

OZUBNICOVÉ VÝHYBKY SYSTÉMU ABT A ŘEŠENÍ PRŮJEZDU OZUBNICOVÉHO VOZIDLA

ABT RACK RAILWAY TURNOUTS AND RACK RAILWAY VEHICLE PASSAGE SOLUTIONS

Lukáš RAIF¹, Antonín VÉVODA², Miroslav KOMÁREK³, Libor VÝMOLA⁴

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252705

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

V souvislosti s modernizacemi ozubnicových tratí v Česku a na Slovensku v posledních letech (Štrba – Štrbské Pleso v roce 2021 a Tanvald – Kořenov v roce 2025) bylo potřeba navrhnout a vyrobit ozubnicové výhybky pro tyto tratě, což obnášelo důkladně prostudovat aktuální řešení takových výhybek v zahraničí a následně navrhnout řešení vlastní. Příspěvek je zaměřen na aktuálně řešenou problematiku výhybek pro Abtův systém ozubnice, který je použit na modernizované trati Tanvald – Kořenov. V příspěvku budou čtenáři seznámeni s typy ozubnicových výhybek pro Abtův systém ozubnice. Dále je představeno řešení ozubnicové výhybky českého výrobce výhybek, DT – Výhybkárny a strojírny, a.s. V rámci vývoje výhybek byla velká pozornost zaměřena i na interakci výhybky nejen s ozubnicovým, ale i adhezním vozidlem se zaměřením na možné kolize. Bylo potřeba se vypořádat s chybějícími podklady, což bylo částečně nahrazeno 3D skenováním podvozků lokomotivy. V příspěvku je pozornost věnována i problematice interakce ozubeného kola s ozubeným hřebenem.

Klíčová slova

výhybka, ozubnicová dráha, ozubnicové vozidlo, Abtova ozubnice

Abstract

In connection with the modernization of the rack railway lines in Czechia and Slovakia in recent years (Štrba – Štrbské Pleso in 2021 and Tanvald – Kořenov in 2025), it was necessary to design and produce rack railway turnouts for these lines, which involved a thorough study of the current solution of such turnouts abroad and then designing own solution. The paper focuses on the currently designed turnouts for the Abt rack railway system, which is used on the modernized line Tanvald – Kořenov. In the paper the readers will be introduced to the types of the rack railway turnouts for the Abt system. Furthermore, the rack railway turnout solution of the Czech manufacturer of switches and crossings, DT – Výhybkárny a strojírny, a.s., is presented. Within the development of turnouts, much attention was also focused on the interaction of the turnout not only with the rack railway vehicle but also with the adhesion vehicle, with a focus on possible collisions. It was necessary to deal with the

¹ Ing. Lukáš Raif, Ph.D., © 0000-0001-7628-0545. DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Kojetínská 4750/6, 796 01 Prostějov, Česká republika, tel.: +420 702 153 485, e-mail: raif@dtvs.cz

² Ing. Antonín Vévoda. DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Kojetínská 4750/6, 796 01 Prostějov, Česká republika, tel.: +420 601 391 741, e-mail: vevoda@dtvs.cz

³ Ing. Miroslav Komárek. DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Kojetínská 4750/6, 796 01 Prostějov, Česká republika, tel.: +420 720 846 383, e-mail: komarek.konst@dtvs.cz

⁴ Ing. Libor Výmola. DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Kojetínská 4750/6, 796 01 Prostějov, Česká republika, tel.: +420 720 989 504, e-mail: vymolal@dtvs.cz

missing supporting documents, which was partially replaced by 3D scanning of the locomotive bogie components. In the paper, attention is also paid to the problem of the rack and cogwheel interaction.

Keywords

turnout, rack railway, rack railway vehicle, Abt rack rail

1 ÚVOD

Železniční dráhy vybavené ozubnicí představují jedinečné řešení pro dopravu v náročném terénu, kde je přenos trakčních a brzdných sil pomocí adheze nedostatečný. Výhybky s ozubnicí pak hrají zásadní roli v řízení směru jízdy a propustnosti na těchto tratích, pokud se stanice musí nacházet ve velkých sklonech. Výhybky musí splňovat nejen běžné požadavky na nesení a vedení kolejového vozidla a systém ovládání, ale i specifické technické nároky spojené s ozubnicovým systémem pro zachování přenosu trakčních a brzdných sil i při průjezdu výhybkou. Tento příspěvek je podrobně zaměřen na systémy ozubnic, principy fungování ozubnicových výhybek, jejich konstrukci a význam v rámci ozubnicových železničních drah.

2 OZUBNICOVÉ DRÁHY V ČR A SR

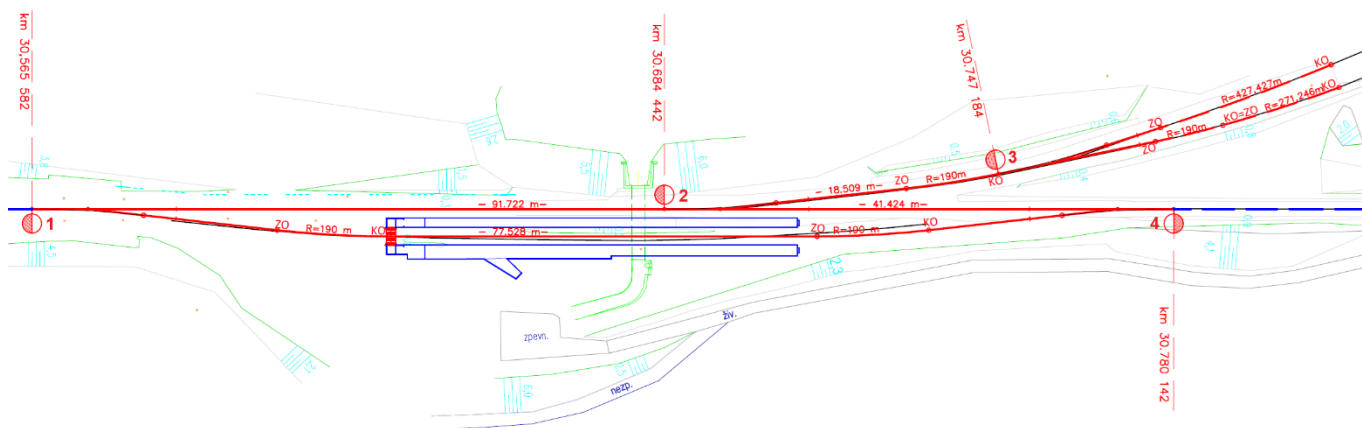
V Česku a na Slovensku se nacházejí celkem 3 železniční dráhy vybavené ozubnicí. Patrně nejznámější z nich je úzkorozchodná ozubnicová dráha na Slovensku ve Vysokých Tatrách mezi Štrbou a Štrbským plesem (délka cca 4,5 km). Na této dráze, jako jediné ze všech 3 ozubnicových drah, je provozována pravidelná osobní doprava s čistě ozubnicovým provozem a ozubnicovými vozidly. Další dvě dráhy jsou specifické pouze ozubnicovými úseky na jinak adhezní dráze normálního rozchodu koleje. Jediná taková dráha v ČR je mezi stanicemi Tanvald a Kořenov na pomezí Jizerských hor a Krkonoš (obsahuje cca 5 km koleje s ozubnicí). Další adhezní dráha s ozubnicovými úseky je pak na Slovensku mezi stanicemi Pohronská Polhora – Tisovec (cca 6 km koleje s ozubnicí). Pravidelná doprava je na obou těchto drahách tvořena výhradně adhezními vozidly a ozubnicová vozidla dnes projíždějí těmito úseky zejména jako turistické nostalgické vlaky. [1, 2]

2.1 Ozubnicová dráha Tanvald – Kořenov

Ozubnicová dráha Tanvald – Kořenov je horská kolejová dráha s normálním rozchodem koleje 1435 mm, která je částí regionální železniční trati Liberec – Harrachov. Tato jednokolejná neelektrifikovaná horská kolejová dráha je vybavena kolejí s ozubnicí pouze v úsecích o větších podélných sklonech. Maximální sklon je 58 ‰. Na trati je použit systém dvoulamelové Abtovy ozubnice. [3]

Na této dráze se nachází celkem 4 železniční stanice – Tanvald, Desná, Dolní Polubný a Kořenov. Historicky byly ozubnicové výhybky instalovány pouze do žst. Dolní Polubný, přes kterou ozubnice průběžně procházela (převládající podélný sklon ve staničních kolejích je cca 30 ‰). Jednalo se celkem o 3 ozubnicové výhybky v dopravních kolejích a 2 konvenční výhybky v manipulačních kolejích. Ozubnicové výhybky byly vloženy do hlavní koleje do rozvětvení do předjízdny staniční koleje a z průběžné staniční koleje ještě do rozvětvení do manipulačních kolejí. Toto uspořádání bylo v roce 1992 zredukováno, předjízdna dopravní kolej byla zrušena a ozubnicová výhybka pro odbočení do manipulační koleje nahrazena konvenční výhybkou. V oblasti stanice byla zrušena ozubnice, přičemž přibližně v poloze původních ozubnicových výhybek pro rozvětvení předjízdny koleje byly zřízeny nájezdy na ozubnici. [4]

Aktuálně v roce 2025 probíhá rekonstrukce železniční stanice (viz obr. 1), při které jí bude navráceno původní uspořádání kolejíště včetně třech ozubnicových výhybek, které byly nově zkonstruovány a vyrobeny v DT. [5]



Obr. 1 Uspořádání stanice Dolní Polubný po rekonstrukci. Zleva postupně výhybky č. 1, 2, 3 a 4. Výhybka č. 3 je konvenčního provedení, všechny tři výhybky v hlavní koleji jsou potom ozubnicové; zdroj: [5]

3 ŽELEZNIČNÍ SVRŠEK

Železniční svršek ozubnicových drah je široké téma. [6] Mimo problematiku různých systémů ozubnic do této oblasti patří také konstrukce běžné koleje, kotvení kolejového roštu, konstrukční řešení nájezdů na ozubnici a problematika výhybek a výhybkových konstrukcí. V tomto článku bude za účelem následujících souvislostí popsán pouze systém Abtovy ozubnice a příslušné typy výhybek.

3.1 Systém dvoulamelové Abtovy ozubnice

Tento systém ozubnice byl navržen švýcarským inženýrem Carlem Romanem Abtem v 80. letech 19. století. Jedná se o dvě ozubnicové lamely, které jsou vzájemně přesazené (viz obr. 2), v případě dvoulamelového systému o polovinu modulu ozubení, v případě třílamelového systému o třetiny modulu ozubení. [7] Rozteč zubů je zpravidla 120 mm. Výška roztečné přímky a hlavové přímky nad temenem poježděné kolejnice (TK) je různá dle konkrétní dráhy. V případě ozubnicové dráhy Tanvald – Kořenov, resp. Pohronská Polhora – Tisovec, je roztečná přímka 55 mm nad TK a hlavová přímka 70 mm nad TK. Světlá vzdálenost mezi lamelami je zpravidla 32 až 40 mm; v případě výše zmíněných předmětných drah v ČR a SR je 40 mm. Tloušťka lamel se pak zpravidla dimenzuje dle zatížení. Na dráze Tanvald – Kořenov byla původně tloušťka lamel 35 mm, v průběhu času byla při výměně nahrazena za lamely o tloušťce 40 mm. [4, 5]



Obr. 2 Systém dvoulamelové Abtovy ozubnice na ozubnicové dráze Schneebergbahn v Rakousku

Lamely se montují na stoličky (resp. držáky ozubnice), a to tak, že se vždy musí překrývat spoj lamel minimálně ob jeden pražec. Lamely se z valné většiny šroubují; svařování lamel u Abtova systému bylo zkušebně provedeno pouze na dráze Montserrat ve Španělsku. [6] V případě šroubových spojů je nutná

konstrukční spára mezi lamelami, což zabezpečuje jak teplotní dilataci, tak regulaci nevstřícnosti vznikající v obloucích mezi lamelou vnitřní a vnější. V případě šroubovaných lamel se spárou není nutné se zabývat přídatným silovým účinkem od teplotních změn v ozubnicovém pásu v případě použité bezstykové koleje (na rozdíl od systému Strub, který při svaření spolupůsobí s kolejovým roštem). Jelikož se lamely ve sklonu opotřebovávají jednostranně, je možno v rámci údržby také otáčet lamely naopak, aby se opotřebovávala druhá strana zubů. [6]

3.2 Typy výhybek

Existuje několik řešení ozubnicových výhybek, které vychází také ze specifík různých systémů ozubnic. Proto jsou také některé typy výhybek použitelné jen pro některý ze systémů ozubnic, přičemž některé jsou použitelné pro více systémů ozubnic. Rozdělení typů ozubnicových výhybek je převzato podle literatury [6]. Existuje 5 základních typů, které lze částečně kombinovat. Pro Abtovu ozubnici se používá typ II a typ V; tyto typy jsou podrobně popsány níže.

Dále také existují speciální „výhybky“, které však nejsou úplně výhybkami z hlediska dnešního technického konstrukčního pojetí výhybky; jedná se o výhybky tzv. „ohýbací“ (něm. term. *Biegeweichen*), tzv. „přesuvné“ (něm. term. *Schiebeweichen*), případně také tzv. „obracecí“ či „přetáčecí“ (něm. term. *Gleiswender*). [6]

Výhybka typu II

Z hlediska konstrukce dnešních ozubnicových výhybek se jedná o archaickou konstrukci. Byla navržena v roce 1891 přímo Carlem Romanem Abtem. Použití této výhybky není vhodné ve sklonech, jelikož přes výhybku nejsou průběžně obě ozubnicové lamely v záběru s ozubeným kolem; je využíváno principu vystřídání pravé a levé lamely při průjezdu výhybkou, což zjednodušuje celou konstrukci výhybky (viz obr. 3 vlevo). Výhodou tohoto typu výhybky je, že neobsahuje přerušené pojižděné kolejnice, což eliminuje putování kolejnic, zjednodušuje přenos normálových sil z bezstykové koleje a eliminuje zvýšené dynamické namáhání, které by vzniklo přerušením kolejnic. U výhybky tohoto typu je rovněž jednodušší přestavný mechanismus, jelikož se pohybují pouze relativně krátké segmenty ozubnicových lamel ve střední části, a to tak, že na jedné straně se přisunují k pojižděné středové kolejnici nepojižděného směru, resp. se na druhé straně odsunují od pojižděné středové kolejnice pojižděného směru, čímž se vytváří prostor pro průjezd kola v okolí pojižděné kolejnice. Bylo zjištěno, že u tohoto typu výhybky jsou kritická místa, a to tam, kde se k průběžné lamelě přidává druhá lamela nebo v místě, kde se lamely rozbíhají. V některých případech se v těchto kritických místech konstruují tvarové úpravy zubu. [6]

Jedná se o typ výhybky, který byl použit pro žst. Dolní Polubný jak v původní, tak v nové verzi. Popis principu průjezdu vozidla je pak podrobně popsán v kapitole 4.2.

Výhybka typu V

Tento typ výhybky pro Abtův systém ozubnice je dnes celosvětově mnohem rozšířenější než starší typ II. Některé dráhy již ani jiný typ (např. Matterhorn Gotthard Bahn) nepoužívají. Hlavní výhodou tohoto typu je, že má průběžně přes celou výhybku dvě lamely (viz obr. 3 vpravo), což umožňuje konstantní záběr ozubeného kola do obou lamel. Také jsou eliminována místa, kde se lamely rozbíhají, či střídají. Tento typ výhybky je tedy všeobecně mnohem vhodnější do úseků o větších sklonech a pro vyšší rychlosti.

Výhybky pak mají z hlediska konstrukce nedostatek v přerušení pojižděných kolejnic, což je problém z hlediska přenosu sil z bezstykové koleje, a proto výhybka vyžaduje konstrukci velkého množství opěrek proti putování kolejnic. Výhybka je také složitější z hlediska návrhu přestavných a závěrových systémů, jelikož je zde více bodů přestavování – jazyky, ozubnicové hřebeny ve výměně a pojižděné kolejnice a ozubnicové hřebeny ve střední části. Vzhledem k přestavování pojižděných kolejnic je také zpravidla ve střední části výhybky instalován závěr, který u typu II, kde se přestavují pouze jednotlivé lamely, používán často není.



Obr. 3 Porovnání typů výchybek pro systém Abtovy ozubnice – typ II (vlevo) a typ V (vpravo). Výchybky vyfoceny na ozubnicové dráze Schneebergbahn v Rakousku

4 VÝHYBKA PRO ŽST. DOLNÍ POLUBNÝ

4.1 Technické řešení výchybky

Požadavkem Správy železnic bylo, aby se výchybka co nejvíce blížila původnímu provedení výchybky, která byla navržena ve Vítkovických železárnách a schválena výnosem ČSD v roce 1936. Jedná se o typ II ozubnicové výchybky dle [6]. Přesto že se jedná o archaickou konstrukci výchybky dle [6], lze výběr tohoto typu výchybky pro danou aplikaci považovat v zásadě za vhodný, protože se jednak výchybky nenacházejí ve významných sklonech (tj. konkrétně ve sklonech 27, 31 a 40 promile) a jednak jde o jednodušší konstrukci ozubnicové výchybky (při srovnání s ostatními typy).

Ve stanici jsou celkem 3 ozubnicové výchybky, jedna pravá a dvě levé v základním tvaru. **Geometricky** se jedná o výchibku tvaru 1:9-190 nemající žádnou odlišnost oproti konvenčním výchybám této geometrie. Maximální rychlost v oblouku odbočné větve je z hlediska maximálního nedostatku převýšení standardně 40 km/h (dle [10]), při ozubnicovém provozu však může být rychlost omezena (viz [11]).

4.2 Konstrukční prvky výchybky

Celý modernizovaný úsek ozubnicové dráhy je na soustavě železničního svršku S 49, v běžné koleji s Y-pražci. Z pohledu **kolejového** bylo snahou co nejvíce výchibku přiblížit konvenční výchybce z hlediska dostupnosti náhradních dílů. To se podařilo jen částečně, protože výchybka má jistá specifika. Zůstaly zachovány následující komponenty: srdcovka typu SK, přídržnice a kolejnice k přídržnici v srdcovkové části, vnější pojižděné kolejnice ve střední části. Mírnou úpravou musely projít jazyky a opornice ve výměnové části, přičemž odlišnost spočívala pouze v poloze vrtání jazykových opěrek. Středové kolejnice ve střední části prošly mírnou úpravou – zfrézováním oblasti pojižděné hrany tak, aby byla svislá a zajišťovala dokonalé doléhání pohyblivého ozubnicového hřebenu. Dále byla doplněna do střední části ochranná kolejnice¹ přídržnicového profilu z důvodu minimalizace následků při případném rozřezu (viz kap. 6.3). Systémy upevnění kolejiva k pražcům vycházejí konstrukčně ze stávajících systémů upevnění pro betonové pražce s tím rozdílem, že bylo zvoleno uchycení k pražci přivařením základové desky podkladnic. To mohlo být provedeno z toho důvodu, že není požadavek na elektrickou izolaci kolejnicových pásů, jelikož na této trati bude zabezpečení počítači náprav. Dále bylo snahou výchibku konstrukčně přiblížit i přiléhající běžné koleji, proto bylo zvoleno řešení s ocelovými pražci konstrukčně blízkými navazujícím Y-pražcům. Ve výchybce byl použit také standardní žlabový pražec ve výměnové části, který byl upraven pro uchycení držáku ozubnice.

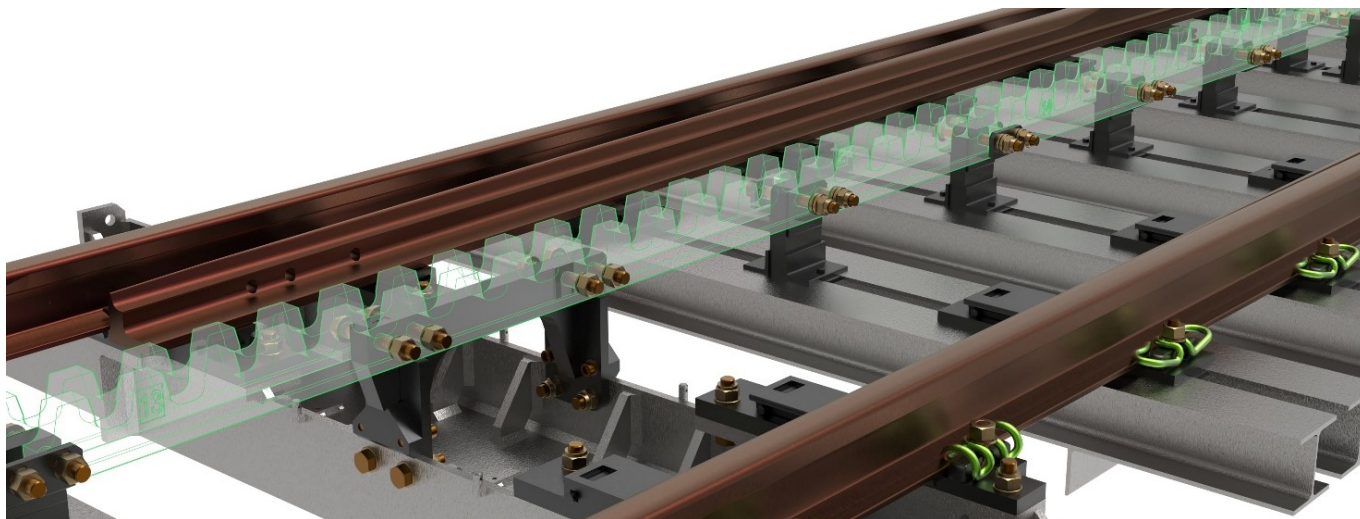
^{*} Pozn. Z hlediska terminologie výchybek a výchybkových konstrukcí dle ČSN EN 13232-3 je ochranná kolejnice v zásadě totéž co přídržnice, v běžném provozním stavu se ale u ní nepředpokládá dotyk vnitřní strany obruče kola při průjezdu (na rozdíl od přídržnice nebo přídržné kolejnice). Zpravidla má tedy širší žlábek než přídržnice, konstrukčně se obvykle od přídržnice neliší.



Obr. 4 Pohled na ozubnicovou výhybku od výměnové části – zřejmý je žlabový pražec, ocelové pražce a rozbíhající se lamely dvoulamelového Abtova systému ozubnice

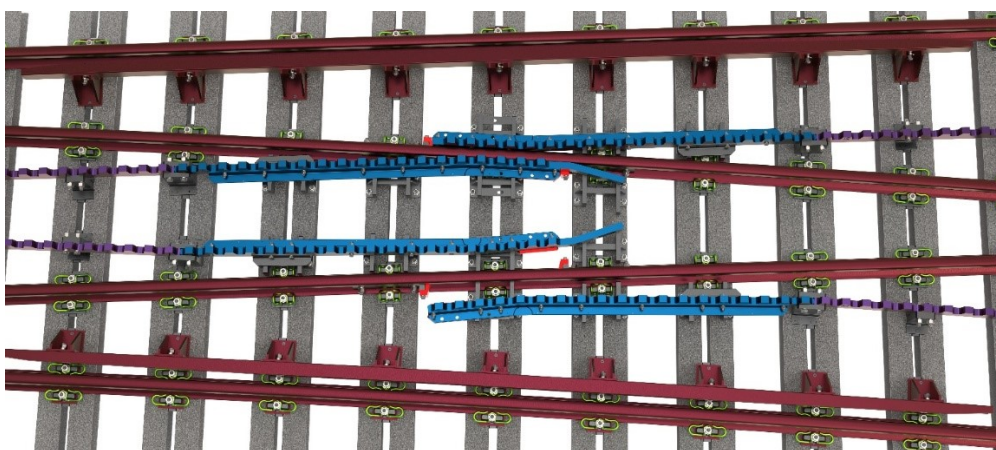
Řešení ozubnice ve výhybce bylo provedeno dle původních výhybek. Toto řešení využívá dvoulamelového systému a skutečnosti, že při malých sklonech stačí, aby byla v záběru jen jedna z lamel. Vhodným vystřídáním pravé a levé lamely dochází tedy ke konstrukčnímu zjednodušení díky eliminaci pohyblivých částí. Ve výměnové části se jednoduše rozbíhá pravá a levá lamela tak, že ozubené kolo při příslušném oddálení druhé lamely z ní sjede a pokračuje pouze po jedné lamele (tj. při jízdě doprava po pravé lamelě a při jízdě doleva po levé – patrné z obr. 4). V místě, kde již nemůže dojít ke koliznímu kontaktu ozubeného kola s právě nepojížděnou větví výhybky, je pak doplněna opět druhá lamela. Přechod ozubnice přes středovou kolejnici střední části výhybky je opět řešen principem, kdy stačí, aby bylo ozubené kolo v záběru pouze s jednou lamelou, viz obr. 5. V místě překonávané středové kolejnice druhého směru doléhají pohyblivé hřebeny k této kolejnici, přičemž lamely jsou vyhnuty, aby mohly pokračovat podél této kolejnice, ke které doléhají. Ozubené kolo tedy při přechodu postupně sjíždí z jedné lamely a postupně najíždí na druhou lamelu. Lamely v této oblasti musejí být pohyblivé, aby byl zabezpečen volný průjezd pro kolo v příslušném směru průjezdu. V následující oblasti za pohyblivými lamelami už může být opět přidána druhá lamela.

Držáky (stoličky) pro ozubnicové tyče jsou svařovaného provedení, zjednodušeně řečeno se jedná o ocelovou desku, na niž jsou přivařeny dva úhelníky, na nichž leží ozubnicový hřeben (viz obr. 5). Uchycení lamely k ocelové desce držáku je pak pomocí dvou šroubů s maticemi. Speciální řešení držáku ozubnice vyžadoval žlabový pražec; zde byl navržen vyvýšený rám, který je uchycen k bočnicím žlabového pražce.



Obr. 5 Detail uchycení ozubnicových lamel v oblasti výhybky – patrné uchycení lamely na žlabovém pražci i typické upevnění na ocelových pražcích

Pohyblivé lamely ve střední části (viz obr. 6) jsou vyztuženy úhelníky z vnější strany po celé délce a z vnitřní strany pouze u první kluzné plochy. Úhelníky slouží nejen pro vyztužení a zvýšení stability na vzpěr, ale také z důvodu zamezení klopení tyče a zvětšení kontaktní plochy na kluzných plochách. Tyče kloužou po kluzných plochách tvořených tlustým plechem přivařeným k systému upevnění. Pohyblivé uchycení bylo u původní výhybky řešeno formou čepu, u aktuálního řešení je provedeno formou speciálního krajního držáku ozubnicové tyče s drážkou vyfrézovanou do „V“, což umožňuje pohyb v příčném směru. Přenos trakčních sil se předpokládá směrem k místu otáčení takový, že se vymezí vůle v držáku a síla přejde do pevně uchycené následující lamely, přes niž se roznese do pražců. Pro přenos síly v opačném směru byl navržen ocelový záchytný prvek (na obr. 6 červený prvek), přes který se trakční síla přenesou do středové pojižděné kolejnice. Pohyblivé lamely mají také prvek zabraňující nadzvedávání lamely, jedná se o ocelový prvek, který se v přilehlé poloze zasune pod hlavu pojižděné středové kolejnice.



Obr. 6 Střední část výhybky s pohyblivými ozubnicovými lamelami – u vnějších pojižděných kolejnic jsou doplněny ochranné kolejnice stejného konstrukčního provedení jako přídržnice, ale se širším žlábkem (50 mm)

Na konstrukčním řešení výhybky spolupracovala také společnost AŽD návrhem **přestavných a závěrových systémů**. Ve výměnové části jsou u tohoto typu ozubnicové výhybky pohyblivé pouze jazyky stejně jako u konvenční výhybky. Proto nebylo tedy nutné vyvíjet kompletně nový systém pro výměnovou část. Přestavování výhybky se v první fázi předpokládá ručně pomocí standardního výměníku se závažím typu K3. Vše je ale ve výhybce nachystáno na dodatečnou montáž elektromotorického přestavníku EP600 na přírubový žlabový pražec. Závěr je ve výhybce použit standardní čelistový. Naopak ve střední části musel být nově vyvinut systém táhel a mechanismus pro přestavování pohyblivých lamel spojený s přestavníkem ve výměnové části. Byl navržen táhlový mechanismus přes úhlové páky, který vede od přestavníku ve výměnové části. Okolo pražce, který je uprostřed pohyblivých lamel, povedou nastavitelné tyče, které budou zabezpečovat příslušný pohyb a budou zajišťovat udržení lamel v přilehlé i odlehle poloze. Zvláštní závěr pro pohyblivé lamely nebyl navržen, výpočtem bylo potvrzeno, že zapevňovací síla po přestavení je pro pohyblivé lamely dostatečná i bez použití závěru.

5 PROVOZOVANÁ VOZIDLA

Pro řešení interakce vozidel s výhybkou musely být zjištěny podrobné informace o vozidlech, které se na této dráze vyskytují, a to jak ozubnicových, tak adhezních, aby mohla být stanovena případná kolizní místa a posouzen průjezd. Základní posouzení průjezdu provedla Správa železnic, která následně poskytla vstupní podklady. Stěžejními vozidly, která byla pro posouzení předmětem zájmu, byla ozubnicová motorová lokomotiva řady 715, která je na této dráze v počtu dvou kusů aktuálně v provozu, a adhezní motorový vůz řady 840, který z valné většiny aktuálně zabezpečuje osobní dopravu.

5.1 Popis provozovaných vozidel

Ozubnicová lokomotiva řady 715

Motorové ozubnicové lokomotivy řady 715 (dříve řada T426.0) vyrobila v roce 1961 v počtu 4 ks pro tehdejší ČSD rakouská lokomotivka SGP Floridsdorf Wien.

Pojezd lokomotivy je rámový, se čtyřmi hnacími dvojkolími, která jsou propojena spojnicemi poháněnými jalovou hřídelí od převodovky umístěné v zadní části lokomotivy. První a třetí dvojkolí jsou příčně posuvná (± 20 mm), což umožňuje průjezd oblouky malých poloměrů. Druhé a čtvrté dvojkolí jsou uložena bez příčné vůle. Nominální průměr hnacích kol je 1100 mm.

Výkon spalovacího motoru (809 kW) se dělí na dvě části – jedna část vstupuje do hydrodynamické převodovky pro pohon adhezních kol, druhá část výkonu (menší) vstupuje do hydrodynamické převodovky pohánějící ozubnicový stroj. Výkon motoru je dělen v poměru 574 kW pro adhezi ku 235 kW pro ozubnici. Ozubnicový stroj – vozík – je tříbodově a pružně uložen mezi nápravami (druhou a třetí) a je poháněn kloubovým hřídelem z ozubnicové hydrodynamické převodovky. Průměr roztečné kružnice ozubeného kola je 840 mm a ozubené kolo má 22 zubů. [4]

Stadler RS1

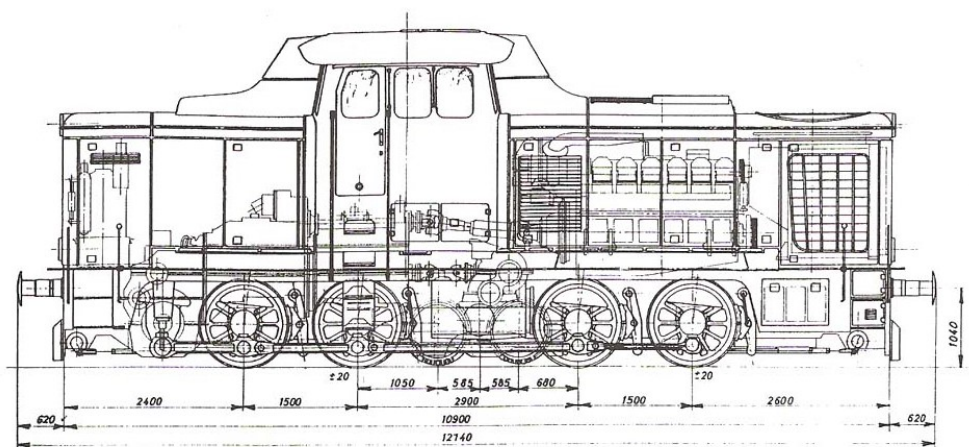
Adhezní provoz zajišťují čtyřnápravové motorové vozy řady 840 ČD vyrobené firmou Stadler pod obchodním označením Regio-Shuttle RS1. Vozy řady 840 jsou určeny objednavatelem dopravy pro provoz na ozubnicové dráze Tanvald – Kořenov, nejedná se však o ozubnicová vozidla, nicméně mají dostatečné trakční i brzdící vlastnosti pro adhezní provoz na této sklonově náročné trati.

5.2 Zajištění podkladů vozidel

Výkresová dokumentace

Za účelem zajištění výkresové dokumentace byly osloveny ČD, jakožto provozovatel vozidel jak ozubnicových, tak adhezních. Předmětem zájmu byla zejména lokomotiva řady 715, za účelem posouzení základní interakce s ozubnicovou výhybkou. Dále také vůz řady 840 za účelem ověření bezkolizního průjezdu ozubnicovou výhybkou.

Z hlediska ozubnicové lokomotivy řady 715 nebylo nalezeno dostatečné množství výkresové dokumentace týkající se pojezdu a ozubeného kola. Ukázka oskenovaného výkresu je na následujícím obr. 7.



Obr. 7 Výřez z výkresu ozubnicové lokomotivy řady 715

Skenování podvozku lokomotivy řady 715

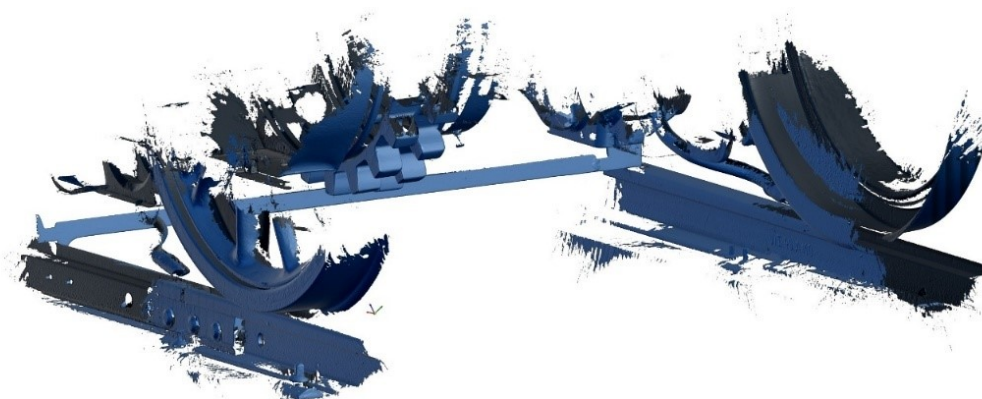
Nejprve bylo přistoupeno k 3D skenování podvozku ozubnicové lokomotivy řady 715 přímo ve výtopně v žst. Kořenov, kde jsou tyto lokomotivy deponovány. Metoda 3D skenování je v DT již více než 10 let běžně používána, a to především na pojížděné plochy kolejnic a komponentů výhybek za účelem

hodnocení míry a způsobu opotřebení (zejména pevné srdcovky). Poslední dobou se ale více uplatňuje i skenování komponentů vozidel pro potřeby posouzení průjezdnosti. Jedna z prvních aplikací 3D skenování vozidla byla tramvaj Stadler Tango NF2 u DPO Ostrava po vykolejení na kolejové křižovatce za účelem posouzení interakce vozidla a koleje při průjezdu předmětnou kolejovou křižovatkou.

V DT byl pro tyto potřeby využit 3D skener HandySCAN od dodvatele SolidVision, s.r.o. Jedná se o laserový ruční skener. Pro indexaci polohy skeneru vzhledem ke skenovanému objektu využívá tato technologie tzv. poziční značky (body), které se nalepují přímo na skenovaný objekt. Principiálně využívá skener principu 3D triangulace. Výsledky skenování jsou pak reprezentovány free-form nestrukturovanými 3D daty ve formě mračna bodů nebo polygonové sítě. Snímky, resp. skeny jsou shromažďovány do společného souřadného systému, kde jsou následně sloučeny do celistvého modelu. Tento proces je nazýván slučování (nebo také registrace) a může být prováděn buď již během skenování, nebo následným zpracováním.

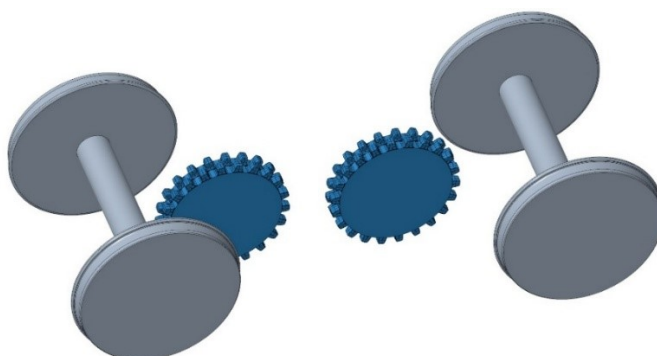
Následuje zpracování počítačovým programem (VX Elements), kde je možno data po naskenování následně editovat, čistit od náhodných odlesků, uzavírat díry, optimalizovat kvalitu dat a mnoho dalšího. Výsledná polygonová síť je většinou exportována jako STL (STereo-Lithography, nebo Standard Tessellation Language) soubor, nebo převedena na Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) plošný CAD model.

U lokomotivy řady 715 (konkrétně u vozidla 715 001-4) bylo oskenováno ozubené kolo (viditelná část) a přílehlý dvojkolí (viz obr. 8). Poloha druhého ozubeného kola, ostatních dvojkolí a další potřebné míry byly odečteny z výkresu a také fyzicky doměřeny ručně konvenčními metodami měření (metr, posuvné měřítko apod.).



Obr. 8 Surová oskenovaná plocha ozubeného kola a jednoho dvojkolí na lokomotivě 715.001

Následovalo zpracování modelu pojezdu pro posouzení jeho interakce s výhybkou. Byly využity oskenované segmenty ozubených kol a vymodelován zjednodušený model dvojkolí. Pro model byly převzaty reálné parametry dvojkolí (tj. tvar jízdních obrysů kol, rozkolí, průměry kol), parametry ozubeného kola a vzájemná poloha ozubených kol a dvojkolí. Byl sestaven zjednodušený model celého reálného pojezdu, viz obr. 9.



Obr. 9 Zjednodušený model pojezdu lokomotivy řady 715 vytvořený na základě reálných oskenovaných ploch – krajní dvojkolí zde nejsou vyobrazena

Sken muzejního exponátu ozubeného kola lokomotivy řady 715

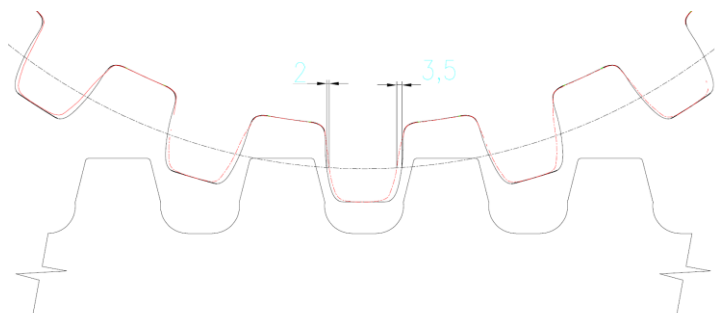
Dle informace předané od pracovníků v depu Kořenov nebylo na těchto lokomotivách ozubené kolo nikdy měněno. Proto vyvstala v souvislosti s následným posuzováním interakce vozidla a koleje otázka, jak by vypadalo ozubené kolo nové. Výkresová dokumentace původního ozubeného kola se nedochovala. Proto bylo snahou provést ještě porovnání 3D modelu ozubeného kola s jiným. Bylo proto využito existujícího 3D skenu ozubeného kola z muzea (viz obr. 10), který sloužil jako podklad pro Pražskou strojírnu, a.s., dodavatele ozubnicových tyčí a nájezdů na ozubnici. Původ tohoto ozubeného kola je neznámý – bylo buď vyrobeno jako náhradní a je dosud nepoužité nebo bylo demontováno z jedné ze zrušených lokomotiv řady 715.

Skenování zabezpečil pro Pražskou strojírnu, a.s. přímo dodavatel technologie 3D skenování, firma SolidVision, a.s. Metoda skenování byla zcela totožná, jakou používá přímo DT.



Obr. 10 Skenovaný muzejní exponát ozubeného kola lokomotivy řady 715

Následně proběhlo porovnání tvaru zubů obou ozubených kol. Při porovnání obou ozubených kol byly zjištěny rozdíly (viz obr. 11). Muzejní exponát ozubeného kola vykazuje menší opotřebení a symetrický tvar zubu. To indikuje, že se jedná buď o kolo nové, nebo bylo použito na lokomotivě, která na ozubnicových úsecích nebyla příliš využívána. Kolo oskenované na lokomotivě 715 001-4 potom vykazuje nejen boční opotřebení zubu, ale i nesymetrické opotřebení zubu, na roztečné kružnici se jedná o úbytek 2 mm z jedné a 3,5 mm ze druhé strany. Lze tedy usuzovat, že lokomotiva byla v minulosti používána spíše jednostranně směrem ke spádu trati.



Obr. 11 Porovnání ozubeného kola z muzea a z lokomotivy 715 001-4 – jsou patrné rozdíly v bočním opotřebení zubů

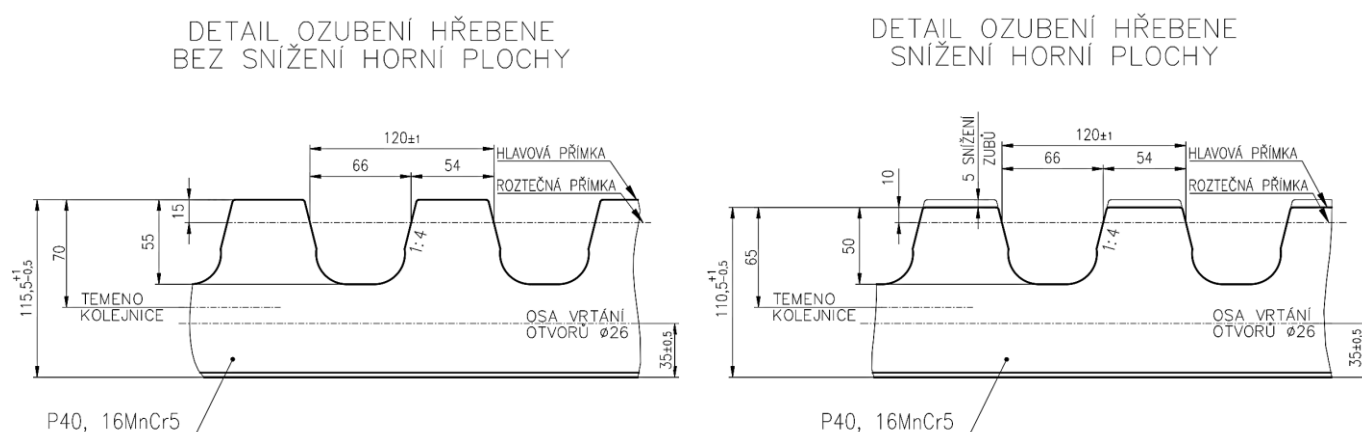
Rozpěra kolejnicové brzdy na motorovém voze řady 840

Kritickým místem na vozidle řady 840 jsou rozpěry mezi trámcí kolejnicové brzdy (viz obr. 12). Tato rozpěra má upravený tvar v oblasti osy koleje, což souvisí s provozem na ozubnicové dráze. V případě provozu vozidla pouze v běžné koleji je zde dostatečná vůle mezi horní plochou zubu a spodní plochou rozpěry. Pokud však vozidlo pojedje přes výhybky (se kterými se při konstruování vozidel nepočítalo), dochází k situaci, kdy ozubnicový pás v danou chvíli neprojížděného směru výhybky odbíhá postupně od osy koleje na stranu až po místo ve střední části, kde jsou instalovány pohyblivé ozubnicové hřebeny. To tedy znamená, že v případě výhybek již toto vybraní rozpěry není dostatečné při zohlednění provozních tolerancí.



Obr. 12 Rozpěry kolejnicové brzdy s vybráním pro ozubnicový hřeben; zdroj: Ing. Hartman (Správa železnic)

Z důvodu tohoto zjištění došlo tedy k úpravě horní plochy ozubených tyčí ve výhybce v kolizních oblastech. Byly diskutovány dvě možnosti snížení o požadovaných 5 mm. Buď mohlo dojít k posunutí celé ozubené tyče ve svislém směru nebo ke zfrézování ozubených tyčí z horní plochy. Jakožto konstrukčně „čistší“ řešení byla zvolena alternativa zfrézování z horní plochy (viz obr. 13) i s ohledem na to, že pokud by se v budoucnu pořídila jiná, třeba i ozubnicová vozidla, mohly by být ozubnicové tyče vyměněny za tyče se standardní geometrií, jelikož výšková poloha držáků ozubnice, všech otvorů a míst připojení přestavných tyčí je v tomto případě ve správné výšce.



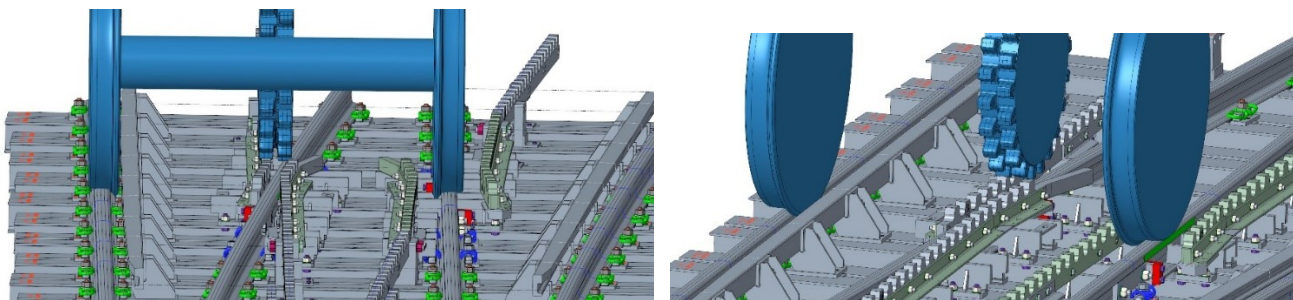
Obr. 13 Vlevo jmenovitý rozměr ozubnicové tyče, vpravo úprava pro výhybku snížením (zfrézováním) horní plochy zubů o 5 mm

6 INTERAKCE VOZIDLA S VÝHYBKOU

6.1 Posouzení průjezdu ozubnicové lokomotivy řady 715 výhybkou

Model vytvořený na základě oskenovaného segmentu podvozku posloužil pro názornější a kvalitnější posouzení průjezdu vozidla výhybkou. Bylo posuzováno postavení vozidla v oblouku a přechod ozubeného kola přes kritické oblasti.

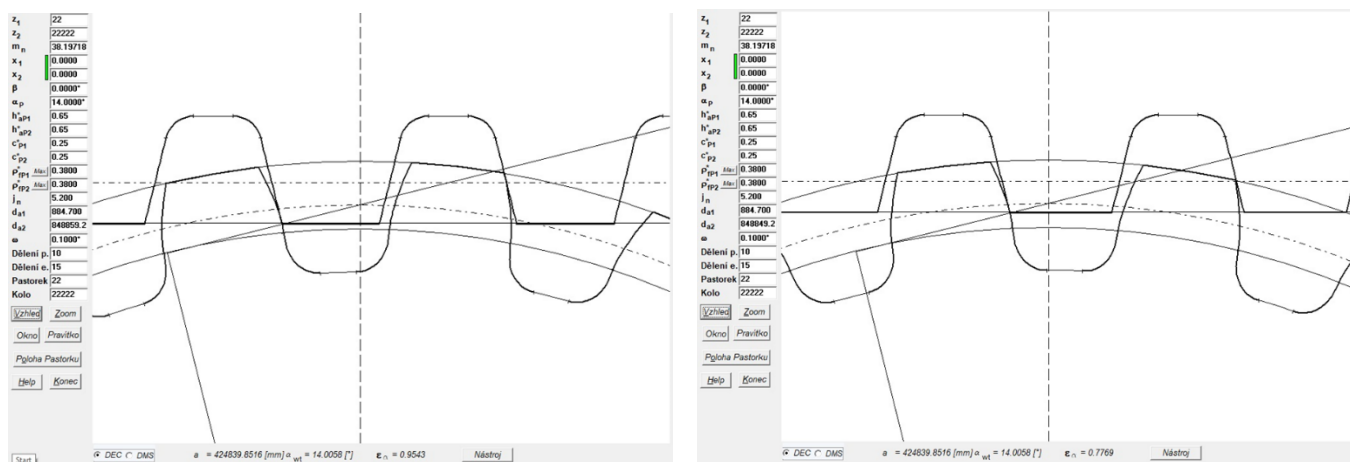
Stěžejní bylo posouzení průjezdu vozidla přes oblast pohyblivých hřebenů ve střední části (viz obr. 14). Nejprve bylo posuzováno místo vystřídání pravého a levého pohyblivého hřebenu, který v místě přiléhání k pojezdové kolejnici odbíhá mimo osu pohybu vozidla, a následně bylo posouzeno, zda odlehlá poloha pohyblivých hřebenů je dostatečná pro průjezd kol vozidla včetně rezervy pro opotřebené kolo, tolerance parametrů dvojkolí a příčný pohyb dvojkolí v jízdním kanále koleje. Ukázalo se, že použití ochranné kolejnice (šířka žlábků 50 mm), která byla použita zejména z důvodu případného rozřezu (viz kapitola 6.3) bude mít pozitivní vliv i z hlediska průjezdu vozidla s krajně opotřebeným jízdním obrysem, jelikož v případě zmenšeného rozchodu dvojkolí, a tudíž rozšířeném jízdním kanálu koleje, ochranná kolejnice povede dvojkolí příznivější nevychýlenou trajektorií ozubeného kola přes kritické místo přechodu.



Obr. 14 Posouzení průjezdu vozidla střední částí výhybky s pohyblivými ozubnicovými hřebeny – u vnějších pojezděných kolejnic je patrná ochranná kolejnice stejného konstrukčního provedení jako přídržnice

6.2 Interakce ozubené kolo/ozubený hřeben

Jelikož byl požadavek ve výhybce snížit ozubnicový hřeben o 5 mm, bylo řešeno také posouzení záběru ozubeného kola (pastorku) do hřebenu. Jako vstup pro výpočet byly využity sken muzejního exponátu ozubeného kola, které má tvar zřejmě se blížíci výkresovému stavu, a výrobní parametry hřebene (ozubnicové tyče). Byly zkoumány dva stavy – hřeben v původní výšce a hřeben ve snížené výšce (viz obr. 15). Výpočet byl proveden specializovaným softwarem, který vyvinul na VŠB-TU Ostrava prof. M. Němček. [12]



Obr. 15 Posouzení záběru ozubeného kola a hřebene – vlevo nominální stav, vpravo hřeben snížen o 5 mm; obrázky vykresleny v pozici na začátku záběru; zdroj: [12]

Hřeben má opracované boky zubů přímkově až po ostrý přechod do patního oblouku. Rozteč zubů je 120 mm, čemuž odpovídá čelní modul $m_n = 38,19718$. Výška funkční části zubu hřebene je podle výkresu 32 mm (při snížení je 27 mm). Celková výška zubu hřebene je 55 mm (po snížení je 50 mm).

Pro ozubené kolo platí stejný modul i rozteč. Celková výška zubu je 56,6 mm v obou případech. Ozubení vykazuje oproti standardním strojním ozubeným převodům velké reálné hlavové vůle, což se u ozubnicových drah zpravidla vyskytuje. Vzhledem k teorii ozubených převodů se v posuzovaném systému hřeben/ozubené kolo vyskytuje snížení zubu o cca 6 mm, podobně je tomu i u hřebene. Odsunutí ozubeného kola od hřebene je 10,747 mm, což vytváří boční vůli 5,2 mm. Lze podotknout, že velikost boční vůle nemá vliv na záběrové parametry převodu. Zvětšení boční vůle se dá dopočítat na základě změřených šířek zubů.

Posouzením bylo také zjištěno, že součinitel trvání záběru je při nominální výškové poloze hřebenu $\epsilon = 0,9543$ a při sníženém hřebeni o 5 mm $\epsilon = 0,7769$. Pokud je $\epsilon < 1$ nastává při odvalování ozubeného kola po hřebeni zjednodušeně řečeno situace, kdy není v záběru žádný zub, což je samozřejmě negativní situace. U strojních převodů se navrhuje ozubené převody zpravidla s $\epsilon > 1,2$. U Abtovy ozubnice toto ve standardním stavu nevadí, jelikož záběr probíhá ve dvou vzájemně posunutých lamel (hřebenech). Místo, v němž by nebyl v kontaktu s hřebem žádný ze zubů ozubeného kola, je tedy překlenuto druhou lamelou. U výhybky typu II, kde jsou místa s jednou lamelou jde o problematické oblasti, pokud ale nejsou

výhybky ve velkém sklonu a ozubnicové vozidlo bude úsekem projíždět s částečně také adhezním přenosem tažné síly, lze konstatovat, že při jízdě stálou rychlostí by tato skutečnost neměla činit problémy.

6.3 Řešení rozřeznosti výhybky

Ozubnicová výhybka není z principu rozřezná. Pokud není před výhybkou elektronicky hlídáno najetí z nesprávného směru, s největší pravděpodobností dojde k vykolejení (viz např. [13]). Při konstrukčním zpracování bylo tedy snahou minimalizovat případné škody v případě najetí vozidla z nesprávného směru.

Za tímto účelem byl na pohyblivé ozubnicové lamely ve střední části výhybky navržen z vnitřní strany pojižděné kolejnice výběh, jehož funkcí je, aby najíždějící okolek vozidla pokud možno odtlačil přiléhající lamelu a vytvořil si tak žlábek pro projetí. Předpokládá se, že obruč kola z vnější strany si také odtlačí pohyblivou lamelu z vnější strany pojižděné kolejnice. Jelikož by mělo kolo v tomto případě tendenci šplhat na hlavu pojižděné kolejnice, byla u vnějších středových kolejnic navržena ochranná kolejnice se šířkou žlábků 50 mm (standardně má přídržnice šířku žlábků 40 mm). Ochranná kolejnice by tedy dopomohla tomu, aby se dvojkolí udrželo v jízdním kanále koleje.

Navržená ochranná kolejnice má dále benefit také v tom, že střední část výhybky, která je citlivá na správné rozdělení pražců, udrží jejich správnou polohu vůči pojižděným kolejnicím a v případě krajně opotřebovaných jízdních obrysů kola ozubnicového vozidla zamezí přílišnému vychýlení dvojkolí vůči ose koleje, resp. ose ozubnicového pásu.

7 ZÁVĚRY

Na základě provedené rešerše ozubnicových výhybek v Evropě byla navržena nová ozubnicová výhybka pro Abtův systém ozubnice na míru Správě železnic, resp. specifickým potřebám trati Tanvald – Kořenov. Při návrhu byla inspirace jednak z totožné konstrukce z minulosti, ale také z obdobných výhybek konkurenčních výrobců vyskytujících se např. na Schneebergbahn v Rakousku nebo na Gornergrat Bahn ve Švýcarsku. Navržená výhybka je také použitelná pro adhezní provoz a je v ní řešena také minimalizace případných škod v případě rozřezu.

Z pohledu provozovatele ozubnicové dopravy lze doporučit se v budoucnu zabývat problematikou tvaru ozubeného kola. Jelikož neexistuje výkresová dokumentace původního ozubeného kola, bude nezbytné přistoupit k návrhu tvaru nového kola tak, aby se zlepšily parametry ozubeného převodu, zejména součinitele trvání záběru. Jelikož proběhla náročná rekonstrukce trati včetně dopravní Dolní Polubný, nabízí se zvážení možnosti pořízení nových „pseudo-ozubnicových“ vozidel pro osobní dopravu, které by disponovaly ozubeným kolem nikoliv pro přenos trakční síly, ale zejména pro potřeby brzdění, což by umožnilo zvýšit rychlost průjezdu vozidel po spádu, která je aktuálně z důvodu bezpečnosti značně snížena.

Správce železniční infrastruktury by měl zabezpečit řádnou údržbu výhybky včetně mazání všech kluzných ploch, ale také ozubnicových tyčí v místě kontaktu s ozubeným kolem v případě, že vozidla nedisponují samomazacím mechanismem. Pokud by se v budoucnu zavedl ozubnicový provoz ve větší míře s příslušnými vozidly, lze doporučit vyměnit snížené ozubnicové lamely ve výhybce za nové se jmenovitou hodnotou hlavové přímky nad TK. Dále lze doporučit, vzhledem k součiniteli trvání záběru < 1 , aby správce infrastruktury do všech oblastí běžné koleje vložil standardně obě lamely, a to i v místech s menším sklonem (např. v obvodu stanice), kde by se nabízelo jako dostatečné řešení použití pouze jedné lamely.

Autoři článku, resp. vývojový tým DT, děkuje prof. Dr. Ing. Miloši Němčkovi z VŠB-TU Ostrava za odborné konzultace týkající se ozubených převodů ve vztahu k návrhu ozubnicové výhybky. Dále děkují pracovníkům depa Kořenov za zprostředkování prohlídky a skenování ozubnicových lokomotiv, pracovníkům ČD za poskytnutí potřebných informací o provozovaných adhezních vozidlech a zástupcům Matterhorn Gotthard Bahn za předané informace ohledně údržby ozubnicových výhybek včetně ukázky v žst. Stalden-Saas.



Literatura

- [1] VOKÁČ, P. *K horským velikánům zub za zubem*. Praha: Karpana, 2011. ISBN 978-80-904720-0-6.
- [2] HARÁK, M. *Ozubnicové a pozemní lanové dráhy Evropy*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2023. ISBN 978-80-271-3801-2.
- [3] ČERNÝ, K., NAVRÁTIL, M., KÁRNÍK, J. *Horská železnice Liberec – Jelenia Góra na starých pohlednicích*. Praha: Tváře, 2017. ISBN 978-80-906621-4-8.
- [4] BOREK, V., FRIML, R. *Ozubnicové lokomotivy našich drah*. Praha: Corona, 2011. ISBN 978-80-86116-69-3.
- [5] SAGASTA s.r.o. *Rekonstrukce dopravní Dolní Polubný*. Projektová dokumentace stavby.
- [6] VÖV UTP D RTE 29700. *Systemtechnik Zahnradbahnen*. Dokumentation.
- [7] ABT, C. R., *Lokomotiv Steilbahnen und Seilbahnen*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, 1901.
- [8] SUDOP KOŠICE. *Rekonštrukcia ozubnice Štrba – Štrbské Pleso*. Projektová dokumentace stavby.
- [9] TENSOL. *Technické podklady, produktové listy*.
- [10] ČSN 73 6360-1:2020. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování*.
- [11] SŽDC (ČD) D 40. *Předpis pro organizování drážní dopravy na tratích Liberec – Tanvald – Železný Brod, Tanvald – Harrachov, Smržovka – Josefův Důl*. České dráhy, 1999.
- [12] NĚMČEK, M. *Geometrie, Profil, ProfilData*. Specializovaný software. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/347/cs/veda-a-vyzkum/software/>. [citováno 2025-06-15]
- [13] BUNDESANSTALT FÜR VERKEHR. *Entgleisung Salamander Triebkopf 13 auf Fahrt 4 am 10. Mai 2011 Schneebergbahn Ausweiche Wasserstelle am Hengst*. Untersuchungsbericht. Wien, 2011.

Zasláno / received: 02. 07. 2025, přijato / accepted: 11. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Petr Vnenk, Ph.D. (Správa železnic, státní organizace), Ing. Aleš Hába, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera).