

RESEARCH OF THE EFFECT OF SUPPORT PADS ON WHEEL PROPERTIES AND THE DESIGN OF RAILROAD BRIDGES

Pavel Vrba, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
pavel.vrba@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Výstavba vysokorychlostních tratí je aktuálním tématem železniční dopravy v ČR. V rámci návrhu mostů vysokorychlostních tratí jsou kladeny zvýšené nároky na dynamickou odezvu konstrukce, která se přímo podílí na plynulosti a bezpečnosti provozu. Odezva konstrukce mostu na zatížení je také ovlivněna skladbou železničního svršku, který se na přenosu zatížení zásadním způsobem podílí.

Problematika podpražcových podložek je z pohledu aplikace v konstrukci železničního svršku často zkoumaným fenoménem, avšak při návrhu mostních konstrukcí je přehlížena. Prohloubením znalostí týkajících se funkce podpražcových podložek a jejich vhodným zohledněním společně s dalšími prvky koleje může vést ke zefektivnění návrhu konstrukce železničních mostů.

Cílem příspěvku je shrnutí aktuálního stavu legislativy týkající se podpražcových podložek a rámcová rešerše této problematiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Podpražcové podložky, kolej, přechodová oblast, degradace lože, normy

ABSTRACT

The construction of high-speed lines is a topical issue of railway transport in the Czech Republic. In the design of bridges of high-speed lines, increased demands are placed on the dynamic response of the structure, which directly contributes to the gas-speed and safety of operation. The load response of the bridge structure is also influenced by the composition of the superstructure, which contributes significantly to the load transfer.

The issue of sleeper pads is a frequently investigated phenomenon from the point of view of application in superstructure design, but is overlooked in bridge design. Increasing the knowledge of the function of sleeper pads and their appropriate consideration together with other track elements can lead to more efficient design of railway bridge structures.

The aim of this paper is to summarise the current state of legislation concerning sleeper pads and to provide a framework for research of this issue.

KEYWORDS

Under sleeper pads, track, transition zone, ballast degradation, norms

1. ÚVOD

1.1. Obecně

Projekty staveb vysokorychlostních tratí na území české republiky s sebou přináší řadu nových principů a pravidel platných pro jejich návrh. Vysokorychlostní tratě s sebou zároveň přináší potřebu použití řady dosud málo využívaných konstrukčních prvků jako jsou kolejnicová dilatační zařízení, podpražcové podložky nebo nové způsoby řízení svislé tuhosti v délce koleje.

Aktuálním trendem na poli návrhu železničních mostů jsou realizace mostů s průběžným kolejovým ložem. Výhodami tohoto řešení jsou snížení hladiny hluku, zefektivnění mechanizované údržby a menší změna tuhosti trať/most. Legislativní dokumenty předpokládají použití BK na veškerých tratích VRT. Dle závazných dokumentů Správy železnic se předpokládá použití podpražcových podložek v síti VRT, na základě řady pozitivních přínosů získaných na testovacích úsecích a dle ohlasů ze zahraničních výzkumů.

1.2. Podpražcové podložky

Podpražcová podložka neboli USP (under sleeper pads), je pružná vrstva upevněná na ložné ploše příčných nebo výhybkových pražců. Hlavním důvodem použití podpražcových podložek je ochrana kolejového lože. Vložením podložky pod pražec dochází ke zvětšení kontaktní plochy mezi pražcem a kolejovým ložem, což vede ke snížení kontaktního napětí. Použitím podložek v koleji dále dochází k přenosu zatížení na větší počet pražců, které vede k dalšímu přerozdělení zatížení a prodloužení životnosti všech komponent železničního svršku. Další benefity jsou podrobněji popsány v kapitole 4 tohoto článku.

Z hlediska návrhu železničních mostů je problematika podpražcových podložek opomíjeným tématem. Prvním předpokladem pro lepší návrh konstrukce je efektivnější distribuce zatížení skrze konstrukci koleje. Druhým aspektem je vliv

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

podložky (prvku z elastického materiálu), na dynamickou odezvu koleje i mostu (ovlivnění tuhosti, útlumu koleje). Naproti tomu, dle znění příslušných dokumentů může mít použití podložky s nevhodnými parametry i negativní důsledky.

Přechodové zóny jsou místa, kde se podmínky podpory kolejového lože náhle mění, například ze zemního násypu na most. Geometrie trati v těchto místech degraduje rychleji než běžná železniční trať, což vyžaduje častější a nákladnější údržbu. Cílem příspěvku je shrnutí aktuálního stavu legislativy a poznatků dosavadních výzkumných prací ve smyslu použití podpražcových podložek a jejich vlivu na návrh konstrukce železničních mostů, přechodových oblastí nebo případných vlivů na návrh bezстыkové koleje na mostě (a doplnění textu [22]). Snahou příspěvku je poukázat na možné benefity zohlednění podpražcových podložek při návrhu železničních mostů a přechodových oblastí, které mohou vést k optimalizaci návrhu.

2. REŠERŠE NORMOVÝCH PODKLADŮ

V rámci rešerše byly hledány dosavadní poznatky k problematice použití podpražcových podložek, jejich vlivu na návrh mostní konstrukce a konstrukce železničního svršku.

Prvním krokem je shrnutí stávajícího stavu legislativy dle směrnic Mezinárodní železniční unie (směrnice UIC a IRS) a v interních předpisech národní Správy železnic (SŽ). Z důvodu značné souvislosti s daným tématem byly zkoumány také dokumenty věnující se „Matracím pod kolejovým ložem“ a dokumenty pojednávající o „vysokorychlostních tratích“.

O problematice podpražcových podložek, jejich použití a dalších souvislostech byly zkoumány následující dokumenty:

- Interní předpisy SŽ
 - Manuál pro projektování VRT ve stupni DÚR
 - Předpis SŽDC S3
 - Metodický pokyn pro navrhování pražců s podpražcovými podložkami
- Směrnice mezinárodní železniční unie (UIC a IRS)
 - IRS 70713-1
 - IRS 70719-1

2.1. Interní předpisy SŽ

2.1.1. Manuál pro projektování VRT ve stupni DÚR

Manuál pro projektování VRT ve stupni DÚR [11] (dále jen „Manuál“) je Interní předpis shrnující problematiku návrhu vysokorychlostních tratí. Manuál předkládá požadavky investora (SŽ) na řešení jednotlivých součástí VRT dle osvědčených zahraničních řešení. Předpis řeší problematiku VRT z pohledu všech dotčených profesí.

Z pohledu návrhu mostních konstrukcí se manuál odkazuje na splnění požadavků norem řady EN. Manuál předpokládá posouzení interakce kolej / most pro všechny mosty nad 50 m. Dle kap. 3.1 a 3.2 Manuál předpokládá použití pražců s podpražcovými podložkami (USP) v síti VRT.

2.1.2. Předpis SŽDC S3

Interní předpis Správy Železnic S3 [10] obsahuje souhrn zásad pro projektování železničního svršku tratí s normálním rozchodem. Předpis se věnuje konstrukci železničního svršku, de-

finuje požadavky a podmínky pro bezpečné provozování železniční dopravy. V roce 2021 byl předpis doplněn o díl XVII pojednávající o konstrukci železničního svršku pro rychlosti nad 200 km/h (do 360 km/h).

Předpis předpokládá použití pražců s tuhými USP do konstrukce kolejí, výhybek a výhybkových konstrukcí pro tratě s návrhovou rychlostí vyšší než 200 km/h. Pro použití jiných druhů USP se předpis odkazuje na Metodický pokyn pro navrhování pražců s podpražcovými podložkami [12].

2.1.3. Metodický pokyn pro navrhování pražců s podpražcovými podložkami

Metodický pokyn [12] stanovuje podmínky pro navrhování, instalaci, manipulaci a údržbu pražců s podpražcovými podložkami. Dokument definuje zásady pro použití pražců s USP v běžné trati, pod výhybkami a v rámci přechodových oblastí. Platnost dokumentu je podmíněna splněním ustanovení předpisu SŽDC S3 a je závazný pro všechny subjekty věnující se návrhem, realizací a údržbou dané tratě. Metodický pokyn vychází mimo jiné z poznatků uvedených ve směrnici IRS 70713-1. Dále se metodický pokyn odkazuje na znění normy ČSN EN 16730 a interní předpisy SŽDC S3 a S9.

Dokument definuje dělení USP dle statické tuhosti jako základní technickou specifikaci USP. V rámci metodického pokynu jsou dále shrnuty hlavní přínosy USP, stanovené obecné zásady pro použití a postup při navrhování USP v běžné trati, pod výhybkou a v přechodových oblastech. Postupy navrhování USP definované metodickým pokynem jsou spíše obecného charakteru, s důrazem na nutné detailní posouzení v určitých situacích. Konkrétní způsob a forma návrhu/posouzení není dokumentem stanovena.

2.2. Směrnice Mezinárodní železniční unie

2.2.1. IRS 70713-1 Under sleeper pads (USP) – recommendations for use

Směrnice IRS 70713 [6] se zabývá problematikou aplikace podpražcových podložek (neboli USP = Under sleeper pads). Jsou představeny důvody pro použití podložek, jejich členění, vlastnosti a zároveň limity pro použití. Dle dokumentu má umístění USP různé vlivy na chování a tuhost koleje podle vlastností použitého prvku. Podložky zvyšují kontaktní plochu mezi pražcem a kolejovým ložem, což přispívá k delší životnosti komponent, prodloužení intervalů údržby, ale také k ovlivnění dynamických parametrů tratě.

Prvky USP lze použít pro redukcí tloušťky kolejového lože, řízení změny tuhosti v přechodových oblastech mostu nebo ve snaze o snížení přenosu vibrací do okolí tratě. V mnoha ohledech se jedná o pozitivní přínos, avšak nevhodná konfigurace může vést k negativním důsledkům jako je destabilizace tratě nebo nadměrné deformace koleje.

2.2.2. IRS 70719-1 Recommendations for the use of Under ballast mats (UMB)

IRS 70719-1 [7] se věnuje problematice matrací umístěných pod kolejové lože. Směrnice dělí matrace dle fyzikálních

vlastností a uvádí doporučení pro použití v jednotlivých případech. Pro ukotvení v normách řady EN se směrnice odkazuje na ČSN EN 17282.

Obdobně jako u USP se jedná o elastický prvek umísťovaný do konstrukce železničního tělesa za cílem zefektivnění přenosu sil, redukci nežádoucích vibrací, úpravu tuhosti podloží nebo tloušťky kolejového lože. Nevhodná volba UBM s sebou nese obdobné nežádoucí projevy jako v případě USP. Narozdíl od USP se jedná o prvky, u kterých se nepředpokládá užití v celé trati, ale jako nástroj k řešení lokálních oblastí. Kombinování s dalšími elastickými prvky kolejového svršku (USP a SRP) se bez detailního posouzení nedoporučuje (skládání účinků neprobíhá v rovině superpozice a vyžaduje detailní posouzení).

3. USP DLE ZAHRANIČNÍCH EXPERIMENTŮ

Pro úvod do problematiky byly v rámci rešerše studovány dostupné zdroje zabývající se různými směry výzkumu týkající se problematiky podpražcových podložek a jejich vlivu na vlastnosti koleje. Dle publikací shromážděných v rámci rešeršní činnosti lze sledovat následující směry výzkumů na poli aplikace USP.

- Vliv USP na přerozdělení zatížení pražce* (pod pražcem)
- Vliv USP na degradaci kolejového lože* (prvků tratě)
- Vliv USP na dynamické chování tratě* (šíření vibrací, útlum, deformace)
- Vliv USP při interakci vozidlo - kolej
- Vliv USP na stabilitu (polohu) koleje
- Vliv USP na odpor koleje* (příčný, podélný)

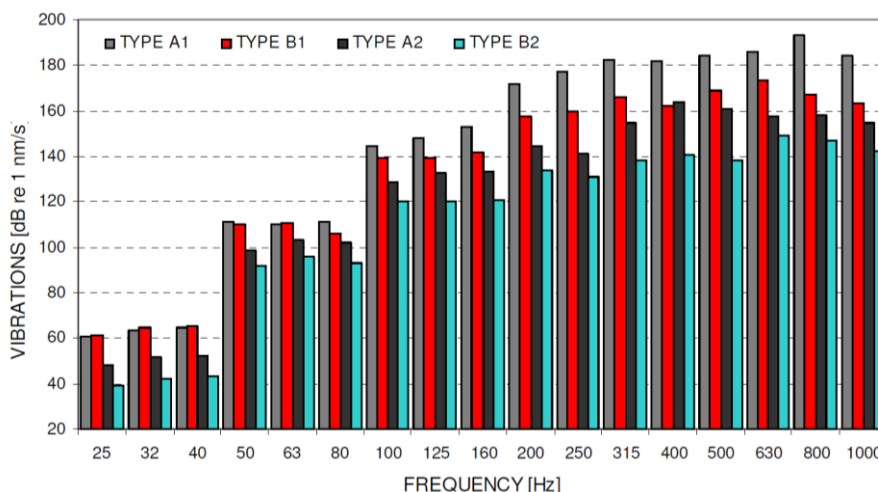
- Použití USP pro úpravu tuhosti koleje* (v přechodových oblastech)
- Vliv USP na návrh mostních konstrukcí
- Materiálové vlastnosti USP (trvanlivost, únava, použitý materiál)
- Využití recyklovaných materiálů (recyklace prvků) při výrobě USP
- Studie vlivu USP na náklady životního cyklu (LCC)

S ohledem na rozsah tohoto příspěvku jsou dále popsány pouze vybrané zdroje poukazující na dosavadní poznatky publikovaných výzkumů (označeno *).

3.1. Experimentální vyšetřování koleje s USP

Článek [13] z roku 2010 publikovaný univerzitou v Zářebu se věnuje problematice přenosu dynamických účinků zatížení na konstrukce železničního spodku. V rámci popisovaného pokusu byly měřeny hodnoty vibrací na jednotlivých komponentech (kolej, pražec, podkladní železobetonová deska) od simulovaného dynamického zatížení železniční dopravou. Měření bylo provedeno na vzorcích reprezentující konstrukci kolejového svršku s kolejovým ložem a systém podobný tzv. pevné jízdní dráze Celkem bylo měření provedeno na čtyřech pokusných vzorcích následující sestavy.

- sestava koleje s pražcem přímo uloženým na ŽB desce (type A1)
- sestava koleje s USP pražcem uloženým na ŽB desce (type B1)
- sestava koleje s kolejovým ložem (type A2)
- sestava koleje s kolejovým ložem s USP pražcem (type B2)



Obrázek 1 - Vibrace měřené na podkladní betonové desce pro jednotlivé prvky uložení koleje [13]

Výše uvedený obrázek graficky znázorňuje naměřené výsledky. Na základě měření daného pokusu lze jednoznačně prokázat, že vložení prvku upravující tuhost koleje dochází k redukci přenášených vibrací na konstrukce železničního spodku. Vložení prvků USP do koleje dle autora přináší významné zlepšení ve smyslu snížení dynamických účinků a tím redukci nákladů na realizaci a provoz trati.

Dle závěru článku je nezbytné detailní pochopení odezvy tratě na svislé dynamické zatížení pro správné zohlednění účinků

zatížení na konstrukce železničního spodku. Vložení elastických materiálů do konstrukce železničního svršku může zásadním způsobem ovlivnit chování tratě. Zásadním aspektem jsou fyzikální vlastnosti daného prvku (tzn. rozměry, tuhost, schopnost útlumu) a umístění v trati (tzn. kolejnicová podložka, podpražcová podložka, rohož pod kolejovým ložem). Důležitým benefitem použití USP je jejich kompatibilita s aktuálně běžnými postupy výstavby a údržby trati.

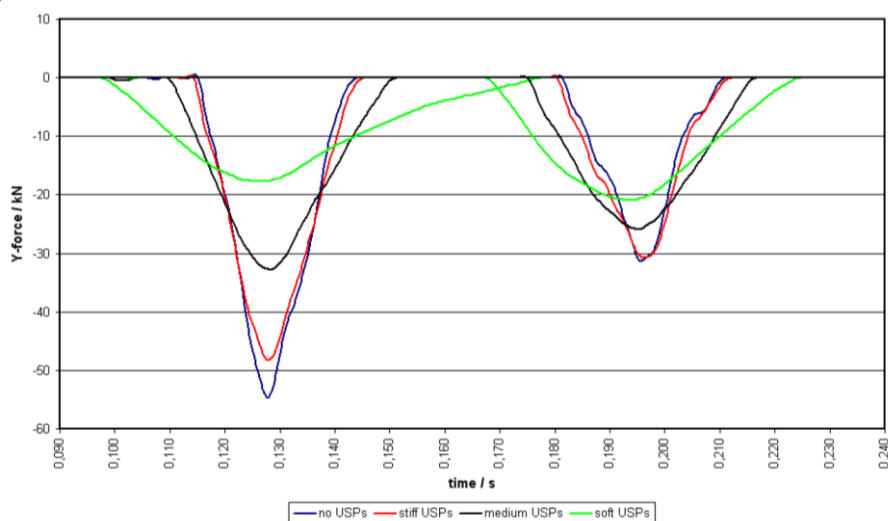
3.2. Vliv podpražcových podložek na dynamiku koleje

Předmětem práce [14] publikované univerzitou ze švédského Linköpingu byl vyšetřován vliv USP na dynamické chování tratě. Pomocí numerické analýzy byly zkoumány přínosy USP při použití v přechodových oblastech, při náhodné změně tuhosti koleje a v případě tzv. „zavěšených pražců“ (fenomén, kdy daný pražec není v kontaktu s kolejovým ložem).

Výpočetní model byl vytvořen v prostředí programu LS-DYNA. Model simuluje kolej o třiceti pražcích s rozdělením 600 mm, idealizovanou kolejnicí UIC60, pražce délky 2,5m výšky 200 mm, USP tl. 20 mm a idealizovaným kolejovým ložem. Pro analýzu byla použita trojice různých USP s využitím níže uvedených parametrů (členění neodpovídá dělení dle aktuální legislativy)

- Tuhé USP, $E=1000\text{MPa}$, $C=3000\text{kN/mm}$
- Střední USP, $E=100\text{MPa}$, $C=400\text{kN/mm}$
- Měkké USP, $E=10\text{MPa}$, $C=50\text{kN/mm}$

Na základě numerické analýzy bylo zjištěno, že vliv tuhé USP má na celkové chování koleje malý vliv, což je přisuzováno volbou příliš tuhé podložky. Výsledky výpočtů s měkkými USP vykazují známky přílišné poddajnosti koleje a klesajícího významu kolejového lože (příliš měkké USP). Nejlepší výsledky byly dosaženy při použití středně tuhých USP. Středně tuhé USP vykazují dle autora nejlepších výsledků naskrz zkoumanými oblastmi.



Obrázek 2: Graf vývoje kontaktní síly v čase dle tuhosti USP, pod vybranými pražci [14]

Výše uvedený obrázek z kapitoly 8 popisované práce ilustruje vliv USP na distribuci zatížení (obdobný obrázek se nachází v závěru kapitoly 7). S klesající tuhostí USP dochází k redukci hodnot sil přenášené pražci, zatímco se prodlužuje čas, kdy síla na pražec působí. Tento jev lze vysvětlit tak, že s klesající tuhostí USP dochází k aktivaci většího počtu pražců (podpor), což má za následek efektivnější redistribuci nápravových sil. Dle závěrů práce je možné předpokládat pozitivní efekt použití USP ve smyslu interakce vozidlo/kolej. Avšak pro dosažení dobrých výsledků musí být tuhost podložek vhodně zvolena.

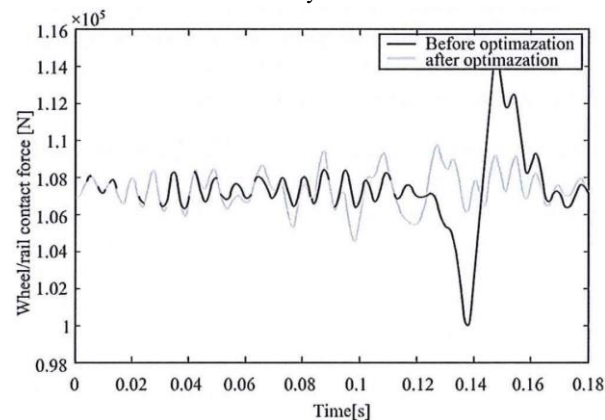
3.3. Použití podpražcových podložek na trati s proměnnou tuhostí

Další práce publikované univerzitou ze švédského Linköpingu [15] doplňuje informace provedené numerické analýze zaměřené na vyšetřování vlivu USP na konstrukce trati. Třetí a čtvrtá fáze byly popsány v předchozí kapitole.

První část studie se věnuje optimalizaci oblasti trati mezi úseky s rozdílnou tuhostí pomocí regulace tuhosti podloží. Tuhost modelovaného úseku koleje se mění z počátečních 45 kN/mm (měkký konec) na 90 kN/mm na druhém konci. Změna tuhosti probíhá na úseku o délce 15 pražců. Přechodová zóna byla rozdělena do úseků vždy o třech pražcích se stejnou tuhostí. Cílem optimalizace bylo stanovení ideálního vývoje tuhosti v přechodové oblasti a minimalizaci kontaktní síly kola / kolejnice.

Optimalizace byla provedena pro případy, kdy zatížení přechází z tuhé do měkké koleje a z měkké do tuhé koleje.

Výsledkem optimalizace je změna tuhosti, jejíž charakter je blízký lineárnímu průběhu. Kontaktní síla kola/kolejnice (pro jízdu z tuhé do měkké dráhy) je znázorněna na uvedeném obrázku. Oproti původním parametrům tratě došlo ke snížení maximálních hodnot kontaktní síly.

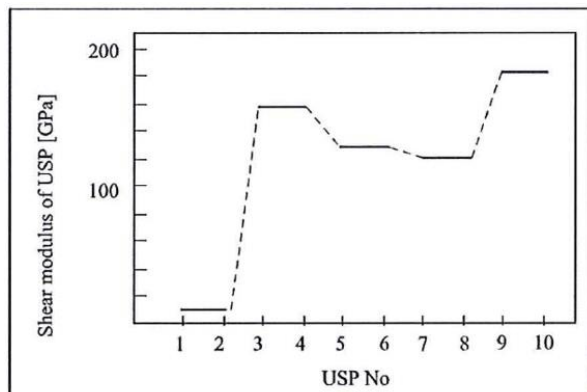


Obrázek 3: Kontaktní síla před a po optimalizaci tuhosti [15]

V druhé části studie byl obdobný model (menší délka) ve střední části (přechodová část) vybaven podpražcovými pod-

ložkami o tloušťce 20 mm. Oblast změny tuhosti byla rozdělena na úseky vždy po 2 prážkách se stejnými parametry USP. Jako optimalizační parametr byl zvolen smykový modul G materiálu USP.

Optimální hodnoty modulu pružnosti ve smyku materiálu USP jsou uvedeny na obrázku níže. Dvě další vyzkoušené distribuce tuhosti (bez optimalizace) měly pět tuhostí 10, 100, 125, 150 a 175 GPa, respektive 10, 150, 150, 150, 150 GPa. Bylo zjištěno, že tyto dvě distribuce tuhosti poskytly téměř stejný výsledek jako optimalizované rozložení. Obdobně jako v prvním případě došlo k redukci kontaktní síly (avšak v menším měřítku).



Obrázek 4: Optimalizace smykového modulu USP [15]

3.4. Analýza vlivu podpražcových podložek v přechodových oblastech vysokorychlostních tratí

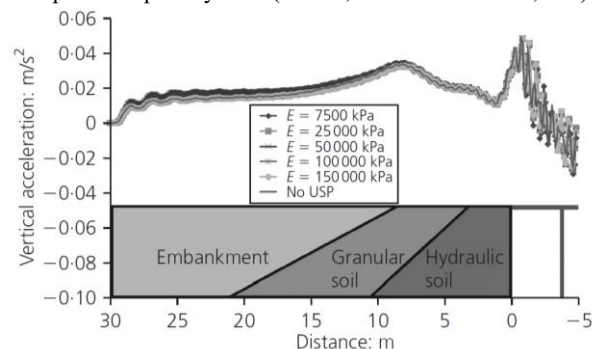
Článek [16] autorů ze španělských univerzit zkoumá vliv USP při použití v přechodových oblastech vysokorychlostních tratí. Přechodové oblasti jsou slabými články vysokorychlostních tratí. Vlivem náhlé změny tuhosti v těchto oblastech dochází ke změně dynamických parametrů tratě vedoucí k negativnímu ovlivnění komfortu cestujících, zhoršení vlastností tratě a dochází k růstu rizika vykojení.

Pro popis zkoumaného fenoménu byla provedena numerická analýza v programu LS-DYNA. Výpočetní model přechodové oblasti je tvořen 3D elementy zohledňující vlastnosti jednotlivých prvků tratě. Modelovaná trať se skládá z kolejnic UIC60, betonových prážců hmotnosti 300 kg, podpražcových podložek, kolejového lože tloušťky 35 cm a sestavy vrstev přechodové oblasti odpovídající španělským zvyklostem. Proměnnou v rámci analýzy byla tuhost USP. Přínos USP byl vyhodnocen z hlediska statických deformací i dynamické odezvy (svislé zrychlení).

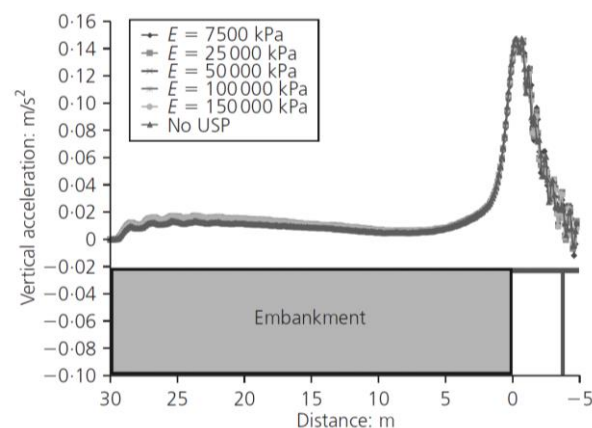
Prezentované výsledky numerické analýzy lze shrnout v rámci výše uvedených obrázků. Obrázky graficky znázorňují hodnoty svislých zrychlení kolejového vozidla v závislosti na vzdálenosti vůči opěře mostu pro případ klasické konstrukce přechodové oblasti a pro případ opěry přímo navazující na standardní konstrukci tratě. V obou případech byly ve výpočtu uvažovány různé vlastnosti USP, včetně stavu bez jejího použití.

Dle prezentovaných výsledků vyplývá, že použití USP v přechodových oblastech nemá zásadní vliv na deformaci a napětí pod úrovní kolejového lože. Na základě výsledků dynamické

odezvy koleje autoři nedoporučují nahrazení standardní konstrukce přechodové oblasti pouze pomocí USP, protože nedochází k dostatečnému vyhlazení křivky vertikálního zrychlení v předmostí. Nicméně použití USP jako prvku doplňující konstrukci přechodové oblasti je vhodným řešením s ohledem na další pozitivní přínosy USP (údržba, distribuce zatížení, atd.).



Obrázek 5: Svislé zrychlení vlaku při běžné konstrukci přechodové oblasti [16]

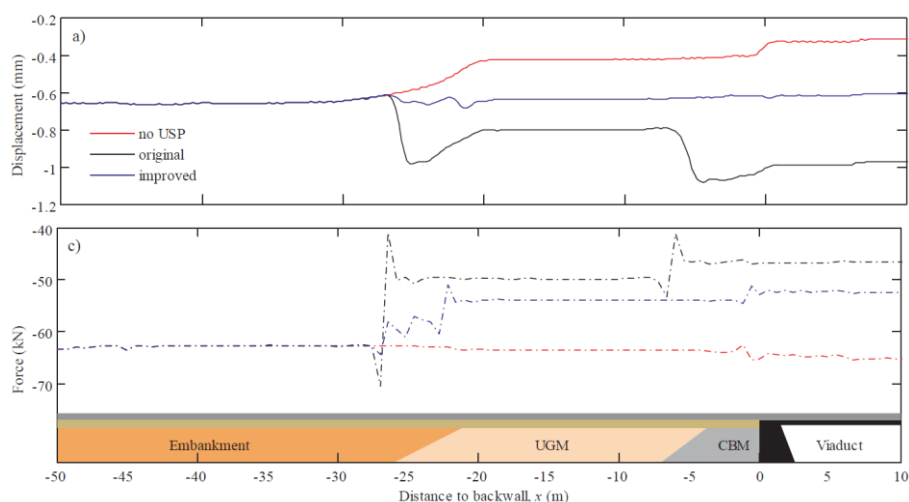


Obrázek 6: Svislé zrychlení vlaku bez konstrukce přechodové oblasti [16]

3.5. Numerické situace pro zlepšení použití podpražcových podložek v přechodových oblastech mostů

Tato případová studie [17] je přechodová zóna na severním přístupu k viaduktu São Martinho. V této přechodové zóně bylo instalováno celkem 84 prážců s USP pomocí dvou typů USP (rozdílné tuhosti).

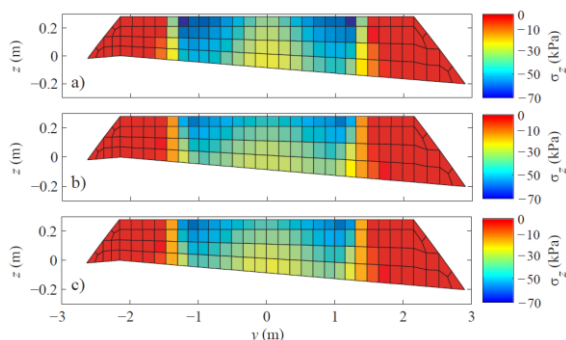
Pro lepší pochopení vlivu USP použili autoři trojrozměrný nelineární numerický analytický nástroj – Pegasus. Proces kalibrace modelu spočíval v úpravě vlastností materiálů náspu a komponentů kolejnice tak, aby dynamická odezva koleje odpovídala získaným výsledkům v terénu. V tomto validačním procesu autoři zjistili, že je nutné upravit vertikální tuhost obou typů USP. Autoři se rozhodli upravit vlastnosti USP, nikoli vlastnosti materiálů náspu. Kalibrací byla získána shoda mezi numerickými a experimentálními vertikálními posuvy i zrychlení prážců v měřicích úsecích. Autoři se dále rozhodli o provedení optimalizace pomocí zavedení více typů USP. Vylepšená konfigurace obsahuje 4 typy USP. Posledním srovnávaným stavem je konfigurace přechodové oblasti bez použití USP.



Obrázek 7: Srovnání deformace a kontaktní síly v koleji [17]

Na grafu je patrné srovnání jednotlivých konfigurací přechodové oblasti. Vylepšená konfigurace má nejlepší průběh deformace koleje. Původní konfigurace naopak dosahuje nejhoršího výsledku při redukci kontaktní síly pražec/lože.

Dále byla provedena analýza napětí v konstrukci lože, jejíž výsledky jsou uvedeny na obrázku níže. Skutečná konfigurace a vylepšený design snížily špičková vertikální napětí ve vrstvě šterku asi o 15–20 %.



Obrázek 8: Rozložení napětí v kolejovém loži [17]

Hlavním důvodem pro instalaci USP v přechodových zónách je snížení kontaktních sil mezi pražcem a šterkem, s cílem snížit degradaci šterku, tedy rozdílné sedání v dlouhodobém horizontu.

3.6. Výzkum vlivu USP na dynamickou odezvu železničních mostů

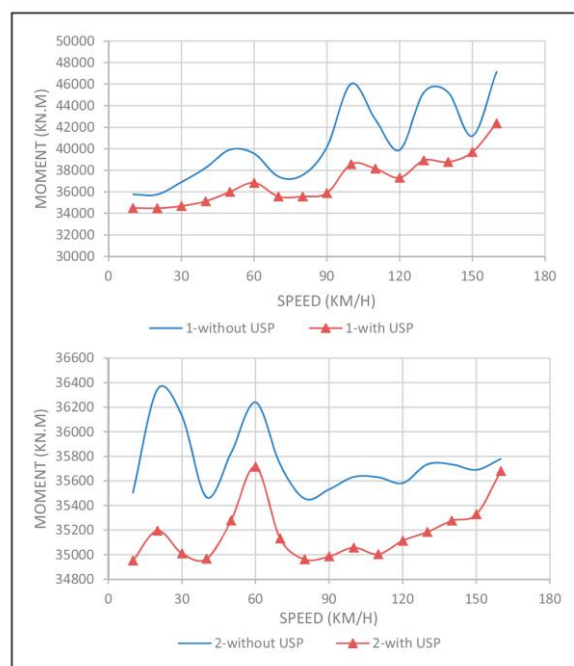
Článek [18] publikovaný v roce 2018 univerzitou v Teheránu pojednává o vlivu USP na dynamickou odezvu železničních mostů. Pro analýzu byl vybrán stávající most v severní provincii Íránu. Jedná se o konstrukci o dvou polích se světlostí 7,0 m, sestávající se z železobetonové desky šířky 4,5 m vyztužené I profily. Kolej na mostě je tvořena kolejnicemi UIC60, betonovými pražci se vzdáleností 60 cm a kolejovým roštem tloušťky 35 cm.

Pro vybraný most byl zhotoven numerický model, jehož funkce byla ověřena experimentem na skutečné konstrukci (průjezd skutečného vlaku ve spektru předepsaných rychlostí). Do kalibrovaného modelu byl následně zaveden prvek USP (s

tuhostí 11 700 N/mm), pro který byl vyšetřován jeho vliv. Na základě provedené numerické analýzy by vložení daných USP do konstrukce koleje došlo k následujícím změnám v chování konstrukce.

- Snížení amplitudy kmitání konstrukce až o 58%
- Snížení svislé deformace středu pole až o 15%
- Snížení hodnoty ohybových momentů až o 16%

Níže přiložený obrázek graficky znázorňuje vliv USP na hodnotu ohybových momentů nosné konstrukce pro vyšetřované spektrum rychlostí vlaku.



Obrázek 9: Graf ohybového momentu ve středu rozpětí daného experimentu [18]

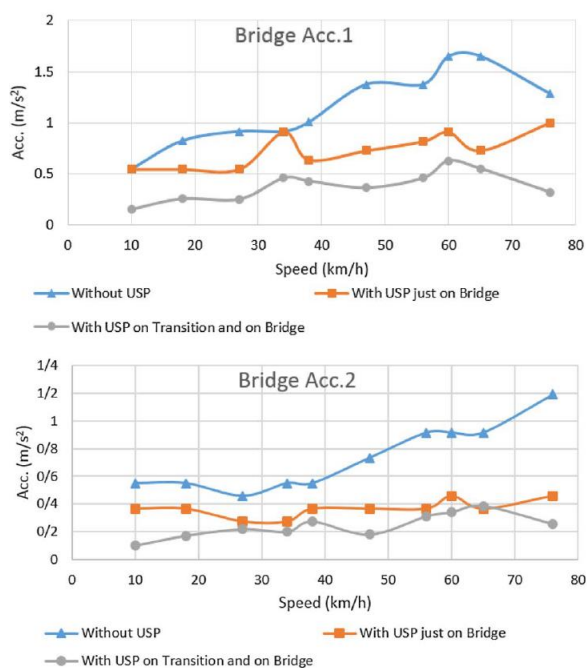
Prezentovaná numerická analýza dle autora prokazuje pozitivní vliv použití USP na dané konstrukci vůči danému zatížení, při daném spektru rychlostí (do 160 km/h). Dalším přínosem článku je popis způsobu modelování konstrukce želez-

ničního svršku na mostě, zavedení prvku USP a odladění numerického modelu pomocí in-situ experimentu (způsoby a prvky měření).

3.7. Měření efektu podpražcových podložek v přechodové oblasti mostu

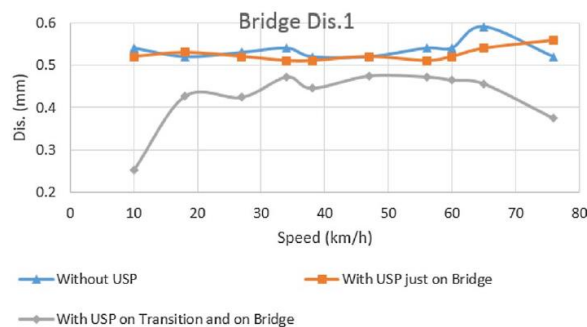
Tento článek [19] Teheránské univerzity popisuje další etapu výzkumu popisovaném v předchozí kapitole [1]. Byly provedeny reálné experimenty ve 3 etapách. První sloužila k získání dat stávajícího stavu mostu (viz kap. 3.6). Druhé měření probíhalo při použití USP pouze na mostě. V poslední etapě byly USP osazeny i v rámci přechodových oblastí. V rámci experimentu byl zkušební úsek projížděn dieselovou lokomotivou a měřeny zrychlení a deformace vybraných konstrukčních prvků koleje a mostu. Tato studie byla provedena za účelem posouzení účinků použití podložek pod pražce (USP) v přechodové zóně z běžné šterkové trati na železniční mosty.

Při instalaci USP v přechodové zóně se průměrná změna maximálního zrychlení kolejnice snížila o 35 % při různých zaznamenaných rychlostech ve srovnání se situací bez USP. Toto snížení bylo o 4 % ve srovnání s případem, kdy byl USP použit pouze na mostní části. Na níže přiložených grafech jsou uvedeny hodnoty svislých zrychlení středu rozpětí jednotlivých polí mostu.



Obrázek 10: Svislé zrychlení mostovky v obou polích [19]

Je zcela zřejmé, že použití USP v přechodové zóně snižuje zrychlení při všech rychlostech v okamžiku vjezdu vlaku na most, což snižuje dopad zatížení na most. Ve druhém poli jsme také zaznamenali pokles zrychlení na mostovce v důsledku použití USP v přechodové zóně. Instalaci USP v přechodové zóně se snížilo průměrné maximální zrychlení mostovky o 66 % ve srovnání se situací bez USP a o 48 % ve srovnání se situací, kdy byl USP instalován pouze na mostním úseku.



Obrázek 11: Svislá deformace prvního pole [19]

Porovnání deformací mostovky bylo provedeno v prvním poli (viz obrázek níže). Došlo ke snížení hodnot posunů po instalaci USP v přechodové zóně ve srovnání se dvěma dalšími stavy. Důvodem tohoto snížení může být lepší rozložení zatížení v loži v důsledku přítomnosti USP a snížení dopadu na most v okamžiku příjezdu.

3.8. Analýza dlouhodobého chování mostu na základě krátkodobé odezvy

Tento článek [20] se věnuje studiu dynamické odezvy pomocí modelu konečných prvků kalibrovaném dle měření stávajícího mostu. Jsou zkoumány a porovnávány účinky rychlosti vlaku, různých typů podloží a podložek pod pražce (USP).

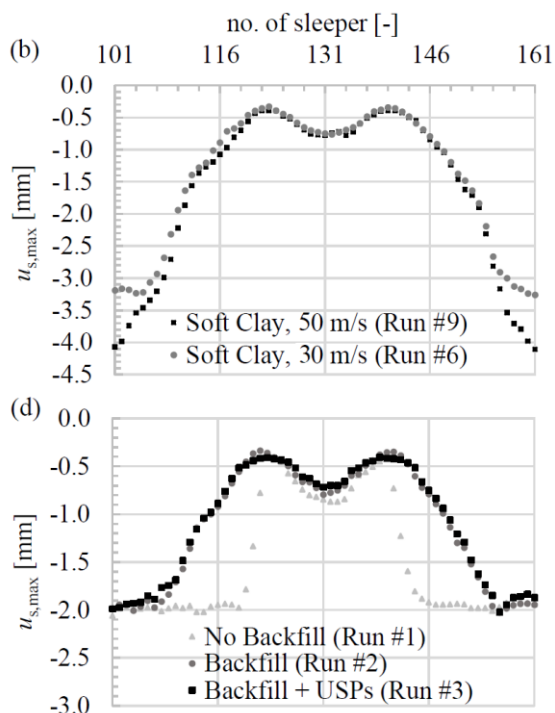
První část numerické studie zkoumala chování přechodové oblasti dle skutečného řešení (řízení tuhosti zásypu pomocí klínů zeminy s různými parametry + přechodová deska), vliv přidání podpražcových podložek (k zamýšlenému řešení) a případ, kdy by přechodová oblast mostu nebyla řešena. Druhá část zkoumala dynamické chování mostního přiblížení s různými podkladovými materiály a rychlostmi vlaků.

První obrázek znázorňuje maximální deformace koleje (pražců) pro různé rychlosti vlaku a jednotlivá řešení přechodové oblasti. Druhý obrázek ukazuje grafy pro různé podkladové materiály a rychlosti vlaků 30 m·s⁻¹ a 50 m·s⁻¹.

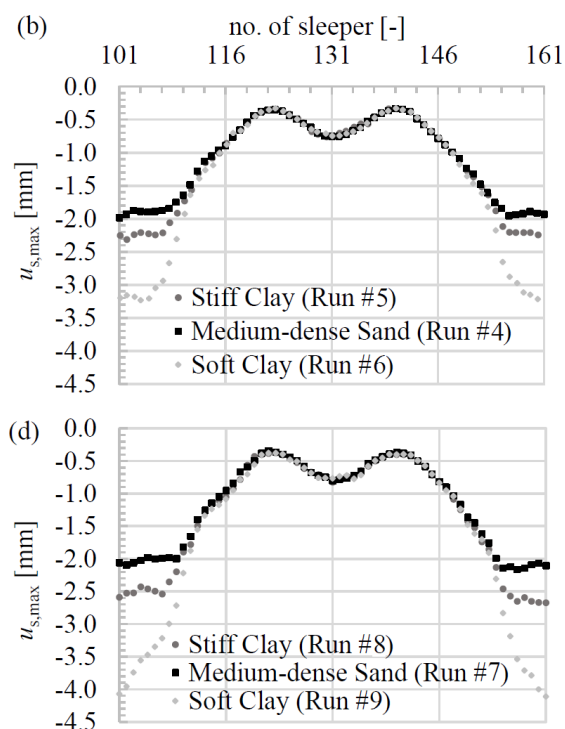
Dle grafů vlaky s vyšší rychlostí způsobují větší deformace (dynamické zatížení). Se zvyšující se rychlostí, dochází k většímu zatížení oblasti, zejména když je podkladový materiál relativně měkký. Materiál podkladu výrazně ovlivňuje odezvu železniční trati, přičemž měkký materiál vede k podstatně většímu maximálnímu vertikálnímu posunu pražců.

Při nízké tuhosti podloží a vysoké rychlosti je přítomen dvojitý škodlivý účinek: zvýšení přechodných průhybů pražců v důsledku snížené tuhosti podpěry a zesílení dynamického zatížení vyplývajícího z vyšších rychlostí vlaků.

Bez přechodového řešení je změna maximálního tlaku pražce-zátěž a vertikální přechodové posunutí pražce náhlá na mostní opěře. Klínovitý zásyp a nájezdová deska zmírňují problémy tím, že vyhlazují změny v tuhosti podpory poskytované železniční trati alespoň v analyzovaném idealizovaném scénáři. Přidání USP do přechodové zóny výrazně nezměnilo deformace a dynamické chování stopy, avšak snížilo kontaktní napětí (pražec lože) v běžné trati.



Obrázek 12: Průběh deformací koleje dle rychlosti a dle typu úpravy [20]



Obrázek 13: Průběh deformací koleje dle podloží při daných rychlostech [20]

Výsledky krátkodobé simulace lze dle autora článku použít k odhadu dlouhodobého chování pomocí rovnice sedání, která souvisí s výstupem modelování (zatížení, sedání nebo napětí mezi sousedními pražci) a počtu cyklů. V ideálním případě by bylo vždy implementováno dlouhodobé modelování, avšak tento postup je náročný na výpočetní techniku. Sestavením hodnot pro parametry rovnice sedání, je možné odhadnout

změnu rychlosti sedání šterku mezi sousedními pražci a tím i vývoj rozdílového sedání.

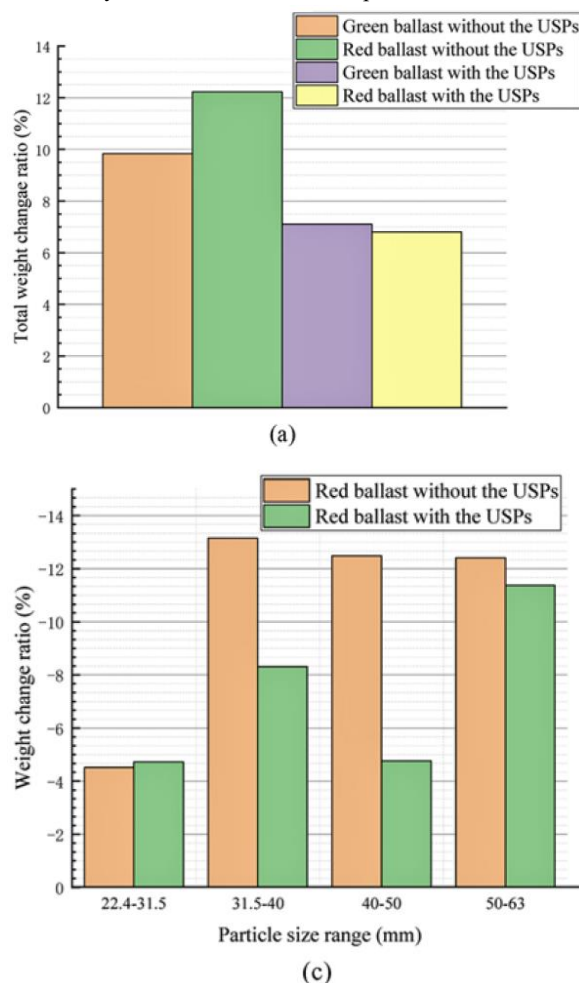
3.9. Mechanické vlastnosti kolejového lože s a bez použití USP

Je již známo, že sedání trati je významně ovlivněno degradací šterku. USP pomáhají snižovat degradaci šterku hlavně tím, že zabráňují rozbití částice šterku na rozhraní pražce a šterku a mohou zvýšit rozložení napětí v podélném směru.

Kvůli složitým polním podmínkám není snadné vyvolat stejné testovací konfigurace, zrychlení lože není snadné měřit a degradaci lože je obtížné vyhodnotit. Tato omezení mohou vést k určitým rozdílům ve výsledcích. Autoři tohoto příspěvku [21] se rozhodli pro laboratorní test chování a degradace kolejového lože pod cyklickým zatížením.

Experiment byl proveden na polovině pražce umístěného ve vaně se třemi stěnami, vyplněné kamenivem simulující kolejové lože. Testovací vzorek byl osazen sadou tlakových senzorů, senzorů pohybu, akcelerometry a papírem citlivým na tlak. Použitá zrna kolejového lože byly natřeny různými barvami, v jednotlivých vrstvách, aby bylo možné je odlišit a snadněji vyhodnotit degradaci balastu v různých vrstvách.

Experiment byl proveden pro pražec bez USP a pražec s středně tuhým USP. Po kalibraci měřidel bylo aplikováno $100 \cdot 10^4$ cyklů zatížení silou 125 kN při frekvenci 8 Hz.



Obrázek 14: Procentuální ztráta hmotnosti kolejového lože [21]

Obrázek výše ukazuje srovnání celkové ztráty hmotnosti v procentech dvou vrstev balastního lože s a bez USP. Z obrázku je vidět, že použití USP může snížit ztrátu hmotnosti lože (zejména v oblasti přímo pod pražcem – červená oblast).

Další závěry popisovaného výzkumu jsou následující.

- Kontaktní plochy pražce-lože se měří sečtením ploch ok na papíru citlivém na tlak. Výsledky ukazují, že kontaktní plocha s USP se zvětší více než 5krát oproti stavu bez USP.
- Kolejové lože s USP má nižší statickou tuhost lože než to bez USP. Tuhost statického lože s USP se však po cyklickém zatížení mírně zvyšuje, zatímco tuhost statického balastního lože bez USP po cyklickém zatížení klesá.
- Aplikace USP pomáhá snížit trvalé sedání, vertikální napětí lože s a bez USP jsou však po zhutnění téměř stejná.
- Využití USP zvyšuje zrychlení pražce a šterkové lože, ale snižuje degradaci zátěže.

4. SHRUTÍ PROBLEMATIKY USP

4.1. Shrnutí aktuálních poznatků o USP

Dle dokumentu IRS 70713-1 [6] a „Manuálu VRT“ [11] se předpokládá osazení podpražcové podložky v síti VRT. USP je prvek z elastického materiálu (tloušťky do 20 mm) osazený na kontaktní ploše pražce, která se do konstrukce koleje vkládá pro dosažení lepších vlastností v určitých ohledech.

Standardní účely, které tyto prvky plní jsou následující:

- Redukce vibrací
- Úprava dynamických vlastností tratě
- Úprava tuhosti podloží (přechodové oblasti)
- Náhrada kolejového lože (snížení tloušťky)
- Ochrana konstrukce / prodloužení životnosti prvku

Vložením prvků USP a UBM do kolejového lože dochází ke zvýšení kontaktní plochy mezi ložem a daným konstrukčním prvkem, což má za následek snížení kontaktního napětí a prodloužení životnosti. Dalším benefitem použití USP je aktivace většího množství pražcových podpor pod projíždějící nápravou kolejového vozidla vedoucí k redistribuci zatížení. Osazením tohoto prvku zároveň dochází o ovlivnění tuhostních a dynamických vlastností konstrukce koleje.

Konkrétními pozitivními účinky použití USP dle Lakušik [13] jsou:

- Redukce zatížení distribuovaná pražcem do železničního spodku (až 30 %)
- Redukce namáhání kolejnice a pražce vlivem přerozdělení zatížení (až 40 %)
- Zvýšení příčného odporu koleje vlivem zlepšení vlastností kontaktní plochy (až 9 %)
- Zvýšení pružnosti koleje
- Pozitivní dopad na geometrii koleje (trvanlivost)
- Prodloužení cyklů údržby
- Zvýšení komfortu cestujících
- Redukce přenášených vibrací (až 30 %)
- Redukce tloušťky kolejového lože (až 10 cm)

Pro stanovení vlastností samotné USP nebo pražců s USP slouží norma ČSN EN 16730 [1] (totožný účel pro UBM plní ČSN EN 17 282 [2]). Uvedené normy definují způsob zkoušení, vyhodnocení a popisu fyzikálních vlastností elastických prvků upravující tuhost koleje, avšak nepředkládají způsob návrhu pro stanovení požadovaných parametrů.

Podle směrnice IRS 70713-1 [6] a metodického pokynu SŽ [12] dělíme podpražcové podložky do čtyř skupin, na základě hodnoty statické plošné tuhosti C_{stat} [N/mm³] (základní fyzikální parametr).

- | | |
|---------------|-----------------------------|
| • Tuhé | 0,25-0,45 N/mm ³ |
| • Střední | 0,15-0,25 N/mm ³ |
| • Měkké | 0,08-0,15 N/mm ³ |
| • Velmi měkké | do 0,08 N/mm ³ |

Z pohledu návrhu USP, resp. stanovení požadovaných vlastností pro docílení předpokládaných účinků USP, je hlavním přínosem znění metodického pokynu [12] a směrnice UIC [6]. Uvedené dokumenty explicitně nestanovují numerický postup návrhu, ale předkládají soubor doporučení sloužící k volbě vhodné tuhosti USP. Dle metodického pokynu je za stanovení požadovaných vlastností zodpovědný provozovatel trati. Výpočty a modely zajišťuje projektant na základě schválených typových řešení či konzultace se specializovaným pracovištěm.

Níže je uveden zjednodušený výčet doporučení pro navrhování USP dle metodického pokynu [12]:

- Použití USP nesmí být kombinováno s dalším opatřením pro zvýšení pružnosti v konstrukci železničního svršku a není vhodné kombinovat s opatřeními železničního spodku (UBM)
- Pro běžné tratě s rychlostí nad 200 km/h se standardně použijí tuhé USP.
- Při návrhu tuhých USP se nezpracovává výpočet odezvy kolejového roštu
- Při nahrazování tloušťky kolejového lože pomocí USP musí být docíleno shodné tuhosti koleje jako v případě plné tloušťky kolejového lože (min. tl. koleje. Lože pro podbití je 200 mm)
- Při požadavku na snížení vibrací a v dalších specifických případech se navrhuje USP střední nebo měkké (definuje projektant). Řešení musí splňovat požadavky interakce se skladbou kolejového roštu.
- Zvláštní pozornost je nutné věnovat úsekům používající sestavu upevnění s odlišnou tuhostí.
- Při nevhodném použití USP s nižší pevností může dojít k nežádoucím vlivům na dynamické chování koleje.
- Pokud nejsou zvláštní důvody, zřizuje se celý úsek trati s USP stejné tuhosti.
- Při použití USP v kombinaci s pražcovými kotvami se volí tuhé USP.
- Není nutné zřizovat přechodovou oblast v případě přechodu běžné konstrukce koleje na kolej využívající tuhé USP. V ostatních případech se návrh provádí pro splnění kritéria vzájemného rozdílu průhybu mezi sousedními skladbami o hodnotě 0,5mm.

Níže uvedený obrázek ze směrnice IRS 70713-1 [6] graficky znázorňuje, pro jaký typ řešeného problému je vhodná konkrétní USP (dle statické tuhosti).

USP fields of application	USP type		
	Soft	Medium	Stiff
Improvement of track quality (point 1.3)			
S&C (point 1.3)			
Transition zones (point 1.4)			
Zones with reduced ballast thickness (point 1.5)			
Reduction of long-pitch corrugation (point 1.6)			
Reduction of ground-borne vibrations (point 1.7)			

Obrázek 6: Volba vlastností USP dle záměru použití [6]

Možným přínosem USP je dle metodického pokynu [12] aplikace v přechodové oblasti za účelem vytvoření plynulého přechodu tuhosti mezi železničním tělesem a konstrukcí mostu. USP mohou přispět ke zmírnění častých negativních účinků spojených s přechodovými zónami [17]. Této problematice se dále věnují články [15], [16], [19] a [20]. Mezi jednotlivými výzkumy jsou rozpory v účinnosti, avšak obecný závěr je, že je možné funkci konstrukce přechodové oblasti pomoci prvků USP vylepšit.

Výsledky pak ukazují, že při instalaci USP v přechodových zónách je vyžadován pečlivý návrh, aby dostavily očekávané benefity a naopak minimalizovali nežádoucí jevy.

Norma ČSN EN 1991-2 [4] předpokládá roznos zatížení na trojici sousedících kolejových podpor v poměru 1:2:1. Na základě výsledků analýz prací [14] a [18] dochází při použití USP k aktivaci většího množství prachů, což vede k efektivnějšímu přerozdělení účinků zatížení. Při aktivaci více prachů zároveň dochází k prodloužení času, kdy nápravná síla na pražec působí [14]. S klesající tuhostí USP účinky tohoto fenoménu rostou.

4.2. USP z pohledu dynamické analýzy

Použitím USP dochází k ovlivnění charakteristik tratě (změna tuhosti), vlastní frekvenci konstrukce (distribuce zatížení, útlum) a z toho důvodu by při provádění dynamické analýzy měli být zohledněny.

Ze stejného důvodu by při dynamické analýze konstrukce měl být zohledněn i vliv kolejové lože, které se na redukci dynamických účinků a přerozdělení zatížení také podílí (viz výsledky Lakušik [13]). Vhodná idealizace šterku kolejového lože a jeho zavedení do výpočtů je složité a přináší řadu otázek. Hodnoty dynamických parametrů kolejového lože pro zohlednění do dynamické analýzy nebyly nalezeny v žádném z dosud zkoumaných materiálů (na legislativní úrovni).

Kombinace s dalšími elastickými prvky tratě (měkké kolejnicové podložky, matrace pod kolejovým ložem) se bez detailního ověření jejich spolupůsobení nedoporučují [7]. Skládání účinků těchto prvků neprobíhá v rovině superpozice, ale jedná se o komplexní problematiku, která se projevuje ve statické i dynamickém chování konstrukce. V tuto chvíli je dle zdrojů [6] a [12] možné kombinovat pouze tuhé USP podložky s prvky UBM určité tuhosti (tuhá USP tvoří další pružinu v dynamické soustavě, avšak s malým dopadem na odezvu).

Nevhodnou volbou USP může vézt k nežádoucímu ovlivnění vlastní frekvence konstrukce, zvýšení hodnot deformací koleje, v krajním případě k destabilizaci tratě. Nesprávným ovlivněním tuhosti koleje hrozí riziko nadměrných deformací

koleje z toho plynoucí diskomfort cestujících a zvyšující se riziko vykojení.

Dle směrnice IRS 70713-1 [6] jsou v tuto chvíli znalosti problematiky použití podpražcových podložek s ohledem na dynamickou odezvu mostní konstrukce limitované a výzkumné práce na objasnění jejich dopadu stále probíhají.

5. ZÁVĚR

V rámci příspěvku je nejprve shrnuta problematika podpražcových podložek z pohledu doporučení stávající legislativy (závazných předpisů Správy železnic a doporučení Mezinárodní železniční unie). V druhé části příspěvku je pozornost věnována vybraným publikacím shrnující poznatky výzkumných prací. V závěrečné části jsou shrnuty poznatky z hlediska návrhu, funkce a benefitů podpražcových podložek společně s možnými dopady na dynamickou odezvu konstrukce.

Podpražcové podložky mají řadu pozitivních přínosů kdy se jedná zejména o zefektivnění distribuce zatížení a redukce dynamických účinků. Naproti tomu existují i negativa, kdy volbou nevhodných parametrů podložky dochází ke zvýšení deformací a zhoršení vlastností spojených se stabilitou koleje.

Hlavním úskalím při zohlednění vlivu podpražcových podložek je chybějící metodika vedoucí k jejich návrhu a nejednoznačné závěry dosavadních výzkumů.

V tuto chvíli jsou dostupné předpisy vyžadující použití podpražcových podložek (např. ve VRT tratích), existují normy pro zkoušení a vyhodnocování jejich vlastností, ale chybí předpis stanovující postup pro návrh nebo zohlednění těchto prvků. Dle znění směrnice UIC IRS 70713-1 [6] není v tuto chvíli dostatek podkladů pro finální stanovisko a je doporučeno další zkoumání této technologie v souvislosti na chování BK nebo dynamickou odezvu konstrukce.

V rámci budoucího výzkumu bude podrobněji zkoumána problematika podpražcových podložek a vlivu na chování železničních mostů. Hlavním směrem výzkumu bude objasnění vlivu dílčích podpražcových podložek, dle vlastností, na interakci bezстыkové koleje s mostem, dopady na přechodovou oblast a dopad na přerozdělení zatížení v rámci železničního svršku.

Reference

- [1] ČSN EN 16730 - Železniční aplikace - Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce s podpražcovými podložkami, Praha: UNMZ, 2017
- [2] ČSN EN 17282 - Železniční aplikace – Infrastruktura – Rohože pod šterkovým ložem, Praha: UNMZ, 2021
- [3] ČSN EN 1990 ed. 2 (ČSN 73 0002): Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Ed. 2. Praha: ČNI, 2021.
- [4] ČSN EN 1991-2 ed. 2 (ČSN 73 6203): Eurokód: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou. Ed. 2. Praha: ČNI, 2018.
- [5] IRS 60680 Design of a high speed railway - Infrastructure, 1st edition, Paris – France: UIC, April 2022, ISBN 978-2-7461-3154-5

- [6] *IRS 70713-1 Railway Application - Track and structure - „Under Sleeper Pads(USP) - Recommendations for Use“*, 1st edition, Paris – France: UIC, April 2018, ISBN 978-2-7461-2697-8
- [7] *IRS 70719-1 Way and Works - Track and Structure - Recommendations for the use of Under Ballast Mats (UBM)*, 1st edition, Paris – France: UIC, August 2022, ISBN 978-2-7461-3198-9
- [8] *UIC Code 720 Laying and Maintenance of CWR Track*, 2nd edition, Paris – France: UIC, March 2005, ISBN 2-7461-0527-6
- [9] *UIC Code 774-3 R Track/bridge Interaction - Recommendations for calculations*, 2nd edition, Paris – France: UIC, October 2001, ISBN 2-7461-0257-9
- [10] *SŽDC S3 Železniční svršek*, Praha, SŽ, 2020
- [11] *Manuál pro projektování VRT ve stupni DÚR*. Praha, 2020.
- [12] *SŽ MP Metodický pokyn pro navrhování pražců s podpražcovými podložkami do konstrukce kolejí, výhybek a výhybkových konstrukcí*, Praha, SŽ, 2020
- [13] Lakušik S, Ahac M and Haladin I. Experimental investigation of railway track with under sleeper pad. In.: *10th Slovenian Road and Transportation Congress*, Portorož, Slovinsko, říjen 2010.
- [14] Witt S, *Influence of under sleeper pads on railway track dynamics*. Linköping University, Švédsko, 2008
- [15] Tore L E Dahlberg, On the Use of Under-Sleeper Pads in Tracks with Varying Track Stiffness. In *9th International Heavy Haul Conference*, Linköping University, Švédsko, 2009
- [16] Insa R, Salvador P, Inarejos J and Medina L. Analysis of the performance of under-sleeper pads in high-speed line transition zones. In.: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* [online]. 2014, ISSN 0965-092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/tran.11.00033>
- [17] Paixão A, Varandas JN, Fortunato E, Calçada R (2018) Numerical simulations to improve the use of under sleeper pads at transition zones to railway bridges. *Engineering Structures* 164:169-182, DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.005
- [18] Mottahed J, Zakeri JA, Mohammadzadeh S. Field and numerical investigation of the effect of under-sleeper pads on the dynamic behavior of railway bridges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018;232(8):2126-2137. doi:[10.1177/0954409718764027](https://doi.org/10.1177/0954409718764027)
- [19] MOTTAHED, Jaber; ZAKERI, Jabbar Ali a MOHAMMADZADEH, Saeed. A Field Investigation on the Effects of Using USPs in Transition Zone From Ballasted Track to Bridges. Online. *International Journal of Civil Engineering*. 2019, roč. 17, č. 9, s. 1421-1431. ISSN 1735-0522. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00440-3>.
- [20] Ognibene, Giacomo & Powrie, William & Le Pen, Louis & Harkness, John. Analysis of a Bridge Approach: Long-Term Behaviour From Short-Term Response. In *15th Railway Engineering Conference*, Edinburgh, 2019
- [21] GUO, Yunlong; WANG, Jianxi; MARKINE, Valeri a JING, Guoqing. Ballast Mechanical Performance with and without Under Sleeper Pads. Online. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020, roč. 24, č. 11, s. 3202-3217. ISSN 1226-7988. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12205-020-2043-5>
- [22] Vrba, Pavel. Rešerše problematiky podpražcových podložek pro zefektivnění návrhu železničních mostů. In: *Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2023*. Praha: CTU FCE. Department of Concrete and Masonry Structures, 2023. ISBN 978-80-01-07137-3.