



DIE REPUBLIK SLOWENIEN
MINISTERIUM FÜR INFRASTRUKTUR

TECHNISCHE SPEZIFIKATION TSG-212-00X: 2023

Auf der Grundlage von Artikel 50 Absatz 6 des Eisenbahnverkehrssicherheitsgesetzes (ABI. RS Nr. 30/18) gibt der Minister für Infrastruktur eine technische Spezifikation heraus.

STRECKENOBEBBAU -BERECHNUNG DER ZULÄSSIGEN VERTIKALLASTEN AUF DER SCHIENE — TSPI - PGV.10.311: 2023

Minister für Infrastruktur

-

Nummer:

In Ljubljana,

BERECHNUNG DER ZULÄSSIGEN VERTIKALLASTEN AUF DER SCHIENE

Diese technische Spezifikation (TSPI – PGV.10.311: 2023) Diese Verordnung wird ausgehend von dem Informationsverfahren gemäß der Richtlinie (EU) 2015/1535 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft ausgegeben (ABl. L 241, vom 17. 9. 2015, S. 1) erlassen.

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Gegenstand der technischen Spezifikation	3
1.2	Begriffsbestimmungen	3
2	Spurkräfte	4
3	Berechnung der vertikalen Bewegung, des Biegemoments und des Drucks	5
3.1	Einzelne Radkraft	5
3.2	Gruppe von Radkräften	5
4	Biegespannung im Schienenfuß und dynamischer Faktor	7
4.1	Dynamischer Faktor	8
5	Schubspannung im Schienenkopf	8
6	Bedingungen für die Installation der Schiene	9
6.1	Schieneninstallationsbedingungen auf Hauptstrecken	9
6.2	Bedingungen für die Errichtung von Schienen auf Regionalstrecken	9
6.3	Schieneninstallationsbedingungen auf Abstellgleisen von Bahnhöfen und Industrieschienen	10
7	Referenzdokumente	10
8	Literatur	10
10	ANHÄNGE	11
10.1	Anhang 1: Bedeutung von Symbolen	11
10.2	Anhang 2 Werte der Beeinflussungslinien η und μ nach Zimmermann	12
10.3	Anhang 3	13
10.4	Anhang 4 Berechnungsbeispiel	14

1 Einleitung

1.1 Gegenstand der technischen Spezifikation

Die technische Spezifikation legt das Verfahren zur Berechnung des Schienenausfalls, das Biegemoment im Schienenfuß und den Schwellendruck auf der Schotterfahrbahn bei Verkehrslast fest. Sie umfasst auch die Berechnung der Biegespannungen im Schienenfuß als Stütze und die Berechnung der Tangentialspannungen im Schienenkopf als direkte Spur des Schienenfahrzeugs.

Zweck der technischen Spezifikation ist die Bewertung der Übereinstimmung des Gleisbaus gemäß Nummer 4.2.6 Gleiswiderstand gegenüber den tatsächlichen Lasten der technischen Spezifikationen für die Interoperabilität des Teilsystems Infrastruktur. Die Auslegung des Gleises muss den Anforderungen entsprechen, in denen nachgewiesen werden kann, dass die technischen Merkmale der Schienen (Profil, Steigung, Qualität), Befestigungssystem, Schwellen (Bereich, Querverschiebung) und Schotterfahrbahnen (Dicke, Granulation) und Nutzungsbedingungen (Achsenlast, Geschwindigkeit, minimaler Lichtbogen-, Kanten- und Kantenmangel) angemessen sind und den Betriebsbedingungen des Teilsystems Infrastruktur entsprechen.

Die Berechnung des Gleisaufbaus nach dieser technischen Spezifikation gilt auch dann, wenn die Achslasten die Standardlasten einer bestimmten Klasse von Strecken (außerordentliche Sendungen) oder bei nicht standardmäßigen Gleisbauten (z. B. Schienen mit geringerer Spurweite, größerer Abstand von Schwellen, Schienen mit höherem Verschleiß usw.) überschreiten.

1.2 Begriffsbestimmungen

Die in dieser technischen Spezifikation verwendeten Fachausdrücke haben folgende Bedeutung:

Achslast, (ger. *Achslast*) P ist die Kraft des Gewichts eines stationären Fahrzeugs, das auf eine Achse sowohl in Achsen als auch in Horizontalen wirkt.

Statische Radkraft (ger. *statische Radkraft*) Q_{st} ist die Gewichtskraft eines stationären Fahrzeugs, das auf einem Rad in der Achse und horizontal wirkt.

Quasistatische Radkraft (ger. *quasistatische Radkraft*) Q_{qst} ist die vertikale Komponente der unkompensierten Querkraft in der Kurve.

Effektive Radkraft (ger. *effektive Radkraft*) Q ist die Summe der vertikalen statischen und quasi-statischen Radkraft.

Dynamische Radkraft (ger. *dynamische Radkraft*) ist das Produkt der effektiven Radkraft Q und des dynamischen Faktors α .

Streckengeschwindigkeit (ger. *Streckengeschwindigkeit*) ist die Höchstgeschwindigkeit, für die eine Linie oder ein Abschnitt einer Linie ausgelegt ist.

Zugfestigkeit (ger. *Zugfestigkeit*) ist die Spannung, bei der ein Schienenstahlprüfstück bei einer gleichmäßig steigenden Zuglast zusammenbricht.

Biegespannung (ger. *Biegespannung*) ist der Quotient des Biege- und Widerstandsmoments der Schiene.

Schubspannung (ger. *Schubspannung*) τ ist die Differenz zwischen vertikalen Druckspannungen und horizontalen Radialspannungen und ist eine Radkraftfunktion Q und Raddurchmesser r .

Dauerfestigkeit (ger. *Dauerfestigkeit*) ist eine Spannung, die trotz Gewichtsänderung keine Ermüdung des Materials verursacht.

Geschwindigkeitsfaktor (ger. *Geschwindigkeitsfaktor*) erfasst den Einfluss dynamischer Radkräfte aufgrund von Anomalien auf der Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene und Unregelmäßigkeiten in der geometrischen Position der Spur.

2 Spurkräfte

Vertikale und horizontale (transversale und längsseitige) Radkräfte wirken sich auf den Gleisbau aus. Die Gleiskonstruktion muss senkrechten Radkräften standhalten. Horizontale Radkräfte können bei der Berechnung von Kupplung, Biegemoment und Druck ignoriert werden.

Vertikale Radkräfte wirken auf der Schiene wie:

- Statische Radkräfte Q_{st} .

Die statische Radkraft ist die Gewichtskraft des stationären Fahrzeugs, das auf ein Rad sowohl in Achsen als auch in Horizontalen angewendet wird, berechnet mit der Gleichung:

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

wobei:

Q_{st} die statische Radkraft,
 P die Achslast ist.

- Quasistatische Radkräfte Q_{qst}

Die quasistatische Radkraft ist die vertikale Komponente der nicht kompensierten Querkraft in der Kurve und entspricht im Durchschnitt 20 % des Wertes der statischen Radkraft, berechnet anhand der Gleichung:

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

wobei:

Q_{qst} die quasistatische Radkraft,
 Q_{st} die statische Radkraft ist.

- Effektive Radkräfte Q

Die effektive Radkraft Q ist die Summe der statischen und quasistatischen Radkraft und wird anhand der Gleichung berechnet:

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

wobei:

Q die effektive Radkraft,
 Q_{st} die statische Radkraft,
 Q_{qst} die quasistatische Radkraft ist.

- Dynamische Radkräfte Q_{din}

Die dynamische Radkraft ist das Produkt der effektiven Radkraft Q und des dynamischen Faktors α und wird anhand der Gleichung berechnet:

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

wobei:

BERECHNUNG DER ZULÄSSIGEN VERTIKALLASTEN AUF DER SCHIENE

- Q_{din} die dynamische Radkraft,
 Q die effektive Radkraft,
 α der dynamische Faktor ist.

Der dynamische Faktor α hängt von der Streckengeschwindigkeit und dem Gleiszustand ab und wird in Kapitel 5 dieser Spezifikation näher erläutert.

Die effektive Radkraft darf 145 kN nicht überschreiten (SIST EN 14363, 2005).

3 Berechnung der vertikalen Bewegung, des Biegemoments und des Drucks

Die vertikale Bewegung der Schiene, das Schienenbiegemoment und der Schwellendruck auf Gleisen sind nach dem Zimmermann-Verfahren zu berechnen, das als Standardmethode für die Berechnung der oberen Struktur von Eisenbahnstrecken anerkannt ist. Die Methode basiert auf der Annahme, dass die Schiene eine Längsstütze ohne Gewicht auf einem elastischen Trägermaterial ist, das an imaginären Längsschwellen mit der gleichen effektiven Kontaktfläche wie bei Querschwellen liegt.

Die Gleichungen für Positionierung, Biegemoment und Druck sind aus dem Gleichgewichtszustand zu berechnen, wenn die Querkraft und das Biegemoment im beobachteten Querschnitt der Längsstütze im Gleichgewicht mit der Anwendung von äußeren Kräften in Form einer Dauerlast, für jede Radkraft und für eine Gruppe von Radkräften sind.

3.1 Einzelne Radkraft

Für eine einzelne Radkraft gelten folgende Gleichungen:

- vertikale Bewegung der Schiene:

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

- Biegemoment:

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

- der Druck der Schwelle auf die Schotterfahrbahn:

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

3.2 Gruppe von Radkräften

Für eine Gruppe von Radkräften gelten die folgenden Gleichungen:

- vertikale Bewegung der Schiene:

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

- Biegemoment:

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

- der Druck der Schwelle auf die Schotterfahrbahn:

BERECHNUNG DER ZULÄSSIGEN VERTIKALLASTEN AUF DER SCHIENE

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

- wobei: μ Biegemoment-Einflusslinien,
 η Einflusslinie für das Biegen,
 Q die effektive Radkraft,
 M das Biegemoment,
 C der Gleisflexibilitätskoeffizient,
 p der Schienendruck auf die Schwelle,
 b die Breite der imaginären Längsschwelle,
 L der Grundwert des Aufbaus ist.

Die Breite der imaginären Längsschwelle b und der Basiswert des Überbaus L sind anhand der folgenden Gleichungen zu berechnen:

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

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

- wobei:
 b die Breite der imaginären Längsschwelle,
 b_1 die Querswellenbreite,
 u der Abstand von Schienenachse bis Ende der Schwelle,
 a der Querswellenabstand,
 L die Aufbaukonstante,
 E die Schienenelastizitätsmodul $E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$,
 I das Trägheitsmoment der Schiene,
 C der Gleisflexibilitätskoeffizient ist.

Der Gleisflexibilitätskoeffizient C ist für die verschiedenen Streckenbedingungen in Anhang 3 aufgeführt.

Die Einflusslinien für das Moment μ und für das Biegen η sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt, und ihre Werte sind in Anhang 2 angegeben.

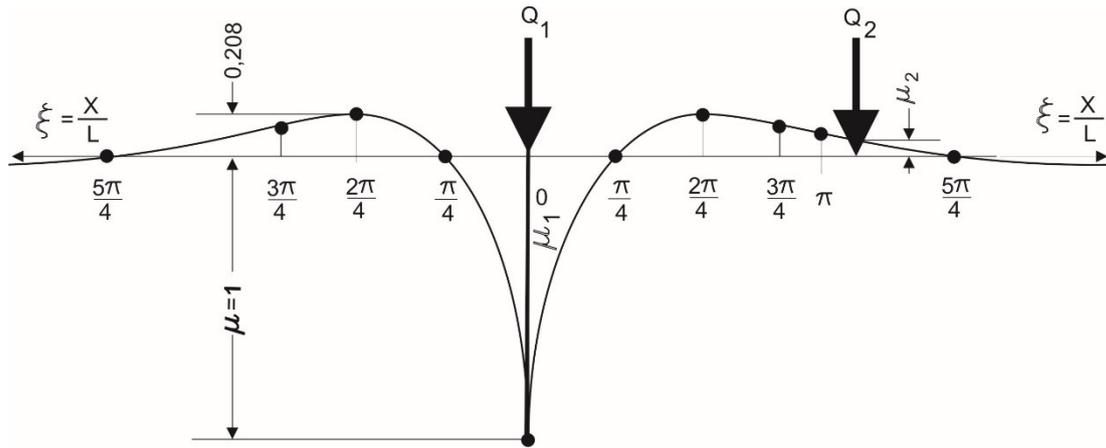


Abbildung 1: Einflusslinie für das Moment

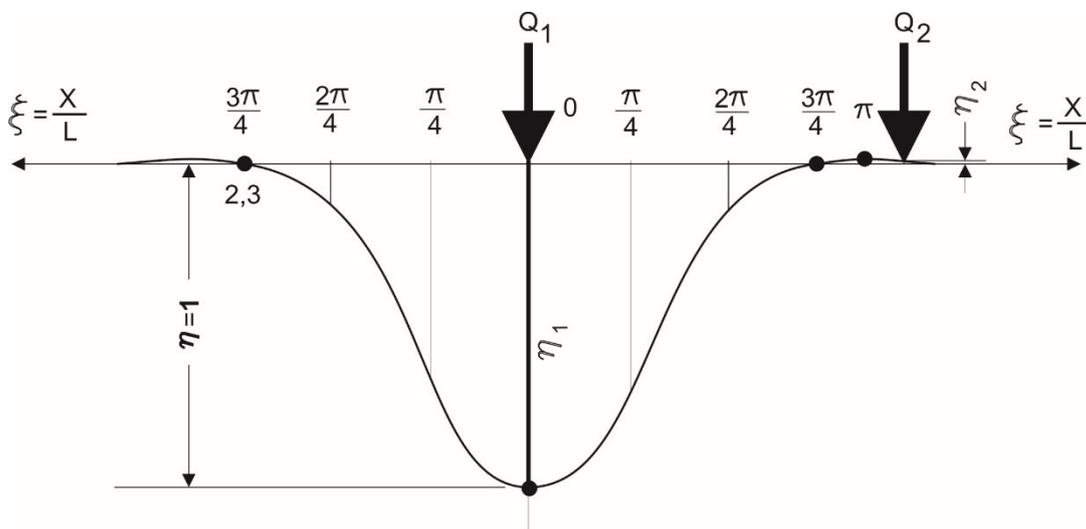


Abbildung 2: Einflusslinie für das Biegen

4 Biegespannung im Schienenfuß und dynamischer Faktor

Die mittlere Biegespannung im Schienenfuß wird anhand der Gleichung berechnet:

$$\sigma = \frac{M}{W}. \tag{5.1}$$

Basierend auf einer Reihe von Experimenten (Fastenrath, 1977) wurde festgestellt, dass bis zu einer Geschwindigkeit von 200 km/h die mittlere Biegespannung im Schienenfuß σ und die mittlere Schienenablenkung y mehr oder weniger Konstanten waren, um welche die tatsächlichen Werte gestreut werden. Eine Streuung kann durch eine Standardabweichung der Abweichungen vom Mittelwert beschrieben werden. Unter Verwendung der Standardabweichung, der Liniengeschwindigkeit, des Linienzustands und des statistischen Wahrscheinlichkeitsfaktors berechnen wir den dynamischen Faktor α und damit die Maximal- und Minimalwerte der Biegespannung und Schienensenkung.

Die maximale Biegespannung wird anhand der Gleichung berechnet:

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

wobei:

- σ die mittlere Biegespannung,
- σ_{max} die maximale Biegespannung,
- M das Biegemoment im Schienenbein,
- W das Schienenwiderstandsmoment,
- α der dynamische Faktor ist.

Die zulässigen Schienenspannungen bei unterschiedlicher Last oder ihre Dauerdynamikfestigkeit sind in Anhang 3 Tabelle 3 angegeben.

4.1 Dynamischer Faktor

Der dynamische Faktor ist eine Funktion der Liniengeschwindigkeit und des Zustands des Leitungsaufbaus und der statistischen Wahrscheinlichkeit der Fehlererfassung.

Für Geschwindigkeiten $V < 60$ km/h wird nach folgender Formel berechnet:

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

für Geschwindigkeiten $60 \leq V \leq 200$ km/h nach der Gleichung:

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

wobei:

- α der dynamische Faktor,
- V die Liniengeschwindigkeit (km/h),
- $t = 1$ der statistische Wahrscheinlichkeitsfaktor (68 % Wahrscheinlichkeit, alle Fehler zu erfassen),
- $t = 2$ der statistische Wahrscheinlichkeitsfaktor (95,5% Wahrscheinlichkeit, alle Fehler zu erfassen),
- $t = 3$ der statistische Wahrscheinlichkeitsfaktor (99,7% Wahrscheinlichkeit, alle Fehler zu erfassen),
- $s = 0,1$ die Standardabweichung von Mängeln in sehr gutem Linienzustand,
- $s = 0,2$ Standardabweichung von Mängeln in gutem Leitungszustand,
- $s = 0,3$ die Standardabweichung von Defekten in schlechtem Leitungszustand gut.

5 Schubspannung im Schienenkopf

Schubspannungen im Schienenkopf sind auf Unterschiede zwischen vertikalen Druckspannungen und horizontalen Radialspannungen zurückzuführen. Dies ist die größte flache Fläche in einer Tiefe von 4-6 mm unter der Kontaktfläche des Rades und der Schiene und kann zu schweren Schienenschäden führen, die *Head-Check* genannt werden.

Die maximale Schubspannung im Schienenkopf τ_{max} wird anhand der Gleichung berechnet:

BERECHNUNG DER ZULÄSSIGEN VERTIKALLASTEN AUF DER SCHIENE

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

zulässige Schubspannung nach der Gleichung:

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

Die effektive Radkraft Q , die noch nicht dazu führt, dass die zulässige Schubspannung im Schienenkopf überschritten wird und somit der Schienenkopfschaden wie folgt ist:

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

wobei:

- τ die Schubspannung [N/mm²],
- σ_t die Schienenzugfestigkeit [N/mm²],
- Q die effektive Radkraft [kN],
- r der Raddurchmesser [mm] ist.

6 Bedingungen für die Installation der Schiene

6.1 Schieneninstallationsbedingungen auf Hauptstrecken

Die Gleise der offenen Strecken der Haupt- oder TEN-V-Verkehrsstrecken und die Hauptbahngleise dieser Strecken müssen der Achslast der Kategorien F1, F2, P3 und P4 der TSI entsprechen. Dies bedeutet, dass sie eine Achslast von 225 kN aufweisen oder mit 60 E1-förmigen Schienen mit Neigung 1° gebaut werden müssen: 40 oder 1°: 20 und mit einem Abstand von 60 cm zwischen den Schwellen.

60 E1 Schienenstahl muss eine Härte von mindestens 200 HBW und eine Zugfestigkeit von mindestens 900 N/mm² und bei der Prüfung der Materialermüdung mindestens 5×10⁶ belasten (TSI INF 1299/2014/EU).

Die Schiene ist eine Interoperabilitätskomponente und daher muss vor der Installation die EG-Konformitätserklärung eingeholt werden.

Bei Verwendung von 60 E1-Schienen ist durch Berechnung nach dieser Spezifikation nachzuweisen, dass die Rollspannungen im Schienenfuß die Dauerdynamikfestigkeit der Schiene nicht überschreiten.

6.2 Bedingungen für die Errichtung von Schienen auf Regionalstrecken

Die offenen Gleise der Regional- und Hauptbahnhofgleise dieser Strecken müssen der Achslast der Kategorien F3 und P5 der TSI entsprechen. Dies bedeutet, dass sie eine Achslast von 200 kN aufweisen oder mit 49 E1-förmigen Schienen mit Neigung 1° gebaut werden müssen: 40 oder 1°: 20 und mit einem maximalen Schwellenabstand von 63 cm.

49 E1 Schienenstahl muss eine Härte von mindestens 200 HBW und eine Zugfestigkeit von mindestens 680 N/mm² haben und bei der Prüfung der Materialermüdung mindestens 5 × 10⁶ belasten (TSI INF 1299/2014/EU).

Die Schiene ist eine Interoperabilitätskomponente und daher muss vor der Installation die EG-Konformitätserklärung eingeholt werden.

Bei Verwendung von gebrauchten Schienen mit 49 E1 oder 60 E1 oder größerem Querschwellenabstand ist durch Berechnung nach dieser Spezifikation nachzuweisen, dass die Biegespannungen der Schiene die kontinuierliche dynamische Festigkeit der Schiene nicht überschreiten.

6.3 Schieneninstallationsbedingungen auf Abstellgleisen von Bahnhöfen und Industrieschienen

Bahnhofsgleise und Industriegleise müssen unabhängig vom Schienensystem und dem Abstand zwischen den Schwellenwerten, die auf diesen Gleisen verwendet werden, eine Achslast von 180 kN aufweisen.

49 E1 Schienenstahl muss eine Härte von mindestens 200 HBW und eine Zugfestigkeit von mindestens 680 N/mm^2 haben und bei der Prüfung der Materialermüdung mindestens 5×10^6 belasten (TSI INF 1299/2014/EU).

Die Schiene ist eine Interoperabilitätskomponente und daher muss vor der Installation die EG-Konformitätserklärung eingeholt werden.

7 Referenzdokumente

Die Leitlinie basiert auf der folgenden Referenzdokumentation:

SIST EN 15528:2016 Eisenbahnanlagen – Kategorisierung von Strecken für die Verwaltung der Schnittstelle zwischen zulässigen Fahrzeuglasten und Infrastruktur;

SIST EN 13674-1-2011, Eisenbahnanwendungen – Aufbau – Gleise – Teil 1: Vignol-Schienen mit einer Masse von 46 kg/m und mehr;

SIST EN 14363:2005 Eisenbahnanlagen – Prüfung der Fahreigenschaften für die Übernahme von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und des stationären Verhaltens;

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

Erlass über die Kategorisierung der Strecken (ABl. RS Nr. 4/09, 5/09 – Berichtigung, 62/11, 66/12, 12/13 und 30/18 – ZVZelP-1).

8 Literatur

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.

1 ANHÄNGE

1.1 Anhang 1: Bedeutung von Symbolen

a	Schwellenabstand [cm]
α	dynamischer Faktor
b	Breite der imaginären Längsschwelle [cm]
b_1	Querschwellenbreite [cm]
C	Gleisflexibilitätskoeffizient [$C = 100 \text{ N/cm}^3$]
E	Schienenelastizitätsmodul [$E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$]
I	Schienenträgheitsmoment [cm^4]
M	Biegemoment [Ncm]
p	Schienenenddruck auf Schwelle [N/cm^2]
r	Raddurchmesser [mm]
r	effektive Radkraft [N]
Q_{st}	statische Radkraft [N]
Q_{qst}	quasistatische Radkraft [N]
Q_{din}	dynamische Radkraft [N]
u	Abstand zwischen der Schienenachse und dem Ende der Schwelle (und Länge der effektiven Kontaktfläche der Schwelle)
W	Schienenwiderstandsmoment [cm^3],
x	tatsächlicher Punktabstand vom beobachteten Querschnitt [cm]
y	Schwellenabsenkung [cm]
r	Biegespannung [N/cm^2]
σ_t	Zugfestigkeit [N/mm^2]
σ_t	zulässige Schienenbiegespannung [N/mm^2]
σ_t	Tangentialspannung im Schienenkopf [N/mm^2]

BERECHNUNG DER ZULÄSSIGEN VERTIKALLASTEN AUF DER SCHIENE

1.2 Anhang 2 Werte der Beeinflussungslinien η und μ nach Zimmermann

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			

1.3 Anhang 3

Tabelle 1: 49 E1 und 60 E1 Schienendaten

Schienenform	Masse [kg/m]	Querschnittsfläche [cm ²]	Widerstandsmoment W [cm ³]und	Trägheitsmoment [cm ⁴]	Schienenhöhe [mm]	Fußbreite [mm]	Kopfbreite [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

Tabelle 2: Schienenflexibilitätskoeffizient C (Klotzinger, 2008)

Gleisqualität	Verbrauchskoeffizient [N/cm ³]
Sehr schlecht	< 50
Schlecht	≥ 50
Gut	≥ 100
Sehr gut	≥ 150
Gleis auf einem Betonsockel	≥ 300

Tabelle 3: Nachhaltige Schienendynamikfestigkeit (Gottwald, 1999)

Schienenzugfestigkeit σ_t [N/mm ²]	Dauerhafte dynamische Festigkeit σ_{dop} [N/mm ²]	
	Durchgehend geschweißte Strecke	Gemeinsame Strecke
700 (R 220)	245	280
900 (R 260)	282	320

1.4 Anhang 4 Berechnungsbeispiel

Die Berechnung des Biegemoments und der Biegespannung im Schienenfuß, die Absenkung der Schiene und der Druck der Schwelle auf der Strecke gehen unter die erste Radkraft.

Eingabedaten

60 E1-Schienenform: $E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$, $I = 3\,038 \text{ cm}^4$, $B = 333,36 \text{ cm}^3$

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

Schwellenabstand: $A = 60 \text{ cm}$, Schwellenbreite $b_1 = 26 \text{ cm}$, $2u = 136 \text{ cm}$

Liniengeschwindigkeit: 100 km/h

Statische Radkraft: $Q_{st} = 112,5 \text{ kN}$

Effektive Radkraft: $Q = 1,2 Q_{st} = 135 \text{ kN}$,

Gutes Gleis: $s = 0,2$

Radradius: 400 mm

Achslayout des Vierachsfahrzeugs



(1) Biegemoment für eine Gruppe von Kräften

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

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

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

$$b = \frac{2u b_1}{a} = \frac{136 \cdot 26}{60} = 58,93 \text{ cm}$$

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

$$\mu_2 = -0,15$$

Biegemoment und Biegung werden nur von der ersten und zweiten Achse beeinflusst.

(2) Maximale Biegespannung im Schienenfuß

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

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

Die Biegespannung im Schienenfuß ist geringer als die permanente dynamische Festigkeit der 60 E1-Schiene, die nach deutschen Vorschriften für durchgehend geschweißte Gleise und Zugfestigkeit 900 N/mm² 282 N/mm² entspricht.

(3) Biegen oder Absenkung

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

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

$$\eta_2 = 0,02$$

Bei Achsabstand 0,7761 = 0,7761 × 3,14 × 86 = 205 cm wirkt sich die benachbarte Kraft nicht mehr auf die Bewegungsbahn aus.

(4) Schwellendruck auf der Schotterfahrbahn

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

Der Schwellendruck auf der Schotterfahrbahn kann auch direkt aus dem Sieb wie folgt berechnet werden:

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

(5) Vertikale Schwellenkraft unterhalb der beobachteten Achse

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

(6) Schubspannung im Schienenkopf

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

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