



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTARSTVO INFRASTRUKTURE

TEHNIČKA SPECIFIKACIJA TSG-212 - 00X: 2023

Na temelju članka 50. stavka 6. Zakona o sigurnosti željezničkog prometa (SL RS br. 30/18), ministar infrastrukture izdaje tehničku specifikaciju

GORNJI USTROJ ŽELJEZNICE - IZRAČUN DOPUŠTENIH VERTIKALNIH OPTEREĆENJA NA TRAČNICAMA — TSPI - PGV.10.311: 2023

Ministar infrastrukture

—

Broj:

U Ljubljani

Ova tehnička specifikacija (TSPI – PGV.10.311: 2023) izdana je u skladu s postupkom pružanja informacija temeljem Direktive (EU) 2015/1535 Europskog parlamenta i Vijeća od 9. rujna 2015. o utvrđivanju postupka pružanja informacija u području tehničkih propisa i pravila o uslugama informacijskog društva (SL L 241, 17. 9. 2015., str. 1.).

Sadržaj

1	Uvodni dio.....	3
1.1	Predmet tehničke specifikacije.....	3
1.2	Definicije pojmova.....	3
2	Sile koje djeluju na tračnicu.....	4
3	Izračun slijeganja, momenta savijanja i pritiska.....	5
3.1	Pojedinačna sila kotača.....	5
3.2	Skupina sila kotača.....	5
4	Čvrstoća na savijanje u podnožju tračnica i dinamički faktor.....	7
4.1	Dinamički faktor.....	7
5	Smično naprezanje u glavi tračnice.....	8
6	Uvjeti za ugradnju tračnica.....	9
6.1	Uvjeti za ugradnju tračnica na glavnim prugama.....	9
6.2	Uvjeti za ugradnju tračnica na regionalnim prugama.....	9
6.3	Uvjeti za ugradnju tračnica na sporednim kolosijecima kolodvorskih i industrijskih kolosijeka.....	9
7	Referentni dokumenti.....	10
8	Literatura.....	10
10	PRILOZI.....	11
10.1	Prilog 1.: Značenje simbola.....	11
10.2	Prilog 2.: Vrijednosti faktora utjecaja η i μ prema Zimmermannu.....	12
10.3	Prilog 3.....	13
10.4	Prilog 4.: Primjer izračuna.....	14

1 Uvodni dio

1.1 Predmet tehničke specifikacije

U tehničkoj specifikaciji utvrđuje se postupak za izračun kvara tračnice, moment savijanja u podnožju tračnice i granično opterećenje na tračnu gredu pri prometnom opterećenju. Obuhvaća i izračun naprezanja savijanja u podnožju tračnice kao nosača i izračun tangencijalnih naprezanja u glavi tračnice kao izravnom putu kretanja željezničkih vozila.

Svrha je tehničke specifikacije ocijeniti sukladnost konstrukcije kolosijeka u skladu s točkom 4.2.6. Otpor kolosijeka na stvarna opterećenja tehničkih specifikacija za interoperabilnost za podsustav infrastruktura. Konstrukcija kolosijeka u skladu je sa zahtjevima ako se može dokazati da su tehničke značajke tračnica (profil, nagib, kvaliteta), sustava za pričvršćivanje, pragova (razmak, uređaji za poprečno pomicanje kolosijeka) i greda tračnice (debljina, granulacija) i uvjeti uporabe (osovinsko opterećenje, brzina, minimalni polumjer luka, nadvišenje i nedostatak nadvišenja) primjereni i da ispunjavaju radne uvjete podsustava infrastruktura.

Izračun gornjeg ustroja pruge u skladu s ovom tehničkom specifikacijom primjenjuje se i kada osovinska opterećenja premašuju standardna opterećenja određene kategorije pruge (izvanredne pošiljke) ili u slučaju nestandardne konstrukcije kolosijeka (npr. tračnice manjeg profila, veći razmak pragova, tračnice s većim trošenjem itd.).

1.2 Definicije pojmova

U ovoj tehničkoj specifikaciji upotrijebljeni tehnički izrazi imaju sljedeće značenje:

Osovinsko opterećenje (njem. *Achslast*) P je sila težine vozila u stanju mirovanja koja djeluje na jednu osovinu u obje osovine i horizontale.

Statična sila kotača (njem. *statische Radkraft*) Q_{st} je sila težine vozila u stanju mirovanja koja djeluje na jedan kotač u osovini i horizontali.

Kvazistatična sila kotača (njem. *quasistatische Radkraft*) Q_{qst} je vertikalna komponenta nekompenzirane bočne sile u krivulji.

Efektivna sila kotača (njem. *effektive Radkraft*) Q zbroj je vertikalne statične i kvazistatične sile kotača.

Dinamična sila kotača (njem. *dynamische Radkraft*) je umnožak efektivne sile kotača Q i dinamičkog faktora α .

Brzina pruge (njem. *Streckengeschwindigkeit*) je najveća brzina za koju je projektirana pruga ili dio pruge.

Vlačna čvrstoća (njem. *Zugfestigkeit*) je naprezanje pri kojem se testni komad čelika tračnica lomi pri jednoliko rastućem vlačnom opterećenju.

Čvrstoća na savijanje (njem. *Biegespannung*) je kvocijent momenta savijanja i otpora tračnice.

Smično naprezanje (njem. *Schubspannung*) τ je razlika između vertikalnih tlačnih naprezanja i horizontalnih radijalnih naprezanja te je funkcija sile kotača Q i polumjera kotača r .

Dinamička čvrstoća (njem. *Dauerfestigkeit*) je naprezanje koje, unatoč promjeni težine, ne uzrokuje zamor materijala.

Dinamički faktor pojačanja (njem. *Geschwindigkeitsfaktor*) bilježi utjecaj dinamičkih sila kotača zbog anomalija na dodirnoj površini kotača i tračnice te nepravilnosti u geometrijskom položaju kolosijeka.

2 Sile koje djeluju na tračnicu

Na gornji ustroj pruge djeluju vertikalne i horizontalne (poprečne i uzdužne) sile kotača. Konstrukcija kolosijeka mora biti takva da izdrži vertikalne sile kotača. Horizontalne sile kotača mogu se zanemariti pri izračunu slijeganja, momenta savijanja i pritiska.

Vertikalne sile kotača djeluju na tračnicu kao:

- Statične sile kotača Q_{st} .

Statična sila kotača je sila težine vozila u mirovanju koja djeluje na jedan kotač u vertikalnom i horizontalnom smjeru i izračunava se prema jednadžbi:

$$Q_{st} = 0,5 P, \quad (3.1)$$

gdje je:

Q_{st} statična sila kotača,
 P osovinsko opterećenje.

- Kvazistatične sile kotača Q_{qst}

Kvazistatična sila kotača vertikalna je komponenta nekompenzirane bočne sile u krivulji i u prosjeku je jednaka 20 % vrijednosti statične sile kotača, izračunano prema jednadžbi:

$$Q_{qst} = 0,2 Q_{st}, \quad (3.2)$$

gdje je:

Q_{qst} kvazistatična sila kotača,
 Q_{st} statična sila kotača.

- efektivne sile kotača Q

efektivna sila kotača Q zbroj je statične i kvazistatične sile kotača i izračunava se prema jednadžbi:

$$Q = Q_{st} + Q_{qst}, \quad (3.3)$$

gdje je:

Q efektivna sila kotača,
 Q_{st} statična sila kotača,
 Q_{qst} kvazistatična sila kotača.

- Dinamičke sile kotača Q_{din}

Dinamička sila kotača je umnožak efektivne sile kotača Q i dinamičkog faktora α i izračunava se prema jednadžbi:

$$Q_{din} = Q\alpha, \quad (3.4)$$

gdje je:

Q_{din} dinamička sila kotača,
 Q efektivna sila kotača,
 α dinamički faktor.

Dinamički faktor α ovisi o brzini i stanju kolosijeka te je detaljnije objašnjen u poglavlju 5. ove specifikacije.

Efektivna sila kotača ne smije biti veća od 145 kN (SIST EN 14363, 2005).

3 Izračun slijeganja, momenta savijanja i pritiska

Slijeganje tračnice, moment savijanja tračnice i pritisak praga na gredu tračnice izračunavaju se prema Zimmermannovoj metodi koja je priznata kao standardna metoda za izračun gornjeg ustroja željezničkih pruga. Metoda se temelji na pretpostavci da je tračnica uzdužni oslonac bez težine na elastičnoj podlozi, koji se oslanja na zamišljene uzdužne pragove s jednakom efektivnom nosivom površinom kao i za poprečne pragove.

Jednadžbe za slijeganje, moment savijanja i pritisak izračunavaju se iz uvjeta ravnoteže, u kojem su poprečna sila i moment savijanja u promatranom presjeku uzdužne grede u ravnoteži s djelovanjem vanjskih sila u obliku jednoliko raspoređenog opterećenja, i to za pojedinačnu silu kotača i za skupinu sila kotača.

3.1 Pojedinačna sila kotača

Za pojedinačnu silu kotača primjenjuju se sljedeće jednadžbe:

- slijeganje tračnice:

$$y = \frac{Q}{2bCL}, \quad (4.1)$$

- moment savijanja:

$$M = \frac{QL}{4}, \quad (4.2)$$

- granični pritisak na gredu tračnice:

$$p = \frac{Q}{2bL}. \quad (4.3)$$

3.2 Skupina sila kotača

Za skupinu sila kotača primjenjuju se sljedeće jednadžbe:

- slijeganje tračnice:

$$y = \frac{1}{2bCL} (Q_1 \eta_1 + Q_2 \eta_2 + \dots), \quad (4.4)$$

- moment savijanja:

$$M = \frac{L}{4} (Q_1 \mu_1 + Q_2 \mu_2 + \dots), \quad (4.5)$$

- granični pritisak na gredu tračnice:

$$p = \frac{\sum Q \eta}{2bL} = \frac{1}{2bL} (Q_1 \eta_1 + Q_2 \eta_2 + \dots), \quad (4.6)$$

gdje je: μ faktor utjecaja na moment savijanja,

η faktor utjecaja za savijanje,

Q efektivna sila kotača,

M moment savijanja,

C koeficijent fleksibilnosti tračnice,

p pritisak tračnice na prag,

b širina zamišljenog uzdužnog praga,
 L osnovna vrijednost gornjeg ustroja.

Širina zamišljenog uzdužnog praga b i osnovna vrijednost gornjeg ustroja L izračunavaju se s pomoću sljedećih jednažbi:

$$b = \frac{2ub_1}{a}, \quad (4.7)$$

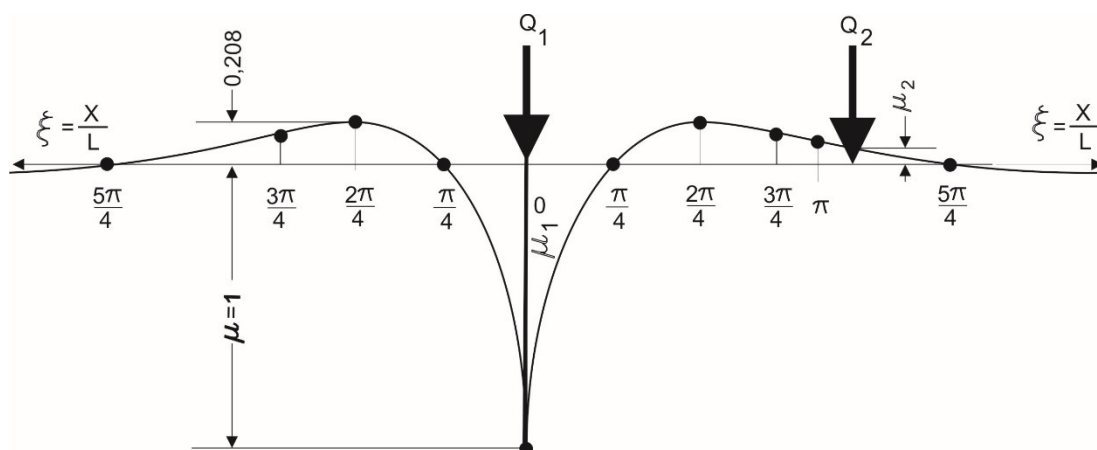
$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}}, \quad (4.8)$$

gdje je:

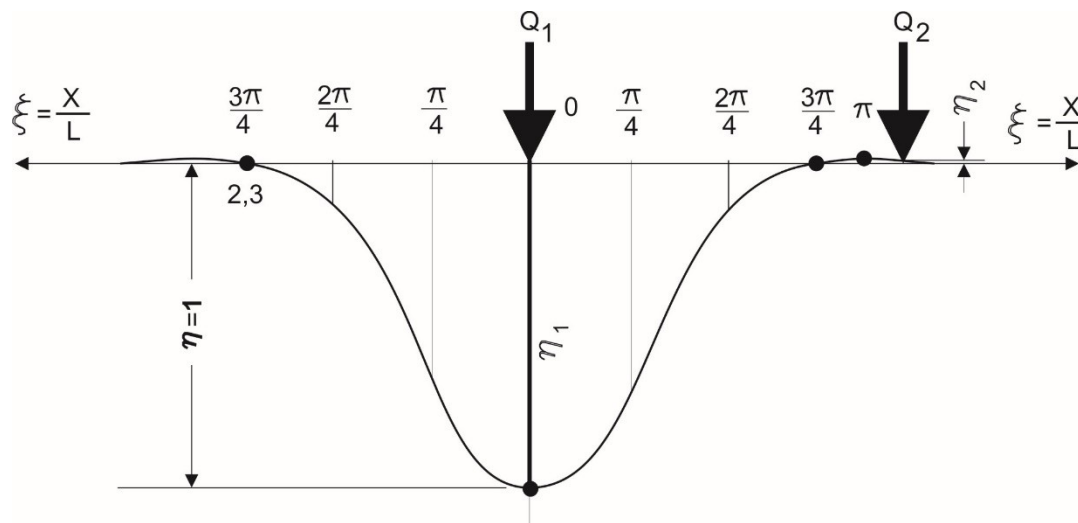
b širina zamišljenog uzdužnog praga,
 b_1 širina poprečnog praga,
 u udaljenost od osi tračnice do kraja praga,
 a razmak između poprečnih pragova,
 L konstanta gornjeg ustroja,
 E modul elastičnosti tračnice $E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$,
 I moment inercije tračnice,
 C koeficijent fleksibilnosti tračnice.

Koeficijent fleksibilnosti tračnice C prikazan je u Prilogu 3. za različite uvjete pruge.

Faktori utjecaja za moment μ i za savijanje η prikazani su na slici 1. i slici 2., a njihove su vrijednosti prikazane u Prilogu 2.



Slika 1.: Faktor utjecaja za moment



Slika 2.: Faktor utjecaja za savijanje

4 Čvrstoća na savijanje u podnožju tračnica i dinamički faktor

Srednja vrijednost čvrstoće na savijanje u podnožju tračnice izračunava se prema jednadžbi:

$$\sigma = \frac{M}{W}. \quad (5.1)$$

Na temelju brojnih eksperimenata (Fastenrath, 1977.), utvrđeno je da su srednja čvrstoća na savijanje u podnožju tračnice σ i srednje savijanje tračnice y do brzine od 200 km/h više-manje konstante oko kojih se stvarne vrijednosti raspršuju. Raspršivanje se može opisati standardnom devijacijom odstupanja od srednjih vrijednosti. Koristeći standardnu devijaciju, brzinu pruge, stanje pruge i faktor statističke vjerojatnosti, izračunavamo dinamički faktor α i time maksimalne i minimalne vrijednosti čvrstoće na savijanje i slijeganja tračnice.

Maksimalna čvrstoća na savijanje izračunava se prema jednadžbi:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \alpha, \quad (5.2)$$

gdje je:

- σ srednja čvrstoća na savijanje,
- σ_{max} maksimalna čvrstoća na savijanje,
- M moment savijanja u podnožju tračnice,
- W moment otpora tračnice,
- α dinamički faktor.

Dopuštena naprezanja u tračnici pod promjenjivim opterećenjem, odnosno njihove trajne dinamičke čvrstoće, navedene su u tablici 3. Priloga 3.

4.1 Dinamički faktor

Dinamički faktor je funkcija brzine pruge i stanja gornjeg ustroja pruge i statističke vjerojatnosti hvatanja pogrešaka.

Za brzine $V < 60$ km/h izračunava se prema jednadžbi:

$$\alpha = 1 + ts, \quad (5.3)$$

za brzine $60 \leq V \leq 200$ km/h prema jednadžbi:

$$\alpha = 1 + ts \left(1 + \frac{V - 60}{140} \right), \quad (5.4)$$

gdje je:

α dinamički faktor,

V brzina pruge (km/h),

$t = 1$ faktor statističke vjerojatnosti (68 % vjerojatnost hvatanja svih pogrešaka),

$t = 2$ faktor statističke vjerojatnosti (95,5% vjerojatnost hvatanja svih pogrešaka),

$t = 3$ faktor statističke vjerojatnosti (99,7% vjerojatnost hvatanja svih pogrešaka),

$s = 0,1$ standardna devijacija pogrešaka u vrlo dobrom stanju pruge,

$s = 0,2$ standardna devijacija pogrešaka u dobrom stanju pruge,

$s = 0,3$ standardna devijacija pogrešaka u lošem stanju pruge.

5 Smično naprezanje u glavi tračnice

Smično naprezanje u glavi tračnice rezultat je razlika između vertikalnih tlačnih naprezanja i horizontalnih radijalnih naprezanja. To je najveća ravnina na dubini 4–6 mm ispod kontaktne površine kotača i tračnice i može dovesti do ozbiljnog oštećenja tračnice pod nazivom *head check*.

Maksimalno smično naprezanje u glavi tračnice τ_{max} izračunava se prema jednadžbi:

$$\tau_{max} = 412 \sqrt{\frac{Q}{r}}, \quad (6.1)$$

dopušteno smično naprezanje prema jednadžbi:

$$\tau_{dop} = 0,3 \sigma_t. \quad (6.2)$$

Efektivna sila kotača Q koja još ne dovodi do prekoračenja dopuštenog smičnog naprezanja glave tračnice, a time i oštećenja glave tračnice je:

$$Q = 4,9 \cdot 10^{-7} \cdot r \cdot \sigma_t^2, \quad (6.3)$$

gdje je:

τ smično naprezanje [N/mm²],

σ_t vlačna čvrstoća tračnice [N/mm²],

Q efektivna sila kotača [kN],

r polumjer kotača [mm].

6 Uvjeti za ugradnju tračnica

6.1 Uvjeti za ugradnju tračnica na glavnim prugama

Kolosijeci otvorene pruge glavnih pruga ili pruga paneuropske prometne mreže TEN-T i glavni kolosijeci tih pruga moraju odgovarati osovinskom opterećenju kategorija F1, F2, P3 i P4 TSI-ja. To znači da moraju osigurati osovinsko opterećenje od 225 kN ili biti izrađeni s tračnicama oblika 60 E1 postavljenim pod nagibom od 1°: 40 ili 1°: 20 i s razmakom od 60 cm između pragova.

60 Čelik za tračnice E1 mora imati tvrdoću od najmanje 200 HBW i vlačnu čvrstoću od najmanje 900 N/mm², a u ispitivanju zamora materijala mora izdržati najmanje 5×10⁶ ciklusa bez oštećenja (TSI INF 1299/2014/EU).

Tračnica je interoperabilna komponenta, pa se prije ugradnje mora pribaviti EC – Izjava o sukladnosti.

Kada se koriste rabljene tračnice 60 E1, izračunom u skladu s ovom specifikacijom mora se dokazati da čvrstoća na savijanje u podnožju tračnice ne prelazi trajnu dinamičku čvrstoću tračnice.

6.2 Uvjeti za ugradnju tračnica na regionalnim prugama

Kolosijeci otvorene pruge regionalnih pruga i glavni kolosijeci ovih pruga moraju odgovarati osovinskom opterećenju kategorija F3 i P5 iz TSI-ja. To znači da moraju osigurati osovinsko opterećenje od 200 kN ili biti izrađeni s tračnicama oblika 49 E1 postavljenim pod nagibom od 1°: 40 ili 1°: 20 i s razmakom između pragova ne većim od 63 cm.

49 Čelik za tračnice E1 mora imati tvrdoću od najmanje 200 HBW i vlačnu čvrstoću od najmanje 680 N/mm², a u ispitivanju zamora materijala mora izdržati najmanje 5 × 10⁶ ciklusa bez oštećenja (TSI INF 1299/2014/EU).

Tračnica je interoperabilna komponenta, pa se prije ugradnje mora pribaviti EC – Izjava o sukladnosti.

Kada se koriste rabljene tračnice 49 E1 ili 60 E1 ili s većim razmakom između poprečnih pragova, izračunom u skladu s ovom specifikacijom mora se dokazati da čvrstoća na savijanje u podnožju tračnice ne prelazi trajnu dinamičku čvrstoću tračnice.

6.3 Uvjeti za ugradnju tračnica na sporednim kolosijecima kolodvorskih i industrijskih kolosijeka

Kolodvorski kolosijeci i industrijski kolosijeci moraju osigurati osovinsko opterećenje od 180 kN bez obzira na sustav tračnica i razmak među pragovima koji se koriste na tim kolosijecima.

49 Čelik za tračnice E1 mora imati tvrdoću od najmanje 200 HBW i vlačnu čvrstoću od najmanje 680 N/mm², a u ispitivanju zamora materijala mora izdržati najmanje 5 × 10⁶ ciklusa bez oštećenja (TSI INF 1299/2014/EU).

Tračnica je interoperabilna komponenta, pa se prije ugradnje mora pribaviti EC – Izjava o sukladnosti.

7 Referentni dokumenti

Smjernica se temelji na sljedećoj referentnoj dokumentaciji:

SIST EN 15528:2016: Željeznički sustav -- Kategorije pruga za određivanje sučelja između granica opterećenja željezničkih vozila i infrastrukture;

SIST EN 13674-1-2011, Željeznički sustav – Željeznički gornji ustroj – Tračnica – 1. dio: Vignoleove željezničke tračnice mase 46 kg/m i više;

SIST EN 14363:2005: Željeznički sustav – Ispitivanje i simulacija za prihvatljivost voznih svojstava željezničkih vozila – Dinamička i statička ispitivanja;

UIC KODEKS 518: Fahrtechnische Prufung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrsicherheit Fahrwegbeanspruchung und Fahrverhalten;

Uredba o kategorizaciji pruga (SL RS br. 4/09, 5/09 – ispravak, 62/11, 66/12, 12/13 i 30/18 – ZVZelP-1).

8 Literatura

D. Gottwald: Die neue Oberbauberechnung der Deutschen Bundesbahn, 1999.

E. Klotzinger: Der Oberbauschotter, Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung, ETR 1, 2, 2008.

Zgonc et al.: Željeznički tir – zgornji ustroj in elementi trase železniške proge, Ljubljana 2021, v pripravi.

9

10 PRILOZI

10.1 Prilog 1.: Značenje simbola

a	razmak između pragova [cm]
α	dinamički faktor
b	širina zamišljenog uzdužnog praga [cm]
b_1	širina poprečnog praga [cm]
C	koeficijent fleksibilnosti kolosijeka [$C = 100 \text{ N/cm}^3$]
E	modul elastičnosti tračnice [$E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$]
I	moment inercije tračnice [cm^4]
M	moment savijanja [Ncm]
p	pritisak tračnice na prag [N/cm^2]
r	polumjer kotača [mm]
Q	efektivna sila kotača [N]
Q_{st}	statična sila kotača [N]
Q_{qst}	kvazistatična sila kotača [N]
Q_{din}	dinamička sila kotača [N]
u	udaljenost između osi tračnice i kraja praga (duljina efektivne kontaktne površine praga)
W	moment otpora tračnice [cm^3],
x	stvarna udaljenost točke od promatranog presjeka [cm]
y	slijeganje praga [cm]
σ	čvrstoća na savijanje [N/cm^2]
σ_t	vlačna čvrstoća tračnice [N/mm^2]
σ_{dop}	dopuštena čvrstoća na savijanje u tračnici [N/mm^2]
τ	smično naprezanje u glavi tračnice [N/mm^2]

10.2 Prilog 2.: Vrijednosti faktora utjecaja η i μ prema Zimmermannu

ξ	η	μ	ξ	η	μ
0,0	1,0000	1,0000	3,6	-0,0366	-0,0124
0,1	0,9907	0,8100	3,7	-0,0340	-0,0078
0,2	0,9651	0,6398	3,8	-0,0313	-0,0040
0,3	0,9267	0,4888	3,9	-0,0286	-0,0007
0,4	0,8784	0,3564	4,0	-0,0258	0,0018
0,5	0,8231	0,2415	4,1	-0,0230	0,0040
0,6	0,7628	0,1431	4,2	-0,0204	0,0057
0,7	0,6997	0,0599	4,3	-0,0178	0,0069
0,8	0,6354	-0,0093	4,4	-0,0154	0,0079
0,9	0,5712	-0,0657	4,5	-0,0132	0,0085
1,0	0,5083	-0,1108	4,6	-0,0111	0,0088
1,1	0,4476	-0,1457	4,7	-0,0092	0,0090
1,2	0,3899	-0,1716	4,8	-0,0074	0,0089
1,3	0,3355	-0,1897	4,9	-0,0059	0,0087
1,4	0,2849	-0,2011	5,0	-0,0045	0,0083
1,5	0,2384	-0,2068	5,1	-0,0033	0,0079
1,6	0,1959	-0,2077	5,2	-0,0022	0,0074
1,7	0,1576	-0,2047	5,3	-0,0014	0,0069
1,8	0,1234	-0,1985	5,4	-0,0006	0,0063
1,9	0,0932	-0,1899	5,5	0,0000	0,0057
2,0	0,0667	-0,1794	5,6	0,0005	0,0052
2,1	0,0439	-0,1675	5,7	0,0009	0,0046
2,2	0,0244	-0,1548	5,8	0,0012	0,0040
2,3	0,0080	-0,1416	5,9	0,0015	0,0035
2,4	-0,0056	-0,1282	6,0	0,0017	0,0030
2,5	-0,0166	-0,1149	6,1	0,0018	0,0026
2,6	-0,0254	-0,1019	6,2	0,0018	0,0021
2,7	-0,0320	-0,0895	6,3	0,0019	0,0018
2,8	-0,0369	-0,0777	6,4	0,0018	0,0015
2,9	-0,0403	-0,0666	6,5	0,0018	0,0011
3,0	-0,0422	-0,0563	6,6	0,0017	0,0008
3,1	-0,0431	-0,0468	6,7	0,0016	0,0006
3,2	-0,0430	-0,0383	6,8	0,0015	0,0004
3,3	-0,0422	-0,0306	6,9	0,0014	0,0002
3,4	-0,0408	-0,0237	7,0	0,0013	0,0001
3,5	-0,0388	-0,0177			

10.3 Prilog 3.

Tablica 1.: 49 Podaci o tračnicama E1 i 60 E1

Oblik tračnice	Masa [kg/m]	Površina presjeka [cm ²]	Moment otpora W [cm ³]	Moment inercije [cm ⁴]	Visina tračnice [mm]	Širina noge [mm]	Širina glave [mm]
49 E1	49,4	62,92	240	1816	149	125	67
54 E1	53,8	68,56	276	2307	159	140	70
60 E1	60,2	76,70	334	3038	172	150	72

Tablica 2.: Koeficijent fleksibilnosti tračnice C (Klotzinger, 2008.)

Kvaliteta kolosijeka	Koeficijent fleksibilnosti [N/cm ³]
Vrlo loše	< 50
Loše	≥ 50
Dobro	≥ 100
Vrlo dobro	≥ 150
Kolosijek na betonskoj podlozi	≥ 300

Tablica 3.: Trajna dinamička čvrstoća tračnice (Gottwald, 1999.)

Vlačna čvrstoća tračnice σ_t [N/mm ²]	Trajna dinamička čvrstoća tračnice σ_{dop} [N/mm ²]	
	Kontinuirano zavareni kolosijek	Spojeni kolosijek
700 (R 220)	245	280
900 (R 260)	282	320

10.4 Prilog 4.: Primjer izračuna

Izračun momenta savijanja i čvrstoće na savijanje u podnožju tračnice, slijeganje tračnice i pritisak praga na gredu tračnice pod djelovanjem sile prvog kotača.

Ulazni podaci

60 Oblik tračnice E1: $E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$, $I = 3038 \text{ cm}^4$, $W = 333,36 \text{ cm}^3$

Koeficijent fleksibilnosti: $C = 100 \text{ N/cm}^3$

Razmak između pragova: $a = 60 \text{ cm}$, širina pragova $b_1 = 26 \text{ cm}$, $2u = 136 \text{ cm}$

Brzina pruge: 100 km/h

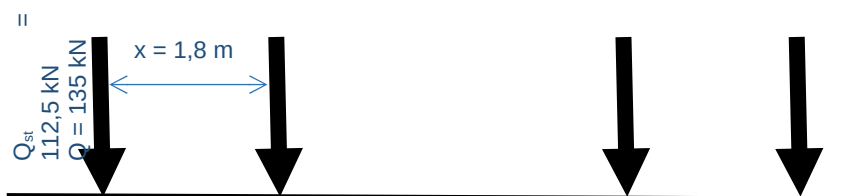
Statična sila kotača: $Q_{st} = 112,5 \text{ kN}$

Efektivna sila kotača: $Q = 1,2 Q_{st} = 135 \text{ kN}$,

Dobar kolosijek: $s = 0,2$

Polumjer kotača: 400 mm

Raspored osovina četveroosovinskog vozila



(1) Moment savijanja za skupinu sila

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$M = \frac{LQ}{4} (1 + \mu_2) = \frac{81,12 \cdot 135\,000}{4} (1 - 0,06) = 232083 \text{ Ncm} = 23,21 \text{ kNm}$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 3038}{58,93 \cdot 100}} = 81,12 \text{ cm}$$

$$b = \frac{2ub_1}{a} = \frac{136 \cdot 26}{60} = 58,93 \text{ cm}$$

$$\xi_2 = \frac{x}{L} = \frac{180}{81,12} = 2,22$$

$$\mu_2 = -0,15$$

Na moment savijanja i savijanje utječu samo prva i druga osovina.

(2) Maksimalna čvrstoća na savijanje u podnožju tračnice

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \alpha = \frac{232083}{333,6} \cdot 1,77 = 1232 \frac{N}{cm^2} = 123 \frac{N}{mm^2}$$

$$\alpha = 1 + t s_d \left(1 + \frac{V-60}{140} \right) = 1 + 3 \cdot 0,2 \left(1 + \frac{100-60}{140} \right) = 1,77$$

Čvrstoća na savijanje u podnožju tračnice manja je od trajne dinamičke čvrstoće tračnice 60 E1, koja prema njemačkim propisima za kontinuirano zavareni kolosijek i vlačnu čvrstoću od 900 N/mm² iznosi 282 N/mm².

(3) Savijanje ili slijeganje

$$y = \frac{Q}{2bCL} (1 + \eta_2) = \frac{135000}{2 \cdot 58,93 \cdot 100 \cdot 81,12} (1 + 0,02) = 0,144 \text{ cm} = 1,44 \text{ mm}$$

$$\xi_2 = \frac{x}{L} = \frac{180}{81,12} = 2,22$$

$$\eta_2 = 0,02$$

Na razmaku između osovina $0,761 \pi = 0,761 \times 3,14 \times 86 = 205 \text{ cm}$ susjedna sila više nema utjecaja na slijeganje tračnice.

(4) Pritisak praga na gredu tračnice

$$p = \frac{1}{2bL} (Q_1 \eta_1 + Q_2 \eta_2 + \dots) = \frac{Q}{2bL} (1 + \eta_2) = \frac{135000}{2 \cdot 58,93 \cdot 81,12} (1 + 0,02) = 14,4 \text{ N/cm}^2$$

Pritisak praga na gredu tračnice također se može izračunati izravno iz slijeganja, i to:

$$p = C \cdot y = 100 \cdot 0,144 = 14,4 \frac{N}{cm^2} \leq \sigma_{dop} = 30 \frac{N}{cm^2}$$

(5) Vertikalna sila praga ispod promatrane osovine

$$S = a \cdot b \cdot p = 60 \cdot 58,93 \cdot 14,4 = 50915 \text{ N} = 50,9 \text{ kN}$$

(6) Smično naprezanje u glavi tračnice

IZRAČUN DOPUŠTENIH VERTIKALNIH OPTEREĆENJA NA TRAJNICAMA

$$\tau_{max} = 412 \sqrt{\frac{Q}{r}} = 412 \sqrt{\frac{135}{400}} = 239 \text{ N/mm}^2 \leq 270 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{dop} = 0,3 \sigma_t = 0,3 \cdot 900 = 270 \text{ N/mm}^2$$