



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

MĚŘENÍ A ANALÝZA TUHOSTI PODLOŽEK POD PATU KOLEJNICE

EVALUATION OF THE RAIL PAD STIFFNESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Klára Šardická

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav železničních konstrukcí a staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Klára Šardická
Název	Měření a analýza tuhosti podložek pod patu kolejnice
Vedoucí práce	prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Bakalářská práce Bc. Radima Tomana: Vyhodnocení měření statické tuhosti podložek pod patu kolejnice

ČSN EN 13146-9+A1 Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění – Část 9: Stanovení tuhosti, 2012

OTP Pružné podložky pod patu kolejnice v bezpodkladnicovém upevnění, č. j. 57 045/95-S13, 2001

OTP Pružné podložky pod patu kolejnice v podkladnicovém upevnění, č. j. 60 789/99-O13, 2001

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci bakalářské práce vyhodnoťte měření nízkofrekvenční dynamické tuhosti při frekvenci 5 Hz podložek pod patu kolejnice. Jedná se o nové podložky různých typů a od různých výrobců. Porovnejte naměřené hodnoty pro podkladnicové a bezpodkladnicové upevnění. Dále vyhodnoťte měření tuhosti i u užitých podložek a porovnejte s výsledky měření na nových podložkách.

V rámci práce dále zhodnoťte faktory, které mohou mít významný vliv na výsledky měření.

V rámci závěrů se věnujte doporučením pro výrobce a objednavatele.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Podložky pod patu kolejnice jsou součástí podkladnicového i bezpodkladnicového uzlu upevnění. Jedná se o pružný prvek, který slouží především ke snížení negativních účinků dynamického namáhání, redukci hluku a vibrací. Práce se zabývá laboratorním měřením nízkofrekvenční dynamické tuhosti při frekvenci 5 Hz, statické tuhosti dle ČSN a statické tuhosti dle OTP podložek pod patu kolejnice. Cílem je provedení a vyhodnocení měření vzorků dodaných různými výrobci a dle rozptylu výsledných tuhostí výrobce porovnat. Vyhodnotit tuhosti i užitých pryžových podložek a porovnat s výsledky nových vzorků. Dále se práce věnuje faktorům, které by samotné měření a jeho výsledky mohly ovlivnit.

KLÍČOVÁ SLOVA

Podložky pod patu kolejnice, nízkofrekvenční dynamická tuhost, statická tuhost, upevnění, rozptyl

ABSTRACT

Rail pads are part of baseplate and baseplateless fastening system. It is a flexible element that is used primarily to reduce the negative effects of dynamic stress, reduce noise and vibration. This thesis deals with laboratory measurement of low-frequency dynamic stiffness at 5 Hz, static stiffness according to ČSN and static stiffness according to OTP of rail pads. The aim is to carry out and evaluate the measurements of samples supplied by different manufacturers and to compare them according to the variance of the resulting stiffnesses. Evaluate the stiffness of used rubber pads and compare with the results of new samples. Further, this thesis deals with the factors that the measurement itself and its results could influence.

KEYWORDS

rail pads, low-frequency dynamic stiffness, static stiffness, fastening system, dispersion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Klára Šardická *Měření a analýza tuhosti podložek pod patu kolejnice*. Brno, 2019. 57 s., 255 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Měření a analýza tuhosti podložek pod patu kolejnice* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 4. 2019

Klára Šardická
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Měření a analýza tuhosti podložek pod patu kolejnice* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 4. 2019

Klára Šardická
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala panu prof. Ing. Jaroslavu Smutnému, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

Poděkování patří také mé rodině za podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	CÍLE	11
3	UPEVNĚNÍ	12
3.1	PODKLADNICOVÉ UPEVNĚNÍ.....	12
3.2	BEZPODKLADNICOVÉ UPEVNĚNÍ	14
4	PODLOŽKY POD PATU KOLEJNICE.....	15
5	TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ	17
5.1	ZKOUŠENÁ SESTAVA	19
5.1.1	DLE ČSN	19
5.1.2	DLE OTP	20
5.2	MĚŘENÍ POSUNŮ	20
6	METODY MĚŘENÍ TUHOSTI PODLOŽEK	22
6.1	NÍZKOFREKVENČNÍ DYNAMICKÁ ZKOUŠKA.....	22
6.2	STATICÁ ZKOUŠKA DLE ČSN	23
6.3	STATICÁ ZKOUŠKA DLE OTP.....	23
7	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ.....	24
8	ZKUŠEBNÍ SOUBOR	25
9	VYHODNOCENÍ.....	26
9.1	NÍZKOFREKVENČNÍ DYNAMICKÁ ZKOUŠKA.....	27
9.1.1	SOUBOR NOVÝCH VZORKŮ.....	30
9.1.2	SOUBOR UŽITÝCH VZORKŮ	32
9.2	STATICÁ ZKOUŠKA DLE ČSN	35
9.2.1	SOUBOR UŽITÝCH VZORKŮ	38
9.3	STATICÁ ZKOUŠKA DLE OTP.....	41
9.3.1	SOUBOR UŽITÝCH VZORKŮ	44
9.4	SHRNUTÍ	47
10	SROVNÁNÍ NOVÝCH A UŽITÝCH VZORKŮ.....	48
11	ZÁVĚR	53

1 ÚVOD

Bakalářská práce vznikla na podnět Správy železniční dopravní cesty (SŽDC) v rámci projektu Centra pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), které se zabývá technickými inovacemi a řešením nedostatků dopravní silniční a kolejové dopravní sítě. Tato práce se zaměřuje na problematiku pryžových podložek pod patu kolejnice.

Jízdní dráhou železničních vozidel je kolej. Ta je sestavena z obecně známých i méně známých komponentů jako jsou kolejnice, pražce, upevňovadla, drobné kolejivo a kolejové lože. Zásadní je fungování všech těchto prvků jako jednoho celku a nalezení ideálních sestav železničního svršku pro specifické potřeby koleje. Naladění jednotlivých součástí dle požadavků a podmínek tratě povede ke zvýšení její kvality a životnosti. Pokud budeme znát vlastnosti a možnosti jednotlivých prvků sestavy, budeme moci snáze definovat hledané kombinace pro různé druhy kolejí. Jedním prvkem železničního svršku jsou i podložky pod patu kolejnice.

Podložky pod patu kolejnice byly součástí především systému upevnění kolejnic pro pevnou jízdní dráhu, kde bylo cílem dosáhnout obdobné pružnostní charakteristiky jako u dobře udržované klasické koleje ve šterkovém loži. V dnešní době jsou podložky pod patu kolejnice běžným prvkem jak v podkladnicovém, tak bezpodkladnicovém upevnění a podílí se na redukci vibrací a hluku od pojezdu železničních vozidel. Další výhodou je jednoznačně snížení dynamického namáhání jízdní dráhy. Vkládáním těchto pružných podložek do upevnění ovlivňujeme tuhost nejen upevnění jako celku, ale také tuhost celé konstrukce. Z těchto důvodů je zřejmé, jak významnou veličinou je tuhost podložky samotné.

2 CÍLE

Cíle této bakalářské práce lze rozdělit do několika částí. První z nich je realizace laboratorního měření. Pro stanovení tuhosti podložek pod patu kolejnice existuje několik metodik. V zadání práce je stanoveno a požadavkem bylo provést měření pouze pro nízkofrekvenční dynamickou tuhost při frekvenci 5 Hz. Pro vyhodnocení užitých podložek jsem se však rozhodla měřit i statickou tuhost, a to jak dle ČSN EN 13146-9 tak i Obecných technických podmínek. Dále byla vyhodnocena všechna naměřená data a dle norem stanoveny výsledné tuhosti.

Dalším krokem je vyhodnocení zjištěných tuhostí zkoušených podložek pro podkladnicové a bezpodkladnicové upevnění. Jelikož byly vzorky dodány různými výrobci, jsou porovnány výsledky pryžových podložek od jednotlivých dodavatelů na základě rozptylu hodnot. Soubor měřených vzorků se skládal z podložek nových a užitých. Je tedy provedena i analýza a porovnání nových podložek s užitými.

Na základě zkušeností z provedených měření je cílem také stanovit faktory, které by výsledné tuhosti mohly během samotného měření ovlivnit. Závěr práce se věnuje doporučením pro výrobce a objednatele se snahou nastítnit možnosti dalšího výzkumu.

3 UPEVNĚNÍ

Upevnění kolejnic k pražcům je zajištěno pomocí upevňovadel a drobného kolejiva. Těmito prvky je dosažen požadovaný rozchod koleje a také stabilita kolejnic. U upevnění jsou kladeny vysoké nároky na tuhost.

Upevnění se dělí na dvě hlavní skupiny, a to v závislosti na uložení kolejnice buď přímo na pražec, nebo s využitím podkladnice. Součástí obou systémů, podkladnicového i bezpodkladnicového, jsou pružné podložky pod patu kolejnice. Pryžové podložky lze tedy přirozeně rozdělit do dvou skupin dle upevnění pro něž jsou určeny. V podkladnicovém upevnění je podložka vložena mezi patou kolejnice a podkladnicí, v bezpodkladnicovém upevnění je umístěna mezi patou kolejnice a pražcem.

3.1 PODKLADNICOVÉ UPEVNĚNÍ

Ve snaze zajistit vyšší životnost železničního svršku, se začaly kolejnice ukládat na podkladnice. Ty zvětšují dotykovou plochu mezi kolejnicí a pražcem, čímž umožňují roznos sil od účinků železničních vozidel a dojde ke snížení napětí mezi kolejnicí a pražcem. Jelikož kolejnice nejsou v běžné koleji umístěny svisle, využitím podkladnic usnadníme jejich uložení do potřebného úklonu. U podkladnicového upevnění je kolejnice v úklonu 1:20. Toto uložení umožňuje lepší přenos sil od kol vozidla. K pražci je podkladnice připevněna vrtulemi. [1]

Podkladnice lze dělit dle konstrukčního uspořádání na:

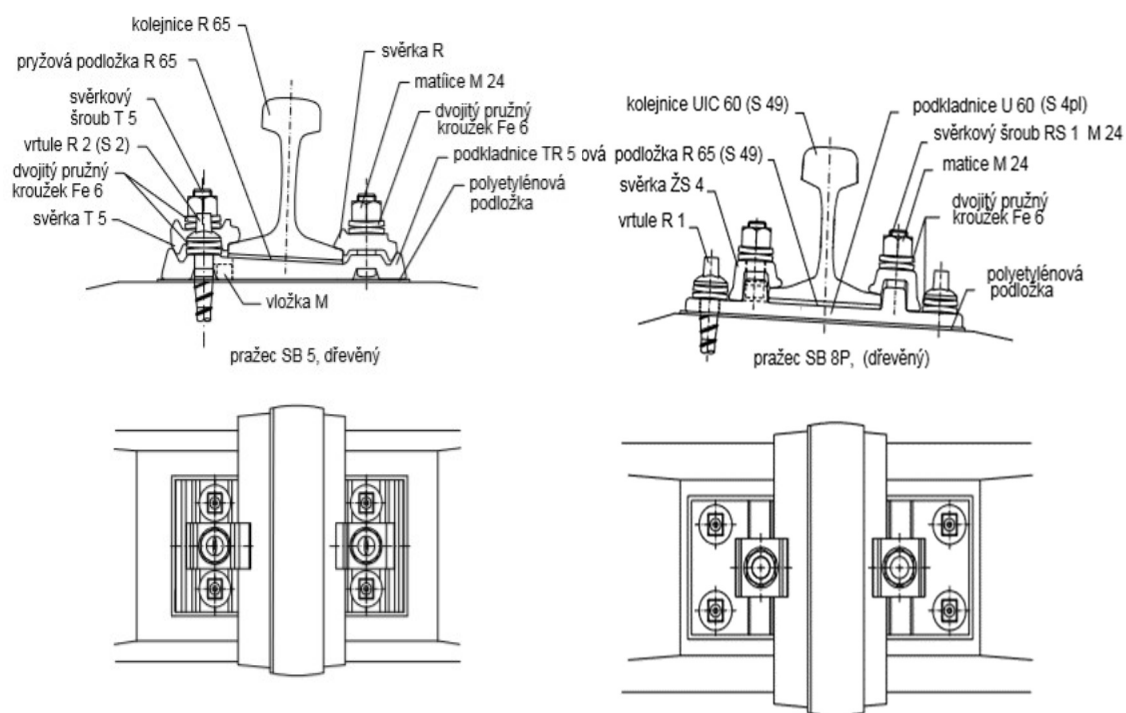
- klínové,
- rozponové,
- žebrové.

Klínové podkladnice byly určeny pro přímé upevnění, kdy je kolejnice uchycena upevňovadly přímo k podpoře. Vrtule se svou hlavou opírá přímo o patu kolejnice. Podkladnice nesly označení T1, T2 a T3. Toto upevnění se dnes již nepoužívá. [1]

Nástupcem klínových podkladnic se staly podkladnice rozponové, které umožňují snadnou úpravu rozchodu koleje. Pro dřevěné pražce byly určeny podkladnice T1 a T2, pro mostní konstrukce na mostnicích T3 a T4. Nepřímé upevnění kolejnic umožňují rozponové podkladnice typu T5, TR5, T6a TR6, které se k pražci upevňují pomocí čtveřice vrtulí. Pouze pomocí dvou svěrkových šroubů nebo vrtulí byly upevněny typy T7 a T8. U podkladnice T7 je svěrkový šroub uchycen přímo k pražci, jedná se tedy o přímé upevnění. [1]

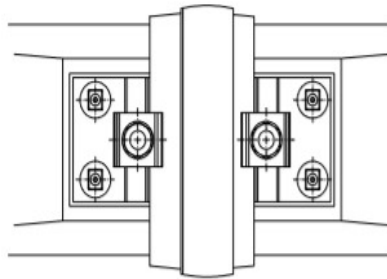
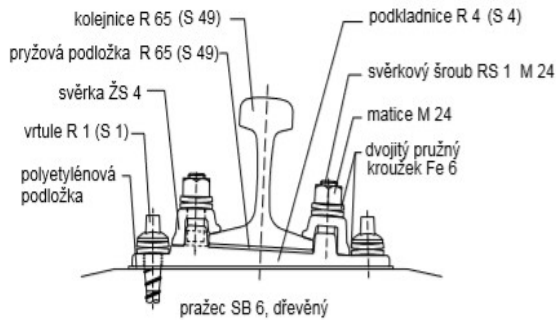
Žebrová podkladnice je ocelová deska a pata kolejnice je na ní vedena dvěma žebry. Žebra zajistí stabilitu kolejnice i v případě povolení svěrek, které přitlačují patu kolejnice k podkladnici. Svěrky mohou být tuhé nebo pružné a jsou připevněny svěrkovými šrouby. Podkladnice je k pražci připevněna čtyřmi vrtulemi. Žebrové podkladnice S 4, ve výhybkách S 4pl (ploché), se používají pro uložení kolejnice 49 E1. Kolejnice R 65 a 60 E1 se ukládají na podkladnici typu U 60. [1]

Všechny typy schváleného podkladnicového upevnění jsou k dohledání v předpisu SŽDC S3 Železniční svršek, díl. 7, s účinností od 1. října 2008 ve znění změny č. 2 (s účinností od 1. října 2014). Ukázka podkladnicového upevnění:

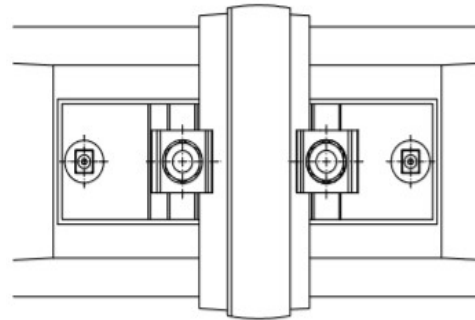
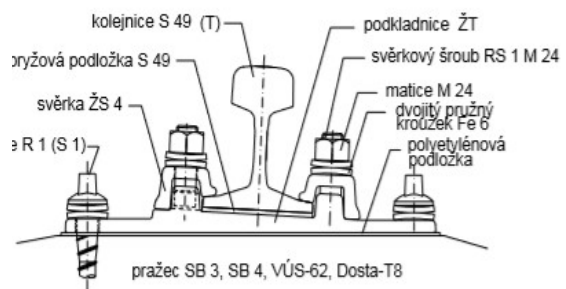


Obrázek 1: Rozponové podkladnice TR 5 [6]

Obrázek 2: Žebrové podkladnice U 60 [6]



Obrázek 3: Žebrová podkladnice R 4 [6]



Obrázek 4: Žebrová podkladnice ŽT [6]

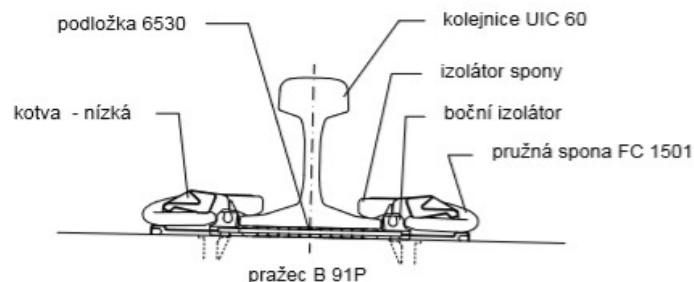
3.2 BEZPODKLADNICOVÉ UPEVNĚNÍ

U bezpodkladnicového typu upevnění je na pražci upravena úložná plocha pro kolejnice do sklonu 1:40 a kolejnice je připevněna přímo k pražci, podložena pouze pryžovou podložkou.

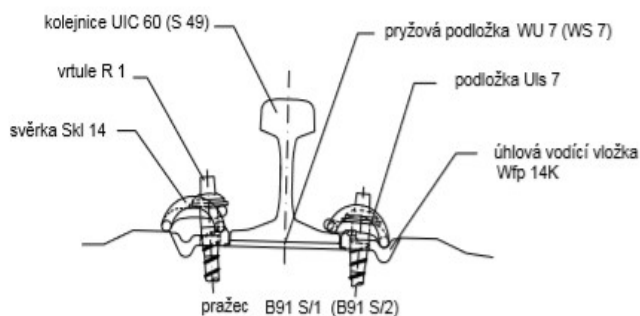
Firma Vossloh dodává na český trh bezpodkladnicový typ upevnění W 14. Kolejnice je umístěna na pryžovou podložku a volná ramena pružných svěrek (Skl 14) přitlačují patu kolejnice. Směrové vedení zajišťují úhlové vodící vložky, které ve speciální úpravě brání také nadměrnému bočnímu vyklápní kolejnic. [1]

Upevnění FastClip od anglické firmy Pandrol je pružná spona uchycena k pražci pomocí pražcové kotvy. Pružné spony se do pracovní polohy nasunou kolmo na kolejnici. Kolejnice je uložena na pryžové podložce tl. 11,5 mm a její poloha je přesně vymezena bočními plastovými vložkami na pražcové kotvě. Výhodou je předem určená svěrná síla. [1]

Všechny typy schváleného bezpodkladnicového upevnění jsou k dohledání v předpisu SŽDC S3 Železniční svrtek, díl.7, s účinností od 1.října 2008 ve znění změny č.2 (s účinností od 1.října 2014). Ukázka bezpodkladnicového upevnění:



Obrázek 5: Upevnění FC I [6]



Obrázek 6: Upevnění W 14 [6]

4 PODLOŽKY POD PATU KOLEJNICE

Pružné podložky pod patou kolejnice jsou nezbytným prvkem upevnění. Úpravou tuhosti uzlu upevnění se podílí na redistribuci kolové síly na sousední pražce. Snížením nepříznivých účinků od dynamického namáhání na drobné kolejivo, upevňovadla, kolejnicové podpory i kolejové lože, prodlužuje životnost koleje. V upevnění kolejnic podložka také redukuje vibrace a hlukovou zátěž od pojezdu vozidel. Prvek také slouží k elektrické izolaci kolejnicových pásů.

Požadavky na vlastnosti podložek pod patu kolejnice jsou stanoveny obecnými technickými požadavky.

Fyzikálně-mechanické vlastnosti:

- odolnost proti účinkům ropných produktů,
- odolnost proti povětrnostním vlivům,
- odolnost proti UV záření,
- odolnost proti pesticidům,
- odolnost proti dynamickým účinkům,
- elektroizolační vlastnosti materiálu,
- nesmí mít korozivní účinky na beton či kov.

Technické vlastnosti:

- označování,
- rozměry,
- materiál,
- provedení a vzhled,
- rozsah tuhosti,
- vliv na životní prostředí,
- životnost.

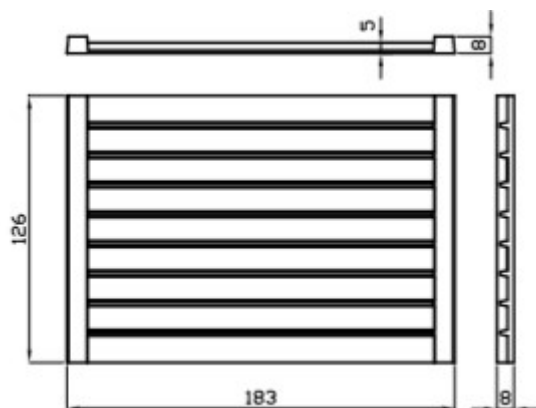
Všechny výrobky musí být označeny značkou, která definuje výrobce, datum výroby, tvar a materiál podložky. Pro vyloučení poškození vozidly, včetně vozidel údržby jsou definovány rozměry pružných podložek, ty se liší dle typu upevnění. Šířku podložky určuje šířka paty kolejnice, 150 mm pro kolejnice 60 E1, 60 E2 a R 65 a 125 mm pro kolejnice 49 E1. Tloušťky jsou 5 mm, 6 mm, 7 mm, 9 mm a 11,5 mm při normové toleranci kolísání hodnot na jedné podložce v rozmezí 0,5 mm. [2]

Z důvodu svislé deformace podložek se jejich povrch jednostranně či oboustranně rýhuje. Tento požadavek úpravy povrchu je důsledkem vysoké hodnoty součinitele příčné kontrakce (tj. poissonova součinitele) pryže. Ten vyjadřuje poměrnou deformaci materiálu v na sebe kolmých směrech. Výstupky a rýhy tedy vytvářejí prostor pro toto deformování materiálu. Úprava povrchu však není přesně definována, je pouze stanoveno, že: „*Desénování musí být provedeno tak, aby se nestalo příčinou poruch na kolejnici či pražci.*“ [3]

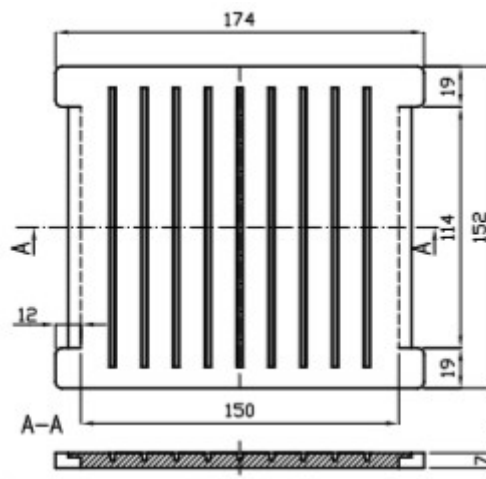
Pryž je pro výrobu podložek vhodná, ale lze využít i jiný pružný materiál splňující požadavky na něj kladené. Musí se však jednat o materiál, jehož složky jsou výhradně z primárních surovin. [4]

Norma ČSN EN 13141-1 také uvádí požadavek na technické vlastnosti celého uzlu upevnění i s pryžovou podložkou pod patu kolejnice, na odpor proti podélnému posunutí kolejnice. Tento parametr totiž přímo ovlivňuje bezpečnost, zejména bezстыkové koleje.

Všechny typy schválených pryžových podložek pod patu kolejnice jsou k dohledání v Služební rukověti SŽDC SR103/3(S) Výkresy materiálu pro železniční svršek. Ukázka podložek pro podkladnicové a bezpodkladnicové upevnění:



Obrázek 7: Pryžová podložka S49 183/126/5 pro podkladnicové upevnění [2]



Obrázek 8: Pryžová podložka WU7 pro bezpodkladnicové upevnění [2]

5 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Zkušební metody pro měření tuhosti podložek mají normou stanovené zásady pro zkušební prostory, zatěžovací zařízení, zkoušenou sestavu, do níž se pryžové podložky umisťují, i pro přístroje měřící přetvoření. Prostor laboratoře i všechny použité součásti a zařízení se po dobu nejméně 16 hodin před začátkem zkoušky musí udržovat při teplotě $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. V případě zkoušky při jiné teplotě se prostor a zařízení udržuje při zkušební teplotě. [5]

Na zatěžovací zařízení je kladen požadavek, že musí být schopno vyvinout o 10 % větší sílu, než je maximální síla zatěžovací při požadovaných zkoušených frekvencích. Pro měření podložek vyhodnocovaných v této bakalářské práci bylo využito hydraulické zařízení v prostorách fakulty stavební VUT v Brně. Jedná se o přístroj FA 120-2000 M01 s maximální silou lisu 120 kN.

Přístroj FA 120-2000 M01 se skládá ze základové desky s odpružením, na níž je umístěn silný kovový rám. Ve středu rámu je pohyblivý zatěžovací válec. Zařízení je schopno měřit jak zatížení, tak i přetvoření. Zatěžování je řízeno softwarem.



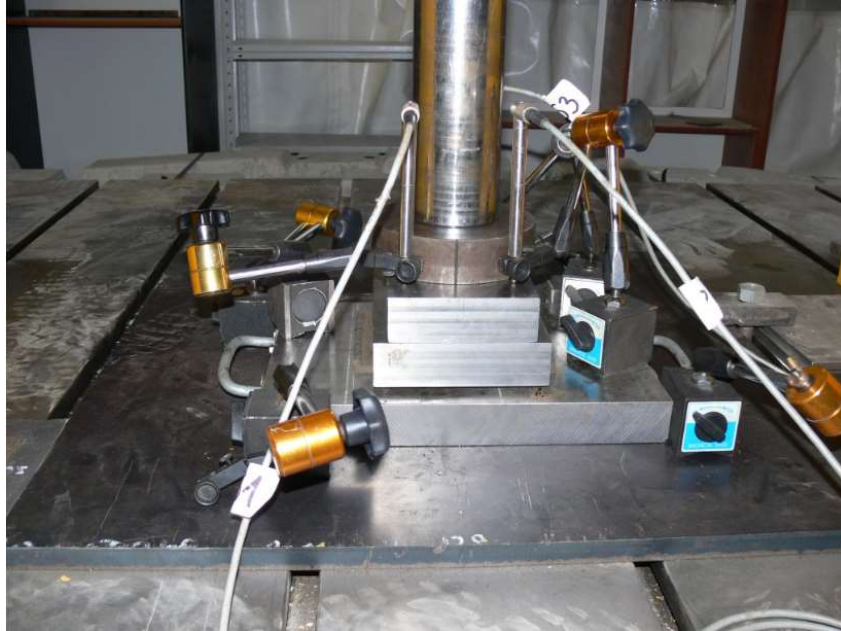
Obrázek 9: Zatěžovací rám

Před samotným měřením bylo nutné ověřit přesnost vnášení zatěžovací síly a provést kalibraci zařízení. Pro každou sérii vzorků se provedlo naladění regulačních konstant PID regulátoru. Sestava se lehce zatížila a nastavením proporcionální, derivační a integrační konstanty se reálná odezva na siloměru sladila s teoretickou zatěžovací křivkou.

Prakticky tento postup probíhá následovně. Zvolíme požadovaný kanál (zatěžovací válec) a zpětnou vazbu (síla), vybereme požadovaný signál s malou amplitudou a požadovanou frekvencí a upravujeme konstanty PID do té doby, dokud nedosáhneme požadovaného chování regulátoru. Po naladění vyhovujících konstant uložíme nastavení.

5.1 ZKOUŠENÁ SESTAVA

V průběhu zkoušky je pryžová podložka umístěna do sestavy tuhých, kovových desek a celá sestava je umístěna na základnu přístroje FA 120-2000 M01 a stlačována hydraulickým válcem dle předpisu.

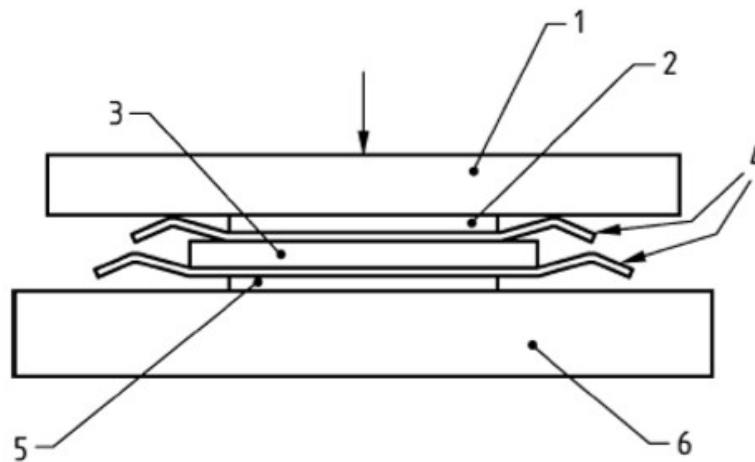


Obrázek 10: Zkoušená sestava

5.1.1 DLE ČSN

Zkušební sestava dle ČSN je pro statickou i nízkofrekvenční dynamickou zkoušku shodná. První v pořadí je rovná, tuhá a vodorovná základna na niž se umístí deska roznášející zatížení. Tato minimálně 10 mm tlustá kovová deska musí být pravoúhlá se zaoblenými hranami. Její další dva rozměry jsou závislé na typu podložky. Pro podložku pod patu kolejnice má být její šířka stejná, jakou udává norma ČSN EN 13146-4, pro zkoušku účinku opakovaného zatížení, a délka 210 mm. [5]

Pro simulaci tření se podložka uloží mezi dva archy neopotřebovaného brusného plátna hrubosti v rozmezí od P180 do P400. Použité archy musí mít minimální velikost celé plochy zkoušené podložky. Na podložku mezi brusnými plátny umístíme horní desku roznášející zatížení a na ni další kovovou desku. [5]



Legenda

- 1 kovová deska
- 2 horní deska roznášející zatížení
- 3 zkoušená podložka
- 4 brusné plátno
- 5 spodní deska roznášející zatížení
- 6 základna

Obrázek 11: Uspořádání zkoušky [5]

5.1.2 DLE OTP

Pro zkoušky dle OTP se podložka nejprve zbaví všech nečistot a poté se pouze funkční částí, tedy bez bočních výstupků, vkládá mezi dvě tuhé, rovné ocelové desky. Na rozdíl od ČSN součástí sestavy nejsou brusné plátna. [4]

5.2 MĚŘENÍ POSUNŮ

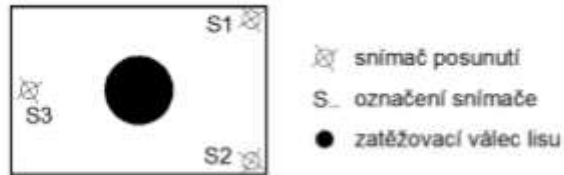
Přetvoření, ke kterému dochází během vnášení zatěžovací síly, je měřeno externími snímači. Mohou být použity jak dotykové snímače, splňující normu EN ISO 9513:2002, tak bezdotykové snímače. Požadavek na přesnost měření je $\pm 0,02$ mm pro podložky s deklarovanou tuhostí ≤ 100 MN/m a $\pm 0,01$ mm pro podložky s deklarovanou tuhostí > 100 MN/m. [5]

Norma ČSN požaduje použití tří nezávislých snímačů [5], OTP pouze dvou umístěných proti sobě v ose podložky [4]. Pro měření deformace u všech zkoušek byly použity tři indukční snímače typu WA-10-T s rozsahem 10 mm. Snímače automaticky zaznamenávaly posuny zatěžované kovové desky každé 0,02 s.

Magnetické úchytky s kloubovými rameny držely snímače v kolmé poloze tak, aby byly posuny zaznamenány v celém rozsahu. Za použití Johansonových kostek proběhla kontrola přesnosti měření jednotlivých snímačů. Jedná se o měřky o přesném, ověřeném rozměru, které umístíme pod hrot snímače a kontrolujeme, zda změřená

hodnota na snímači odpovídá rozměru kostky. Pro kontrolu kolmosti byl navíc použit ověřený úhelník.

Snímače byly umístěny na horní kovovou desku dle schématu (obrázek 12), na jednu stranu dva snímače do rohů desky a jeden snímač do středu protilehlé strany. Důvodem tohoto rozmístění je možnost kontroly rovnoměrnosti stlačení.



Obrázek 12: Schéma rozmístění snímačů



Obrázek 13: Indukční snímač WA-10-T

6 METODY MĚŘENÍ TUHOSTI PODLOŽEK

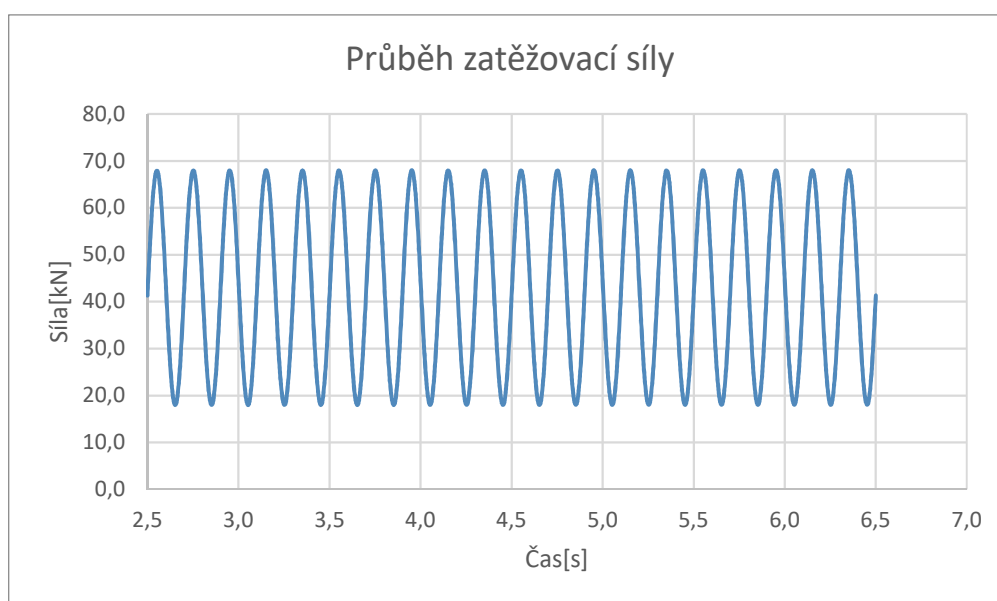
Jednotlivé metody pro stanovení statických či dynamických tuhostí se liší, základní princip je však u provedených zkoušek stejný. Stanovenou silou se podložka rovnoměrně stlačuje a pomocí snímačů přetvoření se měří vzniklé svislé stlačení. Výsledná tuhost vyjadřuje schopnost podložky odolávat stlačení.

6.1 NÍZKOFREKVENČNÍ DYNAMICKÁ ZKOUŠKA

Postup měření nízkofrekvenční dynamické tuhosti upravuje evropská norma ČSN EN 13146-9+A1 „Železniční aplikace“ v části 9: Stanovení tuhosti [5], která zároveň upravuje požadavky na zařízení, jak je popsáno v kapitole 5. Předepsaná velikost zatěžovacích sil je určena z příslušné části norem řady EN 13481.

Zkoušená sestava, přesněji popsána v kapitole 5.1.1., se umístí na rovnou, tuhou a vodorovnou základnu, tak aby hydraulický zatěžovací válec působil silou kolmo na střed horní kovové desky. Podložka je cyklicky zatěžována při definované zkušební frekvenci (5 ± 1) Hz, (10 ± 1) Hz nebo (20 ± 1) Hz. Pokud není stanovena nebo je požadována obecná hodnota nízkofrekvenční dynamické tuhosti, provede se měření při všech třech frekvencích. Při dynamických zkouškách má zatěžovací síla sinusový signál. [5]

Sestava se zatěžuje cyklickou silou $F_{LFP1}=18$ kN až $F_{LFP2}=68$ kN při požadované zkušební frekvenci. Zaznamenáváme průběh vnášení zatěžovací síly a stlačení podložky (viz. kapitola 5.2.). Pro výpočet nízkofrekvenční dynamické tuhosti uvažujeme posledních 10 s zatěžování. [5]

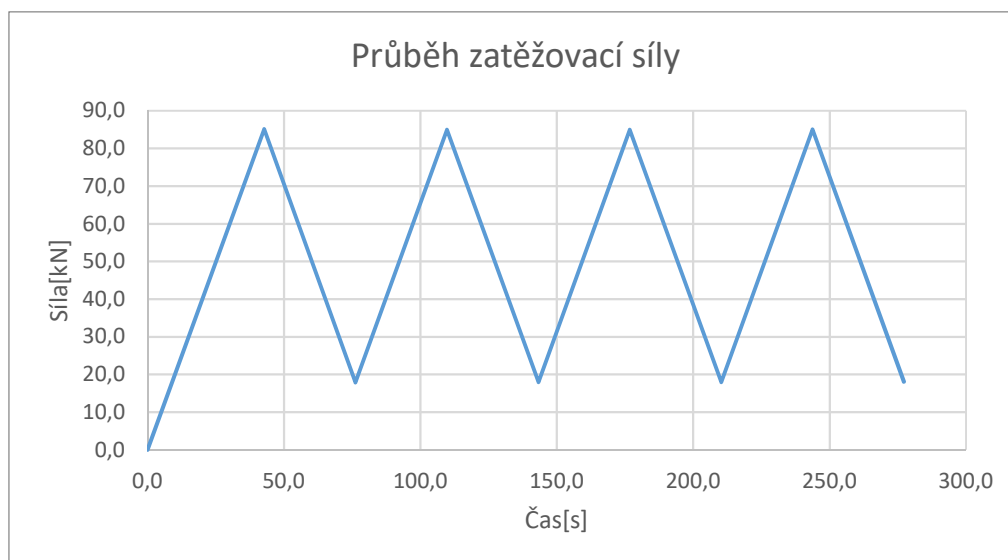


Obrázek 14: Průběh zatěžovací síly nízkofrekvenční dynamické zkoušky

6.2 STATICKÁ ZKOUŠKA DLE ČSN

Statická zkouška je stejně jako zkouška dynamická definována normou ČSN EN 13146-9+A1 „Železniční aplikace“ v části 9: Stanovení tuhosti [5], kde je uvedena i specifikace zařízení a měřících přístrojů (viz. kapitola 5.). Zatěžovací síly jsou specifikovány v příslušné části norem řady EN 13481.

Zkoušená sestava (dle 5.1.1.) se uloží na rovnou, tuhou, vodorovnou základnu a je centricky zatěžována zatěžovacím zařízením. Prostřednictvím zatěžovacího zařízení se působí silou $F_{SPmax}=85$ kN, ta je určena typem koleje, pro jaký se předpokládá zkoušená podložka. Poté se síla sníží na $F_{SP1}=18$ kN, což je předpokládaná teoretická svěrná síla svěrky. Tento cyklus zatěžování opakujeme ještě třikrát. Rychlost vnášení maximální zatěžovací síly F_{SPmax} je (120 ± 10) kN/min, odtížení podložky provedeme stejnou rychlostí. Pro vyhodnocení statické tuhosti dále pracujeme se čtvrtou zatěžovací větví. [5]



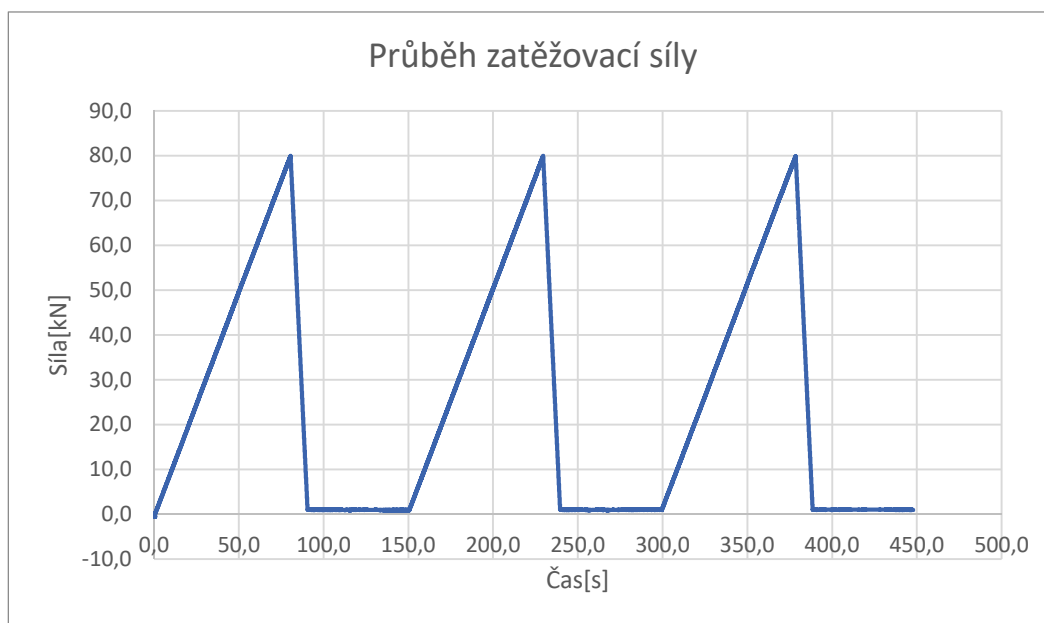
Obrázek 15: Průběh zatěžovací síly statické zkoušky dle ČSN

6.3 STATICKÁ ZKOUŠKA DLE OTP

Postup zkoušek statické tuhosti je pro podkladnicové i bezpodkladnicové stejný a upravují ho Obecné Technické Podmínky pro pružné podložky pod patu kolejnice v bezpodkladnicovém upevnění č.j. 57045/96-S13 [4] a Obecné Technické Podmínky pro pružné podložky pod patu kolejnice v podkladnicovém upevnění č.j. 60 789/99 O13 [3].

Zkušební vzorek vložený mezi dvě ocelové desky se zatíží silou $F_{MIN}=1$ kN a rychlostí přibližně 1 kN/s se zvyšuje až na hodnotu $F_{MAX}=80$ kN. Po okamžitém odlehčení zpět na hodnotu 1 kN se toto zatížení udržuje po dobu 1 minuty. Cyklus zatížení,

odtížení a minutové prodlevy se opakuje celkem třikrát. Po celou dobu zaznamenáváme hodnoty posunů. Pro výpočet tuhosti dle OTP se však uvažují pouze hodnoty třetí zatěžovací větve. [4] [3]



Obrázek 16: Průběh zatěžovací síly statické zkoušky dle OTP

7 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

Jakékoliv měření, byť laboratorní, je zatíženo chybou. Pro správnou interpretaci výsledků i z důvodů provádění zkoušek mnoha laboratořemi, je snaha definovat faktory vstupující do měření a možné nepřesnosti měření eliminovat. Tato kapitola je věnována právě faktorům, které by se mohly zásadním způsobem podílet na zkreslení výsledků a ovlivnit výsledné hodnoty měření. Faktory jsou shodné pro všechny metodiky měření tuhosti podložek pod patu kolejnice uvedené v této bakalářské práci.

První článek, který do řetězce průběhu měření vstupuje, je zkoušená sestava. Ta je přesně popsána v kapitole páté (5.1). Uspořádání sestavy je definováno normou ČSN EN 13 146-9+A1, kde je uvedena i požadovaná tloušťka kovových desek 10 mm. Dostatečná tloušťka desek je velice důležitá, protože zajišťuje tuhost a deska se tak při zatěžování nedeformuje. Vniklá deformace desky, by byla zaznamenána snímači osazenými na její horní straně a přičítala by se tak k měřené deformaci podložky.

Dalším je testovací zařízení. Zařízení musí být schopno vyvinout požadovanou sílu při požadované rychlosti či frekvenci. Důležitá je však také přesnost, s jakou zatěžovací sílu vnášíme. Pro ověření přesnosti vnášení síly je nutné provést kalibraci testovacího zařízení.

Testovací zařízení je schopno měřit také přetvoření vzniklé při zatěžování. Pro vyhodnocení však nelze tyto hodnoty použít. Deformace zaznamenaná samotným zařízením je zkrácena o deformaci kovového rámu zatěžovacího zařízení. Ta vzniká v reakci na sílu vyvinutou hydraulickým válcem. Je tedy nutné vždy použít externí snímače posunutí.

Před samotným osazením externích snímačů je nutné provést jejich kalibraci. K tomu je možné využít Johansonovy kostky. Nejprve osadíme snímač do úchytky, poté pod něj postavíme měrku o přesném rozměru. Na snímači ověřujeme, zda změřená hodnota odpovídá rozměru měrky.

Po ověření kalibrace můžeme snímače umístit na horní kovovou desku. Aby byl snímač schopen zaznamenat celý rozsah stlačení podložky, musí být umístěn kolmo k desce. Toho lze snadno docílit za pomoci ověřeného úhelníku.

8 ZKUŠEBNÍ SOUBOR

Zkušební soubor vzorků, jehož měření a analýze se ve své bakalářské práci věnuji poskytla Správa železniční dopravní cesty v roce 2017 Ústavu železničních konstrukcí a staveb (ÚŽKS), fakulty stavební VUT v Brně, ke zpracování v rámci projektu CESTI. Zkoušky na všech vyhodnocených podložkách byly realizovány v prostorách ÚŽKS na fakultě stavební VUT v Brně ve dnech 22.-23. srpna 2017 a 12.-13. října 2017. ÚŽKS poskytl také potřebné zařízení a měřící přístroje.

Podložky byly dodány pěti různými výrobci, které z důvodu následného zveřejnění práce, budu označovat pouze A, B, C, D a E. Soubor obsahuje 108 kusů podložek pod patu kolejnice pro různé typy podkladnicového upevnění a pro bezpodkladnicové upevnění typu W 14. Celkově bylo realizováno a vyhodnoceno na 192 měření.

Přehled počtu provedených měření rozdělených do tabulky dle metody zkoušek a dále upevnění pro které je podložka určena:

Tabulka 1: Počet provedených a zpracovaných měření

podložky	upevnění	nízkofrekvenční dynamická zkouška	statická zkouška dle ČSN	statická zkouška dle ČSN
nové	podkladnicové	36	-	-
	bezpodkladnicové	30	-	-
užité	podkladnicové	36	36	36
	bezpodkladnicové	6	6	6

Z nových podložek bude dále zpracovááno a vyhodnocováno všech 66 zkoušených vzorků.

Soubor užitých pryžových podložek se skládá z 39 vzorků, které byly součástí různého typu upevnění, různých tratí a byly v provozu od 1 až po 4 roky. Doručené série, tedy pryžové podložky stejného výrobce, data výroby, typu a umístěny na stejné trati, neobsahují shodný počet kusů. Z těchto důvodů jsem se rozhodla do dalšího porovnávání zahrnout pouze série o minimálním počtu tří vzorků a vyloučit i vzorky s extrémními hodnotami.

Tabulka 2: Přehled vyhodnocovaných užitých podložek

Typ upevnění	Podkladnicové					Bezpodkladnicové	
Výrobce	A		B	D	E	D	E
Šířka paty kolejnice	150	125	150	150	150	150	150
Série	A _{U_150}	A _{U_125}	B _{U_150}	D _{U_150}	E _{U_150}	D _{U_150}	E _{U_150}
Počet vzorků [ks]	8	3	5	5	4	3	3
V provozu [roky]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4

9 VYHODNOCENÍ

Uspořádání a vnášení zatěžovací síly je u jednotlivých zkoušek rozdílné a má významný vliv na výsledné statické i dynamické tuhosti. Mezi dynamickými a statickými výslednými hodnotami jsou velké rozdíly a prozatím nebyl ani nalezen možný převodní součinitel mezi výsledky pro zkoušky dle ČSN a OTP. V následující kapitole je popsán postup vyhodnocení zkoušek na konkrétním příkladu měřených pryžových podložek pod patu kolejnice. Je nutné si uvědomit, že v kapitolách 9.2 a 9.3 pro statické zkoušky, jsou jako příklad uvedeny hodnoty a grafické výstupy užitých vzorků.

Dále jsou v jednotlivých kapitolách porovnávány výsledné hodnoty zkoušených nových i užitých podložek dle jednotlivých provedených zkoušek a typu upevnění, pro něž jsou podložky určeny. Vyhodnocena je stálost výroby jednotlivých sérií. Ty jsou porovnávány na základě rozptylu tuhostí. Jelikož požadavkem je, aby trať měla po délce stejné vlastnosti, tedy aby jednotlivé uzly upevnění měly stejnou tuhost, očekáváme i od zkoušených sérií nízký rozptyl hodnot. Rozptyl lze definovat jako čtverec průměrné odchylky od střední hodnoty.

9.1 NÍZKOFREKVENČNÍ DYNAMICKÁ ZKOUŠKA

Nízkofrekvenční dynamická tuhost k_{LFPf} byla stanovena ze záznamu vnášené síly a stlačení kovové desky z posledních 10 s měření. Posunutí desky bylo zaznamenáváno třemi snímači, z nichž se určilo průměrné posunutí (d_{LFP}). Podložka byla cyklicky zatěžována silou od 18 kN do 68 kN.

Dynamická tuhost při frekvenci 5 Hz byla stanovena dle vzorce:

$$k_{LFPf} = \frac{F_{LFP2} - F_{LFP1}}{d_{LFP}} \text{ [kN/mm]}$$

kde

F_{LFP1} - minimální průměrná zatěžovací síla $F_{LFP1} = 18$ kN [kN]

F_{LFP2} - maximální průměrná zatěžovací síla $F_{LFP2} = 68$ kN [kN]

d_{LFP} - průměrné stlačení podložky; $d_{LFP} = d_{LFP2} - d_{LFP1}$ [mm]

d_{LFP1} - průměrné posunutí při působícím zatížení F_{LFP1} [mm]

d_{LFP2} - průměrné posunutí při působícím zatížení F_{LFP2} [mm]

Tuto rovnici lze použít pro každou měřenou frekvenci, v našem případě však byla vyhodnocována pouze zkouška při frekvenci 5 Hz dle požadavku zadavatele.

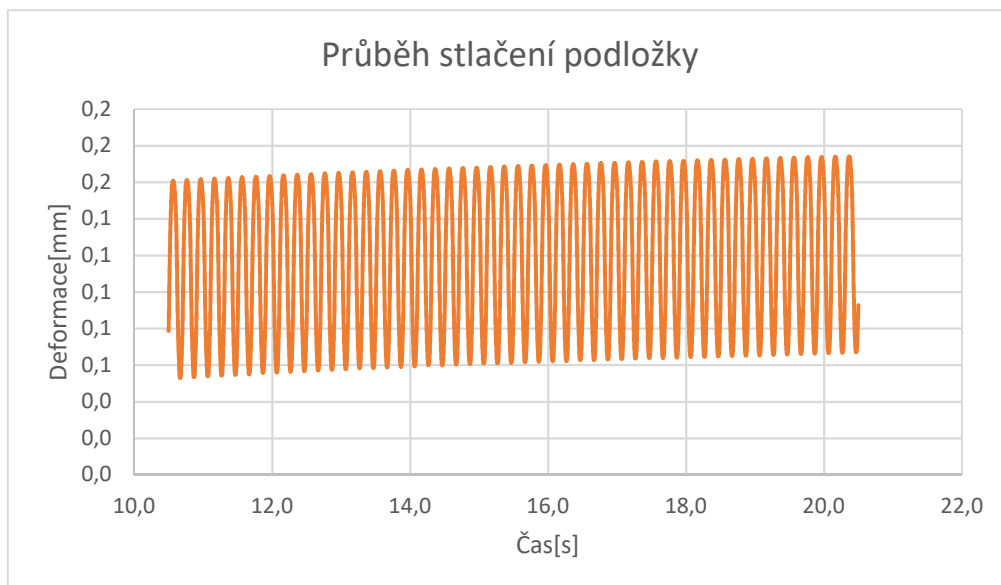
Norma nedefinuje interval požadované tuhosti. Udává pouze podmínku rovnoměrného stlačení kovové desky, kdy se posunutí ani na jednom snímači nesmí lišit od střední hodnoty posunutí o víc než 20 %. Tímto výpočtem ověřujeme, že byla deska zatěžována v jejím středu. Při nesplnění podmínky se měření opakuje.

Tabulka 3: Výpočet nízkofrekvenční dynamické tuhosti

Průměrná tuhost	
F_{LFP1} [kN]	18
F_{LFP2} [kN]	68
d_{LFP} [mm]	0,118
k_{LFP} [kN/mm]	426,693

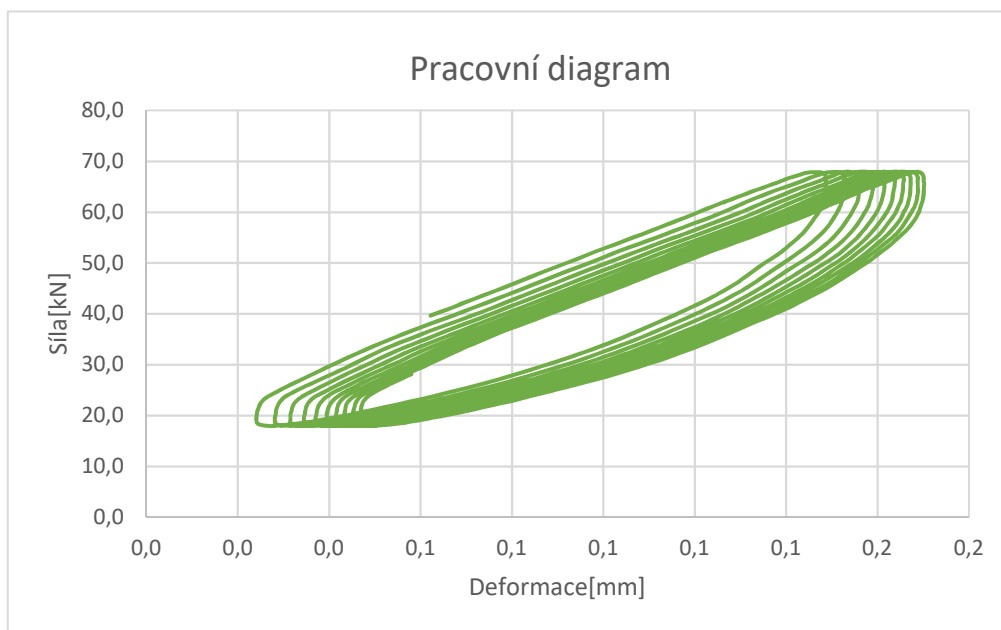
Tuhost stanovená pro jednotlivé snímače			
	S_1	S_2	S_3
F_{LFP1} [kN]	18	18	18
F_{LFP2} [kN]	68	68	68
$d_{LFP,i}$ [mm]	0,132	0,113	0,108
k_{LFP} [kN/mm]	379,261	440,303	460,514

Rovnoměrná deformace			
	S_1	S_2	S_3
d_{LFP} [mm]	0,118		
$\pm 20\% d_{LFP}$	(0,094;0,141)		
$d_{LFP,i}$ [mm]	0,132	0,113	0,108
	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE



Obrázek 17: Průběh stlačení podložky při nízkofrekvenční dynamické zkoušce

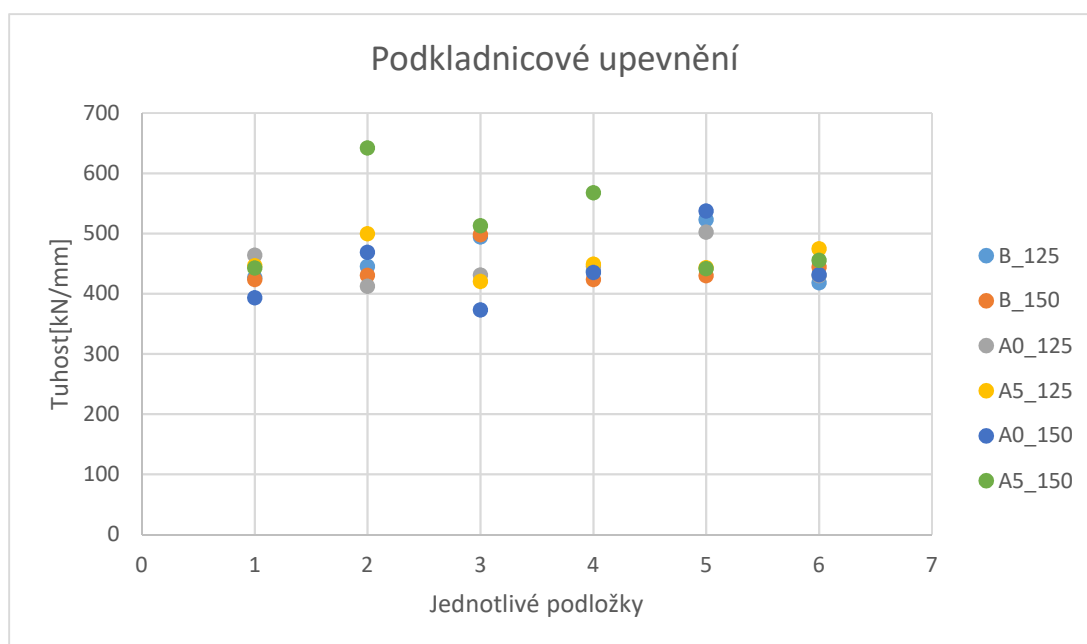
Grafické znázornění průběhu stlačení podložky a pracovní diagram viz. Obrázek 17 a Obrázek 18. Obsah křivky pracovního diagramu vyjadřuje energii, kterou pryžová podložka během zatěžování přeměňuje na teplo.



Obrázek 18: Pracovní diagram podložky při nízkofrekvenční dynamické zkoušce

9.1.1 SOUBOR NOVÝCH VZORKŮ

Tento soubor obsahuje celkem 66 pryžových podložek, dodaných čtyřmi různými výrobci A, B, C a D. Jedná se o série vždy po šesti kusech. Šest sérií od výrobců A a B je pro podkladnicové upevnění, kdy polovina je určena pro kolejnice s šířkou paty 125 mm a druhá polovina pro šířku paty kolejnice 150 mm. Číslo 0 a 5 u dodavatele A udávají rozdílné směsi použité při výrobě.



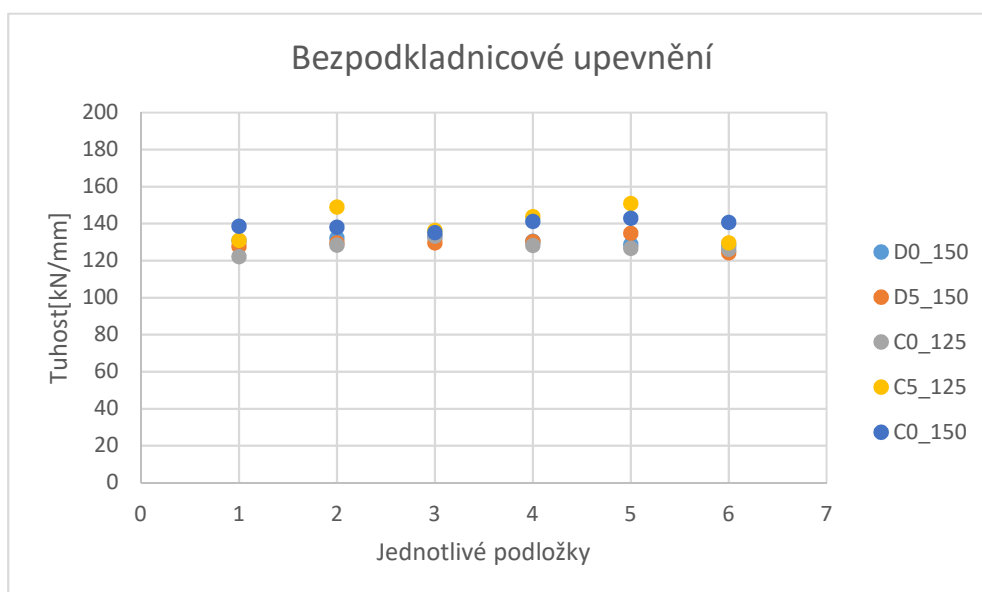
Obrázek 19: Tuhosti nových podložek pro podkladnicové upevnění

V bodovém grafu (obrázek 19) jsou vyneseny tuhosti jednotlivých podložek ze sérií pro podkladnicové upevnění. Hodnoty vzorků se pohybují v intervalu od 373,1 kN/mm do 441,3 kN/mm. V následující tabulce (tabulka 7) je vyhodnocena stálost výběry jednotlivých sérií. U nových podložek pro podkladnicové upevnění dopadly nejlépe série A5_125, nejhůře potom A5_150. Snahou je, aby série byly vyrobeny s co nejmenšími odchylkami. Jinak řečeno, nejlépe znamená s nejmenším rozptylem, naopak nejhůře s největším rozptylem.

Tabulka 4: Vyhodnocení rozptylu nízkofrekvenčních dynamických tuhostí nových podložek pro podkladnicové upevnění

Podkladnicové upevnění						
Výrobce	B		A			
Šířka paty kolejnice	125	150	125		150	
Série	B_125	B_150	A0_125	A5_125	A0_150	A5_150
Průměrná tuhost [kN/mm]	457	441	446	455	440	510
Medián [kN/mm]	441	430	438	447	433	484
Rozptyl [(kN/mm) ²]	1735	824	969	763	3411	6586
Směrodatná odchylka [kN/mm]	42	29	31	28	58	81
Maximum [kN/mm]	523	498	502	499	537	642
Minimum [kN/mm]	418	423	412	420	373	441

Zbýlých pět sérií dodaných výrobcí C a D je určeno pro bezpodkladnicové upevnění.



Obrázek 20: Nízkofrekvenční dynamická tuhost nových podložek pro bezpodkladnicové upevnění

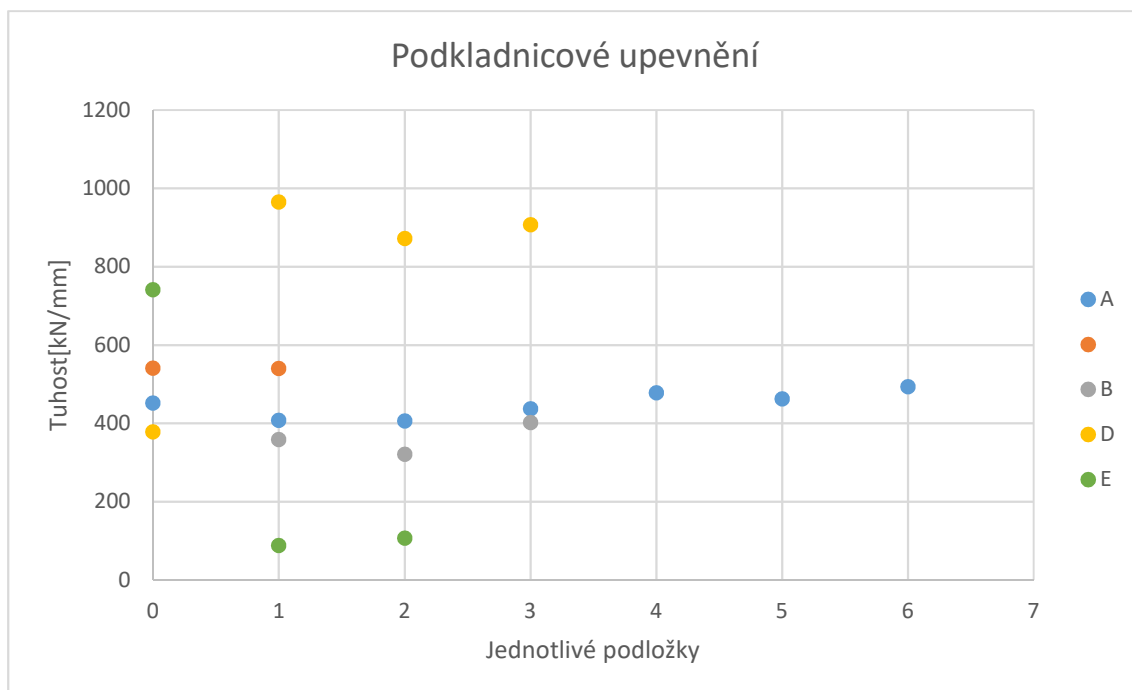
V grafu (Obrázek 20) je vidět tuhosti jednotlivých vzorků ze sérií pro bezpodkladnicové upevnění. Na první pohled je zřejmé, jak významně se výsledných tuhosti podložek pro podkladnicové a bezpodkladnicové upevnění liší. U bezpodkladnicového upevnění se hodnoty pohybují v intervalu tuhostí od 122 kN/mm do 151 kN/mm. Podložky pro podkladnicové upevnění jsou tedy přibližně třikrát tužší než pro bezpodkladnicové. V tabulce 9 jsou vyhodnoceny série dle jejich rozptylu. Nejlépe dopadla série od výrobce D, D0_150. Největší rozptyl má série C5_125.

9.1.2 SOUBOR UŽITÝCH VZORKŮ

Tabulka 5: Vyhodnocení rozptylu nízkofrekvenčních dynamických tuhostí nových podložek pro bezpodkladnicové upevnění

Bezpodkladnicové upevnění					
Výrobce	D		C		
Šířka paty kolejnice	150		125		150
Série	D0_150	D5_150	C0_125	C5_125	C0_150
Průměrná tuhost [kN/mm]	129	129	129	140	139
Medián [kN/mm]	130	129	128	140	140
Rozptyl [(kN/mm) ²]	10	12	6	83	7
Směrodatná odchylka [kN/mm]	3	3	3	9	3
Maximum [kN/mm]	133	135	133	151	143
Minimum [kN/mm]	124	124	126	129	135

V souboru užitých vzorků je celkem vyhodnoceno 31 kusů pryžových podložek, z toho 25 podložek pro podkladnicové upevnění, které byly dodány čtyřmi výrobci, A, B, D a E. A pro bezpodkladnicové upevnění bylo vyhodnoceno pouze 6 vzorků od výrobců D a E.



Obrázek 21: Nízkofrekvenční dynamická tuhost podložek pro podkladnicové upevnění

Tabulka 6: Vyhodnocení nízkofrekvenčních dynamických tuhostí užitých podložek pro podkladnicové upevnění

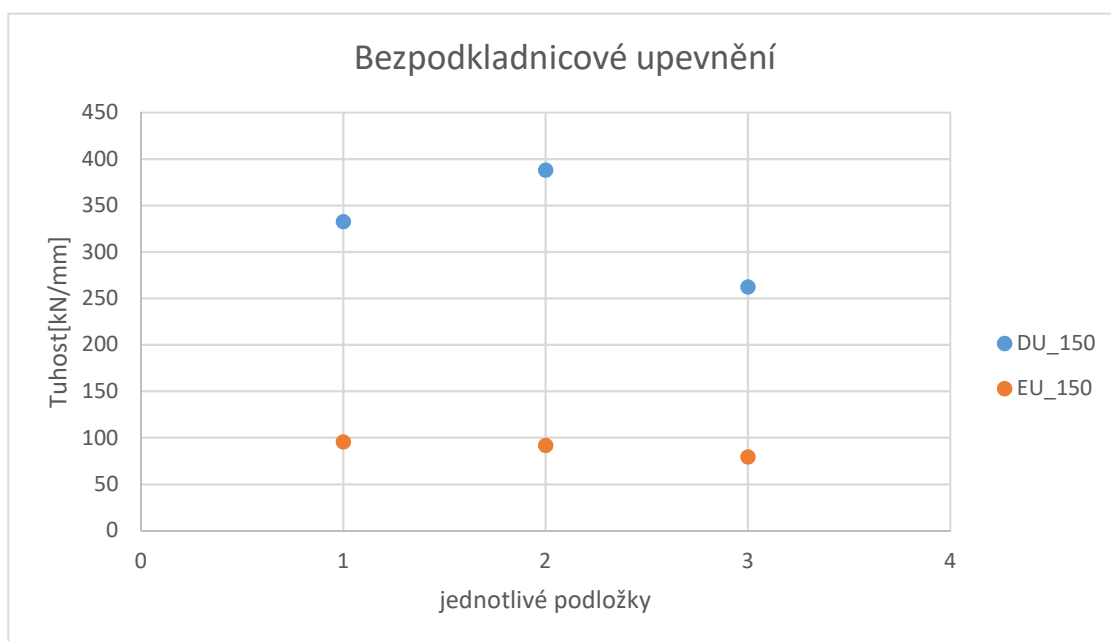
Podkladnicové upevnění					
Výrobce	A		B	D	E
Šířka paty kolejnice	150	125	150	150	150
Série	A _{U_150}	A _{U_125}	B _{U_150}	D _{U_150}	E _{U_150}
Průměrná tuhost [kN/mm]	440	463	357	850	99
Medián [kN/mm]	444	540	358	872	99
Rozptyl [(kN/mm) ²]	1437	17977	1154	9147	105
Směrodatná odchylka [kN/mm]	38	134	34	96	10
Maximum [kN/mm]	494	541	401	965	108
Minimum [kN/mm]	386	308	321	741	88

Tabulka 7: Vyhodnocení nízkofrekvenčních dynamických tuhostí užitých podložek pro bezpodkladnicové upevnění

Bezpodkladnicové upevnění		
Výrobce	E	D
Šířka paty kolejnice	150	150
Série	E _{U_150}	D _{U_150}
Průměrná tuhost [kN/mm]	89	328
Medián [kN/mm]	92	333
Rozptyl [(kN/mm) ²]	73	3966
Směrodatná odchylka [kN/mm]	9	63
Maximum [kN/mm]	96	388
Minimum [kN/mm]	79	263

U užitých podložek lze očekávat větší rozptyl tuhostí, způsobený opotřebením a stárnutím materiálu. V grafu (obrázek 21.) nízkofrekvenčních dynamických tuhostí podložek pro podkladnicové upevnění jsou hodnoty od 88 kN/mm až po 965 kN/mm maximální tuhost série D_{U_150}. V porovnání rozptylů výsledných tuhostí dopadla nejlépe série A_{U_125}. Největší rozptyl hodnot má série D_{U_150}.

Z měření pryžových podložek pro bezpodkladnicové upevnění mají vzorky ze série D_{U_150} výrazně vyšší odchylky, než vzorky od dodavatele E. Je nutno vzít v úvahu, že obě série obsahují pouze tři podložky, které byly v provozu shodně 4 roky, avšak v různých tratích s odlišnými provozními podmínkami.



Obrázek 22: Nízkofrekvenční dynamické tuhosti užitých podložek pro bezpodkladnicové upevnění

9.2 STATICKÁ ZKOUŠKA DLE ČSN

Hodnoty a diagramy uvedené v této kapitole, jsou vyhodnocení užitých podložek.

Podložku zatěžujeme silou $F_{SP1} = 18 \text{ kN}$ až do síly $F_{SPmax} = 85 \text{ kN}$. Statickou tuhost dle ČSN (k_{SP}) vypočítáme ze čtvrté zatěžovací větve, jako poměr síly od 18 kN do 68 kN a odpovídajícího stlačení podložky d_{SP} .

Statická tuhost dle ČSN byla stanovena dle vzorce:

$$k_{SP} = \frac{F_{SP2} - F_{SP1}}{d_{SP}} \text{ [kN/mm]}$$

kde

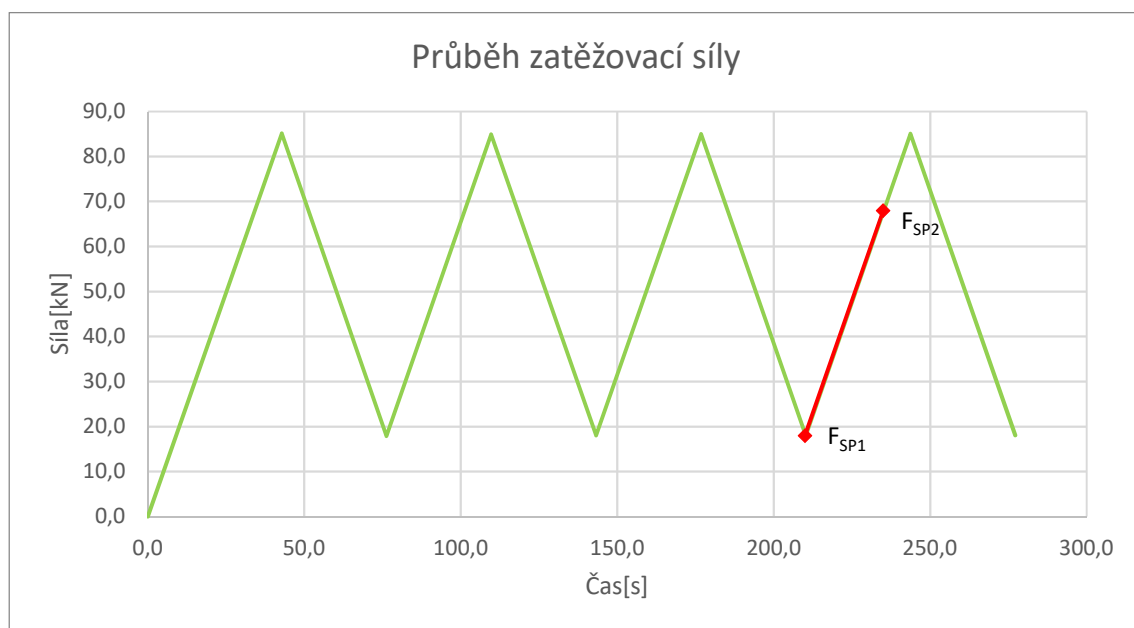
F_{SP1} – minimální zatěžovací síla $F_{SP1} = 18 \text{ kN}$ [kN]

F_{SP2} – zatěžovací síla $F_{SP2} = 0,8 * F_{SPmax} = 68 \text{ kN}$ [kN]

d_{SP} – stlačení podložky; $d_{SP} = d_{SP2} - d_{SP1}$ [mm]

d_{SP1} – posunutí při působícím zatížení F_{SP1} [mm]

d_{SP2} – posunutí při působícím zatížení F_{SP2} [mm]



Obrázek 23: Průběh zatěžovací síly dle ČSN s vyznačením parametrů pro výpočet tuhosti

Jelikož statická zkouška dle ČSN vychází ze stejné normy jako zkouška dynamická, ani tady tedy není přesně definován interval požadované tuhosti. Shodně je také uvedena podmínka rovnoměrného stlačení, kdy se posunutí ani na jednom snímači nesmí lišit od střední hodnoty posunutí o víc než 20 %.

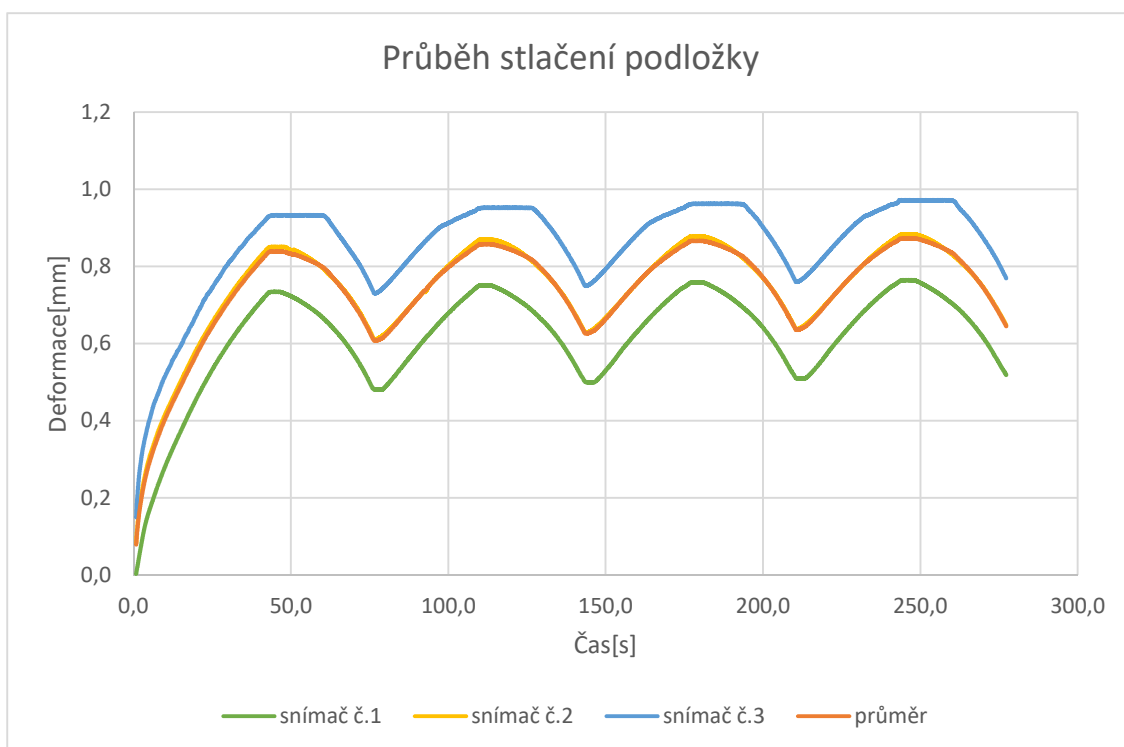
Tabulka 8: Výpočet statické tuhosti dle ČSN

Průměrná tuhost	
F_{SP1} [kN]	18
F_{SP2} [kN]	68
d_{SP} [mm]	0,189
k_{SP} [kN/mm]	264,732

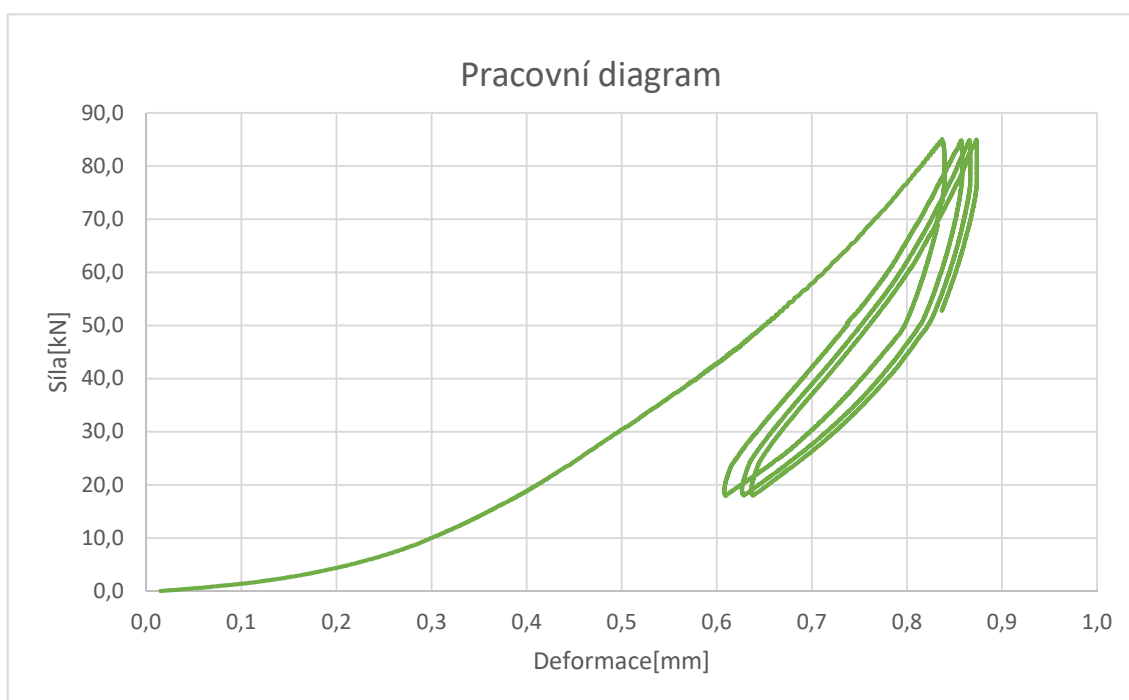
Tuhost stanovená pro jednotlivé snímače			
	S_1	S_2	S_3
F_{SP1} [kN]	18	18	18
F_{SP2} [kN]	68	68	68
$d_{SP,i}$ [mm]	0,197	0,191	0,179
k_{SP} [kN/mm]	253,351	261,496	279,350

Rovnoměrná deformace			
	S_1	S_2	S_3
d_{SP} [mm]	0,189		
$\pm 20\% d_{LFP}$	(0,151;0,227)		
$d_{SP,i}$ [mm]	0,197	0,191	0,179
	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

Grafické znázornění průběhu deformace viz. Obrázek 24. Na obrázku 25. je obsah zaznamenané křivky roven energii spotřebované a přeměněné podložkou, tedy vykonané práci.



Obrázek 24: Průběh stlačení podložky při statické zkoušce dle ČSN

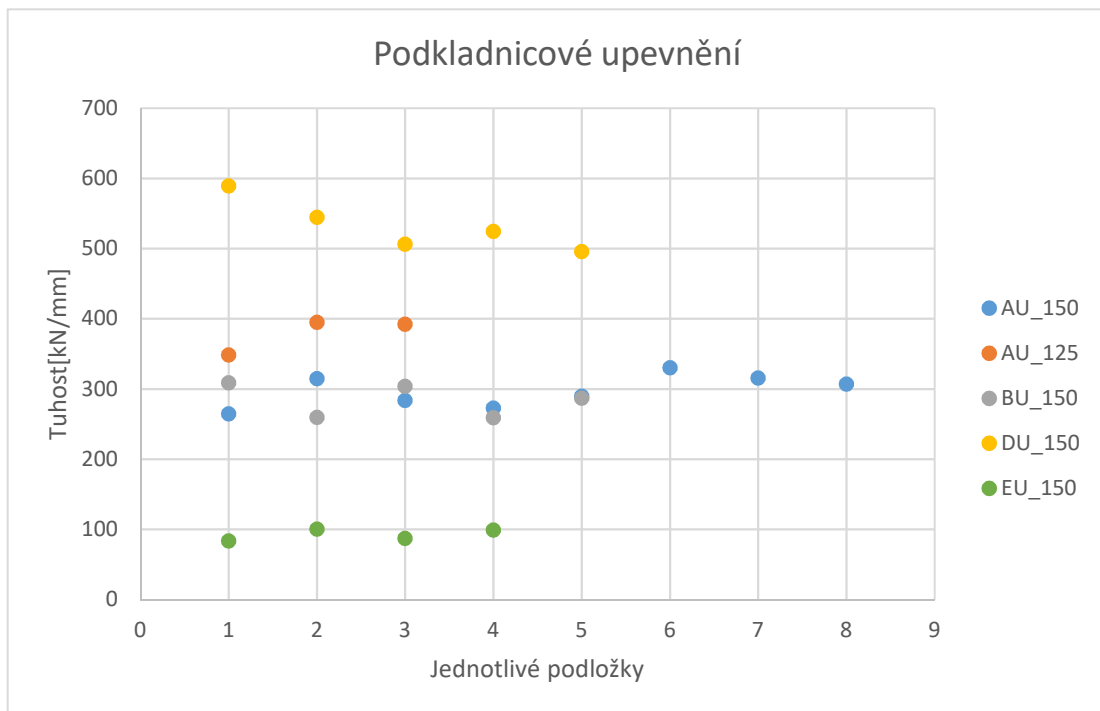


Obrázek 25: Pracovní diagram podložky při statické zkoušce dle ČSN

9.2.1 SOUBOR UŽITÝCH VZORKŮ

Vyhodnocované vzorky jsou totožné s kapitolou 9.1.2, pro přehlednost je zachováno značení sérií.

Pro podkladnicové upevnění se vzorky pohybují v rozmezí 84 kN/mm a 589 kN/mm. Již z grafu (obrázek 26) je zřejmé, že vzorky série EU_150 mají dle zkoušky ČSN statickou tuhost s nejnižším rozptylem hodnot. Naopak série DU_150 s největším rozdílem výsledných hodnot dopadla, jako nejhůře hodnocená.



Obrázek 26: Statické tuhosti dle ČSN pro podkladnicové upevnění

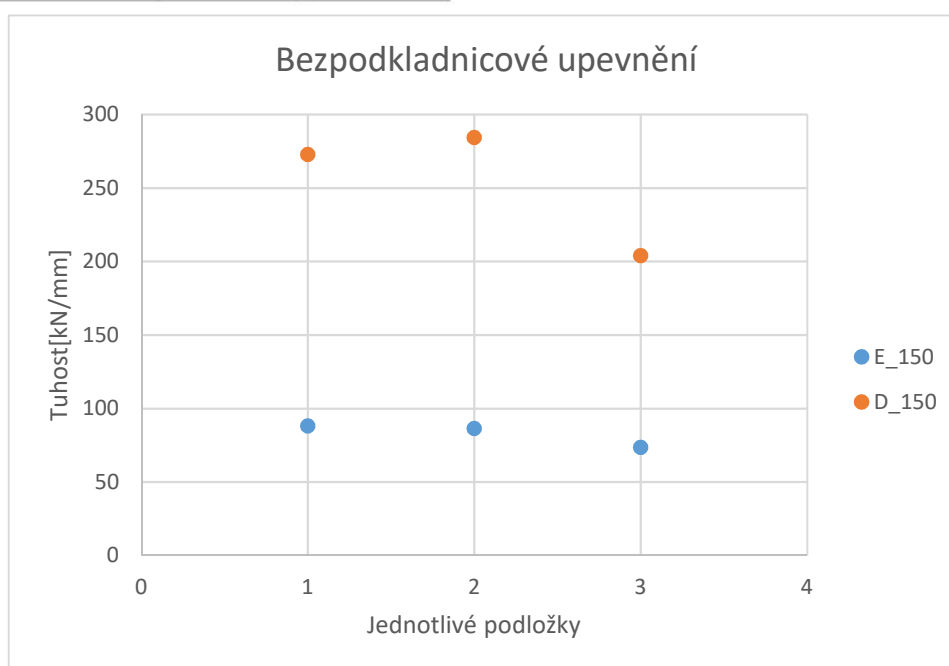
Tabulka 9: Vyhodnocení statických tuhostí podložek dle ČSN pro podkladnicové upevnění

Podkladnicové upevnění					
Výrobce	A		B	D	E
Šířka paty kolejnice	150	125	150	150	150
Série	A _{U_150}	A _{U_125}	B _{U_150}	D _{U_150}	E _{U_150}
Průměrná tuhost [kN/mm]	297	379	284	532	93
Medián [kN/mm]	298	392	287	525	93
Rozptyl [(kN/mm) ²]	532	676	562	1369	71
Směrodatná odchylka [kN/mm]	23	26	24	37	8
Maximum [kN/mm]	330	395	309	589	100
Minimum [kN/mm]	265	349	259	496	84

Tabulka 10: Vyhodnocení statických tuhostí podložek dle ČSN pro bezpodkladnicové upevnění

Bezpodkladnicové upevnění		
Výrobce	E	D
Šířka paty kolejnice	150	150
Série	E _{U_150}	D _{U_150}
Průměrná tuhost [kN/mm]	83	254
Medián [kN/mm]	86	273
Rozptyl [(kN/mm) ²]	63	1891
Směrodatná odchylka [kN/mm]	8	43
Maximum [kN/mm]	88	284
Minimum [kN/mm]	73	204

Tuhosti pryžových podložek určené pro bezpodkladnicové upevnění se pohybují od 73 kN/mm do maximálních 284 kN/mm. Série E_{U_150} dopadla ve srovnání se sérií D_{U_150}, z pohledu rozptylu, mnohem lépe. Již v grafu statické tuhosti dle ČSN pro bezpodkladnicové upevnění je viditelné, že hodnoty vzorků od výrobce D jsou více rozptýleny. Směrodatná odchylka série E_{U_150} je víc než čtyřikrát menší než u D_{U_150}.



Obrázek 27: Statické tuhosti dle ČSN pro bezpodkladnicové upevnění

9.3 STATICKÁ ZKOUŠKA DLE OTP

Při statické zkoušce dle OTP se podložka ve třech cyklech zatíží až při maximální hodnotě 80 kN a poté odlehčuje na 1 kN. Pro výpočet tuhosti k_{OTP} se stanovuje z poslední zatěžovací větve. Tuhost se rovná poměru rozdílu zatěžovací síly $F_{70} = 70$ kN a $F_{20} = 20$ kN a odpovídající deformace.

Tuhost dle OTP určuje vzorec:

$$k_{OTP} = \frac{F_{70} - F_{20}}{d_{OTP}} \text{ [kN/mm]}$$

kde

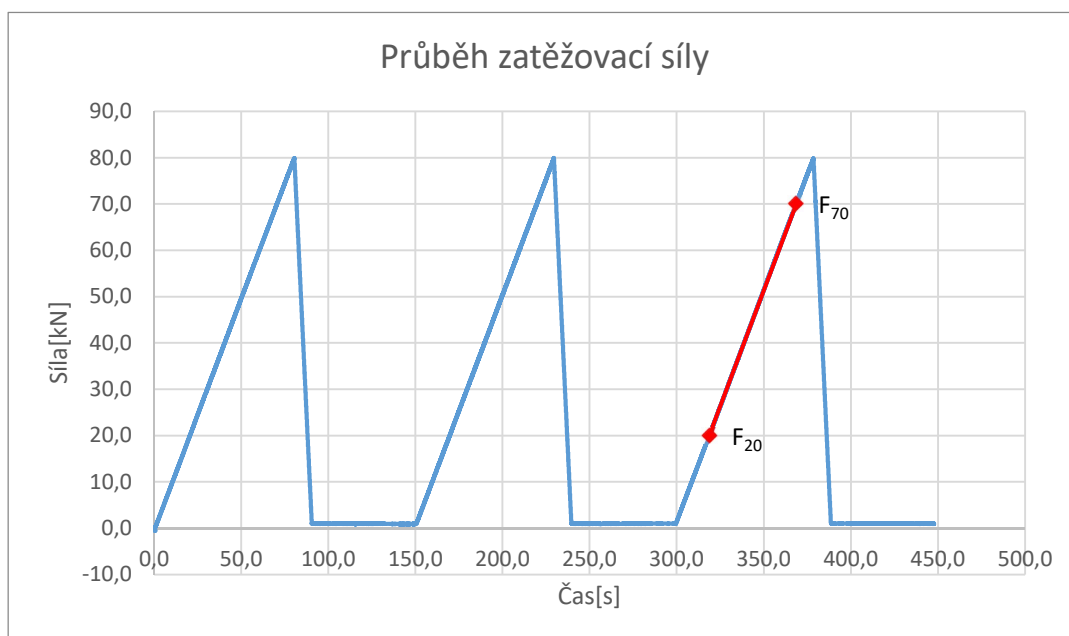
F_{20} – minimální zatěžovací síla $F_{20} = 20$ kN [kN]

F_{70} – zatěžovací síla $F_{70} = 70$ kN [kN]

d_{OTP} – stlačení podložky; $d_{OTP} = d_{70} - d_{20}$ [mm]

d_{20} – posunutí při působícím zatížení F_{20} [mm]

d_{70} – posunutí při působícím zatížení F_{70} [mm]



Obrázek 28: Průběh zatěžovací síly dle OTP s vyznačením parametrů pro výpočet tuhosti

OTP se od normy ČSN zásadně liší v tom, že uvádí konkrétní požadavky na sečnou tuhost podložek. Intervaly požadovaných hodnot jsou pro podkladnicové a bezpodkladnicové upevnění různé.

- Podkladnicové: $k_{OTP} = \langle 90 - 120 \rangle$ kN
- Bezpodkladnicové: $k_{OTP} = \langle 55 - 75 \rangle$ kN

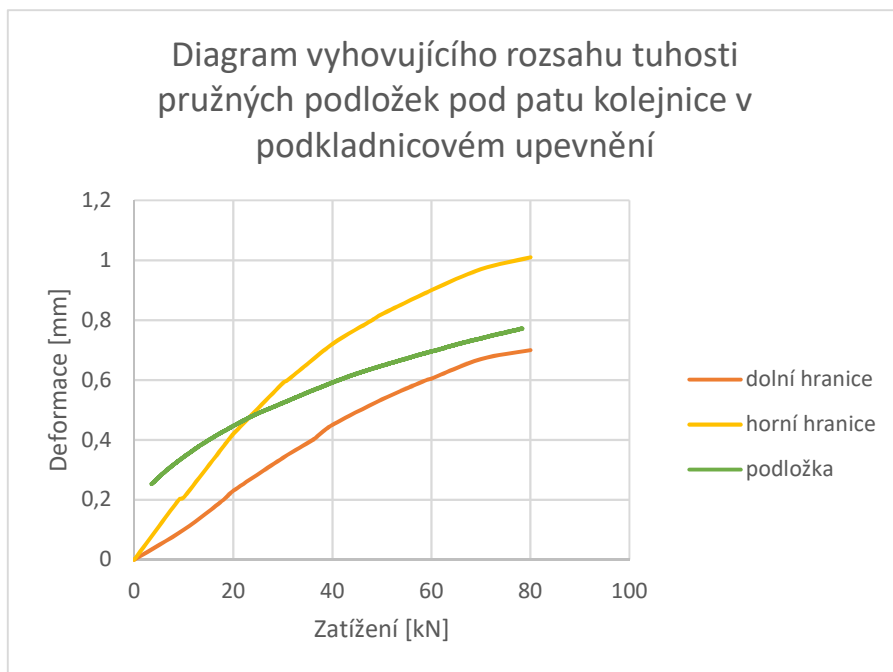
Pro podkladnicové i bezpodkladnicové upevnění je poté shodně uvedena podmínka trvalé deformace. Ta se odečte jednu minutu po posledním zatěžovacím cyklu a nesmí překročit hodnotu 0,25 mm. Norma nepožaduje ověření rovnoměrného stlačení, pro kontrolu je však k vyhodnocení doplněno.

Tabulka 11: Výpočet statické tuhosti dle OTP

Průměrná tuhost	
F_{20} [kN]	20
F_{70} [kN]	70
d_{OTP} [mm]	0,293
k_{OTP} [kN/mm]	171,984
$k \in (90;120)$	NEVYHOVUJE

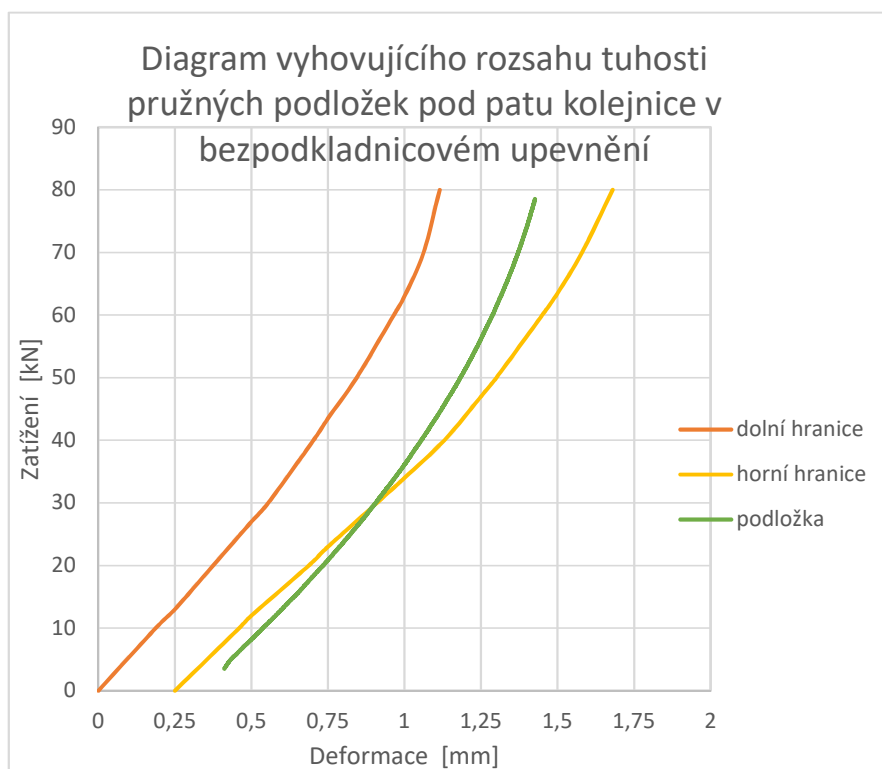
Tuhost stanovená pro jednotlivé snímače			
	S_1	S_2	S_3
F_{20} [kN]	20	20	20
F_{70} [kN]	70	70	70
$d_{OTP,i}$ [mm]	0,317	0,301	0,260
k_{OTP} [kN/mm]	157,460	166,041	192,450

Trvalá a rovnoměrná deformace			
	S_1	S_2	S_3
d_{OTP} [mm]	0,293		
d_{LONG}	< 0,25		
$\pm 20\% d_{OTP}$	(0,234;0,351)		
$d_{OTP,i}$ [mm]	0,317	0,301	0,260
	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE



Obrázek 29: Diagram vyhovujícího rozsahu tuhosti podložek pod patu kolejnice pro podkladnicové upevnění

Zároveň norma uvádí diagram vyhovujícího rozsahu tuhosti. Do diagramu vynášíme třetí, tedy poslední zatěžovací větev pracovního diagramu podložky. Tato větev musí ležet v rozmezí dvou limitních křivek. Stejně jako intervaly požadovaných tuhostí i diagramy se liší dle typu upevnění, pro něj je vzorek určen.

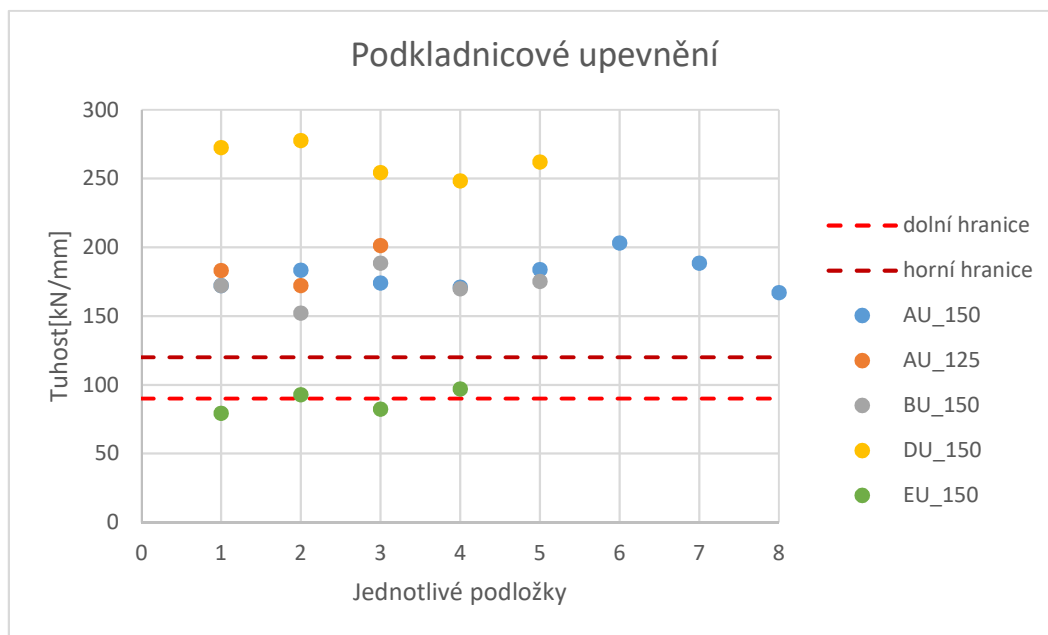


Obrázek 30: Diagram vyhovujícího rozsahu tuhosti podložek pod patu kolejnice v bezpodkladnicovém upevnění

9.3.1 SOUBOR UŽITÝCH VZORKŮ

Grafy vyhodnocených tuhostí dle statické zkoušky OTP jsou doplněny o horní a dolní hranice požadovaných hodnot tuhostí. Značení sérií odpovídá zkouškám dle ČSN i nízkofrekvenční dynamické zkoušce užitých podložek.

U podkladnicového upevnění se tuhosti pohybují mezi hodnotami 79 kN/mm až 269 kN/mm. Rozpětí hodnot je mnohem menší než u užitých podložek zkoušených dle ČSN i dynamické zkoušky. Pokud se podíváme na hranice tuhostí stanovené normou, tak pouze série EU_150 se přiblížila dolní hodnotě 90 kN/mm. A dvě ze čtyř podložek z této série, jako jediné ze všech zkoušených vzorků, dosáhly požadovaného intervalu tuhosti. EU_150 má také v porovnání rozptylu nejnižší hodnoty a průměrná odchylka od jejího průměru činí pouze 8 kN. Největším rozptyl hodnot tuhostí jednotlivých vzorků má naopak série AU_125.



Obrázek 31: Statické tuhosti dle OTP podložek pro podkladnicové upevnění

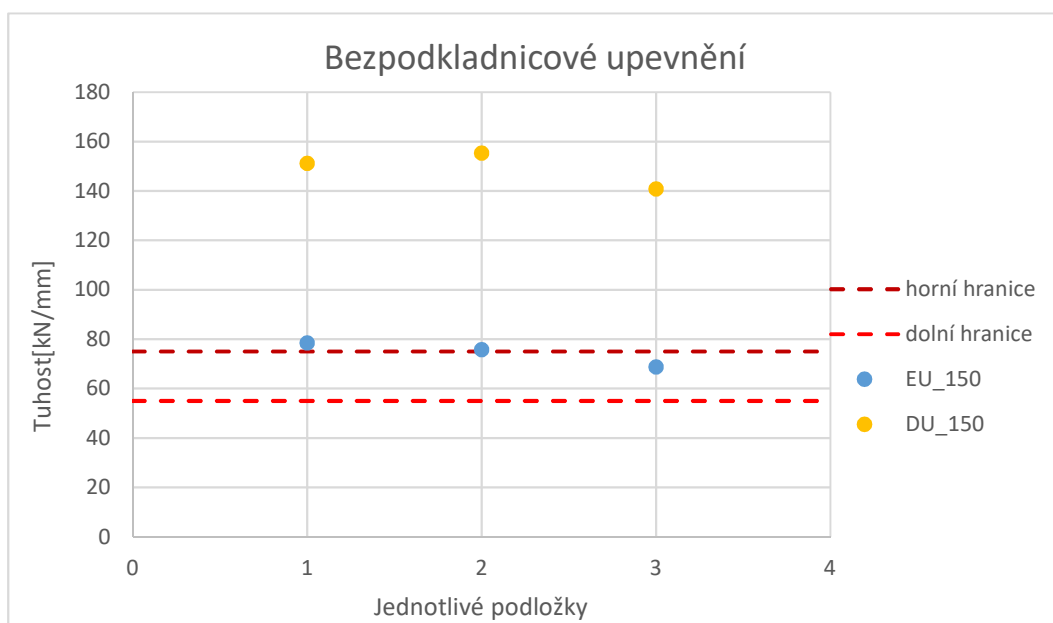
Tabulka 12: Vyhodnocení statických tuhostí dle OTP pro podkladnicové upevnění

Podkladnicové upevnění					
Výrobce	A		B	D	E
Šířka paty kolejnice	150	125	150	150	150
Série	A _{U_150}	A _{U_125}	B _{U_150}	D _{U_150}	E _{U_150}
Průměrná tuhost [kN/mm]	180	185	176	251	202
Medián [kN/mm]	179	183	183	248	192
Rozptyl [(kN/mm) ²]	140	218	211	38	1093
Směrodatná odchylka [kN/mm]	12	15	15	6	33
Maximum [kN/mm]	203	201	188	262	248
Minimum [kN/mm]	167	172	152	248	174

Tabulka 13: Vyhodnocení statických tuhostí dle OTP pro bezpodkladnicové upevnění

Bezpodkladnicové upevnění		
Výrobce	E	D
Šířka paty kolejnice	150	150
Série	E _{U_150}	D _{U_150}
Průměrná tuhost [kN/mm]	74	149
Medián [kN/mm]	76	151
Rozptyl [(kN/mm) ²]	25	55
Směrodatná odchylka [kN/mm]	5	7
Maximum [kN/mm]	78	155
Minimum [kN/mm]	69	141

Ze vzorků pro bezpodkladnicové upevnění dosáhly pouze dva požadovaných hodnot tuhostí. A to vzorky ze série E_{U_150}, u níž ve srovnání s podložkami od výrobce D, byl nízký i rozptyl tuhostí. Pro bezpodkladnicové upevnění dopadly tedy opět lépe pryžové podložky dodané výrobcem E a to v posouzení jak požadovaných hodnot tuhostí, tak i v porovnání rozptylu obou sérií.



Obrázek 32: Statické tuhosti dle OTP podložek pro bezpodkladnicové upevnění

9.4 SHRNU TÍ

V tabulce č. 27 jsou uvedeny série, které mají v porovnání s ostatními nejvyšší (bílé pole) a nejnižší (zelené pole) rozptyl hodnot tuhostí jednotlivých podložek.

V celkovém posouzení lze říci, že výrobce E vyrobil a dodal podložky pod patu kolejnice s nejvíce konzistentními vlastnostmi a stabilními výsledky. Rozptyl tuhostí vzorků je v tomto srovnání jednoznačně nejnižší. Naopak je tomu s podložkami dodanými výrobcem D. Ty se vyznačují vysokými odchylkami hodnot tuhosti.

V porovnání upevnění jsou tuhosti vzorků v sériích více rozptýleny u podkladnicového upevnění. U bezpodkladnicového upevnění jsou rozptyly obecně nižší.

Tabulka 14: Shrnutí sérií s nejvyšším a nejnižším rozptylem tuhosti

Typ zkoušky		Nízkofrekvenční dynamická				Statická dle ČSN		Statická dle OTP	
Podložky		Nové		Užité		Užité		Užité	
podkladnicové	Série	A5_125	A5_150	A_125	D_150	E_150	D_150	E_150	A_125
	Rozptyl [(kN/mm) ²]	763	6586	86	9147	71	1369	72	218
bezpodkladnicové	Série	D0_150	C5_125	E_150	D_150	E_150	D_150	E_150	D_150
	Rozptyl [(kN/mm) ²]	3	83	73	3966	63	1891	25	55

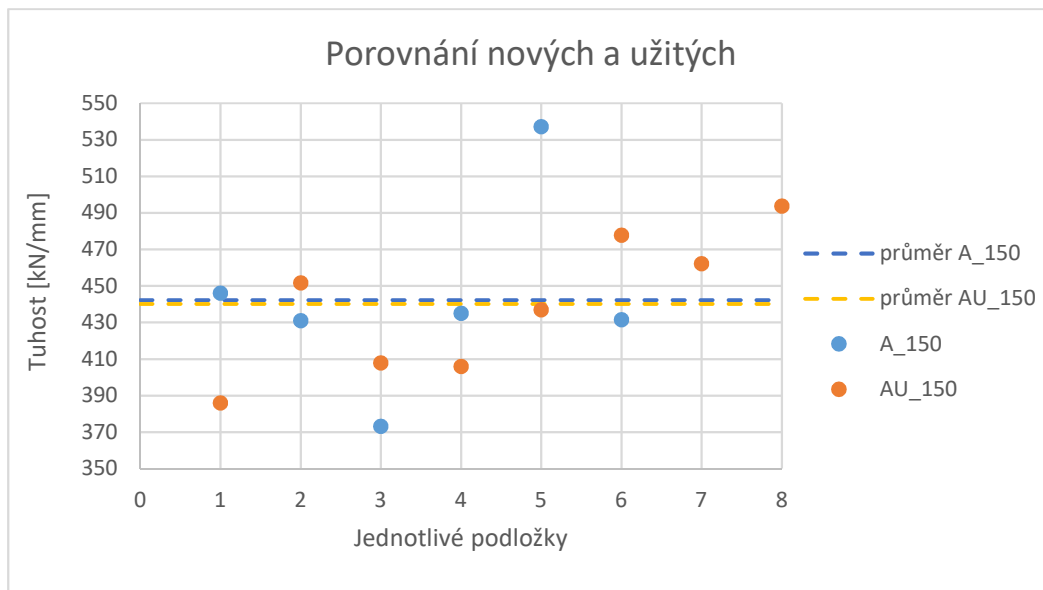
10 SROVNÁNÍ NOVÝCH A UŽITÝCH VZORKŮ

V následující kapitole jsou srovnány nízkofrekvenční tuhosti nových a užitých vzorků. Toto srovnání bylo možné provést pouze u tří výrobců – A, B a D, a to z důvodu nedostatečného množství užitých podložek. Užité a nové podložky které jsou vzájemně porovnávány, se shodují ve výrobcu, jsou určeny pro stejné upevnění a šířku paty kolejnice.

Tabulka 15: Nízkofrekvenční dynamické tuhosti sérií A_150

VÝROBCE A	
	dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]
nové podložky; podkladnicové upevnění; 150mm	
A01_150	446
A02_150	431
A03_150	373
A04_150	435
A05_150	537
A06_150	431
Průměrná hodnota	442
Směrodatná odch.	58
Rozptyl [(kN/mm) ²]	3411
užité podložky; 2,5 let v provozu; podkladnicové upevnění; 150mm	
A _U 1_150	386
A _U 2_150	452
A _U 3_150	408
A _U 4_150	406
A _U 5_150	437
A _U 6_150	478
A _U 7_150	462
A _U 8_150	494
Průměrná hodnota	440
Směrodatná odch.	38
Rozptyl [(kN/mm) ²]	1437

Od výrobce A srovnáváme vzorky určené pro podkladnicové upevnění pod patu kolejnice šířky 150 mm. Výsledné tuhosti sérií se liší pouze o 2 kN/mm, u nových podložek je průměrná tuhost 442 kN/mm a u užitých 440 kN/mm. Za pozornost stojí také fakt, že rozptyl užitých vzorků umístěných v trati po dobu dvou a půl let je přibližně o 58 % nižší než u vzorků nových.

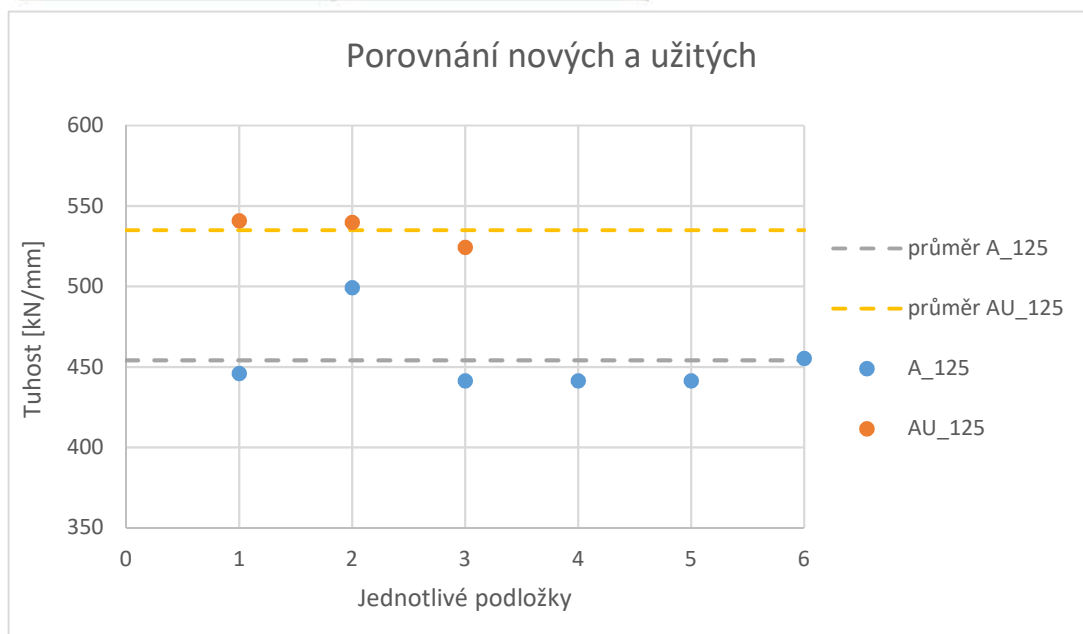


Obrázek 33: Nízkofrekvenční dynamická tuhost sérií A_150

Tabulka 16: Nízkofrekvenční dynamické tuhosti sérií A_125

VÝROBCE A	
	dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]
nové podložky; podkladnicové upevnění; 150mm	
A51_125	446
A52_125	499
A53_125	441
A54_125	441
A55_125	441
A56_125	455
Průměrná hodnota	454
Směrodatná odch.	28
Rozptyl [(kN/mm) ²]	763
užité podložky; 2,5 let v provozu; podkladnicové upevnění; 125mm	
A _U 1_125	541
A _U 2_125	540
A _U 3_125	524
Průměrná hodnota	535
Směrodatná odch.	38
Rozptyl [(kN/mm) ²]	1437

U sérií pro šířku paty kolejnice 125 mm již vidíme, že u vzorků užitých, které byly v kolejišti dva a půl roku je rozptyl hodnot jejich tuhostí o 88,3 % vyšší než u podložek nových. Užitě podložky jsou v tomto případě o 81 kN/mm tužší než podložky nové.

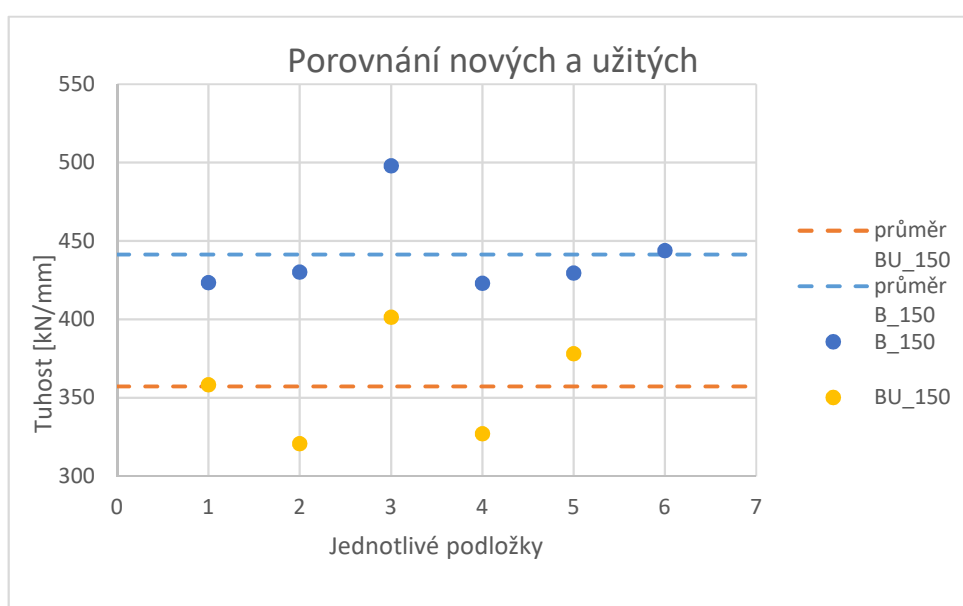


Obrázek 34: Nízkofrekvenční dynamická tuhost sérií A_125

Tabulka 17: Nízkofrekvenční dynamická tuhost
sérií B_150

VÝROBCE B	
	dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]
nové podložky; podkladnicové upevnění; 150mm	
B1_150	423
B2_150	430
B3_150	498
B4_150	423
B5_150	430
B6_150	444
Průměrná hodnota	441
Směrodatná odch.	29
Rozptyl [(kN/mm) ²]	824
užité podložky; 2,5 let v provozu; podkladnicové upevnění; 150mm(R65)	
B _U 1_150	358
B _U 2_150	321
B _U 3_150	401
B _U 4_150	327
B _U 5_150	378
Průměrná hodnota	357
Směrodatná odch.	34
Rozptyl [(kN/mm) ²]	1154

U výrobce B jsou porovnány série pro podkladnicové upevnění pro kolejnici s šířkou paty 150 mm. V tomto případě se výsledné tuhosti užitých podložek od nových liší o 84 kN/mm, avšak nižší tuhost mají podložky užití. Rozptyl užitých vzorků je vyšší o 40 % než u vzorků nových.



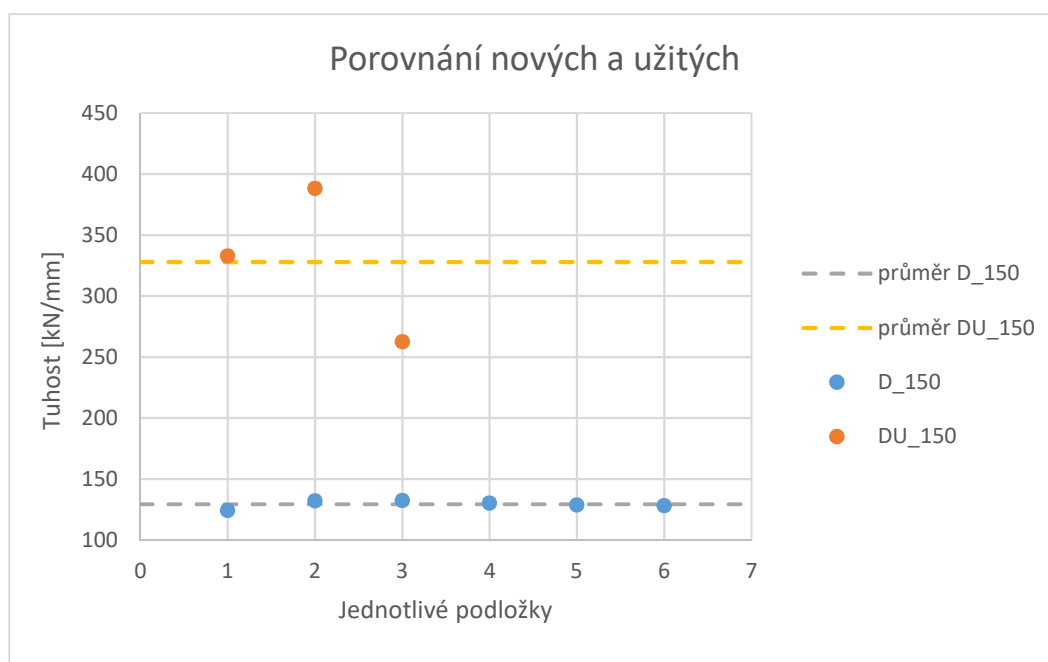
Obrázek 35: Nízkofrekvenční dynamická tuhost sérií B_150

Tabulka 18: Nízkofrekvenční dynamická tuhost sérií D_150

VÝROBCE D	
	dynamická tuhost [kN.mm ⁻¹]
nové podložky; bezpodkladnicové upevnění; 150mm	
D1_150	124
D2_150	132
D3_150	133
D4_150	130
D5_150	129
D6_150	128
Průměrná hodnota	129
Směrodatná odch.	3
Rozptyl [(kN/mm) ²]	10
užité podložky; 4 roky v provozu; bezpodkladnicové upevnění; 150mm	
D _U 1_150	333
D _U 2_150	388
D _U 3_150	263
Průměrná hodnota	328
Směrodatná odch.	63
Rozptyl [(kN/mm) ²]	3966

Poslední série užitých a nových podložek, které bylo možno takto porovnat, byly dodány výrobcem D a jsou určeny pro patu kolejnice o 150 mm. Jedná se o vzorky pro bezpodkladnicové upevnění. Podložky po čtyřech letech v provozu mají tuhost 328 kN/mm, v porovnání s novými vzorky, které mají 129 kN/mm, jsou o celých 154% tužší.

Rozptyl hodnot je však u série D_U_150 3966 kN/mm.



Obrázek 36: Nízkofrekvenční dynamická tuhost sérií D_150

11 ZÁVĚR

Na podložkách dodaných pěti různými výrobci proběhly zkoušky nízkofrekvenční dynamické tuhosti při frekvenci 5 Hz a na užitých vzorcích i statické zkoušky dle OTP a ČSN. Z naměřených a zpracovaných dat se podařilo vyhodnotit tuhosti dodaných vzorků na základě uvedených metodik. V průběhu laboratorních zkoušek jsem si byla vědoma toho, že mnoho faktorů ovlivňuje výslednou tuhost. V kapitole 7. jsem se podrobněji věnovala dle mého nejdůležitějším z nich a možnostem, jak chybám při měření předejít.

Zkoušené podložky jsou rozděleny do kategorií na nové a užité vzorky a pro podkladnicové a bezpodkladnicové upevnění. Porovnáním, k němuž je zvolen rozptyl, jsou určeny série s nejlepšími, ale i nejhorsími výsledky pro jednotlivé kategorie. Ze srovnání vyplynul výrobce E, jako dodavatel pryžových podložek s nejstálějšími vlastnostmi. Nejhůře dopadl ve srovnání dodavatel D.

Překvapivé výsledky ukázalo srovnání nových a užitých podložek pod patu kolejnice. Oproti předpokladu, že pryžová podložka po určité době v provozu začne tuhnout, došlo u některých dodavatelů k opačnému efektu. Srovnány byly čtyři dvojice sérií. U dvou jsou dle předpokladu hodnoty tuhosti užitých podložek vyšší, než je tomu u nových vzorků. U jedné dvojice přesto, že pryžové podložky byly umístěny dva a půl roku v koleji, se výsledná tuhost téměř nezměnila. U poslední dvojice však mají užití vzorky dokonce nižší tuhost než vzorky nové. Bohužel pro stanovení závěru, nebo předpokladu chování pryžových podložek pod patu kolejnice v čase, nebylo vyhodnoceno dostatečné množství vzorků. Tyto nesrovnalosti mohou být způsobeny také tím, že vzorky nepochází ze stejného roku výroby, tudíž mohlo dojít ke změně směsi podložek.

Momentálně požadovaný interval tuhostí stanovují pouze Obecné technické podmínky. Je však zřejmé, že metoda měření uvedená v ČSN EN 13 146-9 je bližší skutečnému chování v koleji než metoda podle OTP. Výzkum bude nejspíše směřovat i k úpravě limitů sečných tuhostí pro statickou tuhost dle ČSN. Bohužel se prozatím nepotvrdil hledaný převodní součinitel mezi oběma metodikami.

Bude tedy třeba pokračovat ve sběru dat, nových i užitých podložek pod patu kolejnice. Pro vypovídající výstupy a následné hodnocení je důležitý správný výběr zkušební souboru vzorků. Dle matematicko-statistických metod, popsaných normou ČSN EN 01 0250 – Statistické metody v průmyslové praxi, lze provést náhodný výběr a odhad parametrů základního souboru.

Následně by se na podložkách měly provádět zkoušky tuhostí jak statické, tak i dynamické. Pro lepší představu o chování vzorků, by bylo vhodné měřit nízkofrekvenční dynamickou zkoušku při normou uváděných frekvencích 5 Hz, 10 Hz i 20 Hz. Výslednou nízkofrekvenční dynamickou tuhost pak stanovovat jako jejich průměr.

Zkoušky na užitých podložkách by se měly provádět v co nejmenším časovém rozmezí, aby bylo možné stanovit a predikovat jejich chování v čase. S využitím časových řad bychom mohli následně predikovat vývoj tuhosti. Výsledné hodnoty by měly být vyhodnocovány s ohledem na trať v níž byla pružná podložka umístěna a také na poloze podložky v trati. Dá se totiž očekávat, že namáhání a opotřebení je závislé i na rozdílu umístění v trati (v rovném úseku trati, na vnějším kolejnicovém pásu v oblouku, na vnitřním kolejnicovém pásu v oblouku atd.).

Požadované statické i nízkofrekvenční dynamické tuhosti by dle mého názoru měly vyplynout z požadavků na statické a nízkofrekvenční dynamické tuhosti uzlu upevnění. Na základě požadavků na tyto tuhosti pro určité provozní podmínky jako je maximální rychlost, provozní zatížení, maximální hmotnost na nápravu atd., by bylo možné určit odpovídající tuhost podložky pod patou kolejnice. Vlastnosti podložky nevychází pouze z tuhosti uzlu upevnění, ale z požadavků na tuhost celé konstrukce.

Se stanovenou tuhostí by musel být samozřejmě v souladu únavový limit svěrek ve svislém směru. Pro kontrolu souladu únavového limitu svěrky a tuhosti podložky postačuje porovnání se statickou tuhostí, která je obecně nižší než nízkofrekvenční dynamická, a tudíž dochází ke kmitání pružné svěrky při vyšší amplitudě. Vhodné by bylo také zavedení tzv. „Stiffening factor“, což je poměr statické sečné tuhosti a nízkofrekvenční dynamické tuhosti.

Další výzkum by se tedy měl zaměřit nejen na měření tuhostí samotných podložek pod patu kolejnice. Pro stanovení vlivu pryžové podložky na celý uzel upevnění, je zásadní provádět také zkoušky celého upevnění a zkoušky přímo v kolejišti. Pokusit se ověřit, zda je možné nalézt obecnou zákonitost v hodnotách statická a dynamická tuhost podložky, statická a dynamická tuhost sestavy upevnění, statická tuhost podložky a dynamická tuhost sestavy upevnění, statická tuhost sestavy upevnění a dynamická tuhost podložky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Železniční stavby: Železniční spodek a svršek*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2620-9.
- [2] *SŽDC SR103/3(S): Služební rukověť_Výkresy materiálu pro železniční svršek*. Praha, 2010.
- [3] *OTP pro pružné podložky pod patu kolejnice v podkladnicovém upevnění č.j. 60 789/99-O13*. Praha, 2000.
- [4] *OTP pro pružné podložky pod patu kolejnice v bezpodkladnicovém upevnění č.j. 57 045/95-S13*. Praha, 1996.
- [5] *ČSN EN 13146-9+A1: Železniční aplikace- Kolej- Metody zkoušení systémů upevnění- Část 9: Stanovení tuhosti*. 2012.
- [6] *SŽDC S3 Železniční svršek, díl. 7*. Praha, 2008.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
CESTI	Centrum pro efektivní a udržitelnou infrastrukturu
VUT	Vysoké učení technické
ÚŽKS	Ústav železničních konstrukcí a staveb
ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
OTP	obecné technické podmínky
PID	proporcionální, derivační, integrální
A, B, C, D, E	pracovní označení dodavatelů/ série nových vzorků
A _U , B _U , C _U , D _U , E _U	série užitých vzorků
S ₁ , S ₂ , S ₃	snímače posunutí
k _{LFPf}	nízkofrekvenční dynamická tuhost
F _{LFP1}	minimální průměrná zatěžovací síla nízkofrekvenční dynamické zkoušky
F _{LFP2}	maximální průměrná zatěžovací síla nízkofrekvenční dynamické zkoušky
d _{LFP}	průměrné stlačení podložky při nízkofrekvenční dynamické zkoušce
d _{LFP1}	průměrné posunutí při působení síly F _{LFP1}
d _{LFP2}	průměrné posunutí při působení síly F _{LFP2}
k _{SP}	statická tuhost dle ČSN
F _{SPmax}	maximální zatěžovací síla statické zkoušky dle ČSN
F _{SP1}	minimální zatěžovací síla statické zkoušky dle ČSN
F _{SP2}	síla pro vyhodnocení statické zkoušky dle ČSN, 0,8* F _{SPmax}
d _{SP}	stlačení podložky při statické zkoušce dle ČSN
d _{SP1}	posunutí při působení síly F _{SP1}
d _{SP2}	posunutí při působení síly F _{SP2}
k _{OTP}	statická tuhost dle OTP
F ₂₀	zatěžovací síla 20 kN statické zkoušky dle OTP

F_{70}	zatěžovací síla 70 kN statické zkoušky dle OTP
d_{OTP}	stlačení podložky při statické zkoušce dle OTP
d_{20}	posunutí při působení síly F_{20}
d_{70}	posunutí při působení síly F_{70}