



# Akustická analýza procesu zadírání plechů

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály  
*Autor práce:* **Bc. Martin Najman**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Najman**  
Osobní číslo: **S16000293**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**  
Název tématu: **Akustická analýza procesu zadírání plechů**  
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Základní typy ochranných povlaků plechů určených pro tažení výlisků.
2. Tribologie v tvářecích procesech, význam tření při tváření. Přehled zkoušek používaných pro hodnocení tribologických vlastností plechů.
3. Základy zpracování akustického signálu.
4. Experimentální zjištění možnosti analýzy procesu zadírání hlubokotažných plechů pomocí akustického signálu. Návrh metodiky měření a vyhodnocení experimentu.
5. Vyhodnocení navrženého řešení.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- [1] PÖHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.  
[2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.  
[3] MANG, T. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Berlin: Springer-Verlag, 2014. 2064 s. ISBN 978-3-642-22646-5.  
[4] TRACTON, A.A. *Coating materials and surface coatings*. London: Taylor & Francis Group, 2007. 464 s. ISBN 1-4200-4404-4.  
[5] BLÁŠKOVIČ, P., BALLA, J. a DZIMKO, M. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. 360 s. ISBN: 80-05-00633-0.  
[6] GEIST, B. *Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005. s. 282, ISBN 80-86253-31-7.  
[7] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8.  
[8] VLACHÝ, V. *Praxe zvukové techniky*. 3. vyd. Praha: Muzikus, 2008. s. 297, ISBN 978-80-8625-346-6.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



doc. Ing. Jafomír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta Strojní

Katedra strojírenské Technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Student: Martin Najman

**Téma práce:** Akustická analýza procesu zadírání plechů

**Abstrakt:** Diplomová práce se zabývá možností využití akustické analýzy pro monitorizaci procesu zadírání plechů s ochrannými povlaky zinku. Teoretická část diplomové práce je zaměřena na tribologické procesy a základní způsoby nanášení ochranných povlaků plechů používaných v automobilovém průmyslu. Dále jsou popsány základní pojmy z oblasti akustiky a zpracování akustického signálu. Experimentální část se zabývá analýzou zadírání plechů s ochrannými povlaky na bázi zinku a zinku v kombinaci s hořčíkem. Pro oba testované materiály je provedena analýza s využitím tenzometrického záznamu síly a analýza pomocí akustického signálu.

**Klíčová slova:** Ochranný povlak, tribologie, akustika, zadírání plechů

**Title of Thesis:** Acoustic analysis of the Galling Process for Sheets

**Abstract:** Diploma thesis deals with the acoustic analysis utilization for monitoring the galling process of zinc coated sheets. Theoretical part of this thesis is focused on the tribological processes and basic methods of protective coatings deposition on sheets used in the automotive industry. Moreover, there are described basic terms from branch of acoustic and acoustic signal processing. Experimental part is about the analysis of galling process for sheets with protective coatings on the basic of zinc and zing in combination with magnesium. For both tested materials (Zn, Zn-Mg) there was performed analysis using the strain-gauge record of force and analysis by means of acoustic signal.

**Key words:** Protective Coating, Tribology, Acoustic, Galling of Sheets

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mě podporovali a pomáhali mi při vytváření diplomové práce.

Jmenovitě vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc, panu Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za pomoc s měřením.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Teoretická část .....</b>	<b>7</b>
2.1. Povlaky .....	7
2.1.1 Žárové zinkování (HDG – Hot-dip galvanizing).....	7
2.1.2 Elektrolytické zinkování (EG – Electrolytic galvanizing).....	9
2.1.3 Konverzní fosfátové povlaky.....	10
2.2. Tribologie.....	14
2.2.1. Kontaktní procesy .....	14
2.2.2. Procesy tření .....	15
2.2.3. Tribologické zkoušky - tribometrie .....	19
2.2.4. Problematika zadírání .....	24
2.3. Akustika .....	26
2.3.1. Zvuk .....	26
2.3.2. Pořízení zvukového záznamu .....	28
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>41</b>
3.1. Cíle práce .....	41
3.2. Analýza procesu zadírání pomocí silové odezvy.....	42
3.2.1. SOKOL 400 .....	42
3.2.2. Podmínky testu .....	44
3.2.3. Volba testovaného materiálu .....	45
3.2.4. Materiál nástroje na tažení .....	46
3.2.5. Postup měření .....	47
3.2.6. Výstupy testů .....	47
3.3. Zvuková analýza procesu zadírání.....	56
3.3.1. Postup měření .....	57
3.3.2. Výstup z měření .....	57

<b>4. Závěrečné výsledky .....</b>	<b>91</b>
4.1. Materiál HX300LAD Z100 – 1 mm/s.....	91
4.2. Materiál HX300LAD Z100 – 10 mm/s.....	92
4.3. Materiál HX180BD ZM90 – 1 mm/s.....	92
4.4. Materiál HX180BD ZM90 – 10 mm/s.....	93
<b>5. Závěr .....</b>	<b>94</b>
<b>6. Seznam použité literatury .....</b>	<b>96</b>
Příloha 3 .....	118
Příloha 3.1: Protokol pro materiál HDG při 1 mm/s.....	118
Příloha 3.2: Protokol pro materiál HDG při 10 mm/s.....	119
Příloha 3.3: Protokol pro materiál ZM při 1 mm/s .....	120
Příloha 3.1: Protokol pro materiál ZM při 10 mm/s .....	121



## Použité zkratky

HDG	žárově nanesený zinek
ZM	žárově nanesený zinek – hořčík
EG	elektrolyticky nanesený zinek
SW	software

## 1. Úvod

V průběhu let postupně vzrůstají požadavky spotřebitelů na jakost protikorozi ochrany automobilových karoserií, neboť je známo, že životnost moderního automobilu je do značné míry ovlivněna životností ocelové karoserie. Z tohoto důvodu nacházejí stále větší uplatnění plechy s ochrannými povlaky na bázi zinku. Mimo ochranných povlaků ze samotného zinku se v praxi začínají objevovat povlaky ze sloučenin zinku, např. zinek – hořčík.

Kvalita takovýchto plechů pak musí přetrvat i proces lisování. To se týká nejen možného vzniku trhlin nebo tvarových nepřesností, ale v neposlední řadě také schopnosti další protikorozi ochrany. To není v dnešní době, kdy se kladou vysoké nároky, ať už z hlediska složitosti tvarů nebo náročných procesních parametrů (vysoké tlaky, rychlosti), ničím jednoduchým.

V některých případech tak dochází k porušení povlaků a ztrátě antikorozi ochrany. Jsou tak kladeny požadavky na výzkumy, jejichž výsledky by přinesly nové metody, jak požadovanou vysokou kvalitu efektivně udržovat.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Povlaky

V posledních letech značně vzrostly požadavky spotřebitelů na jakost protikorozní ochrany automobilových karoserií, neboť je známo, že životnost moderního automobilu je do značné míry ovlivněna životností ocelové karoserie. Pro splnění požadavků, které jsou na ochranné povlaky kladeny, tj. ochrana před účinky koroze, zabezpečení dobrého vzhledu, je třeba, aby byly povlaky nanášeny na kovově čistý a vhodně upravený materiál. Životnost ochranného povlaku a jeho ochranná účinnost, je v první řadě závislá na dokonalé vazbě systému: povlak – základní materiál a na tvářitelnosti povrchové vrstvy. Trvalá je snaha zlepšovat vlastnosti povlaků, metody jejich přípravy. Velká pozornost se věnuje zjišťování ztráty vlastností povlaků při vlastním tváření plechů. V automobilovém průmyslu se nejvíce uplatňují plechy s povlaky na bázi zinku. Zinek je vhodný především svou relativně nízkou cenou, výbornou korozní ochranou, svými elektrochemickými vlastnostmi poskytuje ocelovému podkladu katodickou ochranu. Na výrobu karoserií se využívají ocelové plechy s povlakem:

- žárově zinkovaným (HDG, ZM),
- elektrolyticky zinkovaným (EG),
- elektrolyticky zinkovaným a fosfátovaným (EG + PH) [1].

#### 2.1.1 Žárové zinkování (HDG – Hot-dip galvanizing)

Ocelové součásti po zbavení mastnot, okují, rzi a jiných nečistot nořeny do roztaveného zinku. Na povrchu oceli se vytvoří povlak s různým podílem slitinových fází zinek – železo a vnější vrstvou čistého zinku. Metoda se nejvíce používá pro dlouhodobou protikorozní ochranu. [4]

##### 2.1.1.1 Suchý způsob neboli suché zinkování

Po odmaštění, moření a oplachu se součást ponoří do tavidlové lázně, což je vodný roztok chloridu zinečnatého a chloridu amonného a následně se usuší. Na povrchu součásti se vytvoří tenká vrstva tavidla, která brání oxidaci. Vrstva tavidla také čistí hladinu roztaveného zinku od oxidu při ponořování součásti. Před ponořením a vynořením součásti se z hladiny roztaveného zinku stírá popel ze spáleného tavidla a oxidy zinku. Po vytažení ze zinku se zinkovaná součást ochladí ve vodě nebo na vzduchu. [4]

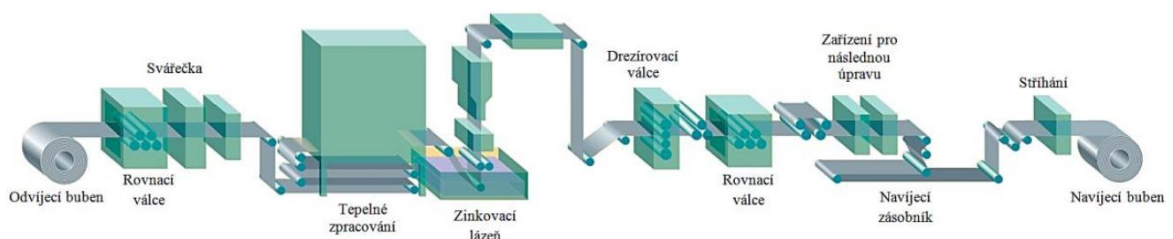
### 2.1.1.2 Mokrý způsob neboli mokré zinkování

Při mokrému způsobu je hladina zinkovací lázně rozdělena přepážkou na dvě části. V jedné části se na hladině zinkové lázně nachází vrstva tavidla – chloridu amonného. Ihned po odmaštění a odmoření se součást zanořuje přes vrstvu tavidla do zinkové lázně. Poté se součást protáhne zinkovou lázní s částí s tavidlem do části, kde je čistá a volná hladina. Z jejího povrchu se stírá popel ze spáleného tavidla a oxidy zinku. Po vytažení ze zinku se součást ochladí na vzduchu nebo ve vodě.

Obě výše uvedené metody poskytují z hlediska kvality a úrovně protikorozní ochrany zcela rovnocenné povlaky. Suchý způsob je nejběžnější, protože se dá snáze mechanizovat. [4]

### 2.1.1.3 Žárové zinkování ocelového pásu

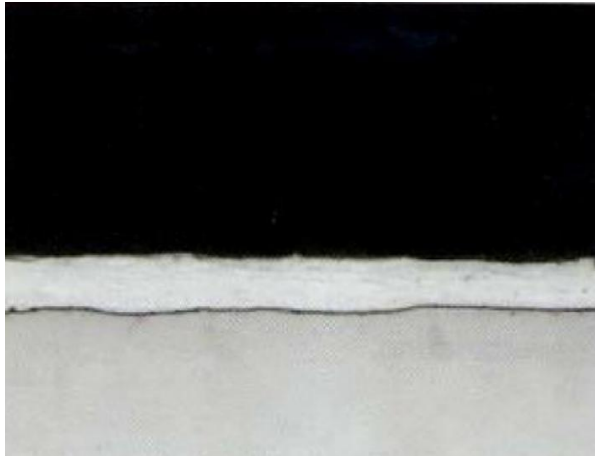
Zinkování tenkých plechů probíhá kontinuálně, celý proces je propojen do uzavřeného systému. Za studena válcovaný plech ve svitcích je v průběhu procesu svařován a vzniká tak nekonečný pás (obr. 2.1). Po odmaštění je nutné pás mořit nebo oxiduje. Potom se povrch redukcí při 950 °C zbaví oxidu a současně s tím probíhá změkčovací žíhání oceli. Kovově čistý pás se nachází v ochranné atmosféře až ke vstupu do zinkovací lázně. Po několika sekundách v zinkovací lázni vystupuje pás kolmo vzhůru kde prochází mezi, tzv. vzduchovými stíracími noži, ty jemným proudem vzduchu nebo páry stírají zinkový povlak na požadovanou tloušťku. Pás dále putuje přes ochlazovací sekci, rovnání a úpravu, kde se provádí ochrana proti vzniku bílé rzi. Dále je pás veden k formátovacím nůžkám, navíjí se na svitky pro expedici nebo pro další povlakování plastem, organickým povlakem nebo k dalšímu tváření. [4]



**Obr. 2.1:** Kontinuální žárové zinkování plechu [3]

Plech s tímto typem povlaku jsou vhodné pro hluboké tažení i tak náročných dílů jako jsou karosářské výlisky. Velice dobrá jakost povrchu (homogenní, řízená textura) vzniklá žárovým pozinkováním umožňuje použití na viditelné lakované díly, na které se v automobilovém průmyslu kladou nejvyšší nároky. Díky elasticitě zinkové vrstvy je

vyloučeno riziko jejího popraskání. Podélný rez plechu s vrstvou zinkového povlaku je znázorněn na obrázku 19. [3]

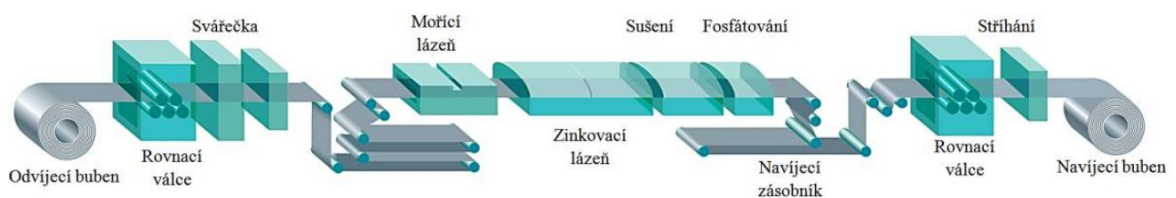


**Obr. 2.2:** Podélný rez vrstvou žárově pozinkovaného povrchu, zvětšeno 1000x [2]

### 2.1.2 Elektrolytické zinkování (EG – Electrolytic galvanizing)

Ocelový povrch se nejprve odmastí a pak očistí od okují a rzi mořením. Často se spojuje předúprava s elektrolytickým odmašťováním. Součást se zavěsí do vodného roztoku zinečnaté soli (elektrolyt) a zapojí se jako katoda ke zdroji stejnosměrného proudu. Jako anoda se zapojí desky z čistého zinku (elektrolytický zinek 99,995 %). Elektrolyt může být kyselý, neutrální nebo alkalický a podle toho se volí druh zinečnaté soli. Jakmile se zapojí proud, rozpouští se zinek z anody a ve formě zinečnatých iontů putuje ke katodě, kde se vylučuje na povrchu součásti. [4]

Větší předměty se běžně zavěšují na přípravky (závěsy, háky atd.), zatímco menší předměty (šrouby, matice, kování atd.) se pokovují v bubnech. Přípravky nebo bubny se pohybují mezi různými lázněmi – často s pomocí programovatelných robotů. Jinak je tomu u pásů plechů, ty jsou odvíjeny skrz speciální linky viz obrázek 2.3.



**Obr. 2.3:** Zjednodušené schéma linky pro elektrolytické zinkování [3]

Vytvořená vrstva zinku (obr. 2.4) má velmi jemnozrnnou strukturu a na povrchu oceli drží pouze mechanicky. Normalizované tloušťky povlaku jsou 3, 5, 8, 12 nebo 20 mikrometru ( $\mu\text{m}$ ). Běžně se používá 5 až 8  $\mu\text{m}$ . Tenké povlaky se používají především na

hromadném zboží, zatímco tlustší povlaky ( $> 20 \mu\text{m}$ ) se zpravidla dají vytvořit pouze na zboží s jednoduchou geometrií, například na drátu. Pro tloušťky větší než  $15 \mu\text{m}$  je často ekonomičtější zboží pozinkovat žárově.

Při elektrolytickém pozinkování se dosahuje velmi čisté a tudíž tvárné (houževnaté) Zn vrstvy, která odolává i značným přetvořením. Použití takto povrchově upravených materiálů souvisí s jejich odolností proti korozi. Na základě elektrochemických zákonitostí dvojice železo-zinek (efekt obětované anody) nabízí povlak výbornou korozní ochranu dokonce, i když je poškozen (např. poškrábáním). Při zpracování ocelí s EG povlaky se zinkový povlak vyznačuje velmi dobrou tvářitelností a je proto vhodný k hlubokému tažení. Morfologie povrchu plechu u elektrolyticky zpracovaných materiálů není tak výrazná z toho důvodu, že zinková vrstva kopíruje morfologii základního materiálu, který je již po finálním drezírovacím válcování. Na základě nepříznivých tribologických vlastností (v porovnání s povlaky nanášenými ponořováním do lázně) je vhodná úprava tohoto povlaku fosfátováním, zejména u obzvláště náročných výlisků. Fosfátová vrstva zaceluje krystaly zinku, čímž snižuje jejich sdíráání a zároveň v kombinaci s olejem napomáhá samotnému tažení. [3] [4]



**Obr. 2.4:** Podélný rez elektrolyticky pozinkovaného povrchu, zvětšeno 1000x [2]

### 2.1.3 Konverzní fosfátové povlaky

Fosfátové povlaky jsou jedním z nejrozšířenějších typů konverzních povlaků a pravděpodobně nejrozšířenějším typem povrchové úpravy. Fosfátovací proces lze definovat jako povrchovou úpravu kovového materiálu za současného vytvoření nevodivé, nerozpustné, adherentní konverzní vrstvy zlepšující vlastnosti povrchu. Povlak je výsledkem série chemických reakcí, během kterých se část podkladového kovu stává součástí odolnějšího filmu. Používá se k povrchovým úpravám oceli, hliníku a zinku pro:

- Tváření za studena: při procesu dochází k velmi vysokému namáhání povrchu a fosfátování je používáno ve všech typech operací tváření za studena, tj. tažení drátů, trubek nebo profilů; hluboké tažení; vytlačování; kování.
- Kontinuálně zpracovávané kovy: elektrolyticky zinkované ocelové pásy jsou fosfátovány v lince, aby se zvýšila zpracovatelnost v následujících tvářecích operacích, jako je lisování plechovek, ale i pro zvýšení korozní odolnosti a následného nanášení nátěrů.
- Korozní odolnost: silné povlaky zinečnatého nebo manganatého fosfátu vážou ochranný olejový film a poskytují doplňující protikorozní ochranu, např. pro matky, šrouby, nýty a trubky.
- Mazání povrchů ložisek: manganatý fosfát zvyšuje množství adsorbovaného maziva a zkracuje dobu záběhu. Používá se pro ozubená kola, hřídele, písty, převodovky a ventily
- Podklad pro nátěry: fosfáty zvyšují adhezi a korozní odolnost nátěru.
- Elektrická izolace: fosfátové povlaky mohou být použity jako vrchní vrstva na pleších z křemíkové oceli tvořící rotory elektrických motorů, generátorů nebo transformátorů. [5]

Fosfátové povlaky jsou obvykle nanášeny dvě způsoby. Podle počtu, velikosti a tvaru zpracovávaných dílů je povlak nanášen buď postříkem nebo ponorem. Podle způsobu aplikace mohou vznikat rozdíly ve složení a morfologii fosfátových povlaků. Kontinuálně zpracovávané pásy plechů jsou fosfátovány procesem navalování a vysušení, kde je fosfatizační roztok nanášen na pás a dále, bez oplachu, je vysušen za vzniku fosfátového povlaku. Základní mechanismus konvenční fosfátovací lázně je založen na vylučování nerozpustných terciárních fosforečnanů kovů z vodných roztoků kyseliny fosforečné s alkalickými solemi s jedním, či více kovovými kationty na povrch součásti. Lázeň tedy obsahuje kyselinu fosforečnou, dihydrogenfosforečnany vhodných kovů (zvolený s ohledem na povlakovaný materiál) a látky usnadňující tvorbu povlaku zvané urychlovače (akcelerátory) a katalyzátory. Komerční lázně dále obsahují doplňkové látky, které zaručují kompaktnost povlaku a stabilitu lázně, např. tenzidy. [6]

Před fosfátováním je nutné provést předúpravy povrchu jako je odmaštění, odmoření a v poslední řadě aktivace. Aktivace před fosfátování se provádí horkou vodou nebo speciální disperzí fosfátu titanu nebo manganu. Aktivace podporuje vznik jemné

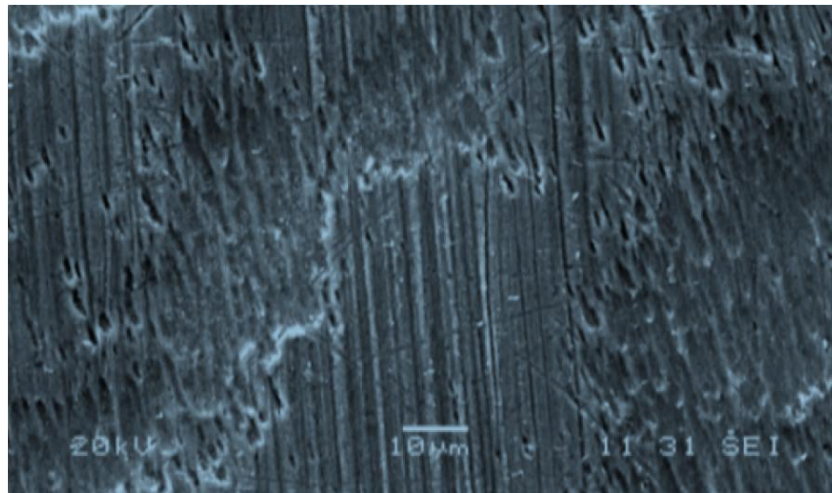
krystalické struktury následně vytvořeného fosfátového povlaku. Mezi jednotlivými procesy se vždy provádí oplach vodou. Konečný oplach se provádí demineralizovanou vodou nebo pasivačním roztokem.

Fosfátové procesy mají mnoho variant, ale nejdůležitější z hlediska použitelnosti pro tažené plechy jsou železnaté a zinečnaté fosfátování. [7]

### **2.1.3.1 Železnaté fosfátování**

Lázně železnatého fosfátování jsou svým složením, a s tím souvisejícími vylučovanými povlaky, nestandardní. Jsou tvořeny vždy alkalickými dihydrogenfosforečnany, především pak solemi sodnými, draselnými případně amonnými. Povlaky železnatého fosfátu tvoří namodralý, někdy iridiscentní duhový povlak, který může přecházet na modrošedý až šedý, podle jeho zvyšující se tloušťky. Železnaté fosfátování se dělí na tenkovrstvé (plošná hmotnost od 0,1-0,5 g.m<sup>-2</sup>) a silnovrstvé (plošná hmotnost 0,5 - 1,5 g.m<sup>-2</sup>). Skutečná tloušťka povlaků se pohybuje obvykle okolo 300 nm a nepřekročí u nejsilnějších vrstev 1 μm. Urychlované lázně tohoto druhu fosfátování pracují obvykle při teplotách 60 - 70 °C a expoziční čas u ponorové technologie bývá okolo 5 minut. Železnaté fosfátování je velice levné a oproti ostatním fosfátovacím technologiím je jednoduché z pohledu kontroly optimálního složení pracovních lázní. Kdy postačí pouze udržovat optimální hodnoty pH lázně a dávkování koncentráту. Nevýhody jsou naopak v nižší korozní odolnosti povlaků železnatého fosfátu oproti ostatním fosfátovým povlakům. Proto jsou využívány zejména pro dobré ukotvení nátěru všude tam, kde jsou nižší nároky na systém protikorozní ochrany výrobků. Uplatnění nachází při lakování, tzv. „bílé techniky“, pro ukotvení laků z práškových plastů, jako mezioperační pasivace povrchů oceli. Silnovrstvé železnaté fosfátování se vlastnostmi povlaku blíží fosfátování zinečnatému. [7]

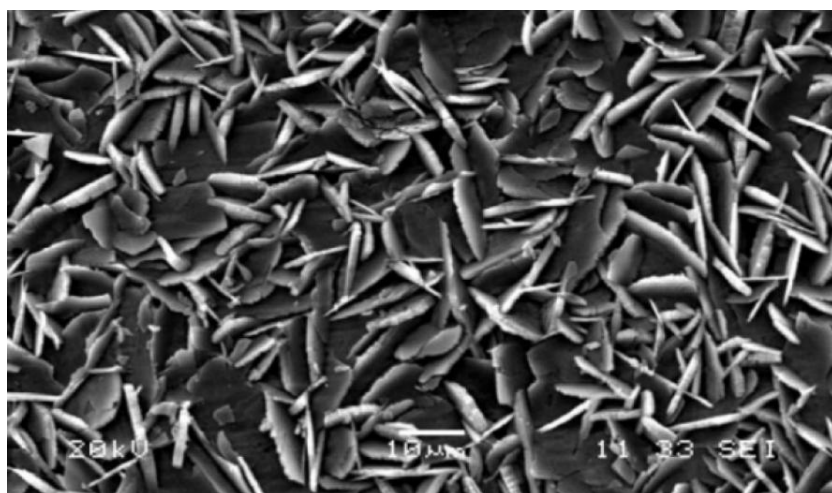




**Obr. 2.5:** Povrch železnatého fosfátu [8]

### 2.1.3.2 Zinečnaté fosfátování

Zinečnaté fosfátování je především používáné pro povrchovou úpravu oceli, zinku nebo zinkových povlaků na oceli, popřípadě sloučenin těchto kovů s hliníkem. Fosfatizační lázeň obsahující dihydrogenfosforečnan zinečnatý umožňuje silnější film minerálu hopeitu krystalizujícího v orthorombické krystalové soustavě. Vzniká tak typické lupenité zrna (obr. 2.6) V případě ocelového podkladu je v malém množství obsažen v povlaku také minerál fosfofylit, krystalující v monoklinické soustavě. Hodnota pH se pohybuje mezi 2 a 3,5. Obvyklá aditiva jsou dusičnany, fluoridy, fluorokřemičitany, ionty niklu nebo manganu. Doba expozice odpovídající vyloučení vrstvy o plošné hmotnosti  $1-10 \text{ g.m}^{-2}$  je přibližně 3-10 minut při teplotě roztoku  $40-70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zinečnatý fosfát je v praxi nejčastěji využíván jako podklad pod organické povlaky, elektroizolační vrstva nebo pro usnadnění tažení drátů. [8] [9]

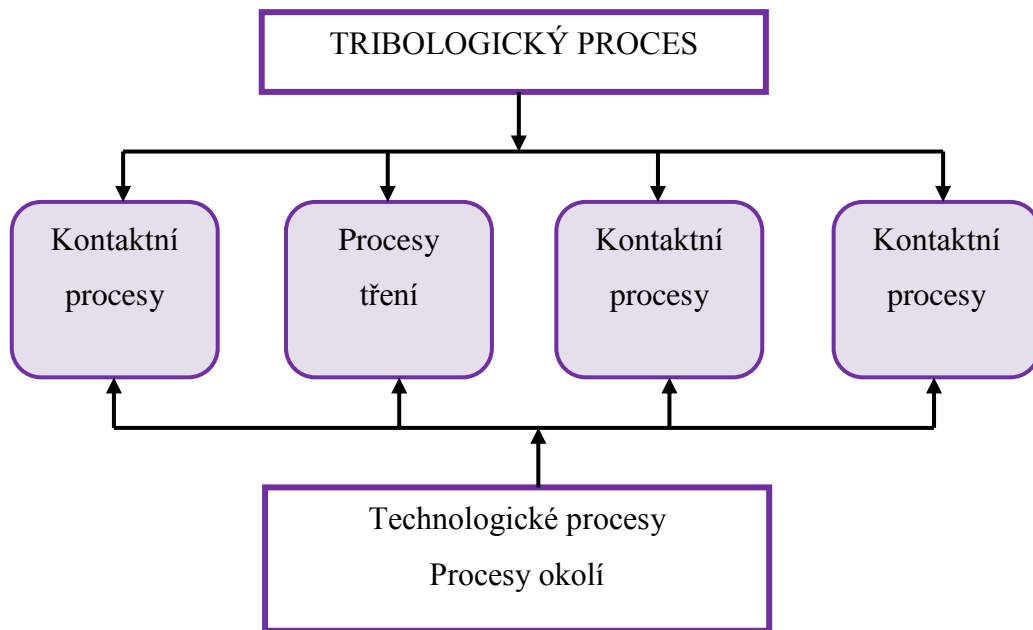


**Obr. 2.6:** Povrch zinečnatého fosfátu [8]

## 2.2. Tribologie

Tribologie je samostatná vědecká disciplína zabývající chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu nebo při pokusu o něj. Tento pohyb je buď obecně kluzný, valivý, nárazový nebo kmitavý. Ve skutečnosti se často uplatňují dva i více druhů pohybu současně. Souhrnně lze říci, že tribologie se zabývá třením, opotřebením a mazáním.

Tribologický proces charakterizují materiální interakce třecích těles, mezilátky a okolí, které probíhají v prostoru a čase. Obecné vazby mezi jednotlivými částmi tribologickými procesy jsou znázorněny na obrázku 2.7. [10]



**Obr. 2.7:** Vzájemné vazby v tribologickém systému [10]

Při tribologických procesech se řeší především:

- mechanismy přeměny užitečných veličin v systému,
- fyzikální procesy přeměny energie,
- procesy vedoucí všeobecně ke ztrátám v systému,
- možnosti pozitivního působení na systém s ohledem na minimalizaci ztrát.

### 2.2.1. Kontaktní procesy

Kontakt mezi jednotlivými členy tribologického systému je základním znakem chování tribologického systému. Při kontaktních procesech je třeba uvažovat se základními tvarově-rozměrovými a materiálovými vlastnostmi dotýkajících se částí, jejich vzájemnou vazbou a reakcích mezi nimi. Tyto interakce mohou být materiálové, fyzikální, chemické, atd. Vzhledem k velkému počtu kontaktních situací je třeba zvažovat řadu vlivů:

- počet těles zúčastňujících se na kontaktním procesu,
- makrogeometrii a mikrogeometrii kontaktních těles,
- fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těles tvořících tribologický systém,
- charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy,
- typ a rychlost vzájemného relativního pohybu.

Při řešení tribologických problémů v praxi má velký význam plocha styku, jež zprostředkuje přenos pohybu. Nerozhoduje však geometrická plocha, ale skutečná plocha styku, jež je menší a jen výjimečně se rovná geometrické ploše. [11]

### **2.2.2. Procesy tření**

Tváření kovů je založeno na působení nástroje na tvářený polotovar. Silovým účinkem nástroje kloužou přemísťované částice kovu po pracovní ploše nástroje, což vyvolává vznik třecích sil, které tento klouzavý pohyb brzdí a tím ovlivňují průběh deformace v celém tvářeném tělese.

Při tažení má vyvolané tření za následek nárůst tažné síly až o 20-30 %. Tření samotné způsobuje ořez, opotřebení činných částí nástroje a ovlivňuje také mezní hodnoty stupně tažení. Abychom snížili vznikající tření je nezbytné použít vhodný druh maziva. S tím dále souvisí i problematika zadírání. Zadírání je jev běžně se vyskytující v technologii tažení a podstatně ovlivňuje konečnou kvalitu pohledových dílu. [11]

Obecně je tření jev, mající charakter procesu, který se váže na vzájemný relativní pohyb dvou dotýkajících se prvků tribologického systému. Jedna z nejnámějších obecných definic popisuje tření jako odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. Touto definicí lze přesně popsat tření vnější, avšak už ne tak přesně tření vnitřní. Obě tření lze tak lépe definovat jako ztrátu mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálůvých oblastí. [12] [13]

Tření při tvářecích procesech se podstatně liší od tření strojních součástí, a to především v těchto rozdílech:

- podstatně vyšší tlak na styčné ploše,
- neustálá změna tlaku v jednotlivých bodech styku vlivem plastické deformace, jednoho z těles, z toho plyne nerovnoměrné rozdělení tlaku,
- neustálá změna plochy styku během tvářecí operace,

- různé rychlosti pohybu tvářeného materiálu v různých bodech styku vlivem plastické deformace,
- různé směry pohybu tvářeného materiálu při plastické deformaci.

Tření podstatně ovlivňuje tvářecí proces, a to:

- ve spotřebě energie,
- ve velikosti deformačního odporu,
- ve velikosti opotřebení tvářecích nástrojů,
- v průběhu celého tvářecího pochodu,
- ve vlastnostech (mechanických) tvářeného polotovaru,
- ve velikosti výsledného silového účinku na nástroj,
- apod.

V technologických tvářecích pochodech můžeme rozeznávat dvojí úlohu vnějšího tření:

- Úloha pasivního činitele, projevující se v tom, že je brzděn rozvoj deformace, a že s pasivními odpory je spojena zvýšená spotřeba energie, potřebná na deformační proces a opotřebení nástrojů.
- Úloha aktivního činitele, projevující se v tom, že vnější tření umožňuje uskutečnit tvářecí pochod, jako je válcování, neboť podmiňuje záběr materiálu válci.

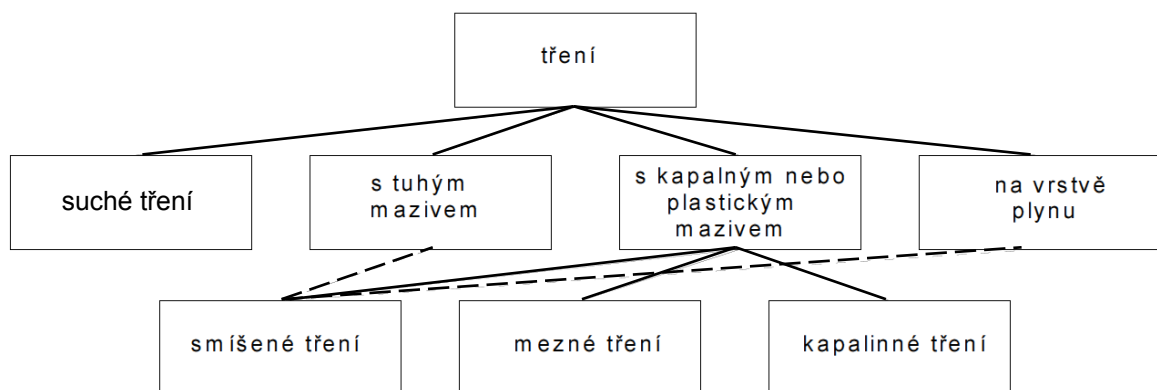
Pro posouzení velikosti vnějšího tření se zavádí součinitel vnějšího tření  $\mu$ , který závisí na několika faktorech. Těmi jsou:

- povrchová jakost pracovní plochy nástroje,
- povrchová jakost tvářeného kovu,
- chemické složení tvářeného kovu,
- tvářecí teplota (souvisí především s tvorbou okují),
- pracovní rychlost nástroje (s rostoucí rychlostí klesá),
- mazivo [12] [14].

Pokud vycházíme ze základního tribologického systému rozlišujeme tření dle toho, zda je mezi styčnými povrchy mazivo či jiná látka, nebo jde-li o styk tuhých těles bez maziva viz obr. 2.8. Rozlišujeme tedy:

1. Tření suché tření, nastává tehdy, kdy se určující materiálová oblast nachází v tuhém stavu, tento třecí stav se dále dělí na čisté tření tuhých těles (deformační tření) a na tření v adhezních vrstvách, stav čistého tření tuhých těles nastává především ve vakuu.
2. Tření kapalinové, charakterizuje ho stav, při kterém má vrstva materiálu, v které probíhá tření, vlastnosti kapaliny.
3. Tření plynné, je obdobou kapalinového tření s tím rozdílem, že charakteristická vrstva má vlastnosti plynu.
4. Tření plazmatické, je stav, kdy charakteristická vrstva, ve které probíhá třecí proces, má vlastnosti plazmy.

Jednotlivé třecí stavy se v praxi vyskytují samostatně ve velmi omezené míře. Ve skutečnosti nastává často kombinace jednotlivých druhů tření. [15]



**Obr. 2.8:** Rozdělení tření [15]

### 2.2.2.1. Suché tření

Nejvýraznější vliv na suché tření má vlastnost povrchů (velikost povrchu, mechanické vlastnosti, chemické složení, chemická reaktivita, nečistoty). Dochází k přímému styku dvou materiálů a vzniku sil bránících pohybu. Podle dnešních představ se tyto síly dělí na deformační a adhezní. V prvním se více uplatňuje mechanika, v druhém chemie. Při zhotovování vylisků nepravidelných tvarů je přítomnost suchého tření nežádoucí využíváno je pouze jako mechanismus přidržovače. [16]

### 2.2.2.2. Mezné tření

Nastává při mazání, kdy povrchy se nacházejí v bezprostřední blízkosti a k interakci dochází jen mezi jejími povrchovými nerovnostmi. Zatížení je přenášeno velmi tenkou vrstvičkou adsorbovaných molekul plynu nebo kapaliny nebo látky vytvořené

chemickou reakcí povrchů. K meznému tření může dojít i u záměrně mazaných povrchů, není-li přívod maziva dostatečný nebo vrstva maziva není dostatečně únosná. Za těchto podmínek se třecí plochy natolik přiblíží k sobě, že jejich bezprostřednímu styku brání již jen film polárních molekul maziva s velkou přilnavostí k povrchu – mezná vrstva. V technické praxi vzniká mezní tření v případech, kdy při malých stykových plochách jsou třecí povrchy zatěžovány velkými tlaky, při malých smykových rychlostech a mezi drsnými povrchy.

### 2.2.2.3. Kapalinové tření

Mezní filmy dosahují podstatného zmenšení třecí síly při relativním pohybu dvou těles a zabraňují tvorbě studených svarů, avšak nedokáží zcela oddělit třecí povrchy od sebe a eliminovat tak vliv drsnosti povrchů.

Dokonalého oddělení třecích povrchů se docílí až při kapalinovém tření, kdy jsou povrchy od sebe dostatečně vzdáleny a mezera mezi nimi je vyplněna vrstvou maziva nebo jiným kapalným médiem, které zcela vyrovnává drsnost povrchů a svým vlastním tlakem ruší účinek kolmého zatížení na povrchy těles. Třecí síla je tedy v podmínkách kapalinového tření závislá pouze na velikosti vnitřního tření v mazací vrstvě. [17]

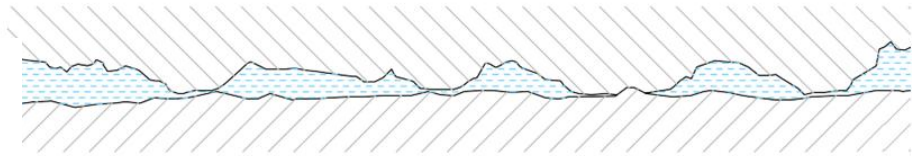
### 2.2.2.4. Smíšené tření

Jde o kombinaci tření kapalinného a mezního. Nastává v případě nejsou-li třecí plochy dokonale odděleny vrstvou maziva a dochází i k bezprostřednímu styku jejich mikronerovností. K tomuto druhu tření dochází, jestliže tloušťka maziva mezi povrchy je menší než tloušťka potřebná pro zajištění kapalinového tření, ale je větší než tloušťka tenkého filmu, který zajišťuje mazání mezní.

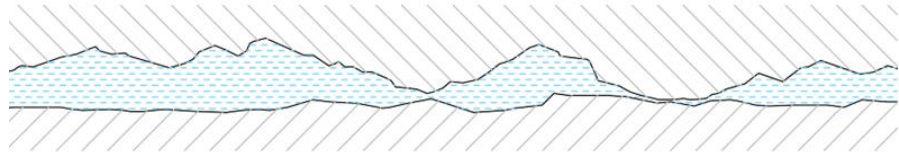
Důvodem je především velké tlakové zatížení současně s malou smykovou rychlostí třecích ploch. Velký vliv má také viskozita použitého maziva. Vrstva maziva je také ovlivněna jeho teplotou při zvýšených tlacích a smykových rychlostech.

Smíšené tření představuje nejrozšířenější formu tření při výrobě výlisků karosářského typu a podíl jednotlivých složek (mezní tření a kapalinové tření) do značné míry ovlivňují konečnou kvalitu zhotovovaného výrobku. Na obrázku 2.9 jsou schematicky znázorněny nejčastější způsoby tření při tváření výlisků nepravidelných tvarů. [17]

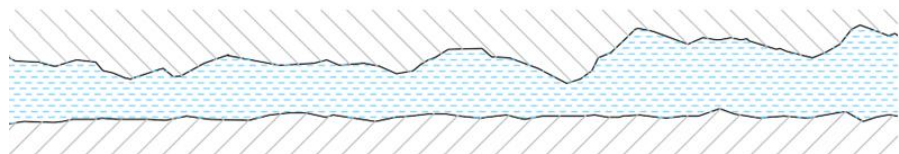
mezné



smíšené



kapalinné



**Obr. 2.9:** Nejčastější způsoby tření [17]

Na obr. jsou zobrazeny stavy tření mezného, kapalinného a smíšeného. Tyto schematické modely tření jsou zakresleny pro dva materiály s odlišnou drsností i tvrdostí povrchu. Spodní materiál (nástroj) má leštěný povrch a podléhá pouze elastické deformaci. Druhý člen soustavy má menší pevnost, větší drsnost povrchu a plasticky se deformuje. [17]

### 2.2.3. Tribologické zkoušky - tribometrie

Tribometrií nazýváme oblast, která se zabývá tribologickými zkouškami. Tyto mechanicko-dynamické zkoušky napodobující různé podmínky slouží k posouzení tažných rychlostí, kontaktních tlaků, druhu materiálu a jejich povrchu, maziv a pracovních teplot. Typ zkoušky se volí tak, aby co nejvíce přibližoval danou výrobní technologii, jedině tak můžeme očekávat vysokou korelaci výsledků laboratorních měření a reálného tribosystémem. K dispozici je řada zkušebních metod, které jsou více či méně vhodné pro danou oblast. Získání přesných informací o reálném tribologickém systému je poměrně obtížné. Existují i problémy s přenosem dat ze zkoušek (získané na jednoduchých zkušebních vzorcích) na výrobek. Z těchto důvodů se kromě zkoušek v laboratoři dělají i zkoušky na modelovém zkušebním zařízení a ve zvláštních případech přímo v provozu.

Se vzrůstající složitostí tribologického systému rostou i náklady na jeho zkoušení. Při sledování procesu tváření plechu, jakožto tribologického systému, zjišťujeme velké množství vlivu vstupujících do tohoto systému. Obecně lze říci, že velikost třecí síly při tváření závisí na:

- Mikrogeometrii povrchu substrátu,

- rychlosti posuvu plechu v nástroji,
- deformaci materiálu,
- druhu použitého substrátu,
- druhu materiálu nástroje
- povrchu nástroje,
- použitém mazivu při tažení,
- velikostí kontaktního tlaku mezi materiálem a nástrojem.

Každá z těchto uvedených veličin se podílí na tribologických dějích ve sledované soustavě, nevyskytují se však samostatně nýbrž tak, že se navzájem ovlivňují. Odděleně by se tak tyto vlivy hodnotily obtížně, proto se často při vyhodnocování tribologických podmínek posuzují komplexně výsledky zkoušek pro soustavu nástroj-mazadlo-materiál-technologické podmínky. Tribologický výzkum v oblasti tváření plechů tak především probíhá na úrovni zkoumání makromodelu, kdy se zohledňuje celý funkční projev sledovaného modelu a tento výzkum lze charakterizovat tím, že získáváme údaje z vnějších měřitelných veličin tribologického systému. [8] [17]

Mezi tyto veličiny především patří měření velikosti třecí síly při pohybu testovaného vzorku. Přehled v současnosti používaných testů při hodnocení tribologických vlastností materiálů a mazadel používaných v automobilovém průmyslu je uveden v dalších kapitolách. [17]

### **2.2.3.1. Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí**

Jeden ze základních a nejrozšířenějších testů vyvinul Wojtowicz a jeho princip spočívá v protahování pásku testovaného materiálu mezi zkušebními čelistmi. Princip tohoto testu je znázorněn na obrázku 2.10.

Výhodou je snadné:

- Nastavení podmínek (rychlosti protahování pásku a velikosti normálního zatížení čelisti  $F_N$ ),
- Měření sledované veličiny  $F_{\text{tažná}}$ .

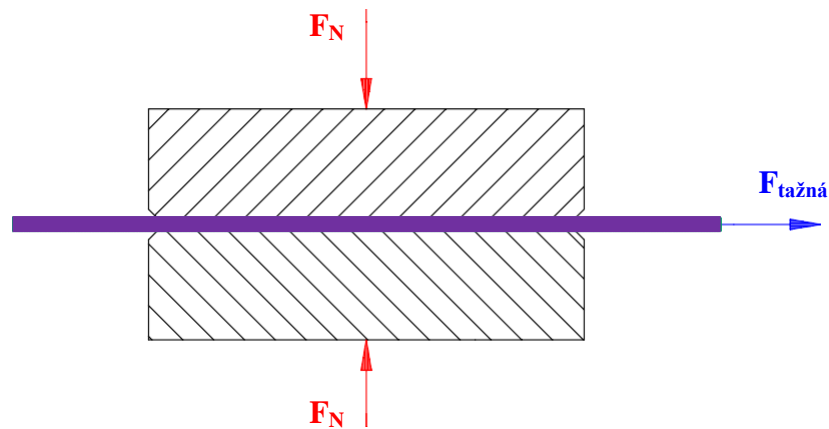
Nevýhodou je:

- Rapjatost testovaného materiálu při zkoušce neodpovídající skutečné napjatosti materiálu pod přidržovačem,



- Realitě neodpovídající plastická deformace testovaného materiálu.

Výpočet koeficientu tření je rovněž snadný a vypočte se z hodnot  $F_N$  a  $F_{\text{tažná}}$ . [17]



**Obr. 2.10:** Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí [17]

### 2.2.3.2. Modelování tření na tažné hraně

Princip tohoto testu spočívá v tažení zkušební vzorku přes tažnou hranu tažnice o zvoleném poloměru  $R$  rychlostí  $v$ . Měřítkem pro posouzení tribologických poměrů vznikajících na tažné hraně je zde velikost tažné síly  $F_{\text{tažná}}$ . Velikost tažné síly závisí na velikosti brzdící síly  $F_p$ , délce styku testovaného materiálu s tažnou hranou, koeficientu tření na tažné hraně a mechanických vlastnostech protahovaného vzorku. Schematické znázornění uspořádání tohoto testu je na obrázku 2.11.

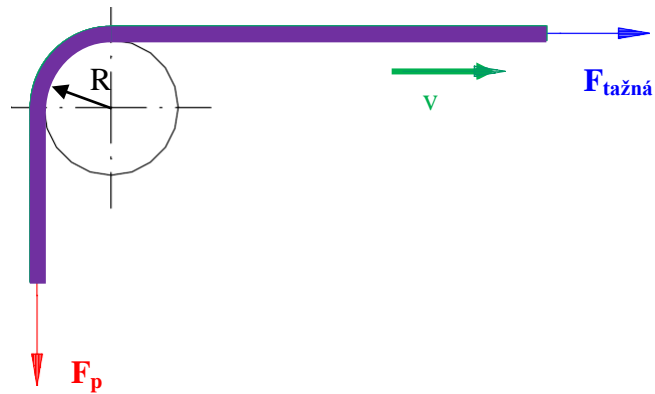
Výhodou je:

- Snadné nastavení rychlosti protahování vzorku.

Nevýhodou je:

- Špatná kontrola kontaktního tlaku mezi tažnou hranou a vzorkem.

Koeficient tření na tažné hraně lze zjistit z velikosti síly potřebné pro ohyb a narovnání pásku na tažné hraně. [17]



Obr. 2.11: Modelování tření na tažné hraně [17]

### 2.2.3.3. Modelování vypínání přes tažnou hranu

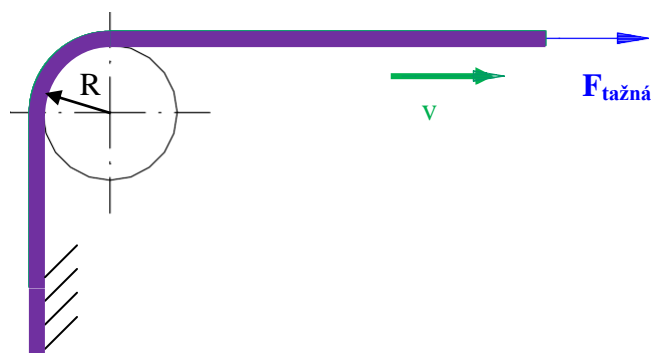
Princip tohoto testu je obdobný jako v předchozí kapitole s výjimkou toho, že je zkušební vzorek na jedné straně pevně uchycen a druhá strana vzorku zůstává v pohybu rychlostí  $v$ . Kritériem pro vyhodnocení zkoušky je síla  $F_{\text{tažná}}$  potřebná pro vytvoření předem zvolené deformace testovaného vzorku. Schematické znázornění uvedeného testu je vidět na obrázku 2.12.

Výhodou je:

- Podoba deformace v kontaktní zóně s deformací na čele tažníku při hlubokém tažení.

Nevýhodou je:

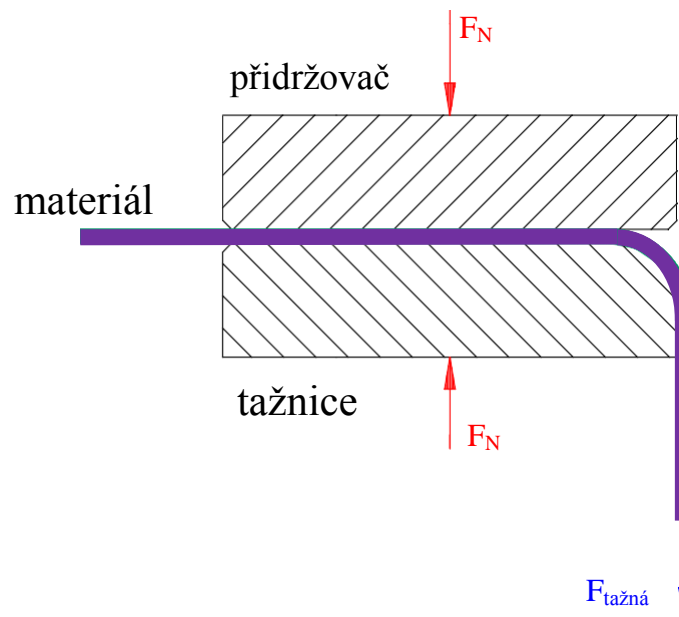
- Obtížná nastavitelnost kontaktního tlaku a kluzné rychlosti na tažné hraně. [17]



Obr. 2.12: Modelování vypínání přes tažnou hranu [17]

#### 2.2.3.4. Modelování tření mezi přídržovačem, tažnicí a tažnou hanou

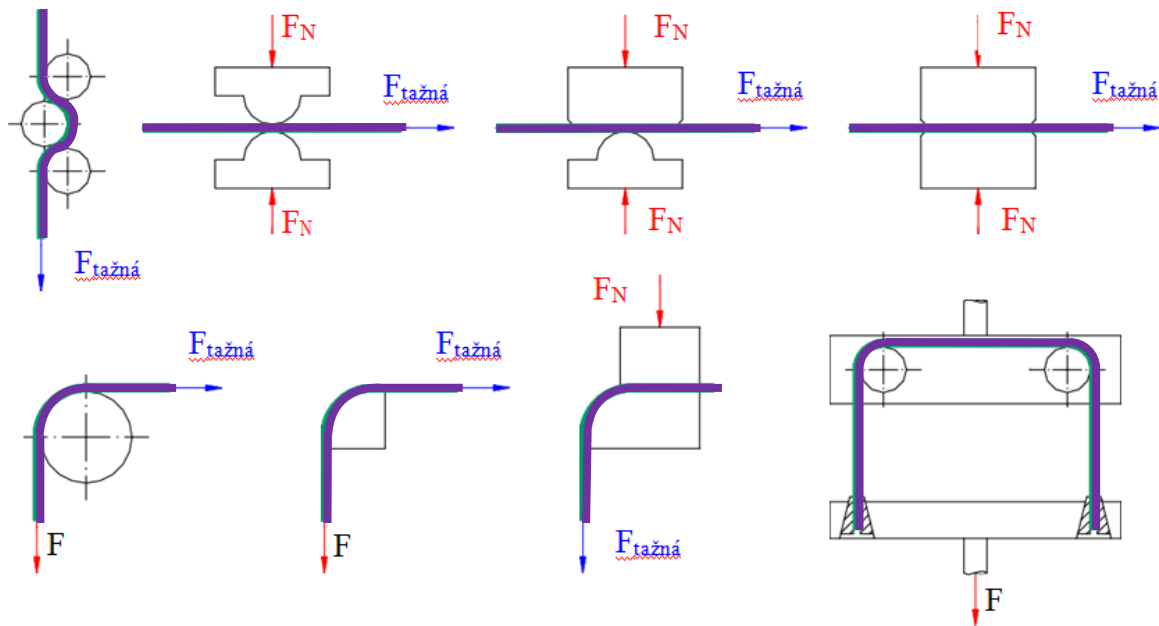
Princip a stejně tak výhody a nevýhody tohoto testu jsou kombinací metod popsaných v kapitolách 2.2.3.1. a 2.2.3.2. Hodnotícím kritériem pro tribologické vlastnosti je opět velikost síly potřebné pro protažení pásku  $F_{\text{tažná}}$ . Schematické znázornění uvedeného testu je vidět na obrázců 2.13. [17]



**Obr. 2.13:** Modelování tření mezi přídržovačem, tažnicí a tažnou hranou [17]

#### 2.2.3.5. Další způsoby tribologických zkoušek

Kromě výše uvedených existuje celá řada dalších laboratorních zkoušek pro hodnocení tribologických vlastností testovaných mazadel a substrátů. Většina zkoušek je technologická a výsledky z jednotlivých pracovišť nejsou porovnatelné. Každá ze zkoušek na základě určitých hodnotících kritérií porovnává mezi sebou výsledky jednotlivých zkoušek pro určitou kombinaci testovaný substrát – testované mazivo – technologické podmínky. Příklady dalších takových používaných zkoušek pro hodnocení tribologických vlastností jsou uvedeny na obrázku 2.14. [17]



Obr.2.14: příklady tribologických zkoušek [17]

## 2.2.4. Problematika zadírání

Jak již bylo dokázáno, koeficient tření přímo souvisí s projevem zadírání.

Zadírání se projevuje nejen při výrobě tvářených součástí, ale rovněž při provozu strojních dílů. Většina pozornosti se však doposud věnovala strojním součástem. Zde je tento problém pozorován především při vzájemném pohybu součástí, rotujících čepů v ložiskách i posuvu tyčí ve vedení, pístů ve válcích atd. Tato práce je však zaměřena na problematiku zadírání při výrobě tvářených dílů.

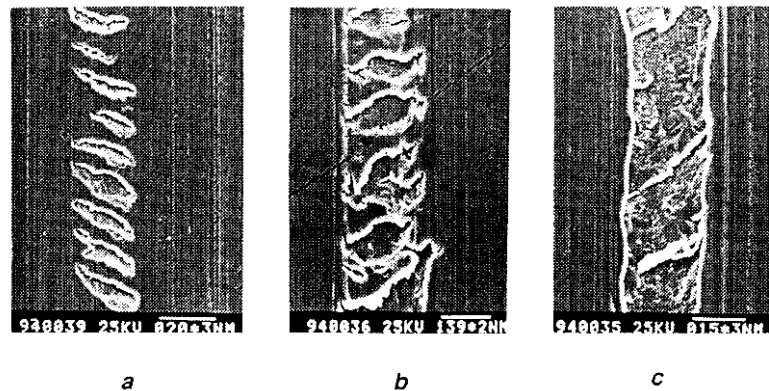
Zadírání je letitým problémem zejména při tváření plechů za studena tam, kde existují vysoké kontaktní tlaky. Platí to zejména v automobilovém průmyslu, kdy zadírání nejen snižuje životnost nástroje, ale zejména poškozuje povrch výlisku natolik, že ani další povrchové opravy neumožní dosáhnout potřebnou kvalitu vyráběného dílu.

V provozu lisoven automobilového průmyslu se zatím nedaří spolehlivě tento nepříznivý jev odstranit. Je zřejmé, že zadírání souvisí se stavem povrchu plechu, třením mezi materiálem a nástrojem, mazáním, kontaktními tlaky, rychlostí posuvu plechu v nástroji a čistotou prostředí, které též má na zadírání nemalý vliv.

### 2.2.4.1. Definice zadírání

Ve zkratce můžeme zadírání charakterizovat jako mezní stav tření, kdy dochází ke kovovému styku dvou ploch a ke vzniku tzv. "mikrosvarů". Představuje hrubé poškození povrchových vrstev, v jehož důsledku se na povrchu zkušebních vzorků objevují úzké rýhy. Ty jsou orientované ve směru posuvu vzorků a viditelné již pouhým okem.

Snímky z elektronového mikroskopu ukazují na porušení celistvosti zinkového povlaku v různých stádiích, rozvoj této poruchy dokumentuje obrázek 2.15. Na počátku dochází k porušení celistvosti povlaku pouze v podobě lokálního narušení vrstvy, kdy stále existují mezi trhlinami celistvé můstky zinkového povlaku (a), při pokračujícím styku plechu s nástrojem se trhliny zvětšují, můstky se bortí (b), až dojde k úplnému setření zinkové vrstvy (c). Povlak je stržen do té míry, že je možné v příčném řezu pozorovat místa základního materiálu vystupující na povrch. [11]



**Obr. 2.15:** Vznik a rozvoj zadírání [11]

#### 2.2.4.2. Optimalizace procesu zadírání

Výzkum vzniku a následných projevů zadírání u plechů s povlaky je orientován na hodnocení tribologických vlastností plechů v návaznosti na technologické podmínky tažení. Problematice tribologických podmínek a jejich optimalizaci při tažení je v posledních letech věnována velká pozornost. Jedná se o studium dějů, které výrazně ovlivňují vlastní proces tažení plechů a do značné míry určují konečnou kvalitu výlisku zejména po lakování.

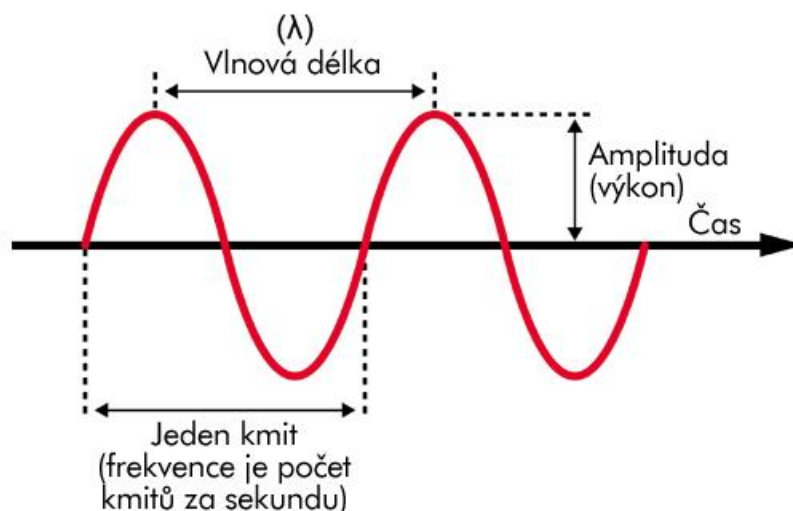
V oblasti výzkumu tribologických jevů jsou neustále hledány a následně zdokonalovány nové metodiky měření tak, aby se jejich výstupní hodnoty co nejvíce přiblížily reálným hodnotám vyskytujícím se v procesu tváření. V laboratořích katedry strojírenské technologie na Technické univerzitě v Liberci k tomu slouží jednoúčelové zařízení pro tribologické zkoušky „SOKOL 400“. Na tomto zařízení lze nastavovat několik parametrů, kterými se snažíme přiblížit co nejvíce reálnému ději. Konkrétně je to rychlost posuvu, kontaktní tlak, materiál a drsnost plochy nástroje, mazivo.

## 2.3. Akustika

### 2.3.1. Zvuk

Zvuk lze obecně definovat jako mechanické kmitání, které je charakterizováno parametry pohybu částic pružného prostředí nebo u vlnového pohybu parametry zvukového pole. Zvuk tedy vzniká tehdy, když určitý předmět (tím může být např. struna) kmitá ve slyšitelném frekvenčním pásmu. Pokud se tyto kmity prostřednictvím vzduchu dostanou až k našim uším, způsobí souhlasné rozkmitání ušních bubínek, což náš mozek vyhodnocuje jako zvuk. Takový zvuk se projevuje jako zvuk slyšitelný, což je akustické kmitání pružného prostředí v pásmu frekvencí od 16 Hz do 20 000 Hz, schopný vyvolat zvukový vjem. Frekvenční závislost definice slyšitelného zvuku je silně individuální, jen málokdo je schopen vnímat celé pásmo frekvencí. Zvuky mimo toto pásmo jsou lidským uchem neslyšitelné, přesto jsme je schopni vnímat a mohou mít i nepříznivý vliv na zdraví či psychiku. Zvuky pod slyšitelnou hranicí (0,7 - 16 Hz) se označují jako infrazvuk, zvuky nad slyšitelnou hranicí (do 50 kHz) jako ultrazvuk. [20]

Zvuk vzniká kmitáním bodů a bodových soustav. Kmitavý pohyb je fyzikální děj, u něhož se v závislosti na čase střídavě (periodicky) mění charakteristické veličiny, např. poloha, rozměr, tlak, rychlost apod. Nejjednodušší je periodický pohyb sinusového (tj. harmonického) průběhu viz obrázek 2.16. [18] [20]

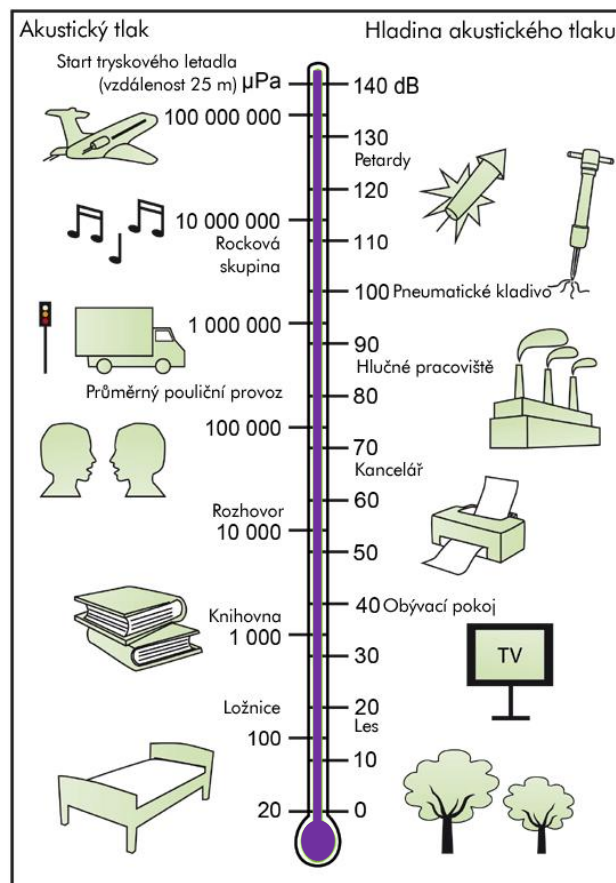


**Obr. 2.16:** Harmonické vlnění [18]

Zdroj zvukového vlnění se stručně nazývá zdroj zvuku a hmotné prostředí, ve kterém se toto vlnění šíří jeho vodič. Vlivem vzruchu, který je generován zdrojem zvuku se částice vzduchu (vodiče) v některých místech prostoru navzájem přibližují či vzdalují, tím vzniká jejich zhuštění nebo zředění (přetlak a podtlak). Tyto změny se šíří od zdroje zvuku

rychlostí  $c$ , která je ve vzduchu cca 340 m/s (tato hodnota je závislá na teplotě, při 0°C je rychlost zvuku 331,8 m/s, při 30°C pak 349,6 m/s). Vodič zvuku, zprostředkuje spojení mezi zdrojem zvuku a jeho přijímačem (detektorem), kterým bývá v praxi ucho, mikrofon nebo snímač. Vodičem jsou i kapaliny (např. voda) a pevné látky (např. ocel). Dokonalým izolantem zvuku je vzduchoprázdno tedy vakuum.

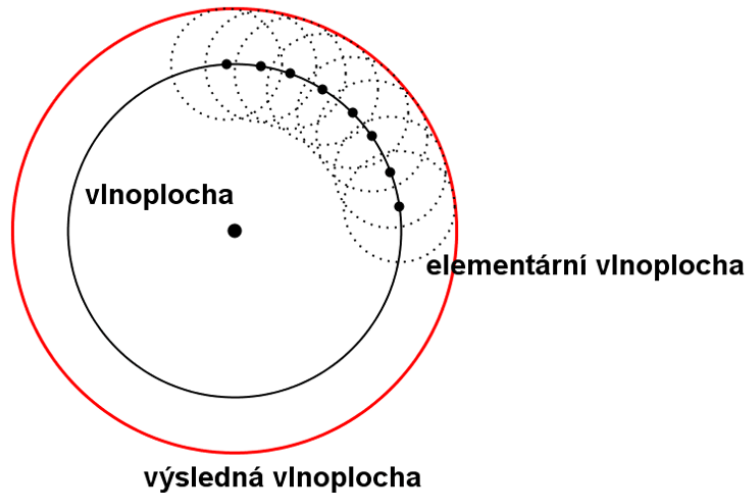
Lidské ucho reaguje na akustický tlak, který se měří v jednotkách Pa ( $N/m^2$ ). Nejnižší hladina akustického tlaku, kterou průměrné ucho dokáže detekovat, je o 0,00002 Pa a limit pro bolest je asi 200 Pa. Vzhledem k této široké škále tlaku je nepraktické používat lineární stupnici, takže hladiny akustického tlaku se obvykle vyjadřují pomocí logaritmické stupnice (označené jako dB). Výrazy dB a bel (= 10 dB) jsou ve skutečnosti čistě matematické pojmy a nejsou určeny zvlášť pro akustiku. Stupně různých zvuků viz obrázek 2.17.



**Obr. 2.17:** Stupně různých zvuků [18]

Ve volném prostoru se zvuk šíří od zdroje všemi směry volně, při tom s rostoucí vzdáleností slábne akustická energie (síla zvuku), jeho šíření můžeme popsat tzv. vlnoplochami (spojnicemi všech míst zvukového pole, které mají v daný okamžik stejné parametry) viz. obrázek 2.18. Je-li zdroj zvuku malý (bodový), mají vlnoplochy tvar koule,

je-li zdrojem např. rozměrná deska, jsou vlnoplochy rovinné (za rovinné považujeme i vlnoplochy ve velké vzdálenosti od bodového zdroje). [20]



**Obr. 2.18:** Šíření zvuku [19]

Šíření zvukových vln v prostoru popisuje celá řada fyzikálních principů. Vlny se v prostoru odrážejí, lámou i ohýbají, sčítají se s jinými vlnami, podléhají tlumení atd.

Narazí-li zvuk na nějakou překážku, dochází částečně k jeho pohlcení a přeměnu na tepelnou energii, částečně k jeho odrazu (část zvuku se rovněž šíří vibracemi např. zdí nebo prochází na druhou stranu). Tepelná energie vznikající pohlcováním zvuku je i při dost silných úrovních zvuku takřka zanedbatelná.

V přirozeném prostředí dochází k vícenásobným odrazům, které přicházejí k našim uším s různým zpožděním (vlivem rychlosti zvuku), v různé barvě (odrazivost rozličných povrchů se mění s frekvencí), v různé fázi a z různých směrů. Tento jev vnímáme jako přirozený dozvuk.

Zdrojem zvuku může být každé chvějící se těleso. O vlnění v okolí zdroje zvuku však nerozhoduje jen jeho chvění, ale i okolnost, jestli je tento předmět dobrým nebo špatným zářičem zvuku. Tato jeho vlastnost závisí hlavně na jeho geometrickém tvaru. [20] [21]

### 2.3.2. Pořízení zvukového záznamu

Zvukové vlnění je sled tlakových vln, které se šíří hmotným prostředím, nejčastěji vzduchem. S rozvojem sdělovací techniky a kinematografie bylo potřeba zvuk zaznamenávat tak, aby ho bylo možné později znovu přehrát. Záznam zvuku je buď analogový nebo digitální.



### 2.3.2.1. Analogový záznam zvuku

Existují tři základní metody analogového záznamu zvuku.

1. Mechanický záznam zvuku - nejstarší způsob používaný již od konce 19. století.
2. Optický záznam zvuku - zaveden v souvislosti s rozvojem zvukového filmu ve 20. letech 20. století.
3. Magnetický záznam zvuku - používá se od 30. let 20. století, postupně se stal dominantním způsobem záznamu zvuku a používá se dodnes i v profesionální praxi (rozhlas, televize, film).

#### **Mechanický záznam zvuku**

Mechanický záznam zvuku je obecně znám jako gramofonový záznam. Zvuk je prostřednictvím elektroakustického měniče zaznamenán na paměťové médium (zde gramofonová deska) cestou spojitě drážky, jejíž průběh odpovídá průběhu zaznamenaného akustického signálu. [22]

#### **Optický záznam zvuku**

Optický záznam zvuku se objevil poprvé v kinematografii v počátcích rozvoje zvukového filmu. Do té doby, byly němé filmy doprovázeny živou hudbou a dialogy byly ve filmu vloženy jako titulky. Později byla živá reprodukce nahrazena gramofonem, byl zde ale problém se synchronizací a kvalitou zvuku. Filmové společnosti hledaly způsob, jak umístit zvukový záznam přijatelné kvality přímo na filmový pás. Problém byl v tom, že pohyb filmu v kameře i v promítacím stroji je krokový, zatímco zvuk bylo nutné přehrávat spojitě. Filmový pás musel v kameře i v promítacím stroji projít, tzv. uklidňovací smyčkou a až poté se zvuk zaznamenával nebo snímal. Zvuk je tak oproti obrazu na filmovém pásu posunut a "předbíhá" obraz o 21 políček. Optický záznam se provádí se vzorkovací frekvencí přibližně 10 kHz. [22]

#### **Magnetický záznam zvuku**

Hlavní výhodou magnetického záznamu zvuku byla snadná možnost oprav záznamu jeho přemazáním, mechanický záznam byl vyryt v podložce a optický záznam byl "nafočen" na filmu, a proto nebylo možné tyto záznamy opravovat. Proto se také začal používat v rozhlasových studiích. Pro zařízení sloužící k záznamu a reprodukci magnetického záznamu zvuku se vžilo označení magnetofon. Ve druhé polovině 20. století se magnetický záznam zvuku začal využívat i v amatérské praxi, protože umožňoval

vícenásobné použití jednoho nosiče. Postupně dosáhla kvalita magnetofonů takové úrovně, že byly ostatní druhy záznamu zvuku vytlačeny. [22]

### **2.3.2.2. Digitální záznam zvuku**

Ke konci 20. století se prosadil záznam zvuku v digitální podobě. Velkou výhodou digitálního signálu je to, že je tvořen pouze dvěma diskrétními stavy: logickou jedničkou a nulou. Tyto dva stavy se během záznamu, zpracování nebo přenosu digitálního signálu velmi snadno odlišují. [22]

### **Digitalizace analogového signálu**

V současnosti nejpoužívanější způsob, kdy je analogový záznam z mikrofonu rovnou digitalizován a ukládán v digitální podobě na pevné disky, CD či DVD v odpovídajících formátech. Převod zvuku na digitální signál zajišťují elektronické součástky zvané A/D převodníky.

Proces digitalizace:

1. Do zvukové karty vstupuje analogový signál získaný například z mikrofonu, který převede mechanické vlnění na elektromagnetické.
2. Zvuková karta provede vzorkování signálu. V určitých časových intervalech odečítá hodnotu záznamu jako číslo. Obvyklá vzorkovací frekvence pro ukládání hudby na CD je 44,1 kHz, což znamená, že odečet hodnoty signálu se provádí každých  $1/44100 = 0,000023$  s.
3. Poté provede zvuková karta kvantování, což je zaokrouhlení odečtené hodnoty. Tato zaokrouhlená hodnoty se převede do dvojkové soustavy (1 vzorek do 8, 16 nebo 24 bitů)
4. Při přehrávání zvuku, který je v PC uložený v digitální podobě je nutné provést opačný převod, protože zvuk vyluzují reproduktory, které jsou analogové. Zvuk zrekonstruovaný z digitálního záznamu není zcela totožný s originálním analogovým signálem. [22]

### **2.3.2.3. AD/DA převodníky**

Digitalizace takového signálu je založena na dvou základních operacích: vzorkování a zaokrouhlování (kvantování). Při snímání probíhají současně. Tento systém vytvořil britský vědec Alec Reeves v roce 1937 a nazval jej Pulsně kódová modulace.

Prakticky lze říci, že se jedná o zjednodušení analogového signálu bez faktické ztráty kvality zvuku. Celý proces digitalizace zvuku obstarává tzv. A/D převodník (analogově digitální převodník), kde průchodem analogového signálu přes tento převodník získáme jeho digitální (číselnou) podobu.

Analogově digitální převodník je elektronická součástka určená pro převod spojitého (analogového) signálu na signál diskrétní (digitální). Důvodem tohoto převodu je umožnění zpracování původně analogového signálu na číslicových počítačích. A/D a D/A převodníky mají zásadní vliv na kvalitu zvuku u jakéhokoli audiosystému. AD/DA převodníky jsou součástí zvukové karty, která může být interní, zapojená do PCI slotu uvnitř počítače, což přináší zhoršení některých parametrů vlivem rušení, které se přenáší z dalších obvodů v počítači. Externí zvukovou kartu je možné připojit k PC prostřednictvím dalších digitálních rozhraní např. ADAT přenos po optickém kabelu, profesionální dvoukanálové rozhraní AES/EBU se symetrickým vedením, nebo pomocí rozhraní FireWire či USB. [22]

#### **2.3.2.4. Mikrofony**

Mikrofon je zařízení pro přeměnu akustického (zvukového) signálu na signál elektrický. První mikrofon vynalezl tvůrce gramofonu Emile Berliner 4. března 1877. [24]

#### **Technické parametry mikrofonů**

##### **Citlivost mikrofonu**

Citlivost mikrofonů se určuje na základě měření výstupní úrovně signálu pro určitý zvukový tlak. Systém měření spočívá v umístění mikrofonu v akustickém poli o konstantní úrovni akustického tlaku 1 Pascalu (10 mikrobarů), přičemž se měří výstupní napětí mikrofonu (SPL = SOUND PRESSURE LEVEL = úroveň akustického tlaku), Měření se provádí v otevřeném obvodu, tzn. že výstup mikrofonů není nijak zatěžován (vysokoimpedanční měřicí systém). Čím vyšší je citlivost mikrofonu, tím je lepší odstup užitečného signálu od šumu, protože při vyšším signálu není zapotřebí tak velké zesílení vstupního kanálu mixážního pultu. Citlivost mikrofonu je frekvenčně závislá, proto se její udaná hodnota vztahuje k určité frekvenci. Běžné mikrofony mívají citlivost 1-10 mV/Pa. [20]

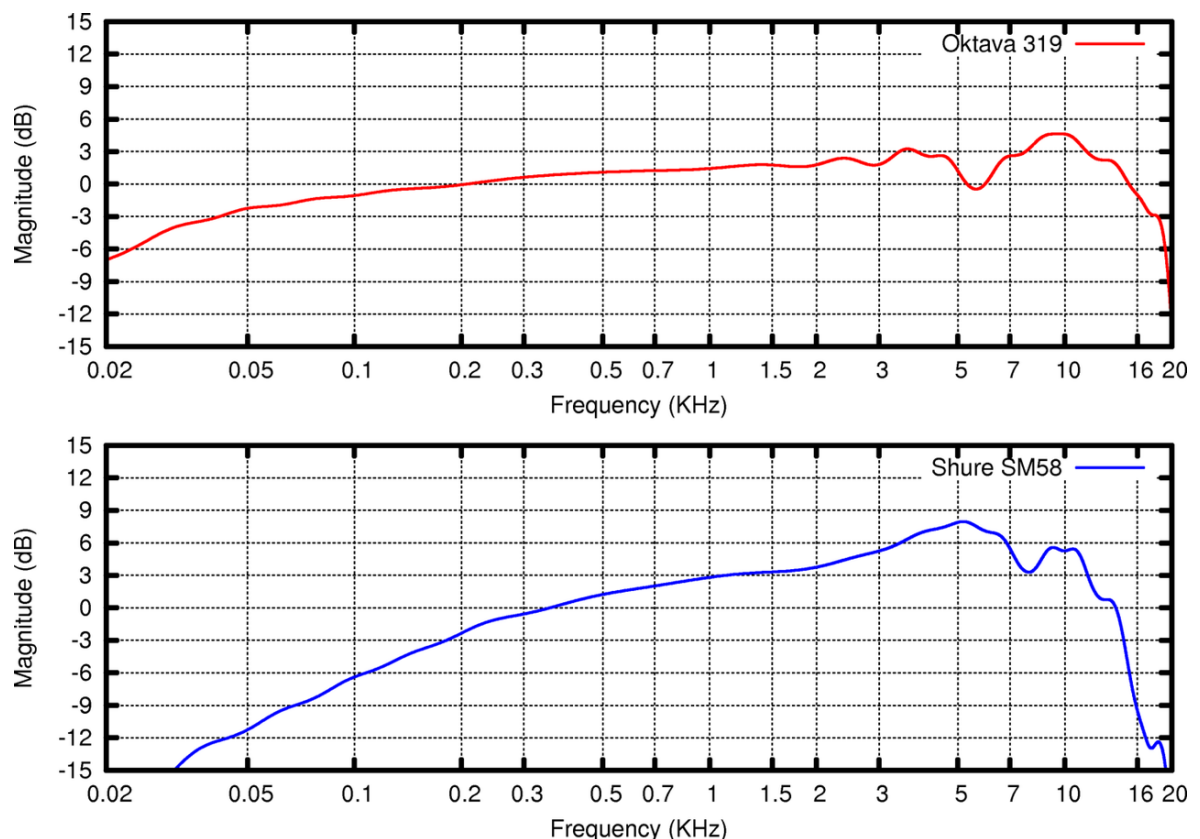
##### **Frekvenční charakteristika**

U mikrofonu je kvalita zvuku měřena pomocí frekvenční charakteristiky. Vyjadřuje schopnost reprodukovat rozsah zvukových frekvencí. Lepší, dražší mikrofony mají široký

frekvenční rozsah. To znamená, že jsou stejně citlivé na nízké, střední a vysoké tóny. Fyzikálním ideálem by byl mikrofon, který by akustický podnět přeměnil vždy na odpovídající elektrický signál bez ohledu na jeho frekvenci. Tak tomu však není a nejen proto, že by takový mikrofon byl mj. současně i barometrem.

Profesionální mikrofony jsou často popisovány grafem. Obrázek 2.19 ukazuje příklady frekvenčních charakteristik dvou mikrofonů různého typu. Dokonalý mikrofon zobrazí rovnou přímku probíhající od 20 do 20 000 Hz, představuje plochu frekvenční charakteristiky v celém slyšitelném frekvenčním spektru. Pokud jsou v grafu zobrazeny hrby (špičky), je mikrofon méně citlivý na některé frekvence. Citlivost mikrofonu se obvykle měří v mínus decibel, běžný mikrofon má citlivost -58 dB. Hodnota je důležitá, pokud se nahrávají velmi slabé zvuky. [24]

Frekvenční charakteristika zobrazuje na vodorovné ose frekvence v Hz pro celé zvukové spektrum, zatímco na svislé uvádí úroveň výstupního signálu v dB. Protože se u jednotlivých kusů může frekvenční průběh nepatrně lišit, měří často firmy každý vyrobený mikrofon individuálně a frekvenční charakteristiku zpracovanou zapisovacím měřicím systémem přikládají k danému kusu do krabice. [23] [24]



**Obr. 2.19:** Kmitočtové charakteristiky mikrofonů, nahoře Oktava 319 (studiový), dole Shure SM58 (zpěvový) [24]

## Impedance

Udává se v jednotkách  $\Omega$  (Ohm). Stejně jako citlivost mikrofonu je i impedance frekvenčně závislá. Proto je její hodnota vztažena k určitému kmitočtu (obvykle 1kHz). Velikost impedance je důležitá pro správné připojení do vstupního obvodu - předzesilovače. Vstupní impedance předzesilovače by měla být minimálně pětkrát větší, než je výstupní impedance mikrofonu. Doporučenou minimální zatěžovací impedanci udávají výrobci mikrofonů jako parametr „minimal terminating impedance“. Při nesplnění této podmínky se dočkáte zkreslení frekvenční charakteristiky a zvýšení šumu v signálu.

Mikrofony se konstruují buď jako vysokoimpedanční (5 - 150 Ohm), nebo nízkoimpedanční (150 - 600 Ohm). Vysokoimpedanční mikrofony dávají sice silnější signál, jsou však náchylnější na elektromagnetická rušení a jsou daleko více ovlivňovány kapacitou kabelu. Proto se využívají spíše pro domácí komerční přístroje nebo jiné neprofesionální aplikace, kde postačí relativně krátké kabely (2 – 3 m). Výhodou je možnost použití jednoduššího mikrofonního předzesilovače, vzhledem k vyšší signálové úrovni. [25]

## Šum mikrofonu

Vyjadřuje se odstupem šumového napětí v jednotkách dB. Vlastní šum mikrofonu je způsoben elektrickými obvody (cívka nebo zesilovač) a tepelným pohybem molekul vzduchu, které naráží na membránu. Čím je tato hodnota nižší, tím lépe. [25]

## Základní akustické jednotky

### Akustický tlak [ $\text{N/m}^2$ , Pa]

– vyjadřuje zvýšení nebo snížení tlaku oproti klidovému stavu. Akustický tlak 1 Pa lze vyjádřit i v dB (1 Pa 94 dB SPL)

### Akustický výkon [Watt]

– je energie vyzářená zdrojem za časovou jednotku.

### Akustická intenzita [ $\text{Watt/m}^2$ ]

– je množství zvukové energie, která projde plochou  $1 \text{ m}^2$  za 1 sekundu. [20]

## Hladina akustického tlaku [decibel]

Výzkum potvrdil, že průměrný práh slyšení začíná pro kmitočty 1 kHz na hodnotě akustického tlaku  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$  (to odpovídá prahové intenzitě  $10 \text{ W/m}^2$ ). Je-li tato hodnota vyjádřena jako vztažná úroveň 0 dB, je možné i hladinu akustického tlaku vyjádřit

v dB. Důvodem pro upřednostnění této jednotky je zejména to, že většina ovládacích prvků a měřicích systémů na el. přístrojích má stupnice oceňované v dB. Tato jednotka je výhodná i z toho důvodu, že 1 dB odpovídá zhruba právě slyšitelné změně v úrovni hlasitosti (závisí to na kmitočtu zvuku a jeho intenzitě).

Protože lidský sluch nevnímá všechny kmitočty stejně silně, existují rovněž jednotky pro vyjádření hlasitosti. Ty mají sice vztah k velikosti akustického tlaku, berou však v úvahu i měnící se citlivost sluchu v celém zvukovém spektru. Základem pro jejich vznik byly rozsáhlé analýzy frekvenčního průběhu lidského sluchu v závislosti na intenzitě zvuku, na jejichž základě byly vytvořeny tzv. Fletcher-Munsonovy křivky a později nově korigované křivky ISO (doporučené Mezinárodní organizací pro normalizaci). Vznikly tak další jednotky:

#### **Hladina hlasitosti [fón]**

– odpovídá hladině akustického tlaku vyjádřené v dB pouze na referenčním kmitočtu 1 kHz, bere v úvahu různou citlivost sluchu v celém akustickém pásmu.

#### **Hlasitost [son]**

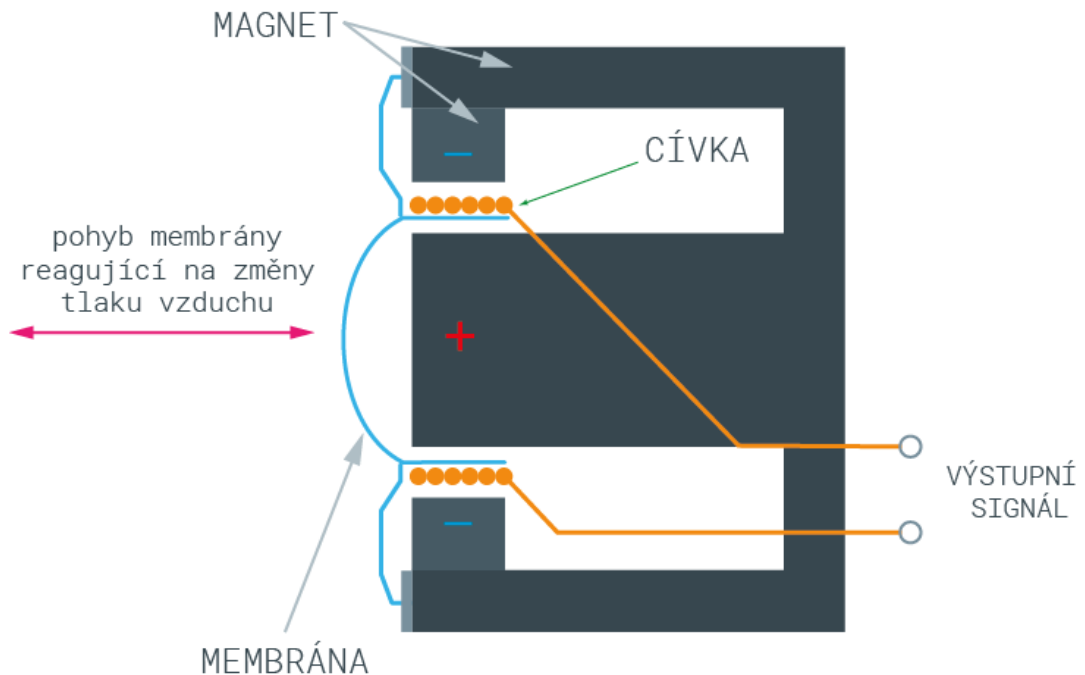
– umožňuje na rozdíl od jednotek pro hladinu hlasitosti jednoduše určit hlasitost několika zvuků najednou. [20]

### **2.3.2.5. Typy mikrofonních systémů**

I když se některé dražší kapacitní mikrofony hodné přibližují k požadavkům na ideální mikrofon, který by fungoval perfektně pro všechny účely, zpravidla je vždy zapotřebí sáhnout k určitým kompromisům, a to i z hlediska ekonomického. Podle toho, jakým způsobem se provádí převod akustické energie na elektrický signál, dělí se klasické mikrofony na dynamické a kapacitní. Oba systémy mají ještě řadu modifikací, a kromě těchto typů se vyrábějí i různé speciální mikrofony pro kontaktní využití. [20]

#### **Dynamické mikrofony**

Základem systému je lehká kruhová membrána vyrobená z tenké plastické hmoty, mechanicky spojená s cívkou z velmi jemného drátu, která se pohybuje v mezeře permanentního magnetu. Membrána, kmitající podle změn akustického tlaku, převádí tyto kmity na cívku, pohybem vodiče v magnetickém poli vzniká v závitech cívky elektrický proud. Jak víme, je tento proud velice slabý, a proto se zesiluje na potřebnou úroveň např. mikrofonním předzesilovačem v mixážním pultu. Schéma dynamického mikrofonu můžeme vidět na obrázku 2.20.



**Obr. 2.20:** Schéma dynamického mikrofonu [27]

Dynamické mikrofony mají před ostatními typy několik výhod. Jsou relativně nákladné na výrobu a mechanicky dost odolné, což znamená, že se mohou používat nejen ve studiu, ale i naživo. Mohou snášet extrémně vysoké úrovně zvukového tlaku a nevyžadují žádné napájení, protože samotný mikrofon neobsahuje žádné elektronické obvody.

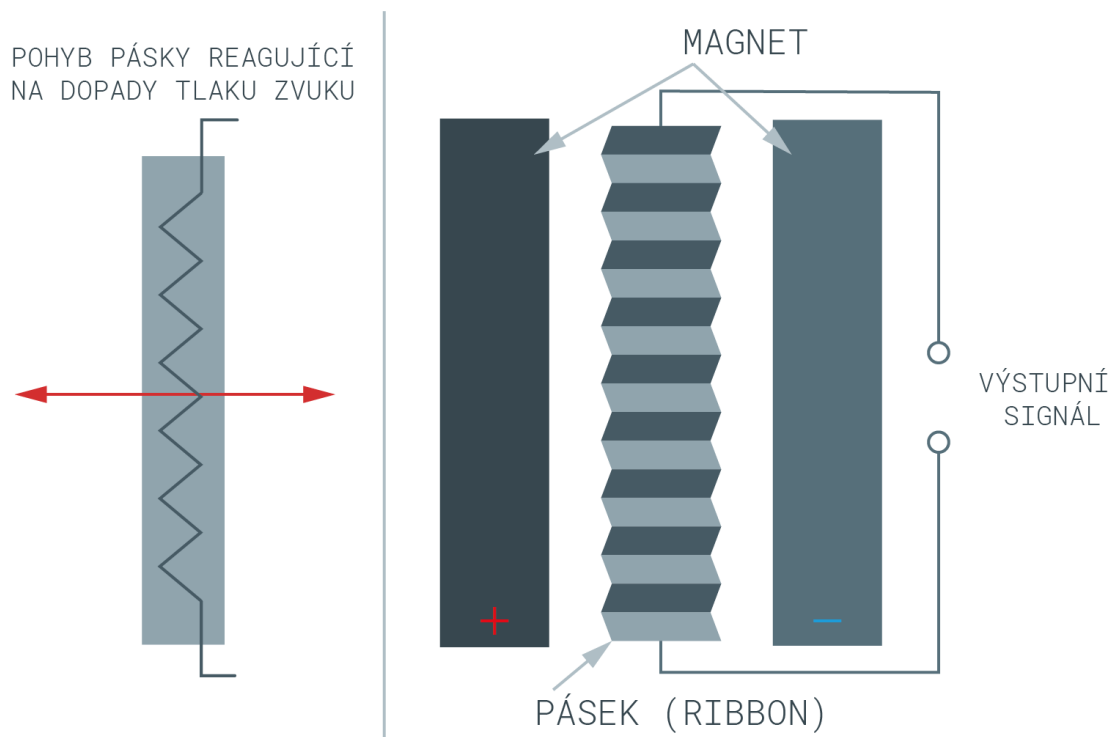
Jednou z nevýhod dynamických mikrofonů je skutečnost, že dávají relativně slabý výstupní signál, což vyžaduje větší zesílení vstupního předzesilovače, čímž rapidně vzrůstá šum. Proto jsou tyto mikrofony určeny zejména pro snímání hlasitějších zvuků z menších vzdáleností. Při natáčení tichých akustických nástrojů by musel být tento typ mikrofonu umístěn v těsné vzdálenosti od zdroje zvuku, čímž je ve většině případů vyloučeno věrné sejmутí barvy a charakteru nástroje. [20] [26]

### Páskové mikrofony

Na obrázku 2.21 vidíte schéma konstrukce páskového mikrofonu. Tento druh převaděče pracuje na systému pohybu pásky v magnetickém poli a v podstatě se jedná o stejný princip jako u mikrofonu dynamického, s výjimkou toho, že membrána a cívka jsou v tomto případě nahrazeny tenkým vodivým páskem. Jedná se tedy o ekvivalent dynamického mikrofonu s jediným závitem cívky, proto je vznikající el. napětí velmi slabé

a musí se přizpůsobovat standardní hodnotě prostřednictvím zabudovaného transformátoru.

I když nejsou tyto typy příliš rozšířené, mají oproti dynamickým a kapacitním systémům určité výhody. Páskový mikrofon může mít frekvenční rozsah často až přes 20 kHz, přičemž frekvenční průběh je velice vyrovnaný. Dříve byly tyto typy nespolehlivé kvůli své křehkosti, ale moderní páskové mikrofony jsou již poměrně robustní, zvláště modely, u kterých je pásek nahrazen tenkou kovovou vrstvou napařenou na plastické membráně. [20] [26]



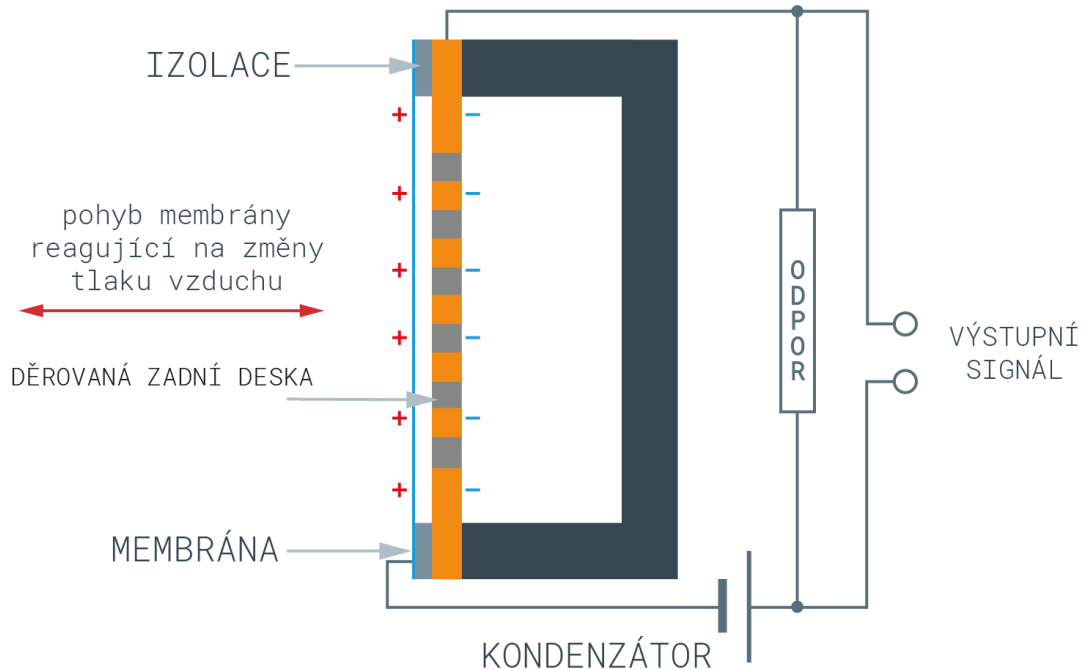
**Obr. 2.21:** Schéma páskového mikrofonu [27]

### Kapacitní mikrofony

Kapacitním mikrofonům se často říká také kondenzátorové, neboť fungují na stejném principu jako kondenzátor viz obrázek 2.22. Celý princip je založen na faktu, že pokud se mění kapacita kondenzátoru tím, že se změní vzdálenost mezi oběma deskami, změní se mezi nimi i napětí. V kapsli se nachází velmi tenká a pružná vodivá membrána a kovová destička která je děrovaná kvůli propustnosti tlaku vzduchu. Je-li na obou deskách systému přítomen příslušný el. náboj, způsobuje jakýkoliv pohyb membrány změnu kapacity a na odporu se snímá napětí, které odpovídá těmto změnám. Jelikož celý systém funguje za předpokladu přítomnosti elektrického náboje, musí být kapacitní mikrofon napájen fantomovým napájením. Tyto mikrofony jsou jediné, které elektrické napětí



neprodukují, ale je generováno změnami hodnot mezi napájenými elektrodami. Aby nedocházelo k oslabování náboje, musí mít předzesilovač velmi vysokou impedanci, což se zajišťuje použitím tranzistorů FET nebo elektronek. [20] [25]

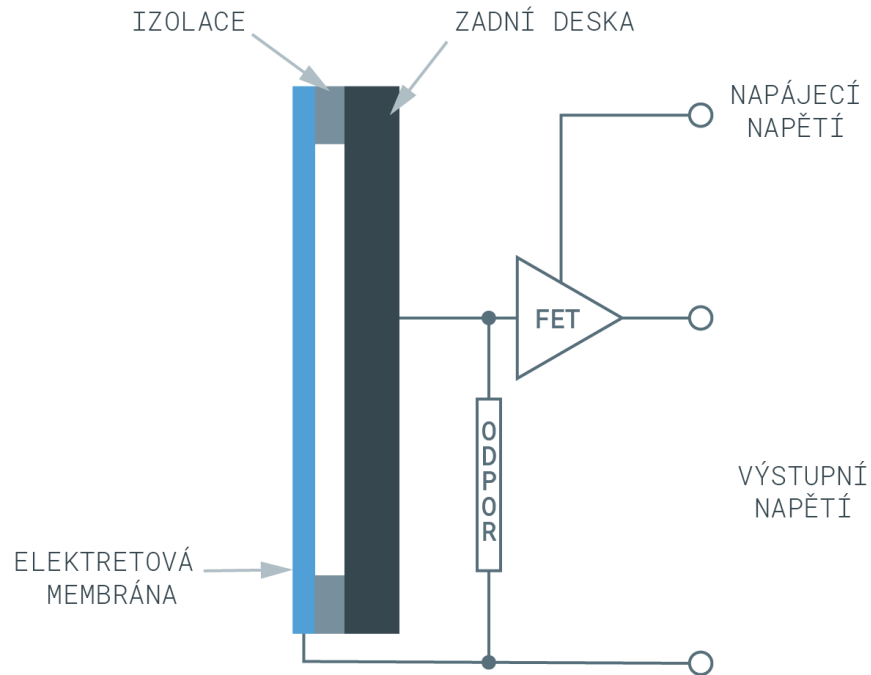


**Obr. 2.22:** Schéma kapacitního mikrofonu [27]

### Elektretové mikrofony

Elektretové mikrofony pracují na stejném principu jako mikrofony kondenzátorové. Rozdíl je v tom, že elektrický náboj není na membránu přiváděn, ale je její součástí. Tento materiál, ze kterého je membrána vyrobena, se nazývá elektret. Elektret je nevodivá hmota, která je permanentně elektricky nabitá. Aby celý systém mohl fungovat je součástí kapsle FET předzesilovač, který vyžaduje napájení v řádu voltů, což je umožněno z baterie umístěné v těle výrobku či pomocí externího napaječe. Schéma konstrukce můžeme vidět na obrázku 2.23.

Velkou nevýhodou klasických elektretových mikrofonů je membrána nesoucí elektrický náboj. Ta má vyšší hmotnost a nižší pružnost než například membrána u kapacitního systému, což má opět vliv na účinnost systému při vyšších frekvencích (vyšší setrvačnost membrány). V průběhu vývoje těchto systémů sice docházelo k dílčím vylepšením, zásadní změnu však přinesly teprve mikrofony typu BACK ELEKTRET, kde vrstvou s elektrickým nábojem (elektretem) je opatřena pevná deska, a proto je možné vyrábět membrány ze stejných materiálů jako u kapacitních mikrofonů. [20] [27]

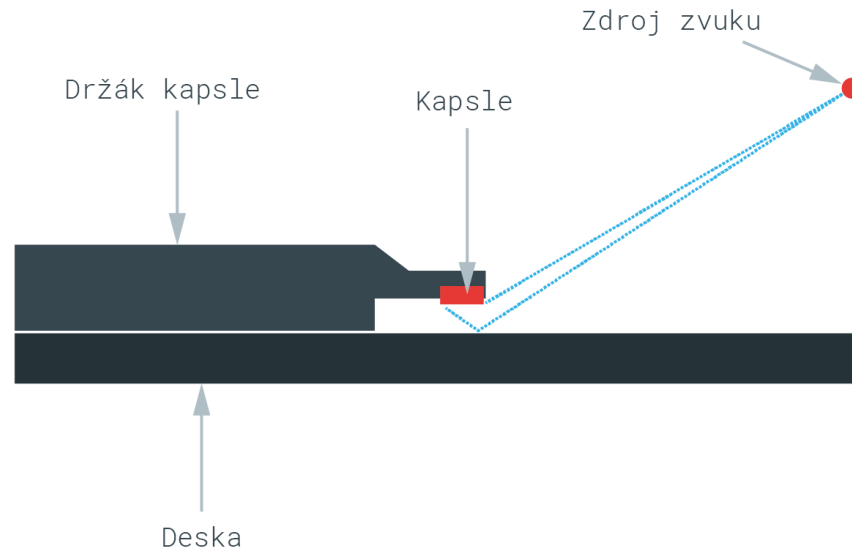


**Obr. 2.23:** Schéma elektretového mikrofonu [27]

### Mikrofony s tlakovou zónou (PZM)

Správné označení těchto mikrofonů je BOUNDARY EFFECT MICROPHONE (mikrofony s efektem ohraničené plochy), PZM (PRESSURE ZONE MICROPHONE) je pouze obchodní označení, které se ujalo i pro ostatní typy.

U klasických mikrofonů vznikají při větších vzdálenostech problémy s odrazem zvuku od zdí a dalších ploch. Tyto odrazy přicházejí na mikrofon oproti přímému zvuku o něco později a v různé fázi, což způsobuje nepříjemné zdvihy a poklesy na různých frekvencích. PZM mikrofony jsou konstruovány tak, aby tento efekt nevznikal. Kapsle je směřována na hladkou odrazovou desku a její vzdálenost od ní je pouze minimální. To způsobuje, že kapsle snímá změny tlaku pouze v této tlakové zóně viz obrázek 2.24, a tak není snímán signál ovlivněn změnami okolního akustického tlaku jak je tomu u tradičního systému snímání. Výhodou tohoto systému je také to, že mikrofon dává dvojnásobný výstupní signál, neboť přímý a odražený zvuk dorazí na mikrofonní kapsli ve fázi. [20] [27]



**Obr. 2.24:** Schéma PZM mikrofonu [27]

### 2.3.2.6. Zvukoměr – akustický analyzátor

Základním měřicím přístrojem akustiky je zvukoměr. V současné době s rozvojem digitálních měřicích přístrojů představuje i běžný zvukoměr poměrně komplikované měřicí zařízení, které je vhodné pro mnoho různých druhů akustických a vibračních měření. V digitálním zvukoměru je zabudovaný frekvenční analyzátor v reálném čase (obr. 2.25). Akustickým měničem na vstupu je obvykle mikrofon, ale na většinu zvukoměrů je možno pomocí redukce připojit i jiné měniče, jako například snímač zrychlení. Nejčastěji se používá kondenzátorový mikrofon, který má velmi dobré parametry. Především důležitá je lineární frekvenční charakteristika v celém slyšitelném pásmu. V bezprostřední vzdálenosti za mikrofonem je umístěn zesilovač s velkým vstupním odporem (nábojový zesilovač). Součástí zvukoměru je dále zesilovač a analogové přepínání rozsahů, běžně jsou součástí váhové filtry A, B, C a ev. D a možnost oktávkové nebo třetinooktávkové filtrace. Váhové filtry A, B, C jsou inverzní ke křivkám stejné hlasitosti při hladinách 40, 80 a 120 dB, křivka D se používá pro letecký hluk. Podstatnou vlastností, která podstatně stanovuje třídu přesnosti zvukoměru, je převodník střídavého signálu na stejnosměrný. V analogovém provedení je výstupem napětí úměrné efektivní hodnotě vstupujícího střídavého napětí (tzv. efektovací obvod). Zobrazovací jednotka je dnes již většinou digitální. Její dynamické vlastnosti jsou však odvozeny od ručkových měřidel, jejichž rychlost reakce na změnu signálu závisí na mechanických a elektrických vlastnostech měřidla. Ty udávají časovou konstantu. Zobrazovaná hodnota pak přibližně odpovídá průměru za čas daný časovou konstantou. Norma stanovuje časové konstanty S (slow) 1s, F (fast) 200ms a I (impuls),

kteřá je nesymetrická a pro náběh má hodnotu 35 ms a pro doběh (pokles) 2s. Požadavky na elektroakustické parametry zvukoměrů jsou v normě IEC651 a jejích dodatcích. [29]



**Obr. 2.25:** Zvukoměr - spektrální analyzátor B&K 2270 [28]

### 3. Experimentální část

Zaměříme-li se na problematiku lisovaných dílů, narazíme na spoustu problémů s tím spojených. Nedostatečné mazání, výskyt trhlin, porušení povlaku, zadírání, namáhání nástrojů, s čím souvisí zkrácení jejich životnosti a mnoho dalších. Společnosti, které tímto způsobem materiál zpracovávají, mají samozřejmě zájem tyto problémy řešit. Zvláště pak zpracovatelé plechů pro automobilový průmysl, kde jsou kladeny vysoké nároky na povrch výlisků. Mnoho institucí se touto problematikou zabývá už řadu let, a tak otázka tribologie rozhodně není novým tématem. V laboratorním prostředí dnes není problém nasimulovat různé výrobní pochody týkající se lisování a následně je analyzovat. Pomocí tenzometrů tak dostáváme hodnoty sil a tlaků, přes výpočty pak koeficienty tření a celkově tak chování soustav. Problém nastává v momentě, kdy chceme tyto poznatky převést do praxe. Všechna tyto měření jsme schopni provádět na vzorcích v laboratoři. Takové metody jsou z hlediska ať už z technického nebo ekonomického v praxi neproveditelné. Další možností je plná simulace děje pomocí výpočetních softwarů. Zde ovšem nastává problém v nastavení reálných podmínek, především co se týče koeficientu tření, neboť při lisování složitých tvarů jsou v místě styku nástroje s plechem tribologické poměry různé. Hodnota koeficientu není při reálném ději stálá, ale mění se jak v čase, tak s tvarem výlisku. Zvláště u dílů pro automobilový průmysl, jejichž členitost je výrazná. Při těchto simulacích je však koeficient zadáván jako konstanta. Aby bylo dosaženo reálných výsledků, je u těchto simulací třeba podrobně popsat podmínky tažení, a proto je nutné znát konkrétní hodnoty koeficientu tření. Využívání těchto simulačních softwarů tak zatím není v praxi příliš časté. Je tedy třeba najít metody vyhodnocování lisovacího děje, které by splnily podmínky použití v praxi. Jednou z možných metodik, která by tato kritéria mohla splňovat je právě akustická analýza procesu. Zaměřili jsme se tedy na otázku, zda je možné monitorovat proces zadírání plechů pomocí akustické analýzy.

#### 3.1. Cíle práce

Cílem mé práce je porovnat silové výstupy s výstupy akustickými a nalézt možnost spojitost, která by byla dále využitelná k analýze zadírání. Klíčovými body mé práce tedy jsou:

- Silová analýza zadírání na zařízení SOKOL 400.
- Zvuková analýza pomocí akustického analyzátoru.
- Porovnání a vyhodnocení obou měření.

## 3.2. Analýza procesu zadírání pomocí silové odezvy

Silová analýza procesu zadírání byla provedena na jednoúčelovém zařízení pro tribologické zkoušky „SOKOL 400“. Toto zařízení se nachází v laboratořích Technické univerzity v Liberci.

### 3.2.1. SOKOL 400

Zařízení, které je svého druhu poměrně unikátní, bylo zkonstruováno a sestrojeno přímo na univerzitě v Liberci. Na tomto zařízení je možné modelovat různé podmínky vyskytující se během tažení výlisků nepravidelného tvaru, a to při vysokých rychlostech. Modelovat tak lze např. tažení s použitím brzděné lišty, tažení v oblasti přidržovače, tažení v oblasti tažné hrany nástroje atd.

Základem zařízení je samonosný rám tvořený dvěma vodícími tyčemi a třemi pevnými deskami. Po vodících tyčích se pohybuje suport unášený párem pohybových kuličkových šroubů. Kroutící moment je přenášen na šrouby pomocí převodu s ozubeným řemenem. Motor má snímání otáček pomocí resolveru, ten je připojen na frekvenční servoměnič, který po zapnutí a nalezení výchozí polohy kompletně kontroluje pohyb a polohování suportu.

Na vlastním zařízení je upevněn pomocí rámu zkušební přípravek. Ten je opatřen čtyř sloupkovým vedením pro zajištění dostatečné tuhosti přípravku a rovinnosti funkčních ploch čelistí. Čelisti přípravku jsou silově ovládané hydraulickým válcem připojeným na hydraulický agregát. Tlak v systému je vyvozován automaticky dle nastavené požadované hodnoty. Čelisti mají velikost kontaktní plochy, s ohledem na zkoušky uznávané v automobilovém průmyslu,  $3120 \text{ mm}^2$  (40 mm x 78 mm).



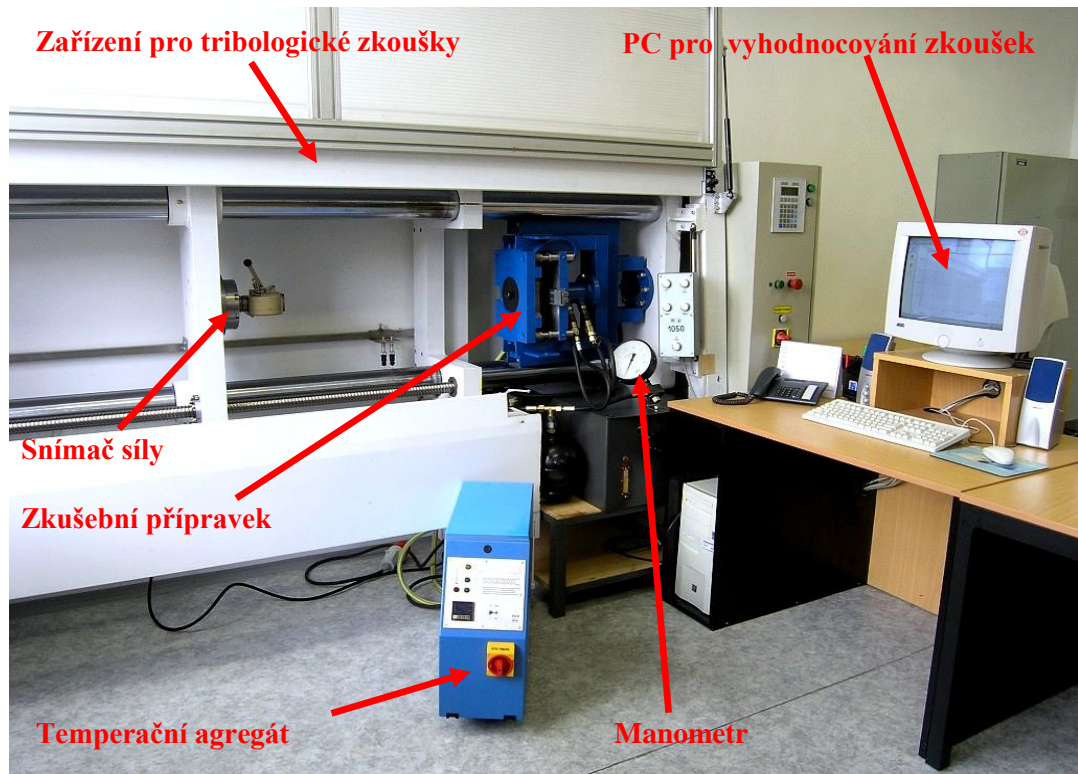
Na obr. 3.1 je pohled na ovládací panel stroje, kde pomocí jednotlivých kláves se ovládá chod celého zařízení. Automatický cyklus se spouští pomocí klávesy **F1** na displeji. Po odstartování cyklu provede suport pohyb podle nastavených parametrů (rychlosti posuvu, měřené délky pásku, frekvence snímání dat).

Při dosažení nastavené rychlosti začíná odměřovat navolenou dráhu a zároveň se nastaví příslušný výstup frekvenčního měniče jako signál pro zahájení měření.

Automatický cyklus se ukončí po dosažení příslušné dráhy a zastavení suportu.

**Obr. 3.1:** Ovládací panel

Kompletní zařízení s popisem jednotlivých částí je vidět na obrázku 3.2.



**Obr. 3.2:** Uspořádání tribologického pracoviště se zkušebními zařízeními SOKOL 400

Princip tohoto zařízení je takový, že je mezi nepohybující se čelisti vložen pásek plechu. Na těchto čelistech pak lze nastavovat konkrétní kontaktní tlak. Jeden z konců je pak upevněn do pohyblivých čelistí (snímač síly). Ty se při procesu měření posouvají námi určenou rychlostí a protahují pás skrz nepohybující se čelisti. V závislosti na kontaktním tlaku vyvozeném mezi nepohybujícími se čelistmi je snímána síla potřebná k protažení pásu námi zadanou rychlostí. Výsledkem je nám poté průběh síly v závislosti na vzdálenosti.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny technické parametry tribologického vysokorychlostního zařízení.

**Tabulka 3.1:** Technické parametry tribologického zařízení SOKOL 400

Elektromotor asynchronní	5.5 kW 3x380 V / 50Hz externí chlazení	
Frekvenční měnič SERVO	11 kW 3x380 V - LENZE	
Maximální tahová síla suportu	20 000 N	
Rozsah nastavitelných posuvů	1 - 400mm <sup>s<sup>-1</sup></sup>	
Snímání otáček	Resolver - LENZE	TS265.1N131E78
Komunikační panel HMI	LENZE	
Primární převod ozubeným řemenem	8MR-50	56/28 zb.
Pohybové šrouby BOSCH-REXROTH	Ø40, stoupání 20	2 ks
Maximální rychlost posuvu	400mm <sup>s<sup>-1</sup> při cca 85 Hz</sup>	
Délka pracovního posuvu	max. 1,2m	
Celková délka posuvu	1,5m (včetně rozjezdů a dojezdů)	

Parametry, při kterých lze v současnosti provádět tribologickou zkoušku protahováním pásku, jsou uvedeny v následující tabulce 3.2.

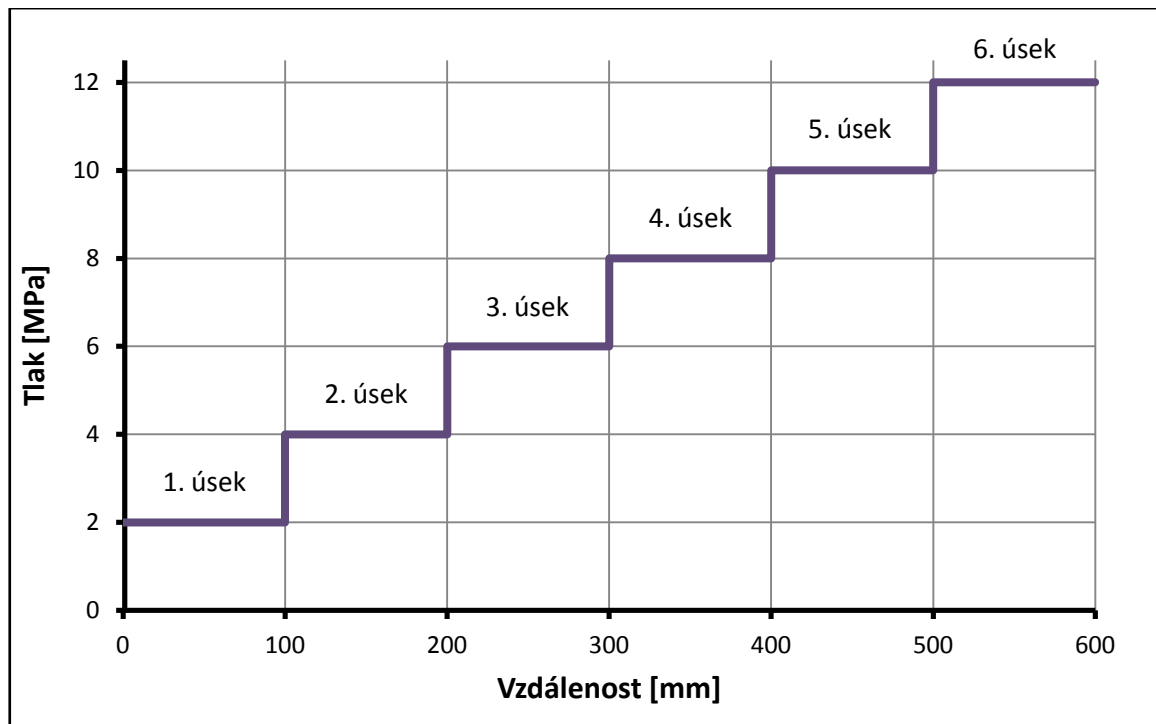
**Tabulka 3.2:** Technické parametry zařízení SOKOL 400

Zkušební technické parametry zařízení SOKOL 400	
Rychlost posuvu suportu	$v = 1 \text{ až } 400\text{mm}\text{s}^{-1}$
Kontaktní tlak čelistí	$p = 0,5 \text{ až } 35\text{MPa}$
Kontaktní plocha čelistí	$S = 40 \times 78\text{mm}$
Teplota čelistí	$T = 15 \text{ až } 95^{\circ}\text{C}$
Frekvence snímání dat	$f = 10\text{kHz}$

### 3.2.2. Podmínky testu

Jelikož při reálném lisování členitých dílů dochází na povrchu plechu v různých místech k různým tlakům, byl celý test nastaven tak, že testovaný vzorek byl protahován skrz čelisti při stupňovitě se zvyšujícím tlaku (obr. 3.3). Rozsah tlaků byl zvolen ze zkušeností, kdy víme, že první známky zadírání se začínají projevovat od 2 MPa, naopak od 12 MPa už začíná docházet k přetržení vzorku, což není našim cílem. Zvolený rozsah jsme tedy stanovili od 2 do 12 MPa, přičemž byl tlak postupně zvyšován o 2 MPa. Protahování probíhalo při každé hodnotě tlaku na úseku o vzdálenosti 100 mm. Ve výsledku se tedy na 600 mm vzorku postupně vystřídalo šest různých hodnot tlaku.





**Obr. 3.3:** Graf znázorňující průběh testu

Za takovýchto podmínek byl test uskutečněn pro dvě různé rychlosti, konkrétně 1 mm/s a 10 mm/s. Opět bylo vycházeno z předchozích zkušeností, z kterých víme, že k největšímu zadírání dochází při nízkých rychlostech, kdy je dostatek času na tvorbu můstků. Proto byla horní hranice stanovena právě na 10 mm/s. Dolní hranice 1 mm/s je přibližně nejnižší rychlost, která je v procesu tažení dosahována.

### 3.2.3. Volba testovaného materiálu

Pro náš experiment jsme zvolili dva zástupce různých materiálů. První testovaná je běžně používaná hlubokotažná ocel se žárově naneseným zinkovým povlakem. Ocel nese označení:

#### HX300LAD Z100 (dále označován jako HDG)

H	<i>pro tažení za studena</i>
X	<i>válcovaná za studena či tepla</i>
300	<i>min. smluvní mez kluzu 300 MPa</i>
LA	<i>mikrolegovaná ocel</i>
D	<i>žárově nanesený povlak</i>
Z	<i>žárově nanesený zinek</i>
100	<i>vrstva zinku 100 g/m<sup>2</sup></i>

Tato ocel má poměrně vysokou zadíravost, budou tak dobře pozorovatelné projevy zadírání, a to jak silové, tak akustické.

Druhým testovaným materiálem je hlubokotažná ocel s povlakem zinek – hořčík, též žárově naneseným. Tato ocel s vysokou odolností vůči korozi nese označení:

### HX180BD ZM90 (dále označován jako ZM)

H	<i>pro tažení za studena</i>
X	<i>válcovaná za studena či tepla</i>
180	<i>min. smluvní mez kluzu 180 MPa</i>
B	<i>bake hardenable</i>
D	<i>žárově nanesený povlak</i>
ZM	<i>žárově nanesený zinek - hořčík</i>
90	<i>vrstva zinku 90 g/m<sup>2</sup></i>

U tohoto materiálu se zadírání projevuje mnohem méně, a to z důvodu obsahu hořčíku v jeho povlaku. Ve výsledku tak budeme moci porovnat výsledky pro dva rozdílné materiály.

#### 3.2.4. Materiál nástroje na tažení

Nástrojem pro tažení, v případě laboratorního testu, byl přípravek na tribologickém zařízení SOKOL 400. Funkčními částmi přípravku byly dvě výměnné čelisti z materiálu používaného na výrobu nástrojů pro tažení výlisků karosářského typu v průmyslové praxi.

Vzhledem k rozměrům nástrojů pro výlisky karosářského typu se pro jejich výrobu používá nejčastěji tvárná litina. Z důvodů poškození povrchu nástroje během tažení se v současné době nástroje tepelně zpracovávají kalením. Zakalení materiálu přispívá ke zvýšení životnosti nástrojů a současně ke snížení výskytu zadírání během procesu tažení.

Použité čelisti zkušebního přípravku tedy byly z tvárné litiny povrchově zakalené s označením GGG-70L (interní označení v koncernu VW dle normy DIN 1693). Pro testování pak zjištěné hodnoty tvrdosti, chemického složení a drsnosti:

- Tvrdost 320 HB
- Chemické složení C = 3,2÷3,4%, Mn = 0,3÷0,8%, Si = 1,8÷2,4%, P ≤0,05%, S ≤ 0,01%, Cu ≈ 1,0%, Ni ≈ 1,0%, Mo ≈ 0,5%
- Drsnost čelistí R<sub>a</sub> = 0,07 μm, R<sub>z</sub> = 0,76 μm

Kontaktní plocha čelistí je  $S = 3120 \text{ mm}^2$ . Tato plocha je daná šířkou testovaného pásku 40 mm a délkou funkční části čelisti 78 mm.

### 3.2.5. Postup měření

Z obou vybraných materiálů jsme připravili vzorky ve formě pásků plechů (obr. 3.4) o rozměru 850 x 45 mm. Tedy 600 mm testovaná vzdálenost, plus přídavky na uchycení do zařízení.



**Obr. 3.4:** Připravené vzorky, zleva ZM a HDG

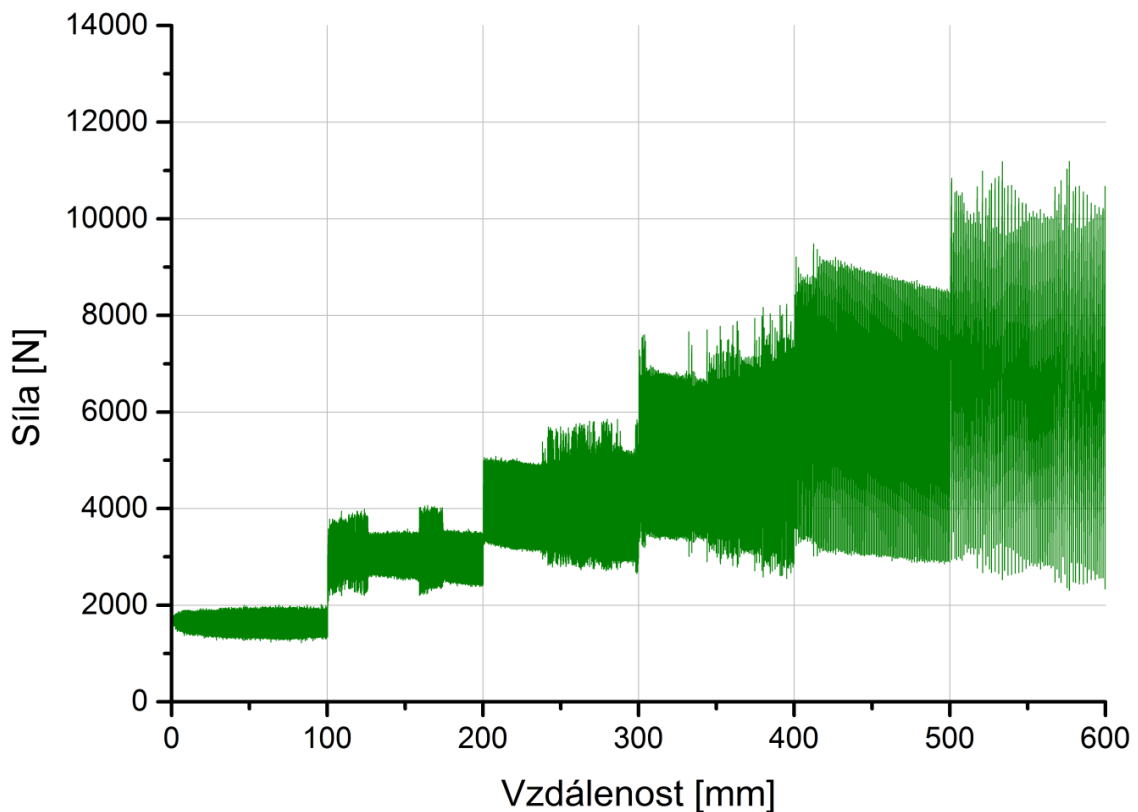
Na vzorek byla nejdříve nanесena souvislá vrstva pracího oleje Fuchs Anticorit PL 3802–39 LV. Tento typ oleje byl zvolen pro autentičnost děje, neboť totožný olej je rovněž nanášen při reálném lisování automobilových dílů v podmínkách Škoda Auto a.s. Vzorek byl následně vložen mezi čelisti přípravku. Po nastavení výchozí polohy byl jeden z konců upevněn do snímače síly. Před spuštěním testu byl program nastaven podle zvolených podmínek, tedy stupňovitě se zvyšující tlak po 100 mm při dané rychlosti. Po spuštění probíhal celý test automaticky. Tímto způsobem byly provedeny testy u obou materiálů při obou zvolených rychlostech.

### 3.2.6. Výstupy testů

#### 3.2.6.1. Materiál HX300LAD Z100

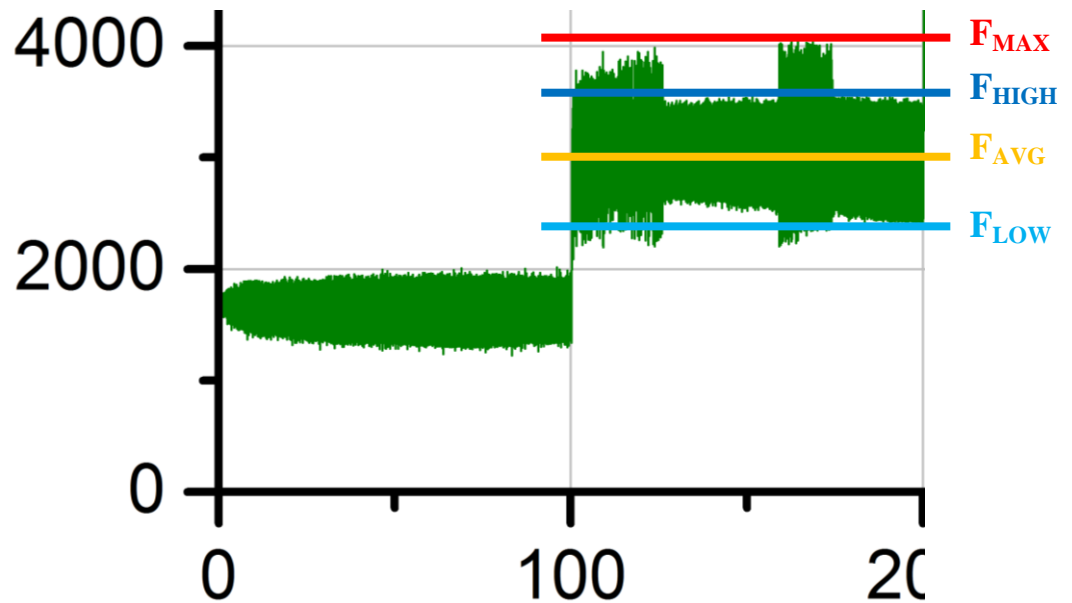
Prvním testovaným materiálem byl plech s žárově nanесenou vrstvou zinku. Rychlost posuvu byla volena 1 mm/s. Při testované vzdálenosti 600 mm tak trval jeden test 10 minut. Aktuální velikosti tažných sil, potřebné pro posuv pásku plechu v čelistech

zkušebního přípravku jsou snímány tenzometrickým snímačem síly KAF 20 kN a prostřednictvím software Sampl2k jsou ukládány do formátu \*.csv. Takto získaná data je možno dále zpracovat v libovolném SW pro analýzu dat (Excel, Origin, Matlab atd.) Na obrázku 3.5 je uveden příklad výsledku měření materiálu HX300, kdy byl pro zpracování dat použit SW Origin. Z výsledků měření je patrné, že s rostoucím tlakem dochází k zvýšené tvorbě mikrospojů v kontaktních plochách testovaného materiálu a zkušebních čelistí projevující se rozkmitem síly. Příčinou opakujícího se nárůstu a poklesu tažné síly je vznik a porušení mikrospojů mezi taženým materiálem a zkušební čelistí. Zároveň, jak je z grafu též patrné, s rostoucím kontaktním tlakem se snižuje i frekvence zadírání plechu.



**Obr. 3.5:** Silový průběh pro rychlost 1 mm/s

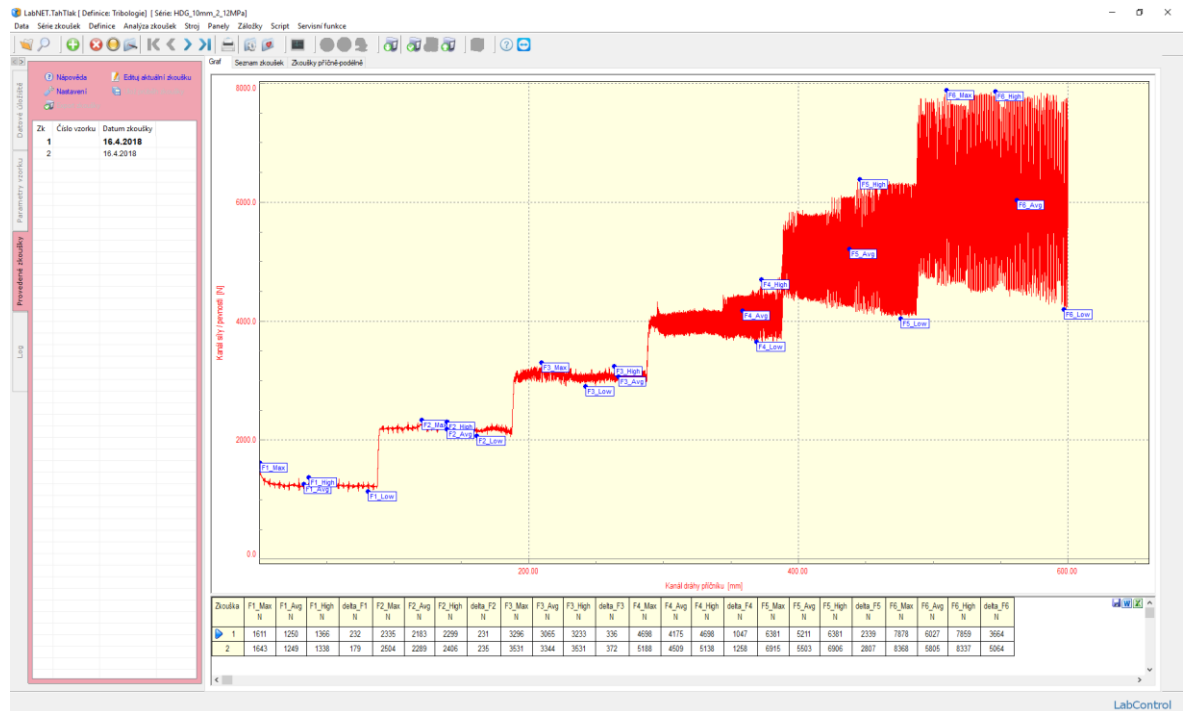
Pro vzájemné porovnání výsledků měření byly v každém měřeném úseku vyhodnocovány charakteristické silové veličiny, a to síla maximální, střední, horní a velikost rozkmitu. Význam jednotlivých vyhodnocovaných veličin je patrný z obrázku 3.6.



**Obr. 3.6:** Vyhodnocování jednotlivých úseků

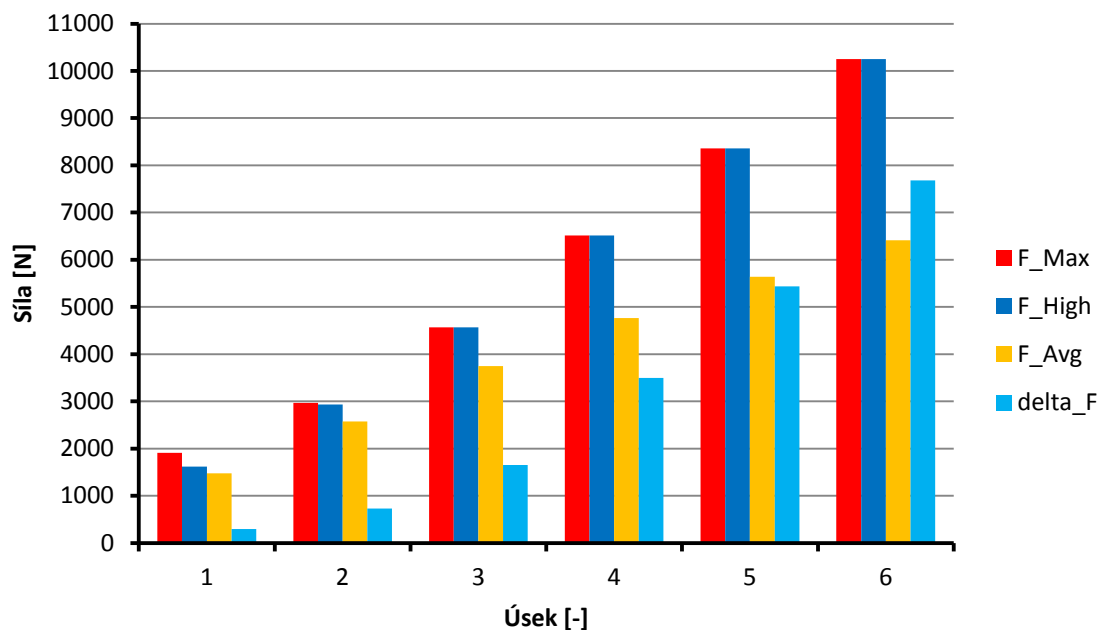
- Maximální síla  $F_{MAX}$  je nejvyšší hodnota, které bylo v měřeném úseku dosaženo.
- Horní síla  $F_{HIGH}$  je nejvyšší velikost síly, které bylo dosaženo v tzv. ustáleném úseku měření (vyhodnocována až po dosažení 30 mm protažení testovaného vzorku), spodní síly.
- Spodní síla  $F_{LOW}$  je nejmenší velikost síly, které bylo dosaženo v tzv. ustáleném úseku měření (vyhodnocována až po dosažení 30 mm protažení testovaného vzorku), spodní síly.
- Velikost rozkmitu delta F je rozdíl mezi  $F_{HIGH}$  a  $F_{LOW}$  a je měřítkem velikosti zadírání testovaného plechu.

Vyhodnocení jednotlivých veličin bylo provedeno pomocí SW Labtest 4, jehož prostředí a způsob vyhodnocení je patrné z obrázku 3.7.



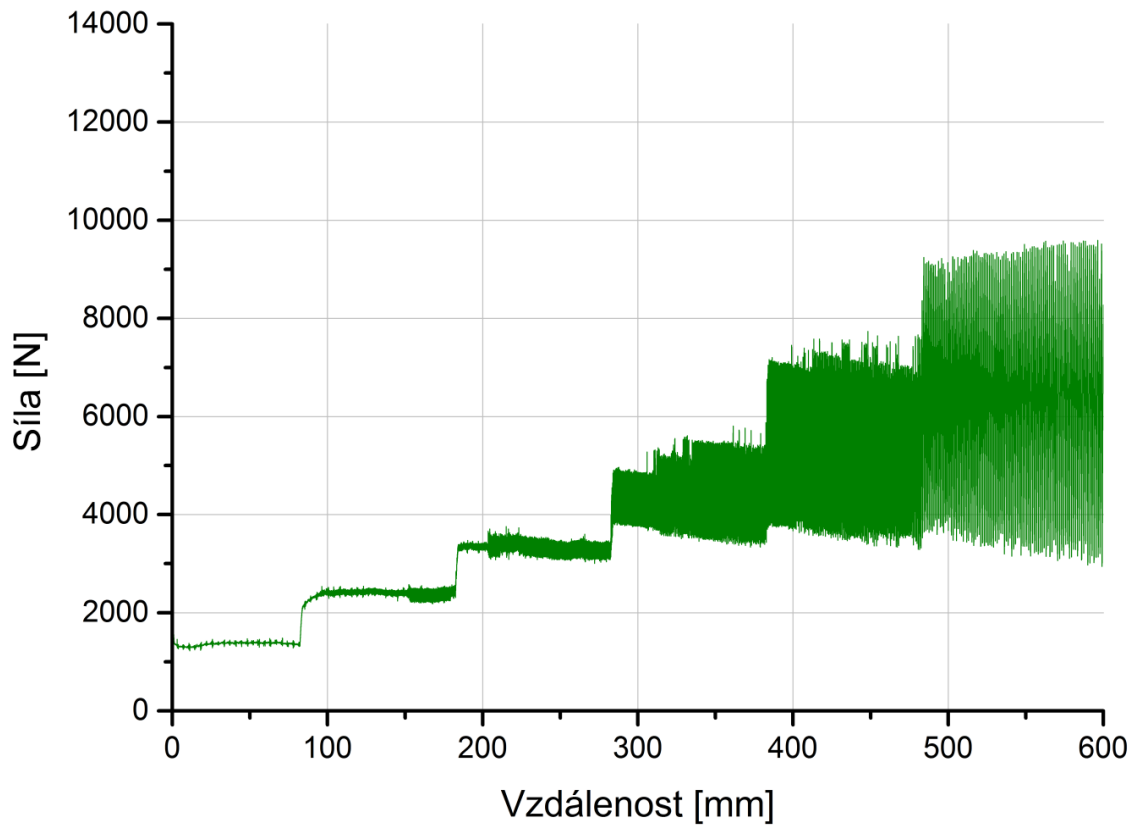
Obr. 3.7: Prostředí SW Labtest

Porovnání sil z jednotlivých úseků je graficky znázorněno na obrázku 3.8.



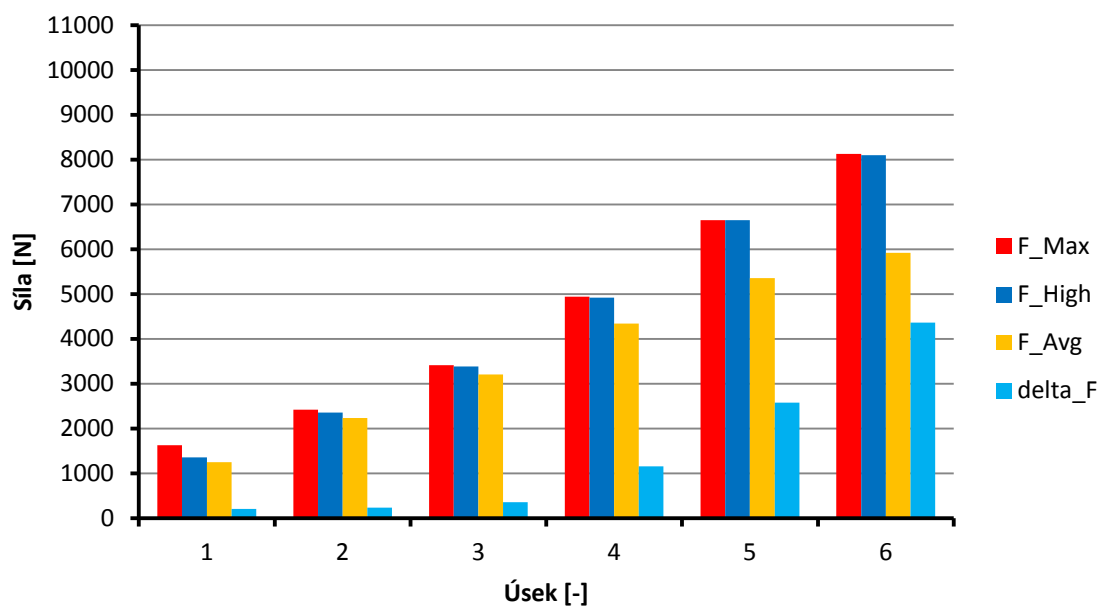
Obr. 3.8: Porovnání jednotlivých úseků z hlediska velikosti sil

Druhý test už probíhal při rychlosti 10 mm/s. Trval 1 minutu a z jeho výstupu jsme opět sestavili graf závislosti síly na vzdálenosti (obr. 3.9). Ze silového průběhu je patrné, že zadírání se začne více projevovat až od čtvrtého úseku. Dříve se při takovéto rychlosti můstky nestačí vytvářet.



**Obr. 3.9:** Silový průběh pro rychlost 10 mm/s

I v tomto případě je znatelné zvýšení rozkmitu síly se stoupajícím tlakem a snížení frekvence utržení můstků. Ovšem hodnoty nedosahují takových hodnot, jako tomu bylo při rychlosti 1 mm/s. To lze i pozorovat v grafu na obrázku 3.10, kde jsou opět porovnány síly v jednotlivých úsecích.

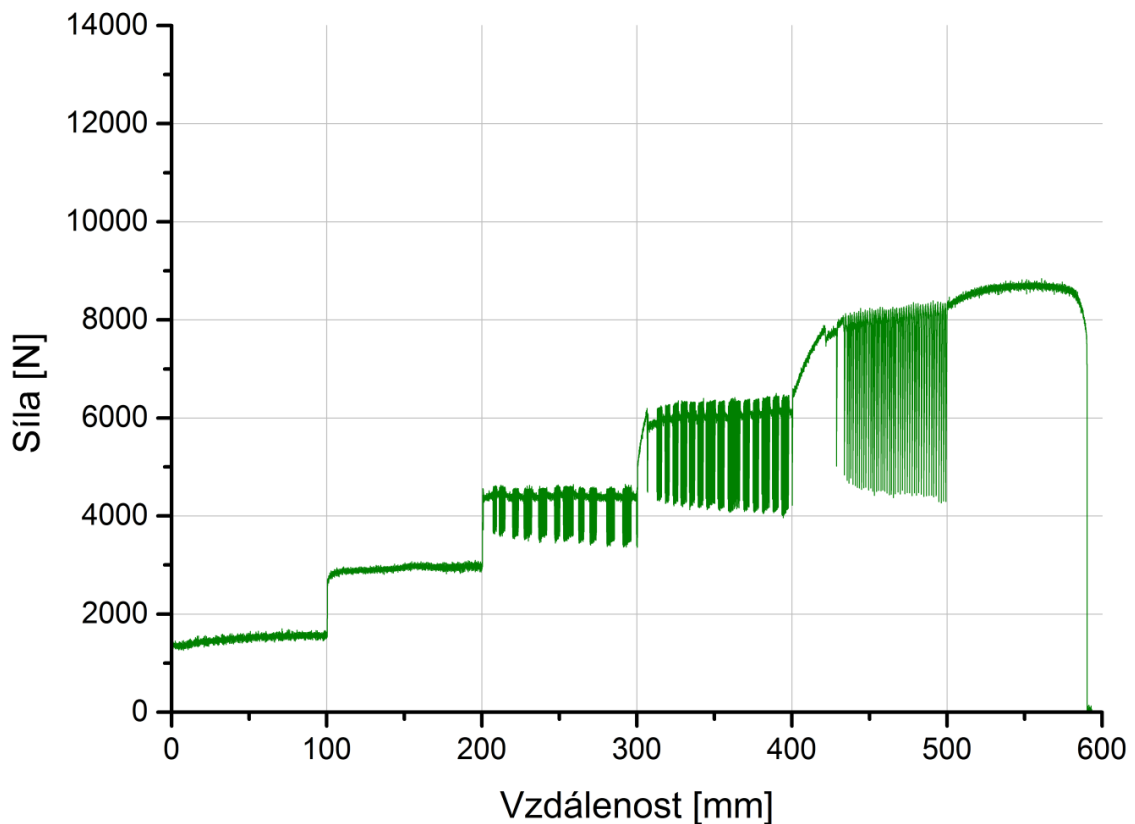


**Obr. 3.10:** Porovnání jednotlivých úseků z hlediska velikosti sil

### 3.2.6.2. Materiál HX180BD ZM90

Druhým testovaným materiálem je plech s povlakem zinek – hořčík. Tento materiál se začíná postupně více využívat v automobilovém průmyslu. Jeho výhodou je nejen větší odolnost proti korozi, ale také menší sklony k zadírání. Může za to zmíněný obsah hořčíku, který je tvrdší než zinek.

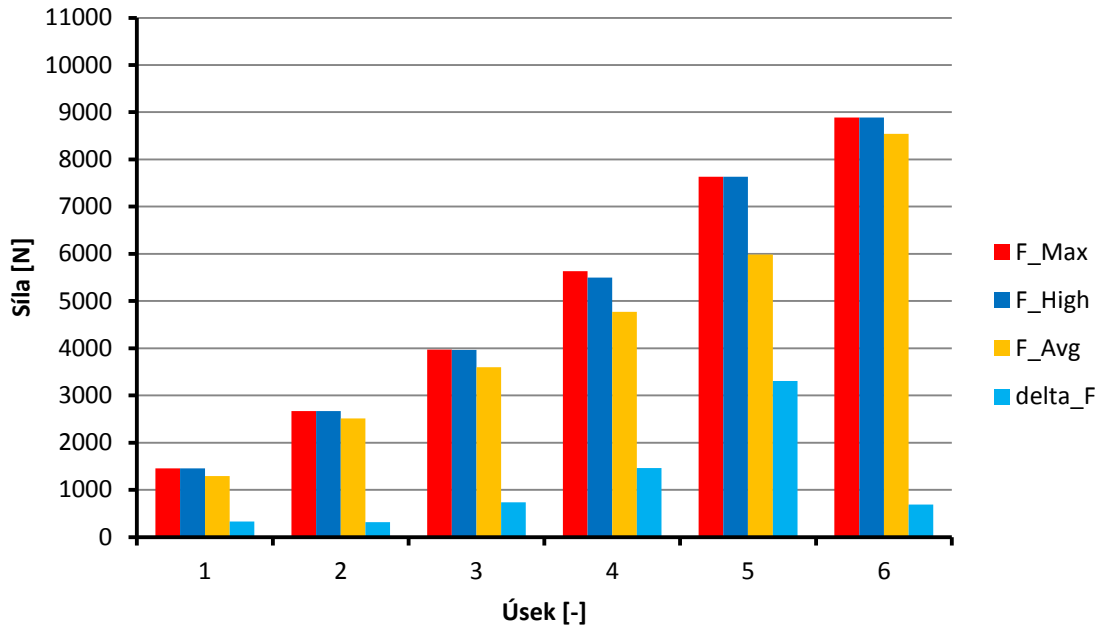
První test proběhl, stejně tak jako u prvního materiálu, za rychlosti 1 mm/s. Ani při takto nízké rychlosti nemá materiál zprvu sklony k zadírání (obr. 3.11). První dva úseky jsou z pohledu sil takřka konstantní a nevykazují „stick-slip“ efekt. Až ve třetím úseku, tedy při tlaku 6 MPa můžeme pozorovat projevy zadírání.



**Obr. 3.11:** Silový průběh pro rychlost 1 mm/s

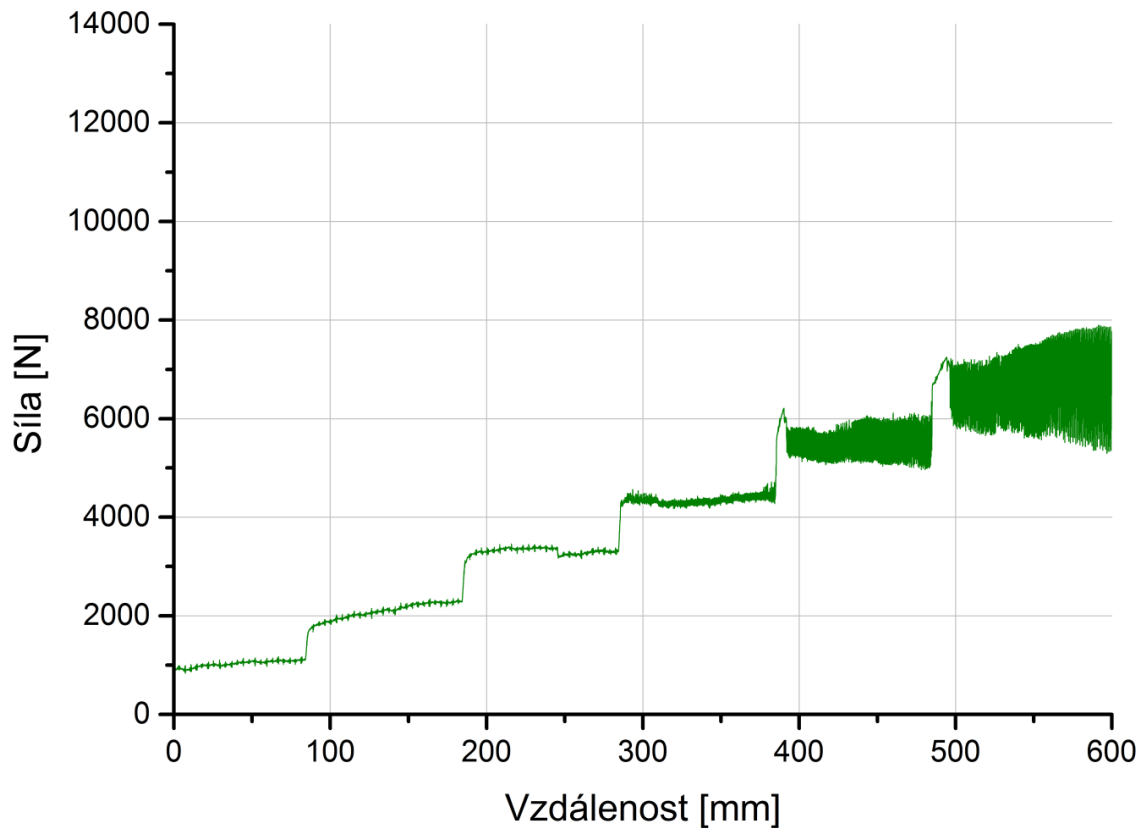
V posledním úseku už projevy zadírání opět nepozorujeme, není to ovšem tím, že by zde k zadírání nedocházelo. Důsledkem vysokého koeficientu tření došlo k zastavení vzorku a k následnému porušení vlivem plastické deformace. V posledním úseku měření tak byl de facto zaznamenán průběh tahové zkoušky. Vyhodnocené síly z jednotlivých úseků byly opět zaneseny do sloupcového grafu (obr. 3.12) pro jejich vzájemné porovnání.





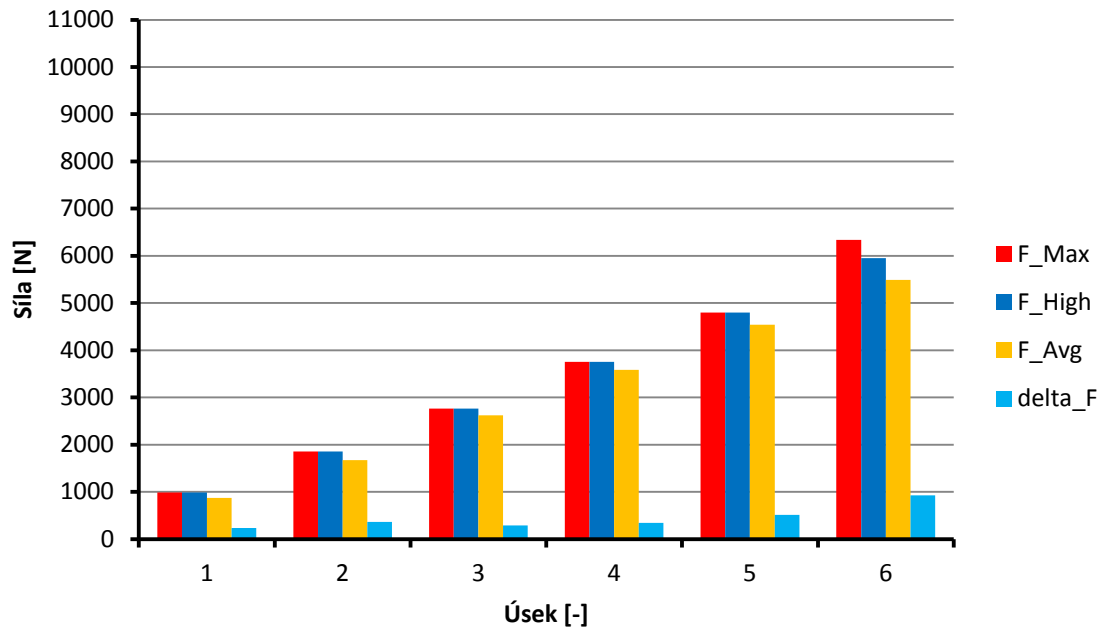
**Obr. 3.12:** Porovnání jednotlivých úseků z hlediska velikosti sil

Poslední test byl proveden při rychlosti 10 mm/s. Silovou odezvu vidíme na obrázku 3.13. Zadirání se projevuje až v posledních dvou úsecích, a to poměrně málo.



**Obr. 3.13:** Silový průběh pro rychlost 10 mm/s

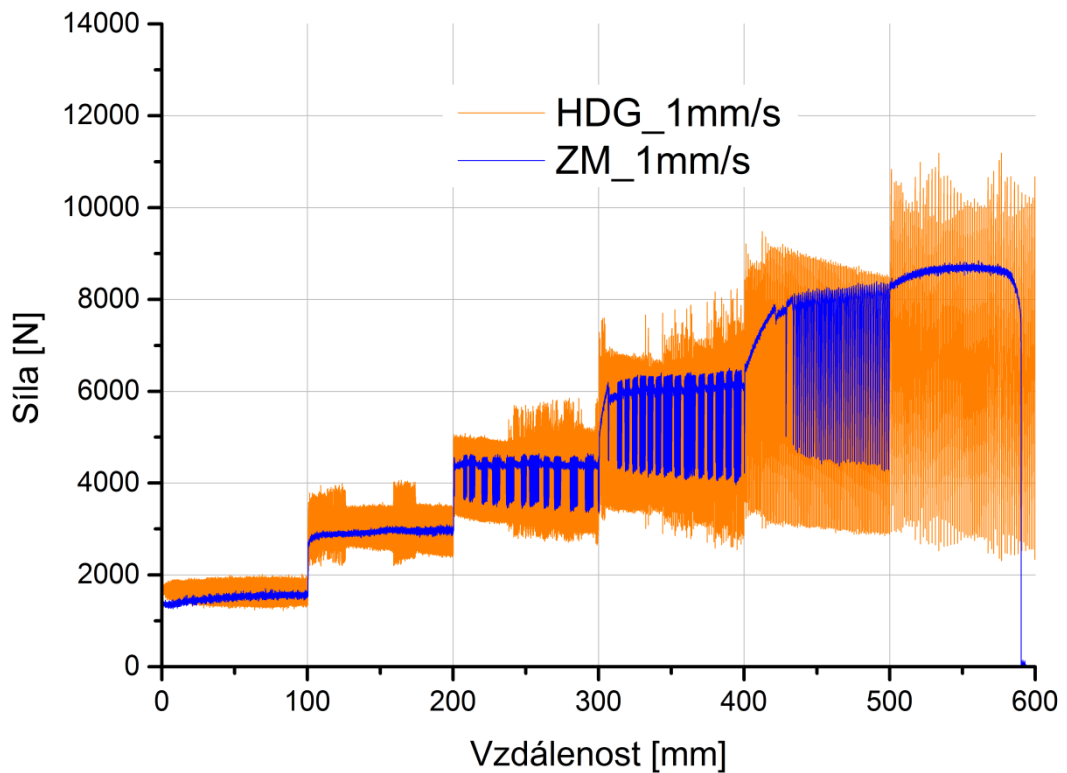
I v posledním případě byl sestrojen sloupcový graf s přehledem vyhodnocených sil pro všechny jednotlivé úseky (obr. 3.14).



**Obr. 3.14:** Porovnání jednotlivých úseků z hlediska velikosti sil

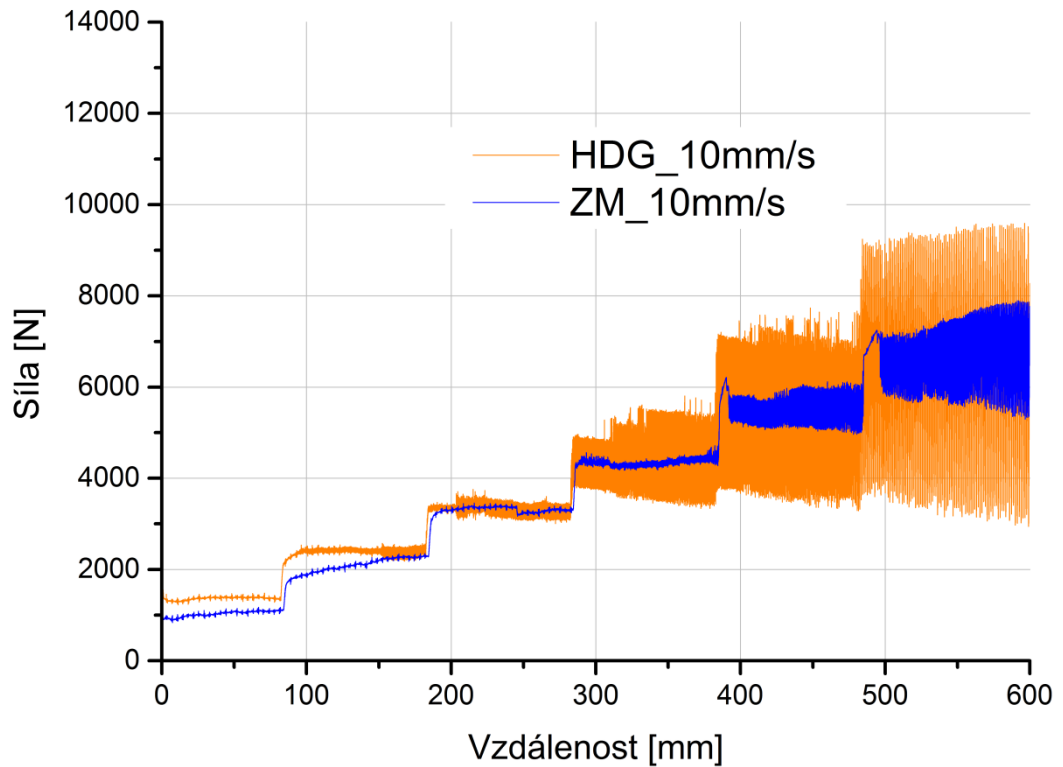
Ověřily se tedy oba naše předpoklady. Za první, že materiál s obsahem hořčíku v povlaku má menší sklony k zadírání a za druhé, že se zvyšující se hodnotou rychlosti se rovněž zadírání snižuje.

Rozdíl silové odezvy mezi materiály HDG a ZM při rychlosti 1 mm/s je zobrazen na obrázku 3.15. Jsou tak vidět velké rozdíly v rozkmitu sil mezi oběma materiály, a to ve všech úsecích.



**Obr. 3.15:** Rozdíl silové odezvy mezi oběma materiály při rychlosti 1 mm/s

V grafu na obrázku 3.16 je pak porovnání obou materiálů i pro vyšší testovanou rychlost, tedy 10 mm/s. U obou materiálů můžeme v případě prvních dvou úseků mluvit o přibližně stejném rozkmitu sil, protože ani v jenom případě ještě nedochází k zadírání. Od třetího úseku už se u materiálu HDG začíná objevovat zadírání, zatímco u ZM můžeme o zadírání mluvit až v úseku čtvrtém.



**Obr. 3.16:** Rozdíl silové odezvy mezi oběma materiály při různých rychlostech

### 3.3. Zvuková analýza procesu zadírání

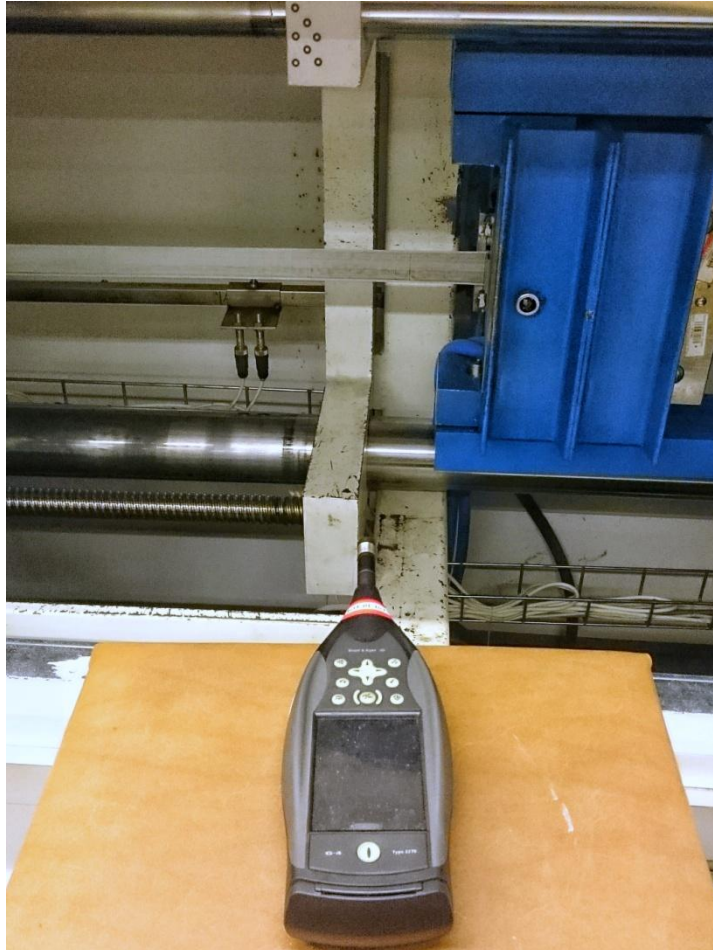
Při zvukové analýze byl nejprve zaznamenán zvuk jednotlivých testů na zařízení SOKOL 400, a to pomocí přenosného zvukového analyzátoru Brüel & Kjær typ 2270 (obr. 3.17). Následně byl výstup toho z tohoto zařízení dále zpracováván a vyhodnocován.



**Obr. 3.17:** Ruční analyzátor Brüel & Kjær typ 2270

### 3.3.1. Postup měření

Zvuk byl snímán souběžně s testy silové odezvy, které jsou popsány v kapitole 5.2. Při těchto testech byl zvukoměr uložen v blízkosti protahovaného vzorku, a to vždy ve stejné vzdálenosti, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků (obr. 3.18).

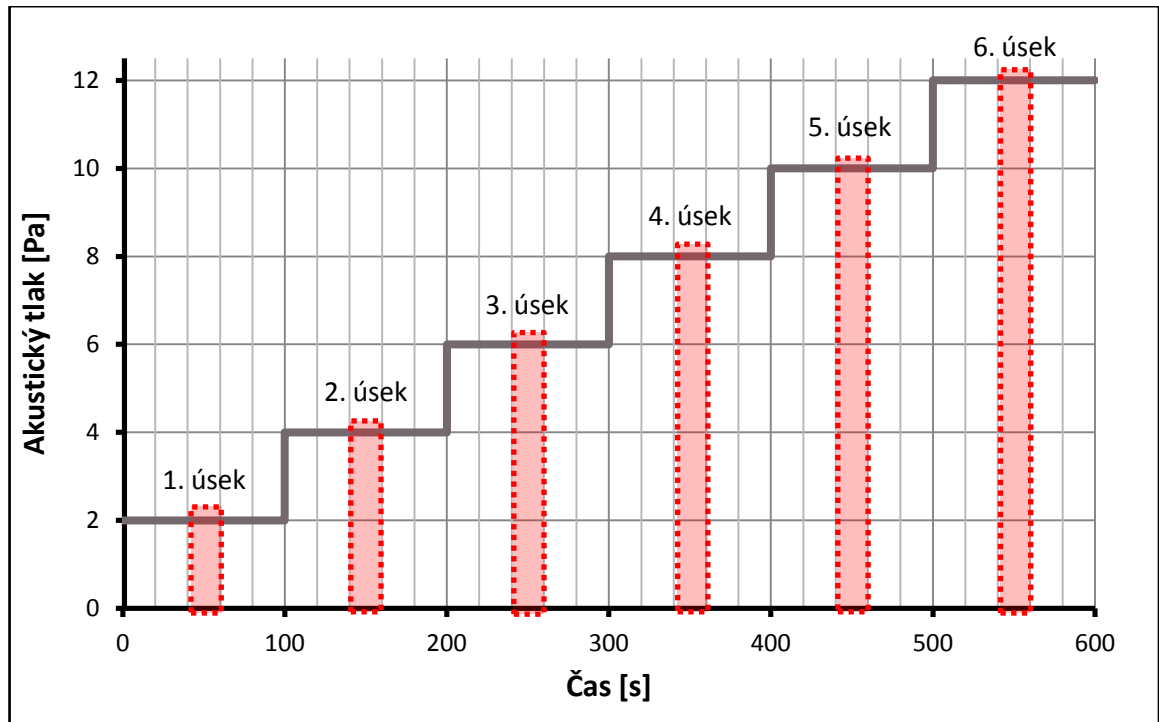


**Obr. 3.18:** Poloha zvukoměru při snímání zvuku

Zaznamenávání zvuku bylo spuštěno současně s testem na zařízení SOKOL a záznam probíhal po dobu celého testu.

### 3.3.2. Výstup z měření

Záznam ve formátu WAV pořízený zvukoměrem byl dále analyzován pomocí SW Pulse Reflex. Nahrávka byla pořízena s vzorkovací frekvencí 44100 Hz. Při takové frekvenci by bylo softwarově náročné analyzovat celý záznam, proto byla ze středu každého úseku vybrána výseč o délce v řádu jednotek sekund (obr. 3.19). Základem byl výstup ve formě časového průběhu intenzity zvuku, přesněji závislost akustického tlaku na času.

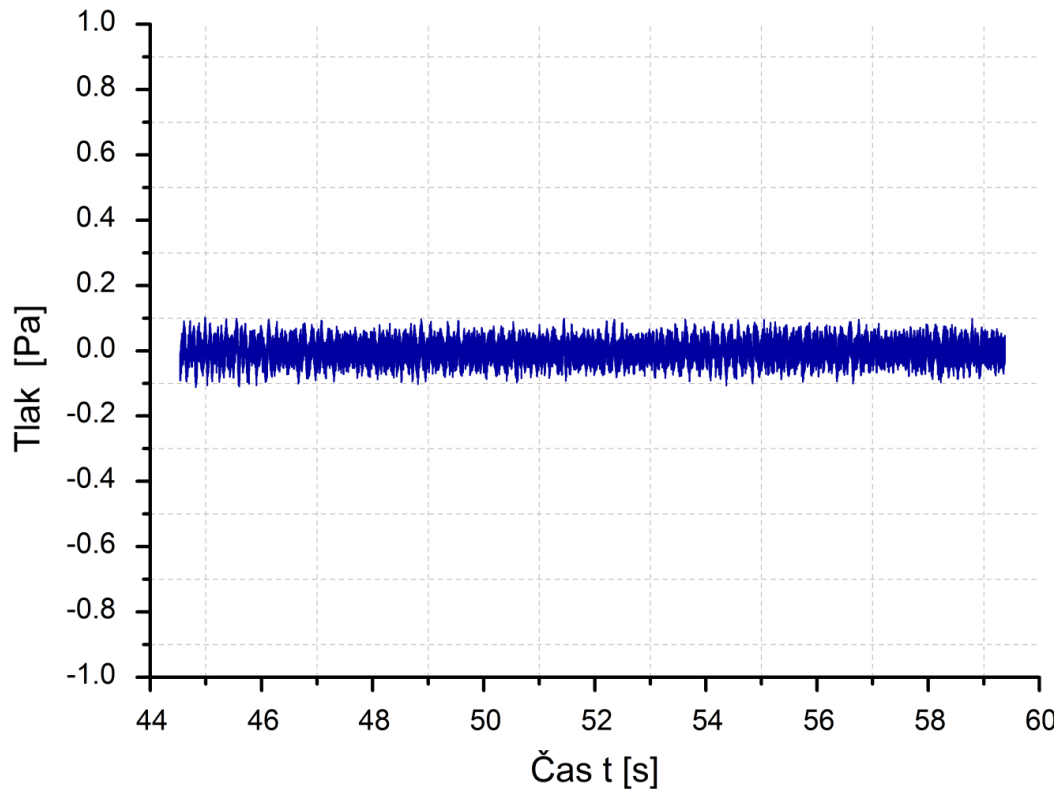


**Obr. 3.19:** Schematické znázornění vybraných výsečí z celkového záznamu

### 3.3.2.1. Materiál HX300LAD Z100 – rychlost 1 mm/s

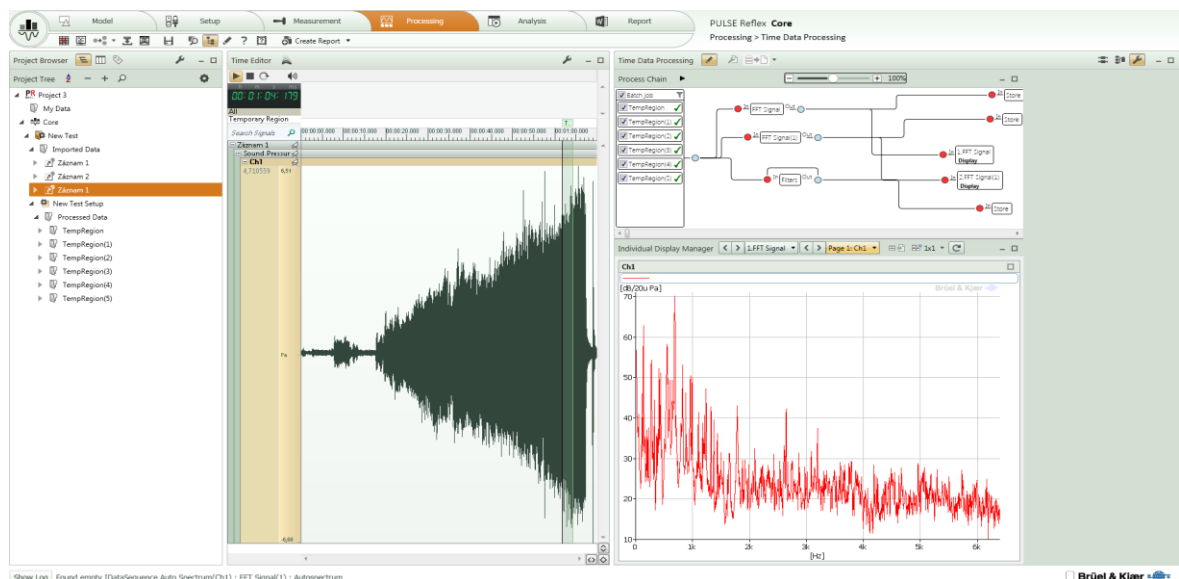
#### 1. úsek

Z prvního úseku dostáváme již zmíněnou výseč závislosti akustického tlaku na času (obr. 6.20). Už ze silové odezvy viz. kapitola 3.2.6.1. bylo zřejmé, že k zadírání na tomto úseku nedochází. Zvukový záznam tak obsahuje jen šum, tedy zvuky z okolí, převážně hluk ze zařízení SOKOL.



**Obr. 6.20:** Časový průběh akustického tlaku pro 1. úsek

Problémem při vyhodnocení zvukového záznamu je fakt, že zvukový záznam se skládá z mnoha frekvencí. Program Pulse Reflex (obr. 6.21), stejně jako mnoho dalších, tak pracuje při vyhodnocení signálu s tzv. FFT filtry (Fast Fourier Transform – Rychlá Fourierova Transformace). FFT je nástroj, který „rozloží“ nahrávku obsahující množství signálů na jednotlivé frekvence. Dostáváme tak výsledek měření v tzv. frekvenčních charakteristikách.



**Obr. 6.21:** Prostředí softwaru Reflex Pulse

## Rychlá Fourierova transformace

FFT je rychlá verze diskrétní Fourierovy transformace (DFT - Discrete Fourier Transform). DFT je transformace, která převádí diskrétní signál v časové oblasti do frekvenční oblasti. Tato transformace nachází uplatnění ve zpracování signálu v reálném času na pomalých procesorech, jakou jsou například DSP.

V současné době se číslicové signály užívají daleko častěji než analogové. To znamená, že jsou zadány v podobě číslicových řad, a ne nějakých funkcí. Za tím účelem byla vyvinuta metodika použitelná pro zpracování periodických vzorkovaných číslicových signálů. Tato metodika byla založena na požadavku, že pro vzorkovaný periodický signál musí dát výsledek stejný, jako pro původní signál spojitý (nevzorkovaný).

Pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace je třeba určit  $N \times N$  koeficientů (složitost  $O(N^2)$ ), což je značné množství. Zejména tam, kde počet vzorků dosahuje tisíců nebo desetitísiců, lze očekávat, že počet operací bude značný.

Rychlou Fourierovou transformací získáme stejné výsledky jako u Fourierovy transformace diskrétní, avšak mnohem rychleji. Klasická metoda DFT potřebuje  $O(N^2)$  operací, zatímco FFT pouze  $O(N \log N)$ .

V klasické podobě lze provádět pro signály, u nichž bylo sejmuto  $2^p$  vzorků, v současné době existují už i sofistikovanější algoritmy, které umožňují provést rychlou transformaci pro libovolný počet vzorků. Vysvětleme si stručně postup klasické metody

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad n=0, \dots, N-1$$

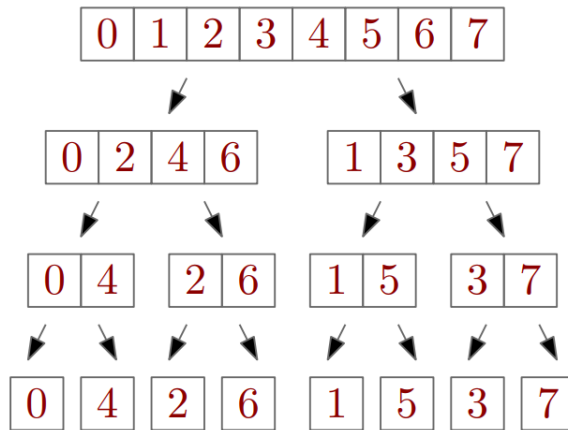
Nyní si rozdělme vzorky signálu na dvě skupiny, a to sudé vzorky a liché vzorky následujícím způsobem:

$$e_n = f_{2n}, \quad o_n = f_{2n+1}, \quad n = 0, 1, \dots, N/2 - 1$$

$$E_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n e^{-j\frac{2\pi}{N}n2k} \quad O_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} o_n e^{-j\frac{2\pi}{N}n2k}$$

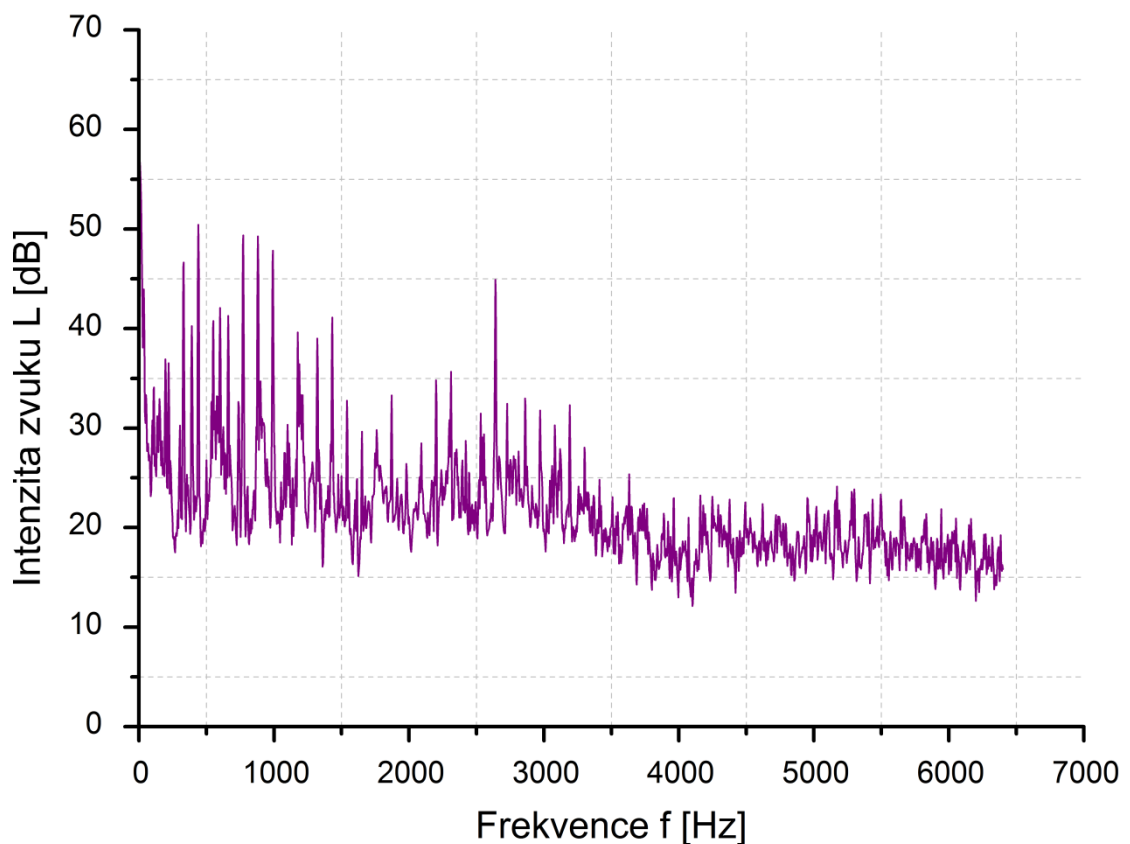
Tím jsme transformaci obsahující  $N$  bodů rozdělili na dvě transformace obsahující  $N/2$  bodů a stejným způsobem budeme pokračovat dál směrem do dalších dělení, až bude výsledná posloupnost mít jen dva prvky (obr. 3.22). Počet operací kompletní transformace se tak zmenší z  $O(N^2)$  na  $O(N \log N)$ .



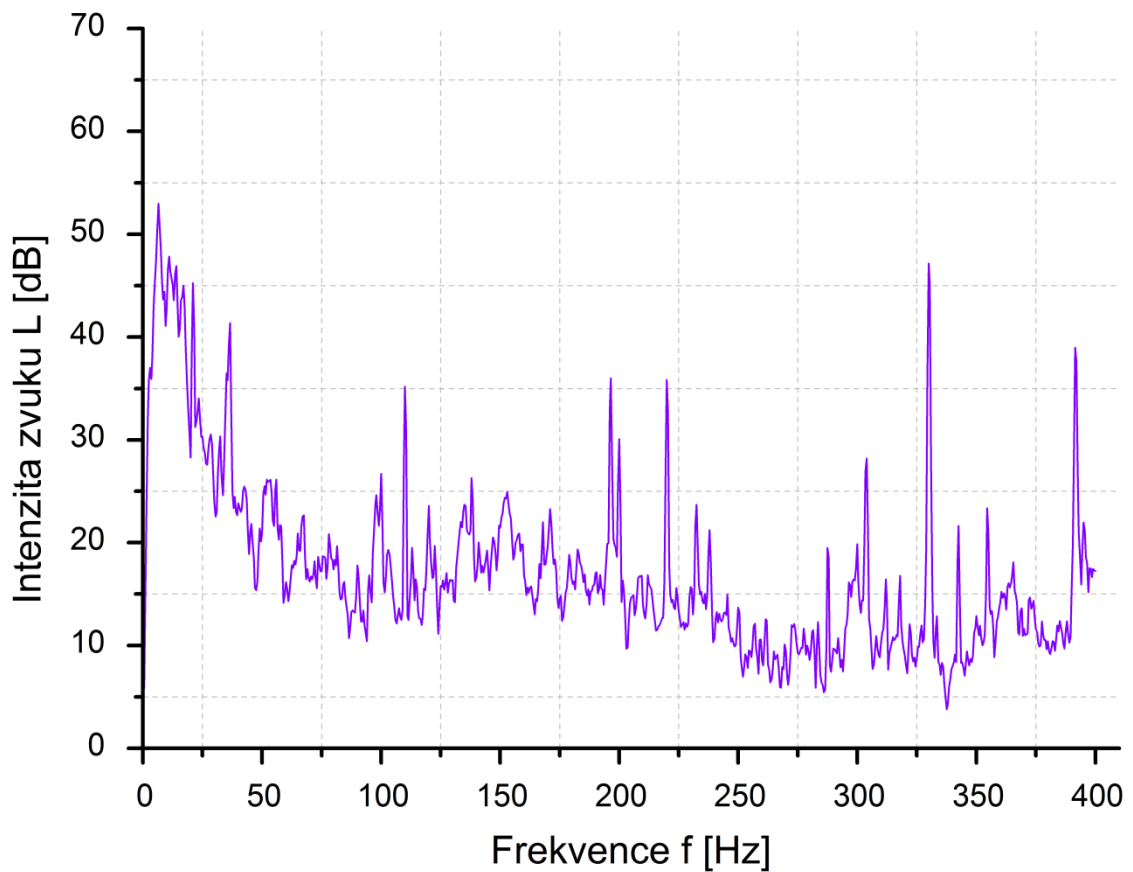


**Obr. 3.22:** Rozdělení transformací

Z předchozích zkušeností a subjektivního vnímání zvukového projevu při měření bylo patrné, že proces zadírání je charakterizován nízkými zvukovými frekvencemi. Z tohoto důvodu byly pro frekvenční analýzu zvoleny dva rozsahy frekvencí, kromě vysokofrekvenčního spektra v rozsahu 0 – 6400 Hz, i nízkofrekvenční spektrum o rozsahu 0 – 400 Hz. Výsledky FFT analýzy pro uvedená spektra v prvním úseku měření jsou vidět na obrázku 3.23 resp. 3.24.



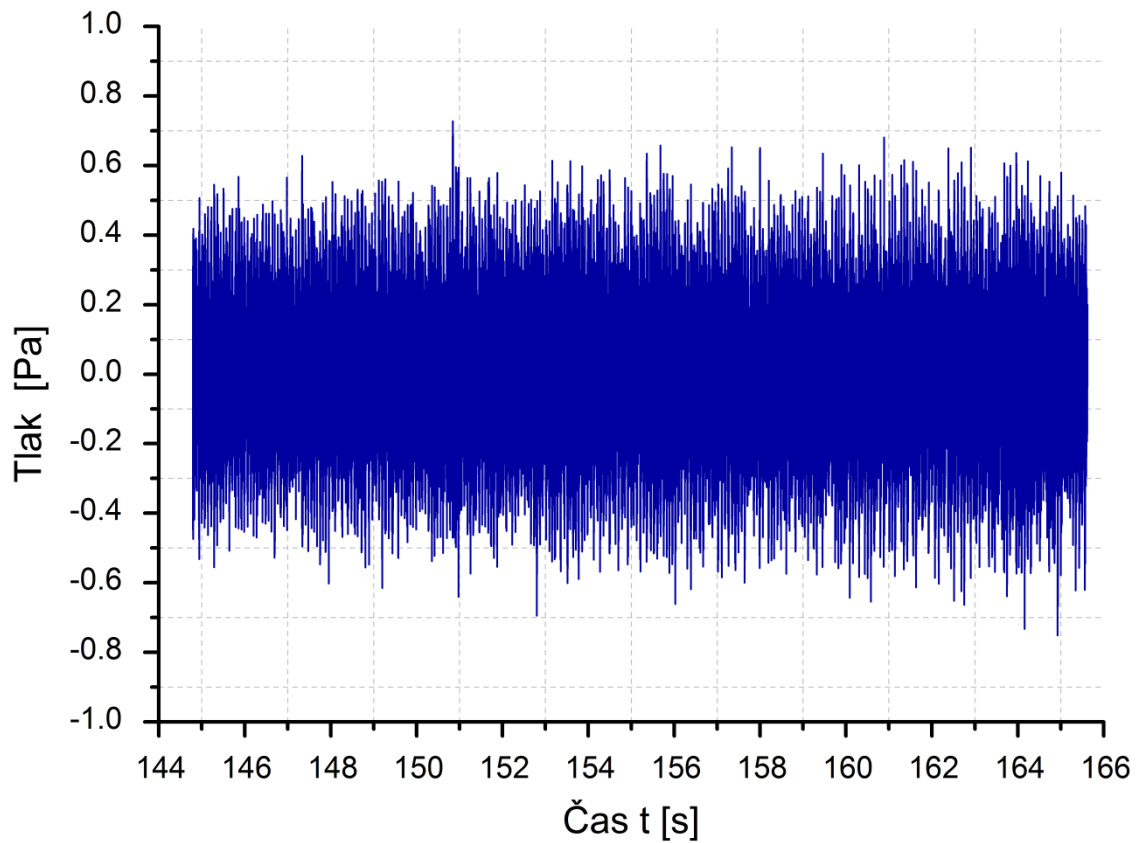
**Obr. 3.23:** Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.24:** Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-400 Hz

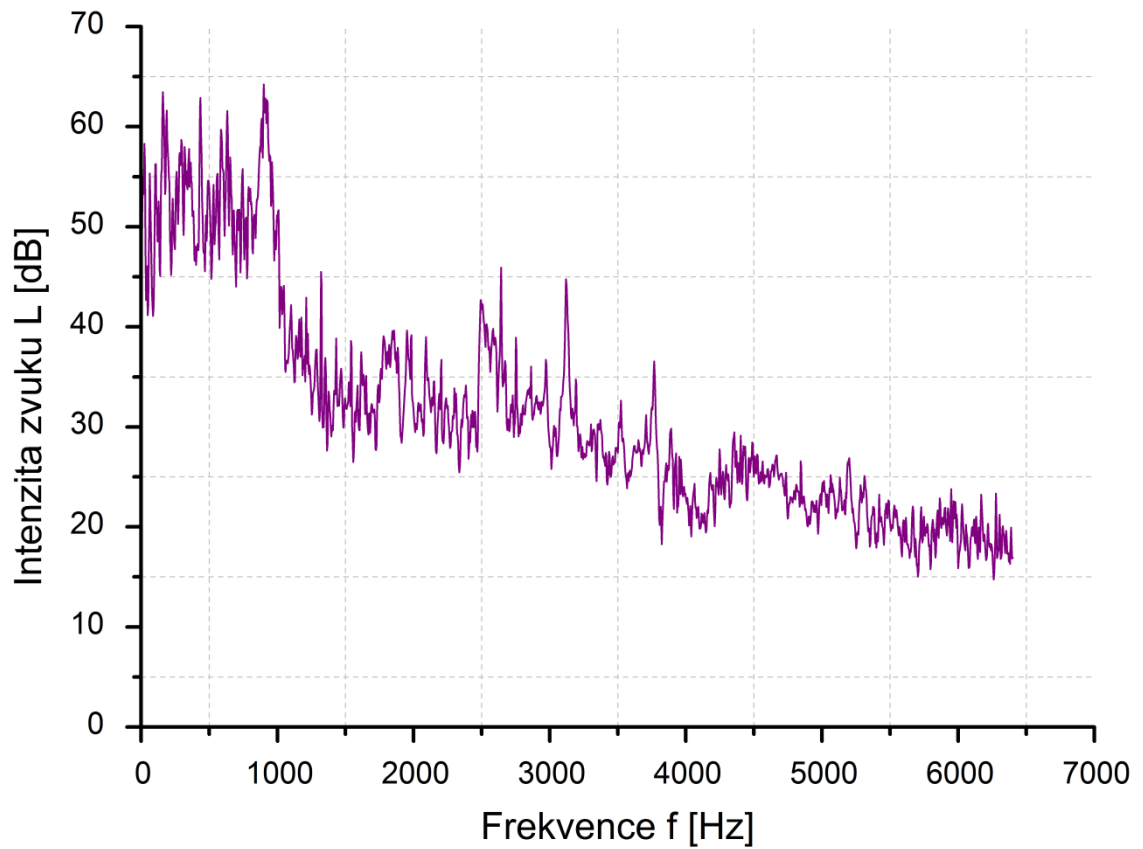
## 2. úsek

U druhého úseku jsme postupovali identicky, tak jak se popsáno o kapitolu výše. Opět tedy vycházíme z výseče z časového průběhu akustického tlaku (obr. 3.25). Zde pozorujeme nárůst akustického tlaku oproti prvnímu úseku.

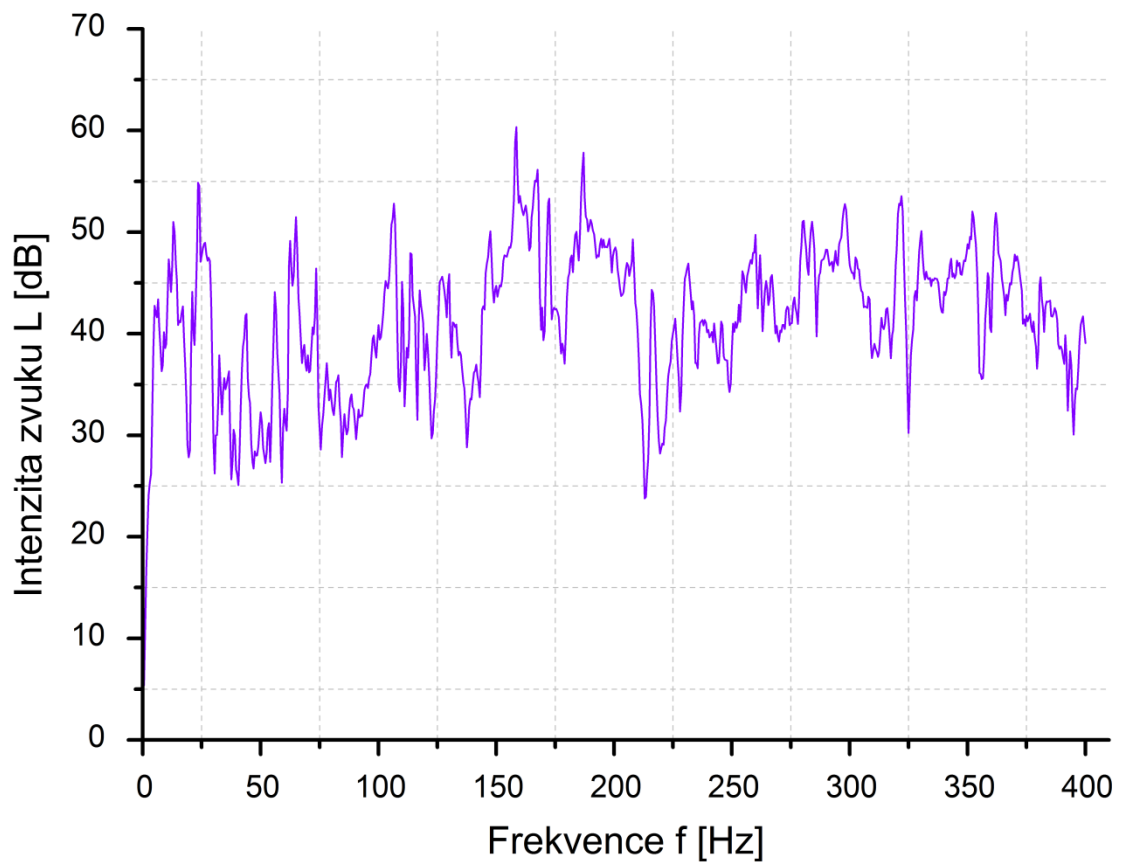


**Obr. 3.25:** Časový průběh akustického tlaku pro 2. úsek

Obdobně jako u prvního úseku získáváme ze softwaru Pulse Reflex dvě frekvenční charakteristiky. Pro vysokofrekvenční spektrum (obr. 3.26) a nízkofrekvenční spektrum (obr. 3.27).



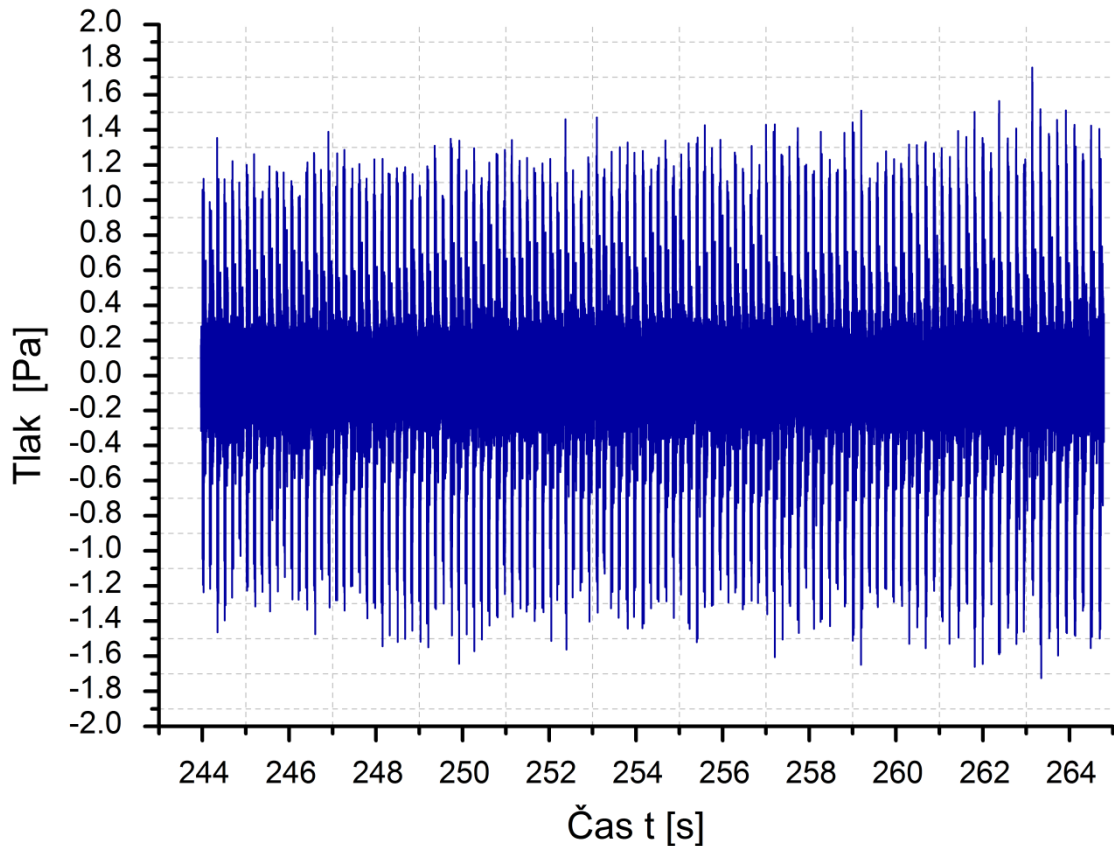
**Obr. 3.26:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.27:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-400 Hz

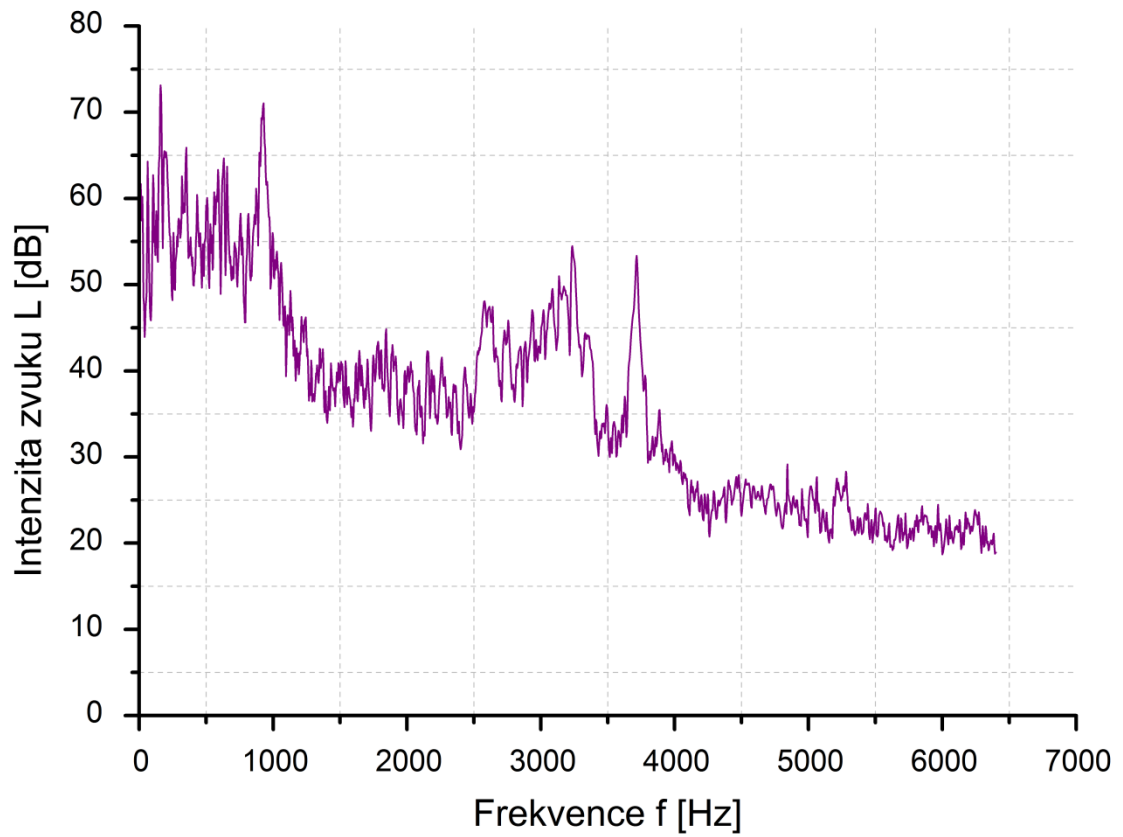
### 3. úsek

Z průběhu akustického tlaku je patrné zvýšení zadírání. Hodnota tlaku se zvyšuje a frekvence kmitů je nižší (obr. 3.28).

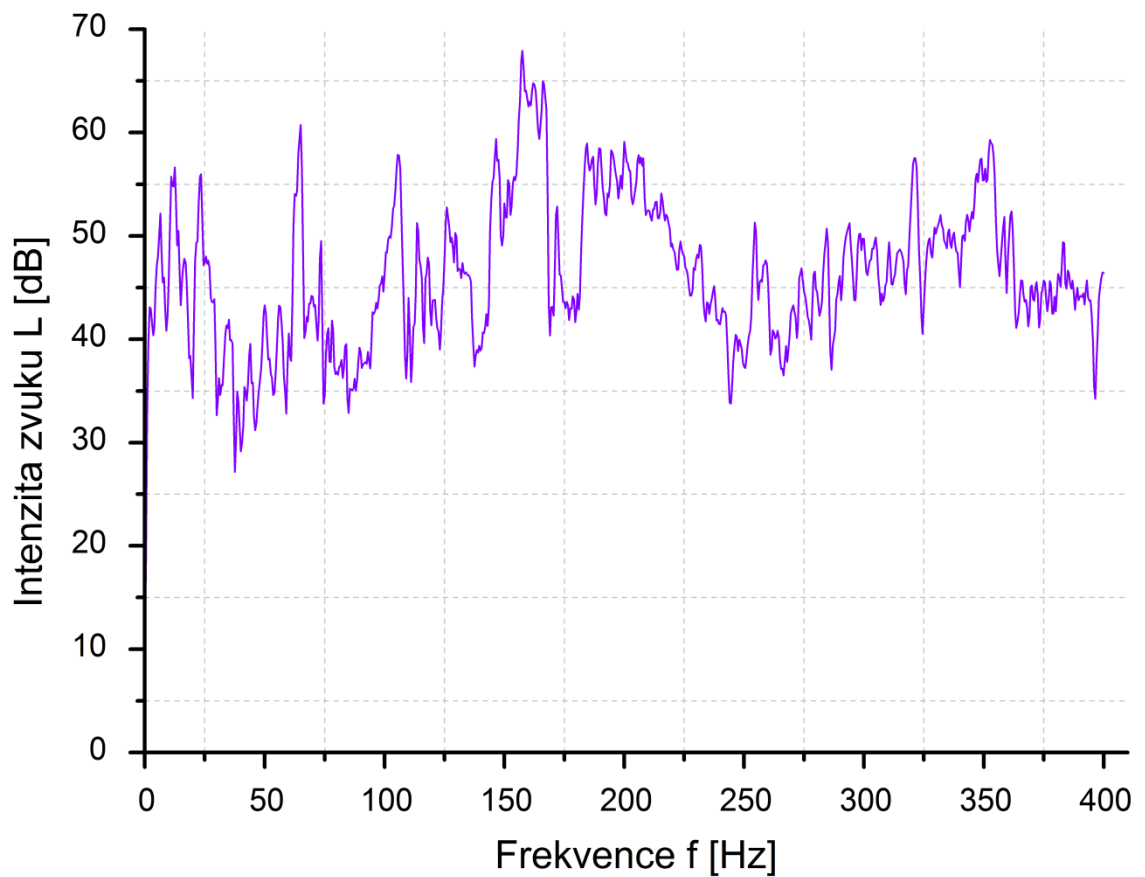


**Obr. 3.28:** Časový průběh akustického tlaku pro 3. úsek

Z frekvenční charakteristiky vysokofrekvenčního spektra (obr. 3.29) je patrný nárůst intenzity zvuku nízkofrekvenčních projevů. Zadírání, které se začíná objevovat, se tedy projevuje nízkofrekvenčními zvuky. Frekvenční charakteristika pro nízkofrekvenční spektrum je zobrazena na obrázku 3.30.



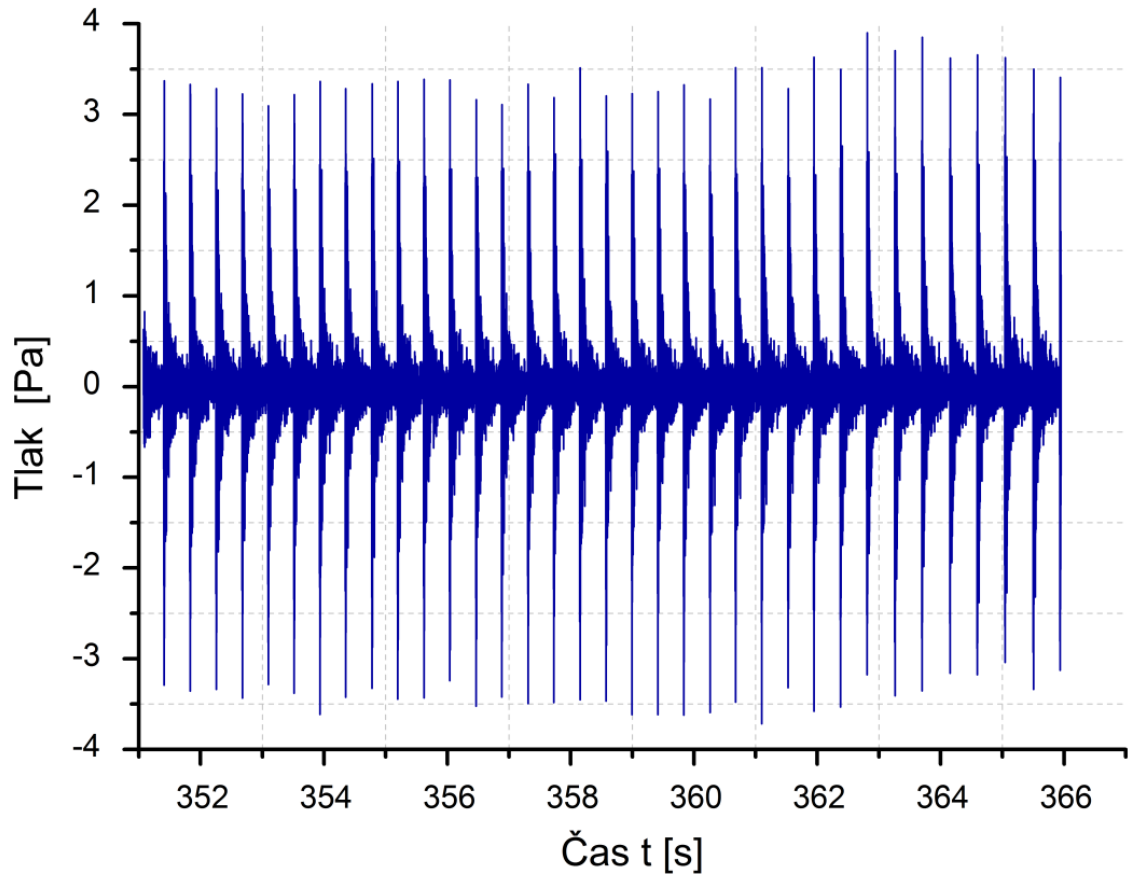
**Obr. 3.29:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.30:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-400 Hz

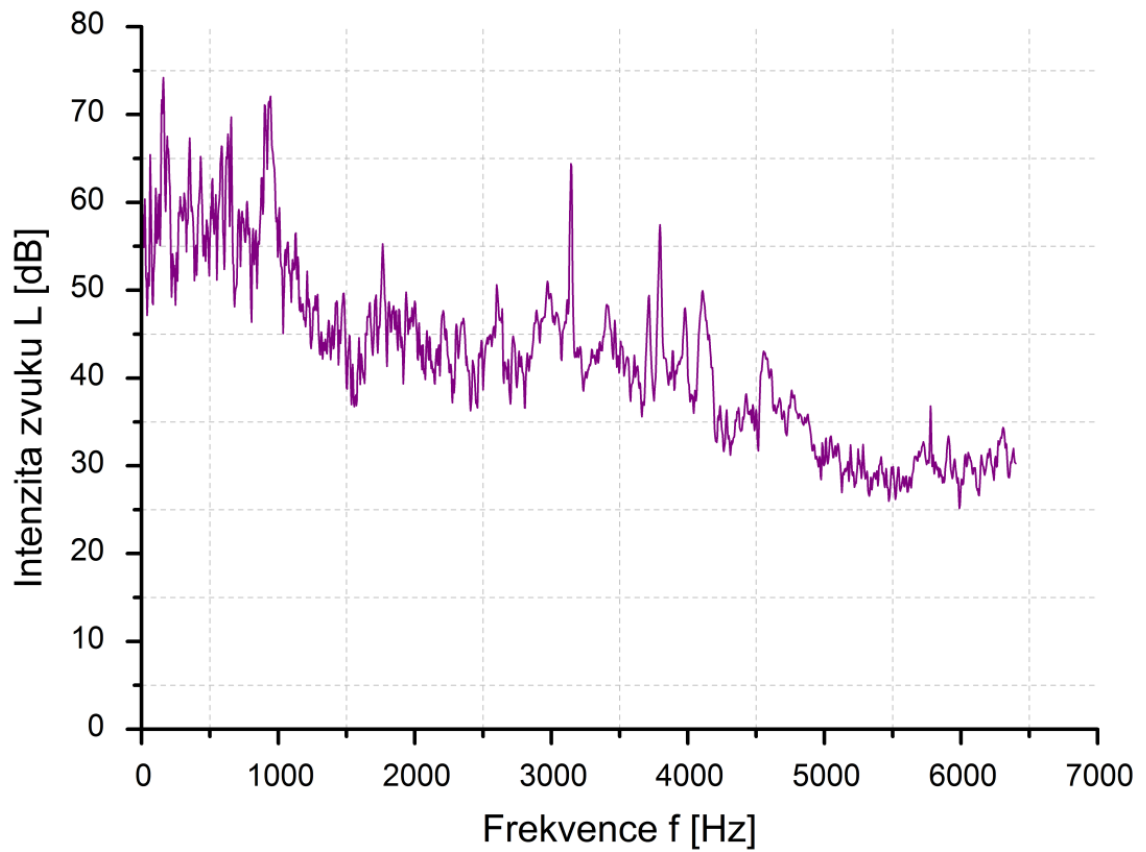
#### 4. úsek

Další zvýšení akustického tlaku a zároveň snížení frekvence zadírání nastává ve čtvrtém úseku (obr. 3.31).

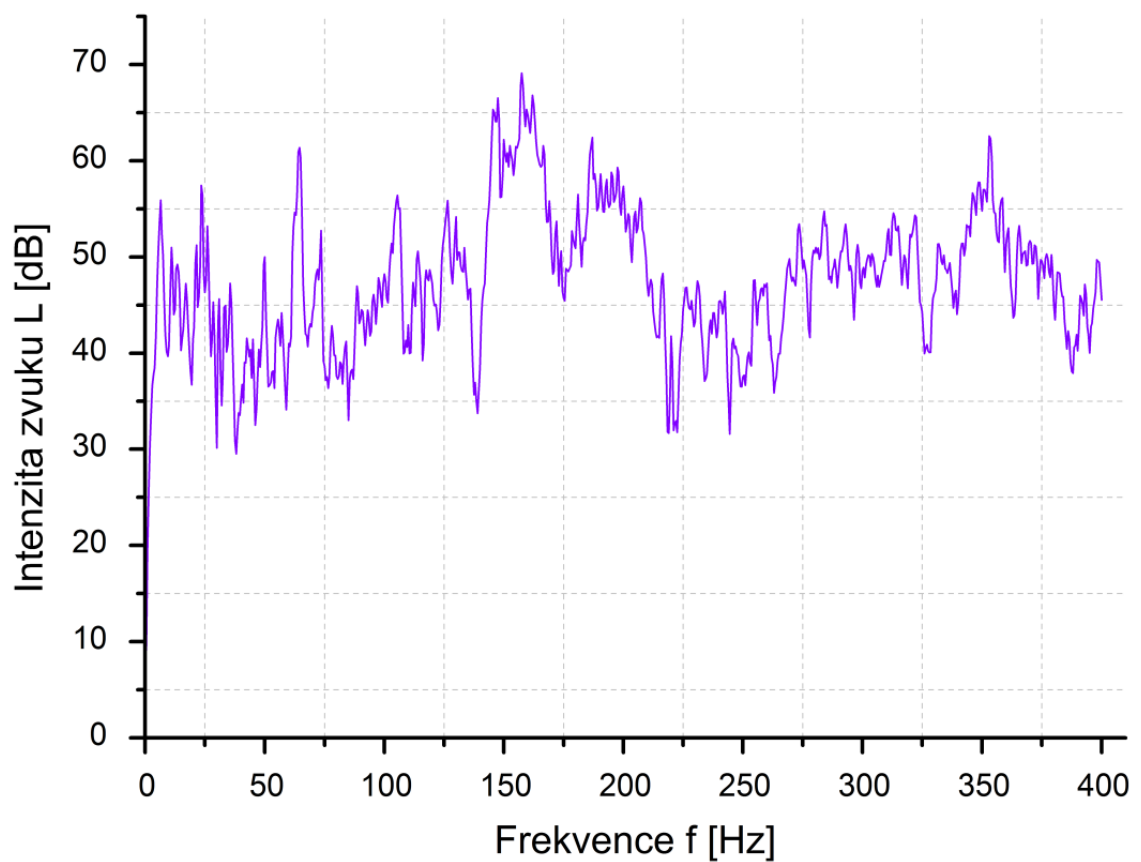


**Obr. 3.31:** Časový průběh akustického tlaku pro 4. úsek

Frekvenční charakteristika se oproti předešlému úseku příliš nezměnila, stále jsou výraznější zvuky nízké frekvence (obr. 3.32) (obr. 3.33).



**Obr. 3.32:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-6400 Hz

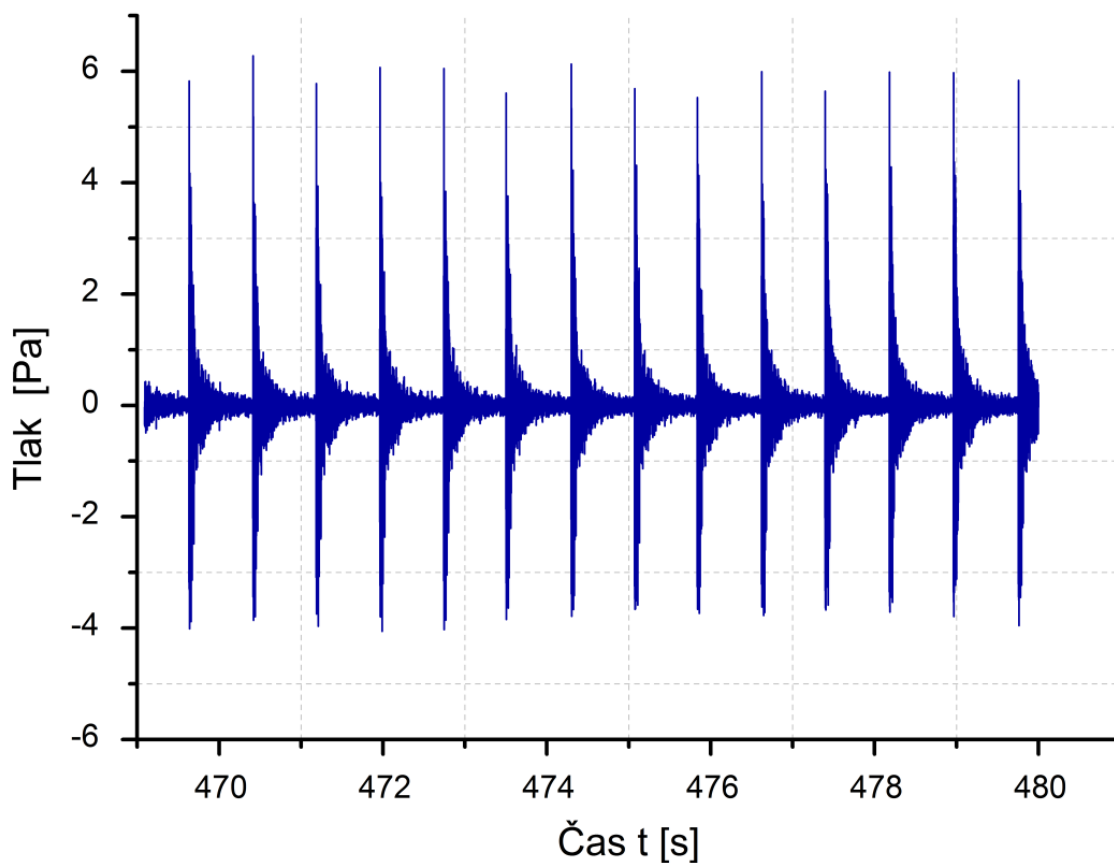


**Obr. 3.33:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-400 Hz



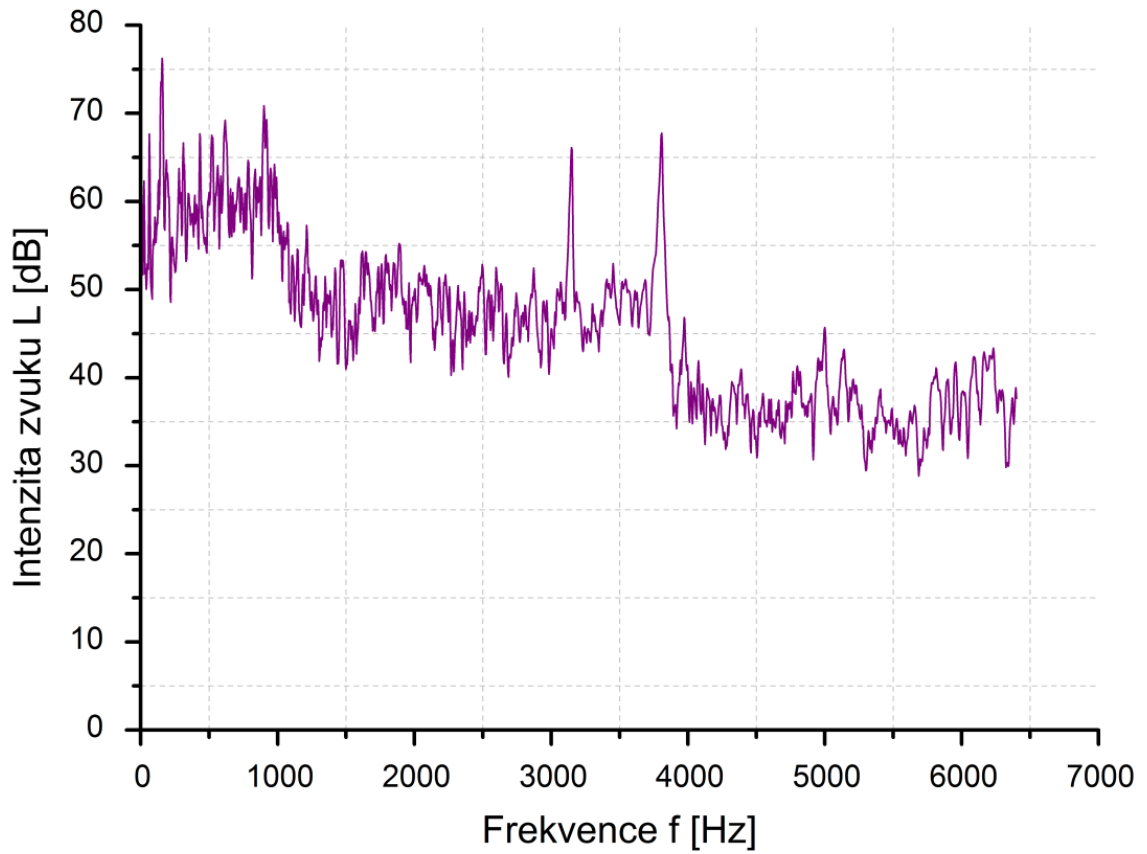
### 5. úsek

Snadno pozorovatelné je jednotlivé zadírání v pátém úseku, kdy je mezi jednotlivými výchytkami až 1 sekunda (obr. 3.34).

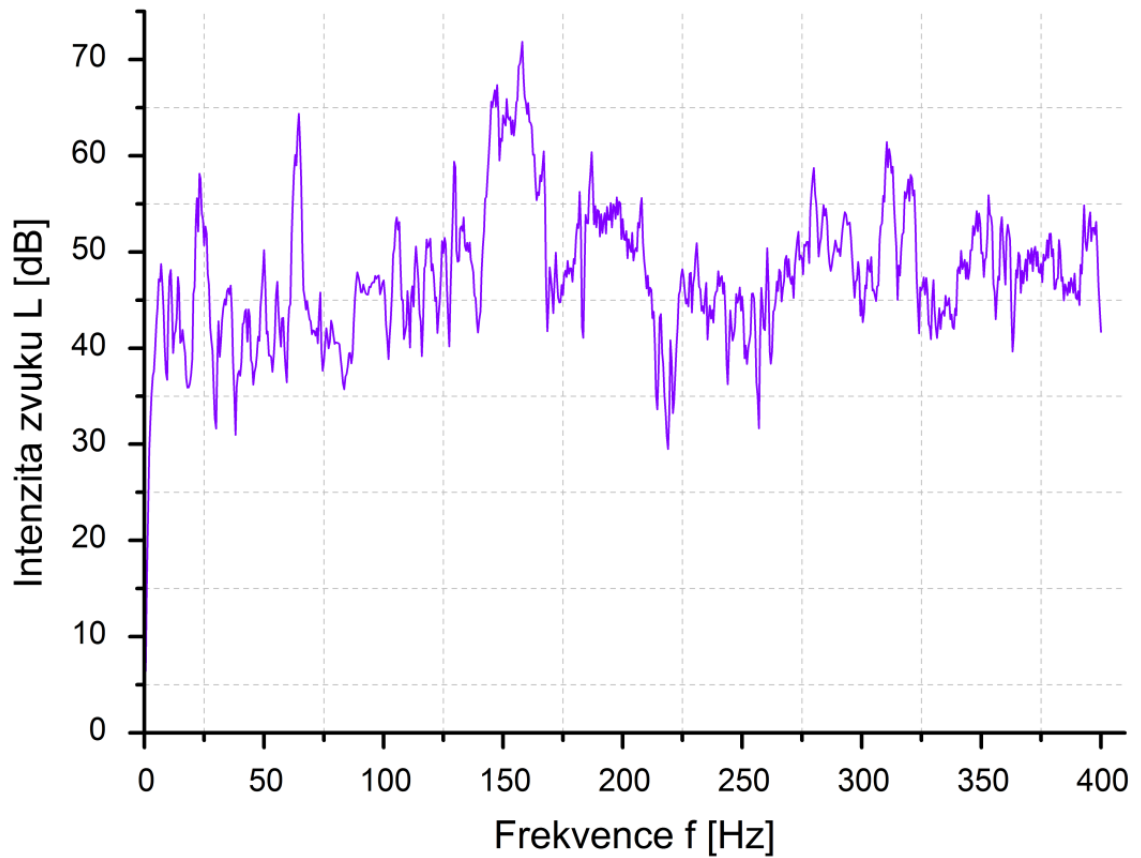


**Obr. 3.34:** Časový průběh akustického tlaku pro 5. úsek

Průběh frekvenční charakteristiky zůstává takřka nezměněn (obr. 3.35) (obr. 3.36).



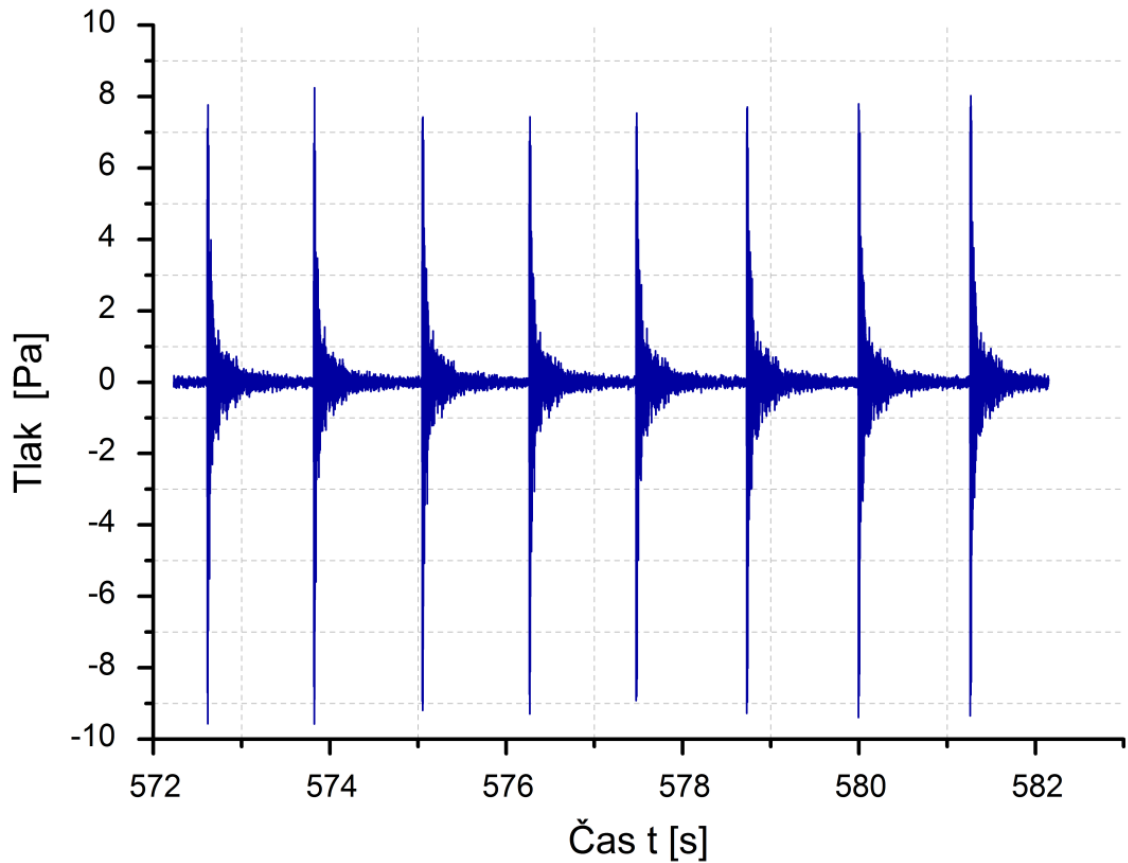
Obr. 3.35: Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



Obr. 3.36: Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-400 Hz

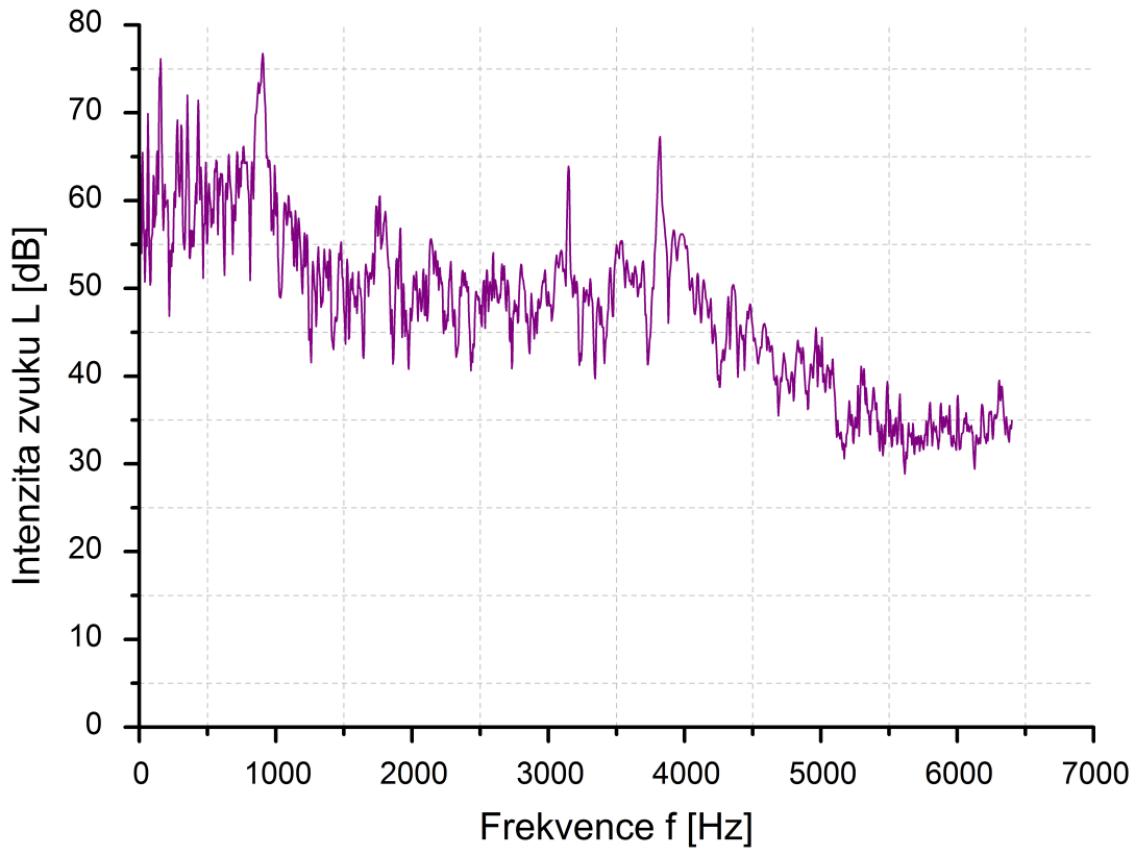
## 6. úsek

Nejvyššího akustického tlaku je dosahováno v úseku šestém, tedy při tlaku 12 MPa. Zároveň čas mezi jednotlivými zvukovými projevy se zvyšuje na hodnoty překračující 1 sekundu (obr. 3.37).

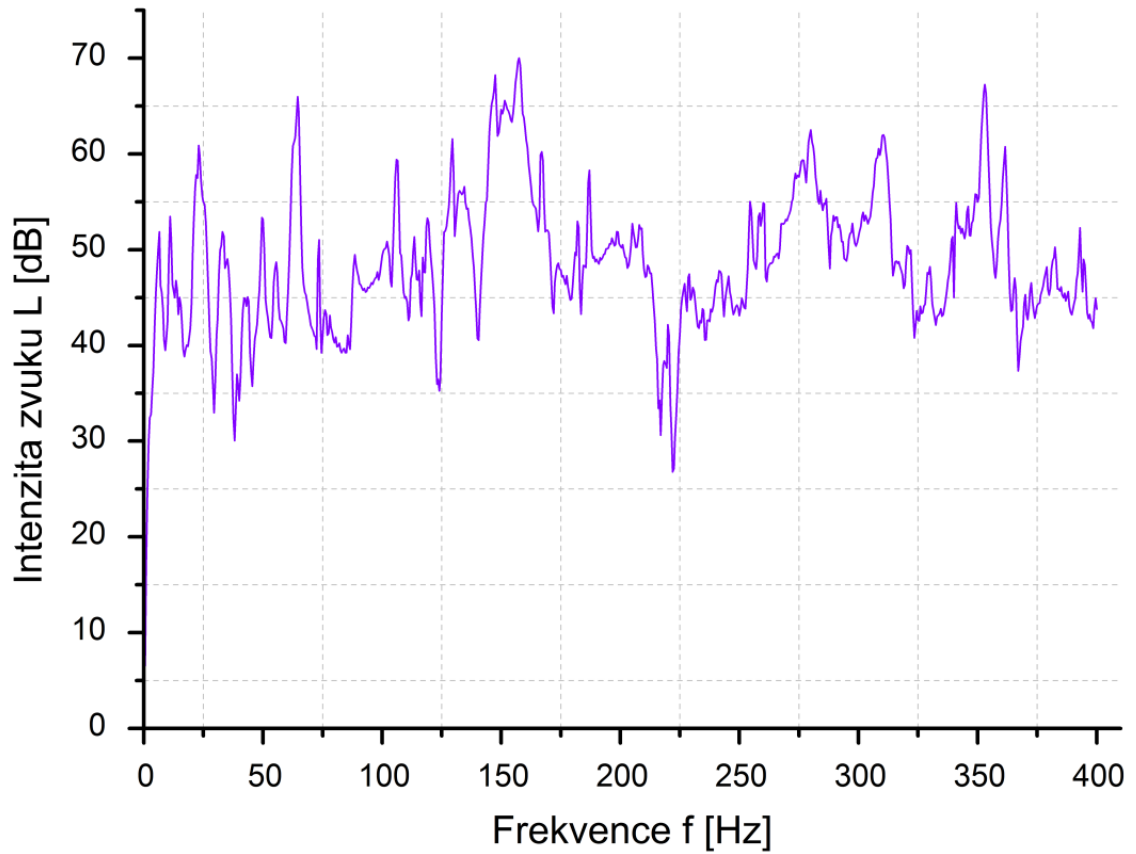


**Obr. 3.37:** Časový průběh akustického tlaku pro 6. úsek

Na průběhu frekvenční charakteristiky pro vysokofrekvenční spektrum (obr. 3.38) můžeme pozorovat menší vzrůst intenzity zvuku i ve vysokých frekvencích. Stále však nejvyšších hodnot decibelů dosahují zvuky nízkých frekvencí (obr. 3.39).

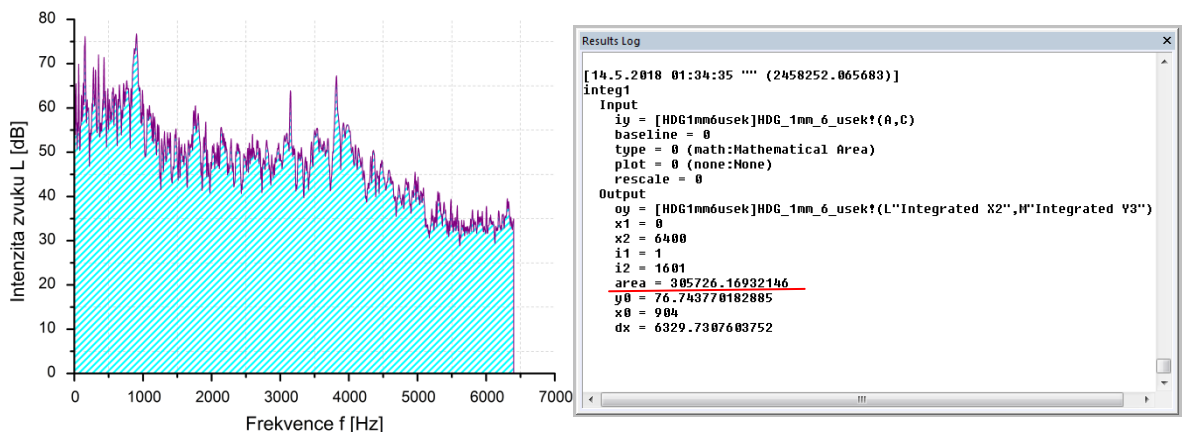


**Obr. 3.38:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.39:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-400 Hz

Z výsledných frekvenčních charakteristik dostáváme křivky, které znázorňují závislost intenzity zvuku na frekvenci. Pro další vyhodnocení a vzájemné porovnání intenzity zvuku v jednotlivých měřených úsecích bylo třeba zjistit průměrnou hodnotu intenzity zvuku v daných frekvenčních pásmech. Jelikož tato závislost tvoří obecnou křivku, bylo třeba provést integraci časového průběhu, tedy vypočítat plochu pod křivkou a následně vydělit výslednou hodnotou rozsahem. Tato matematická operace byla provedena pro všechny měřené úseky v SW Origin, kde jsme použily jednu ze základních funkcí softwaru. Příklad výsledku měření je vidět na obrázku 3.40.



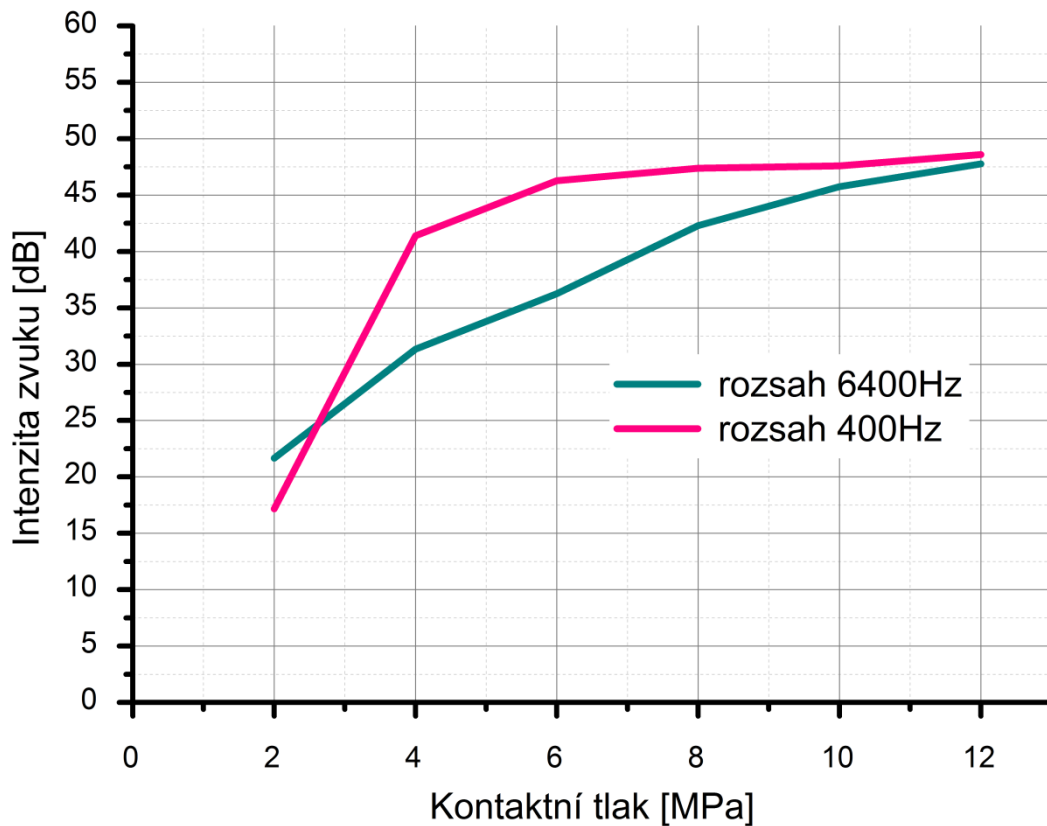
**Obr. 3.40:** Integrace pomocí softwaru OriginPro

Po integraci všech křivek jednotlivých úseků dostáváme následující hodnoty viz tabulka 3.3.

**Tab. 3.3:** Hodnoty integrací a průměrů intenzity zvuku jednotlivých úseků

	Plocha pod křivkou pro rozsah 6kHz [dB.Hz]	Plocha pod křivkou pro rozsah 400Hz [dB.Hz]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]
1. úsek	138580.96959	6865.39300	21.65	17.16
2. úsek	200610.65687	16559.21473	31.35	41.40
3. úsek	232035.73321	18510.70314	36.26	46.28
4. úsek	270722.29883	18953.02141	42.30	47.38
5. úsek	292809.79977	19040.99683	45.75	47.60
6. úsek	305726.16932	19441.67238	47.77	48.60

Průměrné hodnoty intenzity zvuku z obou frekvenčních spekter tvoří graf na obrázku 3.41. Na tomto grafu tak můžeme porovnat, jaký vliv má výběr rozsahu frekvencí.



**Obr. 3.41:** Porovnání obou spekter z hlediska intenzity zvuku při rychlosti 1 mm/s

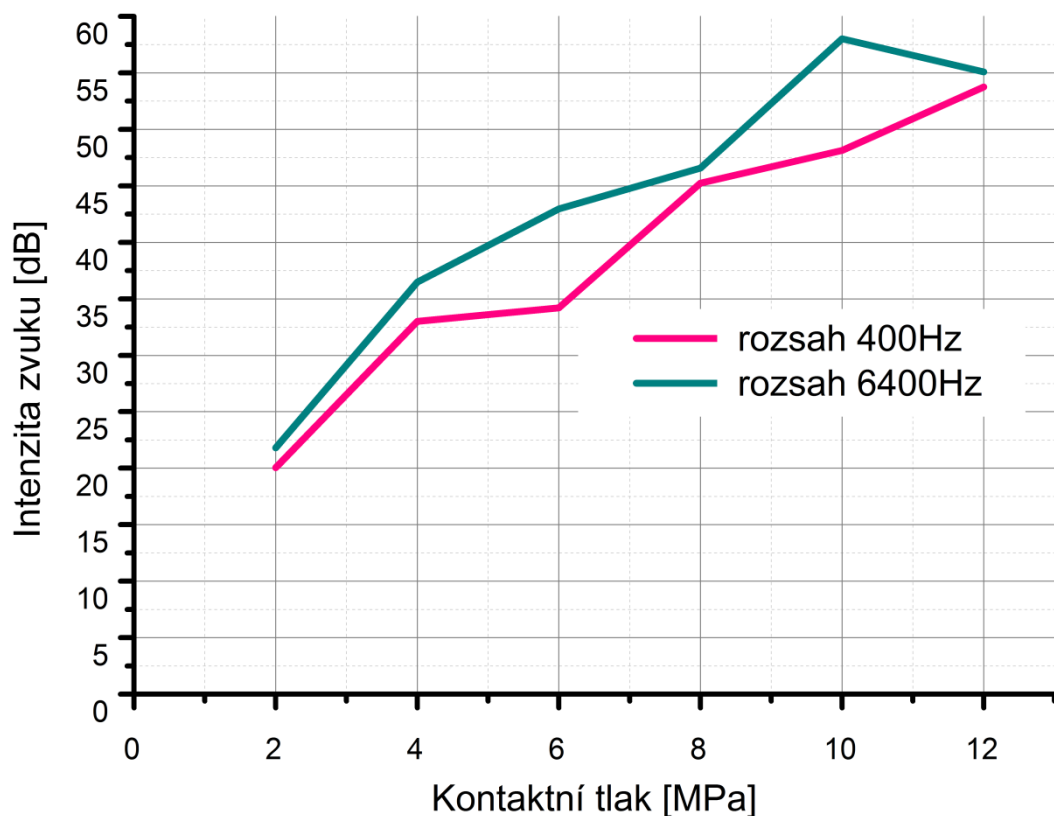
Z výsledků měření prezentovaném na obrázku 3.41 je patrné, že výraznější vliv na analýzu procesu zadírání má nízkofrekvenční pásmo, kde dochází v okamžiku vzniku zadírání k prudkému nárůstu intenzity zvuku (druhý úsek měření). U vysokofrekvenčního pásma je nárůst pozvolný a v měřeném rozsahu prakticky lineární.

### 3.3.2.2. Materiál HX300LAD Z100 – rychlost 10 mm/s

Stejným způsobem jako bylo vyhodnocováno měření při rychlosti 1 mm/s bylo postupováno i při akustickém měření a vyhodnocení v případě zvolené rychlosti 10 mm/s. Z důvodu rozsahu textové části diplomové práce jsou jednotlivé grafy časových průběhů akustického tlaku pro jednotlivé měřené úseky a následně získaná frekvenční pásma uvedeny v příloze 1. Z naměřených a vyhodnocených výsledků byl sestrojen graf závislosti intenzity zvuku v jednotlivých měřených úsecích, který je vidět na obrázku 3.42. Průměrné hodnoty intenzity zvuku získané dle metodiky popsané v kapitole 3.3.2.1. jsou uvedeny v tabulce 3.4.

**Tab. 3.4:** Hodnoty integrací a průměrů intenzity zvuku jednotlivých úseků

	Plocha pod křivkou pro rozsah 6kHz [dB.Hz]	Plocha pod křivkou pro rozsah 400Hz [dB.Hz]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]
1. úsek	139467.00257	8015.95951	21.79	20.04
2. úsek	233539.21699	13205.24274	36.49	33.01
3. úsek	274924.11607	13679.74392	42.96	34.20
4. úsek	298096.38632	18097.13162	46.58	45.24
5. úsek	371299.32023	19255.01277	58.02	48.14
6. úsek	352500.90593	21503.93301	55.08	53.76



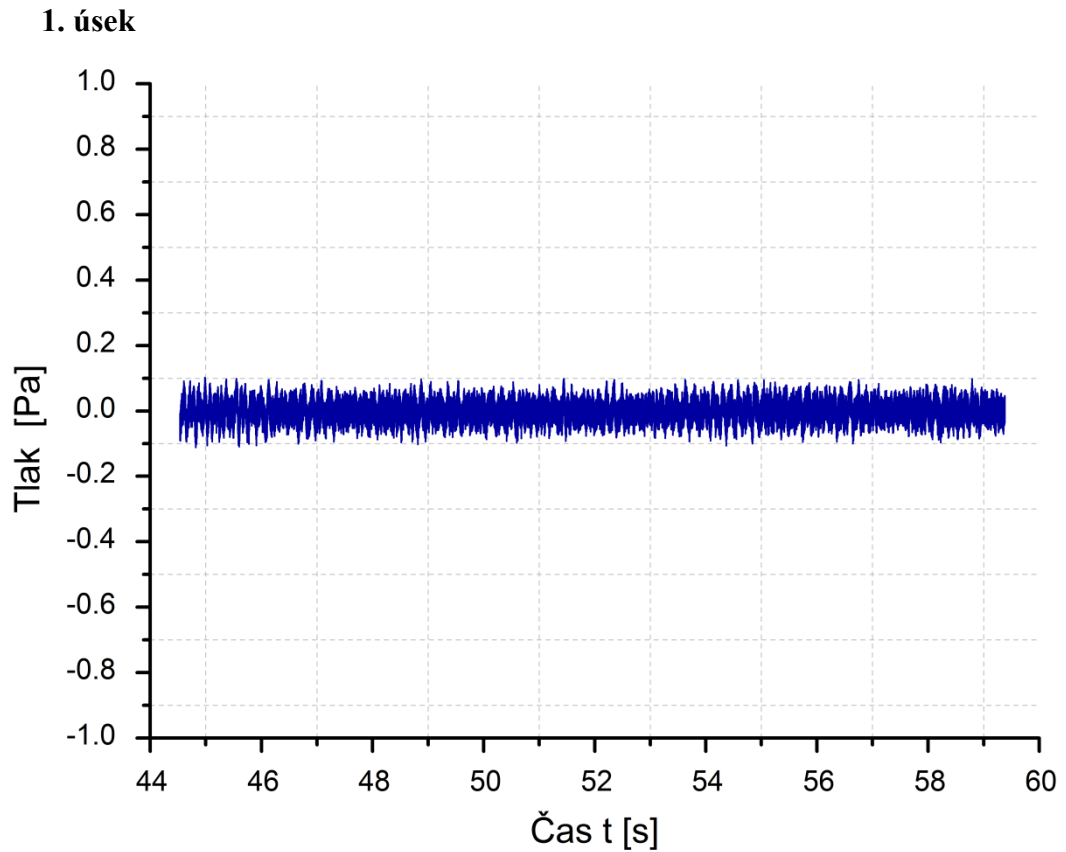
**Obr. 3.42:** Porovnání obou spekter z hlediska intenzity zvuku při rychlosti 10 mm/s

### 3.3.2.3. Materiál HX180BD ZM90 – 1 mm/s

Dalším testovaným byl materiál zkráceně označovaný jako ZM při rychlosti protahování 1 mm/s. Postup a vyhodnocení byl opět shodný s postupem popsáním v kapitole 3.3.2.1.. Na obrázku 3.43 tak dostáváme závislost akustického tlaku na čase pro

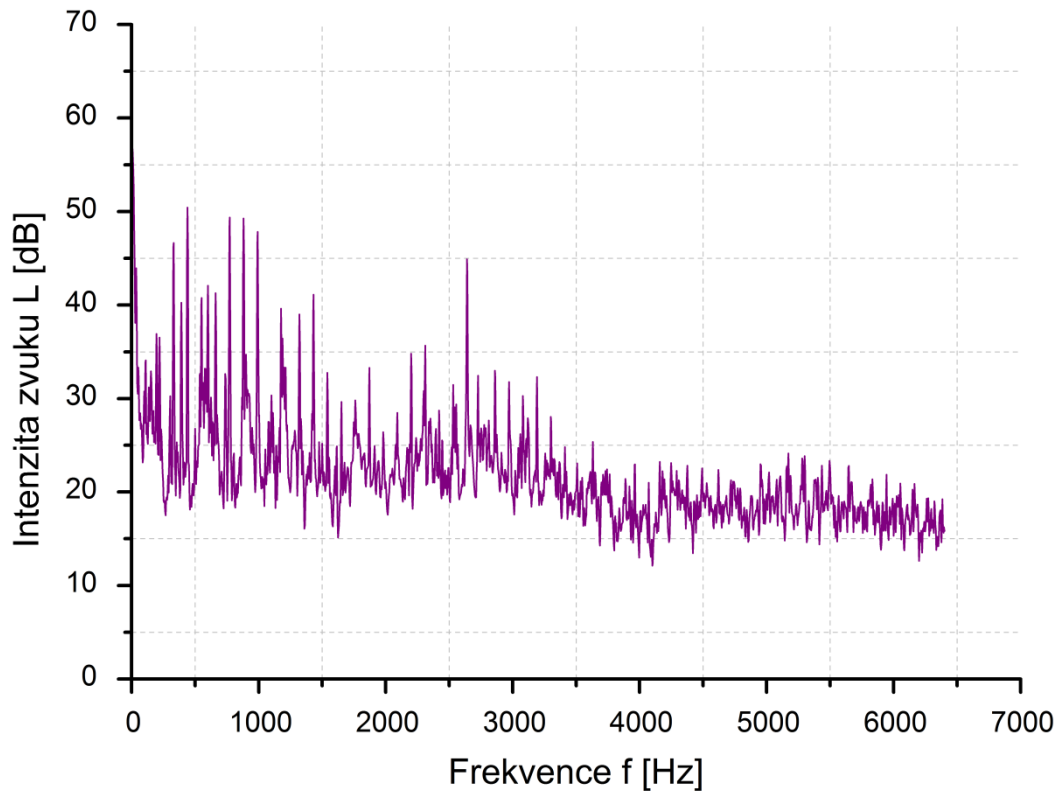
první úsek. Stejně tak jak tomu bylo v případě prvního úseku u materiálu HDG, tak i v tomto případě je první úsek pouze šum z okolí, jelikož k zadírání nedochází.

Na obrázcích 3.45 a 3.46 jsou pak vyobrazeny frekvenční charakteristiky. Z frekvenční charakteristiky pro vysokofrekvenční spektrum je patrné, že se intenzita zvuku s měnící se hodnotou frekvence příliš nemění.

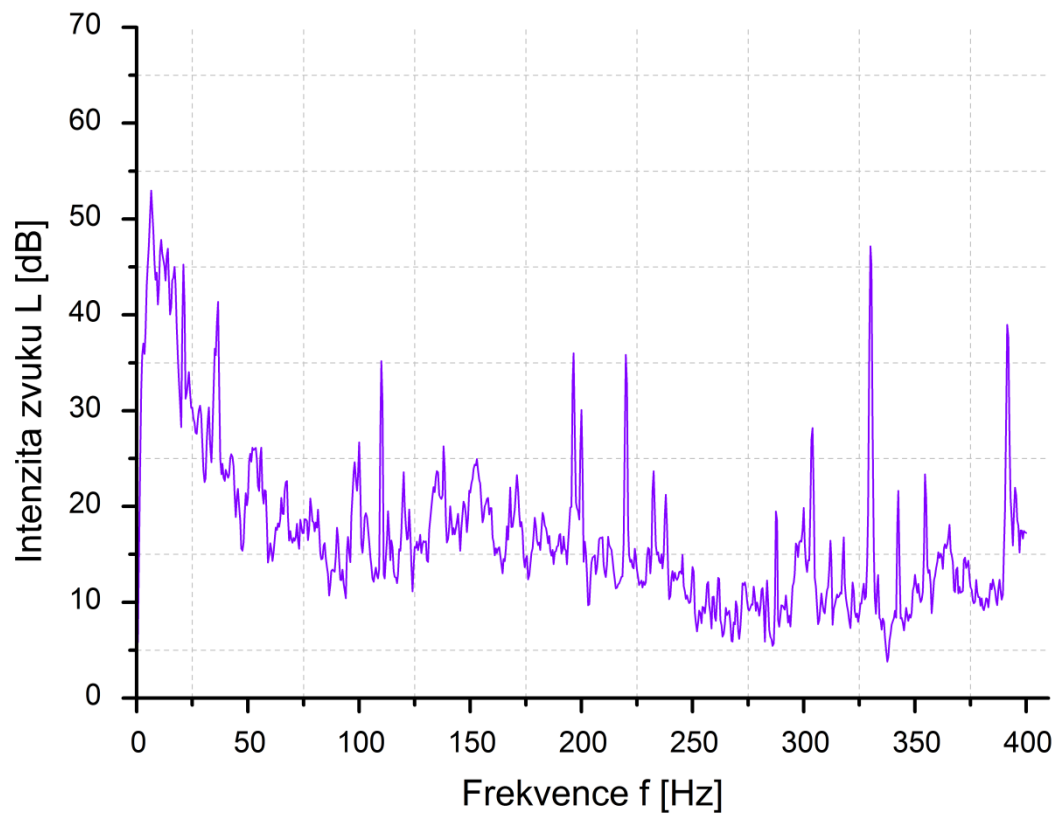


**Obr. 3.43:** Časový průběh akustického tlaku pro 1. úsek





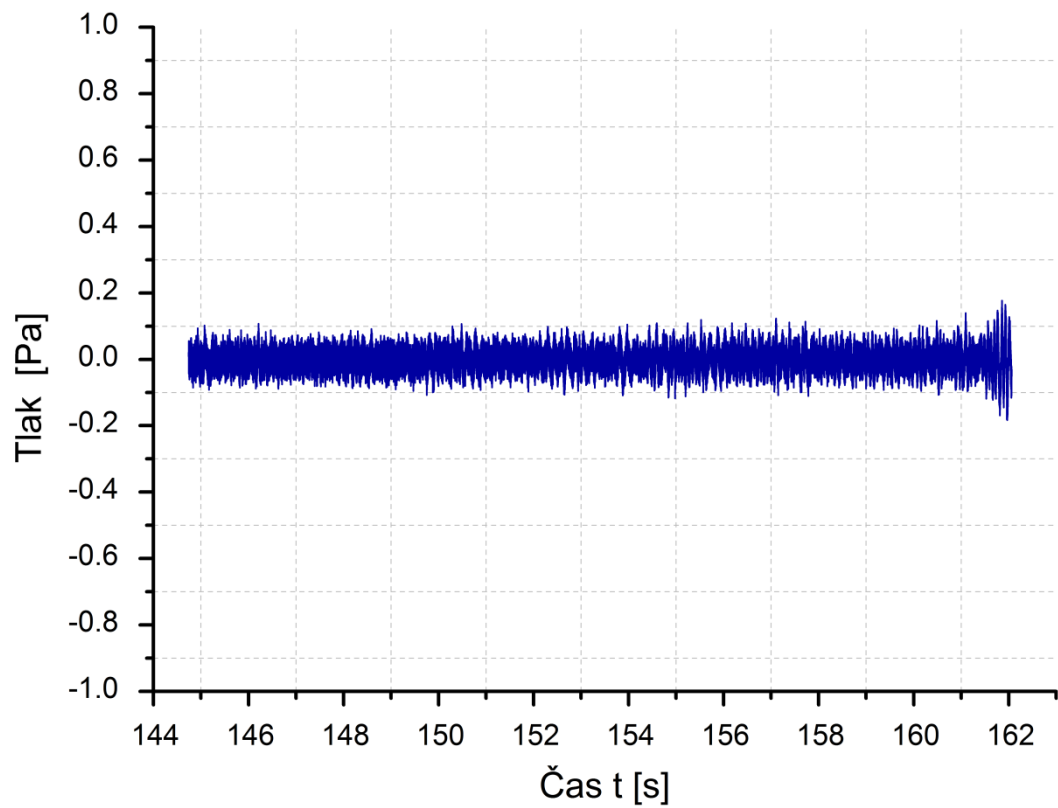
**Obr. 3.45:** Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.46:** Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-400 Hz

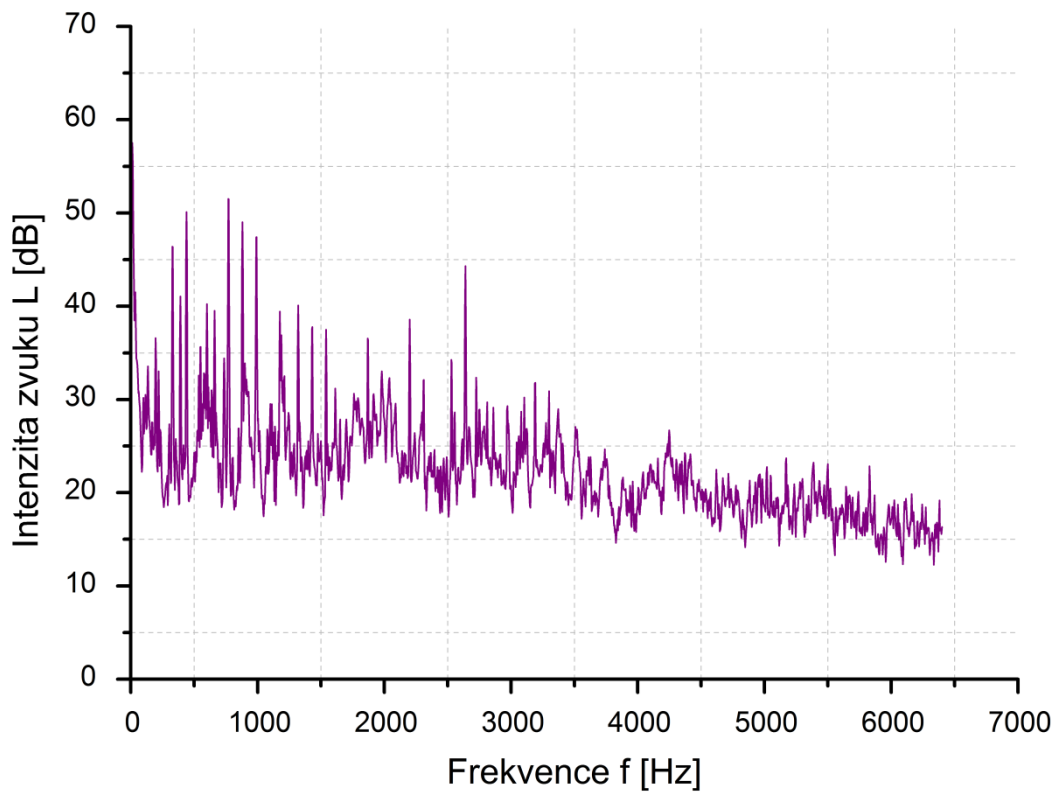
## 2. úsek

Ani v druhém úseku nenastalo zadírání, znovu tedy pouze šum (obr. 3.47).

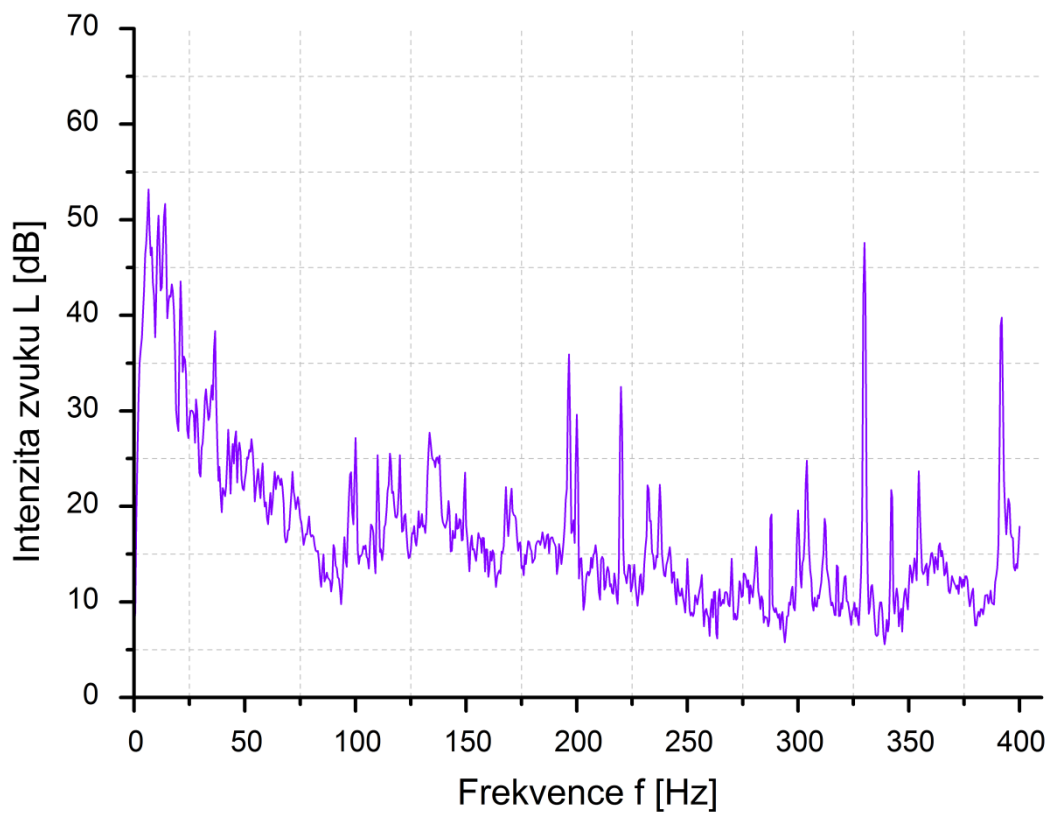


**Obr. 3.47:** Časový průběh akustického tlaku pro 2. úsek

Žádné změny se neodehrály ani ve frekvenční charakteristice (obr. 3.48) (obr. 3.49).



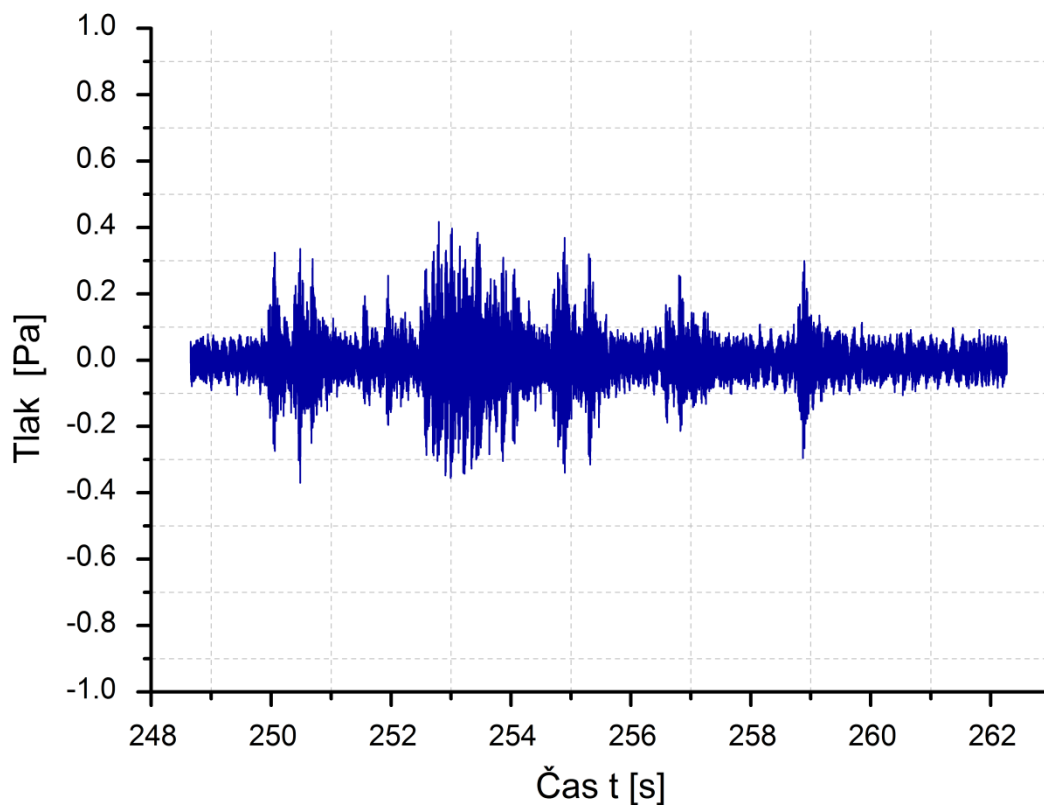
**Obr. 3.48:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.49:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-400 Hz

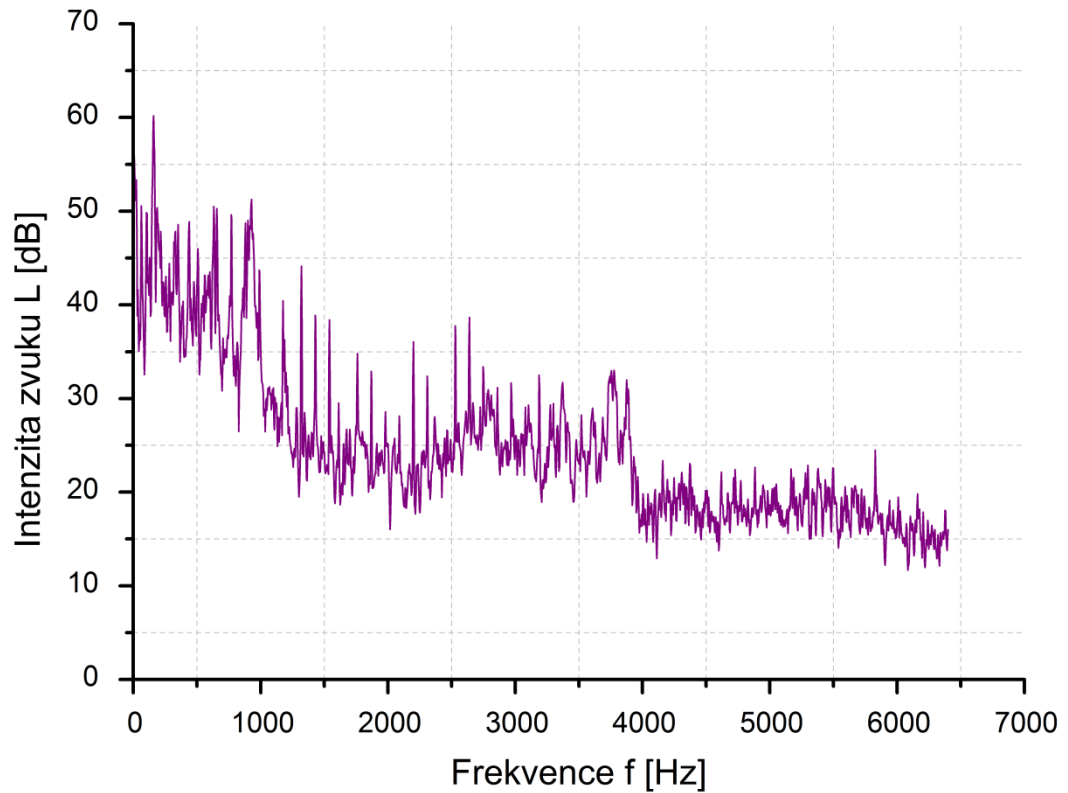
### 3. úsek

Jak je vidět ze silové odezvy, ve třetím úseku se začíná projevovat zadírání, tomu odpovídá i časový průběh akustického tlaku. (obr. 3.50).

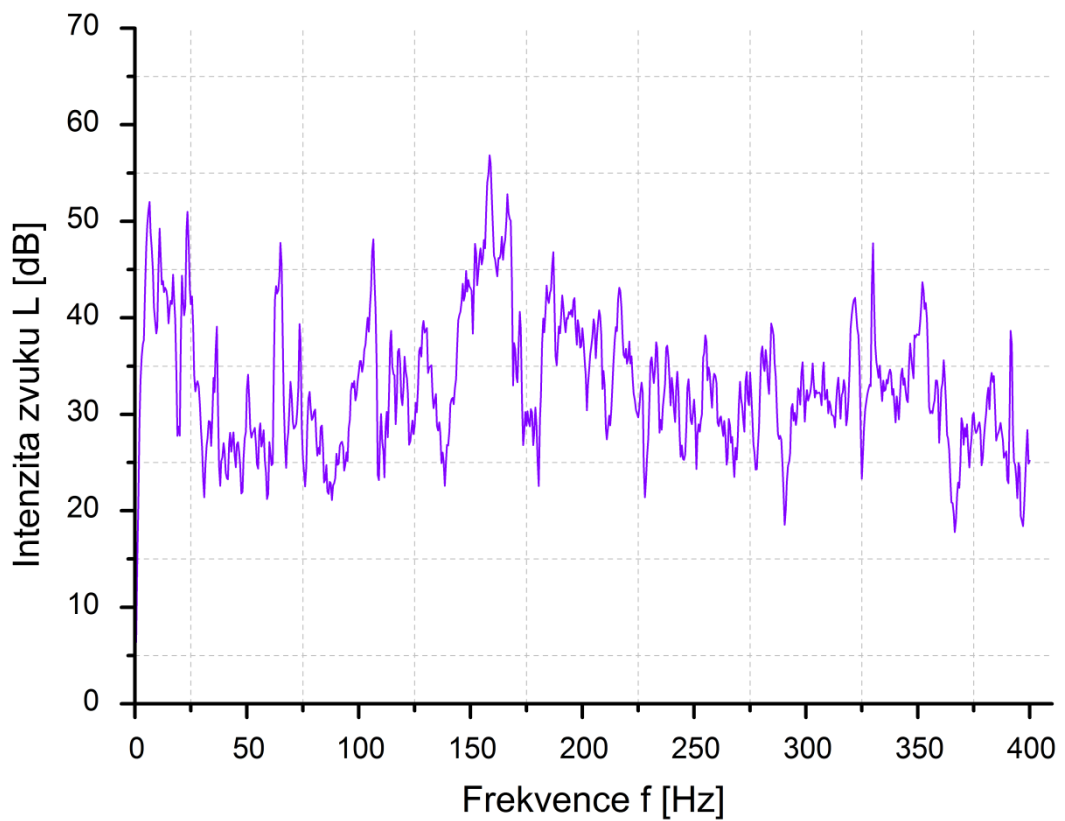


**Obr. 3.50:** Časový průběh akustického tlaku pro 3. úsek

Intenzita zvukového projevu v nižších frekvencích se začíná zvyšovat (obr. 3.51) (obr. 3.52).



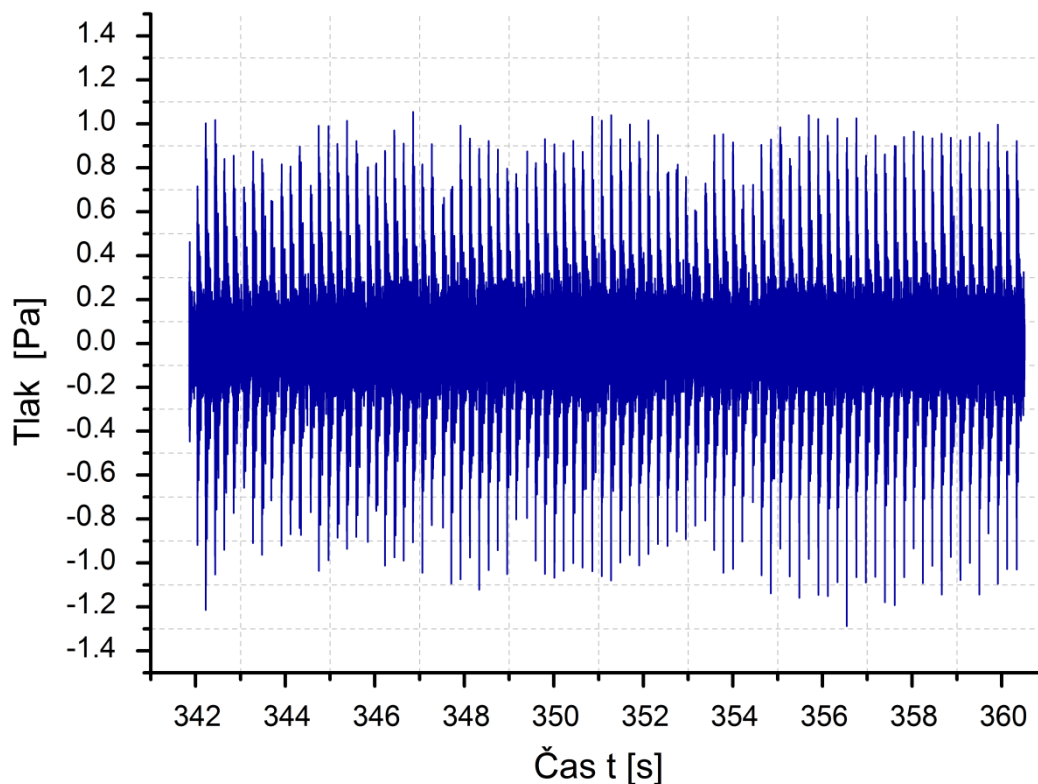
**Obr. 3.51:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.52:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-400 Hz

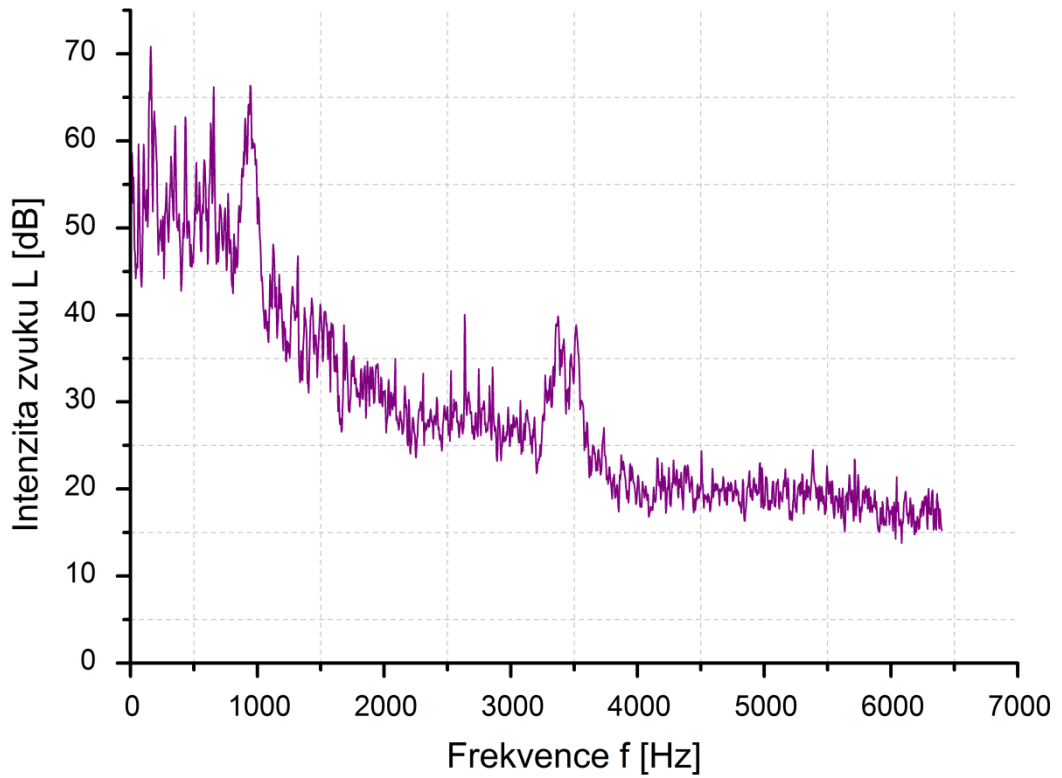
#### 4. úsek

Na tomto úseku se zadírání projevuje už v plném rozsahu. Na grafu z obrázku 3.53 jsou dobře patrné jednotlivé výkyvy akustického tlaku.

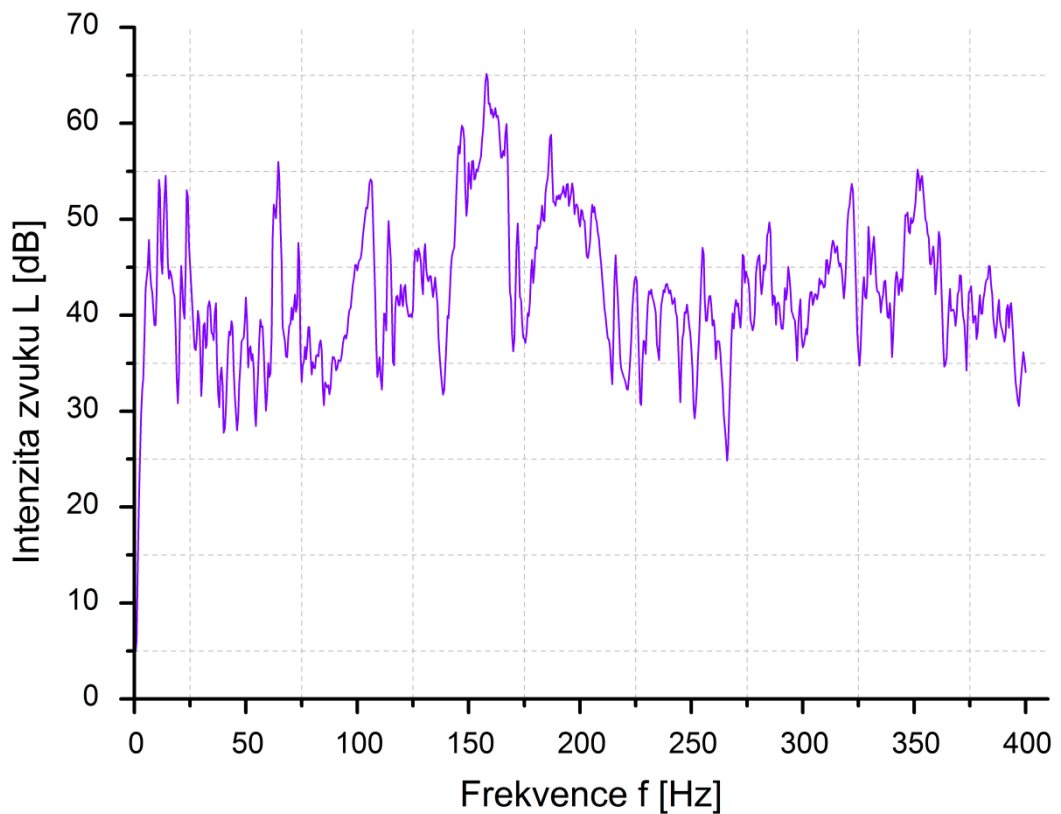


**Obr. 5.53:** Časový průběh akustického tlaku pro 4. úsek

Na průběhu frekvenční charakteristiky už můžeme vidět nárůst intenzity zvuku v nízkých frekvencích (obr. 3.54), zatímco ve vysokých frekvencích jsou hodnoty intenzity zvuku přibližně stejné (obr. 3.55).



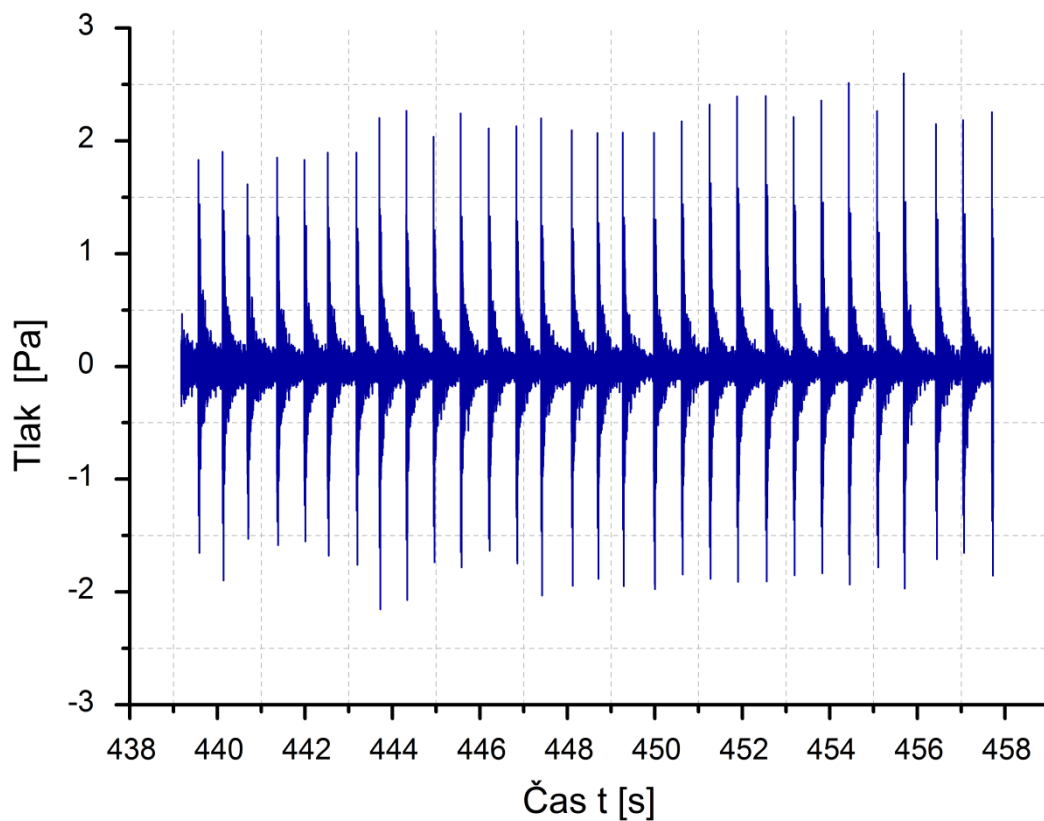
**Obr. 3.54:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.55:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-400 Hz

### 5. úsek

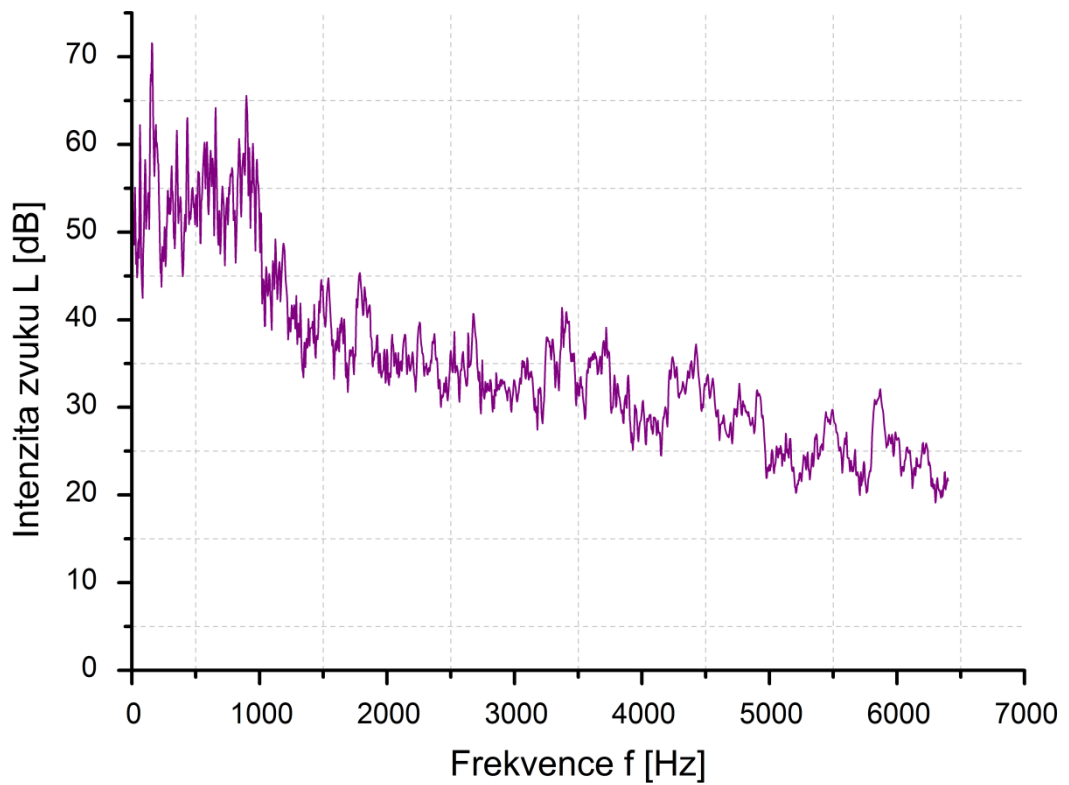
Na předposledním úseku už akustický tlak dosahuje hodnot až 2,5 Pa (obr. 3.56). Zadírání je dobře pozorovatelné.



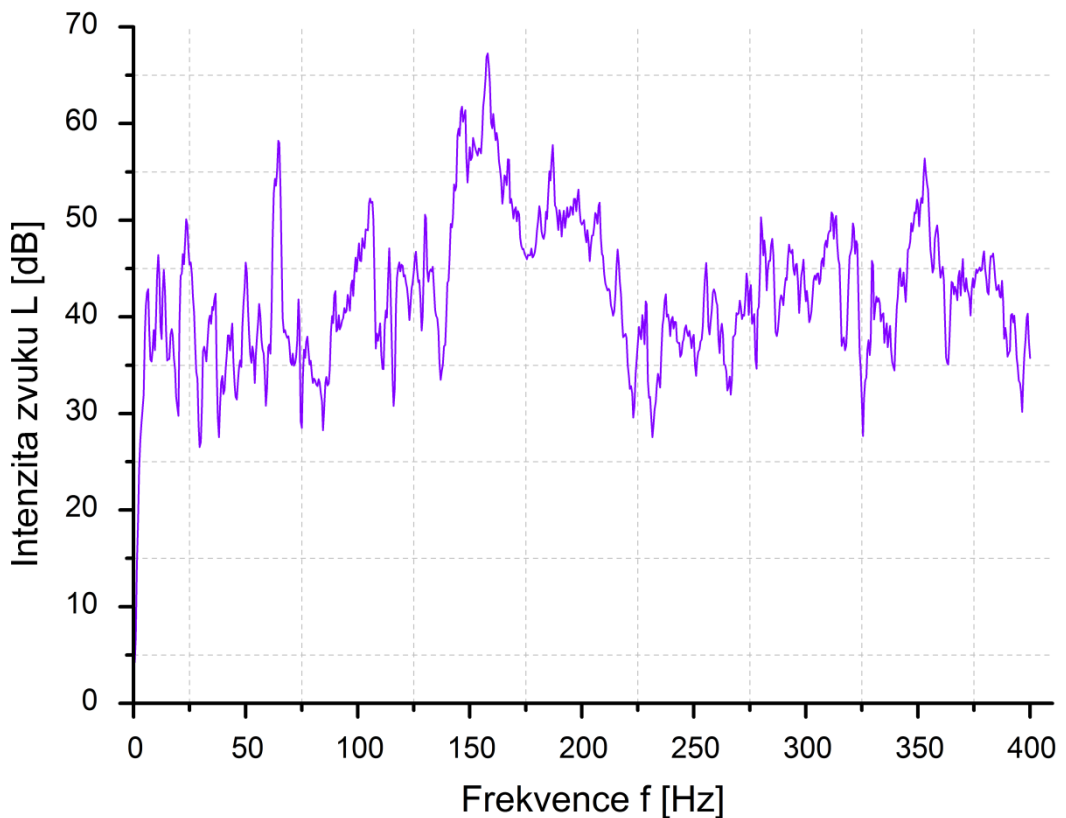
**Obr. 3.56:** Časový průběh akustického tlaku pro 5. úsek

Intenzita zvuku se oproti předchozímu úseku při vyšších frekvencích nepatrně zvedla (obr. 3.57). V nízkých frekvencích zůstávají hodnoty intenzity zvuku stejné (obr. 3.58).





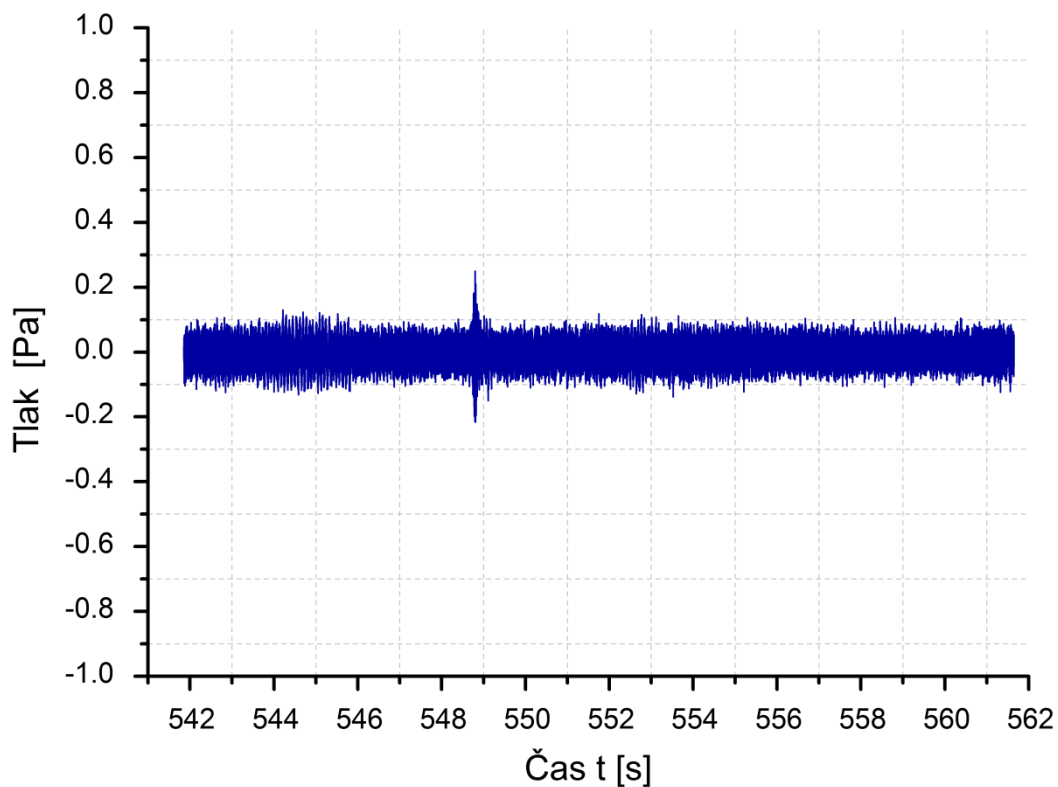
**Obr. 3.57:** Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Obr. 3.58:** Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-400 Hz

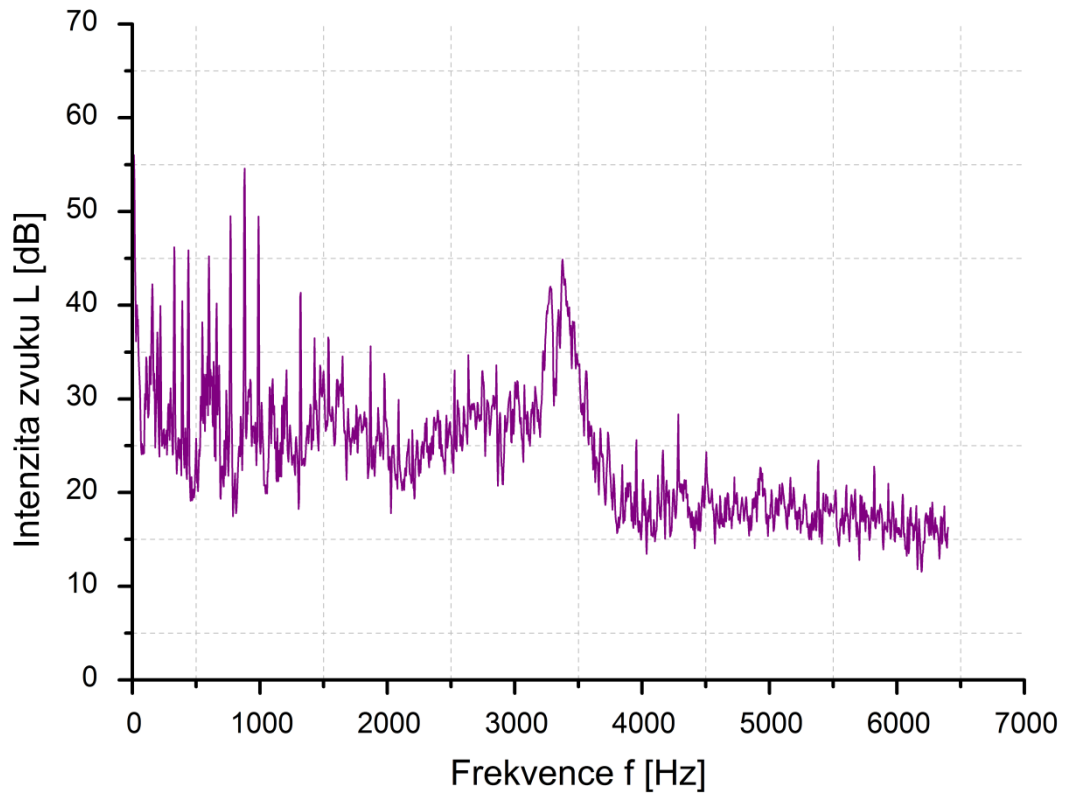
### 6. úsek

Jak už jsme pozorovali při silové analýze (kapitola 3.2.6.2.), v šestém úseku, kdy kontaktní tlak dosahoval 12 MPa, došlo k přetržení vzorku. Nahrávka tak obsahuje jen šum z okolí (obr 3.59).

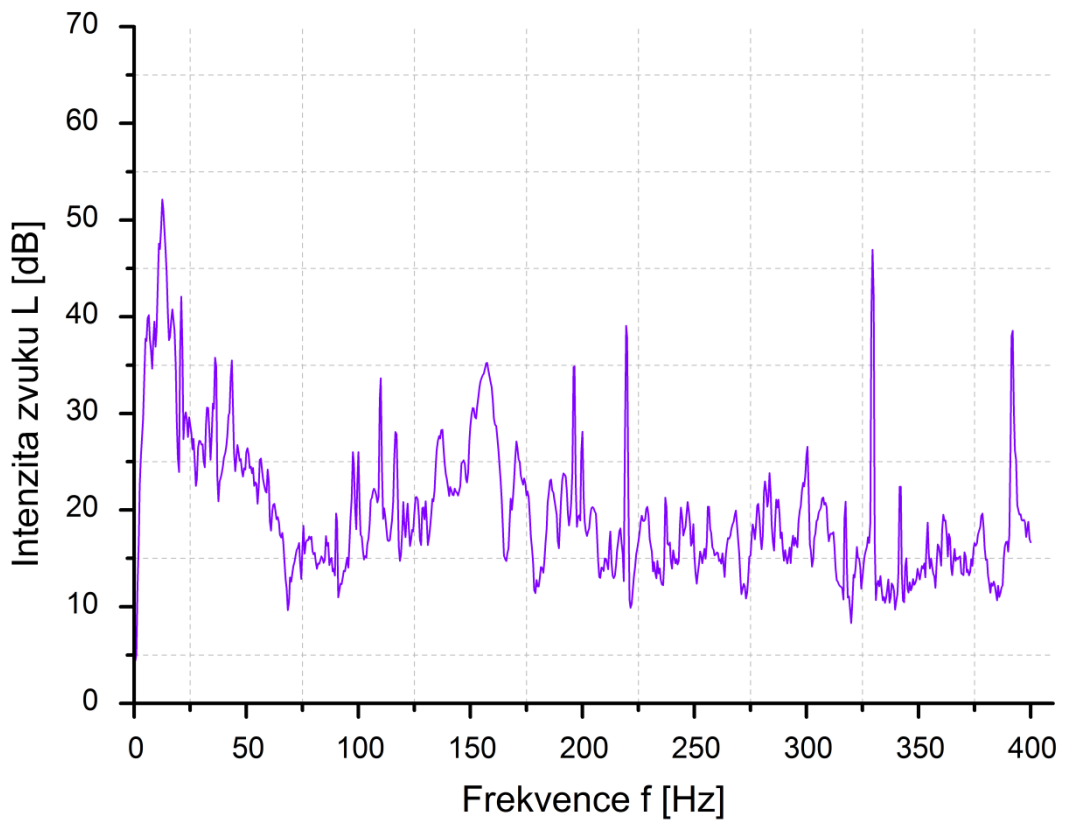


**Obr. 3.59:** Časový průběh akustického tlaku pro 6. úsek

I intenzita zvuku celkově klesla, jak je vidět z frekvenčních charakteristik (obr. 3.60) (obr. 3.61).



**Obr. 3.60:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



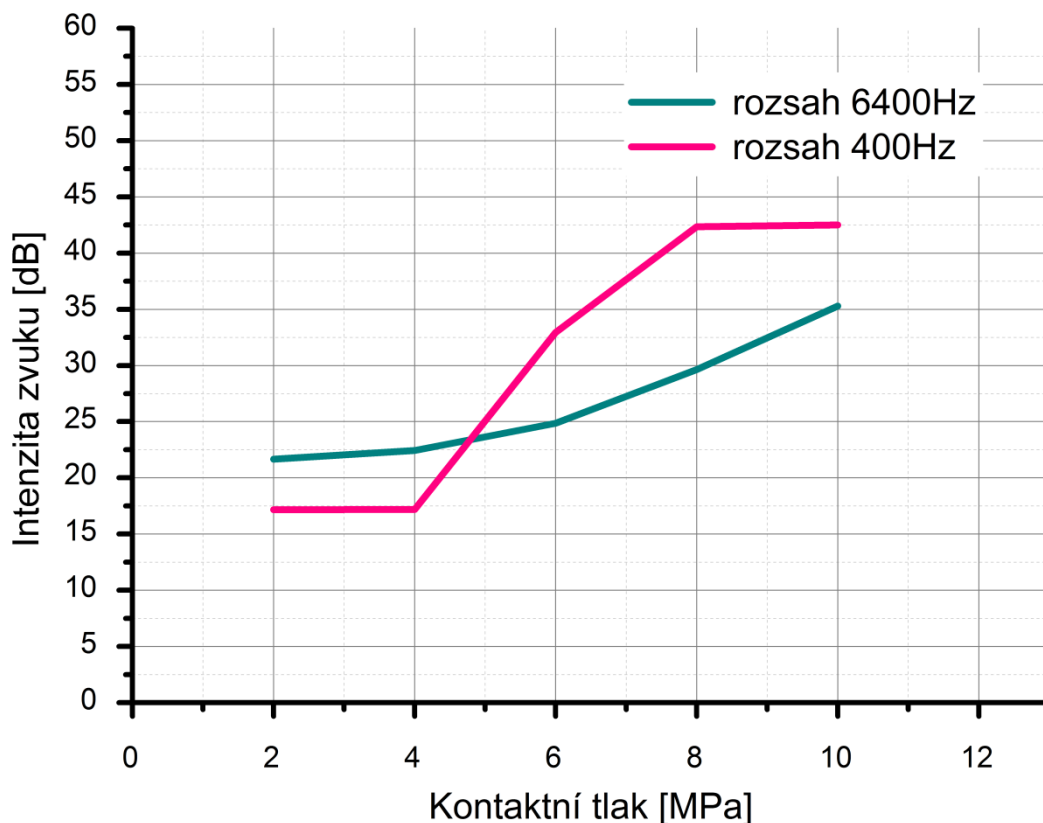
**Obr. 3.61:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-400 Hz

Totožnou metodikou jako v kapitole 3.3.2.1. dostáváme průměrné hodnoty intenzity zvuku pro jednotlivé úseky. Jejich shrnutí je zaznamenáno v tabulce 3.5. Graf sestrojený z těchto hodnot pak na obrázku 3.62.

**Tab. 3.5:** Hodnoty integrací a průměrů intenzity zvuku jednotlivých úseků

	Plocha pod křivkou pro rozsah 6kHz [dB.Hz]	Plocha pod křivkou pro rozsah 400Hz [dB.Hz]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]
1. úsek	138580.96959	6865.39300	21.65	17.16
2. úsek	143522.09790	6872.32134	22.43	17.18
3. úsek	159048.61840	13173.93117	24.85	32.93
4. úsek	189667.83076	16935.49331	29.64	42.34
5. úsek	225868.27401	17001.66810	35.29	42.50
6. úsek	152049.39489	7915.26832	23.76	19.79

U nízkofrekvenčního spektra pozorujeme prudký nárůst intenzity zvuku mezi 2. a 4. úsekem. Naopak po 5. úseku hodnoty prudce padají z důvodu již zmiňovaného přetržení vzorku. Z tohoto důvodu jsme tak 6. úsek dále neanalyzovali.



**Obr. 3.62:** Porovnání obou spekter z hlediska intenzity zvuku pro rychlost 1 mm/s

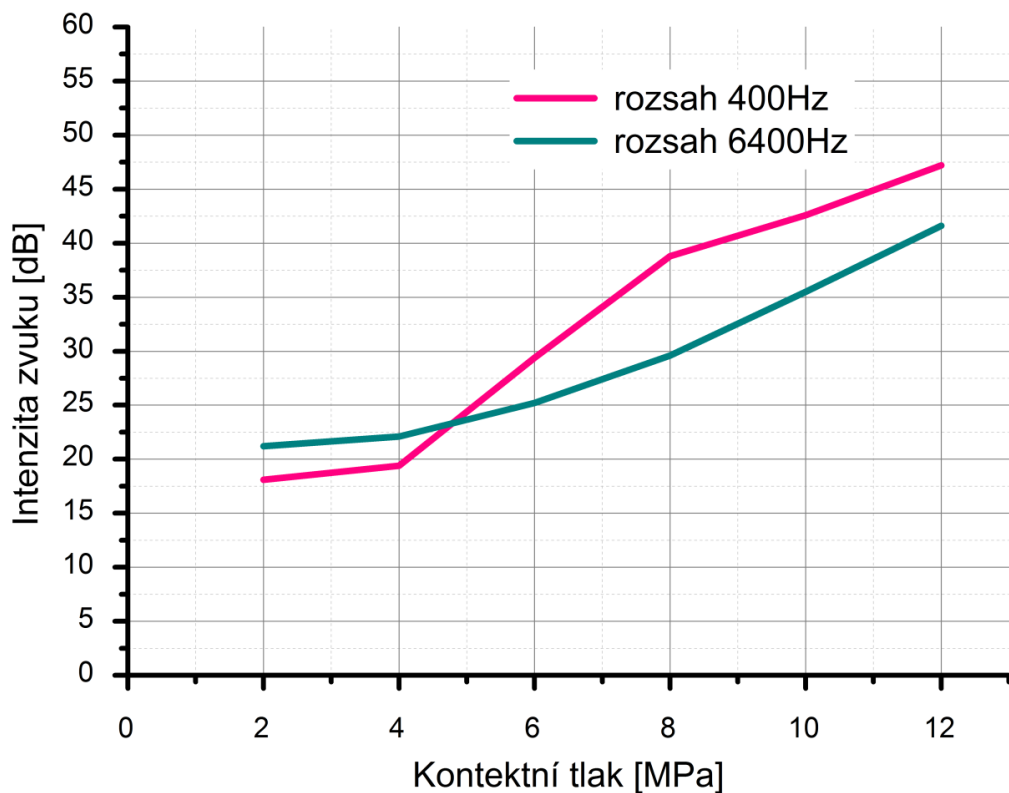
#### 3.3.2.4. Materiál HX180BD ZM90 – 10 mm/s

I druhý vybraný materiál tedy ZM jsme testovali při rychlosti 10 mm/s. Vyhodnocení probíhalo totožně, jako tomu bylo v předešlých třech případech. Vyhodnocení jednotlivých úseků, tzn. časové průběhy akustického tlaku a z nich získané frekvenční charakteristiky, jsou obsaženy v příloze 2.

V tabulce 3.6 pak už můžeme vidět shrnutí průměrných hodnot akustických tlaků v jednotlivých úsecích. Graficky jsou pak tyto výsledky znázorněny na obrázku 3.63.

**Tab. 3.6:** Hodnoty integrací a průměrů intenzity zvuku jednotlivých úseků

	Plocha pod křivkou pro rozsah 6kHz [dB.Hz]	Plocha pod křivkou pro rozsah 400Hz [dB.Hz]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]
1. úsek	135915.15546	7243.03633	21.24	18.11
2. úsek	141394.78764	7777.42698	22.09	19.44
3. úsek	161236.09833	11772.80572	25.19	29.43
4. úsek	189444.77322	15526.50934	29.60	38.82
5. úsek	227308.66624	17045.29376	35.52	42.61
6. úsek	266398.06945	18884.40898	41.62	47.21



**Obr. 3.63:** Porovnání obou spekter z hlediska intenzity zvuku pro rychlost 10 mm/s

U materiálu HDG byly při rychlosti 10 mm/s průměrné hodnoty intenzity zvuku vyšší pro vysokofrekvenční spektrum, pro materiál ZM je tomu však opačně. Průměrné hodnoty intenzity zvuku pro nízkofrekvenční spektrum jsou vyšší v maximu o 10 dB.

## 4. Závěrečné výsledky

Pro přehlednost byly naměřené hodnoty velikosti tažných sil a intenzity zvuku znázorněny do tabulek výsledných hodnot. Jsou zde uvedeny hodnoty horní tažné síly, která je měřítkem koeficientu tření při zvolených podmínkách a velikost rozkmitu síly, která je měřítkem zadírání povrchu plechu. Spolu s uvedenými hodnotami jsou dále v tabulce zaznamenány hodnoty intenzity zvuku získaných z obou analyzovaných frekvenčních spekter.

### 4.1. Materiál HX300LAD Z100 – 1 mm/s

**Tab. 4.1:** Porovnání hodnot silové a akustické analýzy pro HDG – 1mm/s

Kontaktní tlak [MPa]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]	Horní síla [N]	Rozkmit síly [N]
2	21.65	17.16	1621	294
4	31.35	41.40	2935	726
6	36.26	46.28	4571	1652
8	42.30	47.38	6514	3495
10	45.75	47.60	8360	5434
12	47.77	48.60	10251	7678

## 4.2. Materiál HX300LAD Z100 – 10 mm/s

Tab. 4.2: Porovnání hodnot silové a akustické analýzy pro HDG – 10mm/s

Kontaktní tlak [MPa]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]	Horní síla [N]	Rozkmit síly [N]
2	21.79	20.04	1352	206
4	36.49	33.01	2353	233
6	42.96	34.20	3382	354
8	46.58	45.24	4918	1152
10	58.02	48.14	6644	2573
12	55.08	53.76	8098	4364

## 4.3. Materiál HX180BD ZM90 – 1 mm/s

Tab. 4.3: Porovnání hodnot silové a akustické analýzy pro ZM – 1mm/s

Kontaktní tlak [MPa]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]	Horní síla [N]	Rozkmit síly [N]
2	21.65	17.16	1455	331
4	22.43	17.18	2670	313
6	24.85	32.93	3967	739
8	29.64	42.34	5500	1461
10	35.29	42.50	7636	3308



#### 4.4. Materiál HX180BD ZM90 – 10 mm/s

**Tab. 4.4:** Porovnání hodnot silové a akustické analýzy pro ZM – 10mm/s

Kontaktní tlak [MPa]	Průměrná intenzita zvuku pro rozsah 6kHz [dB]	Intenzita zvuku pro rozsah 400Hz [dB]	Horní síla [N]	Rozkmit síly [N]
2	21.24	18.11	990	234
4	22.09	19.44	1852	365
6	25.19	29.43	2766	291
8	29.60	38.82	3754	343
10	35.52	42.61	4797	509
12	41.62	47.21	5949	925

## 5. Závěr

Pro hodnocení tribologických vlastností materiálů používaných pro hluboké tažení v automobilovém průmyslu je na katedře strojírenské technologie využívána zkouška protahováním pásku plechu mezi čelistmi. Vzhledem k dlouhodobému využívání tohoto testu je metodika provádění a vyhodnocení zkoušky již dostatečně propracována a výsledky ověřeny v praxi. V rámci řešení diplomové práce tak byla zjišťována možnost využití akustické analýzy, jako jedné z dalších diagnostických metod, pro monitorizaci dějů při tribologickém testu a případné využití této metody v praxi při tažení plechů v automobilovém průmyslu. Pro testy byly zvoleny dva běžně používané materiály s žárově nanesenou vrstvou zinku a vrstvou na bázi zinek – hořčík. Oba testované materiály byly voleny záměrně s ohledem na jejich rozdílné tribologické chování při tažení v nástroji.

Při tribologickém testu byla standardně měřena pomocí tenzometrického snímače velikost tažné síly a paralelně s tímto měřením probíhalo snímání zvuku zvukovým analyzátozem. Z výsledků měření velikosti tažných sil, které jsou znázorněny v grafech, je patrný rozdíl v chování obou testovaných materiálů, kdy u plechu s žárově nanesenou vrstvou zinku dochází výraznému zadírání oproti materiálu s vrstvou zinek- hořčík. Materiál s vrstvou zinku vykazuje přibližně dvojnásobnou velikost rozkmitu síly (zadírání) oproti materiálu s vrstvou zinek-hořčík. Střední hodnoty sil jsou přibližně stejné. Z výsledku měření vyplývá, že přísada hořčíku v ochranné vrstvě příznivě ovlivňuje proces zadírání. Výsledek tribologického testu vyhodnocovaný na základě silové odezvy má tak jednoznačné a prokazatelné závěry. Cílem diplomové práce však nebylo porovnání obou typů materiálů, ale ověřit možnost využití akustické analýzy pro tribologický test a případnou aplikovatelnost této metody v praxi. Paralelně získaný akustický záznam tak bylo nutné dále zpracovat a vyhodnotit. Výstupem z akustického analyzátoru Brüel & Kjær typ 2270 byl časový průběh akustického tlaku snímáný při tribologickém testu. Tento záznam byl podroben frekvenční analýze, přičemž byly voleny dvě frekvenční pásma a to 400 Hz a 6,4 kHz. Pro obě frekvenční pásma byly vypočítány intenzity zvuku a pomocí integrace zjištěny jejich průměrné hodnoty. Z výsledků měření, které jsou uvedeny v souhrnných tabulkách 4.1. až 4.4. je patrné, že existuje souvislost mezi velikostí tažných sil, zadírání a intenzitou zvuku. Zvyšující se intenzita zvuku je tak v laboratorních podmínkách prokazatelně měřitelnou veličinou závislou na procesu zadírání plechu. Z výsledků časových průběhů akustického tlaku je patrné, že maximální hodnoty akustického tlaku se

opakují s frekvencí v řádu jednotek Hz (viz např. Obr. 3.56). Pro vyhodnocení procesu zadírání je však problematický charakter vyvíjeného zvuku při tažení. Výsledný zaznamenaný zvuk není složen z harmonických vlnění, ale jednotlivých, nepravidelně se opakujících se zvukových vln o různé frekvenci. Vyhodnocení takového signálu je pak značně obtížné a predikce vzniku zadírání na základě akustické analýzy je značně problematická. Na základě výsledků měření prezentovaných v diplomové práci doporučuji v případě využití akustické analýzy pro monitorizaci zadírání plechů analyzovat podrobněji nízkofrekvenční pásma do maximální velikosti 1kHz. V těchto oblastech je projev zadírání výraznější, než v oblastech vysokých frekvencí. Z pohledu praktického využití této metody při lisování se domnívám, že metoda akustické analýzy bude omezena technickými možnostmi snímání zvuku v prostředí s nadměrnou hlučností, což lisovny bezesporu jsou. V případě dalšího výzkumu v oblasti monitorizace procesu zadírání plechů doporučuji zaměřit se na analýzu vibrací, které jsou sekundárním projevem zadírání plechů.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] KOLNEROVÁ, Michaela a Pavel SOLFRONK. Morfologie plechů se zinkový povlakem používaných v automobilovém průmyslu. [online]. [cit. 2018-04-02]. *Metal 2001*. Ostrava 2001. Dostupné z: <http://docplayer.cz/65050-Morfologie-plechu-se-zinkovy-povlakem-pouzivanych-v-automobilovem-prumyslu.html>
- [2] KOLNEROVÁ, Michaela. Metody tváření kovu a plastu: Hodnocení plechu s povlaky [online]. Liberec, 2010 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/mtk/Plechypovlaky.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/Plechypovlaky.pdf)
- [3] KUPILÍKOVÁ, Hana. *Vliv velikosti deformace a stavu napjatosti na poškození ochranného povlaku na bázi Zn-Mg*. Liberec, 2014 [cit. 2018-03-22]. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] *PŘÍRUČKA ŽÁROVÉHO ZINKOVÁNÍ* [online]. 2007. Praha [cit. 2018-04-22].
- [5] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [6] POKORNÝ P., V. MEJTA a P. SZELAG. Povrchová úprava: Příspěvek k teoretickým základům tvorby fosfátového povlaku [online]. Hradec Králové: IMPEA, s. r. o., 2011, VII, [cit. 2018-04-06]. ISSN 1801-707X. Dostupné z: <http://www.povrchovauprava.cz/uploads/assets/casopisy/pu-2011-03.pdf>
- [7] Klasifikace fosfátových povlaků. *Tribotechnika* [online]. Praha: VŠCHT-Praha [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/klasifikace-fosfatovych-povlaku.html>
- [8] SOFRONK, Pavel. *Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace*. Liberec, 2002. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [9] *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Povrchové úpravy kovů a plastů*. 2005.
- [10] BLAŠKOVITŠ, Pavel, Marián DZIMKO a Jozef BALLA. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).

- [11] KOLNEROVÁ, Michaela. *Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení: (autoreferát disertační práce)*. V Liberci: Technická univerzita, Fakulta strojní, 2006. ISBN 80-7372-036-1.
- [12] MAŠEK, Libor. *Vliv maziv na opotřebení tvářecích nástrojů* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. [cit. 2018-04-12]. ISBN 80-214-1794-3. Dostupné z:  
<http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-1794-3.pdf>
- [13] KŘENKOVÁ, Petra. *Antikorozní ochrana kovů a povrchové úpravy kovových výlisků* [online]. Zlín, 2006 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z:  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/510/k%C5%99enkov%C3%A1\\_2006\\_bp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/510/k%C5%99enkov%C3%A1_2006_bp.pdf?sequence=1) Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [14] *Technologie tváření* [online]. Benešov [cit. 2018-04-16]. Dostupné z:  
<http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>
- [15] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. Řada strojírenské literatury.
- [16] ŠTĚPINA, Václav a Václav VESELÝ. *Maziva v tribologii*. Bratislava: VEDA vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1985.
- [17] *Tribologie* [online]. Liberec : TU v Liberci, 2011 [cit. 2011-04-06]. Dostupné z :  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/ttv/tribologie.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf)
- [18] *Obecné informace ozvuku* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z:  
<http://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/obecne-informace-o-zvuku>
- [19] *Šíření vln v prostoru* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z:  
<http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/vlneni/sireni-vlneni-v-prostoru>
- [20] VLACHÝ, Václav. *Praxe zvukové techniky*. 3., aktualiz. a dopl. vyd. Praha: Muzikus, c2008. ISBN 978-80-86253-46-5.
- [21] *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z:  
[https://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](https://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)

- [22] Multimediální technologie: Pořízení zvukového záznamu. *Wikispaces* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z:  
<https://umt.wikispaces.com/V%C3%BDvoj+technick%C3%BDch+prost%C5%99edk%C5%AF+pro+z%C3%A1znam+zvuku>
- [23] UTZ, Peter. *Introduction to audio*. Middleton, Wisc.: A-R Editions, 2003. ISBN 978-08-9579-512-0.
- [24] Mikrofon. *Wikipedie* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrofon>
- [25] Začínáme s mikrofony. *Frontman* [online]. 2012 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z:  
<http://frontman.cz/zaciname-s-mikrofony>
- [26] THOMPSON, Daniel M. *Understanding audio: getting the most out of your project or professional recording studio*. Boston, Mass.: Berklee Press, c2005. ISBN 0634009591.
- [27] Typy mikrofonů. *ADM magazine* [online]. 2017 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z:  
<http://admmagazin.cz/mikrofony-01-typy-mikrofonu/>
- [28] Přístroje a vybavení. *Bioanalitika* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:  
<http://www.bioanalytika.cz/cz/pristroje.html>
- [29] Měření hluku a vibrací zvukoměrem [online]. Praha [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:  
[http://acoust.feld.cvut.cz/files/uak\\_files/uloha1.pdf](http://acoust.feld.cvut.cz/files/uak_files/uloha1.pdf) Úloha. ČVUT.

## **Seznam příloh**

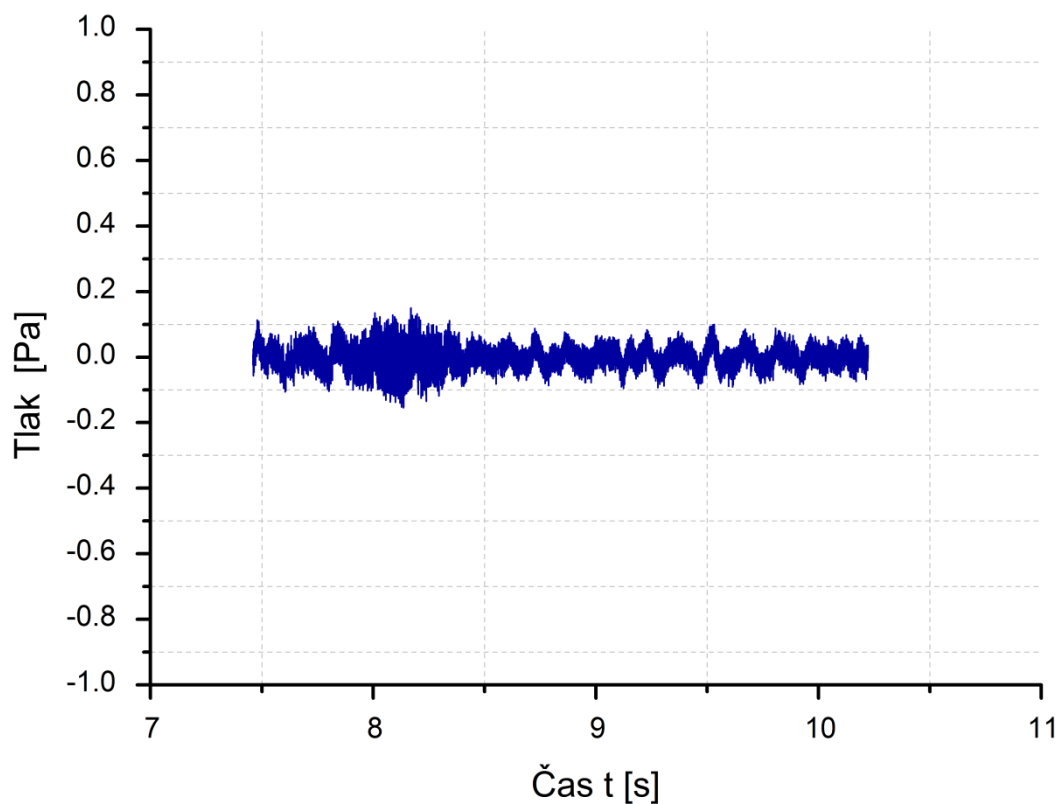
Příloha 1 – Materiál HX300LAD Z100 – rychlost 10 mm/s

Příloha 2 – Materiál HX180BD ZM90 – 10 mm/s

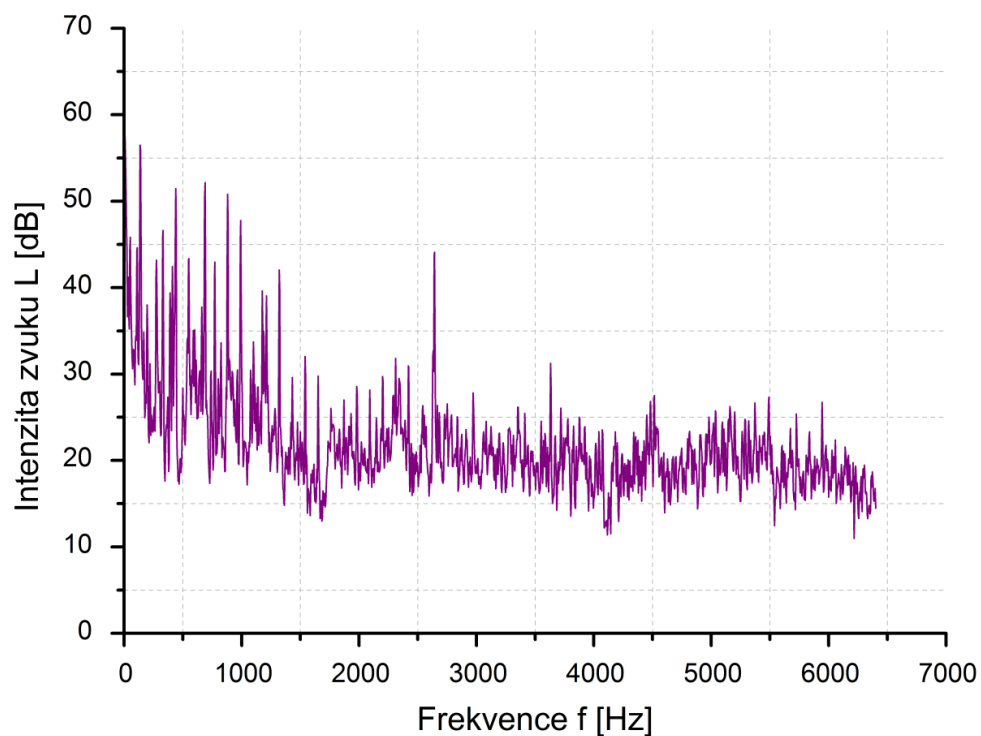
Příloha 3 – Protokoly z měření silové odezvy na zařízení SOKOL 400

## Příloha 1 - Materiál HX300LAD Z100 – rychlost 10 mm/s

Příloha 1.1: Časový průběh akustického tlaku pro 1. úsek

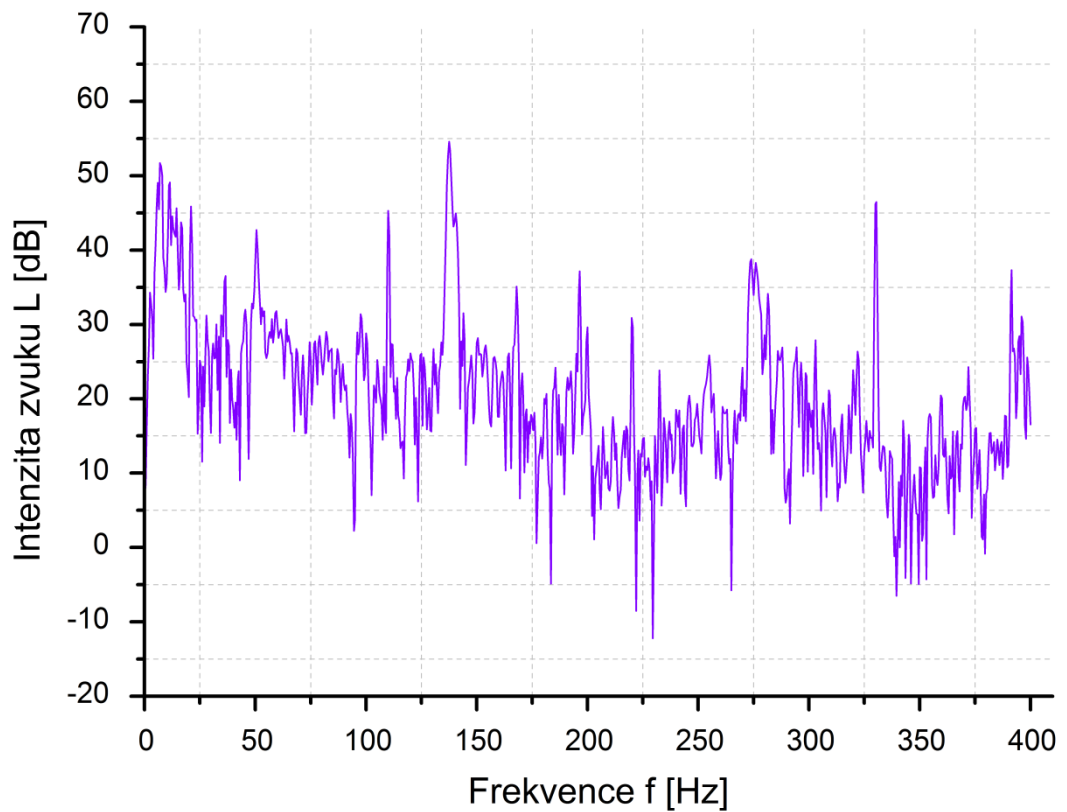


Příloha 1.2: Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-6400 Hz

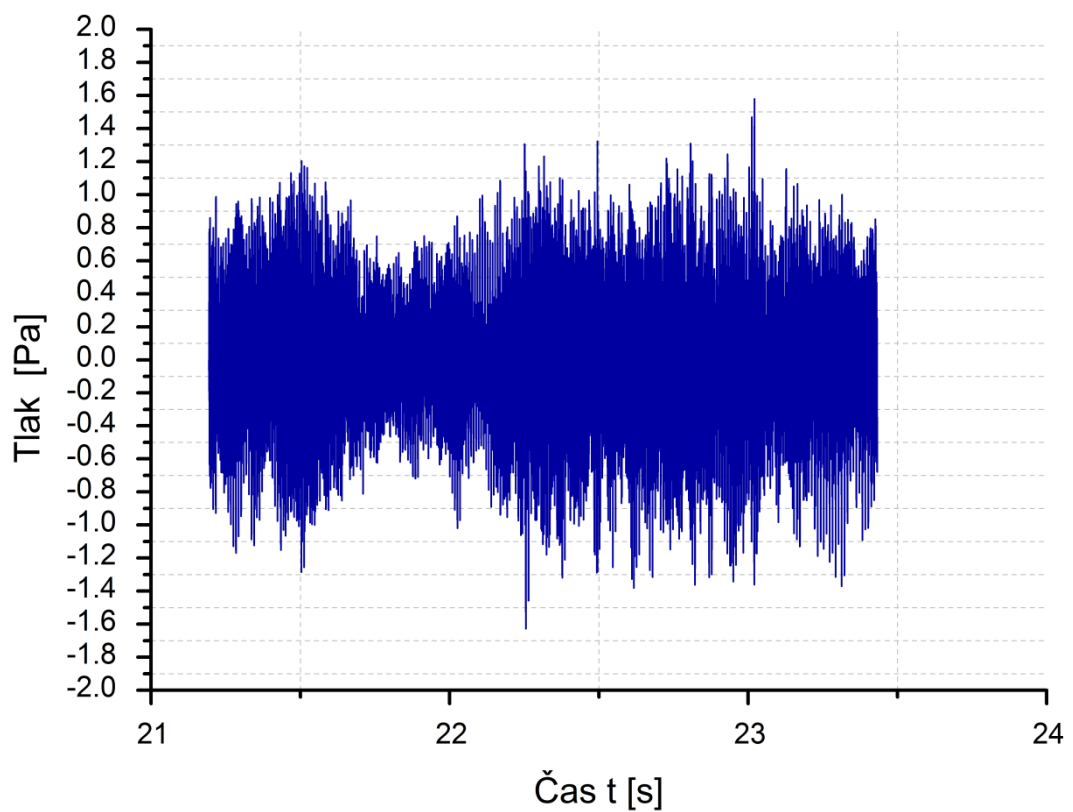




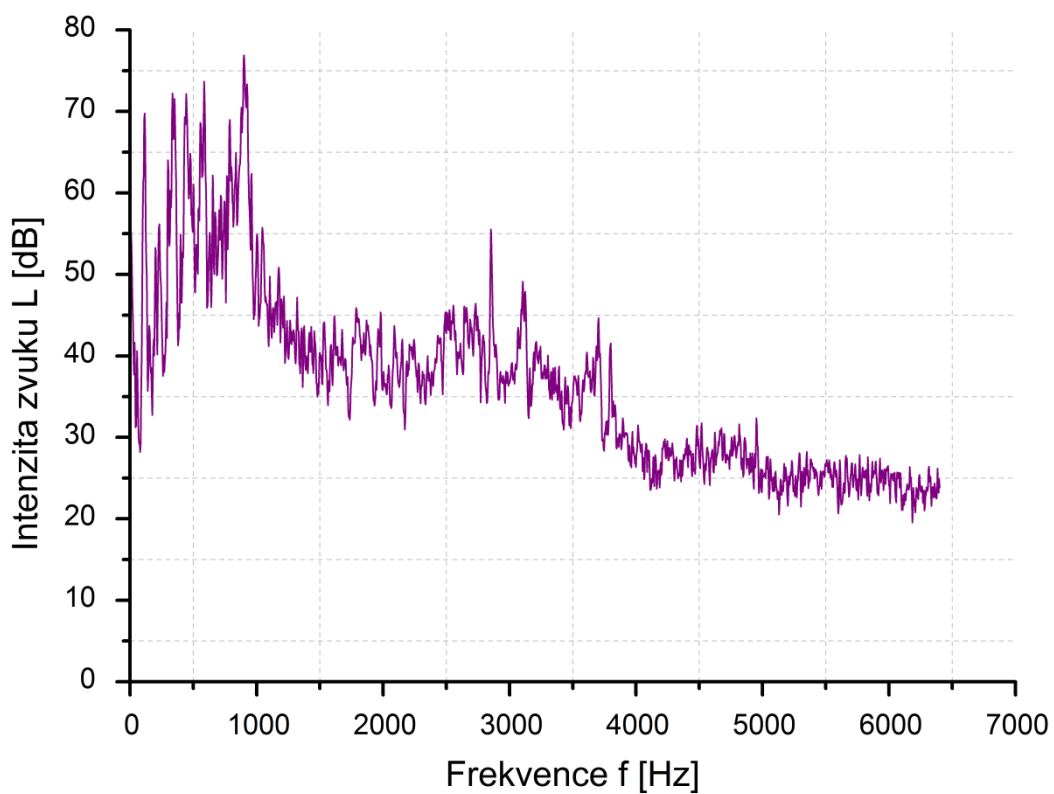
**Příloha 1.3:** Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-400 Hz



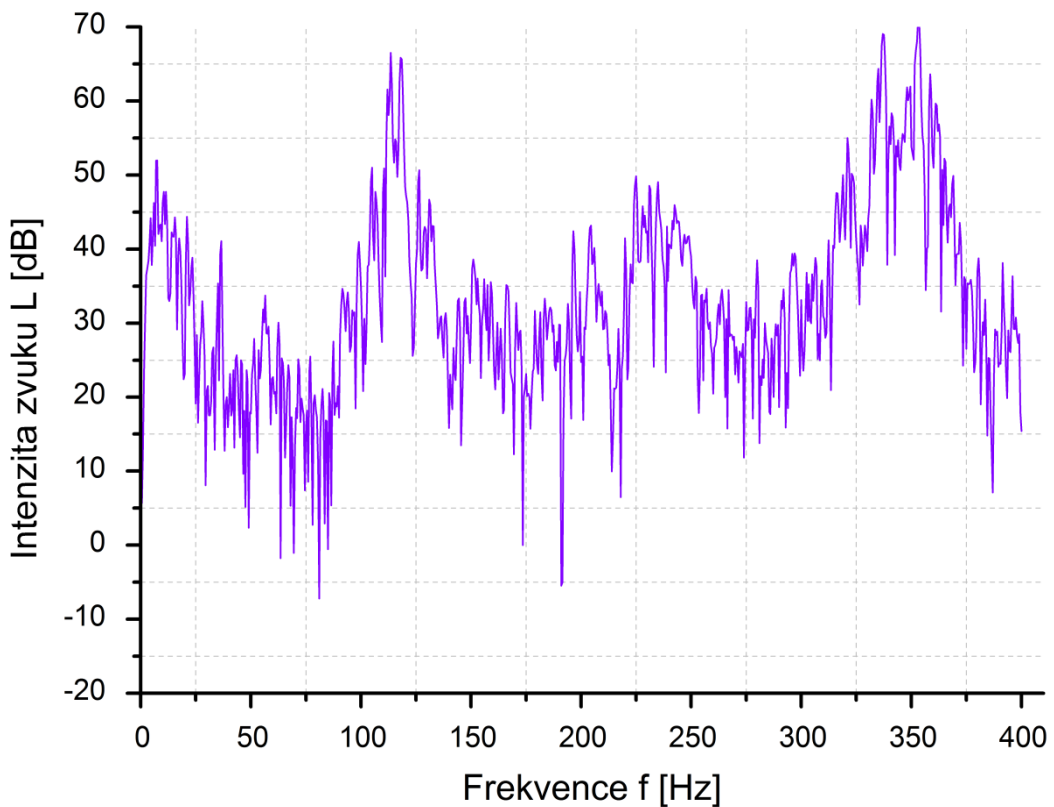
**Příloha 1.4:** Časový průběh akustického tlaku pro 2. úsek



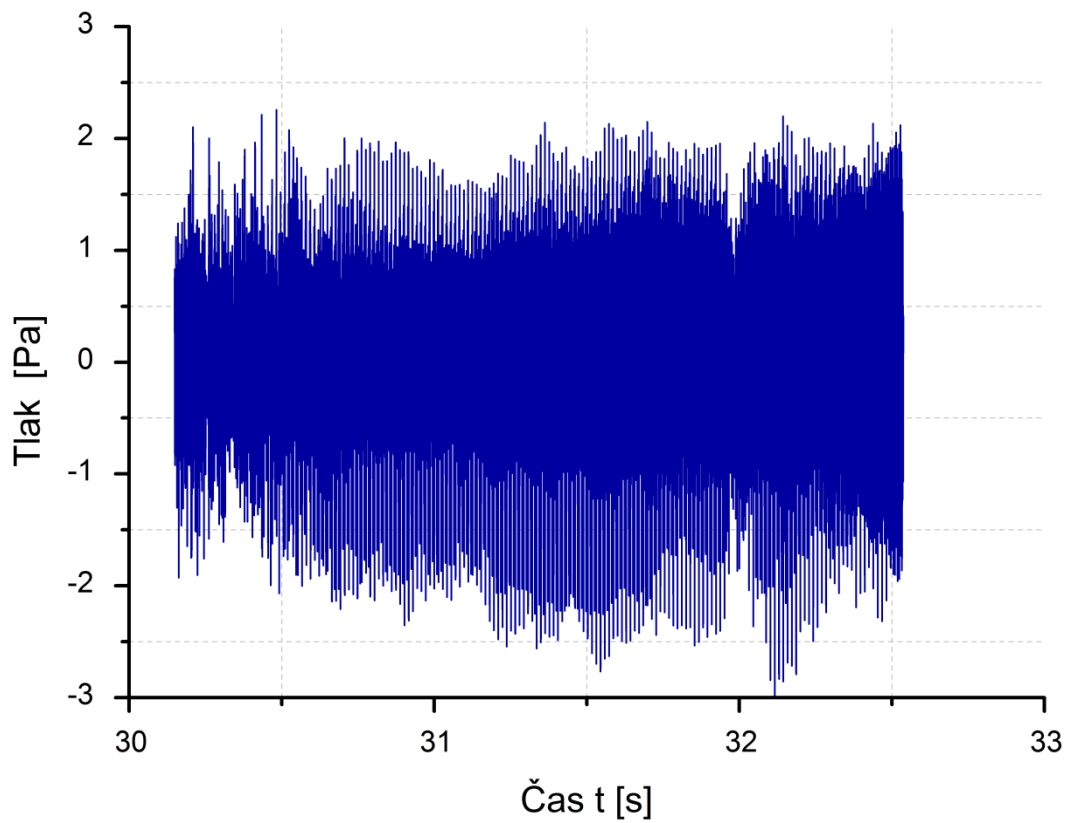
**Příloha 1.5:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



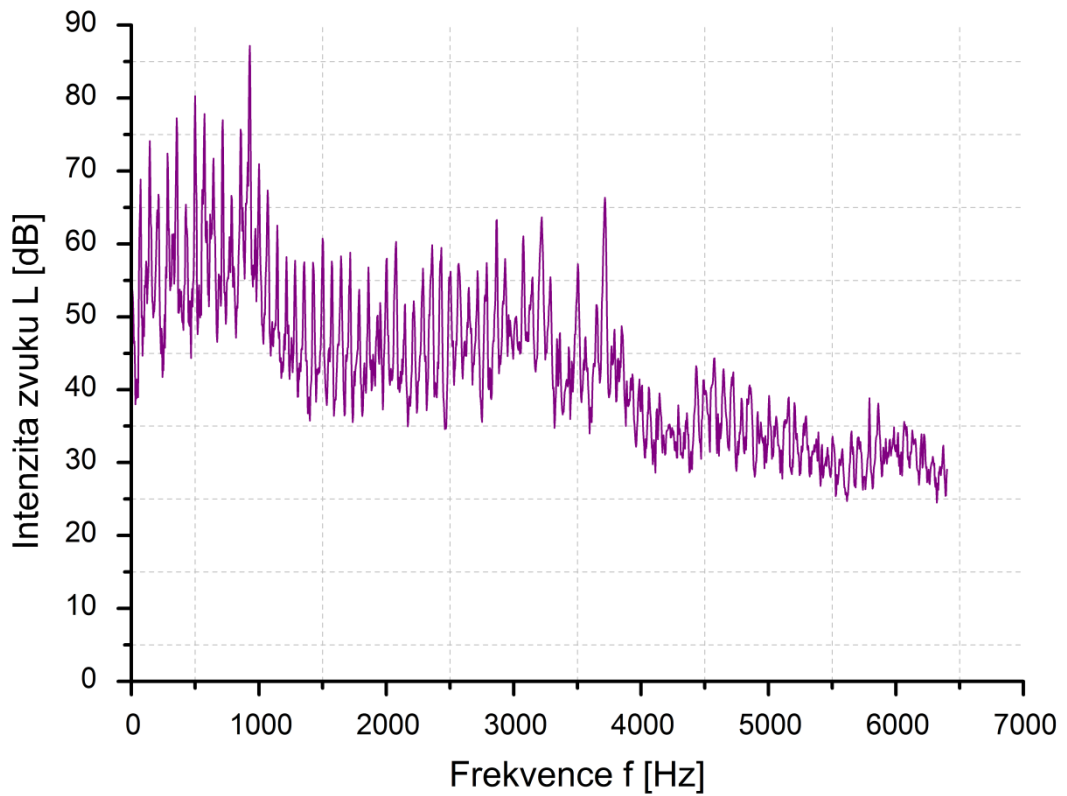
**Příloha 1.6:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-400 Hz



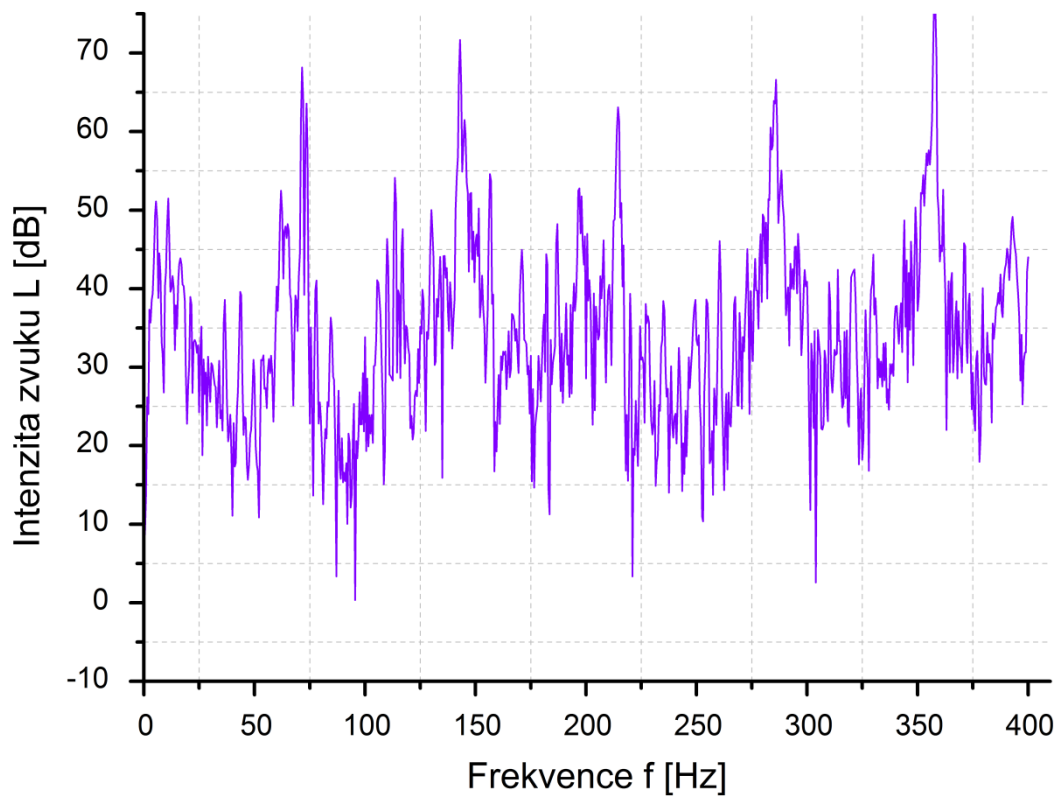
**Příloha 1.7:** Časový průběh akustického tlaku pro 3. úsek



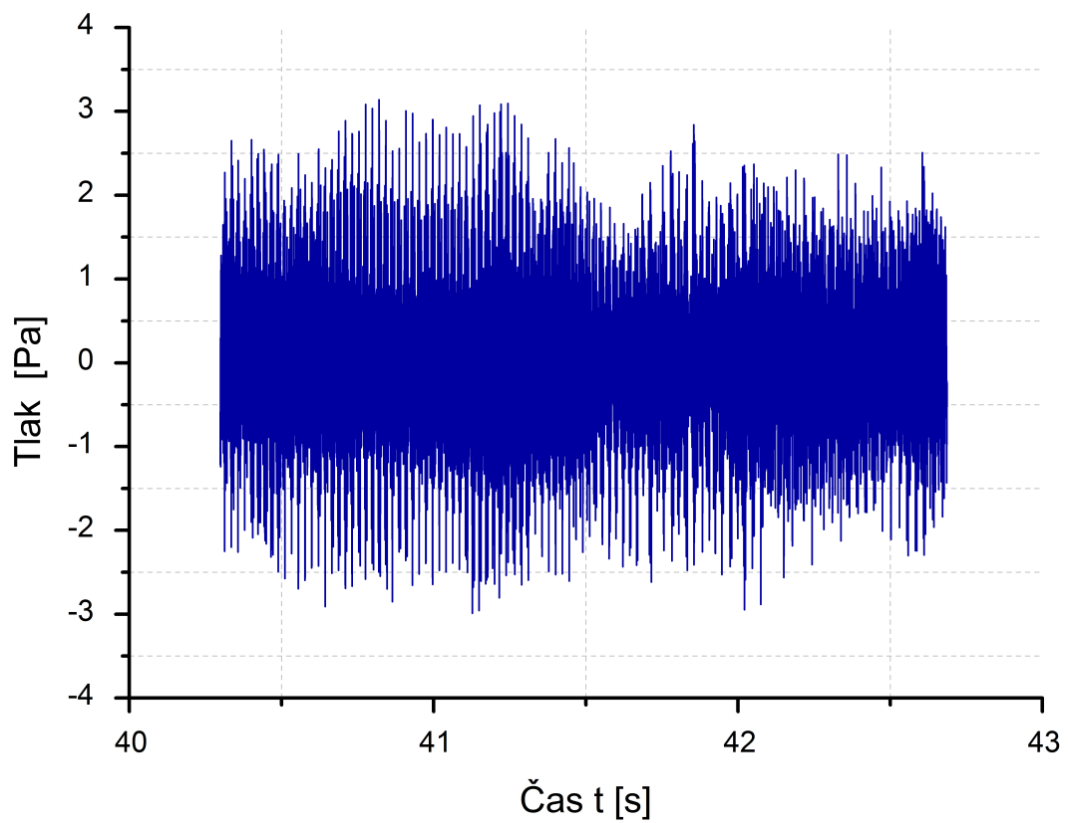
**Příloha 1.8:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



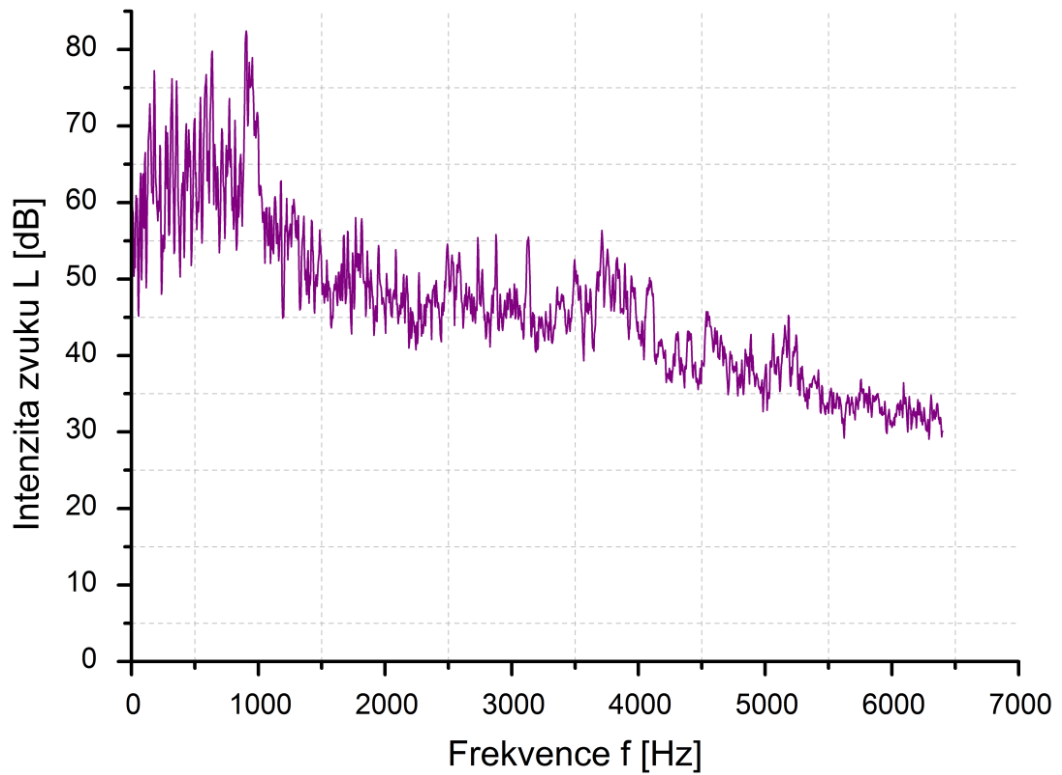
**Příloha 1.9:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-400 Hz



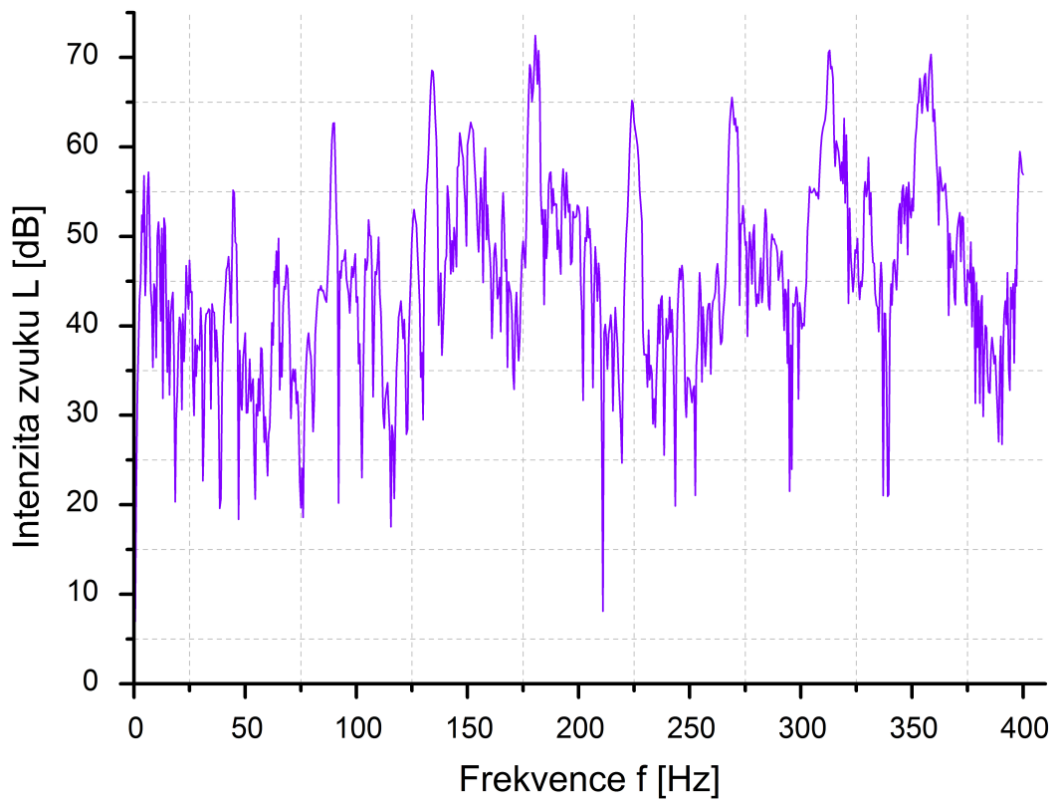
**Příloha 1.10:** Časový průběh akustického tlaku pro 4. úsek



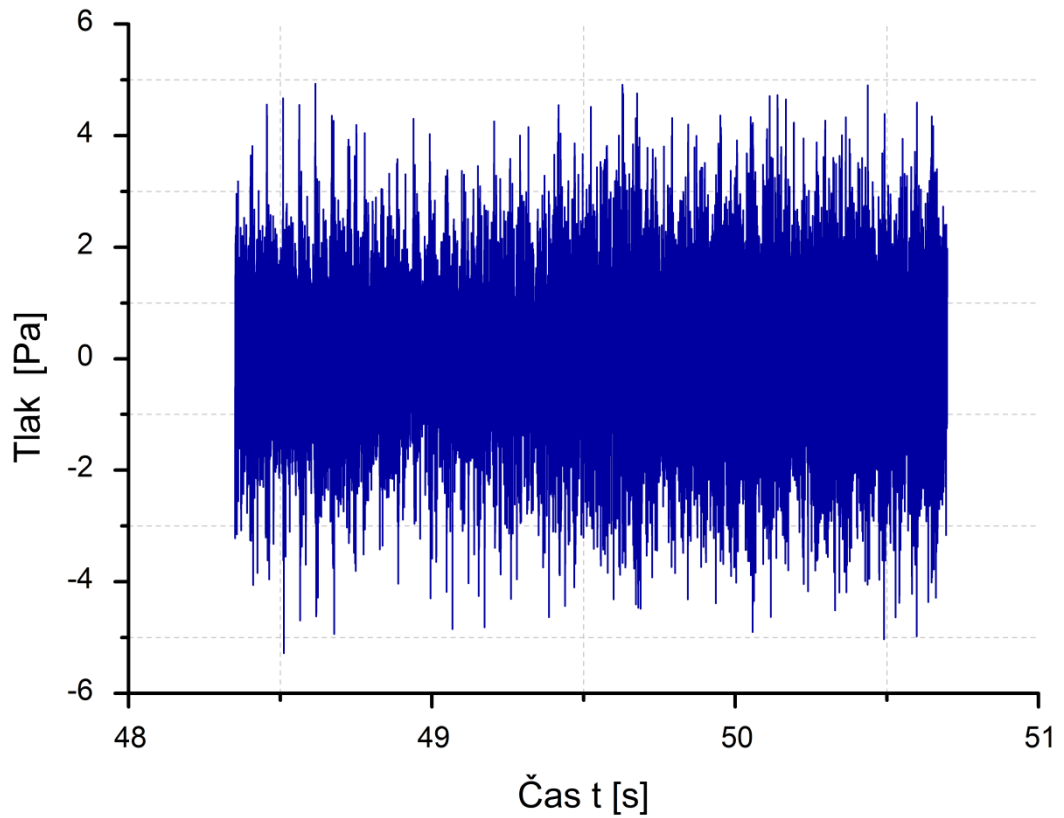
**Příloha 1.11:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



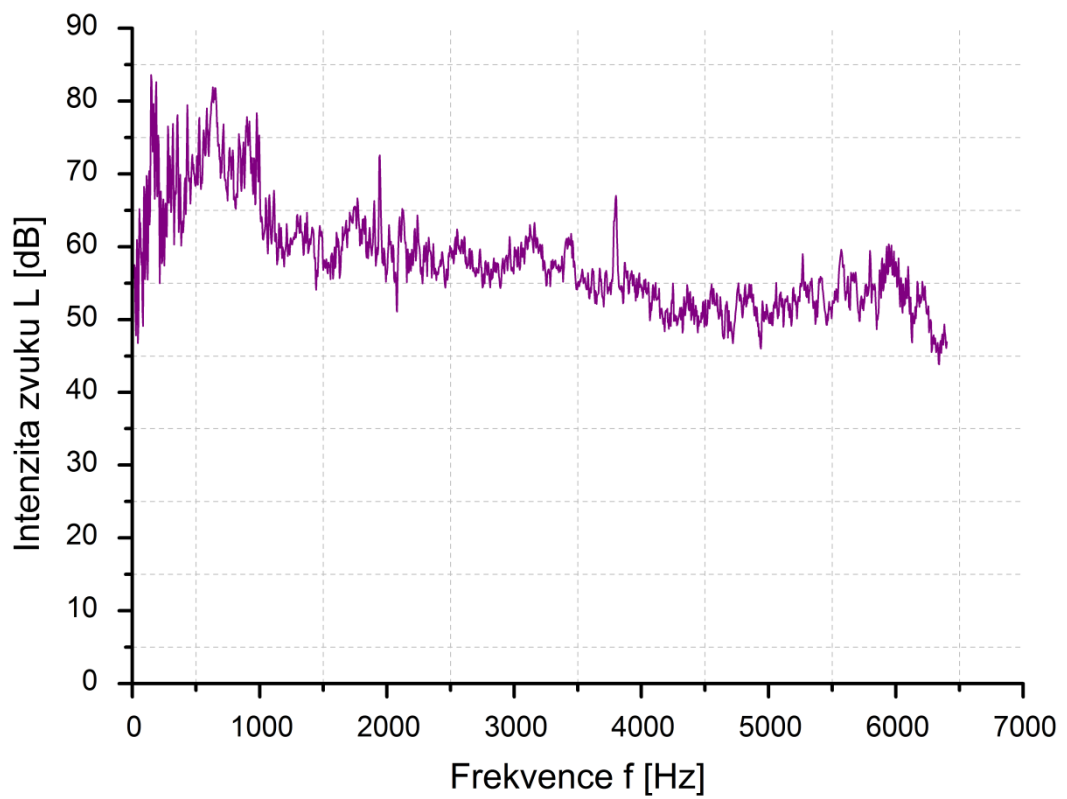
**Příloha 1.12:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-400 Hz



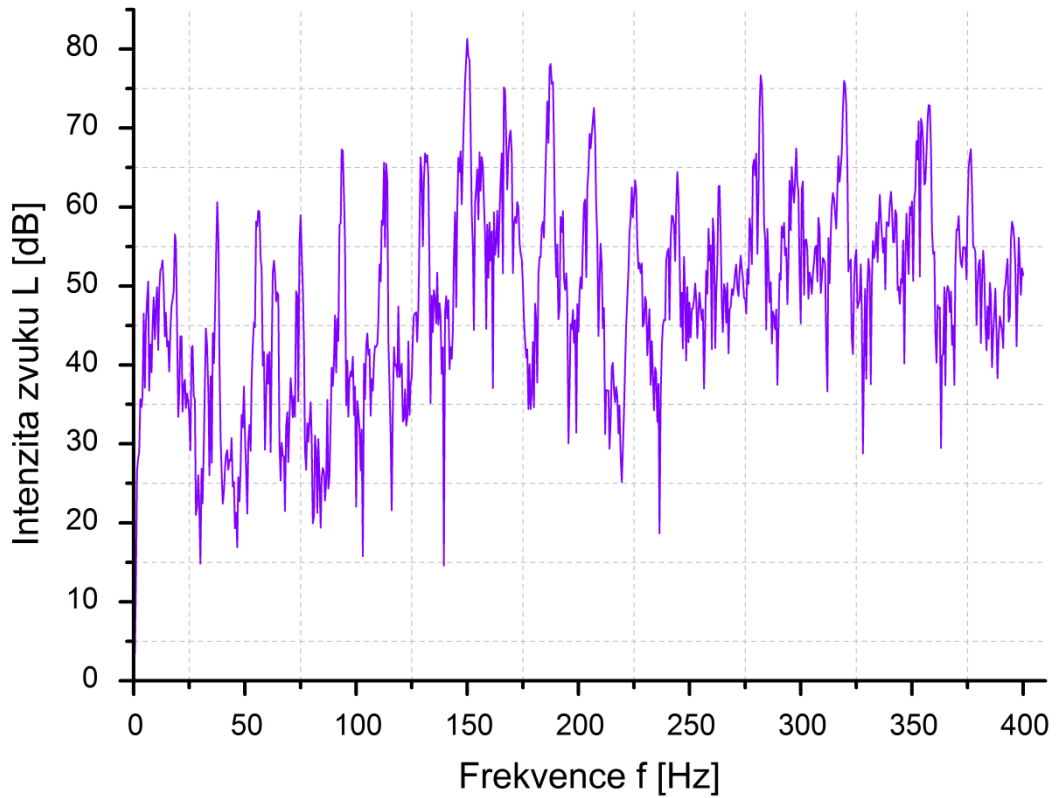
**Příloha 1.13:** Časový průběh akustického tlaku pro 5. úsek



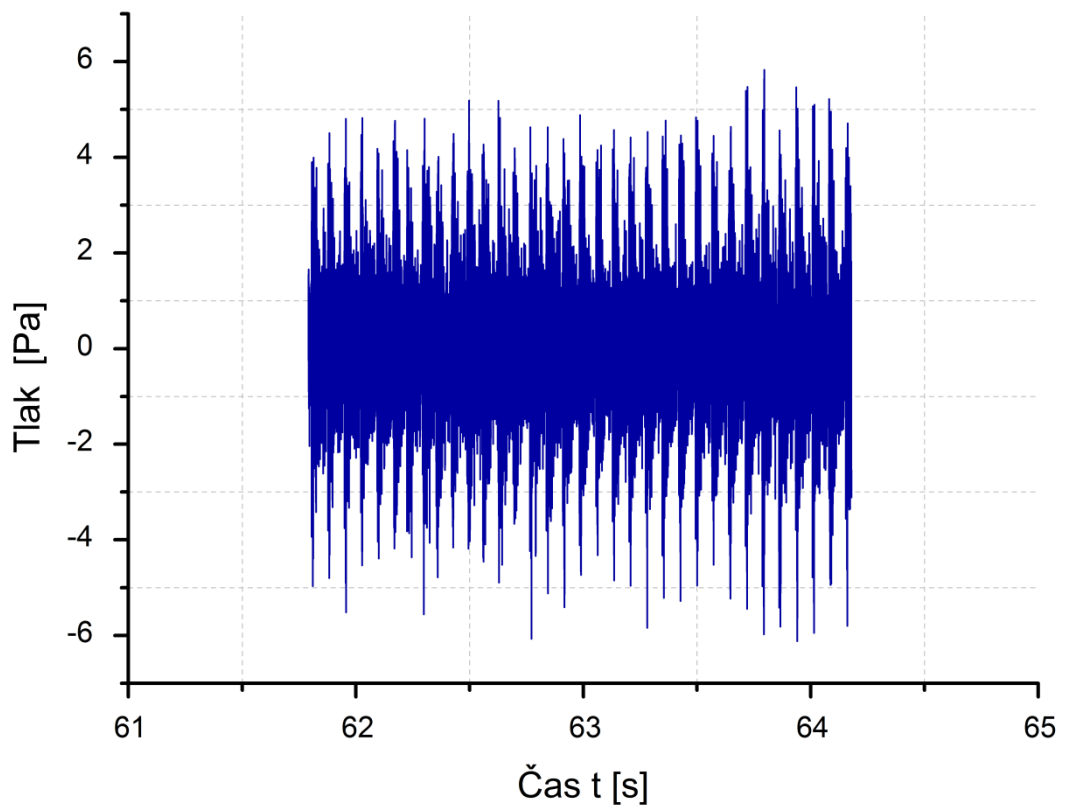
**Příloha 1.14:** Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



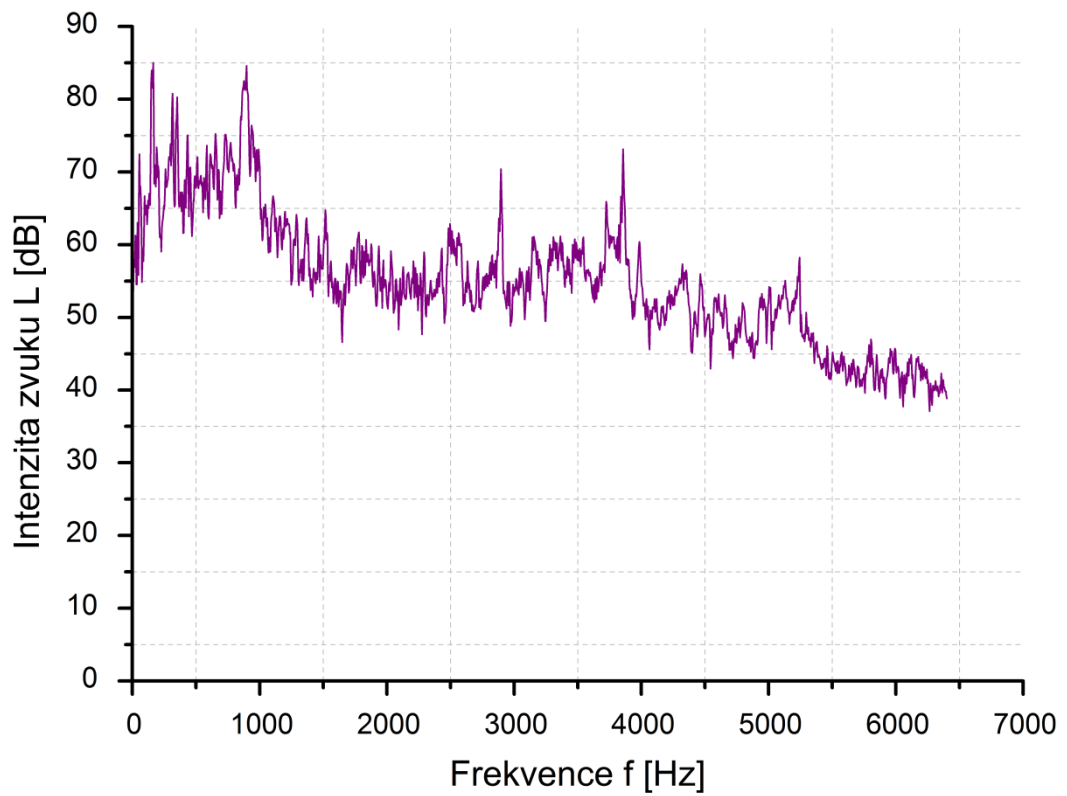
**Příloha 1.15:** Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-400 Hz



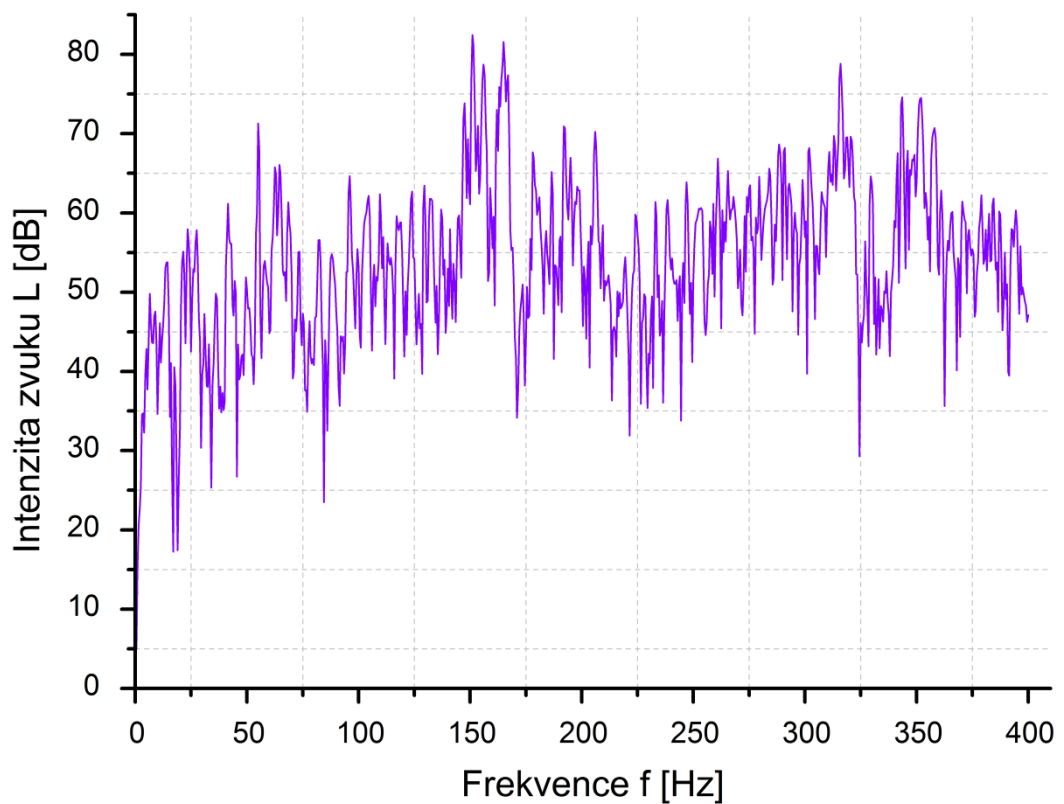
**Příloha 1.16:** Časový průběh akustického tlaku pro 6. úsek



**Příloha 1.17:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



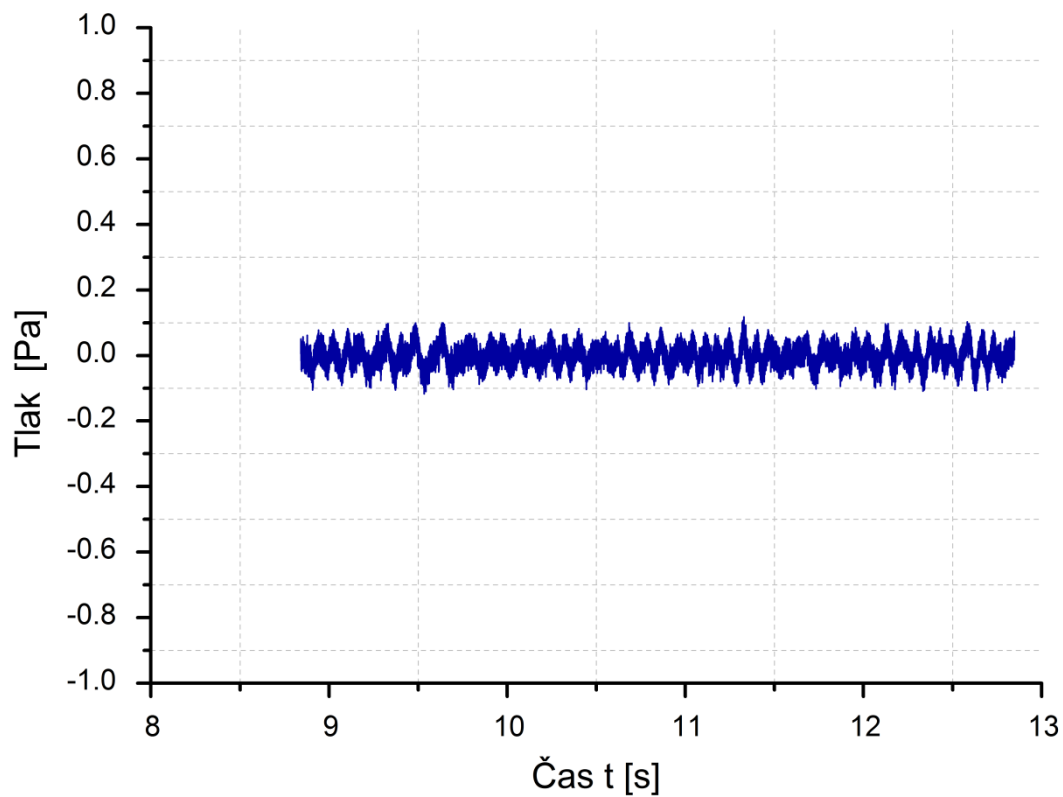
**Příloha 1.18:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-400 Hz



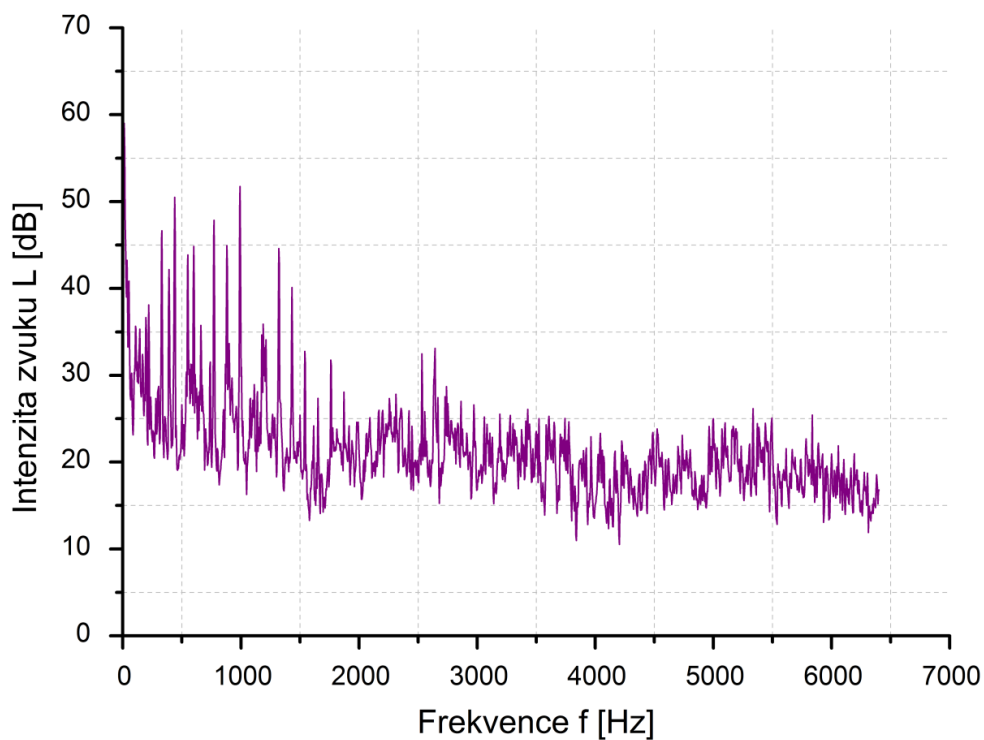


## Příloha 2 – Materiál HX180BD ZM90 – 10 mm/s

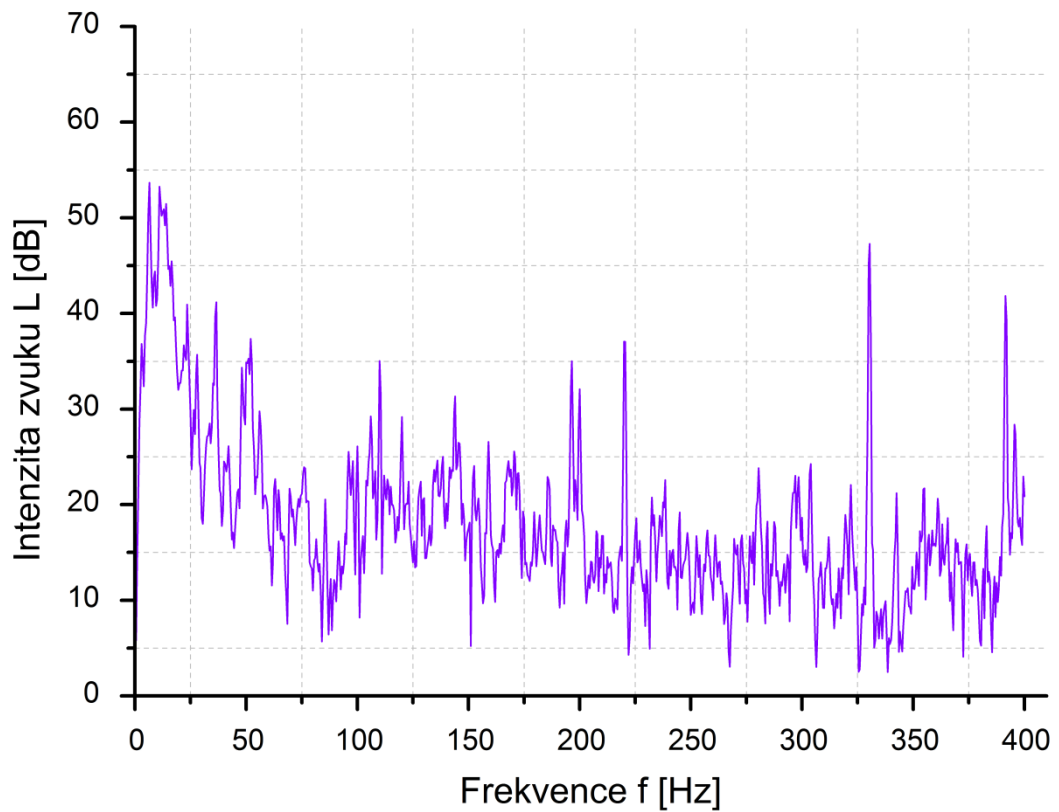
Příloha 2.1: Časový průběh akustického tlaku pro 1. úsek



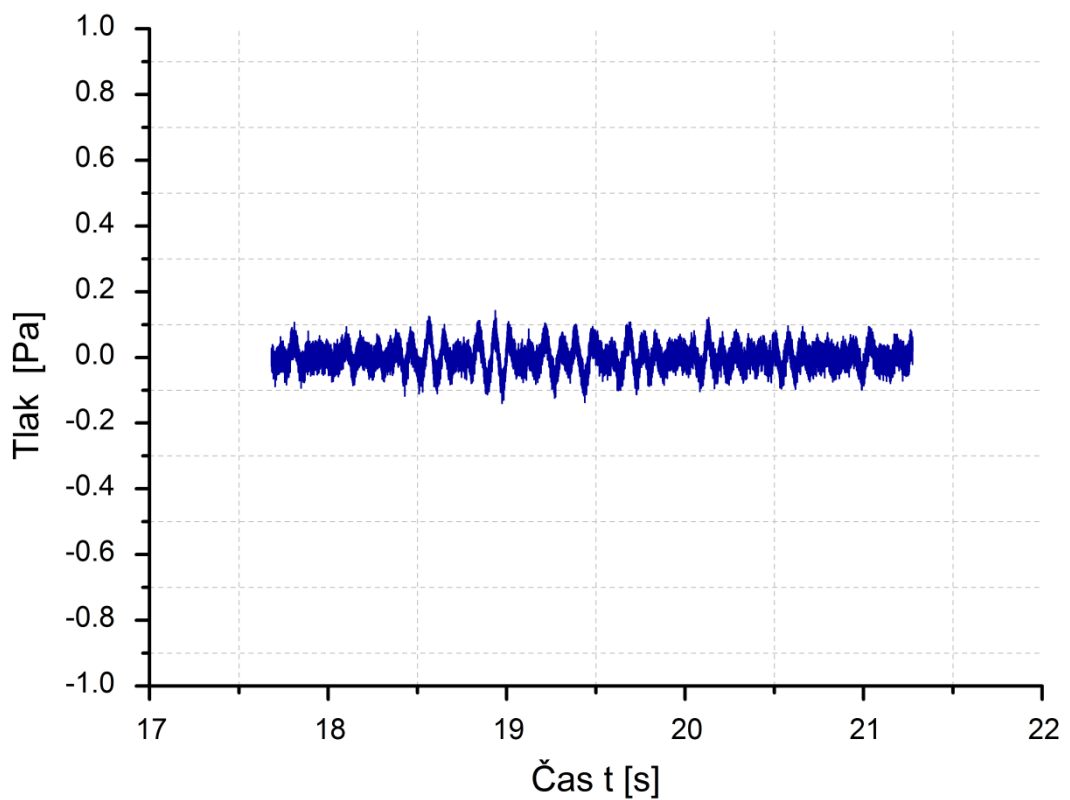
Příloha 2.2: Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



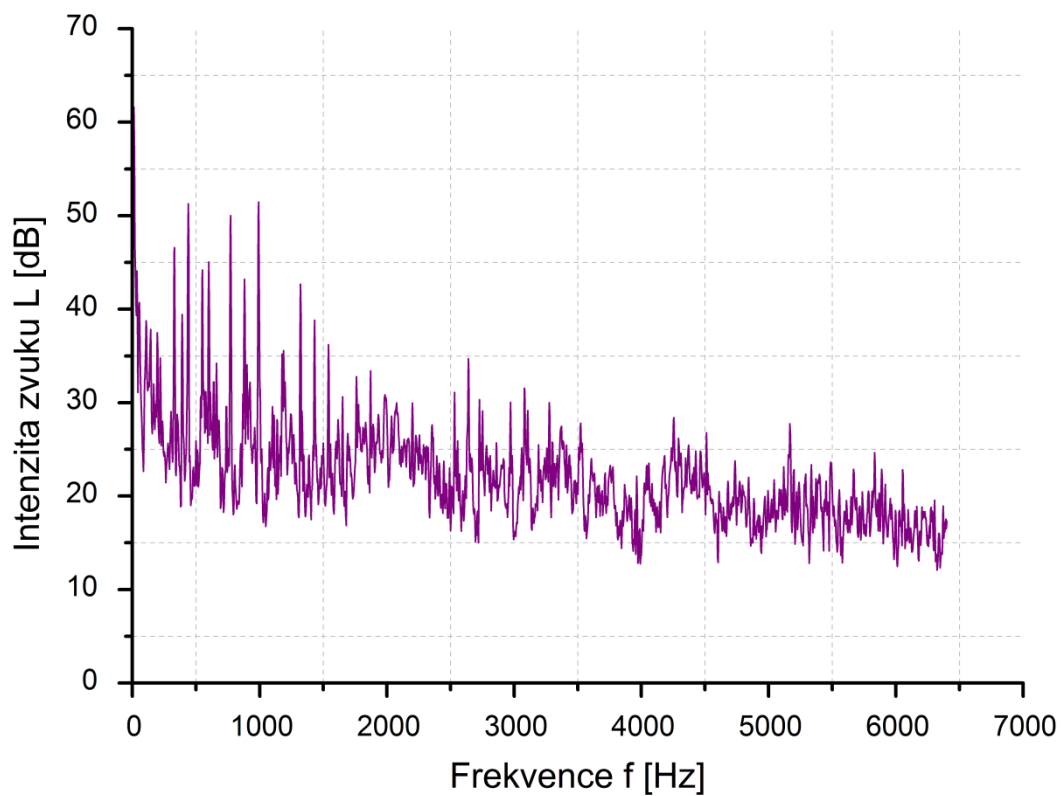
**Příloha 2.3:** Frekvenční charakteristika pro 1. úsek při rozsahu 0-400 Hz



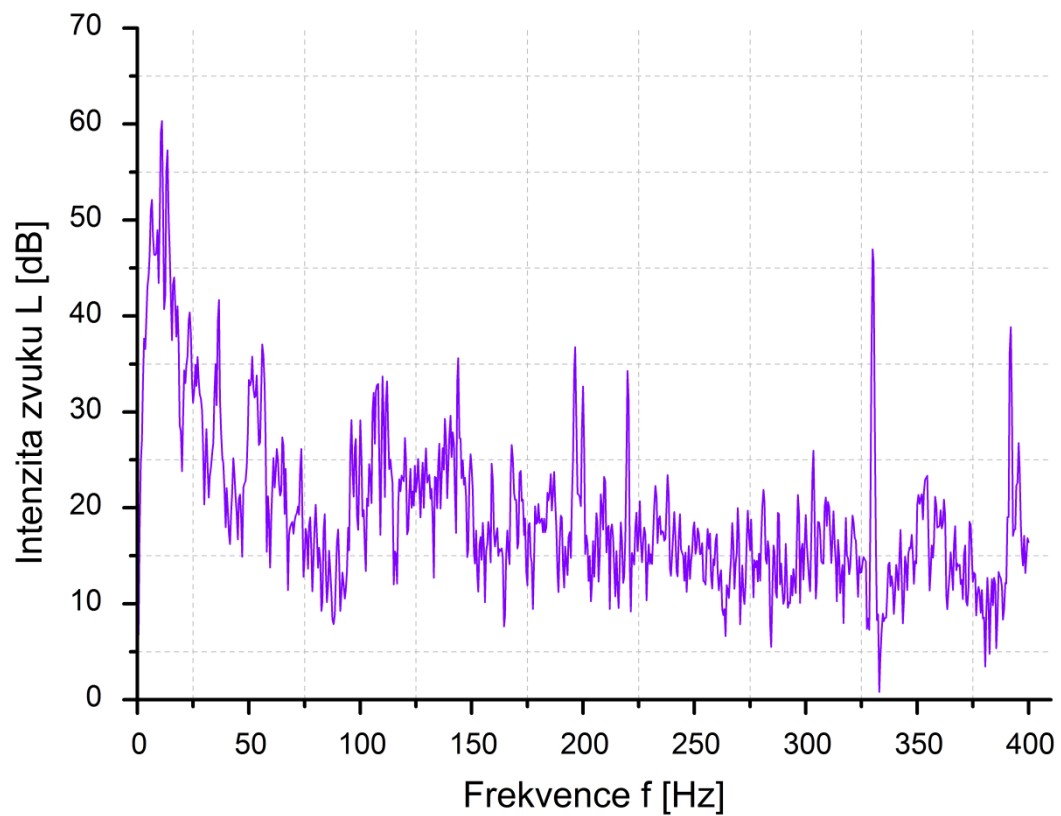
**Příloha 2.4:** Časový průběh akustického tlaku pro 2. úsek



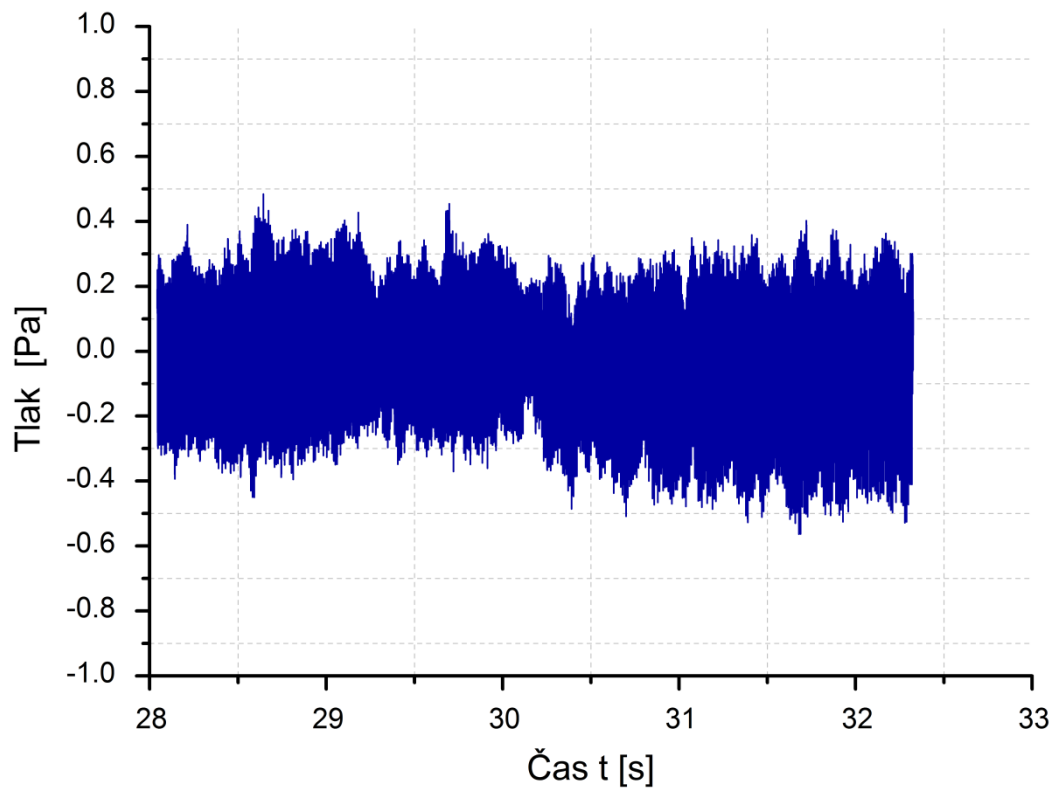
**Příloha 2.5:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



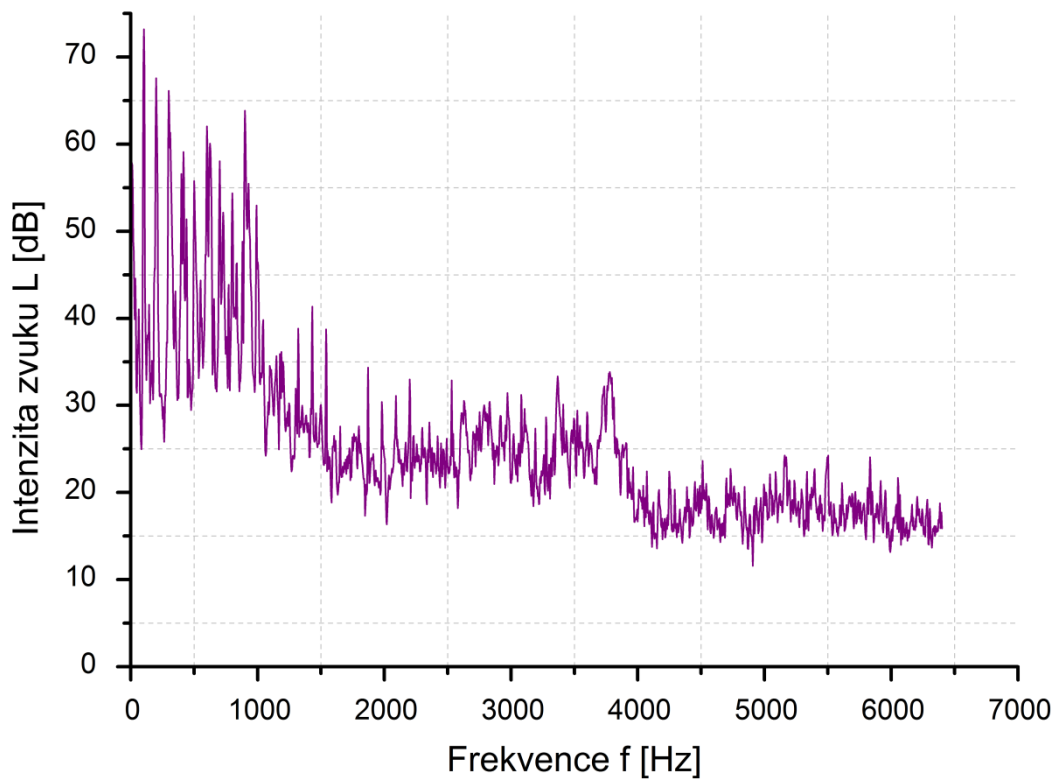
**Příloha 2.6:** Frekvenční charakteristika pro 2. úsek při rozsahu 0-400 Hz



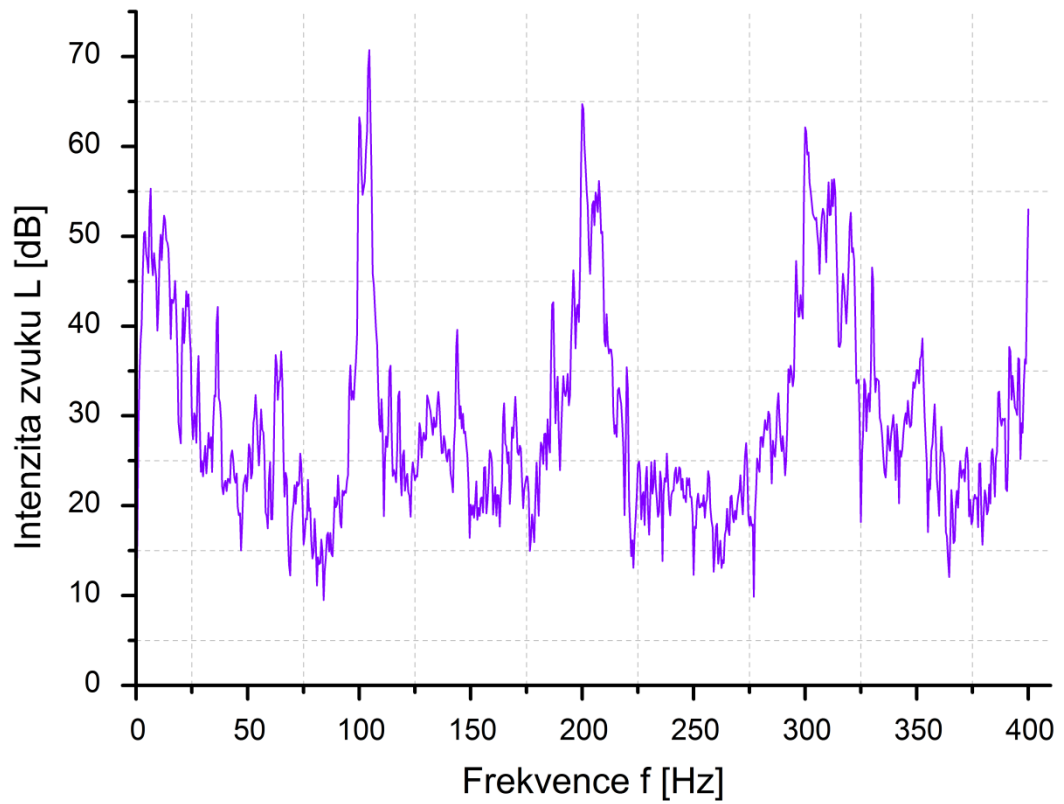
**Příloha 2.7:** Časový průběh akustického tlaku pro 3. úsek



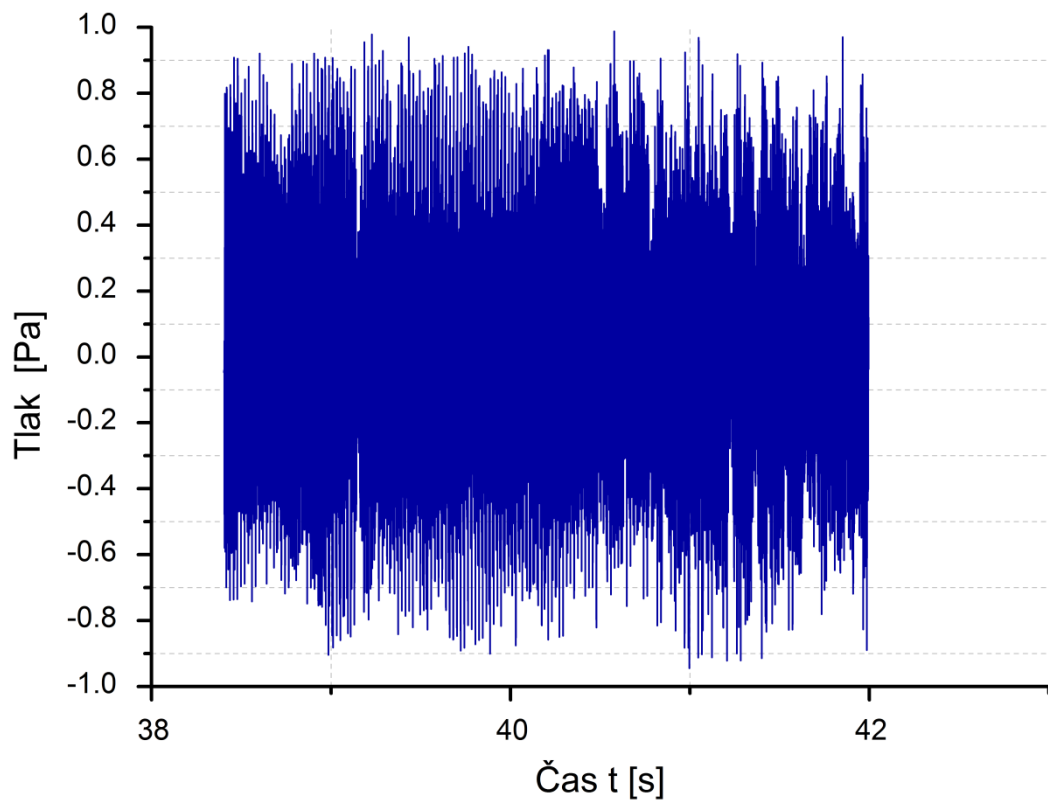
**Příloha 2.8:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



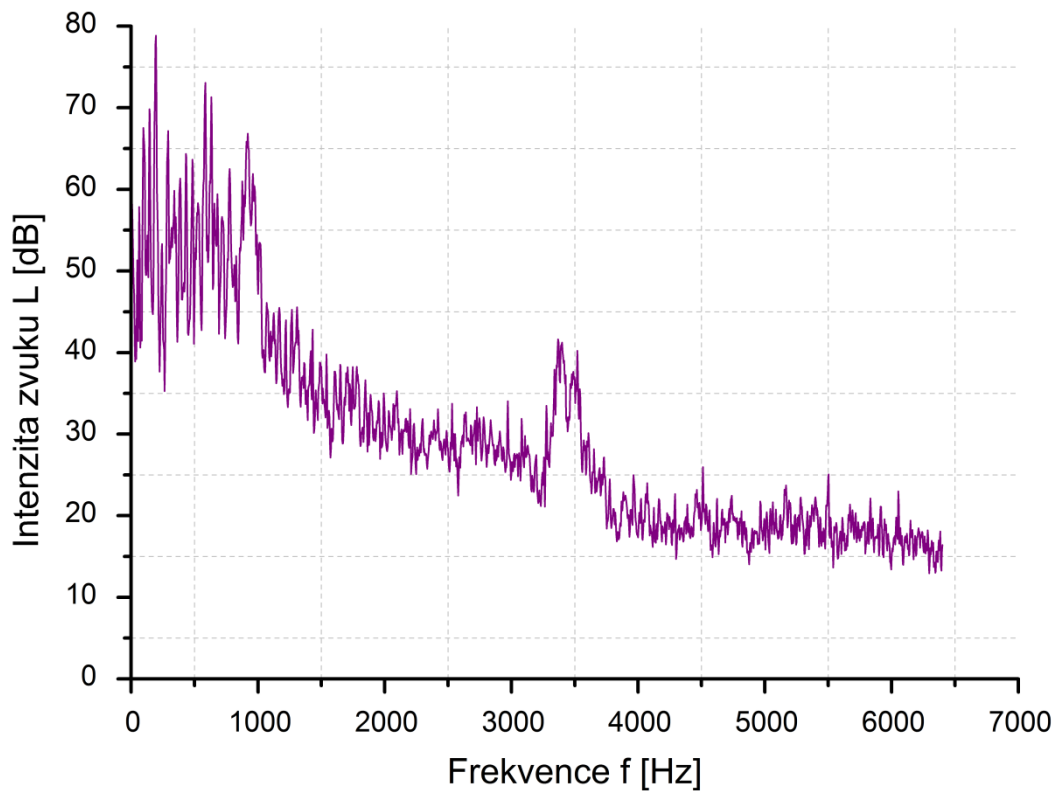
**Příloha 2.9:** Frekvenční charakteristika pro 3. úsek při rozsahu 0-400 Hz



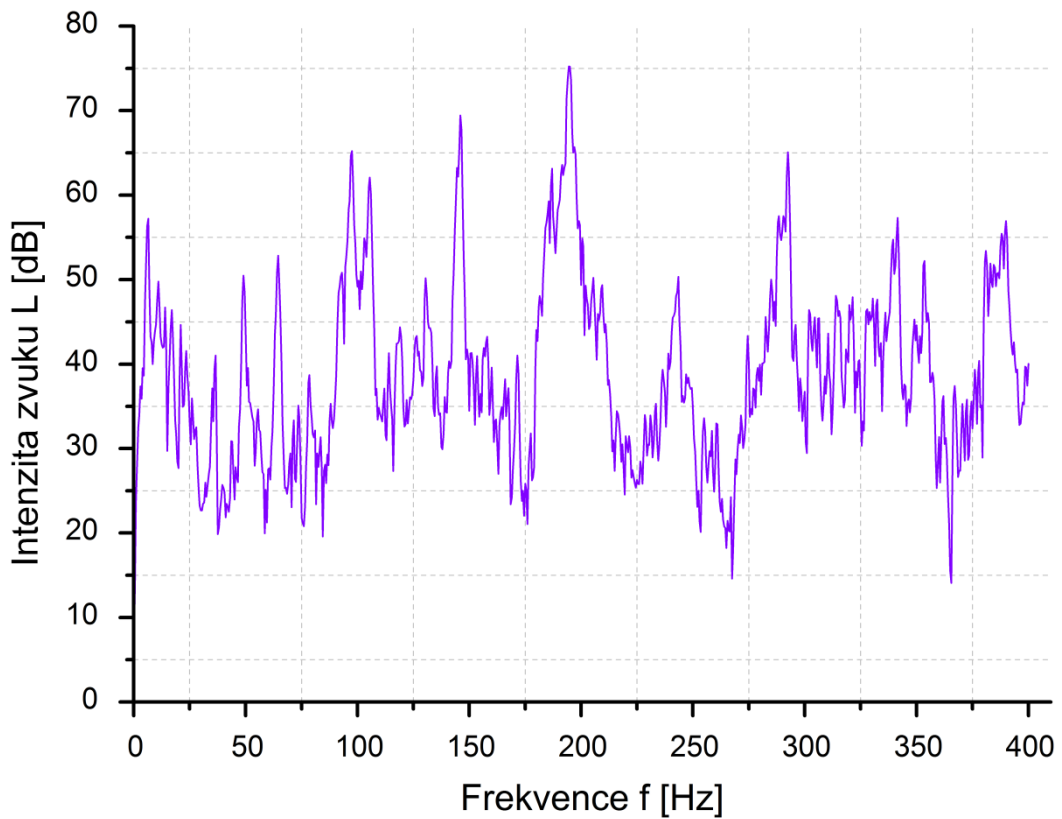
**Příloha 2.10:** Časový průběh akustického tlaku pro 4. úsek



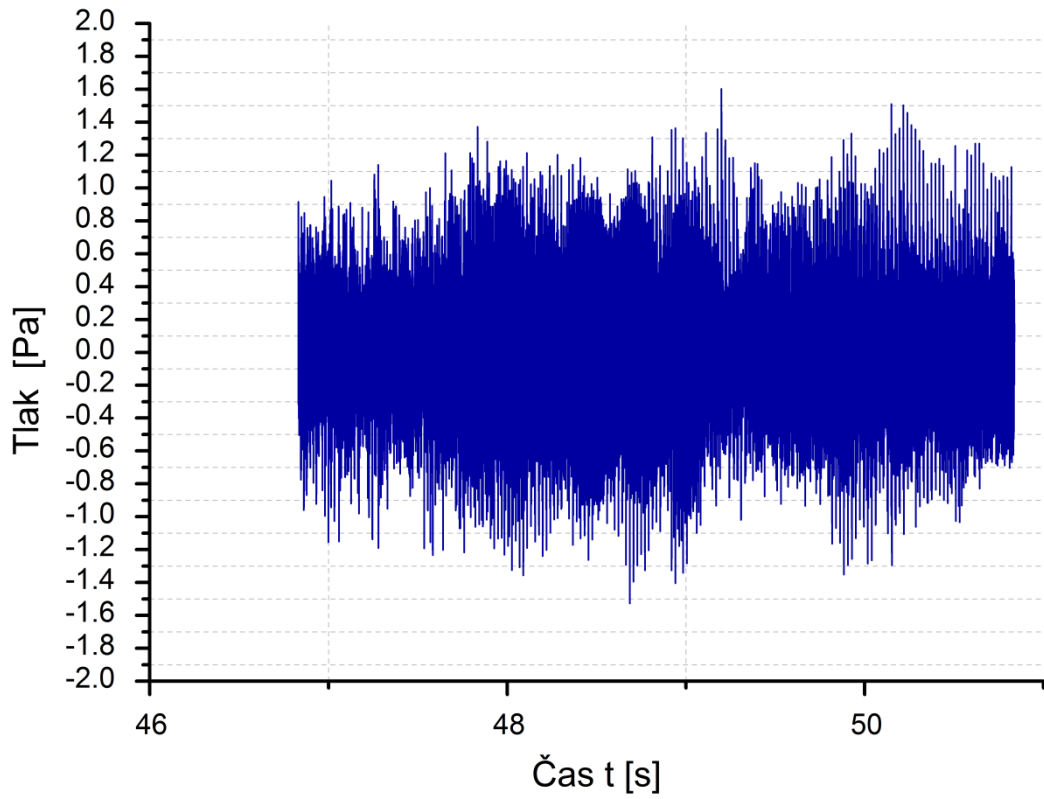
**Příloha 2.11:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



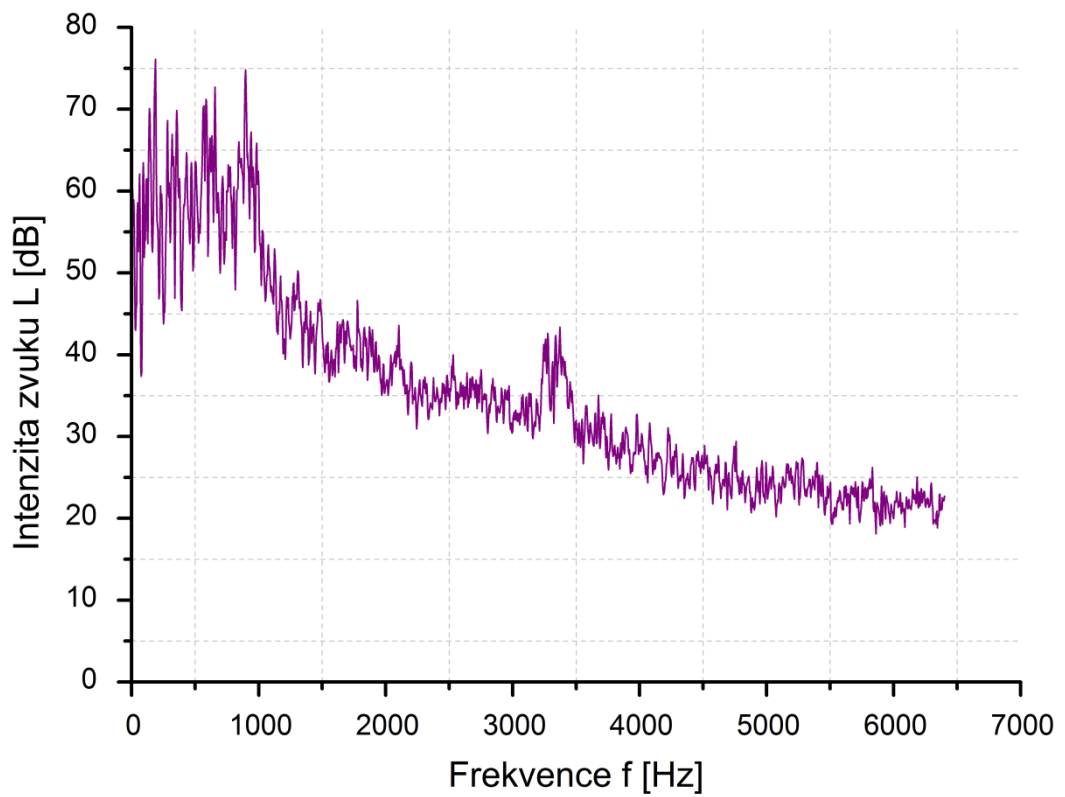
**Příloha 2.12:** Frekvenční charakteristika pro 4. úsek při rozsahu 0-400 Hz



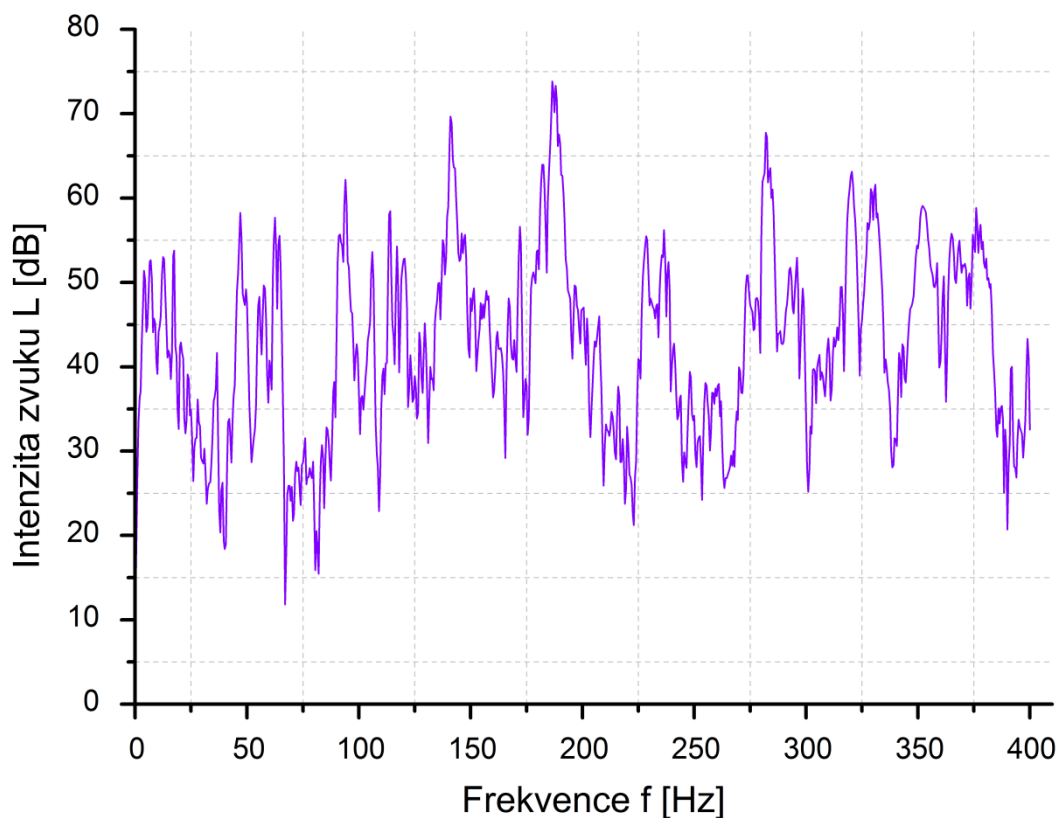
**Příloha 2.13:** Časový průběh akustického tlaku pro 5. úsek



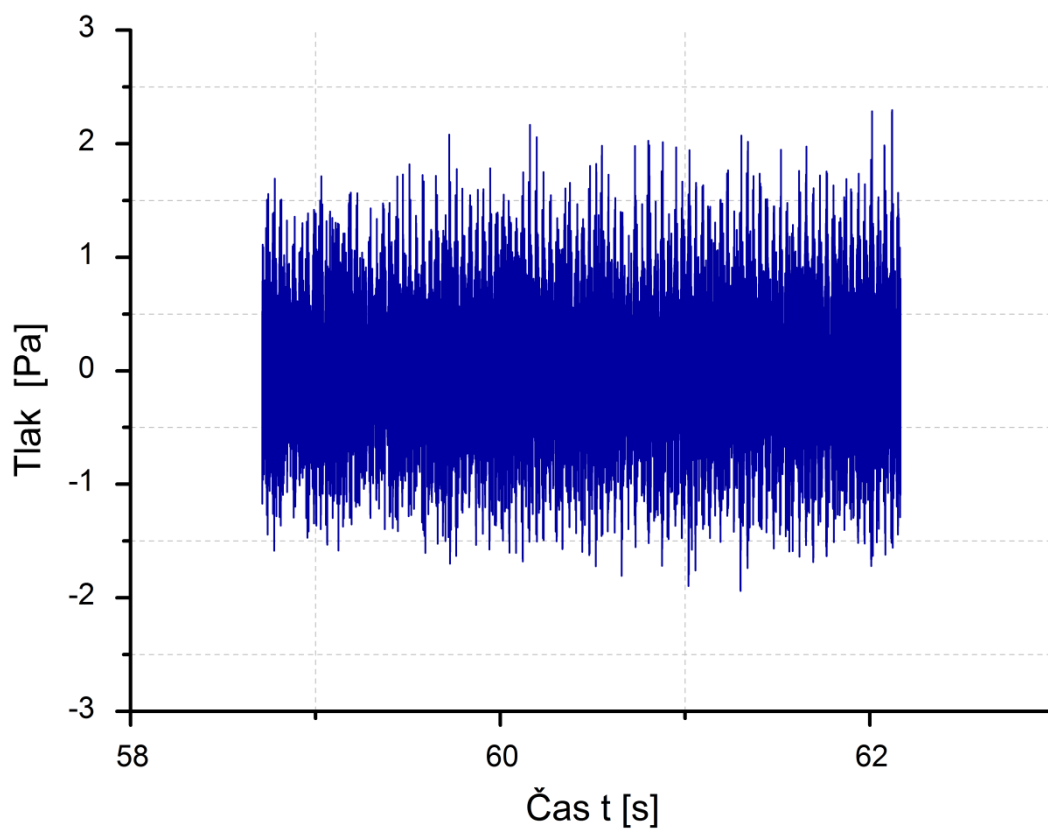
**Příloha 2.14:** Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Příloha 2.15:** Frekvenční charakteristika pro 5. úsek při rozsahu 0-400 Hz

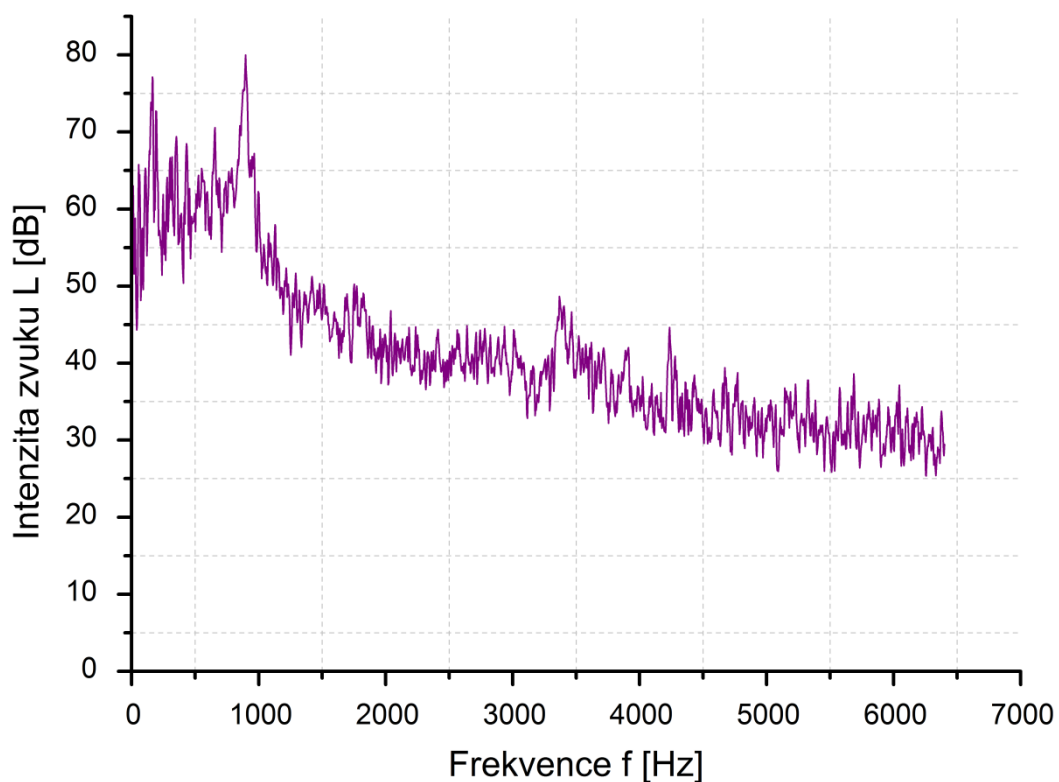


**Příloha 2.16:** Časový průběh akustického tlaku pro 6. úsek

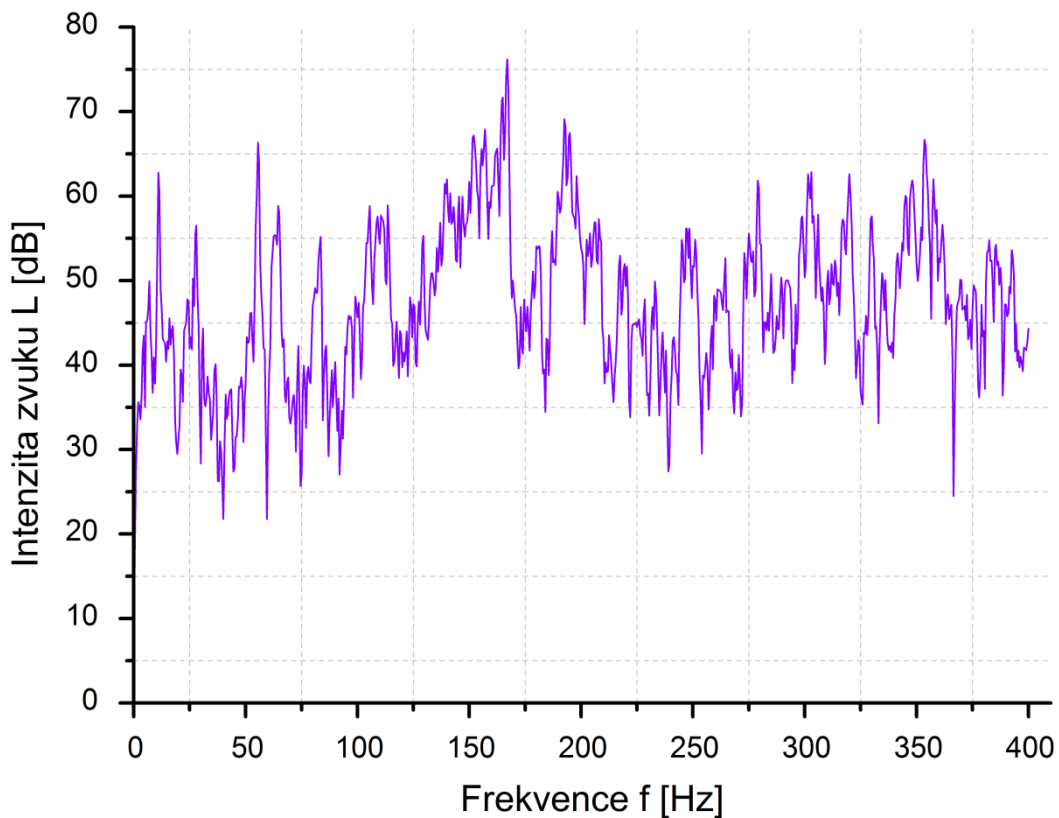




**Příloha 2.17:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-6400 Hz



**Příloha 2.18:** Frekvenční charakteristika pro 6. úsek při rozsahu 0-400 Hz



## Příloha 3

### Příloha 3.1: Protokol pro materiál HDG při 1 mm/s



## Technische Universität in Liberec Lehrstuhl für Maschinentechnologie

### Tribologie - Streifenziehtest

#### Eintrittswerte

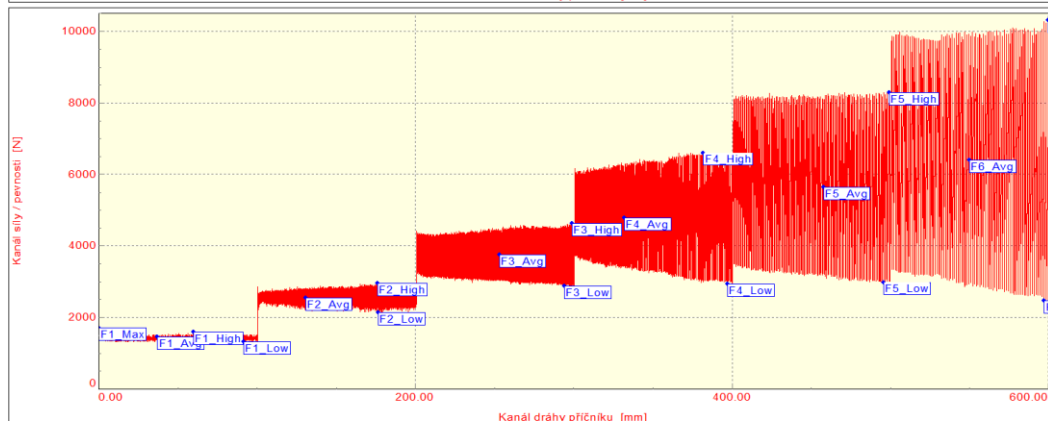
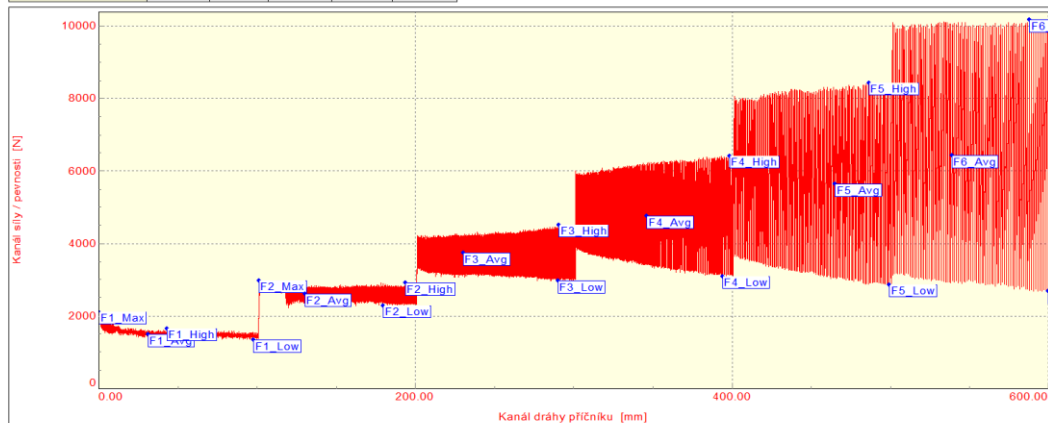
Getesteter Schmierstoff : Anticorit PL 3802-39LV  
Schmierstoffmenge : 1,5±0,1 g/m<sup>2</sup>  
Getestetes Substrat : HDG  
Oberflächenrauheit : Ra=1,21/1,33 µm R<sub>Pc</sub>=74/71 1/cm  
Werkzeugmaterial : GGG 70L - gehärtet  
Kontaktdruck : 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 MPa

Stoßfläche : 40 mm x 78 mm  
Schubgeschwindigkeit : 1 mm/s  
Variante : 1B  
Temperatur : 40°C  
Aufnahmegeschwindigkeit : 2 kHz  
Messstrecke : 600 mm

#### Schlusswerte

Zkouška	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
1	10184	6428	10184	2672	7513
2	10318	6397	10318	2475	7843

Statistika	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
Počet zkoušek	2	2	2	2	2
Průměrná hodnota	10251	6412	10251	2574	7678
Směrodatná odchylka	95	22	95	139	234



**Příloha 3.2: Protokol pro materiál HDG při 10 mm/s**



Technische Universität in Liberec  
Lehrstuhl für Maschinentechnologie

Tribologie - Streifenziehtest

**Eintrittswerte**

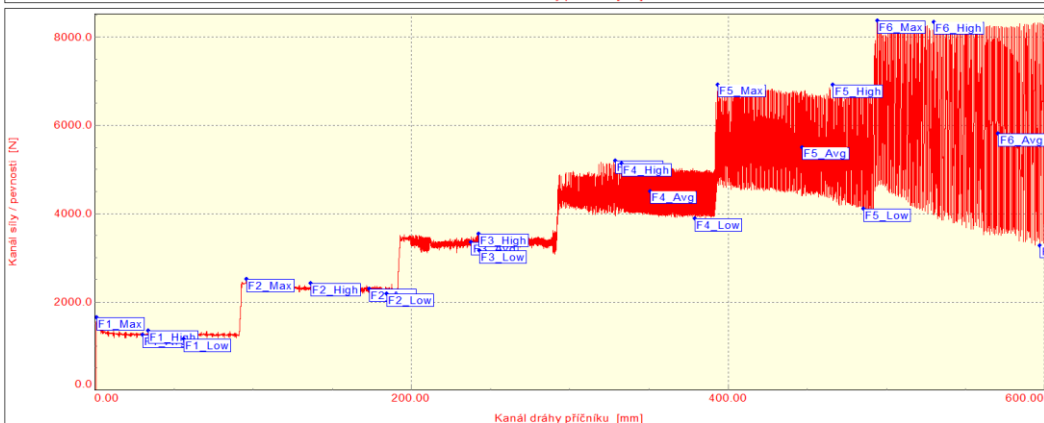
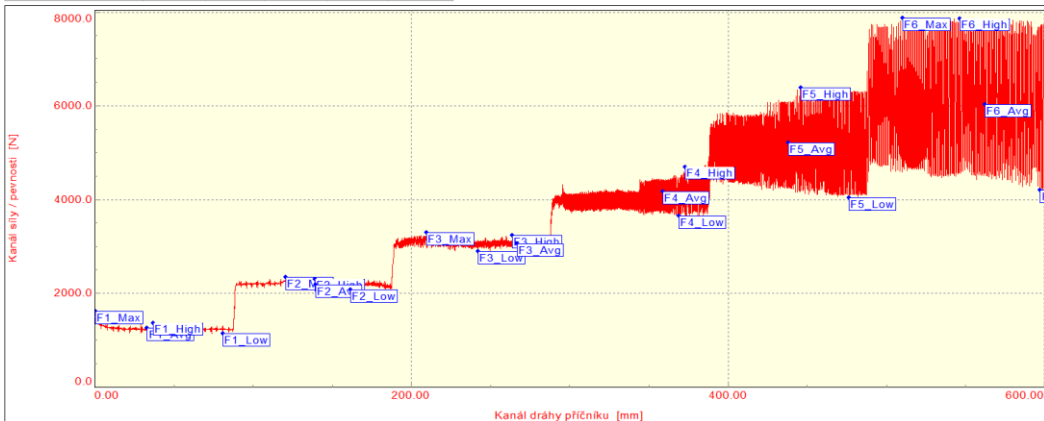
Getesteter Schmierstoff : Anticorit PL 3802-39LV  
Schmierstoffmenge : 1,5±0,1 g/m<sup>2</sup>  
Getestetes Substrat : HDG  
Oberflächenrauheit : Ra=1,21/1,33 µm R<sub>Pc</sub>=74/71 1/cm  
Werkzeugmaterial : GGG 70L - gehärtet  
Kontaktdruck : 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 MPa

Stoßfläche : 40 mm x 78 mm  
Schubgeschwindigkeit : 10 mm/s  
Variante : 1B  
Temperatur : 40°C  
Aufnahmegeschwindigkeit : 2 kHz  
Messstrecke : 600 mm

**Schlusswerte**

Zkouška	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
1	7878	6027	7859	4195	3664
2	8368	5805	8337	3273	5064

Statistika	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
Počet zkoušek	2	2	2	2	2
Průměrná hodnota	8123	5916	8098	3734	4364
Směrodatná odchylka	347	167	338	652	990



Příloha 3.3: Protokol pro materiál ZM při 1 mm/s



Technische Universität in Liberec  
Lehrstuhl für Maschinentechnologie

Tribologie - Streifenziehtest

Eintrittswerte

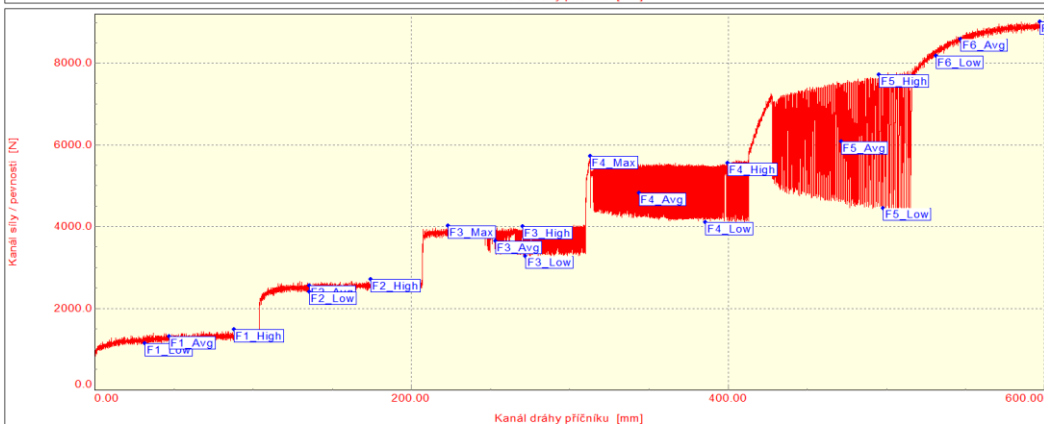
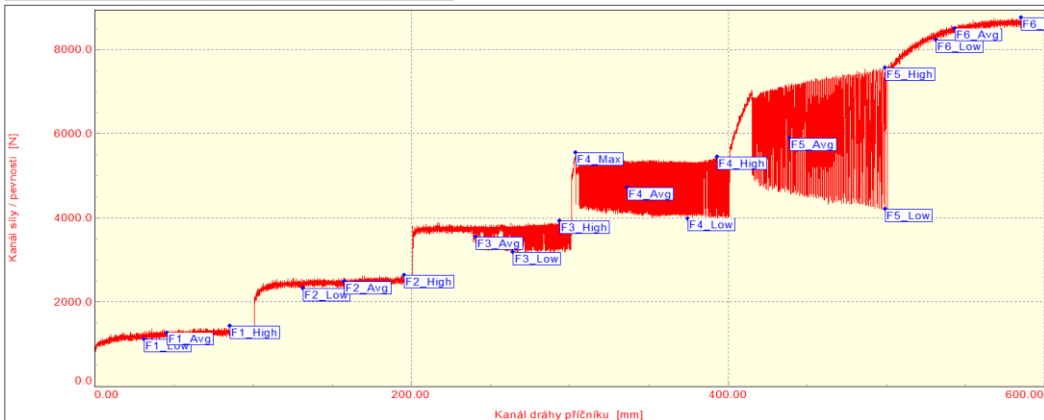
Getesteter Schmierstoff : Anticorit PL 3802-39LV  
Schmierstoffmenge : 1,5±0,1 g/m<sup>2</sup>  
Getestetes Substrat : ZM  
Oberflächenrauheit : Ra=1,28/1,35 µm R<sub>Pc</sub>=123/129 1/cm  
Werkzeugmaterial : GGG 70L - gehärtet  
Kontaktdruck : 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 MPa

Stoßfläche : 40 mm x 78 mm  
Schubgeschwindigkeit : 1 mm/s  
Variante : 1B  
Temperatur : 40°C  
Aufnahmegeschwindigkeit : 2 kHz  
Messstrecke : 600 mm

Schlusswerte

Zkouška	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
1	8761	8496	8761	8229	532
2	9011	8590	9011	8169	842

Statistika	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
Počet zkoušek	2	2	2	2	2
Průměrná hodnota	8886	8543	8886	8199	687
Směrodatná odchylka	177	67	177	42	219



Příloha 3.1: Protokol pro materiál ZM při 10 mm/s



Technische Universität in Liberec  
Lehrstuhl für Maschinentechnologie

Tribologie - Streifenziehtest

Eintrittswerte

Getesteter Schmierstoff: : Anticorit PL 3802-39S  
Schmierstoffmenge : 1,5±0,1 g/m<sup>2</sup>  
Getestetes Substrat : ZM  
Oberflächenrauheit : Ra=1,28/1,35 µm RpC=123/129 1/cm  
Werkzeugmaterial : GGG 70L - gehärtet  
Kontaktdruck : 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 MPa

Stoßfläche : 40 mm x 78 mm  
Schubgeschwindigkeit : 10 mm/s  
Variante : 1B  
Temperatur : 40°C  
Aufnahmegeschwindigkeit : 2 kHz  
Messstrecke : 600 mm

Schlusswerte

Zkouška	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
1	6023	5344	5669	5019	650
2	6656	5630	6229	5030	1199

Statistika	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
Počet zkoušek	2	2	2	2	2
Průměrná hodnota	6340	5487	5949	5025	925
Směrodatná odchylka	448	202	396	8	388

