



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra železničních staveb**

Výzkum uplatnění plastových příčných podpor v železniční trati

Research in applicability of plastic bearers in railway track

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Vít Lojda

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: doc. Ing. Hana Krejčířiková, CSc.

Školitel specialista: Aran van Belkom, M.Sc.

Praha, 2020



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Vít Lojda

Název disertační práce: Výzkum uplatnění plastových příčných podpor v železniční trati

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitelky doc. Ing. Hany Krejčířikové, CSc. a školitele specialisty Arana van Belkoma, MSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla za finanční podpory projektů Studentské grantové soutěže ČVUT SGS, číslo projektu 161 - 1611579A137 a 161 - 1611850A137. Dále byla částečně podpořena programem Centra kompetence Technologické agentury ČR v rámci projektu CESTI, číslo projektu TE01020168 a projektem Provozní diagnostika kvalitativních ukazatelů koleje železničních tratí měřením její prostorové deformace, číslo projektu TA04030889.

V Praze dne 6. srpna 2020

podpis

Poděkování

Děkuji školitelce doc. Ing. Haně Krejčířkové, CSc. za odborné vedení doktorského studia a teoretické znalosti předané v jeho průběhu. Zvláštní poděkování patří panu Aran van Belkomovi, M.Sc. za jeho specializované vedení a podporu. Dále děkuji doc. Ing. Martinu Lidmilovi, Ph.D. a Ing. Leoši Horníčkoví, Ph.D. za předání odborných zkušeností a dále členům Katedry železničních staveb a Experimentálního centra FSv, ČVUT v Praze, kteří pomohli při přípravě experimentů. Dále děkuji Ing. Vojtěchu Stančíkovi, který přispěl při přípravě výpočtu v odborném software. Za odborná doporučení při zpracování výsledků disertační práce děkuji doc. Ing. Pavlu Tesárkovi, Bc. Marku Pýchovi, MRes a Ing. Marku Pokornému, Ph.D. Speciální poděkování za motivaci při studiu a podporu mého rozvoje patří Ing. Eleonoře Augustové.

Zvláštní poděkování vyjadřuji firmě Impregnace Soběslav, s.r.o., jmenovitě Ing. Petru Sladovníkovi za odbornou a technickou pomoc a firmě Lankhorst Engineered Products Bv. za odbornou spolupráci. Dále firmě JUB a.s., zvláště Ing. Petru Hrochovi, a stejně tak firmě DT - Výhybkárna a strojírna, a.s., jmenovitě Ing. Marku Smolkovi.

Abstrakt

Tématem disertační práce je výzkum uplatnění pražců z polymerů v železniční trati. Železniční pražce se v ČR v současnosti vyrábějí ze dřeva, předpjatého betonu a oceli. Dřevěné pražce vynikají pro svou adaptabilitu a ohybovou tuhost, jejíž míra je adekvátní pro tuhost tratě. Avšak jejich nevýhodou je nedostatek kvalitního dřeva pro výrobu a biodegradabilita, která negativně ovlivňuje životnost dřevěných pražců. Tato problematika vede k nezbytnosti dřevo impregnovat kreosotovým olejem, který však obsahuje škodlivé látky. Z těchto důvodů při aplikaci pražců dlouhodobě dochází k nahrazení dřeva za jiný materiál, nejčastěji za předpjatý beton, který je u správců železniční infrastruktury preferován pro svou trvanlivost. Jeho významnou nevýhodou je vysoká ohybová tuhost a tvrdost povrchu, které vedou k malé kontaktní ploše mezi zrny kameniva kolejového lože a pražci a k zvýšenému namáhání zrn, které způsobuje jejich drcení, změnu frakce, a podněcuje častější provádění údržby koleje. Na základě uvedených poznatků je při vývoji pražců vhodné použít materiál, který je trvanlivý jako beton a pružný jako dřevo. Proto se jako vhodný materiál jeví syntetické polymery.

Polymery a kompozity s polymerní matricí představují ve vývoji pražců nejnovější stupeň stavu techniky a jejich integrace do železniční infrastruktury v EU je ve fázi provozního ověřování v koleji. Požadavky na jejich vlastnosti a design vedly k vývoji rozmanitých typů dle konstrukce, tvaru, materiálu a způsobu vyztužení.

Tato disertační práce je výzkumně zaměřena na posouzení jejich uplatnění v železniční trati pomocí numerických a experimentálních metod. Posouzení zahrnuje sadu pražců z polymerů pocházejících od výrobců z Japonska a Nizozemí a sadu referenčních pražců z impregnovaného tvrdého dřeva a z předpjatého betonu.

Posouzení ohybové tuhosti pražce v konstrukci koleje bylo provedeno jako parametrická studie založená na modelu pražce na pružném podkladu podle teorie Timoshenka a Zimmermanna. Výpočet deformace pražce byl proveden metodou konečných diferencí. Geometrické a materiálové charakteristiky pražce potřebné pro výpočet byly experimentálně stanovené při namáhání pražce ohybem.

Posouzení vlivu příčného odporu pražce na funkci bezстыkové koleje bylo provedeno na základě určení kritického ohřátí kolejnicového pásu, při kterém nastává ztráta stability koleje. Posouzení bylo provedeno jako parametrická studie s výpočtem pomocí numerického modelu založeného na metodě konečných prvků. Dále bylo provedeno posouzení stability rozchodu koleje z hlediska délkové teplotní roztažnosti pražce. Nakonec bylo provedeno posouzení bezpečnosti pražce z hlediska rozvoje požáru.

Abstract

The dissertation aims at the research into the applicability of polymeric sleepers in railway track. Sleepers in the Czech Republic are made of hardwood, prestressed concrete or steel. Wooden sleepers are excellent for their flexibility and bending stiffness, whose proportion is adequate to the track stiffness. However, their downside is the lack of quality wood for their production, a short service life and biodegradability. This leads to the necessity of preserving wood with creosote oil containing harmful substances. As a result, in the track, wood has been widely replaced with prestressed concrete. This durable sleeper type has significantly expanded but the disadvantages are its excessive stiffness and surface hardness leading to a small contact area between the aggregate grains and the sleeper soffit. It results in the considerable strain followed by crushing, changing the grain size curve followed by maintenance interventions. Based on the above findings, it would be appropriate to develop sleepers applying material as durable as concrete along with the flexibility observed in wood, and thus, potential materials that come to mind could be polymers.

Polymers represent the state of the art in the sleeper development. The requirements for their properties led to the development of various types according to the design, shape, or reinforcement. The current phase of sleepers' development corresponds to the integration process in the railway infrastructure of the EU countries.

The topic of the doctoral thesis contributes with research aiming to consider the applicability of polymer sleepers by means of numerical and experimental methods. The research is based on a set of polymer sleepers from Japan and the Netherlands, and a set of reference sleepers of impregnated hardwood and prestressed concrete.

The sleeper bending stiffness in the track structure was calculated as a parametric study based on a beam on an elastic foundation according to the theory of Timoshenko and Zimmermann. The calculation of sleeper deformation was based on the finite difference method. The sleeper geometrical and material characteristics required for the calculation were experimentally determined in the bending test.

Furthermore, the assessment of the influence of the sleeper lateral resistance on the function of the continuously welded rail was performed based on the determination of the critical temperature at which the track stability is lost. The assessment was performed as a parametric study with a numerical model based on the finite element method. Also, the stability of the track gauge was evaluated in terms of the sleeper thermal expansion. Finally, the safety test of polymer sleepers in terms of fire propagation was conducted.

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Konstrukce železničního svršku	1
1.2 Polymery v železničním svršku	1
1.3 Požadavky na vlastnosti kolejnicových podpor	3
1.4 Historický vývoj pražců	4
1.4.1 Kamenné bloky a prahy.....	5
1.4.2 Pražce z tvrdého impregnovaného dřeva.....	6
1.4.3 Pražce z oceli	7
1.4.4 Pražce z předpjatého betonu	7
1.4.5 Pražce na bázi polymerů	8
1.5 Zkušební úseky tratě s aplikací pražců z polymerů v zahraničí	10
1.6 Shrnutí literární rešerše	11
Cíle disertační práce	12
TEORETICKÁ ČÁST	13
2 Výpočet namáhání pražce jako nosníku na pružném podkladu	13
2.1 Namáhání konstrukce železničního svršku statickým zatížením.....	14
2.2 Roznášení kolové síly a vyjádření zatížení na pražec.....	17
2.3 Pražec na pružném podkladu.....	19
2.4 Numerické řešení diferenciální rovnice ohybové čáry metodou konečných diferencí ..	20
2.4.1 Matice tuhosti	22
2.4.2 Vektor silového zatížení	22
2.4.3 Výpočet svislého posunutí a vykreslení ohybové čáry pražce	23
2.5 Zhodnocení výpočtu pražce na pružném podkladu.....	24
3 Stabilita bezстыkové koleje	26
3.1 Úvod do bezстыkové koleje.....	26
3.2 Napětí v bezстыkové koleji vyvolané teplotními změnami.....	27
3.3 Stabilita bezстыkové koleje v přímé trati ve vodorovné rovině	28
3.4 Zhodnocení rozboru stability BK ve vodorovné rovině	31
4 Teplotní roztažnost pražce a její souvislost s rozchodem koleje	32
4.1 Geometrické parametry koleje a jejich odchylky	32
4.2 Rozchod koleje	33
4.3 Teplotní roztažnost pražce	34
4.4 Zhodnocení výpočtu délkové teplotní roztažnosti pražce.....	35
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
5 Zkoušky a typy pražců zařazené do experimentální části	37
5.1 Testované typy pražců	38
5.1.1 Impregnované tvrdé dřevo	38
5.1.2 Polymery	38
5.1.3 Předpjatý beton	39
5.2 Stanovení charakteristik pražců podrobených zkouškám	39
5.3 Seznam pražců podrobených zkouškám	39
5.4 Typy systému upevnění pražců použité při zkouškách	41
6 Stanovení odolnosti pražce při namáhání ohybem	42
6.1 Materiálové charakteristiky pražce stanovené při namáhání ohybem.....	42
6.2 Laboratorní model pro čtyřbodový ohyb pražce	44
6.3 Laboratorní sestava a použité přístroje	46
6.4 Stanovení meze pružnosti pražce	49
6.4.1 Zatěžovací schéma pro stanovení meze pružnosti	50
6.4.2 Zpracování dat pro zhodnocení meze pružnosti pražce	51

6.4.3	Zhodnocení stanovené meze pružnosti pražce	53
6.5	Stanovení modulu pružnosti pražce	53
6.5.1	Zatěžovací schéma pro stanovení modulu pružnosti	54
6.5.2	Výpočet modulu pružnosti	56
6.5.3	Zpracování dat pro vyhodnocení modulu pružnosti.....	57
6.5.4	Zhodnocení stanoveného modulu pružnosti pražce	59
6.6	Stanovení variability <i>E</i> -modulu pražců z impregnovaného bukového dřeva	60
6.6.1	Popis sady pražců a postupu provádění zkoušky ohybem.....	61
6.6.2	Statistické zpracování modulu pružnosti	61
6.6.3	Zhodnocení variability modulu pružnosti sady bukových pražců.....	63
6.7	Parametrická studie vlivu ohybové tuhosti pražce na pokles konstrukce koleje.....	63
6.8	Zhodnocení výsledků ze zkoušky namáhání pražce ohybem	66
7	Stanovení příčného odporu pražce a jeho vliv na stabilitu bezстыkové koleje	68
7.1	Příčný odpor pražce stanovený in situ v Hostivici.....	68
7.1.1	Popis železniční trati zvolené pro provedení zkoušky	69
7.1.2	Příprava pražců pro stanovení příčného odporu	69
7.1.3	Postup stanovení příčného odporu pražce in situ.....	70
7.1.4	Výsledky příčného odporu pražce stanovené in situ	71
7.2	Příčný odpor pražce stanovený v laboratoři	72
7.2.1	Pražce podrobené stanovení příčného odporu v laboratoři.....	73
7.2.2	Laboratorní sestava a přístroje pro stanovení příčného odporu pražce	73
7.2.3	Hutnění kameniva v laboratorním boxu	75
7.2.4	Postup stanovení příčného odporu v laboratoři.....	78
7.2.5	Výsledky příčného odporu pražce stanoveného v laboratoři	79
7.3	Parametrická studie vlivu příčného odporu pražce na stabilitu BK.....	82
7.3.1	Rozbor stability konstrukce a stanovení kritického tvaru vybočení.....	83
7.3.2	Výpočet kritické teploty pro ztrátu stability bezстыkové koleje	85
7.3.3	Materiálové a průřezové charakteristiky prutů	86
7.3.4	Tuhost uzlu upevnění	86
7.3.5	Tuhost podepření pražce.....	87
7.3.6	Vyhodnocení výsledků parametrické studie bezстыkové koleje	89
7.4	Zhodnocení vlivu příčného odporu pražce na stabilitu bezстыkové koleje	89
8	Stanovení doporučeného koeficientu délkové teplotní roztažnosti pražce	91
8.1	Popis lokality dlouhodobého snímání teploty pražce.....	91
8.2	Přístrojové vybavení použité ke sledování teploty.....	92
8.3	Zpracování zaznamenaných dat o teplotě.....	92
8.4	Výpočet doporučené délkové teplotní roztažnosti pražce	93
8.5	Zhodnocení vlivu délkové teplotní roztažnosti pražce na stabilitu rozchodu koleje.....	95
9	Stanovení bezpečnosti pražce z hlediska rozvoje požáru	96
9.1	Zkušební postup pro provedení požární zkoušky pražců	97
9.1.1	Posouzení požární bezpečnosti ve stavebnictví podle technických norem	97
9.1.2	Požární bezpečnost pražců z polymerů v odborné literatuře.....	99
9.1.3	Návrh postupu pro provedení zkoušky požární bezpečnosti pražce	100
9.2	Příprava požárního scénáře	101
9.3	Provedení zkoušky požární bezpečnosti pražce	104
9.4	Výsledky zkoušky požární bezpečnosti pražce	105
9.5	Zhodnocení zkoušky požární bezpečnosti pražce.....	107
10	Návrh zkušebního úseku s pražci z polymeru.....	109
11	Závěr.....	110
	Seznam použité literatury	115
	Seznam tabulek.....	124
	Seznam obrázků.....	125

Abecední seznam použitých zkratek a symbolů

Seznam použitých zkratek je v tab. 1 a souhrn zavedených symbolů je v tab. 2.

Tab. 1: Abecední seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
ASTM	American Society for Testing and Materials (Americká společnost pro zkoušení a materiály)
AL	Alert Limit (mez sledování)
AVR	Antivibrační rohož
BK	Bezстыková kolej
CDV	Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Evropská norma přejatá do soustavy norem ČSN
ČSD	Československé státní dráhy, s. o.
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DB AG	Deutsche Bundesbahn Aktiengesellschaft (Německé dráhy)
EU	Evropská unie (European Union)
EK	Evropská komise (European Commission)
FDM	Finite-Difference Method (metoda konečných diferencí, metoda sítí)
FEM	Finite-Element Method (metoda konečných prvků)
GPK	Geometrické parametry koleje
HBW	Hardness Brinell Wolfram (tvrdost povrchu podle Brinella)
HSS	Označení pražce z polymeru na bázi recyklovaného polyetyleny (s vyšší tuhostí)
IAL	Immediate Action Limit (mez bezodkladného zásahu)
IL	Intervention Limit (mez zásahu)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
LCC	Life Cycle Costs (náklady na životní cyklus)
MKR	Mezikvartilové rozpětí
N/a	Not available (hodnota není stanovena, není dostupná)
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen (Rakouské spolkové dráhy)
OTP	Obecné technické podmínky (stanovené Správou železnic, s. o.)
PWI	Permanent Way Institution
PES	Označení pražce z polymeru na bázi recyklovaného polyetyleny (se standardní tuhostí)
PUS	Označení pražce z polymeru na bázi polyuretanu
PTŽS	Pláň tělesa železničního spodku
RP	Rychlostní pásma
RZZ	Rázová zatěžovací zkouška
SNCF	Société nationale des chemins de fer français (Francouzská národní železniční spol.)
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, s. o. (od 1. 1. 2020 změněno na Správa železnic, s. o.)
TC	Thermocouple (termočlánek)
TSI	Technical Specifications for Interoperability (Technické podmínky pro interoperabilitu)
VUT	Vysoké učení technické v Brně
UIC	Union Internationale des Chemins de fer (Mezinárodní železniční unie)
ŽST	Železniční stanice

Tab. 2: Abecední seznam zavedených symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
A	Plocha	$[m^2]$
A_f	Plocha nádoby	$[m^2]$
a	Vzdálenost mezi tuhou podporou a působištěm zatížení $0,5 \cdot F_{pz}$	$[m]$
B	Osová vzdálenost pražců	$[m]$
b	Šířka příčného průřezu nosníku, šířka pražce	$[m]$
b_L	Šířka souvislého podepření kolejnice	$[m]$
C	Součinitel ložnosti pružného podkladu	$[N \cdot m^{-3}]$
$C_1; C_2; C_3; C_4$	Konstanta	$[-]$
$D_1; D_2; D_3$	Svislý posun při namáhání pražce ohybem	$[mm]$
$d; d_{max}$	Průhyb; maximální průhyb uprostřed rozpětí pražce při namáhání ohybem	$[mm]$
$d_u; d_p$	Průhyb pražce na: mezi pružnosti; mezi únosnosti při namáhání ohybem	$[mm]$
E	Modul pružnosti materiálu (E -modul)	$[Pa]$
$E_I; E_Iz$	Ohybová tuhost nosníku	$[Pa \cdot m^2]$
e	Eulerovo číslo	$[-]$
F	Síla, silové zatížení	$[N]$
F_{cr}	Kritická osová síla v BK	$[N]$
F_{pz}	Zatížení pražce na pružném podkladu a při namáhání pražce ohybem	$[N]$
$F_{pz,u}; F_{pz,p}$	Zatížení pražce při namáhání ohybem na: mezi pružnosti; mezi únosnosti	$[N]$
$F_x; F_{x,rez}$	Příčná síla (směr osy x); ustálená (reziduální) příčná síla	$[N]$
F_y	Podélná síla (směr osy y)	$[N]$
F_{yd}	Návrhová mez kluzu oceli	$[Pa]$
f	Frekvence zatěžování	$[Hz]$
G	Modul pružnosti ve smyku	$[Pa]$
g	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
h	Výška příčného průřezu nosníku, tloušťka pražce	$[m]$
H_p	Efektivní výhřevnost materiálu	$[J \cdot g^{-1}]$
i	Číslo uzlu; bodu (aplikováno při značení $D_i, Q_i, x_i, M_i, V_i, w_i, F_i, F_{pz,i}, p_i$)	$[-]$
$I_x; I_y; I_z$	Moment setrvačnosti průřezu nosníku	$[m^4]$
k_{rp}	Tuhost podložky pod patu kolejnice	$[N \cdot m^{-1}]$
k_d	Součinitel roznášení kolového zatížení na pražec	$[-]$
k_x	Příčný odpor pražce	$[N \cdot m^{-1}]$
k_y	Podélný odpor pražce	$[N \cdot m^{-1}]$
$k_{y,f}$	Podélný odpor (podélná tuhost) proti posunutí kolejnice v uzlu upevnění	$[N \cdot m^{-1}]$
$k_{y,tot}$	Soustava podélného odporu k_y a $k_{y,f}$	$[N \cdot m^{-1}]$
k_z	Spojité svislá tuhost kolejové jízdní dráhy, modul pružnosti uložení kolejnice	$[N \cdot m^{-2}]$
$k_{\Phi,y,f}; k_{\Phi,z,f}$	Tuhost proti natočení v uzlu upevnění	$[N \cdot m \cdot rad^{-1}]$
L	Charakteristická délka kolejového roštu; délka pražce	$[m]; [m]$
L_p	Vzdálenost podpor	$[m]$
l	Délka nosníku	$[m]$
l_o	Původní délka, rozchod koleje	$[m]$
m	Hmotnost na nápravu	$[kg]$
m_p	Hmotnost pražce	$[kg]$
m_f	Rychlost úbytku hmotnosti vzorku na jednotku plochy	$[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
$M; M_{max}; M_0$	Ohybový; maximální ohybový moment; okrajová podmínka	$[N \cdot m]$
M_{vd}	Rázový modul deformace	$[Pa]$
N	Velikost vzorku	$[-]$
$N_y; N_{cr}$	Osová síla v kolejnicovém pásu, osová síla vedoucí ke ztrátě stability BK	$[N]$
n	Počet uzlů	$[-]$
O_y	Brzdné síly	$[N]$
P_i	Reakce podloží v uzlu nosníku	$[N]$
p	Reakce podloží	$[N \cdot m^{-2}]$
p'	Reakce podloží vztažená na střednici nosníku	$[N \cdot m^{-1}]$
p_i	Reakce spojitá mezi dvěma uzly v metodě sítí	$[N \cdot m^{-1}]$
Q	Kolová síla	$[N]$
Q_f	Tepelný výkon	$[W]$
$Q_1; Q_2$	Hranice horního výběrového kvartilu; hranice dolního výběrového kvartilu	$[-]$
$q; q_c$	Spojité zatížení	$[N \cdot m^{-1}]$
$s; \bar{s}$	Směrodatná odchylka; výběrová směrodatná odchylka	$[-]$
\bar{s}^2	Nejlepší nestranný odhad	$[-]$

Tab. 2 (pokračování): Abecední seznam zavedených symbolů

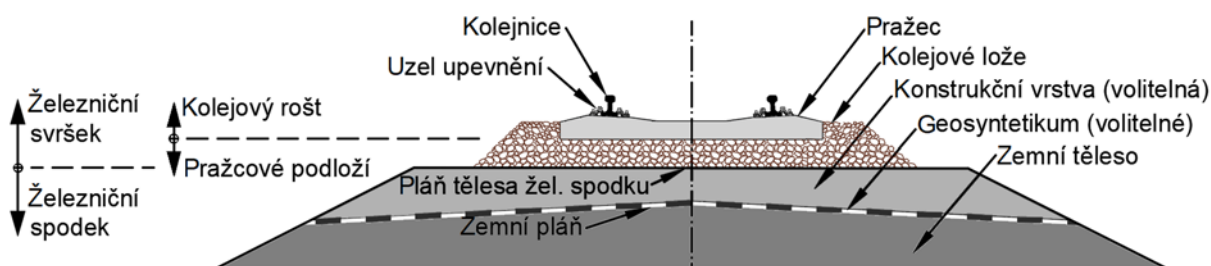
Symbol	Popis	Jednotka
t	Čas	[s]
T	Teplota	[°C]
$T_g; T_f; T_m$	Teplota skelného přechodu; teplota tečení; teplota tání	[°C]
T_N	Neutrální teplota kolejnicového pásu	[°C]
T_α	Percentil studentova T rozdělení	[-]
u	Posun ve směru osy pražce (směr osy x)	[m]
$V; V_{max}; V_0$	Posouvající síla; maximální posouvající síla; silová okrajová podmínka	[N]
v	Posun ve směru osy koleje (směr osy y)	[m]
v_t	Rychlost; traťová rychlost	[m·s ⁻¹]
w	Posun ve směru gravitace (směr osy z)	[m]
$\bar{X}; \bar{X}$	Průměr; výběrový průměr	[-]
X_i	Hodnota E -modulu ve statickém souboru dat	[Pa]
x	Osa, souřadnice, vzdálenost sledovaného průřezu od působíště svislé síly	[m]
y	Osa, souřadnice	[m]
Z	Množina celých čísel	[-]
z	Osa, souřadnice	[m]
α	Součinitel délkové teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
$\alpha_{cr}; \alpha_{cr,min}$	Součinitel kritického zatížení; minimální součinitel kritického zatížení	[-]
δ	Dynamický součinitel	[-]
ε	Poměrná deformace	[-]
Δd	Rozdíl průhybu při horní a dolní hladině zatížení	[m]
Δf	Počáteční amplituda výchylky (imperfekce) v numerickém modelu BK	[mm]
Δl	Změna délky prutu (kolejnice, pražce)	[m]
ΔT	Změna teploty prutu	[K]
ΔT_{cr}	Ohřátí kolejnicového pásu vzhledem k T_N , které vyvolá ztrátu stability BK	[K ⁻¹]
Δx	Vzdálenost mezi uzly v metodě sítí	[m]
η	Pořadnice příčinkové čáry	[-]
λ	Tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
μ	Pořadnice příčinkové čáry	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ν	Poissonův součinitel	[-]
ξ	Relativní souřadnice	[-]
$\sigma; \sigma_{cr}$	Napětí; kritické napětí v kolejnicovém pásu vedoucí ke ztrátě stability BK	[Pa]
σ_m	Napětí v krajních vláknech průřezu od ohybu	[Pa]

1 Úvod

1.1 Konstrukce železničního svršku

Železniční trať je z hlediska stavby rozdělena na dvě základní části - železniční spodek a železniční svršek, jak je ukázáno na obr. 1. Železniční spodek je tvořen tělesem železničního spodku (zemní těleso, konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku a odvodňovací zařízení), stavbami železničního spodku (propustky, mosty, tunely, aj.) a dalšími částmi (dopravní plochy a komunikace, drobné stavby, zařízení železničního spodku). Použité materiály mají být únosné, propustné a nenamrzavé v takové míře, aby spolehlivě přenášely zatížení ze železničního svršku. Horní plocha tělesa železničního spodku, která ho odděluje od železničního svršku, se nazývá pláň tělesa železničního spodku (PTŽS). V případě provedení konstrukční vrstvy nebo stabilizace zeminy pojivy za účelem zvýšení deformační odolnosti či mrazuvzdornosti se plocha mezi konstrukčními vrstvami a zemním tělesem nazývá zemní pláň [1].

Klasická konstrukce železničního svršku se skládá z kolejnic, uzlů upevnění, kolejnicových podpor a z kolejového lože. Železniční trať se z hlediska namáhání provozem rozděluje na kolejový rošt a pražcové podloží. Kolejový rošt se skládá z kolejnicových pásů, které jsou spojeny uzlem upevnění s kolejnicovými podporami, kterými mohou být příčné nebo výhybkové pražce nebo mostnice [2].



Obr. 1: Příčný řez klasickou konstrukcí železniční tratě v násypu a její názvosloví [3-upraveno]

1.2 Polymery v železničním svršku

Věda se vývojem plastů, resp. polymerů, zabývá přibližně sto let [4]. K průmyslovým aplikacím se využívají nejen primární polymery, ale s ohledem na ekologické trendy se aplikují i polymery ze skupiny odpadů. Vlivem optimalizace výroby a vyztužování se polymery využívají i ve stavebních konstrukcích namáhaných ohybem, smykem nebo osovými silami. Mezi aplikace polymerů v konstrukcích dopravních staveb patří například lávky pro pěší o rozpětí až 10 m [5, 6].

Jak je ukázáno na obr. 2, v tratích Správy železnic se polymery uplatňují v konstrukci protihlukových a antivibračních opatření, uzlu upevnění, pražcových kotev

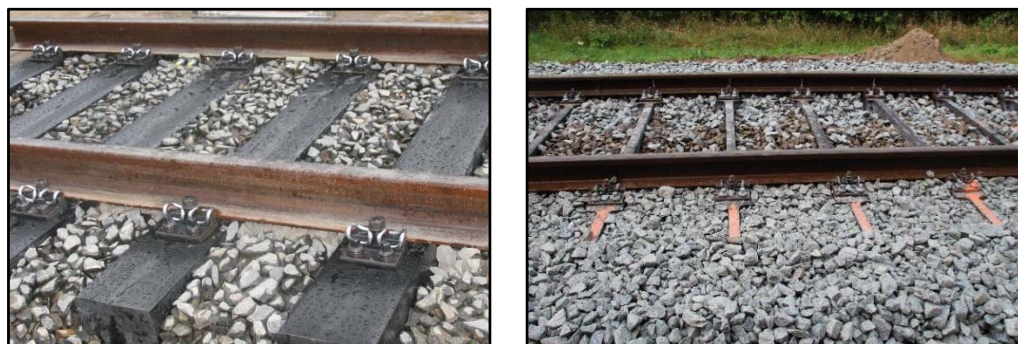
pro zvýšení příčného odporu pražce [7] i tvarovek pro zpevnění příkopu [8]. V řadě jmenovaných prvků železniční trati se jedná o inovativní využití polymerů, která umožňují náhradu obvyklých materiálů, jako jsou dřevo nebo beton.



Obr. 2: Vybrané příklady prvků z polymerů použitých v tratích Správy železnic [9]

V souladu se zmíněným využitím polymerů dochází u zahraničních správců železniční infrastruktury k technickému rozvoji v oblasti kolejnicových podpor z polymerů, kompozitů s polymerní matricí nebo hybridních podpor na bázi polymerů (obr. 3) [10]. Motivací k aplikaci kolejnicových podpor z polymerů je možné překonání problémů, které vykazuje tvrdé impregnované dřevo, předpjatý beton nebo ocel. Základní myšlenkou aplikace polymerů při výrobě kolejnicových podpor není pouhá přímá náhrada dřeva ani přiblížení se jeho vlastnostem. Idea polymerních kolejnicových podpor je založená na užitku z vlastností, které polymery nabízejí.

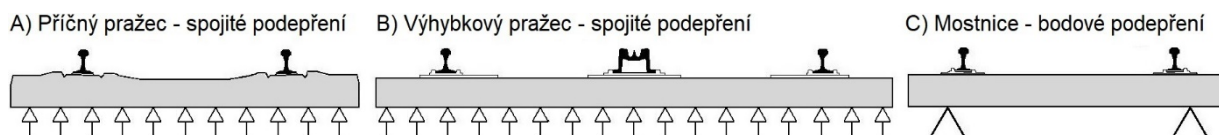
Kolejnicové podpory z polymerů musí obdobně jako tvrdé impregnované dřevo, předpjatý beton nebo ocel splňovat požadavky na mechanickou odolnost a aplikační vlastnosti při zachování přijatelných nákladů na jejich životní cyklus (LCC) [11].



Obr. 3: Vybrané aplikace pražců na bázi recyklovaných polymerů v zahraničí [11], [13]

1.3 Požadavky na vlastnosti kolejnicových podpor

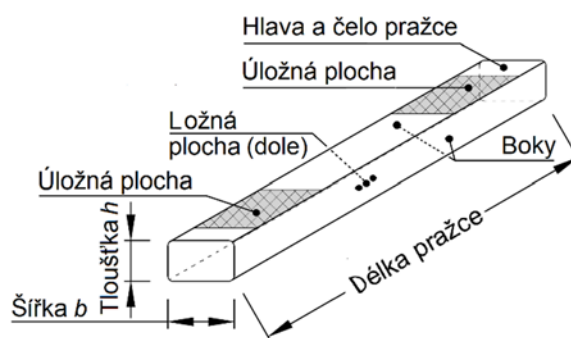
Kolejnicová podpora je nosník, na kterém spočívají kolejnicové pásy. Příčné kolejnicové podpory se podle svého účelu dělí do tří skupin: příčné pražce a výhybkové pražce ukládané do kameniva kolejového lože, které je spojitě podpírá, a dále na mostnice podepřené bodově podélnými nosníky ocelových železničních mostů bez průběžného kolejového lože. Statické schéma jednotlivých kolejnicových podpor je na obr. 4. Názvosloví příčného pražce je uvedeno na obr. 5.



Obr. 4: Typy kolejnicových podpor rozdělené dle podepření

Příčné pražce mají splňovat zejména tyto funkce:

- nést kolejnicové pásy,
- udržovat stálou hodnotu rozchodu koleje,
- přenášet zatížení z kolejového roštu do pražcového podloží,
- udržovat úklon kolejnicových pásů,
- zajistit dostatečný elektrický odpor,
- umožnit montáž prvků uzlu upevnění,
- umožnit práci podbíječky a údržbu koleje traťovými stroji,
- snižovat hluk a vibrace emitované provozem drážních vozidel [14].

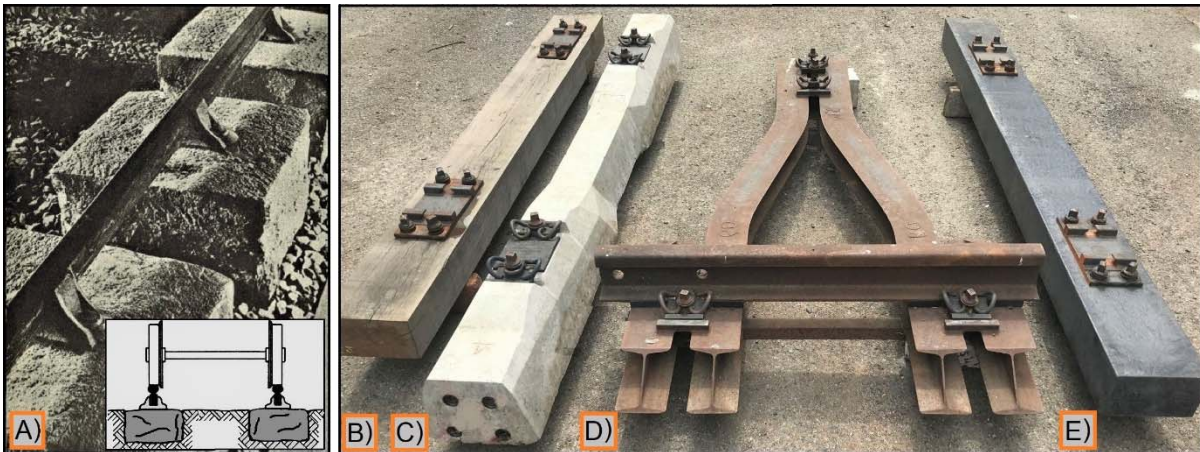


Obr. 5: Názvosloví příčného pražce [2-upraveno]

Vzhledem ke jmenovaným požadavkům a zvyšujícím se nárokům na hospodárnost, provozovanou rychlost a spolehlivost provozu prošly pražce historickým vývojem a inovacemi z pohledu materiálu, tvaru i konstrukce.

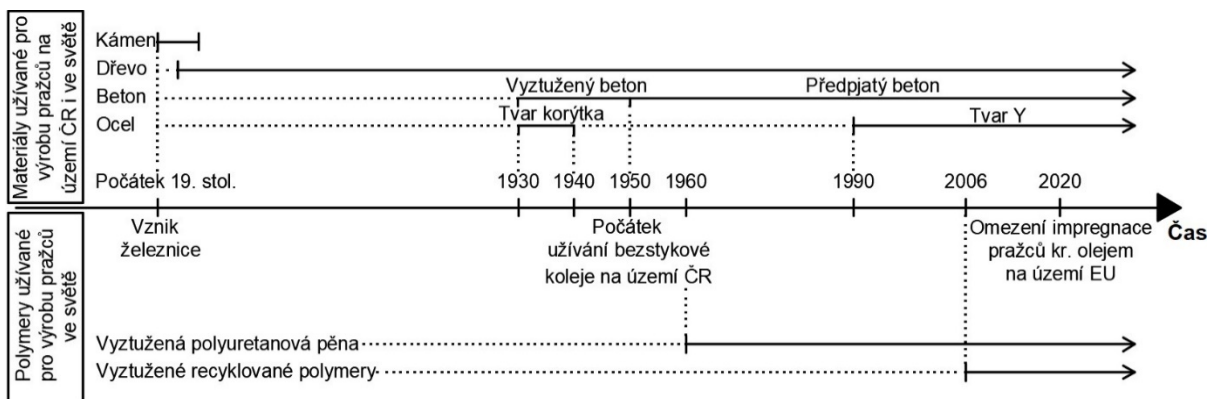
1.4 Historický vývoj pražců

V počátcích železnice v 19. století byly kolejnice neseny kamennými bloky nebo prahy (obr. 6). S rozvojem trakce, zvyšováním rychlosti a zatížení konstrukce koleje došlo ke zvyšování technických požadavků, kterým kámen nevyhovoval a došlo k jeho náhradě pražci ze dřeva. Rozvoj technologie výroby oceli, vyztužování a předpínání betonu ve 20. století umožnily vývoj typů pražců (obr. 6), které splňují požadavky železnice v moderní době.



Obr. 6: Příklady typů pražců: A) kamenné bloky [15, 16], B) impregnované tvrdé dřevo, C) předpjatý beton, D) ocelový pražec tvaru Y, E) polymer (recyklovaný)

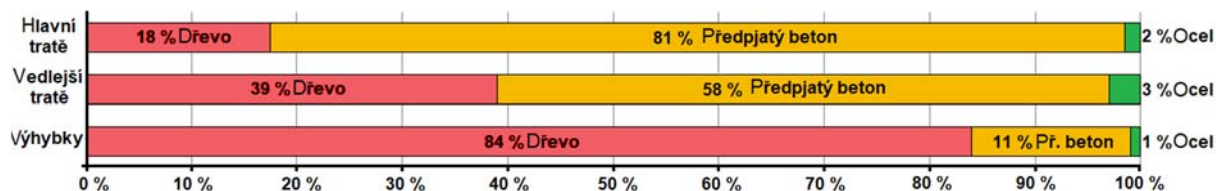
Časová osa na obr. 7 zobrazuje historický přehled materiálových typů pražců užívaných u správců železničních tratí v ČR. Dále jsou pod osou přidány i polymerní pražce užívané v zahraničí.



Obr. 7: Materiály používané pro výrobu pražců v ČR a ve světě (nad časovou osou) a polymery používané v zahraničí (pod časovou osou) [17]

Časová osa je doplněna o počátek užívání konstrukce bezстыkové koleje v tratích Československých státních drah, s. o. (ČSD). Dále je vložena datace o omezení použití kreosotového oleje pro impregnaci pražců ze dřeva pro novostavby a rekonstrukce tratí v zemích EU, která nabude předpokládanou platnost v roce 2020 [18]. Omezení použití kreosotového oleje může zásadní měrou ovlivnit rozšíření

příčných pražců z polymeru. Na obr. 8 je uvedena relativní četnost železničních pražců dle materiálu v tratích Správy železnic k roku 2010, která byla převzata z reportu pracovní skupiny pro Udržitelnost dřevěných pražců, která byla utvořena při Mezinárodní železniční unii [18].



Obr. 8: Relativní četnost pražců z tvrdého impregnovaného dřeva, předpjatého betonu a oceli v tratích Správy železnic k roku 2010 [18-upraveno]

Podle grafu se pražce z předpjatého betonu využívají na více než 80 % hlavních tratí a více než polovině vedlejších tratí. Lze předpokládat, že k roku 2020 se jejich rozšíření ještě zvýšilo. K roku 2010 bylo evidováno 39 % vedlejších tratí s pražci ze dřeva, ale lze předpokládat, že v rámci rekonstrukcí tratí jejich rozšíření dlouhodobě klesá kvůli jejich náhradě regenerovanými pražci z předpjatého betonu z kolejí vyšších řádů. Na druhou stranu lze jmenovat specifické úseky trati, kde pražce z předpjatého betonu nejsou vhodné z důvodu náhlé změny tuhosti pražcového podloží, požadavku na pražce s nižší ohybovou tuhostí a zpružnění a nároky na sníženou tloušťku kolejového lože. Takovými místy jsou:

- přechodové oblasti mezi konstrukcí zemního tělesa a železničního mostu,
- viadukty nebo některé mosty s průběžným kolejovým ložem,
- tratě vedené oblastmi poklesových kotlin na poddolovaných územích [19],
- výhybky,
- tunely,
- železniční přejezdy,
- oblasti s výskytem vlnkovitosti kolejnice [20].

V případě nedostupnosti vhodné impregnační látky nebo kvalitního dřeva pro výrobu pražců by mohlo dojít k potřebě přímé náhrady dřeva za jiný materiál, kterým mohou být polymery.

1.4.1 Kamenné bloky a prahy

Kamenné bloky či prahy pro podporování kolejnic se využívaly na první železniční dráze v Anglii mezi městy Stockton a Darlington nebo na koněspřežné Ardrossanské trati ve Skotsku ve 30. letech 19. století [2]. První železnice na evropské pevnině byla

trať z Českých Budějovic do Lince plně provozovaná od roku 1832, se kterou je spjata i jedna z prvních aplikací kamenných bloků [2].

Z pohledu petrografie se jednalo o pískovcové nebo žulové bloky, které byly ukládané přímo do zeminy. Bloky byly opatřeny otvory k přímému upevnění kolejnice prováděné použitím dřevěných či kovových hřebů. Bloky byly ukládané jen pod kolejnicemi, aby byl umožněn průjezd koňského spřežení mezi kolejnicemi. Nástupem lokomotiv však vzrostlo nápravové zatížení, při kterém se bloky zatlačovaly do podloží, a zhoršovala se stabilita rozchodu koleje. Dynamické účinky zatížení vedly k hlučnosti provozu, nízkému komfortu jízdy a opotřebením železničního svršku i vozidla. Kamenné pražce se s ohledem na zmíněné zkušenosti aplikovaly jen krátkodobě [21, 22].

1.4.2 Pražce z tvrdého impregnovaného dřeva

Dřevo bylo po dlouhou dobu výhradním materiálovým typem pražce. V historii bylo aplikováno měkké dřevo typu modřín a borovice, které má však o 25 až 50 % kratší životnost než tvrdé dřevo [23]. Pražce ze dřeva se vyrábějí z tvrdých dřevin druhu buk, dub nebo azobé. Dřevo musí být nedeformované a bez prasklin [24]. Dřevo je náchylné k napadení houbami či dřevokazným hmyzem, které spolu s povětrnostními vlivy snižují jeho životnost, a proto se musí impregnovat chemickými látkami (kreosotový olej, síran zinečnatý, aj.), aby byla vzhledem k hospodárnosti prodloužena doba použitelnosti dřevěných pražců. Kreosot je biocidní produkt založený na kamenouhelném dehtu. Kamenouhelný dehet je směs látek, mezi které patří nebezpečné polycyklické aromatické uhlovodíky. Impregnace dřevěných pražců použitím kreosotového oleje byla vyhodnocena jako škodlivá životnímu prostředí [25] a nařízením Evropské komise je použití kreosotového oleje v zemích EU k roku 2020 omezováno [18].

Impregnace je prováděna s přirozeně vysušeným dřevem s vlhkostí pod 30 %, která je hranicí přirozeného nasycení vláken [26]. Volba kvalitního dřeva pro výrobu pražce a prodloužení jeho životnosti impregnační látkou má z hlediska hospodárnosti podstatný vliv, protože obnova dřevěných pražců v trati je nákladná a lze ji odhadnout až na 15 % výdajů na udržování trati [23].

I přes adekvátní ohybovou tuhost a flexibilitu dřevěných pražců bylo jejich rozšíření negativně ovlivněno nedostatkem kvalitního dřeva pro výrobu. Z důvodu nízké tvrdosti povrchu dřeva je navíc vyžadováno uložení paty kolejnice na podkladnici, která zajišťuje roznášení nápravového zatížení na úložnou plochu pražce. Ve snaze odstranit zmíněné nedostatky byly pro pražce hledány modernější materiály.

1.4.3 Pražce z oceli

Pražce z oceli se nejprve válcovaly z plechu zpracovaného do tvaru žlabu nebo otočeného koryta [23]. Ocelové korýtkové pražce byly u ČSD užívány ve 30. letech (s přesahem až do 60. let) 20. století [2] a dále se nerozšířily zejména kvůli korozi v místě uzlu upevnění, praskání, obtížnosti podbíjení a nekompatibilitě s kolejovými obvody [1].

Pražce tvaru Y se využívají od 90. let. Jejich vidlicový tvar zajišťuje vysoký příčný odpor. K jeho přenášení nedochází oproti konvenčním pražcům za hlavami pražců, ale střední částí pražce a ztužidly, a proto se šířka kolejového lože s pražci tvaru Y provádí menší. Tyto přednosti vedou k aplikaci pražců tvaru Y v úsecích železniční trati, kde aplikace betonových či dřevěných pražců není vhodná [1, 27].

1.4.4 Pražce z předpjatého betonu

Pražce na bázi betonu byly vyvíjeny až od poloviny 20. století. Ačkoliv je princip výroby betonu známý více než 2000 let, jeho aplikace při výrobě železničních pražců byla umožněna až na základě vývoje technologií potřebných pro vyztužování betonu a následně pro jeho předpínání. Pražce z předpjatého betonu se vzhledem k dřevěným pražcům vyznačují vysokým příčným odporem, který vyplývá z jejich hmotnosti a tvaru. Tím spolu s vývojem systému upevnění kolejnice umožnily rozšíření konstrukce bezстыkové koleje, která vedla ke zvýšení spolehlivosti tratě, snížení nákladů na údržbu a umožnila navýšení traťové rychlosti. Pražce z předpjatého betonu se typicky vyrábějí jako monoblokové, ale v zahraničí se užívají i dvoublokové s ocelovým profilem ve střední části pražce. Výhodou moderních pražců z předpjatého betonu je úklon jejich úložné plochy a dostatečná tvrdost, která umožňuje použití přímého bezpodkladnicového upevnění [28].

Pražce z předpjatého betonu se rozšířily i kvůli své životnosti (běžně 40 až 50 let). Životnost pražců, která snižuje frekvenci jejich výměny po dožití, vede ke snížení celkových nákladů na údržbu tratě. Pražce z předpjatého betonu se významně rozšířily, avšak jednou z jejich nevýhod je příliš vysoká ohybová tuhost a vysoká hmotnost, která vede k namáhání zrn kameniva kolejového lože na malé ploše [29] a způsobuje jejich drcení (možno omezit podpražcovými podložkami). Z výše uvedených poznatků vyplývá, že při výrobě pražců by bylo vhodné aplikovat materiál, který je trvanlivý jako beton a zároveň pružný a tvarově přizpůsobivý jako dřevo. Proto se jako potenciálně vhodný materiál pro výrobu pražců jeví polymery.

1.4.5 Pražce na bázi polymerů

Pražce z polymerů nebo kompozitů s polymerní matricí a hybridní pražce na bázi polymerů představují ve vývoji pražců poslední stupeň stavu techniky a k roku 2020 jsou stále předmětem dalšího vývoje. Typy pražců vyvinuté k aplikaci v tratích EU musejí být v souladu s technickými požadavky pro interoperabilitu (TSI) [30]. Doposud vyvinuté typy pražců na bázi polymerů se používají u zahraničních správců tratí.

Vývoj pražců z polymerů je vzhledem k vývoji pražců z předpjatého betonu analogickým příkladem, protože k rozšíření obou typů pražce nepostačoval jen základní materiál, ale následně bylo třeba vyvinout i vhodnou výrobní technologii vyztužení. Syntetické polymery se v průmyslu používají více než sto let [4], ale jejich použití při výrobě pražců bylo možné až později na základě vývoje výrobní technologie pultruze. Vývoj prvních kompozitních pražců vyrobených pultruzí z polyuretanové pěny vyztužených skelnými vlákny byl v literatuře dohledán v Japonsku v 60. letech 20. století [31, 32]. Jejich rozšíření v tratích Japonska bylo jen omezené, pravděpodobně z důvodu neúměrných nákladů na pořizování polyuretanu.

V dalších dekádách došlo k masovému rozšíření aplikace polymerů v průmyslu se kterým je spjatá problematika nakládání s odpadem. V rámci recyklace odpadu a jeho využití jako sekundárního materiálu došlo v USA v polovině 90. let k vývoji prvních pražců z recyklovaných polymerů. Mechanická odolnost pražců bez výztuže však byla nízká, a pražce bez výztuže se neosvědčily a v 90. letech příliš se nerozšířily.

Technologický vývoj ve zpracování polymerů a výrobě pražců a vyztužování vedl ke zlepšení mechanické odolnosti. Extruzní výrobní technologie plastu založená na kontinuálním vytlačování horké taveniny skrz formovací matici umožnila vývoj pražce s obdélníkovým příčným průřezem [32]. S rozšířením metody vstřikování plastů do forem bylo umožněno navrhnout železniční pražec s proměnným tvarem příčného průřezu po jeho délce. Příčné pražce z materiálů na bázi polymerů se na evropském a americkém kontinentu začaly intenzivně vyskytovat přibližně od roku 2010. Jejich konstrukce se odlišuje s ohledem na:

- typ polymeru – polyetylen, polypropylen, polyuretan aj.,
- původ polymeru – primární či recyklovaný,
- materiál výztuže – skelná vlákna nebo tyče, ocelové tyče (pruty),
- orientace výztuže – všesměrně rozptýlená, podélná, příhradová,
- obsah plniva – křemenný písek,
- tvar příčného průřezu – hranol, proměnný po délce, komorový.

Vyztužováním polymerů se kompenzuje jejich nízká ohybová tuhost oproti betonu, dřevu a oceli a až o řád vyšší délková teplotní roztažnost [33, 34]. Následkem různého přístupu ve vyztužení pražců z polymerů bylo vyvinuto několik rozdílných typů, které byly v roce 2015 rozděleny podle Ferdous a kol. [10] do tří skupin. V důsledku vývoje pražců z polymerů s podélnou tyčovou výztuží je však k roku 2020 vhodné rozeznávat čtyři skupiny, jak je uvedeno v tab. 3.

Tab. 3: Přehled pražců z polymerů užívaných ve světě k roku 2020

Typ pražce	Materiál matrice	Způsob vyztužení	Označení výrobce	Země původu	Zdroj
1	Recyklované polymery	Recyklovaná skelná vlákna	TieTek	USA	[35]
		Krátká skelná vlákna	Axion	USA	[36]
		Bez výztuže	I-Plas	Velká Británie	[37]
		Bez výztuže	Tufflex	JAR	[38]
		Recyklovaná skelná vlákna	Strail	Německo	[39]
2	Recyklované polymery	Podélné tyče z oceli	KLP	Nizozemí	[40]
		Podélné tyče z oceli	Vossloh	Německo	[41]
		Podélné tyče ze skla	IntegriCo	USA	[42]
3	Polyuretanová pěna	Podélná skelná vlákna	FFU (Sekisui)	Japonsko	[31]
4	Fenolová pryskyřice, geopolymerní beton	Podélná, příčná skelná vlákna	Sandwich	Austrálie	[43]
			Hybrid	Austrálie	[44]

Typ č. 1 zahrnuje pražce z recyklovaných polymerů bez výztuže a s výztuží z krátkých všesměrně orientovaných vláken. Typ č. 2 je reprezentován pražci z recyklovaných polymerů vyztužených tyčemi v podélném směru pražce. Typ č. 3 je zastoupen typem pražce na bázi polyuretanové pěny, která je vyztužena dlouhými skelnými vlákny v podélném směru. Pražce typu č. 4 na bázi primárních polymerů jsou charakterizovány orientací dlouhých skelných vláken v podélném i příčném směru.

Kolejnicové pásy se na polymerní pražce nejčastěji upevňují pomocí podkladnicového upevnění K s pružnou svěrkou. Kotvení vrtulí v polymerních pražcích se provádí přímým zatáčením do pražce bez použití vložek tedy způsobem shodným s dřevěnými pražci, avšak s odlišným průměrem otvoru [33, 45, 46].

Příčné pražce na bázi polymerů lze předpokládat jako vhodnou alternativu k dřevěným pražcům z pohledu nulové biodegradability, protože pražce z polymerů není potřebné chránit impregnační látkou proti dřevokaznému hmyzu a houbám. Životnost navíc není snížena ani korozí materiálu jako u pražců z oceli. Pražce z polymerů mají srovnatelnou ohybovou tuhost s dřevěnými pražci [47] a pod zatížením nejsou náchylné k trhlinám například kvůli špatnému podepření vlivem špatného podbití nebo poddolování tak, jako betonové pražce [19]. Dalším rysem pražců z polymerů je jejich viskoelastická deformace pod zatížením, která se vlivem disipace energie pozitivně projevuje vyšším koeficientem útlumu vibrací [48].

Mezi nevýhody pražců z polymerů patří jejich nízká hmotnost, kvůli které pražec spolu s nízkou drsností povrchu nedosahuje takového příčného odporu jako pražec z předpjatého betonu. Dalším omezením pražců z polymerů je nižší tvrdost úložné plochy, kvůli které může při cyklickém zatěžování provozem dojít k zatlačování paty kolejnice, a proto je v současnosti používáno jen podkladnicové upevnění. Tomu se stejně jako u pražců ze dřeva předchází používáním podkladnic (nejčastěji s typem upevnění K nebo Ke), které jsou však technicky překonané a nevhodné. Nalezení řešení, které by znamenalo jejich postradatelnost, může být cílem budoucího výzkumu.

1.5 Zkušební úseky tratě s aplikací pražců z polymerů v zahraničí

Aplikace pražců z polymerů a kompozitů s polymerní matricí je u zahraničních správců a provozovatelů tratí ve fázi provozního ověřování. Jako předstupeň úplné integrace do železniční infrastruktury států EU jsou pražce uloženy ve zkušebních úsecích tratí. Na základě literární rešerše byly dohledány zkušební úseky u nejvýznamnějších správců infrastruktury v Evropě, za které lze považovat Deutsche Bundesbahn AG (DB), Österreichische Bundesbahnen (ÖBB), Société nationale des chemins de fer français (SNCF), NetworkRail nebo ProRail. V městské kolejové dopravě byly nalezeny například u Wiener Linien nebo ProRail v Amsterdamu. Zkušebních úseků s pražci z polymerů jsou v Evropě desítky. Vybrané evropské zkušební úseky s pražci z polymerů, ke kterým byla v literatuře nalezena citace, jsou uvedené v tab. 4.

Tab. 4: Vybrané aplikace pražců z polymerů u zahraničních železničních správců [13, 31, 49–51]

Místo	Výrobce	Správce železniční infrastruktury	Rok aplikace
Most Hackingerstrasse, Vídeň, Rakousko	Sekisui	ÖBB	2005
Leverkusen, Německo	Sekisui	Vlečka Bayer AG	2008
Arnhem, Nizozemí	Sekisui	ProRail	2012
Würzburg, Německo	Sekisui	DB AG	2012
Gävle, Švédsko	KLP	Jernhusen	2015
Kalmar, Švédsko	KLP	Trafikverket	2016
Zwolle, Nizozemí	KLP	ProRail	2019

V síti tratí Správy železnic nebyly pražce z polymerů doposud ověřovány a výzkum zaměřený na definování požadovaných parametrů, při kterých mohou být využity, nebyl na území ČR k počátku roku 2020 nalezen. Aplikace pražců z polymerů v ČR byla dohledána pouze na železničním přejezdu úzkorozchodné vlečky vlastněné Mladějovickými průmyslovými drahami v počtu 24 kusů [52]. Dále byly pražce z polymerů v koleji aplikovány pro potřeby experimentální činnosti disertační práce.

1.6 Shrnutí literární rešerše

Na základě poznatků z literární rešerše lze shrnout silné a slabé stránky pražců z polymerů a jejich pozitivní a negativní vlastnosti při jejich použití v železniční trati. Poznátky jsou zpracované v tab. 5.

Tab. 5: Silné a slabé stránky použití pražců z polymerů [11, 33, 34, 53–56]

Silné a slabé stránky pražců z polymerů		Pozitivní a negativní důsledky aplikace pražců z polymerů	
Silné	Žádná biodegradabilita (dřevokazý hmyz a houby neškodí) ^D ⇒	Pozitivní	Pražce není třeba impregnovat kreosotovým olejem
	Odolnost vůči povětrnostním vlivům ^D ⇒		Odhadovaná životnost pražce 50 let
	Nízká elektrická vodivost ^O ⇒		Neovlivňuje funkci zabezpečovacího zařízení, kolejových obvodů
	Variabilita tvaru příčného průřezu dle tvaru výrobní formy ^B ⇒		Zvýšení příčného odporu pražce
	Výroba odléváním do dlouhých forem nebo vytlačováním ^{B, D} ⇒		Výroba výhybkového pražce o délce až 5 m
	Vyšší koeficient útlumu ^B ⇒		Nižší emise hluku a vibrací tratě od provozu drážních vozidel
	Adekvátní ohybová tuhost pražce vzhledem k tuhosti trati ^B ⇒		Snížení namáhání zrn kameniva kolejového lože
	Flexibilita ^{B, O} ⇒		Možnost vrtání, kompatibilita s podkladnicovým typem upevnění
	Nízká hmotnost ^{B, O} ⇒		Snazší přeprava a manipulace
Možnost recyklace vyřazených pražců ^B ⇒	Redukce množství plastového odpadu		
Slabé	Nízká hmotnost a drsnost povrchu pražce ^B ⇒	Negativní	Nízký příčný odpor pražce
	Vysoký koeficient teplotní roztažnosti polymerů ^{B, D, O} ⇒		Nutnost vyztužovat (vliv dilatace pražce na rozchod koleje)
	Hořlavost některých typů polymeru ^{B, O} ⇒		Částečné riziko v oblasti požární bezpečnosti
	Degradace polymerů vlivem UV záření (sluneční záření) ^{B, D, O} ⇒		Částečné poškození povrchu - úbytek materiálu, ztráta integrity

^BVzhledem k pražcům z předpjatého betonu

^DVzhledem k pražcům z impregnovaného tvrdého dřeva

^OVzhledem k pražcům z oceli

Na základě shrnutí silných a slabých stránek pražců z polymerů byly vytvořeny výzkumné otázky, podle kterých byly formulovány cíle disertační práce na téma definování rozsahu aplikace pražců z polymerů v tratích Správy železnic společně s doporučením základních parametrů pro zřízení zkušebního úseku.

Cíle disertační práce

Disertační práce se zabývá aplikovaným výzkumem v oblasti železničního svršku se zaměřením na příčné pražce na bázi polymerů. Cílem bylo ověřit zvolené vlastnosti polymerních pražců a posoudit jejich použitelnost v železniční trati. Posouzení bylo provedeno aplikací numerických metod a experimentálních měření uskutečněných in situ a v laboratoři. Zvolená problematika byla rozdělena na následující dílčí cíle:

- numerický model pražce v konstrukci železniční tratě vypočtený jako nosník na pružném podkladu a jeho posouzení při namáhání zatížením,
- rozbor stability bezстыkové koleje ve vodorovné rovině,
- výpočet délkové teplotní roztažnosti pražce a její vliv na rozchod koleje,
- experimentální stanovení charakteristik pražce namáhaného ohybem,
- experimentální stanovení příčného odporu pražce,
- experimentální stanovení doporučeného koeficientu teplotní délkové roztažnosti pražce,
- experimentální posouzení bezpečnosti pražce z hlediska rozvoje požáru.

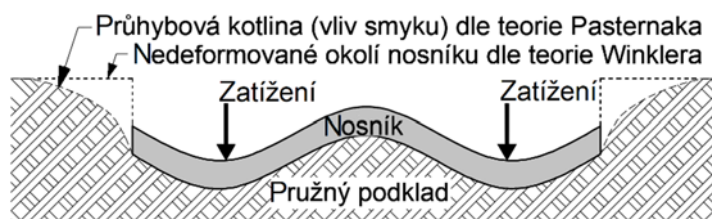
TEORETICKÁ ČÁST

2 Výpočet namáhání pražce jako nosníku na pružném podkladu

Jednou z podmínek dlouhodobého zajištění stálosti geometrických parametrů koleje (GPK) je zamezení trvalým deformacím částí železničního svršku nebo spodku. Z toho důvodu se konstrukce železničního svršku a spodku navrhuje dostatečně únosná s deformacemi v pružné oblasti. Splnění zmíněných podmínek patří k spolehlivému a dlouhodobému zajištění funkce koleje [2]. Trvalé deformace jsou v koleji sledované jako trvalé odchylky GPK od projektovaného stavu. Odchytky jsou definovány s přesností na milimetry a jejich rozsah upravuje norma ČSN 736360-2 [57].

Pro modelování konstrukcí v oblasti jejich pružné deformace, se ve stavební mechanice používá lineární model tělesa označovaný jako Hookův zákon [58]. Zmíněný lineární model vyjadřuje vztah mezi mechanickým napětím a deformací jako přímou úměru. Poměr mezi nimi se definuje jako modul pružnosti E . Ocel se až do dosažení svojí meze kluzu deformuje lineárně. V případě modelování deformace zemin a polymerů pomocí lineárního modelu se jedná o určitou idealizaci jejich pracovního diagramu, kterou se ve výpočtu zavádí nepřesnost, avšak v oblasti malých deformací lze nesoulad materiálu a lineárního modelu zanedbat [59].

Jednotlivé prvky konstrukce železniční tratě mají svou tuhost. Celková svislá tuhost zahrnující všechny prvky železničního spodku a železničního svršku se získá pomocí superpozice svislých tuhostí jednotlivých prvků a označuje se obecně jako tuhost železniční tratě [2]. Tuhost železniční tratě by se měla pohybovat v takové míře, aby nebyly vyvolány nadměrné pružné deformace, které se projevují jako nadměrný pokles konstrukce koleje pod zatížením. Na druhou stranu, tuhost tratě nemá být příliš vysoká, aby nedocházelo ke zhoršování komfortu jízdy a poškozování prvků železničního svršku, železničního spodku a vozidla. Vhodná tuhost konstrukce koleje má přibližně takovou hodnotu, která pod zatížením od nápravy vyvolá pokles o doporučené hodnotě přibližně 1,5 mm až 2,0 mm [60]. Další idealizace pro výpočet deformace zeminy jako pružného podkladu se týká vlivu smykových sil. Pro výpočet lze uvažovat dva různé modely podkladu, Winklerův nebo Pasternakův (obr. 9).



Obr. 9: Porovnání Winklerovy a Pasternakovy teorie pro výpočet pružného podloží [61-upraveno]

Nosník uložený na pružném podkladu podle teorie E. Winklera publikované roku 1867 je zjednodušený model podloží, který uvažuje pouze normálová napětí a zanedbává smyková napětí. V případě železničního pražce se vazba mezi ložnou plochou a podložím uvažuje pouze jednostranně a to jako tlakové napětí. Tahové napětí, resp. ztráta kontaktu mezi pražcem a podložím (zvedání pražce), se neuvažuje. Při výpočtu se v oblasti kontaktu ložné plochy pražce s podkladem uvažují nezávislé pružiny. Stlačení zeminy v okolí ložné plochy pražce se v rámci Winklerova podloží neuvažuje a smykové působení zeminy se tak zanedbává, a tím výpočtový model zcela neodpovídá skutečnému chování zeminy [61].

Další metoda užívaná pro výpočet nosníku na pružném podkladu je teorie podle Pasternaka, ve které je oproti teorii podle Winklera navíc zaveden druhý parametr, a to přenos smykových sil. Výsledky výpočtu tak lépe vystihují reálné chování zeminy [61].

Použití Winklerova modelu podloží se i přes své zjevné nepřesnosti zavedlo a dlouhodobě se využívá ve výpočtech konstrukce železniční tratě v ČR i v zahraničí. O problematice tuhosti železniční tratě pojednává např. Belkom, Giannakos nebo Permanent Way Institution (PWI) v literatuře [48, 62, 63].

2.1 Namáhání konstrukce železničního svršku statickým zatížením

Základním prvkem konstrukce železničního svršku je kolejnice, která je zatěžována dvojkolím. Z nosné a vodící funkce kolejnice vyplývá svislá složka zatížení a vodorovná složka rozdělená na příčné a podélné zatížení. Mezi další typy zatížení namáhající kolejnici, které však nejsou dále rozebírány, patří teplota a zbytkové napětí z výroby [1].

Výpočtový model a posouzení únosnosti kolejnice se historicky vyvíjely. Dlouhodobě nejrozšířenější je model souvislého pružného podkladu podle teorie Timoshenka [64]. Idealizovaný model kolejnice je zaveden s následujícími předpoklady:

- kolejnice je zatěžována kolem jako osamělým břemenem, které působí pouze ve svislém směru,
- zatížení ohybovým momentem od výstředného uložení kola na hlavě kolejnice se neuvažuje,
- kolejnice má po délce neměnný příčný průřez a je spojitě podepřena pružným podkladem o konstantní tuhosti.

Výpočet pružného podkladu byl proveden podle teorie Winklera. Winklerovo pružné podloží idealizuje zemní těleso, konstrukční vrstvu (pokud je aplikována) a kolejové lože jako jedno homogenní těleso, které se deformuje lineárně pružně a je charakterizované tuhostí. Tuhost podkladu lze vyjádřit dvěma způsoby. Spojitou svislou tuhostí kolejové jízdní dráhy k_z [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$], kterou uvádí předpis SŽDC S3 [3]. Ve Spojeném království, Německu, Holandsku atp. se podle Esvelda [65] k vyjádření tuhosti podkladu používá součinitel ložnosti C [$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$].

Spojitá tuhost k_z vyjadřuje souvislé pružné podepření kolejnice v šířce b_L . Součinitel C vyjadřuje svislou tuhost pružiny na ploše o velikosti 1 m^2 . Pro převod spojitě tuhosti k_z na součinitel ložnosti C platí vztah (1),

$$C = \frac{k_z}{b_L} \quad (1)$$

kde b_L [m] je šířka souvislého podepření kolejnice. Vyjádření šířky souvislého podepření kolejnice b_L vyplývá ze vztahu (2),

$$b_L = \frac{A}{2B} \quad (2)$$

kde A je účinná plocha pražce [mm^2] a B je osová vzdálenost pražců [m]. Podle literatury [1] se účinná plocha pražce z předpjatého betonu uvažuje $0,42 \text{ m}^2$ a ze dřeva $0,36 \text{ m}^2$. Informativní hodnoty spojitě svislé tuhosti kolejové jízdní dráhy k_z jsou v tab. 6 a hodnoty součinitele ložnosti C v tab. 7. Ve výpočtech nosníku na pružném podkladu byl použit součinitel ložnosti C .

Tab. 6: Informativní hodnoty spojitě svislé tuhosti kolejové jízdní dráhy k_z dle podloží [3]

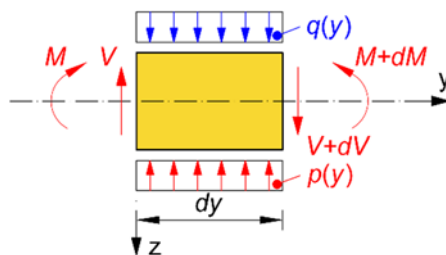
Kvalita podloží	Spojitá svislá tuhost kolejové jízdní dráhy k_z	
	[$10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$]	
Tuhé podloží	40	
Standardní	20	
Špatná	10	
Velmi špatná	5	

Tab. 7: Informativní hodnoty součinitele ložnosti C dle kvality podloží [65]

Kvalita podloží	Slovní hodnocení kvality podloží	Součinitel ložnosti C
		[$\text{N}\cdot\text{mm}^{-3}$]
Tuhé podloží	Skalní podloží, pevná jízdní dráha	> 0,15
Dobrá	Nové kolejové lože po podbití	0,10
Špatná	Znečištěné kolejové lože	0,05
Velmi špatná	Silně znečištěné kolejové lože	0,02

Výpočet deformace kolejnicového pásu se provádí pomocí vyjádření rovnováhy sil na elementu nosníku, ze kterého vyplývá diferenciální rovnice ohybové čáry [1]. Kolejnice byla modelována jako prut definovaný svou střednicí (spojnicí všech těžišť po délce nosníku), který je podepřen souvislým pružným podkladem. Při výpočtu ohybu prutu platí Schwedlerovy věty, které vyjadřují diferenciální vztahy mezi

zatížením q , posouvající silou V , ohybovým momentem M . Věty vyplývají z rovnováhy sil na elementu pražce na obr. 10. Pro rovnováhu mezi zatížením a vnitřními silami na nosníku při aplikaci Schwedlerových vět platí vztah (3).



Obr. 10: Rovnováha sil na elementu nosníku [1-upraveno]

$$q(y) = \frac{d^2}{dy^2}(EI_x \frac{d^2 w(y)}{dy^2}) + k_z(y) \quad (3)$$

Kde EI_x je ohybová tuhost kolejnice [$N \cdot m^2$], k_z je modul pružnosti uložení kolejnice [$N \cdot m^{-2}$], $q(y)$ je zatížení kolejnice na jednotku délky [$N \cdot m^{-1}$]. Partikulární řešení rovnice (3) se dle [1] uvažuje podle vztahu (4):

$$w(y) = w_0(y) \quad w_0(y) = \frac{1}{k_z} q(y) \quad (4)$$

Ve výpočtu se pro lepší názornost zavádí relativní souřadnice ξ podle vztahu (5):

$$\xi = \frac{y}{L} \quad (5)$$

kde L podle vztahu (6) vyjadřuje charakteristickou délku kolejového roštu, odpovídající délce nosníku, který je namáhán ohybovým momentem.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI_x}{k_z}} \quad (6)$$

Řešení homogenní části diferenciální rovnice pro prizmatický prut je dáno vztahem (7):

$$w(y) = c_1 \cdot e^{\xi} \cdot \cos(\xi) + c_2 \cdot e^{\xi} \cdot \sin(\xi) + c_3 \cdot e^{-\xi} \cdot \cos(\xi) + c_4 \cdot e^{-\xi} \cdot \sin(\xi) \quad (7)$$

kde c jsou konstanty, které lze určit podle okrajových podmínek vztahem (8):

$$w(\infty) = 0 \quad \frac{dw}{dy}(\infty) = 0 \quad w(0) = 0 \quad \frac{dw}{dy}(0) = 0 \quad (8)$$

Výsledné řešení průhybu resp. svislého posunu $w(\xi)$ je dáno vztahem (9) a řešení ohybového momentu $M(\xi)$ je dáno vztahem (10):

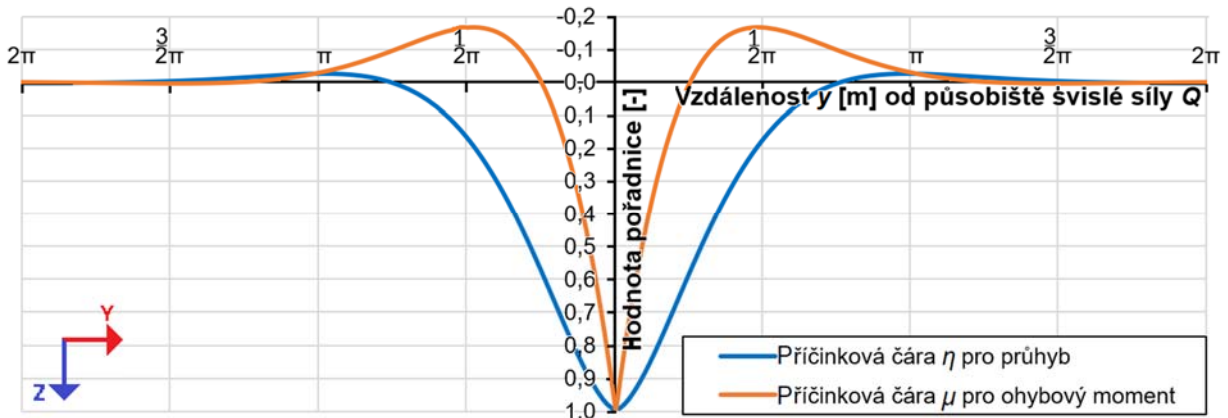
$$w(\xi) = \eta \frac{Q}{2 \cdot k_z \cdot L} \quad (9)$$

$$M = 0,25 \cdot \mu \cdot Q \cdot L \quad (10)$$

kde η je pořadnice příčinkové čáry pro průhyb daná vztahem (11) a μ je pořadnice příčinkové čáry pro ohybový moment určená vztahem (12). Pořadnice příčinkových čar pro průhyb a ohybový moment jsou vyneseny na obr. 11.

$$\eta = e^{-\xi}(\cos \xi + \sin \xi) \quad (11)$$

$$\mu = e^{-\xi}(\cos \xi - \sin \xi) \quad (12)$$



Obr. 11: Příčinkové čáry ohybového momentu a průhybu kolejnice dle Zimmermanna [66-upraveno]

2.2 Roznášení kolové síly a vyjádření zatížení na pražce

Roznášení účinku kolové síly Q přes kolejnici na okolní pražce, které vyplývá z příčinkové čáry pro průhyb dle teorie Zimmermanna, je uvedeno na obr. 12.

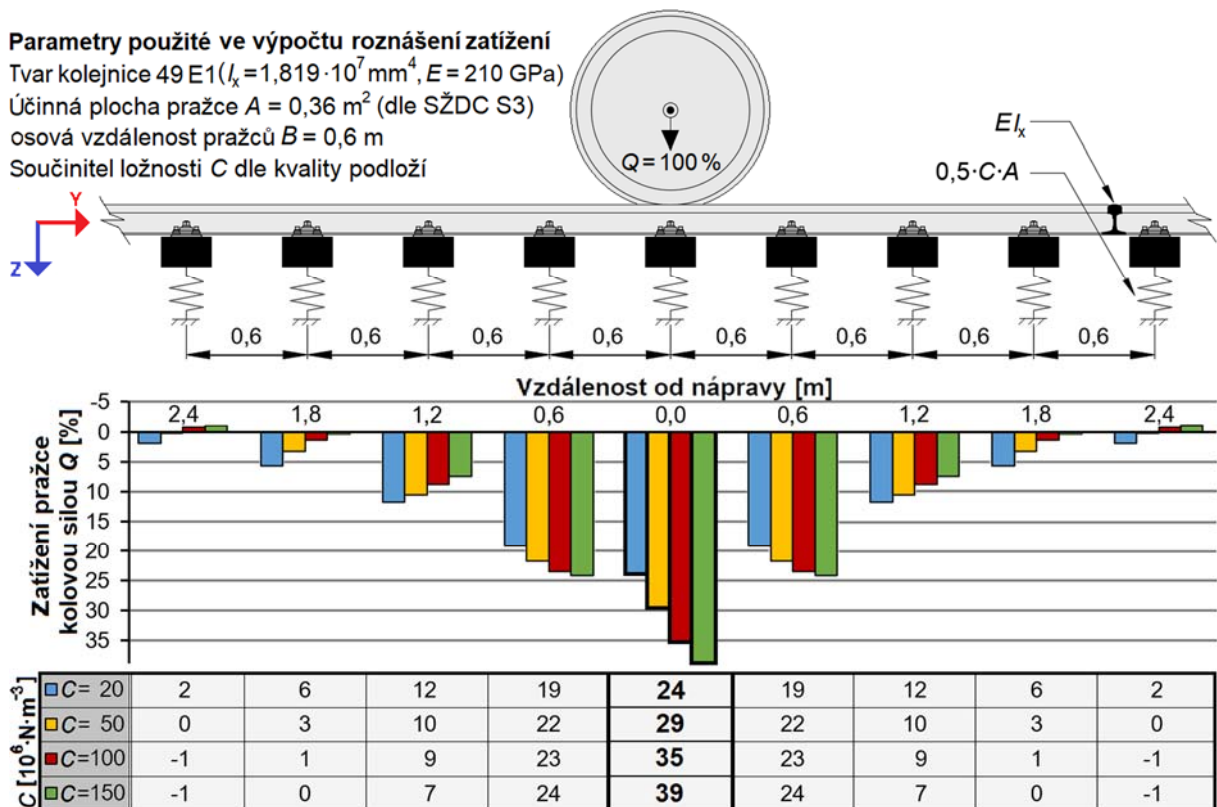
Parametry použité ve výpočtu roznášení zatížení

Tvar kolejnice 49 E1 ($I_x = 1,819 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$, $E = 210 \text{ GPa}$)

Účinná plocha pražce $A = 0,36 \text{ m}^2$ (dle SŽDC S3)

osová vzdálenost pražců $B = 0,6 \text{ m}$

Součinitel ložnosti C dle kvality podloží



Obr. 12: Rozdělení svislé kolové síly Q na pražce přes kolejnici při různém součiniteli ložnosti C

Rozdělení bylo určeno použitím příčinkové čáry pro průhyb a parametrů zvoleného tvaru kolejnice, typu a rozdělení pražců a tuhosti podloží uvažované jako součinitel ložnosti C . Roznášení je vypočteno pro neojetou hlavu kolejnice. Obr. 12 ukazuje, že velikost zatížení pražce umístěného pod nápravou souvisí s tuhostí podloží. V případě tuhého podloží je zatížení pražce pod nápravou největší. Čím je součinitel ložnosti C podkladu nižší, tím je zatížení pražce pod nápravou nižší. K roznášení zatížení na okolní pražce dochází vlivem ohybové tuhosti kolejnice. Čím je kolejnice ohybově tužší, tím dochází k roznášení zatížení do větší vzdálenosti od nápravy. Pro výpočet síly F_{pz} , která zatěžuje pražec (použito v laboratorní zkoušce v experimentální části), která se nachází přímo pod nápravou, platí vztah (13):

$$F_{pz} = \eta \frac{Q \cdot B}{2 \cdot L} \quad (13)$$

Velikost kolové síly Q vyplývá z hmotnosti m od nápravy vozidla. Hmotnost na nápravu m je určena předpisem SŽDC S3 [3], který ji rozděluje do traťových tříd uvedených v tab. 8.

Tab. 8: Meze hmotnosti na nápravu m dle traťových tříd [3]

Traťová třída	Meze třídy hmotnosti na nápravu m	
	[t]	
A	16,0	
B	18,0	
C	20,0	
D	22,5	
E	25,0	

Hmotnost vozidla, která se pohybuje po koleji, koná při poklesu koleje svislý pohyb, při kterém vzniká setrvačná síla. Z toho důvodu se bere v úvahu dynamická složka zatížení, která se ve výpočtu zohledňuje pomocí dynamického součinitele δ . Hodnoty dynamického součinitele vycházejí z traťové rychlosti v_t rozdělené do rychlostních pásem (RP) a z kvality trati rozdělené do tří úrovní. Součinitel δ je podle předpisu SŽDC S3 přepočítán v tab. 9.

Tab. 9: Dynamický součinitel δ podle traťové rychlosti a kvality trati [3-upraveno]

Rychlostní pásmo [-]	Traťová rychlost v_t [km·h ⁻¹]	Dynamický součinitel δ [-] dle kvality trati		
		Dobrá	Špatná	Velmi špatná
RP0	< 60	1,10	1,40	1,90
RP1	60 – 80	1,11	1,44	1,99
RP2	80 – 120	1,12	1,48	2,08
RP3	120 – 160	1,25	1,50	2,13
RP4	> 160	1,26	1,52	2,17

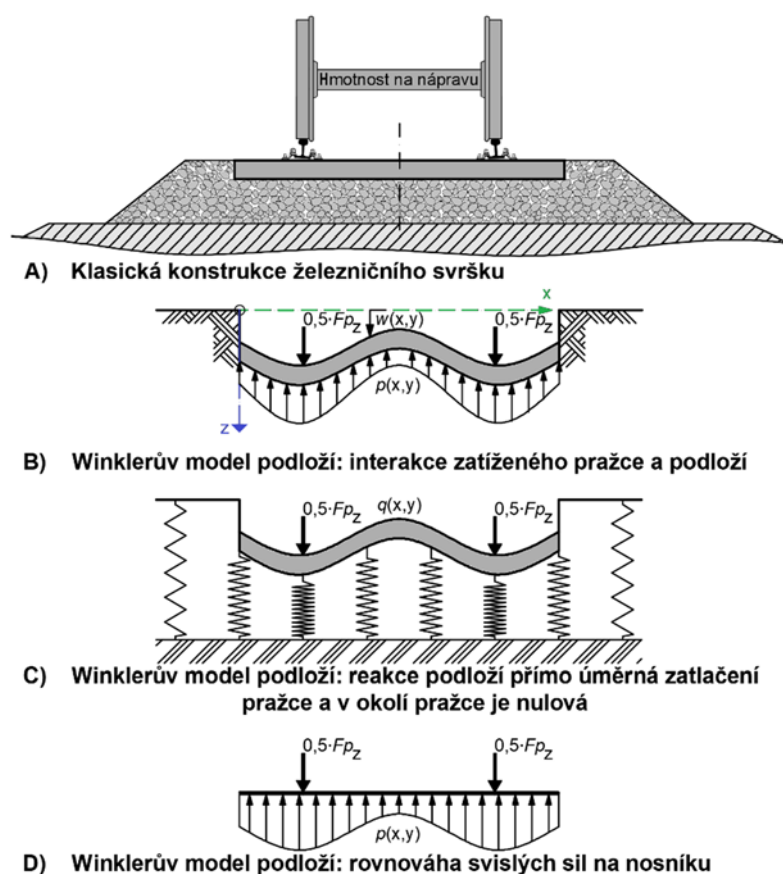
2.3 Pražec na pružném podkladu

Zatížení železničního pražce (obr. 13A) se modeluje jako nosník zatížený osamělými břemeny, která působí v místě uložení kolejnic. Uložení nosníku je uvažováno na pružném Winklerově podkladu (obr. 13B). Jak popisuje např. Krejsa [67], nosník se pod zatížením po své délce pružně deformuje a zatlačuje se do podloží. Jako odpověď vzniká reakce podloží $p(x,y)$, která je přímo úměrná zatlačení nosníku do podloží $w(x,y)$, viz obr. 13C a obr. 13D). Pro výpočet reakce podloží pak platí vztah (14).

$$p(x,y) = C \cdot w(x,y) \quad (14)$$

kde $p(x,y)$ je modul reakce podloží [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$], C je součinitel ložnosti [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$] a $w(x,y)$ je průhyb nosníku, resp. zatlačení do podloží [m].

Předpokladem pro výpočet podle vztahu (14) je homogenní podloží, kterému nejbližší odpovídá nové, neznečištěné kamenivo kolejového lože po podbití [65].



Obr. 13: Model nosníku zatížený dvěma osamělými břemeny uložený na podkladu idealizovaném podle Winklera [61-upraveno]

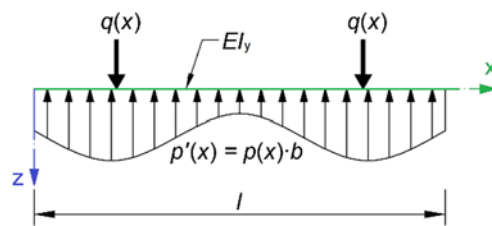
Analýza pražce pomocí diferenciální rovnice ohybové čáry byla provedena obdobně jako pro výpočet kolejnice. Pražec byl modelován jako prut definovaný svou střednicí; spojnicí všech těžišť po délce nosníku. Při výpočtu ohybu prutu byly použity

Schwedlerovy věty, které vyjadřují diferenciální vztahy mezi zatížením q , posouvající silou V , ohybovým momentem M . Věty vyplývají z rovnováhy sil na elementu praxe na obr. 10. Vztah (15) vyjadřuje závislost mezi zatížením a průhybem nosníku při aplikaci Schwedlerových vět:

$$q_c = \frac{d^2}{dx^2} E I_y \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (15)$$

kde q_c je zatížení [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$], E je modul pružnosti [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$] a I_y je moment setrvačnosti [m^4].

Prut je shora zatížen osamělými břemeny $q(x)$, a protože je podloží pružné a umožňuje ohyb prutu, je zdola vyvolána reakce podloží $p'(x)$, jak je uvedeno na obr. 14. Účinek reakce podloží na šířku nosníku b je přepočítán na působení na prut. Pro výpočet zatížení prutu $q_c(x)$ platí vztah (16). Po dosazení $q_c(x)$ a úpravě rovnice (15) vznikne vztah (17) a finálně pak vztah (18) připravený pro výpočet průhybu nosníku pomocí následně popsané metody sítí [67].



Obr. 14: Svislé síly pro výpočet ohybu prutu [61]

$$q_c(x) = q(x) - p'(x) = q(x) - p(x) \cdot b = q(x) - C \cdot b \cdot w(x) \quad (16)$$

kde $q(x)$ je zatížení v libovolném bodě na ose x [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$], b je šířka nosníku [m] a $w(x)$ je průhyb nosníku na ose x [m].

$$\frac{d^2}{dx^2} \cdot E I_y \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + C \cdot b \cdot w(x) = q(x) \quad (17)$$

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} + \frac{C \cdot b \cdot w(x)}{E I_y} = \frac{q(x)}{E I_y} \quad (18)$$

2.4 Numerické řešení diferenciální rovnice ohybové čáry metodou konečných diferencí

Rovnice (18) je lineární nehomogenní diferenciální rovnice čtvrtého řádu. Rovnici lze řešit pomocí metody konečných diferencí (finite difference method, dále jen FDM), která se ve stavební mechanice nazývá metoda sítí. Jedná se o numerickou metodu pro řešení diferenciálních rovnic jejich aproximací s diferenčními vztahy. Výhodou je, že metoda sítí umožňuje převedení úlohy na řešení lineárních rovnic za pomoci vyjádření diferenčních vztahů (19) až (22).

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_i = \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2 \cdot \Delta x} \quad (19)$$

$$\left(\frac{d^2w}{dx^2}\right)_i = \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (20)$$

$$\left(\frac{d^3w}{dx^3}\right)_i = \frac{w_{i+2} - 2w_{i+1} + 2w_{i-1} - w_{i-2}}{2 \cdot \Delta x^3} \quad (21)$$

$$\left(\frac{d^4w}{dx^4}\right)_i = \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{\Delta x^4} \quad (22)$$

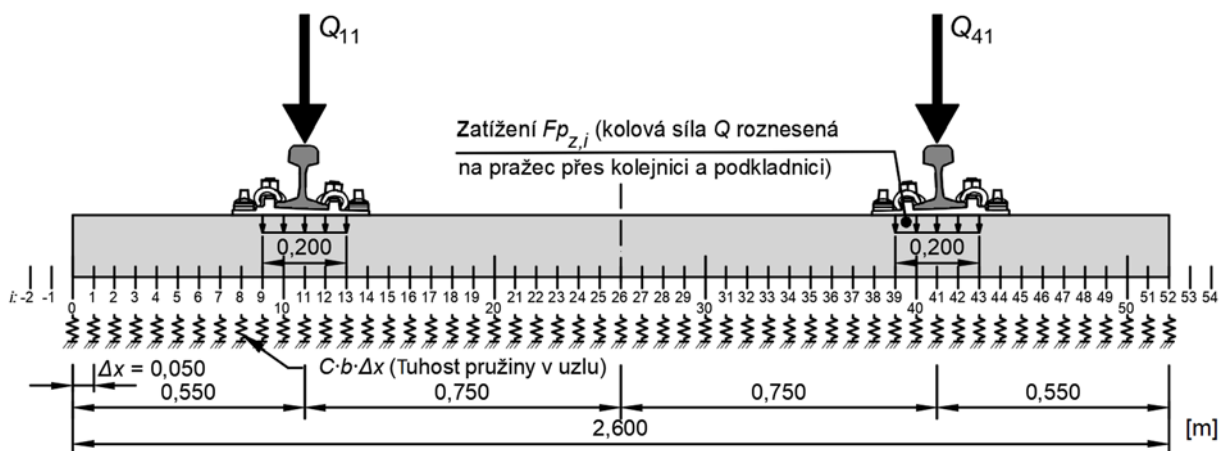
kde w_i je průhyb nosníku v i -tém uzlu a Δx je vzdálenost mezi uzly [m]. Rovnice (18) se upraví na tvar rovnice (23)

$$\frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{\Delta x^4} + \frac{C \cdot b \cdot w_i}{E I_y} = \frac{q_i}{E I_y} \quad (23)$$

Lineární rovnici (23), která vyplývá z diferenciální rovnice ohybové čáry, a která je upravena pro metodu FDM, lze aplikovat ve výpočtu nosníku na pružném podkladu. Kořeny rovnice lze hledat maticovým počtem.

Pražec uložený na pražcovém podloží byl vypočítán jako nosník na Winklerově podkladu řešený podle výše zmíněné metody FDM. Pro výpočet v této práci byl použit program Microsoft Office Excel verze 2013. Výpočet je proveden pro délku nosníku L rovnou 2,6 m, která je délkou odpovídající pražci v trati o normálním rozchodu koleje. Poloha zatížení F je 0,75 m od svislé osy pražce (viz obr. 15).

Nosník se při výpočtu metodou FDM rozděluje na počet uzlů n tak, aby numerické a grafické výstupy výpočtu byly v požadované přesnosti, a aby rozdělení nosníku na uzly reflektovalo důležité body nosníku, ve kterých působí zatížení pražce $F_{p_z,i}$. Byl zvolen počet uzlů n rovný 52 a jejich rozmístění je patrné z obr. 15. S ohledem na délku pražce L pak vyplývá délka Δx mezi uzly rovná 0,05 m.



Obr. 15: Rozložení uzlů i , zatížení a podpor po délce pražce pro výpočet metodou FDM

2.4.1 Matice tuhosti

Použitím metody FDM byla v každém z uzlů nosníku x_i , kde $i \in Z; < -2; 54 >$, vyjádřena tuhost. Před vyjádřením tuhosti však byly nejprve stanoveny statické okrajové podmínky. Podmínky (24) až (27) vyplývají z uložení nosníku (viz obr. 15) a pomocí vztahů (20) a (21) jsou upravené pro řešení metodou FDM.

$$M_0 = 0 \quad \rightarrow \quad -EI_y \cdot \frac{w_1 - 2w_0 + w_{-1}}{\Delta x^2} = 0 \quad \rightarrow \quad w_{-1} = 2w_0 - w_1 \quad (24)$$

$$V_0 = 0 \quad \rightarrow \quad -\frac{w_2 - 2w_1 + 2w_{-1} - w_{-2}}{2\Delta x^3} = 0 \quad \rightarrow \quad w_{-2} = w_2 - 4w_1 + 4w_0 \quad (25)$$

$$M_{52} = 0 \quad \rightarrow \quad -EI_y \cdot \frac{w_{53} - 2w_{52} + w_{51}}{\Delta x^2} = 0 \quad \rightarrow \quad w_{53} = 2w_{52} - w_{51} \quad (26)$$

$$V_{52} = 0 \quad \rightarrow \quad -\frac{w_{54} - 2w_{53} + 2w_{51} - w_{50}}{2\Delta x^3} = 0 \quad \rightarrow \quad w_{54} = w_{50} - 4w_{51} + 4w_{52} \quad (27)$$

kde M_0 je ohybový moment [N·m] a kde V_0 je posouvající síla [N].

Jak je ukázáno na obr. 15, ve schématu pro řešení metodou FDM jsou navíc uzly umístěné mimo nosník, tj. uzly x_{-1} a x_{-2} , resp. x_{53} a x_{54} . Tuhost je zde vyjádřena za pomoci statických okrajových podmínek (24) až (27) jako násobky tuhosti uzlů x_0 , x_1 a x_2 , resp. x_{50} , x_{51} a x_{52} . Tuhost v jednotlivých uzlech 1 až 52 byla vypočtena podle vztahů (28) až (32), které jsou

$$i = 0 \quad \left(2 + \frac{C \cdot b \cdot \Delta x^4}{EI_y} \right) w_i - 4w_{i+1} + 2w_{i+2} \quad (28)$$

$$i = 1 \quad -2w_{i-1} + \left(5 + \frac{C \cdot b \cdot \Delta x^4}{EI_y} \right) w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2} \quad (29)$$

$$i \in < 2; 50 > \quad w_{i-2} - 4w_{i-1} + \left(6 + \frac{C \cdot b \cdot \Delta x^4}{EI_y} \right) w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2} \quad (30)$$

$$i = 51 \quad w_{i-2} - 4w_{i-1} + \left(5 + \frac{C \cdot b \cdot \Delta x^4}{EI_y} \right) w_i - 2w_{i+1} \quad (31)$$

$$i = 52 \quad 2w_{i-2} - 4w_{i-1} + \left(2 + \frac{C \cdot b \cdot \Delta x^4}{EI_y} \right) w_i \quad (32)$$

2.4.2 Vektor silového zatížení

Ve výpočtu pražce na pružném podkladu jsou uvažována dvě osamělá břemena, která představují kolové síly Q v místě kolejnic (obr. 15) a jejich velikost vyplývá z tab. 8 dle předpisu SŽDC S3. Kolová síla je s použitím výsledků na obr. 12, resp. použitím vztahu (13), přerozdělena na pražce a vyjádřena jako svislé silové zatížení F_{pz} působící na pražec umístěný pod nápravou. Roznášení zatížení F_{pz} přes žebrové podkladnice je ve výpočtu zohledněno rovnoměrným přerozdělením do 5 uzlů (šířka 200 mm), které přibližně odpovídá roznášení od paty kolejnice po úhlem 45° [64]. Vektor silového zatížení v uzlu se v metodě FDM vyjadřuje podle vztahu (33), který je:

$$i \in \langle 9:13; 39:43 \rangle \quad \frac{Fp_{z,i} \cdot \Delta x^4}{\Delta x \cdot EI_y} \quad (33)$$

kde $Fp_{z,i}$ je zatížení v i -tém uzlu na ose x [N] vyjádřené ve vztahu (34) jako

$$Fp_{z,i} = 0,1 \cdot Fp_z \cdot \delta \quad (34)$$

kde konstanta 0,1 vyjadřuje rozdělení síly na 10 uzlů v místě podkladnic ($i \in \langle 9:13; 39:43 \rangle$) a δ je dynamický součinitel [-].

2.4.3 Výpočet svislého posunutí a vykreslení ohybové čáry pražce

Hodnoty vyjádřené v jednotlivých uzlech byly uspořádány do soustavy 52 lineárních rovnic, kde na levých stranách jsou vyjádřeny tuhosti uzlů nosníku a neznámé svislé posuny v uzlech w_0 až w_{52} . Na pravých stranách jsou nulové hodnoty s výjimkou uzlů x_9 až x_{13} a x_{39} až x_{43} , kde je vyjádřeno zatížení $Fp_{z,i}$. Soustava lineárních rovnic byla převedena na symetrickou čtvercovou matici 52×52 s nenulovou pravou stranou. Kořeny, které jsou řešením rovnic, jsou svislé posuny w_i v každém uzlu nosníku x_i . Vypočtené svislé posuny w_i dále umožňují v každém uzlu výpočet svislé síly p_i podle vztahu (35), výpočet svislé silové reakce P_i podle vztahu (36) a výpočet ohybového momentu M_i podle vztahu (37), které jsou

$$p_i = w_i \cdot C \cdot b \quad (35)$$

$$P_i = p_i \cdot \Delta x \quad (36)$$

$$M_i = -EI_y \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (37)$$

kde p_i je reakce rozložená mezi dvěma uzly [$N \cdot m^{-1}$] a kde P_i je reakce v i -tém uzlu [kN].

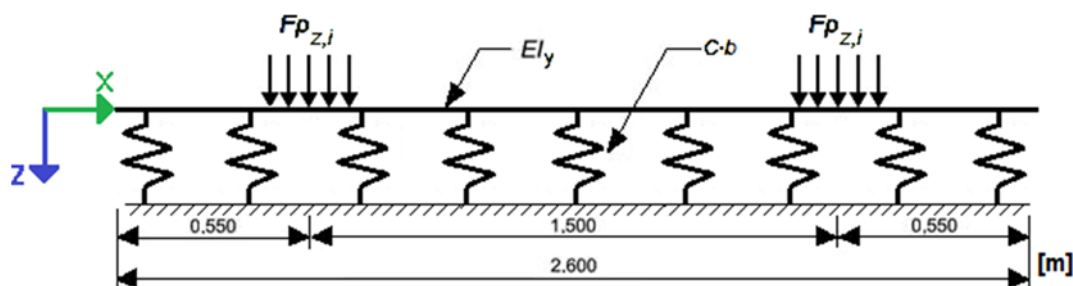
Kontrola správnosti výpočtu soustavy lineárních rovnic je provedena podle vztahu (38) jako rovnováha všech svislých sil působících na nosník, tj. zatížení a reakce. Kontrola je:

$$\sum_{i=0}^{53} F_{z,i} = 0 \quad (38)$$

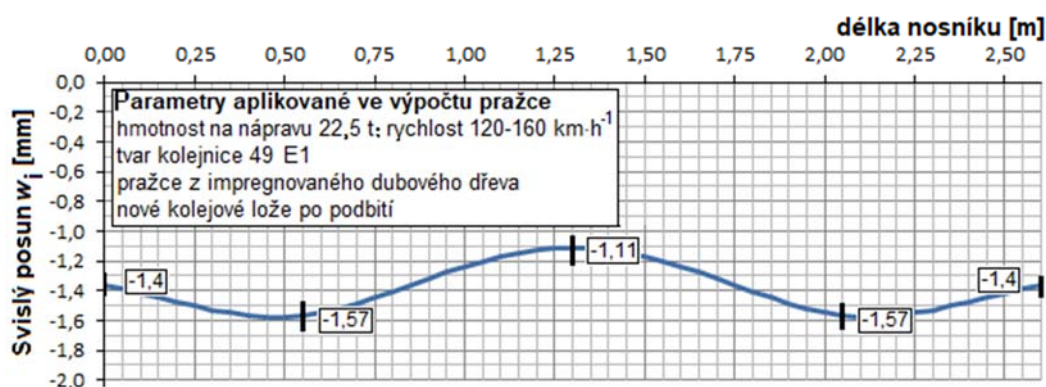
kde $F_{z,i}$ je libovolná svislá síla působící v i -tém uzlu po délce pražce.

K průhybu pražce vypočtenému v parametrické studii je třeba dodatečně připočítat vliv stlačení pružné podložky pod patou kolejnice [68]. Jak popisuje Šardická [69], tuhost podložky k_{rp} pod patu kolejnice 49 E1 o šířce 125 mm lze v případě podkladnicového upevnění uvažovat hodnotou $454 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$. Jedná se o nízkofrekvenční dynamickou tuhost stanovenou experimentálně podle normy ČSN EN 13146-9+A1.

Grafickým výstupem výpočtu pražce na pružném podkladu na obr. 16 A) je ohybová čára vykreslená jako svislý posunu w_i na obr. 16 B) a ohybový moment M_i vykreslený na obr. 16 C).



A) Statické schéma pražce na pružném podkladu s vyznačením vstupních parametrů



B) Ohybová čára pražce pod zatížením s vyznačením hodnot svislého posunu v důležitých bodech



C) Ohybový moment M_i pražce pod zatížením s vyznačením hodnot v důležitých bodech

Obr. 16: Výsledky výpočtu nosníku na pružném podkladu prezentované jako ohybová čára a ohybový moment pražce při zvolených vstupních parametrech výpočtu

2.5 Zhodnocení výpočtu pražce na pružném podkladu

Výpočet nosníku na pružném podkladu podle teorie Timoshenka umožnilo určit namáhání kolejnicového pásu a namáhání pražce při jeho zatížení kolovou silou. Výsledkem výpočtu byl pokles, resp. svislý posun kolejnicového pásu, který je podporován pružným podložím podle Winklera. Z výpočtu poklesu kolejnicového pásu bylo vypočteno přerozdělení zatížení na pražec, kde byl opět použit výpočet nosníku na pružném podkladu. Z výpočtu pražce vyplývá jeho deformační čára a ohybový moment.

Provedený výpočet pražce byl založen na metodě FDM a byl zpracován jako parametrická studie, ve které jsou zahrnuty následující proměnné:

- zatížení od hmotnosti na nápravu m , a dynamický součinitel δ ,
- tvar kolejnice,
- typ pražce (rozměry příčného průřezu $a \times b$, E -modul),
- pružný podklad (součinitel ložnosti C).

Výpočet nosníku na pružném podkladu zpracovaný jako parametrické studie je určen k posouzení použitelnosti pražců z pohledu ohybové tuhosti. Vstupní parametry pražců zahrnující geometrické a materiálové charakteristiky byly experimentálně stanoveny v kapitole 5 a 6. Testovány byly pražce z polymerů a referenční typy pražců, které se běžně používají v tratích Správy železnic. K posouzení aplikovatelnosti pražců byl použit pokles kolejnicového pásu pod zatížením, který byl vypočten pomocí parametrické studie. Prvním kritériem pro posouzení pražců z polymerů bylo porovnání jejich zmíněného poklesu vzhledem k poklesu referenčních pražců a druhým kritériem byl doporučený pokles kolejnicového pásu, který je v literatuře např. podle Rießbergera uváděn hodnotou 1,5 mm až 2,0 mm [60].

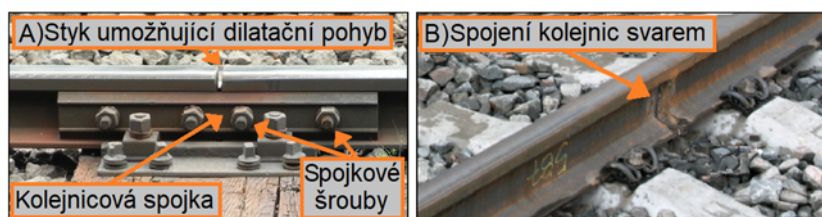
3 Stabilita bezстыkové koleje

3.1 Úvod do bezстыkové koleje

Bezстыková kolej (BK) se z technických a ekonomických důvodů stala preferovanou variantou řešení konstrukce železničního svršku oproti stykované koleji užívané v minulosti [70]. Vývoj BK byl ovlivněn podmínkou zajištění dlouhodobé stability koleje, která byla splněna s rozšířením teoretického poznání BK, s vývojem prvků železničního svršku zvyšující stabilitu BK a zkušenostmi se zřizováním a údržbou BK [71]. Pražce z polymerů jsou v železničním svršku novým prvkem, a jejich úspěšná aplikace a rozšíření v koleji jsou podmíněny splněním moderních požadavků na pražce, se kterými souvisí zajištění spolehlivé funkce BK. Styčný požadavek na pražce z polymerů ohledně stability BK je odpor pražce v kolejovém loži, který bylo třeba posoudit.

První zkušební úsek s BK byl zřízen v Německu ve 20. letech 20. století. Další úseky pak ve Spojených státech a v Sovětském svazu ve 30. letech. První zkušební trať u ČSD vznikla na základě vědecké práce profesora Vaverky v roce 1954 [72].

V případě stykované koleje zůstávají mezi konci kolejnic spáry pro jejich teplotní dilataci. Kolejnice se propojují kolejnicovými spojkami z ocelových profilů, které přiléhají ke stojině kolejnice a jsou s ní spojeny spojkovými šrouby (obr. 17). Styky se provádí přednostně převíslé (případně s podepřením můstkovou deskou a dvojčítými pražci). Ve druhém případě, ve kterém jsou mezi konci kolejnic svary a jsou splněny požadavky dle SŽDC S3/2, vzniká bezстыková kolej. Přínos BK spočívá v odstranění nehomogenních míst, ze kterého vyplývá plynulejší vedení dvojkolí, a snížení nákladů na údržbu. Shrnutí výhod BK a nevýhod BK (splnění technických nároků) je v tab. 10.



Obr. 17: Spojení kolejnic A) kolejnicovým stykem (můstková deska a dvojčíté pražce) a B) svarem

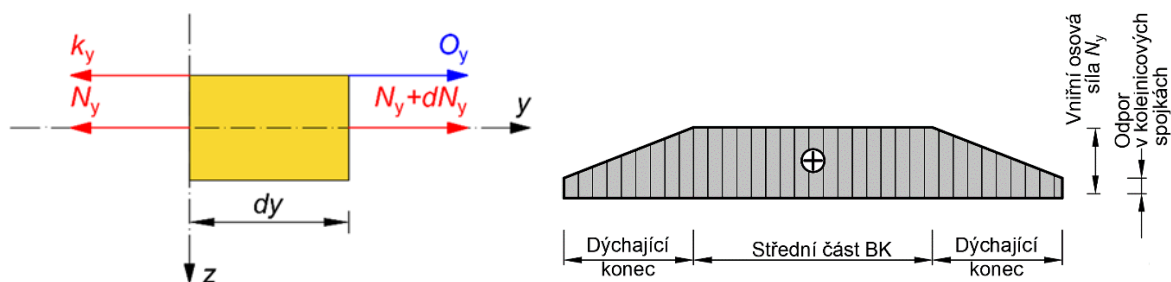
Tab. 10: Výhody a nevýhody zřizování bezстыkové koleje [68, 72]

Výhody BK – vyloučení nehomogenních míst	Nevýhody BK – potřeba splnit požadavky na:
1) Vyšší traťová rychlost	1) Zajištění stability BK (odpor pražce, pražcové kotvy, tvar a stabilizace kolejového lože aj.)
2) Nižší hlučnost jízdy	2) Zajištění dilatačního zařízení mostů, tunelů, aj. (dilatace soustředěna v dýchajících koncích)
3) Plynulejší vedení dvojkolí a vyšší komfort jízdy	3) Předcházení zvýšenému riziku lomu koleje v zimním období a vybočení v letním období
4) Snížení opotřebení vozidel a koleje	4) Kvalifikované provádění prací stavby a údržby
5) Nižší spotřeba energie jedoucího vozidla	
6) Spolehlivější vedení signálu traťového zab. zař.	
7) Úspora materiálu z kolejnicových spojek	

3.2 Napětí v bezstykové koleji vyvolané teplotními změnami

Teplotní roztažnost se ve stykované koleji projevuje změnou délky kolejnic, kterým je umožněno dilatovat v oblasti kolejnicových styků. V BK však vlivem teplotních změn v kolejnicových pásech a současně eliminací styků svařováním dochází v BK ke vzniku vnitřní osově síly N_y . Teplotní změny ΔT jsou uvažovány vzhledem k tzv. neutrální teplotě T_N , při které se provádí upnutí kolejnic k pražcům a závěrné svary BK. Osová síla v kolejnicovém pásu vyvolaná teplotními změnami je při neutrální teplotě nulová.

Dále v koleji působí vnější osově síly od brzdění a rozjezdu vozidel O_y . Proti jmenovaným osovým silám působí v koleji podélný odpor k_y , který je tvořen jako soustava podélného odporu v uzlu upevnění a podélného odporu pražce v kolejovém loži. Jak popisuje například Plášek [1], z rovnováhy zmíněných vnitřních a vnějších osových sil působících na elementu kolejnicového pásu (obr. 18) vyplývá vztah (39). Základní analytická rovnice prutu (40) dosazená do vztahu (39) vytvoří diferenciální rovnici prutu (41).



Obr. 18: Rovnováha osových sil na elementu prutu [1-upraveno], průběh osově síly N_y v délce BK [73].

$$\frac{dN_y}{dy} = k_y - O_y \quad (39)$$

$$\frac{dv}{dy} - \alpha(T - T_N) = \frac{N_y}{E \cdot A} \quad (40)$$

$$EA \frac{d^2v}{dy^2} = k_y - O_y \quad (41)$$

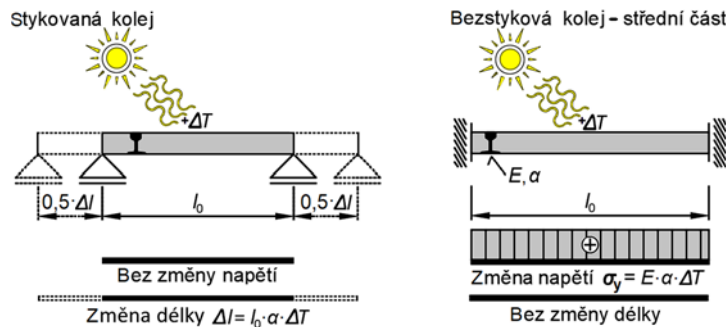
Změna délky kolejnicového pásu vlivem teplotních změn se v BK projevuje pouze v oblasti tzv. dýchajících konců. Mezi dýchajícími konci se nachází střední část BK, ve které nedochází k podélnému posunu, a která se nazývá jako tzv. kolej s plným napětím od teplotních změn [1]. Text je dále zaměřen na BK s plným napětím a se zavedením následujících předpokladů:

- ve střední části BK nedochází k překonání podélného odporu (tzn. podélný posun v se neuvažuje),
- kolej zatížena jen statickým teplotním účinkem (bez vnějších osových sil O_y),
- kolej je přímá (nezakřivená).

Za výše zavedených předpokladů lze úpravou vztahu (41) získat vztah (42) pro vyjádření vnitřní osově síly N_y a vztah (43) pro vnitřní osově napětí σ_y . Shrnutí vlivu kladné teplotní změny na stykovanou kolej a na BK v její střední části je v obr. 19.

$$O_y = 0; v = 0 \quad N_y = EA\alpha (T_N - T) \quad (42)$$

$$O_y = 0; v = 0 \quad \sigma_y = E\alpha (T_N - T) \quad (43)$$



Obr. 19: Vliv teplotní změny kolejnicového pásu na stykovanou a bezстыkovou kolej [70, 74]

Ze vztahu (43) vyplývá, že ve střední části BK s plným napětím platí přímá úměrnost mezi změnou napětí a teploty. Například změna teploty o 1°C vyvolá změnu napětí 2,5 MPa, která v případě kolejnice tvaru 49 E1 odpovídá změně osově síly o 15,8 kN.

Výše popsané teoretické chování střední části BK srovnávané s oboustranně vetknutým nosníkem, ve kterém dochází při účinku teploty ke změně tlakového nebo tahového napětí σ_y , je platné za teoretických předpokladů, které však mají v koleji proměnný charakter. Teplotní zatížení je po délce BK proměnné vlivem stínění. Navíc, jak popisuje Hřebíček [75], v konstrukci železniční trati, a tím i v její tuhosti a odporu k_y , se vyskytují nehomogenity. Proměnnost teplotního zatížení po délce trati a její nehomogenity mohou být spolu s účinky extrémní změny teploty, superponované se zbytkovým napětím z výroby kolejnic (až 100 MPa [1]), a s účinky od provozu příčinou poruch BK, které představují provozní riziko [71]. V případě působení extrémní tahové síly (v zimním období) dochází k lomu kolejnicového pásu. Naopak při extrémní tlakové síle v letním období hrozí překonání odporu BK a ztráta stability, která se projevuje vybočením koleje. Stabilita konstrukce BK vyplývá z prvků železničního svršku. V případě aplikace pražců z polymerů je žádoucí provést posouzení vlivu jejich odporu na stabilitu koleje, na které je zaměřena další část textu.

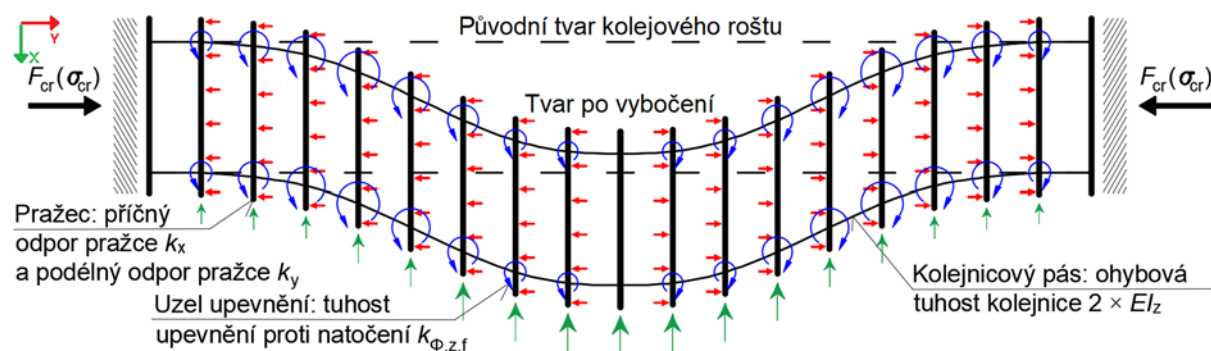
3.3 Stabilita bezстыkové koleje v přímé trati ve vodorovné rovině

Stabilita BK souvisí s Eulerovou teorií o namáhání prutu vzpěrným tlakem. Teorie předpokládá elastický přímý prut homogenního průřezu, který je oboustranně vetknutý.

Pokud je překročena osová síla F_{cr} , která prut namáhá, dojde ke ztrátě stability prutu doprovázené jeho vybočením. [71]. Jak uvádí Milták [73], podobným způsobem je vzpěrným tlakem namáhaný i kolejový rošt, který se však od namáhání prutu dle Eulera liší jednak svou konstrukcí a také prostředím, které předurčuje rovinu vybočení.

Vybočení kolejového roštu nastává v obecné rovině, kterou lze rozdělit na vybočení ve svislém a vodorovném směru. Proti vybočení ve svislé rovině působí především hmotnost kolejového roštu a ohybová tuhost kolejnicových pásů EI , která je ve svislém směru přibližně 6krát větší než ve vodorovném. Převažující část výsledné deformace se však neprojevuje ve svislé, ale ve vodorovné rovině [1].

Proti vybočení kolejového roštu ve vodorovné rovině, působí rámová tuhost koleje, která zahrnuje vliv tuhosti uzlu upevnění proti natočení $k_{\phi,z,f}$ a vliv vodorovné ohybové tuhosti kolejnicových pásů EI_z . Další odchylka kolejového roštu od Eulerovy teorie vyplývá z jeho uložení v kamenivu kolejového lože, které vytváří odporové prostředí. Interakcí pražce a kameniva vzniká podélný odpor pražce k_y a příčný odpor pražce k_x , který významně zvyšuje odolnost BK vůči vybočení. K namáhání BK tlakem dochází od oslunění, které vyvolává teplotní zatížení kolejnicových pásů nad jejich neutrální teplotu T_N a v BK dochází k tlaku. Za předpokladu zanedbání vybočení kolejového roštu ve svislém směru má pak kritická osová síla F_{cr} takovou velikost, při které jsou překonány zmiňované odpory, a následuje vybočení roštu ve vodorovné rovině (obr. 20). Tvar vybočení ve vodorovné rovině může mít více podob, které se od sebe liší počtem vln. Na obrázku níže je uveden symetrický tvar půlvlny, který je prvním deformačním tvarem. Další tvary s více vlnami lze nalézt např. v [1].



Obr. 20: Odpor působící proti vodorovnému vybočení kolejového roštu při ztrátě stability BK (symetrické vybočení tvaru půlvlny) [68-upraveno]

Teoretický rozbor stability bezstykové koleje při namáhání tlakem a odvození příslušných vztahů pro výpočet délky vlny vybočení, kritické ohřátí kolejnicového pásu ΔT_{cr} a kritické napětí σ_{cr} popisuje například Führer [71], Fendrich [68] nebo Lichtberger [76]. Jak uvádí literatura, významný negativní vliv na stabilitu BK mají imperfekce

koleje. Projevují se jako výchylka ve směru koleje Δf s tím, že čím je výchylka větší, tím je riziko ztráty stability BK vyšší, protože vyžaduje nižší kritické ohřátí kolejnicového pásu. Ze zmíněného vyplývá, že vybočení koleje lze předejít pravidelnou diagnostikou koleje a jejím udržováním.

Jak bylo uvedeno na obr. 20, stabilitu BK pozitivně ovlivňují odpory vyplývající z prvků konstrukce železničního svršku. Při aplikaci pražců z polymerů lze jejich použití předpokládat v kombinaci s kolejnicí tvaru 49 E1 a podkladnicovým upevněním s pružnou svěrkou Skl24. Tuhostí obou prvků, která se podílí na odporu kolejového roštu proti vodorovnému vybočení, se zabývá např. Führer [71] nebo Lichtberger [76]. Příčný a podélný odpor pražce v kamenivu kolejového lože je podle Zaremského [77] pozitivně ovlivněn vlivy, které jsou shrnuty v tab. 11.

Tab. 11: Informativní souhrn parametrů pražce ovlivňující stabilitu koleje ve vodorovné rovině [77]

Parametr pražce	Velmi pozitivní vliv	Pozitivní vliv
Hmotnost		•
Šířka		•
Výška	•	
Délka		•
Dvoublokový	•	
Tření na ložné ploše	•	
Instalace pražcových kotev	•	

Hmotnost pražců z polymerů je srovnatelná s pražci s impregnovaného tvrdého dřeva a oproti pražcům z předpjatého betonu je přibližně poloviční hmotnost (např. typ B03: 250 kg; polymerní pražec vystrojený podkladnicemi: 135 kg). Negativní vliv hmotnosti pražců z polymerů na stabilitu BK však může být částečně eliminován proměnnou šířkou a výškou příčného průřezu pražce po jeho délce. Při vhodném tvaru průřezu pražce ve tvaru obráceného písmene T může být jeho vlastní nízká hmotnost kompenzována přitížením kamenivem kolejového lože. Koeficient tření pražce z polymerů může být zvýšen výstupky, systémem žeber nebo rastrem drážek na ložné ploše pražce. Uvedené prostředky ke zvýšení tření jsou umožněny houževnatostí polymeru.

V kontrastu k parametrům pražce zmíněným v tab. 11, které zvyšují stabilitu BK, dochází v koleji ke stavebním a udržovacím pracím na železničním svršku, které negativně ovlivňují konsolidaci kameniva kolejového lože. Ke snížení stability BK dochází bez ohledu na použitý typ pražce. U nově zbudovaných tratí, nebo u tratí po provedení údržby podbíjením, nejsou zrna zkonsolidována a příčný odpor pražce je z toho důvodu nižší [78] (například pražec z předpjatého betonu typu B30 užívaný v tratích DB AG dosahuje podle Fendricha v nestabilizovaném kamenivu hodnoty

60 % příčného odporu pražce a až po projetí milionu tun zátěže dosahuje 100 % odporu [68]). Na druhou stranu, drážní vozidla, která svými účinky homogenizují kamenivo, se v koleji kvůli bezpečnosti musí pohybovat dočasně sníženou rychlostí, kterou lze odborně vyhodnotit například podle numerického modelu, kterým se zabýval Markine [79]. Projetou zátěží a snížením související dočasné rychlosti lze nahradit nasazením dynamického stabilizátoru, který provede stabilizaci kameniva a podle Fendricha zajistí přibližně 74 % příčného odporu [68].

3.4 Zhodnocení rozboru stability BK ve vodorovné rovině

Jak bylo popsáno výše, odpor pražce v kolejovém loži je, vedle rámové tuhosti koleje, parametr, na kterém závisí vodorovná stabilita kolejového roštu, a který podmiňuje stabilitu a bezpečnost provozu BK. Vyjádření hodnoty příčného odporu pražce z polymeru výpočtem je nepřesné až nemožné z důvodů nahodilosti podmínek pražce a koleje (stav kameniva, geometrie a materiál pražce, vliv udržovacích prací, vliv povětrnostních vlivů). Z toho důvodu se ve výpočtu stability BK běžně uvažuje s empirickými hodnotami, které se stanovují experimentálně. Pro posouzení stability bezstykové koleje ve vodorovné rovině při aplikaci pražců z polymeru bylo třeba experimentálně stanovit příčný odpor pražců k_x . Poté byl vytvořen numerický model koleje pro posouzení stability BK stanovením kritické osové síly N_{cr} resp. kritickým přírůstkem teploty ΔT_{cr} . Obě jmenované části byly popsány v kapitole 7.

4 Teplotní roztažnost pražce a její souvislost s rozchodem koleje

4.1 Geometrické parametry koleje a jejich odchylky

Provozní dráha má být v takovém technickém stavu, aby byl umožněn plynulý a bezpečný provoz drážních vozidel [80]. Technický stav koleje musí splňovat požadavky vymezené normami, právními předpisy a předpisy provozovatele trati. Podle normy ČSN 73 6360-1 [81] je kolej definována geometrickými parametry koleje (GPK), které se dělí na:

- konstrukční uspořádání koleje (rozchod koleje a vzájemná výšková poloha kolejnicových pásů),
- geometrické uspořádání koleje (směr, podélná výška a sklon koleje),
- prostorovou polohu koleje (množina bodů osy koleje jednoznačně určených polohopisnými souřadnicemi a nadmořskou výškou).

GPK mají být udržovány co nejbližší projektované hodnotě. V GPK však dochází k odchylkám, které vznikají vlivem výrobních tolerancí dílců a přesnosti mechanizace při stavbě koleje a dále vlivem provozu. Odchylky v GPK je nutné udržovat z hlediska hospodárnosti a bezpečnosti ve stanovených mezích. Odchylky v GPK jsou zjišťovány diagnostikou koleje prováděnou při přejímce stavebních prací a dále periodicky za provozu. Měření odchylek se provádí jízdou měřicího vozu, měřicí drezíny, použitím vozíku Krab, ruční rozchodkou nebo jinými prostředky. Odchylky od GPK a jejich rozsah definuje ČSN 73 6360-2 [57], která je rozděluje na:

- odchylky při stavbě a přejímce prací,
- odchylky za provozu a při údržbě koleje.

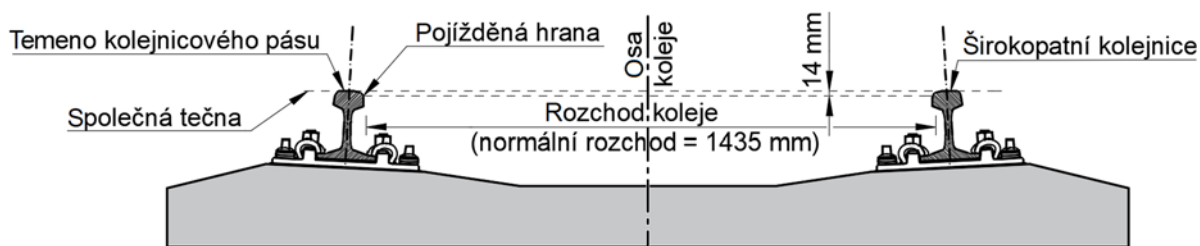
Odchylky za provozu a při údržbě koleje jsou definované podle své závažnosti jako:

- provozní odchylky geometrických veličin rozdělené ve dvou stupních jako:
- mez sledování – Alert Limit (AL),
- mez zásahu – Intervention Limit (IL),
- mezní provozní odchylky geometrických veličin jako:
- mez bezodkladného zásahu – Immediate Action Limit (IAL).

Meze odchylek GPK se rozdělují podle traťové rychlosti v_t [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$] s tím, že čím je traťová rychlost vyšší, tím jsou přípustné odchylky menší. Traťová rychlost je podle [57] rozdělena po intervalech na pět rychlostních pásem (RP).

4.2 Rozchod koleje

Rozchod koleje je podle ČSN 73 6360-1 definován jako vzdálenost mezi pojížděnými hranami kolejnicových pásů, měřená na kolmici k ose koleje [81]. Rozchod koleje se širokopatními kolejnicemi (např. tvar 49 E1, 60 E1) se měří ve vzdálenosti 14 mm pod temenem kolejnice [2], jak je uvedeno na obr. 21. Hodnota 1435 mm se označuje jako normální rozchod koleje. Normální rozchod byl zaveden G. Stephensonem v 19. století a rozšířil se přibližně na 60 % současných tratí ve světě [2].



Obr. 21: Normální rozchod koleje a jeho určení podle ČSN 73 6360-1

V rozchodu koleje dochází k odchylkám, které vznikají z důvodů vad koleje, nedostatečné údržby koleje, nadměrné deformace prvků konstrukce tratě pod zatížením nebo kvůli teplotní roztažnosti pražce. Vznik odchylek v rozchodu koleje má za následek nepříznivé zvýšení silového působení mezi kolejí a vozidlem, které při dlouhodobém vlivu vede k rychlejšímu opotřebení kol a hlav kolejnic a snižuje bezpečnost provozu [28]. Zmíněným negativním vlivům se předchází pravidelnou diagnostikou a údržbou koleje. Velikost přípustných odchylek v rozchodu koleje udává ČSN 73 6360-2. Odchyly v rozchodu koleje se dělí na první typ zahrnující stavbu a přejímku prací s odchylkami, které jsou menší než odchylky druhého typu, které se vyhodnocují za provozu a při údržbě koleje. Vzhledem k problematice délkové teplotní roztažnosti pražce, která je vysvětlena dále, byly v dalším rozboru uvažovány odchylky za provozu a při údržbě koleje a jejich normové hodnoty jsou uvedeny v tab. 12. Uvedené provozní a mezní provozní odchylky se vztahují na přímou kolej, na kterou jsou, oproti směrovému oblouku, kladeny přísnější požadavky.

Tab. 12: Odchyly v rozchodu koleje (stupeň AL, IL, IAL v přímé koleji) podle ČSN 73 6360-2 [57]

Rychlostní pásmo	Traťová rychlost v_t [km·h ⁻¹]	Stupeň AL – mez sledování [mm]	Stupeň IL – mez zásahu [mm]	Stupeň IAL – mez bezodkladného zásahu [mm]
RP0	$0 < v_t \leq 60$	+15 -7	+20 -8	+25 -9
RP1	$60 < v_t \leq 80$	+15 -7	+20 -8	+25 -9
RP2	$80 < v_t \leq 120$	+15 -7	+20 -8	+25 -9
RP3	$120 < v_t \leq 160$	+10 -5	+15 -7	+20 -8
RP4	$160 < v_t \leq 230$	+7 -3	+12 -4	+15 -6
RP5	$230 < v_t \leq 300$	+7 -3	+12 -4	+15 -5

4.3 Teplotní roztažnost pražce

Vlastnost materiálu pražce měnit svůj objem při změně teploty se nazývá teplotní roztažnost. Pozitivní teplotní roztažnost materiálu má za následek zvětšení jeho objemu, pokud se materiál ohřívá, a pokles objemu, pokud je ochlazován. V případě, že mezi změnou teploty ΔT a změnou objemu platí přímá úměra, jedná se o lineární teplotní roztažnost vyjádřenou koeficientem α [82].

Rozměry dřevěného pražce pro normální rozchod jsou $2600 \times 260 \times 150$ mm. Délka pražce je asi 10krát větší než rozměry jeho příčného průřezu, a proto je pražec dále zjednodušeně považován za nosník s jedním převládajícím rozměrem, kterým je délka jeho střednice. Pražec byl dále uvažován jako prutový model a změna jeho délky vlivem teplotní roztažnosti jako změna délky střednice vyjádřena vztahem (44):

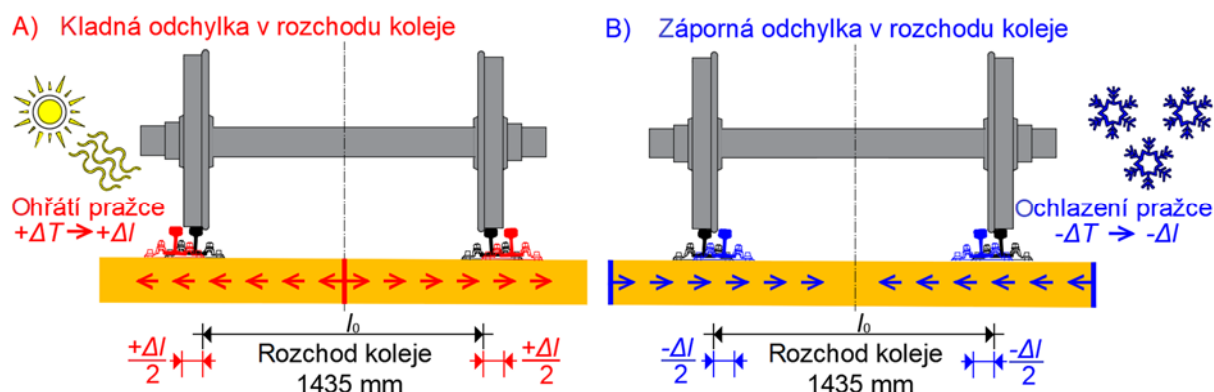
$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (44)$$

kde α je koeficient délkové teplotní roztažnosti materiálu pražce [K^{-1}], Δl je změna délky [mm], l_0 je původní délka [mm], ΔT je změna teploty pražce [K]

Jedním z požadavků, které musí pražec dlouhodobě splňovat, je udržovat stálou hodnotu rozchodu koleje [14] (v rozsahu povolených odchylek v tab. 12 dle [57]), kterou z pohledu teplotní roztažnosti ovlivňují následující parametry:

- koeficient délkové teplotní roztažnosti konstrukce pražce (zahrnuje vliv matrice a její výztuže, pokud je použita),
- ohřátí či ochlazení pražce vzhledem k jeho teplotě při upnutí kolejnicových pásů k pražci.

V případě, že koeficient α materiálu pražce a změna teploty pražce ΔT budou významně vysoké, může dojít k odchylce v rozchodu koleje, která je omezena dle ČSN 73 6360-2 [57]. Zjednodušený výpočtový model pro posouzení délkové teplotní roztažnosti pražce, který je uvažovaný dále, idealizuje pražec jako střednici s tím, že změna teploty pražce nastává konstantně po výšce jeho průřezu. Dalším zavedeným předpokladem je, že pražec je uložený v kamenivu kolejového lože, které je pružné a pražec v něm může volně dilatovat. Změna teploty ΔT je dána jako rozdíl mezi teplotou, při které došlo k upnutí kolejnice na pražec a teplotou, při které se pražec ohřívá nebo ochlazuje v závislosti na okolní teplotě. Lze předpokládat, že největší hodnoty ΔT nastávají v letním nebo zimním období. V závislosti na koeficientu α se pražec zkracuje či prodlužuje, jak je znázorněno na obr. 22.



Obr. 22: Schéma vzniku odchylky v rozchodu koleje $\pm\Delta l$ v důsledku změny teploty $\pm\Delta T$ a délkové teplotní roztažnosti pražce při volné dilataci pražce [83-upraveno]

Zmíněné předpoklady výpočtu délkové teplotní roztažnosti zahrnují zřejmou nepřesnost. Pražec je v klasické konstrukci železničního svršku zakrytý kolejovým ložem až po jeho úložnou plochu, a tím je tepelně izolován, a nemusí tak docházet k rovnoměrné změně teploty pražce po výšce jeho průřezu. Tuto nepřesnost lze očekávat pravděpodobněji při ohřátí pražce, kdy sluneční záření ohřívá povrch na jeho úložné ploše. Při ochlazení pražce lze izolační vlastnost kameniva kolejového lože očekávat naopak nižší, např. z důvodu tzv. hloubky promrznutí, která je definována podle typu zeminy a doby účinku teploty, ale vždy jí lze předpokládat níže než je úložná plocha pražce, tj. obvykle v hloubce 260 mm [84].

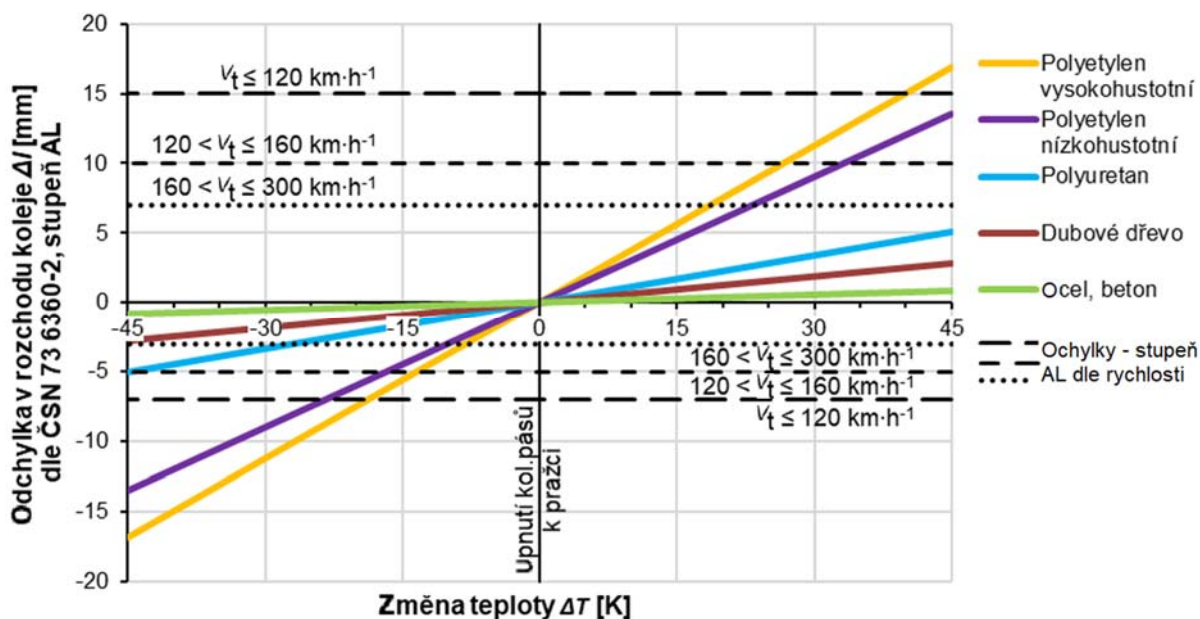
4.4 Zhodnocení výpočtu délkové teplotní roztažnosti pražce

V tratích Správy železnic se používají pražce z impregnovaného tvrdého dřeva, předpjatého betonu a oceli a srovnání jejich koeficientů α je uvedeno v tab. 13 (dubové dřevo je uvedeno bez obsahu impregnační látky). Dále jsou v tabulce uvedeny typy polymerů, ze kterých jsou pražce užívané v zahraničí.

Tab. 13: Teplotní roztažnost materiálů užívaných na výrobu pražců [32, 58, 85]

Materiál	Ocel, beton	Dubové dřevo	Polyetylen nízkohustotní	Polyetylen vysokohustotní	Polyuretan
Koeficient teplotní roztažnosti $\alpha [10^{-5} \cdot K^{-1}]$	1,2	4,2	20,0	20,0 až 25,0	13,0 až 20,0

Teplotní roztažnost oceli a betonu je shodná a roztažnost dubového dřeva 3,5krát vyšší. Polymery používané jako matrice pražce se vyznačují teplotní roztažností, která je o řád vyšší a může dosahovat až $25 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ [58]. Vzhledem k betonu či oceli je teplotní roztažnost používaných polymerů 20krát větší a její možný vliv na odchylky v rozchodu koleje je třeba posoudit. Na obr. 23 jsou zobrazené odchylky v normálním rozchodu koleje při změně teploty pražce a hodnoty odchylek povolené v ČSN 73 6360-2.



Obr. 23: Vypočtená odchylka v rozchodu koleje způsobená změnou teploty pražce o $\pm 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Podle grafu by při změně teploty pražce o desítky stupňů mohlo dojít k překročení povolených odchylek v rozchodu koleje. Jak je vidět z grafu, pro posouzení délkové teplotní roztažnosti pražce jsou z pohledu bezpečnosti rozhodující záporné odchylky v rozchodu koleje.

Z uvedeného vyhodnocení rešerše literatury a technických listů výrobců pražců vyplývá, že koeficient délkové teplotní roztažnosti pražců je známý. Rozchod koleje a jeho odchylky jsou dané normou a jsou tedy též známé. Známy není rozsah teploty pražce v letním a zimním období. Lze předpokládat, že vzhledem k uložení pražce v kamenivu bude zmíněný rozsah teploty malý, ve srovnání například s rozsahem teploty kolejnicového pásu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ uvažovaným ve výpočtech teorie BK [28].

Za účelem zjištění rozsahu teploty pražce bylo provedeno podpůrné měření, které je v kapitole 8, při kterém byly dlouhodobě sledovány teploty pražce v koleji. Aplikací výše uvedeného vyhodnocení spolu s daty z podpůrného měření bylo možné provést posouzení stability rozchodu koleje při aplikaci pražců z polymerů a vypočítat doporučenou hodnotu jejich délkové teplotní roztažnosti platnou k podmínkám v lokaci, ve které bylo podpůrné měření provedeno.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5 Zkoušky a typy pražců zařazené do experimentální části

Z teoretických předpokladů vyplynula experimentální činnost zaměřená na zkoušky železničního svršku s příčnými pražci na bázi polymerů, předpjatého betonu a impregnovaného tvrdého dřeva. Výstupy z experimentální činnosti v podobě geometrických a materiálových charakteristik zvolených typů pražců umožnily ověřit vybranou problematiku zpracovanou v teoretické části. Aplikace zpracované teorie a stanovených charakteristik pražců je včleněna do experimentální části a slouží k posouzení pražců hlediska jejich ohybové tuhosti, funkce bezстыkové koleje (BK), stability rozchodu koleje a požární bezpečnosti. Přehled provedených zkoušek je v tab. 14.

Tab. 14: Přehled zkoušek provedených v experimentální části

Číslo kapitoly, název zkoušky a její části			Provedení
6	Odolnost pražce při namáhání ohybem	6.4 Mez pružnosti pražce (sada vybraných materiálů)	V laboratoři
		6.5 Modul pružnosti pražce (sada vybraných materiálů)	V laboratoři
		6.6 Modul pružnosti pražce (sada z bukového dřeva)	V laboratoři
7	Příčný odpor pražce a jeho vliv na BK	7.1 V koleji	In situ
		7.2 V laboratorním boxu	V laboratoři
8	Koeficient teplotní délkové roztažnosti pražce a jeho vliv na rozchod koleje		In situ
9	Bezpečnost pražce z hlediska rozvoje požáru		In situ

Zkoušky provedené s pražci v experimentální části byly zvoleny v souladu s teoretickou částí tak, aby kvantifikované výsledky experimentů bylo možno aplikovat ve výpočtu konstrukce trati. Zaměření zkoušek bylo zvoleno s ohledem na:

- správce železniční infrastruktury tak, aby jim výsledky přinesly nové informace o rozsahu možného užívání pražců z polymerů z hlediska únosnosti a tuhosti v ohybu a aplikaci v konstrukci bezстыkové koleje. A dále nové poznatky o požární bezpečnosti pražců z polymerů.
- výrobce pražců z polymerů tak, aby jim výsledky přinesly informace o vlivu tvaru pražce na stabilitu bezстыkové koleje a doporučený rozsah koeficientu délkové teplotní roztažnosti pražce.

Postup provádění zkoušek v experimentální části byl navržen speciálně pro účel disertační práce. Výjimkou je uspořádání laboratorní zkoušky pro stanovení odolnosti pražců při namáhání ohybem, které bylo převzato z normy [86]. Laboratorní modely a provedené zkoušky byly odborně zajištěny v laboratořích Fakulty stavební, ČVUT v Praze s využitím laboratorního přístrojového vybavení.

5.1 Testované typy pražců

5.1.1 Impregnované tvrdé dřevo

Ve zkouškách byly testovány pražce z tropického tvrdého impregnovaného dřeva azobé, které Správa železnic ojediněle využívá v úsecích tratí, kde při požadavku na dlouhodobou životnost není z praktických důvodů (stísněné poměry, vrtání otvorů) možné použít předpjaté betonové pražce. Dále byly testovány pražce z impregnovaného bukového a dubového dřeva, které splňují Obecné technické podmínky (OTP) dle Správy železnic [87]. Pražce z buku a dubu byly od výrobce impregnovány kreosotovým olejem GX+ typu C, který se vyrábí destilací černouhelného dehtu [26]. Podle informací výrobce bylo dřevo při impregnačním procesu nasyceno impregnační látkou v následujícím množství [26]:

- bukové dřevo přibližně $130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- dubové dřevo přibližně $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

5.1.2 Polymery

Typy pražců zařazené v experimentální části zahrnovaly pražce z primárního (nerecyklovaného) polymeru a z recyklovaného polymeru. Pražec na bázi primárního polymeru byl kompozitní, s matricí z polyuretanu vyztuženého v podélném směru skelnými vlákny (pražec dále označován jako PUS). Dále byly použity dva typy pražců z recyklovaného polyetylenu s výztuží z ocelových prutů uložených v podélném směru. Dva zmíněné typy pražců se od sebe lišily stupněm vyztužení (poměr plochy příčného řezu oceli a polymeru). Pražec, který se v této práci dále označuje jako vysokopevnostní (high strength, dále označován zkratkou HSS), se vyznačoval stupněm vyztužení 2,62 %. Pražec označovaný jako PES se na rozdíl od pražce HSS vyznačuje nižším stupněm vyztužení, a to 1,07 %.

Pražce typu PUS, HSS a PES byly monoblokové s příčným průřezem ve tvaru obdélníku. Pražec s označením HSS_atyp vychází svým tvarem z monoblokového tvaru HSS, ale jeho příčný průřez po délce pražce je optimalizovaný za účelem zvýšení jeho příčného odporu. Pro testování byly mimo jiné důvody zvoleny proto, že svými rozměry příčného průřezu odpovídají dřevěným pražcům používaným v tratích Správy železnic. Z toho důvodu by bylo možné tyto testované typy v případě pozitivních výsledků uvažovat na základě rozměrů jako přímou náhradu pražců z tvrdého impregnovaného dřeva a navrhnout je při zřízení zkušebního úseku se zaměřením na pražce z polymerů [46].

5.1.3 Předpjatý beton

Pražce z předpjatého betonu testované v experimentální části splňují OTP pro betonové pražce dle Správy železnic [88] a jsou zavedené pro užívání v tratích. Pražce z předpjatého betonu jsou z důvodu své odolnosti a trvanlivosti v tratích významně rozšířeny, a proto byly do zkoušek zařazeny jako referenční materiál pro vyhodnocení výsledků zkoušek pražců z polymerů. V experimentální části byly zahrnuty dva typy, a to monoblokové pražce z předpjatého betonu typu SB8P a B03.

5.2 Stanovení charakteristik pražců podrobených zkouškám

Hmotnost pražců m_p byla stanovena vážením pomocí závěsné jeřábové váhy Crane Scale s měřicím rozsahem 3 000 kg a přesností měření $\pm 0,5$ kg. Rozměry příčného průřezu sledovaných pražců byly stanoveny jako šířka b a výška h . Rozměry byly stanoveny pomocí posuvného digitálního měřítka Mitutoyo Absolute CDN-P30PMXs měřicím rozsahem 300 mm a přesností měření $\pm 0,01$ mm. Pražce z impregnovaného tvrdého dřeva a polymerů měly obdélníkový průřez, který byl kontrolován ve třech profilech rozmístěných rovnoměrně po délce pražce. Z důvodu variace rozměrů ± 2 mm byla v další části práce uvažována průměrná hodnota šířky a výšky. Moment setrvačnosti I_y příčného průřezu pražce k jeho vodorovné těžištové ose byl dle [58] vypočten vztahem (45) pro obdélník [89]:

$$I_y = \frac{1}{12}bh^3 \quad (45)$$

Pražce z předpjatého betonu typu B03 a SB8P mají čtyřúhelníkový příčný průřez, který je proměnný po délce pražce. S ohledem na odlišné rozměry příčného průřezu pražce typu B03 ve střední části a v části pod kolejnicovými pásy byl moment setrvačnosti I_y vypočítán na základě vážených průměrných rozměrů šířky a výšky.

5.3 Seznam pražců podrobených zkouškám

V experimentální části bylo zkouškám podrobena celkem 24 kusů pražců, které lze rozdělit na celkem 9 různých typů odlišujících se svým materiálem, způsobem vyztužení, tvarem příčného průřezu po délce pražce, hmotností aj. Podle materiálu lze sledované pražce rozdělit na následující typy, kterým bylo přiděleno označení:

- impregnované tvrdé dřevo; označení: Dub, Buk, Azobé,
- polymer; označení: PUS, PES, HSS a HSS_atyp,
- předpjatý beton; označení: B03 a SB8P.

Za účelem jasné identifikace prážců při zkouškách a následném vyhodnocení dat bylo jednotlivým kusům prážce přiděleno označení podle materiálu a pořadového čísla. Toto značení je aplikováno v celé experimentální části. Seznam prážců a jejich přiřazení ke zkouškám je v tab. 15.

Tab. 15: Přehled prážců podrobených zkouškám v experimentální části

Typy materiálu a označení prážce		Charakteristiky prážce			Přiřazení prážce ke zkouškám						
		Hmotnost m_p	Rozměry příčného průřezu $b \times h$	Moment setrvačnosti příčného průřezu k vodorovné těžišťové ose I_y	Namáhání prážce ohybem			Příčný odpor prážce		Stabilita rozchodu koleje rozchodu koleje	Požární bezpečnost
					Mez pružnosti	Modul pružnosti	Modul pružnosti	7.1 In situ	7.2 Lab.		
		[kg]	[mm × mm]	[10 ⁷ ·mm ⁴]	6.4 Lab. ³	6.5 Lab.	6.6 Lab.	8 In situ	9 In situ		
Impregnované tvrdé dřevo	Dub_1	102	259 × 161	9,0	•	•					
	Buk_1	93	258 × 153	7,7	•						
	Buk_2	92	251 × 156	8,0			•				
	Buk_3	93	257 × 156	8,1			•				
	Buk_4	97	267 × 154	8,4			•				
	Buk_5	95	262 × 157	8,4			•				
	Buk_6	94	267 × 151	7,7			•				
	Buk_7	94	260 × 154	7,9			•				
	Buk_8	92	261 × 152	7,6			•				
	Buk_9	95	257 × 160	8,8	•	•	•		•		
	Buk_10	n/a ²	251 × 156	7,9						•	
Azobé_1	117	251 × 151	7,1	•	•						
Polymer ¹	PUS_1	91	250 × 150	7,0	•	•					
	PES_1	100	252 × 152	7,4	•	•					
	PES_2	116	251 × 150	7,1					•		
	PES_3	n/a ²	251 × 152	7,2				•			•
	PES_4	n/a	250 × 152	7,3				•			•
	PES_5	n/a	251 × 152	7,3						•	•
	HSS_1	116	250 × 151	7,1	•	•					
	HSS_atyp	79	250 × 150	7,0					•		
Předpř. beton	B03_1	252	220 × 190	12,6	•						
	B03_2	252	220 × 190	12,6		•					
	SB8P_1	270	260 × 183	13,3					•		

¹ Pražec z kompozitu na bázi polyuretanové pěny (PUS), prážec z recyklovaného polyetylenu vyztužený ocelovou výztuží (PES, HSS, HSS_atyp)

² Hodnotu nebylo potřeba stanovit nebo nebyla dostupná (angl. not available)

³ Zkouška provedená v laboratoři

Výrobci testovaných prážců (tab. 15) nejsou specifikováni z důvodu ochrany jejich duševního vlastnictví. Výsledky zkoušek se vztahují na testované prážce o takových rozměrech a kvalitě, v jaké byly přijaté pro testování na ČVUT v Praze. Testované prážce byly nové a před provedením zkoušek byla provedena vizuální kontrola pro odhalení případného poškození. Pražce byly před laboratorními zkouškami uloženy v laboratoři a kondicionovány při teplotě (19 ± 3) °C vždy po dobu alespoň 48 hodin.

5.4 Typy systému upevnění pražců použité při zkouškách

Pokud není v popisu zkoušek uvedeno jinak, pražce z tvrdého impregnovaného dřeva a z polymerů byly vystrojeny prvky nepřímého systému upevnění typu K. Předvrtání otvorů pro vložení vrtulí bylo provedeno výrobcem pražců před jejich dodáním do laboratoře. Výrobce standardně dodává pražce pro DB AG a ÖBB, a z toho důvodu bylo na pražcích instalováno upevnění typu K ze zahraničí. Na úložnou plochu pražce byly instalovány žebrové podkladnice typu RpH, které byly umístěny ve vzájemné vzdálenosti odpovídající normálnímu rozchodu koleje o hodnotě 1435 mm. Zvolený typ podkladnice je rozměrově kompatibilní s kolejnicí tvaru 49 E1. Podkladnice byly upevněny pomocí vrtulí typu Ss8¹⁵⁰ s dvojitými pružnými kroužky typu Fe 6. Na povrch podkladnic byly umístěny pružné podložky pod patu kolejnice typ S49 o rozměrech 183 × 126 × 6 mm.

Pražce typu B03 z předpjatého betonu se vystrojují přímým systémem upevnění, ale vzhledem k jejich aplikaci při laboratorní zkoušce pro stanovení namáhání pražce ohybem nebyl k montáži uzlu upevnění důvod. Při namáhání pražce ohybem byly použity pouze pružné podložky pod patu kolejnice typ S49 popsané výše.

Pražec typu SB8P z předpjatého betonu byl vystrojen uzlem upevnění, které je v souladu s předpisem SR 103/3 SŽDC [90]. Zahrnuje zejména podkladnice typu S4pl s penefolovými podložkami, vrtule typu R1 a další prvky.

6 Stanovení odolnosti pražce při namáhání ohybem

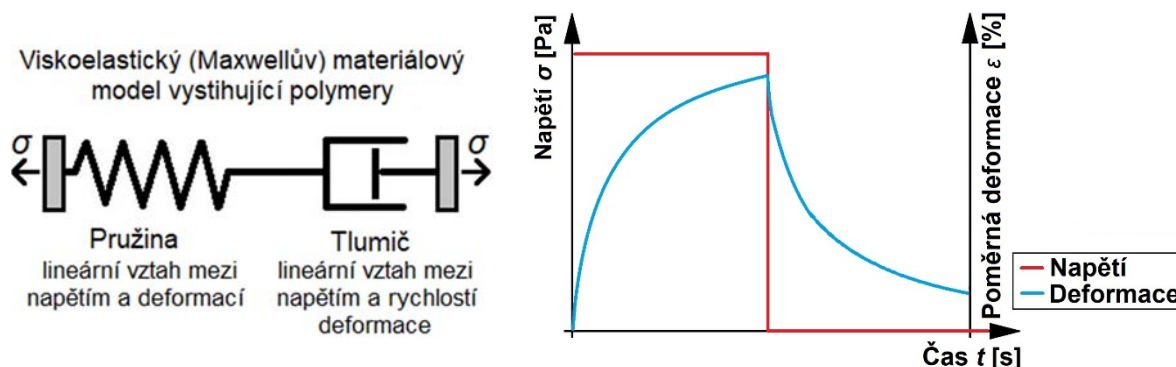
V následující kapitole experimentální části je popsána laboratorní zkouška, ve které byly sledované pražce uvedené v tab. 15 podrobeny namáhání ohybem. Z dat získaných při zatěžování byly vyhodnoceny charakteristiky sledovaných typů pražců popisující jejich pružnost. Závěrem kapitoly je zhodnocení jejich aplikovatelnosti v trati.

6.1 Materiálové charakteristiky pražce stanovené při namáhání ohybem

Materiály typu dřevo, ocel nebo beton mohou být při malém namáhání považovány za pružné. Poměr mezi napětím a jejich deformací je lineární (jak popisuje Hookův zákon) a je nezávislý na rychlosti zatěžování. To se projevuje tak, že po odeznění zatížení se těleso vrátí okamžitě do původního stavu. Deformaci pružných látek lze modelovat pomocí pružiny a její tuhost vyjádřit modulem pružnosti E (E -modul) [58]. Viskózní materiály se vyznačují tím, že jejich napětí je závislé na rychlosti zatěžování a není přímo závislé na jejich deformaci. Tyto materiály lze modelovat pomocí tlumiče [91].

Deformace polymerů však závisí na velikosti zatížení a délce jeho trvání, rychlosti nárůstu zatížení (frekvenci zatěžování). Mimo zmíněné parametry závisí i na teplotě [10]. Polymery patří mezi viskoelastické materiály, které se vyznačují pružnou i viskózní deformací. Jejich deformace může být vystižena Maxwellovým materiálovým modelem, který se skládá ze sériově zapojené pružiny a tlumiče (obr. 24) [92].

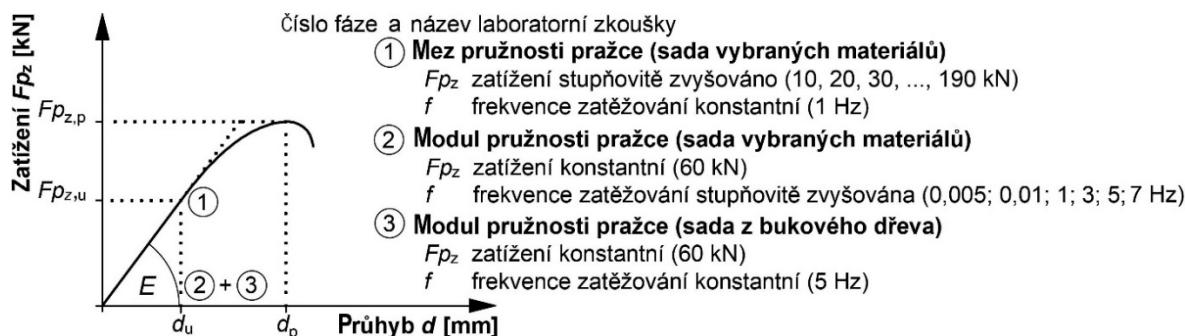
Jak dále ukazuje obr. 24, pokud jsou polymery po určitou dobu zatíženy statickou silou, deformace se skládá z pružné části, která okamžitě odpovídá zatížení a z viskózní části deformace, která narůstá v čase. Po odtížení pružná část deformace okamžitě odezní a viskózní část deformace se v čase dlouhodobě snižuje do odeznění. Tento jev se nazývá dotvarování (creep) [91].



Obr. 24: Materiálový model pro polymery (vlevo) a souvislost mezi napětím a deformací (vpravo) [92]

Vliv viskoelastivity byl vzat v úvahu při volbě zatěžovací frekvence při cyklickém zatěžování. Také byly zvoleny časové odstupy mezi zkouškami, ve kterých byly pražce odtíženy, aby byla eliminována viskózní složka deformace pražce z předešlé zkoušky.

Laboratorní zkouška, ve které byly pražce namáhané ohybem, byla rozdělena na tři fáze, které se liší způsobem zatěžování a zkušebními tělesy. Zmíněné fáze jsou shrnuty ve schématickém pracovním diagramu na obr. 25.



Obr. 25: Přehled provedených laboratorních zkoušek pražce namáhaného ohybem

Cílem první fáze laboratorní zkoušky (kapitola 6.4) bylo ověření hypotézy o možnosti idealizace pražce jako pružného tělesa. Pražce byly podrobeny silovému zatížení F_{pz} . Pražce ze dřeva, předpjatého betonu, ale i z polymerů byly do hledané meze pružnosti předpokládány zjednodušeně jako pružné materiály. Mez pružnosti je hraniční hodnotou zatížení $F_{pz,u}$ v pracovním diagramu pražce, od kterého již neplatí Hookův zákon [58]. Bylo předpokládáno, že mez pružnosti pražce bude nalezena při významně větší velikosti zatížení, než připadá na pražec umístěný pod nápravou (obr. 12), popř. mez nebude z kapacitních důvodů zatěžovacího zařízení nalezena. Namáhání pražce bylo provedeno jako cyklické zatěžování o konstantní zatěžovací frekvenci 1 Hz se stupňovitým zvyšováním síly až do nalezení meze pružnosti pražce.

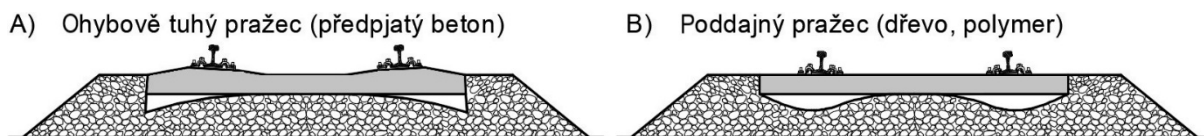
V druhé fázi zkoušky zpracované v kapitole 6.5 byla zvolená sada pražců opět namáhána ohybem. Cílem bylo vyhodnotit E-modul, avšak nyní v rozsahu zatížení, které (po ověření v první fázi) odpovídá pružné deformaci pražců a koresponduje se zatížením pražce v koleji (zvoleno 60 kN). Ve druhé fázi bylo opět aplikováno cyklické zatěžování, avšak oproti první fázi se lišilo rozsahem a frekvencí zatěžování. Aplikovaná zatěžovací frekvence odpovídala nejprve kvazistatickému zatěžování se stupňovitým zvyšováním až do nízkofrekvenčního dynamického zatěžování. [47] V každém stupni zatěžovací frekvence byl vyhodnocen E-modul. Výsledek byl použit v parametrické studii ve výpočtu nosníku na pružném podkladu.

Ve třetí fázi zkoušky (kapitola 6.6) bylo opět provedeno namáhání ohybem se zaměřením na sadu bukových impregnovaných pražců. Sada byla namáhána cyklickým zatížením o zvoleném rozsahu a zatěžovací frekvenci. Cílem bylo vyhodnotit E-modul a odchylky dané nehomogenitou dřeva [47].

6.2 Laboratorní model pro čtyřbodový ohyb pražce

Pražce v železniční trati mají být podepřeny kamenivem kolejového lože zejména v části pod kolejnicovými pásy. To je zajištěno pravidelnou údržbou trati, která zahrnuje podbíjení pražců, čištění a doplňování kameniva kolejového lože. Po provedení údržby kolej podléhá cyklickým silovým účinkům a akumulaci nápravového zatížení a efekt podbití se dlouhodobě snižuje až do okamžiku další údržby. Snižování účinku podbití pražce se projevuje jako zhutnění podkladu, zatlačování kameniva do pláně tělesa železničního spodku, resp. jako změna způsobu podepření pražce [93]. Tato změna může být umocněna vlivem pumpování pražce ve zblácených místech kolejového lože [26] nebo lokálními poklesy pražcového podloží [27].

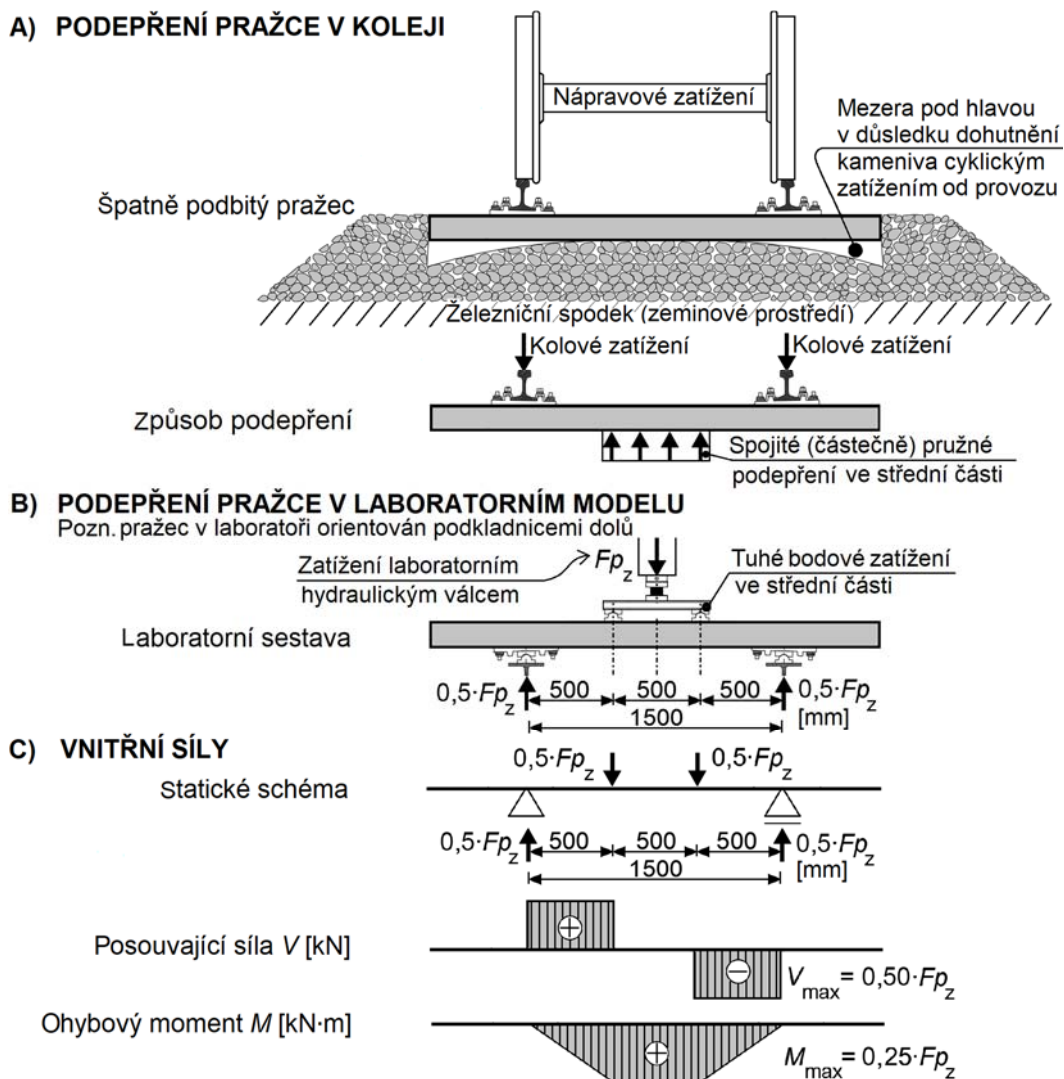
Roznášení nápravového zatížení po délce pražce je dáno ohybovou tuhostí pražce EI_y , která se řádově liší u pražce z předpjatého betonu a u pražce ze dřeva nebo polymeru. Nejméně vhodný způsob uložení pražce nastává, pokud je podepřen pouze v jeho střední části (obr. 26A). Zatížení od nápravy vyvolává při zmíněném způsobu podepření značný záporný ohybový moment. Tento způsob podepření je nepříznivý zejména pro nepoddajné pražce, kterými jsou např. pražce z předpjatého betonu. Laboratorní zkouška na záporné ohybové momenty pražce z předpjatého betonu lze nalézt například v normě [96]. V kontrastu s pražci s vysokou ohybovou tuhostí, může u poddajnějších materiálových typů pražců (impregnované tvrdé dřevo, polymery), dojít k redukci podepření v částech pražce pod kolejnicovým pásem (obr. 26B). Laboratorní zkouška pro tento způsob podepření je pro pražce z polymeru předepsána v normě [97] a [86].



Obr. 26: Zatlačení šterku pod ložnou plochou A) ohybově tuhého pražce a B) poddajného pražce

Laboratorní zkouška ohybem byla provedena podle obr. 26A a je podrobně rozkreslena na obr. 27. Zkouška byla založena na zatěžování nosníku ohybem v jeho střední části se záznamem zatížení a průhybu nosníku. Schéma na obr. 27A podrobněji vysvětluje souvislost mezi způsobem podepření pražce v koleji v jeho střední části se způsobem podepření pražce v laboratorním modelu. Laboratorní model odpovídá čtyřbodovému ohybu (obr. 27B), tj. prostý nosník se dvěma osamělými silami umístěnými ve třetinách rozpětí nosníku. Čtyřbodový ohyb je ve srovnání s tříbodovým vhodnější, jelikož zatížení dvěma silami je rozděleno

rovnoměrěji než jednou silou, ohybový moment je ve střední části rozpětí nosníku konstantní (obr. 27C) a vede k přesnějšímu stanovení modulu pružnosti E [58]. Namáhání střední části pražce v laboratorním modelu koresponduje s namáháním v koleji s jednou výjimkou. Působíště zatížení v laboratorním modelu je bodové a vede tedy na namáhání pražce připomínající uložení pražce o velmi malé kontaktní ploše mezi jeho ložnou plochou a kamenivem kolejového lože. Kamenivo je navíc oproti tuhému laboratornímu roznášecímu nosníku částečně stlačitelné.

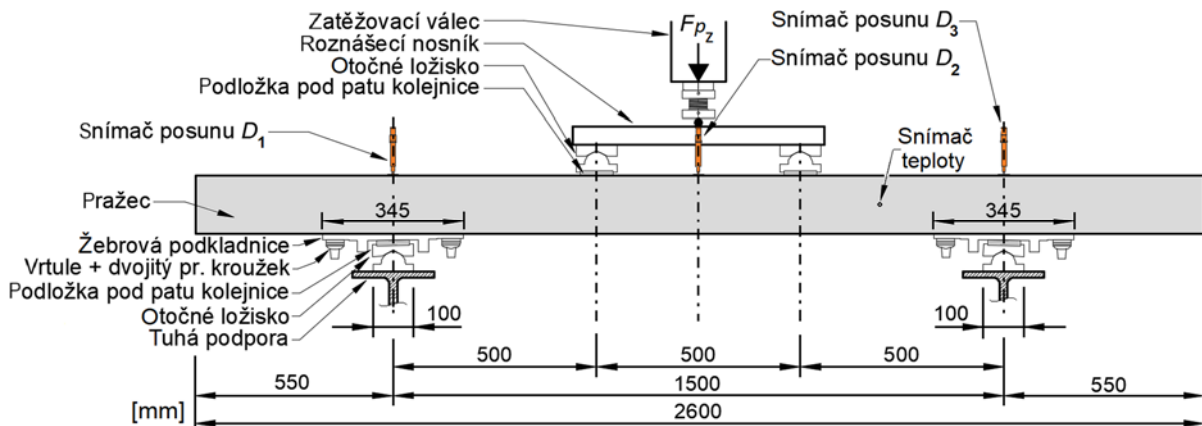


Obr. 27: Nepříznivý způsob podepření pražce v koleji (část A), a z něj vyplývající použitý laboratorní model podepření pražce (část B) a vnitřní síly odpovídající modelu (část C)

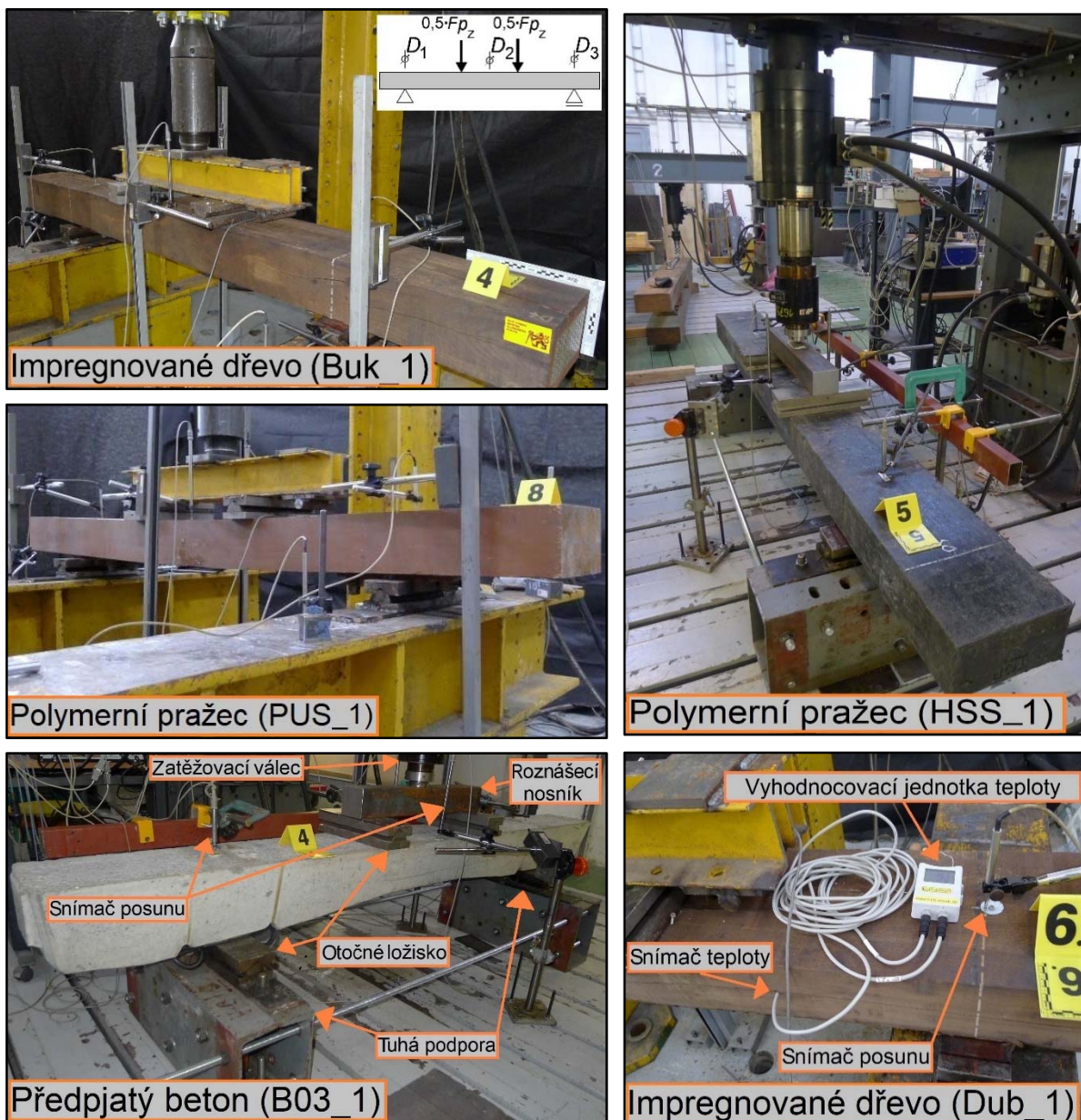
Namáhání pražců ohybem bylo provedeno v laboratořích Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze. Pražec byl při provádění laboratorní zkoušky otočen podkladnicemi směrem dolů. Při respektování polohy podkladnic na pražci vychází rozpětí nosníku o hodnotě 1,5 m, která odpovídá osové vzdálenosti kolejnic při normálním rozchodu koleje, tj. 1,435 m.

6.3 Laboratorní sestava a použité přístroje

Schéma a popis sestavy se základními rozměry jsou na obr. 28. Fotodokumentace prahů při provádění laboratorní zkoušky a laboratorní sestava je na obr. 29.



Obr. 28: Podrobný popis a rozměry sestavy pro provedení laboratorní zkoušky ohyb prahce

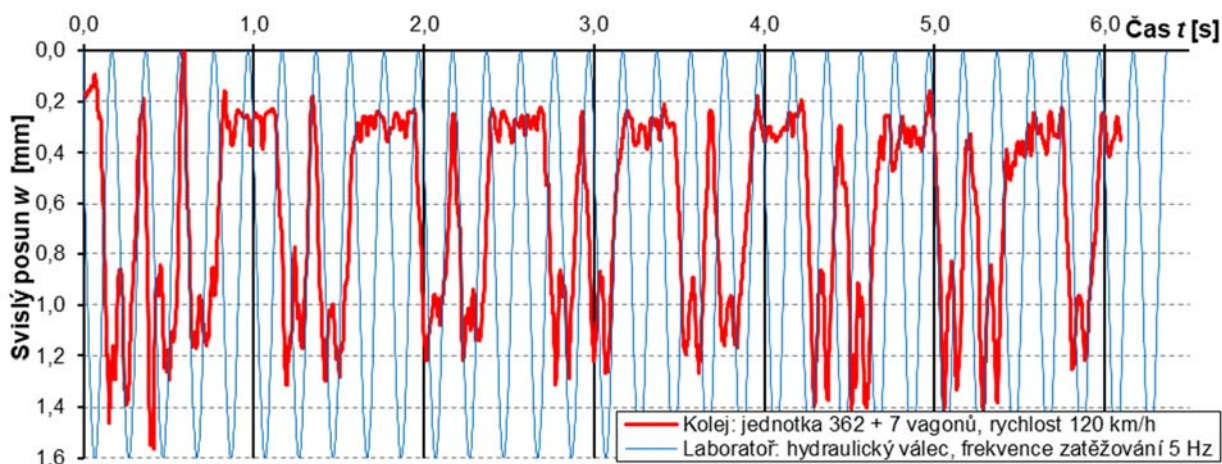


Obr. 29: Sledované typy prahců podrobené namáhání ohybem a popis laboratorní sestavy

Pro vyvození zatížení F_{p_z} byl nainstalován hydraulický válec s působišťem umístěným v polovině rozpětí pražce. Silové zatížení F_{p_z} bylo na pražci přerozděleno ocelovým roznášecím nosníkem na dvě síly o velikosti $0,5 \cdot F_{p_z}$. Zatížení bylo vyvozeno hydraulickým válcem Inova Savad 200 - 100 [98] s maximálním statickým zatížením 200 kN. Laboratorní zkoušky se zatěžováním až do porušení pražce, které vyžadovaly zatížení nad 200 kN, byly provedeny hydraulickým válcem Inova AHS 630-300 M01 s maximálním statickým zatížením 630 kN.

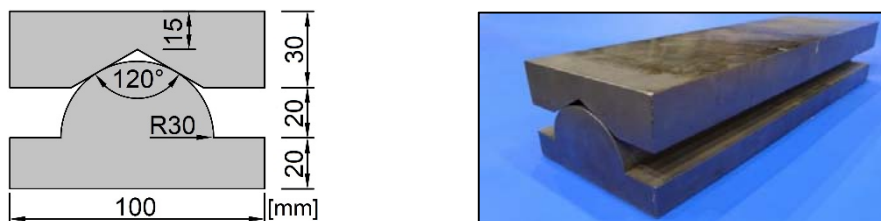
Hydraulický válec v laboratorních podmínkách nahrazuje zatížení vozidlem. Vozidlo na kolej působí cyklickým zatížením, které však nemá harmonickou funkci (obr. 30), ale její tvar je spjatý s rychlostí a s typem vozidla, ze kterého vyplývá vzdálenost a počet jeho náprav. Hledáním funkce cyklického zatěžování, která se blíží skutečnému zatížení od vozidla, se podrobněji zabýval například Brown [59] nebo ji popisuje technický předpis AASHTO T307 [99], který jí udává funkcí poloviční sinusoidy. Hydraulický válec však v laboratoři působil harmonickou funkcí. Její použití je zjednodušením, které se ale v technických prepisech pro laboratorní zkoušky (např. pražců z předpjatého betonu a dalších prvků konstrukce trati) standardně používá.

Zatěžovací frekvence aplikovaná v laboratoři při namáhání pražců ohybem vychází z rychlosti vozidla. Odhad frekvence zatěžování lze ukázat na obr. 30, kde je záznam průhybu kolejnicového pásu od zatížení soupravou složené z čtyřnápravové jednotky (lokomotivy) řady 362 a sedmi vagonů, která se v trati 221 Praha – Benešov u Prahy pohybovala rychlostí $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Ze záznamu je patrné, že pevný bod je soupravou zatížen celkem 32krát za 6 sekund (5krát až 6krát za sekundu). Rychlost $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ tedy při výše popsaných podmínkách přibližně odpovídá zatěžovací frekvenci 5 Hz. Podobně lze odhadnout zatěžovací frekvenci i pro jinou rychlost.



Obr. 30: Porovnání záznamu dat z průhybu kolejnicového pásu při zatížení v koleji a v laboratoři

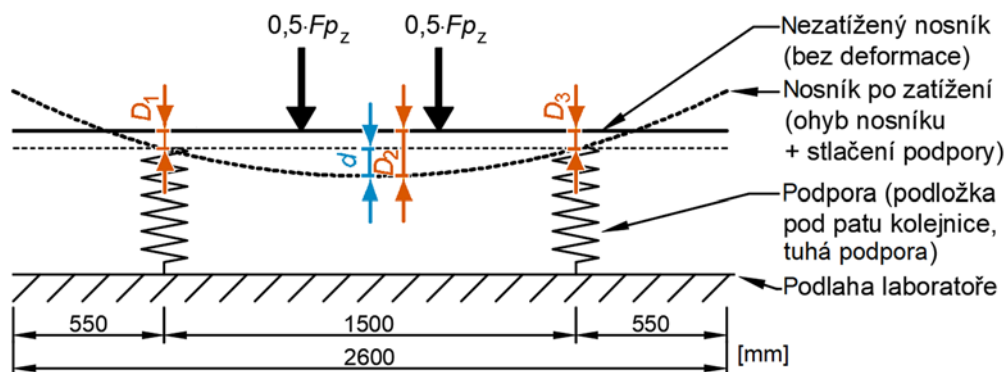
V bodech působí zatížení a v místech podpor pražce, byla umístěna otočná ložiska z tvrdokovu (obr. 31) pro umožnění natočení podpory podle zakřivení pražce namáhaného ohybem. Ložisko umožňuje natočení od vodorovné roviny v rozsahu $\pm 23^\circ$. Ložisko se skládá z pevného a otočného dílu. Díly byly vyrobeny ze zušlechtné oceli s povrchovou úpravou nitridací plynem pro vytvoření tvrdé vrstvy odolné vůči otlačení. Povrch ložiska splňuje kritérium na tvrdost požadovanou např. normou pro zkoušku na kladný nebo záporný ohybový moment betonového pražce [96]. Kritérium je vyjádřené požadavkem na tvrdost o hodnotě HBW > 240 stanovenou metodou Brinell. Půdorysné rozměry ložiska jsou 320×100 mm a výška 70 mm.



Obr. 31: Ocelové otočné ložisko umožňující natočení podpory

Svislý posun pražce byl zaznamenáván indukčními snímači dráhy typu HBM WA / 20 mm s odpruženou měřicí tyčí a s měřicím rozsahem 20 mm a přesností $\pm 0,02$ mm [100]. Uložení snímačů dráhy bylo provedeno na samostatně stojící podpůrné konstrukci ukotvené k podlaze laboratoře a bylo nezávislé vzhledem k uložení pražce. Svislé posunutí při zatěžování pražce bylo sledováno po délce pražce ve třech měřicích profilech označených symbolem D . Měřicí profil v bodech nad podporami nosníku byl označen D_1 a D_3 . Měřicí profil uprostřed nosníku byl označen D_2 s tím, že v okolí zatěžovacího válce byly z důvodu nedostatku prostoru užity dva snímače a ve zpracování dat byla využita jejich průměrná hodnota.

Vlivem uložení snímačů dráhy vzhledem k podlaze laboratoře se při záznamu svislého posunu D_2 nejedná přímo o průhyb nosníku, ale o hodnotu průhybu zvětšenou o svislý posun D_1 a D_3 zaznamenaný v místě tuhé podpory (obr. 32).



Obr. 32: Schéma namáhání pražce ohybem a měření svislých posunutí D_1 a D_3 nad podporami a D_2 uprostřed rozpětí pro výpočet průhybu pražce d

Zmíněný svislý posun u podpory je způsoben stlačením pryžové podložky pod patu kolejnice. Z tohoto důvodu byl pro další vyhodnocení výsledků zkoušky zaveden průhyb d uprostřed rozpětí, který definuje průhyb pražce a je vypočten podle vztahu (46).

$$d = D_2 - \frac{D_1 + D_3}{2} \quad (46)$$

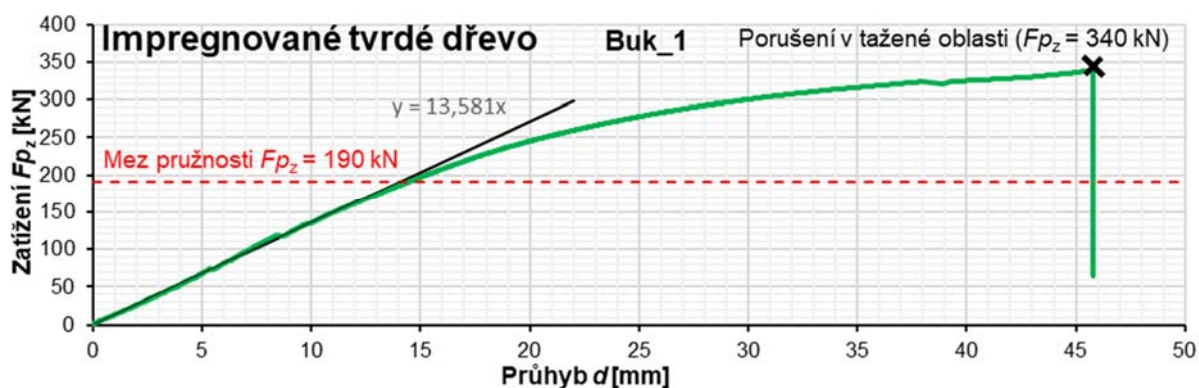
Podkladem pro vyhodnocení výsledků laboratorní zkoušky je záznam dat s uspořádanými dvojicemi zatížení F_{pz} a průhybu uprostřed rozpětí nosníku d . Záznam dat ze siloměru hydraulického válce a ze snímačů dráhy byl prováděn měřicí ústřednou Dewetron DEWE 30-16 [101]. Vzorkovací frekvence při záznamu dat byla zvolena jako 20násobek zatěžovací frekvence. Při zatěžovací frekvenci 7 Hz byla vzorkovací frekvence alespoň 140 Hz.

Teplota vzduchu v laboratoři a teplota pražce při zatěžování byla kontrolována pomocí teplotních snímačů Pt1000TGL40 s měřicím rozsahem $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Snímače teploty byly zapojeny do dvoukanálového dataloggeru COMET typ S0121 s rozlišením $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [102]. Kontrola vývoje teploty pražce při cyklickém zatěžování byla prováděna z důvodu možného vzniku tepla při deformaci pražce pod zatížením, které by zejména u polymerních pražců mohlo vést ke snížení jejich ohybové tuhosti. Čidlo bylo uloženo v pražci v předvrtaném otvoru o průměru 6 mm umístěném ve vzdálenosti 250 mm od podpory pražce.

6.4 Stanovení meze pružnosti pražce

Cílem laboratorní zkoušky provedené dle schématu na obr. 28 bylo ověřit při jakém zatížení F_{pz} se sledované typy pražce již nedeformují pružně. Dále bylo posouzeno, zda se zatížení, které odpovídá hmotnosti na nápravu dle traťových tříd, po přepočtení na jeden pražec, nachází v oblasti pružné deformace pražce.

V úvodní části laboratorní zkoušky byl zatěžován pražec z bukového dřeva označený jako Buk_1 s popisem uvedeným v tab. 15. Pražec byl podroben statickému zatížení F_{pz} , které bylo zvyšováno rychlostí $10\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ a bylo zvyšováno až do porušení pražce. Výstupem je zatěžovací křivka na obr. 33.



Obr. 33: Statické zatížení pražce Buk_1 ohybem (úvodní zkouška, zatížení zvyšováno do porušení)

Z vyhodnocení dat je patrné, že pražec se pod zatížením deformoval přibližně pružně až do meze pružnosti, která nastala při zatížení F_{p_z} rovnému 190 kN. S dalším zvyšováním zatížení se charakter deformace pražce měnil z pružné na plastickou. Zkouška byla ukončena po vyčerpání únosnosti pražce, která se projevila porušením vláken v tažené oblasti při zatížení F_{p_z} rovnému 340 kN. Zatížení při porušení odpovídá normálovému napětí za ohybu σ_m rovnému 84,4 MPa, které bylo vypočteno podle vztahu (47) pro obdélníkový příčný průřez.

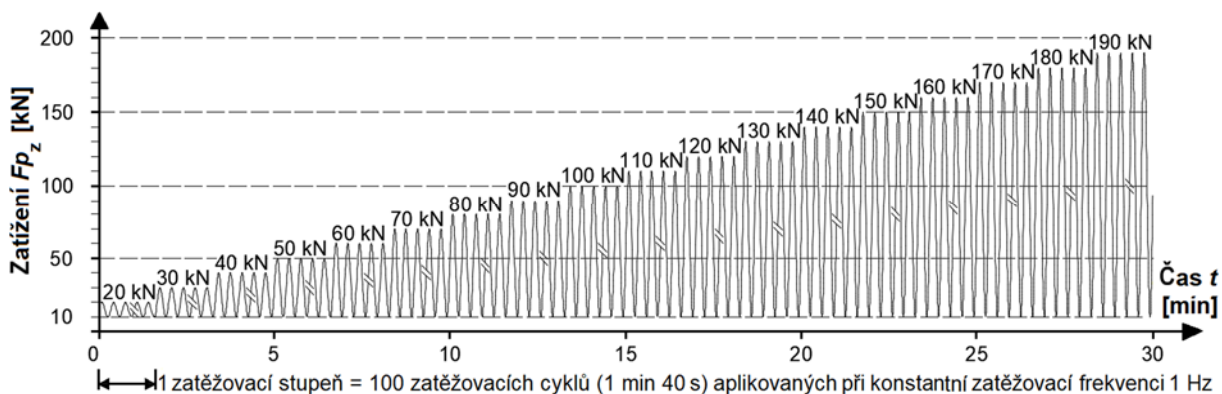
$$\sigma_m = \frac{M}{I_y} \cdot \frac{h}{2} \quad (47)$$

Duckworth [103] podrobil sadu 12 nových pražců z tvrdého impregnovaného dřeva srovnatelné destruktivní zkoušce ohybem s výsledkem o průměrné hodnotě 78 MPa. Zmíněné výsledky ze statického zatěžování pražce Buk_1 byly aplikovány jako podklad při volbě hydraulického lisu s kapacitou 200 kN v další části experimentu, ve které byly pražce podrobeny dynamickému zatěžování.

6.4.1 Zatěžovací schéma pro stanovení meze pružnosti

Při laboratorní zkoušce bylo aplikováno svislé cyklické zatížení pražce F_{p_z} o zvolené zatěžovací frekvenci 1 Hz. Dolní mez zatížení F_{p_z} byla z bezpečnostních důvodů a z technických možností zatěžovacího válce zvolena jako hodnota 10 kN. Horní mez byla při provádění zkoušky zvyšována v zatěžovacích stupních po 10 kN až do 190 kN. Při každém zatěžovacím stupni bylo provedeno 100 zatěžovacích cyklů. Zatěžovací schéma je uvedeno na obr. 34. Zkouška byla zakončena v okamžiku splnění některé z následujících podmínek:

- překročení meze pružnosti pražce nebo jeho porušení,
- dosažení zatížení $F_{p_z} = 190$ kN (limit hydraulického válce v režimu dynamického zatěžování),
- dosažení průhybu $d = 15$ mm (průhyb mimo technické možnosti hydraul. válce).



Obr. 34: Sekvence cyklického zatížení pro zkoušku pražce ohybem při konstantní zatěžovací frekvenci a vzrůstající hodnotě zatížení

Namáhání ohybem s cílem stanovit mez pružnosti bylo podrobena celkem 7 pražců. Jejich popis je uveden v tab. 15. Označení sledovaných pražců je:

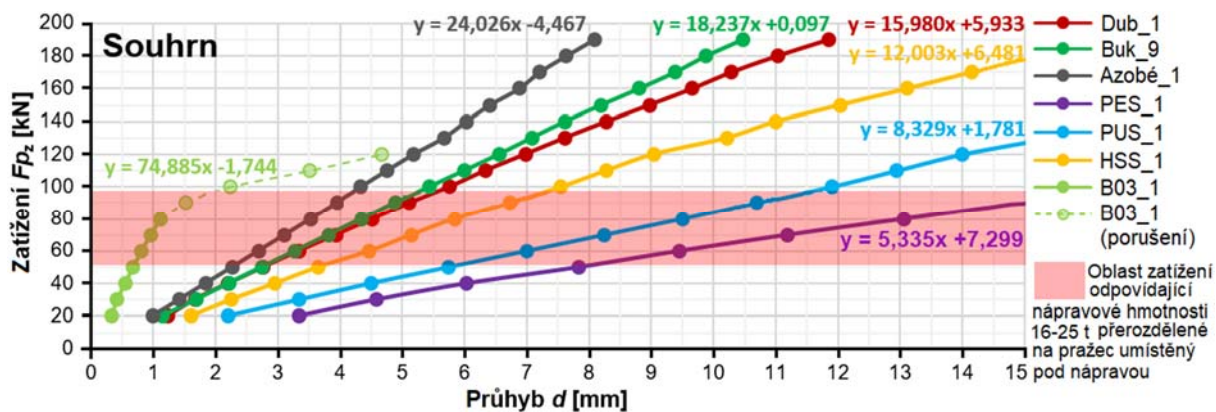
- impregnované tvrdé dřevo: Dub_1, Buk_9, Azobé,
- polymery: PUS_1, PES_1, HSS_1,
- předpjatý beton: B03_1.

6.4.2 Zpracování dat pro zhodnocení meze pružnosti pražce

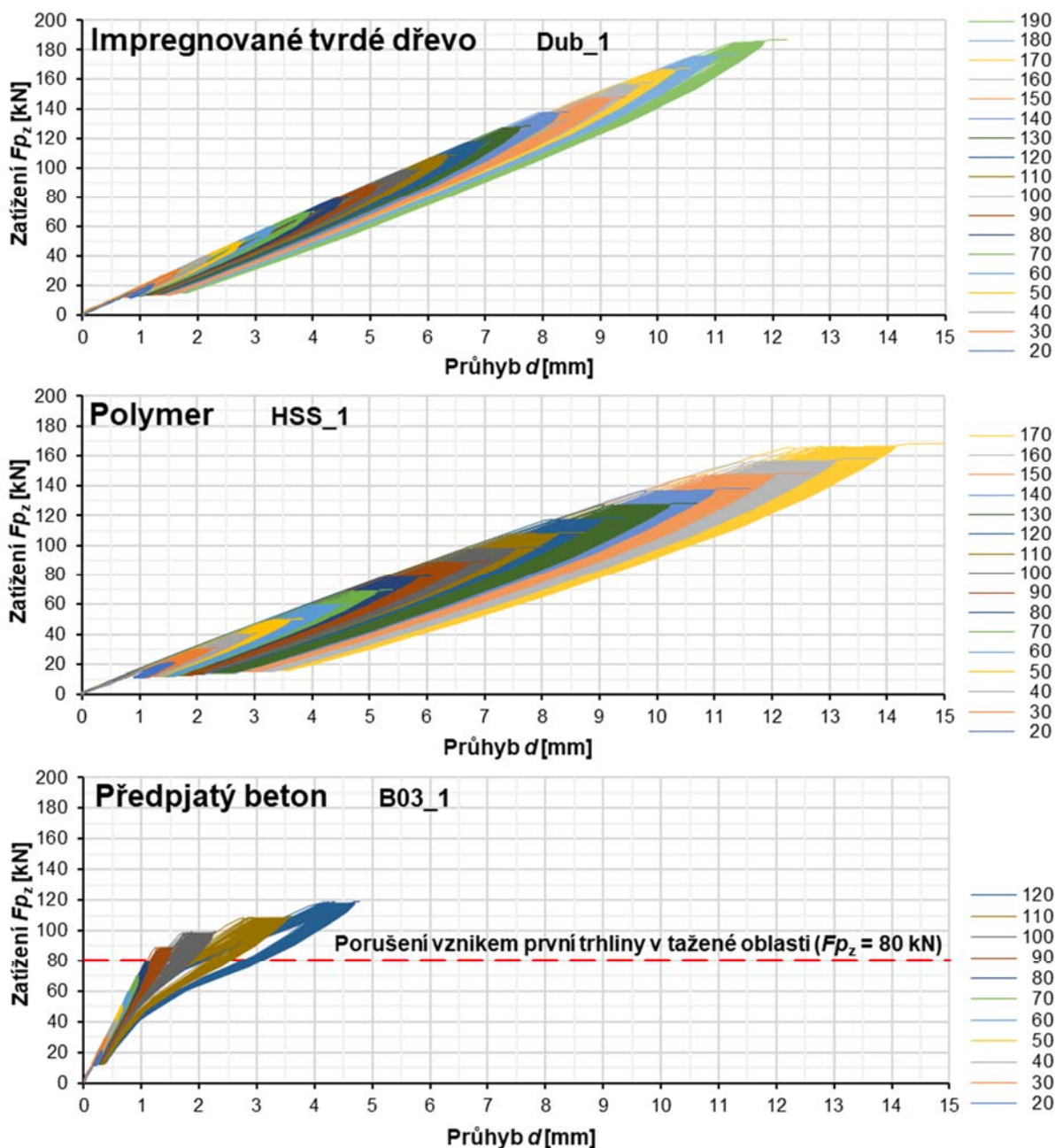
Souhrn výsledků 7 sledovaných typů pražců je souhrnně uveden na obr. 35. Z grafu je patrné stupňovité zvyšování zatížení a odpovídající průhyb. Detailní výsledky tří reprezentativních pražců, a to dřevěného (Dub_1), polymerního (HSS_1) a pražce z předpjatého betonu (B03_1) jsou prezentované individuálně ve formě hysterezních křivek na obr. 36.

Mez pružnosti nebyla u žádného sledovaného pražce dosažena vyjma pražce z předpjatého betonu B03_1, u kterého se při zatížení $F_{p_z} = 80$ kN vyskytla trhlinka v oblasti tažených vláken a došlo k porušení pražce. Porušení pravděpodobně nenastalo kvůli nízké únosnosti pražce, ale kvůli způsobu jeho podepření při laboratorní zkoušce, které ohybově tuhým (nepoddajným) pražcům nevyhovuje (obr. 26 A). V laboratoři byly podpory rozmístěny tak, aby byla napodobena nejnejpříznivější varianta podepření v kolejovém loži. V kolejovém loži je však pražec podepřen také částečně v jeho střední části. Tím se odlišuje od bodového podepření v laboratorní zkoušce, kterým byl pražec B03_1 extrémně namáhán.

Pražce z impregnovaného tvrdého dřeva nejevily při zatížení do 200 kN známky poškození. Nejmenšího průhybu dosahoval pražec Azobé_1. Pražce z polymerů vykazaly oproti pražci Dub_1 a Buk_1 o 25 % (a více) větší průhyb, ale stále se nacházely v pružné oblasti deformace a nejevily známky poškození. Jejich zkouška byla ukončena před dosažením 190 kN z důvodu překonání průhybu 15 mm.



Obr. 35: Zátěžovací diagram prokazující lineární závislost zatížení a průhybu sledovaných pražců s vyznačením rozsahu zatížení od nápravy (přečítáno na jeden pražec)



Obr. 36: Hysterezní křivky z namáhání pražců ohybem (impregnované tvrdé dřevo Dub_1, polymer HSS_1 a předpjatý beton B03_1)

6.4.3 Zhodnocení stanovené meze pružnosti pražce

Výsledky stanovení meze pružnosti pražců jsou v tab. 16. Zhodnocení je provedeno jako ověření platnosti Hookova zákona při velikosti zatížení $F_{pz} = 97,5$ kN. Zatížení odpovídá hmotnosti na nápravu 25 t s koeficientem roznosu k_d rovnému 0,39 (dle obr. 12: pražec umístěný pod nápravou; tuhé podloží; kolejnice tvaru 49 E1). Zhodnocení při použití jmenovaných parametrů zatížení pražce je vhodné, protože jsou z hlediska bezpečnosti pro pražec nejméně příznivé.

Tab. 16: Zhodnocení stanovené meze pružnosti pražce

Označení pražce	Deformoval se pražec při zatížení $F_{pz} = 97,5$ kN lineárně pružně? *	Síla F_{pz} při dosažení meze pružnosti pražce
Dub 1	Ano	Mez pružnosti při 190 kN nedosažena
Buk 9	Ano	Mez pružnosti při 190 kN nedosažena
Azobé 1	Ano	Mez pružnosti při 190 kN nedosažena
PES 1	Ano	Mez pružnosti při 100 kN nedosažena
PUS 1	Ano	Mez pružnosti při 140 kN nedosažena
HSS 1	Ano	Mez pružnosti při 180 kN nedosažena
B03 1	Ne	80 kN

* 97,5 kN odpovídá parametrům: pražec pod nápravou (25 t), tuhé podloží, kolejnice tvaru 49 E1

S výjimkou pražce B03_1 z předpjatého betonu nebyla u sledovaných pražců dosažena mez pružnosti a ani nedošlo k jejich porušení ohybem. Jejich průhyb byl přímo úměrný aplikovanému zatížení (platnost Hookova zákona).

S ohledem na sledované pražce a jejich mez pružnosti lze vyslovit závěr, že zatížení na jeden pražec v koleji způsobuje i za nejméně příznivých parametrů pouze pružnou deformaci. Mez pružnosti nebyla u pražců z tvrdého impregnovaného dřeva ani polymerů dosažena. Rezerva pro Dub_1, Buk_9, Azobé_1 a HSS_1 je vzhledem k výše uvedenému zatížení na pražec 97,5 kN více než 185%. Vzhledem k realističtější hodnotě zatížení od nápravy přepočítané na jeden pražec F_{pz} rovné 60 kN je rezerva jmenovaných pražců více než 300%. Pro zjištění skutečné rezervy by bylo vhodné použít hydraulický válec s vyšší zatěžovací kapacitou a zatěžovat až do dosažení meze pružnosti. Pražce PES_1 a PUS_1 se deformovaly pružně, ale vyznačovaly se značným průhybem. Předpoklad o tom, že zatížení odpovídající nápravové hmotnosti 16 t až 25 t přerozdělené na pražec umístěný pod nápravou vyvolá pouze pružnou deformaci pražce, byl potvrzen. Tento závěr byl použit v další části laboratorních zkoušky namáhání pražců ohybem s cílem stanovit jejich E -modul.

6.5 Stanovení modulu pružnosti pražce

Železniční pražec je vedle kolejnice, uzlu upevnění a pražcového podloží významným prvkem, který ovlivňuje svislou tuhost kolejového roštu. Jak vypočetl Belkom [48],

s ohledem na hmotnost na nápravu (tab. 8) a doporučený průhyb konstrukce koleje dle Rießbergera [60] 2 mm, je optimální tuhost kolejového roštu přibližně $50 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$. Nízká tuhost souvisí s nadměrným průhybem konstrukce koleje, namáhání a opotřebení jejích prvků. Na druhou stranu vysoká tuhost by způsobila rázy při pohybu vozidla po koleji a tím nadměrný hluk a vibrace. U pražce se jako u nosníku stanovuje ohybová tuhost EI_y , která závisí na rozměrech příčného průřezu pražce a na modulu pružnosti E , který byl stanoven z namáhání pražce ohybem při deformaci v jeho pružné oblasti.

6.5.1 Zatěžovací schéma pro stanovení modulu pružnosti

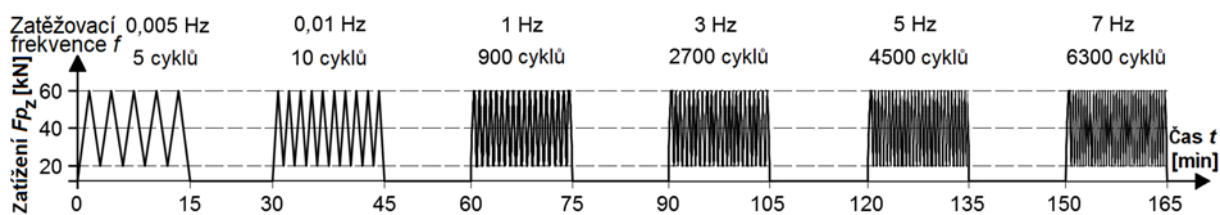
Určení silového zatížení F_{pz} pro laboratorní zkoušku ohyb pražce bylo stanoveno výpočtem pomocí příčinkových čar průhybu kolejnice dle teorie Zimmermanna podle kapitoly 2. Výpočet byl proveden s parametry, které jsou předpokládány pro aplikaci polymerních pražců v provozované trati. Vstupní parametry výpočtů byly:

- koeficient roznášení zatížení $k_d = 0,35$ dle obr. 12 platný pro:
- tvar kolejnice 49 E1,
- součinitel ložnosti $C = 0,10 \cdot \text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ (nové kolejové lože, po podbití),
- osovou vzdálenost pražců $B = 0,6 \text{ m}$,
- účinnou plochu dřevěného pražce $A = 0,36 \text{ m}^2$.
- hmotnost na nápravu $m = 18 \text{ t}$ (traťová třída B).

Zatížení F_{pz} bylo vypočteno a z praktických důvodů zaokrouhleno na hodnotu 60 kN a při kvazistatickém a cyklickém zatěžování pražce bylo přijato jako horní hodnota zatížení $F_{pz,max}$. Dolní hodnota zatížení $F_{pz,min}$ by měla být blízká nule. Hydraulický válec však při cyklickém zatěžování vyžaduje z bezpečnostních důvodů určitou minimální sílu, při které je zkušební sestava neustále stlačována. Volba dolní hodnoty zatížení také závisí na tuhosti vzorku. Při použité konfiguraci rozpětí a tuhosti nosníku byla s ohledem na bezpečnost při provádění zkoušky stanovena dolní hodnota zatížení jako 20 kN.

Pražce vyrobené ze dřeva, polymeru a betonu mají různé reologické modely, jak je pojednáno např. v literatuře [32, 48, 92]. Pražce z polymerů mají viskoelastický materiálový model. To znamená, že odezva na zatížení v určitém okamžiku nesouvisí pouze s velikostí zatížení, ale také s historií zatěžování a její rychlostí (v případě cyklického zatěžování se zatěžovací frekvencí). Zatěžovací frekvence se v železniční trati odvíjí od traťové rychlosti vozidla, které svými nápravami působí na kolej (obr. 30).

Z tohoto důvodu byl pro laboratorní zkoušku pražce ohybem sestaven zatěžovací postup o různých zatěžovacích frekvencích, který začíná (pomalým) kvazistatickým zatěžováním a po jednotlivých stupních zrychluje na nízkofrekvenční dynamické zatěžování. Byly zvoleny následující stupně zatěžovací frekvence: 0,005; 0,01; 1; 3; 5 a 7 Hz. Za účelem porovnatelnosti výsledků mezi jednotlivými stupni frekvence byla stanovena doba zatěžování na každém frekvenčním stupni na 15 minut. Po každém frekvenčním stupni následovalo odtížení pražce, které trvalo opět 15 minut a bylo prováděno kvůli eliminaci deformace pražce dotvarováním (creep). Zatěžovací postup je uveden v grafu na obr. 37.

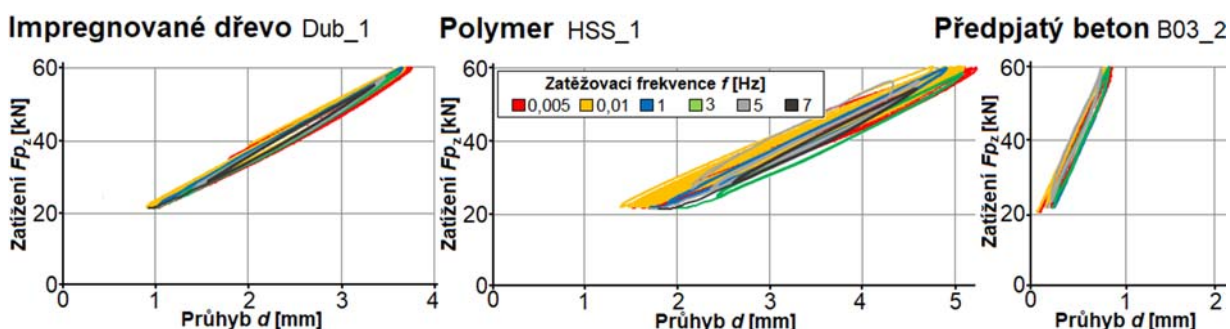


Obr. 37: Sekvence kvazistatického a cyklického zatížení pro zkoušku pražce ohybem pro stanovení charakteristik pružnosti pražce [47]

Namáhání ohybem s cílem stanovit E -modul bylo podrobena celkem 7 pražců. Jejich popis je uveden v přehledu pražců v tab. 15. Označení sledovaných pražců je:

- impregnované tvrdé dřevo: Dub_1, Buk_9, Azobé_1,
- polymery: PUS_1, PES_1, HSS_1,
- předpjatý beton: B03_2.

Příklady hysterezních křivek ze zatěžování pražců ohybem (Dub_1, HSS_1 a B03_2) při zatěžovací frekvenci 0,005 Hz až 7 Hz jsou uvedeny na obr. 38. Z grafů vyplývají významné rozdíly v průhybu, které souvisí s ohybovou tuhostí pražců, resp. E -modulem. Z grafu pražce HSS_1 jsou navíc patrné i rozdíly ve sklonu hysterezních křivek při zvyšování zatěžovací frekvence, které souvisí se změnou ohybové tuhosti pražce. Naopak z grafu pražce Dub_1 a zejména pak z B03_2 je patrný sklon křivek bez větších odchylek.



Obr. 38: Informativní záznam z namáhání pražců zatížením F_{p2} při různých zatěžovacích frekvencích.

6.5.2 Výpočet modulu pružnosti

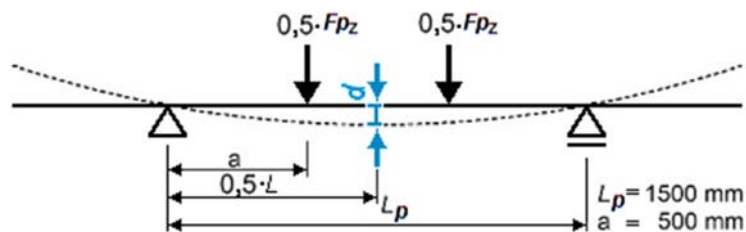
Z dat naměřených při experimentu byl vyhodnocen E -modul, který charakterizuje vztah zatížení a pružné deformace nosníku o příslušných rozměrech. E -modul je však možné vypočítat jen za předpokladu níže zmíněných podmínek podle Navier-Bernoulliho hypotézy [104]:

- homogenní materiál nosníku → splněno (výjimka u nosníků s ocelovou výztuží),
- lineární rozložení napětí a deformace po výšce průřezu nosníku → splněno (výjimka u nosníků s ocelovou výztuží),
- zachování rovinnosti průřezu nosníku před a po deformaci → při malém průhybu d splněno,
- kolmost roviny průřezu na střednici po deformaci → při malém průhybu d splněno.

E -modul lze dle principů stavební mechaniky získat integrací diferenciální rovnice ohybové čáry pro čtyřbodový ohyb upravenou jako vztah (48) s parametry na obr. 39:

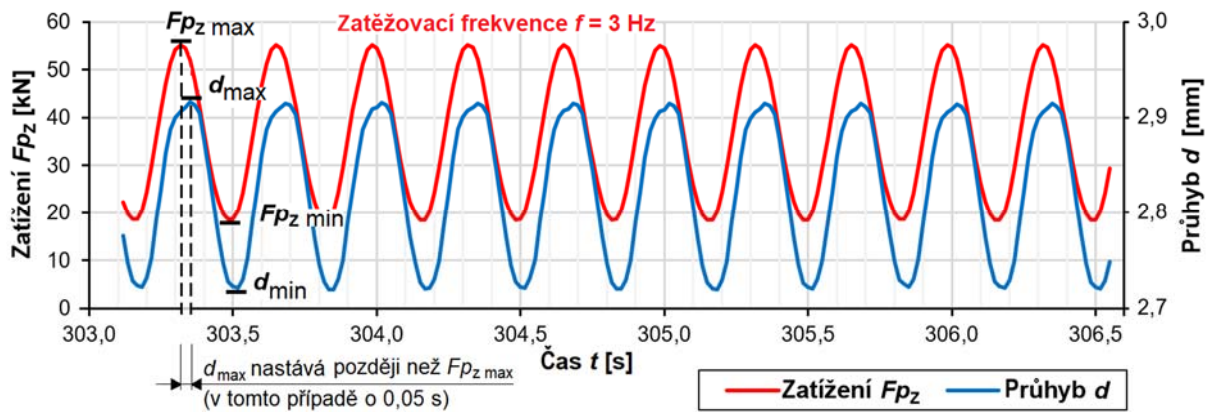
$$E = \frac{\Delta F_{p_z} \cdot a(3L_p^2 - 4a^2)}{48\Delta d \cdot I_y} \quad (48)$$

kde ΔF_{p_z} představuje rozdíl zatížení na pražec mezi jeho horní hodnotou $F_{p_z, \max}$ a dolní hodnotou $F_{p_z, \min}$ [kN], a představuje vzdálenost [m] mezi osou podpory a místem aplikace zatížení, L_p je rozpětí [m], Δd je rozdíl horní hodnotou průhybu d_{\max} a dolní hodnotou průhybu d_{\min} [m] vypočtený s využitím vztahu (46) a I_y představuje moment setrvačnosti průřezu nosníku k jeho vodorovné těžišťové ose [m⁴], vyjádřený vztahem (45) pro obdélník.



Obr. 39: Schéma pro výpočet E -modulu při čtyřbodovém ohybu

Během provádění experimentu byl zaznamenán svislý posun v bodech D_1 až D_3 pro výpočet průhybu pražce d , který tvoří dohromady s aplikovaným zatížením F_{p_z} závislé dvojice pro vyhodnocení výsledků. Oproti horní hodnotě zatížení $F_{p_z, \max}$ nastávala horní hodnota d_{\max} opožděně (v řádu setin sekundy), jak ukazuje obr. 40. Důvodem je vliv viskoelastického chování testovaných materiálů. Ze zřejmého důvodu bylo vyhodnocení dat provedeno tak, že nejprve byly vyhledány páry horních hodnot $F_{p_z, \max}$ a d_{\max} , stejně tak jejich minimálních hodnot, a až ty byly vzaty do výpočtu E -modulu.

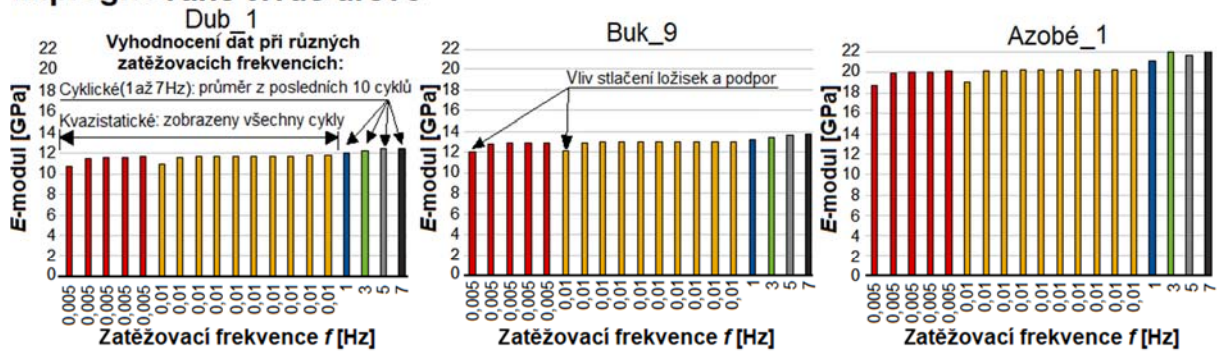


Obr. 40: Záznam průhybu d a zatížení F_{pz} , který ukazuje, že hodnota d_{\max} (resp. d_{\min}) nenastává v okamžik hodnoty $F_{pz \max}$ (resp. $F_{pz \min}$) ale opožděně (pražec PES_1, zatěžovací frekvence 3 Hz)

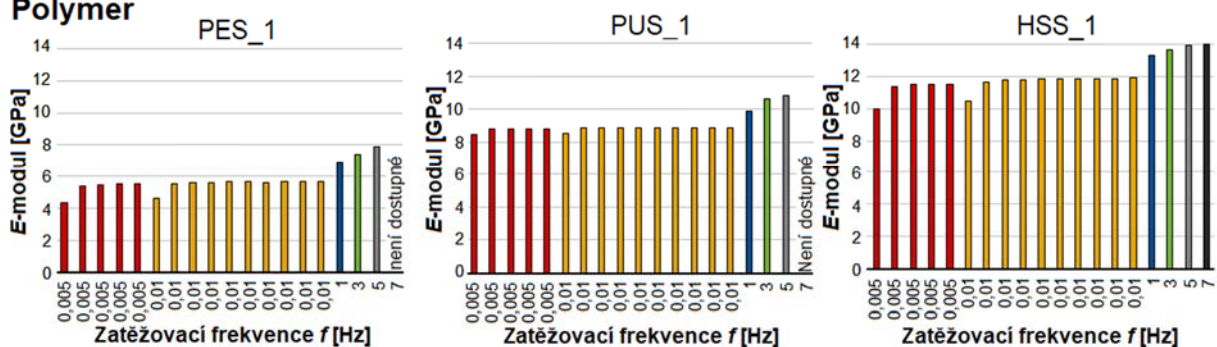
6.5.3 Zpracování dat pro vyhodnocení modulu pružnosti

Do vztahu (48) pro výpočet E -modulu byla použita data průhybu Δd a zatížení ΔF_{pz} ze zatěžovací větve. E -modul je vyhodnocen individuálně na obr. 41 souhrnně na obr. 42.

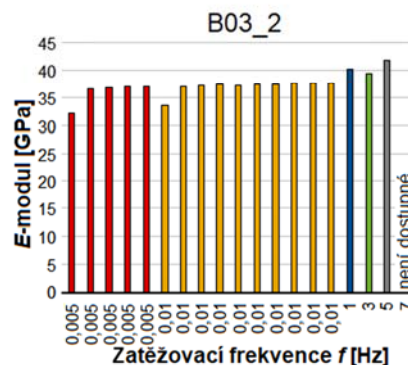
Impregnované tvrdé dřev



Polymer



Předpjatý beton



Obr. 41: Podrobné výsledky E -modulu sledovaných prahů při různých zatěžovacích frekvencích [47]

Vypočtený E -modul sledovaných pražců (Dub_1, Buk_9, Azobé_1, PUS_1, PES_1, HSS_1, B03_2) je i nadále vztažen na konkrétní pražce, z jejichž zkoušek byl vypočten (výsledné hodnoty nelze zobecňovat kvůli malému počtu zkušebních těles).

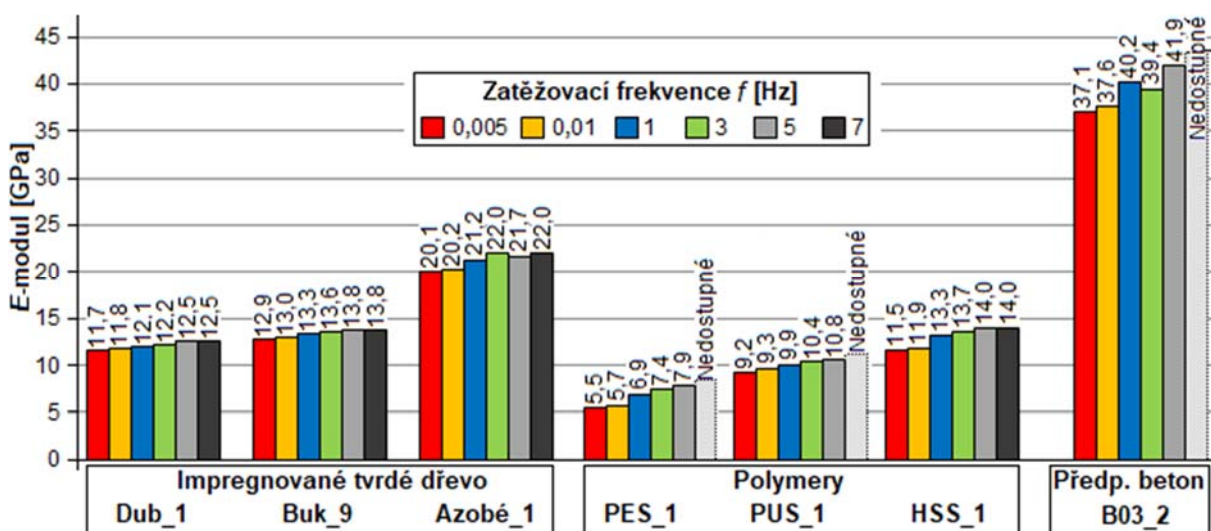
Jak je popsáno na obr. 41 u výsledků pro dubový pražec, E -modul byl vyhodnocen z každé zatěžovací frekvence kvazistatického zatížení (0,005 Hz a 0,01 Hz). Při cyklickém zatížení o frekvenci 1 Hz a vyšší bylo provedeno podstatně více cyklů než při kvazistatickém zatížení a vyhodnocení každého cyklu by bylo výpočetně komplikované. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že hodnoty E -modulu ze zatěžovacích cyklů obsahují odchylky (v řádu jednotek procent), a proto byl vyhodnocen průměrný E -modul z posledních deseti zatěžovacích cyklů.

Pražce vyznačující se nízkou tuhostí, mezi které patří PES_1 a PUS_1, vykazovaly pod zatížením značný průhyb d . S velikostí průhybu pražce přímo souvisí velikost dráhy válce, který pražec zatěžuje. Kombinace nároků na hydraulický agregát vyplývající z dráhy válce a zatěžovací frekvence 7 Hz byla mimo technické možnosti hydraulického systému a nebyla pro jmenované pražce dostupná.

Měřítka svíslé osy grafu pro E -modul je rozdílné pro skupiny pražců z impregnovaného dřeva, polymerů a předpjatého betonu. Rozdílné měřítko bylo zvoleno, protože sloupce pak jasněji označují chování pražců při různé frekvenci zatížení, tj. změny jejich E -modulu.

Zatěžování při různých frekvenčních stupních bylo přerušeno 15 minutovými pauzami s odtížením. Při zahájení dalšího frekvenčního stupně nebylo aplikováno předtížení. Z toho důvodu je hodnota E -modulu v každém prvním kvazistatickém kroku (0,005 Hz a 0,01 Hz) zatížení nižší. Tento jev je způsoben stlačením pružných podložek pod patu kolejnice, podobně jako v železniční trati [105]. Na tento jev je poukázáno na obr. 41 u výsledků pro bukový pražec (Buk_9).

Vyhodnocením bylo zjištěno, že pražce se po provedení cca 15 tisíc zatěžovacích cyklů deformují pružně a nejeví známky poškození. Kvazistatické zatěžování s frekvencí 0,005 Hz a 0,01 Hz vykazovalo srovnatelný E -modul pražců. Uvedené frekvence zatěžování se podobaly účinku statické síly, při které se významně neprojevuje viskoelastické chování, a tedy nedošlo ke změně E -modulu. Při vzrůstající zatěžovací frekvenci byl však zaznamenán nárůst tuhosti. Souhrnné výsledky E -modulu rozdělené podle typu materiálu pražce a zatěžovací frekvence jsou na obr. 42. Výsledky pro 0,005 Hz a 0,01 Hz jsou prezentované posledním zatěžovacím cyklem a výsledky pro 1 Hz až 7 Hz průměrnou hodnotou z posledních 10 zatěžovacích cyklů.



Obr. 42: Souhrnné výsledky E -modulu prážců ze sledovaných materiálů, stanovené při zvolených hodnotách zatěžovací frekvence f [47]

Při porovnání výsledků z kvazistatického zatěžování při frekvenci 0,005 Hz a 0,01 Hz mají pražce srovnatelný E -modul. Avšak při frekvenci 1 Hz a vyšších bylo patrné zvýšení E -modulu. Z tohoto důvodu bylo vhodné vyčíslit přírůstky E -modulu v závislosti na zvýšení frekvence zatížení, které jsou shrnuty v tab. 17.

Tab. 17: Hodnoty E -modulu různých materiálů pražce při kvazistatickém zatížení 0,005 Hz a jeho nárůst v důsledku zvyšování zatěžovací frekvence až do 7 Hz [47]

Označení pražce	Nárůst E -modulu [GPa] dle zatěžovací frekvence f [Hz]					
	0,005	0,01	1	3	5	7
Dub_1	11,7	+0,1 (+1 %)	+0,4 (+3 %)	+0,5 (+5 %)	+0,8 (+7 %)	+0,8 (+7 %)
Buk_9	12,9	+0,1 (+1 %)	+0,4 (+3 %)	+0,7 (+5 %)	+0,9 (+7 %)	+1,0 (+7 %)
Azobé_1	20,1	+0,1 (+1 %)	+1,1 (+5 %)	+1,9 (+9 %)	+1,6 (+8 %)	+1,9 (+9 %)
PES_1	5,5	+0,1 (+3 %)	+1,4 (+25 %)	+1,9 (+34 %)	+2,4 (+43 %)	Nedostupné ¹
PUS_1	9,2	+0,2 (+2 %)	+0,7 (+8 %)	+1,3 (+14 %)	+1,7 (+18 %)	Nedostupné ¹
HSS_1	11,5	+0,4 (+3 %)	+1,7 (+15 %)	+2,1 (+19 %)	+2,4 (+21 %)	+2,5 (+21 %)
B03_2	37,1	+0,5 (+1 %)	+3,1 (+8 %)	+2,3 (+6 %)	+4,8 (+13 %)	Nedostupné ²

¹ mimo technické možnosti hydraulického systému (nízká tuhost pražce, vysoká zatěžovací frekvence)

² chyba v provádění zkoušky

6.5.4 Zhodnocení stanoveného modulu pružnosti pražce

Podle vyhodnocení relativního rozdílu E -modulu pražce Dub_1 a Buk_9, který je 10 %, lze oba pražce prohlásit za srovnatelně tuhé. Novák [106] uvádí E -modul dubového dřeva v ohybu hodnotou 11,6 GPa a bukového dřeva 13,1 GPa, které jsou vzhledem k E -modulu v Tab. 17 shodné. V případě pražce Azobé_1, byla vyhodnocena přibližně o 60 % vyšší tuhost, kterou se potvrdila jeho vyšší odolnost vůči namáhání. Z důvodu vyšší odolnosti bývají pražce z tropického dřeva Azobé, vedle jejich dlouhé životnosti, aplikovány v trati v případech, ve kterých nelze použít pražce z předpjatého betonu (např. výhybkové pražce Azobé v Roudnici nad Labem nebo v ŽST Dolní Žleb). Nárůst E -modulu při zvyšování zatěžovací frekvence z 0,005 Hz na 7 Hz měl při cyklickém zatěžování v případě všech tří pražců ze dřeva podobný rozsah, a to do 9 %.

Hodnoty E -modulu pražců z polymerů stanovené při namáhání ohybem je na základě měření pražců ze dřeva a referenci Nováka [106] možné považovat za správné. Z výsledků je patrné, že pražce z polymerů dosahují porovnatelného nebo nižšího E -modulu než pražce z tvrdého impregnovaného dřeva. Oproti pražcům ze dřeva bylo u pražců z polymerů se zvýšením zatěžovací frekvence patrné zvýšení E -modulu až o desítky procent, ze kterého vyplývá, že pražce z polymerů mají při zatěžování frekvenčně závislou tuhost, která je důsledkem viskoelastického modelu chování polymerů. Ze zmíněného vyplývá, že zatěžovací frekvence pražců z polymerů by při laboratorních cyklických zatěžovacích zkouškách pražců měla odpovídat frekvenci zatížení od náprav vozidel v koleji. Vhodné je nízkofrekvenční zatěžování alepoň 3 Hz. Výsledky kvazistatického zatěžování polymerních pražců jsou vzhledem k zatěžování pražce vozidlem jedoucím v koleji nepřesné.

6.6 Stanovení variability E -modulu pražců z impregnovaného bukového dřeva

Pražce z polymeru jsou výsledkem kontrolovaného výrobního procesu, který umožňuje sledování kvality surovin (tj. polymeru, výztuže) a zpracování, na základě kterého by měly být omezeny odchylky v jejich mechanické odolnosti. Avšak dřevo je přírodního původu a mechanické vlastnosti impregnovaných dřevěných pražců mohou kolísat podle vlhkosti dřeva a nehomogenit zahrnujících praskliny a suky. V rámci další kapitoly zaměřené na ohybovou tuhost pražce byla provedena zkouška sady impregnovaných pražců z impregnovaného bukového dřeva s cílem stanovit referenční hodnotu E -modulu z namáhání ohybem včetně statistických charakteristik. Pražce z impregnovaného bukového dřeva byly vybrány kvůli jejich dostupnosti a častému výskytu v koleji v České republice. Podobný experiment zaměřený na stanovení E -modulu dřevěných pražců za účelem získání referenční hodnoty pro vývoj polymerního pražce s vlákny uvádí např. Ticoalu et al. [107], který však testoval pražce nespécifikovaného druhu dřeva a impregnační látky.

Normy pro posouzení mechanických vlastností dřevěných pražců nejsou stanovené, přestože dřevěné pražce byly v koleji výhradně používány po desetiletí. Relevantní normou pro dřevěné pražce je však ČSN 13145 [24], která definuje druhy dřeva pro výrobu pražců a kritéria, podle kterých se má dřevo k výrobě pražců zvolit a opracovat (např. způsob kácení, řezání, sušení). Dostatečná mechanická odolnost tedy není definována číselně, ale popisem jak řezivo k výrobě dřevěného pražce připravit.

6.6.1 Popis sady pražců a postupu provádění zkoušky ohybem

Variabilita pražců byla hodnocena podle kritéria E -modulu. Celkem 8 pražců z impregnovaného bukového dřeva bylo podrobeno namáhání ohybem. Jejich popis je uveden v tab. 15. Označení sledovaných pražců je:

- impregnované tvrdé dřevo: Buk_2 až Buk_9.

Sada pražců z impregnovaného bukového dřeva byla podrobena laboratorní zkoušce v ohybu podle schématu uvedeného na obr. 28. Tím bylo umožněno přímé porovnání výsledků E -modulu pražců sledovaných v předešlých zkouškách. Pražce byly podrobeny cyklickému zatížení $F_{pz} = 60$ kN se zatěžovací frekvencí 5 Hz. Každý pražec byl zatížen 4 500 zatěžovacími cykly. E -modul pražců byl vypočten podle vztahu (48) z posledních 10 zatěžovacích cyklů (stejně jako v kapitole 6.5.3).

6.6.2 Statistické zpracování modulu pružnosti

Výsledky E -modulu se pohybovaly v intervalu od 8,5 GPa do 13,0 GPa a byly zpracovány s použitím statistických metod. S vyhodnoceným E -modulem se dále pracovalo jako se souborem dat o N vzorcích (8 pražců), který byl podroben statistickému zpracování: na odlehlá pozorování, směrodatnou odchylku a 95% predikční interval spolehlivosti. Zvolené metody uvádí např. Jarušková v [108].

Data byla posouzena na výskyt odlehlých pozorování pro vyloučení hodnot, které se z důvodu náhodných chyb, chyb měření nebo vlastností pražce odchylojí od reprezentativní hodnoty. Pro výpočet odlehlých pozorování byl využit vztah (49) pro vyjádření dolního a horního kvartilu a vztah (50) pro mezikvartilové rozpětí (MKR). Posouzení odlehlých pozorování (tab. 18) bylo provedeno použitím intervalu (51), který ve statistickém souboru dat vymezil rozsah výběrových dat pro další zpracování.

$$Q_1 = \frac{X_{(0,25N)} + X_{(1+0,25N)}}{2} \quad Q_2 = \frac{X_{(0,75N)} + X_{(1+0,75N)}}{2} \quad (49)$$

$$MKR = Q_2 - Q_1 \quad (50)$$

$$(Q_1 - 1,5MKR; Q_2 + 1,5MKR) \quad (51)$$

Tab. 18: Vyloučení odlehlých pozorování E -modulu impregnovaných bukových pražců

Položka	Symbol	Jednotka	Vztah	Hodnota
Velikost vzorku	N	[-]	-	8
Horní výběrový kvartil	Q_1	[GPa]	(49)	11,8
Dolní výběrový kvartil	Q_2	[GPa]		9,8
Mezikvartilové rozpětí	MKR	[GPa]	(50)	2,0
Hranice odlehlých pozorování	Dolní	[GPa]	(51)	6,8
	Horní	[GPa]		14,9

Vypočtené hranice pro odlehlá pozorování vymezily interval pro stanovení výběrového vzorku dat. Všechny 8 naměřených hodnot E -modulu impregnovaných bukových prážců leží uvnitř intervalu odlehlých pozorování, a proto byly použity dále. Podle vztahu (52) byla vypočtena střední hodnota (výběrový průměr \bar{X}) a podle vztahu (53) výběrová směrodatná odchylka \bar{s} . Pro zpracování dat byl přijat předpoklad normálního (Gaussova) rozdělení pravděpodobnosti. Výsledky dat byly zpracovány pro 95% predikční interval spolehlivosti hodnoty E -modulu. Pro stanovení intervalu byl vztahem (54) stanoven nejlepší nestranný odhad \bar{s}^2 . Hranice 95% predikčního intervalu spolehlivosti pro E -modul byly vypočteny vztahem (55), kde T_α je percentil 100 $(1 - 0,5p)$ studentova T rozdělení s $N - 1$ stupni volnosti. Hodnota T_α byla převzata z tabulek [109]. Souhrn zpracovaných dat je uveden v tab. 19. a na obr. 43.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (52)$$

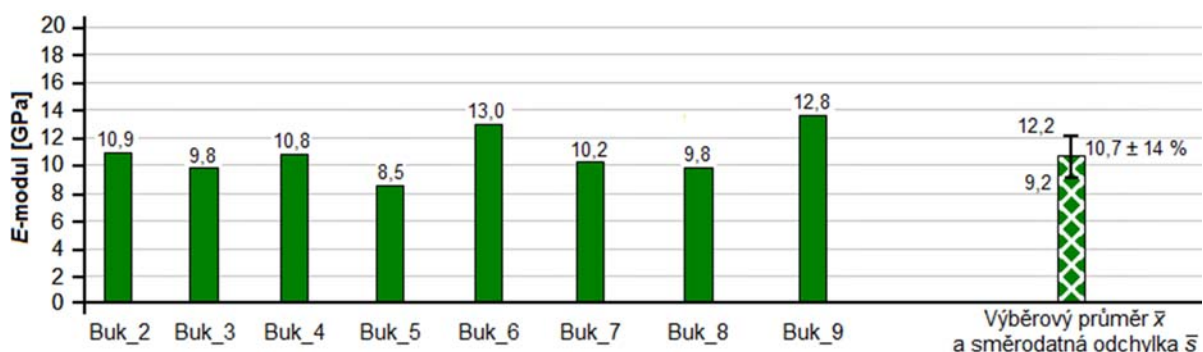
$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (53)$$

$$\bar{s}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1} \quad (54)$$

$$\left(\bar{X} - T_{0,5\alpha}[N-1] \frac{\bar{s}}{\sqrt{N}}; \bar{X} + T_{0,5\alpha}[N-1] \frac{\bar{s}}{\sqrt{N}} \right) \quad (55)$$

Tab. 19: Průměr, směrodatná odchylka a hranice intervalu 95% spolehlivosti E -modulu sady prážců

Položka	Symbol	Jednotka	Vztah	Hodnota
Velikost výběrového vzorku	\bar{N}	[-]	-	8
Výběrový průměr	\bar{X}	[GPa]	(52)	10,7
Výběrová směrod. odchylka	\bar{s}	[GPa]	(53)	1,5
Nejlepší nestranný odhad	\bar{s}^2	[GPa ²]	(54)	2,3
Hranice 95% predikčního intervalu spolehlivosti	Dolní	[GPa]	(55)	9,5
	Horní	[GPa]		12,0



Obr. 43: Výsledky E -modulu sady impregnovaných bukových prážců [47]

Při zatěžovací frekvenci 5 Hz byla vypočtena průměrná hodnota E -modulu sady impregnovaných bukových prážců a relativní směrodatná odchylka $10,7 \text{ GPa} \pm 14 \%$. Interval 95% spolehlivosti pro E -modul sady testovaných prážců je $(10,7 \pm 1,3) \text{ GPa}$.

6.6.3 Zhodnocení variability modulu pružnosti sady bukových pražců

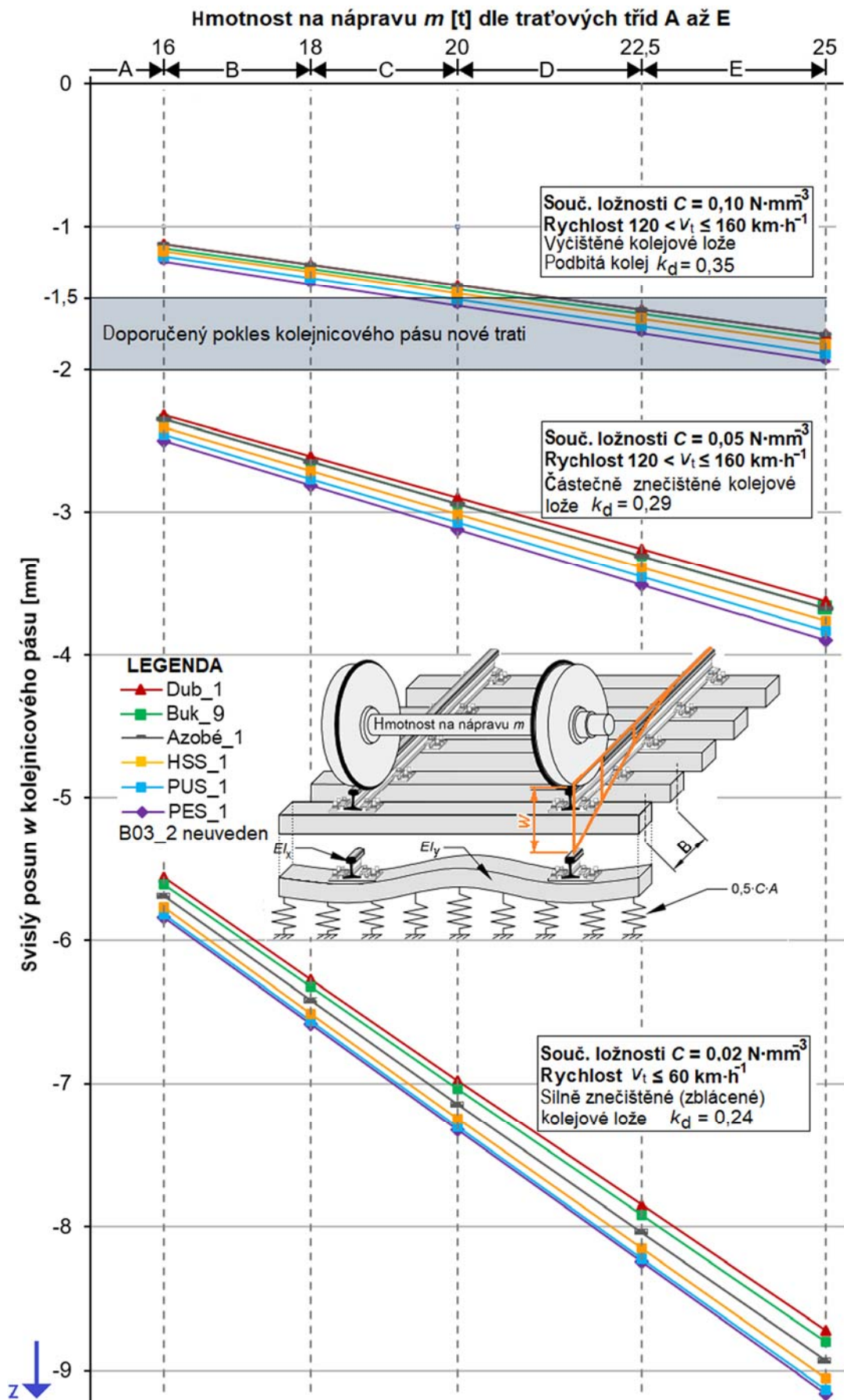
Výsledky E -modulu sady pražců (Buk_2 až Buk_9) byly porovnány s Ticoalu et al. [107], který provedl čtyřbodový ohyb 6 dřevěných výhybkových pražců o rozměrech příčného průřezu 225×115 mm a rozpětím nosníku 2,7 m. Působíště zatížení bylo umístěno ve dvou bodech ve třetinách rozpětí a zatěžování bylo provedeno kvazistaticky (bez cyklického zatěžování) až do porušení pražců. Z pružné zatěžovací větve deformační křivky byl vyhodnocen průměrný E -modul a standardní odchylka ($16,6 \pm 6,2$) GPa. Na základě přímého porovnání hodnot E -modulu pražců Buk_2 až Buk_9 a hodnot, které uvádí Ticoalu, lze vyslovit závěr, že relativní rozdíl vypočtený z průměrné hodnoty je poměrně významný a to 64 %. Absolutní hodnoty jsou alespoň řádově srovnatelné. Rozdíl vyplývá pravděpodobně z odlišných parametrů zkoušek (odlišné geometrii a rozpětí nosníku, rozdíl v zatěžování, v geografickém původu dřeva, v jeho vlhkosti, a v impregnační látce).

6.7 Parametrická studie vlivu ohybové tuhosti pražce na pokles konstrukce koleje

V teoretické části byl zpracován výpočet pražce jako nosníku na pružném podkladu dle teorie Timoshenka a Zimmermana. Výstupem výpočtu je svislý pokles w konstrukce trati v úrovni kolejnicového pásu, který se pružně deformuje pod zatížením kolovou silou. V grafu na obr. 44 jsou souhrnné výsledky výpočtu, který byl zpracován jako parametrická studie a byly v něm aplikovány geometrické a materiálové parametry zjištěné v experimentální části. Parametry výpočtu byly následující:

- moment setrvačnosti příčného průřezu I_y (tab. 15) a E -modul (tab. 17) pražců Dub_1, Buk_9, Azobé_1, HSS_1, PUS_1 a PES_1,
- součinitele ložnosti C (tab. 6), a k nim zvolená traťová rychlost v_t a příslušný dynamický součinitel δ (tab. 9):
- $C = 0,10 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$; $v_t = 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ až $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; $\delta = 1,25$,
- $C = 0,05 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$; $v_t = 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ až $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; $\delta = 1,25$,
- $C = 0,02 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$; $v_t < 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; $\delta = 1,90$.

Výpočet pražce z předpjatého betonu označeného B03_2 nebyl v parametrické studii zahrnut z důvodu odlišnosti rozměrů příčného průřezu pražce ve střední části a v části pod kolejnicovými pásy, které mají vliv na výpočet momentu setrvačnosti pražce. Výpočet byl připraven pro prizmatické tvary pražce a pražec B03 není ze zmíněného důvodu uveden.



Obr. 44: Pokles pražce (o různé ohybové tuhosti EI_y a rozměrech b a h) v místě pod kolejnicovým pásem při různém součiniteli ložnosti C vypočtený jako nosník na pružném podkladu

Podle výsledků zpracovaných na obr. 44 je jasně zřetelná lineární závislost mezi zatížením a svislým posunem nosníku na pružném podkladu. V grafu je 18 linií rozdělených dle typu pražce, které jsou ve směru osy z rozdělené ve třech skupinách podle kvality pražcového podloží vyjádřené součinitelem ložnosti C . Naopak různý E -modul materiálu pražce a nepatrné rozdíly v rozměrech příčného průřezu vedly k významně nižším rozdílům ve výpočtu poklesu w . Z toho lze usoudit dílčí závěr, že průhyb se významně mění v závislosti na součiniteli ložnosti C , tedy na kvalitě pražcového podloží a až v druhé řadě na E -modulu pražce. Z hlediska výše uvedeného výpočtu a za daných podmínek se ukazuje, že pro celkovou kvalitu dráhy je na rozdíl od E -modulu pražce významnější součinitel ložnosti podkladu C resp. údržba trati. Z toho plyne, že požadavky na E -modul pražců z polymerů nemusejí z pohledu poklesu kolejnicového pásu pod zatížením bezprostředně sledovat E -modul pražců z předpjatého betonu nebo impregnovaného tvrdého dřeva. Dle výsledků na obr. 44 lze dále vynést dílčí závěry:

- Pražce z polymeru typu PES, PUS a HSS mají v místě zatížení řádově srovnatelný průhyb jako dubový a bukový pražec, a proto lze očekávat, že rozsah aplikace pražců ze sledovaných typů polymeru může být z hlediska průhybu v železničních tratích obdobná jako u používaných pražců ze dřeva.
- Pražce z polymeru typu PES a PUS vykazují nepatrně větší průhyb než pražce z impregnovaného dřeva, a proto lze jich aplikaci očekávat na méně zatížených tratích na rozdíl od pražce z polymeru typu HSS.

Na základě řešeného výpočtu nosníku na pružném podkladu a doporučeného průhybu konstrukce železniční tratě pod zatížením rovnému 1,5 mm až 2 mm [60] lze při součiniteli ložnosti $C = 0,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$ uvažovat pro:

- Impregnované dřevěné i polymerní pražce nejvyšší nápravovou hmotnost 22,5 t, tj. třídu zatížení D.

Při úvaze součinitele ložnosti $C = 0,05 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$ a doporučeného průhybu konstrukce železniční tratě 1,5 mm až 2 mm lze impregnované dřevěné a polymerní pražce doporučit pouze pro nižší třídy zatížení a nižší traťovou rychlost (aplikace např. na regionálních tratích s rychlostí do $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ nebo na městských drahách).

Nicméně pokud bude brán v úvahu větší mezní průhyb železniční tratě pod zatížením v úrovni pražce např. o hodnotě 3 mm, lze při součiniteli ložnosti $C = 0,05 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$ uvažovat pro:

- Impregnované dřevěné i polymerní pražce nejvyšší nápravovou hmotnost 20,0 t, tj. třídu zatížení C.

Při součiniteli ložnosti $C = 0,02 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$, který odpovídá silně znečištěnému zblácenému kolejovému loži a havarijnímu stavu tratě, nelze z hlediska výpočtu průhybu uvažovat žádný ze sledovaných materiálů pražce. U lineárního materiálového modelu zeminy lze však s rostoucí deformací předpokládat nižší přesnost výpočtu, a proto se pro $C = 0,02 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3}$ a příslušné nápravové hmotnosti očekává reálně nižší pokles kolejnicového pásu než v grafu uvedených 5,8 až 9,1 mm.

6.8 Zhodnocení výsledků ze zkoušky namáhání pražce ohybem

Železniční pražce uplatňované v klasické konstrukci koleje se podílejí na svislé tuhosti konstrukce koleje. Zatímco pražce z předpjatého betonu jsou často preferovány pro jejich trvanlivost, jejich nadměrná ohybová tuhost a nízký koeficient útlumu lze považovat jen za uspokojivé. Pražce o nižší ohybové tuhosti, mezi které patří polymery a tvrdé impregnované dřevo, jsou potřebné v úsecích trati s požadavkem na zpružnění kolejového roštu. U pražců z polymerů lze na základě většího průhybu pod zatížením předpokládat vyšší koeficient útlumu tlumení vibrací než u dřevěných pražců.

Výzkum prezentovaný v této kapitole se zabýval mechanickou odolností pražců laboratorně ověřovanou při namáhání pražce ohybem. Cílem bylo zejména deformovat pražce v pružné oblasti jejich pracovního diagramu, ve kterém lze deformaci charakterizovat E -modulem a jeho závislostí na vybraných zatěžovacích frekvencích. Namáhání ohybem byly podrobeny tři polymerní typy pražce. Dále byly stejnému namáhání podrobeny pražce z tvrdého impregnovaného dřeva a předpjatého betonu, jejichž výsledky byly považovány za referenční.

V první fázi byla provedena zkouška pražců ohybem, ve které byly pražce podrobeny velikosti zatížení, které svou velikostí přibližně třikrát přesahuje jejich běžnou aplikaci v koleji. Cílem první části bylo ověřit, zda se pražce ve zmiňovaném rozsahu zatížení deformují pružně. Výsledky zkoušky potvrdily lineární závislost mezi zatížením a deformací, a tím bylo umožněno uvažovat deformaci pražců ve zvoleném zatížení jako pružnou a v další části práce ji charakterizovat E -modulem.

V druhé fázi byla provedena zkouška pražců ohybem při zatěžovací frekvenci 0,005 Hz až 7 Hz. Dřevěné pražce vykazovaly srovnatelné hodnoty E -modulu jako polymerní pražce nebo nepatrně vyšší v závislosti na typu pražce. Na základě přímého porovnání mohou být testované polymerní pražce z pohledu ohybové tuhosti vhodnou alternativou při výměně dřevěných pražců.

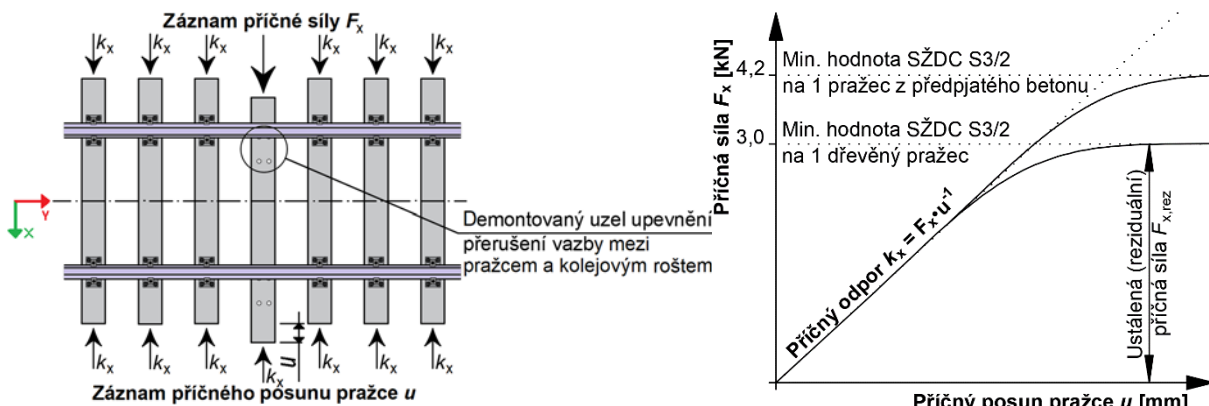
Z vyhodnocení zatěžování polymerních pražců různými zatěžovacími frekvencemi bylo zřetelné jiné chování než u pražců ze dřeva, které bylo přisouzeno viskoelastickému modelu polymerních pražců. Vzhledem k výsledkům, které prokázaly nárůst tuhosti pražců z polymerů při zatížení s frekvencí 1 Hz a vyšší, lze vyslovit závěr o jejich frekvenčně závislé tuhosti, zatímco dřevěné pražce naznačovaly především elastické chování. Z toho vyplývá, že pro zatěžování polymerních pražců při standardizovaném laboratorním měření nebo v numerickém modelu musí být brána v úvahu taková zatěžovací frekvence, která odráží traťovou rychlost v koleji.

Ve třetí fázi ve zkoušce provedené na sadě 8 pražců z impregnovaného bukového dřeva výsledky potvrdily předpoklad, že mechanické vlastnosti pražců prezentovaných E -modulem se mohou lišit v důsledku přirozeného původu dřeva. Zjištěná směrodatná odchylka od průměrné hodnoty byla 14 %.

7 Stanovení příčného odporu pražce a jeho vliv na stabilitu bezстыkové koleje

Stabilita bezстыkové koleje (BK) ve vodorovné rovině závisí na odporu pražce, odporu v uzlu upevnění a ohybové tuhosti kolejnicových pásů [71]. Příčný odpor pražce k_x závisí na kolejovém loži (tvar profilu, konsolidace a stupeň znečištění kameniva), na typu pražce (materiál a geometrie) a na udržovacích pracích [79].

Hodnota příčného odporu se experimentálně stanovuje na jednom pražci, který má přerušenu vazbu se zbytkem kolejového roštu (obr. 45). Při zkoušce pro stanovení příčného odporu pražce se zaznamenává zatížení F_x působící v podélné ose pražce a jemu odpovídající příčný posun u [111]. Průběh příčného odporu k_x je zřejmý z obr. 45 a lze ho idealizovat bilineárním diagramem. První část diagramu vystihuje příčný odpor k_x , ve kterém je příčná síla F_x přímo úměrná posunu pražce u . Po překonání posunu pražce u o 0,5 až 2,0 mm dochází ke změně na ustálený (reziduální) odpor, při kterém nedochází ke zvyšování příčné síly, který je označen jako $F_{x,rez}$. Předpis SŽDC S3/2 [110] stanovuje pro kolej s pražci z předpjatého betonu minimální hodnotu F_x rovnou $7 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ($4,2 \text{ kN}$ na jeden pražec při osové vzdálenosti $0,6 \text{ m}$) a pro kolej s pražci z tvrdého impregnovaného dřeva $5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ($3,0 \text{ kN}$ na jeden pražec).



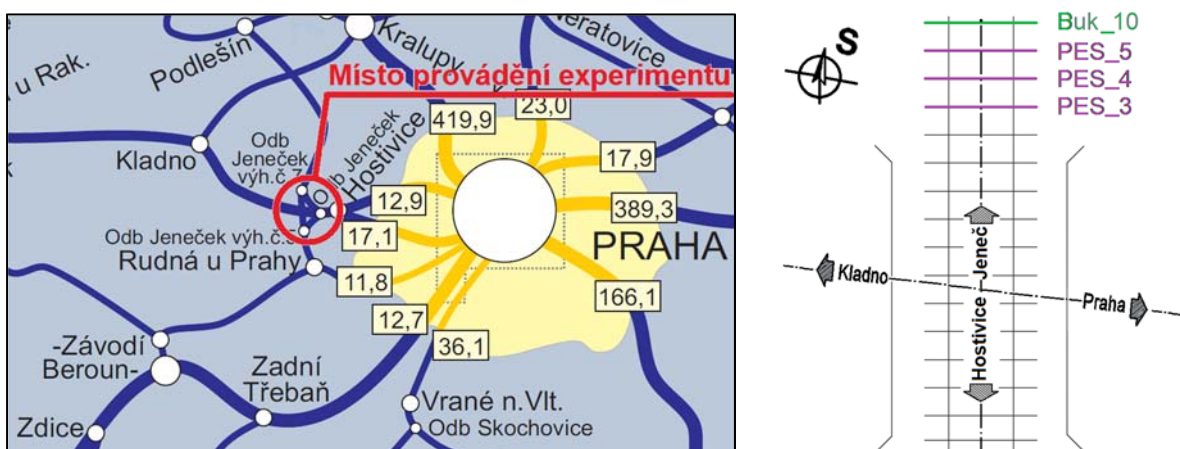
Obr. 45: Příčný odpor pražce: princip stanovení, vyhodnocení a minimální hodnoty dle SŽDC S3/2

7.1 Příčný odpor pražce stanovený in situ v Hostivici

Měření příčného odporu pražce provedené in situ vyžaduje vhodný systém protizátěže, která umožňuje vytlačování pražce. V železniční trati se jedná například o zařízení k opření o kolejnici [111] nebo o stabilní oporu (sloup, stěna). Pro stanovení příčného odporu polymerních pražců provedené in-situ byla zvolena železniční trat v Hostivici u Prahy, kde bylo ve vymezeném úseku umožněno pražce uložit a současně byla dostupná i protizátěž v podobě mostního křídla z vyztuženého betonu.

7.1.1 Popis železniční trati zvolené pro provedení zkoušky

Místo provádění zkoušky je vyznačeno na obr. 46. Místo měření se nachází v oblasti křížení tratí. Zahrnuje nepoužívanou železniční trať, která je spojkou mezi tratěmi č. 121 (Hostivice – Podlešín) a 122 (Praha – Hostivice – Rudná u Prahy). Provoz ve spojce byl zastaven v roce 1993 [112] a z pohledu bezpečnosti provádění zkoušky se stal vhodný pro provádění výzkumu polymerních pražců. Ve stejné lokalitě byly, mimo stanovení příčného odporu, provedeny i ostatní in situ zkoušky, které jsou vyjmenované v tab. 14. Zkoušky byly přidruženy k projektu „Aplikace plastových FRP materiálů na železničních mostech a tunelech“ vedenou doc. Ryjáčkem, Katedrou ocelových a dřevěných konstrukcí, FSv, ČVUT v Praze.



Obr. 46: Mapa tratí [113] a schéma lokality s vyznačenou polohou pražců podrobených zkouškám.

Úsek trati, ve kterém byly prováděny zkoušky, je jednokolejný, neelektrizovaný a umístěný v přechodové oblasti u ocelového mostního objektu ve směru Jeneč. Stávající železniční svršek v místě provádění zkoušky se skládal ze stykovaných kolejnic tvaru R65 upevněných pomocí systému upevnění typu K na bukových pražcích roku výroby 1989 s osovou vzdáleností 650 mm. Údržba GPK a čištění kameniva kolejového lože ve spojce nebylo pravděpodobně od ukončení provozu prováděno. Na místě byla provedena kopaná sonda, kterou byla stanovena následující skladba pražcového podloží:

- kolejové lože o tloušťce cca 370 mm znečištěné zeminou,
- šterkopísek (konstrukční vrstva).

7.1.2 Příprava pražců pro stanovení příčného odporu

Zkoušce stanovení příčného odporu pražce byly podrobeny celkem 2 pražce.

Označení sledovaných pražců je:

- polymery: PES_3, PES_4.

Jejich poloha je zřejmá z obr. 46 a popis z tab. 15. Umístění pražců PES_3 a PES_4 na místo původních dřevěných pražců bylo provedeno podle následujícího postupu: vyjmutí a deponování kameniva z mezipražcového prostoru, vyznačení polohy stávajícího dřevěného pražce, vyjmutí dřevěného pražce kleštěmi svisle vzhůru (značení lavičky z kameniva dle obr. 47), usazení polymerního pražce na vyznačenou lavičku a zašterkování kamenivem. Šterková lavička byla zachována za účelem zajištění rovinnosti kameniva pro maximalizaci jeho kontaktu s ložnou plochou pražce.

Po doplnění kameniva bylo provedeno hutnění (obr. 47) za účelem jeho homogenizace. Kamenivo bylo homogenizováno účinky jednosměrné vibrační desky typu 16 kN/80 kg určené pro zemní stavební práce a pro hutnění vrstev z asfaltového betonu či dlažby. Vibrační deska se skládá z vibrátoru s excentrem poháněným spalovacím motorem, z rámu s madlem a z hutnicí desky. Základní parametry vibrační desky jsou: síla úderu 16 kN, hmotnost 80 kg, rozměry desky 350 × 500 mm.

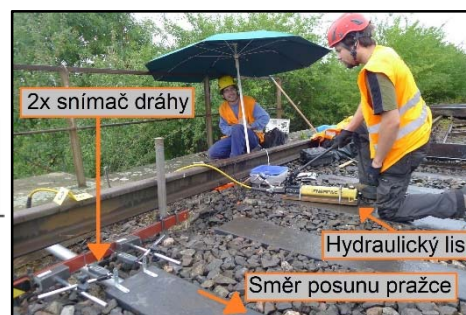
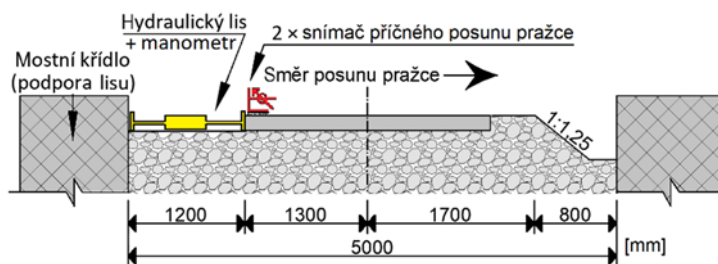
Kamenivo bylo po dobu 45 minut pojížděno v mezipražcovém prostoru a za hlavami pražců v úrovni úložné plochy pražců. Použití dynamického stabilizátoru nebylo z technických a ekonomických důvodů možné aplikovat.



Obr. 47: Příprava pražců z polymeru pro stanovení jejich příčného odporu in situ [12]

7.1.3 Postup stanovení příčného odporu pražce in situ

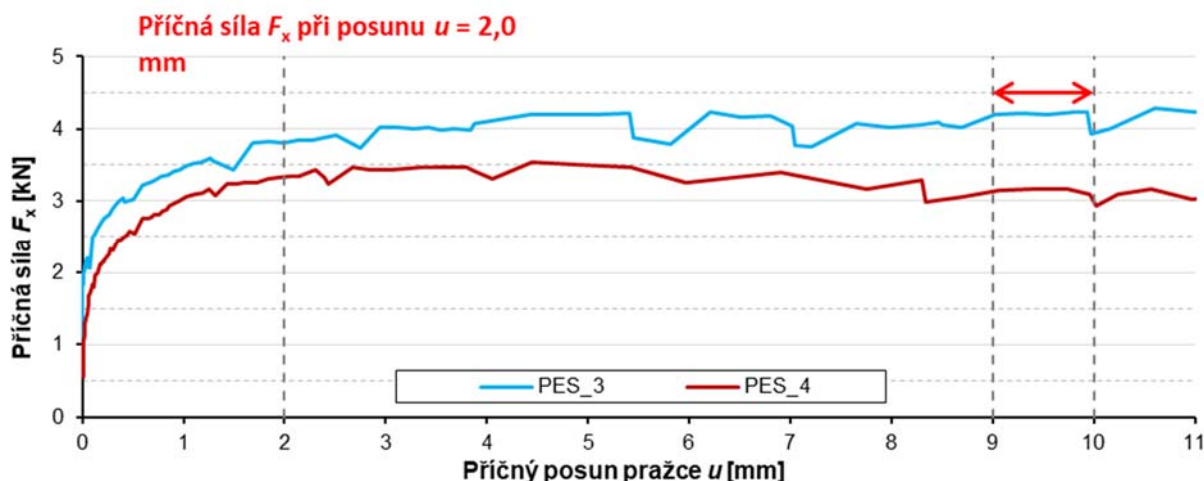
Zapuštěné kolejové lože v místě přechodové oblasti mostu, kde bylo k dispozici mostní křídlo pro opření hydraulického lisu, bylo upraveno do tvaru otevřeného kolejového lože se sklonem svahu 1:1,25 dle SŽDC S3 (obr. 48). Stanovení příčného odporu pražce bylo provedeno bez prvků uzlu upevnění, aby byla přerušena vazba mezi pražcem a kolejovým roštem (obr. 45). Měření příčného posunu pražce u bylo provedeno úchytkoměry Mitutoyo upevněnými do magnetických stojánek Noga připevněných na stojinu kolejnice (obr. 48). Na měřených pražcích byly instalovány kovové úhelníky, o které byly opřeny hroty úchytkoměrů. Sestava s manuálním hydraulickým lisem Enerpac byla opřena o betonové křídlo mostu. Při provádění zkoušky byl pořízen kontinuální záznam příčné síly F_x a posunu pražce u .



Obr. 48: Stanovení příčného odporu pražce in situ v Hostivici [12]

7.1.4 Výsledky příčného odporu pražce stanovené in situ

Záznam dat z měření příčného odporu pražce PES_3 a PES_4 je na obr. 49. Příčný odpor pražce bývá v odborné literatuře orientované na BK (např. Lichtberger [76]) posuzován jako hodnota příčné síly F_x při posunu pražce u rovnému 2,0 mm a také jako reziduální příčná síla $F_{x,rez}$, jak vysvětluje obr. 45, která byla vypočtena jako průměrná hodnota při posunu u mezi 9 mm a 10 mm.



Obr. 49: Záznam měření příčného posunu pražce in situ

Tvar průběhu příčné síly obou sledovaných pražců je přibližně podobný. Ze záznamu je patrné, že příčná síla při posunu u rovnému 2 mm je F_{x,PES_3} rovná 3,8 kN a F_{x,PES_4} rovná 3,3 kN. Reziduální příčná síla $F_{x,rez,PES3}$ je rovná 4,2 kN a F_{x,rez,PES_4} je rovná 3,1 kN. Podle požadavku předpisu SŽDC S3/2 pro pražce ze dřeva musí být hodnota příčného odporu na jeden pražec minimálně 3,0 kN. Požadovanou hodnotu oba sledované pražce splňují.

Na druhou stranu, hodnoty stanoveného příčného odporu sledovaných pražců vyhovují jen s minimální rezervou a jsou významně nižší, než je běžně uváděno pro pražce ze dřeva ve stabilizovaném kamenivě kolejevého lože, které Lichtberger uvádí o hodnotě 6,0 kN na 1 dřevěný pražec [76]. S ohledem na výsledky se předpokládá,

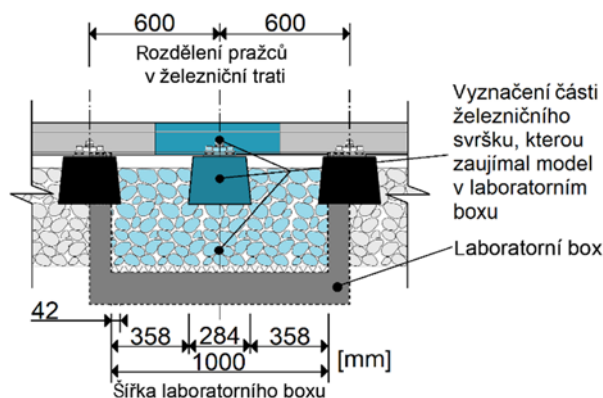
že příčný odpor pražce z polymeru je vyšší. Důvodem k výsledkům zkoušky mohou být podmínky, za kterých byla zkouška prováděna, jako je např. znečištění kameniva nebo tloušťka vrstvy kameniva, která byla hutněna deskou o nedostatečném výkonu. Dalším důvodem nízké hodnoty příčného odporu mohou být nepřesnosti při přípravě a provádění zkoušky, jako je např. nepřesné uložení hydraulického lisu, a tím excentrické působení příčné síly na hlavu pražce. Vhodné by bylo provést nové měření příčného odporu pražce z polymeru v provozované trati s kamenivem konsolidovaným provozem či dynamickým stabilizátorem. Pražce z polymeru však nebyly v trati v ČR doposud aplikovány, a tak bylo potřeba provést nové měření v laboratorních podmínkách. Kamenivo kolejového lože v železniční trati je významně proměnné prostředí, a proto je z pohledu eliminace odchylek výhodné provádět měření příčného odporu v laboratoři. To umožňuje stanovit příčný odpor odlišných typů pražců z různých materiálů a tvarů za stejných laboratorních podmínek. Stanovení příčného odporu pražce v laboratorních podmínkách bylo dalším cílem.

7.2 Příčný odpor pražce stanovený v laboratoři

Předpokladem pro stanovení příčného odporu pražce v laboratorních podmínkách s minimálním množstvím odchylek a tím snížení nepřesnosti výsledku laboratorní zkoušky, byla příprava modelu, který svými rozměry, použitými materiály a způsobem výstavby vystihuje železniční svršek trati. Bylo zvoleno měřítko modelu 1:1. Pro snížení objemu prací při výstavbě byl zvolen model s jedním pražcem uloženým v kamenivu kolejového lože. V možnostech laboratoře bylo z pohledu jejich rozměrů a technického vybavení možnost vystavět model v těchto variantách:

- v malém laboratorním boxu odpovídajícímu jedné polovině pražce,
- ve zdvojeném laboratorním boxu odpovídajícímu jednom celému pražci,
- vytvoření profilu kolejového lože na podlaze laboratoře.

Varianta modelu s polovinou pražce a prostým zdvojnásobením výsledků příčného odporu byla vyhodnocena jako nevhodná, jelikož do vyhodnocení vstupuje více parametrů a ne jen tření na povrchu pražce. Na základě přímého srovnání mezipražcového prostoru, který v trati vyplývá z šířky pražce a zejména z rozdělení pražců a šířky dostupného laboratorního boxu, byla zvolena varianta se zdvojeným laboratorním boxem. Na obr. 50 je příčný řez laboratorního boxu a typické rozdělení pražců v koleji o hodnotě 600 mm dle předpisu SŽDC S3. Z obrázku je patrné, že šířka laboratorního boxu vhodně vystihuje mezipražcový prostor v železniční trati.



Obr. 50: Výsek laboratorně modelovaného železničního svršku pro stanovení příčného odporu pražce

7.2.1 Pražce podrobené stanovení příčného odporu v laboratoři

Laboratornímu stanovení příčného odporu byly podrobeny celkem 4 pražce, které se významně odlišují svým tvarem i materiálem. Jejich popis je uveden v tab. 15 a podrobněji v tab. 20. Označení sledovaných pražců je:

- impregnované tvrdé dřevo: Buk_9,
- polymery: PES_2, HSS_atyp,
- předpjatý beton: SB8P_1.

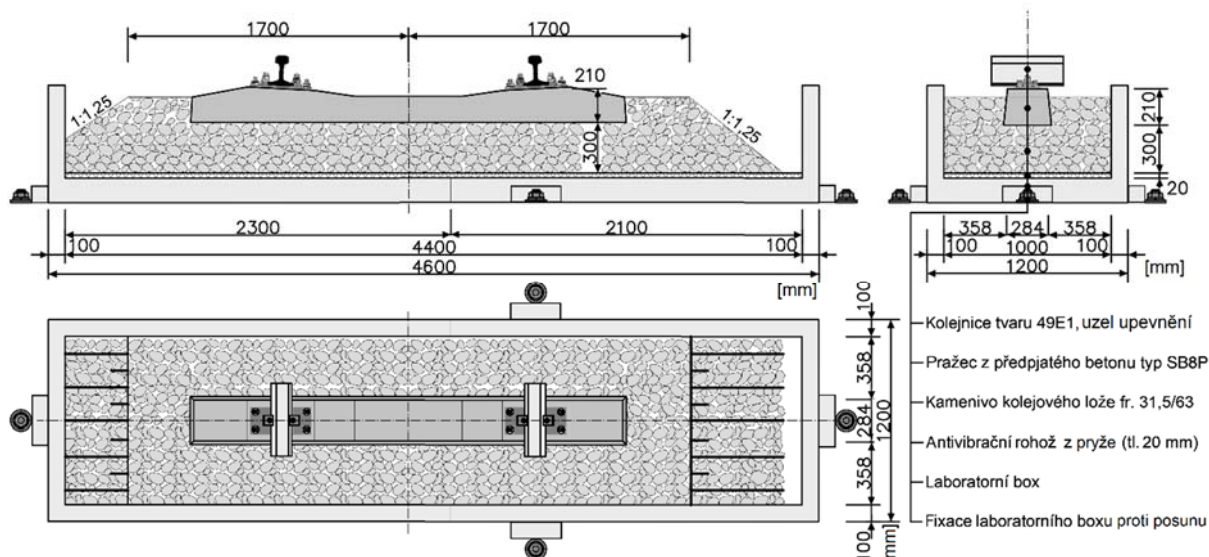
Tab. 20: Rekapitulace pražců podrobených zkoušce stanovení příčného odporu

Označení pražce	Rozměry	Hmotnost	Tvar
	[mm]	[kg]	[-]
Buk_9	257 × 160 × 2600	100	Hranol
HSS_atyp	250 × 150 × 2600	79	Proměnný tvar po délce pražce
PES_2	251 × 150 × 2600	116	Hranol
SB8P_1	260 × 183 × 2600	270	Proměnný tvar po délce pražce

Kritériem pro volbu pražců, které byly podrobeny laboratorní zkoušce, bylo porovnání jejich příčného odporu podle jejich materiálu. Za nejvýznamnější rozdíly mezi zkoušenými pražci lze pokládat: hmotnost, tvar pražce, tvrdost, koeficient tření povrchu pražce a kameniva. Pražec HSS_atyp vychází z monoblokového tvaru, ale je optimalizovaný s cílem zvýšení příčného odporu pražce.

7.2.2 Laboratorní sestava a přístroje pro stanovení příčného odporu pražce

Zkouška proběhla v laboratoři Experimentálního centra Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Stanovení příčného odporu pražce bylo provedeno v laboratorním boxu o vnitřních rozměrech 4,4 × 1,0 × 0,6 m, který umožňuje stavbu modelu železničního svršku v měřítku 1:1. Laboratorní box byl složen z montované a ze svařované části. Rozměry a popis jsou na obr. 51 a stavba modelu na obr. 52. Laboratorní box byl zabezpečen proti pohybu použitím kotev uložených v podlaze laboratoře.



Obr. 51: Laboratorní model železničního svršku použitý pro stanovení příčného odporu pražce



Obr. 52: Stavba laboratorního modelu pro stanovení příčného odporu pražce

Příčný pražec byl ve zkušebním boxu uložen do kameniva kolejového lože frakce 31,5/63 mm. Kolejové lože vytvořené v laboratorním boxu mělo šířku v koruně 3400 mm a sklon svahu 1:1,25 a tímto tvarem a rozměry odpovídalo projektovanému stavu jednokolejné trati s kolejí bez převýšení podle předpisu SŽDC S3. Tloušťka vrstvy kameniva kolejového lože pod ložnou plochou pražce byla 300 mm, a tím podle předpisu SŽDC S3 odpovídalo v případě použití betonového pražce trati zařazené mezi celostátní dráhy a regionálních dráhy v ostatních staničních kolejích a v případě dřevěného pražce celostátní dráze a regionálních dráze v traťových a staničních hlavních a předjízdnych kolejích [3].

Kamenivo kolejového lože bylo uloženo na vloženou vrstvu z antivibračních rohoží vyrobených z recyklované pryže. Důvodem pro uložení gumové vrstvy bylo

zvýšení tření mezi zrny kameniva a ocelovou deskou dna boxu tak, aby bylo zabráněno usmýknutí zrn po hladkém povrchu, a nedošlo tak k chybnému měření příčného posunu pražce u při provádění laboratorní zkoušky. Rohože byly vyrobeny z pojeného pryžového granulátu. Modulové rozměry rohože byly $1,5 \times 0,5$ m a její tloušťka 20 mm. Dno zkušebního boxu bylo přesným výřezem z rohoží zcela zaplněno.

Z obr. 51 je patrné, že kolejové lože není ve své levé polovině vedeno sklonem 1:1,25 až na dno zkušebního boxu, ale je ukončeno jeho stěnou. Tato odchylka od tvaru kolejového lože vyplynula z dispozice laboratoře a uložení modelu a zařízení pro vyvození příčné síly F_x v místnosti. Vzhledem ke směru posunu pražce při provádění laboratorní zkoušky však není tato odchylka s ohledem na výsledky zkoušky považována za významnou.

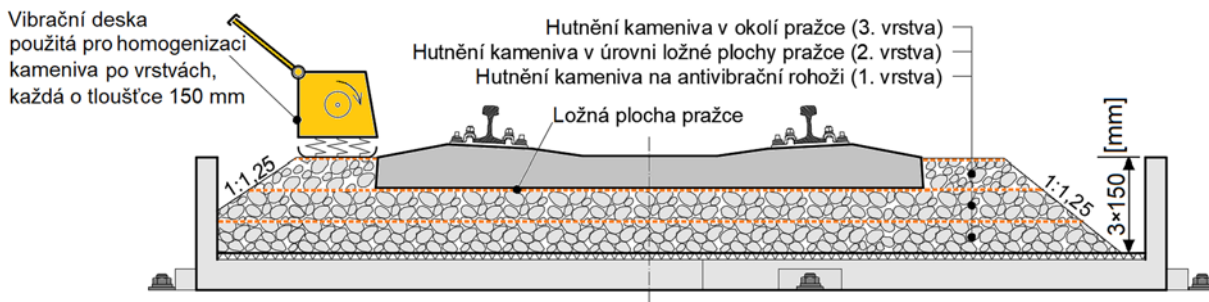
Laboratorní box byl umístěn pod masivním ocelovým zatěžovacím rámem, který sloužil jako podpora pro zařízení pro vyvození příčné síly F_x . Provádění zkoušky v laboratoři umožnilo k vyvození zatížení použít hydraulický válec se zdrojem oleje z ručního hydraulického čerpadla Enerpac nebo z hydraulického agregátu systému Inova. Kritériem pro výběr byla opakovatelnost zkoušky, kterou lze pravděpodobněji očekávat při použití agregátu systému Inova. Pražec byl zatížen hydraulickým válcem Inova typ AH 250-200 V1 o maximálním statickém zatížení 250 kN s pracovní dráhou válce 200 mm.

Pro měření posunu pražce byly využity snímače dráhy HBM typ W20TK s měřicím rozsahem ± 20 mm. Pro záznam dat z hydraulických válců a ze snímačů dráhy byla použita měřicí ústředna Dewetron 30-16, která snímala data se vzorkovací frekvencí 50 Hz. Rychlost záznamu dat byla vzhledem k rychlosti zatížení $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ při provádění zkoušky dostatečná.

7.2.3 Hutnění kameniva v laboratorním boxu

Stavba modelu zahrnovala uložení antivibračních rohoží na dno laboratorního boxu a nanášení kameniva do úrovně ložné plochy pražce odpovídající tloušťce 300 mm. Nanášení kameniva bylo rozděleno do dvou vrstev, každá 150 mm silná a každá z nich byla homogenizována vibrační deskou. Schéma vrstev je patrné z obr. 53.

Hutnění bylo provedeno pomocí stejného typu desky (16 kN/80 kg), která byla aplikována při in situ měření v Hostivici. Každá vrstva kameniva byla hutněna pojezdy po dobu 20 min pro vytvoření šterkové lavičky. Předpokládá se, že účinky vibrační desky po delší dobu by nevedly k lepší homogenizaci kameniva.



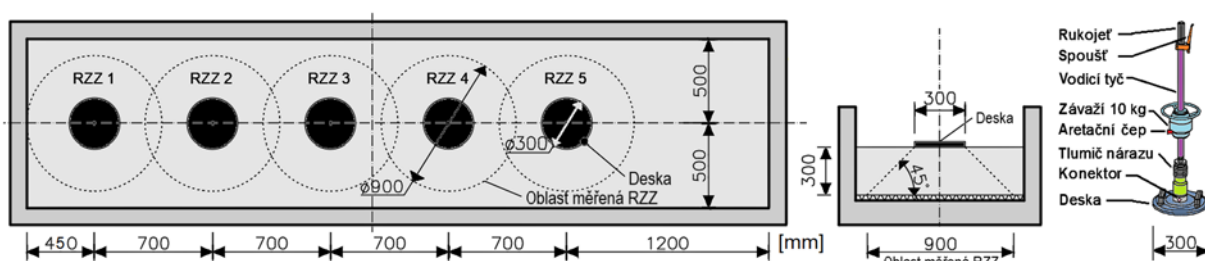
Obr. 53: Stavba modelu s naznačením vrstev kameniva kolejového lože a jejich dynamické stabilizace. Po homogenizaci kameniva byl v podélné ose laboratorního boxu uložen pražec. Po urovňání pražce do vodorovné polohy byla až do úrovně úložné plochy pražce doplněna 3. vrstva kameniva a opětovně byla provedena homogenizace kameniva pomocí pojezdů vibrační desky.

Po ukončení laboratorní zkoušky byl laboratorní model rozebrán. Pražec byl z modelu vyjmut, kamenivo bylo z laboratorního boxu manuálně přemístěno do textilních vaků a zednických van. Antivibrační rohože byly ponechány v boxu. Takto vyprázdněný laboratorní box byl připraven pro stavbu následujícího modelu. Úplné vyklizení kameniva z boxu mezi jednotlivými modely bylo energeticky a časově extrémně náročné, ale zajistilo úplné rozpojení zrn kameniva mezi modely, a tím lepší porovnatelnost výsledků jednotlivých laboratorních modelů.

Lze předpokládat, že kvalita zhutnění kameniva má přímý vliv na výsledky měření příčného odporu pražce. Z tohoto důvodu byla po dokončení druhé vrstvy kameniva (úroveň úložné plochy pražce) u každého modelu provedena kontrola kvality hutnění kameniva, aby bylo možné ověřit případnou nehomogenitu modelu a předejít chybným výsledkům zkoušky. Kontrola zhutnění byla provedena nepřímou metodou pomocí rázové zatěžovací zkoušky (RZZ), kterou se vyhodnocuje rázový modul deformace M_{vd} . Tato metoda se užívá pro stanovení únosnosti vrstev pražcového podloží ze zemin různé frakce o velikosti zrna až do 63,5 mm. Smyslem aplikace RZZ v laboratorních modelech bylo vzájemné porovnání modulu M_{vd} mezi modely a ne jeho absolutní hodnota, která je určitou měrou nepřesná z hlediska konstrukce laboratorního modelu založeném na tuhém ocelovém dně zkušebního boxu pokladeném vrstvou antivibrační rohože. Použitá měřicí sestava pro provádění RZZ se nazývá LDD100 (obr. 54 a obr. 55) a skládá se z kruhové kovové desky o průměru 300 mm, na kterou dopadá z výšky závaží o hmotnosti 10 kg pohybující se na svislé vodící tyči doplněné o tlumič nárazu. Sestava je doplněna vyhodnocovací jednotkou, na kterou je napojen snímač uložený v desce [114].

V RZZ se zkušební deska zatěžuje rázem od pádu závaží z definované výšky na sestavu pružin, která vyvolá silový účinek 7070 N působící po dobu 18 ms. Zkušební deska obsahuje snímač zrychlení, kterým se zaznamená zatlačení desky do štěrku. Při konání RZZ se provádějí tři konsolidační rázy a tři měřicí rázy. Modul M_{vd} vyhodnocený měřicí ústřednou se vypočítá z tří měřicích rázů [114].

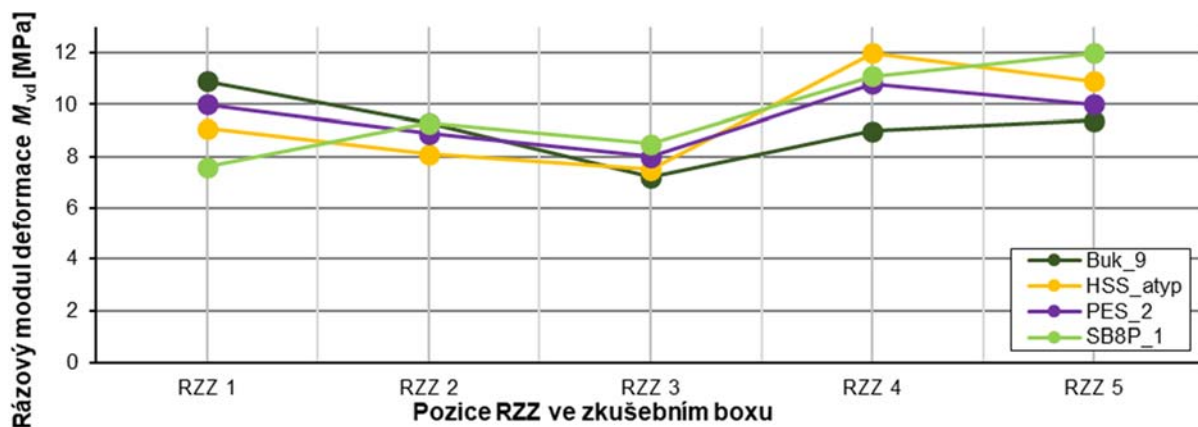
RZZ byly provedeny v každém modelu. V boxu byly rozmístěny do pěti různých poloh (RZZ 1 až RZZ 5), které jsou patrné z obr. 54. RZZ byly umístěny na podélnou osu laboratorního boxu, aby výsledky M_{vd} nebyly ovlivněny působením stěn boxu. Vzájemné odsazení mezi RZZ bylo zvoleno tak, aby rázy při provádění zkoušky dodatečně neuhutnily štěrk a nezkruslovaly tím výsledky. Jejich shrnutí je na obr. 56.



Obr. 54: Poloha RZZ na kamenivu v úrovni ložné plochy pražce a schéma sestavy RZZ



Obr. 55: Laboratorní model ve fázi provádění RZZ a ve fázi před stanovením příčného odporu pražce

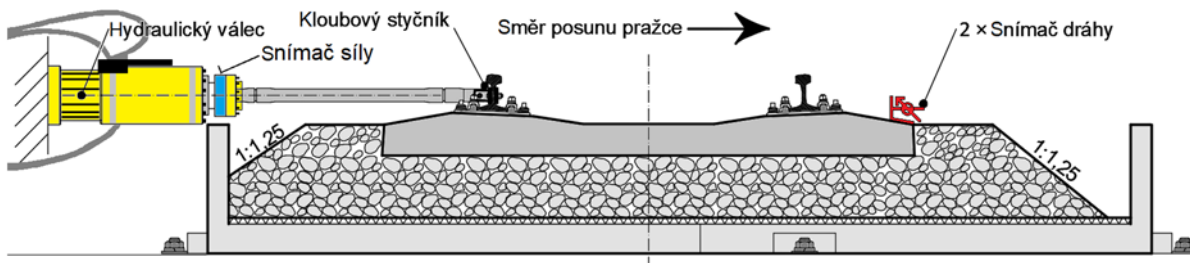


Obr. 56: Výsledky rázového modulu deformace M_{vd} z provedené RZZ

Výsledky M_{vd} v grafu výše lze rozdělit na dvě skupiny a to RZZ 1 až RZZ 3, které jsou nižší než u RZZ 4 a RZZ 5. Tuto odlišnost lze předpokládat z důvodu rozdílné tuhosti dna laboratorní boxu, které má v levé a pravé polovině rozdílnou tloušťku. Průměrné hodnoty modulu M_{vd} pro jednotlivé modely označené podle typu pražce a jejich směrodatné odchylky uvedené v závorce jsou $M_{vd, Buk_9} = 9,2 \text{ MPa}$ (1,2 MPa), $M_{vd, HSS_atyp} = 9,5 \text{ MPa}$ (1,7 MPa), $M_{vd, PES_2} = 9,5 \text{ MPa}$ (1,0 MPa), $M_{vd, SB8P_1} = 9,7 \text{ MPa}$ (1,6 MPa). Zhutnění kameniva pozorované pomocí nepřímé metody RZZ bylo v laboratorních modelech vyhodnoceno jako srovnatelné bez zjevných rozdílů, které by mohli zásadní měrou ovlivnit výsledky stanovení příčného odporu pražce. Rozdíly mezi jednotlivými polohami RZZ1 až RZZ5 vyplývají nejspíše z tuhosti dna laboratorního boxu.

7.2.4 Postup stanovení příčného odporu v laboratoři

Posunutí pražce v kamenivu bylo provedeno horizontálním hydraulickým válcem, který na pražec působil přes kloubový styčník připojený ke stojině kolejnice. Přes kolejnici a uzel upevnění docházelo k přenosu vodorovné síly na pražec. Vodorovná síla byla vzhledem ke směru posunu pražce aplikována na kolejnici vzadu, ze strany drážní stezky, a pražec byl tedy tlačén. Sestava a provádění laboratorní zkoušky je znázorněno na obr. 57.



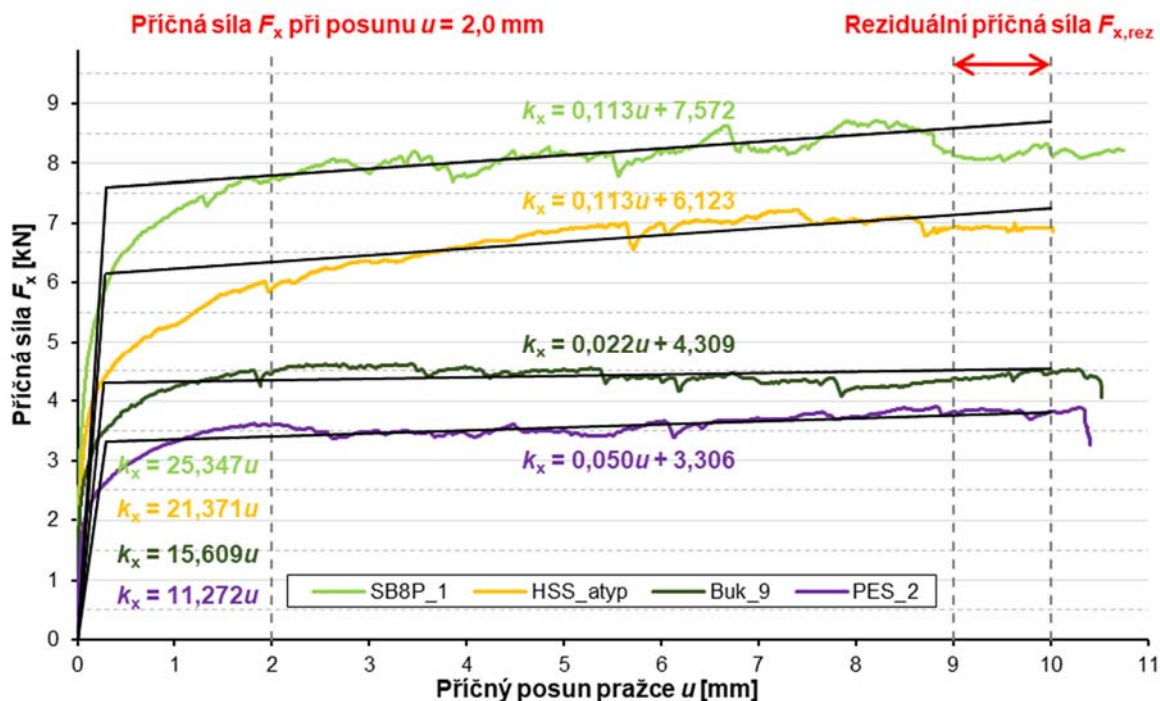
Obr. 57: Provádění laboratorní zkoušky pro stanovení příčného odporu pražce

Posunutí pražce bylo kontinuálně zaznamenáno pomocí dvojice snímačů dráhy uložených relativně vzhledem k podlaze laboratoře. Snímače byly instalovány v laboratorním magnetickém stojánku připevněném na ocelový rám uložený nezávisle na konstrukci laboratorního boxu.

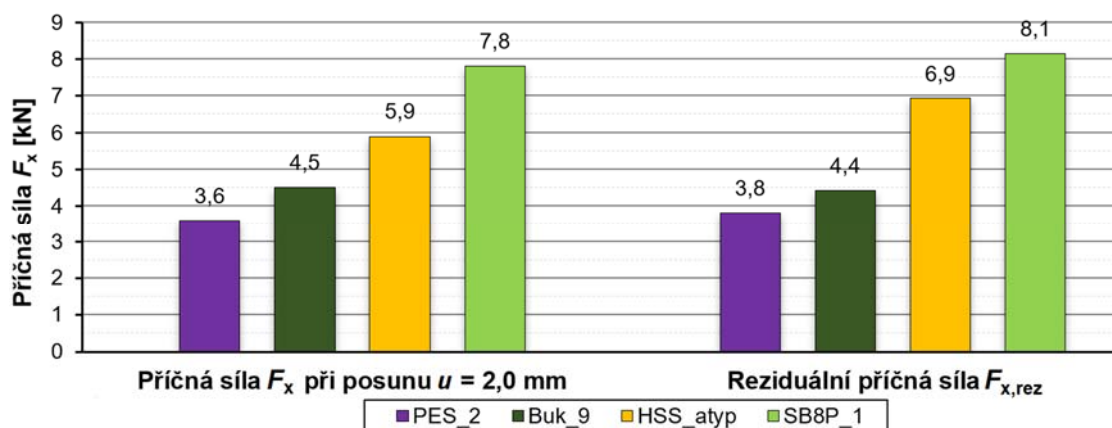
Zatěžování pražce bylo řízeno dráhou. Pro posun byla zvolena konstantní rychlost 10 mm za minutu. Zkouška byla ukončena v okamžiku, kdy byl pražec posunut o dráhu 10 mm, která je s ohledem na obvyklou definici příčného odporu v literatuře (2 mm), dostatečná [68].

7.2.5 Výsledky příčného odporu pražce stanoveného v laboratoři

Záznam dat z měření proložený bilineárním diagramem je na obr. 58. Příčná síla F_x a reziduální příčná síla $F_{x,rez}$ byly vyhodnoceny stejným způsobem jako při in situ stanovení příčného odporu v Hostivici a jsou samostatně na obr. 59.



Obr. 58: Vyhodnocení laboratorního měření příčného odporu pražce a idealizace bilineárním diagramem



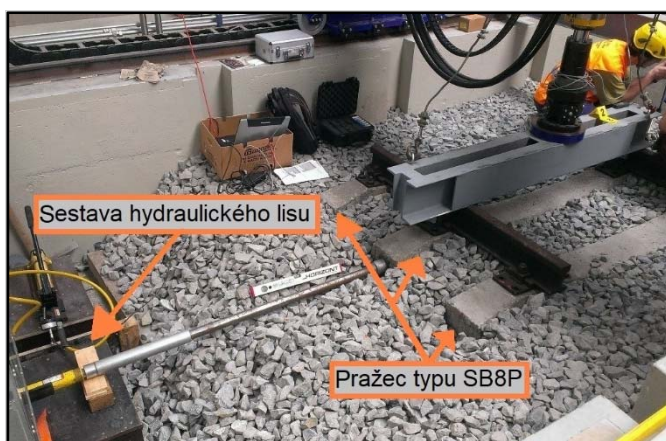
Obr. 59: Příčná síla sledovaných typů pražce F_x vyhodnocená při příčném posunu u 2 mm a reziduální příčný odpor $F_{x,rez}$ (vyhodnocený při průměrném posunu mezi 9 a 10 mm)

Z výsledků polymerního pražce HSS_atyp s proměnným příčným průřezem je patrné, že pražec z polymeru může mít asi o 25 % vyšší hodnotu příčného odpor než pražec ze dřeva. Naopak, z výsledků pražce PES_2 s obdélníkovým průřezem je vidět, že hodnota může být oproti dřevěnému pražci o 25 % nižší. Je tedy zřejmé, že konstrukce pražce má zásadní vliv. Vzhledem k pražci z předpjatého betonu mohou pražce z polymeru dosahovat až 75% jeho příčného odporu.

Z výsledků je dále viditelné, že pražec Buk_9 splňuje požadavek předpisu SŽDC S3/2 na minimální hodnotu příčného odporu 3,0 kN na jeden pražec a stejně tak hodnotu splňují i oba pražce z polymerů. Požadavek na pražec z předpjatého betonu (příčný odpor alespoň 4,2 kN na jeden pražec) byl rovněž splněn.

Výsledky laboratorního stanovení příčného odporu pražců z polymerů lze považovat za úspěšné. Stavba laboratorního modelu je však pouhým přiblížením ke konstrukci železniční tratě a výsledky příčného odporu pražce mohou obsahovat chybu vyplývající z postupu stavby laboratorního modelu, která se od stavby tratě liší. Nicméně lze předpokládat, že poměry (relativní rozdíly) stanoveného příčného odporu pražců jsou zachované. Pro ověření věrohodnosti výsledků byla v literatuře vyhledána data z jiných měření příčného odporu pražce. Ověření výsledků bylo založeno na přímém porovnání výsledků příčného odporu pražce typu SB8P. Pro porovnání byla v literatuře dohledána následující měření:

- Laboratorní měření pražců SB8P_2 a SB8P_3 označené dále jako CDV bylo provedeno Katedrou železničních staveb v Centru dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV) pod vedením doc. Krejčířkové. Měření bylo provedeno v laboratorním boxu [115]. Sestava zahrnovala manuální hydraulickou soupravu působící na čelo pražce a snímače posunu (obr. 60). Výsledky SB8P_2 jsou vzhledem k pražci SB8P_1 porovnatelné a výsledky SB8P_3 jsou přibližně o 50 % vyšší (obr. 61). Oba výsledky byly použity v parametrické studii uvedené dále.



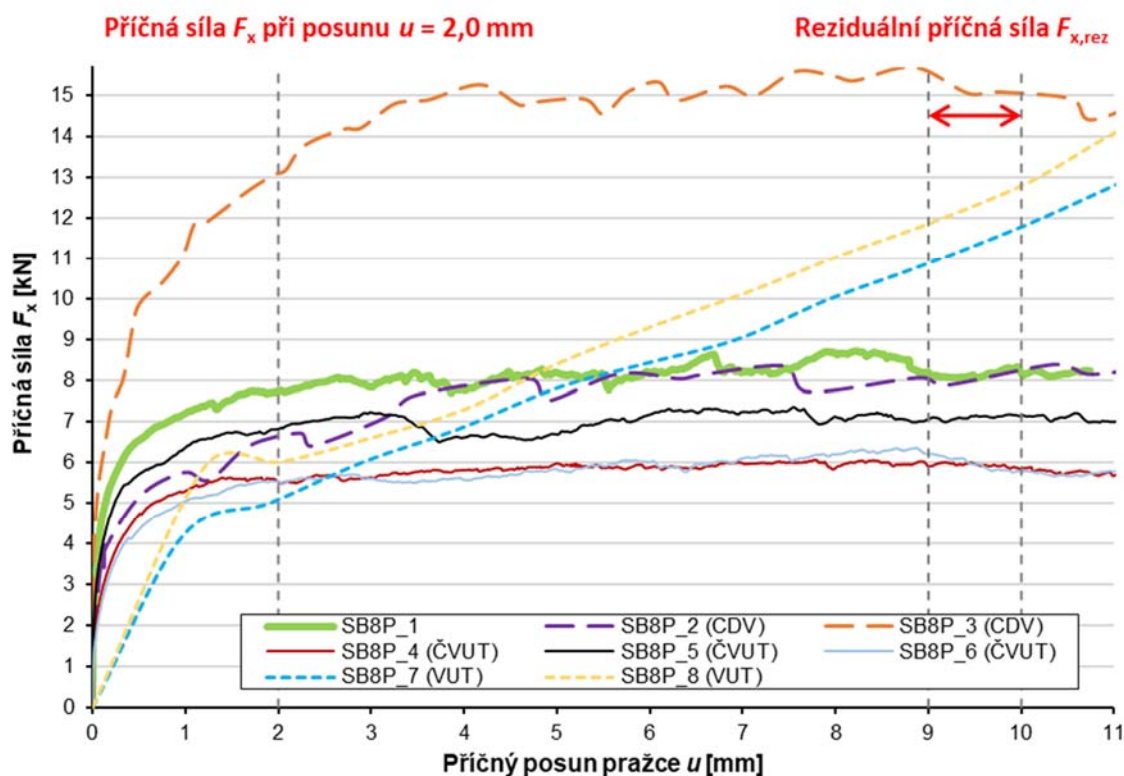
Obr. 60: Měření příčného odporu pražce SB8P ve zkušební boxu Centra dopravního výzkumu [115]

- Laboratorní měření pražců SB8P_4 až SB8P_6 označené dále jako ČVUT bylo provedené Katedrou železničních staveb na ČVUT v Praze pod vedením V. Lojdy. Příprava modelu byla provedena shodným způsobem jako bylo popsáno v kapitole 7.2 s výjimkou postupu při homogenizaci kameniva, které nebylo provedeno vibrační deskou, ale nízkofrekvenčním dynamickým

zatěžováním pražce ve vodorovném směru (maximální síla 40 kN, zatěžovací frekvence 3 Hz, 2000 zatěžovacích cyklů) a současným přitížením ve svislém směru 65 kN v místech kolejnic [116]. Výsledky příčného odporu jsou nižší s rozdílem 15 %, který vyplývá z odlišného postupu homogenizace kameniva.

- In situ měření pražců SB8P_7 a SB8P_8 označené dále jako VUT bylo provedeno pracovníky Ústavu železničních konstrukcí a staveb, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně (VUT) v rámci kvalifikační práce Francové [7]. Měření proběhla v železniční trati Svitavy-Žďárec u Skutče. Z měření byly vybrány záznamy dvou pražců, které Francová označila jako zkouška č. 9 a č. 10. Z porovnání záznamu in-situ měření VUT, které se liší od laboratorního měření CDV a ČVUT tvarem průběhu, vyplývají rozdíly, ke kterým mohlo dojít vlivem způsobu homogenizace kameniva v koleji. Důvodem může být i působení příčné síly od manuální hydraulické soupravy na čele pražce, které vyplývá z konstrukce použitého vytlačovacího přípravku [111].

Porovnání příčného odporu pražce SB8P_1 s výsledky označenými jako CDV, ČVUT a VUT (obr. 61) prokazuje, že výsledky příčného odporu pražce SB8P_1 jsou (vyjma záznamu SB8P_3) věrohodné. Tím lze považovat za věrohodné i výsledky pražců Buk_10, PES_2 a HSS_atyp testované ve stejném laboratorní modelu.



Obr. 61: Porovnání záznamu měření příčného odporu pražce SB8P_1 se záznamem: CDV (Krejčířková; laboratorní) [115], ČVUT (Lojda; laboratorní) [116] a VUT (Francová; in-situ) [7]

7.3 Parametrická studie vlivu příčného odporu pražce na stabilitu BK

Příčný odpor pražců stanovený v laboratoři byl aplikován jako jeden z parametrů v numerickém modelu pro posouzení stability BK ve vodorovné rovině. V numerickém modelu byla aplikováno celkem 6 pražců. Označení pražců v numerickém modelu je:

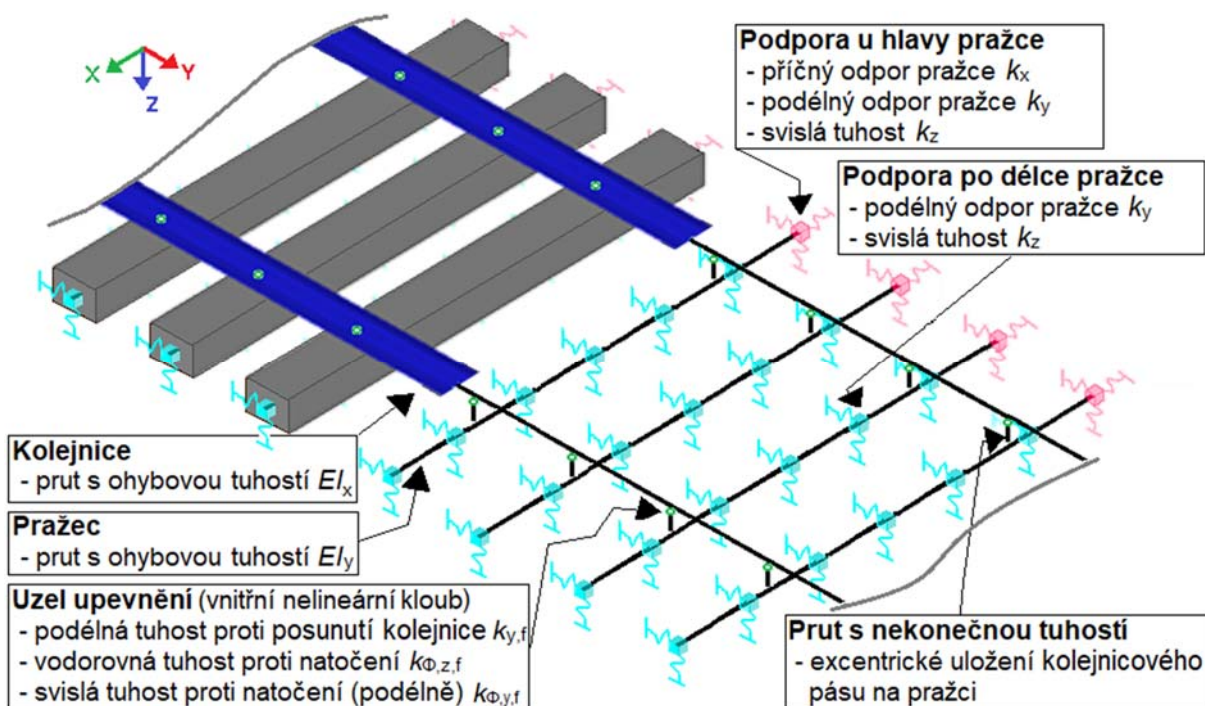
- impregnované tvrdé dřevo: Buk_9,
- polymery: PES_2, HSS_atyp,
- předpjatý beton: SB8P_1, SB8P_2, SB8P_3.

Výpočetní model zahrnoval konstrukci železničního svršku složenou z kolejového roštu a pražcové podloží, které bylo modelováno systémem pružných podpor podle teorie Winklera. Hodnoty ohybové tuhosti a příčného odporu pražce byly převzaty z laboratorních měření v experimentální části a z literatury. Parametry kolejnic, uzlu upevnění a podloží byly převzaty z odborné literatury a technických předpisů. Parametrická studie byla provedena v prostorovém numerickém modelu bezстыkové koleje založeném na metodě konečných prvků (MKP).

Numerický model byl vytvořen pro přímou trať a umožnil výpočet vybočení BK ve vodorovné rovině. Posouzení ztráty stability BK bylo provedeno ve vodorovné rovině. Délka BK v numerickém modelu byla zvolena 300 m a konce koleje byly vetknuté, a proto byla BK uvažována v celé délce s plným napětím. Požadavek na minimální délku BK 150 m, od které se kolej chová jako bezстыková, byl splněn [28].

Numerický model ve 3D byl připraven v software Dlubal RFEM 5.13 [117], který umožnil analýzu prutových konstrukcí a vkládání jejich materiálových a geometrických charakteristik. Jak je ukázáno na obr. 62 v drátěném modelu, BK byla vytvořena jako konstrukce z prutů, kterým byly přiřazeny průřezové a materiálové charakteristiky kolejnice tvaru 49 E1 a sledovaných typů pražců. Uložení kolejnicových pásů na pražcích bylo provedeno prostřednictvím prutů o nulové délce s nekonečnou tuhostí, které měly funkci vnitřního kloubu. Uzel upevnění a jeho tuhost proti posunu a natočení kolejnice byly uvažovány nelineárně.

Bylo zvoleno normální rozdělení pražců o osové vzdálenosti 0,6 m. Příčný odpor pražců v kolejovém loži byl modelován jako pružná podpora ve směru x s definovanou tuhostí umístěná za hlavou pražce. Ve směru y a z byly pražce rovnoměrně podepřeny 7 bodovými podporami.



Obr. 62: Renderované a drátěné zobrazení numerického modelu BK a hlavní vstupní výpočtové parametry

Parametrická studie BK se skládala ze dvou samostatných částí zaměřených na:

- rozbor stability konstrukce a stanovení kritického tvaru vybočení BK,
- stanovení kritické teploty ΔT_{cr} , při které nastane ztráta stability BK [118].

7.3.1 Rozbor stability konstrukce a stanovení kritického tvaru vybočení

Rozbor stability konstrukce provedený v software Dlubal RFEM 5.13 byl zpracován v přídatném modulu RF-Stability. Obsahem rozboru stability bylo vytvořit tvary vybočení BK ve vodorovné rovině, které se liší počtem a symetrií vln. Cílem pak bylo určení energeticky nejjednoduššího kritického tvaru vybočení.

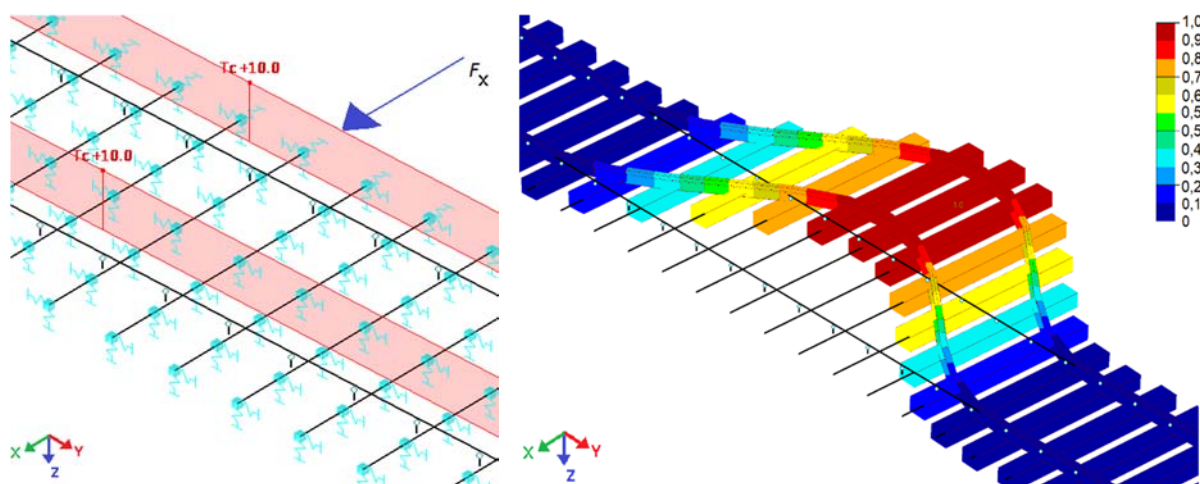
Kritický tvar vybočení byl získán iterativním výpočtem, při kterém byl zvětšován vodorovný bočního impulsu síly F_x , působící na kolej za současného působení přírůstku teploty ΔT . Smyslem bylo nalézt vhodný poměr mezi zatížením bočním impulsem a osovou změnou teploty, který znamenal největší náchylnost ke stabilitnímu vybočení koleje. V tomto kroku nebylo cílem určit vlastní tvary kritického zatížení přímo pro konkrétní kombinace zatížení.

Výpočet byl proveden tak, že byla zvolena referenční hodnota ohřátí BK $\Delta T_{stab,ref}$ vzhledem k T_N , která se při iterativním výpočtu neměnila. Naopak hodnota vodorovného impulsu F_x byla měněna v každé iteraci. Náchylnost ke stabilitnímu porušení koleje byla sledována na základě součinitele kritického zatížení α_{cr} (poměr mezi kritickým zatížením a zatížením skutečně přenášeným konstrukcí). Při zvětšování

impulsu F_x z nulové počáteční hodnoty součinitel α_{cr} nejprve klesal a až při určitém poměru mezi působícím zatížením ΔT a F_x dosáhl minimální hodnoty. Následným zvětšením impulsu F_x došlo ke zvětšení α_{cr} .

Výsledkem výpočtu bylo stanovení tvarů vybočení, odpovídajících minimálnímu možnému součiniteli kritického zatížení $\alpha_{cr,min}$ pro každou konfiguraci koleje s příslušným typem pražce. Z rozboru vyplynulo, že pro všechny konfigurace trati je dosaženo hledaného součinitele $\alpha_{cr,min}$ při vodorovných impulsích, které odpovídají vybočení ve vodorovné rovině koleje v rozmezí 45 mm až 55 mm. Jak již bylo poznamenáno výše, model není vhodný pro stanovení svislých tvarů vybočení koleje.

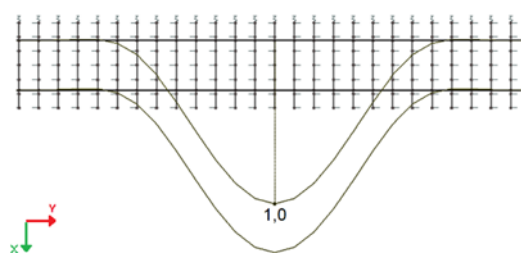
Kombinace zatížení BK ohřátím $\Delta T_{stab,ref} = 10$ K a impulsem síly F_x , který působí na pražec vprostřed délky koleje je na obr. 63. Vodorovný impuls se zvyšoval až do dosažení $\alpha_{cr,min}$.



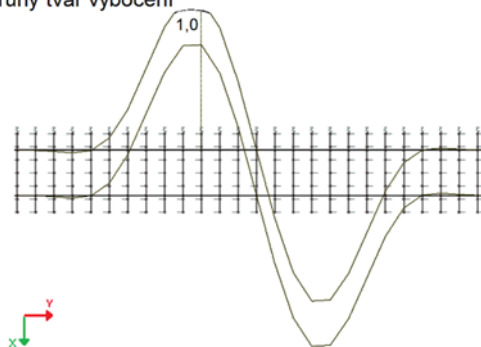
Obr. 63: Kombinace zatížení teplotou a impulsem síly pro rozbor stability konstrukce (vlevo) a první teoretický tvar vybočení BK (vpravo) [118]

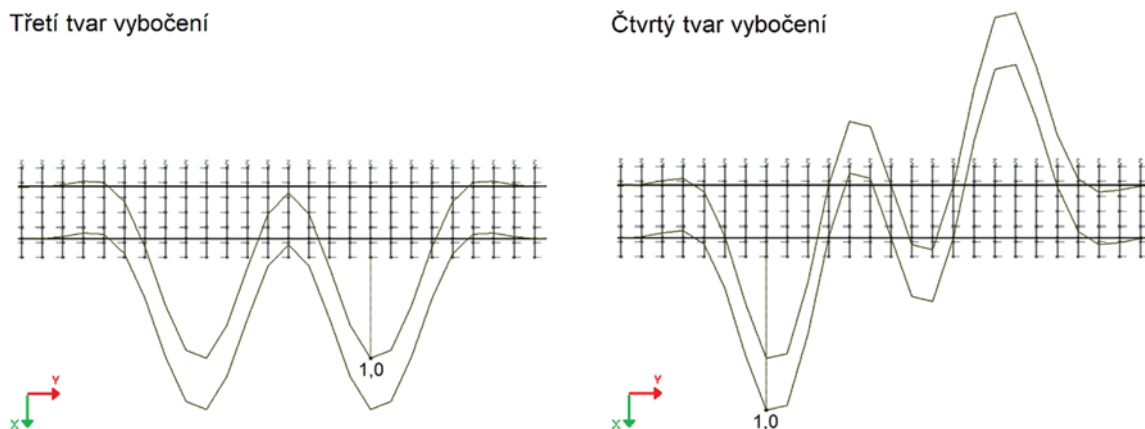
Hledáním vlastních čísel (metodou Lanczos) byly po dosažení nejmenšího možného součinitele kritického zatížení nalezeny první čtyři tvary vodorovného vybočení BK (obr. 64). Tvary vybočení BK byly pro všechny typy sledovaných pražců podobné.

První tvar vybočení



Druhý tvar vybočení





Obr. 64: Tvary vybočení BK ve vodorovné rovině nalezené výpočtem v numerickém modelu [118]

7.3.2 Výpočet kritické teploty pro ztrátu stability bezstykové koleje

Stanovení kritického ohřátí ΔT_{cr} kolejnicového pásu vzhledem k T_N a odpovídající kritické normálové napětí σ_{cr} , které způsobuje ztrátu stability BK, bylo provedeno geometricky nelineárním výpočtem soustavy se zavedenou imperfekcí. Na základě rozboru stability konstrukce je zřejmé, že rozhodujícím tvarem vybočení BK je první vlastní tvar vybočení (obr. 64). První tvar je použit jako počáteční geometrická imperfekce při výpočtu. Tvaru imperfekce byla přidělena počáteční hodnota amplitudy výchylky Δf . Výchylka by měla odpovídat hodnotě očekávané v koleji. Pro účel výpočtu byla použita provozní odchylka od teoretického vzepětí Δf z ČSN 73 6360-2. Výpočet byl vypracován pro dvě varianty výchylky dle RP, které jsou vyčísleny v tab. 21. Pro pražec SB8P_1 byl proveden navíc i výpočet s výchylkou 18 mm.

Tab. 21: Počáteční hodnota amplitudy výchylky Δf (imperfekce) v numerickém modelu BK převzatá z [57] jako provozní odchylka od teoretického vzepětí

Rychlostní pásmo	Trat'ová rychlost v_t	Počáteční imperfekce Δf
	[km·h ⁻¹]	[mm]
RP1	60 < v_t ≤ 80	±13
RP2	80 < v_t ≤ 120	±9

Po vložení imperfekce Δf do geometrie BK byla konstrukce postupně zatěžována přírůstkem teploty, přičemž byla hledána hodnota kritického ohřátí ΔT_{cr} , při které se skokově změnila výchylka ve vodorovné rovině. Při dosažení tohoto kritického ohřátí byla kolejnice namáhána kritickým napětím σ_{cr} . Účinek ohybového momentu, vzniklého v důsledku geometricky nelineárního chování imperfektní soustavy, začne po dosažení kritické teploty růst nad všechny meze a způsobí porušení kolejnice vlivem vodorovného ohybového momentu. V jiném případě, kdy je kritické napětí σ_{cr} vyšší než návrhová mez kluzu kolejnicové oceli ($f_{yd} = 459$ MPa) ztráta stability BK nenastane, ale dojde k porušení prostým tlakem (značná stabilita kolejového roštu).

7.3.3 Materiálové a průřezové charakteristiky prutů

V rámci numerického modelu byla zvolena kolejnice tvaru 49 E1, která byla modelovaná jako prut. Byla uvažována ocel UIC 900 A. Její materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tab. 22.

Tab. 22: Materiálové charakteristiky oceli UIC 900 A dle Dlubal RFEM 5.13 [117]

Materiálová charakteristika	Jednotka	49 E1
Modul pružnosti E	[GPa]	210
Poissonův součinitel ν	[-]	0,3
Modul pružnosti G (smyk)	[GPa]	81
Součinitel délkové teplotní roztažnosti α	[$10^{-5} \cdot K^{-1}$]	1,2
Smluvní návrhová mez kluzu f_{yd}	[MPa]	459

Vstupní parametry numerického modelu se od sebe lišily na základě materiálu, rozměrů a tvaru příčného průřezu dle aplikovaného typu pražce, které byly z tvrdého impregnovaného dřeva, z polymerů a z předpjatého betonu. Styčným vstupním parametrem numerického modelu byl experimentálně stanovený příčný odpor pražců k_x , který jak se dále ukázalo, nejvíce ovlivňoval výsledky. Vstupní parametry pražců pocházely z několika zdrojů. Průřezové charakteristiky pražců vyplývají z tab. 15. Materiálové charakteristiky vyplývají z tab. 17 a knihovny materiálů software Dlubal RFEM 5.13. Použité vstupní hodnoty parametrů pražců jsou zpracovány v tab. 23.

Tab. 23: Průřezové a materiálové charakteristiky pražců v numerickém modelu

Materiálové, geometrické charakteristiky	Jednotka	Označení pražce					
		Laboratorní měření ČVUT v Praze			Lab. měření CDV		
		Buk_9	PES_2	HSS_atyp	SB8P_1	SB8P_2	SB8P_3
Šířka b	[mm]	257	251	250	260	260	260
Výška h	[mm]	160	150	150	183	183	183
Plocha A	[m ²]	0,0411	0,0376	0,0375	0,0476	0,0476	0,0476
Moment setrvačnosti I_y	[10 ⁷ ·mm ⁴]	8,6	7,1	7,0	13,3	13,3	13,3
Moment setrvačnosti I_z	[10 ⁷ ·mm ⁴]	22,6	19,8	19,5	26,8	26,8	26,8
Modul pružnosti E	[GPa]	12,9	11,5	12,1	37,1	37,1	37,1
Poissonův součinitel ν	[-]	0,2	0,45	0,45	0,2	0,2	0,2
Modul pružnosti G (smyk)	[GPa]	0,81	3,97	4,17	15,46	15,46	15,46

7.3.4 Tuhost uzlu upevnění

Uvedené typy pražců v tab. 23 se vystrojují nepřímým podkladnicovým upevněním, např. s pružnou svěrkou Skl 24 [90]. Tuhost uzlu upevnění v numerickém modelu byla uvažována jako vnitřní nelineární kloub s definovanou tuhostí proti posunutí $k_{y,f}$ (tj. dle SŽDC S3/2 podélný odpor proti posunutí kolejnice v uzlu upevnění) a natočení kolejnice. Parametry byly uvažované jako lineární nebo bilineární a byly uvažovány podle Miltáka [73]. Tuhost svěrky vůči natočení v podélné svislé rovině $k_{\phi,y,f}$ nebyla v literatuře [73] dohledána. Citlivostní analýzou numerického modelu však bylo zjištěno, že její hodnota ovlivňuje výsledky numerického modelu. Z toho důvodu byla

od Lim [119] převzata hodnota vztažená na pružné upevnění. Souhrn použitých parametrů je v tab. 24. Ostatní parametry uzlu upevnění nebyly pro stanovení stability BK ve vodorovné rovině zcela nezbytné a v modelu byly definovány jako tuhé [118].

Tab. 24: Souhrn parametrů uzlu upevnění použitých v numerickém modelu BK

Typ deformace, směr, rovina		Položka	Symbol	Hodnota	Zdroj
Posunutí	Příčný směr x	-	-	Tuhé	-
	Podélný směr y	Tuhost	$k_{y,f}$	3,375 MN·m ⁻¹	Milták [73]
		Mez pružnosti	$F_{y,f}$	8,540 kN	
		Posun (mez pružnosti)	$v_{y,f}$	2,530 mm	
Svislý směr z	-	-	Tuhé	-	
Natočení	Vodorovná rovina	-	$k_{\phi,z,f}$	0,045 MNm·rad ⁻¹	Milták [73]
	Podélná svislá rovina	-	$k_{\phi,y,f}$	0,166 MNm·rad ⁻¹	Lim [119]
	Příčná svislá rovina	-	-	Tuhé	-

7.3.5 Tuhost podepření pražce

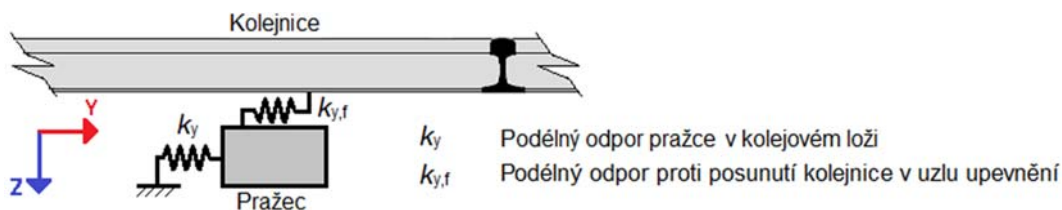
Zatímco parametry uzlu upevnění byly uvažovány pro všechny posuzované případy parametrické studie shodně, parametry uložení pražce v kolejovém loži byly z hlediska příčného odporu měněny dle typu pražce. Citlivostní analýzou modelu bylo zjištěno, že parametr odporu pražce uvažovaný v prvním případě tuhoplastickým modelem jako hodnota příčné síly F_x při posunu pražce u o hodnotě 2 mm nebo v druhém případě jako idealizace příčného odporu bilineárním diagramem, způsobují významné odchylky výsledků výpočtu kritického ohřátí ΔT_{cr} . Ve třetím případě bylo zjištěno, že vypočtená kritická teplota závisí i na tvaru grafu příčného odporu. Z tohoto důvodu byla v rámci výpočtu uvažována podrobná data příčného odporu pražce založená přímo na datech z laboratorních měření na obr. 58 (Buk_10, PES_2, HSS_atyp, SB8P_1) a CDV na obr. 61 (SB8P_2, SB8P_3) [115].

Tuhost podepření pražce ve svislém směru byla uvažována podle předpisu SŽDC S3 jako spojitá svislá tuhost kolejové jízdní dráhy k_z se standardní kvalitou podloží, pro kterou platí charakteristická hodnota $20 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ (tab. 6). Svislá tuhost podepření na jeden uzel byla uvažována $1,714 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, která byla vypočítána s ohledem na:

- rozdělení pražců B s osovou vzdáleností 0,6 m,
- diskretizaci podepření, na základě které byla (namísto spojitého podepření) uvažována skupina 7 pružin rovnoměrně rozmístěných po délce pražce.

Stanovení podélného odporu pražce v kolejovém loži experimentální metodou je komplikované. V rámci předpisů se podélný odpor v kolejovém loži stanovuje společně pro sestavu pražce a uzlu upevnění. Výsledek tedy zahrnuje jak podélnou tuhost uzlu

upevnění, tak podélný odpor pražce v kolejovém loži. Podélná tuhost v uzlu upevnění je v tab. 24. Společná hodnota odporu soustavy $k_{y,tot}$ složené z podélného odporu pražce k_y a odporu proti podélnému posunutí v uzlu upevnění $k_{y,f}$ byla uvažována podle normy UIC 774-3R [120], která požaduje podélný odpor $k_{y,tot}$ alespoň $3,6 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$. Za předpokladu lineárního modelu se sériovým zapojením tuhostí lze vypočítat přibližnou hodnotu tuhosti podélného odporu pražce k_y .



Obr. 65 Podélná tuhost pražce a tuhost uzlu upevnění v modelu se sériovým zapojením pružin [118]

Pro tuhost dvou pružin zapojených sériově podle obr. 65 platí vztah (56). Hledaná tuhost k_y je pak vyjádřena vztahem (57). Na pražci jsou dva uzly upevnění (dvě paralelní pružiny), které jsou zohledněny v tuhosti $k_{y,f}$, která je vyjádřena vztahem (58). Podélný odpor pražce vypočtený s ohledem na předpis UIC 774-3R a známou tuhost upevnění je v tab. 25.

$$\frac{1}{k_{y,tot}} = \frac{1}{k_y} + \frac{1}{k_{y,f}} \quad (56)$$

$$k_y = \frac{k_{y,f} \cdot k_{y,tot}}{k_{y,f} - k_{y,tot}} = \frac{F_y}{v_y} \quad (57)$$

$$k_{y,f} = \frac{2 \cdot F_{y,f}}{v_{y,f}} \quad (58)$$

Tab. 25: Výpočet podélného odporu pražce v kamenivu kolejového lože [118]

	Jednotka	Tuhost soustavy požadovaná dle UIC 774-3R [120]		Tuhost upevnění v podélném směru dle Miltáka [73]		Vypočtený podélný odpor pražce v kamenivu	
		Symbol	Hodnota	Symbol	Hodnota	Symbol	Hodnota
Tuhost	[MN·m ⁻¹]	$k_{y,tot}$	3,600	$k_{y,f}$	3,375	k_y	7,713
Mez pružnosti	[kN]	$F_{y,tot}$	7,200	$F_{y,f}$	8,540	F_y	15,426
Posun na mezi pružnosti	[mm]	$v_{y,f}$	2,000	$v_{y,f}$	2,530	v_y	2,000

Vypočtený podélný odpor pražce v kolejovém loži k_y rovný hodnotě $7,713 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ byl s ohledem na diskretizaci podélného podepření pražce (7 uzlů), přepočítán na hodnotu $1,102 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ pro jeden uzel. Podélná tuhost pražce v kolejovém loži byla pro všechny typy pražce v parametrické studii uvažována shodnou hodnotou.

7.3.6 Vyhodnocení výsledků parametrické studie bezстыkové koleje

Výsledky vlivu příčného odporu sledovaných typů pražců na stabilitu BK zpracované jako parametrická studie a vypočtené pomocí numerického modelu jsou sumarizovány v tab. 26.

Tab. 26: Kritické ohřátí ΔT_{cr} odpovídající napětí σ_{cr} při vybočení konstrukce BK [118]

	Počáteční imperfekce Δf [mm]	PES_2	HSS_atyp	Buk_9	SB8P_1	SB8P_2	SB8P_3
Kritické ohřátí ΔT_{cr} [K]	9	110	139	141	154	136	199
	13	85	107	106	118	109	157
Napětí σ_{cr} při vybočení kolejnicového pásu [MPa]	9	276	349	351	386	335	500
	13	212	269	264	296	272	394

Kritické napětí σ_{cr} v kolejnicovém pásu při překročení návrhové meze kluzu oceli kolejnice ($f_{yd} = 459$ MPa) způsobuje porušení kolejnicového pásu prostým tlakem. Tento způsob porušení BK nastal v případě modelu s pražci SB8P_3 při počáteční imperfekci 9 mm z důvodu velkého příčného odporu pražce.

Pro pražec SB8P_1 byl proveden navíc i výpočet s výchylkou 18 mm, ve kterém došlo k vybočení při ohřátí ΔT_{cr} o 105 K, ze kterého vzniklo napětí σ_{cr} o hodnotě 263 MPa.

7.4 Zhodnocení vlivu příčného odporu pražce na stabilitu bezстыkové koleje

Vliv příčného odporu pražců na stabilitu BK ve vodorovné rovině byl určen parametrickou numerickou analýzou, pomocí které bylo vypočteno kritické ohřátí kolejnicového pásu ΔT_{cr} vzhledem k neutrální teplotě T_N , při které dochází ke ztrátě stability BK. Z provedených výpočtů vyplývají následující závěry:

- Pro zadané okrajové podmínky se kritická teplota pohybuje v rozmezí od 85 K do 157 K (nebo až 199,0 K pro případ SB8P_3, kde se však nejedná o ztrátu stability). Nejvyšší stabilitu BK lze docílit použitím pražců z předpjatého betonu a pražcem HSS_atyp z polymeru. Nižší stabilitu potom použitím pražce PES_2 z polymerů.
- Posouzení stability je velmi citlivé na přesné zadání funkce příčného odporu. Tuhoplastický model příčného odporu zadáním příčné síly F_x při příčném posunu 2,0 mm neposkytne korektní výsledky. Pro stanovení stability BK je třeba použít alespoň bilineární model příčného odporu, ideálně však model, který přímo vystihuje experimentálně stanovená data.
- Posouzení stability je zásadně ovlivněno velikostí amplitudy počáteční imperfekce Δf . Jedná se o hodnotu, která vyplývá z odchylek GPK, které jsou

v koleji pravidelně kontrolovány a posuzovány dle ČSN 73 6360-2 [57]. Čím jsou GPK lépe udržovány, tím jsou odchylky ve směru koleje nižší a tím je vyšší i stabilita BK.

- Použitý model je optimalizován pro ztrátu stability ve vodorovném směru. Skutečné hodnoty kritické změny teploty se mohou zmenšit v důsledku vybočení v obecné rovině. Pro zahrnutí vlivu vybočení ve svislém směru by bylo nutné zavést parametr svislé tuhosti kolejového roštu a jeho hmotnosti.

8 Stanovení doporučeného koeficientu délkové teplotní roztažnosti pražce

Kolejnicové pásy se na pražce upevňují ve vzdálenosti vyplývající z rozchodu koleje, který se měří mezi pojížděnými hranami pásů na kolmici k ose koleje [81]. Předpokládá se, že pražec uložený v kamenivu vlivem teplotní roztažnosti dilatuje. Se změnou jeho délky se mění i poloha kolejnicových pásů, a tím dochází k odchylce v rozchodu koleje.

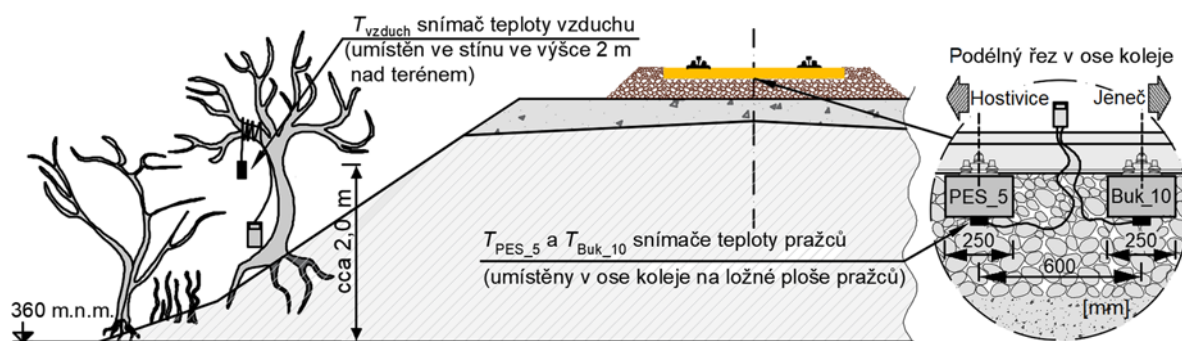
Výše popsaná problematika byla posouzena na základě výsledků podpůrného měření teploty pražců uložených v kamenivu kolejového lože. Na základě naměřených dat, zjednodušeného výpočtového modelu pražce popsaného v kapitole 4 a odchylek v rozchodu koleje definovaných v ČSN 73 6360-2 bylo provedeno vyhodnocení vlivu teplotní délkové roztažnosti pražce na rozchod koleje. Výsledkem je doporučená hodnota koeficientu délkové teplotní roztažnosti pro pražce z polymerů.

8.1 Popis lokality dlouhodobého snímání teploty pražce

Snímání teploty pražce bylo provedeno v úseku železniční tratě v Hostivici u odbočky Jeneček (obr. 46). Místo zvolené pro měření se nachází v nadmořské výšce 360 metrů. Měření teploty byly podrobeny 2 pražce uložené v kamenivu kolejového lože. Popis pražců je uveden v tab. 15. Označení sledovaných pražců je:

- impregnované tvrdé dřevo: Buk_10,
- polymer: PES_5.

Sledované pražce nebyly zastíněny okolní vegetací a ohřívání pražců vlivem slunečního záření nebylo bráněno. Snímání teploty pražců bylo provedeno v úrovni jejich ložné plochy v ose koleje s předpokladem, že měřená teplota vystihuje teplotu průřezu pražce. Teplota na úložné ploše pražců nebyla sledována. V případě podrobnější studie by bylo vhodné měřit teplotu i ve svislém profilu. Referenční snímač pro měření teploty vzduchu byl umístěn ve stínu ve výšce přibližně 2 metry nad terénem. Umístění snímačů teploty je patrné ze schématu na obr. 66.



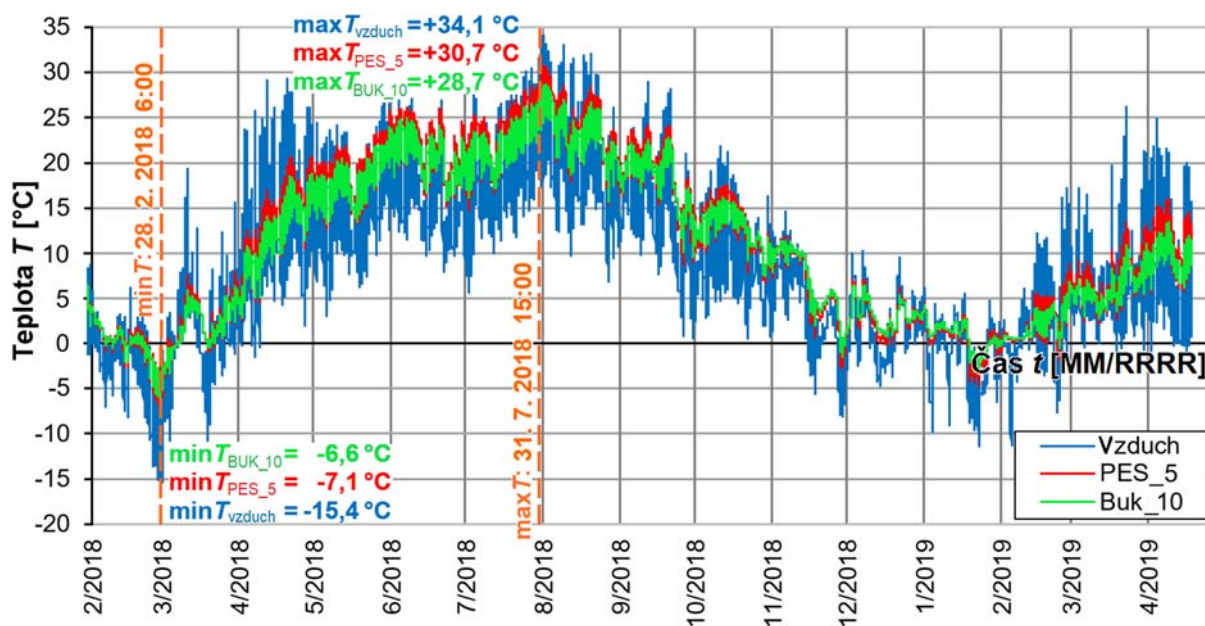
Obr. 66: Umístění snímačů teploty pražců a vzduchu v železniční trati v Hostivici

8.2 Přístrojové vybavení použité ke sledování teploty

Měření a záznam teploty byl proveden kontinuálně pomocí snímačů a dataloggerů. Pro snímání teploty na ložné ploše pražce byly použity dva teplotní snímače Comet typu PT1000TGL40/E. Teplota T_{PES_5} byla měřena na ložné ploše pražce PES_5 a teplota T_{Buk_10} a na ložné ploše pražce BUK_10. Rozlišení snímače je $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jeho měřicí rozsah je $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oba snímače byly společně zapojené do dvoukanálového dataloggeru Comet typu S0121. Pro snímání teploty vzduchu T_{vzduch} byl použit teplotní snímač Comet typ S3121 s rozlišením $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a s měřicím rozsahem $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Data byla ukládána dataloggerem Comet typu S3121 [102].

8.3 Zpracování zaznamenaných dat o teplotě

Měřicí kampaň, ve které byla snímána data o teplotě, trvala od 30. ledna 2018 do 18. dubna 2019, tj. 15 měsíců. Po dobu pozorování teploty se projevila dvě zimní a jedno letní období. Časový průběh naměřené teploty je na obr. 67. Maximální a minimální pozorované hodnoty a jejich vypočtený rozdíl je uveden v tab. 27.



Obr. 67: Vývoj teploty na ložné ploše pražců uložených v kamenivu

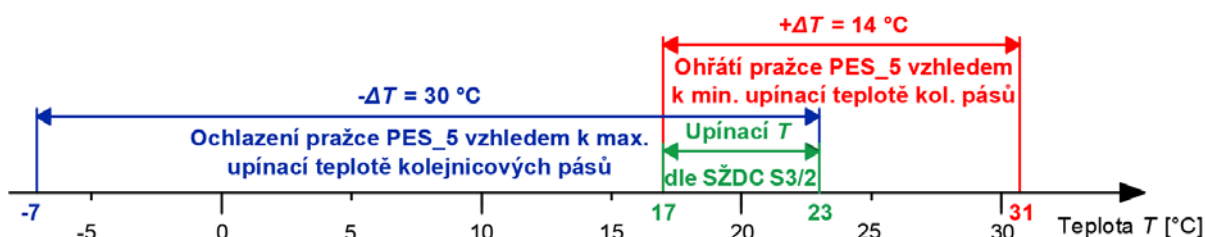
Tab. 27: Maximální, minimální pozorované hodnoty teploty a jejich rozdíl

Teplota T	T_{vzduch}	T_{PES_5}	T_{Buk_10}
Maximální [$^{\circ}\text{C}$]	+34,1	+30,7	+28,7
Minimální [$^{\circ}\text{C}$]	-15,4	-7,1	-6,6
	$\Delta T_{vzduch} = 49,5$	$\Delta T_{PES_5} = 37,8$	$\Delta T_{Buk_10} = 35,3$

Z časového průběhu teploty na obr. 67 jsou zřetelné amplitudy ročních období a amplitudy denní a noční teploty. Vývoj teploty T_{vzduch} ve výšce 2 m nad terémem má srovnatelný tvar záznamu s teplotou pražců na jejich ložné ploše. Ze záznamu teploty pražců T_{PES_5} a T_{Buk_10} jsou patrné srovnatelné hodnoty s tím, že větší amplituda

teploty byla zaznamenána u pražce T_{PES_5} . Předpokládá se, že důvodem k rozdílu teplot sledovaných pražců je odlišnost v jejich tepelné vodivosti λ . Podle Ehrensteina [85] je hodnota součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{polyetylen}$ rovná $0,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Hodnota λ_{Buk} (neimpregnované bukového dřeva kolmo k vláknům) je podle Svobody $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [58]. Na základě porovnání hodnot λ lze předpokládat, že menší rozptyl zaznamenané teploty T_{BUK_10} souvisí s nižší hodnotou λ_{Buk} .

Teplotu, při které se kolejnicové pásy upínají k pražcům, lze zhruba uvažovat podle předpisu SŽDC S3/2 pro bezстыkovou kolej, která se zřizuje na intervalu teplot $+17 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+23 \text{ }^\circ\text{C}$. S ohledem na upínací teplotu BK a naměřenou maximální a minimální teplotu pražce PES_5 bylo na obr. 68 vyjádřeno ochlazení pražce $-\Delta T$ a jeho ohřátí $+\Delta T$.



Obr. 68: Maximální rozsah změny teploty na ložné ploše pražce vzhledem k upínací teplotě kolejnicových pásů dle SŽDC S3/2

Z porovnání velikosti kladné a záporné změny teploty pražce ΔT a z porovnání velikosti odchylek v rozchodu koleje v tab. 12 (dle ČSN 73 6360-2) vyplynulo, že překročení záporné odchylky v rozchodu koleje může nastat pravděpodobněji než překročení kladné odchylky. Oba případy byly popsány na obr. 22 na str. 35. Pro výpočet délkové teplotní roztažnosti pražce byla dále uvažována teplota $-\Delta T$ rovná $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

8.4 Výpočet doporučené délkové teplotní roztažnosti pražce

Na základě změny teploty pražce ΔT , která byla zjištěna za výše popsaných podmínek, byl v tab. 28 vypočten doporučený součinitel délkové teplotní roztažnosti α pražce. Výpočtem byly vyhodnoceny doporučené mezní hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti pražce, při kterých nedojde k překročení odchylek v rozchodu koleje. Souhrn vstupních parametrů a předpokladů pro výpočet je následující:

- lineární délková teplotní roztažnost materiálu pražce vypočtená dle rovnice (44) na straně 34,
- rovnoměrná změna teploty pražce po výšce průřezu $-\Delta T$ rovná $30 \text{ }^\circ\text{C}$ zjištěná měřením in-situ,
- normální rozchod koleje o hodnotě l_0 rovné 1435 mm ,

- odchylky v rozchodu koleje $-\Delta l$ dle tab. 12 při stupni AL (mez sledování) dle ČSN 73 6360-2,
- odchylka v rozchodu koleje nastává pouze vlivem délkové teplotní roztažnosti.

Tab. 28: Součinitel délkové teplotní roztažnosti α pražce [83]

Traťová rychlost v_t podle rychlostních pásem	[$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	$v_t \leq 120$	$120 < v_t \leq 160$	$160 < v_t \leq 230$
Rozchod koleje l_0	[mm]	1435	1435	1435
Odchylka v rozchodu koleje (stupeň AL) Δl	[mm]	-7	-5	-3
Ochlazení pražce ΔT	[$^{\circ}\text{C}$]	-30	-30	-30
Doporučený koeficient délkové teplotní roztažnosti α pražce	[$10^{-5}\cdot\text{K}^{-1}$]	< 16,2	< 11,6	< 7,0

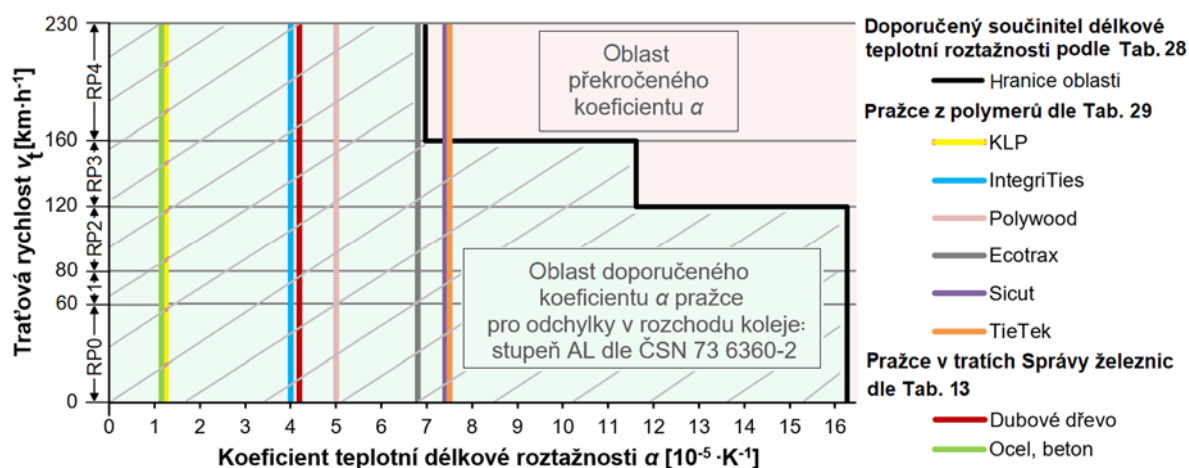
Součinitel α má být co nejmenší, aby jeho vliv na odchylku v rozchodu koleje byl co nejnižší. Doporučený součinitel délkové teplotní roztažnosti α pražce má být podle provedeného vyhodnocení $< 16,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (nebo méně v závislosti na traťové rychlosti).

Výsledek výpočtu součinitele α výše je vyjádřen za předpokladu, že odchylky v rozchodu koleje nastávají pouze v důsledku teplotní roztažnosti. Odchylky však nastávají i z důvodů vad koleje a její nedostatečné údržby, a proto by výpočet měl být považován za orientační. Podle technického předpisu ISO 12856-1 [121] musí součinitel α pražce v trati s nápravovou hmotností do 22,5 t a traťovou rychlostí do $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ dosahovat nejvýše hodnoty $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Vzhledem k výpočtu provedenému výše se jedná o hodnotu o 52 % nižší, na základě které mohou být kompenzovány i další odchylky v rozchodu koleje. Stejným postupem lze porovnat hodnotu součinitele α požadovanou podle technického předpisu AREMA [122], která je $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (oproti výpočtu výše je rezerva 21 %).

Délková teplotní roztažnost pražců z předpjatého betonu ($1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), oceli ($1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) a z impregnovaného dubového dřeva ($4,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) vyhovuje doporučeným hodnotám v tab. 28. Délková teplotní roztažnost polymerů typu polyetylen a polyuretan (tab. 13) přesahuje doporučené hodnoty, ale při použití v pražcích aplikovaných v zahraničí je podle technických listů snížena vlivem vyztužení. Délková teplotní roztažnost pražců z polymerů dle technických listů výrobců v zahraničí je uvedena v tab. 29 a posouzení na obr. 69.

Tab. 29: Koeficient teplotní délkové roztažnosti pražců z polymerů užívaných v zahraničí

Pražec z polymeru dle výrobce	KLP	IntegriTies	Polywood	Ecotrax	Sicut	TieTek
Koeficient délkové teplotní roztažnosti α [$10^{-5}\cdot\text{K}^{-1}$]	1,2	4,0	5,0	6,8	7,4	7,5
Zdroj	[40]	[42]	[123]	[124]	[125]	[126]



Obr. 69: Krajní hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti prazce vzhledem k odchylce v rozchodu koleje na stupni AL a vzhledem k teplotě prazce PES_5 [83-upraveno]

8.5 Zhodnocení vlivu délkové teplotní roztažnosti prazce na stabilitu rozchodu koleje

Odchytky v rozchodu koleje by měly být co nejmenší a s ohledem na bezpečný provoz nemají překračovat hodnoty stanovené předpisem ČSN 73 6360-2. Koeficient délkové teplotní roztažnosti prazce α by měl pro rychlost $v_t \leq 160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ dosahovat nejvýše hodnoty $11,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Při zmíněném kritériu teplotní roztažnosti nedojde z pohledu délkové teplotní roztažnosti k překročení hodnoty odchylky v rozchodu koleje v mezi sledování (stupeň AL). Hlavním předpokladem provedení posouzení bylo, že rozdíl teploty průřezu prazce a teploty prazce při upnutí kolejnicových pásů (ve vzdálenosti, která odpovídá normálnímu rozchodu) a ochlazením prazce není větší než $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Přesnější výsledky by bylo možné prokázat numerickým modelem vedení tepla ve 2D.

Vliv teplotní roztažnosti prazců z polymerů na stabilitu rozchodu koleje není vzhledem k doporučenému koeficientu délkové teplotní roztažnosti prazců závažný. Typy prazců z polymerů dostupné na trhu jsou pro rychlostní pásma a příslušné dovolené odchylky v mezích doporučeného koeficientu délkové teplotní roztažnosti. Při vývoji nových typů prazce je třeba vliv délkové teplotní roztažnosti prazce posoudit např. podle tab. 28.

9 Stanovení bezpečnosti pražce z hlediska rozvoje požáru

Využití polymerů ve vývoji prvků železničního svršku, protihlukových opatření nebo zabezpečovacího zařízení má vzrůstající tendenci. K povrchu jmenovaných součástí trati je obvykle přímý přístup vzduchu. I když je četnost výskytu požáru v železniční trati nízká, ve statistických záznamech mimořádných událostí v drážní dopravě lze dohledat, že např. požár kolejových vozidel se ve státech EU za posledních 10 let vyskytl 21krát [127]. Podle Statistické ročenky Hasičského záchranného sboru ČR z roku 2018 [128] došlo v Bzenci v Jihomoravském kraji k požáru železničního náspu a lesa. Z těchto důvodů je nepřijatelné, aby zmíněné prvky železničního svršku z polymerů umožnily rozšíření požáru v železniční trati a došlo tak k ohrožení bezpečnosti provozu a škodám na infrastruktuře. V souvislosti s požární ochranou byl na Správě železnic zaveden předpis SŽDC Ob14 stanovující organizaci zabezpečení požární ochrany [129].

V okolí trati může dojít k hoření křovin nebo suché vegetace [130], naakumulovaných odpadků nebo uniklého paliva. Ke zvýšení rizika vzplanutí dochází v době vytrvalého sucha. K vzplanutí může dále dojít následkem vandalismu či zhárství, nebo nedbalostí v podobě odhození nedopalku. Vzplanutí může neúmyslně nastat v důsledku stavebních a udržovacích prací v koleji, mezi které patří svařování, frézování či broušení hlavy kolejnice, při kterých dochází k odletu jisker a lokálnímu uvolňování tepla do okolí kolejnice. Ke vzplanutí vlivem zdroje tepla a odletujících jisker od ocelových brzdových špalíků docházelo zejména v historii, protože moderní konstrukce brzd využívají stále více špalíky z kompozitu [131, 132].

Kolejnicové podpory z předpjatého betonu nepředstavují z hlediska vzniku požáru riziko. Pražce z impregnovaného tvrdého dřeva nejsou z hlediska požární bezpečnosti posuzovány. Při nestandardizované požární zkoušce mostnic z impregnovaného tvrdého dřeva, kterou provedl Clausen, však bylo zjištěno zvýšené požární riziko [133]. Zmiňované zvýšené riziko pravděpodobně vyplynulo z uložení mostnic na ocelové mostní konstrukci, kde jsou mostnice v přímém kontaktu se vzduchem. Toto riziko by mohlo být u pražců uložených v kamenivu kolejového lože nižší. Termoplasty typu polyetylen, polypropylen a polyuretan [10] užívané při výrobě pražců ohni neodolávají a za určitých podmínek hoří. Jejich hoření lze redukovat použitím příměsí retardérů hoření, ale ne dokonale odstranit [4]. Odborné články pojednávající o aplikaci polymerních pražců a jejich zkouškách zmiňují reakci pražců z polymerů na oheň jako určité riziko [134]. Z toho důvodu byla v této práci navržena

a provedena unikátní požární zkouška vybraného typu polymerního pražce s cílem zjistit, jak pražce uložené v kamenivu kolejového lože reagují na oheň, a co se stane, pokud začnou v prostředí jejich skutečné aplikace hořet.

Obsahem in-situ zkoušky bylo provedení systémového testu železničního svršku s aplikací polymerních pražců, ve kterém byl požár pražce iniciován takovým způsobem, který napodobuje výše zmíněná rizika. Cílem zkoušky bylo ověřit možný rozvoj požáru mezi jednotlivými pražci z polymeru po délce železniční trati. Zkouška byla provedena za zdokumentovaných povětrnostních podmínek. Cílem nebylo ověřit možnost či pravděpodobnost vzplanutí pražce z polymeru na základě výše zmíněných nebezpečí.

9.1 Zkušební postup pro provedení požární zkoušky pražců

Problematika posouzení požární bezpečnosti pražců z polymerů uložených v kolejovém loži z pohledu rozvoje požáru byla předmětem rešerše odborných zdrojů. Cílem rešerše bylo vypracovat přehled evropských technických norem, odborné literatury a postupů provádění požárních zkoušek. Podle výstupů rešerše byl navržen zkušební postup pro posouzení požární bezpečnosti pražců z polymerů při jejich aplikaci v koleji.

9.1.1 Posouzení požární bezpečnosti ve stavebnictví podle technických norem

Bylo zjištěno, že norma předepisující požární zkoušku pražců ze dřeva, předpjatého betonu či oceli není stanovena. Normou pro zkoušky pražců z polymerů je ISO 12856, která je však prioritně zaměřena na zkoušky mechanické odolnosti jednotlivých pražců [121]. Předpis není zaměřen na zkoušky systému železničního svršku, nicméně udává některé pokyny týkající se požární zkoušky pražců v tunelu [121]. Norma z hlediska zkoušky rozvoje požáru předepisuje, že pražce z polymerů použité v tunelu musejí být jeden od druhého odděleny kamenivem či betonovou směsí a jejich požární zkouška může být provedena podle individuálních požadavků výrobce. O požární zkoušce je poznamenáno, že na horní povrch pražců z polymerů může být nahlíženo jako na podlahu, a proto může být jejich hodnocení reakce na oheň provedeno podle normy ČSN EN 13501-1 [135], která obsahuje požární klasifikační kritéria pro podlahové krytiny. Podlahové krytiny jsou podle ČSN EN 13501-1 požárně klasifikovány do sedmi tříd v závislosti zejména na kritickém tepelném toku při provádění požární zkoušky a dále na požadovaném vzrůstu teploty, na úbytku hmotnosti zkušebního

tělesa, na době trvalého plamenného hoření, na výšce plamene, na množství uvolněného tepla apod.

Dalším relevantním předpisem je francouzská norma XP F51-201-1 [136], která přímo předepisuje tři typy zkoušky pro stanovení požární bezpečnosti pražců z polymerů. První zkouška se týká stanovení hořlavosti zkušebních vzorků ve vodorovné poloze. Stanovení hořlavosti se provádí podle množství uvolněného tepla měřeného pomocí kalorimetru. Druhou popsanou zkouškou je stanovení rozvoje požáru na zkušebních tělesech v měřítku 1:1 připravených ze skutečných pražců, zkrácených na délku 70 cm. Zkušební tělesa jsou však testována ve svislé poloze, a nezohledňují tak skutečnou orientaci pražců v koleji. Třetí popsaná požární zkouška pražce z polymerů je zaměřena na intenzitu kouře z hlediska posouzení jeho hustoty, která snižuje viditelnost (tzv. opacita). Špatná viditelnost ztěžuje evakuaci osob v případě požáru v tunelu. Norma dále umožňuje posouzení pražce z polymerů pomocí numerické studie požární bezpečnosti [136].

Další relevantní předpis, který se zabývá klasifikací stavebních výrobků a konstrukcí staveb podle výsledku zkoušky jejich požární odolnosti, je norma ČSN EN 13501-2 [137]. Ke klasifikaci využívá dva parametry, a to čas a způsob porušení. Pro klasifikaci požární odolnosti je používána doba v minutách, po kterou nejsou během požární zkoušky u stavební konstrukce porušeny tzv. mezní stavy (únosnost/stabilita, izolační schopnost, celistvost, radiace apod.). Mezní stavy však nejsou aplikovatelné na železniční svršek [137].

Příklad zdroje požáru iniciovaného uměle, který imituje požár křovin při hodnocení požární odolnosti protihlukových stěn, je popsán v normě ČSN EN 1794-2. Předpis požaduje iniciační zdroj požáru připravený z vysušených hoblin ze smrkového dřeva, které jsou uloženy v drátěném koši a při začátku zkoušky jsou zapáleny v blízkosti posuzované protihlukové stěny [130].

Na základě rešerše českých a evropských technických norem zaměřených na zkoušky a hodnocení požární bezpečnosti stavebních konstrukcí nebyl nalezen zkušební postup pro hodnocení bezpečnosti pražců z hlediska rozvoje požáru, avšak byly nalezeny relevantní informace, na základě kterých lze navrhnout individuální zkušební postup.

9.1.2 Požární bezpečnost pražců z polymerů v odborné literatuře

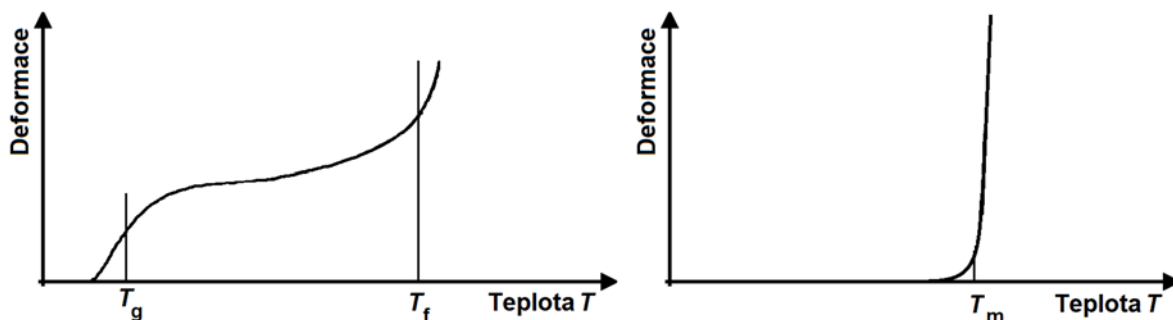
Odborná literatura se v oblasti požární bezpečnosti železničních staveb často zaměřuje na prvky z polymerů a kompozitů aplikovaných v tunelech či na mostech, jak prováděl např. Ryjáček a kol. [138].

V odborném článku, který zpracoval Lampo, zaměřeném na zkoušky a na možné způsoby poškození pražce z polymerů, je popsána i požární bezpečnost pražců z polymerů. Důvodem je riziko, které vyplývá z hořlavosti některých polymerů aplikovaných v pražcích z polymerů [134].

Jiný článek, ve kterém Ferdous popsal současný stav a požadavky na polymerní pražce, opět popisuje požární bezpečnost pražců z polymerů jako možnou problematiku, avšak záznamy o provedení takových zkoušek polymerních pražců nebyly v odborné literatuře nalezeny. Článek rovněž upozorňuje na vliv teploty na mechanickou odolnost pražců z polymerů, které mohou významným ohřátím ztratit tuhost. Ačkoliv po ochlazení opět ztuhnou a zdánlivě se jedná o reverzibilní proces, u termoplastů dochází ke změně fyzikálních vlastností [10].

Rešerší literatury v oboru chemických technologií bylo vyhledáno, že polymery jsou sensitivní ke změně teploty (a to již v řádu desítek stupňů Celsia), která se projevuje táním, případně až změnou struktury [4]. V případě pražce z polymerů se jedná o snížení mechanické odolnosti (ohybové tuhosti, pevnosti v tlaku, aj.) a případně až o ztrátu celistvosti pražce. Sensitivita tuhosti polymerů ke změně teploty je popsána termomechanickou křivkou (viz obr. 70). Křivka popisuje závislost deformace a teploty polymeru a je rozdělena podle skupiny, do které je polymer zařazen. Křivka pro amorfní polymery (např. polystyren, polyvinylchlorid) je charakterizována teplotou skelného přechodu T_g a teplotou tečení T_f a křivka pro krystalické polymery (např. polyetylen, polypropylen) je charakterizována teplotou tání T_m [4].

V případě dlouhodobého účinku vyšší teploty dochází ke snížení mechanických vlastností polymeru až o 50 %. Mezní teploty trvalého účinku vybraných typů polymerů užívaných při výrobě pražců v zahraničí jsou uvedené v tab. 30. Při dosažení teploty tání se těleso z krystalického polymeru přestává chovat jako tuhé a stává se taveninou [91]. V tab. 30 jsou uvedeny charakteristické teploty tání termomechanické křivky T_m vybraných polymerů.



Obr. 70: Termomechanická křivka amorfního polymeru (vlevo) např. PS, PVC a vysoce krystalického polymeru (vpravo) např. PE, PP [4]

Tab. 30: Mezní teplota dlouhodobé použitelnosti polymerů a charakteristické body termomechanických křivek polymerů používaných k výrobě pražců [4]

Polymer	Typ	Mezní teplota dlouhodobé použitelnosti [°C]	Charakteristická teplota tání T_m [°C]
Polyetylen	Vysoce krystalický	+75	+105 až +120
Polypropylen	Vysoce krystalický	+100	+160 až +170
Polyuretan	Vysoce krystalický	+80 až +120	+180

9.1.3 Návrh postupu pro provedení zkoušky požární bezpečnosti pražce

Zkušební postup a vyhodnocení požární zkoušky pražců z polymeru, byl navržen podle informací z provedené rešerše technických norem a odborné literatury. Zkouška zahrnovala železniční svršek ve skutečném měřítku 1:1. Zkouška byla provedena in situ a byla při ní zohledněna orientace pražce a jeho uložení v kamenivu kolejového lože, které může mít vliv na rozvoj požáru při zkoušce. Horní povrch pražců nebyl zakrytý.

Počátečním krokem navržené zkoušky byla umělá iniciace požáru, pro jehož vznik se v železniční trati uvažují příčiny uvedené v úvodu kapitoly (vznícení vegetace či odpadků vlivem nedbalosti nebo v důsledku stavebních a udržovacích prací v koleji).

V průběhu zkoušky byl proveden kontinuální záznam teploty povrchu testovaných pražců po stanovenou dobu a vizuálně bylo hodnoceno šíření požáru mezi polymerními pražci. V průběhu zkoušky byly pražce sledovány a byly zaznamenány významné změny ve vývoji požáru v čase, jako např. výška plamene, okamžik plně rozvinutého požáru na pražci a okamžik přenosu požáru z pražce na vedlejší pražec. Zkouška byla provedena za kontinuálního záznamu směru a rychlosti proudění vzduchu.

Na základě předpokladu, že příjezd jednotky požární ochrany k požáru v trati je časově náročný a přístup nesnadný a provedení zásahu komplikované, byla doba trvání zkoušky, po kterou byly pražce vystaveny plamenu stanovena na 60 minut. Doba mezi vznikem požáru a jeho nahlášením vyplývá z intervalu průjezdu vlaků,

případně z výskytu náhodného pozorovatele požáru v okolí dráhy. Pro vytvoření závěru o polymerních pražcích podrobených zkoušce bylo zavedeno kritérium pro hodnocení výsledku, které vychází z toho, že:

- požár se nesmí šířit z pražce na pražec po délce trati rychlostí vyšší než 1 pražec za 60 min,
- u pražce, který vykazuje trvalé plamenné hoření, nesmí dojít k sálavému přenosu tepla na ohřívanou stranu sousedního pražce tak, že by došlo k dosažení teploty T_f nebo T_m (viz tab. 30 dle typu polymeru). Při dosažení teploty by došlo ke zhoršení mechanických vlastností polymeru, tedy zejména k poklesu tuhosti a pevnosti pražce.

Závěr o požární zkoušce se vztahuje na pražec, který je oddělen kamenivem kolejového lože od pražce, který hoří nebo je v přímém kontaktu s plamenem. Výsledek zkoušky se hodnotí jako reakce pražce oddělného od požáru kamenivem kolejového lože. Provádí se zařazení pražce do jedné ze čtyř kategorií, které jsou seřazené stupňovitě podle ovlivnění pražce po provedení zkoušky. Za úspěšný výsledek zkoušky se považuje zařazení pražce do první kategorie. Zařazení pražce do kategorie bylo navrženo provést podle pozorování jeho stavu po provedení zkoušky tak, že pražec po vizuálním posouzení:

- 1) nejví vliv poškození sálavým teplem a měřená teplota jeho povrchu nepřesáhne 40 °C,
- 2) nejví vliv poškození, ale na povrchu dosáhne teploty T_f (resp. T_m) či vyšší (důsledek ohřátí možno po provedení zkoušky ověřit provedením laboratorní analýzy např. namáhání ohybem s vyhodnocením E -modulu),
- 3) jeví účinky sálavého tepla, které způsobily deformaci tvaru a rozměrů pražce,
- 4) pražec vzplane a je poškozen požárem.

9.2 Příprava požárního scénáře

Požární zkouška pražců z polymeru byla provedena na přechodové oblasti mostu v lokalitě Hostivice (obr. 46), která je podrobně popsána v Kapitole 7.1. Zkoušky byly podrobeny celkem 3 pražce z nízko-hustotního polyetylenu. Jejich popis je uveden v tab. 15. Označení sledovaných pražců je:

- polymery: PES_3 až PES_5.

Pražce PES byly zvoleny kvůli nízké teplotě tání polyetylenu T_m , která je uvedena v tab. 30. Kolejnice byly k pražcům připevněny pomocí tuhého podkladnicového

upevnění, které se užívá dle předpisu SŽDC S3 Železniční svršek pro dřevěné pražce. Pražce PES uložené v kamenivu kolejového lože a upevnění kolejnic je vidět na obr. 71. Při ukládání pražců do kolejového lože bylo použito stávající kamenivo frakce 31,5/63 mm, které bylo na místě manuálně čištěno a zbaveno náletové vegetace.

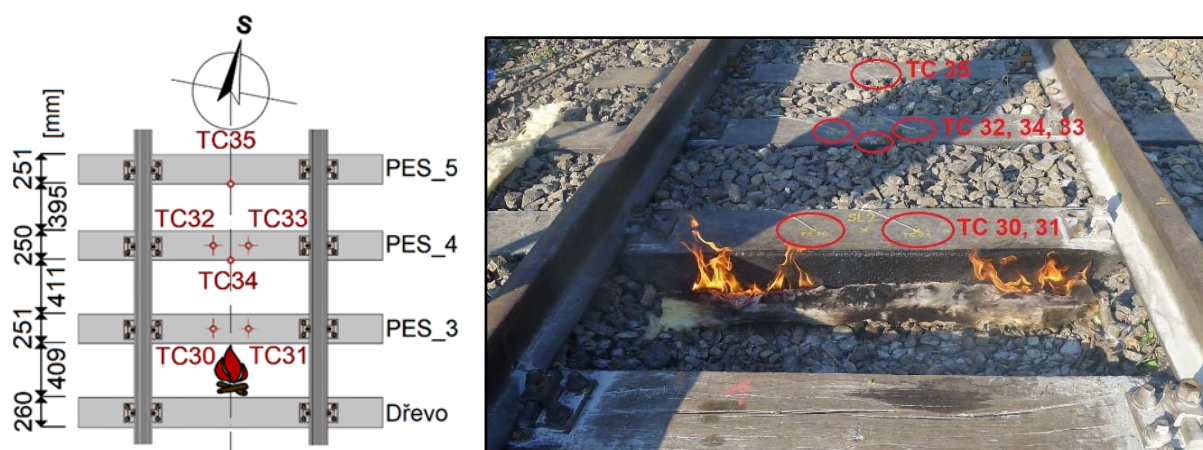


Obr. 71: Pražce typu PES z recyklovaného polymeru připravené pro stanovení požární bezpečnosti

Postup provádění in situ požární zkoušky zavedený pro potřeby této disertační práce byl založen na měření teploty povrchu pražce a na rychlosti přenosu požáru z pražce na následující pražec. Pro sledování vývoje teploty pražců při provádění požární zkoušky a měření rychlosti přenosu požáru mezi pražci byly využity dvě měřicí metody založené na:

- infračervené termografii (termovizi) pro měření rozložení teploty s použitím termokamery typu ThermoCAM SC 2000 (výrobce Flir Systems) pro záznam infračerveného obrazu a teploty s měřicím rozsahem -40 až $+2000$ °C [139],
- snímání teploty plynu na povrchu pražce aplikací plášťových termočlávkových snímačů typu K (výrobce Mavis) o průměru 3 mm s rozsahem pracovní teploty -30 °C až $+980$ °C či krátkodobě $+1050$ °C [140].

Na horním povrchu sledovaných pražců z recyklovaného polymeru bylo při požární zkoušce osazeno celkem 6 termočlávků pro snímání teploty povrchu pražce. Počet aplikovaných termočlávků byl zvolen na základě měřicích kanálů ústředny uvolněných pro tuto zkoušku. Zbylé kanály byly použité na činnost v Úkolu technického rozvoje Správy železnic „Aplikace plastových FRP materiálů na železničních mostech a tunelech“ vedenou doc. Ryjáčkem. Zapojení a záznam dat z termočlávků byl odborně zajištěn pracovníky ÚTAM AV ČR, v. v. i. Pro identifikaci termočlávků bylo zavedeno označení zkratkou TC (thermocouple) s číselným indexem. Rozmístění termočlávků připevněných na horním povrchu pražců je patrné ze schématu a fotografie na Obr. 72, která pochází z okamžiku před zahájením požární zkoušky.



Obr. 72: Rozmístění termočláneků na pražcích a polohy iniciační nálože požáru [9]

TC byly umístěny tak, aby byla sledována teplota a to, zda se plamen rozšíří z prvního na následující pražce. Na pražci PES_3, který byl v přímém kontaktu s požářištěm, byly umístěny TC30 a TC31. Další TC byly rozmístěny na polymerní pražce s tím, že na nejvíce exponované pražce uložené nejbližší požářišti jich bylo umístěno nejvíce. Největší pozornost byla věnována pražci PES_4, na který byly umístěny TC32, TC33, TC34 a na pražci PES_5 byl umístěn TC35.

Průběh a vyhodnocení požární zkoušky by mohlo být podstatně ovlivněno povětrnostními vlivy, zejména rychlostí proudění vzduchu, dešťovými srážkami či teplotou vzduchu. Z toho důvodu byl před prováděním požární zkoušky nainstalován anemometr pro sledování zmíněných vlivů. Anemometr byl uložen na konstrukci zábradlí ocelového mostu ve výšce asi 2 m nad terénem a ve vzdálenosti přibližně 15 metrů od místa požární zkoušky.

Iniciační požár ve zkoušce pražců z polymerů byl připraven v mezipražcovém prostoru mezi dřevěným pražcem a pražcem z recyklovaného polymeru PES_3. Kamenivo kolejového lože bylo v místě požářiště odstraněno až na úroveň ložné plochy pražce. Kamenivo v prostoru mezi ostatními pražci bylo zachováno tak, jak je předepsáno v předpisu SŽDC S3 Železniční svršek. Iniciační nálož požáru byla připravená z petroleje, kterým byla nasycena izolační plst' z čedičových vláken. Nasycená plst' o přibližných rozměrech 1,3 × 0,1 m byla uložena v mezipražcovém prostoru u boku pražce PES_3, jak je vidět na obr. 72.

O problematice vyhodnocení tepelného výkonu Q_f hořící kapaliny, pomocí kterého lze kvantifikovat účinnost připravené iniciační nálože požáru, pojednává Biteau [141]. Výpočtu tepelného výkonu hořícího petroleje, který je volně (bez plsti) umístěn v nádobě, odpovídá vztah (59):

$$Q_f = m_f \cdot H_p \cdot A_f \quad (59)$$

kde m_f je rychlost úbytku hmotnosti vzorku na jednotku plochy [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], H_p je výhřevnost petroleje [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] a A_f je plocha nádoby [m^2]. Hodnoty hmotnostního úbytku látek lze nalézt v ČSN 73 0802 [142] a hodnoty výhřevnosti látek v ČSN 73 0824 [143]. Za předpokladu hoření petroleje v nádobě, která má rozměry shodné s rozměry plsti, je jeho tepelný výkon 30 kW. Vypočtená hodnota tepelného výkonu hoření petroleje v nádobě je vzhledem k hoření petroleje nasáklého ve vláknité struktuře plsti zatížena nepřesností. Rozdělením petroleje ve vláknech plsti je umožněn přístup většího množství vzduchu než při hoření hladiny petroleje v nádobě. Z toho důvodu bylo po odborné konzultaci odhadnuto, že tepelný výkon iniciační nálože požáru mohl být vyšší až o 50 %, tedy 30 kW až 45 kW.

9.3 Provedení zkoušky požární bezpečnosti pražce

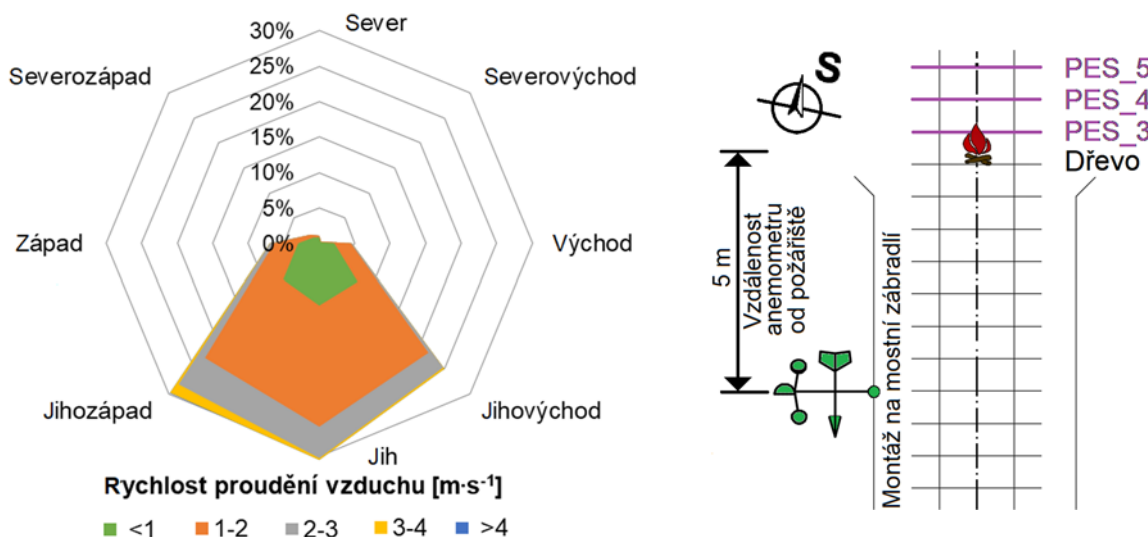
Zkouška byla zahájena vzplanutím iniciační nálože po přiložení louče. Teplota vzduchu ve stínu v okamžiku zahájení požární zkoušky byla $+14,3\text{ }^\circ\text{C}$, relativní vzdušná vlhkost 50 %. Ohříváním boku pražce PES_3 plamenem došlo k jeho vzplanutí. Čas vzplanutí pražce PES_3 nebylo možné přesně definovat kvůli současnému hoření iniciační nálože požáru v těsné blízkosti pražce. Průběh požární zkoušky je zachycen v časosběrných snímcích na obr. 73. Po dohoření petroleje již iniciační nálož požáru přestala přispívat k rozvoji požáru a pražec z recyklovaného polymeru PES_3 hořel samostatně trvalým plamenným hořením až do ukončení zkoušky uhašením. Štěrk kolejového lože v mezipražcovém prostoru mezi pražci PES_3 a PES_4 působil jako izolace a viditelně omezil přenos tepla na pražec PES_4. Na povrchu pražce PES_5 (nejvzdálenější pražec od požářiště) byla nejvyšší naměřená teplota $+25\text{ }^\circ\text{C}$. V čase 64 minut od zahájení byla požární zkouška ukončena uhašením požáru provedeným jednotkou požární ochrany. Zajímavostí bylo chování dřevěného pražce v průběhu požární zkoušky. Na jeho boku, který byl ohříván účinky požářiště, se na povrchu důsledkem zvyšování teploty vyloučil kreosotový olej. V čase 51 min od zahájení požární zkoušky dřevěný pražec vzplanul.



Obr. 73: Časosběrné snímky z požární zkoušky (hoření iniciační nálože požáru a přilehlého pražce - k rozvoji požáru na další pražce po dobu 64 minut nedošlo) [9]

9.4 Výsledky zkoušky požární bezpečnosti pražce

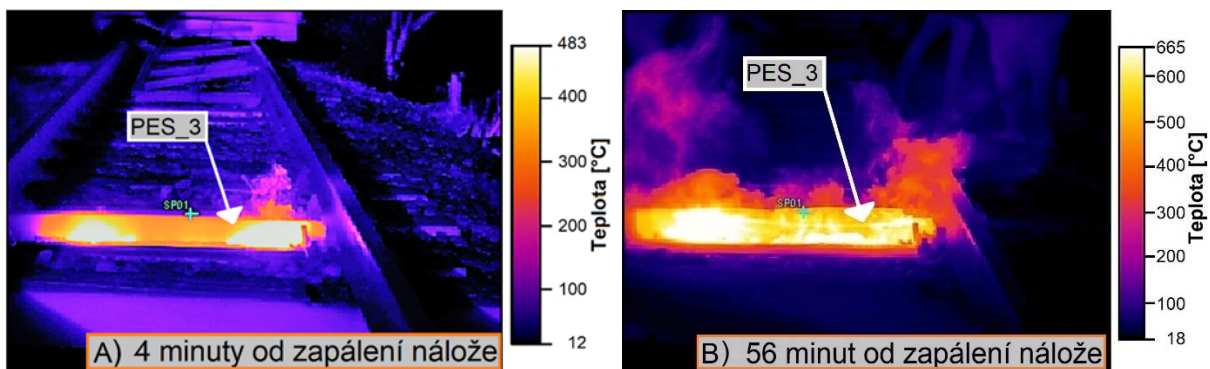
Zpracovaná data pořízená anemometrem jsou graficky prezentována ve formě větrné růžice na obr. 74., která ukazuje směr a rychlost proudění vzduchu. Soubor hodnoty rychlosti proudění vzduchu byl rozdělen po pěti rychlostních pásmech s krokem $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na obvodové ose grafu je vyjádřen relativní výskyt rychlosti pásem po dobu provádění požární zkoušky.



Obr. 74: Větrná růžice popisující směr a rychlost proudění vzduchu při provádění požární zkoušky vytvořená z dat zaznamenaných anemometrem [9]

Z větrné růžice je jasně viditelné, že v průběhu provádění zkoušky převládalo proudění vzduchu jižním směrem s nepatrným alternováním na jihozápad a jihovýchod. Vzhledem k orientaci pražců dle severky na obr. 74 se jednalo o proudění vzduchu ve smyslu od pražců k požářišti, které mohlo snížit vliv sálání plamene z požářiště na pražec. Nicméně pokud se vezme v úvahu druhý sledovaný parametr, kterým byla rychlost proudění vzduchu, z růžice je znatelné, že vliv povětrnostních podmínek vnesený do vyhodnocení požární zkoušky je blízký nule. Rychlost proudění vzduchu byla nejčastěji v intervalu $1\text{--}2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a jen výjimečně dosahovala až $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jedná se o velmi nízkou rychlost klasifikovanou podle Beauforta stupněm 1 až stupněm 2 a slovní stupnicí jako vánek až větřík [144]. Jedná se o zanedbatelný vliv proudění vzduchu, který nemohl významně ovlivnit průběh a výsledky požární zkoušky.

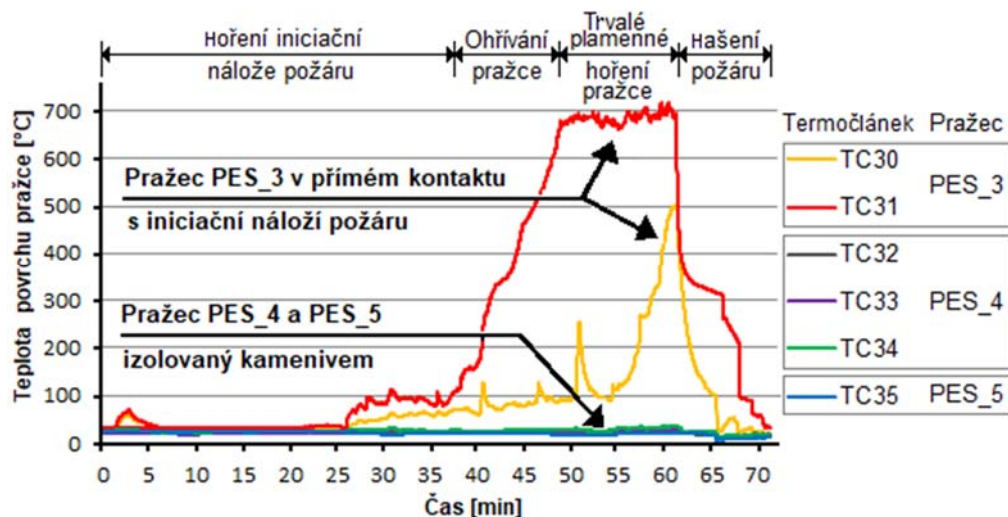
Výstupem zkoušky je měření teploty povrchu pražců z polymerů metodou termovize zpracované ve formě snímků pořízených termokamerou. Data byla zpracovaná v software ThermaCAM™ Reporter 2000 Professional. Po dobu trvání zkoušky byly snímky pořizovány časosběrně se zvolenou frekvencí záznamu 4 snímky za minutu. Vybrané termovizní snímky zachycující rozložení teploty v počátku a před ukončením požární zkoušky jsou na obr. 75.



Obr. 75: Rozložení teploty v okolí požářiště zobrazené metodou termovize: A) po zapálení iniciační nálože; B) trvalé plamenné hoření pražce PES_3 před ukončením zkoušky [9]

Z termovizního snímku požářiště z počátku provádění zkoušky na obr. 75 A), je ve dvou výrazných místech pomocí barevné palety zachycena teplota cca +480 °C. Toto maximum je vzhledem k fotografiím a teplotě zaznamenané termočládky (viz dále v textu), přisouzeno hoření iniciační nálože požáru. Různá teplota na snímku vlevo pochází pravděpodobně z nerovnoměrného složení nálože. Z obr. 75 B) před ukončením zkoušky je již znatelné rovnoměrné rozložení teploty na povrchu hořícího pražce PES_3, který dosahoval maxima přibližně +660 °C.

Teplota zaznamenávaná na povrchu pražců použitím pěti termočládků TC30 až TC35 po dobu více než jedné hodiny je na obr. 76. Teplota zachycená metodou termovize se v době trvalého plamenného hoření pražce z polymeru shoduje s měřením metodou plášťových termočládků.



Obr. 76: Teplota povrchu zaznamenaná termočládky: pražce izolované kamenivem nebyly po dobu 64 minut zasázeny požárem ani významným množstvím sálavého tepla [9]

Záznam termočládků TC32 až TC35 umístěných na pražcích PES_4 a PES_5 vypovídá o teplotě dosažené na povrchu pražce, která byla nejvýše +36 °C. To znamená, že při provádění zkoušky došlo jen k minimálnímu přenosu sálavého tepla z pražce PES_3 na pražec PES_4 a došlo k ohřátí na teplotu, která je

srovnatelná s teplotou v letních měsících. Teplota povrchu pražce dosažená při zkoušce není vzhledem k teplotě tání polyetylenu $T_m = +120\text{ °C}$ významná a nedosahuje ani mezní teploty pro omezení dlouhodobé použitelnosti polyetylenu rovné $+75\text{ °C}$. Nelze tedy očekávat, že mohlo dojít k ovlivnění pražce snížením jeho tuhosti. Vizuálním hodnocením nedošlo k deformaci, ztrátě celistvosti. Výše uvedené pozorování výsledků požární zkoušky jsou významné pro vytvoření závěru o testovaných pražcích. Výsledek zkoušky zvoleného typu pražce je podle metodiky uvedené výše v textu zařazen do kategorie 1), tedy úspěšný.

Ze záznamu teploty aplikací termočlánků je patrné, že po dobu trvání požární zkoušky byl významně ovlivněn pouze pražec PES_3 z recyklovaného polymeru, který byl v přímém kontaktu s iniciační náloží požáru a jehož teplota horního povrchu byla kontrolována termočlánky TC30 a TC31. Nejvyšší dosažená teplota $+716\text{ °C}$ byla zaznamenána termočlánkem TC 31, který byl přímo zasažen ohněm. Termočlánek TC 30 zaznamenal teplotu $+510\text{ °C}$. Z porovnání naměřené teploty je viditelné, že zmíněné dva termočlánky byly ohřívány nerovnoměrně, a to patrně z důvodu rozmístění iniciační nálože požáru. Ze záznamu termočlánku TC30 a TC31 je po uplynutí času 64 minut také patrné ukončení zkoušky hašením.

Kamenivo kolejového lože v prostoru mezi pražci PES_3 a PES_4 mělo izolační funkci, viditelně redukovalo přenos tepla na pražec PES_4. Nejvyšší naměřená teplota na povrchu pražce PES_5 (nejvzdálenější pražec od požářiště) byla $+25\text{ °C}$.

9.5 Zhodnocení zkoušky požární bezpečnosti pražce

V neprovozované koleji v Hostivici byla provedená nestandardizovaná požární zkouška železničních pražců z polyetylenu, umístěných v podmínkách jejich běžného použití. Pražce z polymerů byly odděleny kamenivem kolejového lože. U jednoho pražce byla uložena iniciační nálož pro záměrné založení požáru, který se ponechal rozvíjet po dobu 60 minut a poté byl uhašen. Cílem zkoušky bylo ověření vývoje požáru s ohledem na možnost jeho šíření mezi příčnými pražci. Závěrem zkoušky je, že kamenivo kolejového lože pražce z polymeru dostatečně požárně izolovalo a při provedené zkoušce naprosto znemožnilo rozšíření požáru. Při zkoušce nedošlo k destrukci žádného pražce z polymeru (vyjma pražce v místě požářiště). Pomocí snímačů teploty rozmístěných na horním povrchu pražce bylo zjištěno, že nedošlo ani k významnému ohřátí jiných přilehlých pražců.

Provedením této zkoušky bylo úspěšně zjištěno, že za zdokumentovaných povětrnostních podmínek a při zvoleném typu pražce z polymeru a složení iniciační

nálože odpovídající tepelnému výkonu přibližně 30 kW až 50 kW nedojde k rozšíření požáru ani přenosu většího množství tepla mezi jednotlivými pražci. Zvolené polymerní pražce byly z pohledu šíření požáru po délce trati vyhodnoceny jako použitelné a bezpečné.

Cílem další části výzkumu může být požární zkouška provedená při náročnějších povětrnostních podmínkách zejména při vysoké rychlosti proudění větru. Navíc může být použita iniciační nálož požáru o vyšším tepelném výkonu nebo mohou být zahrnuty negativní vlivy jako je přítomnost hořlavých materiálů po délce trati, např. kolejnicové absorbéry nebo úkapy hořlavých látek z vozidel. Dále může být žádoucí provést požární zkoušku s polymerními a impregnovanými dřevěnými pražci a provést přímé porovnání výsledků.

10 Návrh zkušebního úseku s pražci z polymeru

Výsledky provedeného výzkumu prokázaly, že z hlediska ohybové tuhosti, stability bezстыkové koleje, teplotní roztažnosti a hořlavosti mají pražce z polymerů perspektivu být zařazeny do užívání v železniční trati. Dalším krokem v ověřování vlastností je jejich aplikace ve zkušebním úseku. Prostředí jejich skutečné aplikace umožní provést jejich systémové ověření se zahrnutím vlivu konstrukce koleje, zatížení od vozidel a vlivů povětrnostních podmínek.

Na základě zpracovaných výsledků výzkumu lze přímo doporučit následující parametry zkušebního úseku s pražci z polymerů:

- celostátní ostatní trať s rychlostí do 120 km·h⁻¹,
- třída hmotnosti na nápravu D (do 22,5 t),
- kolejnice tvaru 49 E1 svařená do bezстыkové koleje,
- upevnění podkladnicové pružné (doporučen typ KS),
- pražec typu HSS nebo HSS_atyp (doporučen i PES),
- tloušťka kolejového lože pod pražcem minimálně 300 mm,
- zkušební úsek v širé trati s kolejí v přímé a ve směrovém oblouku.

Minimální délka úseku, ve které je možné vyhodnotit aplikaci pražců z polymerů bez vlivu jiných typů pražců, vyplývá teoreticky z rozdělení svislé kolové síly na pražce (až 9 pražců, tj. 5,4 m) a z délky vlny při vybočení BK ve vodorovné rovině (až 20 pražců, tj. 12 m). S přihlédnutím k oběma hodnotám a k požadavku na vytvoření měřicích profilů pro diagnostiku pražců a k rezervě 25 % je doporučená délka úseku minimálně 17,4 m (tj. minimálně 30 pražců). Doporučená délka úseku, ve kterém bude zahrnuta kolej v přímé i v oblouku, je však spolu s předpokládaným výskytem nehomogenit v konstrukci pražcového podloží významně vyšší, např. 300 m.

Další doporučené parametry zkušebního úseku, které vyplývají z praktických důvodů a z konzultací s výrobcí pražců z polymerů a z konzultací se systémovými specialisty Správy železnic:

- elektrifikovaná trať,
- kolej zařazená do 4. nebo vyššího řádu (tj. zatížení alespoň 7,301 mil. hrt/rok),
- zkušební úsek včleněný do širší rekonstrukce tratě.

Zkušební úsek by měl být v souladu s předpisy SŽDC S3 a SŽDC S4 a s dokumenty používanými při zřizování zkušebních úseků (tj. směrnice SŽDC č. 67 Systém péče o kvalitu [145]).

11 Závěr

Využití primárních nebo recyklovaných polymerů ve skupině materiálů používaných v konstrukci železničního svršku, odráží současný trend modernizace a inovace železniční infrastruktury. Polymery a kompozity s polymerní matricí představují ve vývoji pražců nejnovější stupeň stavu techniky. Impulsem k použití polymerů ve výrobě kolejnicových podpor je inovativní pražec, který má trvanlivost pražce z předpjatého betonu a zároveň ohybovou tuhost srovnatelnou s tvrdým impregnovaným dřevem. Integrace pražců z polymerů do železniční infrastruktury je v zemích EU k roku 2020 ve fázi provozního ověřování ve zkušebních úsecích správců a provozovatelů tratí, mezi které patří DB AG, ProRail, NetworkRail a řada dalších. V síti tratí Správy železnic nebyly pražce z polymerů doposud ověřovány a výzkum pražců z polymerů nebyl na území ČR v období řešení tohoto výzkumu dohledán.

Cílem disertační práce bylo posoudit možnost a rozsah uplatnění zvolených typů pražců z polymerů v železničním svršku podle zvolených hledisek. V úvodu byla provedena rešerše literatury zaměřená na požadavky na pražce a jejich materiálové varianty používané v tratích Správy železnic a v zahraničí. Teoretická část práce byla věnována nejprve výpočtu namáhání pražce jako nosníku na pružném podkladu, poté posouzení směrové stability bezстыkové koleje a nakonec teplotní roztažnosti pražce s ohledem na stabilitu rozchodu koleje.

V experimentální části práce byl nejdříve uveden popis typů pražců jako zkušebních těles, která byla podrobena laboratorním a in situ zkouškám. Nejprve bylo provedeno stanovení odolnosti pražce při namáhání ohybem, potom stanovení příčného odporu pražce, poté stanovení vlivu teplotní roztažnosti pražce na odchylky v rozchodu koleje a nakonec stanovení požární bezpečnosti pražce z hlediska rozvoje požáru.

Geometrické a materiálové charakteristiky pražců získané v experimentální části byly aplikované společně s numerickými metodami z teoretické části a byly zpracovány jako parametrické studie. Na základě přímého porovnání výsledků parametrických studií pražců z polymerů a referenčních pražců z impregnovaného tvrdého dřeva a předpjatého betonu bylo možné posoudit rozsah uplatnění pražců z polymerů v železniční trati. Hlavní výsledky výzkumu jsou shrnuté v tab. 31.

Tab. 31: Hlavní výsledky výzkumu uplatnění polymerních pražců v železniční trati

	Název problematiky			
	Tuhost pražce v ohybu	Stabilita BK ve vodorovné rovině	Stabilita rozchodu koleje	Požární bezpečnost
Kritérium pro posouzení	Modul pružnosti pražce [GPa] (při zatěžovací frekvenci 5 Hz)	Kritické ohřátí ΔT_{cr} [K] při vybočení BK (počáteční imperfekce $\Delta f = 9$ mm)	Teplotní roztažnost α [K^{-1}] pražce vzhledem k odchylce v rozchodu koleje	Rozvoj požáru mezi pražci
Dřevo	13,8 (Buk_9)	141 (Buk_9)	Vyhovělo	Neposuzováno
Polymer	14,0 (HSS_1)	139 (HSS_atyp)	Vyhovělo	Vyhovělo (PES)
Předpjatý beton	41,9 (B03_2)	154 (SB8P_1)	Vyhovělo	Neposuzováno

Důležité závěry vyplývající z disertační práce z hlediska železniční praxe a rozvoje poznatků o aplikaci pražců z polymerů jsou shrnuté níže. Odolnost pražce při namáhání ohybem:

- Ohybová pevnost sledovaných pražců z polymerů splňuje odolnost vůči zatížení odpovídajícímu nápravové hmotnosti přerozdělené na pražec umístěný pod nápravou.
- Ohybová tuhost testovaných pražců z polymerů vyhovuje a je srovnatelná s tuhostí pražců z impregnovaného bukového a dubového dřeva.
- E -modul pražců z polymerů je kvůli viskoelastickému materiálovému modelu při provádění zatěžování významně závislý na rychlosti zatěžování. Z toho důvodu by stanovení jejich mechanické odolnosti mělo být vždy vyhodnoceno při cyklickém zatěžování a ne při kvazistatickém. Adekvátní zatěžovací frekvence vyplývá z traťové rychlosti (např. pro $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, přibližně 5 Hz).
- Průhyb konstrukce tratě pod zatížením při použití pražců z polymerů je srovnatelný s pražci z tvrdého dřeva i předpjatého betonu. Průhyb v nové, podbité koleji se pohybuje v oblasti doporučených hodnot, tj. 1,5 mm až 2 mm.

Stabilita bezстыkové koleje ve vodorovné rovině:

- V závislosti na tvarové variabilitě příčného průřezu pražce z polymeru může být jeho příčný odpor vyšší než odpor pražce z tvrdého dřeva a může dosahovat přibližně 80 % odporu pražce z předpjatého betonu. Tvarová variabilita polymerního pražce je umožněna technologií jeho výroby a odolností vůči rázům.
- Kritická teplota pro ztrátu stability BK při aplikaci polymerních pražců byla vypočtena v numerickém modelu a vzhledem k upínací teplotě kolejnice byla vyhodnocena jako dostatečně vysoká.

- Výsledky výpočtu kritické teploty pro posouzení stability BK v horizontální rovině jsou značně závislé na způsobu definování příčného odporu pražce v numerickém modelu BK. Je doporučeno vkládat podrobná experimentálně stanovená data příčného odporu nebo alespoň jejich bilineární model. Idealizace dat tuhoplastickým modelem vykázala nepřesné výsledky.

Koeficient délkové teplotní roztažnosti pražce vzhledem ke stabilitě rozchodu koleje:

- O vlivu délkové teplotní roztažnosti pražců z polymerů na stabilitu rozchodu koleje významně rozhoduje typ vyztužení pražce. Nárůst odchylky v rozchodu koleje neovlivňuje bezpečnost, pokud je koeficient délkové teplotní roztažnosti pražce nejvýše do $11,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Zmíněná hodnota je doporučena pro rychlost $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Požární bezpečnost pražce z pohledu rozvoje požáru:

- Pražce z polymerů uložené v kamenivu kolejového lože jsou podle experimentálního posouzení požární bezpečnosti přijatelné. V případě vzniku požáru v trati nepřispívají k jeho rozvoji a ani k šíření tepla mezi pražci.

Zjištěné charakteristiky pražců z polymerů a doporučený rozsah jejich aplikace v konstrukci koleje vyhodnocený v této disertační práci jsou referenčními hodnotami pro navazující výzkum. Praktické využití výstupů disertační práce lze předpokládat při návrhu, zřízení a diagnostikování zkušebního úseku s pražci z polymerů v tratích Správy železnic. Na disertační práci bude vhodné navázat praktickým využitím výsledků při přípravě OTP pro polymerní pražce.

Na výzkum pražců z polymerů lze navázat vývojem kompatibilního uzlu upevnění, který překonává nevýhody podkladnicového nepřímého typu, který byl převzat z dřevěných pražců. Dále je možné se věnovat vyhodnocením kontaktních parametrů zrn kameniva kolejového lože s ložnou plochou pražce z polymeru z pohledu zatížení kolejového lože nebo stability BK. Další perspektivní výzkum a aplikace pražců z polymerů může být zaměřena na inovativní řešení a konstrukční uspořádání přechodových oblastí mostů.

V Praze, 6. srpna 2020

Ing. Vít Lojda

Publikace k tématu disertační práce (únor 2014 – leden 2020)

Články v periodiku (indexováno ve WoS a Scopus)

LOJDA, Vít, Aran VAN BELKOM a Hana KREJČIŘÍKOVÁ. Investigation of the elastic modulus of polymer sleepers under a quasistatic and cyclic loading. *Civil and Environmental Engineering* [online]. 2019, **15**(2), 125–133. ISSN 1336-5835. Dostupné z: doi:10.2478/cee-2019-0016

LOJDA, Vít a Hana KREJČIŘÍKOVÁ. Track gauge stability under effect of sleeper thermal expansion. *Acta polytechnica* [online]. 2019, **59**(4), 467–475. ISSN 1210-2709. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2019.59.0467

Články ve sborníku ze zahraničních konferencí (indexováno ve WoS nebo Scopus)

RYJÁČEK, Pavel, Kamila CÁBOVÁ, Ludvík KOLPASKÝ, Jan VŮJTĚCH, Ondřej HRÁSKÝ a Vít LOJDA. Application of FRP materials for a renovation of steel railway bridges. In: *Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks - Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016, s. 2183–2189.

LOJDA, Vít a Aran VAN BELKOM. Fire safety of polymer sleepers in terms of fire propagation. In: *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019* [online]. Sofia: STEF92 Technology, 2019, s. 247–256. ISBN 978-619-7408-77-5. Dostupné z: <https://www.sgem.org/index.php/jresearch-article?citekey=Lojda20192247256>

LOJDA, Vít, Jaroslav JEŘÁBEK a Leoš HORNÍČEK. Utilizing a pressure paper for the determination of contact parameters between aggregate and a railway sleeper. In: *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019* [online]. Sofia: STEF92 Technology, 2019, s. 565–572. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*. ISBN 978-619-7408-77-5. Dostupné z: doi:10.5593/sgem2019/1.2/S02.072

Články ve sborníku z národních konferencí a konference na Slovensku

LOJDA, Vít. Set of Laboratory Tests for Composite Sleepers. In: *YOUNG SCIENTIST 2015*. Jasná: TU Košice Fakulta Stavebná, 2015. ISBN 978-80-553-1988-9.

LOJDA, Vít a Leoš HORNÍČEK. Použití bezстыkové koleje na úzkorozchodných tratích s oblouky malých poloměrů. In: *Sborník konference Juniorstav 2015*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015, s. 180.

LOJDA, Vít. Screw spike pullout test of recycled plastic. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering* [online]. 2015, 04(02), 96–102. Dostupné z: http://ijarse.com/images/fullpdf/1450105439_12_Research_Paper.pdf

LOJDA, Vít. Stanovení rázové houževnatosti recyklovaného plastu vyztuženého skelným vláknem za účelem vývoje železničního pražce. In: *Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2016*. Praha: ČVUT v Praze, 2016.

LOJDA, Vít. Effect of Thermal Expansion in the Development of Recycled plastic Railway Sleeper. In: *Trendy a inovace v dopravním stavitelství*. 20. června 2016, Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební. ISBN: 978-80-01-05973-9, 2016.

LOJDA, Vít. Držebnost upevňovadel v pražcích ze dřeva. In: *Juniorstav 2017*, 19. odborná konference doktorského studia. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2017. ISBN 978-80-214-5473-6.

LOJDA, Vít. Historický vývoj příčných pražců z hlediska materiálu: od kamene k polymerům. In: *Sborník odborného semináře RDIT 2018*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2018, s. 55-60. ISBN: 978-80-248-4270-7.

VLČEK, Josef a Vít LOJDA. Problematika upevňování podkladnice k úložné ploše příčného pražce. In: Ondřej BRET, ed. *Železniční výzkumné aktivity ŽELVA 2019*. Choceň: ČVUT v Praze, 2019, s. 150–158. ISBN 978-80-01-06622-5.

Patent v národní databázi

LIDMILA, Martin, Vít LOJDA, Michal SOMR a Václav NEŽERKA. Příkopová tvarovka z recyklovaného plastu. IPC: E01C11/22, E01F5/00. 2018. Česká republika, Patentový spis, CZ 307338. 2018-02-05. Dostupné z:
https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2017-130&plang=CS.

Studie, technické zprávy a ostatní publikace

LOJDA, Vít. Problematika mostnic z recyklovaného plastu. Praha. Diplomová práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí diplomové práce: Martin Lidmila. 2014

LOJDA, Vít. Použití polymerů v železničním svršku. Praha. Studie k odborné rozpravě v doktorském studiu. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí disertační práce: Hana Krejčířiková, 2015

LOJDA, Vít. Použití polymerů v železničním svršku. Praha. Studie ke státní doktorské zkoušce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí disertační práce: Hana Krejčířiková. 2018

LOJDA, Vít. Laboratorní stanovení příčného odporu pražce (nepublikováno, interní dokument). Praha: Katedra železničních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. 2019

STANČÍK, Vojtěch a Vít LOJDA. Parametrická studie vlivu příčného odporu různých typů pražců na stabilitu bezstykové koleje. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební. 2020

Seznam použité literatury

- [1] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Milan MOCKOVČIAK. *Železniční stavby - Železniční spodek a svršek*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2621-7.
- [2] KLIMEŠ, Ferdinand. *Železniční stavitelství I*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978.
- [3] SŽDC S3. *Železniční svršek, Účinnost od 1. března 2019*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2019
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2011. ISBN 80-708-0617-6.
- [5] CHANDRA, Vijay a John KIM. World's First Recycled Plastic Bridges. In: *Integrating Sustainability Practices in the Construction Industry*. Kansas City: ASCE, 2011, s. 585-593. ISBN: 9780784412046.
- [6] PROCHÁZKOVÁ, Z. a Aran VAN BELKOM. Footbridges made of recycled plastic material reinforced with steel bars. In: Lotte DEBELL a Helena RUSSELL, ed. *Footbridge 2014 - Past, Present & Future*. London: Hemming Information Services, 2014.
- [7] FRANCOVÁ, Aneta. *Příčné odpory pražců s plastovými pražcovými kotvami* [online]. Brno. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vysoké učení Technické v Brně, Ústav železničních konstrukcí a staveb, Vedoucí bakalářské práce: Richard Svoboda, 2013. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=75202
- [8] LIDMILA, Martin, Vít LOJDA, Michal SOMR a Václav NEŽERKA. Příkopová tvarovka z recyklovaného plastu. IPC: E01C11/22, E01F5/00. 2018. Česká republika, Patentový spis, CZ 307338. 2018-02-05. Dostupné z: https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2017-130&plang=CS.
- [9] LOJDA, Vít a Aran VAN BELKOM. Fire safety of polymer sleepers in terms of fire propagation. In: *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019* [online]. Sofia: STEF92 Technology, 2019, s. 247–256. ISBN 978-619-7408-77-5. Dostupné z: <https://www.sgem.org/index.php/jresearch-article?citekey=Lojda20192247256>
- [10] FERDOUS, Wahid, Allan MANALO, Gerard Van ERP, Thiru ARAVINTHAN, Sakdirat KAEWUNRUEN a Alex REMENNIKOV. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. *Composite Structures* [online]. 2015, **134**, 158–168. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>
- [11] LOJDA, Vít. Set of Laboratory Tests for Composite Sleepers. In: *YOUNG SCIENTIST 2015*. Jasná: TU Košice Fakulta Stavebná, 2015. ISBN 978-80-553-1988-9.
- [12] LOJDA, Vít. *Použití polymerů v železničním svršku*. Praha. Studie ke státní doktorské zkoušce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí disertační práce: Hana Krejčířiková. 2018
- [13] BOROVIČ, Amar. *Geïnstrumenteerde dwarsliggers KLP® Hybride kunststof dwarsligger*. Leeuwarden. Diplomová práce. NHL-Stenden Hogeschool, Vedoucí diplomové práce: Sietse Vlietstra. 2019
- [14] BONNETT, Clifford. *Practical railway engineering*. London: Imperial College Press, 1996. ISBN 1-86094-012-9.
- [15] KREJČÍŘÍK, Mojmír. *Po stopách našich železnic*. Praha: NADAS, 1991. ISBN 80-7030-061-2.
- [16] ŠTĚPÁN, Miloslav. *Přehledné dějiny československých železnic 1824-1948*. Praha: Dopravní nakladatelství MD, 1958.
- [17] LOJDA, Vít. Historický vývoj příčných pražců z hlediska materiálu: od kamene k

- polymerům. In: *Sborník odborného semináře RDIT 2018*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2018, s. 55-60. ISBN: 978-80-248-4270-7.
- [18] *SUWOS: Sustainable wooden railways sleepers* [online]. Paris: International Union of Railways, 2013 [vid. 2015-07-17]. ISBN 978-2-7461-2164-5. Dostupné z: www.uic.org/download.php/publication/538E.pdf
- [19] HUDEČEK, Leopold a Denisa CIHLÁŘOVÁ. The Problems of Railways in the Undermined Areas. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. 2015, **3**(1), 713–718.
- [20] VALEHRACH, Jan a Otto PLÁŠEK. Vlnkovitost kolejnic. In: *Kvalita staveb a oprav tratí železniční dopravní cesty*. Děčín: VOŠ a SPŠ Děčín, 2019, s. 40–47.
- [21] RANSOM, Philip John. *The Victorian railway and how it evolved*. Londýn: Heineman, 1990. ISBN 0-434-98083-8.
- [22] ESSERY, Bob. *Railway Signalling and Track Plans*. Hershaw: Ian Allan Publishing, 2007. ISBN 0-7110-3215-7.
- [23] KUGLER, Josef. *Železniční stavitelství*. Brno: Česká matice technická, 1947.
- [24] ČSN EN 13145+A1. *Železniční aplikace – Kolej – Dřevěné příčné a výhybkové pražce*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 491410. 2012
- [25] THIERFELDER, Tomas a Elin SANDSTRÖM. The creosote content of used railway crossties as compared with European stipulations for hazardous waste. *Science of the Total Environment* [online]. 2008, **402**(1), 106–112. ISSN 00489697. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2008.04.035](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.035)
- [26] IMPREGNACE SOBĚSLAV. *Železniční pražce - Produktový list*. 2019
- [27] MANALO, Alan, Thiru ARAVINTHAN, Warnar KARUNASENA a Adriana TICOALU. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. *Composite Structures* [online]. 2010, **92**(3), 603–611. ISSN 02638223. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compstruct.2009.08.046](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.046)
- [28] KREJČIŘÍKOVÁ, Hana. *Železniční stavby 2*. Praha: Česká technika, 2013. ISBN 978-80-01-04889-4.
- [29] LOJDA, Vít, Jaroslav JERÁBEK a Leoš HORNÍČEK. Utilizing a pressure paper for the determination of contact parameters between aggregate and a railway sleeper. In: *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019* [online]. Sofia: STEF92 Technology, 2019, s. 565–572. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. ISBN 978-619-7408-77-5. Dostupné z: [doi:10.5593/sgem2019/1.2/S02.072](https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.2/S02.072)
- [30] EUROPEAN RAILWAY AGENCY. *Guide for the application of the INF TSI According to Framework Mandate C(2010)2576 final of 29/04/2010*. 3. vyd. 2015.
- [31] KOLLER, Gunter. FFU synthetic sleepers offer material gains. *Railway Gazette International* [online]. 2010, **8**, 42–43. Dostupné z: <http://www.railwaygazette.com/>
- [32] EHRENSTEIN, Gottfried Wilhelm. *Polymerní kompozitní materiály*. 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [33] LOJDA, Vít. *Problematika mostnic z recyklovaného plastu*. Praha. Diplomová práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí diplomové práce: Martin Lidmila. 2014
- [34] LOJDA, Vít. Effect of Thermal Expansion in the Development of Recycled plastic Railway Sleeper. In: *Trendy a inovace v dopravním stavitelství*. 20. června 2016, Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební. ISBN: 978-80-01-05973-9, 2016.
- [35] CIC INNOVATION CONSULTANTS INC. *Plastic Lumber in Canadian Marine Applications*. B.m.: A Custom Market Research Study Reviewing the Potential. Environment and Plastics Industry Council (EPIC), CIC Innovation Consultants©. 2003

- [36] AXION INTERNATIONAL. *Composite Railroad Ties: Axion International Recycled plastic Railroad Ties, I-Beams, Boards, Marine Pillings* [online]. 2015 [vid. 2015-09-01]. Dostupné z: <http://www.axionintl.com>
- [37] RAILWAY SLEEPERS a 100M DEAL TO SUPPLY PLASTIC RAILWAY SLEEPERS. *railwaysleepers.com* [online]. 2013 [vid. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.railwaysleepers.com/blog/railway-sleeper-news/100m-deal-to-supply-plastic-railway-sleepers>
- [38] TUFFLEX. *Tufflex - Plastic Polymer & Intrusion Products | Product Range* [online]. 2017 [vid. 2017-01-28]. Dostupné z: <http://www.tufflex.co.za/Pages/ProductCatalogue2/ProductPage/ProductPage.asp?ProductID=16331>
- [39] WOJDASKY, Jörg. Railway Sleepers from Mixed Plastic Waste-Railwaste. *Technical report* [online]. 2010. Dostupné z: https://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/ue_statuspaterRezyklat-Bahnschwellen.pdf?wcmmode=disabled
- [40] LANKHORST ENGINEERED PRODUCTS. *KLP® Main Track Sleeper*. 2015
- [41] BEDNARCZYK, Adrian. New composite sleeper set to undergo live trials. *International Railway Journal* [online]. 2019, **59**(2), 42–45. Dostupné z: <https://flickread.com/edition/html/5c629463d9664#4>
- [42] INTEGRICO. *Next generation composite railroad ties* [online]. 2017. Dostupné z: <http://integrico.com/>
- [43] MANALO, Allan a Thiru ARAVINTHAN. Behavior of Full-Scale Railway Turnout Sleepers from Glue-Laminated Fiber Composite Sandwich Structures. *Journal of Composites for Construction* [online]. 2012, **16**(6), 724–736 [vid. 2016-09-10]. ISSN 1090-0268. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000307
- [44] FERDOUS, Wahid, Allan MANALO, Amar KHENNANE a Obada KAYALI. Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams - Concrete mix design and application. *CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES* [online]. 2015, **58**, 1–13. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.12.012
- [45] LOJDA, Vít. Screw spike pullout test of recycled plastic. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering* [online]. 2015, **04**(02), 96–102. Dostupné z: http://ijarse.com/images/fullpdf/1450105439_12_Research_Paper.pdf
- [46] VLČEK, Josef a Vít LOJDA. Problematika upevňování podkladnice k úložné ploše příčného pražce. In: Ondřej BRET, ed. *Železniční výzkumné aktivity ŽELVA 2019*. Choceň: ČVUT v Praze, 2019, s. 150–158. ISBN 978-80-01-06622-5.
- [47] LOJDA, Vít, Aran VAN BELKOM a Hana KREJČIŘÍKOVÁ. Investigation of the elastic modulus of polymer sleepers under a quasistatic and cyclic loading. *Civil and Environmental Engineering* [online]. 2019, **15**(2), 125–133. ISSN 1336-5835. Dostupné z: doi:10.2478/cee-2019-0016
- [48] VAN BELKOM, Aran. Recycled Plastic Railway Sleepers - Analysis and Comparison of Sleeper Parameters and the Influence on Track Stiffness and Performance. In: *Railway Engineering 2015*. 2015, s. 20.
- [49] KOLLER, Günther. FFU synthetic sleeper - Projects in Europe. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **92**, 43–50. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.118
- [50] LANKHORST ENGINEERED PRODUCTS. *Railway sleeper - Lankhorst Mouldings // News* [online]. 2020 [vid. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.lankhorstrail.com/en/news>
- [51] HEISING, Ineke, Geeske TERPSTRA, Paula OLIVEIRA a Mafalda GRAMAXO. Plastic sleepers of Lankhorst successfully installed by Trafikverket in test track Sweden. *Lankhorst Euronete News*. 2016, (2), 2.

- [52] PRŮMYSL OVÉ MUZEUM MLADĚJOV A MLADĚJOVSKÁ PRŮMYSL OVÁ DRÁHA. *Oprava přejezdu na silnici Nová Ves – Dětřichov* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.mladejov.cz/fotogalerie-2017-4-oprava-prejezdu>
- [53] RYJÁČEK, Pavel, Kamila HOROVÁ, Ludvík KOLPASKÝ, Jan VŮJTĚCH, Ondřej HRÁZSKÝ a Vít LOJDA. *Podklady pro zkoušku Hostivice*. Praha.: Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí. Technická zpráva. 2015
- [54] LOJDA, Vít. *Použití polymerů v železničním svršku*. Praha. Studie k odborné rozpravě v doktorském studiu. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí disertační práce: Hana Krejčířiková, 2015.
- [55] LOJDA, Vít. Držebnost upevňovadel v pražcích ze dřeva. In: *Juniorstav 2017, 19. odborná konference doktorského studia*. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2017.
- [56] LOJDA, Vít. Stanovení rázové houževnatosti recyklovaného plastu vyztuženého skelným vláknem za účelem vývoje železničního pražce. In: *Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2016*. Praha: ČVUT v Praze, 2016.
- [57] ČSN 73 6360-2. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736360. 2009
- [58] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [59] BROWN, Stephen. Soil Mechanics for Pavement Engineers. *Géotechnique*. 1996, **46**(3), 383–425.
- [60] RIESSBERGER, Klaus. One cause for rail induced vibrations. In: *Rail Technology Conferences 2014*. Düsseldorf: Europoint, Rail Technology Conferences & Exhibitions, 2014.
- [61] BROŽOVSKÝ, Jiří a Martin KREJSA. Parallelization of Computational Analysis of Reinforced Concrete Slabs on Foundation. *Key Engineering Materials* [online]. 2017, **738**, 319–328. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/kem.738.319
- [62] POWRIE, William, Louis LE PEN a CROSS INDUSTRY TRACK STIFFNESS WORKING GROUP. *A guide to track stiffness* [online]. Southampton: University of Southampton, 2016. ISBN 9780854329946. Dostupné z: https://www.thepwi.org/technical_hub/technical_hub_files/a_guide_to_track_stiffness_final_reviewr11
- [63] GIANNAKOS, Konstantinos. Deflection of a railway reinforced concrete slab track: Comparing the theoretical results with experimental measurements. *Engineering Structures* [online]. 2016, **122**, 296–309. ISSN 18737323. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2016.04.058
- [64] KREJČIŘIKOVÁ, Hana. *Modelové výpočty v železničním stavitelství*. Druhé. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01612-9.
- [65] ESVELD, Coenraad. *Modern railway track*. Second. Zaltbomme: MRT-Productions, 2001. ISBN 90-800324-3-3.
- [66] ZIMMERMANN, Hermann. *Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues*. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, 1930.
- [67] KREJSA, Martin. *Pružnost a plasticita II - modely podloží*. Ostrava. Fakulta stavební, Vysoká škola báňská - Technická universita Ostrava, Katedra mechaniky: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2017
- [68] FENDRICH, Lothar. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-642-30021-9.
- [69] ŠARDICKÁ, Klára. *Měření a analýza tuhosti podložek pod patu kolejnice*. Brno. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vysoké učení Technické v Brně, Ústav

- železničních konstrukcí a staveb, Vedoucí bakalářské práce: Jaroslav Smutný. 2019
- [70] LOJDA, Vít a Leoš HORNÍČEK. Použití bezстыkové koleje na úzkorozchodných tratích s oblouky malých poloměrů. In: *Sborník konference Juniorstav 2015*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015, s. 180.
- [71] FÜHRER, Gunter. *Oberbauberechnung*. Berlin: Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1978.
- [72] VAVERKA, Josef. *Bezстыková kolej*. Praha: NADAS, 1970.
- [73] MILTÁK, Milan. *Geometrické parametry tramvajové koleje*. Praha. Disertační práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Katedra železničních staveb, Vedoucí disertační práce: Hana Krejčířiková. 1999
- [74] BOPP, Bernd, Ulrich WEIDMANN a Michael KOHLER. Forschungsvorhaben Verifikation der Stabilität von LVG bei Meter-spur in engen Radien. *ETR Swiss, Eurailpress*. 2013, **62**(5), 84–88.
- [75] HŘEBÍČEK, Zdeněk. Měření napětí v bezстыkové koleji. *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. 2000, **10**(2), 1–13. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195402/1008.pdf/49444734-7190-4425-8d68-469e4a234c72>
- [76] LICHTBERGER, Bernhard. *Track Compendium - Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*. Hamburg: Eurailpress Tetzlaff-Hestra, 2005. ISBN 3-7771-0320-9.
- [77] ZAREMBSKI, Allan M. Lateral stiffness of the track and resistance to lateral displacement. *Railway Track & Structures*. 1995, **2**. ISSN 0033-9016.
- [78] ZAKERI, Jabbar Ali. Lateral Resistance of Railway Track. In: Xavier PERPINYA, ed. *Reliability and Safety in Railway* [online]. Tehran: InTech, 2012, s. 359. Dostupné z: doi:10.5772/35421
- [79] MARKINE, Valeri a Coenraad ESVELD. Determination of track lateral resistance and train speed limits using tamping machine and numerical optimisation. In: Michael FORDE, ed. *Railway Engineering 2000*. Edinburgh: Engineering Technics Press, 2000.
- [80] ČESKO. Zákon č. 367/2019 Sb., kterým se mění zákon č. 266/1994 Sb., o dráhách, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2020. ISSN 1211-1244.
- [81] ČSN 73 6360-1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 1: Projektování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736360. 2008
- [82] TAYLOR, Erwin Richard. *Thermal Expansion of Solids*. Russel Township: ASM International, 1998. ISBN 0-87170-623-7.
- [83] LOJDA, Vít a Hana KREJČIŘIKOVÁ. Track gauge stability under effect of sleeper thermal expansion. *Acta polytechnica* [online]. 2019, **59**(4), 467–475. ISSN 1210-2709. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2019.59.0467
- [84] ŽALUD, Zdeněk. *Bioklimatologie* [online]. Brno: Mendelova universita v Brně, Agronomická fakulta. 2015. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/ke_stazeni/bioklimatologie/bioklimatologie_2015.pdf
- [85] RIEDEL, Gabriela, Gottfried Wilhelm EHRENSTEIN a Pia TRAWIEL. *Thermal Analysis of Plastics: Theory and Practice* [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2004. Dostupné z: doi:10.3139/9783446434141
- [86] ISO/FDIS 12856-2. *Railway applications — Polymeric composite sleepers, bearers and transoms — Part 2: Product testing*. Ženeva: International Organization for Standardization. 2020

- [87] SŽDC OTP. *Obecné technické podmínky Dřevěné kolejnicové podpory pro železniční dráhy č. j. 22693/06-OP ve znění Změny 2 č. j. 1105/13-OTH, Účinnost od 1. ledna 2013*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2013
- [88] SŽDC OTP. *Obecné technické podmínky Betonové pražce pro železniční dráhy č. j. 14503/07-OP, Účinnost od 1. června 2007*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2007
- [89] HOŘEJŠÍ, Jiří a Jan ŠAFKA. *Statické tabulky*. Praha: SNTL, 1987.
- [90] SŽDC SR 103/3(S). *Služební rukověť. Výkresy materiálu pro železniční svršek KOLEJ, Účinnost od 1. srpna 2019*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2010
- [91] MASCIA, Leno. *Polymers in industry from A-Z: a concise encyclopedia*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 978-3-527-32964-9.
- [92] FERRY, John. *Viscoelastic Properties of Polymers*. Druhé. B.m.: Wiley, 1980. ISBN 9780471257745.
- [93] MORAVČÍK, Milan a Martin MORAVČÍK. *Mechanika železničních tratí*. Žilina: EDIS, 2002. ISBN 80-7100-983-0.
- [94] HORNÍČEK, Leoš, Petr BŘEŠŤOVSKÝ a Petr JASANSKÝ. Application of geocomposite placed beneath ballast bed to improve ballast quality and track stability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **236**(1). ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/236/1/012039
- [95] KAEWUNRUEN, Sakdirat, Alex REMENNIKOV a Akira AIKAWA. A numerical study to evaluate dynamic responses of voided concrete railway sleepers to impact loading. In: *Australian Acoustical Society Conference 2011, Acoustics 2011: Breaking New Ground*. 2011, s. 464–471. ISBN 9781622762699.
- [96] ČSN EN 13230-2. *Železniční aplikace - Kolej - Betonové příčné a výhybkové pražce*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736365. 2017
- [97] ISO/DIS 12856-3. *Railway applications — Polymeric composite sleepers bearers and transoms — Part 3: General requirements*. Ženeva: International Organization for Standardization. 2020
- [98] INOVA-GMBH. *Product AV200-100 M21* [online]. [vid. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://inovatesting.net/>
- [99] AASHTO T307. *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials. 1999
- [100] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. *Katalogový list. Inductive Standard Displacement Transducer WA B00553*. 2019
- [101] DEWETRON GMBH. *Product Dewetron Dewe 30-16* [online]. 2017 [vid. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.dewetron.com/product/dewe-30-16/>
- [102] COMET SYSTEM S.R.O. *Návod na použití záznamníku teploty S0121, S3121*. Rožnov pod Radhoštěm: COMET SYSTEM, 2006.
- [103] DUCKWORTH, J. Rail Sleepers in Tasmania. In: *1st International Rail Sleeper Conference*. Sydney: Anon, 1973.
- [104] MINDLIN, Raymond. Influence of rotatory inertia and shear in flexural motions of isotropic elastic plates. *American Society of Mechanical Engineers* [online]. 1951, **18**, 1031–1036. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4613-8865-4_29
- [105] SUSSMAN, Theodore, Willem EBERSOHN a Ernest SELIG. Fundamental Nonlinear Track Load Deflection Behaviour for Condition Evaluation. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2001, **1742**(1), 61–67. Dostupné z: doi:10.3141/1742-08

- [106] NOVÁK, Petr. Mechanické vlastnosti dřeva domácích dřevin. *Dřevostavitel.cz* [online]. 2013 [vid. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin>
- [107] TICOALU, Adriana, Thiru ARAVINTHAN a Warna KARUNASENA. An investigation on the stiffness of timber sleepers for the design of fibre composite sleepers. In: *Futures in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials* [online]. 2008, s. 865–870 [vid. 2015-07-16]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/11038107.pdf>
- [108] JARUŠKOVÁ, Daniela. *Pravděpodobnost a matematická statistika*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80- 010-3427-5.
- [109] HÁLA, Martin a Daniela JARUŠKOVÁ. *Pravděpodobnost a matematická statistika. Tabulky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [110] SŽDC S3/2. *Bezстыková kolej, Účinnost od 1. září 2013*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2013
- [111] HŘEBÍČEK, Zdeněk, Štefan MAYERBERGER a Tomáš ROZBOŘIL. Diagnostika příčného odporu bezстыkové koleje. *Nová železniční technika*. 2005, **13**(1).
- [112] PEŠULA, Jan. *Odbočka Jeneček výh. č. 7* [online]. 2007 [vid. 2014-04-28]. Dostupné z: http://railtrips.euweb.cz/c_cze_m07_foto10.html
- [113] KRÝŽE, Pavel. Mapa tratí s vyznačením regionů. *Mapa* [online]. 2013 [vid. 2013-11-11]. Dostupné z: <https://www.cd.cz/assets/vnitrostatni-cestovani/mapa-site/mapa-trati/kraje.pdf>
- [114] HORNÍČEK, Leoš a Petr BŘEŠŤOVSKÝ. Using the Lightweight Falling Deflectometer for Monitoring Trial Railway Sections with Under-Ballast Geocomposites. In: *The conference proceedings for the Railway Condition Monitoring 2014*. Stevenage: Herts: The Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [115] KREJČIŘIKOVÁ, Hana. *DIAKOL: Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2016*. Praha: Fakulta stavební, ČVUT v Praze. 2016
- [116] LOJDA, Vít. *Laboratorní stanovení příčného odporu pražce (nepublikováno, interní dokument)*. Praha: Katedra železničních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. 2019
- [117] DLUBAL SOFTWARE. *RFEM 5.13*. [software]. 2020.
- [118] STANČÍK, Vojtěch a Vít LOJDA. *Parametrická studie vlivu příčného odporu různých typů pražců na stabilitu bezстыkové koleje*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební. 2020
- [119] LIM, Nam Hyoung, Nam Hoi PARK a Young Jong KANG. Stability of continuous welded rail track. *Computers and Structures* [online]. 2003, **81**(22–23), 2219–2236. ISSN 00457949. Dostupné z: doi:10.1016/S0045-7949(03)00287-6
- [120] UIC 774-3R. *Actions on Structures; Track/bridge interaction, Recommendations for calculations*. Paříž: Union Internationale des Chemins de Fer. 2001
- [121] ISO. *ISO 12856-1:Plastics — Plastic railway sleepers for railway applications (railroad ties) — Part 1: Material characteristics*. 2014
- [122] AREMA CHAPTER 30. *Ties*. Maryland: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. 2018
- [123] GUPTA, Rama Kant a Manak NAGAR. *Composite sleepers: An environment friendly alternate sleeper for track and bridges*. Lucknow: Research Design and Standards Organisation (India), 2003.
- [124] AXION-STRUCTURAL INNOVATIONS. *Ecotrax - Physical and mechanical properties*. 2020
- [125] SICUT ENTERPRISES LTD. *Mechanical properties datasheet*. 2017

- [126] AMERICAN TIETEK LLC. *Composite Railroad Crosstie Technical Data* [online]. 2020. Dostupné z: <http://www.tietek.net/specsheets.asp>
- [127] EUROSTAT. Fires in rolling stock. *Rail accidents by type of accident (ERA data)* [online]. 2019. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [128] ŽŮRKOVÁ, Klára. Statistická ročenka 2018 HZS ČR. *Časopis 112* [online]. 2019, **18**(3). Dostupné z: www.hzscr.cz
- [129] SŽDC OB14. *Předpis pro stanovení organizace zabezpečení požární ochrany, Účinnost od 1. května 2014*. 2014
- [130] ČSN EN 1794-2. *Zařízení pro snížení hluku silničního provozu - Neakustické vlastnosti-Část 2: Obecné požadavky na bezpečnost a životní prostředí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 737061. 2011
- [131] MOEHLER, Udo et al. The new German prediction model for railway noise „Schall 032006“: Potentials of the new calculation method for noise mitigation of planned rail traffic, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation systems. In: *Proceedings of the 9th international workshop on Railway noise*. 2007, s. 187–192.
- [132] NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy. *Stavebnictví* [online]. 1998, (11), 33–36. Dostupné z: http://vlaky-hluk.fd.cvut.cz/data/prispevky/stavebnictvi-problematika_hluku.pdf
- [133] CLAUSEN, Carol, Robert WHITE, James WACKER, Stan LEBOW, Mark DIETENBERGER, Samuel ZELINKA a Nicole STARK. Laboratory investigation of fire protection coatings for creosote- treated timber railroad bridges Protective measures from fire for timber railroad bridges. In: *IRG Scientific conference*. 2014.
- [134] LAMPO, Richard, Thomas NOSKER a Henry SULLIVAN. *Development, testing and applications of recycled plastic composite cross ties*. Champaign: U.S. Army engineer R&D center, Construction engineering research laboratory. 2003
- [135] ČSN EN 13501-1. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 730860. 2007
- [136] AFNOR. *XP F51-201-1: Applications ferroviaires – Voie Traverses et supports en matériaux composites à matrice polymère Partie 1 : Spécifications*. 2012
- [137] ČSN EN 13501-2. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 730860. 2017
- [138] RYJÁČEK, Pavel, Kamila CÁBOVÁ, Ludvík KOLPASKÝ, Jan VŮJTĚCH, Ondřej HRÁSKÝ a Vít LOJDA. Application of FRP materials for a renovation of steel railway bridges. In: *Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks - Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016, s. 2183–2189.
- [139] FLIR SYSTEMS. *ThermaCAM Researcher*. Danderyd: FLIR SYSTEMS,AB. 2003
- [140] MAVIS NOVÝ BOR S.R.O. *Pláštěvé termočlánky MTC 10*. Nový Bor: MAVIS Nový Bor s.r.o. 2018
- [141] BITEAU, Hubert, Thomas STEINHAUS, Christopher SCHEMEL, Albert SIMEONI, Guy MARLAIR, Nicolas. BAL a Jose TORERO. Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition. In: Björn KARLSSON, ed. *Fire safety science—proceedings of the ninth international symposium* [online]. 2008, s. 1165–1176. Dostupné z: [doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-1165](https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-1165)
- [142] ČSN 73 0802. *Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro

- technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 730802. 2009
- [143] ČSN 73 0824. *Požární bezpečnost staveb. Výhřevnost hořlavých látek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 730824. 1993
- [144] BARUA, Dilip. Beaufort Wind Scale. In: M. L. SCHWARTZ, ed. *Encyclopedia of Earth Science Series* [online]. Dordrecht: Springer, 2005. ISBN 978-1-4020-3880-8. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1>
- [145] SMĚRNICE SŽDC Č. 67. *Systém péče o kvalitu v oblasti traťového hospodářství, Účinnost od 1. září 2011*. Praha: Správa železniční dopravní cesty. 2011

Seznam tabulek

Tab. 1: Abecední seznam použitých zkratk	vii
Tab. 2: Abecední seznam zavedených symbolů	viii
Tab. 3: Přehled pražců z polymerů užívaných ve světě k roku 2020	9
Tab. 4: Vybrané aplikace pražců z polymerů u zahraničních železničních správců [13, 31, 49–51]	10
Tab. 5: Silné a slabé stránky použití pražců z polymerů [11, 33, 34, 53–56]	11
Tab. 6: Informativní hodnoty spojité svislé tuhosti kolejové jízdní dráhy k_z dle podloží [3]	15
Tab. 7: Informativní hodnoty součinitele ložnosti C dle kvality podloží [65]	15
Tab. 8: Meze hmotnosti na nápravu m dle traťových tříd [3]	18
Tab. 9: Dynamický součinitel δ podle traťové rychlosti a kvality trati [3-upraveno]	18
Tab. 10: Výhody a nevýhody zřizování bezстыkové koleje [68, 72]	26
Tab. 11: Informativní souhrn parametrů pražce ovlivňující stabilitu koleje ve vodorovné rovině [77]	30
Tab. 12: Odchytky v rozchodu koleje (stupeň AL, IL, IAL v přímé koleji) podle ČSN 73 6360-2 [57]	33
Tab. 13: Teplotní roztažnost materiálů užívaných na výrobu pražců [32, 58, 85]	35
Tab. 14: Přehled zkoušek provedených v experimentální části	37
Tab. 15: Přehled pražců podrobených zkouškám v experimentální části	40
Tab. 16: Zhodnocení stanovené meze pružnosti pražce	53
Tab. 17: Hodnoty E -modulu různých materiálů pražce při kvazistatickém zatížení 0,005 Hz a jeho nárůst v důsledku zvyšování zatěžovací frekvence až do 7 Hz [47]	59
Tab. 18: Vyloučení odlehlých pozorování E -modulu impregnovaných bukových pražců	61
Tab. 19: Průměr, směrodatná odchylka a hranice intervalu 95% spolehlivosti E -modulu sady pražců	62
Tab. 20: Rekapitulace pražců podrobených zkoušce stanovení příčného odporu	73
Tab. 21: Počáteční hodnota amplitudy výchylky Δf (imperfekce) v numerickém modelu BK převzatá z [57] jako provozní odchylka od teoretického vzepětí	85
Tab. 22: Materiálové charakteristiky oceli UIC 900 A dle Dlubal RFEM 5.13 [117]	86
Tab. 23: Průřezové a materiálové charakteristiky pražců v numerickém modelu	86
Tab. 24: Souhrn parametrů uzlu upevnění použitých v numerickém modelu BK	87
Tab. 25: Výpočet podélného odporu pražce v kamenivu kolejového lože [118]	88
Tab. 26: Kritické ohřátí ΔT_{cr} odpovídající napětí σ_{cr} při vybočení konstrukce BK [118]	89
Tab. 27: Maximální, minimální pozorované hodnoty teploty a jejich rozdíl	92
Tab. 28: Součinitel délkové teplotní roztažnosti α pražce [83]	94
Tab. 29: Koeficient teplotní délkové roztažnosti pražců z polymerů užívaných v zahraničí	94
Tab. 30: Mezní teplota dlouhodobé použitelnosti polymerů a charakteristické body termomechanických křivek polymerů používaných k výrobě pražců [4]	100
Tab. 31: Hlavní výsledky výzkumu uplatnění polymerních pražců v železniční trati	111

Seznam obrázků

Obr. 1: Příčný řez klasickou konstrukcí železniční tratě v násypu a její názvosloví [3-upraveno].....	1
Obr. 2: Vybrané příklady prvků z polymerů použitých v tratích Správy železnic [9]	2
Obr. 3: Vybrané aplikace pražců na bázi recyklovaných polymerů v zahraničí [11], [13].....	2
Obr. 4: Typy kolejnicových podpor rozdělené dle podepření.....	3
Obr. 5: Názvosloví příčného pražce [2-upraveno]	3
Obr. 6: Příklady typů pražců: A) kamenné bloky [15, 16], B) impregnované tvrdé dřevo, C) předpjatý beton, D) ocelový pražec tvaru Y, E) polymer (recyklovaný)	4
Obr. 7: Materiály používané pro výrobu pražců v ČR a ve světě (nad časovou osou) a polymery používané v zahraničí (pod časovou osou) [17].....	4
Obr. 8: Relativní četnost pražců z tvrdého impregnovaného dřeva, předpjatého betonu a oceli v tratích Správy železnic k roku 2010 [18-upraveno]	5
Obr. 9: Porovnání Winklerovy a Pasternakovy teorie pro výpočet pružného podloží [61-upraveno].....	13
Obr. 10: Rovnováha sil na elementu nosníku [1-upraveno].....	16
Obr. 11: Příčinkové čáry ohybového momentu a průhybu kolejnice dle Zimmermanna [66-upraveno].....	17
Obr. 12: Rozdělení svislé kolové síly Q na pražce přes kolejnici při různém součiniteli ložnosti C	17
Obr. 13: Model nosníku zatížený dvěma osamělými břemeny uložený na podkladu idealizovaném podle Winklera [61-upraveno].....	19
Obr. 14: Svislé síly pro výpočet ohybu prutu [61]	20
Obr. 15: Rozložení uzlů i , zatížení a podpor po délce pražce pro výpočet metodou FDM....	21
Obr. 16: Výsledky výpočtu nosníku na pružném podkladu prezentované jako ohybová čára a ohybový moment pražce při zvolených vstupních parametrech výpočtu.....	24
Obr. 17: Spojení kolejnic A) kolejnicovým stykem (můstková deska a dvojčité pražce) a B) svarem	26
Obr. 18: Rovnováha osových sil na elementu prutu [1-upraveno], průběh osově síly N_y v délce BK [73].	27
Obr. 19: Vliv teplotní změny kolejnicového pásu na stykovanou a bezstykovou kolej [70, 74]	28
Obr. 20: Odpor působící proti vodorovnému vybočení kolejového roštu při ztrátě stability BK (symetrické vybočení tvaru půlvlny) [68-upraveno]	29
Obr. 21: Normální rozchod koleje a jeho určení podle ČSN 73 6360-1.....	33
Obr. 22: Schéma vzniku odchylky v rozchodu koleje $\pm\Delta l$ v důsledku změny teploty $\pm\Delta T$ a délkové teplotní roztažnosti pražce při volné dilataci pražce [83-upraveno].....	35
Obr. 23: Vypočtená odchylka v rozchodu koleje způsobená změnou teploty pražce o $\pm 45^\circ\text{C}$	36
Obr. 24: Materiálový model pro polymery (vlevo) a souvislost mezi napětím a deformací (vpravo) [92].....	42
Obr. 25: Přehled provedených laboratorních zkoušek pražce namáhaného ohybem	43
Obr. 26: Zatlačení štěrku pod ložnou plochou A) ohybově tuhé pražce a B) poddajného pražce	44

Obr. 27: Nepříznivý způsob podepření pražce v koleji (část A), a z něj vyplývající použitý laboratorní model podepření pražce (část B) a vnitřní síly odpovídající modelu (část C).....	45
Obr. 28: Podrobný popis a rozměry sestavy pro provedení laboratorní zkoušky ohyb pražce	46
Obr. 29: Sledované typy pražců podrobené namáhání ohybem a popis laboratorní sestavy	46
Obr. 30: Porovnání záznamu dat z průhybu kolejnicového pásu při zatížení v koleji a v laboratoři	47
Obr. 31: Ocelové otočné ložisko umožňující natočení podpory.....	48
Obr. 32: Schéma namáhání pražce ohybem a měření svislých posunutí D_1 a D_3 nad podporami a D_2 uprostřed rozpětí pro výpočet průhybu pražce d	48
Obr. 33: Statické zatížení pražce Buk_1 ohybem (úvodní zkouška, zatížení zvyšováno do porušení).....	50
Obr. 34: Sekvence cyklického zatížení pro zkoušku pražce ohybem při konstantní zatěžovací frekvenci a vzrůstající hodnotě zatížení	51
Obr. 35: Zatěžovací diagram prokazující lineární závislost zatížení a průhybu sledovaných pražců s vyznačením rozsahu zatížení od nápravy (přepočítáno na jeden pražec).....	52
Obr. 36: Hysterezní křivky z namáhání pražců ohybem (impregnované tvrdé dřevo Dub_1, polymer HSS_1 a předpjatý beton B03_1)	52
Obr. 37: Sekvence kvazistatického a cyklického zatížení pro zkoušku pražce ohybem pro stanovení charakteristik pružnosti pražce [47].....	55
Obr. 38: Informativní záznam z namáhání pražců zatížením F_{p_z} při různých zatěžovacích frekvencích.....	55
Obr. 39: Schéma pro výpočet E -modulu při čtyřbodovém ohybu	56
Obr. 40: Záznam průhybu d a zatížení F_{p_z} , který ukazuje, že hodnota d_{\max} (resp. d_{\min}) nenastává v okamžik hodnoty $F_{p_z \max}$ (resp. $F_{p_z \min}$) ale opožděně (pražec PES_1, zatěžovací frekvence 3 Hz).....	57
Obr. 41: Podrobné výsledky E -modulu sledovaných pražců při různých zatěžovacích frekvencích [47].....	57
Obr. 42: Souhrnné výsledky E -modulu pražců ze sledovaných materiálů, stanovené při zvolených hodnotách zatěžovací frekvence f [47]	59
Obr. 43: Výsledky E -modulu sady impregnovaných bukových pražců [47]	62
Obr. 44: Pokles pražce (o různé ohybové tuhosti EI_y a rozměrech b a h) v místě pod kolejnicovým pásem při různém součiniteli ložnosti C vypočtený jako nosník na pružném podkladu	64
Obr. 45: Příčný odpor pražce: princip stanovení, vyhodnocení a minimální hodnoty dle SŽDC S3/2.....	68
Obr. 46: Mapa tratí [113] a schéma lokality s vyznačenou polohou pražců podrobených zkouškám.....	69
Obr. 47: Příprava pražců z polymeru pro stanovení jejich příčného odporu in situ [12]	70
Obr. 48: Stanovení příčného odporu pražce in situ v Hostivici [12]	71
Obr. 49: Záznam měření příčného posunu pražce in situ	71
Obr. 50: Výsek laboratorně modelovaného železničního svršku pro stanovení příčného odporu pražce	73
Obr. 51: Laboratorní model železničního svršku použitý pro stanovení příčného odporu pražce	74

Obr. 52: Stavba laboratorního modelu pro stanovení příčného odporu pražce.....	74
Obr. 53: Stavba modelu s naznačením vrstev kameniva kolejového lože a jejich dynamické stabilizace.....	76
Obr. 54: Poloha RZZ na kamenivu v úrovni ložné plochy pražce a schéma sestavy RZZ	77
Obr. 55: Laboratorní model ve fázi provádění RZZ a ve fázi před stanovením příčného odporu pražce.....	77
Obr. 56: Výsledky rázového modulu deformace M_{vd} z provedené RZZ.....	77
Obr. 57: Provádění laboratorní zkoušky pro stanovení příčného odporu pražce	78
Obr. 58: Vyhodnocení laboratorního měření příčného odporu pražce a idealizace bilineárním diagramem.....	79
Obr. 59: Příčná síla sledovaných typů pražce F_x vyhodnocená při příčném posunu u 2 mm a reziduální příčný odpor $F_{x,rez}$ (vyhodnocený při průměrném posunu mezi 9 a 10 mm).....	79
Obr. 60: Měření příčného odporu pražce SB8P ve zkušebním boxu Centra dopravního výzkumu [115].....	80
Obr. 61: Porovnání záznamu měření příčného odporu pražce SB8P_1 se záznamem: CDV (Krejčířiková; laboratorní) [115], ČVUT (Lojda; laboratorní) [116] a VUT (Francová; in-situ) [7]	81
Obr. 62: Renderované a drátěné zobrazení numerického modelu BK a hlavní vstupní výpočtové parametry	83
Obr. 63: Kombinace zatížení teplotou a impulsem síly pro rozbor stability konstrukce (vlevo) a první teoretický tvar vybočení BK (vpravo) [118].....	84
Obr. 64: Tvary vybočení BK ve vodorovné rovině nalezené výpočtem v numerickém modelu [118].....	85
Obr. 65 Podélná tuhost pražce a tuhost uzlu upevnění v modelu se sériovým zapojením pružin [118].....	88
Obr. 66: Umístění snímačů teploty pražců a vzduchu v železniční trati v Hostivici	91
Obr. 67: Vývoj teploty na ložné ploše pražců uložených v kamenivu	92
Obr. 68: Maximální rozsah změny teploty na ložné ploše pražce vzhledem k upínací teplotě kolejnicových pásů dle SŽDC S3/2.....	93
Obr. 69: Krajiní hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti pražce vzhledem k odchylce v rozchodu koleje na stupni AL a vzhledem k teplotě pražce PES_5 [83-upraveno].....	95
Obr. 70: Termomechanická křivka amorfního polymeru (vlevo) např. PS, PVC a vysoce krystalického polymeru (vpravo) např. PE, PP [4]	100
Obr. 71: Pražce typu PES z recyklovaného polymeru připravené pro stanovení požární bezpečnosti.....	102
Obr. 72: Rozmístění termočlánků na pražcích a polohy iniciační nálože požáru [9]	103
Obr. 73: Časosběrné snímky z požární zkoušky (hoření iniciační nálože požáru a přilehlého pražce - k rozvoji požáru na další pražce po dobu 64 minut nedošlo) [9].....	104
Obr. 74: Větrná růžice popisující směr a rychlost proudění vzduchu při provádění požární zkoušky vytvořená z dat zaznamenaných anemometrem [9]	105
Obr. 75: Rozložení teploty v okolí požářiště zobrazené metodou termovize: A) po zapálení iniciační nálože; B) trvalé plamenné hoření pražce PES_3 před ukončením zkoušky [9] ...	106
Obr. 76: Teplota povrchu zaznamenaná termočlánky: pražce izolované kamenivem nebyly po dobu 64 minut zasaženy požárem ani významným množstvím sálavého tepla [9]	106