Übungsaufgabe Einschränkungsberechnung

Inhaltsverzeichnis

0 Gegebene Größen

Bogenradius	R	=	250 m
Länge Wagenkasten	L_{Wk}	=	24,20 m
Abstand zwischen den Führungsquerschnitten (Drehgestellabstand)	a	=	17,20 m
Radsatzabstand im Drehgestell	p	=	2,50 m
Spurmaß	d	=	1,41 m
Primäres Querspiel (Radsatzlagerquerspiel)	q	=	0 mm
Sekundäres Querspiel (Wiegenquerspiel, konst. für alle Radien)	w	=	25 mm
Neigungskoeffizient	s	=	0,125
Wankpolhöhe	h_C	=	0,619 m
Statische Unsymmetrie	η_0	=	1°
Höhe der Seitenwandoberkante	h	=	3,2 m

1 Einschränkungsberechnung

1.1 Statische Einschränkung

1.1.1 Maximale innere Einschränkung

1.1.1.1 Lage des Berechnungsquerschnitts

$$\underline{\underline{n_i}} = n_{i.\max} = \frac{a}{2} = \frac{17{,}2}{2}\,\mathrm{m} = \underline{\underline{8{,}6\,\mathrm{m}}}$$

1.1.1.2 Berechnung der Einschränkung

$$E_i = \left[\frac{\Delta_i}{500} + \frac{1{,}465 - d}{2} + q + w + [x_i]_{>0} - \begin{matrix} 0{,}075 & * \\ 0{,}025 & ** \end{matrix}\right]_{>0}$$

* für Teile ≥ 0,43 m über SO

$$\Delta_i = ? \rightarrow \left(a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}\right) \begin{matrix} \le \\ > \end{matrix} 7{,}5\,(\mathrm{m}^2)$$

$$\left(a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}\right) = \left(17{,}2 \cdot 8{,}6 - 8{,}6^2 + \frac{2{,}5^2}{4}\right)\mathrm{m}^2 = (147{,}92 - 73{,}96 + 1{,}5625)\,\mathrm{m}^2 = 75{,}5225\,\mathrm{m}^2 > 7{,}5\,\mathrm{m}^2$$

$$\rightarrow \underline{\Delta_i} = \left(a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}\right) = \underline{75{,}5225\,\mathrm{m}^2}$$

$$x_i = \frac{1}{750}\left(a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4} - 100\right)$$

$$= \frac{1}{750}(75{,}5225 - 100)\,\mathrm{m}$$

$$x_i = -0{,}032637\,\mathrm{m} < 0 \rightarrow \underline{x_i = 0\,\mathrm{m}}$$

$$E_i = \left[\left(\frac{75{,}5225}{500} + \frac{1{,}465 - 1{,}41}{2} + 0 + 0{,}025 + 0 - 0{,}075\right)\mathrm{m}\right]_{>0}$$

$$= \left[(0{,}151045 + 0{,}0275 + 0 + 0{,}025 - 0{,}075)\,\mathrm{m}\right]_{>0}$$

$$E_i = 0{,}128545\,\mathrm{m} = \underline{\underline{0{,}129\,\mathrm{m}}}$$

1.1.1.3 Bestimmung der zulässigen Breite

$$B_{i,zul} = 2 \cdot (b_R - E_i) = 2 \cdot (1{,}575 - 0{,}129)\,\text{m} = \underline{\underline{2{,}892\,\text{m}}}$$

1.1.2 Maximale äußere Einschränkung

1.1.2.1 Lage des Berechnungsquerschnitts

$$\underline{\underline{n_a}} = n_{a.\max} = \frac{L_{Wk} - a}{2} = \frac{24{,}2 - 17{,}2}{2}\,\text{m} = \underline{\underline{3{,}5\,\text{m}}}$$

1.1.2.2 Berechnung der Einschränkung

$$E_a = \left[\frac{\Delta_a}{500} + \left(\frac{1{,}465 - d}{2} + q + w \right) \cdot \frac{2 \cdot n_a + a}{a} + [x_a]_{>0} - \begin{matrix} 0{,}075 & * \\ 0{,}025 & ** \end{matrix} \right]_{>0}$$

* für Teile ≥ 0,43 m über SO

$$\Delta_a = ? \rightarrow \left(a \cdot n_a + n_a^{\,2} - \frac{p^2}{4} \right) \overset{\leq}{\underset{>}{}} 7{,}5\,(\text{m}^2)$$

$$\left(a \cdot n_a + n_a^{\,2} - \frac{p^2}{4} \right) = \left(17{,}2 \cdot 3{,}5 + 3{,}5^2 - \frac{2{,}5^2}{4} \right)\text{m}^2 = (60{,}2 + 12{,}24 - 1{,}5625)\,\text{m}^2 = 70{,}8875\,\text{m}^2 > 7{,}5\,\text{m}^2$$

$$\rightarrow \underline{\Delta_a} = \left(a \cdot n_a + n_a^{\,2} - \frac{p^2}{4} \right) = \underline{70{,}8875\,\text{m}^2}$$

$$x_a = \frac{1}{750}\left(a \cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4} - 120 \right)$$

$$= \frac{1}{750}(70{,}8875 - 120)\,\text{m}$$

$$x_a = -0{,}06548\,\text{m} < 0 \rightarrow \underline{x_a = 0\,\text{m}}$$

$$E_a = \left[\left(\frac{70{,}8875}{500} + \left(\frac{1{,}465 - 1{,}41}{2} + 0 + 0{,}025 \right) \cdot \frac{2 \cdot 3{,}5 + 17{,}2}{17{,}2} + 0 - 0{,}075 \right)\text{m} \right]_{>0}$$

$$= \left[(0{,}141775 + (0{,}0275 + 0 + 0{,}025) \cdot 1{,}40698 + 0 - 0{,}075)\,\text{m} \right]_{>0}$$

$$= \left[(0{,}141775 + 0{,}073866 + 0 - 0{,}075)\,\text{m} \right]_{>0}$$

$$E_a = 0{,}14064\,\text{m} = \underline{\underline{0{,}141\,\text{m}}}$$

1.1.2.3 Bestimmung der zulässigen Breite

$$B_{a,zul} = 2 \cdot (b_R - E_a) = 2 \cdot (1{,}575 - 0{,}141)\,\mathrm{m} = \underline{\underline{2{,}868\,\mathrm{m}}}$$

1.1.3 Maximal zulässige Breite

$$E_i < E_a \rightarrow B_{i,zul} = 2{,}892\,\mathrm{m} > 2{,}868\,\mathrm{m} = B_{a,zul} \rightarrow \underline{\underline{B_{zul}}} = B_{a,zul} = \underline{\underline{2{,}868\,\mathrm{m}}}$$

Y-Wagen: B = 2,883 m, am Wagenende eingezogen: B_{WE} = 2,860 m

1.2 Kinematische Einschränkung

1.2.1 Maximale innere Einschränkung (n_i = 8,60 m)

1.2.1.1 Auswahl der Berechnungsformel

Ist Formel für gerades Gleis oder Gleisbogen ausschlaggebend?

$$a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4} - 500 \cdot \left(w_\infty - w_{i(250)}\right) \underset{>}{\overset{\leq}{}} 250 \cdot (1{,}465 - d) - 0$$

$$[75{,}5225 - 500 \cdot (0{,}025 - 0{,}025)]\,\mathrm{m}^2 \underset{>}{\overset{\leq}{}} [\,250 \cdot (1{,}465 - 1{,}41) - 0]\,\mathrm{m}^2$$

$$75{,}5225\,\mathrm{m}^2 > 13{,}75\,\mathrm{m}^2 \rightarrow \text{Formel (R2) für Gleisbogen entscheidend!}$$

1.2.1.2 Berechnung der quasistatischen Verschiebung z

Anwendung Sonderfall (1.13a) möglich!

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{h > h_C \geq 0{,}5\ \mathrm{m}} \\ \boldsymbol{s \leq 0{,}4} \\ \boldsymbol{\eta_0 \leq 1°} \end{array}\right\} \quad z = \frac{s}{30} \cdot (h - h_C) = \frac{0{,}125}{30} \cdot (3{,}2 - 0{,}619)\ \mathrm{m} = 0{,}01075\ \mathrm{m} = \underline{\underline{0{,}011\ \mathrm{m}}}$$

1.2.1.3 Berücksichtigung 150-m-Bogen?

$$x_i = \frac{1}{750}\left(a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4} - 100\right) + w_{i(150)} - w_{i(250)}$$

$$= \left[\frac{1}{750}(75{,}5225 - 100) + 0{,}025 - 0{,}025\right]\mathrm{m}$$

$$x_i = -0{,}03263\,\mathrm{m} < 0\,\mathrm{m} \rightarrow \underline{x_i = 0\,\mathrm{m}}$$

1.2.1.4 Berechnung des Einschränkungswertes

$$E_i = \frac{a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}}{500} + q + w_{i(250)} + z + [x_i]_{>0} - 0{,}015$$

$$= \left(\frac{75{,}5225}{500} + 0 + 0{,}025 + 0{,}011 + 0 - 0{,}015 \right) \text{m}$$

$$E_i = 0{,}17204 \text{ m} = \underline{\underline{0{,}173 \text{ m}}}$$

1.2.2 Maximale äußere Einschränkung (n_a = 3,5 m)

1.2.2.1 Auswahl der Berechnungsformel

Ist Formel für gerades Gleis oder Gleisbogen ausschlaggebend?

$$a \cdot n_a + n_a{}^2 - \frac{p^2}{4} - 500 \cdot \left[\left(w_\infty - w_{i(250)} \right) \cdot \frac{n_a}{a} + \left(w_\infty - w_{a(250)} \right) \cdot \frac{n_a + a}{a} \right] \leq 250 \cdot \left(1{,}465 - d \right) \cdot \frac{n_a}{a} + 7{,}5$$

$$\left[70{,}8875 - 500 \cdot \left(0{,}025 - 0{,}025 \right) \cdot \frac{3{,}5}{17{,}2} + \left(0{,}025 - 0{,}025 \right) \cdot \frac{3{,}5 + 17{,}2}{17{,}2} \right] \text{m}^2 \overset{\leq}{>} \left[250 \cdot \left(1{,}465 - 1{,}41 \right) \cdot \frac{3{,}5}{17{,}2} + 7{,}5 \right] \text{m}^2$$

$$70{,}8875 \text{ m}^2 > 10{,}298 \text{ m}^2 \rightarrow \text{Formel (R5) für Gleisbogen entscheidend!}$$

1.2.2.2 Berechnung der quasistatischen Verschiebung z

s. innere Einschränkung: $z\left(h = 3{,}2 \text{ m}\right) = \underline{\underline{0{,}011 \text{ m}}}$

1.2.2.3 Berücksichtigung 150-m-Bogen?

$$x_a = \frac{1}{750} \cdot \left(a \cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4} - 120 \right) + \left(w_{i(150)} - w_{i(250)} \right) \cdot \frac{n_a}{a} + \left(w_{a(150)} - w_{a(250)} \right) \cdot \frac{n_a + a}{a}$$

$$= \left[\frac{1}{750} \cdot \left(70{,}8875 - 120 \right) + \left(0{,}025 - 0{,}025 \right) \cdot \frac{3{,}5}{17{,}2} + \left(0{,}025 - 0{,}025 \right) \cdot \frac{3{,}5 + 17{,}2}{17{,}2} \right] \text{m}$$

$$x_a = \text{-}0{,}06548 \text{ m} < 0 \rightarrow \underline{x_a = 0 \text{ m}}$$

1.2.2.4 Berechnung des Einschränkungswertes

$$E_a = \frac{a \cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4}}{500} + \frac{1{,}465 - d}{2} \cdot \frac{n_a + a}{a} + q \cdot \frac{2 \cdot n_a + a}{a} + w_{i(250)} \cdot \frac{n_a}{a} + w_{a(250)} \cdot \frac{n_a + a}{a} + z + [x_a]_{>0} - 0{,}030$$

$$= \left(\frac{70{,}8875}{500} + \frac{1{,}465 - 1{,}41}{2} \cdot \frac{3{,}5 + 17{,}2}{17{,}2} + 0 \cdot \frac{2 \cdot 3{,}5 + 17{,}2}{17{,}2} + 0{,}025 \cdot \frac{3{,}5}{17{,}2} + 0{,}025 \cdot \frac{3{,}5 + 17{,}2}{17{,}2} + 0{,}011 + 0 - 0{,}030 \right) \mathrm{m}$$

$$= \left(0{,}141775 + 0{,}03309 + 0 + 0{,}00509 + 0{,}03009 + 0{,}011 + 0 - 0{,}03\right) \mathrm{m}$$

$$E_a = 0{,}19104\,\mathrm{m} = \underline{\underline{0{,}192\,\mathrm{m}}}$$

1.2.3 Maximal zulässige Breite

$$E_i = 0{,}173\,\mathrm{m} < 0{,}192\,\mathrm{m} = E_a \rightarrow \underline{\underline{B_{zul}}} = 2 \cdot (b_R - E_a) = 2 \cdot (1{,}645 - 0{,}192)\,\mathrm{m} = \underline{\underline{2{,}906\,\mathrm{m}}}$$

Typ Y: B = 2883 mm → Abmessungen nach beiden Berechnungsarten zulässig

2 Lage des Zugführerabteiles

2.1 Statische Einschränkungsberechnung

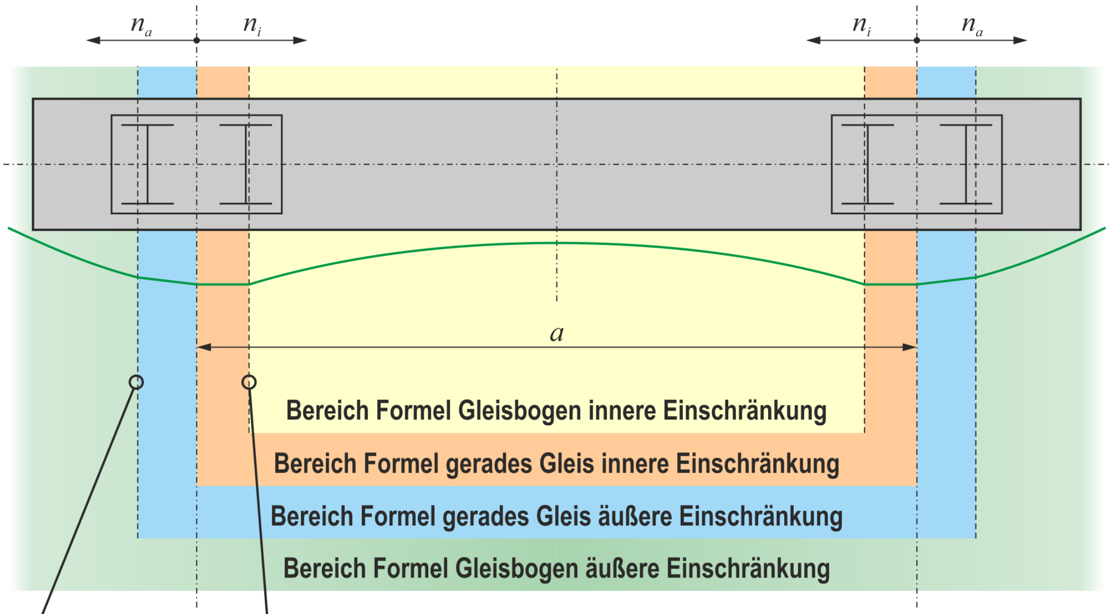
2.1.1 Bedingungen

- $E_i = E_a$
- $n_i + n_a = 2$ m ↘ $n_i = 2$ m - n_a

2.1.2 Problem 1: Anwendung der Formeln Δi bzw. Δa für Gerade oder Gleisbogen?

Lösung:

Ermitteln der n-Werte für Querschnitte, an denen die Formeln wechseln → Gleichheitszeichen in Entscheidungsformel



$$\left(a \cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4}\right) = 7{,}5 \qquad \left(a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}\right) = 7{,}5$$

Innere Einschränkung:

$$\left(a \cdot n_i - n_i^{\;2} + \frac{p^2}{4}\right) = 7{,}5 \qquad \left(17{,}2 \cdot n_i - n_i^{\;2} + \frac{2{,}5^2}{4}\right)\mathrm{m}^2 = 7{,}5\,\mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(-n_i^{\;2} + 17{,}2 \cdot n_i + \frac{2{,}5^2}{4} - 7{,}5\right)\mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(n_i^{\;2} - 17{,}2 \cdot n_i - \frac{2{,}5^2}{4} + 7{,}5\right)\mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(n_i^{\;2} - 17{,}2 \cdot n_i + 5{,}9375\right)\mathrm{m}^2$$

$$n_{i,1/2} = \left(\frac{17{,}2}{2} \pm \sqrt{\frac{17{,}2^2}{4} - 5{,}9375}\right)\mathrm{m} = \left(8{,}6 \pm 8{,}2475\right)\mathrm{m}$$

$$n_{i,1} = 16{,}847\,\mathrm{m}$$

$$n_{i,2} = \underline{\underline{0{,}353\,\mathrm{m}}}$$

Äußere Einschränkung:

$$\left(a \cdot n_a + n_a^{\;2} - \frac{p^2}{4}\right) = 7{,}5 \qquad \left(17{,}2 \cdot n_a + n_a^{\;2} + \frac{2{,}5^2}{4}\right)\mathrm{m}^2 = 7{,}5\,\mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(n_a^{\;2} + 17{,}2 \cdot n_a - \frac{2{,}5^2}{4} - 7{,}5\right)\mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(n_a^{\;2} + 17{,}2 \cdot n_a - 9{,}0625\right)\mathrm{m}^2$$

$$n_{a,1/2} = \left(-\frac{17{,}2}{2} \pm \sqrt{\frac{17{,}2^2}{4} + 9{,}0625}\right)\mathrm{m} = \left(-8{,}6 \pm 9{,}11166\right)\mathrm{m}$$

$$n_{a,1} = -17{,}712\,\mathrm{m}$$

$$n_{a,2} = \underline{\underline{0{,}512\,\mathrm{m}}}$$

Entscheidung verwendete Formeln:

$n_{i,2}$ + $n_{a,2}$ = 0,865 m < 2,0 m ➘ hohe Wahrscheinlichkeit für Formeln für Gleisbogen

2.1.3 Problem 2: Berücksichtigung x_i und x_a notwendig?

Lösung:

Über die Werte x_i und x_a, die nur in die Berechnung eingehen, wenn sie größer als Null sind, wird berücksichtigt, ob der 150-m-Bogen mit der deutlich größeren bogengeometrischen Ausragung (Anteile E1 und E2) und ggf. anderen Wiegenquerspielen (Anteil E3) aber auch den deutlich größeren Ausladungen (zulässige Überschreitungen der Bezugslinie, Anteil E5) die größten Einschränkungswerte ergibt. Das ist nur bei großen Unterschieden der Wiegenquerspiele von 150- und 250-m-Bogen und in Bereichen, die weit von den Führungsquerschnitten (im Bsp. Drehzapfen) entfernt liegen, der Fall.

In diesem Beispiel sind die Wiegenquerspiele für alle Radien konstant. Für die bisher unter Pkt. 1 betrachteten Querschnitte $n_{i,max}$ und $n_{a,max}$, die als Extrema am weitesten von den Führungsquerschnitten entfernt liegen, ergaben sich für x_i und x_a Werte kleiner Null. Für die nun erfolgenden Berechnungen zur Festlegung der Lage des Zugführerabteils, welches in jedem Falle nahe dem Führungsquerschnitt liegt, werden die Werte x_i und x_a ebenfalls Null sein.

2.1.4 Ermittlung n_a, n_i

$$E_i\left(n_i = 2\,\mathrm{m} - n_a\right) = E_a\left(n_a\right)$$

$$\frac{a\cdot(2-n_a)-(2-n_a)^2+\frac{p^2}{4}}{500}+\frac{1{,}465-d}{2}+q+w-0{,}075=$$

$$\frac{a\cdot n_a+n_a^2-\frac{p^2}{4}}{500}+\left(\frac{1{,}465-d}{2}+q+w\right)\cdot\frac{2\cdot n_a+a}{a}-0{,}075$$

$$0=\left(\frac{2}{500}\cdot n_a^2+\frac{2a-4+0{,}105}{500}\cdot n_a+0{,}0525-0{,}003125-\frac{2a}{500}+\frac{4}{500}-0{,}055625\right)\mathrm{m}$$

$$0=\left(\frac{1}{250}\cdot n_a^2+0{,}0669\cdot n_a-0{,}06705\right)\mathrm{m}$$

$$0=\left(n_a^2+16{,}725\cdot n_a-16{,}7625\right)\mathrm{m}\quad\leftarrow\quad 0=\mathrm{x}^2+px+q\Rightarrow x_{1/2}=-\frac{p}{2}\pm\sqrt{\frac{p^2}{4}-q}$$

$$n_{a,1/2}=\left(-\frac{16{,}725}{2}\pm\sqrt{\frac{16{,}725^2}{4}+16{,}7625}\right)\mathrm{m}$$

$$n_{a,1/2}=\left(-8{,}3625\pm 9{,}31096\right)\mathrm{m}$$

$$n_a=\underline{\underline{0{,}9485\,\mathrm{m}}}$$

$$n_i=2\,\mathrm{m}-n_a=\left(2-0{,}9485\right)\mathrm{m}=\underline{\underline{1{,}0515\,\mathrm{m}}}$$

2.1.5 Überprüfung der Bedingung $E_a = E_i$ und Ermittlung der zulässigen Breite des Zugführerabteils

2.1.5.1 Innere Einschränkung (n_i = 1,0515 m)

→ Formel Gleisbogen, $x_i = 0$ (s.o.)

$$E_i = \frac{a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}}{500} + \frac{1{,}465 - d}{2} + q + w - 0{,}075$$

$$= \left(\frac{17{,}2 \cdot 1{,}0515 - 1{,}0515^2 + \frac{2{,}5^2}{4}}{500} + \frac{1{,}465 - 1{,}41}{2} + 0 + 0{,}025 - 0{,}075 \right) \mathrm{m}$$

$$E_i = (0{,}037085 + 0{,}0275 + 0{,}025 - 0{,}075)\,\mathrm{m} = 0{,}014585\,\mathrm{m} = \underline{0{,}0146\,\mathrm{m}}$$

2.1.5.2 Äußere Einschränkung (n_a = 0,9485 m)

→ Formel Gleisbogen, $x_a = 0$ (s.o.)

$$E_a = \frac{a \cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4}}{500} + \left(\frac{1{,}465 - d}{2} + q + w \right) \cdot \frac{2 \cdot n_a + a}{a} - 0{,}075 \cdot$$

$$= \left(\frac{17{,}2 \cdot 0{,}9485 + 0{,}9485^2 - \frac{2{,}5^2}{4}}{500} + \left(\frac{1{,}465 - 1{,}41}{2} + 0 + 0{,}025 \right) \cdot \frac{2 \cdot 0{,}9485 + 17{,}2}{17{,}2} - 0{,}075 \right) \mathrm{m}$$

$$E_a = (0{,}031303 + 0{,}0525 \cdot 1{,}11029 - 0{,}075)\,\mathrm{m} = 0{,}014593\,\mathrm{m} = \underline{0{,}0146\,\mathrm{m}}$$

→ $E_i = E_a$

2.1.5.3 Ermittlung zulässige Breite

$$\underline{\underline{B_{zul}}} = 2 \cdot (b_R - E_a) = 2 \cdot (1{,}575 - 0{,}0146)\,\mathrm{m} = 3{,}1208\,\mathrm{m} = \underline{\underline{3{,}121\,\mathrm{m}}}$$

2.2 Kinematische Einschränkungsberechnung

2.2.1 Vorgehensweise

wie statisch

2.2.2 Problem 1: Anwendung der Formeln Δi bzw. Δa für Gerade oder Gleisbogen?

Innere Einschränkung:

$$a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4} - 500 \cdot \left(w_\infty - w_{i(250)}\right) = 250 \cdot \left(1{,}465 - d\right) - 0$$

$$\left[17{,}2 \cdot n_i - n_i^2 + \frac{2{,}5^2}{4} - 500 \cdot \left(0{,}025 - 0{,}025\right)\right] \mathrm{m}^2 = \left[250 \cdot \left(1{,}465 - 1{,}41\right) - 0\right] \mathrm{m}^2$$

$$\left(17{,}2 \cdot n_i - n_i^2 + \frac{2{,}5^2}{4}\right) \mathrm{m}^2 = 13{,}75\,\mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(-n_i^2 + 17{,}2 \cdot n_i + \frac{2{,}5^2}{4} - 13{,}75\right) \mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(n_i^2 - 17{,}2 \cdot n_i - \frac{2{,}5^2}{4} + 13{,}75\right) \mathrm{m}^2$$

$$0 = \left(n_i^2 - 17{,}2 \cdot n_i + 12{,}1875\right) \mathrm{m}^2$$

$$n_{i,1/2} = \left(\frac{17{,}2}{2} \pm \sqrt{\frac{17{,}2^2}{4} - 12{,}1875}\right) \mathrm{m} = \left(8{,}6 \pm 7{,}8595\right) \mathrm{m}$$

$$n_{i,1} = 16{,}460\,\mathrm{m}$$

$$n_{i,2} = \underline{\underline{0{,}740\,\mathrm{m}}}$$

Äußere Einschränkung:

$$a \cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4} - 500 \cdot \left[\left(w_\infty - w_{i(250)}\right) \cdot \frac{n_a}{a} + \left(w_\infty - w_{a(250)}\right) \cdot \frac{n_a + a}{a}\right] = 250 \cdot \left(1{,}465 - d\right) \cdot \frac{n_a}{a} + 7{,}5$$

$$\left\{17{,}2 \cdot n_a + n_a^2 - \frac{2{,}5^2}{4} - 500 \cdot \left[\left(0{,}025 - 0{,}025\right) \cdot \frac{n_a}{17{,}2} + \left(0{,}025 - 0{,}025\right) \cdot \frac{n_a + 17{,}2}{17{,}2}\right]\right\} \mathrm{m}^2 = \left[250 \cdot \left(1{,}465 - 1{,}41\right) \cdot \frac{n_a}{17{,}2} + 7{,}5\right] \mathrm{m}^2$$

$$\left(17{,}2\cdot n_a + n_a^{\;2} - \frac{2{,}5^2}{4}\right)\text{m}^2 = \left(0{,}79942\cdot n_a + 7{,}5\right)\text{m}^2$$

$$0 = \left(n_a^{\;2} + 17{,}2\cdot n_a - 0{,}79942\cdot n_a - \frac{2{,}5^2}{4} - 7{,}5\right)\text{m}^2$$

$$0 = \left(n_a^{\;2} + 16{,}4006\cdot n_a - 9{,}0625\right)\text{m}^2$$

$$n_{a,1/2} = \left(-\frac{16{,}4006}{2} \pm \sqrt{\frac{16{,}4006^2}{4} + 9{,}0625}\right)\text{m} = \left(-8{,}2003 \pm 8{,}7354\right)\text{m}$$

$$n_{a,1} = -16{,}936\,\text{m}$$

$$n_{a,2} = \underline{\underline{0{,}535\,\text{m}}}$$

Entscheidung verwendete Formeln:

$n_{i,2}$ + $n_{a,2}$ = 1,275 m < 2,0 m ↘ hohe Wahrscheinlichkeit für Formeln für Gleisbogen

2.2.3 Problem 2: Berücksichtigung x_i und x_a notwendig?

Begründung wie statisch

2.2.4 Ermittlung n_a, n_i

$$E_i\left(n_i = 2\,\text{m} - n_a\right) = E_a\left(n_a\right)$$

$$\frac{a\cdot(2-n_a) - (2-n_a)^2 + \frac{p^2}{4}}{500} + q + w + z - 0{,}015$$

$$= \frac{a\cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4}}{500} + \frac{1{,}465-d}{2}\cdot\frac{n_a+a}{a} + q\cdot\frac{2\cdot n_a + a}{a} + w\cdot\frac{n_a}{a} + w\cdot\frac{n_a+a}{a} + z - 0{,}03$$

$$\left[\frac{17{,}2\cdot(2-n_a) - (2-n_a)^2 + \frac{2{,}5^2}{4}}{500} + 0 + 0{,}025 + 0{,}011 - 0{,}015\right]\text{m}^2$$

$$= \left(\frac{17{,}2\cdot n_a + n_a^2 - \frac{2{,}5^2}{4}}{500} + \frac{1{,}465-1{,}41}{2}\cdot\frac{n_a+17{,}2}{17{,}2} + 0\cdot\frac{2\cdot n_a + 17{,}2}{17{,}2} + 0{,}025\cdot\frac{n_a}{17{,}2} + 0{,}025\cdot\frac{n_a+17{,}2}{17{,}2} + 0{,}011 - 0{,}03\right)\text{m}^2$$

$$0 = \left(n_a^2 + 16{,}3265 \cdot n_a - 13{,}6375\right)\text{m}^2$$

$$n_{a,1/2} = \left(-8{,}16325 \pm \sqrt{66{,}63865 + 13{,}6375}\right)\text{m} = \left(-8{,}16325 \pm 8{,}959\right)\text{m}$$

$$n_a = \underline{\underline{0{,}7964\,\text{m}}}$$

$$n_i = 2\,\text{m} - n_a = \left(2 - 0{,}7964\right)\text{m} = \underline{\underline{1{,}2036\,\text{m}}}$$

2.2.5 Ermittlung der zulässigen Breite des Zugführerabteils

2.2.5.1 Einschränkungswert aus innerer Einschränkung (n_i = 1,2036 m)

$$E_i = \frac{a \cdot n_i - n_i^2 + \frac{p^2}{4}}{500} + q + w + z - 0{,}015$$

$$= \left(\frac{17{,}2 \cdot 1{,}2036 - 1{,}2036^2 + \frac{2{,}5^2}{4}}{500} + 0 + 0{,}025 + 0{,}011 - 0{,}015\right)\text{m}$$

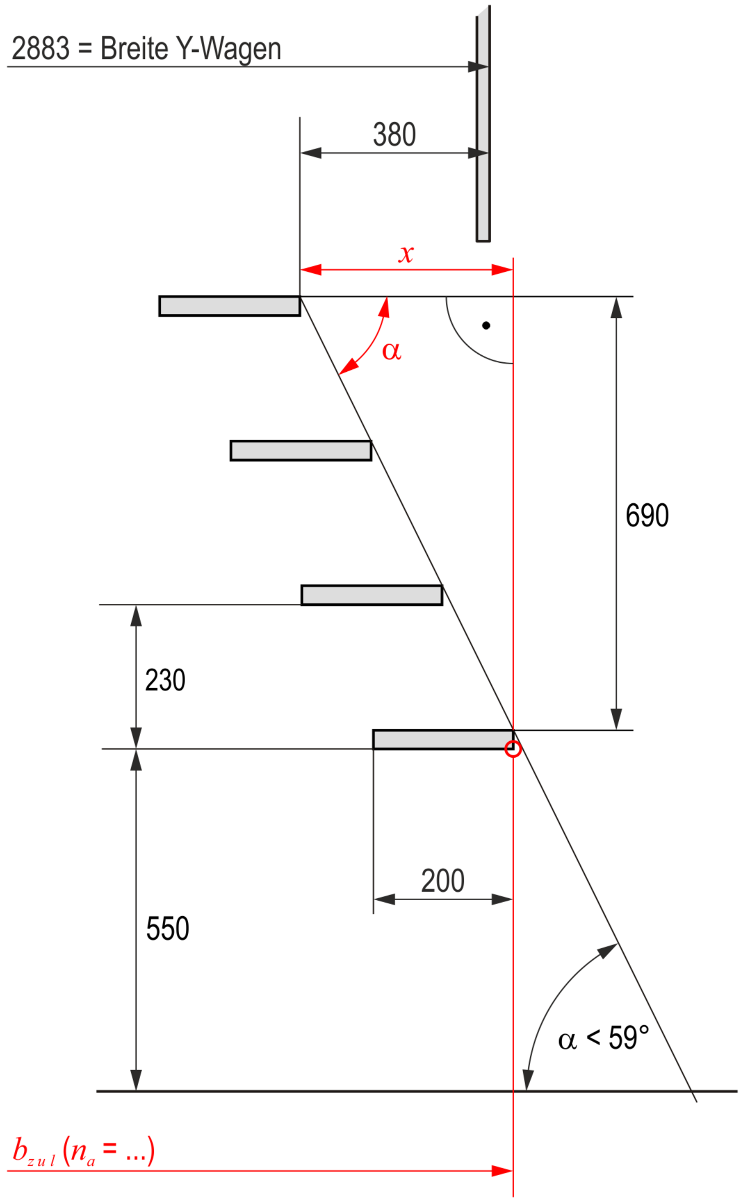
$$E_i = \underline{0{,}06263\,\text{m}}$$

2.2.5.2 Ermittlung zulässige Breite

$$\underline{\underline{B_{zul}}} = 2 \cdot \left(b_R - E_a\right) = 2 \cdot \left(1{,}645 - 0{,}06263\right)\text{m} = 3{,}1647\,\text{m} = \underline{\underline{3{,}165\,\text{m}}}$$

3 Trittstufenwinkel α

3.1 Geometrische Verhältnisse



3.2 Berechnung des möglichen Winkels der Trittstufe mit kinematischer Einschränkungsberechnung

3.2.1 Lage des zu berechnenden Fahrzeugpunktes (Trittstufenecke)

siehe Skizze Aufgabenstellung:

- $n_a = \left(1675 + \frac{650}{2}\right)\text{mm} = 2{,}0\,\text{m}$

- h = 0,55 m

3.2.2 Berechnung quasistatische Verschiebung

Kein Sonderfall möglich ↘ Standardformel

$$z = \left[\frac{s}{30} + \tan(\eta_0 - 1°)_{>0}\right]\left|h - h_c\right| + \left[\frac{s}{10}\left|h - h_c\right| - 0{,}04(h - 0{,}5)_{>0}\right]_{>0}$$

$$= \left(\left[\frac{0{,}125}{30}\right]\cdot 0{,}069 + \left[\frac{0{,}125}{10}\left|0{,}069\right| - 0{,}04\cdot 0{,}05\right]_{>0}\right)\text{m}$$

$$z = \underline{2{,}875\cdot 10^{-4}\ \text{m}}$$

3.2.3 Berechnung Einschränkungswert

$$E_a = \frac{a\cdot n_a + n_a^2 - \frac{p^2}{4}}{500} + \frac{1{,}465 - d}{2}\cdot\frac{n_a + a}{a} + q\cdot\frac{2\cdot n_a + a}{a} + w_{i(250)}\cdot\frac{n_a}{a} + w_{a(250)}\cdot\frac{n_a + a}{a} + z - 0{,}03$$

$$= \left(\begin{array}{l} \dfrac{17{,}2\cdot 2 + 2^2 - \frac{2{,}5^2}{4}}{500} + \dfrac{1{,}465 - 1{,}41}{2}\cdot\dfrac{2 + 17{,}2}{17{,}2} + 0\cdot\dfrac{2\cdot 2 + 17{,}2}{17{,}2} \\ + 0{,}025\cdot\dfrac{2}{17{,}2} + 0{,}025\cdot\dfrac{2 + 17{,}2}{17{,}2} + 2{,}875\cdot 10^{-4} - 0{,}03 \end{array}\right)\text{m}$$

$$= \left(0{,}073675 + 0{,}0307 + 0{,}0029 + 0{,}0279 + 2{,}875\cdot 10^{-4} - 0{,}03\right)\text{m}$$

$$E_a = \underline{\underline{0{,}1055\,\text{m}}}$$

3.2.4 Ermittlung zulässige (halbe) Breite an Trittstufenecke

$$\underline{\underline{b_{zul}}} = b_R - E_a = \left(1{,}620 - 0{,}1055\right)\text{m} = \underline{\underline{1{,}5145\,\text{m}}}$$

3.2.5 Berechnung des Steigungswinkels bei voller Ausnutzung des Konstruktionsraumes

$$x = \left[1{,}5145 - \left(\frac{2{,}883}{2} - 0{,}380\right)\right]\mathrm{m} = \underline{0{,}453\,\mathrm{m}}$$

$$\tan\alpha = \frac{0{,}690}{0{,}453} = 1{,}523 \rightarrow \underline{\underline{\alpha = 56{,}71^\circ}} < 59^\circ$$