



F6

**Fakulta dopravní
Katedra dopravní telematiky**

Úsekové hodnocení geometrie koleje v kontextu přípravy a realizace VRT

Václav Koleník

2024



K620..... Ústav dopravní telematiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Václav Koleník

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Úsekové hodnocení geometrie koleje v kontextu
přípravy a realizace VRT**

Název tématu (anglicky): Track Geometry Quality Evaluation in the Context of High-Speed Lines Developmen

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Proveďte rešerši aktuálních postupů úsekového hodnocení geometrie koleje v ČR i zahraničí
- Zhodnoťte používané postupy aplikováním nad dostupnými daty
- Formulujte doporučení pro zkvalitnění postupů úsekového hodnocení koleje vzhledem k přípravě a realizaci vysokorychlostních tratí v ČR



Rozsah grafických prací: standardní, dle potřeby


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)


Seznam odborné literatury: normy ČSN, EN vztahující se ke GPK
předpis SŽ S2/4

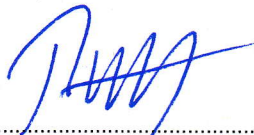
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **27. září 2023**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **5. srpna 2024**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky




prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


Václav Koleník
jméno a podpis studenta

V Praze dne 27. září 2023

Poděkování / Prohlášení

Děkuji doc. Ing. Pavlu Hruběšovi, Ph.D. za odborné vedení a čas strávený při konzultacích, jež usměrňovaly a motivovaly mou práci.

Dále děkuji Úseku diagnostiky tratí Správy železnic za poskytnutí dat a spolupráci.

Děkuji také své rodině za podporu v průběhu tvorby práce.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu.

V Praze dne 3. června 2024

.....

Abstrakt / Abstract

Bakalářská práce vznikla na Fakultě dopravní ČVUT v Praze v rámci studijního programu Dopravní systémy a technika ve spolupráci se Správou železnic. Práce se zabývá tématem geometrické polohy koleje z hlediska měření a vyhodnocování. V práci jsou popsány metody a principy vybraných systémů hodnocení. Součástí je také návrh dílčí úpravy současného systému hodnocení používaného v České republice.

Klíčová slova: geometrická poloha koleje, známka kvality, rychlostní pásmo, lokální závady, hodnocení

The bachelor thesis was prepared at the Faculty of Transportation Sciences Czech Technical University in Prague within the study program Transportation Systems and Technology in cooperation with the Správa železnic. The thesis deals with the topic of the track geometry from the point of view of measurement and evaluation. The work describes the methods and principles of selected evaluation systems. It also includes a proposal for a partial modification of the current evaluation system used in the Czech Republic.

Keywords: track geometry quality, track quality classes, speed classes, isolated defects, assessment

Title translation: Track geometry quality evaluation in the context of high-speed lines development

/ Obsah

1 Úvod	1
2 Geometrické parametry koleje	2
2.1 Normy a předpisy	2
2.2 Měření geometrických parametrů koleje	3
2.3 Měřicí prostředky	5
3 Hodnocení geometrických parametrů koleje	6
3.1 Principy metod hodnocení	6
3.2 Přehled používaných metod hodnocení	9
4 Návrh úpravy koeficientů transformační funkce	13
5 Vyhodnocení datových souborů a návrh koeficientů transformační funkce	15
5.1 Výsledky zpracování prvního souboru	15
5.2 Výsledky zpracování druhého souboru	16
5.3 Návrh koeficientů transformační funkce	17
5.4 Srovnání mezních známek kvality s ČSN EN 13848-6	23
6 Závěr	25
Literatura	27
A Seznam zkratk	29
B Histogramy SDO a ZK	30

Tabulky / Obrázky

5.1	Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus SK	15
5.2	Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus RK	15
5.3	Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus PK	15
5.4	Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus VK	15
5.5	Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus SK	16
5.6	Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus RK	16
5.7	Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus PK	16
5.8	Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus VK	16
5.9	Návrh nových koeficientů	17
5.10	Srovnání známky kvality s kvantily pro SK dle stávajících koeficientů	17
5.11	Srovnání známky kvality s kvantily pro SK dle navržených koeficientů	17
5.12	Srovnání známky kvality s kvantily pro RK dle stávajících koeficientů	17
5.13	Srovnání známky kvality s kvantily pro RK dle navržených koeficientů	18
5.14	Srovnání známky kvality s kvantily pro PK dle stávajících koeficientů	18
5.15	Srovnání známky kvality s kvantily pro RK dle navržených koeficientů	18
5.16	Srovnání známky kvality s kvantily pro VK dle stávajících koeficientů	18
5.17	Srovnání známky kvality s kvantily pro VK dle navržených koeficientů	18
5.18	Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO SK na ZK pro RP1 dle stávajících a navržených koeficientů	23
2.1	Konstrukční a geometrické uspořádání koleje	3
5.1	Transformační funkce rozchodu koleje dle rychlostních pásem	19
5.2	Transformační funkce směru koleje dle rychlostních pásem ..	20
5.3	Transformační funkce převýšení koleje dle rychlostních pásem	21
5.4	Transformační funkce výšky koleje dle rychlostních pásem ..	22
B.1	Soubor 1: Směrodatné odchylky rozchodu koleje dle rychlostních pásem	31
B.2	Soubor 1: Směrodatné odchylky směru koleje dle rychlostních pásem	32
B.3	Soubor 1: Směrodatné odchylky převýšení koleje dle rychlostních pásem	33
B.4	Soubor 1: Směrodatné odchylky výšky koleje dle rychlostních pásem	34
B.5	Soubor 1: Histogramy známek kvality rozchodu koleje dle rychlostních pásem	35
B.6	Soubor 1: Histogramy známek kvality směru koleje dle rychlostních pásem	36
B.7	Soubor 1: Histogramy známek kvality převýšení koleje dle rychlostních pásem	37
B.8	Soubor 1: Histogramy známek kvality výšky koleje dle rychlostních pásem	38
B.9	Soubor 2: Směrodatné odchylky rozchodu koleje dle rychlostních pásem	39
B.10	Soubor 2: Směrodatné odchylky směru koleje dle rychlostních pásem	40
B.11	Soubor 2: Směrodatné odchylky převýšení koleje dle rychlostních pásem	41

5.19	Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO SK na ZK pro RP2 dle stávajících a navržených koeficientů	23	B.12	Soubor 2: Směrodatné odchylky výšky koleje dle rychlostních pásem.....	42
5.20	Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO SK na ZK pro RP3 dle stávajících a navržených koeficientů	23	B.13	Soubor 2: Histogramy známek kvality rozchodu koleje dle rychlostních pásem	43
5.21	Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO VK na ZK pro RP1 dle stávajících a navržených koeficientů	23	B.14	Soubor 2: Histogramy známek kvality směru koleje dle rychlostních pásem	44
5.22	Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO VK na ZK pro RP2 dle stávajících a navržených koeficientů	24	B.15	Soubor 2: Histogramy známek kvality převýšení koleje dle rychlostních pásem	45
5.23	Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO VK na ZK pro RP3 dle stávajících a navržených koeficientů	24	B.16	Soubor 2: Histogramy známek kvality výšky koleje dle rychlostních pásem	46

Kapitola 1

Úvod

K tématu hodnocení kvality geometrických parametrů koleje jsem se dostal v prosinci 2022 skrze nabídku na rozvedení tohoto tématu v rámci projektové výuky. Následně jsem se podílel na zpracování dopravně inženýrské studie Úsekové hodnocení koleje. V návaznosti na tuto studii jsem ji ve spolupráci se Správou železnic rozšířil do podoby této bakalářské práce.

Rozvoj železničních tratí ve formě výstavby vysokorychlostních tratí je podstatným faktorem pro zlepšení konkurenceschopnosti a efektivity železniční dopravy. Modernizace stávajících tratí a výstavba nových úseků jsou nezbytnou součástí rozvoje dopravní infrastruktury, jehož cílem by mělo být uspokojit rostoucí poptávku po přepravě zboží a osob. Modernizace železniční infrastruktury není jen otázkou dopravního inženýrství, ale ovlivňuje také množství navazujících oborů od ekonomiky až po ochranu životního prostředí.

Kvalita geometrické polohy kolejí je důležitým faktorem pro bezpečnost a komfort železniční dopravy. Z hlediska bezpečnosti jde především o riziko vykolejení drážního vozidla. Sledování a měření geometrické polohy kolejí jsou tedy zásadní pro identifikaci potenciálně nebezpečných situací a prevenci nehod. Úsekové hodnocení, jako jedna z hlavních metod, umožňuje systematické zhodnocení stavu celého úseku trati a poskytuje důležité informace pro plánování, provádění a určování nákladnosti údržby. Ve spojení s hodnocením lokálních závad je podstatným faktorem při zajištění funkčnosti a bezpečnosti železniční infrastruktury. S ohledem na plánovaný rozvoj železničních tratí v České republice je nezbytné zajistit, aby používaná řešení byla funkční, spolehlivá a efektivní.

Cílem první části analytické části práce bylo popsat geometrické parametry koleje z hlediska norem a předpisů, definování parametrů, provozních odchylek, rychlostních pásem, vlnových délek a měřících prostředků. Cílem druhé části analytické části bylo popsat hodnocení geometrických parametrů koleje v oblasti principu metod hodnocení a vypracovat přehled konkrétních používaných metod hodnocení v České republice a zahraničí.

Cílem části výpočetní bylo zpracování datových souborů a návrh úprav stávajícího systému vyhodnocování známek kvality geometrické polohy koleje s ohledem na požadovanou funkčnost a technické normy. Hlavním výstupem výpočetní části je návrh nových koeficientů pro stávající transformační funkci a jejich porovnání s koeficienty stávajícími a s limitními hodnotami směrodatných odchylek dle ČSN EN 13848-6.

Kapitola 2

Geometrické parametry koleje

V této kapitole jsem se v úvodní části zabýval normami a předpisy. Normy mají určitý význam z hlediska nastavení obecného rámce pravidel a předpisy tato pravidla dále konkretizují. V další části jsem z daných norem zpracoval základní informace o měření GPK týkající se definice parametrů, odchylek, rychlostních pásem a vlnových délek. V poslední části kapitoly jsem se zaměřil na používané měřicí prostředky v České republice využívané Správou železnic.

2.1 Normy a předpisy

Problematikou popisu geometrie koleje, měřících systémů, hladiny kvality geometrie koleje a stanovení kvality geometrie koleje se v rámci České republiky zabývají normy ČSN 73 6360 a ČSN EN 13848.

Norma ČSN 73 6360 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha je členěna na dvě části. Část 1: Projektování určuje požadavky na geometrické parametry koleje z hlediska návrhu koleje železničních drah normálního rozchodu 1435 mm do rychlosti 360 km/h [1]. Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba stanovuje požadavky na stavebně technické parametry konstrukčního a geometrického uspořádání koleje a její prostorovou polohu pro stavbu a přejímku, provoz a údržbu koleje železničních drah normálního rozchodu 1435 mm do rychlosti 300 km/h [2].

Norma ČSN EN 13848 Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje je členěna na šest částí. Část 1: Popis geometrie koleje definuje hlavní geometrické parametry koleje a specifikuje minimální požadavky na měření a metody analýzy [3]. Část 2: Měřicí systémy – Měřicí vozidla určuje minimální požadavky pro principy měření a měřicí zařízení, aby byly vytvářeny porovnatelné výsledky při měření jedné trati [4]. Část 3: Měřicí systémy – Stroje pro stavbu a údržbu koleje stanovuje minimální požadavky pro měřicí systémy umístěné na strojích pro stavbu a údržbu koleje [5]. Část 4: Měřicí systémy – Lehké kolejové prostředky a ruční zařízení definuje minimální požadavky pro měřicí systémy umístěné na lehkých kolejových prostředcích a manuálně ovládaných zařízeních [6]. Část 5: Hladiny kvality geometrie koleje – Běžná kolej a kolejová rozvětvení určuje minimální požadavky pro hladiny kvality geometrie koleje a specifikuje mezní hodnoty s ohledem na bezpečnost pro každý parametr [7]. Část 6: Stanovení kvality geometrie koleje charakterizuje kvalitu geometrie koleje na základě parametrů definovaných v normě EN 13848–1 a specifikuje různé třídy geometrie koleje. [8].

Měření a vyhodnocování geometrické kvality koleje se zabývají také vnitřní předpisy Správy železnic.

Vnitřní předpis Správy železnic SŽ S2/3 Organizace a provádění prohlídek a měření na dráze celostátní a drahách regionálních stanovuje obecné postupy pro organizaci, provádění a evidenci měření [9].

Vnitřní předpis Správy železnic SŽ S2/4 Zajišťování diagnostiky železničního svršku a spodku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem obsahuje čtyři části zabýva-

jící se obecnými ustanoveními, měřicími prostředky a organizací práce, hodnocením výsledků měření, výstupními sestavami měřících prostředků a jejich využití [10].

2.2 Měření geometrických parametrů koleje

Definice parametrů

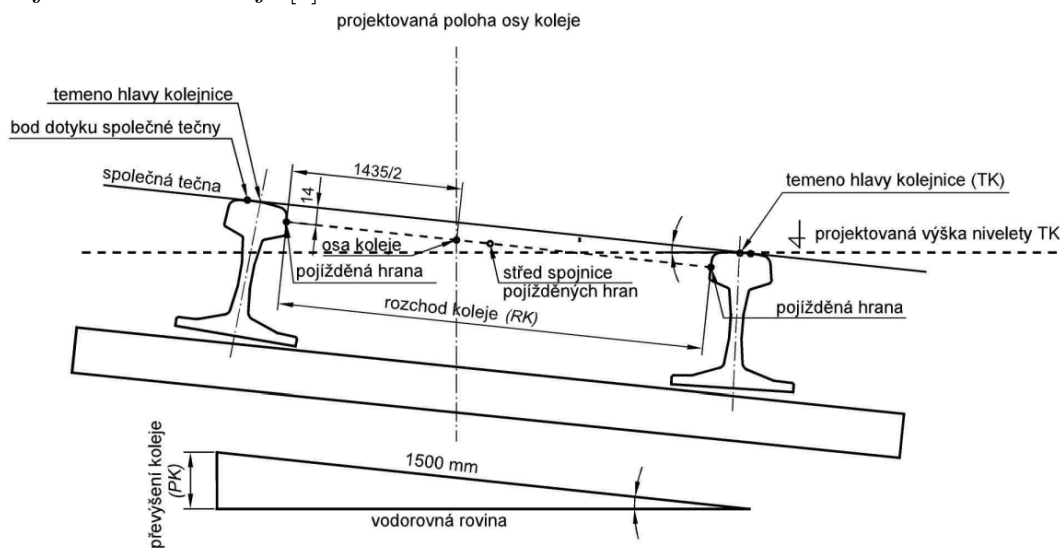
Geometrické parametry koleje se dělí do tří skupin – konstrukční uspořádání koleje, geometrické uspořádání koleje a prostorová poloha koleje [4].

Mezi parametry konstrukčního uspořádání koleje patří směr koleje v geometrické ose, směr kolejnicového pasu, podélná výška koleje v ose, podélná výška kolejnicového pasu a podélný sklon koleje [4].

Mezi parametry geometrického uspořádání koleje patří rozchod koleje, převýšení koleje, zborcení koleje a sklon vzestupnice [4].

Mezi veličiny prostorové polohy koleje patří polohové souřadnice osy koleje a nadmořská výška koleje [4].

Měřenými parametry konstrukčního a geometrického uspořádání při přejímce stavebních prací a za provozu jsou směr koleje v geometrické ose, směr kolejnicového pasu, podélná výška koleje v ose, rozchod koleje, podélná výška kolejnicového pasu, převýšení koleje a zborcení koleje [4].



Obrázek 2.1. Konstrukční a geometrické uspořádání koleje [4]

Směr koleje v geometrické ose je půdorysný průmět středů příčných spojnic pojížděných hran protilehlých kolejnicových pasů [4].

Směr kolejnicového pasu je půdorysný průmět pojížděné hrany kolejnicového pasu [4].

Podélná výška koleje v ose je bokorysný průmět středů spojnic temen hlav protilehlých kolejnicových pasů [4].

Podélná výška kolejnicového pasu je bokorysný průmět temene kolejnicového pasu [4].

Rozchod koleje je nejmenší vzdálenost mezi kolmicemi ke spojnicí temen kolejnicových pasů dotýkajícími se bočních pojížděných ploch do maximální hloubky až 14 mm od spojnice temen kolejnicových pasů [4].

Převýšení koleje je výškový rozdíl kolejnicových pasů daný úhlem, který svírá spojnice temen protilehlých kolejnicových pasů a vodorovná rovina. Udává se délkou svíslé odvěsny pravoúhlého trojúhelníka, jehož přepona má délku 1500 mm [4].

Zborcení koleje je změna převýšení koleje na zvolené měřické základně, vyjádřena hodnotou mm/m [4].

Stavební, provozní a mezní provozní odchylky

Stavební odchylka je odchylka od projektované nebo jmenovité hodnoty geometrické veličiny při přejímce prací v koleji [4].

Provozní odchylka je odchylka od projektované nebo předepsané hodnoty geometrické veličiny na provozované trati. Provozní odchylka je definována ve dvou stupních – mez sledování a mez zásahu [4].

Mez sledování je hodnota, při jejímž překročení je třeba stav geometrických parametrů koleje posoudit a vzít v úvahu při plánování udržovacích prací [4].

Mez zásahu je hodnota, při jejímž překročení je třeba provést udržovací práce tak, aby před příští kontrolou nedošlo k překročení mezní provozní odchylky [4].

Mezní provozní odchylka je odchylka od projektované nebo předepsané hodnoty geometrické veličiny na provozované trati, která nesmí být překročena. Mezní provozní odchylka je definována v jednom stupni – mez bezodkladného zásahu [4].

Mez bezodkladného zásahu je hodnota, při jejímž překročení je nutné provést bezodkladné opatření k zajištění bezpečnosti provozu [4].

Rychlostní pásma

Rychlostní pásmo je pásmo traťových rychlostí rozhodné pro hodnocení geometrické kvality koleje. Určující charakteristikou pro rychlostní pásmo je projektovaná traťová rychlost [4].

Rychlostní pásma jsou rozlišena do šesti skupin:

$$\begin{aligned} \text{RP0} &\leq 60 \text{ km/h} \\ 60 \text{ km/h} &< \text{RP1} \leq 80 \text{ km/h} \\ 80 \text{ km/h} &< \text{RP2} \leq 120 \text{ km/h} \\ 120 \text{ km/h} &< \text{RP3} \leq 160 \text{ km/h} \\ 160 \text{ km/h} &< \text{RP4} \leq 230 \text{ km/h} \\ 230 \text{ km/h} &< \text{RP5} \leq 300 \text{ km/h} \end{aligned}$$

Rozdělení do rychlostních pásem se využívá pro hodnocení lokálních závad pomocí stanovení jednotlivých provozních a mezních provozních odchylek pro jednotlivá rychlostní pásma. V úsekovém hodnocení pomocí celkové známky kvality se rychlostní pásma vyskytují v podobě transformačních koeficientů.

Vlnové délky

Rozsah vlnových délek je prostorová oblast zabraná složkami parametrů [4].

Vlnové délky jsou uvažovány ve třech rozsazích:

$$\begin{aligned} 3 \text{ m} &< \text{D1} \leq 25 \text{ m} \\ 25 \text{ m} &< \text{D2} \leq 70 \text{ m} \\ 70 \text{ m} &< \text{D3} \leq 150 \text{ m} \end{aligned}$$

Pro lepší detekci krátkovlnných závad je zavedeno pásmo D0:

$$1 \text{ m} < \text{D0} \leq 5 \text{ m}$$

Parametry rozchod koleje, převýšení koleje a zborcení koleje mají smysl v celém pásmu vlnových délek [4].

Směr koleje v geometrické ose a podélná výška koleje v ose se vyhodnocují ve vlnovém pásmu D2 pro RP3 až RP5 [4].

Směr kolejnicového pasu a podélná výška kolejnicového pasu se vyhodnocují ve vlnovém pásmu D1 pro RP0 až RP5 [4].

2.3 Měřicí prostředky

Měřicí prostředky geometrických parametrů koleje se rozdělují z pohledu rozsahu záznamu dat na prostředky s bodovým záznamem a na prostředky s kontinuálním záznamem, rozdělení z pohledu zatížení koleje se dělí na prostředky měřící bez zatížení a prostředky měřící pod zatížením [10].

Správa železnic využívá pro měření geometrických parametrů koleje s kontinuálním záznamem měřicí vůz pro železniční svršek (MVŽSv), měřicí vůz pro železniční svršek 2 (MVŽSv2), měřicí drezínu (MD), měřicí drezínu 2 (EM100), malou měřicí drezínu 1 (MMD.1), malou měřicí drezínu 2 (MMD.2), měřicí vozík KRAB (KRAB) a elektronické pojízdné rozchodky [10].

Měřicí vůz pro železniční svršek měří geometrické parametry koleje (rozchod, směr, křivost, převýšení, podélnou výšku koleje železničního svršku), příčný profil kolejnic a pořizuje čelní fotografii (každých 20m). Používá se na celostátních tratích, koridorových tratích, vybraných regionálních tratích ($v > 60$ km/h) a hlavních průjezdných kolejích v železničních stanicích. Měření je prováděno kontinuálně a bezkontaktně laserem. Četnost měření je 1 až 3krát za rok dle rychlostního pásma [10].

Měřicí vůz pro železniční svršek 2 měří geometrické parametry koleje, příčný profil kolejnic, mikrogeometrii kolejnic, průjezdný průřez včetně příčného profilu šterkového lože, zrychlení na ložiskových domcích a pořizuje čelní fotografii (každých 20 m). Používá se na celostátních tratích, koridorových tratích a hlavních průjezdných kolejích v železničních stanicích. Měření je prováděno kontinuálně a bezkontaktně optickými jednotkami. Četnost měření je 1 až 3krát za rok dle rychlostního pásma [10].

Měřicí drezína měří geometrické parametry koleje (rozchod, směr, křivost, převýšení, podélnou výšku koleje železničního svršku), příčný profil kolejnic – ojetí koleje a pořizuje čelní fotografii (každých 20 m). Používá se na staničních kolejích. Měření je prováděno kontinuálně a bezkontaktně laserem. Četnost měření je 1 až 2krát za rok dle rychlostního pásma [10].

Měřicí drezína 2 (speciální hnací vozidlo pro diagnostiku železničního svršku) měří geometrické parametry koleje (rozchod, směr, křivost, převýšení, podélnou výšku koleje železničního svršku), příčný profil kolejnic – ojetí koleje a pořizuje čelní fotografii (každých 20 m). Používá se na regionálních tratích, mimořádně na celostátních a v železničních stanicích na odbočných kolejích na regionální tratě. Měření je prováděno kontinuálně a bezkontaktně optickými jednotkami. Četnost měření je 1 až 2krát za rok dle rychlostního pásma [10].

Malé měřicí drezíny měří geometrické parametry koleje (rozchod, směr, křivost, převýšení, podélnou výšku koleje železničního svršku) a pořizují čelní fotografii (každých 20 m). Používají se na staničních kolejích celostátních tratí včetně přilehlých výhybek. Měření je prováděno kontaktně. Četnost měření je jednou za 2, 3 nebo 5 let [10].

Měřicí vozík KRAB měří geometrické parametry koleje (rozchod, směr, křivost, převýšení, podélnou výšku koleje železničního svršku). Měření je prováděno mechanickým snímáním pomocí kontaktních čidel [10].

Kapitola 3

Hodnocení geometrických parametrů koleje

V první části kapitoly jsem se zabýval sumarizací postupů na základě přístupu k vyhodnocení měřených dat. Existuje mnoho přístupů k vyhodnocování kvality GPK a tento přehled má posloužit k jejich porovnání. V druhé části kapitoly jsem se věnoval zpracování přehledu používaných metod s cílem shromáždit používané postupy vyhodnocování kvality geometrické polohy koleje z České republiky a zahraničí.

3.1 Principy metod hodnocení

Metody založené na směrodatné odchylce

Směrodatná odchylka jednotlivých parametrů je nejčastěji používaná metoda pro vyhodnocení kvality GPK v Evropě. Vyhodnocování směrodatné odchylky pro údržbu je zpravidla prováděno na úsecích délky 200 m, ale lze vyhodnocovat i na úsecích délky 1 km, popřípadě v rozsahu celé trasy nebo celé sítě. Stanovené úseky mohou být pevně určené nebo klouzavé. Sledovanými parametry jsou rozchod koleje, zborcení koleje, střední hodnota rozchodu koleje na délce 100 m, podélné výšky kolejnicových pasů, podélná výška koleje v ose, směry kolejnicových pasů a směr koleje v geometrické ose koleje [8].

Obebný výpočet směrodatné odchylky:

$$SDO = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

n – počet měření
 x_i – odchylka od střednice

Metody založené na hodnocení lokálních závad

Hodnocení lokálních závad je používáno jak pro zjištění rizika vykolejení železničního vozidla, tak pro vyhodnocení kvality GPK. Sledovanými parametry jsou rozchod koleje, zborcení koleje, střední hodnota rozchodu koleje na délce 100 m, podélné výšky kolejnicových pasů, podélná výška koleje v ose, směry kolejnicových pasů a směr koleje v geometrické ose koleje. Vyhodnocení probíhá pomocí stanovených hodnot provozní (mez sledování, mez zásahu) a mezní provozní odchylky (mez bezodkladného zásahu) [8].

Metody založené na kombinaci parametrů

Metody založené na kombinaci parametrů se dělí na kombinace směrodatných odchylek, směrodatné odchylky kombinací parametrů a metodu akcelerace hmotného bodu [8].

Metoda kombinace směrodatných odchylek má za cíl vytvořit jeden parametr, kterým lze charakterizovat kvalitu GPK jednotlivých úseků pro jednotlivá rychlostní pásma. Pro stanovení se využívá odmocnina ze součtu čtverců kombinovaných parametrů. Pro jednotlivé parametry jsou přiřazeny váhové koeficienty. Tyto koeficienty lze měnit v závislosti na účelu daného hodnocení. Výsledné hodnoty je možno transformovat do bezrozměrného čísla reprezentujícího kvalitu GPK bez nutnosti kategorizace do rychlostních pásem [8].

Obecný výpočet kombinované směrodatné odchylky:

$$KoSDO = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i SDO_i^2}$$

n – počet měření

w – váhy pro jednotlivé parametry

SDO – směrodatné odchylky jednotlivých parametrů

Metoda směrodatných odchylek kombinací parametrů se využívá v případě, kdy vyhodnocení pomocí kombinace parametrů poskytuje kvalitnější výsledky v porovnání s vyhodnocováním pouze jednotlivého parametru [8].

Metoda akcelerace hmotného bodu zjednodušuje vozidlo na hmotný bod v těžišti vozidla, který se pohybuje v ose železniční trati. Bod se pohybuje maximální povolenou rychlostí pro daný úsek. Nedokonalosti železniční trati způsobují zrychlení ve vodorovném a svislém směru. K vyhodnocení kvality GPK dochází pomocí vektorového součtu jednotlivých zrychlení [8].

Zrychlení ve směru osy y :

$$a_y = c \cdot v^n (\overline{SK}'' - \Psi \cdot \overline{VK}'' + z \cdot (\overline{VK}''' - \Psi''))$$

Zrychlení ve směru osy z :

$$a_z = c \cdot v^n (\overline{VK}'' + \Psi \cdot \overline{SK}'' + z \cdot (\Psi'^2 + \overline{VK}''^2))$$

Praktické využívání této metody prokázalo, že vzorce pro zrychlení lze zjednodušit.

Zrychlení ve směru osy y :

$$a_y = c \cdot v^n (\overline{SK}'' + z \cdot (\overline{VK}''' - \Psi''))$$

Zrychlení ve směru osy z :

$$a_z = c \cdot v^n \overline{VK}''$$

v – maximální traťová rychlost

\overline{VK} – výška koleje

\overline{SK} – směr koleje

z – výška těžiště

n – exponent

c – koeficient

$$\Psi = \frac{VL - VP}{d}$$

VL – výška levého kolejnicového pasu

VP – výška pravého kolejnicového pasu

d – délka spojnice temen kolejnicových pasů

Výsledný hodnotící parametr zrychlení:

$$a_{yz} = \sqrt{a_y^2 + a_z^2}$$

a_y – zrychlení ve směru osy y

a_z – zrychlení ve směru osy z

Parametr zrychlení lze použít v absolutní hodnotě nebo jako směrodatnou odchylku. Pro vyhodnocování kvality GPK se doporučuje stanovovat parametr zrychlení na traťových úsecích o délce 100 m [8].

Výhodou metody akcelerace hmotného bodu je absence rychlostních pásem z důvodu závislosti výsledného zrychlení na traťové rychlosti, tudíž pro větší traťové rychlosti je potřeba dosáhnout menší míry nedokonalosti železniční trati při stejné hodnotě parametru zrychlení. Pro stanovení kvality GPK je tedy potřeba pouze jedna mezní hodnota pro všechny traťové rychlosti. Dalšími výhodami jsou nezávislost metody na vozidle a lepší korelace se silami kolo-kolejnice než mezi GPK a silami kolo-kolejnice [8].

Metody založené na odezvě vozidla

Analýza odezvy modelu vozidla popisuje vztah mezi kvalitou GPK a odezvami drážních vozidel při různých rychlostech. Odezva vozidla je reprezentována silami kolo-kolejnice a zrychlením podvozku a karoserie drážního vozidla. Metoda zohledňuje dopad na odezvu vozidla z důvodu posloupnosti lokálních závad, kombinaci závad na jednom místě a návrhové prvky železničních tratí. Při použití této metody je třeba dbát na konzistenci mezi doménou vlnových délek a frekvenčním pásmem odezvy vozidla. Výstupem této metody jsou jednotlivé parametry jako směr koleje, výška koleje a zborcení koleje [8].

Analýzu lze provádět také přímým měřením odezvy vozidla. Metoda se nepoužívá pro určení kvality GPK, ale jako indikátor bezpečnosti a kvality jízdy. Při využití se měří zrychlení podvozku a vozové skříně v příčném a vertikálním směru. Lze také provést měření sil kolo-kolejnice. Pro přímé měření je potřeba využívat vozidla, která se běžně používají na posuzovaných tratích. Dále je potřeba provádět měření při traťové rychlosti s odchylkou $\pm 10\%$, zohlednit stav povrchu kolejnice a zaznamenat polohu vozidla [8].

Metody založené na výkonové spektrální hustotě

Výkonová spektrální hustota udává energii signálu ve vztahu k frekvenci pro daný geometrický parametr koleje na určitém úseku železniční trati [8].

Výkonová spektrální hustota se určí podle vztahu:

$$S_{xx} = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda} \overline{X(v)} X(v)$$

λ – vlnová délka
 v – příslušná prostorová frekvence
 $X(v) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda) e^{-i2\pi v \lambda} d\lambda$ – Fourierova transformace $x(\lambda)$
 $\overline{X(v)}$ – komplexně sdružené číslo $X(v)$

Výkonová spektrální hustota bývá stanovována pro úseky o délce 5 km s největší možnou mírou homogenity daného úseku z hlediska stavebního uspořádání železniční tratě. Pro měření by mělo být použito velké škály vlnových délek. Výhodou je lepší zohlednění opakujících se defektů (například styky kolejnic) [8].

Známky kvality železničních tratí

Známky kvality železničních tratí jsou zavedeny z důvodu lepší přehlednosti a následného jednoduššího vyhodnocování. Využívány jsou pro plánování a vyhodnocování údržby správcem infrastruktury, sledování kvality železniční sítě z důvodu smluvních závazků a pro návrh a provoz drážních vozidel [8].

Obecné dělení známek kvality podle četnosti rozdělení hodnot:

- Známka 1 (Class A) – lepší než 10 %
- Známka 2 (Class B) – 10 % až 30 %
- Známka 3 (Class C) – 30 % až 70 %
- Známka 4 (Class D) – 70 % až 90 %
- Známka 5 (Class E) – horší než 90 %

Stanovení jednotlivých známek kvality probíhá pro každé příslušné rychlostní pásmo [8].

3.2 Přehled používaných metod hodnocení

Známka kvality

V České republice Správa železnic používá pro vyhodnocení geometrické kvality koleje výpočet založený na směrodatné odchylce jednotlivých měřených parametrů pro úseky tratí o délce 200 m. Sledovanými parametry jsou rozchod koleje, směr koleje v ose, převýšení koleje a podélná výška koleje v ose [10].

Výpočet směrodatné odchylky:

$$SDO = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

n – počet měření

x_i – odchylka od střednice

Ze znalosti směrodatné odchylky se pomocí transformační funkce určí známka kvality jednotlivých parametrů.

Výpočet známky kvality:

$$ZK = 6 \cdot (1 - \exp(-SDO^m/b))$$

b – koeficient pro jednotlivé parametry a rychlostní pásma

m – koeficient pro jednotlivé parametry a rychlostní pásma

Následně je z nich stanovena celková známka kvality využitím hybridního kritéria.

Výpočet celkové známky kvality:

$$CZK = \langle k \cdot \max\{(w_{SK} \cdot ZK_{SK} + w_{RK} \cdot ZK_{RK}), (w_{PK} \cdot ZK_{PK} + w_{VK} \cdot ZK_{VK})\} \rangle^q$$

w – váhy pro jednotlivé parametry

k – koeficient pro rychlostní pásma

q – koeficient pro rychlostní pásma

Určena je též celková známka podbíjení, která se od celkové známky kvality liší nezahrnutím parametru rozchodu koleje do výpočtu.

Výpočet celkové známky podbíjení:

$$ZP = \langle k \cdot \max\{(w_{SK} \cdot ZK_{SK}), (w_{PK} \cdot ZK_{PK} + w_{VK} \cdot ZK_{VK})\} \rangle^q$$

w – váhy pro jednotlivé parametry

k – koeficient pro rychlostní pásma

q – koeficient pro rychlostní pásma

Nevýhodou řešení užívaného Správou železnic je výskyt koeficientů, které zneprůhledňují výpočet a nereflktování větší závažnosti záporné odchylky rozchodu koleje od odchylky kladné.

Index kvality trati TUG_TQI

Index kvality trati TUG_TQI byl vyvinut na Technické univerzitě ve Štýrském Hradci za účelem eliminovat nedostatky existujících metod vyhodnocování kvality GPK.

Postup vyhodnocení pomocí TUG_TQI spočívá v pěti krocích. V prvním kroku se rozdělí signál z měření rozchodu koleje na kladné a záporné hodnoty z důvodu odlišné závažnosti daných situací. Dále jsou všechny signály normalizovány dle mezní hodnoty jednotlivých parametrů. Normalizace se provádí vydělením naměřené hodnoty hodnotou mezní. Normalizací se dosáhne stavu, kdy není třeba váhových indexů. Z normalizovaných dat se určuje fiktivní prostorová křivka pro všechny geometrické parametry koleje [11].

Výpočet délky prostorové křivky:

$$L_i = \sum_{j=1}^{m-1} \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{i(j+1)} - y_{ij})^2}$$

i – parametr geometrie koleje

L_i – délka prostorové křivky parametru i

j – index bodu měření

m – počet uvažovaných bodů měření

x – poloha měřeného bodu j

y – normalizovaná hodnota parametru i na pozici j

Výpočet indexu kvality pro jednotlivé parametry:

$$TQI_i = \left(\frac{L_i}{L_0} - 1 \right) \cdot 10^8$$

TQI_i – index kvality pro jednotlivé geometrické parametry koleje

L_i – délka prostorové křivky parametru i

L_0 – teoretická délka měřeného úseku

Výpočet celkového indexu kvality pro GPK:

$$\frac{TUG_{TQI} = \sum_{i=1}^n TQI_i}{n}$$

TUG_{TQI} – celkový index kvality GPK

TQI_i – index kvality pro jednotlivé geometrické parametry koleje

Výhodou indexu kvality trati TUG_TQI je rozdělení úseků železničních tratí do plovoucích intervalů, z čehož vychází citlivější kopírování průběhu naměřených hodnot a tím lepší indikace lokálních závad. Dále pak započítání záporného rozchodu koleje a nepřítomnost váhových koeficientů [11].

SD index

SD index je index založený na stanovení jednotlivých směrodatných odchylek pro parametry: výška pravého kolejnicového pasu, výška levého kolejnicového pasu, směr pravého kolejnicového pasu, směr levého kolejnicového pasu, rozchod koleje, převýšení koleje a zborcení koleje. Tento index je nejpoužívanější na světě (např. Velká Británie, Austrálie). Délky měřených traťových úseků se liší dle států [12].

Směrodatná odchylka jednotlivých parametrů:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

n – počet měření

x_{ij} – hodnota měření

\bar{x}_i – aritmetický průměr

Čínský index kvality trati

Čínský index kvality trati spočívá v sumarizaci jednotlivých hodnot směrodatných odchylek pro parametry: výška pravého kolejnicového pasu, výška levého kolejnicového pásu, směr pravého kolejnicového pasu, směr levého kolejnicového pasu, rozchod koleje, převýšení koleje a zborcení koleje. Index uvažuje délky traťových úseků na 200 m pro konvenční dráhy a 500 m pro dráhy vysokorychlostní [12].

Směrodatná odchylka jednotlivých parametrů:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

n – počet měření

x_{ij} – hodnota měření

\bar{x}_i – aritmetický průměr

Čínský index kvality trati:

$$TQI = \sum_{i=1}^7 \sigma_i$$

σ_i – směrodatná odchylka jednotlivých parametrů

Q Index

Q Index je index kvality trati používaný v Nizozemsku. Princip indexu spočívá v porovnání směrodatných odchylek jednotlivých parametrů s jejich 80. percentilem na stupnici 0 až 10, přičemž se stoupající hodnotou stoupá kvalita trati. Směrodatné odchylky jsou počítány pro úseky o délce 200 m a vyhodnocení indexu probíhá na úsecích délky od 5 do 10 km [12].

Q Index:

$$N = 10 \cdot 0,675^{\sigma_i / \sigma_i^{80}}$$

σ_i – směrodatná odchylka jednotlivých parametrů

σ_i^{80} – percentil 80 směrodatných odchylek jednotlivých parametrů

P Index

P Index je systém vyhodnocování kvality GPK používaný v Japonsku. Index je založen na poměru naměřených hodnot s odchylkou větší než ± 3 mm ku počtu všech naměřených hodnot v rámci jednoho traťového úseku o délce 100 nebo 500 m. Se stoupající hodnotou indexu úroveň kvality GPK klesá [12].

CN Track quality Index

CN Track quality Index je používaný v Kanadě. Vyhodnocení spočívá v průměru jednotlivých přepočítaných směrodatných odchylek pro parametry: výška pravého kolejnicového pasu, výška levého kolejnicového pasu, směr pravého kolejnicového pasu, směr levého kolejnicového pasu, rozchod koleje a převýšení koleje. Konstanta C zohledňuje typ železniční trati. Se stoupající hodnotou indexu stoupá kvalita GPK [12].

CN Track quality Index:

$$TQI_i = 1000 - C \cdot \sigma_i^2$$

C – koeficient

σ_i – směrodatná odchylka jednotlivých parametrů

$$TQI = \frac{\sum_{i=1}^6 TQI_i}{6}$$

J Coefficient

J Coefficient je systém vyhodnocování kvality GPK v Polsku. Index je založen na průměru směrodatných odchylek výšky koleje v ose, směru koleje v ose, zborcení koleje a rozchodu koleje se snížením váhy směrodatné odchylky rozchodu koleje [13].

J Coefficient:

$$J = \frac{SD_z + SD_y + SD_w + 0,5 \cdot SD_e}{3,5}$$

SD_z – směrodatná odchylka výšky koleje v ose

SD_y – směrodatná odchylka směru koleje v ose

SD_w – směrodatná odchylka zborcení koleje

SD_e – směrodatná odchylka rozchodu koleje

Track Roughness Index

Track Roughness Index je index používaný ve Spojených státech amerických. Index se stanoví jako průměr druhých mocnin hodnot jednotlivých parametrů. Určován je pro výšku koleje v ose, směr koleje v ose, rozchod koleje a převýšení koleje [12].

Track Roughness Index:

$$TRI_i = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij})^2}{n}$$

x_{ij} – hodnota měření

n – počet měření

MDZ-A Number

Stanovení čísla MDZ se zakládá na reakci vozidla na kvalitu GPK [11].

MDZ-A Number:

$$MDZ = c \cdot \frac{1}{L} \cdot V^{0,65} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{L}{\Delta x}} \sqrt{(\Delta v')^2 + (\Delta h + \Delta \ddot{u})^2}$$

c – koeficient

L – délka traťového úseku

V – rychlost vozidla

$\Delta v'$ – odchylka výšky koleje v ose

Δh – odchylka směru koleje v ose

$\Delta \ddot{u}$ – odchylka převýšení koleje

Kapitola 4

Návrh úpravy koeficientů transformační funkce

V rámci práce jsem zpracoval dva datové soubory Správy železnic. Soubor 1 obsahuje starší naměřená data celé sítě z roku 2019 a Soubor 2 obsahující novější naměřená data celé sítě z roku 2024. Soubory obsahují pro jednotlivé body měření: identifikační údaje, hodnoty směrodatných odchylek pro jednotlivé parametry (rozchod, směr, převýšení a výška koleje), hodnoty známky kvality pro jednotlivé parametry, celkovou známku kvality a známku podbíjení.

Soubor 1 obsahuje hodnoty pro RP0, RP1, RP2 a RP3. Soubor 2 obsahuje hodnoty pro RP0, RP1, RP2, RP3 a RP4. Hodnoty pro RP4 nebyly vyhodnocovány z důvodu nedostatku měřených dat.

Vyhodnocování dat se zaměřuje na: vyhodnocení souborů, úpravu koeficientů pro známky kvality a porovnání známek kvality s ČSN EN 13848-6.

Vyhodnocení souborů spočívá ve zjištění podílu známek kvality větších než 4 a modů hodnot jednotlivých parametrů a RP. Dále je provedeno porovnání s požadavkem mít poměr známek kvality větších než 4 20 % a modus 2,5. Požadavek vychází ze zadání Správy železnic. Dále jsou pro oba soubory vytvořeny histogramy SDO a ZK pro jednotlivé parametry a RP. Histogramy ZK pro SK a VK obsahují vyznačené limitní hodnoty směrodatné odchylky dle ČSN EN 13848-6.

Úprava koeficientů stávající transformační funkce pro výpočet známky kvality je založena na požadavku umístění nejčastější hodnoty směrodatné odchylky do hodnoty známky kvality 2,5 a poměru hodnot se známkou kvality větší než 4 na 20 %. Pro úpravu koeficientů jsou použity hodnoty ze Souboru 2 vzhledem k větší aktuálnosti dat.

Výsledkem je následující soustava rovnic:

$$6 \cdot (1 - \exp(-(Q_{0,8}(SDO))^m/b)) = 4$$

$$6 \cdot (1 - \exp(-(Mod(SDO))^m/b)) = 2,5$$

SDO – směrodatná odchylka pro jednotlivé parametry a RP

$Q_{0,8}$ – kvantil 0,8

Mod – modus

m – neznámá *m*

b – neznámá *b*

Řešením soustavy rovnic jsou odhady transformačních koeficientů *b* a *m*. Pro porovnání stávajících a navržených transformačních koeficientů jsou vytvořeny grafy průběhů transformační funkce a tabulky kvantilů odpovídajících jednotlivým ZK.

Porovnání s ČSN EN 13848-6 spočívá v přepočtení limitních mezních hodnot směrodatné odchylky na ZK dle transformační funkce se stávajícími i nově navrženými koeficienty. Norma určuje limitní směrodatné odchylky pouze pro směr a výšku koleje, a proto jsou vyhodnocovány pouze tyto parametry.

Kapitola 5

Vyhodnocení datových souborů a návrh koeficientů transformační funkce

5.1 Výsledky zpracování prvního souboru

Hodnoty Souboru 1 obecně nesplňují požadavek na 20 % poměr známek větších než 4. Pro všechny parametry a RP vychází poměr menší než požadovaná hodnota. Nejvíce se tomuto požadavku přibližují hodnoty PK. Většina modů je menší než požadovaná hodnota 2,5. Mody nejvíce přibližující se požadavku jsou pro PK a RP4. Pro kompletní porovnání poměru známek větších než 4 a modů souboru viz Tabulka 5.1; 5.2; 5.3; 5.4. Histogramy SDO pro SK, PK a VK se očekávanému normálnímu rozdělení přibližují ve středu intervalu, na okrajích intervalu se od normality vzdalují. Na histogramu SDO RK lze pozorovat dva vrcholy, a tudíž rozdělení není normální. Pro histogramy SDO souboru viz Příloha B (Obrázek B.1; B.2; B.3; B.4). Pro histogramy ZK souboru viz Příloha B (Obrázek B.5; B.6; B.7; B.8).

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	8,18	3,53	2,45	2,88
<i>modus</i>	1,73	1,79	1,25	2,12

Tabulka 5.1. Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus SK

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	3.92	3.92	3.29	5.79
<i>modus</i>	2,16	1,84	0,54	2,38

Tabulka 5.2. Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus RK

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	14,95	11,65	6,45	13,50
<i>modus</i>	2,81	2,51	1,21	2,56

Tabulka 5.3. Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus PK

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	6,43	5,61	4,17	11,84
<i>modus</i>	2,87	2,25	1,28	1,96

Tabulka 5.4. Soubor 1: Poměr známek větších než 4 a modus VK

5.2 Výsledky zpracování druhého souboru

Hodnoty Souboru 2 obecně nesplňují požadavek na 20 % poměr známek větších než 4. Pro všechny parametry a RP vychází poměr menší než požadovaná hodnota. Nejvíce se tomuto požadavku přibližují hodnoty PK a RP0. Většina modů je menší než požadovaná hodnota 2,5. Mody nejvíce přibližující se požadavku jsou pro PK a RP4. Pro kompletní porovnání poměru známek větších než 4 a modů souboru viz Tabulka 5.5; 5.6; 5.7; 5.8. Histogramy SDO pro SK, PK a VK se očekávanému normálnímu rozdělení přibližují ve středu intervalu, na okrajích intervalu se od normality vzdalují. Na histogramu SDO RK lze pozorovat dva vrcholy, a tudíž rozdělení není normální. Pro histogramy SDO souboru viz Příloha B (Obrázek B.9; B.10; B.11; B.12). Pro histogramy ZK souboru viz Příloha B (Obrázek B.13; B.14; B.15; B.16).

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	13,41	7,02	5,26	7,23
<i>modus</i>	2,88	2,31	1,23	2,24

Tabulka 5.5. Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus SK

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	5,25	4,27	3,76	6,63
<i>modus</i>	2,14	2,17	0,61	2,34

Tabulka 5.6. Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus RK

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	17,55	13,69	7,34	15,21
<i>modus</i>	2,78	2,49	1,29	2,76

Tabulka 5.7. Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus PK

	RP0	RP1	RP2	RP3
> 4 (%)	11,79	9,84	7,09	15,99
<i>modus</i>	3,11	1,85	2,05	2,46

Tabulka 5.8. Soubor 2: Poměr známek větších než 4 a modus VK

5.3 Návrh koeficientů transformační funkce

Navržené koeficienty odpovídají požadavku na 20 % poměr známek větších než 4 s odchylkou $\pm 0,60$ % a požadavku na mody v hodnotě ZK 2,5 s odchylkou $\pm 0,14$. Pro navržené koeficienty viz Tabulka 5.9.

RP	0 m	0 b	1 m	1 b	2 m	2 b	3 m	3 b
RK	1,827	2,913	2,493	2,984	0,658	1,049	1,926	0,288
SK	0,716	2,038	1,828	2,831	1,055	1,919	1,317	0,667
PK	1,916	4,567	1,858	3,330	0,797	1,251	1,499	0,676
VK	1,785	9,730	1,137	3,392	1,317	3,026	0,905	1,274

Tabulka 5.9. Návrh nových koeficientů

Na srovnání kvantilů lze pozorovat přiblížení k požadavku, aby poměr známek větších než 4 byl 20 %. Jedním z důsledků změny koeficientů je výrazné snížení známek kvality menších než 1 v určitých případech, především pro rychlostní pásmo 3. Pro porovnání kvantilů odpovídajících ZK pro stávající a navržené koeficienty viz Tabulka 5.10; 5.11; 5.12; 5.13; 5.14; 5.15; 5.16; 5.17.

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	0,84	4,40	16,63	0,00
≤ 2	23,89	40,41	54,36	14,86
≤ 3	60,63	77,17	82,74	67,98
≤ 4	86,59	92,98	94,74	92,77

Tabulka 5.10. Srovnání známky kvality s kvantily pro SK dle stávajících koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	0,00	8,76	0,05	0,01
≤ 2	3,90	35,54	14,77	9,33
≤ 3	39,29	62,43	45,82	48,46
≤ 4	80,10	80,21	79,82	80,17

Tabulka 5.11. Srovnání známky kvality s kvantily pro SK dle navržených koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	8,51	13,12	36,99	0,00
≤ 2	33,29	39,27	58,74	4,47
≤ 3	77,34	80,74	85,57	81,04
≤ 4	94,75	95,73	96,24	93,37

Tabulka 5.12. Srovnání známky kvality s kvantily pro RK dle stávajících koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	9,78	16,36	0,00	0,05
≤ 2	25,35	34,07	0,36	8,78
≤ 3	56,50	60,15	38,81	55,58
≤ 4	79,79	79,82	79,76	79,40

Tabulka 5.13. Srovnání známky kvality s kvantily pro RK dle navržených koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	3,05	6,65	10,87	0,00
≤ 2	22,39	31,77	47,26	2,92
≤ 3	52,30	62,06	74,99	48,71
≤ 4	82,45	86,31	92,66	84,79

Tabulka 5.14. Srovnání známky kvality s kvantily pro PK dle stávajících koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	10,04	10,61	0,00	0,04
≤ 2	32,22	33,79	5,17	15,73
≤ 3	57,07	58,64	41,99	53,89
≤ 4	79,90	80,24	80,28	80,13

Tabulka 5.15. Srovnání známky kvality s kvantily pro PK dle navržených koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	7,99	8,94	14,35	0,00
≤ 2	32,74	35,08	45,03	8,64
≤ 3	63,85	66,42	73,27	48,75
≤ 4	88,21	90,16	92,91	84,01

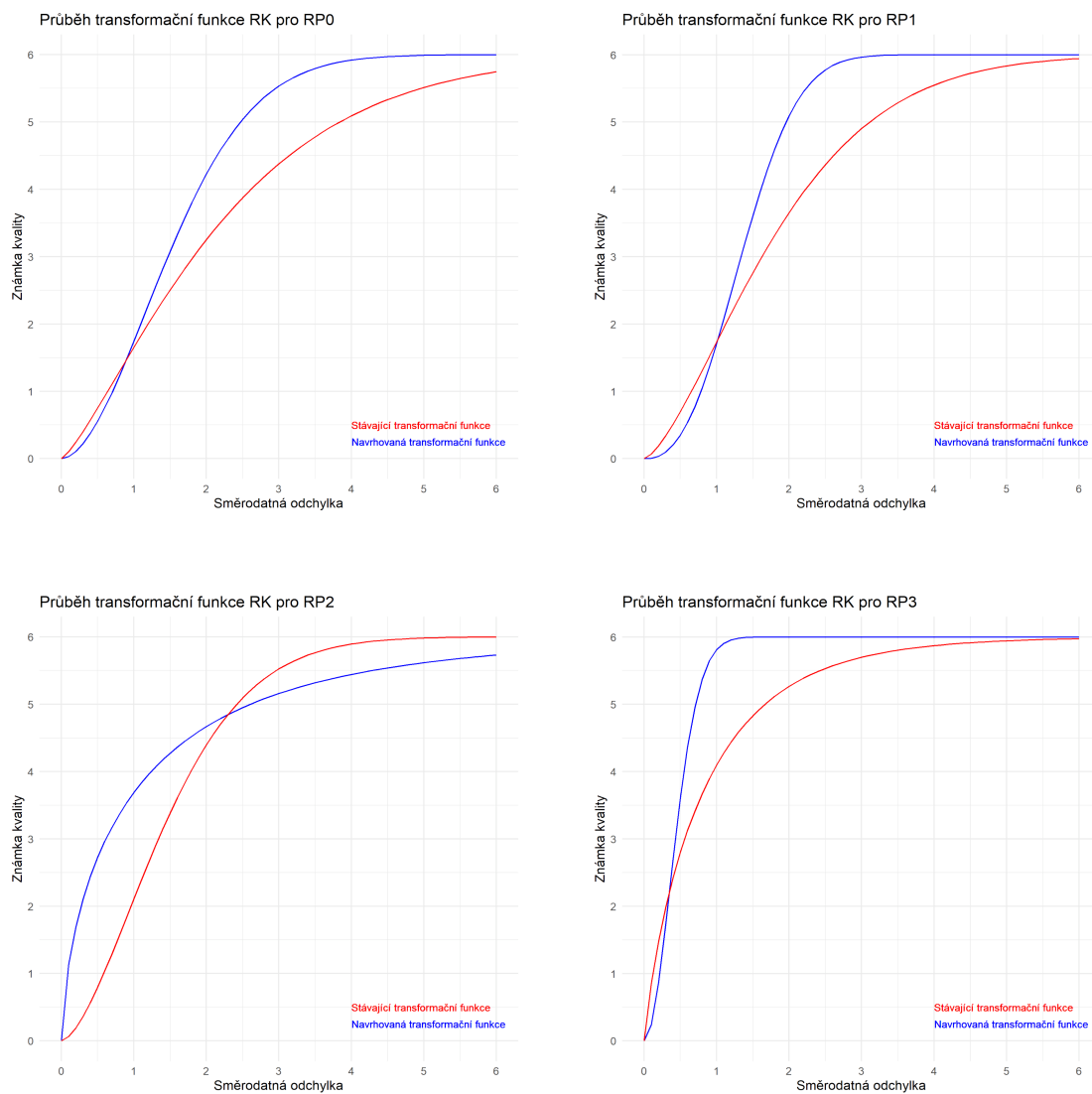
Tabulka 5.16. Srovnání známky kvality s kvantily pro VK dle stávajících koeficientů

ZK	RP0	RP1	RP2	RP3
≤ 1	12,99	2,05	10,07	0,00
≤ 2	32,25	17,40	34,87	8,64
≤ 3	59,46	46,54	58,22	45,55
≤ 4	80,05	79,93	79,75	79,91

Tabulka 5.17. Srovnání známky kvality s kvantily pro VK dle navržených koeficientů

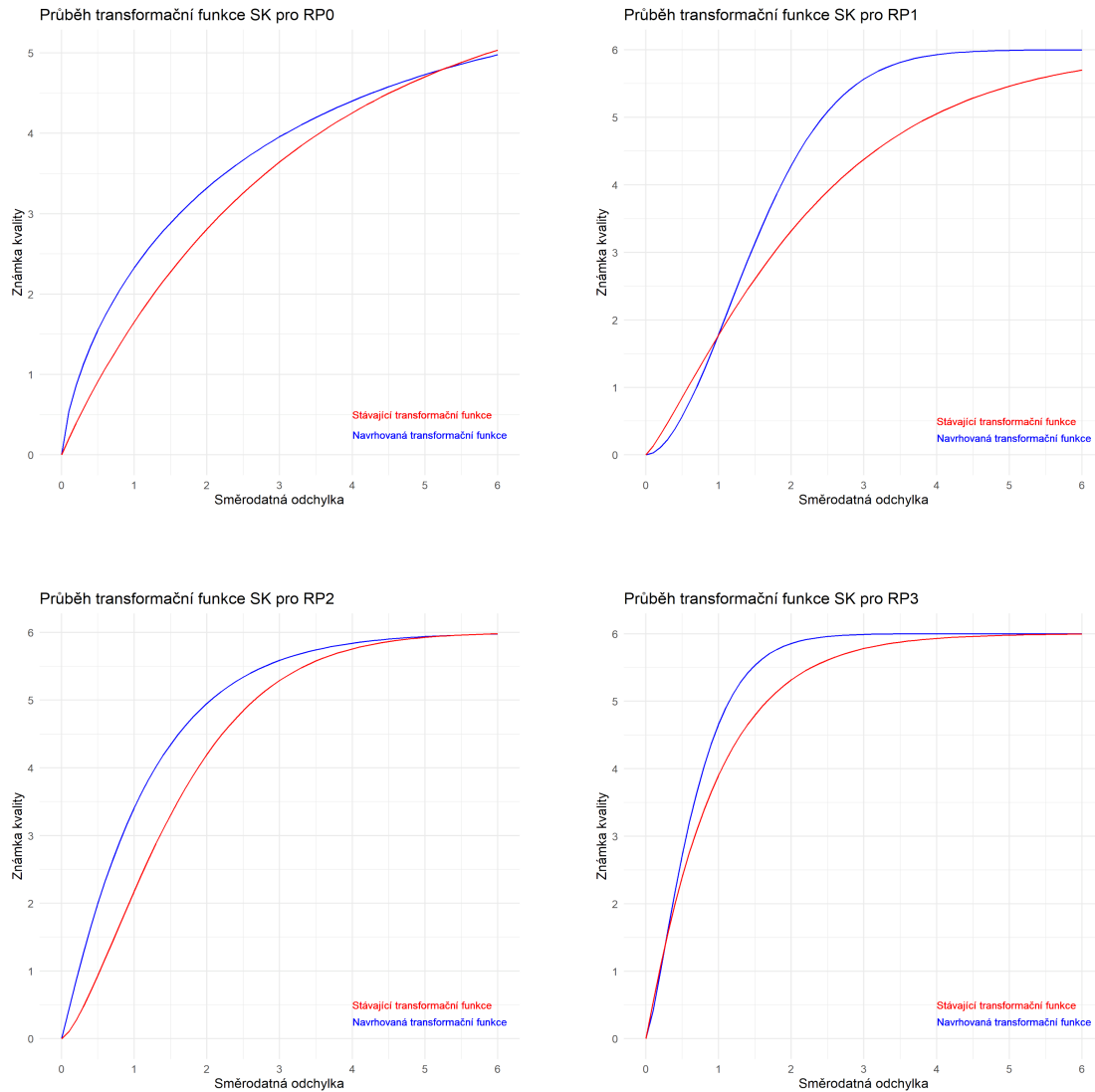
Na vykreslení průběhu transformační funkce dle stávajících a navržených koeficientů lze pozorovat obecné zpřísnění transformace mezi směrodatnými odchylkami a známkami kvality. V některých případech transformační funkce dle navržených koeficientů vykazuje mírnější přepočítání v začátku intervalu transformační funkce, typicky pro nižší rychlostní pásma.

Na vykreslení průběhu transformační funkce pro rozchod koleje je patrné zpřísnění transformace pomocí navržených koeficientů na větší části intervalu, především pro větší hodnoty směrodatné odchylky. Pro RP0, RP1 a RP3 lze pozorovat mírnější transformaci na začátku intervalu. Pro porovnání průběhů transformačních funkcí rozchodu koleje se stávajícími a navrženými koeficienty viz Obrázek 5.1.



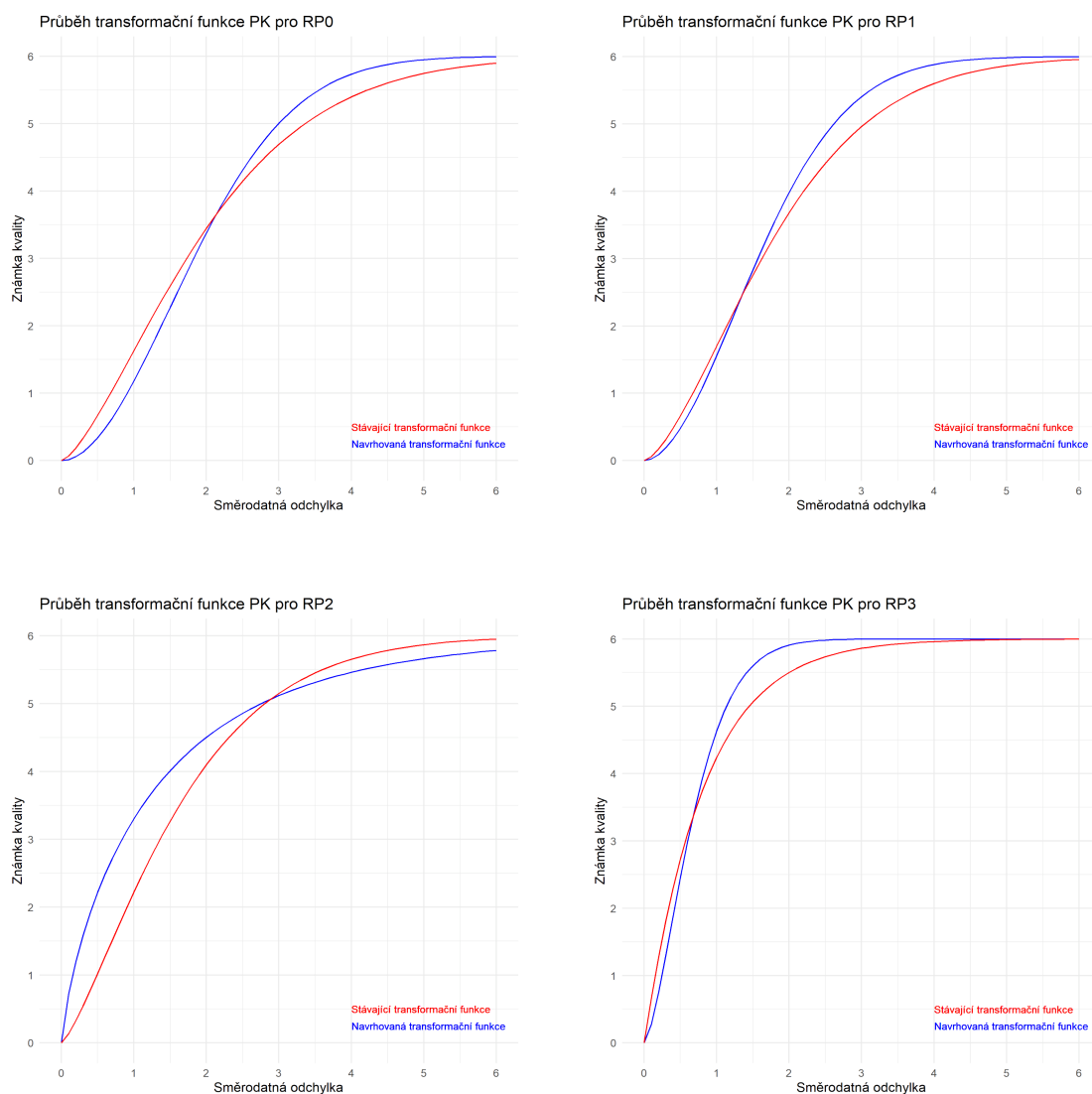
Obrázek 5.1. Transformační funkce rozchodu koleje dle rychlostních pásem

Ze srovnání průběhu transformační funkce pro směr koleje vychází pro RP0, RP2 a RP3 dle navržených koeficientů přísnější převod v průběhu celého intervalu. Pro RP1 je v začátku intervalu transformace mírnější než při použití stávajících koeficientů. Pro porovnání průběhů transformačních funkcí směru koleje se stávajícími a navrženými koeficienty viz Obrázek 5.2.



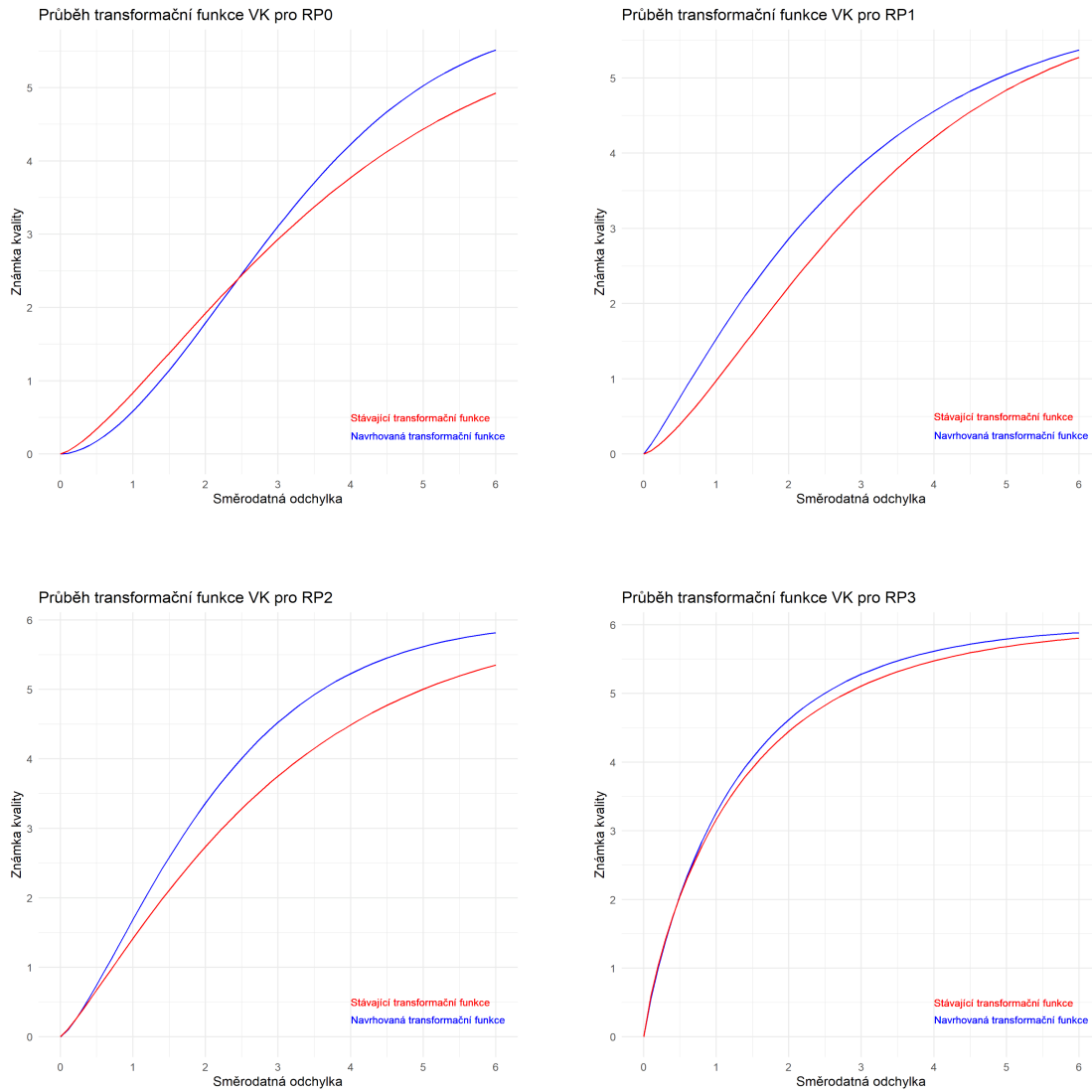
Obrázek 5.2. Transformační funkce směru koleje dle rychlostních pásem

Na vykreslení průběhu transformační funkce pro převýšení koleje pro RP0 je v první polovině převod dle navržených koeficientů mírnější, v druhé polovině přísnější. Pro RP1 a RP3 je transformace při použití navržených koeficientů mírnější na začátku intervalu a přísnější ve větší části konce intervalu. Pro RP2 je přísnější v první polovině intervalu. Pro porovnání průběhů transformačních funkcí převýšení koleje se stávajícími a navrženými koeficienty viz Obrázek 5.3.



Obrázek 5.3. Transformační funkce převýšení koleje dle rychlostních pásem

Ze srovnání průběhu transformační funkce pro výšku koleje vychází pro RP1, RP2 a RP3 dle navržených koeficientů přísnější převod v průběhu celého intervalu. Pro RP0 je v začátku intervalu transformace mírnější než při použití stávajících koeficientů. Pro porovnání průběhů transformačních funkcí výšky koleje se stávajícími a navrženými koeficienty viz Obrázek 5.4.



Obrázek 5.4. Transformační funkce výšky koleje dle rychlostních pásem

5.4 Srovnání mezních známek kvality s ČSN EN 13848-6

Přepočtené limitní směrodatné odchylky uvedené v ČSN EN 13848-6 na ZK podle stávajících koeficientů jsou pro VK ve všech RP a pro SK RP1 mírnější než odpovídající ZK. Pro SK RP2 a SK RP3 jsou přepočtené limitní směrodatné odchylky přísnější než ekvivalenty ZK. Přepočet dle navržených koeficientů řeší tento problém pro SK RP2, pro SK RP3 dochází k přiblížení k požadovaným hodnotám, ale stále je ZK mírnější než přepočtené limitní směrodatné odchylky ČSN EN 13848-6. Pro kompletní porovnání přepočtených limitních hodnot SDO na ZK viz Tabulka 5.18; 5.19; 5.20; 5.21; 5.22; 5.23.

ZK	SDO (mm)	ZK – stávající	ZK – navržené
1	0,90	1,60	1,52
2	1,25	2,21	2,47
3	1,95	3,25	4,19
4	2,70	4,11	5,32

Tabulka 5.18. Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO SK na ZK pro RP1 dle stávajících a navržených koeficientů

ZK	SDO (mm)	ZK – stávající	ZK – navržené
1	0,50	0,93	1,99
2	0,70	1,43	2,63
3	1,05	2,30	3,52
4	1,45	3,20	4,27

Tabulka 5.19. Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO SK na ZK pro RP2 dle stávajících a navržených koeficientů

ZK	SDO (mm)	ZK – stávající	ZK – navržené
1	0,45	2,20	2,45
2	0,55	2,58	2,97
3	0,75	3,25	3,85
4	1,00	3,90	4,66

Tabulka 5.20. Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO SK na ZK pro RP3 dle stávajících a navržených koeficientů

ZK	SDO (mm)	ZK – stávající	ZK – navržené
1	1,25	1,29	1,90
2	1,75	1,92	2,56
3	2,75	3,08	3,64
4	3,75	4,01	4,41

Tabulka 5.21. Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO VK na ZK pro RP1 dle stávajících a navržených koeficientů

ZK	SDO (mm)	ZK – stávající	ZK – navržené
1	0,75	1,05	1,10
2	1,10	1,56	1,70
3	1,80	2,50	2,83
4	2,50	3,28	3,76

Tabulka 5.22. Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO VK na ZK pro RP2 dle stávajících a navržených koeficientů

ZK	SDO (mm)	ZK – stávající	ZK – navržené
1	0,65	2,43	2,47
2	0,85	2,88	2,95
3	1,40	3,79	3,93
4	1,80	4,26	4,42

Tabulka 5.23. Porovnání přepočtených limitních hodnot SDO VK na ZK pro RP3 dle stávajících a navržených koeficientů

Kapitola 6

Závěr

První část analytické části práce se zabývá obecně geometrickými parametry koleje z hlediska norem a předpisů, definování parametrů, provozních odchylek, rychlostních pásem, vlnových délek a měřících prostředků. Druhá část analytické části se zabývá hodnocením geometrických parametrů koleje v oblasti principu metod hodnocení a přehledu konkrétních používaných metod hodnocení v jednotlivých zemích.

V rámci výpočetní části byly statisticky zpracovány dva datové soubory odlišné v čase měření hodnot. Součástí zpracování datových souborů je vyhodnocení poměru známek kvality větších než 4, mody známek kvality, histogramy hodnot směrodatných odchylek a hodnot známek kvality. Vyhodnocování probíhalo pro každý měřený parametr a rychlostní pásmo. Z novějšího datového souboru byl vytvořen návrh nových koeficientů dle zadaných podmínek, kterými byly poměr známek kvality větších než 4 na 20 % a umístění modů směrodatných odchylek do hodnoty známky kvality 2,5. Navržené koeficienty odpovídají požadavku na 20 % poměr známek větších než 4 s odchylkou $\pm 0,60$ % a požadavku na mody v hodnotě ZK 2,5 s odchylkou $\pm 0,14$. Pro srovnání stávajících a navržených koeficientů byly vytvořeny jednotlivé průběhy transformační funkce s oběma variantami koeficientů a také porovnání s přepočítanými hodnotami směrodatné odchylky dle ČSN EN 13848-6 dle stávajících a navržených koeficientů. Mezní hodnoty dle navržených koeficientů jsou obecně přísnější než určené normou, kromě mezní hodnoty výšky koleje pro rychlostní pásmo 2.

Navrhované řešení neřeší problémy související s transformační funkcí. Transformační funkce nezohledňuje záporné odchylky hodnot rozchodu koleje, které jsou z hlediska vyhodnocování kvality železničních tratí závažnějším problémem než odchylky kladné. Další nevýhodou používané transformační funkce je přítomnost velké řady koeficientů různých pro každý parametr a rychlostní pásmo. Přítomnost koeficientů znepřehledňuje výpočet. Koeficienty byly definovány pro datový soubor z tehdejší doby. Pozdější vývoj datového souboru z důvodu obecného zlepšení geometrické kvality koleje v České republice není reflektován v hodnotách koeficientů. Řešením při podmínce zachování stávající transformační funkce by bylo přepočítávání koeficientů po dané době nebo přepočítávání automatizovat. Nevýhodou změny koeficientů by bylo zamezení srovnání výsledků v průběhu času. Při zachování stávající transformační funkce je tedy potřeba vyhodnotit, zda je důležitější statistická výpovědní hodnota neměnná v čase, nebo srovnání v průběhu času. Případná změna transformační funkce, popřípadě systému vyhodnocování, by při vhodně vybrané metodě mohla odstranit závislost výpočtu na množství koeficientů. Nevýhodou by bylo přerušování historické návaznosti na současný systém vyhodnocování kvality geometrických parametrů koleje. Přepřepočítání metody by s sebou neslo složitost určení podstaty výsledku vyhodnocování dat, která by byla nedílnou součástí procesu. Určení požadovaného výstupu by mělo být zásadní pro celý proces a samotný systém vyhodnocování by měl být navázán tak, aby jeho výstup co nejpřesněji vystihoval myšlenkovou podstatu celého vyhodnocování.

Z mého pohledu je v budoucnu potřeba vyhodnotit, zda stávající způsob úsekového hodnocení kvality geometrické polohy koleje odpovídá požadavkům na výsledek. Množ-

ství možností s vývojem měřicí techniky narůstá a do budoucna je potřeba umět efektivně a smysluplně vyhodnocovat naměřená data. Aplikaci způsobů vyhodnocování nad rámec stávající transformační funkce bych se rád věnoval v následujících odborných pracích.

Literatura

- [1] ČSN 73 6360-1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [2] ČSN 73 6360-2. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [3] ČSN EN 13848-1. *Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje – Část 1: Popis geometrie koleje*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [4] ČSN EN 13848-2. *Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje – Část 2: Měřicí systémy – Měřicí vozidla*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [5] ČSN EN 13848-3. *Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje – Část 3: Měřicí systémy – Stroje pro stavbu a údržbu koleje*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [6] ČSN EN 13848-4. *Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje – Část 4: Měřicí systémy – Lehké kolejové prostředky a ruční zařízení*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [7] ČSN EN 13848-5. *Hladiny kvality geometrie koleje – Běžná kolej a kolejová rozvětvení*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [8] ČSN EN 13848-6+A1. *Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje – Část 6: Stanovení kvality geometrie koleje*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [9] *Předpis SŽ S2/3. Organizace a provádění prohlídek a měření na dráze celostátní a dráhách regionálních ve znění změny č. 1 (účinnost od 1. dubna 2022)*. Správa železnic, 2022.
- [10] *Předpis SŽ S2/4. Zajišťování diagnostiky železničního svršku a spodku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem*. Správa železnic, 2022.
- [11] Offenbacher Stefan, Neuhold Johannes, Veit Peter a Landgraf Matthias. *Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI*. Institute of Railway Engineering and Transport Economy, Graz University of Technology, 2020.
- [12] Reng-Kui Liu, Peng Xu, Zhuang-Zhi Sun, Ce Zou a Quan-Xin Sun. *Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro*. 2014.
- [13] Madejski Janusz a Grabczyk Juliusz. *Continuous geometry measurement for diagnostics of tracks and switches*. 2002.
- [14] Hadley Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016.
<https://ggplot2.tidyverse.org>.

- [15] Berend Hasselman. *nleqslv: Solve Systems of Nonlinear Equations*. 2023.
<https://CRAN.R-project.org/package=nleqslv>. R package version 3.3.5.



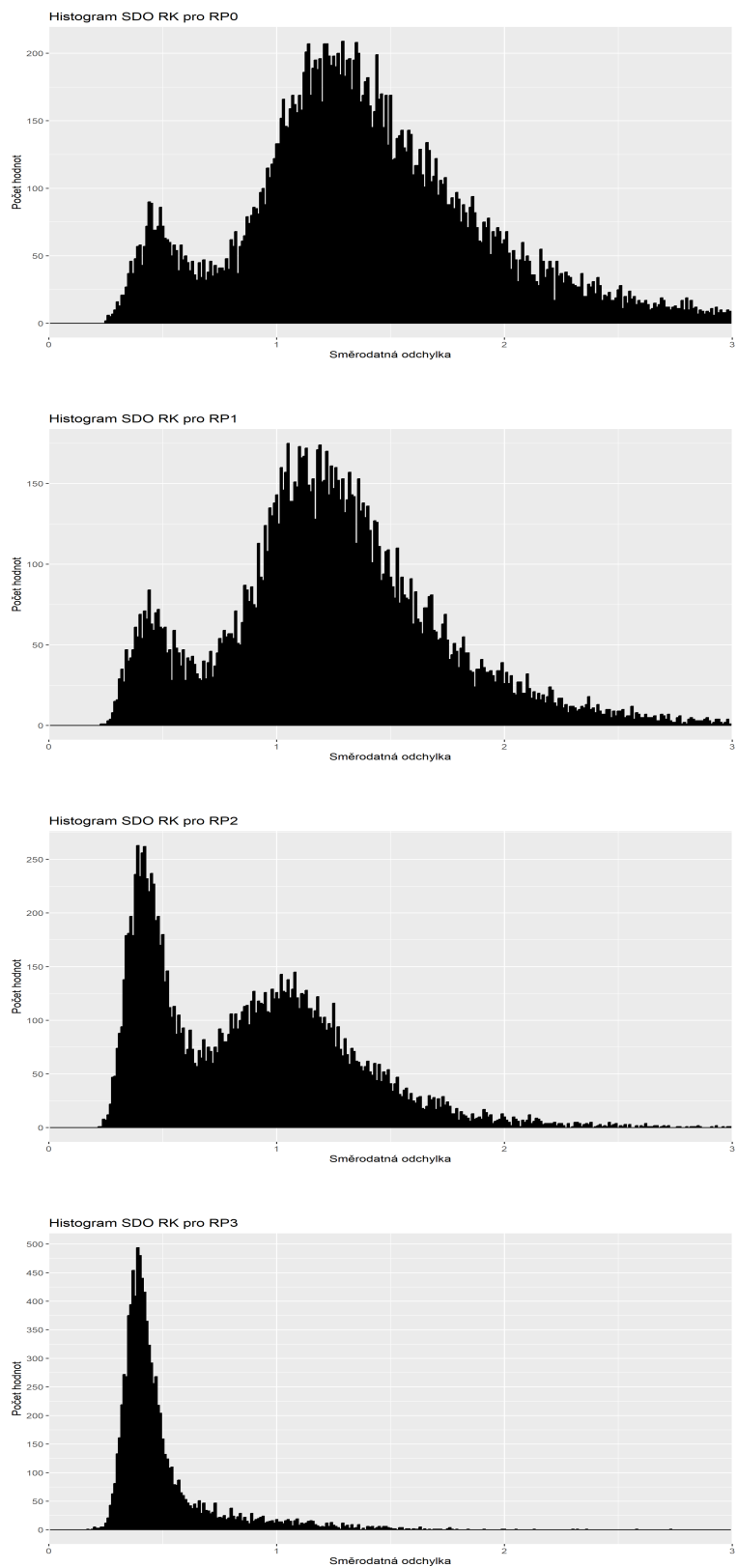
Příloha **A**

Seznam zkratek

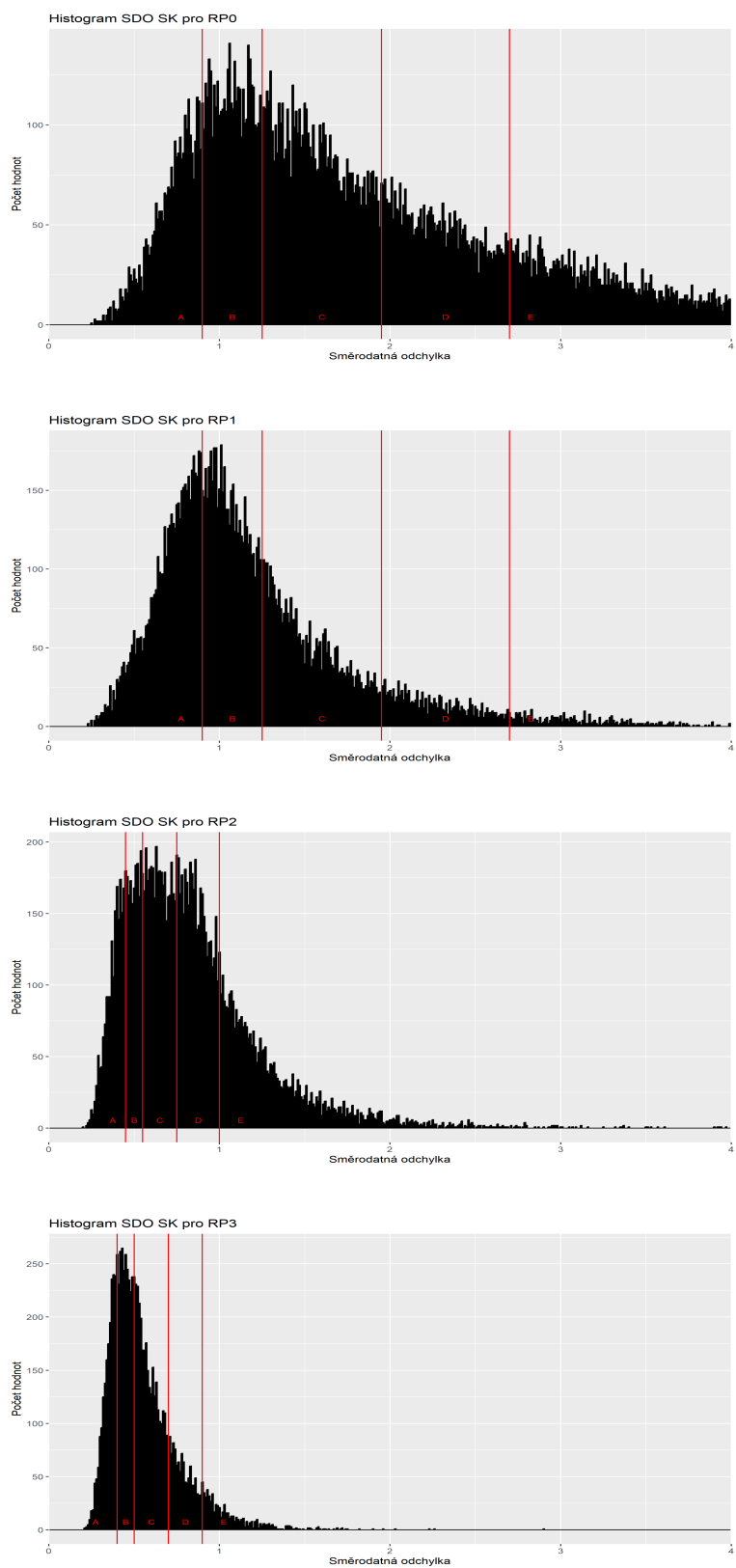
GPK	Geometrické parametry koleje
PK	Převýšení koleje
RK	Rozchod koleje
RP	Rychlostní pásmo
SDO	Směrodatná odchylka
SK	Směr kolejnicového pásu
VK	Podélná výška kolejnicového pásu
ZK	Známka kvality



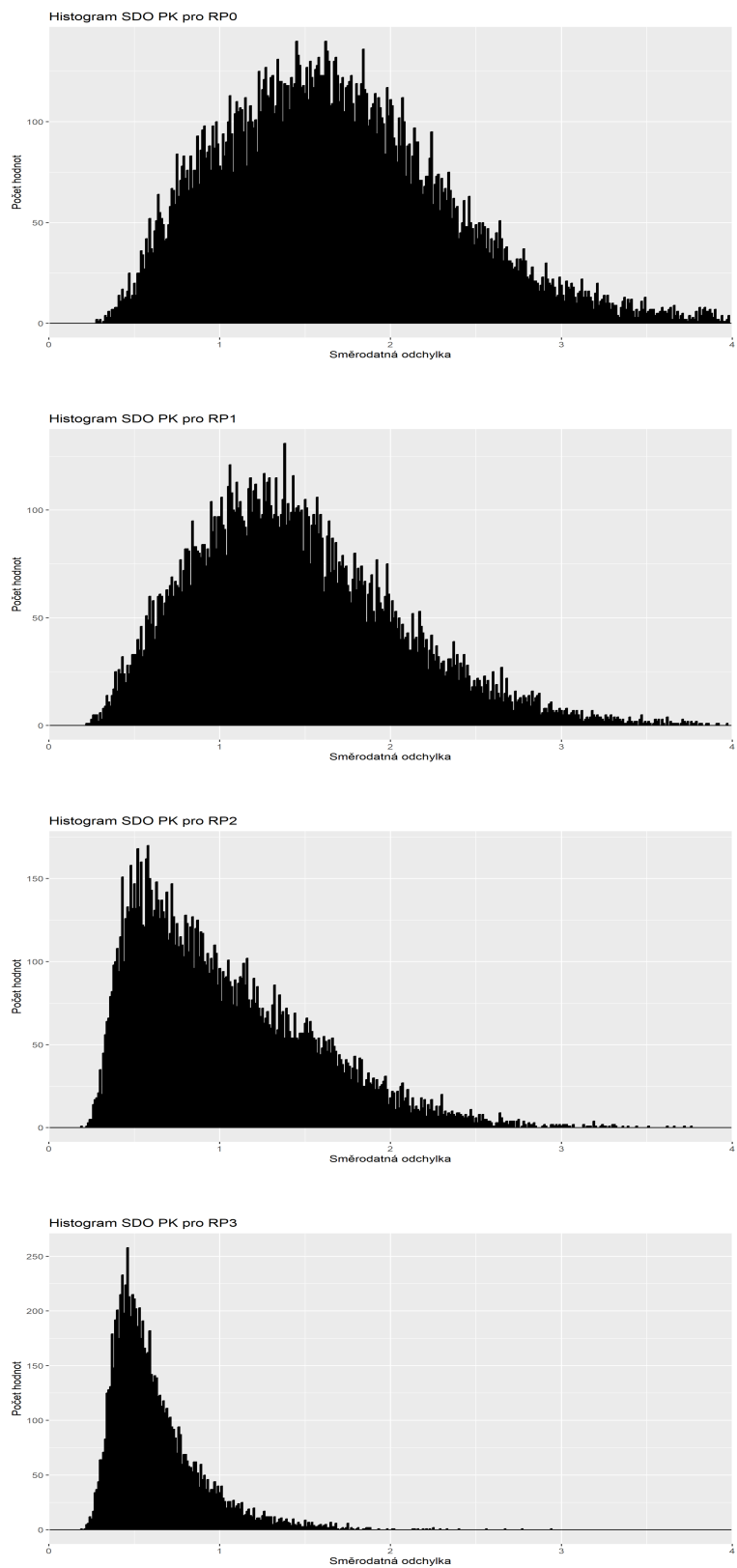
Příloha B
Histogramy SDO a ZK



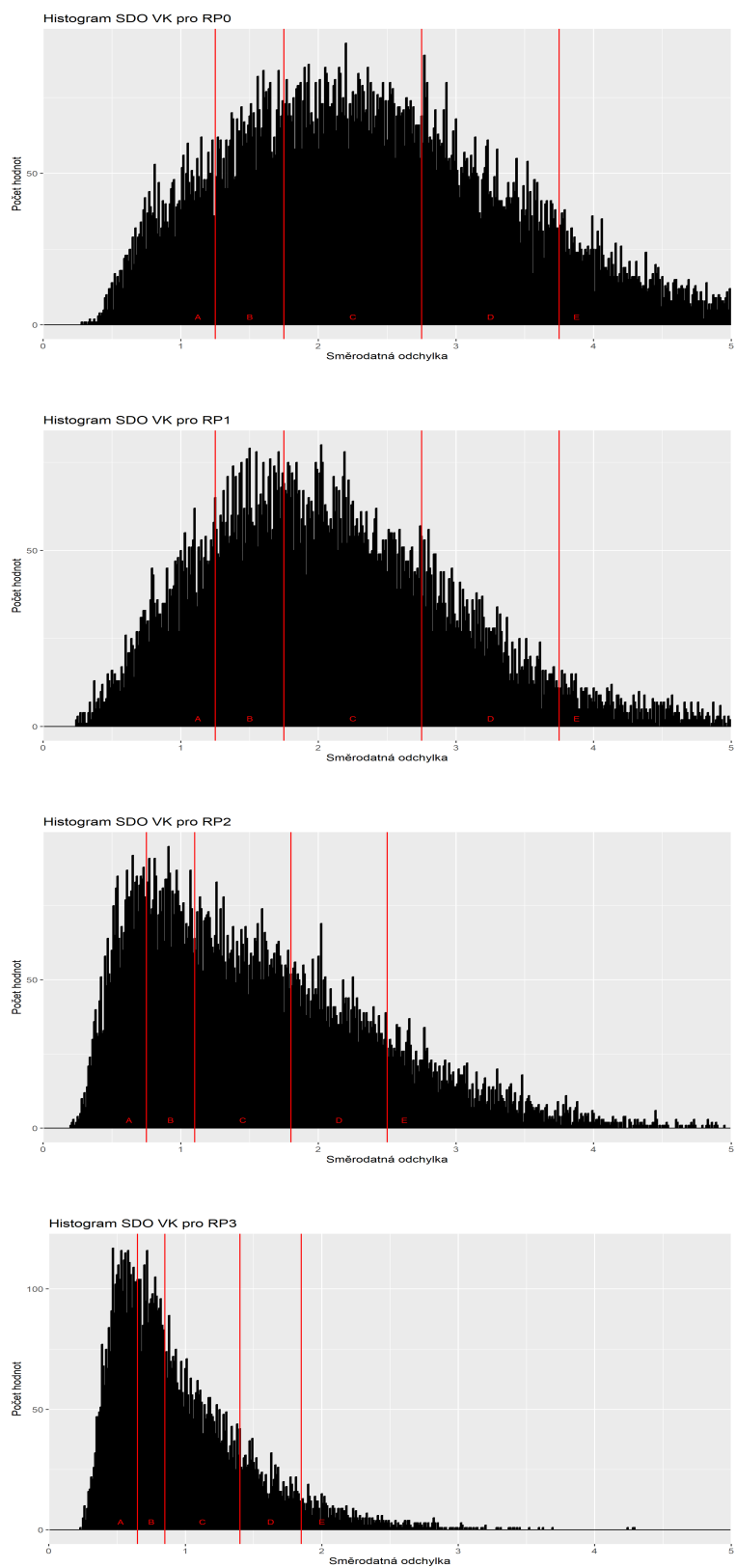
Obrázek B.1. Soubor 1: Směrodatné odchylky rozchodu koleje dle rychlostních pásem



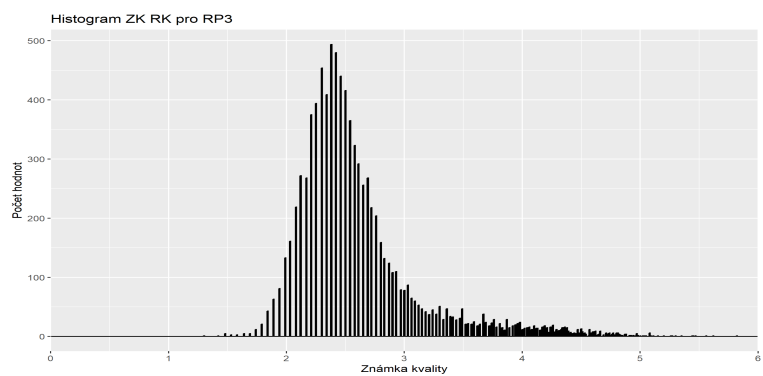
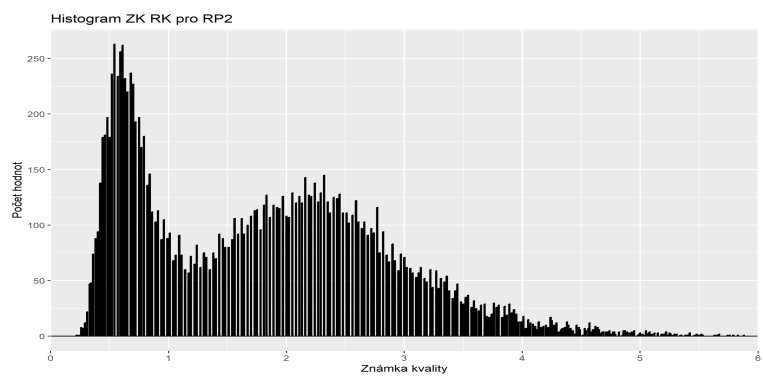
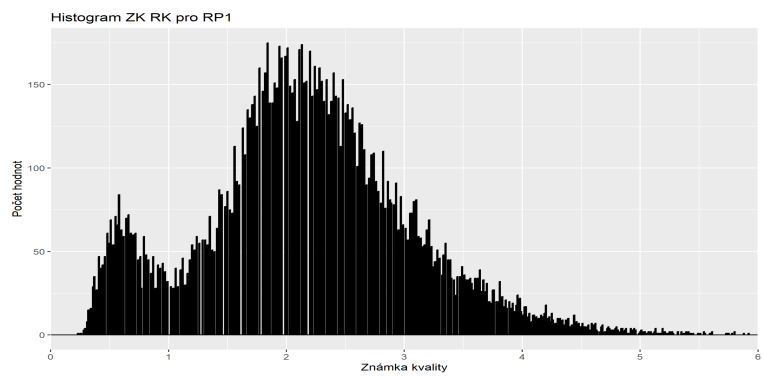
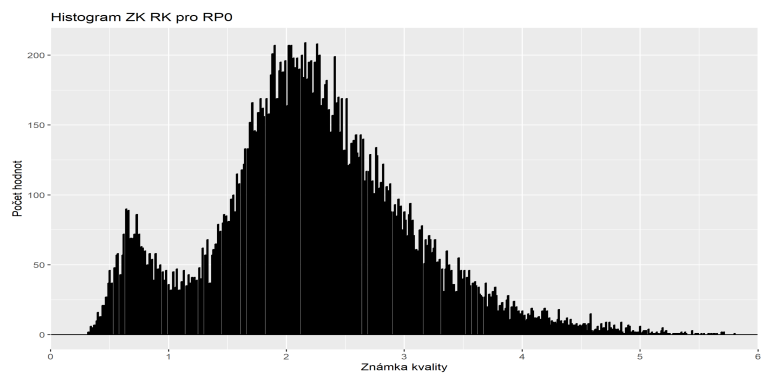
Obrázek B.2. Soubor 1: Směrodatné odchylky směru koleje dle rychlostních pásem



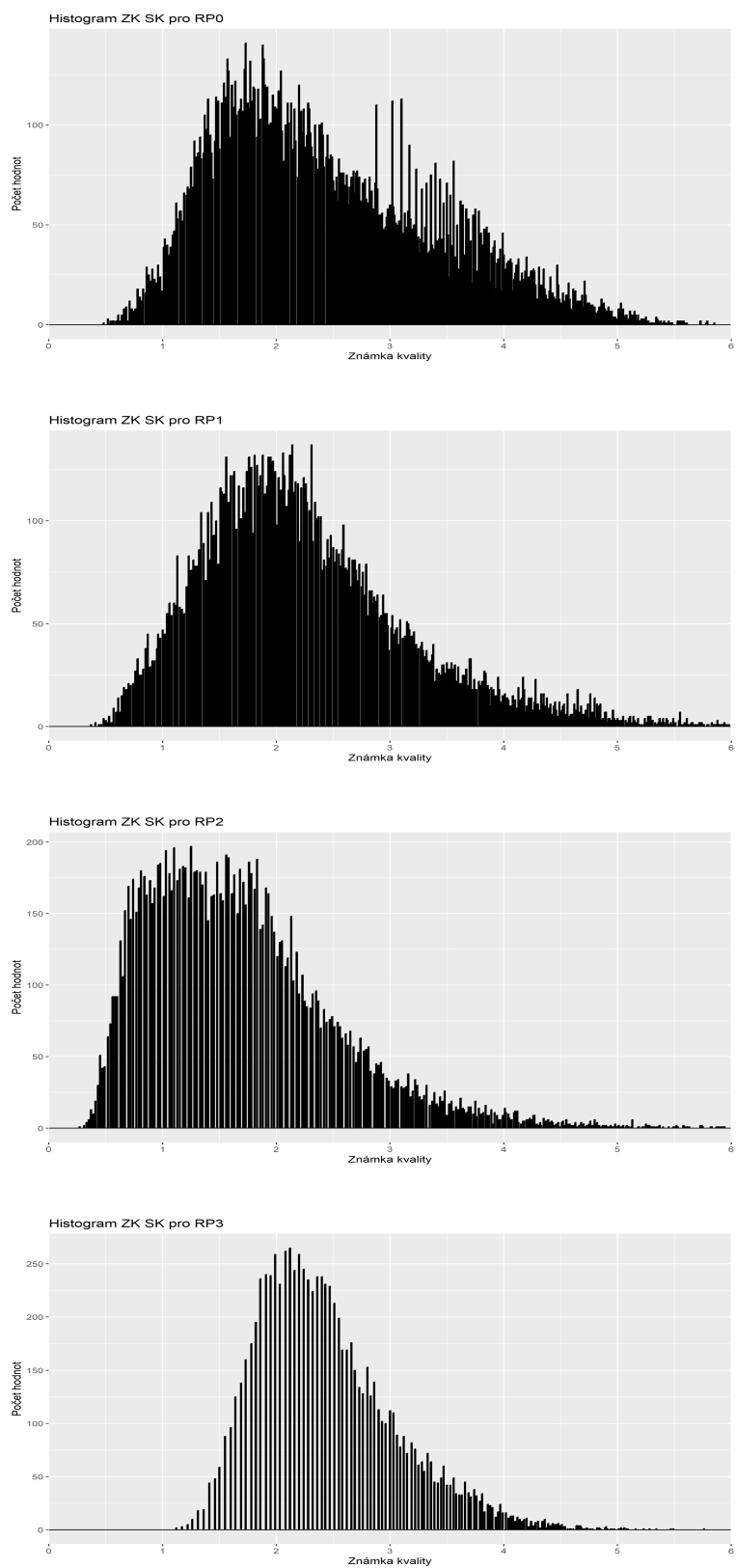
Obrázek B.3. Soubor 1: Směrodatné odchyšky převýšení koleje dle rychlostních pásem



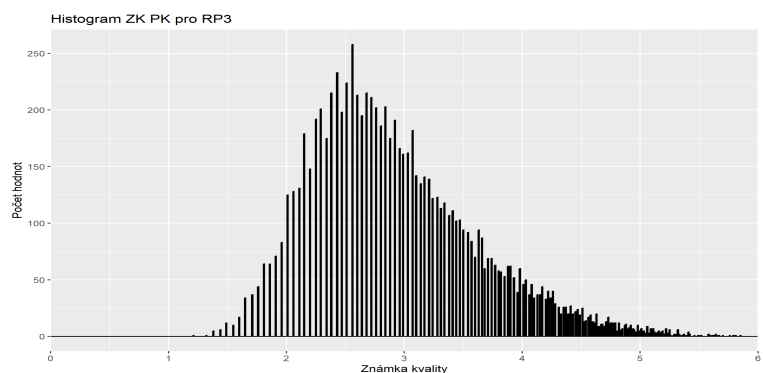
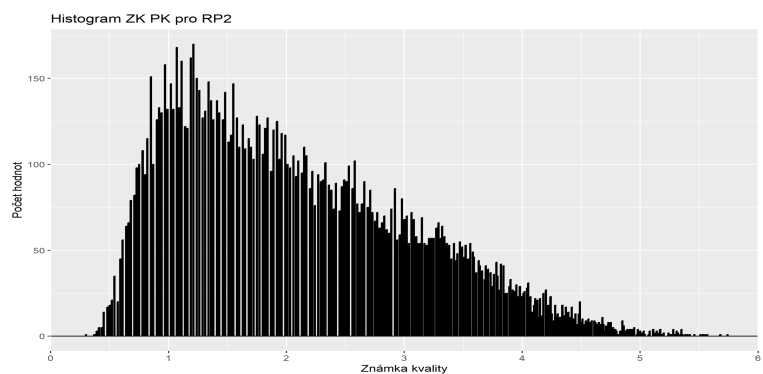
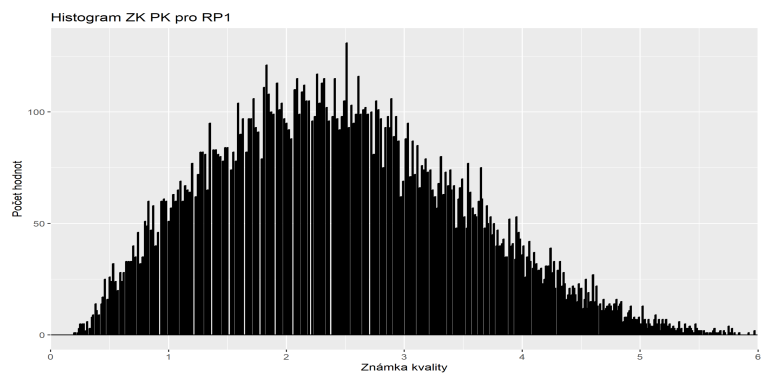
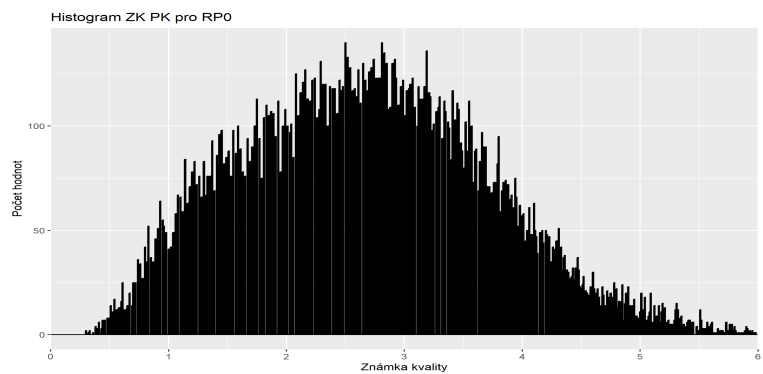
Obrázek B.4. Soubor 1: Směrodatné odchylky výšky koleje dle rychlostních pásem



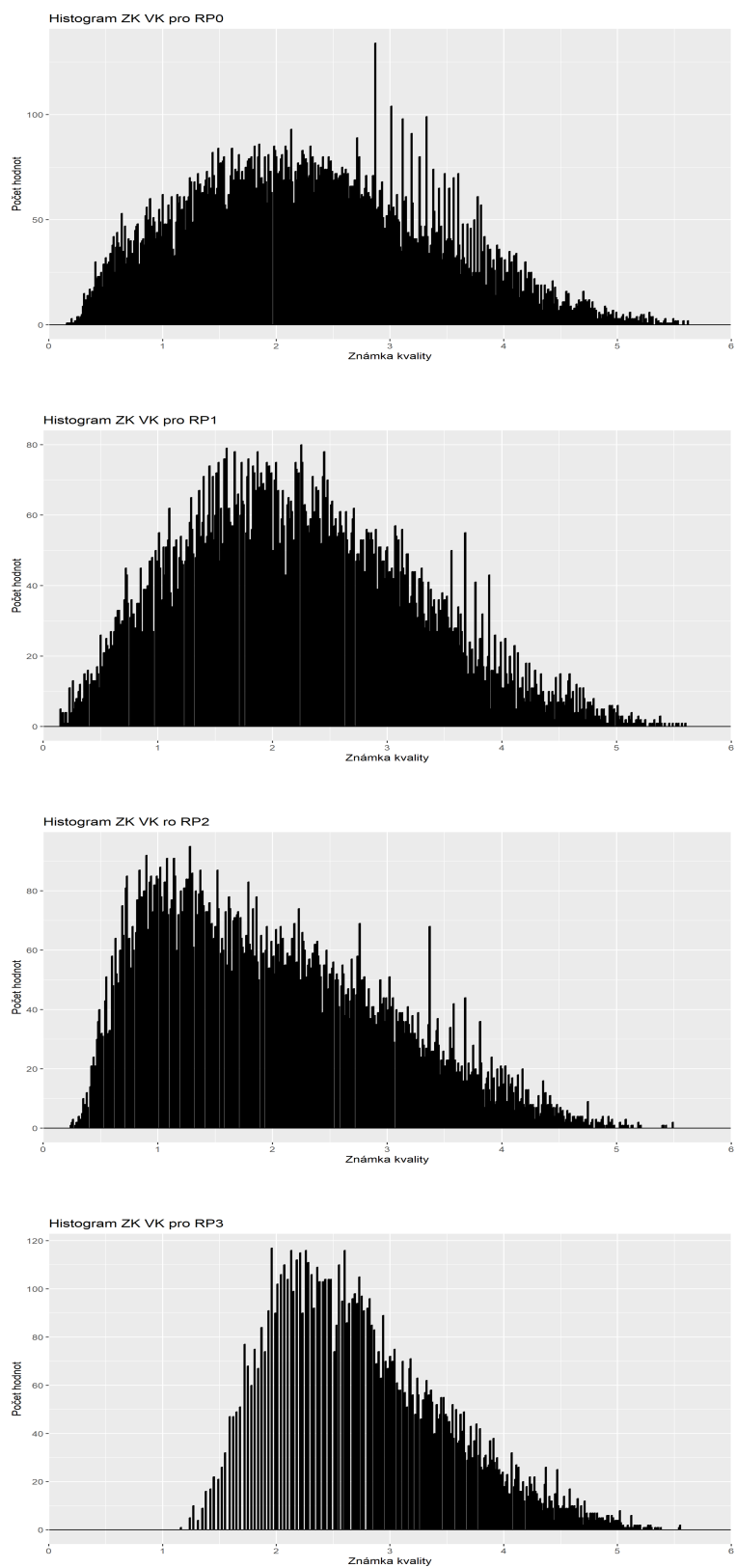
Obrázek B.5. Soubor 1: Histogramy známek kvality rozchodu koleje dle rychlostních pásem



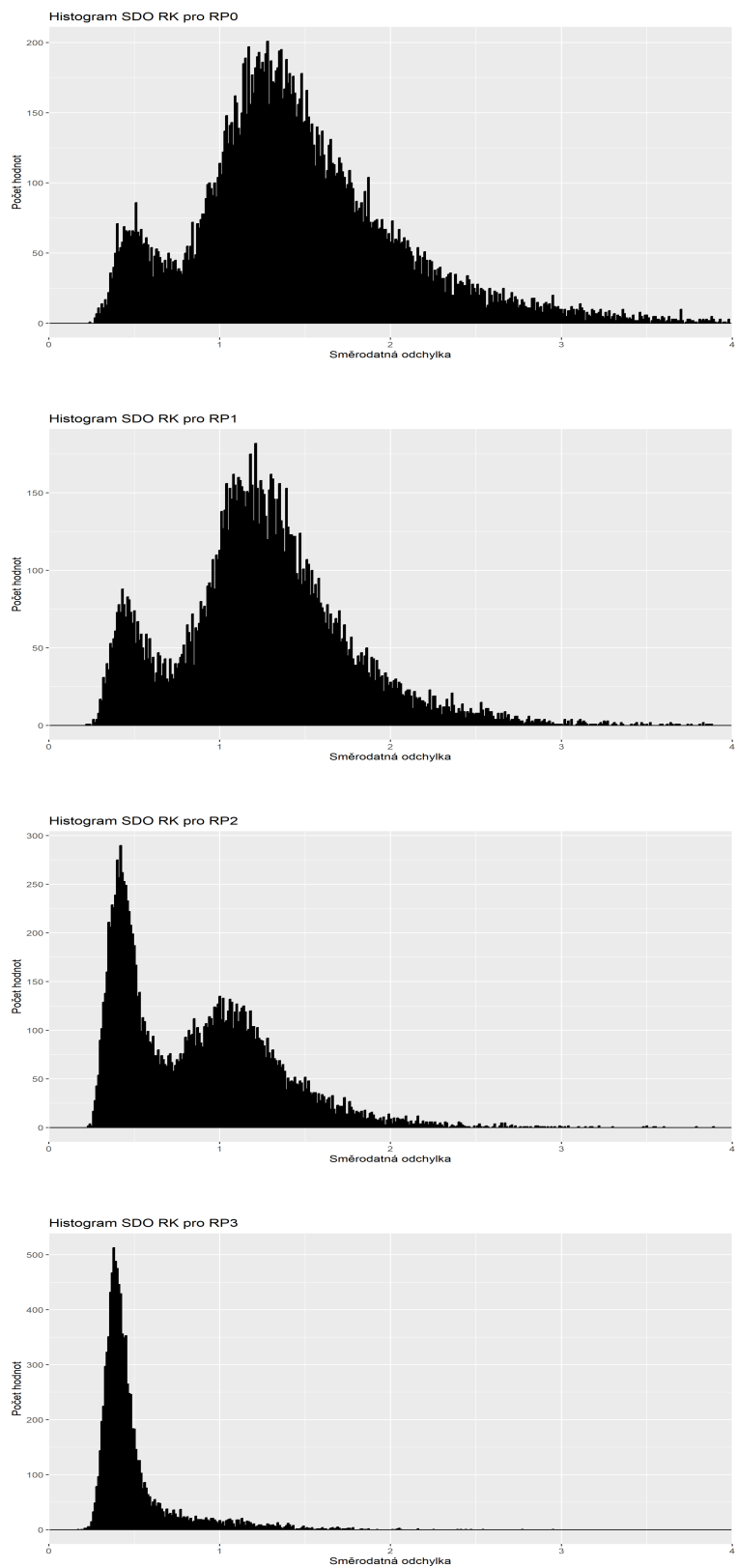
Obrázek B.6. Soubor 1: Histogramy známek kvality směru koleje dle rychlostních pásem



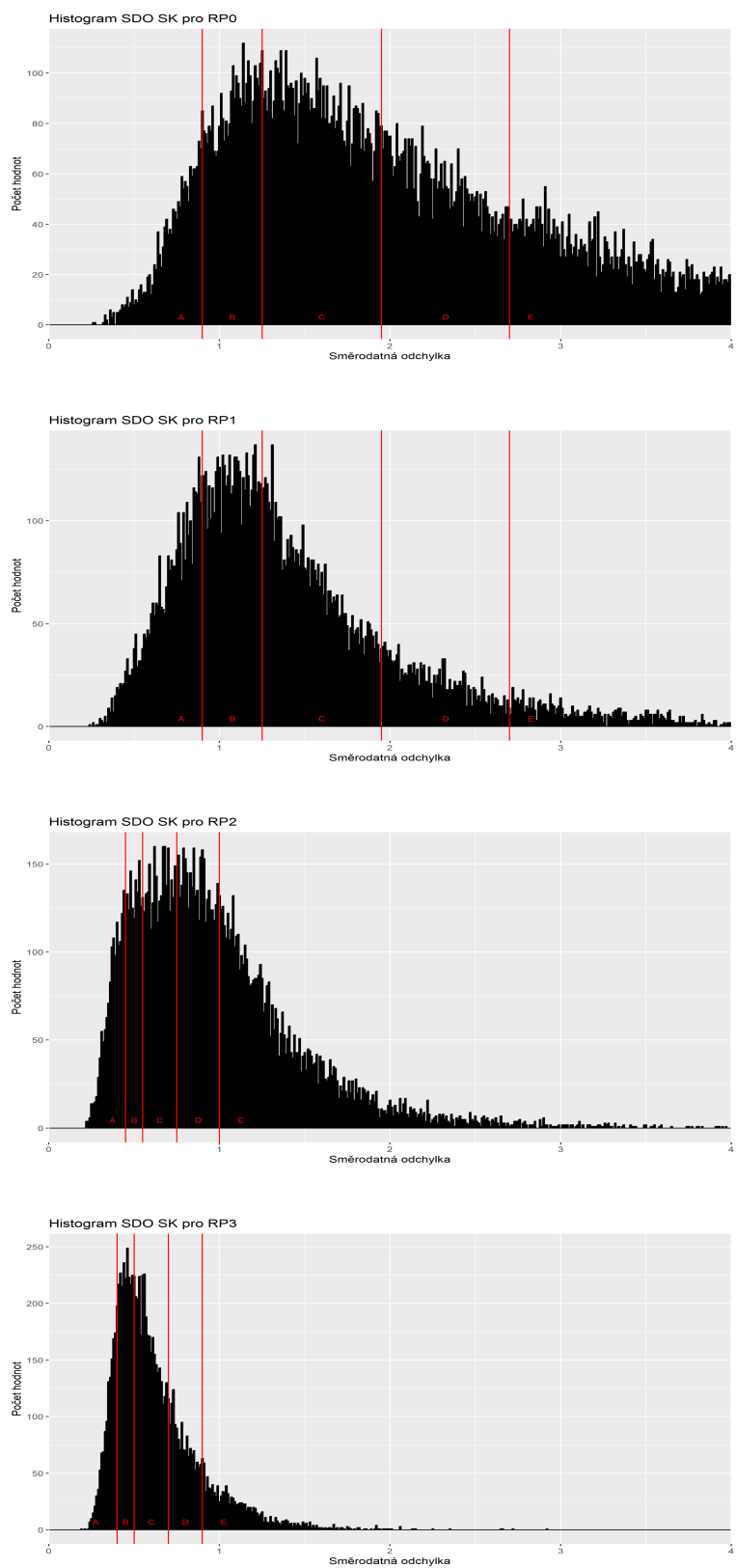
Obrázek B.7. Soubor 1: Histogramy známek kvality převýšení koleje dle rychlostních pásem



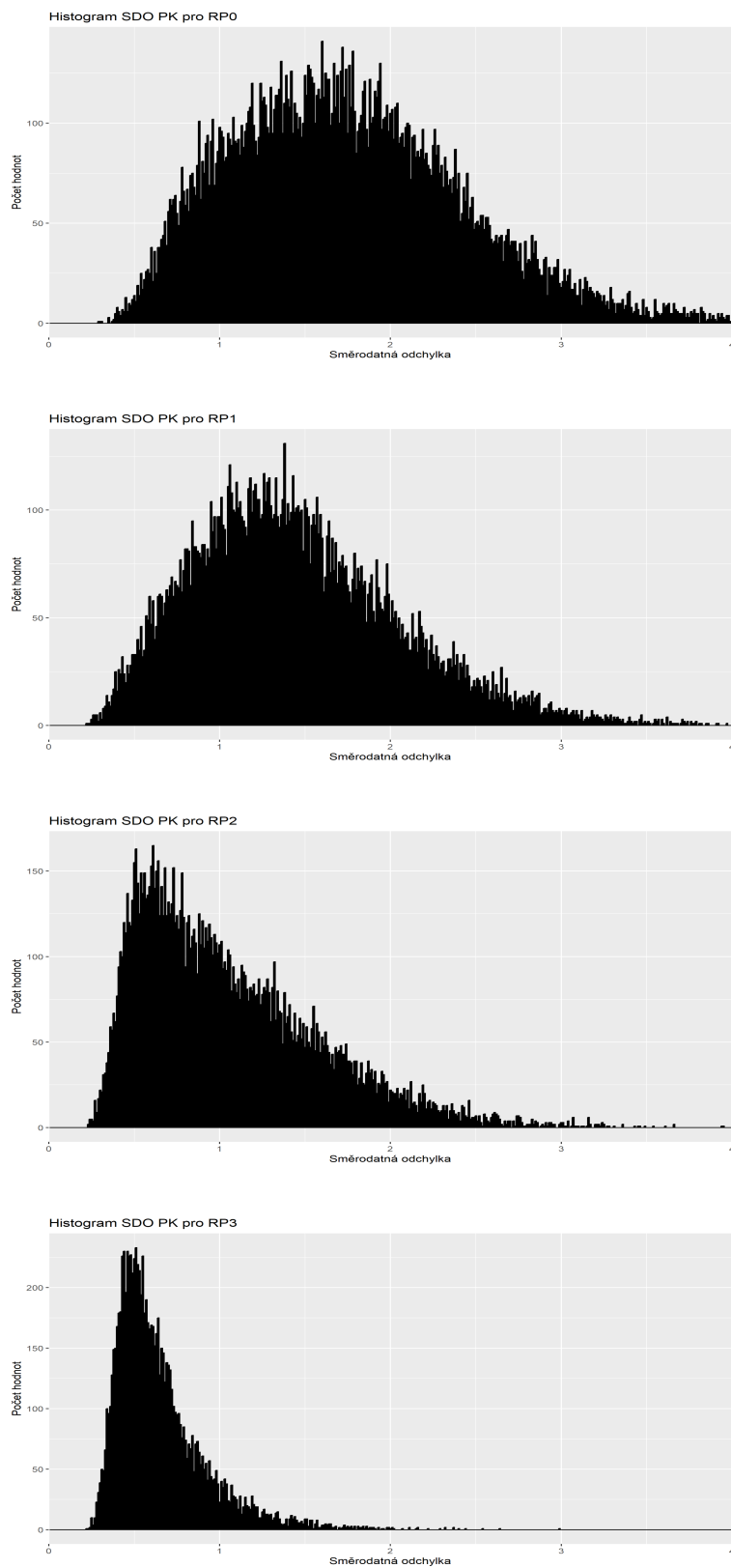
Obrázek B.8. Soubor 1: Histogramy známek kvality výšky koleje dle rychlostních pásem



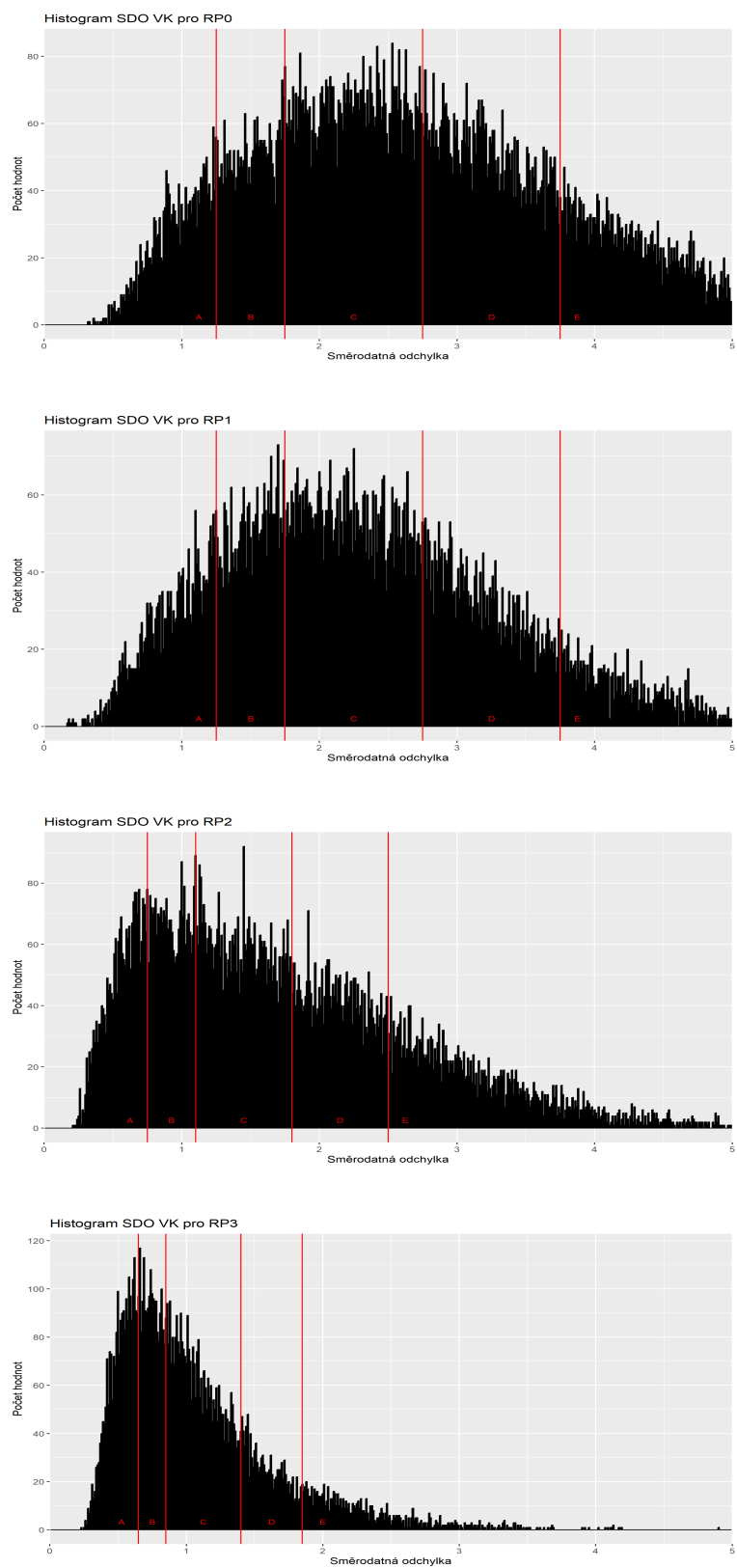
Obrázek B.9. Soubor 2: Směrodatné odchylky rozchodu koleje dle rychlostních pásem



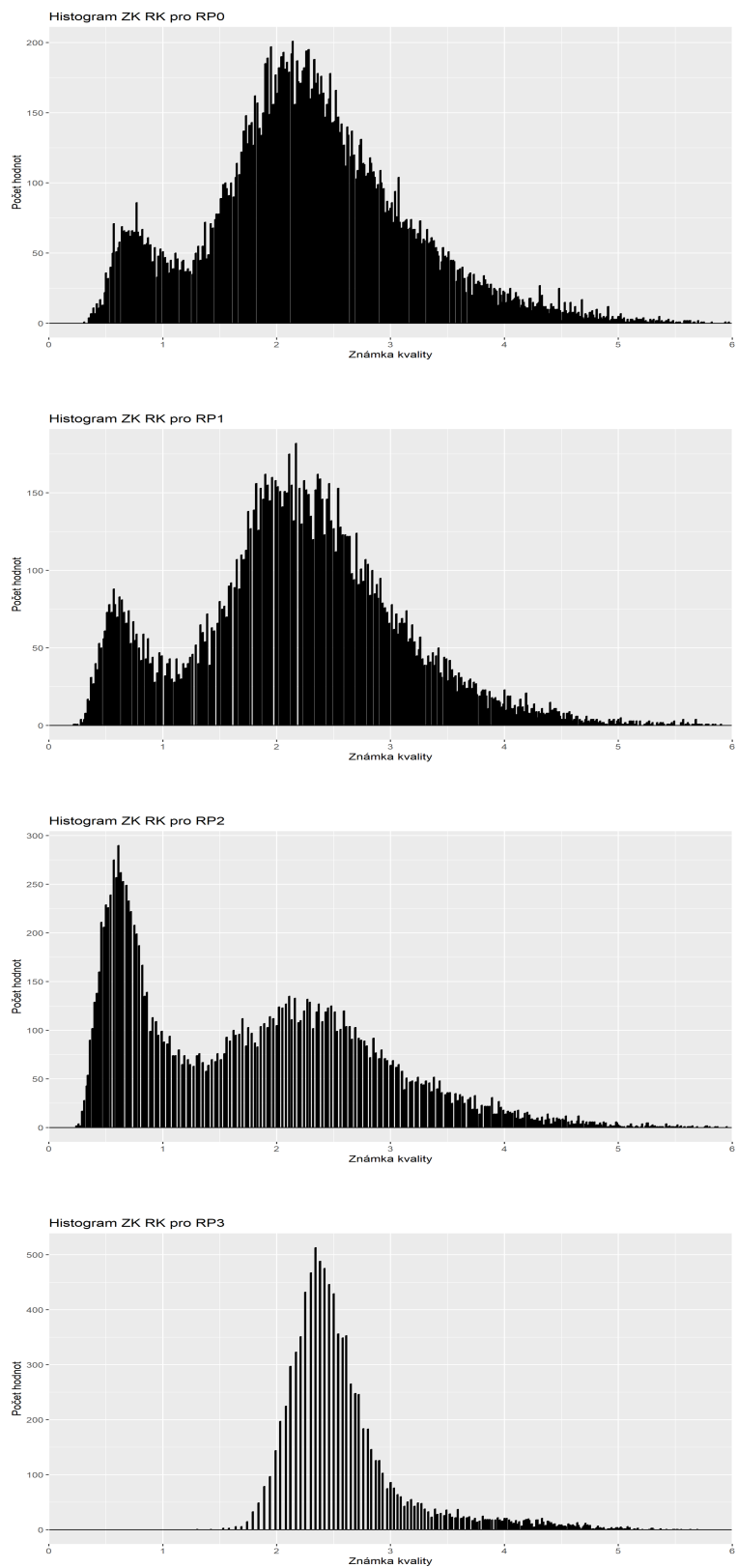
Obrázek B.10. Soubor 2: Směrodatné odchylky směru koleje dle rychlostních pásem



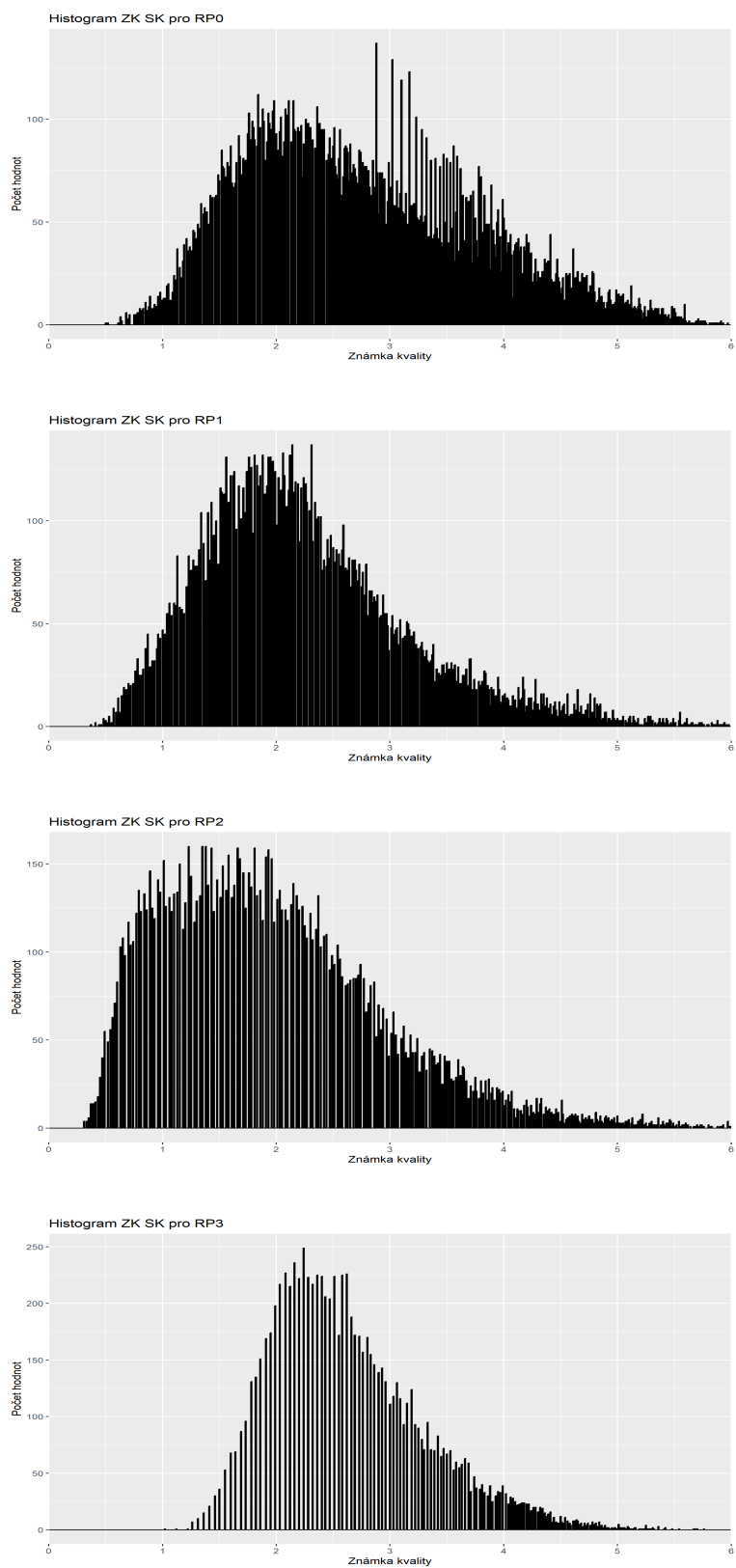
Obrázek B.11. Soubor 2: Směrodatné odchylky převýšení koleje dle rychlostních pásem



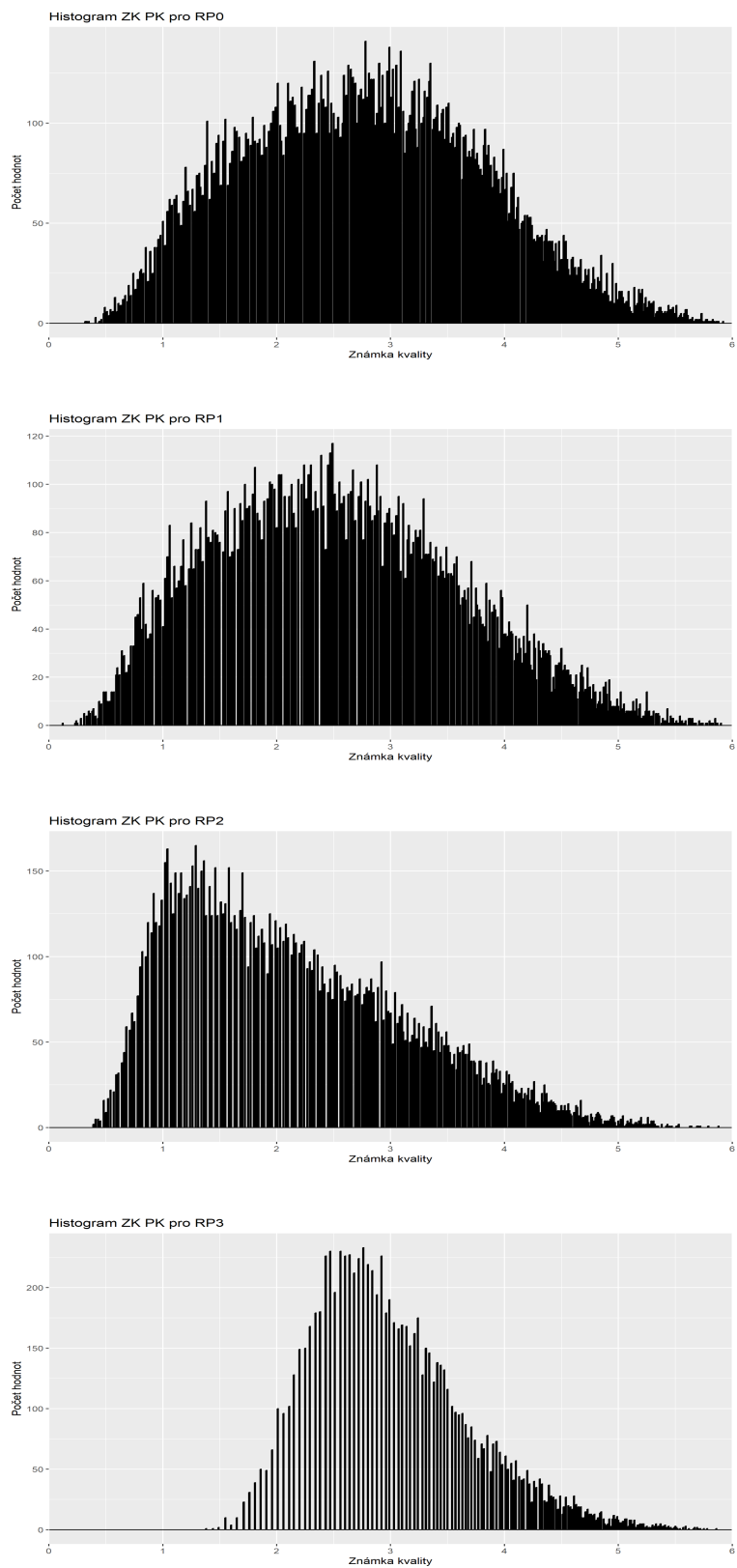
Obrázek B.12. Soubor 2: Směrodatné odchylky výšky koleje dle rychlostních pásem



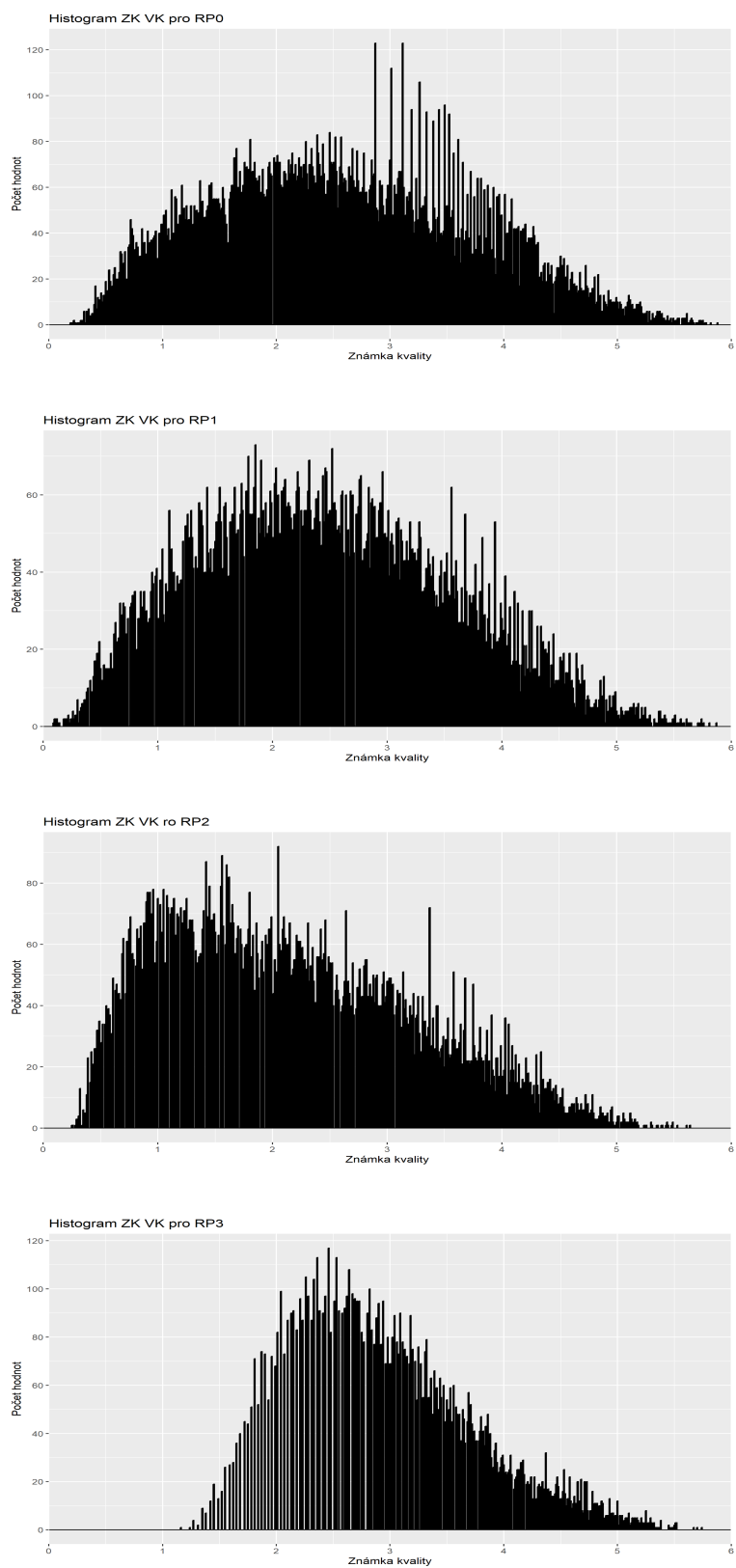
Obrázek B.13. Soubor 2: Histogramy známek kvality rozchodu koleje dle rychlostních pásem



Obrázek B.14. Soubor 2: Histogramy známek kvality směru koleje dle rychlostních pásem



Obrázek B.15. Soubor 2: Histogramy známek kvality převýšení koleje dle rychlostních pásem



Obrázek B.16. Soubor 2: Histogramy známek kvality výšky koleje dle rychlostních pásem