



26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.14>

SIMULACE VYKOLEJENÍ NÁKLADNÍHO VOZU SIMULATION OF FREIGHT WAGON DERAILMENT

Jan PEJŠA^{*)}

1 ÚVOD

Příspěvek se týká simulací vykolejení nákladního vozu. Simulace byly založeny na datech skutečné nehody. Pro účely příspěvku byly některé údaje o nehodě anonymizovány. Provedené simulace měly pomoci dopravci objasnit příčiny nehody. Došlo totiž ohledně příčiny nehody ke sporu mezi dopravcem a firmou, která náklad nakládala. Firma svojí vinu na nehodě popírala a vinu za nehodu svalovala na dopravce. Argumentovala zjištěním vyšetřovací komise, že vykolejený vůz měl opotřebené jízdní profily kol více než dovoluje norma [1]. Ale také bylo zjištěno, že velká část vozů vlakové soupravy byla podle normy [4] nesprávně ložena a existovalo podezření, že vykolejený vůz byl také nesprávně ložen.

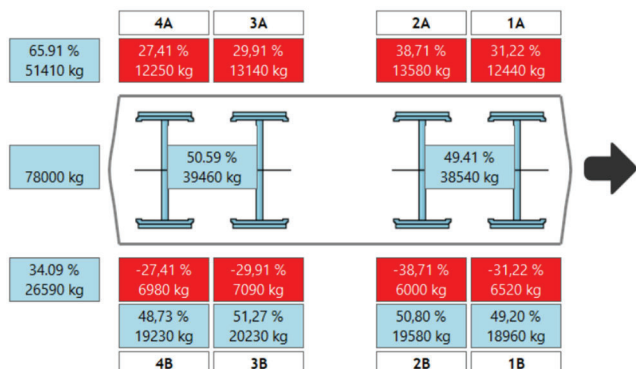
2 POPIS NEHODY

Vlak byl složen z vozů typu Eas, které byly loženy sypkým materiálem. Vykolejení nastalo v levém oblouku o poloměru 340 m na traťovém km 0. K vykolejení došlo na prvním podvozku vyšetřovaného vozu (dále jen „vůz X“). Vlak pokračoval několik kilometrů s vykolejeným podvozkem v jízdě až do stanice, kde na výhybce vykolejil jeho druhý podvozek a první podvozek dalšího vozu. Následně došlo k roztržení vlaku a vlak zastavil. Po nehodě bylo zjištěno, že několik vozů vlaku bylo nesprávně loženo, levé strany vozů byly výrazně přitíženy. Největší jednostranné ložení bylo naměřeno na voze Y řazeném před vozem X, u nějž byla levá strana vůči pravé straně vozu ve smyslu kolových sil přitížena o cca 32 % (**obr. 1**). Norma EN 15654-2:2019 dovoluje přitížení jedné strany vozu maximálně 5 % [4]

U záznamu z vážení vozu X (**obr. 3**) po nehodě existovalo podezření, že rozložení kolových sil naměřených po nehodě neodpovídá stavu v okamžiku vykolejení. Byly pro to tyto důvody:

- 1 Stav ložení vozu X zaznamenaný po nehodě se zřetelně odlišoval od ložení ostatních vozů. Naložený sypký materiál byl vlivem otřesů způsobených dlouhou jízdou vykolejených dvojkolí po pražcích sklepan. Odlišný stav nákladu ve vykolejeném voze X a ve voze Y je patrný z fotografií pořízených po nehodě (**obr. 2 a obr. 4**).
- 2 Výsledky vážení vozu X zároveň svědčí o výrazných rozdílech kolových sil v rámci jednoho podvozku, které byly pravděpodobně způsobené deformacemi podvozků při nehodě.

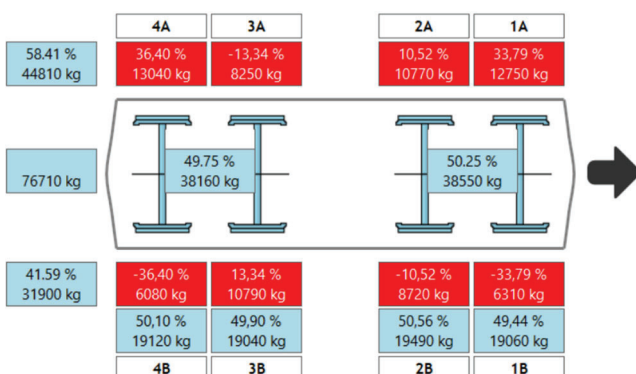
^{*)} Ing. Jan PEJŠA, VÚKV, a.s., Bucharova 1314/8, Stodůlky, 158 00 Praha 5, pejsa@vukv.cz, Výzkumný a vývojový pracovník, zabývá se jízdními vlastnostmi a dynamikou vozidel.



Obr. 1 Záznam z vážení vozu Y po nehodě
Fig. 1 Weighing record of the wagon Y after the accident



Obr. 2 Ložení vozu Y
Fig. 2 Load of the wagon Y



Obr. 3 Záznam z vážení vozu X po nehodě
Fig. 3 Weighing record of the wagon X after the accident



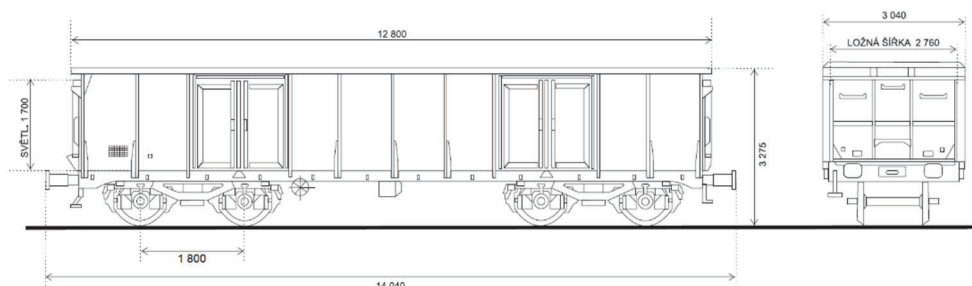
Obr. 4 Ložení vozu X
Fig. 4 Load of the wagon X

Po nehodě byla na levých kolech druhého podvozku vozu X naměřena strmost okolku – qR 6 mm. Kola prvního podvozku vozu X nebylo možné změřit, jelikož byla nehodou poškozena. Norma EN 15313:2017 dovoluje minimální strmost okolku 6,5 mm [1].

Po prozkoumání trati vyšetřovací komisí bylo v místě vykolejení zjištěno, že největší hodnota svislých nerovností koleje byla 37 mm na základně 5 m při měření bez zatížení a 35 mm na základně 5 m při měření pod zatížením. Norma EN 13848-5:2018 dovoluje pro toto místo (Křivka A) maximální hodnotu zborcení 7 mm/m. Naměřené hodnoty svislých nerovností pod zatížením jsou přesně na hranici tohoto limitu. Naměřené hodnoty svislých nerovností bez zatížení tuto limitní hodnotu přesahují [2].

3 POPIS VOZU

Vykolejený vůz X je řady Eas-z s podvozky Y25 Cs. Vzdálenost středů podvozků je 9 m. Typový výkres vozu je zobrazen na **obr. 5**. Hmotnost vozu v prázdném stavu je 23,5 t z toho 2x4,5 t připadalo na podvozky. V době vykolejení měl vůz hmotnost 76,7 t.



Obr. 5 Typový výkres vozu

Fig. 5 Type drawing of the wagon

4 KONCEPT SIMULACÍ

Protože nebylo možné p esn e zjistiť, jak byl vůz X před nehodou lo en, byly simulace koncipovány jako citlivostní analýza na relativní p rit izen i levé strany vozu. Na základě výsledků vážení vozů v ykolejen eho vlaku bylo zvoleno rozmezí od 0 % do 40 %. Aby bylo možné posoudiť, jaký vliv na v ykolejen i měly opotřebené profily kol, byly simulace provedeny se jmenovitými profily kol a s opotřebenými profily kol, které byly naměřeny po nehodě. Kvůli po kozenn i jízdní plochy kol prv n ho podvozku, byly pro simulace použity profily kol naměřené na druhém podvozku vozu X. Seznam provedených simulací je uveden v **TAB. 1**.

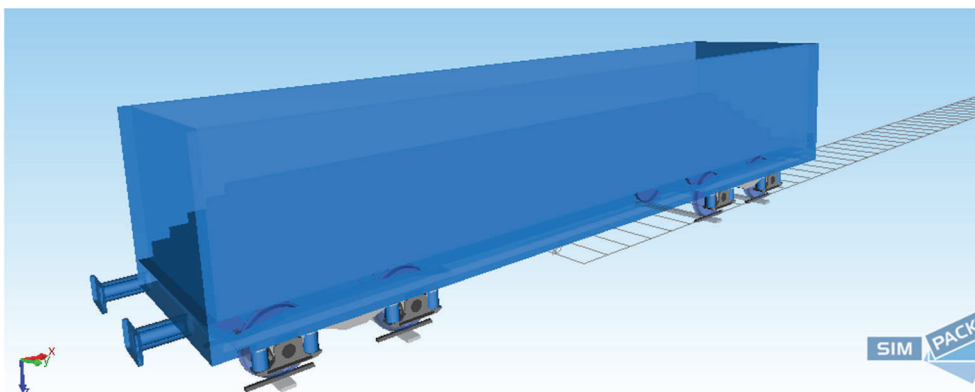
TAB. 1 Seznam provedených simulací

TABLE 1 List of performed simulations

�. Simulace	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Profily kol	Jmenovit�e					Naměřené				
P�rit�izen�i levé strany vozu [%]	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40

5 VÝPOČTOVÝ MODEL VOZU

Výpočtový model vozu X (**obr. 6**) se skl ada z t elosa vozové skříně s nákladem a z dvou podsestav podvozku. T eloso reprezentující vozov ou skříně s nákladem je v modelu uvažováno jako tuhé hmotn e t eloso. Podsestavy podvozku jsou s t elosem vozové skříně spojeny pomocí vazeb a silových prvků, které reprezentují kulovou tornu a odpružené kluznice.

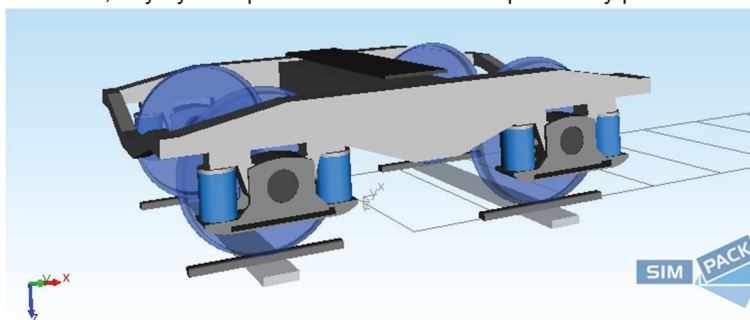


Obr. 6 Grafické zobrazení modelu vozu

Fig. 6 Graphical representation of the wagon model

5.1 Podvozek

Model podvozku (**obr. 7**) se skládá z tuhých hmotných těles, která reprezentují dvojkolí, ložiskové skříně a rám podvozku. Tato tělesa jsou vzájemně propojena silovými prvky a vazbami tak, aby byla respektována konstrukce a parametry podvozku Y25 Cs.

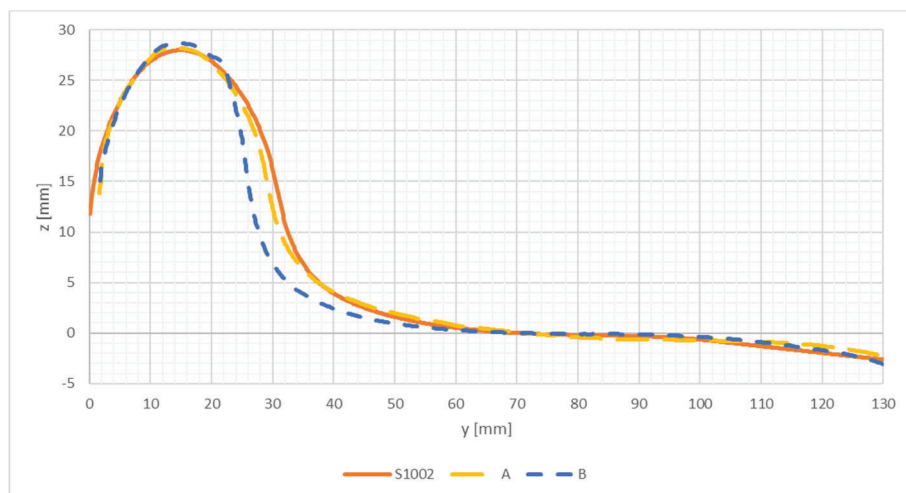


Obr. 7 Grafické zobrazení modelu podvozku

Fig. 7 Graphical representation of the bogie model

5.2 Kontakt kolo – kolejnice

Kolejnice byly typu 60E1 v úklonu 1:40. Protože před nehodou nebyl zaznamenán žádný déšť, byla pro součinitel tření mezi kolem a kolejnicí použita běžná hodnota 0,36. Pro průměr kola byla použita hodnota 877 mm, která odpovídá průměrné hodnotě průměrů kol naměřených na voze X po nehodě. Pro jmenovité profily kol byl použit profil S1002 a pro opotřebené profily kol byly použity profily A a B, které byly pracovníky VÚKV po nehodě naměřeny na dvojkolí vozu X, viz **Obr. 8**. Při průjezdu obloukem, kde došlo k vykojení vozu X, byl profil A na vnějším kole a profil B na vnitřním kole.



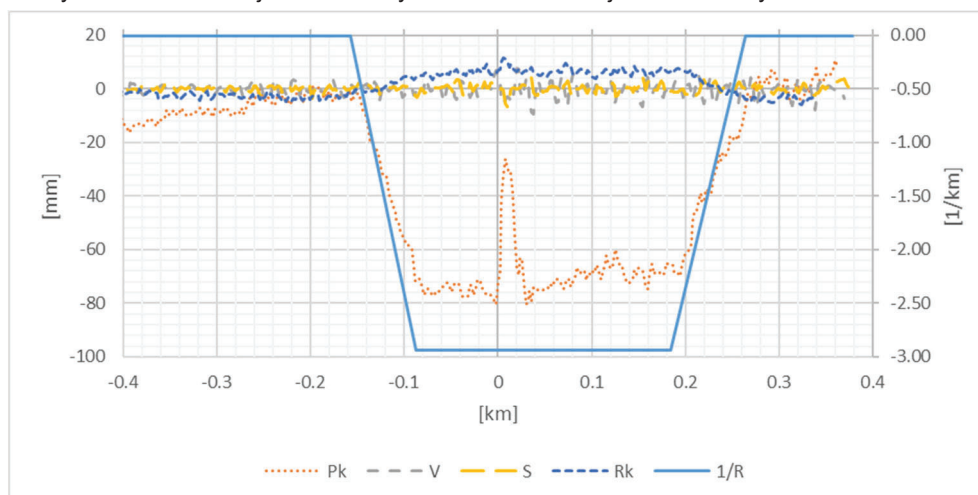
Obr. 8 Profily kol
Fig. 8 Wheel profiles

6 SIMULACE JÍZDY VOZU

Simulace byly provedeny pro p ipady uvedené v **TAB. 1**. Rychlost jízdy vozu byla 30 km/h, jen odpovídá rychlosti jízdy vlaku v době vykolejení.

6.1 Popis tratě

Pro simulace byl zvolen úsek tratí mezi km -0,4 a 0,4. Zvolený úsek se skládá z p ırn e tratí a ze stavebn e p evysen eho levého oblouku o poloměru 340 m. Průběhy k ıvosti – $1/R$, stavebního p evysen ı – P_k , v yskov ych odchylek střednice koleje – V , směrových odchylek střednice koleje – S a odchylek rozchodu – R_k jsou zobrazeny na **obr. 9**.



Obr. 9 Parametry tratě
Fig. 9 Track parameters

7 VYHODNOCOVANÉ VELIČINY

Ve výsledcích simulací byly sledovány zejména veličiny týkající se bezpečnosti proti vykolejení. Limitní hodnoty sledovaných veličin vycházely z limitních hodnot, které jsou uvedeny v normě EN 14363:2020. Vyhodnoceny byly tyto veličiny:

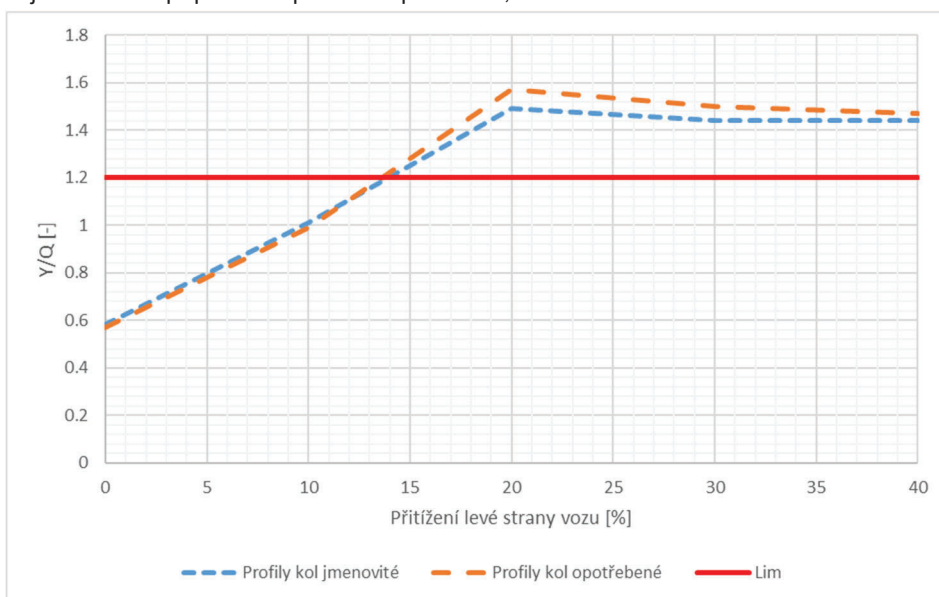
- 1 Koeficient vykolejení – Y/Q . Byla použita limitní hodnota 1,2, která vychází z požadavků na jízdní bezpečnost [3].
- 2 Šplhání okolku – Dz. Byla použita limitní hodnota 5 mm, která vychází z požadavků pro splnění kvazistatické bezpečnosti proti vykolejení metodou 1 [3].

Vyhodnocení sledovaných veličin bylo provedeno na nabíhající kole ve smyslu normy EN 14363:2020.

8 VYHODNOCENÍ SIMULACÍ

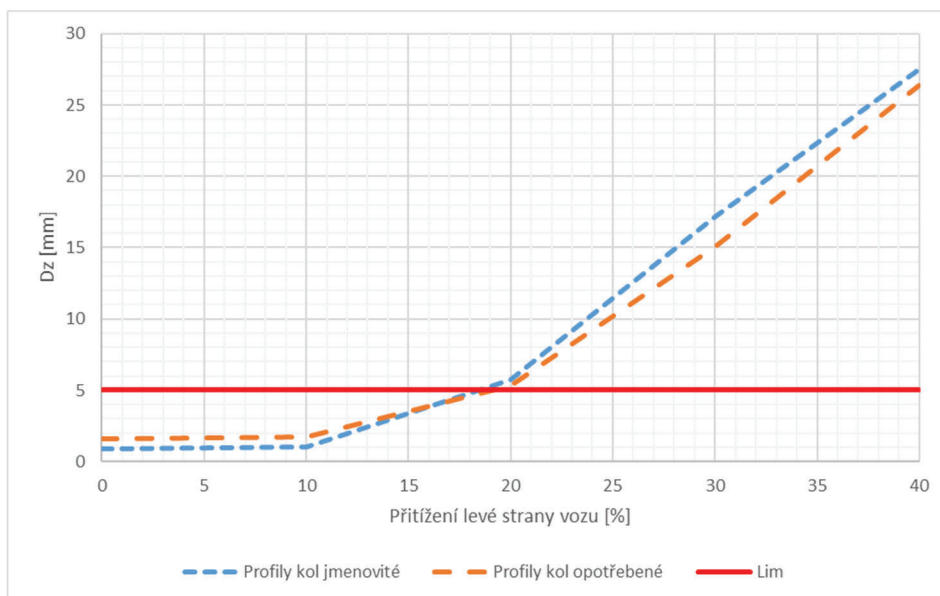
Vyhodnocované veličiny pro obě varianty profilů kol byly graficky vyjádřeny v závislosti na relativním přetížení levé strany vozu. Grafy koeficientu vykolejení a šplhání okolku na nabíhající kole jsou zobrazeny na **obr. 10** a **obr. 11**. V uvedených grafech jsou červeně vyznačeny limitní hodnoty. Z uvedených grafů je patrné, že pro obě varianty profilů kol jsou sledované veličiny takřka shodné. Limitní hodnota koeficientu vykolejení byla dosažena v obou případech profilů kol při přetížení levé strany vozu o 14 %. Limitní hodnota šplhání okolku byla dosažena v obou případech profilů kol při přetížení levé strany vozu o 19 %.

Při přetížení levé strany vozu o 40 % pravý okolek v simulaci vyšplhal na hlavu kolejnice v obou případech opotřebení profilů kol, viz **obr. 12**.



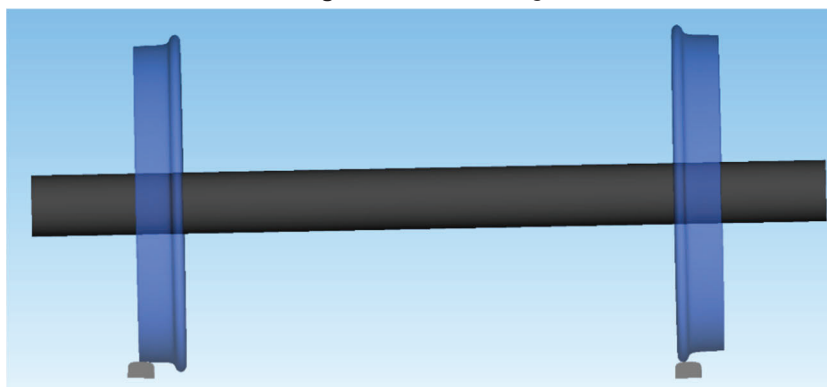
Obr. 10 Koeficient vykolejení

Fig. 10 Derailment coefficient



Obr. 11 Šplhání okolku

Fig. 11 Wheel climbing



Obr. 12 Vyšplhání okolku na hlavu kolejnice

Fig. 12 Climbed wheel on the rail head

9 ZÁVĚR

Na základě dat o nehodě byl vytvořen model vykolejeného vozu X a model trati odpovídající úseku trati, kde došlo k vykolejení. Model trati v sobě zahrnoval změřené kolejové nerovnosti včetně výrazného lokální zborcení (**obr. 9**), které se nacházelo v místě vykolejení.

Byl posouzen vliv opotřebených profilů kol a vliv jednostranného ložení nákladu na nehodu. Z provedených simulací bylo zjištěno, že s narůstajícím přetížením levé strany vozu významně narůstá riziko vykolejení. V případě sledování koeficientu vykolejení Y/Q je kritický stav vykolejení ($Y/Q = 1,2$) dosažen přibližně při přetížení levé strany vozu o 14 %.

Při přetížení levé strany vozu o 40 % již v simulaci okolek úplně vyšplhal na hlavu kolejnice (**obr. 12**).

Dále bylo zjištěno, že pro obě varianty opotřebení profilů kol (jmenovitý profil S1002 a naměřené opotřebené profily) jsou průběhy sledovaných bezpečnostně relevantních veličin takřka shodné, **viz obr. 10 a obr. 11**. Také dosažení kritického stavu vykolejení ($Y/Q = 1,2$) je pro obě varianty opotřebení profilů kol takřka totožné. Z těchto zjištění vyplývá, že opotřebené profily kol s překročenou dovolenou hodnotou strmostí okolku, neměly na nehodu vliv. Toto zjištění také podporuje tzv. Nadalův vztah, který vyjadřuje fyzikální podstatu šplhání okolku, a z něhož vyplývá, že strmější okolky by měly mít pozitivní vliv na bezpečnost proti vykolejení [3].

Literatura

[1] **ČSN EN 15313**. Železniční aplikace – Požadavky na dvojkolí v provozu – Údržba dvojkolí v provozu na vozidlech a po demontáži. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. [2] **ČSN EN 13848-5**. Železniční aplikace – Kolej – Kvalita geometrie koleje – Část 5: Hladiny kvality geometrie koleje – Běžná kolej a kolejová rozvětvení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. [3] **ČSN EN 14363+A1**. Železniční aplikace – Zkoušení a simulace pro schvalování železničních vozidel z hlediska jízdních vlastností – Jízdní chování a stacionární zkoušky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. [4] **ČSN EN 15654-2**. Železniční aplikace – Měření svislých sil na kolech a dvojkolích – Část 2: Dílenská zkouška nových, změněných a opravovaných vozidel. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.



Resumé

Příspěvek se týká simulací vykolejení nákladního vozu. Simulace byly založeny na datech skutečné nehody. Vůz byl typu Eas s podvozky typu Y25 a byl ložený sypkým materiálem. Po nehodě bylo zjištěno, že jízdní profily kol byly opotřebené více než dovoluje norma EN 15313. Existovalo také podezření, že vykolejený vůz byl nesprávně ložen. Levá strana vozu byla pravděpodobně přetížena více než dovoluje norma EN 15654-2. Provedené simulace pomohly dopravní společnosti objasnit příčiny nehody.

Summary

This paper is about simulations of a freight wagon derailment. The simulations were based on real accident data. The wagon was Eas type with Y25 bogies and it was loaded with bulk material. After the accident it was found that running wheel profiles were worn more than the standard EN 15313 allows. Also, there was suspicion of an incorrect loading of the derailed wagon. The left side of the wagon was probably overloaded more than the standard EN 15654-2 allows. The performed simulations helped the transport company clarify the causes of the accident.