



REPUBBLICA DI SLOVENIA  
**MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE**

## **SPECIFICA TECNICA TSG-212-00X: 2023**

Sulla base dell'articolo 50, sesto paragrafo, della legge sulla sicurezza del trasporto ferroviario (GU RS n. 30/18), il ministro delle Infrastrutture emette una specifica tecnica

# **SOVRASTRUTTURA FERROVIARIA - CALCOLO DEI CARICHI VERTICALI AMMISSIBILI NELLA FERROVIA - TSPI - PGV.10.311: 2023**

Ministro delle Infrastrutture

-

Numero:

A Lubiana,

Questa specifica tecnica (TSPI – PGV.10.311: 2023) è stata emanata vista la procedura d'informazione prevista dalla direttiva (UE) 2015/1535 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 9 settembre 2015, che prevede una procedura d'informazione nel settore delle regolamentazioni tecniche e delle norme relative ai servizi della società dell'informazione (GU L 241 del 17.9.2015, pag. 1).

## Contenuto

<b>1</b>	<b>Parte introduttiva.....</b>	<b>3</b>
1.1	Oggetto delle specifica tecnica.....	3
1.2	Definizioni dei termini.....	3
<b>2</b>	<b>Forze del binario.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Calcolo del movimento verticale, del momento flettente e della pressione.....</b>	<b>5</b>
3.1	Forza individuale della ruota.....	5
3.2	Gruppo di forze delle ruote.....	5
<b>4</b>	<b>Sollecitazione a flessione nel piede della rotaia e fattore dinamico.....</b>	<b>7</b>
4.1	Fattore dinamico.....	8
<b>5</b>	<b>Sollecitazione di taglio nella testa della rotaia.....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Condizioni di installazione della rotaia.....</b>	<b>9</b>
6.1	Condizioni di installazione della rotaia sulle linee principali.....	9
6.2	Condizioni di installazione della rotaia sulle linee regionali.....	9
6.3	Condizioni di installazione delle rotaie sui binari delle stazioni e sui binari industriali....	10
<b>7</b>	<b>Testi di riferimento.....</b>	<b>10</b>
<b>8</b>	<b>Letteratura.....</b>	<b>10</b>
<b>10</b>	<b>ALLEGATI.....</b>	<b>11</b>
10.1	Allegato 1: Significato dei simboli.....	11
10.2	Allegato 2: Valori delle linee di influenza $\eta$ e $\mu$ secondo Zimmermann.....	12
10.3	Allegato 3.....	13
10.4	Allegato 4: Esempio di calcolo.....	14

## 1 Parte introduttiva

### 1.1 Oggetto delle specifica tecnica

La specifica tecnica specifica la procedura per il calcolo del cedimento della rotaia, il momento flettente nel piede della rotaia e la pressione di soglia sul binario zavorrato al carico di traffico. Inoltre, copre il calcolo delle tensioni di flessione nel piede della rotaia come supporto e il calcolo delle tensioni tangenziali nella testa della rotaia come binario diretto del materiale rotabile.

Lo scopo della specifica tecnica è valutare la conformità della costruzione del binario secondo il punto 4.2.6 Resistenza del binario ai carichi effettivi delle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema infrastrutturale. La progettazione del binario deve essere conforme ai requisiti se si può dimostrare che le caratteristiche tecniche delle rotaie (profilo, pendenza, qualità), del sistema di fissaggio, delle traversine (portata, dispositivi di spostamento trasversale del binario) e delle rotaie zavorrate (spessore, granulazione) e le condizioni di utilizzo (carico assiale, velocità, raggio minimo dell'arco, sopraelevazione e carenza di sopraelevazione) sono adeguate e soddisfano le condizioni operative del sottosistema infrastrutturale.

Il calcolo della sovrastruttura del binario secondo la presente specifica tecnica si applica anche quando i carichi per asse superano i carichi standard di una determinata categoria di linea (spedizioni straordinarie) o in caso di costruzione di binari non standard (ad esempio, rotaie di scartamento inferiore, maggiore distanza tra le traversine, rotaie con maggiore usura, ecc.).

### 1.2 Definizioni dei termini

Nella presente specifica tecnica, i termini tecnici utilizzati hanno il seguente significato:

Il **carico sull'asse** (ted. *Achslast*)  $P$  è la forza del peso di un veicolo fermo che agisce su un asse in entrambi gli assi e in orizzontale.

La **forza statica della ruota** (ted. *statische Radkraft*)  $Q_{st}$  è la forza del peso di un veicolo fermo che agisce su una ruota in asse e in orizzontale.

La **forza quasistatica della ruota** (ted. *quasistatische Radkraft*)  $Q_{qst}$  è la componente verticale della forza laterale non compensata nella curva.

La **forza effettiva della ruota** (ted. *effektive Radkraft*)  $Q$  è la somma della forza verticale statica e quasi-statica della ruota.

La **forza dinamica della ruota** (ted. *dynamische Radkraft*) è il prodotto della forza effettiva  $Q$  e del fattore dinamico  $\alpha$ .

La **velocità della linea** (ted. *Streckengeschwindigkeit*) è la velocità massima per la quale è progettata una linea o un tratto di linea.

La **tensione di trazione** (ted. *Zugfestigkeit*) è la tensione alla quale un pezzo di acciaio ferroviario di prova collassa con un carico di trazione uniformemente crescente.

La **sollecitazione di flessione** (ted. *Biegespannung*) è il quoziente del momento di flessione e di resistenza della rotaia.

La **resistenza al taglio** (ted. *Schubspannung*)  $\tau$  è la differenza tra le tensioni di pressione verticali e le tensioni radiali orizzontali ed è funzione della forza della ruota e del  $Q$  raggio della ruota  $r$ .

La **resistenza alla fatica** (ted. *Dauerfestigkeit*) è una tensione che, nonostante il cambiamento di peso, non causa la fatica del materiale.

Il **fattore di amplificazione dinamica** (ted. *Geschwindigkeitsfaktor*) cattura l'influenza delle forze dinamiche della ruota dovute ad anomalie sulla superficie di contatto tra ruota e rotaia e a irregolarità nella posizione geometrica del binario.

## 2 Forze del binario

Le forze delle ruote verticali e orizzontali (trasversali e longitudinali) si applicano alla sovrastruttura del binario. La costruzione del binario deve essere tale da resistere alle forze verticali delle ruote. Le forze orizzontali della ruota possono essere ignorate nel calcolo del giunto, del momento flettente e della pressione.

Le forze verticali delle ruote agiscono sulla rotaia come:

- Forze statiche delle ruote  $Q_{st}$ .

La forza statica della ruota è la forza peso del veicolo fermo applicata a una ruota su entrambi gli assi e in orizzontale, calcolata con l'equazione:

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

dove:

$Q_{st}$  forza statica della ruota,  
 $P$  carico sull'asse.

- Forze quasistatiche delle ruote  $Q_{qst}$

La forza quasistatica della ruota è la componente verticale della forza laterale non compensata nella curva ed è in media pari al 20% del valore della forza statica della ruota, calcolata con l'equazione:

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

dove:

$Q_{qst}$  forza quasi-statica della ruota,  
 $Q_{st}$  forza statica della ruota.

- Forze effettive delle ruote  $Q$

La forza effettiva della ruota  $Q$  è la somma della forza statica e quasistatica della ruota ed è calcolata utilizzando l'equazione:

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

dove:

$Q$  forza effettiva della ruota,  
 $Q_{st}$  forza statica della ruota,  
 $Q_{qst}$  forza quasistatica della ruota.

- Forze dinamiche delle ruote  $Q_{din}$

La forza dinamica della ruota è il prodotto della forza effettiva della ruota  $Q$  e del fattore dinamico  $\alpha$  e si calcola con l'equazione:

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

dove:

$Q_{din}$  forza dinamica della ruota,  
 $Q$  forza effettiva della ruota,  
 $\alpha$  fattore dinamico.

Il fattore dinamico  $\alpha$  dipende dalla velocità della linea e dalle condizioni del binario ed è spiegato più in dettaglio nel capitolo 5 di questa specifica.

La forza effettiva della ruota non deve superare 145 kN (SIST EN 14363, 2005).

### 3 Calcolo del movimento verticale, del momento flettente e della pressione

Il movimento verticale della rotaia, il momento flettente della rotaia e la pressione di soglia sui binari devono essere calcolati con il metodo Zimmermann, riconosciuto come metodo standard per il calcolo della struttura superiore delle linee ferroviarie. Il metodo si basa sull'ipotesi che la rotaia sia un supporto longitudinale senza peso su un substrato elastico che giace su soglie longitudinali immaginarie con la stessa area di contatto effettiva delle soglie trasversali.

Le equazioni per il posizionamento, il momento flettente e la pressione devono essere calcolate a partire dalla condizione di equilibrio in cui la forza trasversale e il momento flettente nella sezione trasversale osservata del supporto longitudinale sono in equilibrio con l'applicazione di forze esterne sotto forma di carico continuo, per ciascuna forza della ruota e per un gruppo di forze della ruota.

#### 3.1 Forza individuale della ruota

Per una singola forza ruota si applicano le seguenti equazioni:

- movimento verticale della rotaia:

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

- momento flettente:

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

- la pressione della soglia sul binario zavorrato:

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

#### 3.2 Gruppo di forze delle ruote

Per un gruppo di forze delle ruote si applicano le seguenti equazioni:

- movimento verticale della rotaia:

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

- momento flettente:

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

- la pressione della soglia sul binario zavorrato:

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

dove:  $\mu$  linee di influenza del momento flettente,

## CALCOLO DEI CARICHI VERTICALI AMMISSIBILI NELLA FERROVIA

$\eta$	linea di influenza per la flessione,
$Q$	forza effettiva della ruota,
$M$	momento flettente,
$C$	coefficiente di flessibilità del binario,
$p$	pressione della rotaia sulla traversina,
$b$	larghezza della traversina longitudinale immaginaria,
$L$	il valore di base della sovrastruttura.

La larghezza della traversina longitudinale immaginaria  $b$  e il valore di base della sovrastruttura  $L$  devono essere calcolati con le seguenti equazioni:

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

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

dove:

$b$	larghezza della traversina longitudinale immaginaria,
$b_1$	larghezza della traversina longitudinale,
$u$	distanza dall'asse della rotaia all'estremità della traversina,
$a$	distanza tra le traversine,
$L$	costante della sovrastruttura,
$E$	modulo di elasticità della rotaia ( $\delta = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ ),
$I$	momento d'inerzia della rotaia,
$C$	coefficiente di flessibilità del binario.

Il coefficiente di flessibilità del binario  $C$  è indicato nell'allegato 3 per le diverse condizioni di linea.

Le linee di influenza per il momento  $\mu$  e per la flessione  $\eta$  sono mostrate nella Figura 1 e nella Figura 2 e i loro valori sono riportati nell'allegato 2.

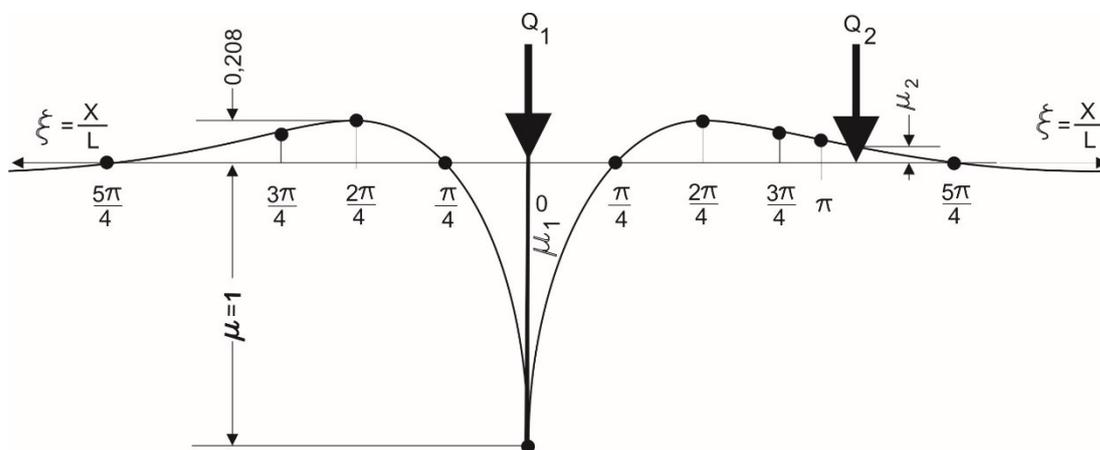


Figura 1: linea di influenza del momento

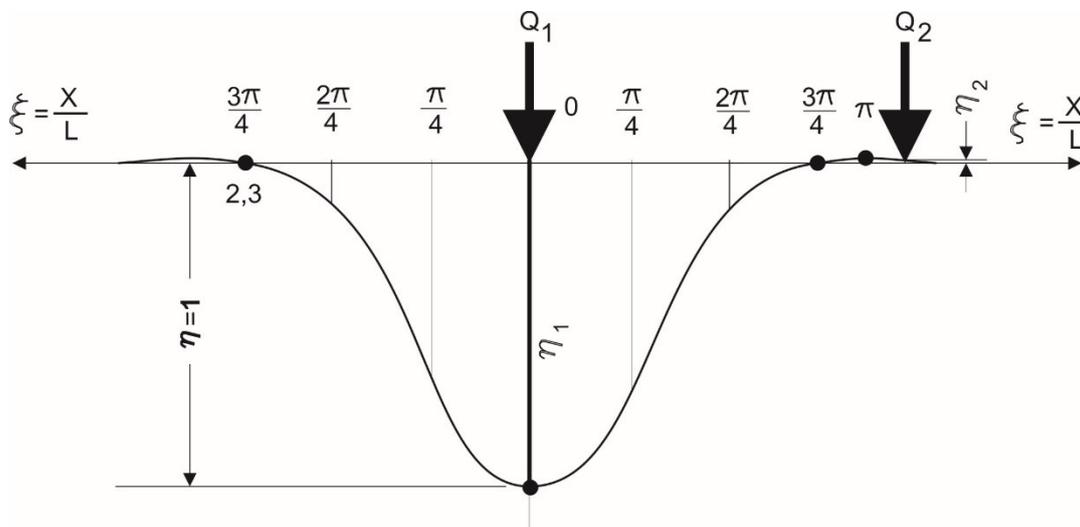


Figura 2: linea di influenza di flessione

#### 4 Sollecitazione a flessione nel piede della rotaia e fattore dinamico

La sollecitazione media di flessione nel piede della rotaia deve essere calcolata con l'equazione:

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

Sulla base di una serie di esperimenti (Fastenrath, 1977), si è riscontrato che fino a una velocità di 200 km/h la sollecitazione media di flessione nel piede della rotaia  $\sigma$  e la deflessione media della rotaia  $y$  sono più o meno delle costanti attorno alle quali si disperdono i valori reali. La dispersione può essere descritta da una deviazione standard delle discrepanze dalla media. Utilizzando la deviazione standard, la velocità della linea, le condizioni della linea e il fattore di probabilità statistica, calcoliamo il fattore dinamico  $\alpha$  e quindi i valori massimi e minimi della sollecitazione di flessione e del cedimento della rotaia.

La sollecitazione di flessione massima viene calcolata con l'equazione:

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

dove:

- $\sigma$  sollecitazione media di flessione,
- $\sigma_{max}$  sollecitazione massima di flessione,
- $M$  momento flettente nella gamba della rotaia,
- $W$  momento di resistenza alla rotaia,
- $\alpha$  fattore dinamico.

Le tensioni ammissibili delle rotaie a carico variabile o la loro resistenza dinamica permanente sono riportate nell'allegato 3, tabella 3.

#### 4.1 Fattore dinamico

Il fattore dinamico è una funzione della velocità della linea e dello stato della sovrastruttura della linea e della probabilità statistica di rilevazione dell'errore.

Per velocità  $V < 60$  km/h devono essere calcolate utilizzando la formula:

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

per velocità  $60 \leq V \leq 200$  km/h secondo l'equazione:

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

dove:

- $\alpha$       fattore dinamico,
- $V$       velocità della linea (km/h),
- $t = 1$     fattore di probabilità statistica (68 % di probabilità di rilevare tutti gli errori),
- $t = 2$     fattore di probabilità statistica (95,5% di probabilità di rilevare tutti gli errori),
- $t = 3$     fattore di probabilità statistica (99,7% di probabilità di rilevare tutti gli errori),
- $s = 0,1$    deviazione standard dei difetti in condizioni di linea molto buone,
- $s = 0,2$    deviazione standard dei difetti in buone condizioni di linea,
- $s = 0,3$    deviazione standard dei difetti in scarse condizioni di linea.

#### 5 Sollecitazione di taglio nella testa della rotaia

Le sollecitazioni di taglio nella testa della rotaia sono dovute alle differenze tra le tensioni di pressione verticali e le tensioni radiali orizzontali. Le tensioni di taglio sono maggiori a una profondità di 4-6 mm al di sotto della superficie di contatto tra ruota e rotaia e possono provocare gravi danni alla rotaia, chiamati "head check".

La massima sollecitazione di taglio nella testa della rotaia  $\tau_{max}$  viene calcolata con l'equazione:

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

sollecitazione di taglio ammissibile secondo l'equazione:

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

La forza effettiva della ruota  $Q$  che non comporta ancora il superamento della sollecitazione di taglio ammissibile nella testa della rotaia e quindi il danneggiamento della testa della rotaia è la seguente:

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

dove:

- $\tau$       sollecitazione di taglio [N/mm<sup>2</sup>],

- $\sigma_t$  sollecitazione di trazione della rotaia [N/mm<sup>2</sup>],  
 $Q$  forza effettiva della ruota [kN],  
 $r$  raggio della ruota [mm].

## 6 Condizioni di installazione della rotaia

### 6.1 Condizioni di installazione della rotaia sulle linee principali

I binari della linea aperta delle linee principali o delle linee della rete di trasporto TEN-T e i binari delle stazioni principali di queste linee devono corrispondere al carico per asse delle categorie F1, F2, P3 e P4 della TSI. Ciò significa che devono garantire un carico per asse di 225 kN o essere costruiti con 60 rotaie di forma E1 dotate di un'inclinazione di 1°: 40 o 1°: 20 e con uno spazio di 60 cm tra le soglie.

60 L'acciaio della rotaia E1 deve garantire una durezza di almeno 200 HBW e una tensione di trazione di almeno 900 N/mm<sup>2</sup> e, nella prova di fatica del materiale, deve resistere ad almeno 5×10<sup>6</sup> cicli senza danni (TSI INF 1299/2014/UE).

Il binario è un componente di interoperabilità e pertanto è necessario ottenere la dichiarazione di conformità CE prima dell'installazione.

Quando si utilizzano rotaie 60 E1 usate, occorre dimostrare con un calcolo conforme a questa specifica che le tensioni di rollio nel segmento della rotaia non superano la resistenza dinamica permanente della rotaia.

### 6.2 Condizioni di installazione della rotaia sulle linee regionali

I binari di linea aperti delle linee regionali e i binari delle stazioni principali di queste linee devono corrispondere al carico per asse delle categorie F3 e P5 della TSI. Ciò significa che devono garantire un carico per asse di 200 kN o essere costruiti con 49 rotaie di forma E1 dotate di un'inclinazione di 1°: 40 o 1°: 20 e con una distanza massima tra le soglie di 63 cm.

49 L'acciaio per rotaie E1 deve garantire una durezza di almeno 200 HBW e una tensione di trazione di almeno 680 N/mm<sup>2</sup> e, nella prova di fatica del materiale, deve resistere ad almeno 5 × 10<sup>6</sup> cicli senza danni (TSI INF 1299/2014/UE).

Il binario è un componente di interoperabilità e pertanto è necessario ottenere la dichiarazione di conformità CE prima dell'installazione.

Quando si utilizzano rotaie usate con una distanza tra le soglie trasversali di 49 E1 o 60 E1 o superiore, si deve dimostrare, mediante calcoli conformi alla presente specifica, che le tensioni di flessione delle gambe della rotaia non superano la resistenza dinamica continua della rotaia.

### 6.3 Condizioni di installazione delle rotaie sui binari delle stazioni e sui binari industriali

I binari delle stazioni e dei binari industriali devono fornire un carico per asse di 180 kN indipendentemente dal sistema ferroviario e dalla distanza tra le soglie utilizzate su tali binari.

49 L'acciaio per rotaie E1 deve garantire una durezza di almeno 200 HBW e una tensione di trazione di almeno 680 N/mm<sup>2</sup> e, nella prova di fatica del materiale, deve resistere ad almeno  $5 \times 10^6$  cicli senza danni (TSI INF 1299/2014/UE).

Il binario è un componente di interoperabilità e pertanto è necessario ottenere la dichiarazione di conformità CE prima dell'installazione.

## 7 Testi di riferimento

L'orientamento si basa sui seguenti testi di riferimento:

SIST EN 15528-2016: Impianti ferroviari – Categorizzazione delle linee per la gestione dell'interfaccia tra i carichi ammissibili dei veicoli e l'infrastruttura;

SIST EN 13674-1-2011, Applicazioni ferroviarie – Sovrastruttura – Binari – Parte 1: binari Vignol con una massa pari o superiore a 46 kg/m;

SIST EN 14363-2005: Impianti ferroviari – Prove delle caratteristiche di guida per la presa in consegna dei veicoli ferroviari – Prova di guida e comportamento da fermo;

CODICE UIC 518: Fahrtechnische Prufung und Zulassung von Eisebahnfahrzeugen – Fahrsicherheit Fahrwegbeanspruchung und Fahrverhalten;

Decreto sulla categorizzazione delle linee (GU RS nn. 4/09, 5/09 – rettifica, 62/11, 66/12, 12/13 e 30/18 – ZVZelP-1).

## 8 Letteratura

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

E. Klotzinger: Der Oberbauschocter, 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.

## 9

## 10 ALLEGATI

### 10.1 Allegato 1: Significato dei simboli

$a$	distanza tra le traversine [cm]
$\alpha$	fattore dinamico
$b$	larghezza della traversina longitudinale immaginaria [cm]
$b_1$	larghezza trasversale delle traversine [cm]
$C$	coefficiente di flessibilità del binario [ $C = 100 \text{ N/cm}^3$ ]
$E$	modulo di elasticità della rotaia [ $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$ ]
$I$	momento di inerzia della rotaia [ $\text{cm}^4$ ]
$M$	momento di flessione [Ncm]
$p$	pressione della rotaia sulla traversina [ $\text{N/cm}^2$ ]
$r$	raggio della ruota [mm]
$Q$	forza effettiva della ruota [N]
$Q_{st}$	forza statica della ruota [N]
$Q_{qst}$	forza quasistatica della ruota [N]
$Q_{din}$	forza dinamica della ruota [N]
$u$	distanza tra l'asse della ferrovia e l'estremità della soglia (lunghezza della superficie di contatto efficace della soglia)
$W$	momento di resistenza della rotaia [ $\text{cm}^3$ ],
$x$	distanza del punto effettivo dalla sezione trasversale osservata [cm]
$y$	cedimento della traversina [cm]
$\sigma$	sollecitazione di flessione [ $\text{N/cm}^2$ ]
$\sigma_t$	sollecitazione di trazione della rotaia [ $\text{N/mm}^2$ ]
$\sigma_{dop}$	sollecitazione di flessione ammissibile della rotaia [ $\text{N/mm}^2$ ]
$\tau$	sollecitazione tangenziale nella testa della rotaia [ $\text{N/mm}^2$ ]

10.2 Allegato 2: Valori delle linee di influenza  $\eta$  e  $\mu$  secondo Zimmermann

$\xi$	$\eta$	$\mu$	$\xi$	$\eta$	$\mu$
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 Allegato 3

Tabella 1: 49 Dati ferroviari E1 e 60 E1

Forma della rotaia	Massa [kg/m]	Area della sezione trasversale [cm <sup>2</sup> ]	Momento di resistenza W [cm <sup>3</sup> ] e	Momento di inerzia [cm <sup>4</sup> ]	Altezza della rotaia [mm]	Larghezza del segmento [mm]	Larghezza della testa [mm]
<b>49 E1</b>	49,4	62,92	240	1816	149	125	67
<b>54 E1</b>	53,8	68,56	276	2307	159	140	70
<b>60 E1</b>	60,2	76,70	334	3038	172	150	72

Tabella 2: Coefficiente di flessibilità della rotaia C (Klotzinger, 2008)

Qualità del binario	Coefficiente di consumo [N/cm <sup>3</sup> ]
Pessimo	<50
Scarso	≥50
Buono	≥100
Ottimo	≥150
Binario su base di cemento	≥300

Tabella 3: Resistenza dinamica sostenibile della rotaia (Gottwald, 1999)

Sollecitazione di trazione della rotaia $\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistenza dinamica durevole $\sigma_{dop}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Binario saldato in continuo	Binario giuntato
700 (R 220)	245	280
900 (R 260)	282	320

## 10.4 Allegato 4: Esempio di calcolo

Il calcolo del momento flettente e dello sforzo di flessione nel segmento della rotaia, il cedimento della rotaia e la pressione della traversina sul binario passano sotto la prima forza della ruota.

### Dati di input

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

Coefficiente di flessibilità:  $C = 100 \text{ N/cm}^3$

Distanza tra le traversine:  $a = 60 \text{ cm}$ , larghezza della traversina  $b_1 = 26 \text{ cm}$ ,  $2u = 136 \text{ cm}$

Velocità di linea:  $100 \text{ km/h}$

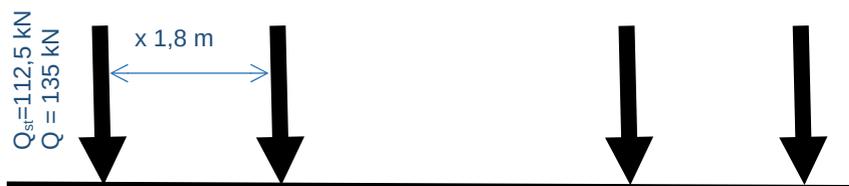
Forza statica della ruota:  $Q_{st} = 112,5 \text{ kN}$

Forza effettiva della ruota:  $Q = 1,2 Q_{st} = 135 \text{ kN}$ ,

Buon binario:  $s = 0,2$

Raggio della ruota:  $400 \text{ mm}$

Disposizione dell'asse del veicolo a quattro assi



### (1) Momento flettente per un gruppo di forze

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$M = \frac{LQ}{4} (1 + \mu_2) = \frac{81,12 \cdot 135000}{4} (1 - 0,06) = 232083 \text{ Ncm} = 23,21 \text{ kNm}$$

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

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

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

$$\mu_2 = -0,15$$

Il momento flettente e la flessione sono influenzati solo dal primo e dal secondo asse.

### (2) Sollecitazione massima di flessione nel segmento del binario

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

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

La sollecitazione di flessione nel segmento della rotaia è inferiore alla resistenza dinamica permanente della rotaia 60 E1, che secondo le norme tedesche per i binari saldati in continuo e la resistenza alla trazione 900 N/mm<sup>2</sup> è pari a 282 N/mm<sup>2</sup>.

### (3) Flessione o cedimento

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

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

$$\eta_2 = 0,02$$

Alla distanza tra gli assi 0,761 π = 0,761 x 3,14 x 86 = 205 cm la forza adiacente non ha più alcun effetto sulla traiettoria.

### (4) Pressione delle traversine sul binario zavorrato

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

La pressione delle traversine sul binario zavorrato può anche essere calcolata direttamente dal setaccio come segue:

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

### (5) Forza verticale della traversina sotto l'asse osservato

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

### (6) Sollecitazione di taglio nella testa della rotaia

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

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