. Listopad 2010. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236236665_Analysis_of_Automotive_Liftgate_Seals_Using_Finite_Element_Analysis. [cit. 2025-03-01].

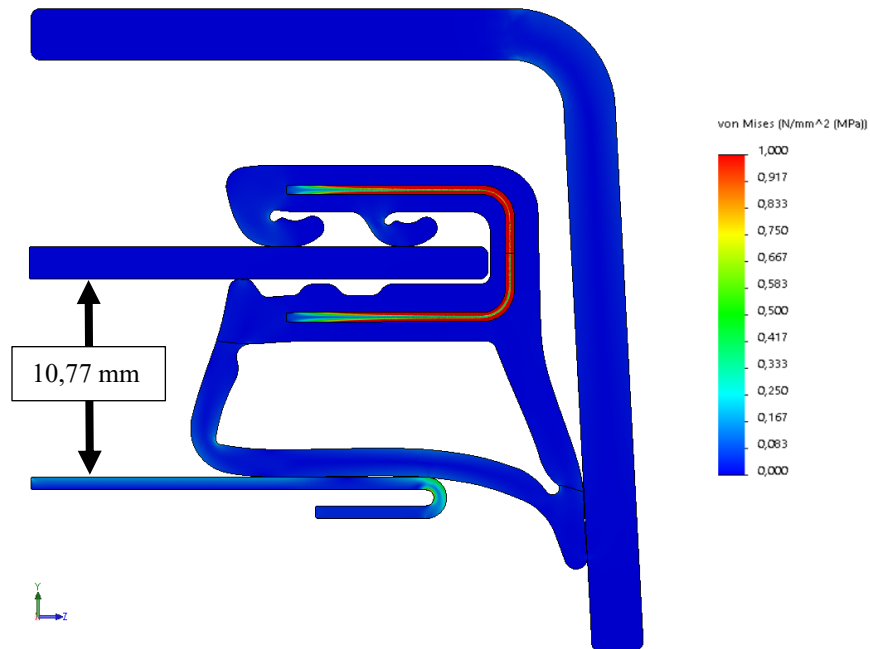
- [26] INDUSTRIILAS. *Sealing profiles*. Online. Dostupné z: <https://industrilas.com/sealing-profiles>. [cit. 2025-03-01].
- [27] FLITNEY, R. *Seals and Sealing Handbook*. 6. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-099416-1.
- [28] SVANBORG, L. *Method development & analysis of seals using FEM* [online]. Master's thesis. Chalmers University of Technology, 2022. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1743441/FULLTEXT01.pdf>. [cit. 2025-04-19].
- [29] ZHU, Wenfeng, WANG, Jie a LIN, Peijian. *Numerical analysis and optimal design for new automotive door sealing with variable cross-section. Finite Elements in Analysis and Design* [online]. 2014, 91, 115–126. ISSN 0168-874X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.06.012>. [cit. 2025-04-19].
- [30] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R. a BUDYNAS, R. G. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, Vysoké učení technické v Brně, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [31] EHLINIK.CZ. *Hliníkové profily, hliníkové plechy – e-shop* [online]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/>. [cit. 2025-01-20].
- [32] I-SCAN™ & HIGH-SPEED I-SCAN USER MANUAL: Tactile Force & Pressure Measurement System version 7.7x [online]. Boston, 2018 [cit. 2025-04-13].
- [33] TEKSCAN. *I-Scan™ Product Selection Guide* [online]. Dostupné z: https://www.tekscan.com/sites/default/files/resources/IDL-I-Scan-SelectionGuide_RevL.pdf. [cit. 2025-04-15].
- [34] TEKSCAN. *Pressure Mapping Sensor 6300* [online]. Dostupné z: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/6300>. [cit. 2025-04-15].
- [35] KILLICH.CZ. *Kroutící momenty* [online]. Dostupné z: <https://www.killich.cz/stranky/technicke-info/kroutici-momenty>. [cit. 2025-04-18].
- [36] POLEPIM.CZ. *Jak funguje ochranná PPF fólie na auta proti slunci a UV záření* [online]. Dostupné z: <https://www.polepim.cz/jak-funguje-ochranna-ppf-folie-na-auta-proti-slunci-a-uv-zareni/>. [cit. 2025-04-20].

Seznam příloh

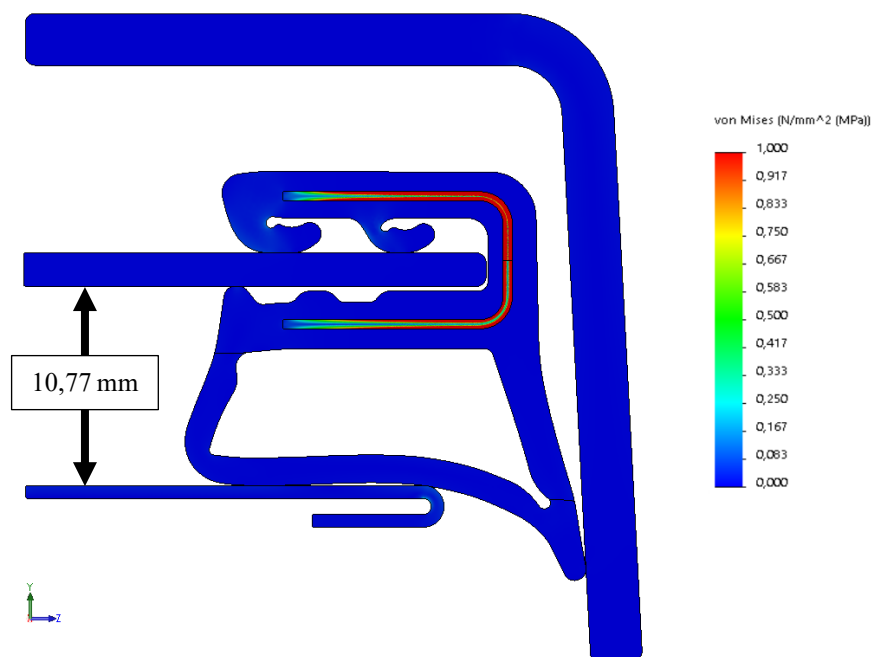
Příloha A: Redukované napětí těsnění.....	123
Příloha B: Síť konečných prvků	128
Příloha C: Výkresová dokumentace	129

Příloha A: Redukované napětí těsnění

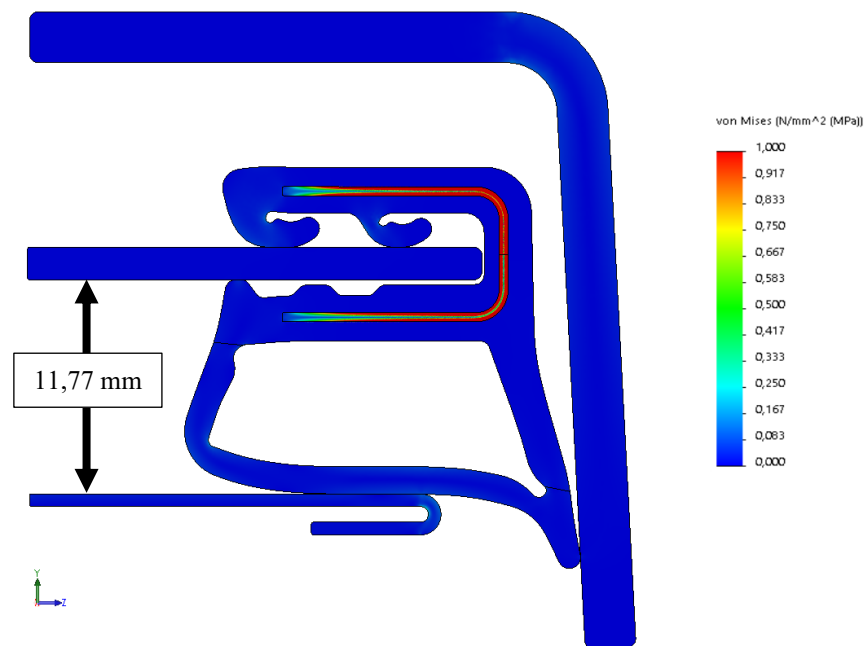
Rozložení redukovaného napětí na postranici karoserie, zejména v oblasti rádiusu, neodpovídá zcela reálnému namáhání. Zvýšená koncentrace napětí v této oblasti je způsobena zavedenými okrajovými podmínkami ve výpočtovém modelu.



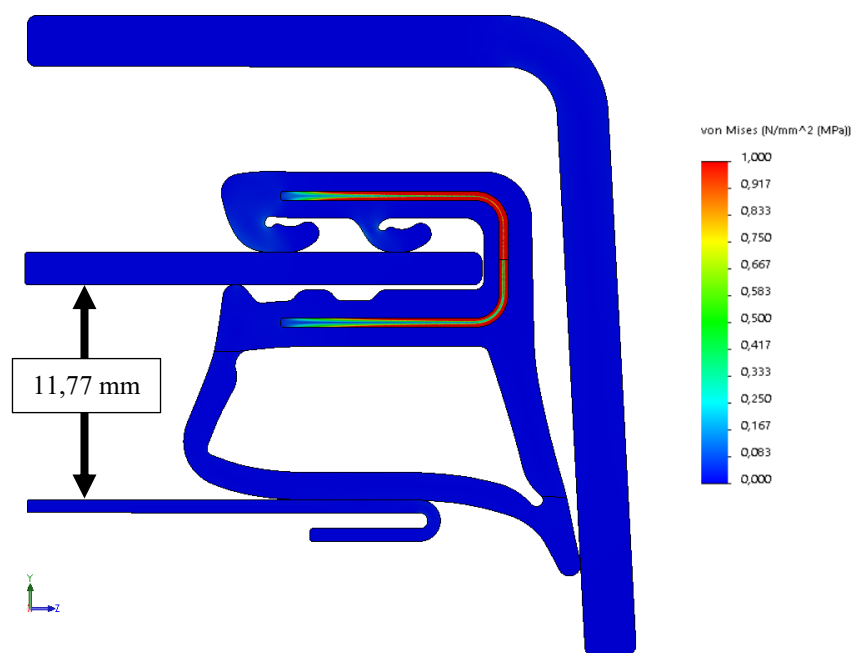
Obr. 126: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko



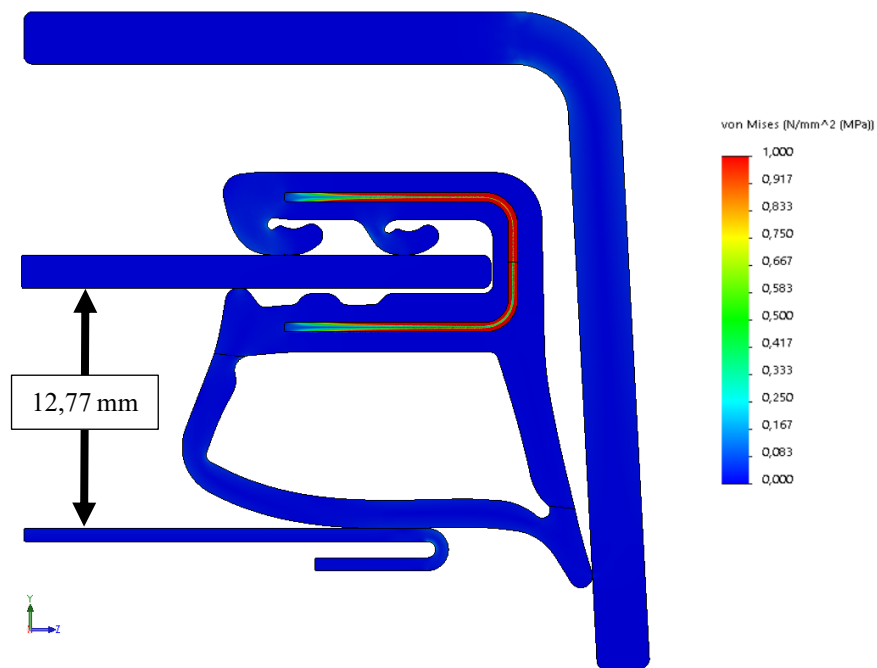
Obr. 127: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 10,77 mm, upravené měřítko



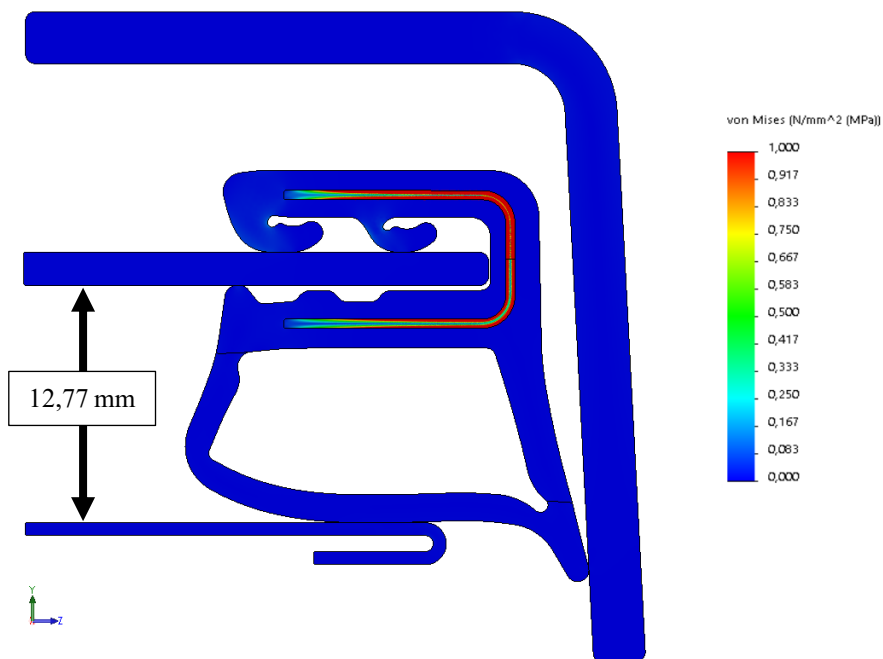
Obr. 128: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko



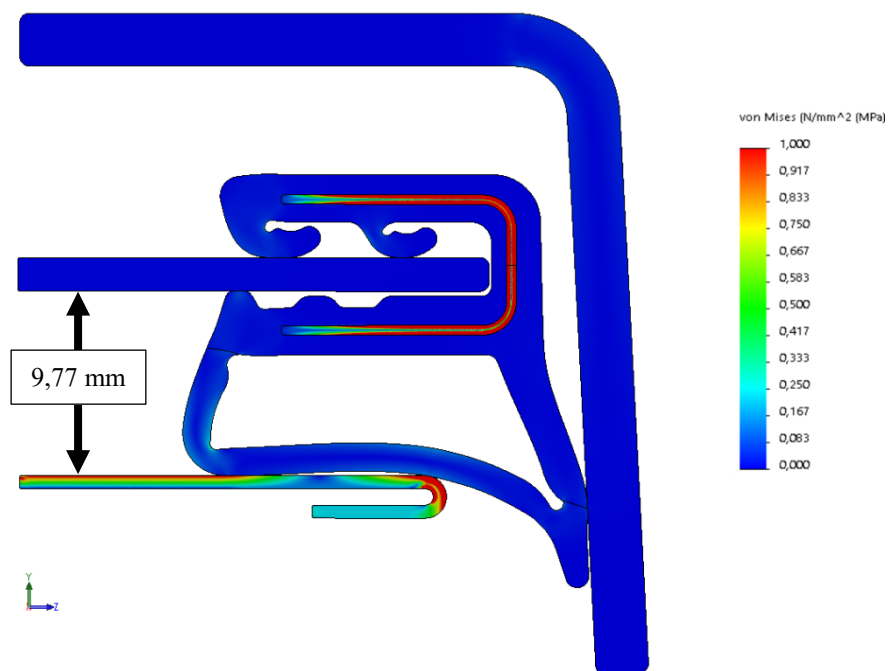
Obr. 129: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 11,77 mm, upravené měřítko



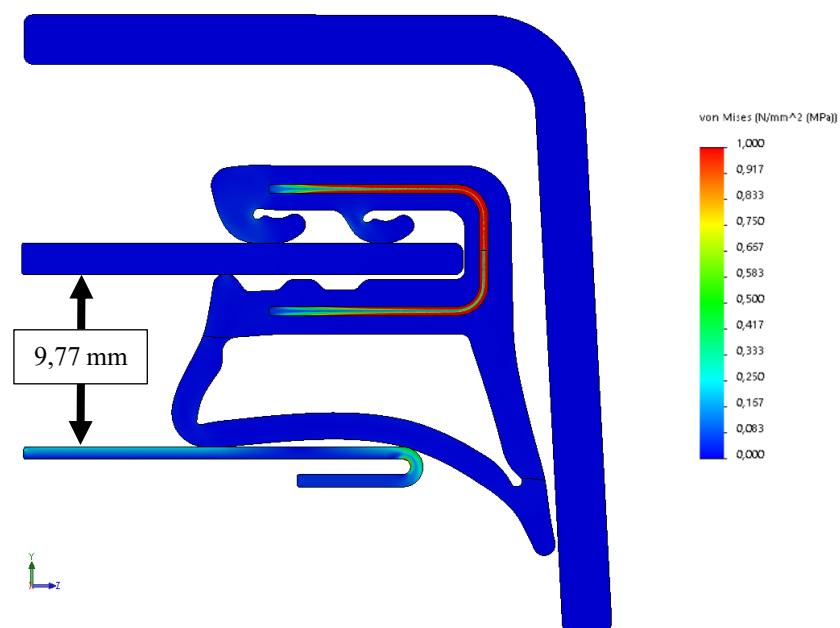
Obr. 130: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko



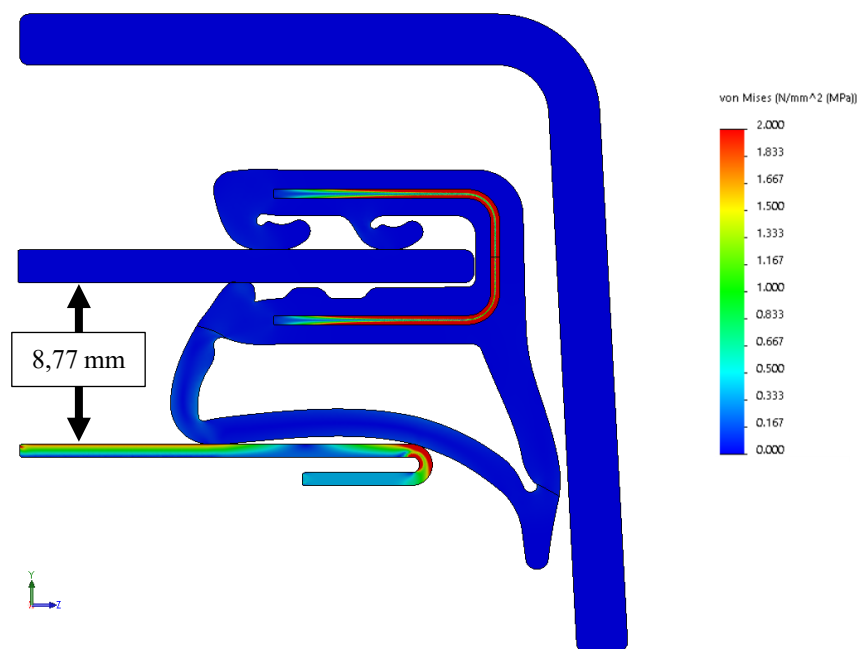
Obr. 131: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 12,77 mm, upravené měřítko



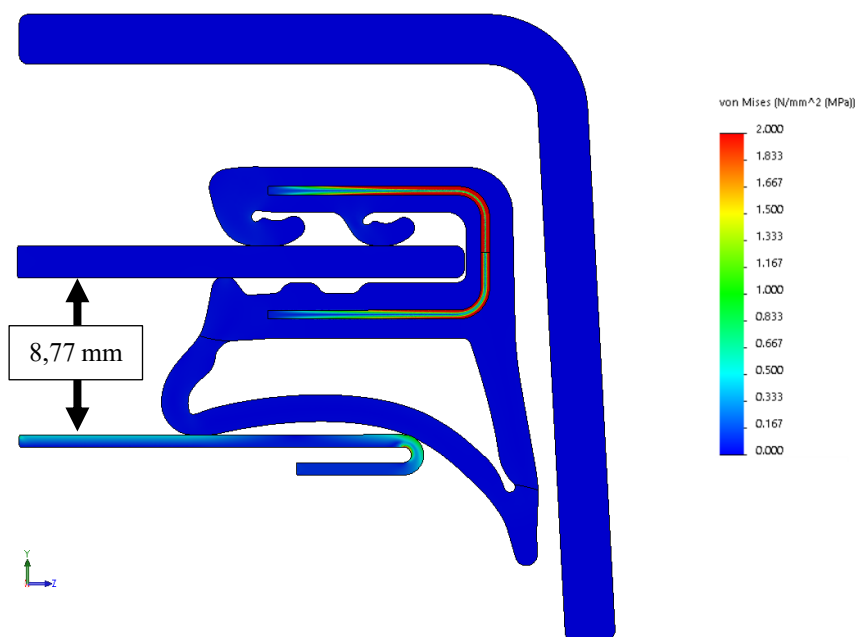
Obr. 132: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko



Obr. 133: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 9,77 mm, upravené měřítko

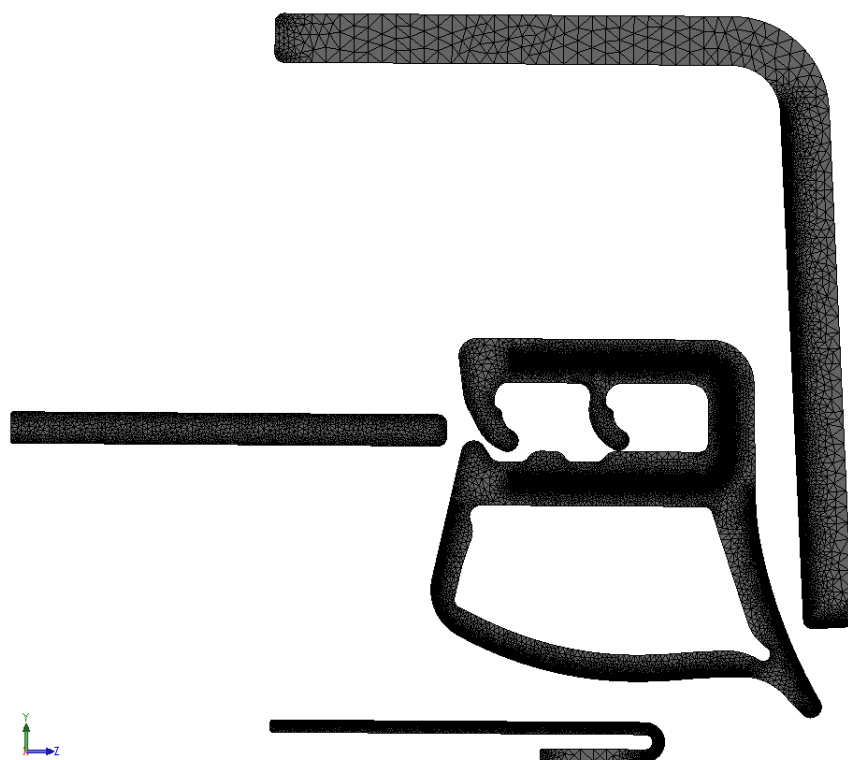


Obr. 134: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní + mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko

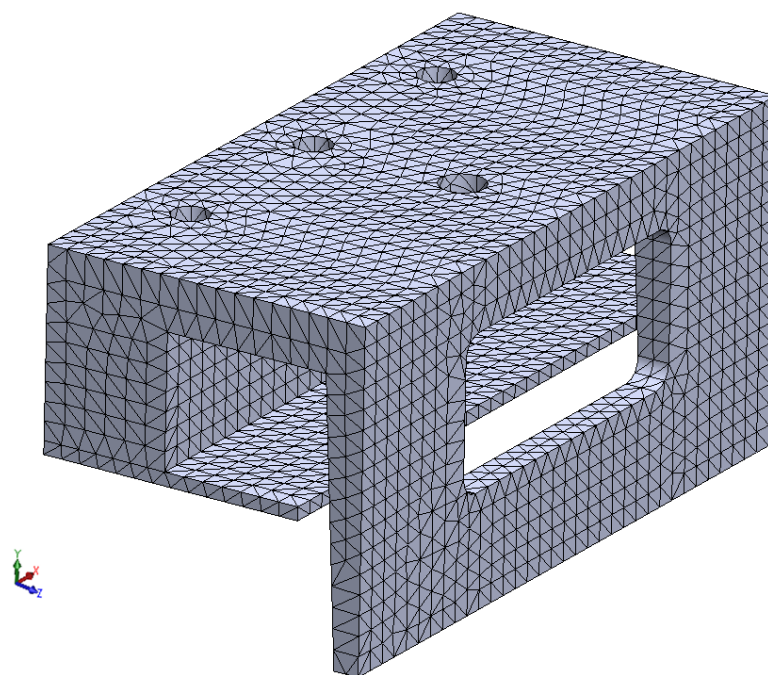


Obr. 135: Redukované napětí těsnění – Mooney-Rivlin (homogenní EPDM) + Ogden (mikroporézní EPDM), spára 8,77 mm, upravené měřítko

Příloha B: Síť konečných prvků



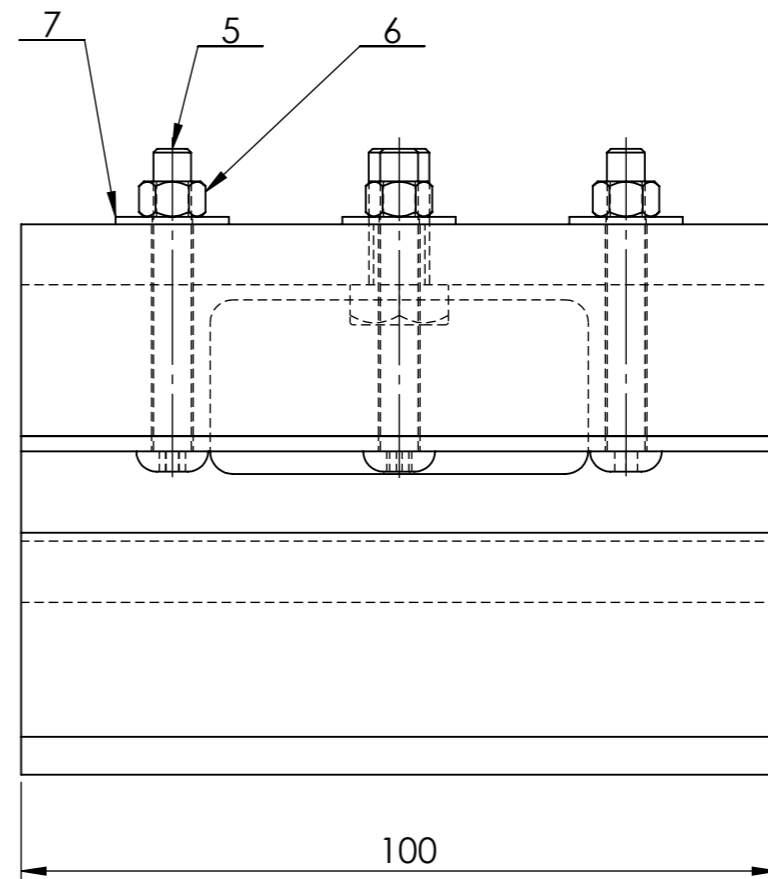
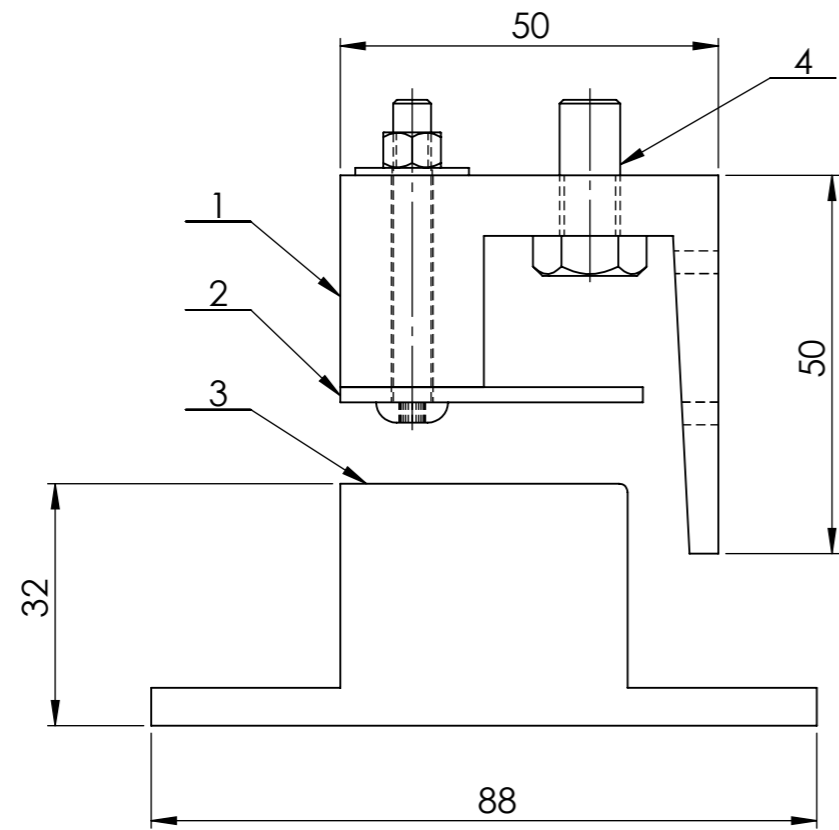
Obr. 136: Síť konečných prvků pro výpočtové modely těsnění



Obr. 137: Síť konečných prvků pro tuhostní analýzu přípravku

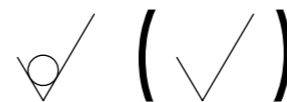
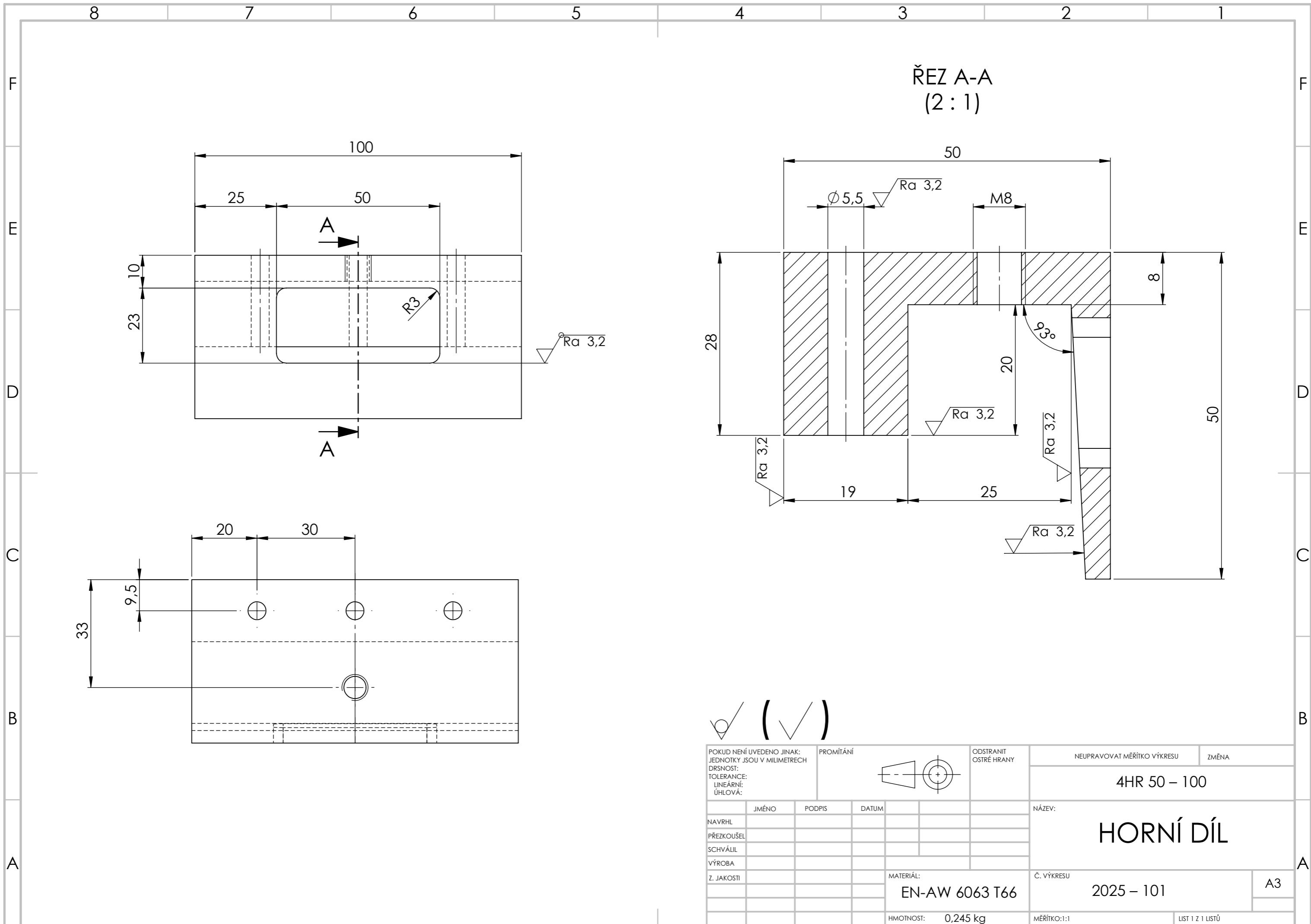
Příloha C: Výkresová dokumentace

- 2025 – 100: Přípravek
- 2025 – 101: Horní díl
- 2025 – 102: Montážní plech
- 2025 – 103: Spodní díl



7	PODLOŽKA 5	ČSN 021726.10	3	0,001
6	MATICE M5	ČSN 021401	3	0,001
5	ŠROUB M5 x 40	ČSN 021103.50	3	0,007
4	ŠROUB M8 x 18	ČSN 021103.55	1	0,013
3	SPODNÍ DÍL	2025 – 103	1	0,398
	PLO 100 x 32 – 100	EN-AW 6063 T66		
2	MONTÁŽNÍ PLECH	2025 – 102	1	0,021
	P 2 – 100 x 40	EN-AW 6060 T66		
1	HORNÍ DÍL	2025 - 101	1	0,245
	4HR 50 – 100	EN-AW 6063 T66		
Číslo pol.	Název – označení	Výkres – norma	Množ.	Hmot. [kg]
	Polotovar	Materiál	Jed.	

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		PROMÍTÁNÍ	ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:					
NAVRHL	JMÉNO	PODPIS	DATUM	NÁZEV:	
PŘEZKOUSEL				PŘÍPRAVEK	
SCHVÁLIL					
VÝROBA				Č. VÝKRESU	A3
Z. JAKOSTI				2025 – 100	
				MĚŘÍTKO: 1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ
				HMOTNOST: 0,686 kg	



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		PROMÍTÁNÍ		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST:						4HR 50 – 100			
TOLERANCE:						NÁZEV:		HORNÍ DÍL	
LINEÁRNÍ:						MATERIÁL:		EN-AW 6063 T66	
ÚHLOVÁ:						HMOTNOST:		0,245 kg	
						Č. VÝKRESU:		2025 – 101	
						MĚŘÍTKO: 1:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ	
NAVRHL		JMÉNO		PODPIS		DATUM		A3	
PŘEZKOUSEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									

4 3 2 1

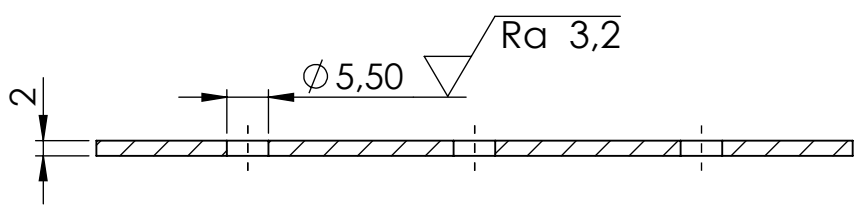
F

F

ŘEZ A-A

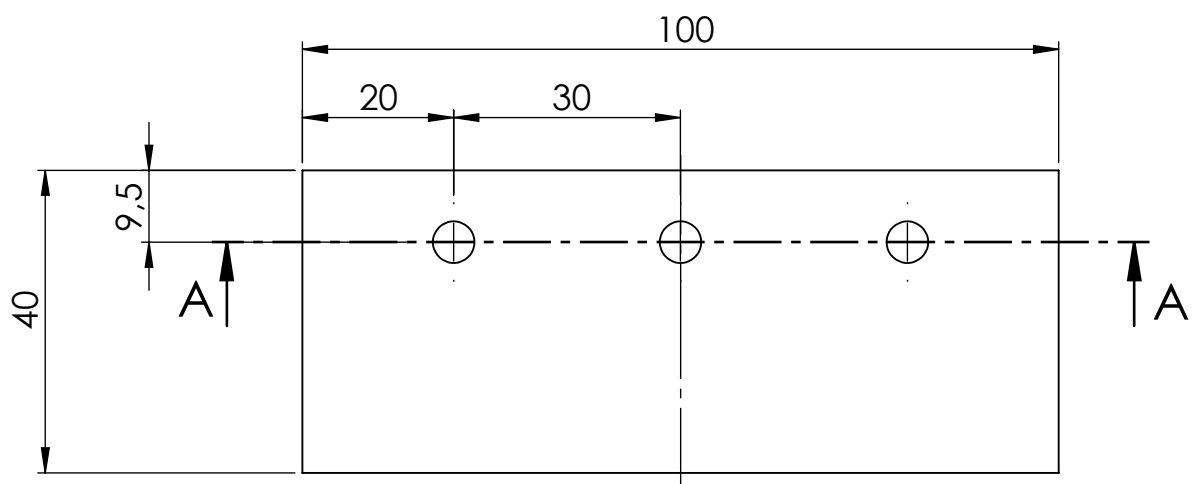
E

E



D

D

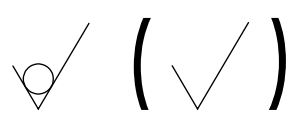


C

C

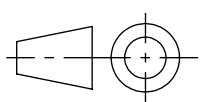
B

B



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

PROMÍTÁNÍ



ODSTRANIT
OSTŘÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

P 2 – 100 x 40

A

A

JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL		
PŘEZKOUSĚL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		

NÁZEV:	<h1>MONTÁŽNÍ PLECH</h1>	
Č. VÝKRESU	2025 – 102	A4
HMOTNOST:	0,021 kg	MĚŘÍTKO: 1:1
		LIST 1 Z 1 LISTŮ

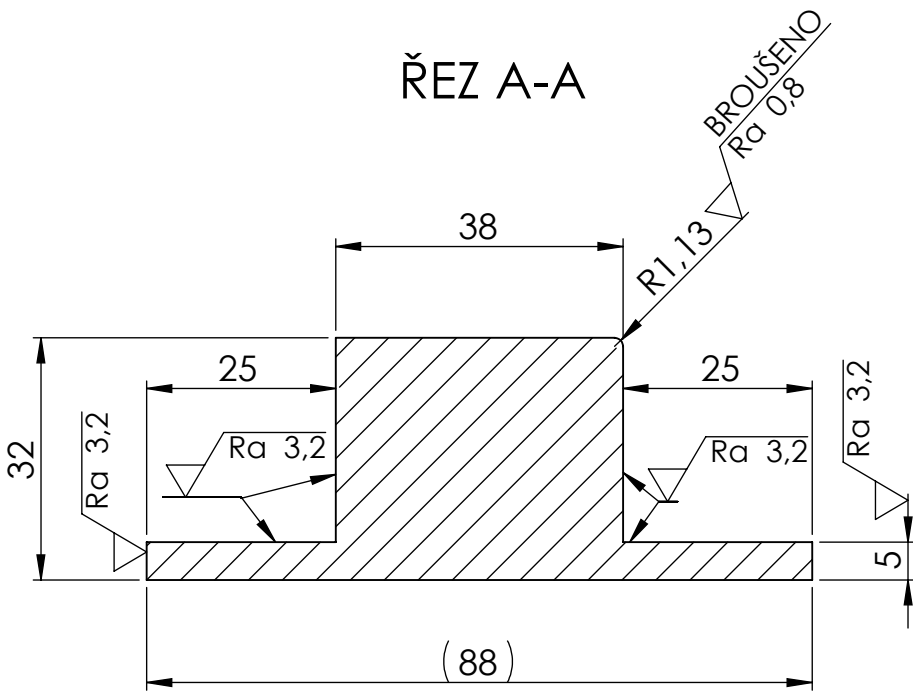
4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

ŘEZ A-A



E

E

D

D

A

A

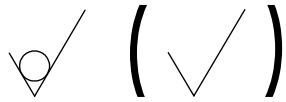
100

C

C

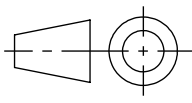
B

B



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

PROMÍTÁNÍ



ODSTRANIT
OSTŘÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

PLO 100 x 32 – 100

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL			
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:

SPODNÍ DÍL

MATERIÁL:
EN-AW 6063 T66

Č. VÝKRESU

2025 – 103

A4

HMOTNOST: 0,398 kg

MĚŘÍTKO: 1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ

4 3 2 1

A

A