



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA INFRASTRUKTURO

TEHNIČNA SPECIFIKACIJA TSG-212-002: 2025

Ministrica za infrastrukturo na podlagi šestega odstavka 50. člena Zakona o varnosti v železniškem prometu (Uradni list RS, št. 30/18 in 54/21) izdaja tehnično specifikacijo

ZGORNJI USTROJ ŽELEZNIC

IZRAČUN DOPUSTNIH VERTIKALNIH OBREMENITEV V TIRNICI

TSPI – PGV.10.311: 2025

Ministrica za infrastrukturo
mag. Alenka Bratušek

Številka: 007-137/2025/2-02112152

Ljubljana, 12. 5. 2025

Vsebina

1	Uvodni del.....	2
1.1	Predmet tehnične specifikacije	2
1.2	Pomen izrazov	2
2	Sile, ki delujejo na tirnico.....	3
3	Izračun posedka, upogibnega momenta in pritiska	4
3.1	Posamezna kolesna sila	4
3.2	Skupina kolesnih sil.....	4
4	Upogibne napetosti v nogi tirnice in dinamični faktor.....	6
4.1	Dinamični faktor	6
Za hitrosti $V < 60$ km/h se izračuna po enačbi:		7
5	Tangencialne napetosti v glavi tirnice	7
6	Pogoji za vgradnjo tirnic	8
6.1	Pogoji za vgradnjo tirnic na glavnih progah	8
6.2	Pogoji za vgradnjo tirnic na regionalnih progah	8
6.3	Pogoji za vgradnjo tirnic na stranskih tirih postaj in industrijskih tirih	8
7	Referenčna dokumentacija	9
8	Literatura.....	9
10	PRILOGE	10
10.1	Priloga 1: Pomen znakov	10
10.2	Priloga 2: Vrednosti vplivnic η in μ po Zimmermannu	11
10.3	Priloga 3.....	12
10.4	Priloga 4: Primer izračuna	13

1 Uvodni del

1.1 Predmet tehnične specifikacije

Tehnična specifikacija določa postopek izračuna posedka tirnice, upogibnega momenta v nogi tirnice in pritiska praga na tirno gredo pri prometni obremenitvi. Zajema tudi izračun upogibnih napetosti v nogi tirnice kot nosilcu in izračun tangencialnih napetosti v glavi tirnice kot neposredni vozni poti tirnih vozil.

Namen tehnične specifikacije je ugotavljanje skladnosti konstrukcije tira po točki 4.2.6 Odpor tira na dejanske obremenitve tehničnih specifikacij za interoperabilnost za podsistem infrastruktura. Konstrukcija tira je skladna z zahtevami, kadar je mogoče dokazati, da so tehnične značilnosti tirnic (profil, nagib, kakovost), pritrdilnega sistema, pragov (razmik, naprave proti prečnemu premiku tira) in tirne grede (debelina, granulacija tolčenca) ter pogoji za uporabo (osna obremenitev, hitrost, minimalni polmer krožnega loka, nadvišanje in primanjkljaj nadvišanja) ustrezni in izpolnjujejo obratovalne pogoje podsistema infrastruktura.

Izračun zgornjega ustroja proge po tej tehnični specifikaciji se uporablja tudi, kadar osne obremenitve presegajo standardne obremenitve neke kategorije proge (izredne pošiljke) ali ko gre za nestandardne konstrukcije tira (npr. tirnice manjšega profila, večji razmik pragov, tirnice z večjo obrabo ipd.).

1.2 Pomen izrazov

V tej tehnični specifikaciji imajo uporabljeni strokovni izrazi naslednji pomen:

Oсна obremenitev (angl. *axel load*, nem. *Achslast*) P je sila teže mirujočega vozila, ki v premi in horizontali deluje na eno os.

Statična kolesna sila (angl. *static wheel force*, nem. *statische Radkraft*) Q_{st} je sila teže mirujočega vozila, ki v premi in horizontali deluje na eno kolo.

Kvazistatična kolesna sila (angl. *quasistatic wheel force*, nem. *kvasistatische Radkraft*) Q_{qst} je vertikalna komponenta nekompenzirane bočne sile v krivini.

Efektivna kolesna sila (angl. *effective wheel force*, nem. *effective Radkraft*) Q je vsota vertikalne statične in kvazistatične kolesne sile.

Dinamična kolesna sila (angl. *dynamic wheel force*, nem. *dynamische Radkraft*) je produkt efektivne kolesne sile Q in dinamičnega faktorja α .

Progovna hitrost (angl. *line speed*, nem. *Streckengeschwindigkeit*) je največja hitrost, za katero je proga ali odsek proge projektiran.

Natezna trdnost (angl. *tensile stress*, nem. *Zugfestigkeit*) je napetost, pri kateri se poruši preizkušaneč tirničnega jekla pri enakomerno naraščajoči natezni obremenitvi.

Upogibna napetost (angl. *bending stress*, nem. *Biegespannung*) je kvocient upogibnega in odpornostnega momenta tirnice.

Tangencialna (strižna) napetost (angl. *shear stress*, nem. *Schubspannung*) τ je razlika med vertikalnimi tlačnimi napetostmi in horizontalnimi radialnimi napetostmi in je funkcija kolesne sile Q in polmera kolesa r .

Trajna dinamična trdnost (angl. *fatigue stress*, nem. *Dauerfestigkeit*) je napetost, ki kljub spreminjajoči se obtežbi ne povzroči utrujenosti materiala.

Dinamični faktor (angl. *dynamic amplification factor*, nem. *Geschwindigkeitsfaktor*) zajema vpliv dinamičnih kolesnih sil zaradi nepravilnosti na stični površini med kolesom in tirnico ter nepravilnosti v geometrijski legi tira.

2 Sile, ki delujejo na tirnico

Na zgornji ustroj proge delujejo vertikalne in horizontalne (prečne in vzdolžne) kolesne sile. Konstrukcija tira mora biti taka, da lahko prenese vertikalne kolesne sile. Horizontalne kolesne sile se pri izračunu posedka, upogibnega momenta in pritiska lahko zanemarijo.

Vertikalne kolesne sile delujejo na tirnico kot:

- Statične kolesne sile Q_{st} .

Statična kolesna sila je sila teže mirujočega vozila, ki v premi in horizontali deluje na eno kolo in se izračuna po enačbi:

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

pri čemer je:

Q_{st} statična kolesna sila,
 P posna obremenitev.

- Kvazistatične kolesne sile Q_{qst}

Kvazistatična kolesna sila je vertikalna komponenta nekompenzirane bočne sile v krivini in je v povprečju enaka 20 % vrednosti statične kolesne sile ter se izračuna po enačbi:

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

pri čemer je:

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

- Efektivne kolesne sile Q

Efektivna kolesna sila Q je vsota statične in kvazistatične kolesne sile in se izračuna po enačbi:

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

pri čemer je:

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

- Dinamične kolesne sile Q_{din}

Dinamična kolesna sila je produkt efektivne kolesne sile Q in dinamičnega faktorja α in se izračuna po enačbi:

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

pri čemer je:

Q_{din} dinamična kolesna sila,
 Q efektivna kolesna sila,
 α dinamični faktor.

Dinamični faktor α je odvisen od progovne hitrosti in stanja proge ter je podrobneje razložen v petem poglavju te specifikacije.

Efektivna kolesna sila ne sme biti večja od 145 kN (SIST EN 14363, 2005).

3 Izračun posedka, upogibnega momenta in pritiska

Posedek tirnice, upogibni moment tirnice in pritisk praga na tirno gredo se izračunavajo po Zimmermannovi metodi, ki je priznana kot standardna metoda za izračun zgornjega ustroja železniških prog. Metoda temelji na predpostavki, da je tirnica vzdolžni nosilec brez teže na elastični podlagi, ki leži na namišljenih vzdolžnih pragih z enako efektivno naležno površino kot pri prečnih pragih.

Enačbe za posedek, upogibni moment in pritisk se izračunajo iz ravnotežnega pogoja, pri katerem sta prečna sila in upogibni moment v opazovanem prerezu vzdolžnega nosilca v ravnotežju z delovanjem zunanjih sil v obliki zvezno razporejene obremenitve, in sicer za posamezno kolesno silo in za skupino kolesnih sil.

3.1 Posamezna kolesna sila

Za posamezno kolesno silo veljajo na slednje enačbe:

- posedek tirnice:

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

- upogibni moment:

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

- pritisk praga na tirno gredo:

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

3.2 Skupina kolesnih sil

Za skupino kolesnih sil veljajo na slednje enačbe:

- posedek tirnice:

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

- upogibni moment:

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

- pritisk praga na tirno gredo:

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

pri čemer je:

μ	vplivnica za upogibni moment,
η	vplivnica za upogib,
Q	efektivna kolesna sila,
M	upogibni moment,
C	koeficient podajnosti tira,
p	pritisk tirnice na prag,

- b širina namišljenega vzdolžnega praga,
 L osnovna vrednost zgornjega ustroja.

Širina namišljenega vzdolžnega praga b in osnovna vrednost zgornjega ustroja L se izračunata po naslednjih enačbah:

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

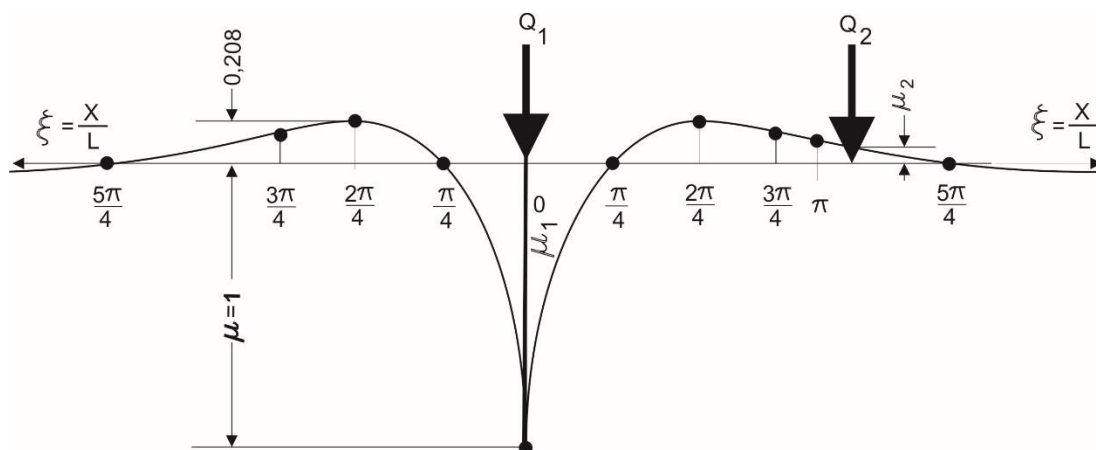
$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}}, \quad (4.8)$$

pri čemer je:

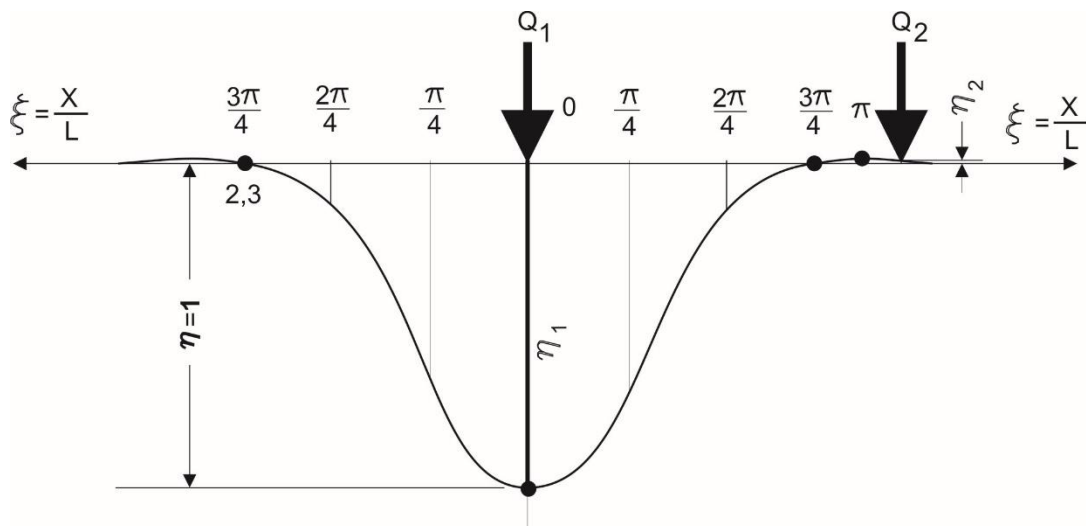
- b širina namišljenega vzdolžnega praga,
 b_1 širina prečnega praga,
 u razdalja od osi tirnice do konca praga,
 a razmik med prečnimi pragi,
 L konstanta zgornjega ustroja,
 E modul elastičnosti tirnice ($E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$),
 I vztrajnostni moment tirnice,
 C koeficient podajnosti tira.

Koeficient podajnosti tira C je za različna stanja proge razviden iz priloge 3.

Vplivnici za moment μ in za upogib η sta razvidni s slike 1 in slike 2, njihove vrednosti pa so podane v prilogi 2.



Slika1: Vplivnica za moment



Slika 2: Vplivnica za upogib

4 Upogibne napetosti v nogi tirnice in dinamični faktor

Srednja upogibna napetost v nogi tirnice se izračuna po enačbi:

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

Na osnovi številnih poskusov (Fastenrath, 1977) je bilo ugotovljeno, da sta srednja upogibna napetost v nogi tirnice σ in srednji upogib tirnice y do hitrosti 200 km/h več ali manj konstanti, okrog katerih se razsipajo dejanske vrednosti. Razsipanje lahko opišemo s standardnim odklonom odstopanj od srednjih vrednosti. S pomočjo standardnega odklona, progovne hitrosti, stanja proge in faktorja statistične verjetnosti izračunamo dinamični faktor α ter s tem maksimalne in minimalne vrednosti upogibnih napetosti in posedka tirnice.

Maksimalno upogibno napetost se izračuna po enačbi:

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

pri čemer je:

- σ srednja upogibna napetost,
- σ_{max} maksimalna upogibna napetost,
- M upogibni moment v nogi tirnice,
- W odpornostni moment tirnice,
- α dinamični faktor.

Dopustne napetosti v tirnici pri spreminjajoči se obremenitvi oziroma njihove trajne dinamične trdnosti so podane v prilogi 3, tabela 3.

4.1 Dinamični faktor

Dinamični faktor je funkcija progovne hitrosti in stanja zgornjega ustroja proge in statistične verjetnosti zajetja napak.

Za hitrosti $V < 60$ km/h se izračuna po enačbi:

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

za hitrosti $60 \leq V \leq 200$ km/h pa po enačbi:

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

pri čemer je:

α dinamični faktor,

V progovna hitrost (km/h),

$t = 1$ faktor statistične verjetnosti (68-odstotna verjetnost zajetja vseh napak),

$t = 2$ faktor statistične verjetnosti (95,5-odstotna verjetnost zajetja vseh napak),

$t = 3$ faktor statistične verjetnosti (99,7-odstotna verjetnost zajetja vseh napak),

$s = 0,1$ standardni odklon napak pri zelo dobrem stanju proge,

$s = 0,2$ standardni odklon napak pri dobrem stanju proge,

$s = 0,3$ standardni odklon napak pri slabem stanju proge.

5 Tangencialne napetosti v glavi tirnice

Tangencialne napetosti v glavi tirnice so posledica razlik med vertikalnimi tlačnimi napetostmi in horizontalnimi radialnimi napetostmi. Te so največje ravno v globini 4–6 mm pod stično površino kolesa in tirnice, posledica pa so lahko hude poškodbe tirnic, imenovane *head check*. Maksimalne tangencialne napetosti v glavi tirnice τ_{max} se izračuna po enačbi:

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

dopustne tangencialne napetosti pa po enačbi:

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

Efektivna kolesna sila Q , ki še ne povzroči prekoračitve dopustnih tangencialnih napetosti v glavi tirnice in s tem poškodb glave tirnice, je:

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

pri čemer je:

τ tangencialna napetost [N/mm²],

σ_t natezna trdnost tirnice [N/mm²],

Q efektivna kolesna sila [kN],

r polmer kolesa [mm].

6 Pogoji za vgradnjo tirnic

6.1 Pogoji za vgradnjo tirnic na glavnih progah

Tiri odprte proge glavnih prog oziroma prog vseevropskega prometnega omrežja TEN-T in glavni postajni tiri teh prog morajo ustrezati osni obremenitvi kategorij F1, F2, P3 in P4 iz TSI. To pomeni, da morajo zagotavljati osno obremenitev 225 kN oziroma biti zgrajeni s tirnicami oblike 60 E1, vgrajenimi z nagibom 1 : 40 ali 1 : 20 in z razmikom med pragi 60 cm.

Jeklo tirnice oblike 60 E1 mora zagotavljati trdoto najmanj 200 HBW, natezno trdnost najmanj 900 N/mm², v preskusu utrujanja materiala pa mora tirnica vzdržati vsaj 5×10^6 ciklov brez poškodb (TSI INF 1299/2014/EU).

Tirnica je komponenta interoperabilnosti, zato je treba pred vgradnjo pridobiti ES – Izjavo o skladnosti.

Ob uporabi rabljenih tirnic oblike 60 E1 je treba z izračunom po tej specifikaciji dokazati, da upogibne napetosti v nogi tirnice ne presegajo trajne dinamične trdnosti tirnice.

6.2 Pogoji za vgradnjo tirnic na regionalnih progah

Tiri odprte proge regionalnih prog in glavni postajni tiri teh prog morajo ustrezati osni obremenitvi kategorij F3 in P5 iz TSI. To pomeni, da morajo zagotavljati osno obremenitev 200 kN oziroma biti zgrajeni s tirnicami oblike 49 E1, vgrajenimi z nagibom 1 : 40 ali 1 : 20 in z razmikom med pragi največ 63 cm.

Jeklo tirnice oblike 49 E1 mora zagotavljati trdoto najmanj 200 HBW, natezno trdnost najmanj 680 N/mm², v preskusu utrujanja materiala pa mora tirnica vzdržati vsaj 5×10^6 ciklov brez poškodb (TSI INF 1299/2014/EU).

Tirnica je komponenta interoperabilnosti, zato je treba pred vgradnjo pridobiti ES – Izjavo o skladnosti.

Ob uporabi rabljenih tirnic oblike 49 E1 ali 60 E1 oziroma večjega razmika med prečnim pragi je treba z izračunom po tej specifikaciji dokazati, da upogibne napetosti v nogi tirnice ne presegajo trajne dinamične trdnosti tirnice.

6.3 Pogoji za vgradnjo tirnic na stranskih tirih postaj in industrijskih tirih

Stranski tiri postaj in industrijski tiri morajo zagotavljati osno obremenitev 180 kN ne glede na sistem tirnic in razmik med pragi, ki se na teh tirih uporabi.

Jeklo tirnice oblike 49 E1 mora zagotavljati trdoto najmanj 200 HBW, natezno trdnost najmanj 680 N/mm², v preskusu utrujanja materiala pa mora tirnica vzdržati vsaj 5×10^6 ciklov brez poškodb (TSI INF 1299/2014/EU).

Tirnica je komponenta interoperabilnosti, zato je treba pred vgradnjo pridobiti ES – Izjavo o skladnosti.

7 Referenčna dokumentacija

Smernica je zasnovana na naslednji referenčni dokumentaciji:

SIST EN 15528:2016: Železniške naprave – Kategorizacija prog za upravljanje vmesnika med dopustnimi obremenitvami vozil in infrastrukturo;

SIST EN 13674-1:2011: Železniške naprave – Zgornji ustroj – Tirnice – 1. del: Vignolove tirnice z maso 46 kg/m in več;

SIST EN 14363:2005: Železniške naprave – Preskušanje voznih karakteristik pri prevzemu železniških vozil – Preskušanje obnašanja med vožnjo in mirovanjem;

UIC KODEX 518: Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrsicherheit Fahrwegbeanspruchung und Fahrverhalten;

Uredba o kategorizaciji prog (Uradni list RS, št. 4/09, 5/09 – popr., 62/11, 66/12, 12/13 in 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.: Železniški tir – zgornji ustroj in elementi trase železniške proge, Ljubljana 2021, v pripravi.

10 PRILOGE

10.1 Priloga 1: Pomen znakov

a	razmik pragov [cm]
α	dinamični faktor
b	širina namišljenega vzdolžnega praga [cm]
b_1	širina prečnega praga [cm]
C	koeficient podajnosti tira [$C = 100 \text{ N/cm}^3$]
E	modul elastičnosti tirnice [$E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$]
I	moment inercije tirnice [cm^4]
M	upogibni moment [Ncm]
p	pritisk tirnice na prag [N/cm^2]
r	polmer koles [mm]
Q	efektivna kolesna sila [N]
Q_{st}	statična kolesna sila [N]
Q_{qst}	kvazistatična kolesna sila [N]
Q_{din}	dinamična kolesna sila [N]
u	razdalja med osjo tirnice in koncem praga (dolžina efektivne naležne površine praga)
W	odpornostni moment tirnice [cm^3],
x	dejanska razdalja točke od opazovanega prereza [cm]
y	posedek praga [cm]
σ	upogibna napetost [N/cm^2]
σ_t	natezna trdnost tirnice [N/mm^2]
σ_{dop}	dopustna upogibna napetost v tirnici [N/mm^2]
τ	tangencialna napetost v glavi tirnice [N/mm^2]

10.2 Priloga 2: Vrednosti vplivnic η in μ po 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 Priloga 3

Preglednica 1: Podatki o tirnicah oblike 49 E1 in 60 E1

Oblika tirnice	Masa [kg/m]	Površina prereza [cm ²]	Odpornostni moment W [cm ³]	Vstrajnostni moment I [cm ⁴]	Višina tirnice [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

Preglednica 2: Koeficient podajnosti tira C (Klotzinger, 2008)

Kakovost tira	Koeficient podajnosti [N/cm ³]
Zelo slaba	< 50
Slaba	≥ 50
Dobra	≥ 100
Zelo dobra	≥ 150
Tir na betonski podlagi	≥ 300

Preglednica 3: Trajna dinamična trdnost tirnice (Gottwald, 1999)

Natezna trdnost tirnice σ_t [N/mm ²]	Trajna dinamična trdnost σ_{dop} [N/mm ²]	
	Neprekinjeno zavarjeni tir	Stikovani tir
700 (R 220)	245	280
900 (R 260)	282	320

10.4 Priloga 4: Primer izračuna

Izračun upogibnega momenta in upogibne napetosti v nogi tirnice, posedka tirnice in pritiska praga na tirno gredo pod prvo kolesno silo.

Vhodni podatki

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

Podajnostni koeficient: $C = 100 \text{ N/cm}^3$

Razmik pragov: $a = 60 \text{ cm}$, širina pragov $b_1 = 26 \text{ cm}$, $2u = 136 \text{ cm}$

Progovna hitrost: 100 km/h

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

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

Dober tir: $s = 0,2$

Polmer koles: 400 mm

Razpored osi štiriosnega vozila



(1) Upogibni moment za skupino sil

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

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

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

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

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

$$\mu_2 = -0,15$$

Na upogibni moment in upogib vplivata samo prva in druga os.

(2) Maksimalna upogibna napetost v nogi tirnice

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

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

Upogibna napetost v nogi tirnice je manjša, kot je trajna dinamična trdnost tirnice oblike 60 E1, ki po nemških predpisih za neprekinjeno zavarjen tir in natezno trdnost tirnice 900 N/mm² znaša 282 N/mm².

(3) Upogib ali posedek

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

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

$$\eta_2 = 0,02$$

Pri razmiku osi 0,761 π = 0,761 × 3,14 × 86 = 205 cm sosednja sila nima več nikakršnega vpliva na posedek tirnice.

(4) Pritisk praga na tirno gredo

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

Pritisk praga na tirno gredo se lahko izračuna tudi neposredno iz posedka, in sicer:

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

(5) Vertikalna sila praga pod opazovano osjo

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

(6) Tangencialne napetosti v glavi tirnice

$$\tau_{max} = 412 \sqrt{\frac{Q}{r}} = 412 \sqrt{\frac{135}{400}} = 239 \text{ N/mm}^2 \leq 270 \text{ N/mm}^2$$
$$\tau_{dop} = 0,3 \sigma_t = 0,3 \cdot 900 = 270 \text{ N/mm}^2$$