

Anhang zu:

**Erarbeitung eines
vereinfachten
Nachweisformats für
die Erdbebenbemessung
von Brückenbauwerken
in Deutschland**

von

Anna Bauer
Max Gündel
Marcus Ries

Wölfel Engineering
Höchberg

Kilian Karius
Dominik Honerboom
Holger Haug

Leonhardt, Andrä und Partner VBI AG Stuttgart

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 179

bast

Anhang A: Einteilungsmatrix

Brückentyp 1.1: Einfeldträger, Plattenbalken, Stahlbeton (Anhang C)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
25	0,5	1,0
20	0,5	2,0
15	0,5	3,0
10	0,5	4,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/15$

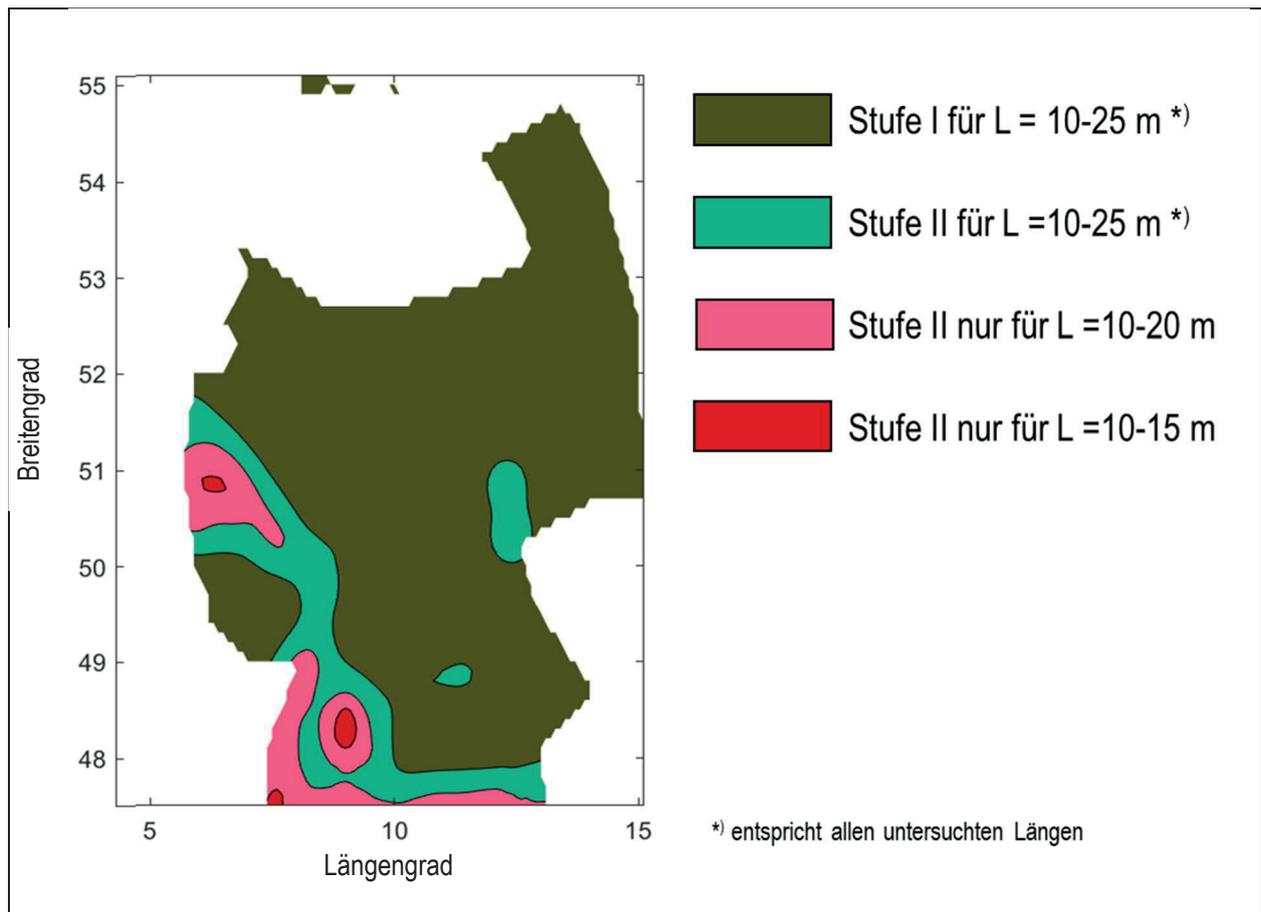


Bild A1: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Brückentyp 1.2: Einfeldträger, Plattenbalken, Spannbeton (Anhang D)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
40	0,5	4,0
35	0,5	4,0
30	0,5	4,0
25	0,5	4,0
20	0,5	4,0
15	0,5	4,0
10	0,5	4,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/20$

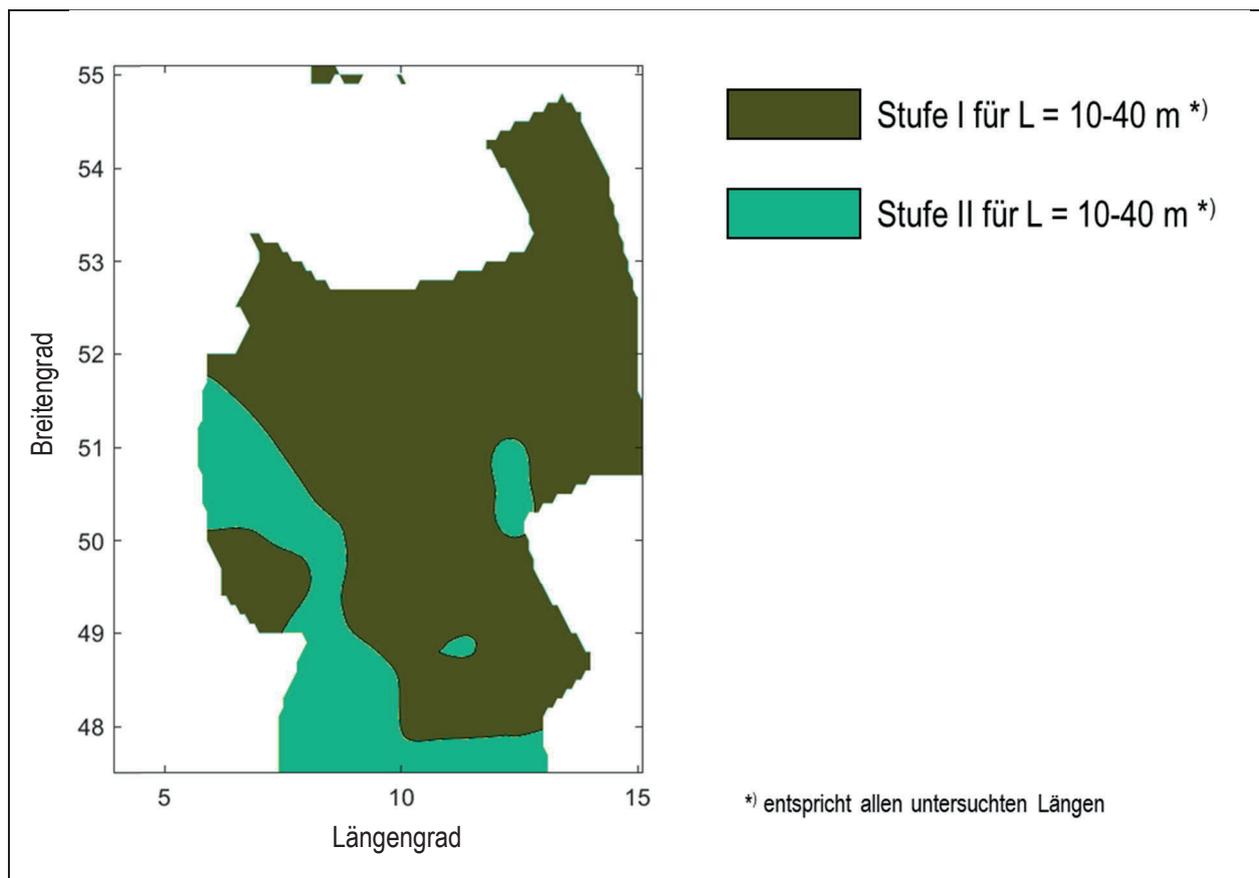


Bild A2: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus $l/20$)

Brückentyp 1.3: Einfeldträger, Plattenbalken, Verbund (Anhang E)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50	0,5	0,5
45	0,5	0,5
40	0,5	0,5
35	0,5	0,5
30	0,5	0,5
25	0,5	1,0
20	0,5	1,0
15	0,5	1,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/30$

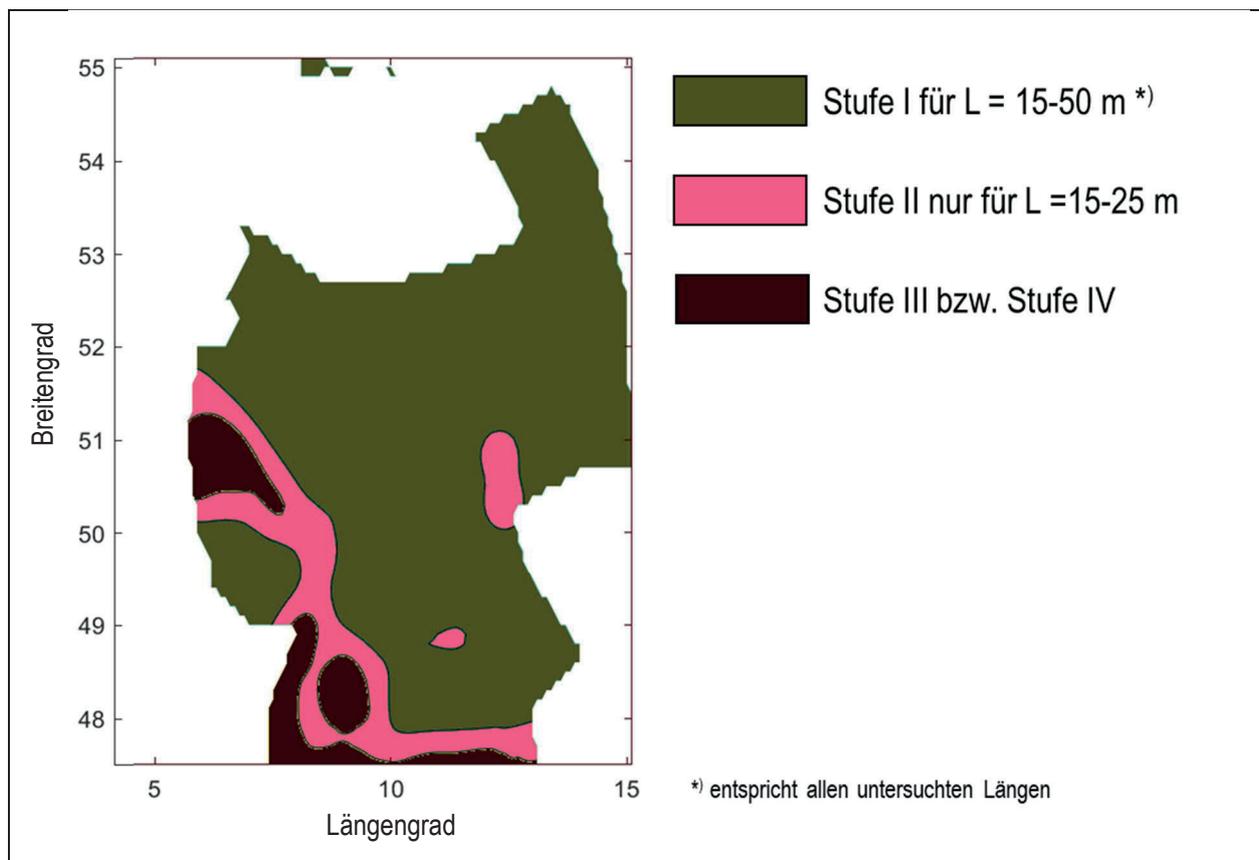


Bild A3: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Brückentyp 2.1: Durchlaufträger, Plattenbalken, Stahlbeton (Anhang F)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50	0,5	0,5
40	0,5	0,5
30	0,5	1,0
20	0,5	1,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/15$

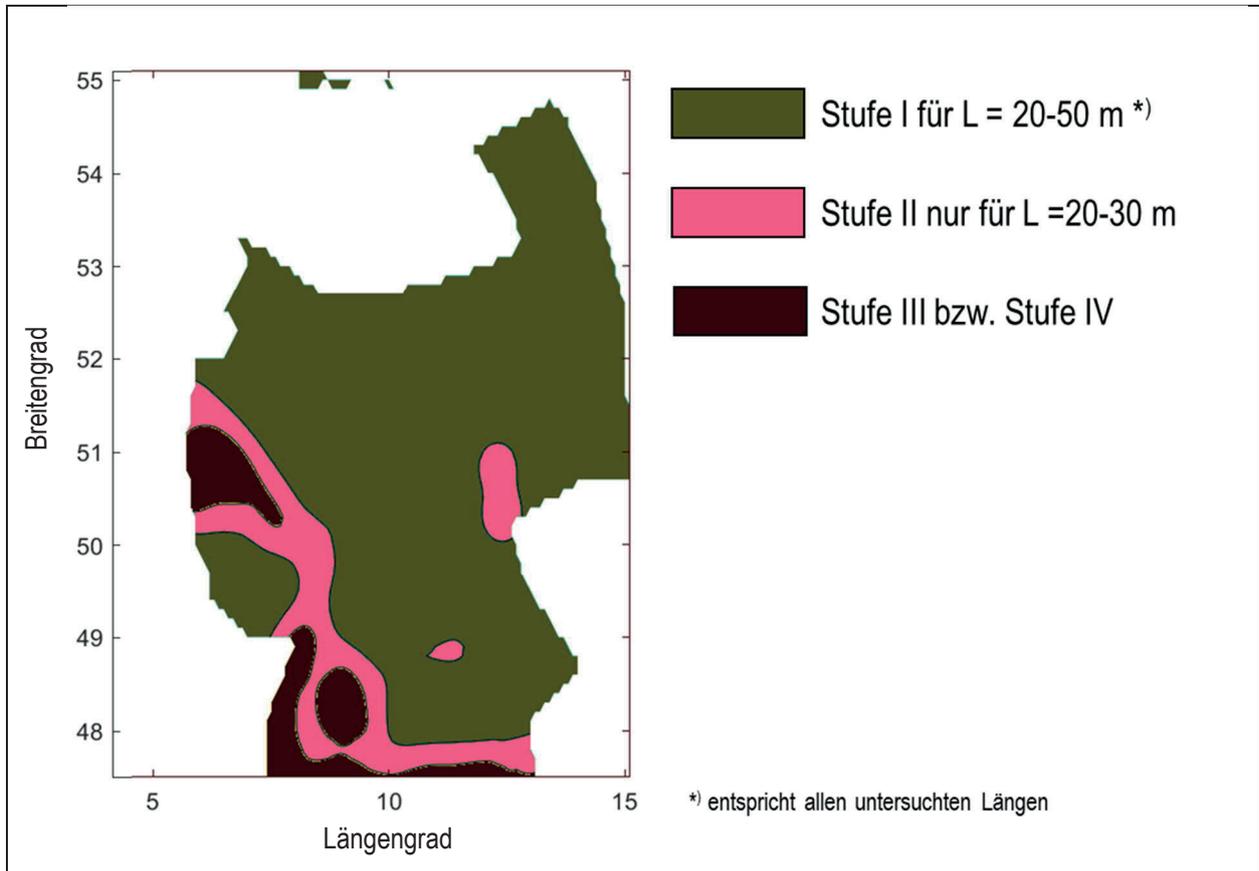


Bild A4: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus $l/20$)

Brückentyp 2.2: Durchlaufträger, Plattenbalken, Spannbeton (Anhang G)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
80	0,5	2,0
70	0,5	2,0
60	0,5	2,0
50	0,5	3,0
40	0,5	4,0
30	0,5	4,0
20	0,5	4,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/20$

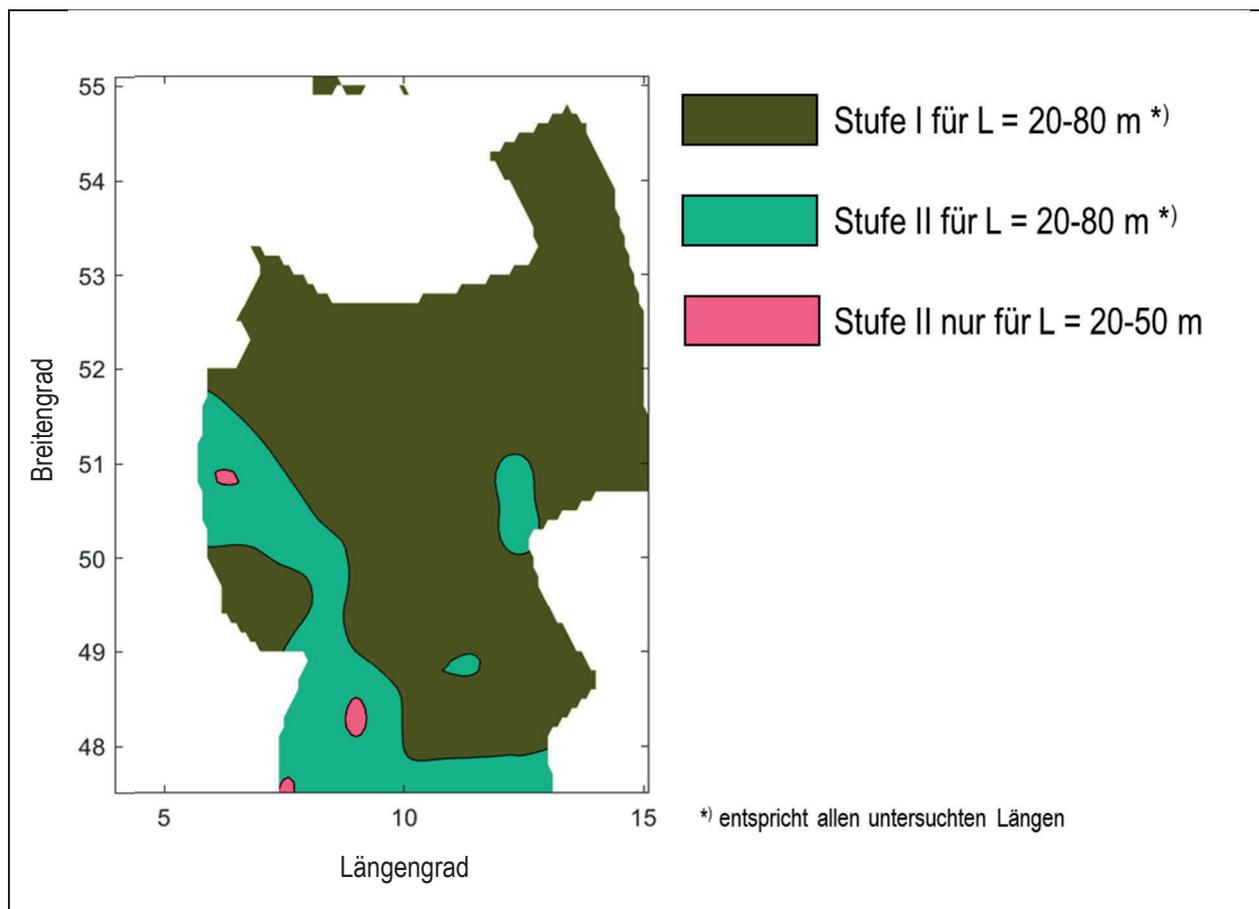


Bild A5: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus $l/20$)

Brückentyp 2.3: Durchlaufträger, Plattenbalken, Verbund (Anhang H)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
100	0,5	0,5
90	0,5	0,5
80	0,5	0,5
70	0,5	0,5
60	0,5	0,5
50	0,5	0,5
40	0,5	0,5
30	0,5	0,5

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/15$

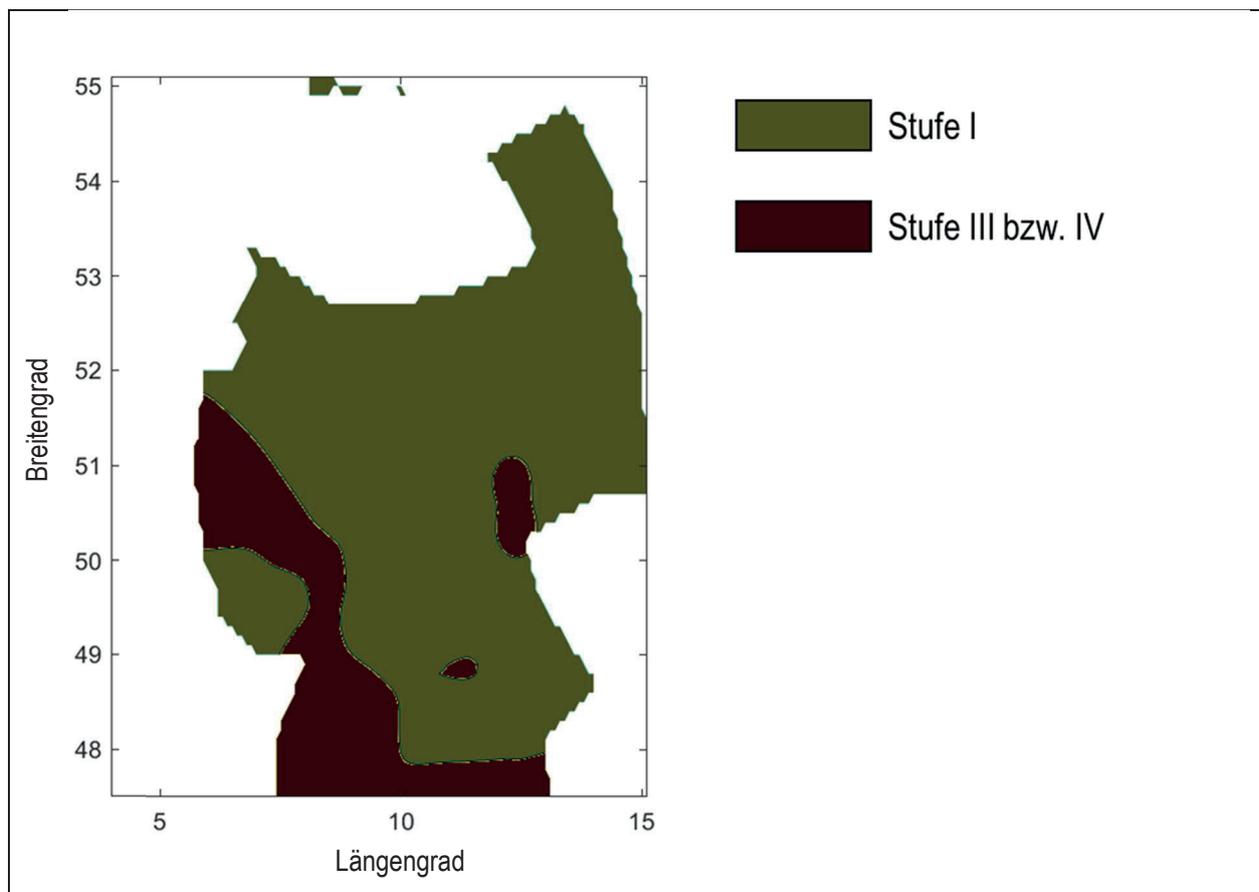


Bild A6: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Brückentyp 3.1: Einfeldträger, Platte, Stahlbeton (Anhang I)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
10,00	0,5	4,0
7,50	0,5	4,0
5,00	0,5	4,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$ und Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/22$

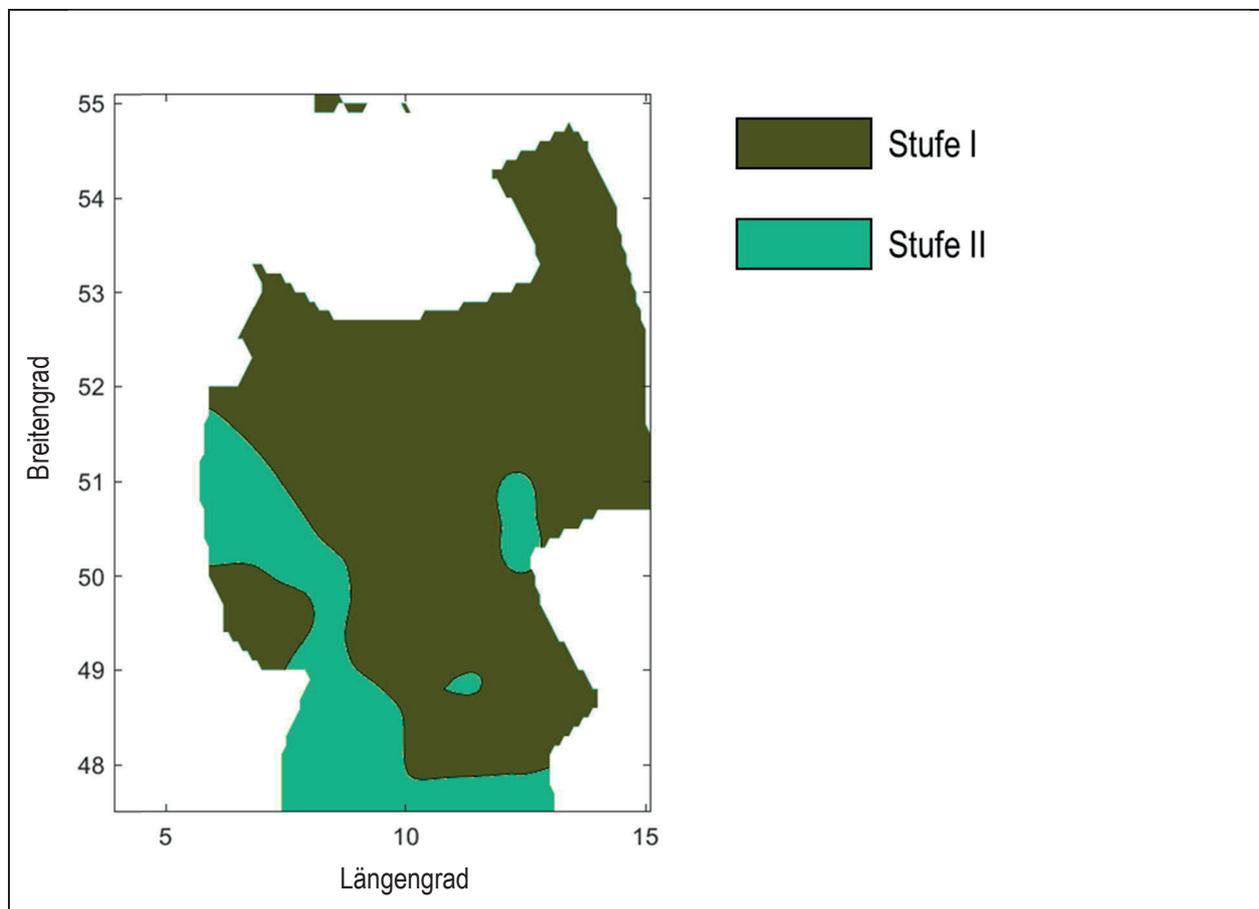


Bild A7: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Brückentyp 3.2: Durchlaufträger, Platte, Stahlbeton (Anhang J)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
10,00	0,5	4,0
7,50	0,5	4,0
5,00	0,5	4,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$ und Schlankheitsverhältnis $l/22$

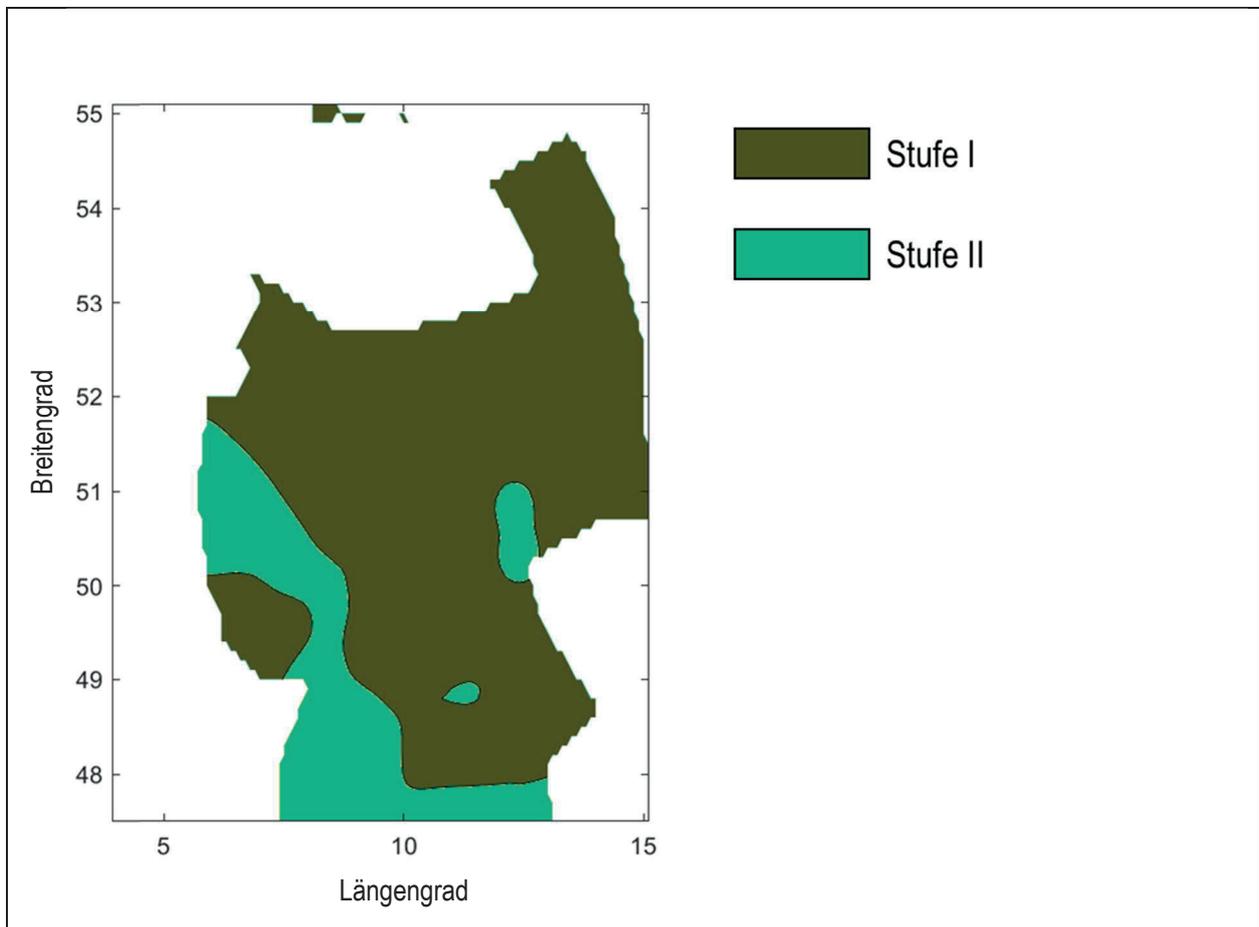


Bild A8: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Brückentyp 4.1: Rahmen, Platte, Stahlbeton (Anhang K)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
15,00	0,5	4,0
10,00	0,5	4,0
5,00	0,5	4,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$, Schlankheitsverhältnis $l/15$, Dicke der Flügelwände $h = 75$ cm und Dicke der Widerlangerwand $d = 100$ cm

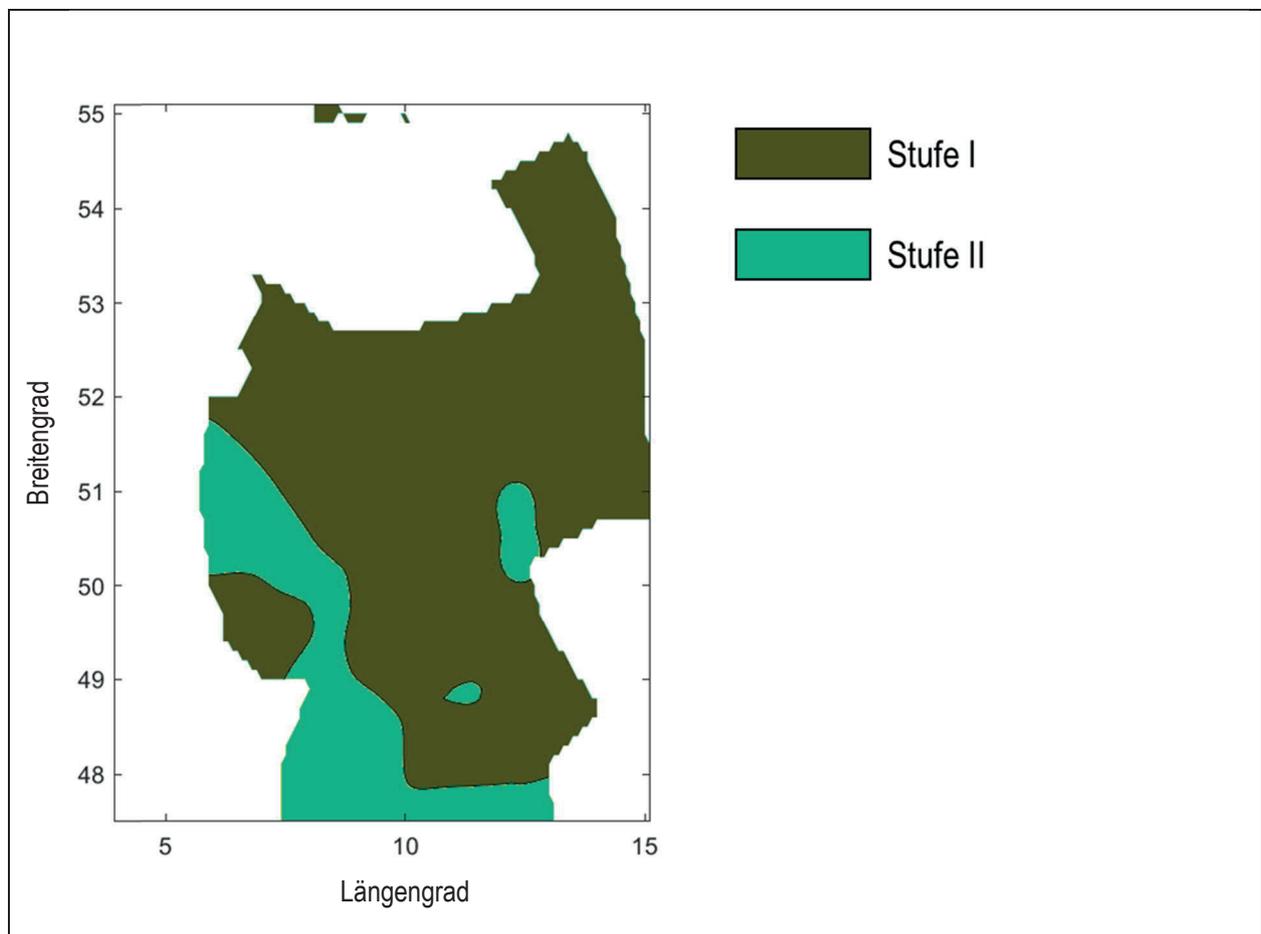


Bild A9: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Brückentyp 4.2: Rahmen, Platte, Spannbeton (Anhang L)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
15,00	0,5	3,5
10,00	0,5	3,0

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$ und Bodenparameter $S = 1,5$, Schlankheitsverhältnis $l/15$, Dicke der Flügelwände $h = 75$ cm und Dicke der Widerlangerwand $d = 100$ cm

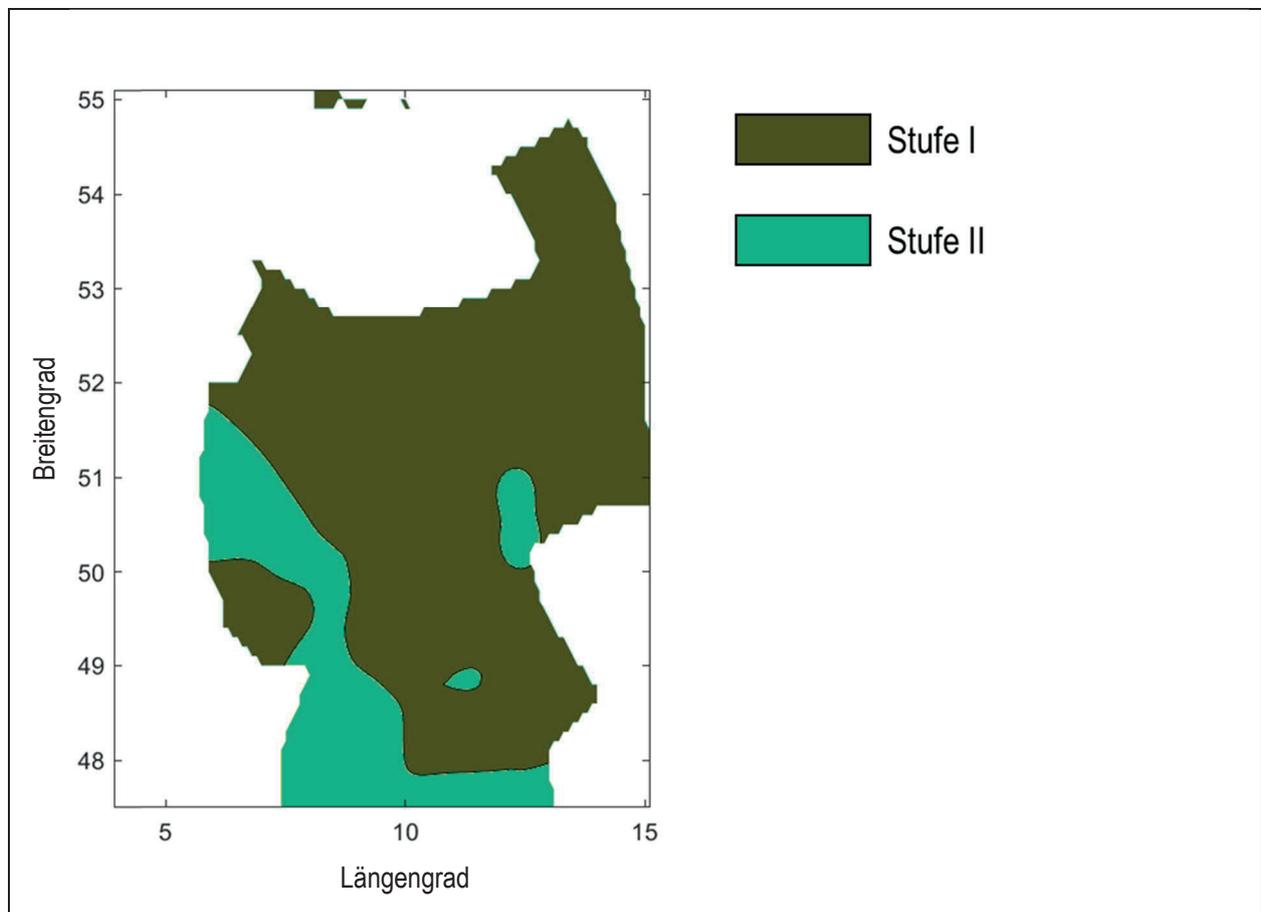


Bild A10: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Der maximale $S_{ap,R}$ Wert in Deutschland beträgt nach DIN EN 1998-1 $S_{ap,R} = 4$ m/s². Mit den angesetzten Randbedingungen ergibt sich ein maximales $a_g \cdot S = 4,0 / 2,5 \times 1,3 \times 1,5 = 3,1$ m/s². Daher kann für den Brückentyp 4.2 die Bemessung für ganz Deutschland über die Stufe II erfolgen.

Brückentyp 4.3: Rahmen, Verbundquerschnitt (Anhang M)

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50,00	0,5	4,0
40,00	0,5	4,0
30,00	0,5	3,5
20,00	0,5	2,5

Ausgewertet für eine Brücke mit Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,3$, Bodenparameter $S = 1,5$, Schlankheitsverhältnis $l/30$, Dicke der Flügelwände $h = 75$ cm und Dicke der Widerlangerwand $d = 100$ cm

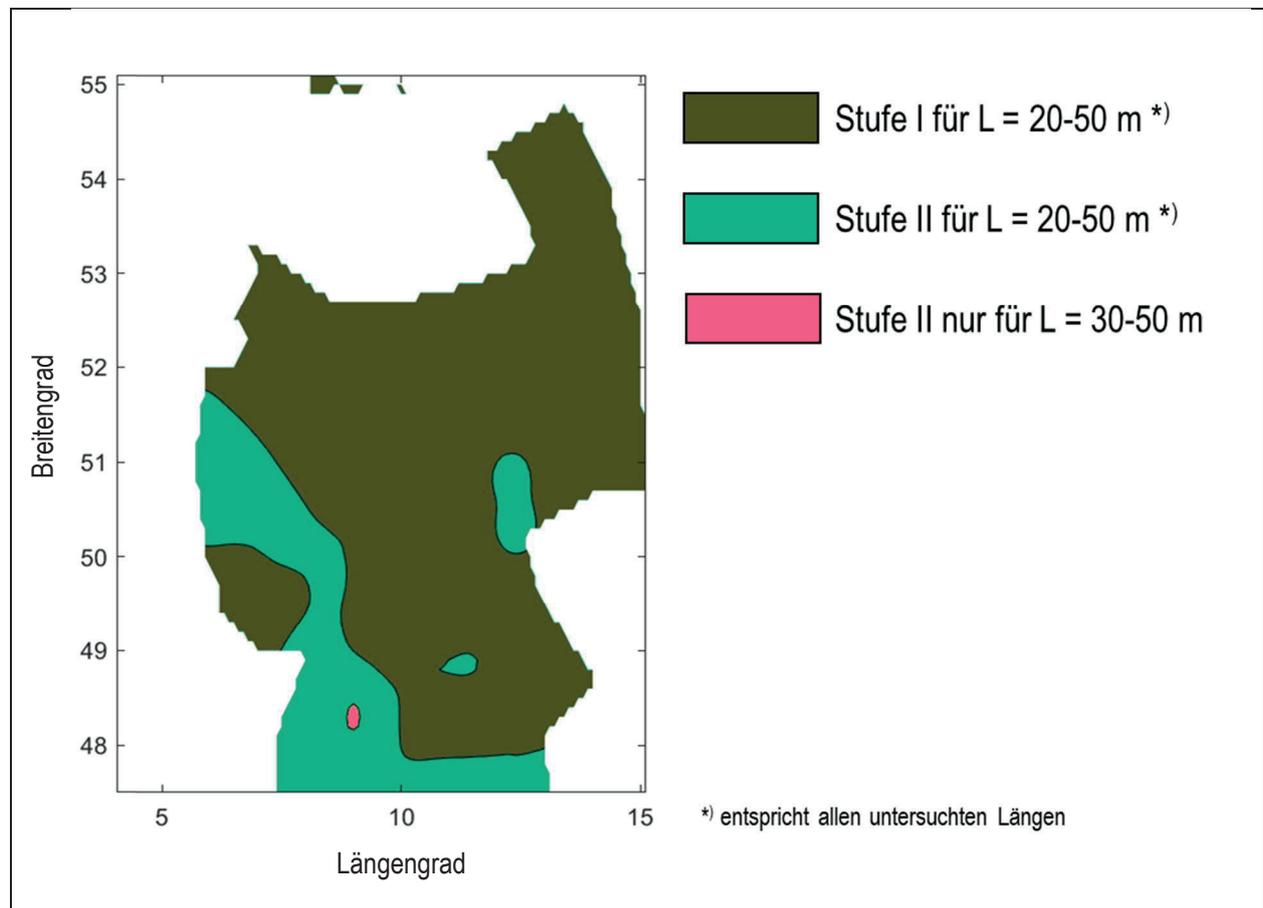
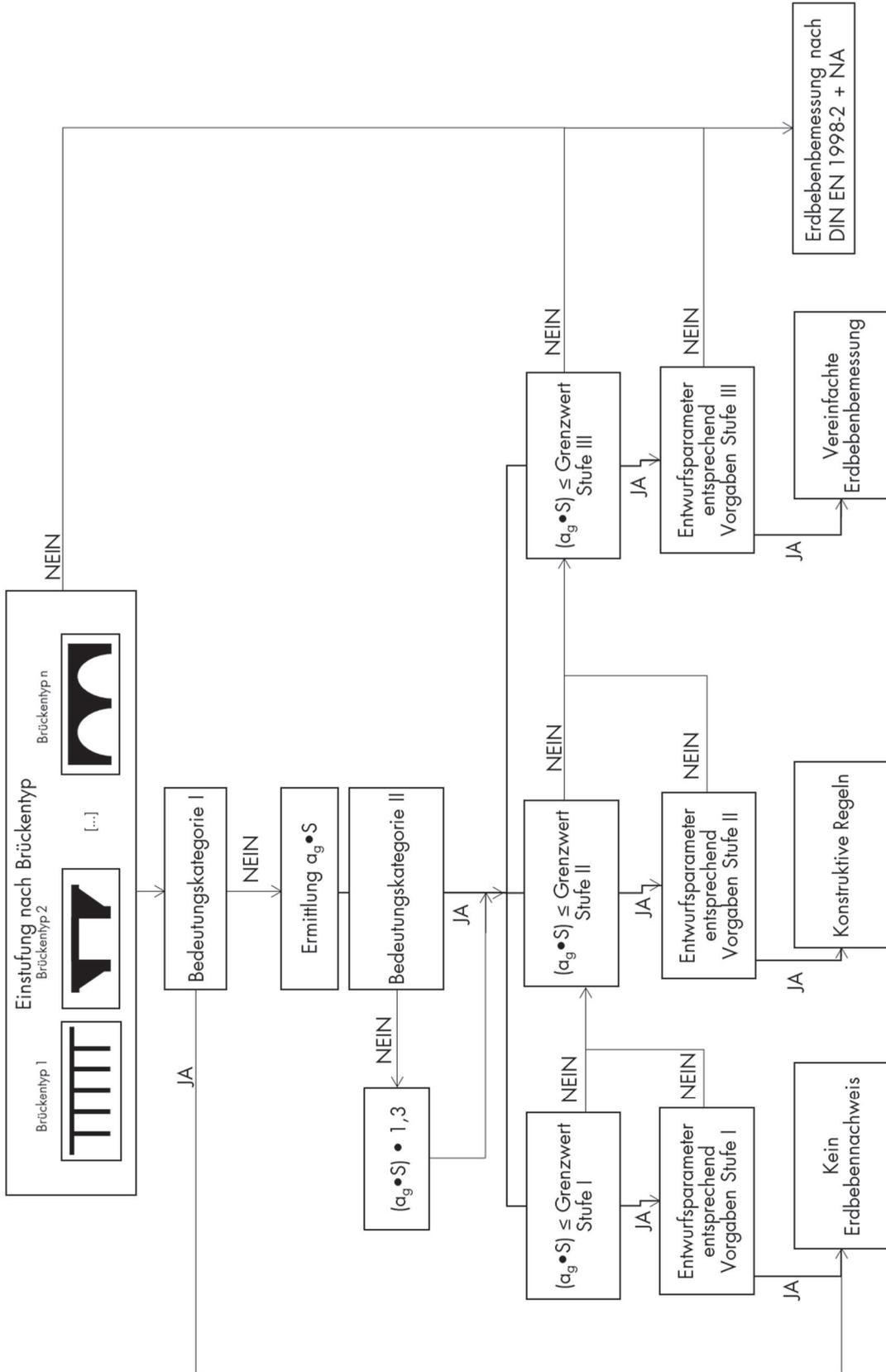


Bild A11: Stufeneinteilung (Spektralwert $S_{ap,R}$ aus /20/)

Anhang B: Flussdiagramm zur Anwendung des Bemessungskonzepts



Anhang C: Brückentyp 1.1

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbalken (s. Bild C1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldrig freiaufliegend (s. Bild C2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Stahlbeton</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild C1</i>
Anzahl der Stege	<i>2</i>
Bauwerkslänge	<i>$\leq 25 \text{ m}$</i>
Konstruktionshöhe	<i>$> l/15$</i> <i>$< l/10$</i>
Schiefwinkligkeit	<i>$\leq 20^\circ$</i>
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ durchgehend vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i>

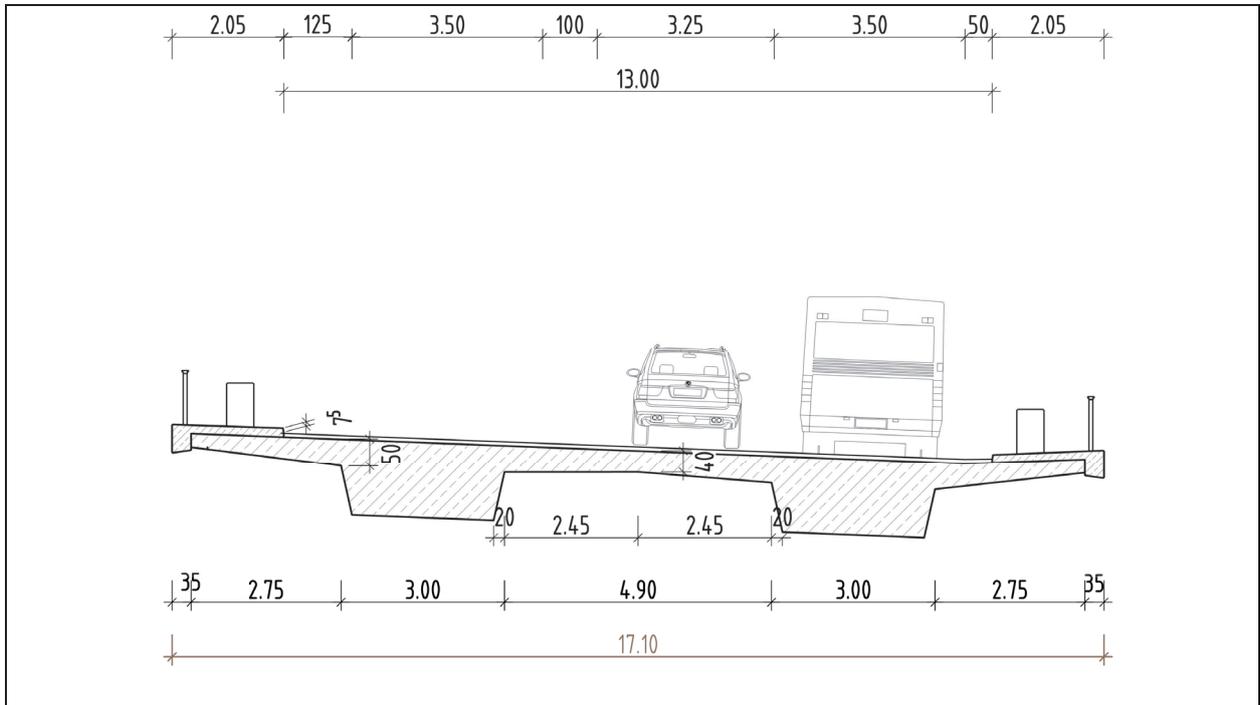


Bild C1: Querschnittswerte /30/

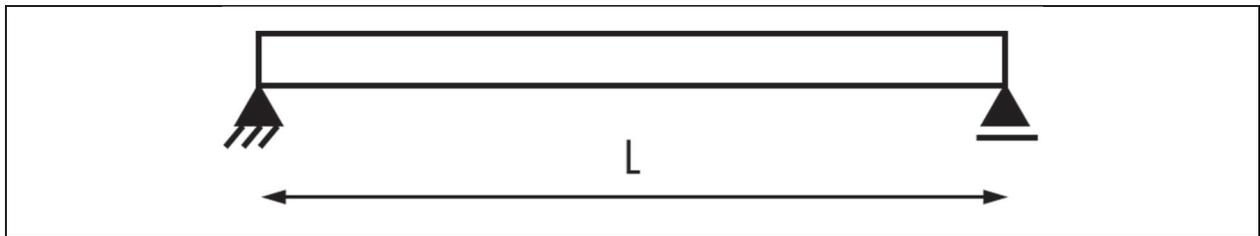


Bild C2: Statisches System

Modellierung

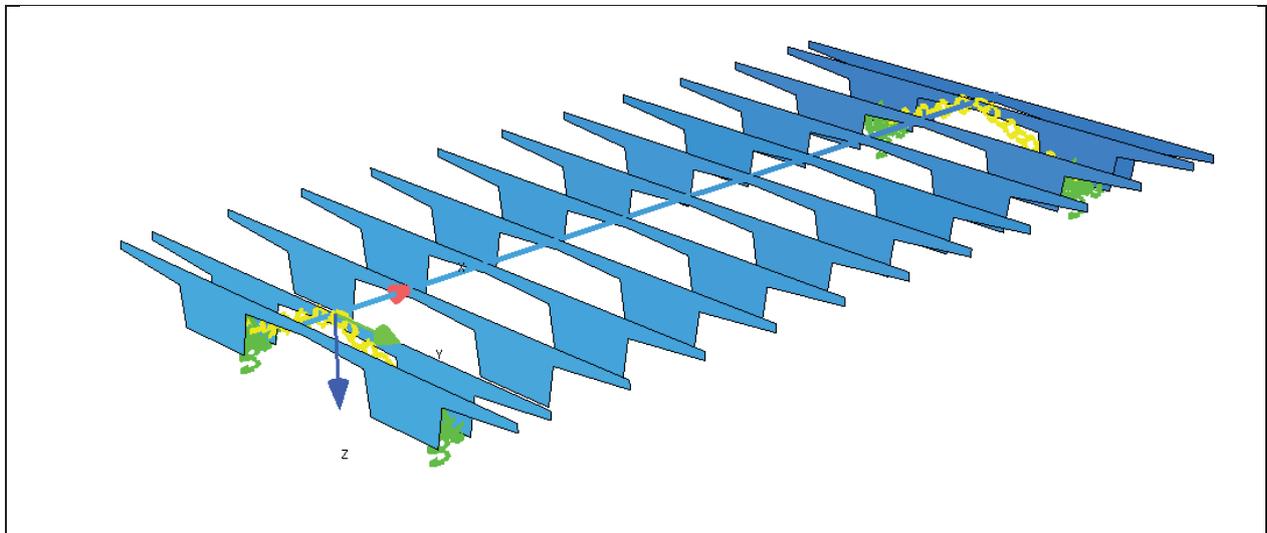


Bild C3: Modell

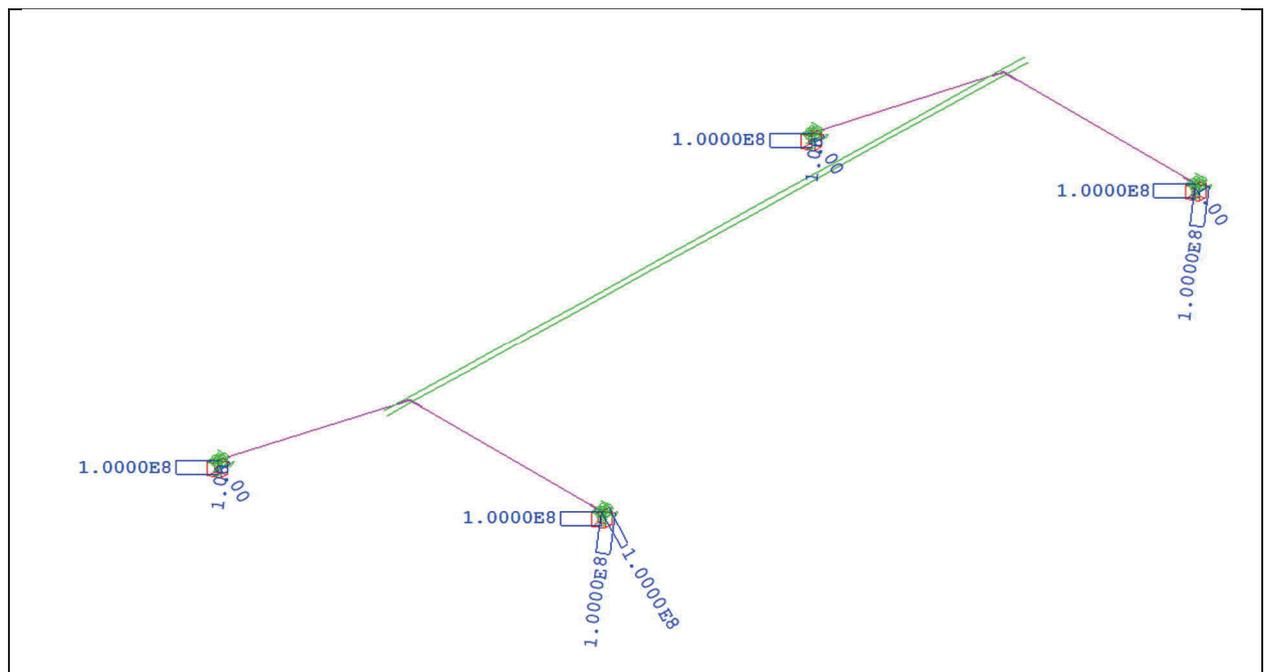


Bild C4: Lagerungsbedingungen, Federkonstante [kN/m³]

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht des Längsträgers oder der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität als Linienlast in der Stabachse angeordnet. Bei der Ermittlung der Eigenformen werden entsprechende Rotationsmassen manuell hinzugefügt.

Querträger:

Das noch nicht berücksichtigte Eigengewicht der Querträger beim Plattenbalkenquerschnitt wird bei den Ausbaulasten als Punktlast mitberücksichtigt. Die Breite der Querträger wird mit 2 m angenommen. Damit ergibt sich ein Zusatzgewicht zwischen den Stegen in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe von

$$\text{ca. } 25 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * (h_k - 0,45 \text{ m}) * 2 \text{ m} = 250 \text{ kN/m} * (h_k - 0,45 \text{ m}).$$

Der Überstand von 1 m an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Fahrbahnbelag:

$$g_{k,\text{Belag}} = 2,5 * 13 \text{ m} = 32,5 \text{ kN/m}$$

Kappe:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 23,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,2} = 32,5 \text{ kN/m} + 23,0 \text{ kN/m} = 55,5 \text{ kN/m}$$

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Die Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 * 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 * 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

$$\text{Grundlast: } 1,20 * 2,5 \text{ kN/m}^2 * 16,6 \text{ m} = 49,8 \text{ kN/m} \quad (e_y = 0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Hauptspur: } (1,33 * 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) * 3,0 \text{ m} = 27,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 5,0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Nebenspur: } (2,40 * 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) * 3,0 \text{ m} = 9,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 2,0 \text{ m})$$

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

$$\text{HS: } 4 * 150 \text{ kN} \quad (e_y = 6,0 \text{ m}; e_z = 4,0 \text{ m})$$

$$\text{NS1: } 4 * 100 \text{ kN} \quad (e_y = 3,0 \text{ m}; e_z = 1,0 \text{ m})$$

$$\text{NS2: } 4 * 50 \text{ kN} \quad (e_y = 0,0 \text{ m}; e_z = -2,0 \text{ m})$$

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist.

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6 \times L_{\text{ges}} < 900$ kN und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

TemperaturKonstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Betonkonstruktion (Typ 3) (EC 1-5, 6.1.3)

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Ed,max}} = 37 \text{ °C} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{\text{N,con}} = -10 - 16 = -26 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{\text{N,exp}} = 39 - 10 = 29 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Betonkonstruktion –Träger/Platte (EC 1-5, 6.1.4)

$$T_{\text{M,heat}} = 15 * 0,82 = 12,3 \text{ K} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 0,82$; 80 mm Belagsdicke)

$$T_{\text{M,cool}} = 8 * 1,00 = 8,0 \text{ K} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$; 80 mm Belagsdicke)

WindWind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$$wk = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (hk + 0,18 \text{ m}) \quad ez = (hk + 0,18 \text{ m}) / 2 - 0,18 \text{ m}$$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ -h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow \text{vereinfachend } w = 0,60 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$$wk = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (hk + 2,08 \text{ m}) \quad ez = (hk + 2,08 \text{ m}) / 2 - 2,08 \text{ m}$$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild C5: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitt 7.5

Mindestbewehrung

Flächige Mindestbewehrung

Es kann davon ausgegangen werden, dass oben und unten je Ø12 /15 eingelegt sind. Daraus ergibt sich folgende absolute Bewehrung:

Oben: $A_{s,min,o} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 16,2 = 122,1 \text{ cm}^2$

Unten: $A_{s,min,u} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 2,4 \times 2 = 36,2 \text{ cm}^2$

Ergebnisse

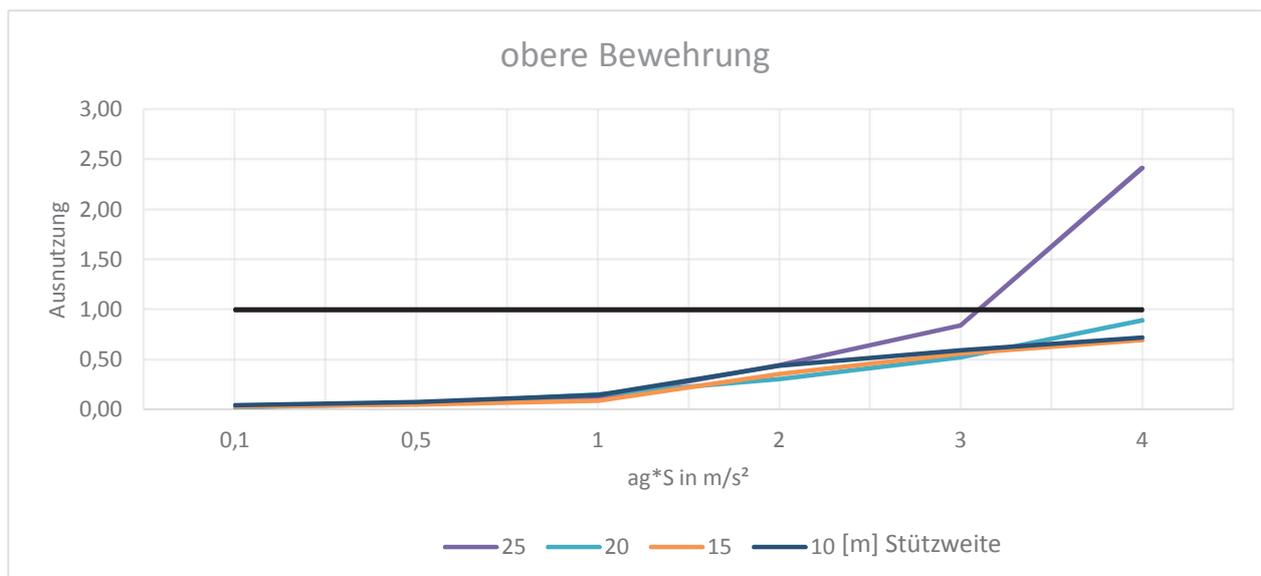
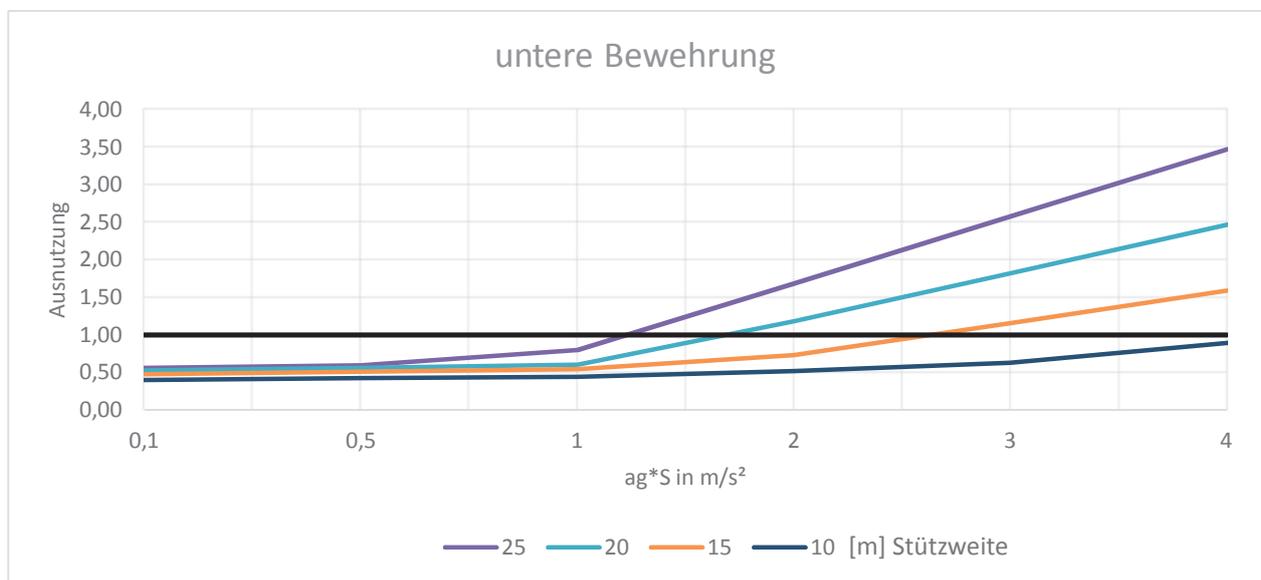
Es werden folgenden Parameter ausgewertet:

- Längsbewehrung unten (Rang 1)
- Längsbewehrung oben (Rang 2)
- Auflagerfederkräfte
- Verschiebungen am Längsaufleger

Längsbewehrung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$

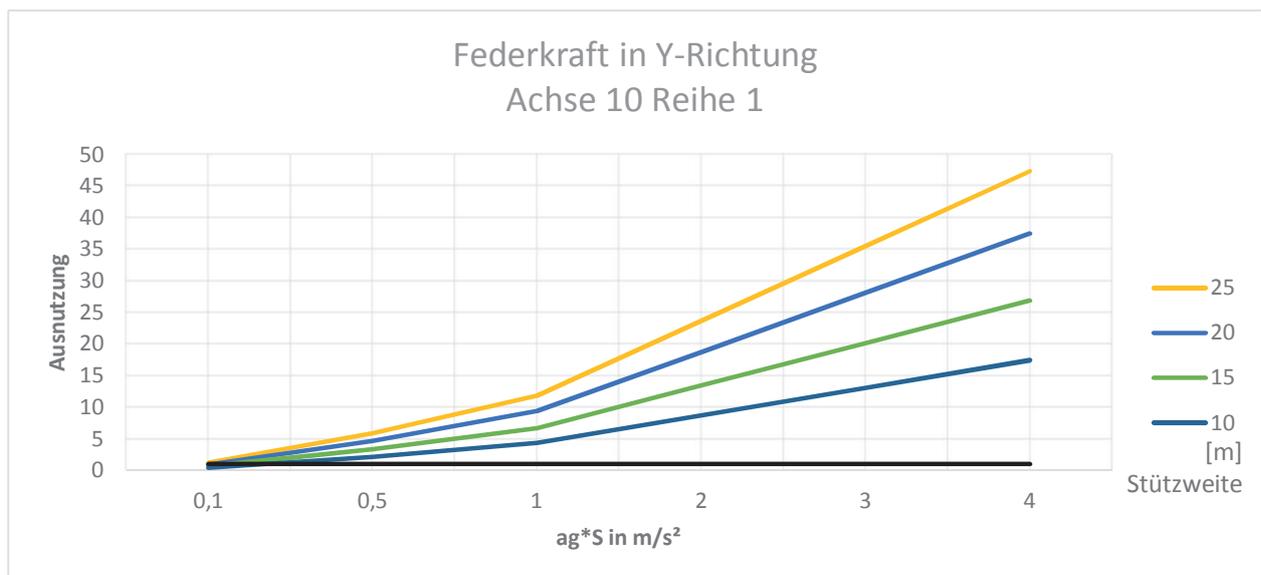
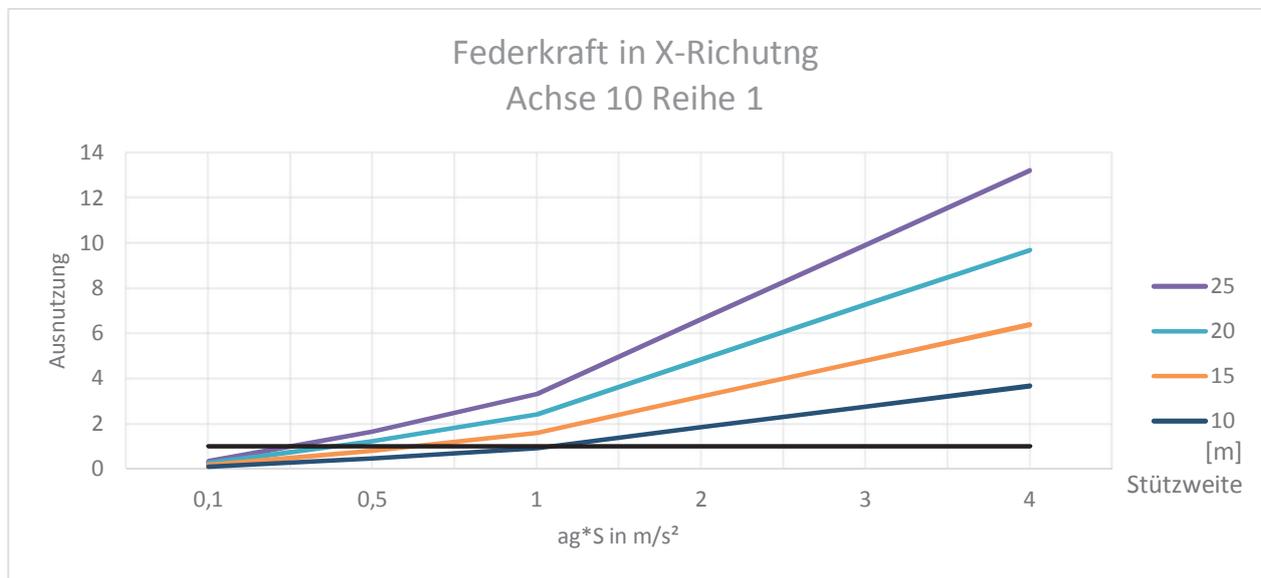


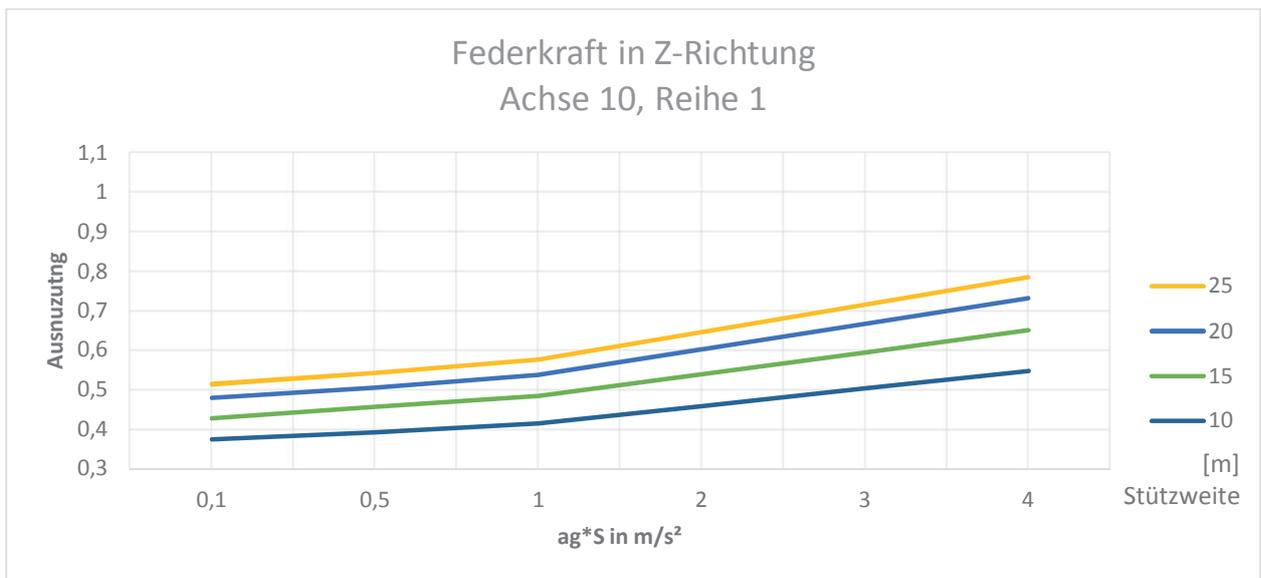
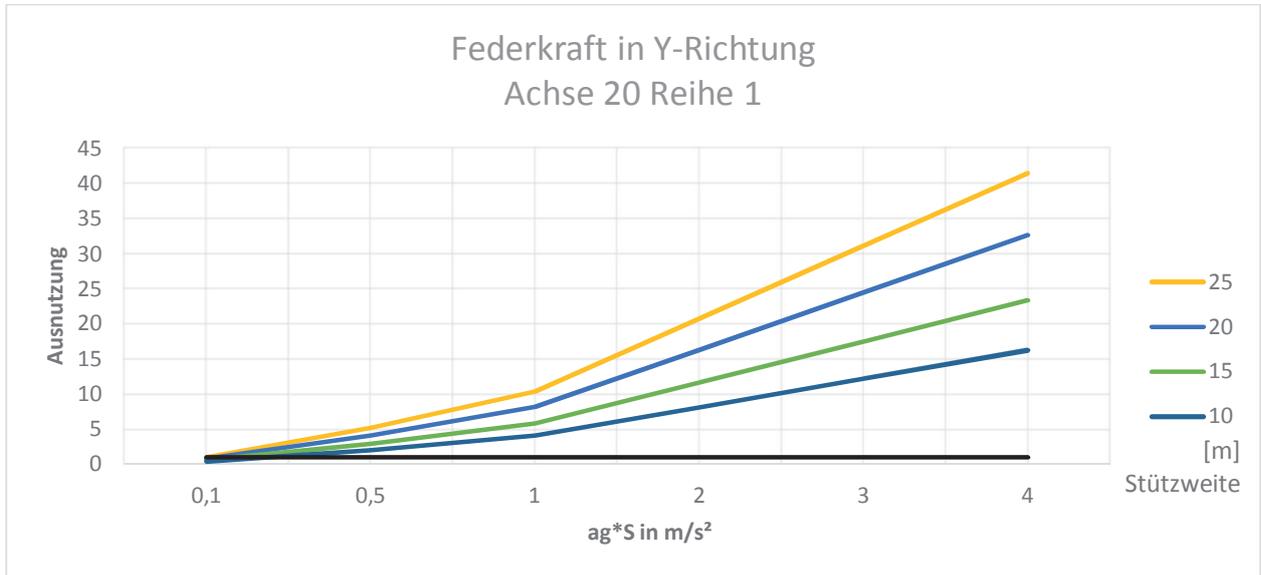
Auflagerfederkräfte

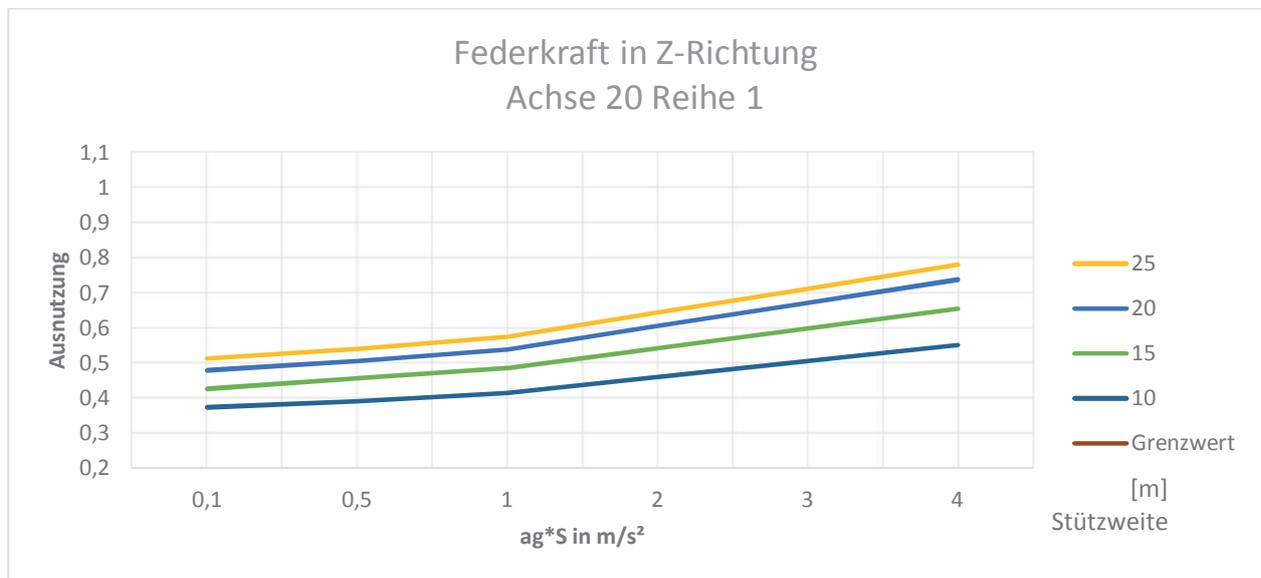
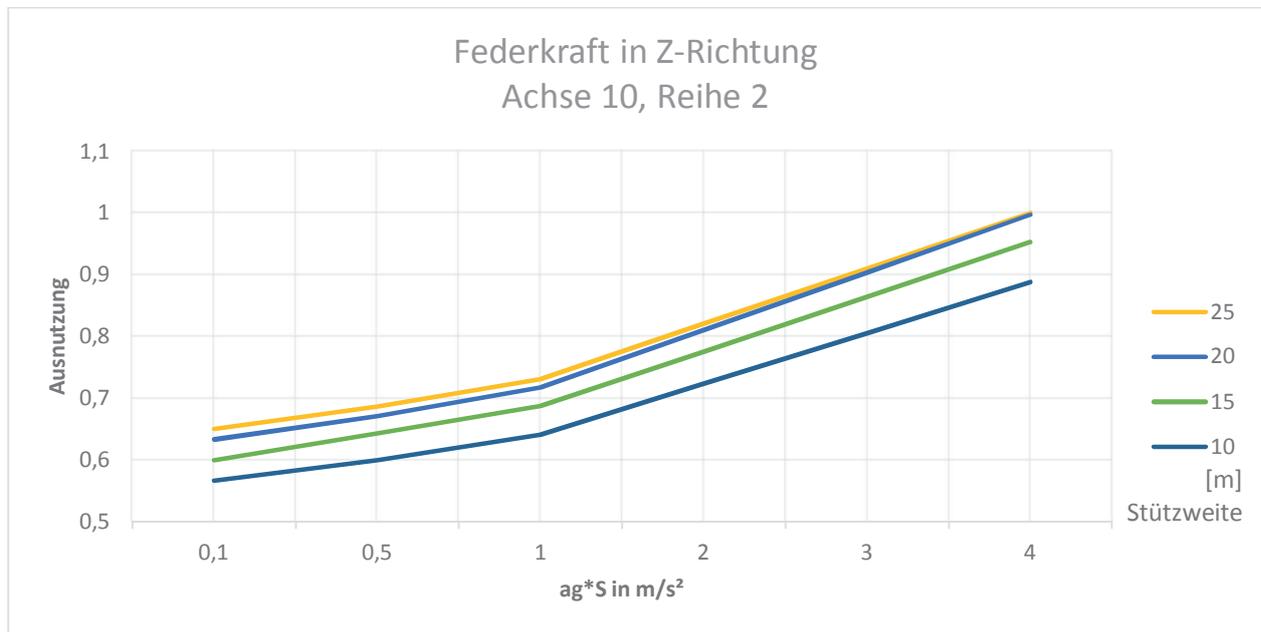
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

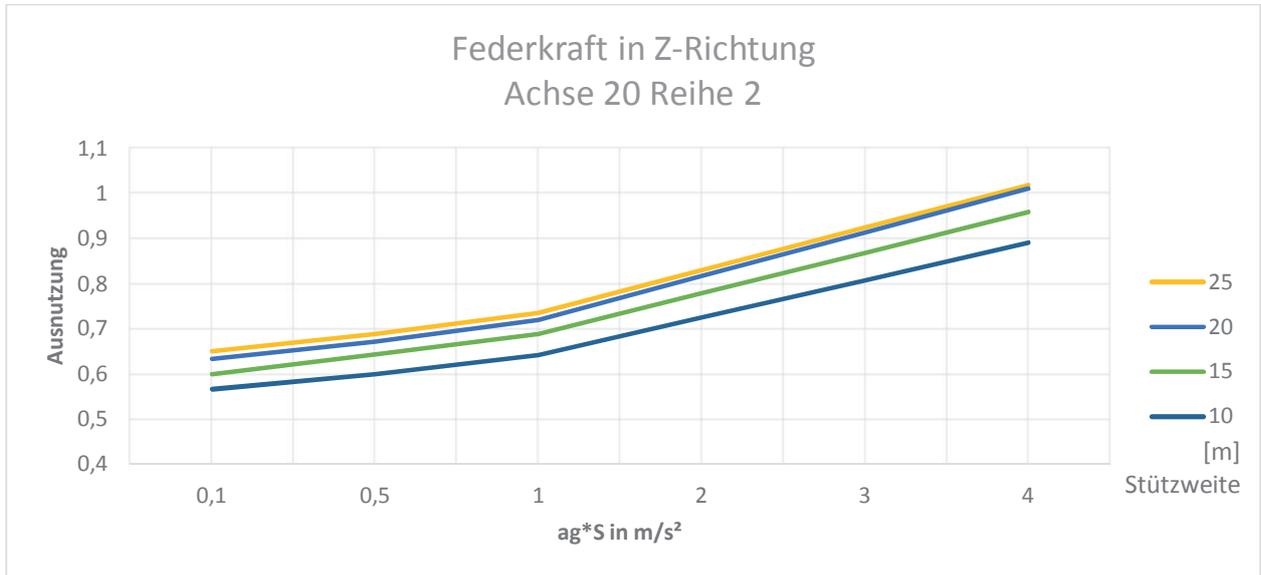
$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

Mit $i = X; Y; Z$

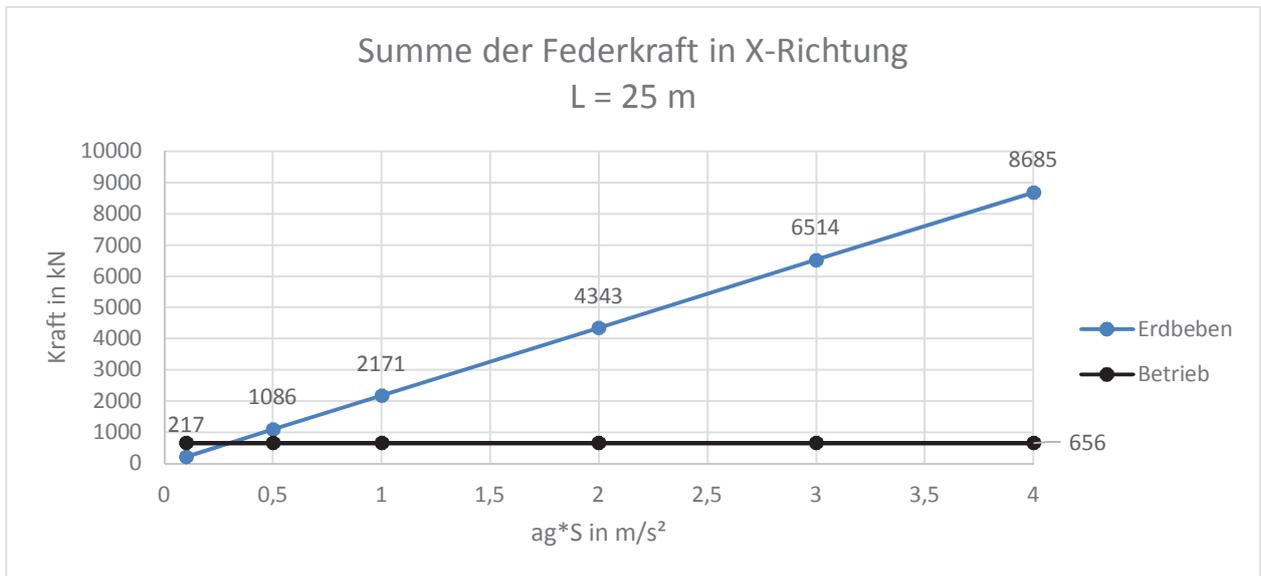


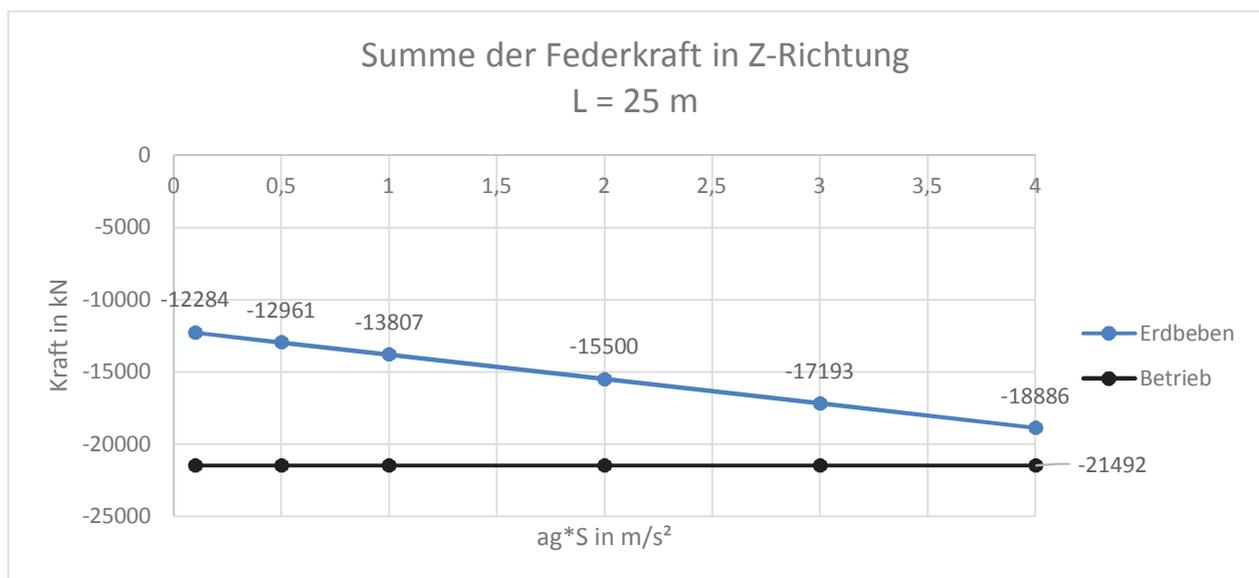
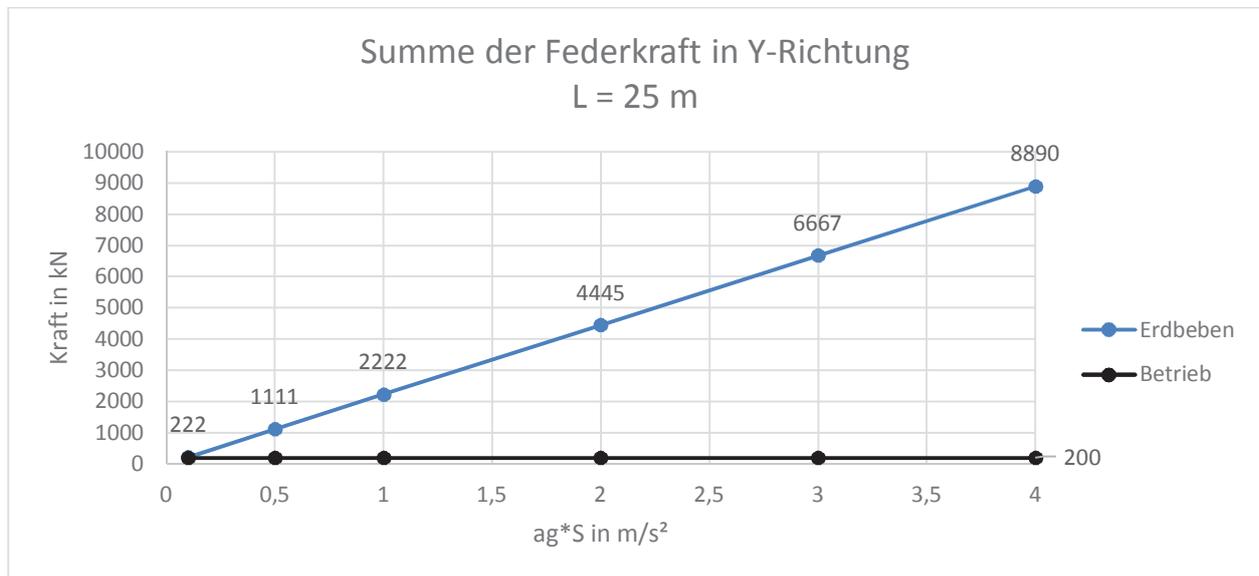






Exemplarisch werden in den nachfolgenden Diagrammen die Zahlenwerte der Federkraft für das Modell mit einer Stützweite von L = 25 m angegeben.

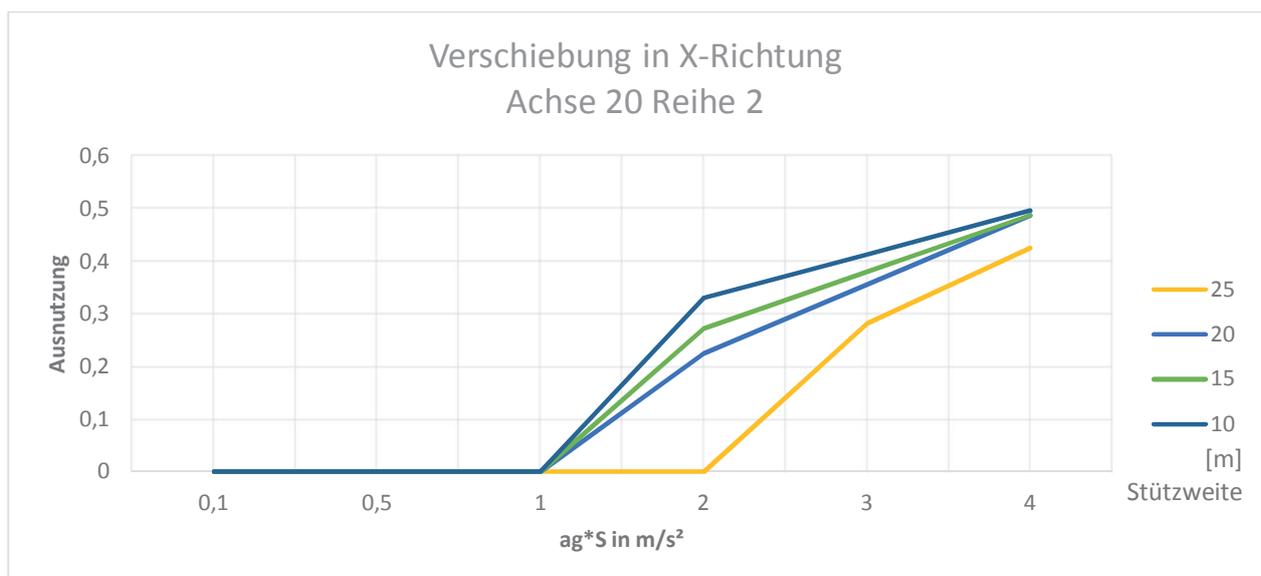
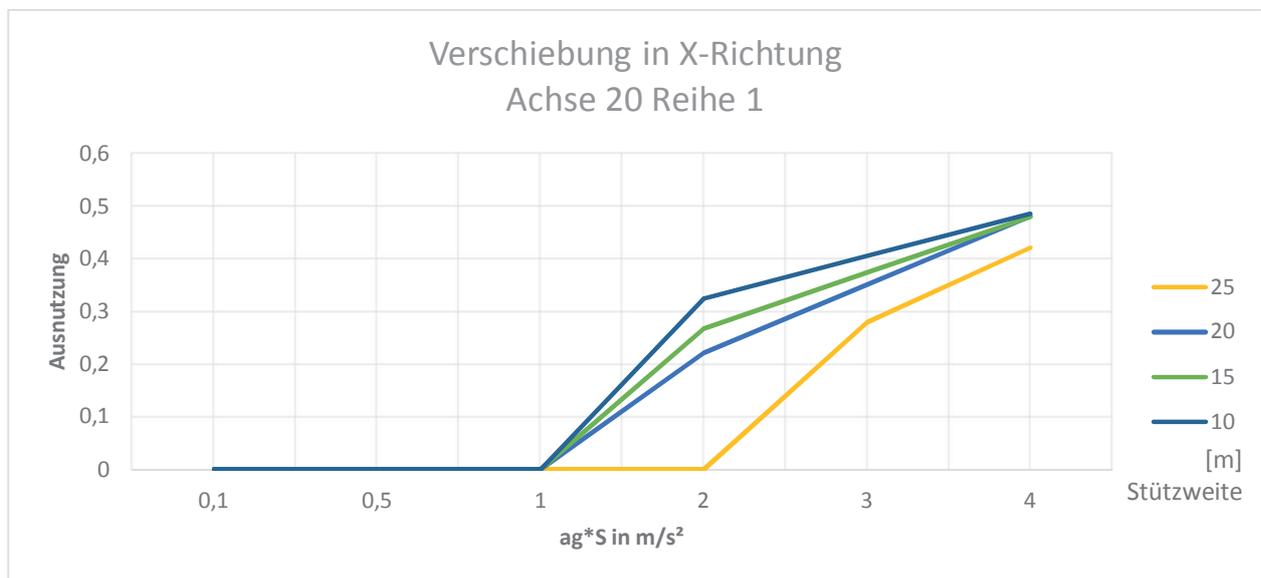




Verschiebung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerverschiebungen, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerverschiebungen, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{u_{i,\text{Erdbeben}}}{u_{i,\text{GZT}}}$$



Auswertung

Für keine der untersuchten Länge decken die horizontalen Auflagerlasten im Betrieb die horizontalen Auflagerlasten unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
25	0,5	1,0
20	0,5	2,0
15	0,5	3,0
10	0,5	4,0

Tabelle C1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //15

Die Berechnung wurde für das größten Schlankheitsverhältnis //15 durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind nicht für geringere Schlankheitsverhältnisse abdeckend. Die aus einem geringen Schlankheitsverhältnis resultierende Konstruktionshöhe führt zu einer Erhöhung der Masse. Durch die höhere Masse erhöht sich die auf die Brücke wirkende Erdbebenbelastung.

Bei einem Schlankheitsverhältnis von //10 erhöht sich die Konstruktionshöhe um den Faktor 1,5. Daher werden die Ergebnisse für das Schlankheitsverhältnis durch den Faktor 1,5 dividiert.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
25	0,5	0,5
20	0,5	1,0
15	0,5	1,5
10	0,5	3,0

Tabelle C2: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //10

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_X \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_Y \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G_1 + G_2 + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{\text{ap,R}} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

Brücke mit einer Länge $L = 15 \text{ m}$

Bei Beachtung folgender Regel darf $a_g \cdot S$ zu $2,0 \text{ m/s}^2$ verwendet werden:

- Zulagen in der unteren Bewehrung am Auflager

$$\Delta A_s = \text{zus. } A_s / \text{vorh. } A_s = 0,20$$

Anhang D: Brückentyp 1.2

Systembeschreibung

Entwurfparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbalken (s. Bild D1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldrig freiaufliegend (s. Bild D2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Spannbeton</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i> <i>Spannstahl: Y 1770</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild D1</i>
Anzahl der Stege	<i>2</i>
Bauwerkslänge	<i>≤ 40 m</i>
Konstruktionshöhe	<i>$> l/20$</i> <i>$< l/15$</i>
Schiefwinkligkeit	<i>$\leq 20^\circ$</i>
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten ≥ 150 m/s</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\varnothing 12/15$ durchgehend vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i> - <i>Vorspannung über 2 Spannglieder mit einer Vorspannung wie nachfolgend beschrieben</i>

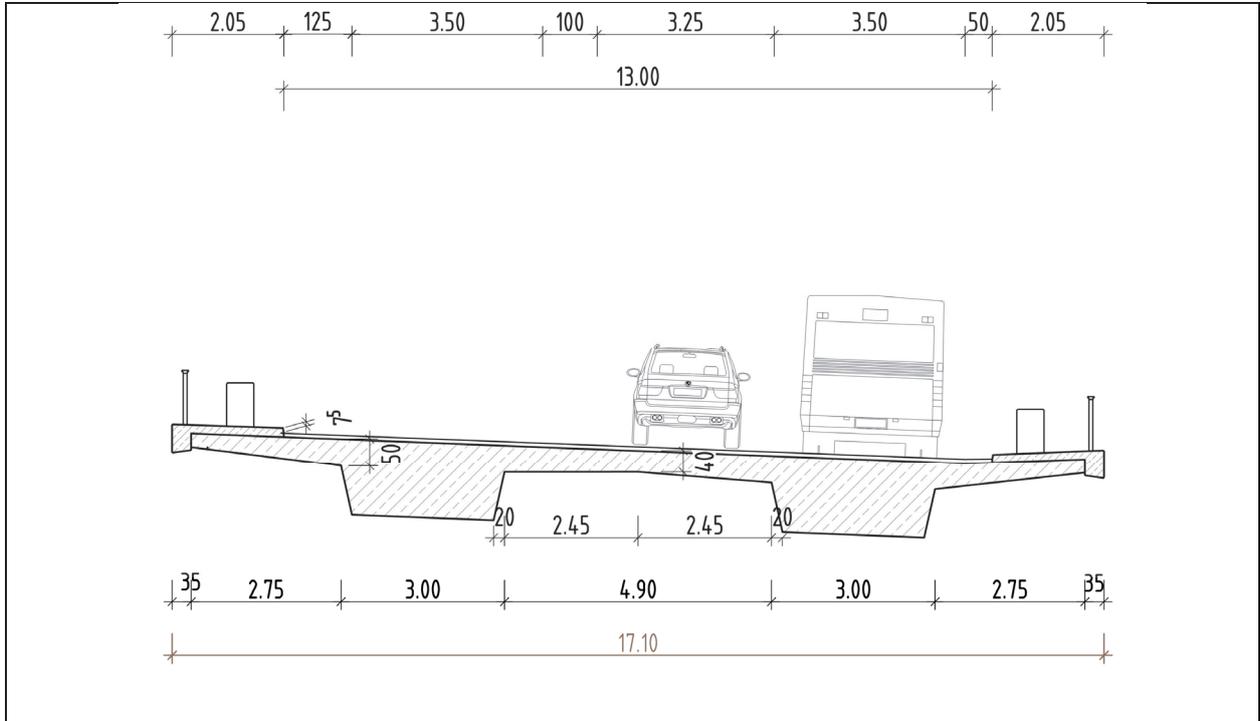


Bild D1: Querschnittswerte

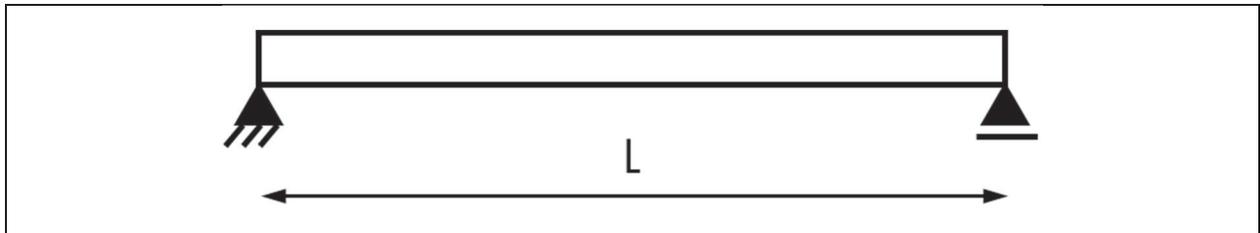


Bild D2: Statisches System

Modellierung

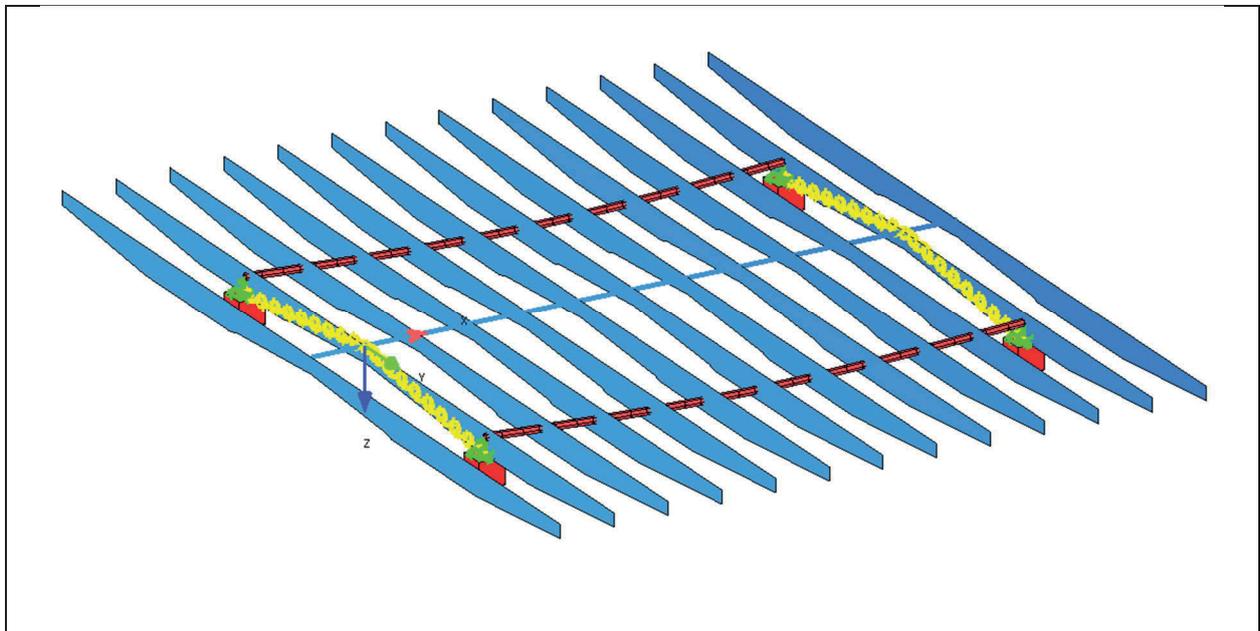


Bild D3: Modell

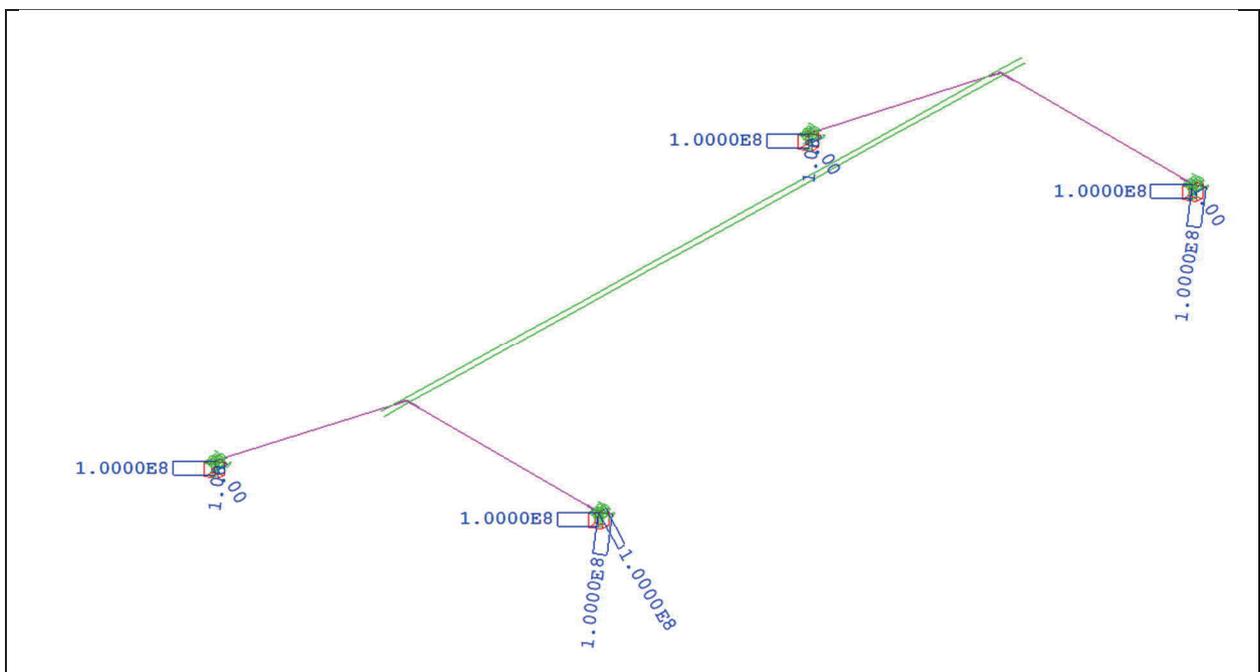


Bild D4: Lagerungsbedingungen, Federkonstante [kN/m]

Vorspannung

In Bild D5 ist der Spanngliedverlauf für die betrachtete Spannbetonbrücke mit $L = 40$ m exemplarisch dargestellt. Für die anderen Längen wurde der Verlauf auf die Konstruktionshöhe und die Länge entsprechend angepasst.

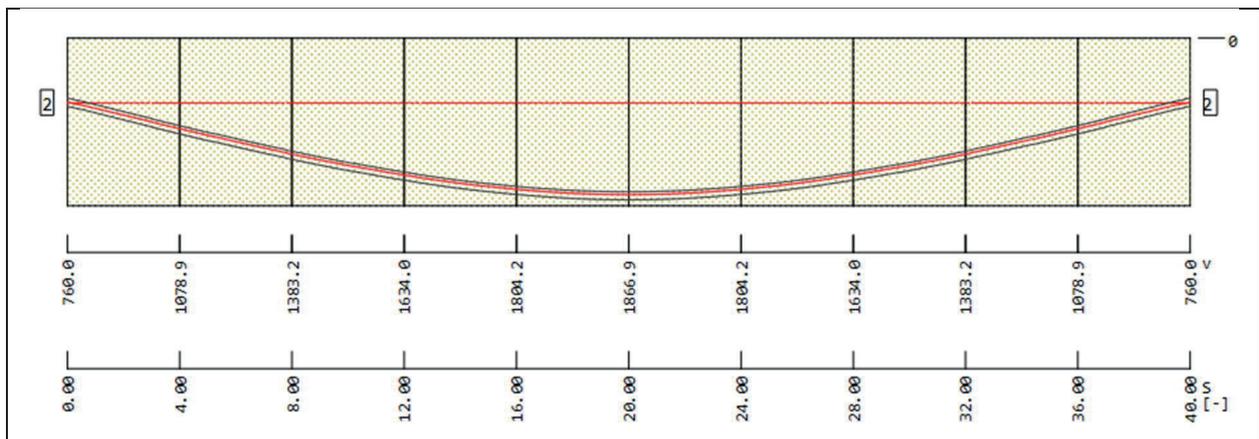


Bild D5: Spanngliedverlauf

Vorspannkraft:	5 MPa = 5000 kN/m ² in Abhängigkeit der Querschnittsfläche des Betons
μ aus Überlastung	0,2
μ aus Nachlassen	0,2
Umlenkfaktor	$\beta = 0,3$ °/m
Keilschlupf am vorgespannten Anker	3,0 mm
Verluste am vorgespannten Anker	0,8 %
Keilschlupf am nicht vorgespannten Anker	4,0 mm
Verluste am nicht vorgespannten Anker	0,0 %
Keilschlupf am Koppler	3,0 mm
Verluste am Koppler	1,0 %

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht des Längsträgers oder der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität als Linienlast in der Stabachse angeordnet.

Querträger:

Das noch nicht berücksichtigte Eigengewicht der Querträger beim Plattenbalkenquerschnitt wird bei den Ausbaulasten als Punktlast mitberücksichtigt. Die Breite der Querträger wird mit 2 m angenommen. Damit ergibt sich ein Zusatzgewicht zwischen den Stegen in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe von

$$\text{ca. } 25 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * (h_k - 0,45 \text{ m}) * 2 \text{ m} = 250 \text{ kN/m} * (h_k - 0,45 \text{ m}).$$

Der Überstand von 1 m an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Fahrbahnbelag:

$$g_{k,\text{Belag}} = 2,5 * 13 \text{ m} = 32,5 \text{ kN/m}$$

Kappe:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 23,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,2} = 32,5 \text{ kN/m} + 23,0 \text{ kN/m} = 55,5 \text{ kN/m}$$

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Die Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 * 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 * 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

$$\text{Grundlast: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 16,6 \text{ m} = 49,8 \text{ kN/m} \quad (e_y = 0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Hauptspur: } 9,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 27,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 5,0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Nebenspur: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 9,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 2,0 \text{ m})$$

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

$$\text{HS: } 4 * 150 \text{ kN} \quad (e_y = 6,0 \text{ m}; e_z = 4,0 \text{ m})$$

$$\text{NS1: } 4 * 100 \text{ kN} \quad (e_y = 3,0 \text{ m}; e_z = 1,0 \text{ m})$$

$$\text{NS2: } 4 * 50 \text{ kN} \quad (e_y = 0,0 \text{ m}; e_z = -2,0 \text{ m})$$

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist.

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6 \times L_{\text{ges}} < 900$ kN und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

TemperaturKonstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Betonkonstruktion (Typ 3) (EC 1-5, 6.1.3)

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Ed,max}} = 37 \text{ °C} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{\text{N,con}} = -10 - 16 = -26 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{\text{N,exp}} = 39 - 10 = 29 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Betonkonstruktion –Träger/Platte (EC 1-5, 6.1.4)

$$T_{\text{M,heat}} = 15 * 0,82 = 12,3 \text{ K} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 0,82$; 80 mm Belagsdicke)

$$T_{\text{M,cool}} = 8 * 1,00 = 8,0 \text{ K} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$; 80 mm Belagsdicke)

WindWind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$$wk = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (hk + 0,18 \text{ m}) \quad ez = (hk + 0,18 \text{ m}) / 2 - 0,18 \text{ m}$$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ -h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow \text{vereinfachend } w = 0,60 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$$wk = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (hk + 2,08 \text{ m}) \quad ez = (hk + 2,08 \text{ m}) / 2 - 2,08 \text{ m}$$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild D6: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitt 7.5

Mindestbewehrung

Flächige Mindestbewehrung

Es kann davon ausgegangen werden, dass oben und unten je Ø12 /15 eingelegt sind. Daraus ergibt sich folgende absolute Bewehrung:

Oben: $A_{s,min,o} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 16,2 = 122,4 \text{ cm}^2$

Unten: $A_{s,min,u} = 2 \times 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 2,4 \times 2,0 = 36,2 \text{ cm}^2$

Ergebnisse

Es werden folgenden Parameter ausgewertet:

- Längsbewehrung unten (Rang 1)
- Längsbewehrung oben (Rang 2)
- Auflagerfederkräfte
- Verschiebungen am Längsauflager

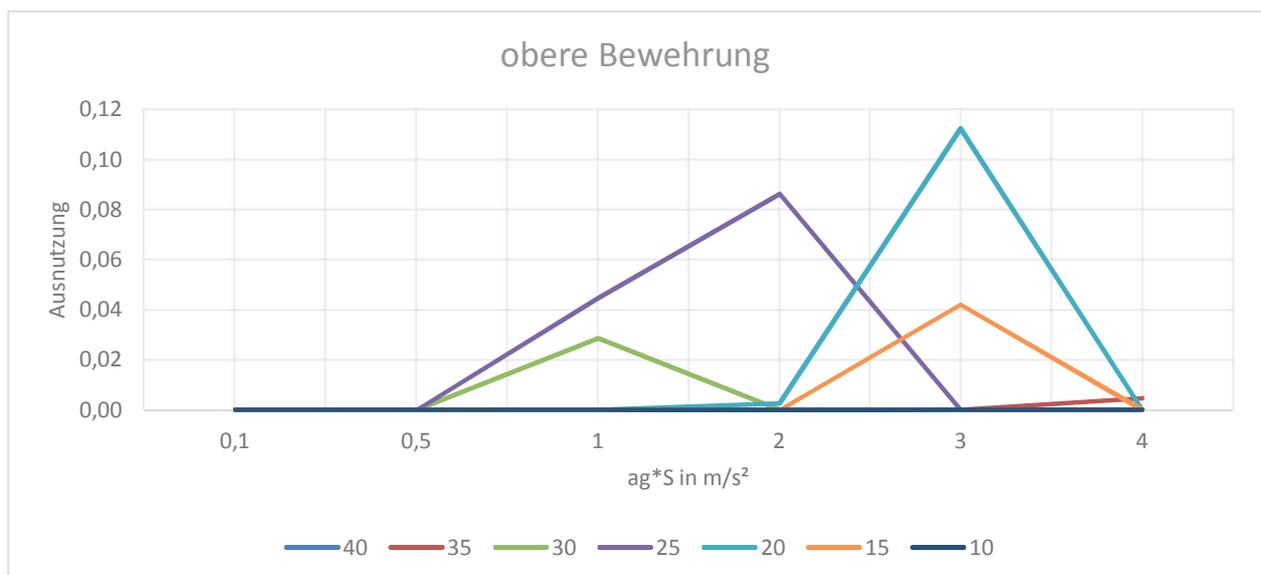
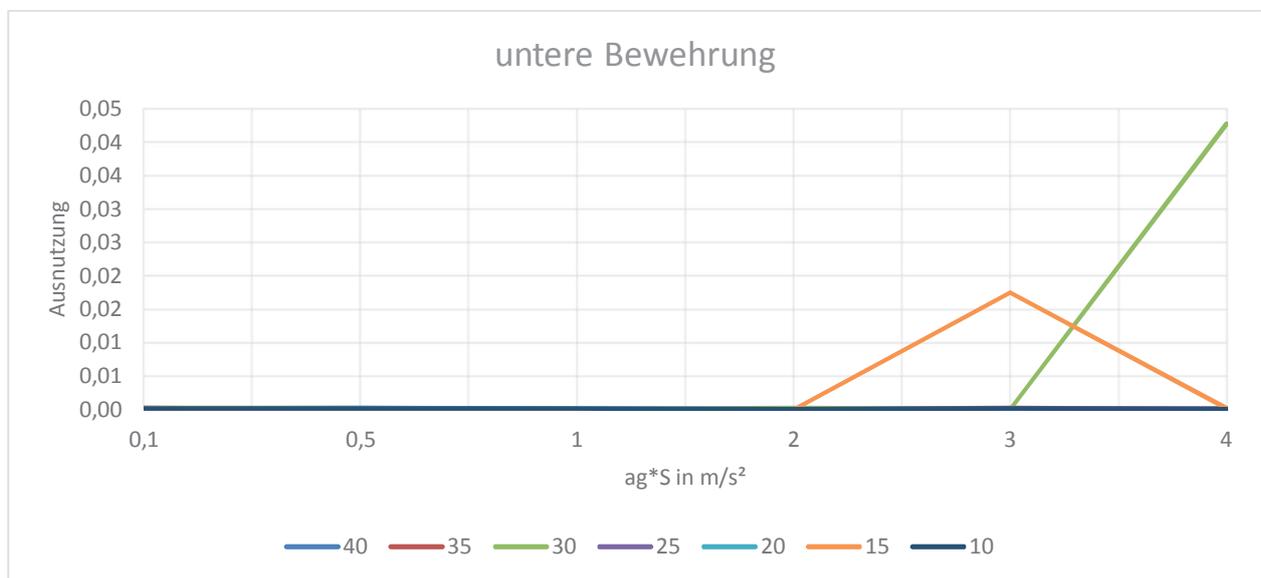
Ergebnisse s. Excel

Die erforderliche Schubbewehrung ergibt sich aus der Mindestquerkraftbewehrung sowie aus der erforderlichen Bewehrung für den Schubabtrag. Bei einem Einfeldträger tritt der größte Schub in der Regel im Bereich der Auflager auf. Da die Auflagerlasten aus ständigen / vorübergehenden Einwirkungen größer als die aus Erdbeben sind, braucht eine Auswertung der Schubbewehrung nicht erfolgen.

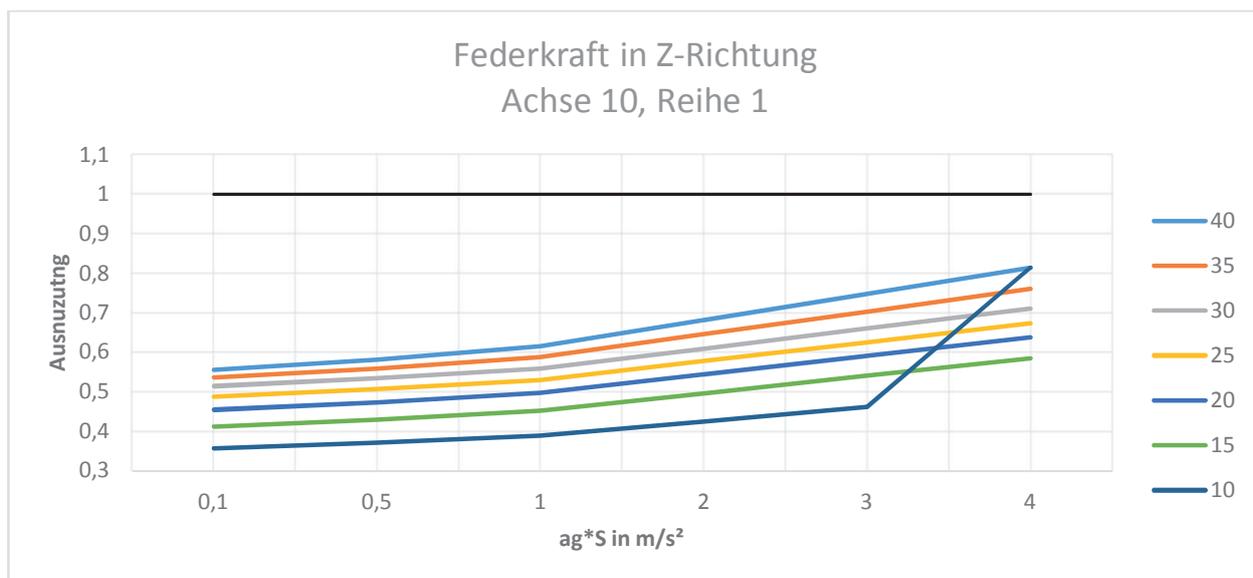
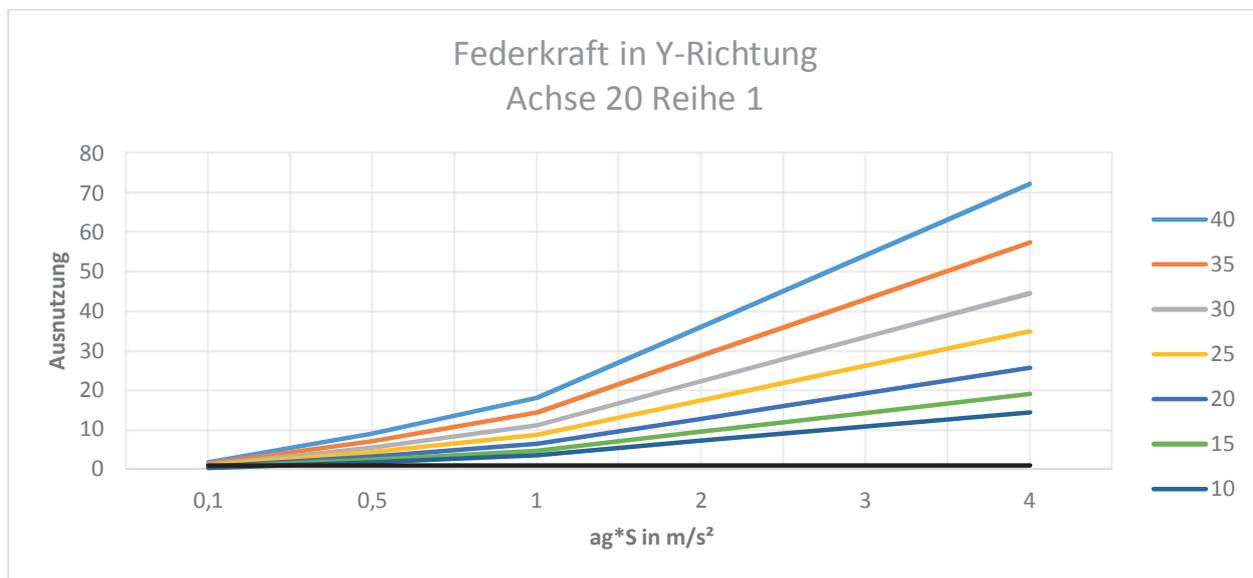
Längsbewehrung

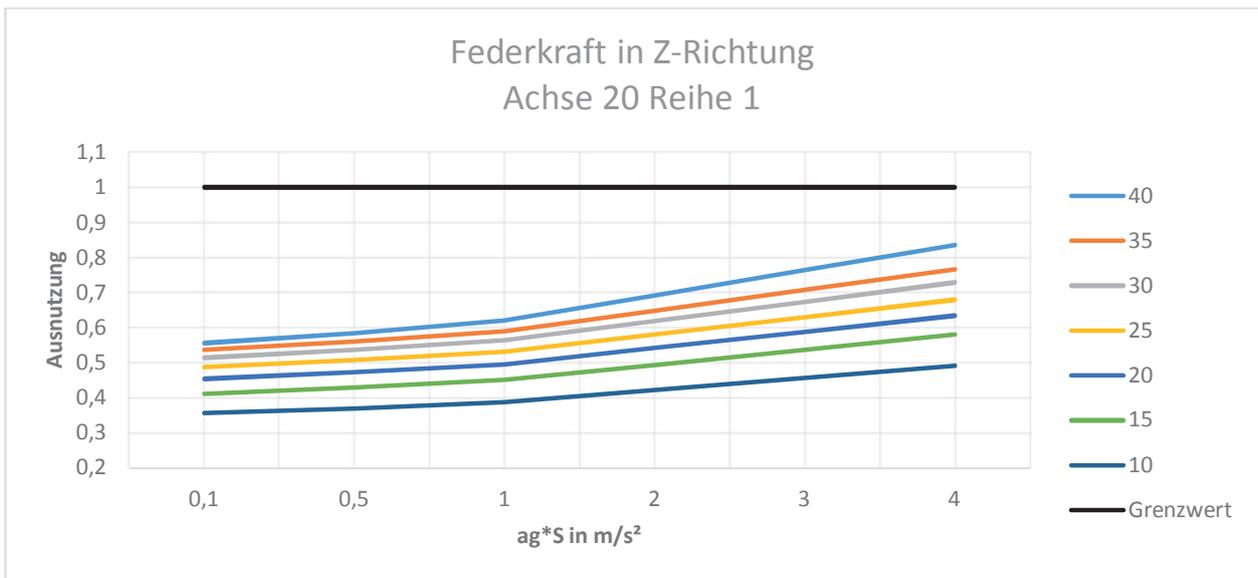
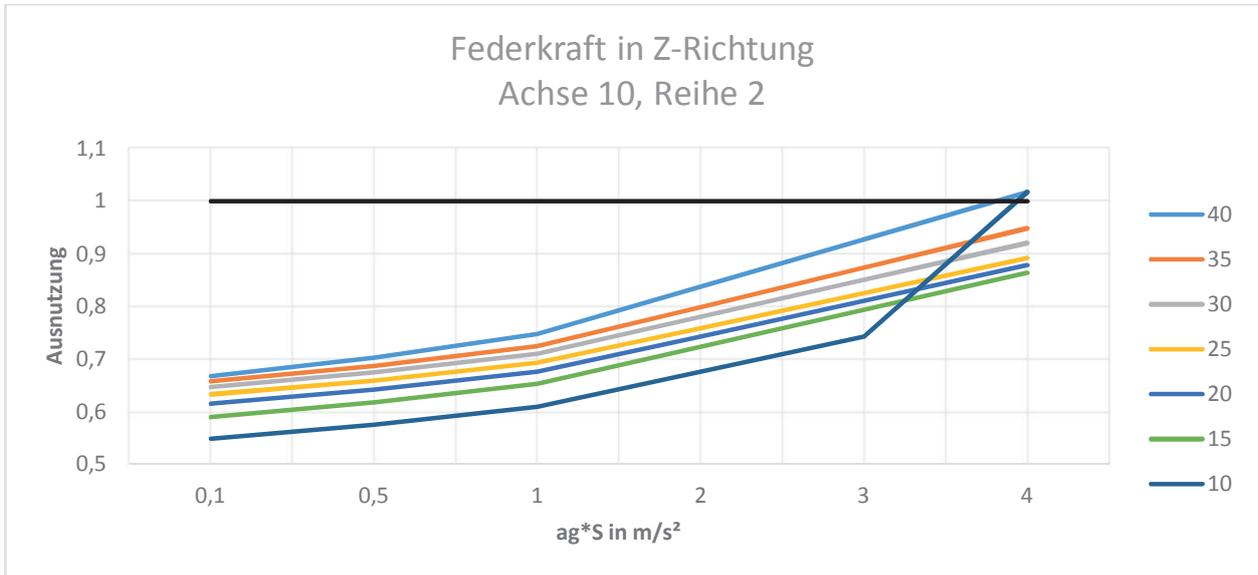
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

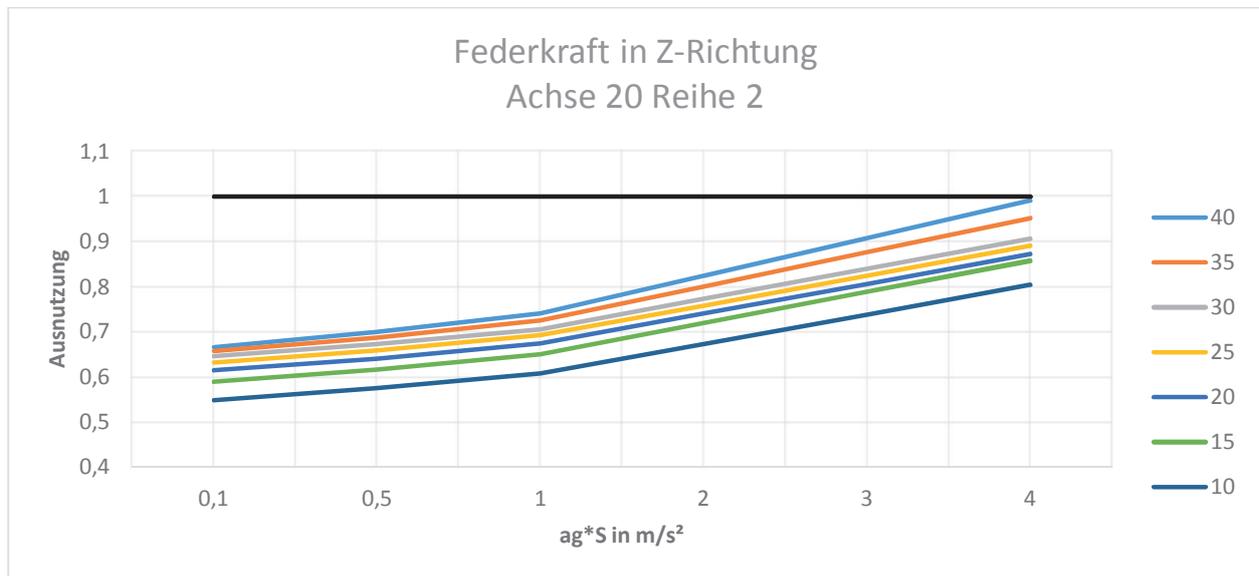
$$\text{Ausnutzung} \hat{=} \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$



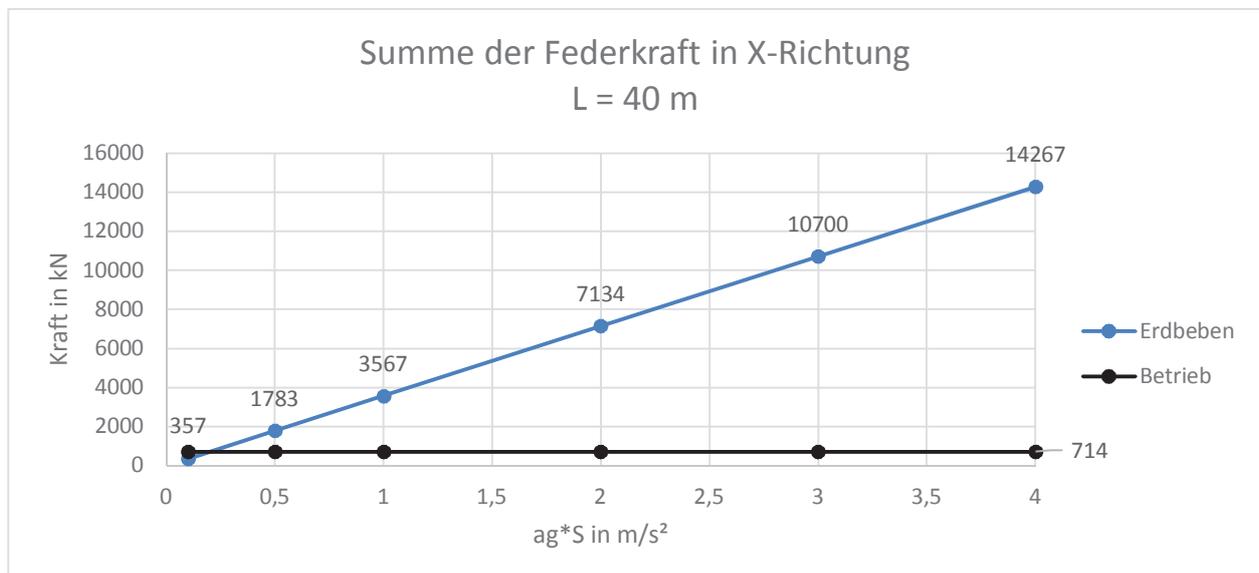
Anmerkung: Knicke in den Kurvenverläufen werden durch numerische Artefakte aufgrund der kleinen Ausnutzungsgrade verursacht. Für die Ergebnisse der Studie haben sie keine Relevanz.

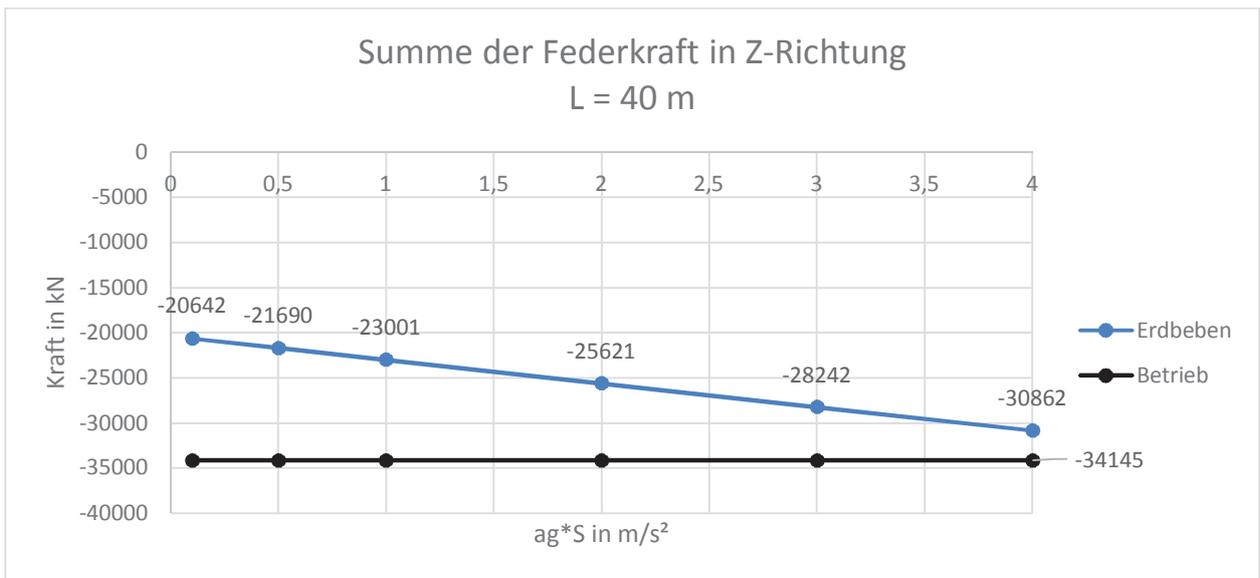
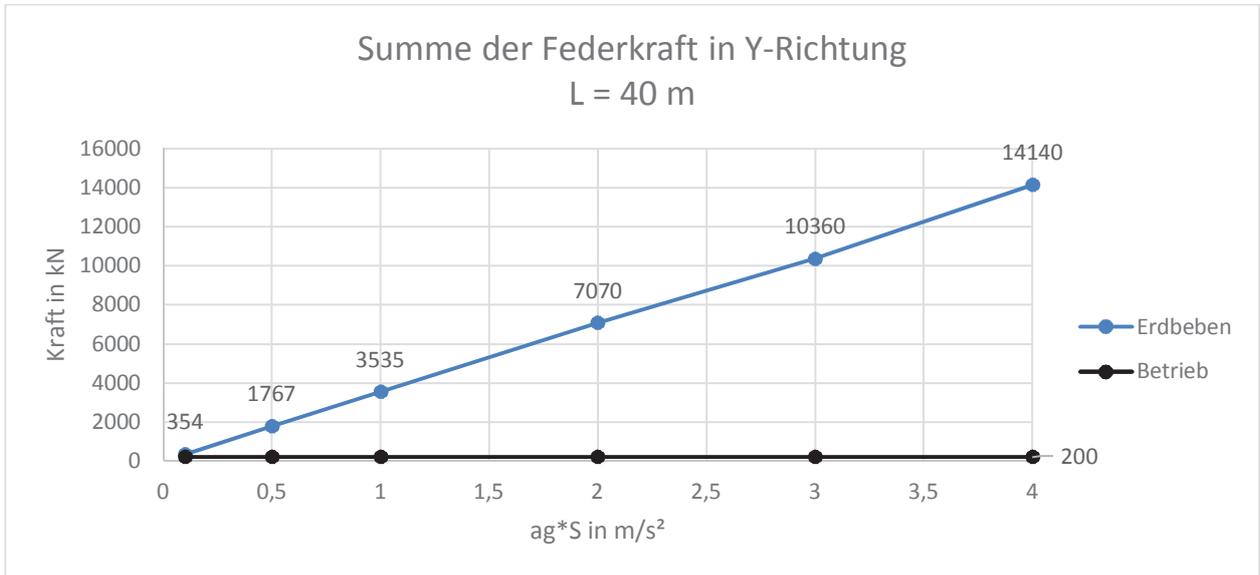






Exemplarisch werden in den nachfolgenden Diagrammen die Zahlenwerte der Federkraft für das Modell mit einer Stützweite von $L = 40$ m angegeben.



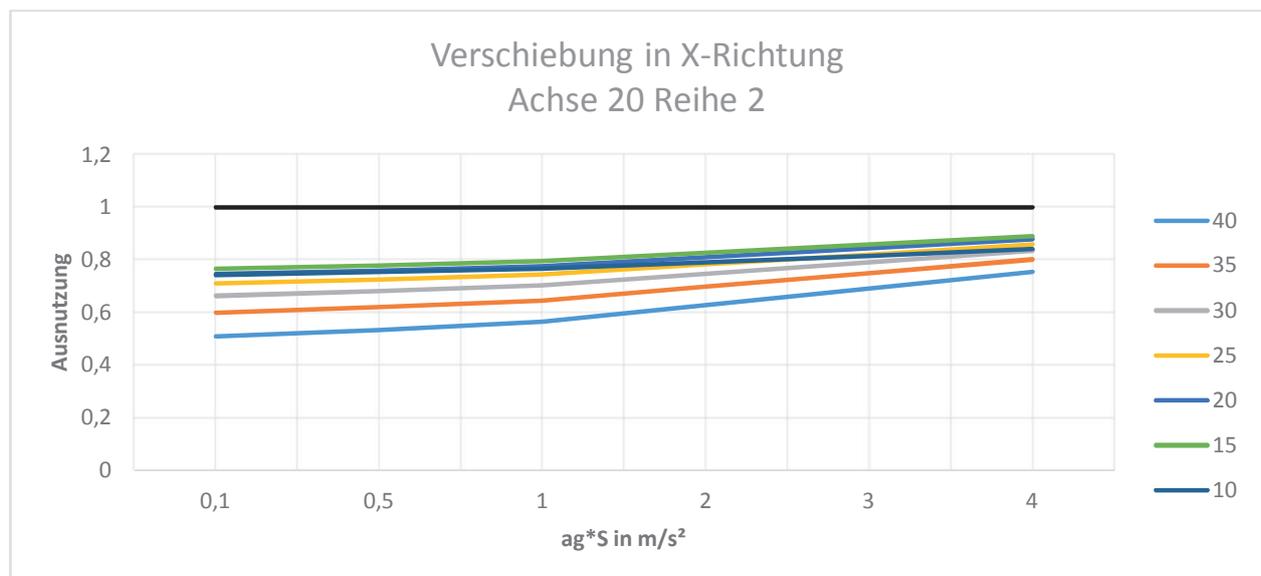
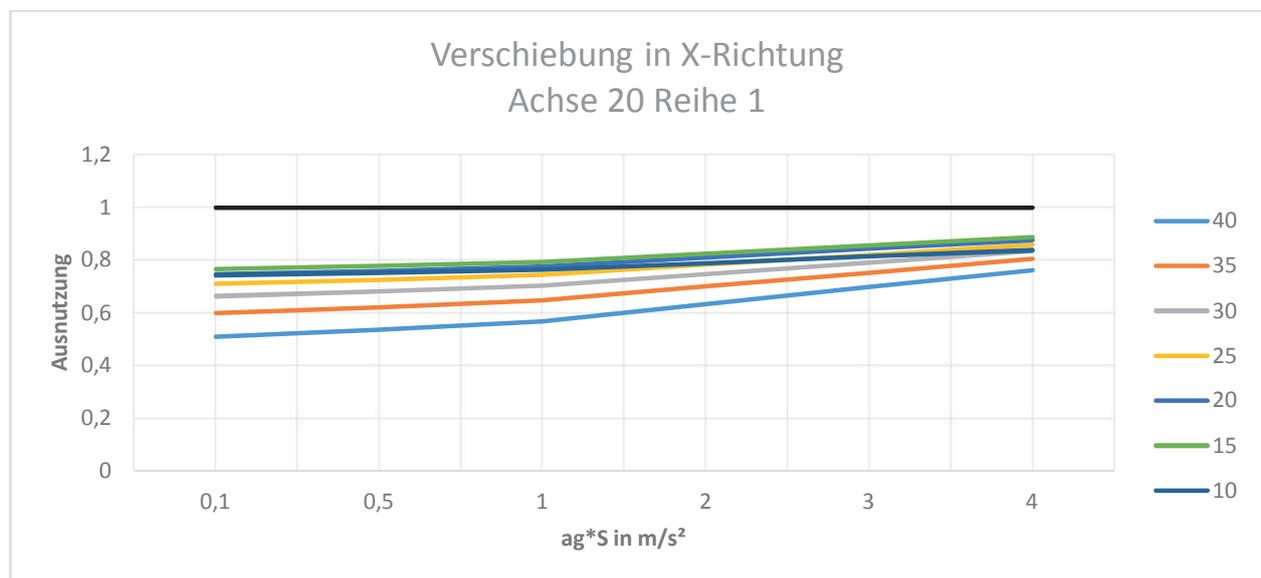


Verschiebung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerverschiebungen, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerverschiebungen, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{u_{i,\text{Erdbeben}}}{u_{i,\text{GZT}}}$$

Mit $i = X; Y; Z$



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Auflagerlasten im Betrieb die horizontalen Auflagerlasten unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
40	0,5	4,0
35	0,5	4,0
30	0,5	4,0
25	0,5	4,0
20	0,5	4,0
15	0,5	4,0
10	0,5	4,0

Tabelle D1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //20

Die Berechnung wurde für das größten Schlankheitsverhältnis //20 durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind nicht für geringere Schlankheitsverhältnisse abdeckend. Die aus einem geringen Schlankheitsverhältnis resultierende Konstruktionshöhe führt zu einer Erhöhung der Masse. Durch die höhere Masse erhöht sich die auf die Brücke wirkende Erdbebenbelastung.

Eine Vergleichsberechnung ergab für ein Schlankheitsverhältnis //15 folgende Grenzwerte.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
40	0,5	2,5
35	0,5	3,0
30	0,5	3,0
25	0,5	3,0
20	0,5	4,0
15	0,5	4,0
10	0,5	3,0

Tabelle D2: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //15

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_X \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_Y \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G1 + G2 + 0,2 \cdot UDL$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

η : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

Anhang E: Brückentyp 1.3

Systembeschreibung

Entwurfparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbalken (s. Bild E1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldrig freiaufliegend (s. Bild E2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Verbundbauweise mit offenen Stahlprofilen</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i> <i>Baustahl: S355</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild E1</i>
Anzahl der Stege	<i>4</i>
Bauwerkslänge	<i>≤ 50 m</i>
Konstruktionshöhe H_k	<i>$> l/30$</i> <i>$< l/18$</i>
Schiefwinkligkeit	<i>$\leq 20^\circ$</i>
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten ≥ 150 m/s</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ durchgehend vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i> - <i>Achsabstand Bewehrung von Betonoberfläche: 50 mm</i>

- *Betonplatte:*
 - Dicke $h > 250 \text{ mm}$
 - Breite $B < 16,6 \text{ m}$
- *Stahlquerschnittswerte in Abhängigkeit von L (in m).*
 - $H < H_k - 250 \text{ mm}$

L [m]	H [cm]	Aa [cm ²]	Iya [cm ⁴]	Iza [cm ⁴]
50	141,7	800,4	2556841	160050
45	125,0	734,9	1840256	136657
40	108,3	668,0	1264480	114529
35	91,7	599,5	816710	93742
30	75,0	528,9	483611	74391
25	58,3	455,9	251165	56591
20	41,7	379,5	104448	40490
15	25,0	298,4	27243	26293

- *Mindestens Querschnittsklasse 3*

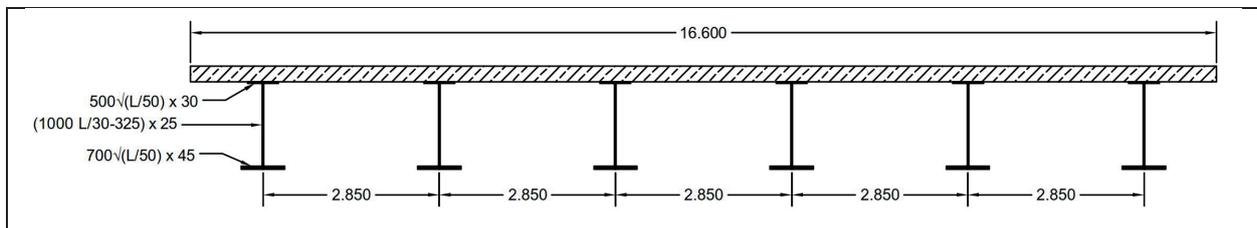


Bild E1: Querschnittswerte (L in m)

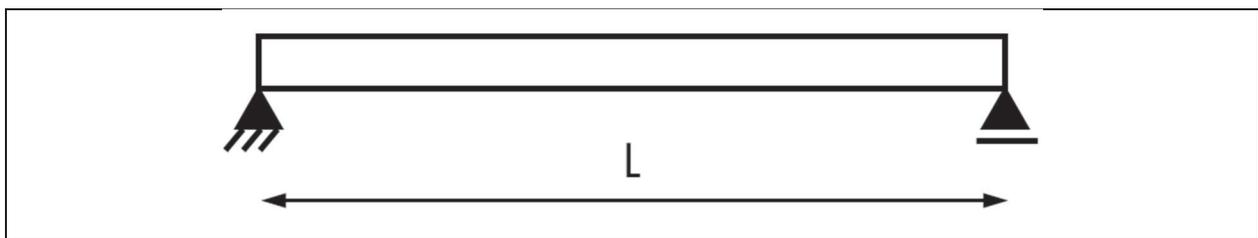


Bild E2: Statisches System

Modellierung

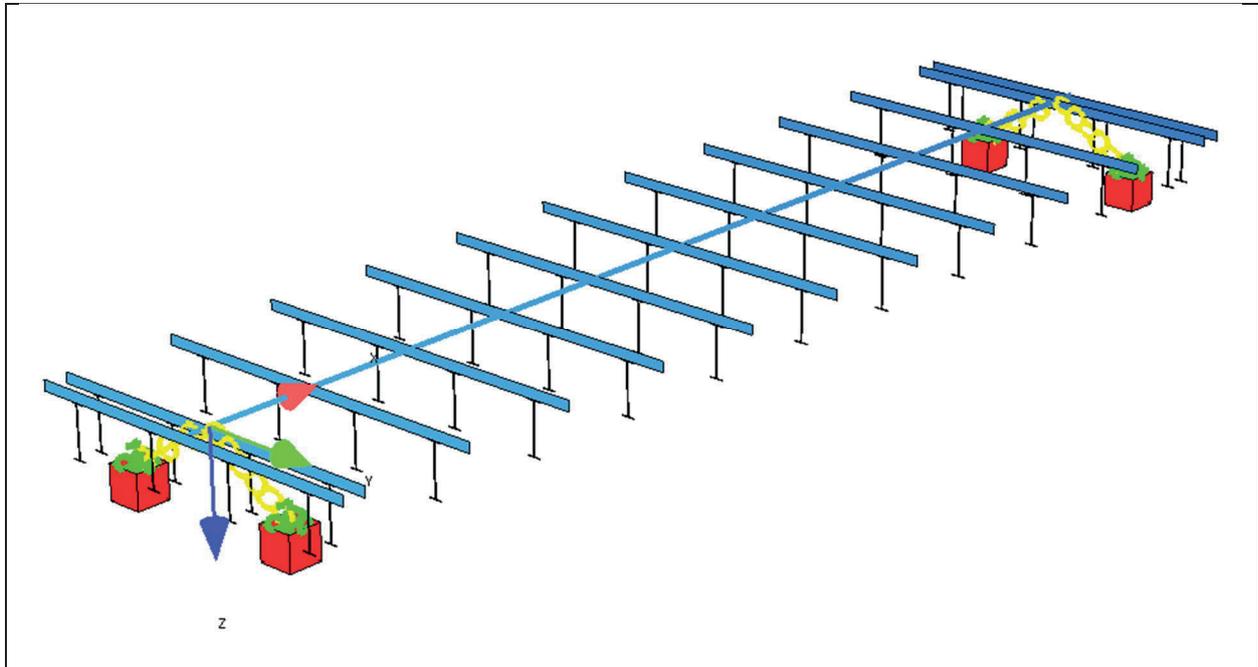


Bild E3: Modell

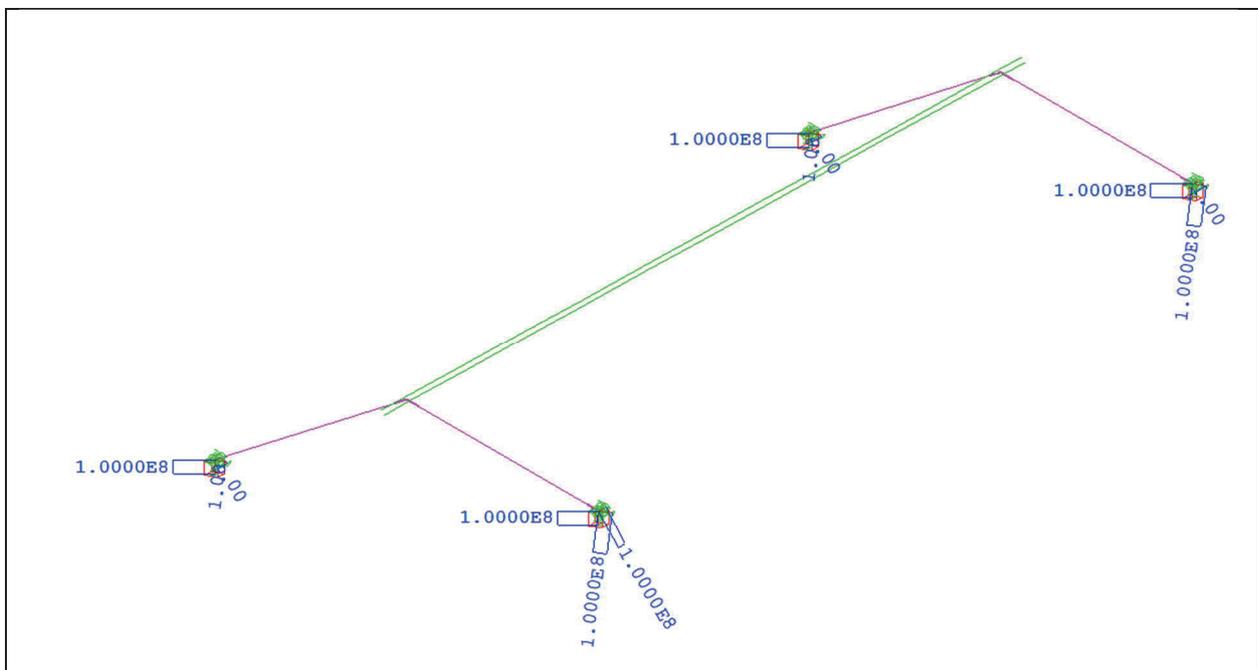


Bild E4: Lagerungsbedingungen, Federkonstante [kN/m]

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt.

Das Konstruktionseigengewicht der Stahlträger wird programmintern mit einer Wichte von $78,5 \text{ kN/m}^3$ ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität als Linienlast in der Stabachse angeordnet.

Querträger:

Da sowohl ein Stahlbeton- als auch ein Stahlquerträger verwendet werden kann, wird die gleiche Belastung wie für den Betonträger angesetzt. Das noch nicht berücksichtigte Eigengewicht der Querträger beim Plattenbalkenquerschnitt wird bei den Ausbaulasten als Punktlast mitberücksichtigt. Die Breite der Querträger wird mit 2 m angenommen. Damit ergibt sich ein Zusatzgewicht zwischen den Stegen in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe von

$$\text{ca. } 25 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * (h_k - 0,45 \text{ m}) * 2 \text{ m} = 250 \text{ kN/m} * (h_k - 0,45 \text{ m}).$$

Der Überstand von 1 m an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Fahrbahnbelag:

$$g_{k,\text{Belag}} = 2,5 * 13 \text{ m} = 32,5 \text{ kN/m}$$

Kappe:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 23,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,2} = 32,5 \text{ kN/m} + 23,0 \text{ kN/m} = 55,5 \text{ kN/m}$$

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Die Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 * 1,2$ wird auf einer Breite von $16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

$$\text{Grundlast: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 16,6 \text{ m} = 49,8 \text{ kN/m} \quad (e_y = 0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Hauptspur: } 9,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 27,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 5,0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Nebenspur: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 9,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 2,0 \text{ m})$$

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

$$\text{HS: } 4 * 150 \text{ kN} \quad (e_y = 6,0 \text{ m}; e_y = 4,0 \text{ m})$$

$$\text{NS1: } 4 * 100 \text{ kN} \quad (e_y = 3,0 \text{ m}; e_y = 1,0 \text{ m})$$

$$\text{NS2: } 4 * 50 \text{ kN} \quad (e_y = 0,0 \text{ m}; e_y = -2,0 \text{ m})$$

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist.

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3,6 \times L_{\text{ges}} < 900$ kN und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{e,\text{min}} = -24 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$$

$$T_{e,\text{max}} = 37 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = 41 \text{ °C}$$

$$T_{N,\text{con}} = -10 - 20 = -30 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{N,\text{exp}} = 41 - 10 = 31 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{M,\text{heat}} = 15 \text{ °C} \times 1,0 = 15 \text{ °C} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

$$T_{M,\text{cool}} = 18 \text{ °C} \times 1,0 = 18 \text{ °C} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

Wind

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67\text{m} < h < 1,67$ m)

$$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$$wk = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (hk + 0,18 \text{ m}) \quad ez = (hk + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67\text{m} < h < 1,67$ m)

$$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow \text{vereinfachend } w = 0,60 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 2,08 \text{ m}) \quad e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild E5: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitt 7.5

Mindestwerte

Es wird angenommen, dass das Moment um die vertikale Achse des Profils hauptsächlich durch die Betonplatte aufgenommen wird.

Es kann davon ausgegangen werden, dass oben und unten je Ø12 /15 eingelegt sind. Daraus ergibt sich folgende absolute Bewehrung:

Oben und unten: $A_{s,min,o} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 15,5 = 123,7 \text{ cm}^2$

Ermittelt man sich unter Verwendung des DAfStB-Heft 631 den rechnerischen Hebelarm der inneren Kräfte für wandartige Träger ($h/L > 1/3$), kann man sich ein zugehöriges aufnehmbares Moment ermitteln. Es wird angenommen, dass sich die Zugzone über ein Viertel der Höhe ($0,25 \times 16,6 = 4,15 \text{ m}$) ausbildet.

$$F_{s,F,zul} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 50 / 1,15 = 2714 \text{ kN}$$

L [m]	H [m]	H/L [-]	z_f [m]	$F_{s,F,zul}$ [kN]	$M_{z,zul}$ [kNm]
15	16,6	1,11	9,00	2714	24429
20	16,6	0,83	10,81	2714	29333
25	16,6	0,66	11,63	2714	31577
30	16,6	0,55	12,18	2714	33073
35	16,6	0,47	12,58	2714	34141
40	16,6	0,42	12,87	2714	34942
45	16,6	0,37	13,10	2714	35566
50	16,6	0,33	13,28	2714	36046

Tabelle E1: aufnehmbares Moment in Stahlbetonplatte

Die Querkraft in Brückenquerrichtung

Material	
Beton	
Festigkeitsklasse	C30/37
f_{ck} [N/mm ²]	30
f_{cd} [N/mm ²]	17,00
Betonstahl	
f_{yk} [N/mm ²]	500
f_{yd} [N/mm ²]	435

Querschnitt	
b_w [m]	0,25
h [m]	16,60
A_c [m ²]	4,150
d [m]	14,53
A_{sl} [cm ²]	62,58
b_w [m]	0,25
h [m]	16,60

Ergebnis	
$V_{Rd,c}$ [kN]	702

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

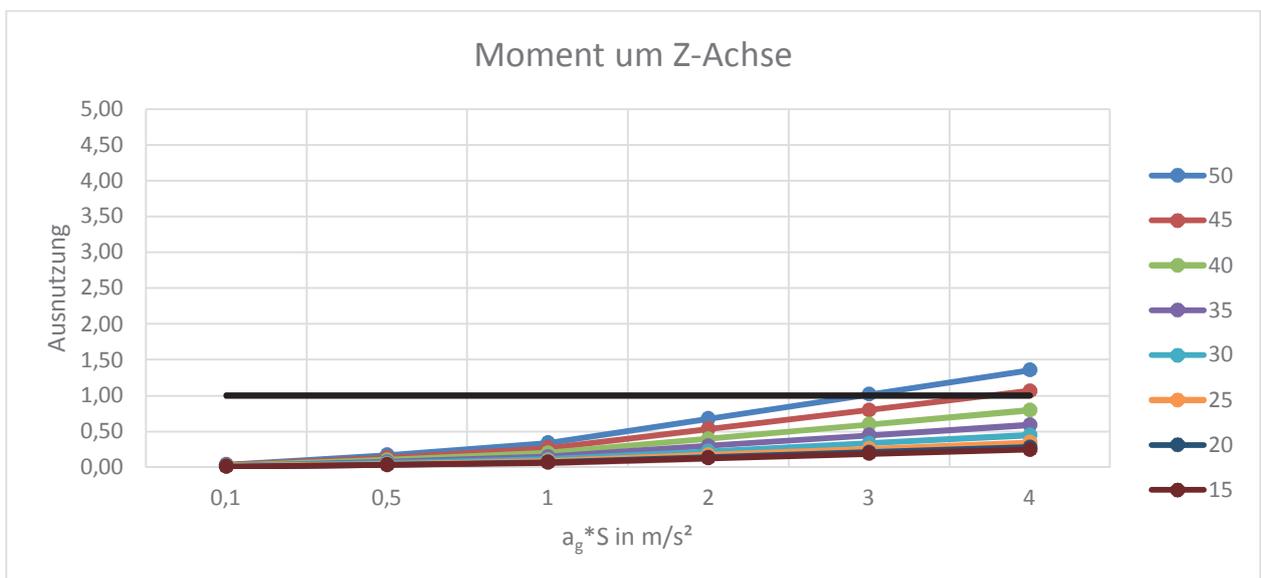
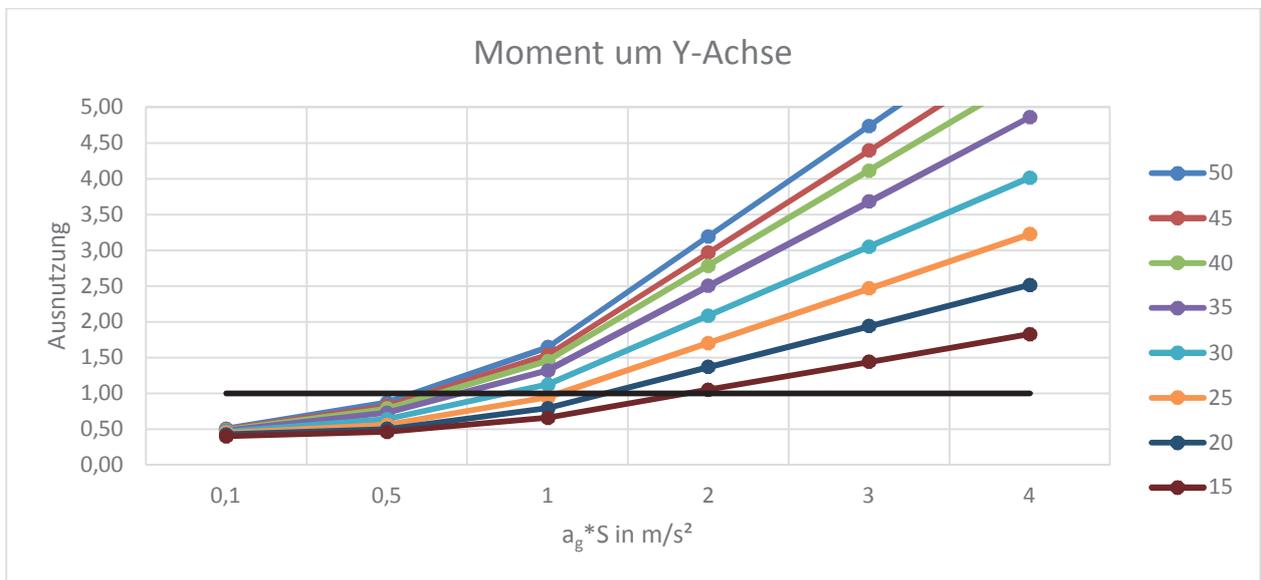
- Momente in X-Richtung
- Momente in Y-Richtung
- Querkraft in Y-Richtung
- Querkraft in Z-Richtung
- Torsionsmoment
- Auflagerfederkräfte
- Verschiebungen am Längsauflager
- Vergleichsspannung

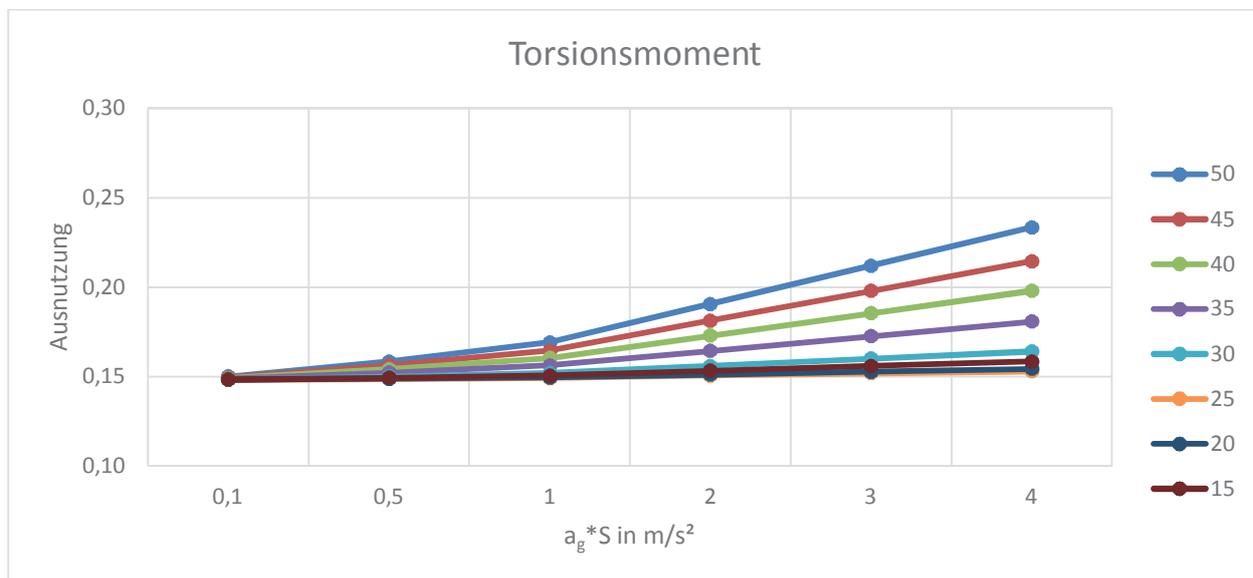
Die erforderliche Schubbewehrung ergibt sich aus der Mindestquerkraftbewehrung sowie aus der erforderlichen Bewehrung für den Schubabtrag. Bei einem Einfeldträger tritt der größte Schub in der Regel im Bereich der Auflager auf. Da in diesem Abschnitt die Auflagerfedern beurteilt werden, kann auf eine gesonderte Betrachtung der Schubbewehrung verzichtet werden.

Momente

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Momente, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu den Momenten, die durch die Erdbebenbelastung resultieren, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

$$Ausnutzung \hat{=} \frac{M_{Erdbeben}}{M_{GZT}}$$

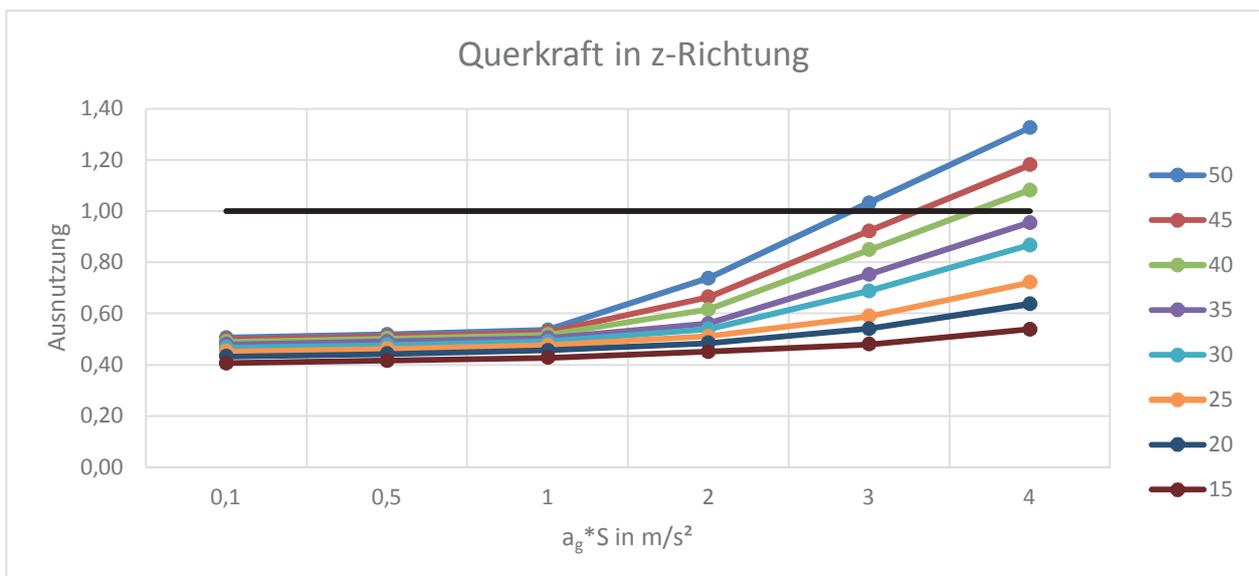
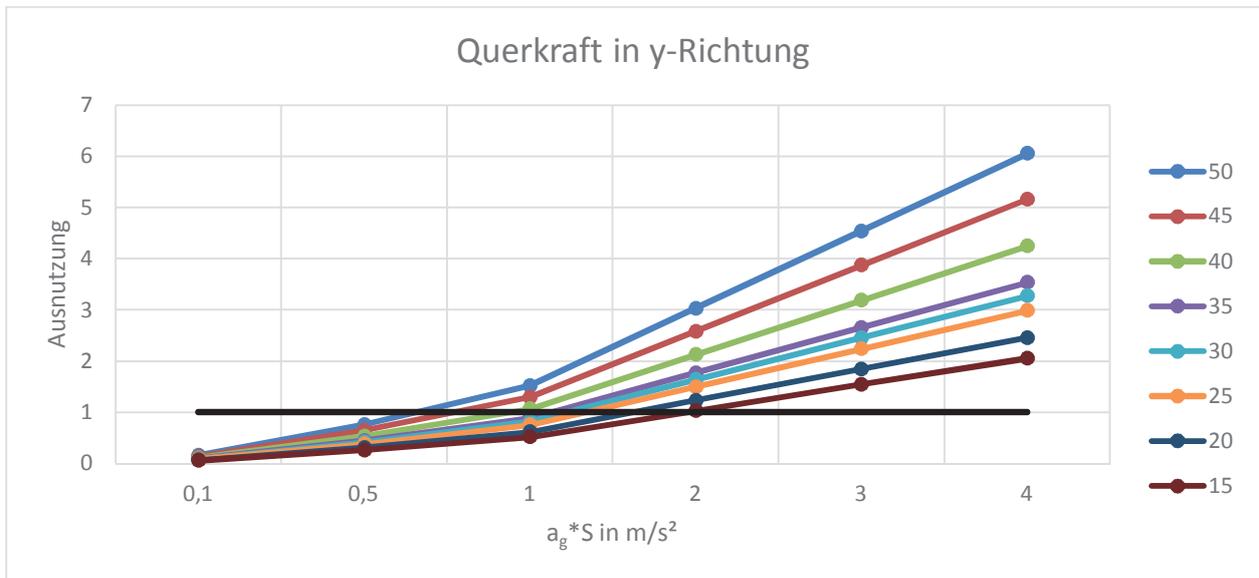




Querkräfte

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Querkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu den Querkräften, die aus einer Erdbebenauslegung resultieren, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{V_{i,\text{Erdbeben}}}{V_{i,\text{GZT}}}$$

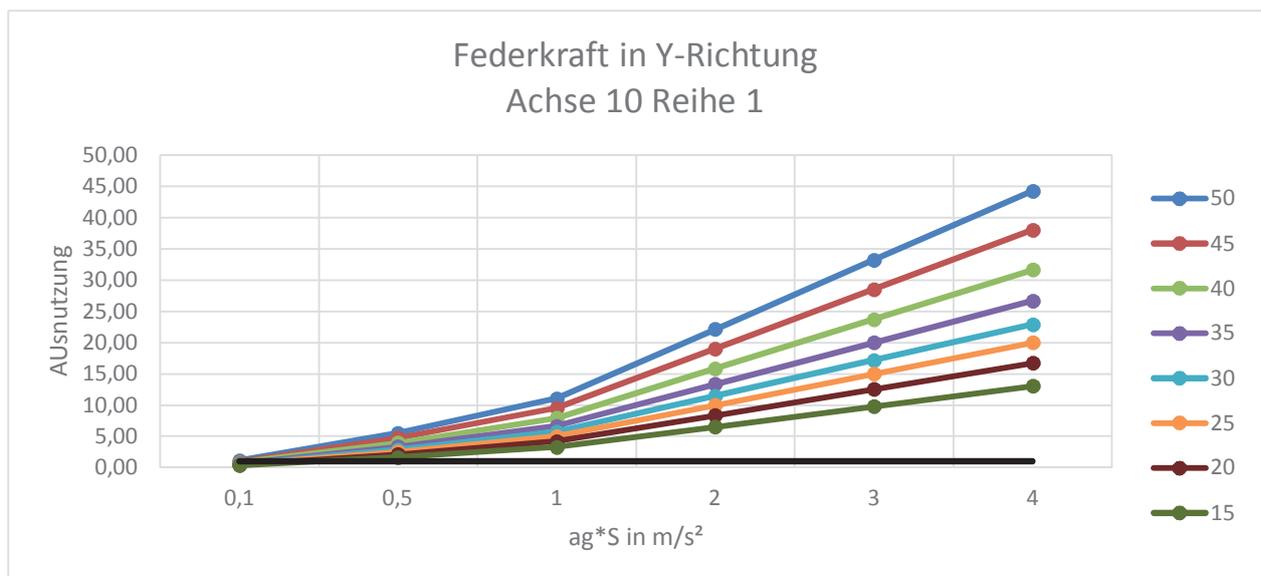
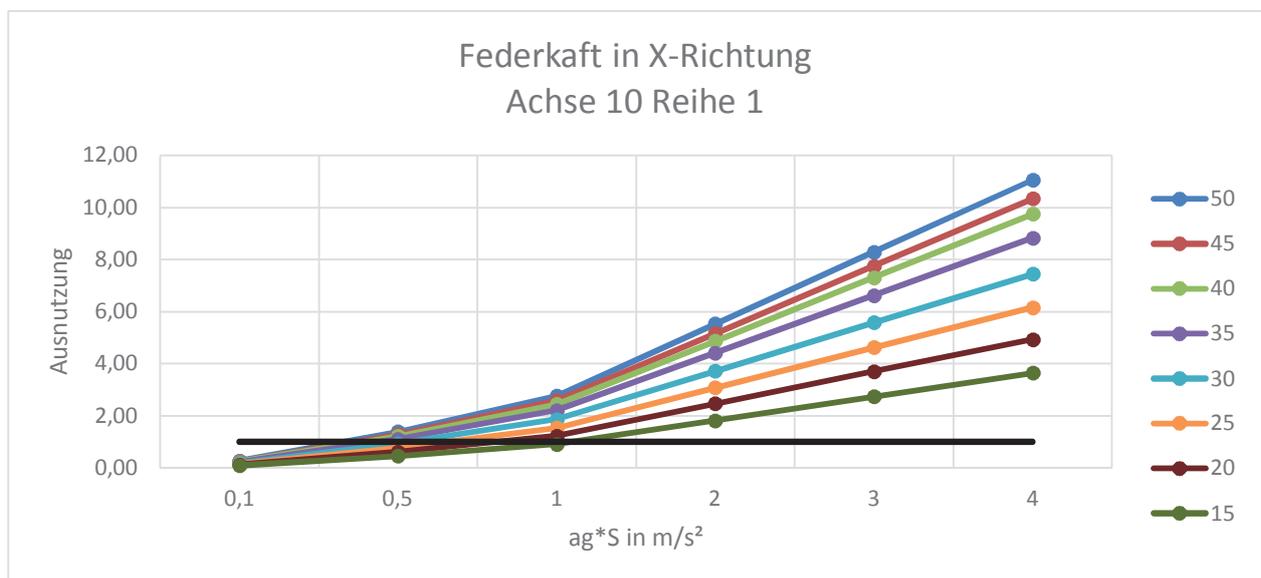


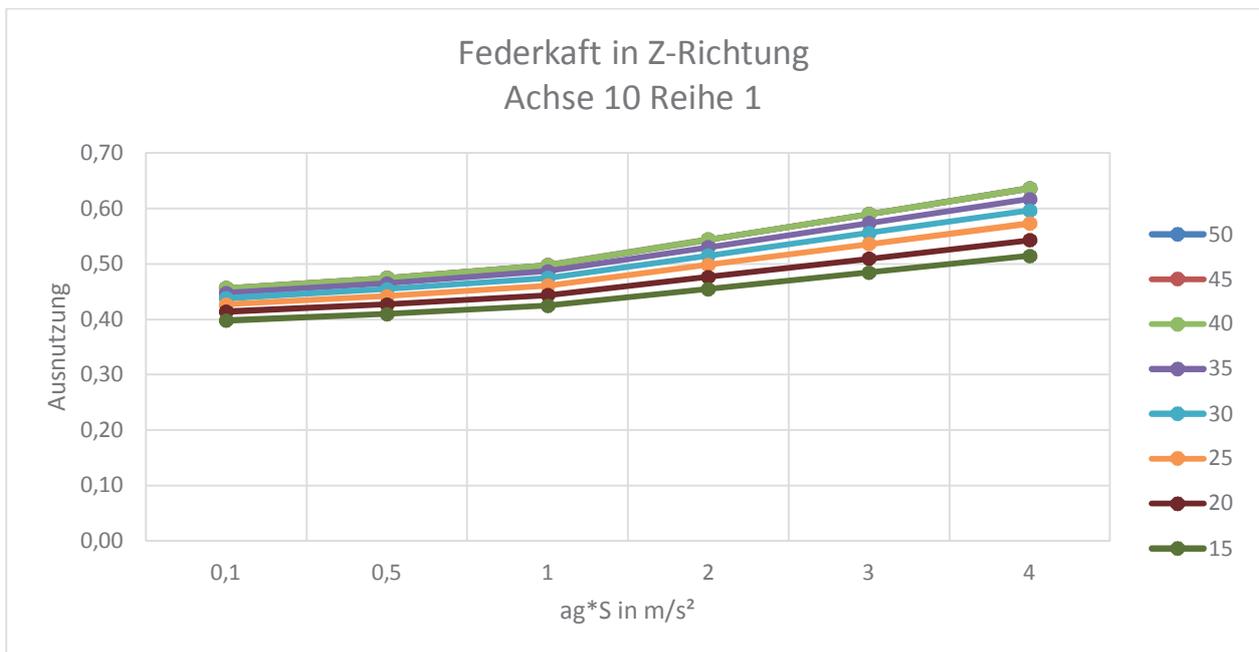
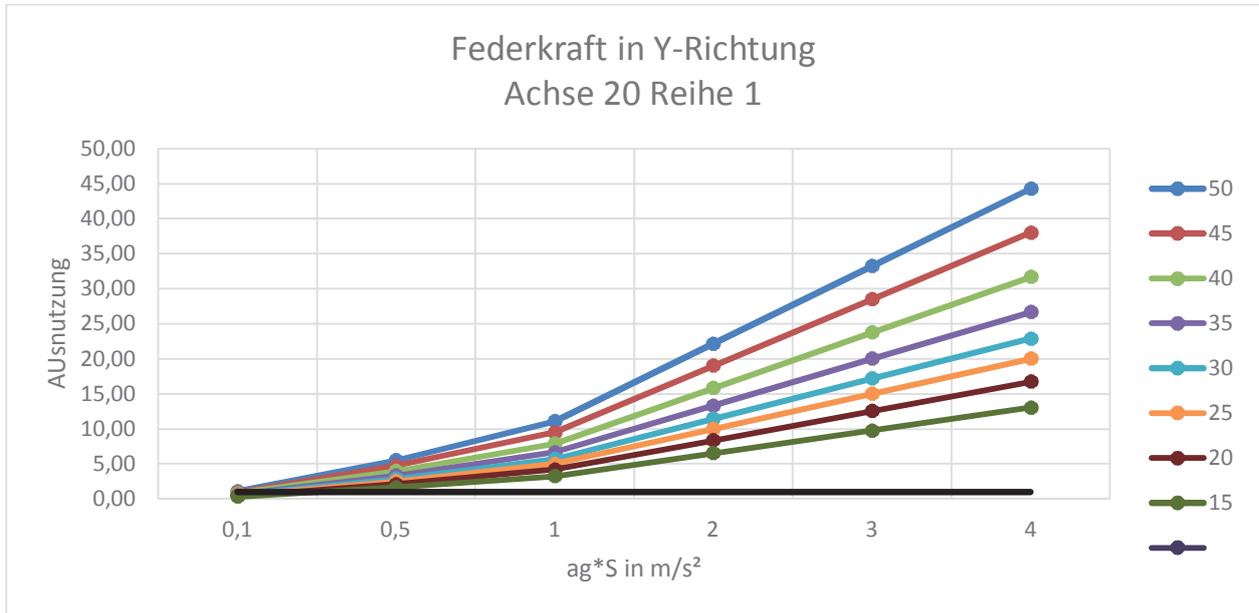
Auflagerfederkräfte

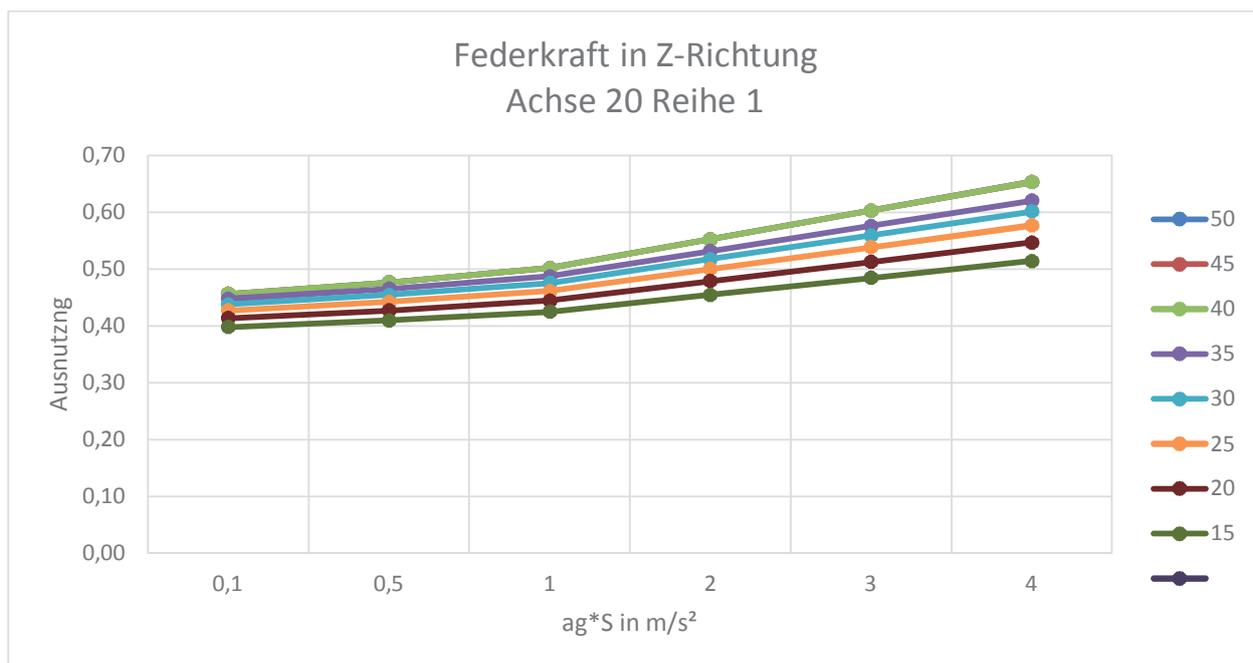
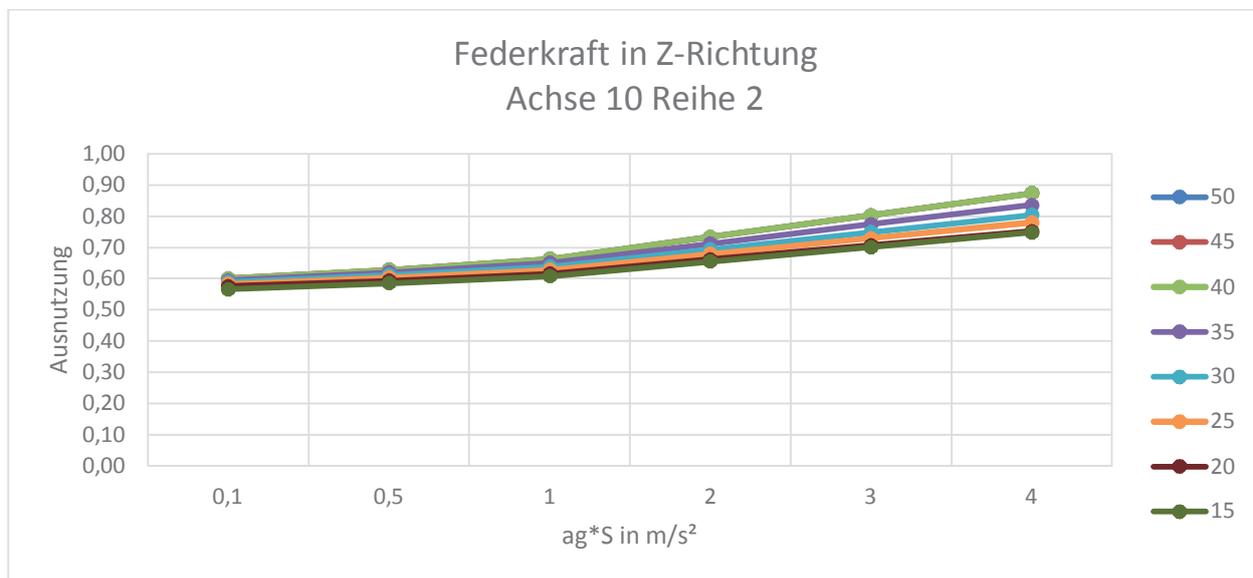
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

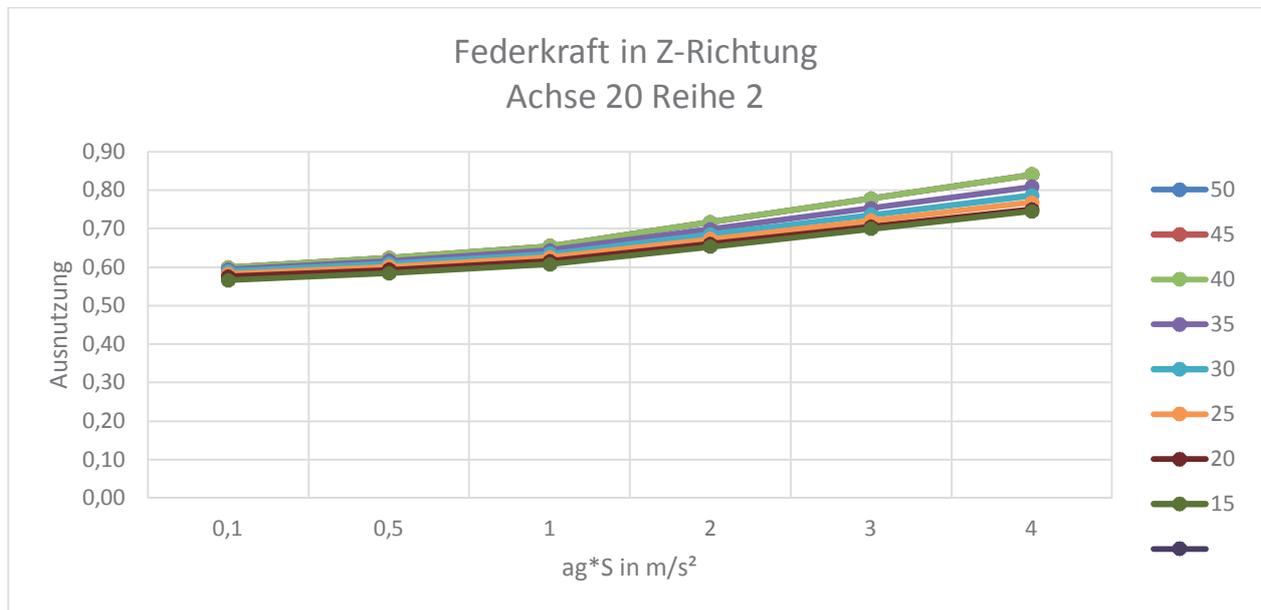
$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

Mit $i = X; Y; Z$

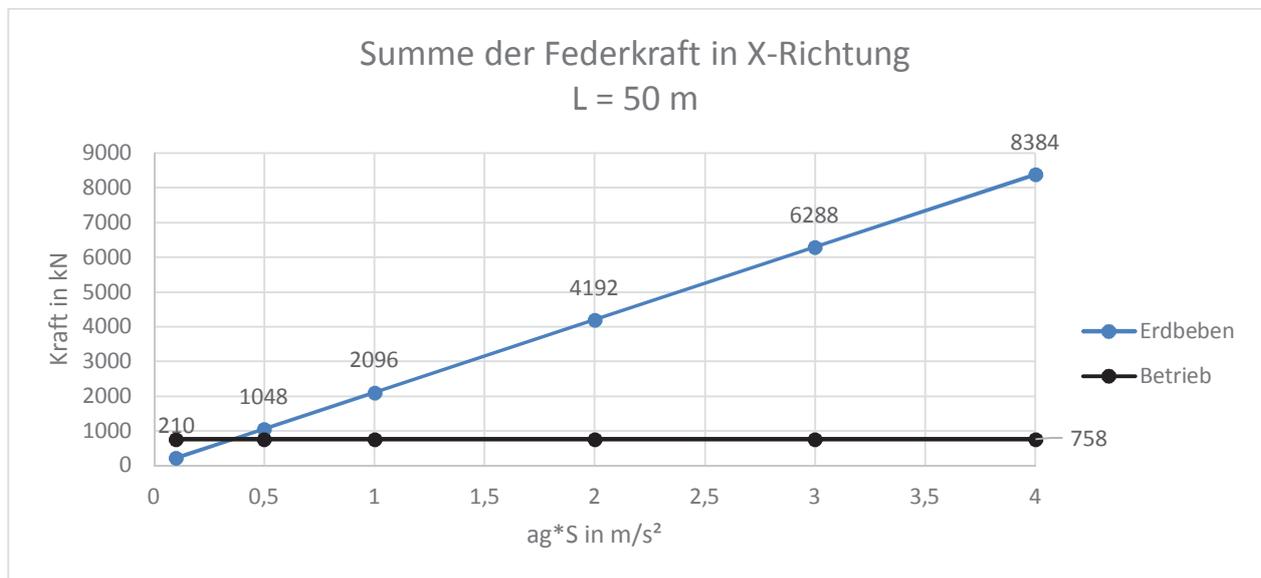


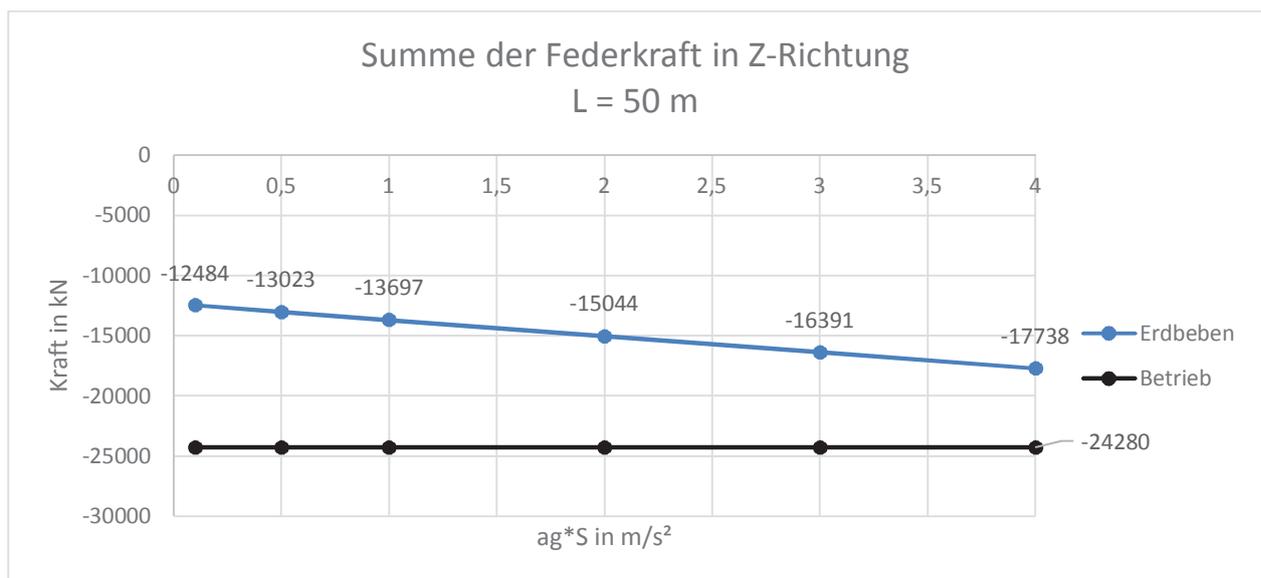
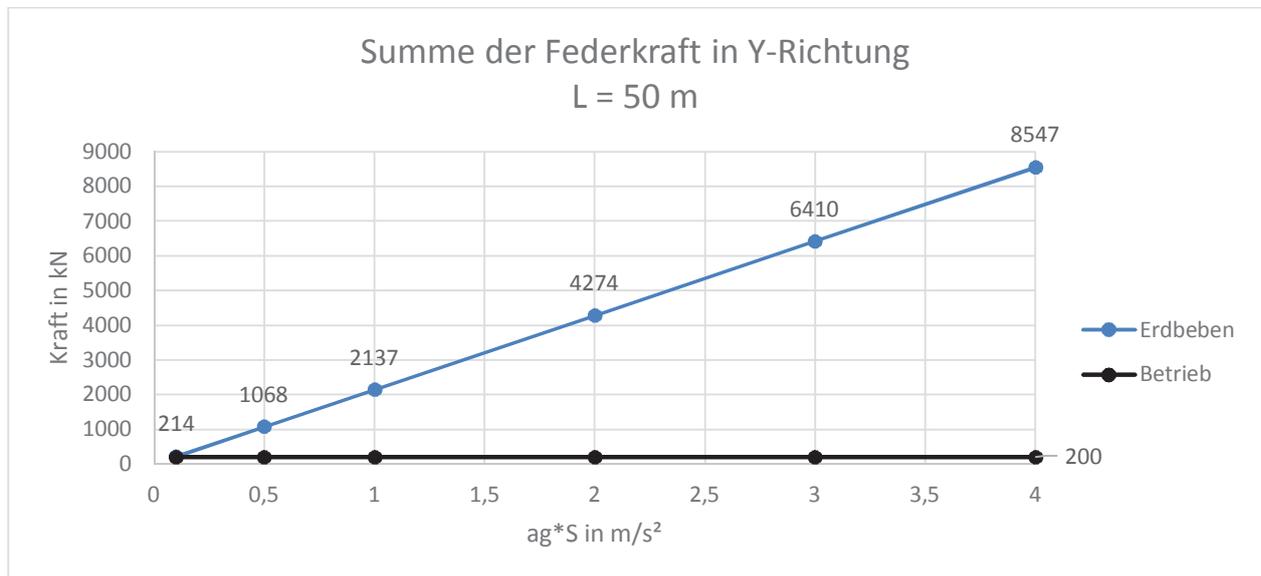






Exemplarisch werden in den nachfolgenden Diagrammen die Zahlenwerte der Federkraft für das Modell mit einer Stützweite von $L = 50$ m angegeben.



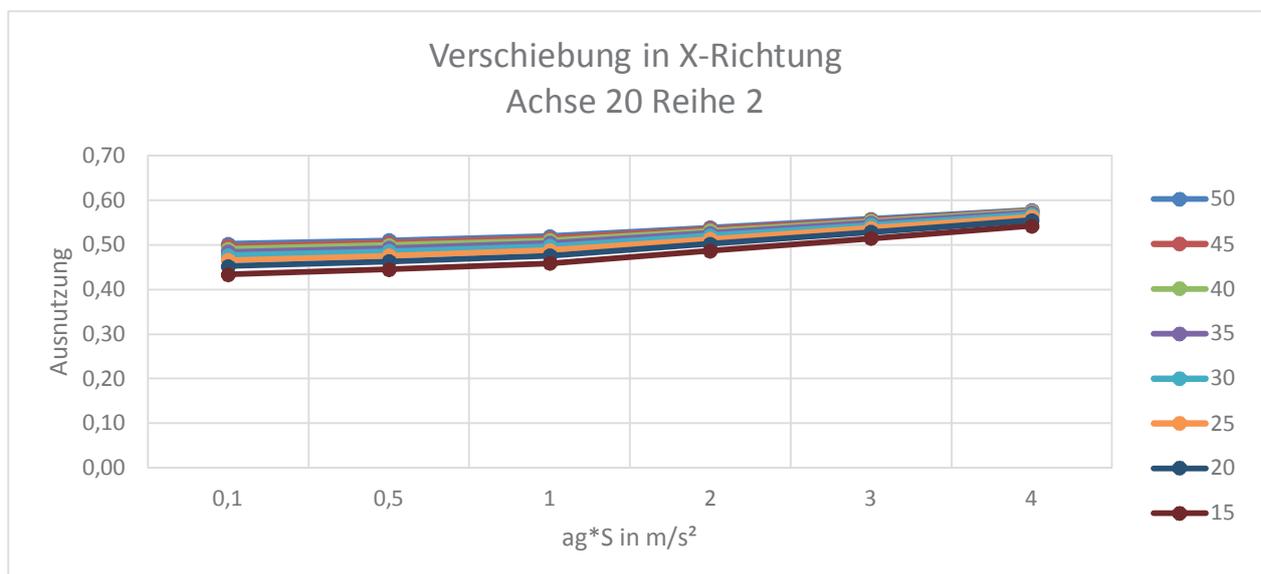
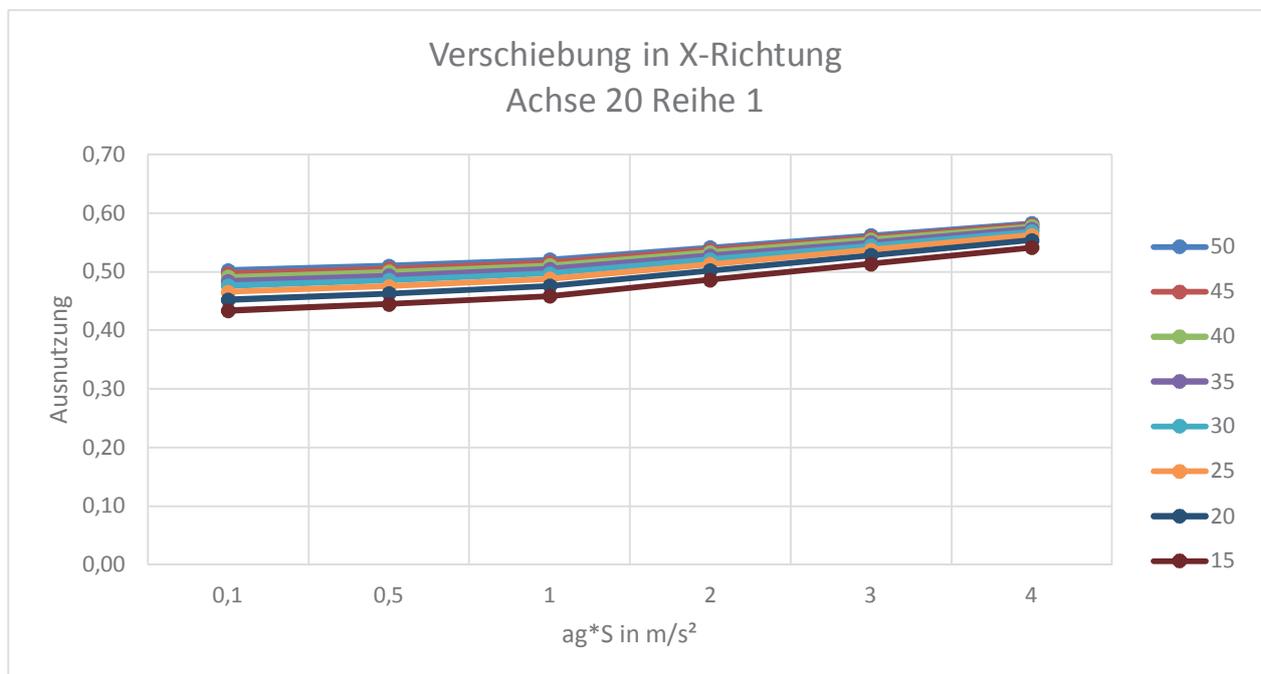


Verschiebung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerverschiebung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Auflagerverschiebung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{u_{i,\text{Erdbeben}}}{u_{i,\text{GZT}}}$$

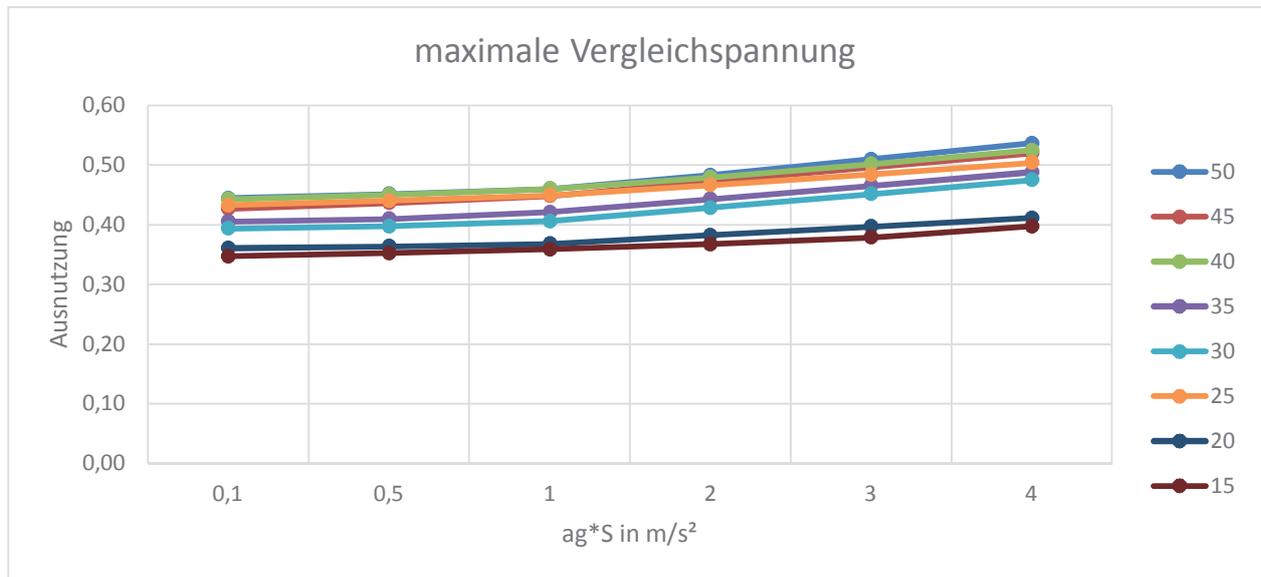
Mit $i = X; Y; Z$



Vergleichsspannung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Vergleichsspannung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Vergleichsspannung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{\sigma_{V, \text{Erdbeben}}}{\sigma_{V, \text{GZT}}}$$



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Auflagerlasten im Betrieb die horizontalen Auflagerlasten unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Grenzwerte

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50	0,5	0,5
45	0,5	0,5
40	0,5	0,5
35	0,5	0,5
30	0,5	0,5
25	0,5	1,0
20	0,5	1,0
15	0,5	1,0

Tabelle E2: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //30

Die Berechnung wurde für das Schlankheitsverhältnis //30 durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind bis zu einem Schlankheitsverhältnis //18 abdeckend.

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden. Nachfolgend werden noch zusätzliche Regeln festgelegt, die nur für bestimmte Brückenlängen und bestimmte $a_g \cdot S$ – Werte gelten.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_X \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_Y \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G_1 + G_2 + 0,2 \cdot UDL$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

Querschnitt mit geschlossenen Profilen

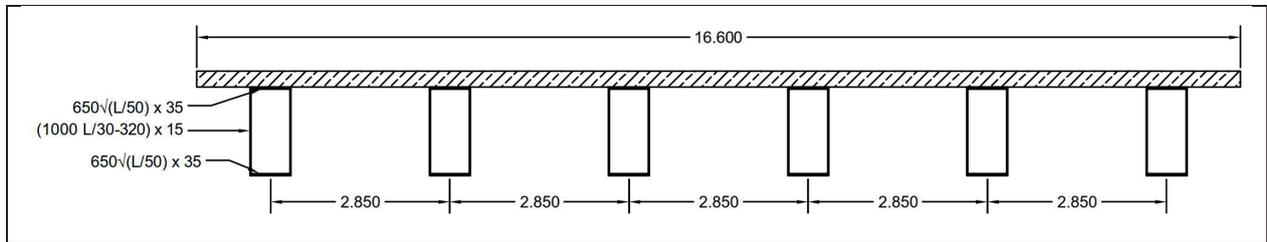


Bild E6: Querschnittswerte (L in m)

Es wurden dasselbe Modell und die gleichen Lastannahmen verwendet.

Die Fläche und das Flächenträgheitsmoment um die starke Achse der Stahlprofile ist vergleichbar zu den offenen Stahlprofilen.

L [m]	H [cm]	Aa [cm ²]	Iya [cm ⁴]	Iza [cm ⁴]
50	141,7	859,0	2788078	567531
45	125,0	785,7	2009521	457194
40	108,3	711,0	1383672	358481
35	91,7	634,7	896575	271454
30	75,0	556,4	533727	196188
25	58,3	475,7	279926	132777
20	41,7	391,8	119032	81339
15	25,0	303,2	33565	42033

Tabelle E3: Querschnittswerte offene Profile

Ein Vergleich der Schnittgrößen ergab für $a_g \cdot S \geq 0,5 \text{ m/s}^2$ eine Abweichung zu den Ergebnissen des Verbundträgers von $\pm 10 \%$. Daher können die Ergebnisse für den Verbundträger auch für geschlossene Querschnitte verwendet werden.

Anhang F: Brückentyp 2.1

Systembeschreibung

Entwurfparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbalken (s. Bild F1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Mehrfeldrig (s. Bild F2)</i>
Anzahl der Felder	2
Material des Überbaus	<i>Stahlbeton</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild F1</i>
Anzahl der Stege	2
Bauwerkslänge	$L \leq 50 \text{ m}$
Verhältnis der Stützweiten	1:1
Konstruktionshöhe	$> L/15$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ durchgehend vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i> - <i>Ersatzsteifigkeit der Stütze im Bereich zwischen den Werten in Tabelle in Abschnitt 7.8.2</i>

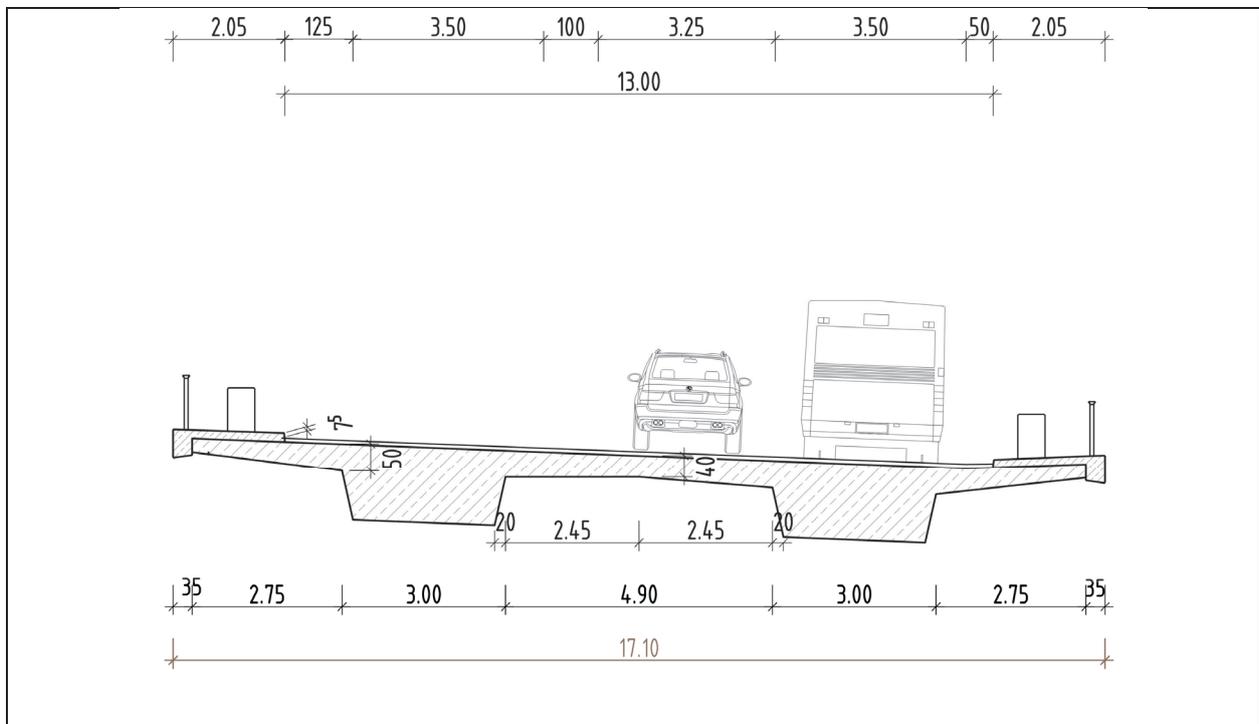


Bild F1: Querschnittswerte /30/

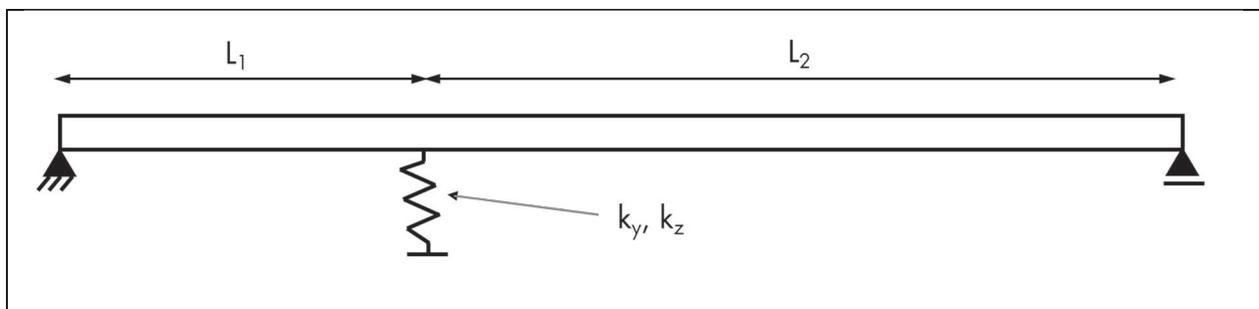


Bild F2: Statisches System

Modellierung

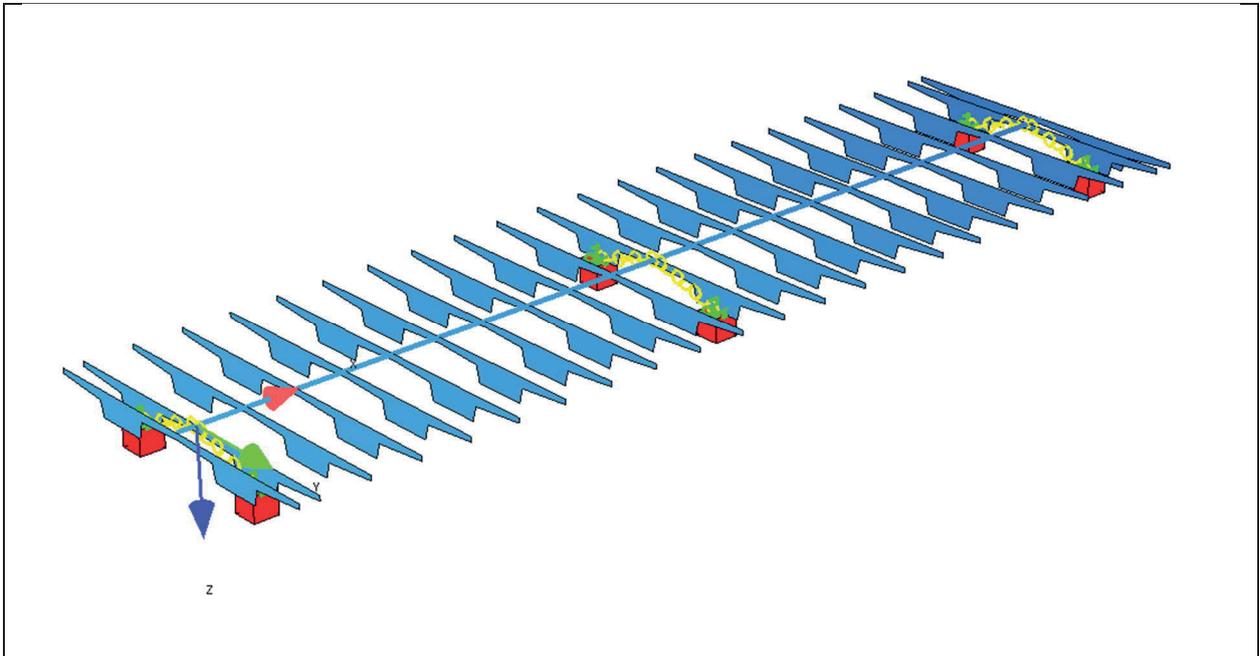


Bild F3: Modell

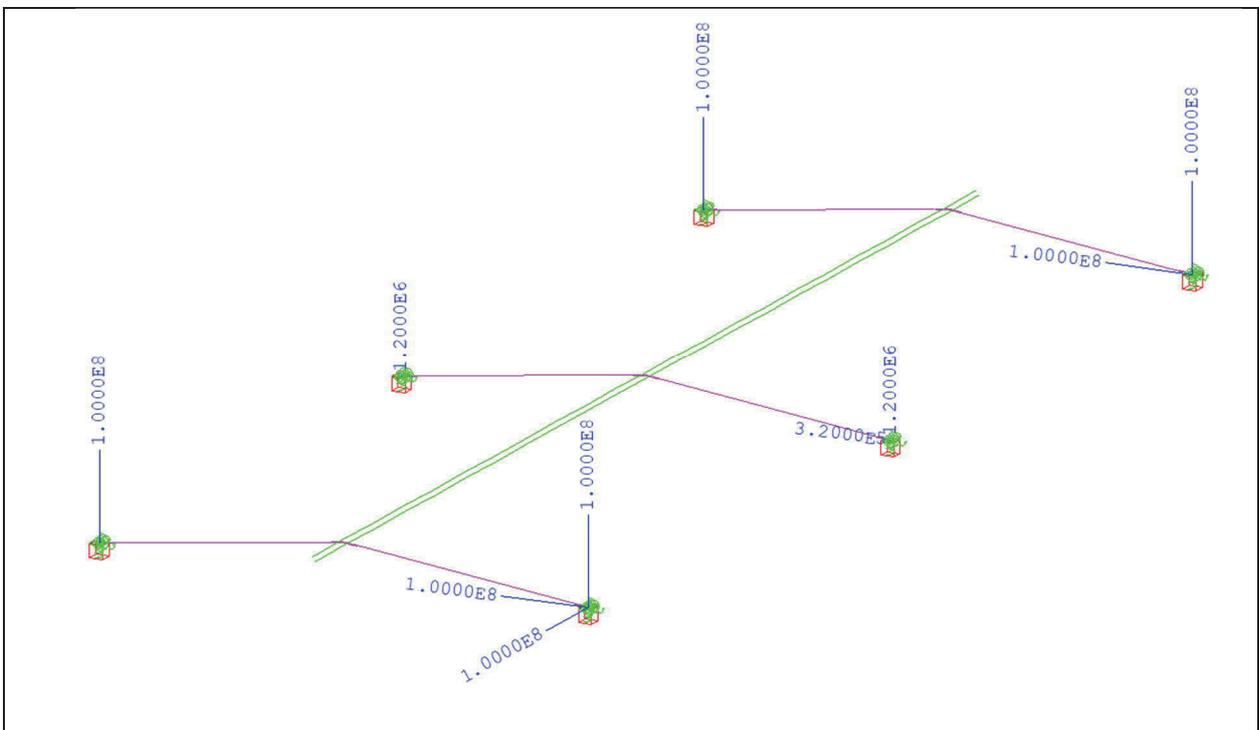


Bild F4: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, maximale statische Federkonstante [kN/m]

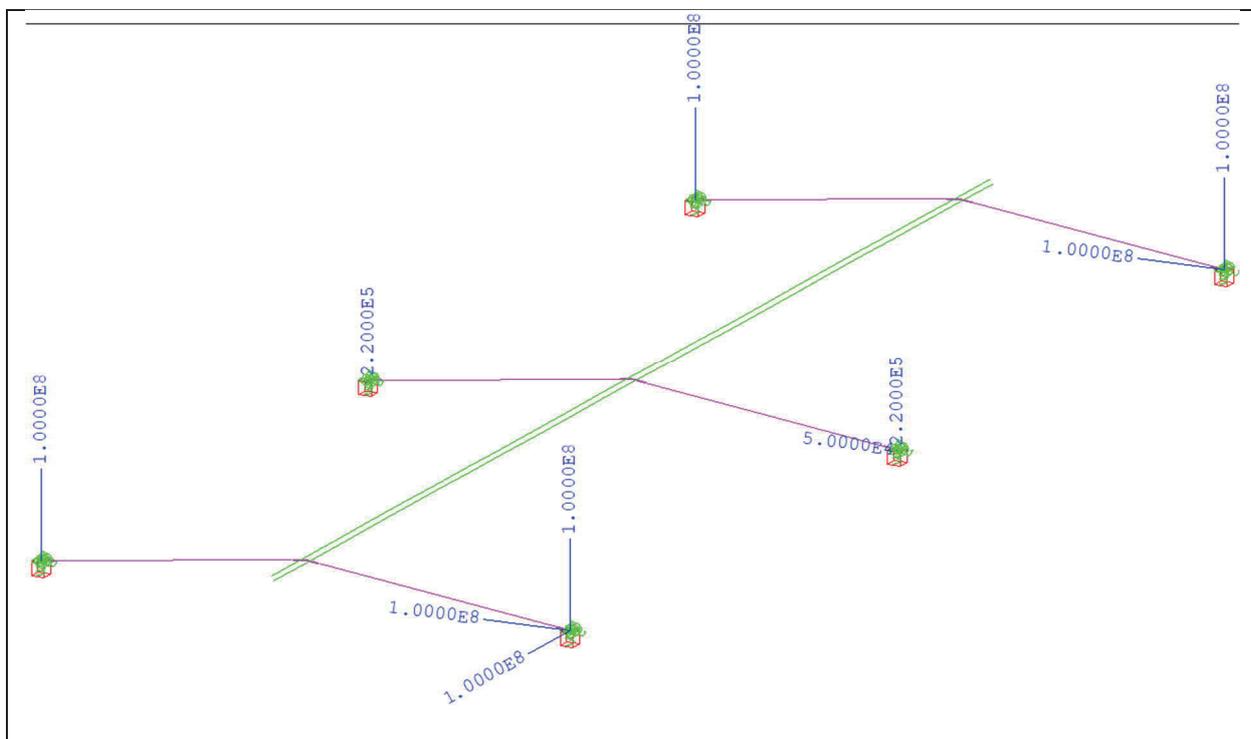


Bild F5: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, minimale statische Federkonstante [kN/m]

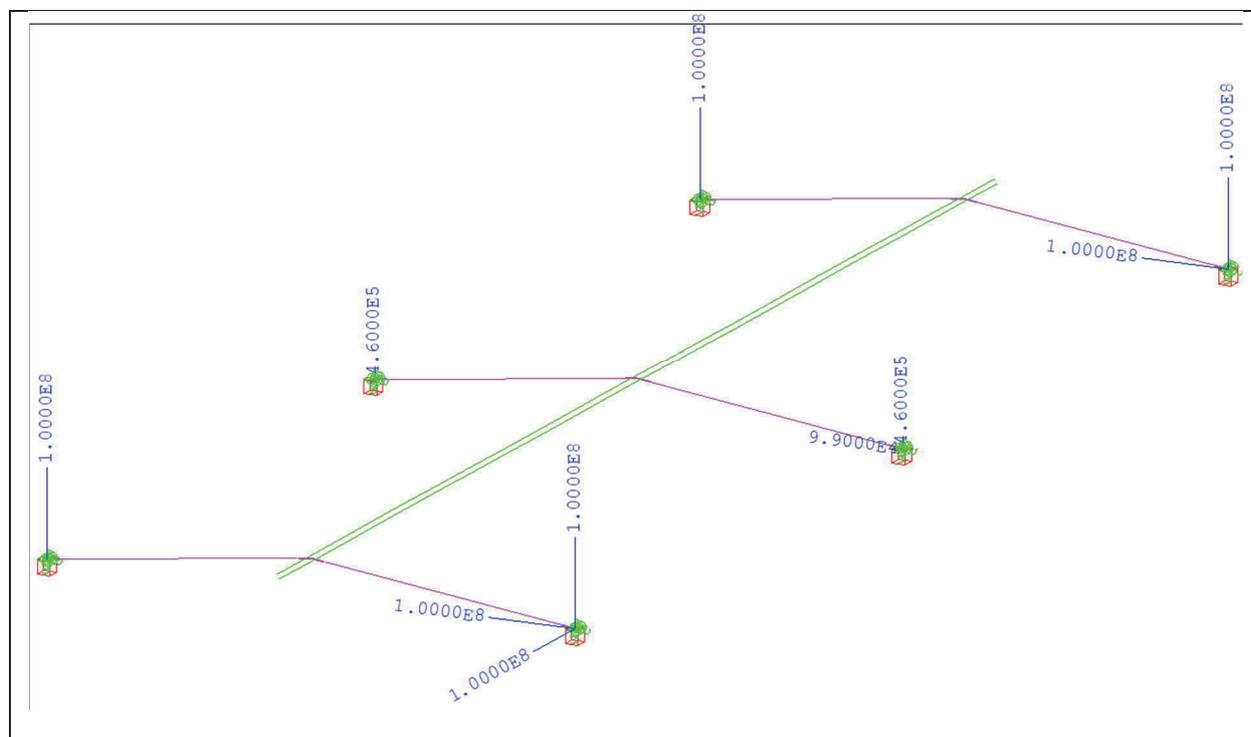


Bild F6: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, maximale statische Federkonstante [kN/m]

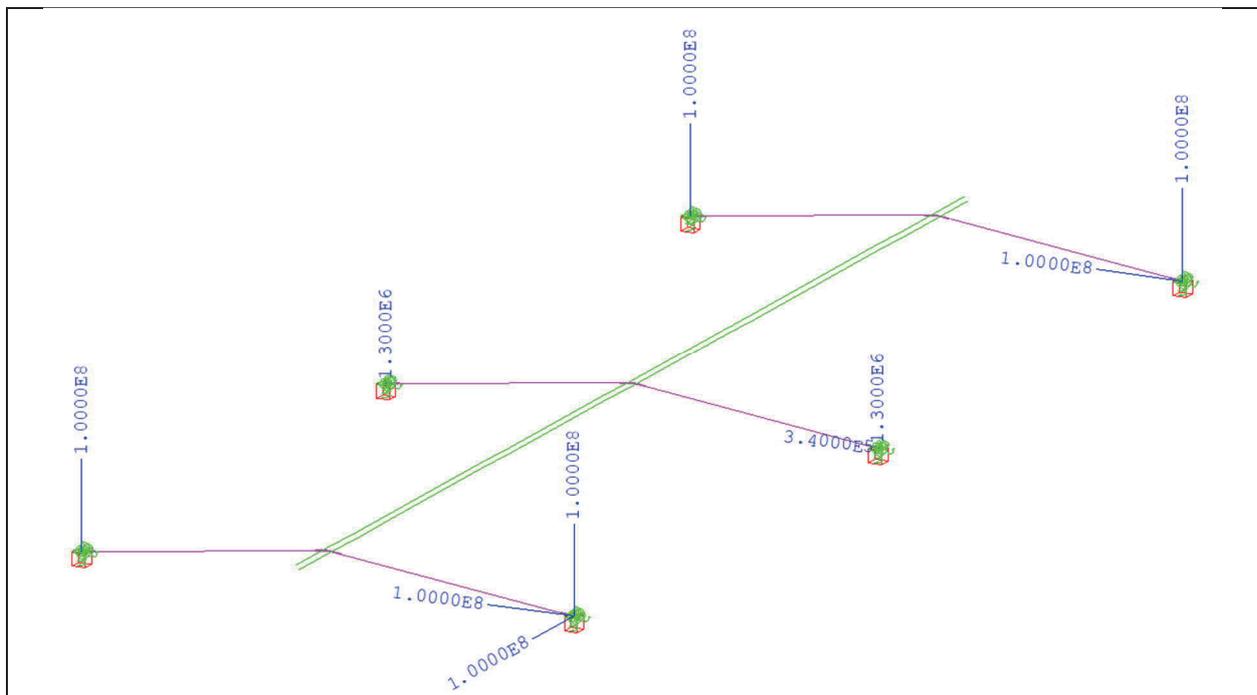


Bild F7: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, minimale dynamische Federkonstante [kN/m]

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt.

Das Konstruktionseigengewicht der Stahlträger wird programmintern mit einer Wichte von $78,5 \text{ kN/m}^3$ ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität als Linienlast in der Stabachse angeordnet.

Querträger:

Da sowohl ein Stahlbeton- als auch ein Stahlquerträger verwendet werden kann, wird die gleiche Belastung wie für den Betonträger angesetzt. Das noch nicht berücksichtigte Eigengewicht der Querträger beim Plattenbalkenquerschnitt wird bei den Ausbaulasten als Punktlast mitberücksichtigt. Die Breite der Querträger wird mit 2 m angenommen. Damit ergibt sich ein Zusatzgewicht zwischen den Stegen in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe von

$$\text{ca. } 25 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * (h_k - 0,45 \text{ m}) * 2 \text{ m} = 250 \text{ kN/m} * (h_k - 0,45 \text{ m}).$$

Der Überstand von 1 m an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Fahrbahnbelag:

$$g_{k,\text{Belag}} = 2,5 * 13 \text{ m} = 32,5 \text{ kN/m}$$

Kappe:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 23,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,2} = 32,5 \text{ kN/m} + 23,0 \text{ kN/m} = 55,5 \text{ kN/m}$$

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 \times 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

Grundlast: $3,0 \text{ kN/m}^2 \times 16,6 \text{ m} = 49,8 \text{ kN/m}$ ($e_y = 0 \text{ m}$)

Überlast Hauptspur: $9,0 \text{ kN/m}^2 \times 3,0 \text{ m} = 27,0 \text{ kN/m}$ ($e_y = 5,0 \text{ m}$)

Überlast Nebenspur: $3,0 \text{ kN/m}^2 \times 3,0 \text{ m} = 9,0 \text{ kN/m}$ ($e_y = 2,0 \text{ m}$)

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

HS: $4 * 150 \text{ kN}$ ($e_y = 6,0 \text{ m}$; $e_y = 4,0 \text{ m}$)

NS1: $4 * 100 \text{ kN}$ ($e_y = 3,0 \text{ m}$; $e_y = 1,0 \text{ m}$)

NS2: $4 * 50 \text{ kN}$ ($e_y = 0,0 \text{ m}$; $e_y = -2,0 \text{ m}$)

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist.

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3,6 \times L_{\text{ges}} < 900 \text{ kN}$ und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{e,\min} = -24 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$$

$$T_{e,\max} = 37 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = 41 \text{ °C}$$

$$T_{N,\text{con}} = -10 - 20 = -30 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{N,\text{exp}} = 41 - 10 = 31 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{M,\text{heat}} = 15 \text{ °C} \times 1,0 = 15 \text{ °C} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

$$T_{M,\text{cool}} = 18 \text{ °C} \times 1,0 = 18 \text{ °C} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

Wind

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 0,18 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow$ vereinfachend $w = 0,60 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 2,08 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$

Anpralllasten auf Fahrzeurückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeurückhaltesysteme berücksichtigt.

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild F8: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitt 7.5

Mindestbewehrung

Flächige Mindestbewehrung

Es kann davon ausgegangen werden, dass oben und unten je Ø12 /15 eingelegt sind. Daraus ergibt sich folgende absolute Bewehrung:

Oben: $A_{s,min,o} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 15,5 = 123,7 \text{ cm}^2$

Unten: $A_{s,min,u} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 2,4 \times 2 = 36,2 \text{ cm}^2$

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

- Längsbewehrung unten (Rang 1)
- Längsbewehrung oben (Rang 2)
- Auflagerfederkräfte
- Verschiebungen am Längsauflager

Ergebnisse s. Excel

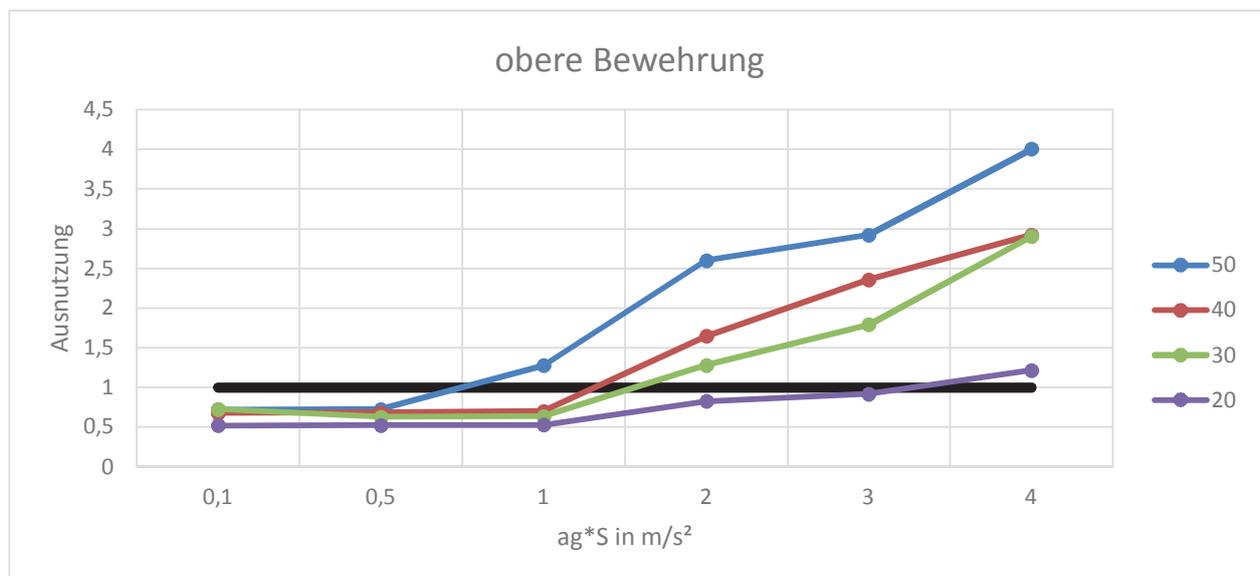
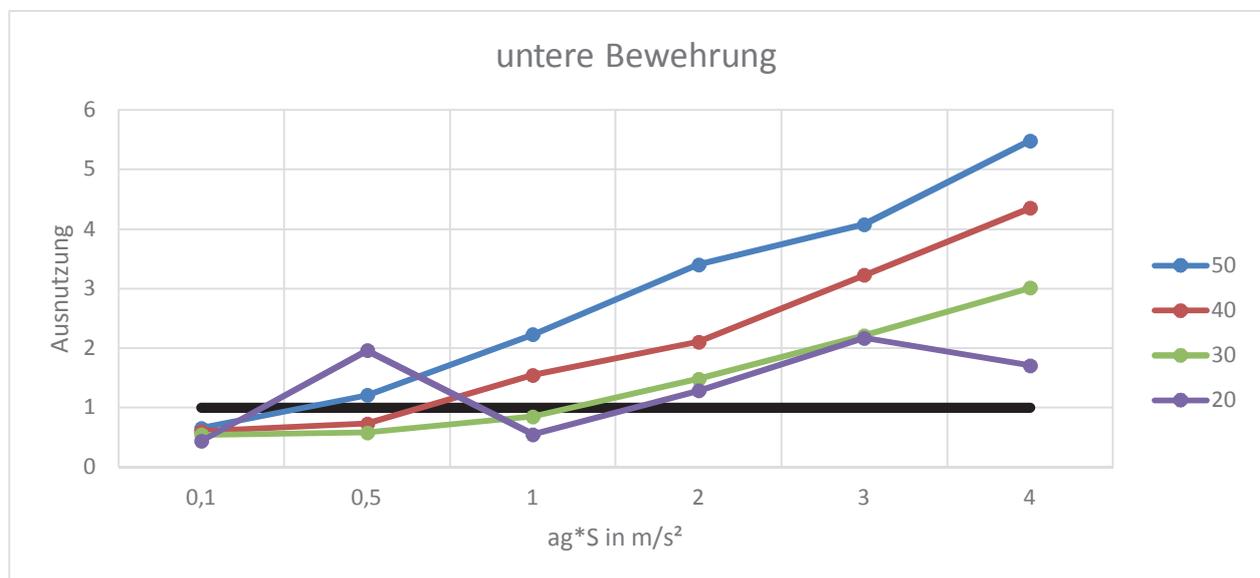
Die erforderliche Schubbewehrung ergibt sich aus der Mindestquerkraftbewehrung sowie aus der erforderlichen Bewehrung für den Schubabtrag. Bei einem Einfeldträger tritt der größte Schub in der Regel im Bereich der Auflager auf. Da in diesem Abschnitt die Auflagerfedern beurteilt werden, kann auf eine gesonderte Betrachtung der Schubbewehrung verzichtet werden.

Die Ergebnisse sind einhüllend für die Modelle mit der minimalen und der maximalen Bettung.

Längsbewehrung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$

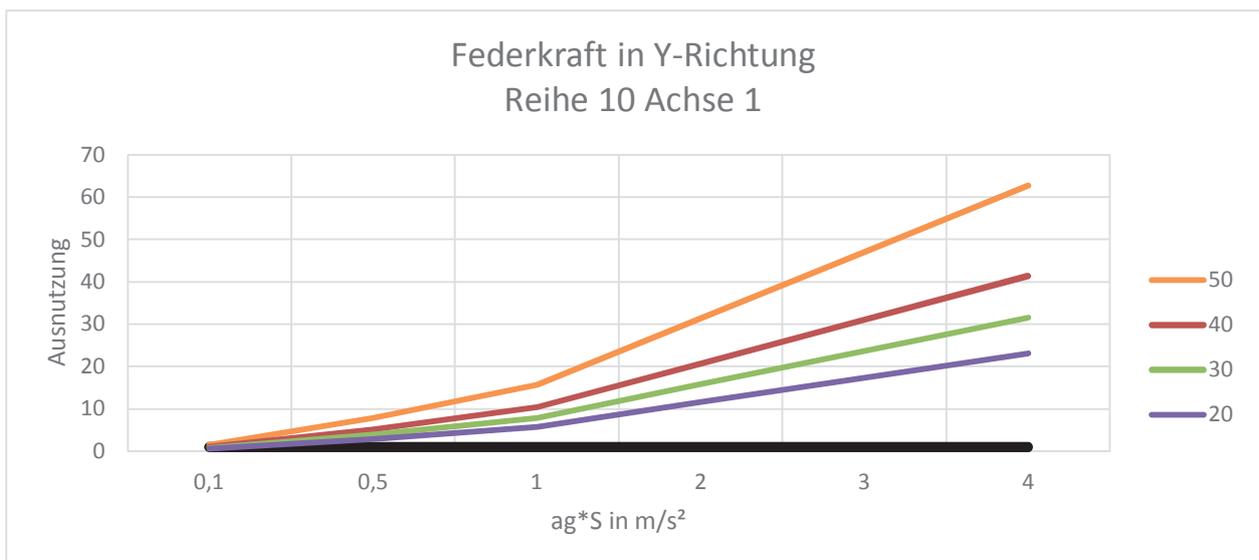
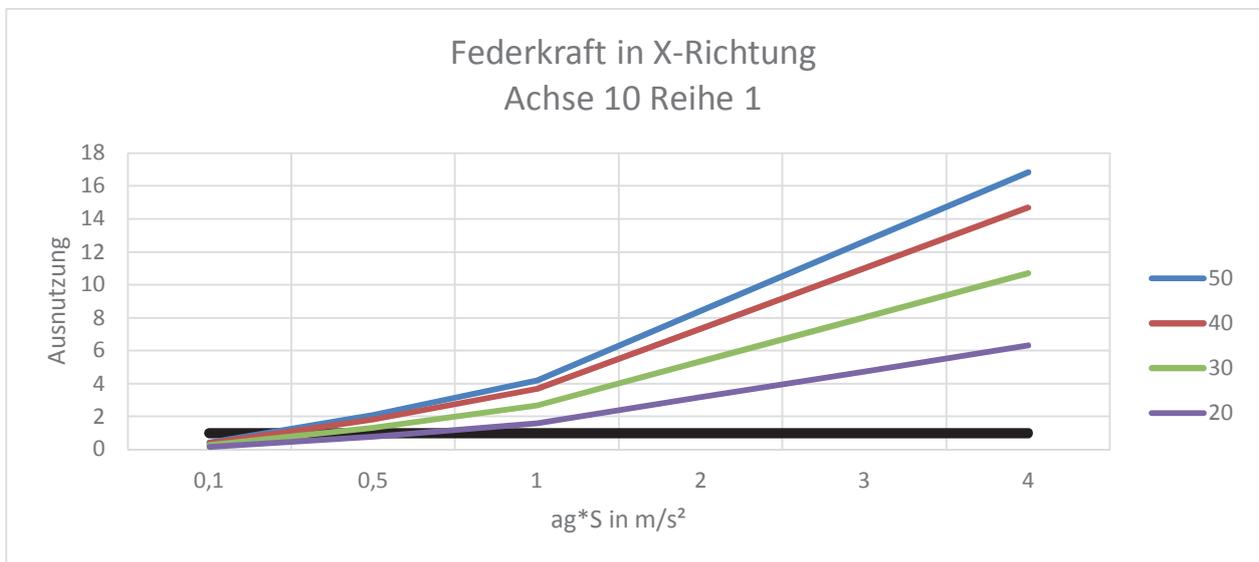


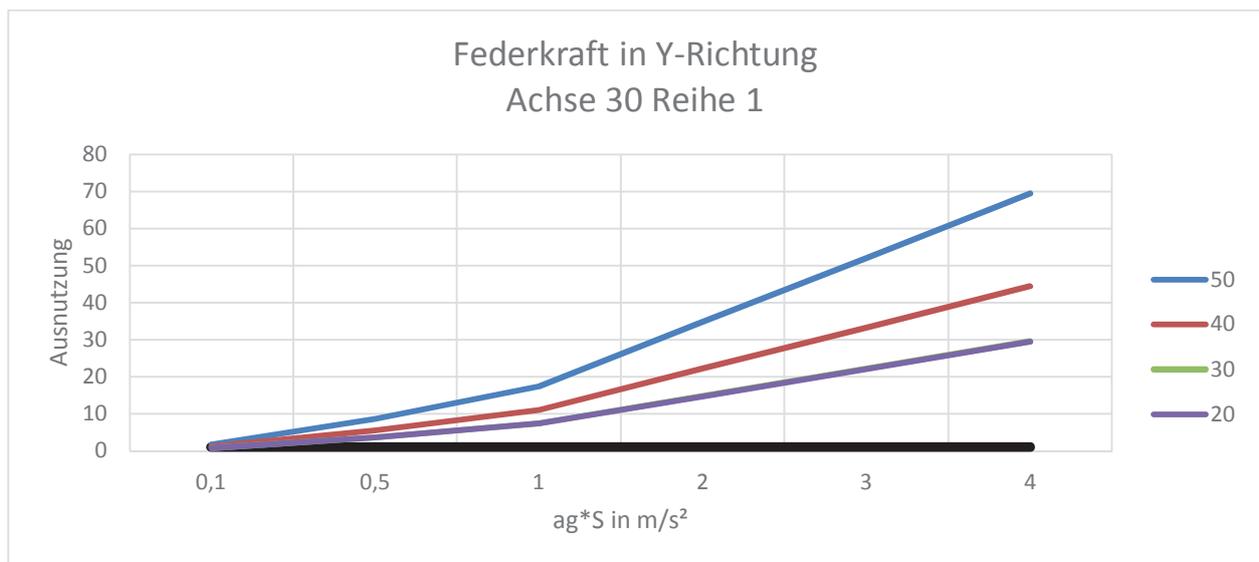
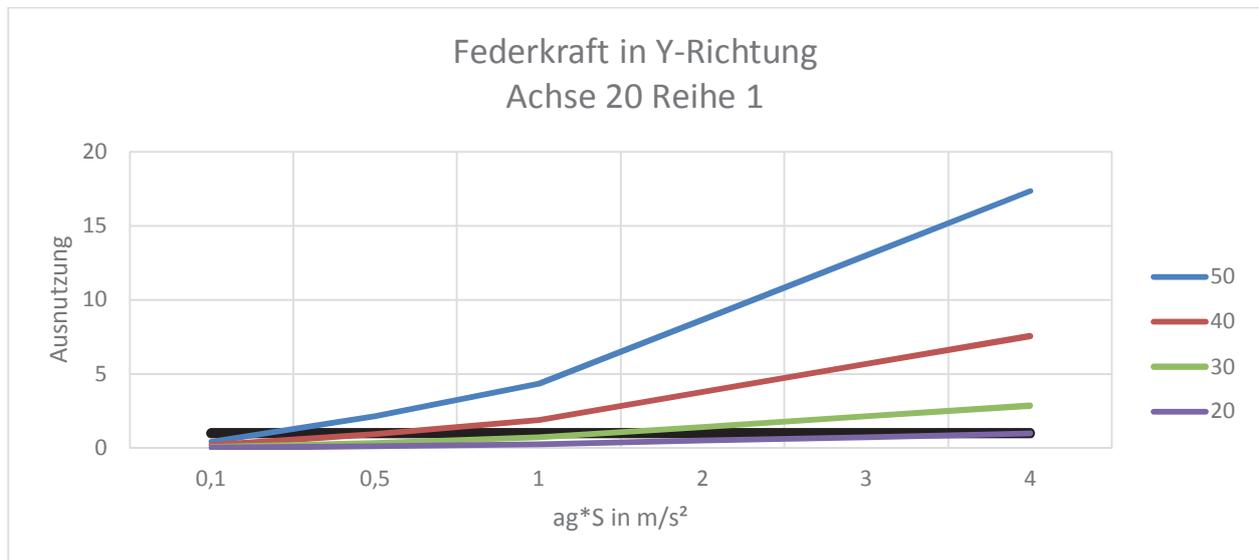
Auflagerfederkräfte

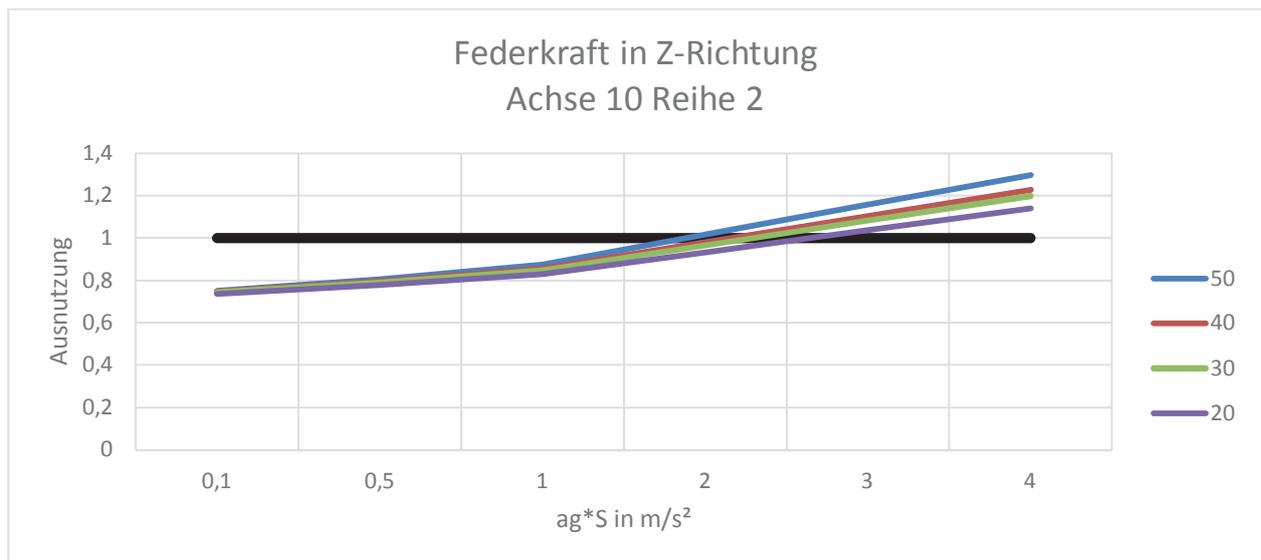
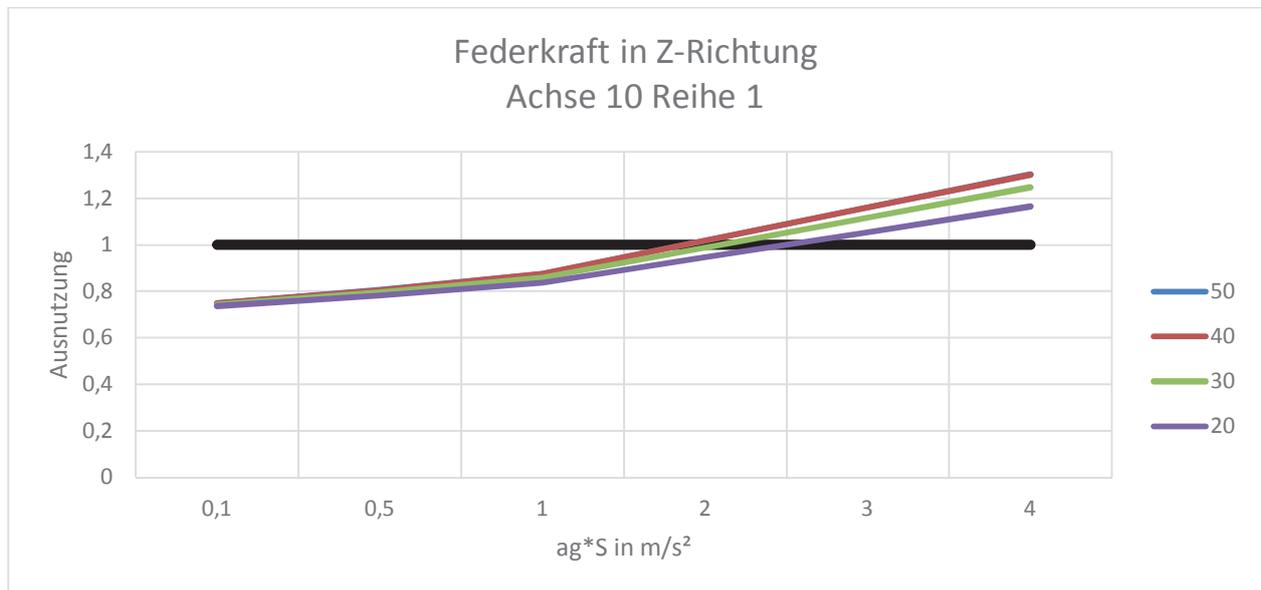
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

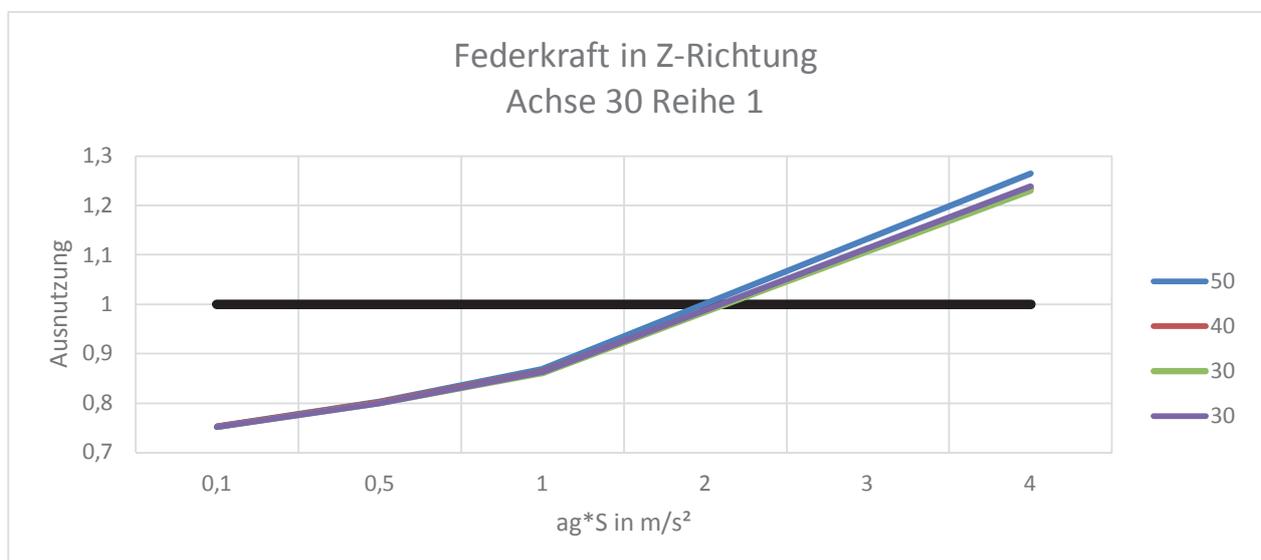
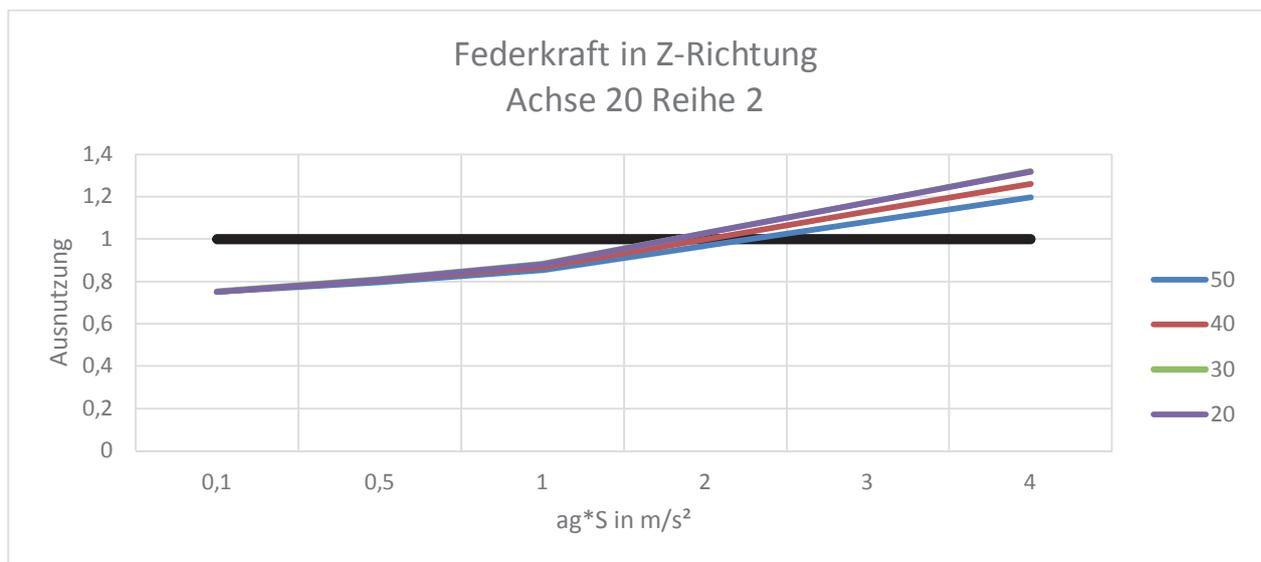
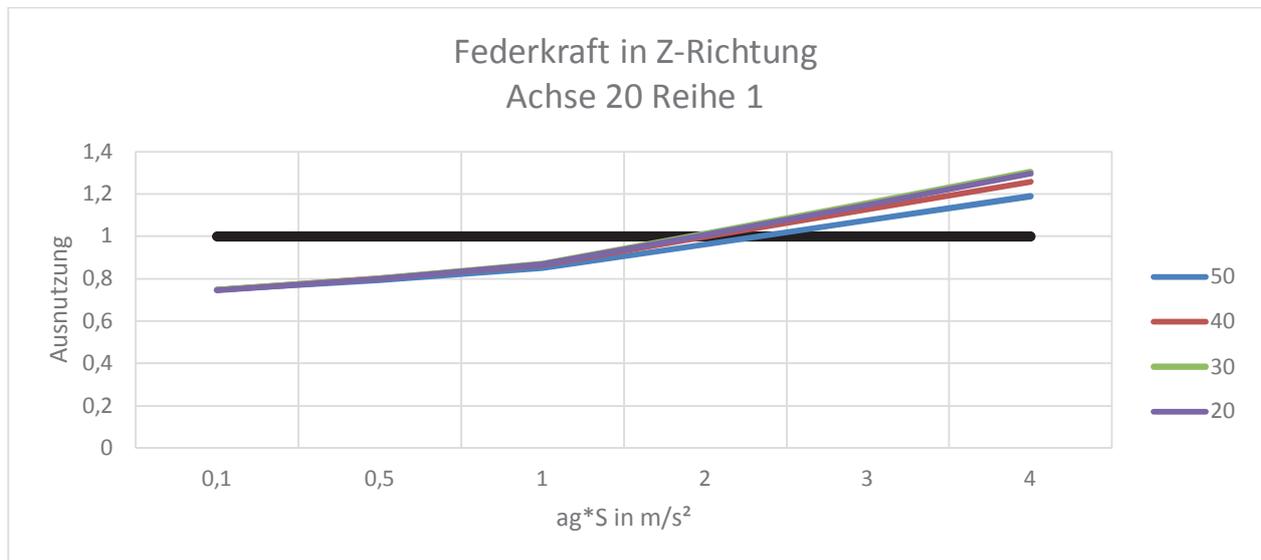
$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

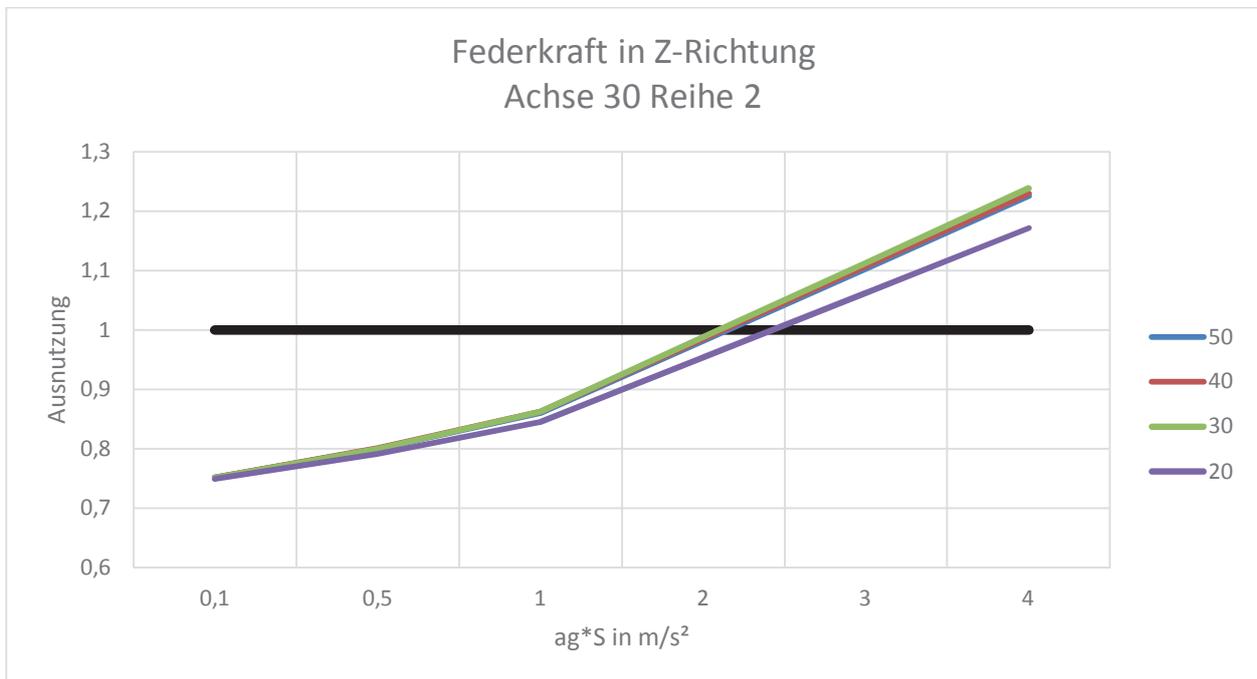
Mit $i = X; Y; Z$



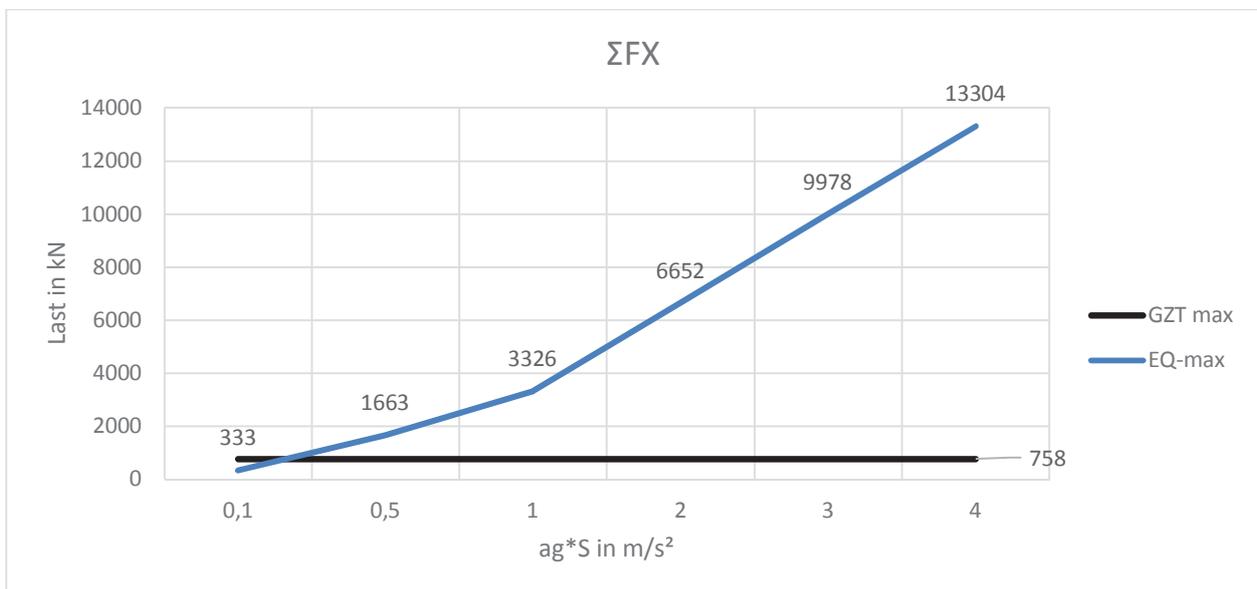


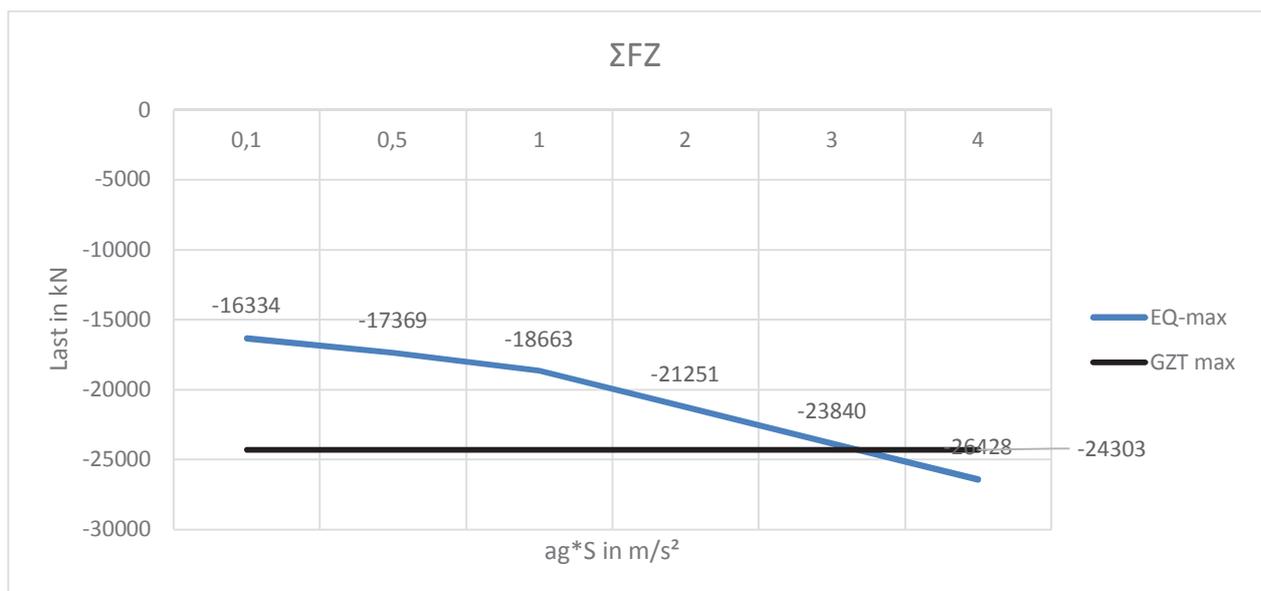
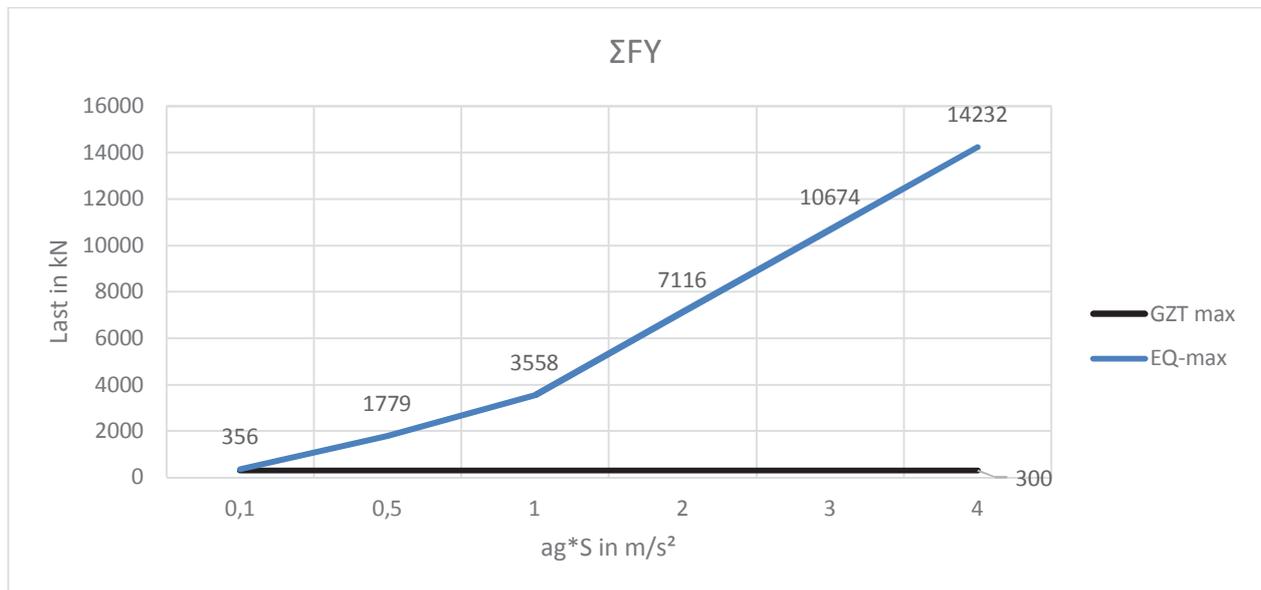






Exemplarisch werden in den nachfolgenden Diagrammen die Zahlenwerte der Federkraft für das Modell mit einer Stützweite von $L = 50$ m und der maximal berücksichtigten Bettung an der Mittelstütze angegeben.



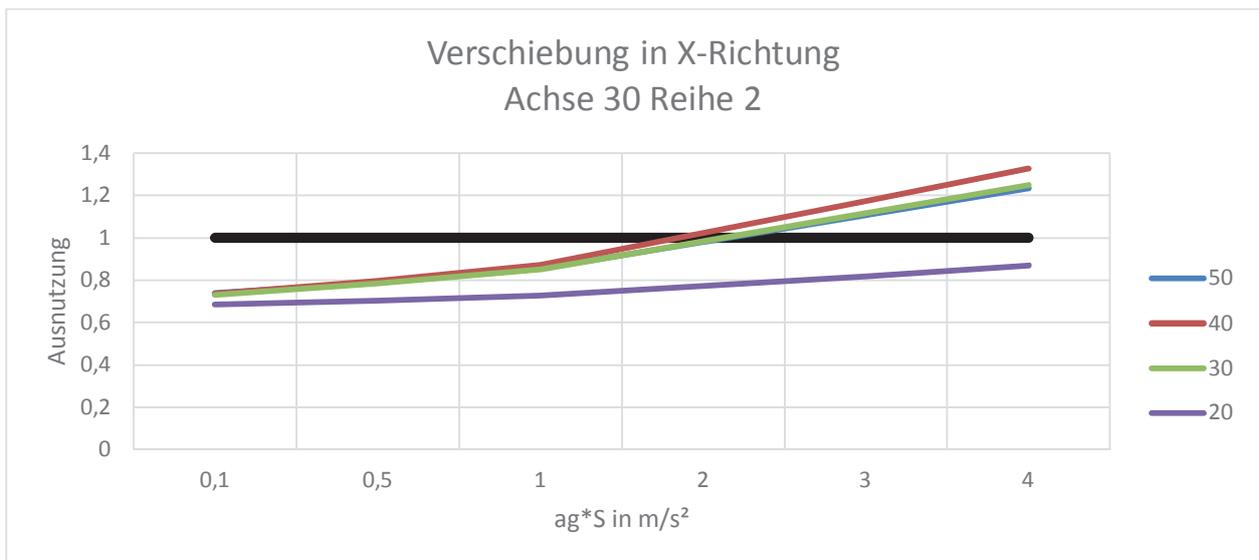
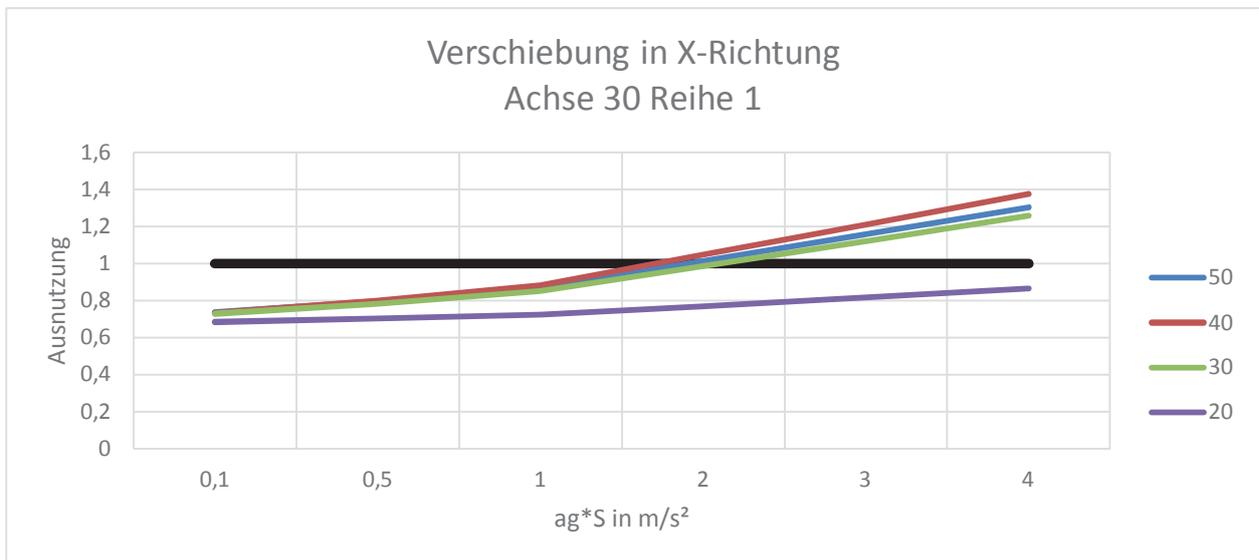


Verschiebung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerverschiebungen, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerverschiebungen, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{u_{i,\text{Erdbeben}}}{u_{i,\text{GZT}}}$$

Mit $i = X; Y; Z$



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Auflagerlasten im Betrieb die horizontalen Auflagerlasten unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50	0,5	0,5
40	0,5	0,5
30	0,5	1,0
20	0,5	1,0

Tabelle F1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //15

Die Berechnung wurde für das größten Schlankheitsverhältnis //15 durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind nicht für geringere Schlankheitsverhältnisse abdeckend. Die aus einem geringen Schlankheitsverhältnis resultierende Konstruktionshöhe führt zu einer Erhöhung der Masse. Durch die höhere Masse erhöht sich die auf die Brücke wirkende Erdbebenbelastung.

Bei einem Schlankheitsverhältnis von //10 erhöht sich die Konstruktionshöhe um den Faktor 1,5. Daher werden die Ergebnisse für das Schlankheitsverhältnis durch den Faktor 1,5 dividiert.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50	0,5	0,5
40	0,5	0,5
30	0,5	0,5
20	0,5	0,5

Tabelle C2: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //10

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden. Nachfolgend werden noch zusätzliche Regeln festgelegt, die nur für bestimmte Brückenlängen und bestimmte $a_g \cdot S$ – Werte gelten.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_X \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_Y \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G_1 + G_2 + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

Anhang G: Brückentyp 2.2

Systembeschreibung

Entwurfparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbalken (s. Bild G1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Mehrfeldrig (s. Bild G2)</i>
Anzahl der Felder	2
Material des Überbaus	<i>Spannbeton</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i> <i>Spannstahl: Y 1770</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild G1</i>
Anzahl der Stege	2
Bauwerkslänge	$L \leq 80 \text{ m}$
Verhältnis der Stützweiten	1:1
Konstruktionshöhe	$> L/20$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ durchgehend vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i>

- Vorspannung über 2 Spannglieder mit einer Vorspannung wie nachfolgend beschrieben. Ersatzsteifigkeit der Stütze im Bereich zwischen den Werten in Abschnitt 7.8.2

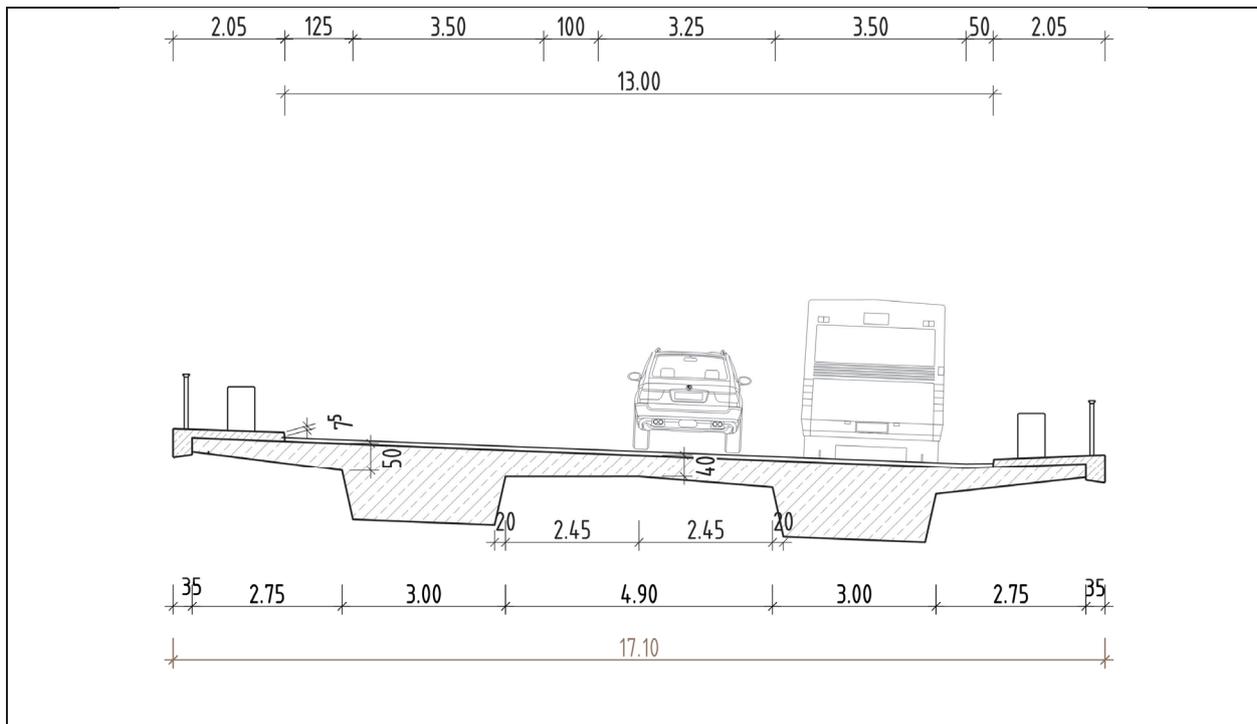


Bild G1: Querschnittswerte /30/

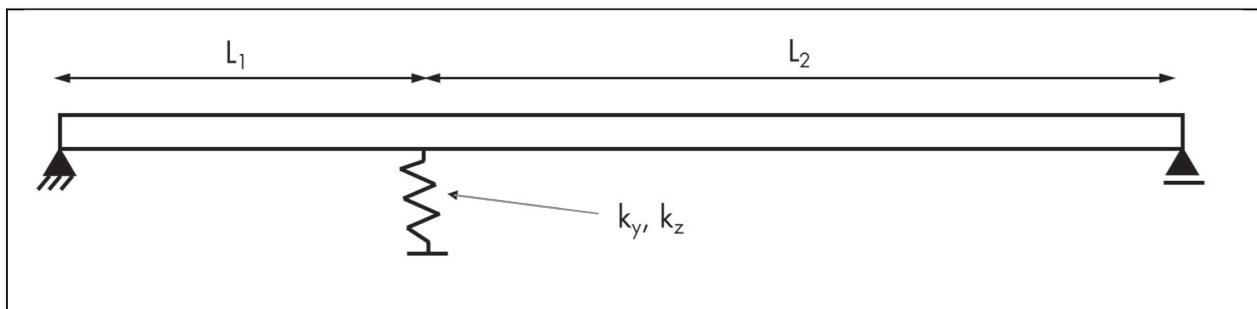


Bild G2: Statisches System

Modellierung

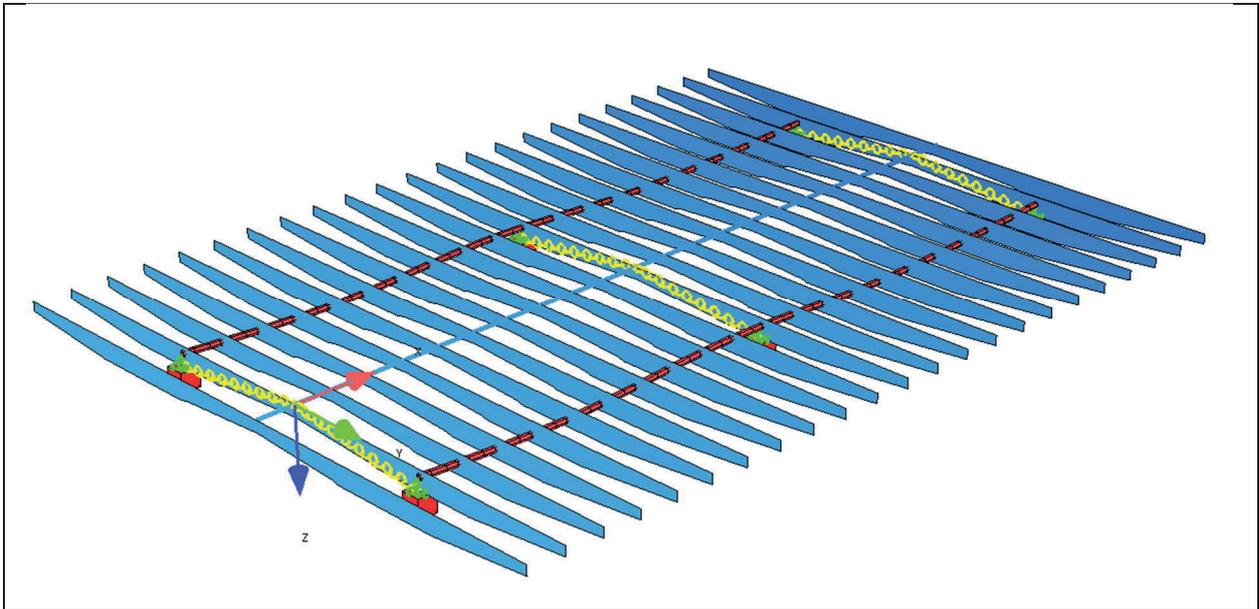


Bild G3: Modell

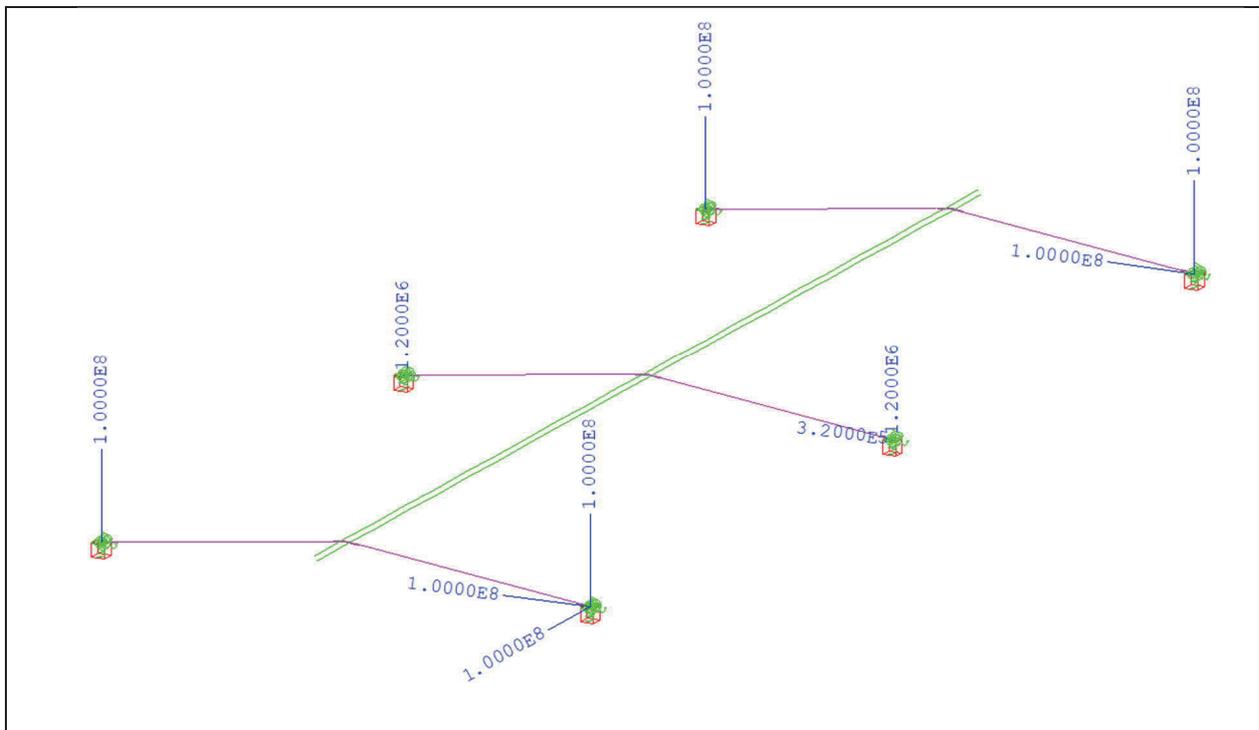


Bild G4: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, maximale statische Federkonstante [kN/m]

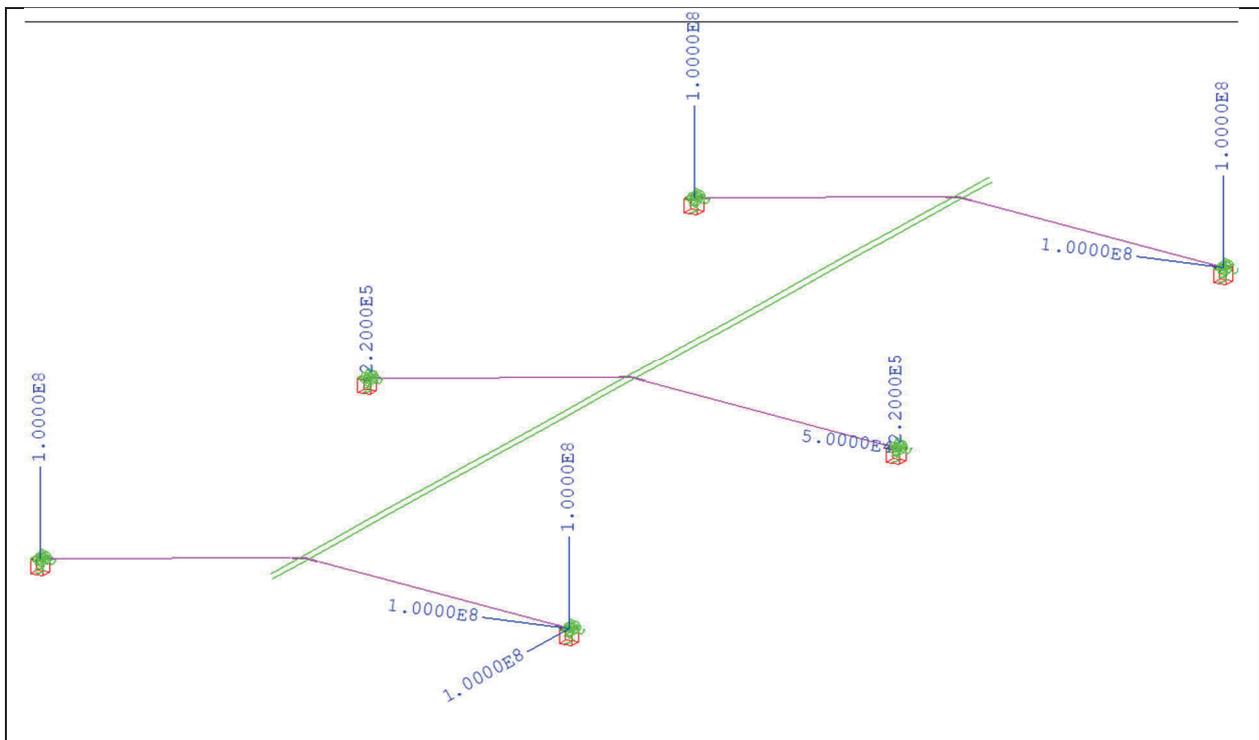


Bild G5: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, minimale statische Federkonstante [kN/m]

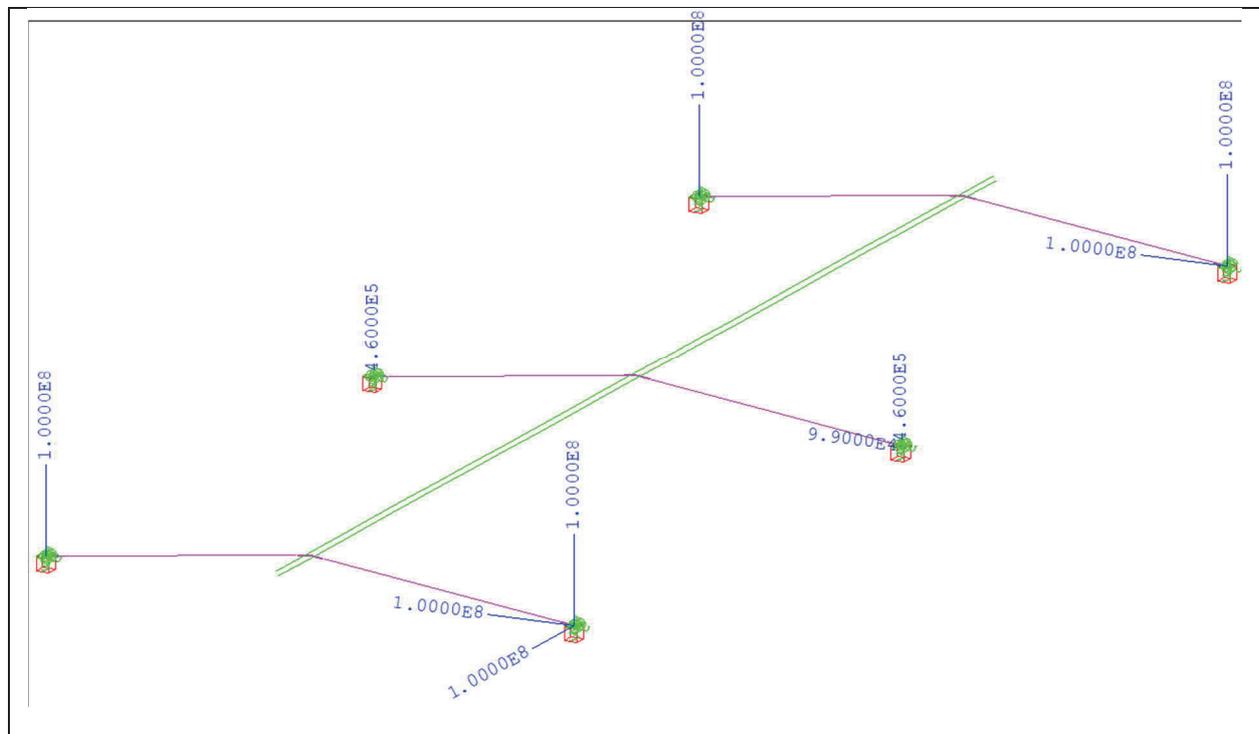


Bild G6: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, maximale statische Federkonstante [kN/m]

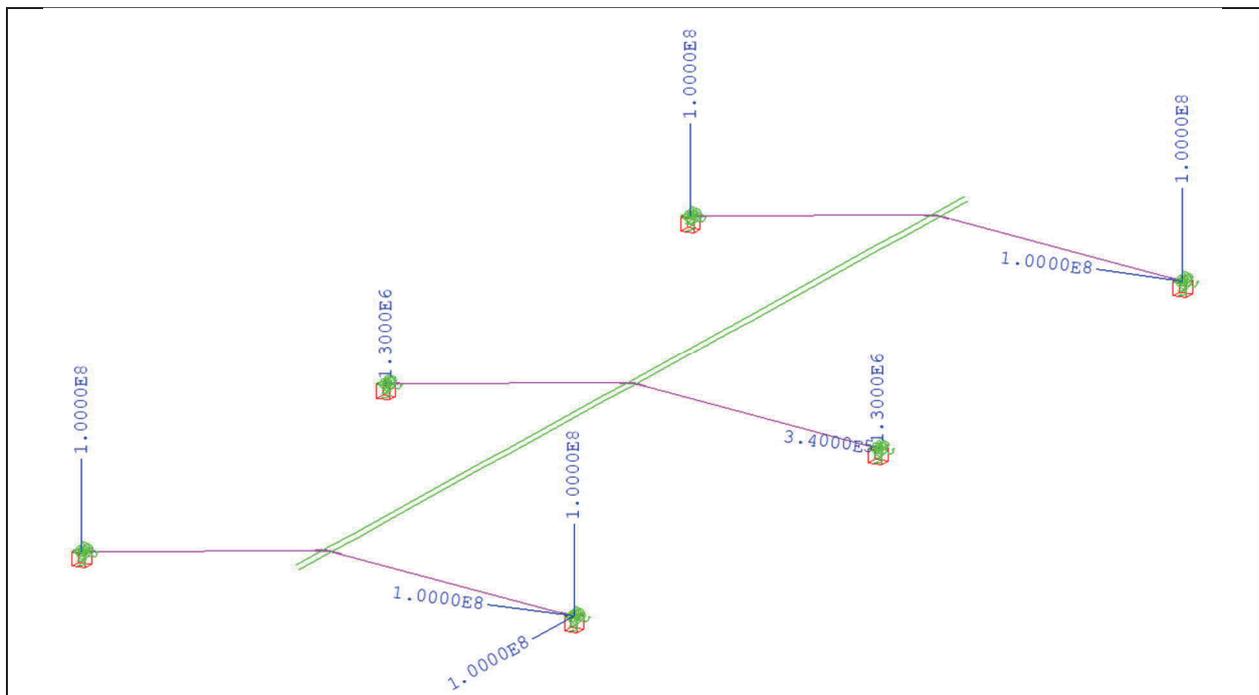


Bild G7: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, minimale dynamische Federkonstante [kN/m]

Vorspannung

In Bild G8 ist der Spanngliedverlauf für die betrachtete Spannbetonbrücke mit $L = 40$ m exemplarisch dargestellt. Für die anderen Längen wurde der Verlauf auf die Konstruktionshöhe und die Länge entsprechend angepasst.

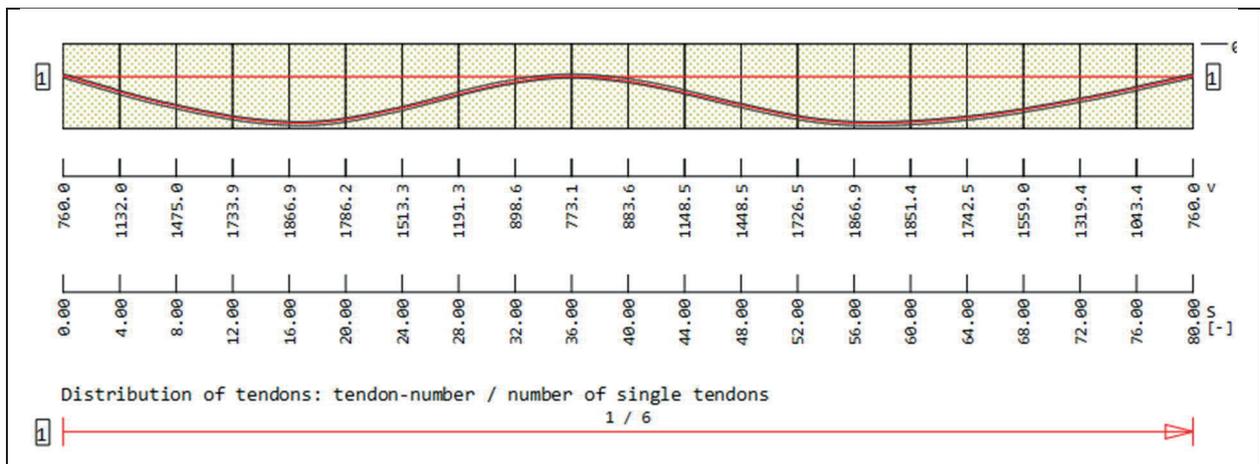


Bild G8: Spanngliedverlauf

Vorspannkraft:	5 MPa = 5000 kN/m ² in Abhängigkeit der Querschnittsfläche des Betons
μ aus Überlastung	0,2
μ aus Nachlassen	0,2
Umlenkfaktor	$\beta = 0,3$ °/m
Keilschlupf am vorgespannten Anker	3,0 mm
Verluste am vorgespannten Anker	0,8 %
Keilschlupf am nicht vorgespannten Anker	4,0 mm
Verluste am nicht vorgespannten Anker	0,0 %
Keilschlupf am Koppler	3,0 mm
Verluste am Koppler	1,0 %

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m³ ermittelt.

Das Konstruktionseigengewicht der Stahlträger wird programmintern mit einer Wichte von 78,5 kN/m³ ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität als Linienlast in der Stabachse angeordnet.

Querträger:

Da sowohl ein Stahlbeton- als auch ein Stahlquerträger verwendet werden kann, wird die gleiche Belastung wie für den Betonträger angesetzt. Das noch nicht berücksichtigte Eigengewicht der Querträger beim Plattenbalkenquerschnitt wird bei den Ausbaulasten als Punktlast mitberücksichtigt. Die Breite der Querträger wird mit 2 m angenommen. Damit ergibt sich ein Zusatzgewicht zwischen den Stegen in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe von

$$\text{ca. } 25 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * (h_k - 0,45 \text{ m}) * 2 \text{ m} = 250 \text{ kN/m} * (h_k - 0,45 \text{ m})$$

Der Überstand von 1 m an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Fahrbahnbelag:

$$g_{k, \text{Belag}} = 2,5 * 13 \text{ m} = 32,5 \text{ kN/m}$$

Kappe:

$$g_{k, \text{Kappe}} = 23,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,2} = 32,5 \text{ kN/m} + 23,0 \text{ kN/m} = 55,5 \text{ kN/m}$$

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von 2,5 kN/m² x 1,2 wird zwischen den Geländern auf einer Breite von (17,1 – 2x0,25 m) = 16,6 m angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

$$\text{Grundlast: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 16,6 \text{ m} = 49,8 \text{ kN/m} \quad (e_y = 0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Hauptspur: } 9,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 27,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 5,0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Nebenspur: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 9,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 2,0 \text{ m})$$

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

$$\text{HS: } 4 * 150 \text{ kN} \quad (e_y = 6,0 \text{ m}; e_y = 4,0 \text{ m})$$

$$\text{NS1: } 4 * 100 \text{ kN} \quad (e_y = 3,0 \text{ m}; e_y = 1,0 \text{ m})$$

$$\text{NS2: } 4 * 50 \text{ kN} \quad (e_y = 0,0 \text{ m}; e_y = -2,0 \text{ m})$$

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist.

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3,6 \times L_{\text{ges}} < 900 \text{ kN}$ und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{e,\text{min}} = -24 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$$

$$T_{e,\text{max}} = 37 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = 41 \text{ °C}$$

$$T_{N,\text{con}} = -10 - 20 = -30 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{N,\text{exp}} = 41 - 10 = 31 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{M,\text{heat}} = 15 \text{ °C} \times 1,0 = 15 \text{ °C} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

$$T_{M,\text{cool}} = 18 \text{ °C} \times 1,0 = 18 \text{ °C} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

Wind

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (hk + 0,18 \text{ m}) \quad e_z = (hk + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow \text{vereinfachend } w = 0,60 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 2,08 \text{ m}) \quad e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild G9: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitt 7.5

Mindestbewehrung

Flächige Mindestbewehrung

Es kann davon ausgegangen werden, dass oben und unten je Ø12 /15 eingelegt sind. Daraus ergibt sich folgende absolute Bewehrung:

Oben: $A_{s,min,o} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 16,2 = 122,1 \text{ cm}^2$

Unten: $A_{s,min,u} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 2,4 \times 2 = 36,2 \text{ cm}^2$

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

- Längsbewehrung unten (Rang 1)
- Längsbewehrung oben (Rang 2)
- Auflagerfederkräfte
- Verschiebungen am Längsauflager

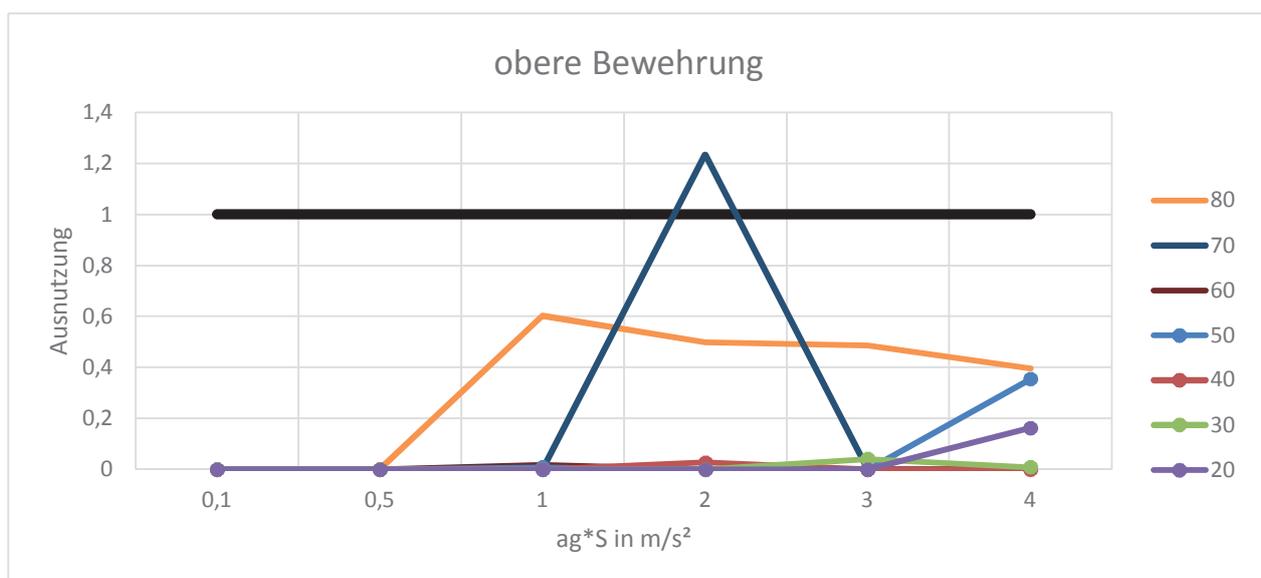
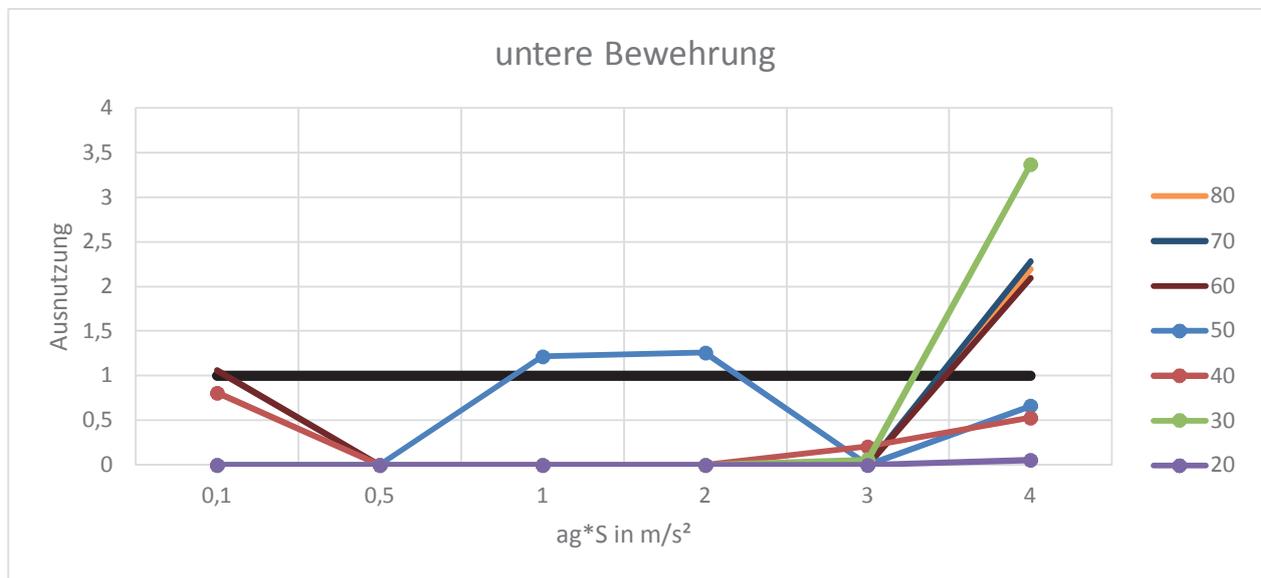
Die erforderliche Schubbewehrung ergibt sich aus der Mindestquerkraftbewehrung sowie aus der erforderlichen Bewehrung für den Schubabtrag. Bei einem Einfeldträger tritt der größte Schub in der Regel im Bereich der Auflager auf. Da in diesem Abschnitt die Auflagerfedern beurteilt werden, kann auf eine gesonderte Betrachtung der Schubbewehrung verzichtet werden.

Die Ergebnisse sind einhüllend für die Modelle mit der minimalen und der maximalen Bettung.

Längsbewehrung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$

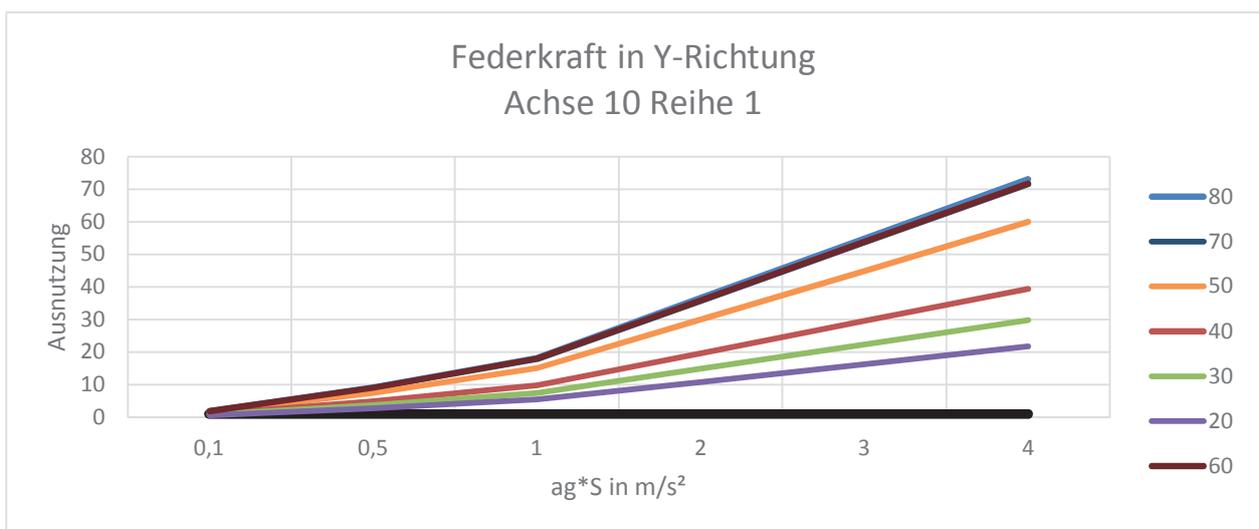
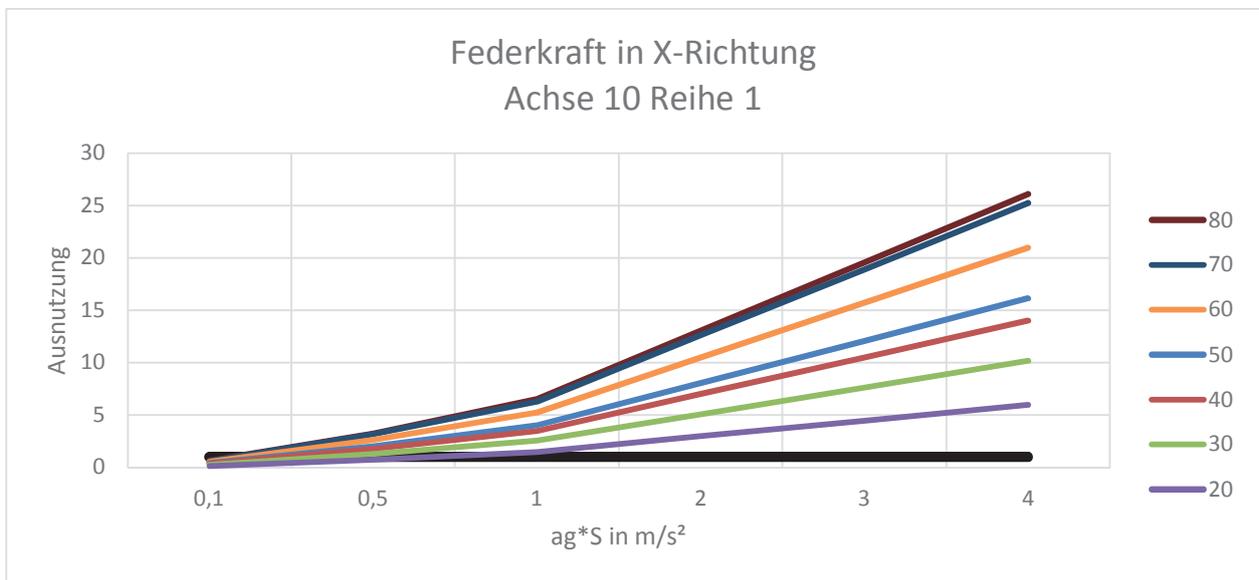


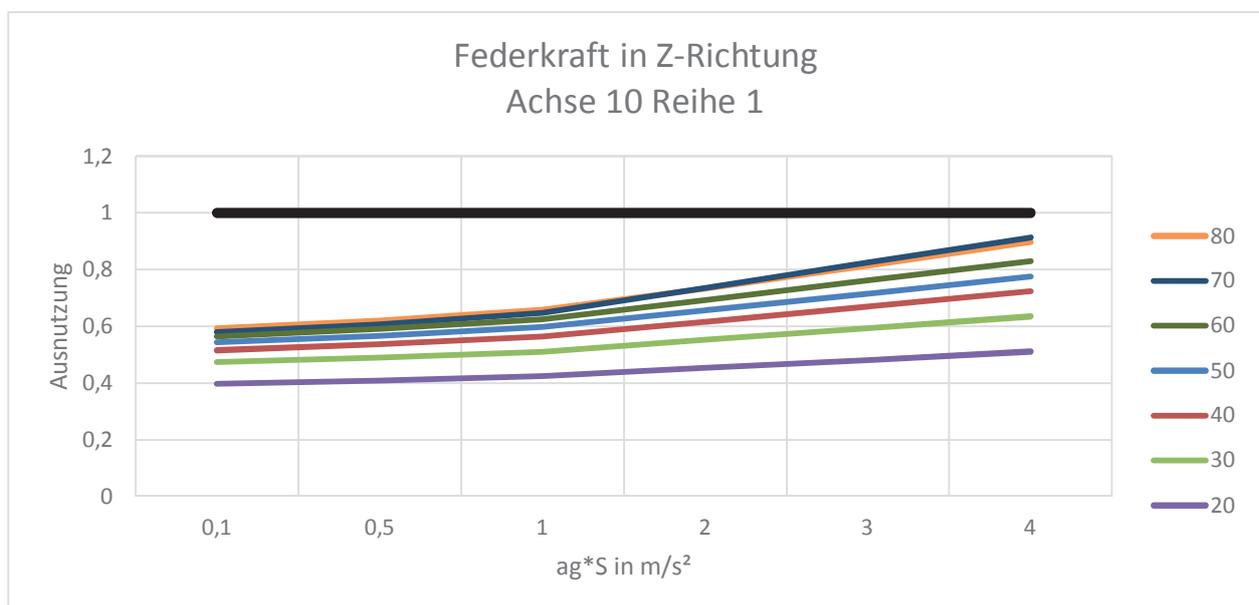
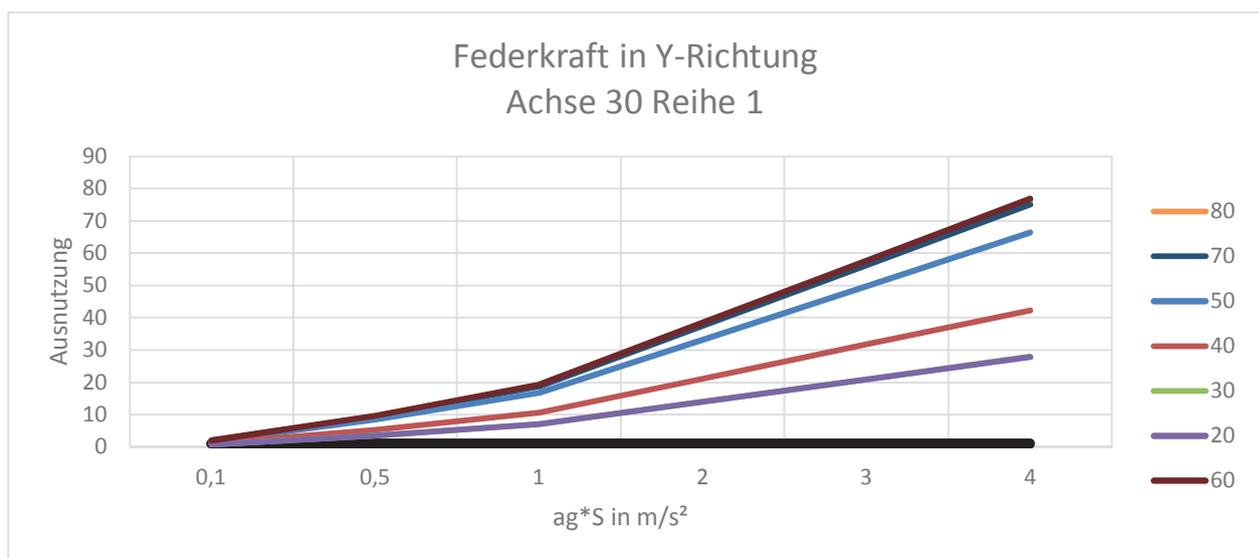
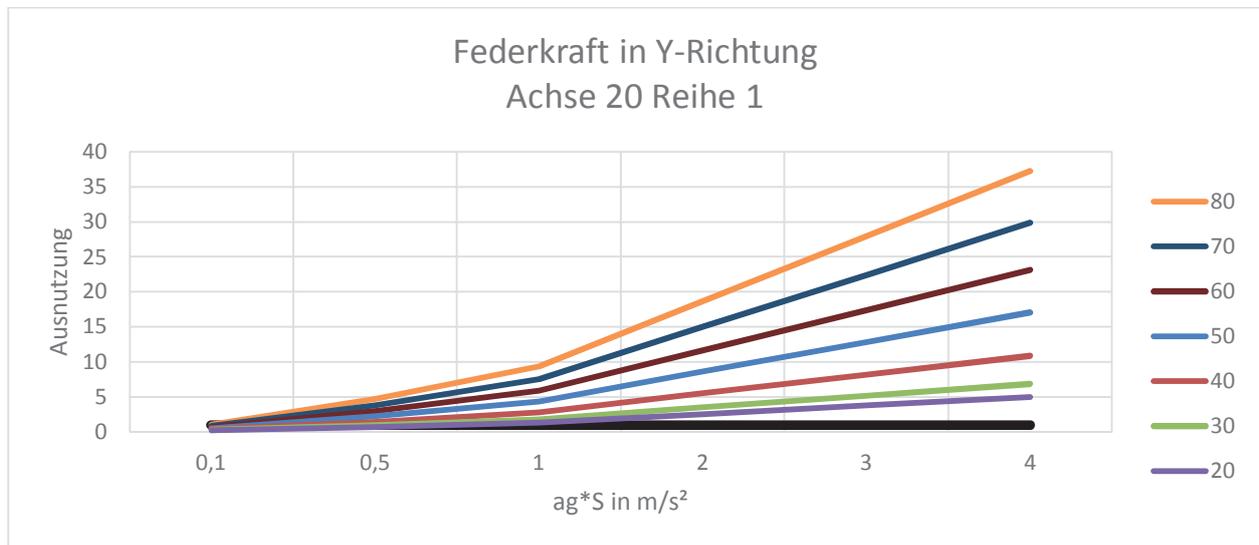
Auflagerfederkräfte

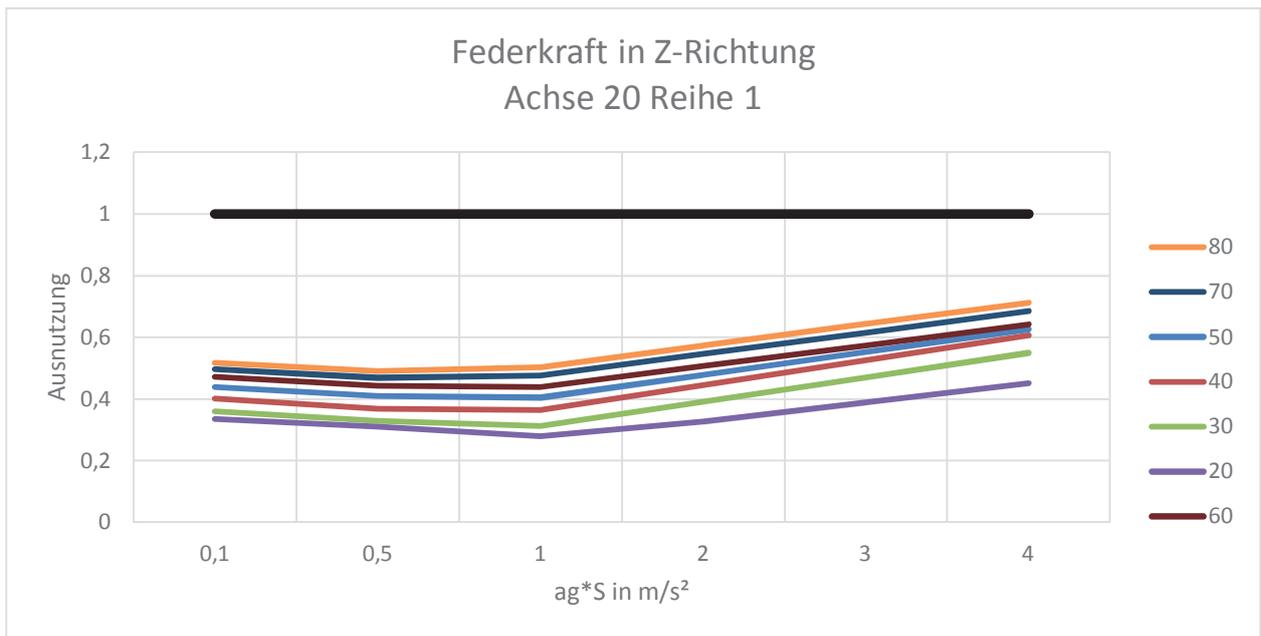
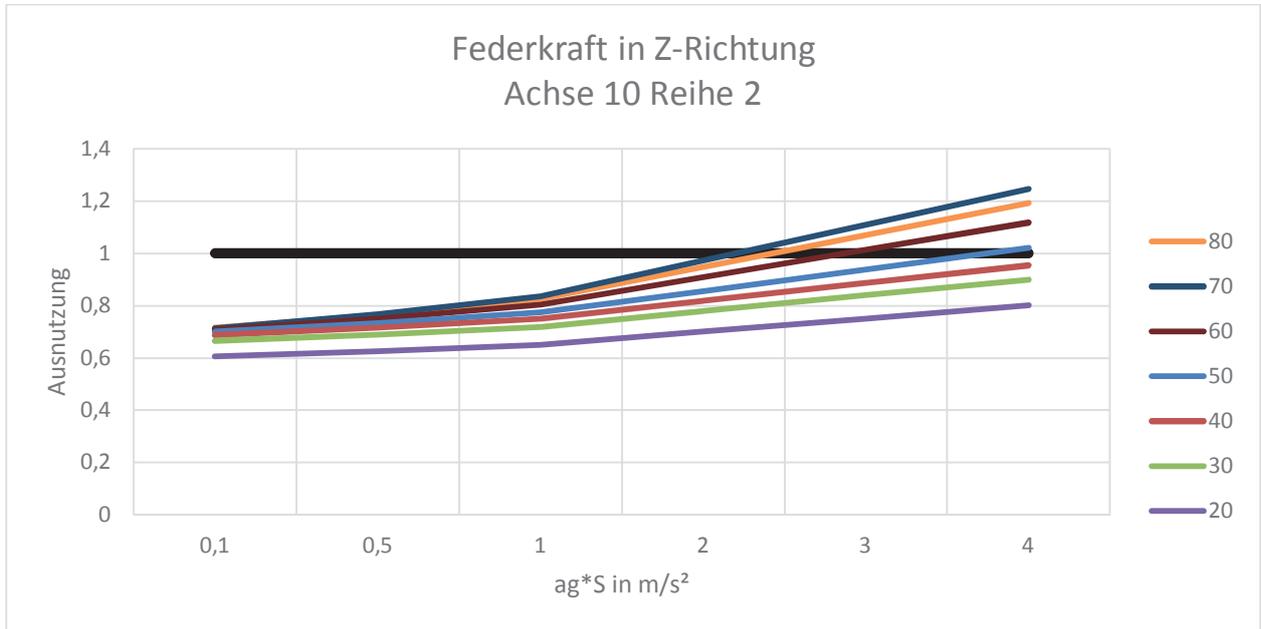
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

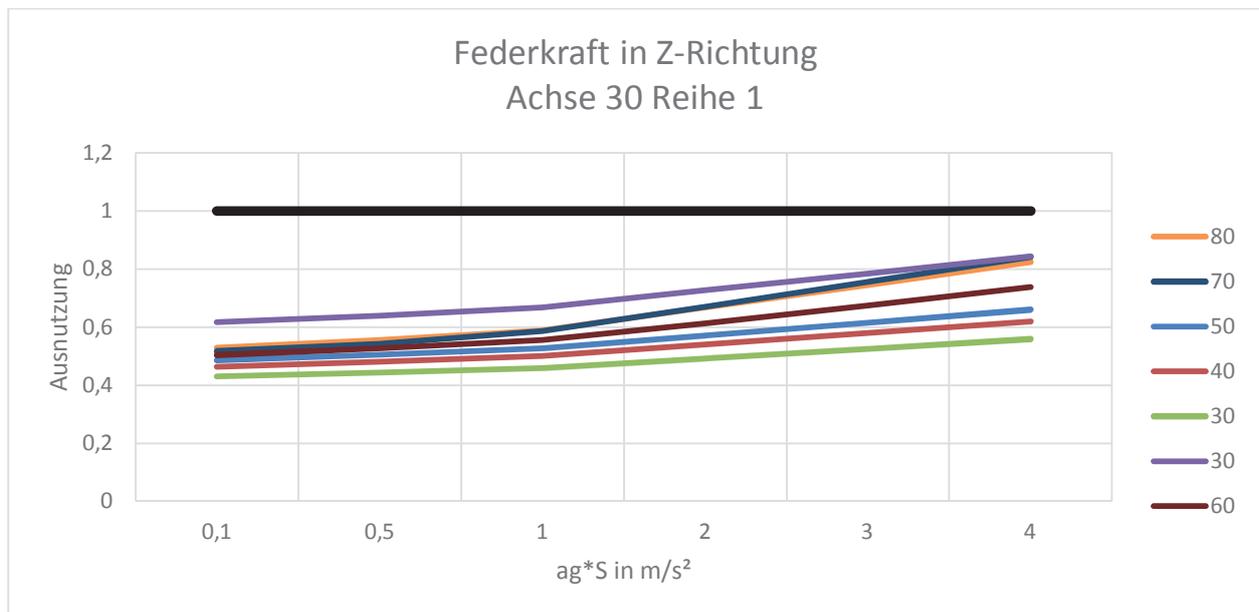
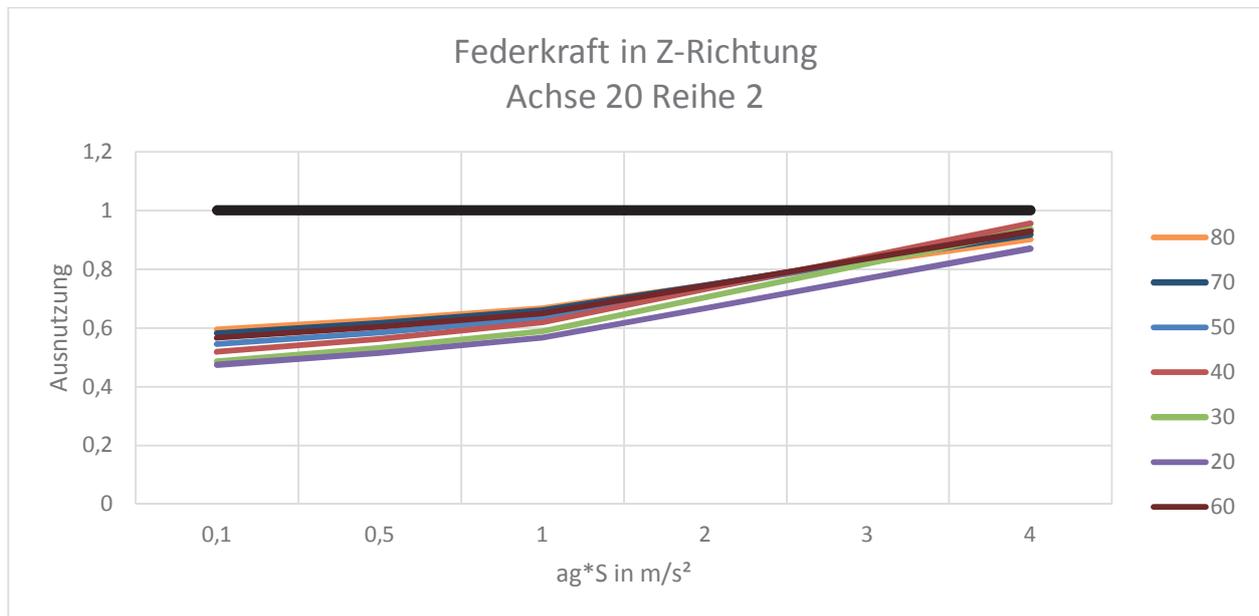
$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

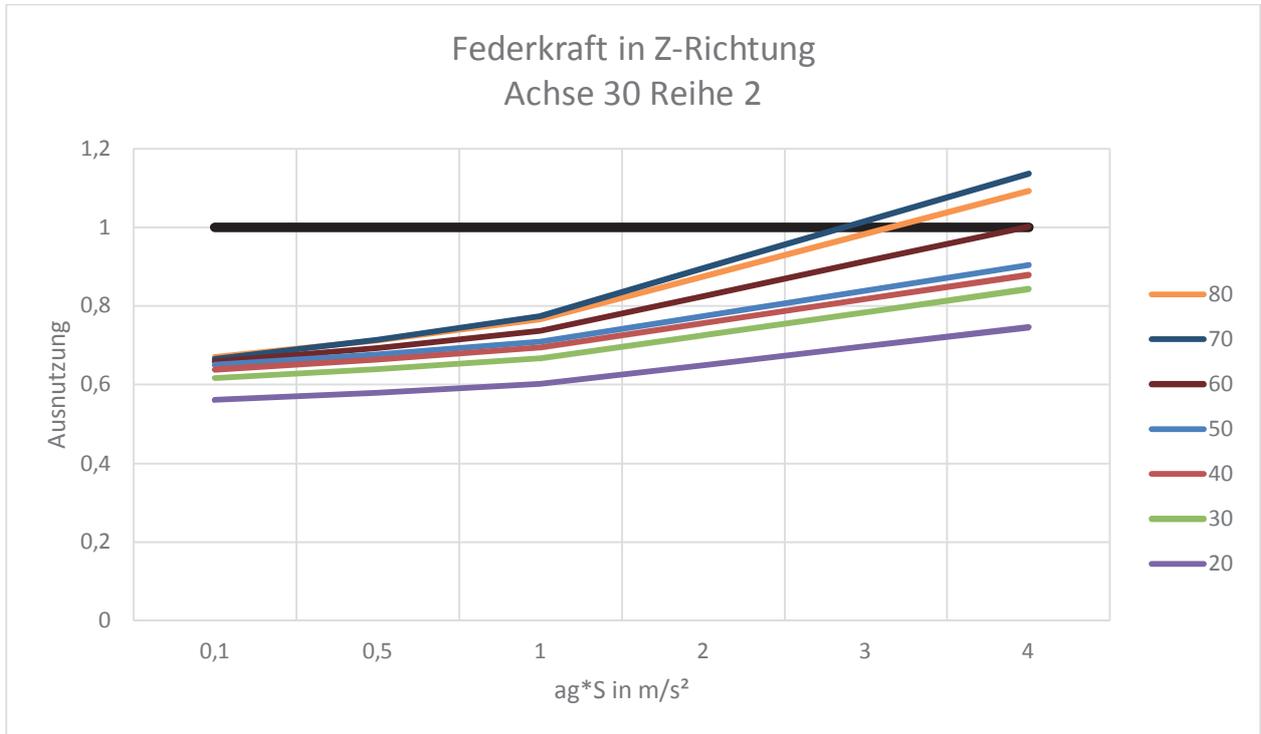
Mit $i = X; Y; Z$



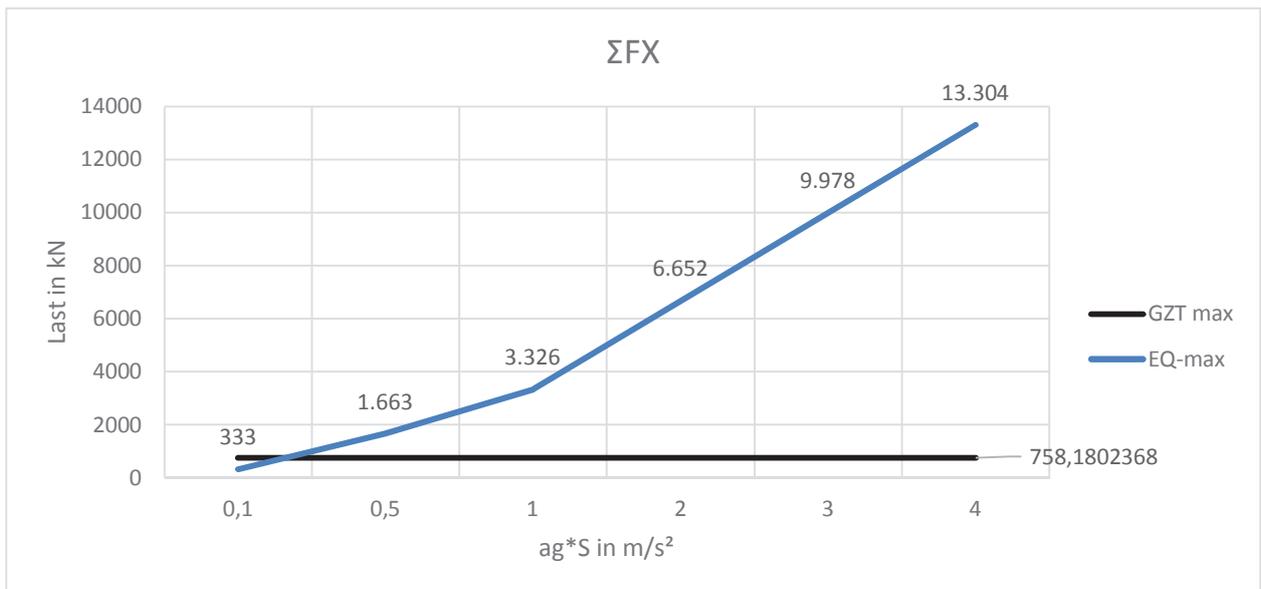


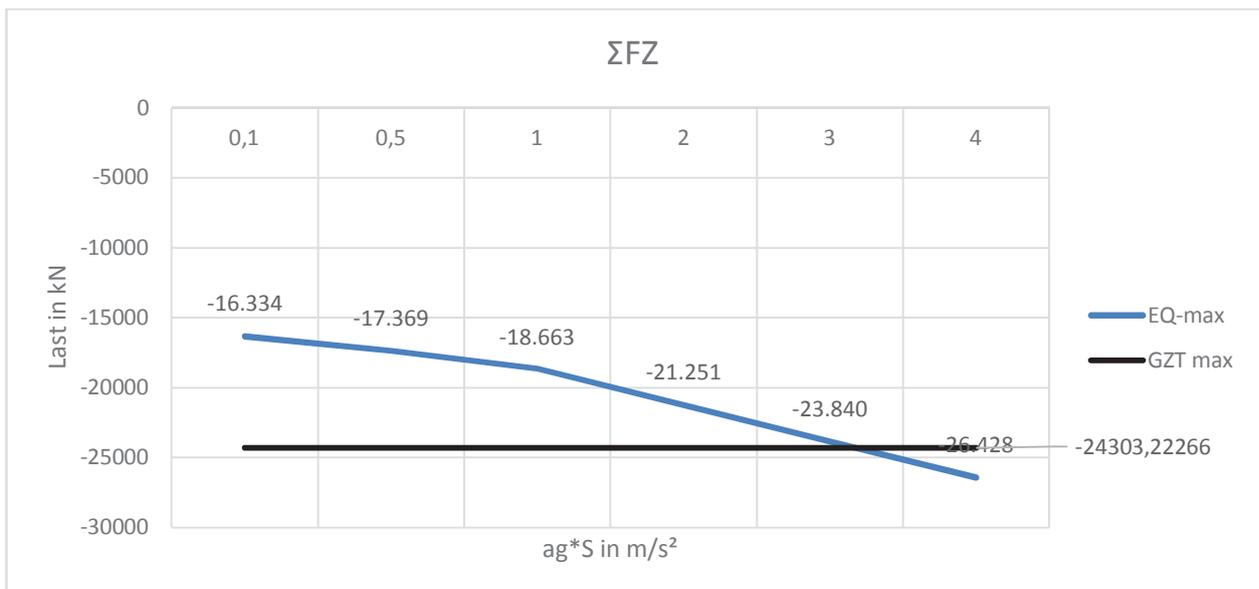
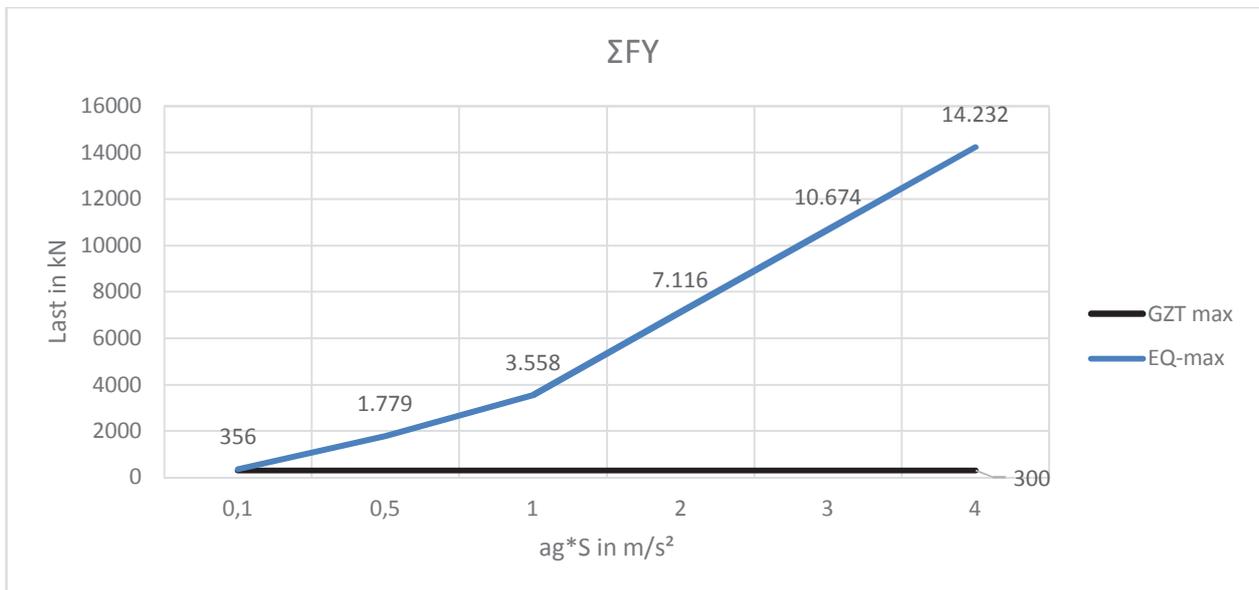






Exemplarisch werden in den nachfolgenden Diagrammen die Zahlenwerte der Federkraft für das Modell mit einer Stützweite von L = 80 m und der maximal berücksichtigten Bettung am Mittelaufleger angegeben.



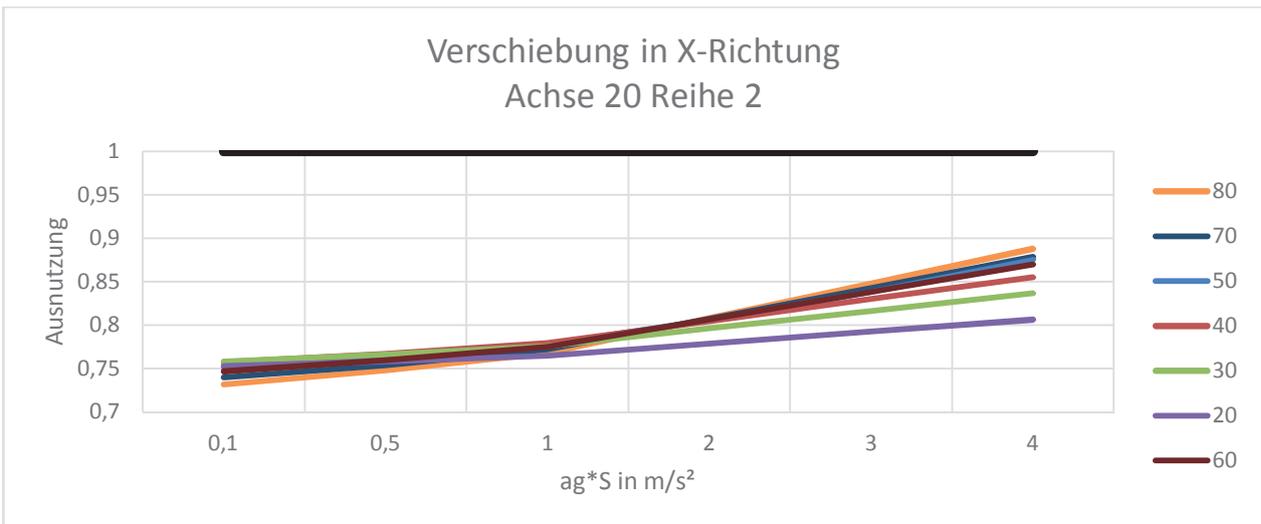
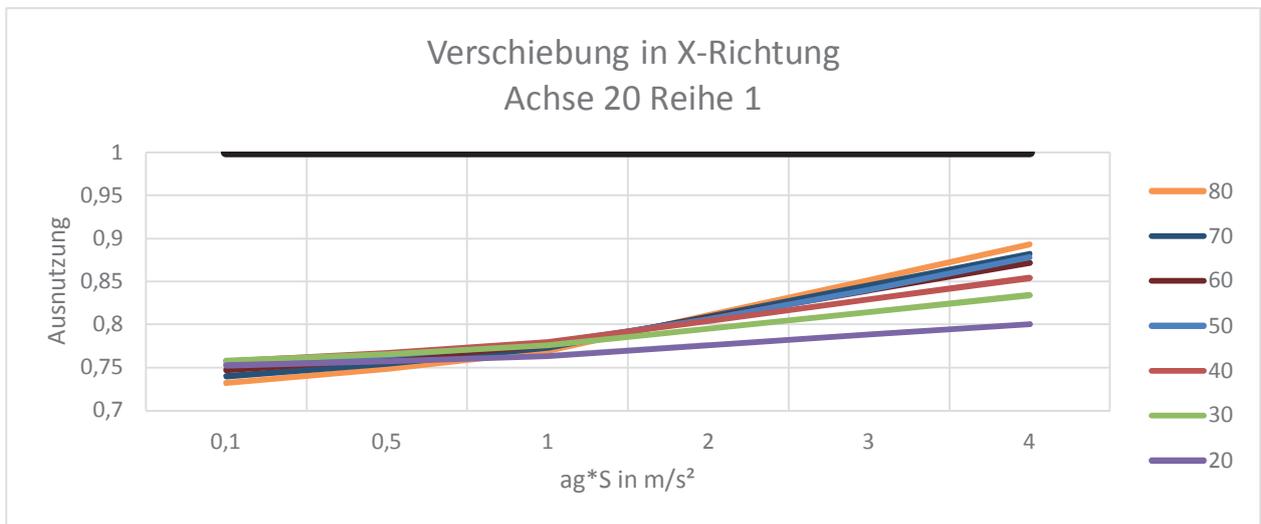


Verschiebung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerverschiebung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Auflagerverschiebung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$Ausnutzung \cong \frac{u_{i,Erdbeben}}{u_{i,GZT}}$$

Mit $i = X; Y; Z$



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Auflagerlasten im Betrieb die horizontalen Auflagerlasten in unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
80	0,5	2,0
70	0,5	1,0 (wsl. Spitze) (2,0)
60	0,5	2,0
50	0,5	1,0 (wsl. Spitze) (3,0)
40	0,5	4,0
30	0,5	3,0 (wsl. Spitze) (4,0)
20	0,5	4,0

Tabelle G1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //20

Die Berechnung wurde für das größten Schlankheitsverhältnis //20 durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind nicht für geringere Schlankheitsverhältnisse abdeckend. Die aus einem geringen Schlankheitsverhältnis resultierende Konstruktionshöhe führt zu einer Erhöhung der Masse. Durch die höhere Masse erhöht sich die auf die Brücke wirkende Erdbebenbelastung.

Eine Vergleichsberechnung ergab für ein Schlankheitsverhältnis //15 folgende Grenzwerte.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
80	0,5	0,5
70	0,5	0,5
60	0,5	0,5
50	0,5	1,0
40	0,5	1,0
30	0,5	1,0
20	0,5	1,0

Tabelle G2: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //15

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_X \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_Y \geq M \cdot 2,5 \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G1 + G2 + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{\text{ap,R}} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

Anhang H: Brückentyp 2.3

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbalken (s. Bild H1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Mehrfeldrig (s. Bild H2)</i>
Anzahl der Felder	2
Material des Überbaus	<i>Verbundbauweise mit offenen Stahlprofilen</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i> <i>Baustahl: S355</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild H1</i>
Anzahl der Stege	4
Bauwerkslänge	$L \leq 100 \text{ m}$
Verhältnis der Stützweiten	1:1
Konstruktionshöhe	$> L/15$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ durchgehend vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i>

- Ersatzsteifigkeit der Stütze im Bereich zwischen den Werten in Tabelle in Abschnitt 7.8.2
- Achsabstand Bewehrung von Betonoberfläche: 50 mm
- Betonplatte:
 - Dicke $h > 450$ mm
 - Breite $B < 15,5$ m
- Stahlquerschnittswerte:
 - $H < H_k - 250$ mm

L [m]	H [cm]	Aa [cm ²]	Iya [cm ⁴]	Iza [cm ⁴]
50	141,7	800,4	2556841	160050
45	125,0	734,9	1840256	136657
40	108,3	668,0	1264480	114529
35	91,7	599,5	816710	93742
30	75,0	528,9	483611	74391
25	58,3	455,9	251165	56591
20	41,7	379,5	104448	40490
15	25,0	298,4	27243	26293

- Mindestens Querschnittsklasse 3

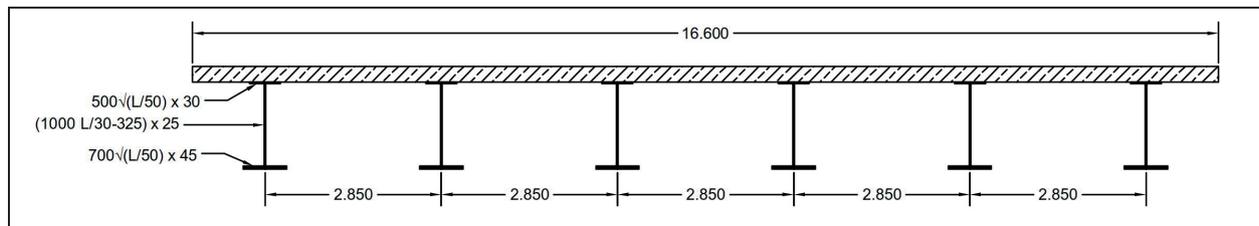


Bild H1: Querschnittswerte

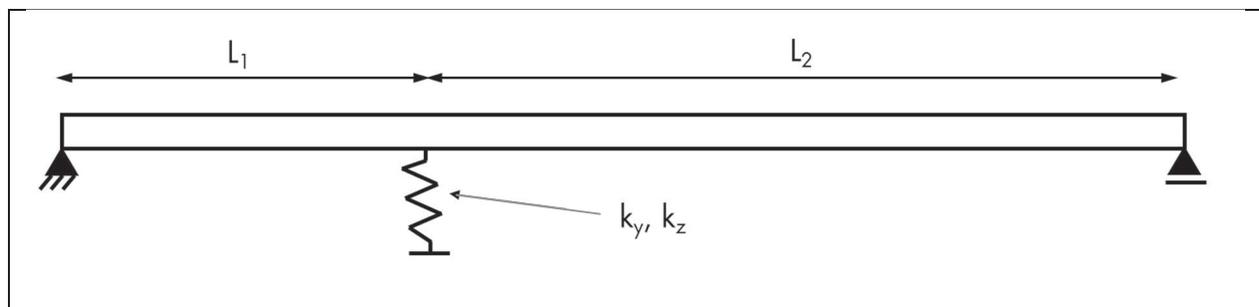


Bild H2: Statisches System

Modellierung

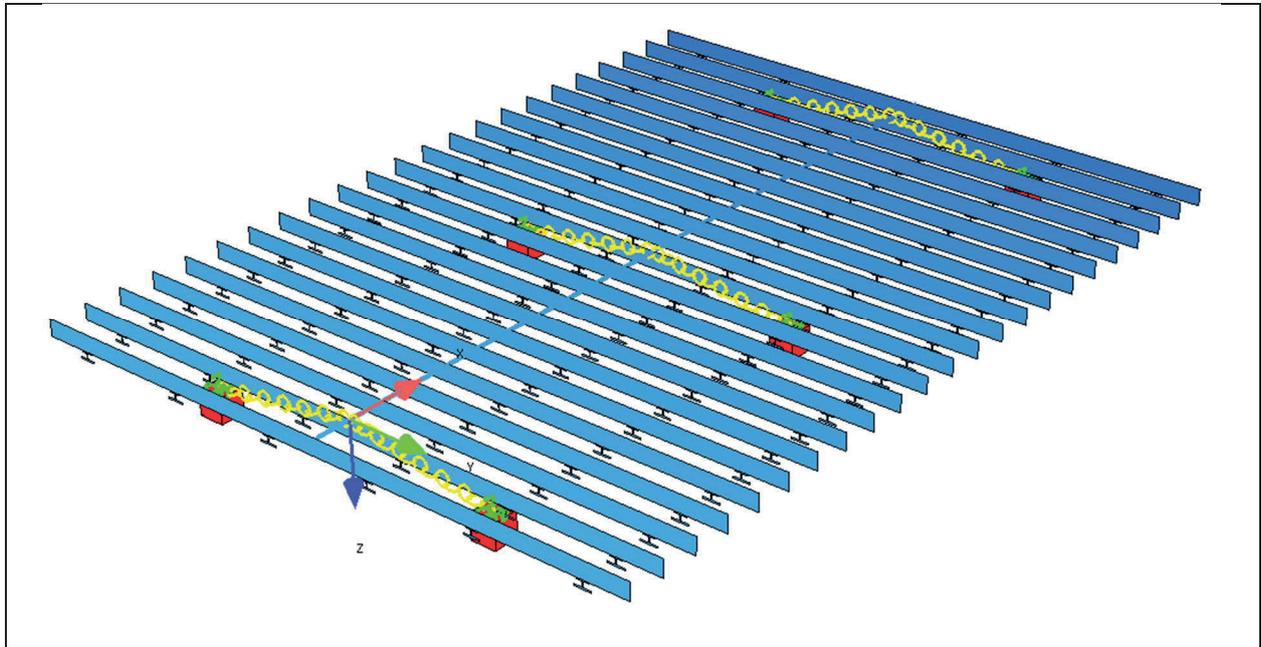


Bild H3: Modell

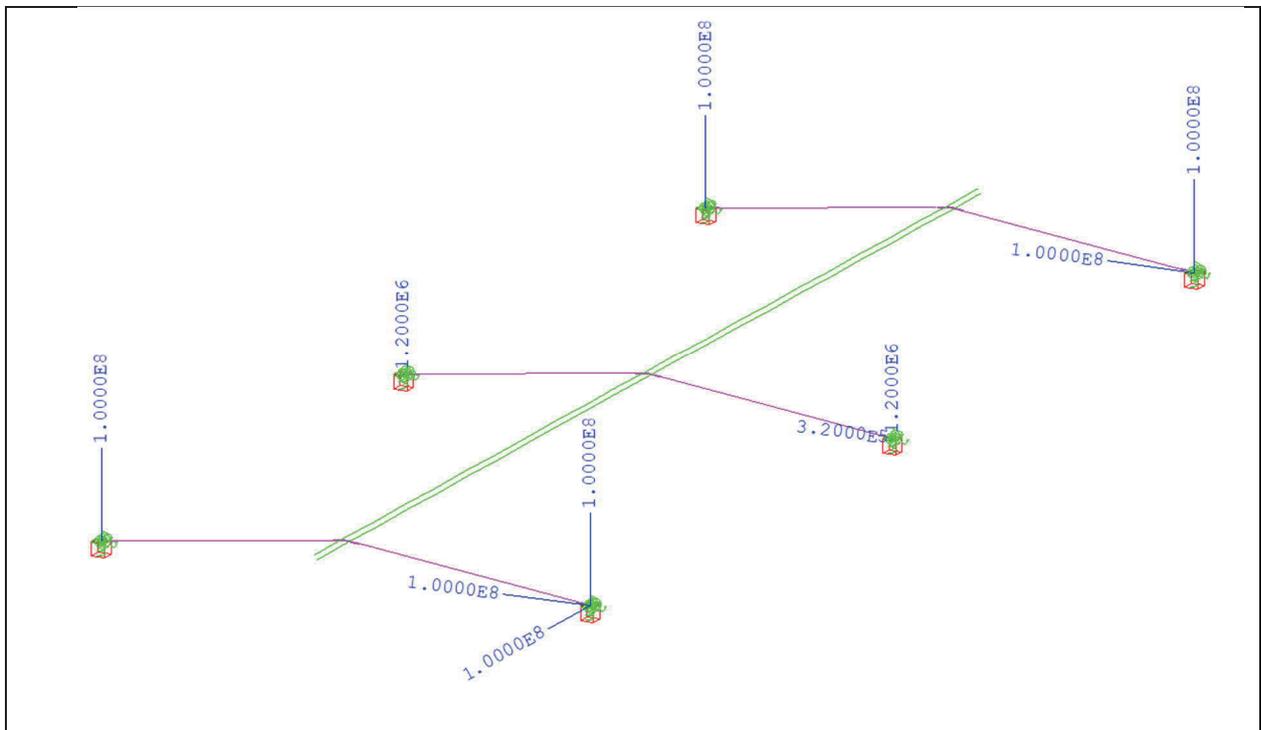


Bild H4: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, maximale statische Federkonstante [kN/m]

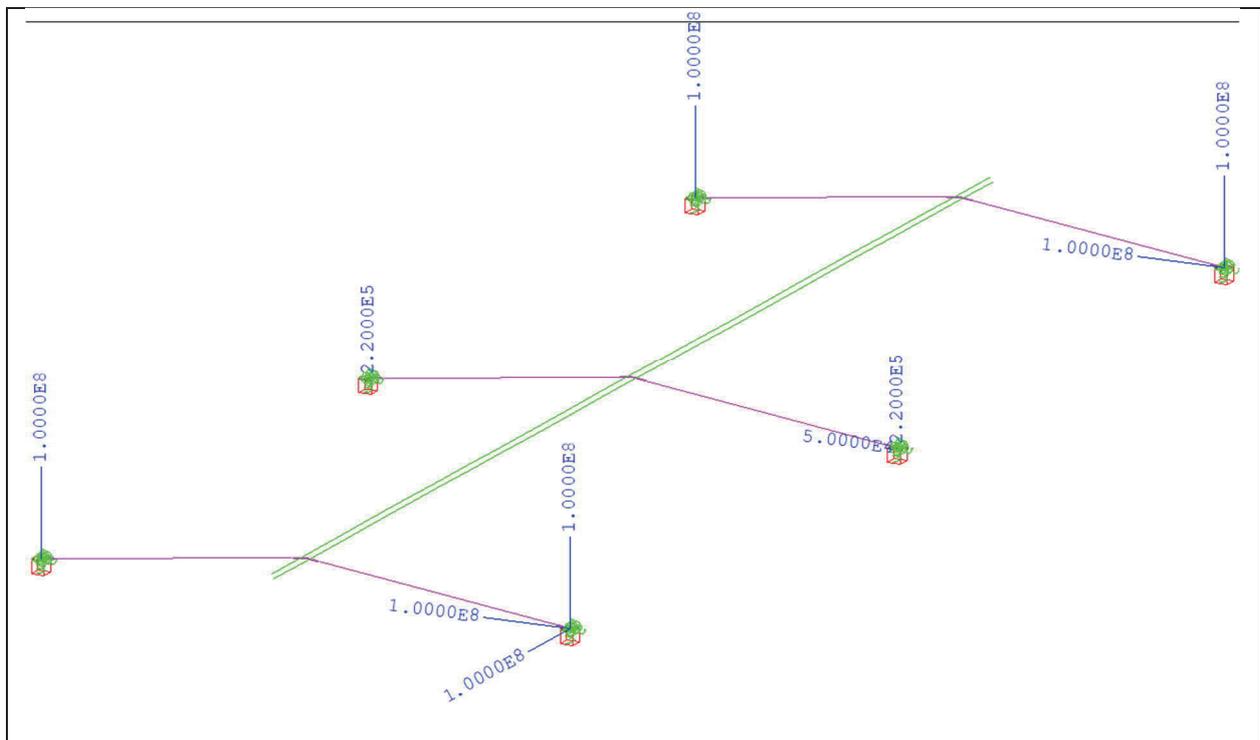


Bild H5: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, minimale statische Federkonstante [kN/m]

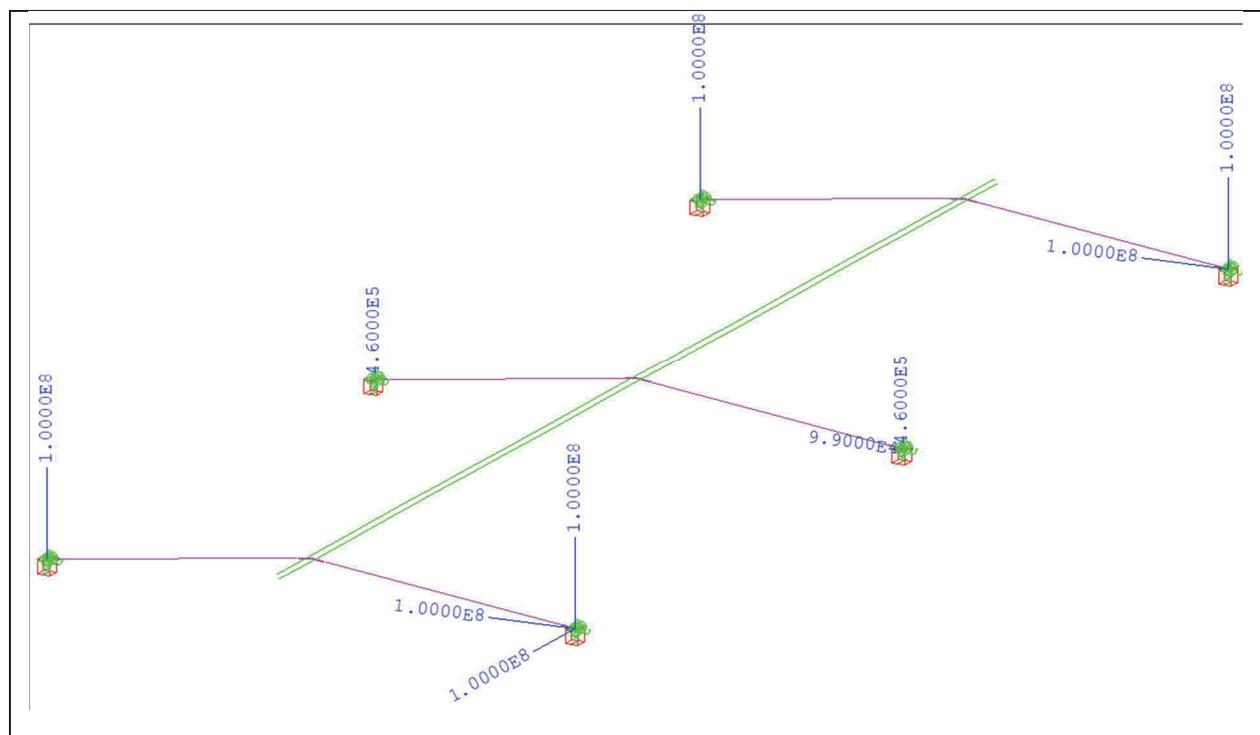


Bild H6: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, maximale statische Federkonstante [kN/m]

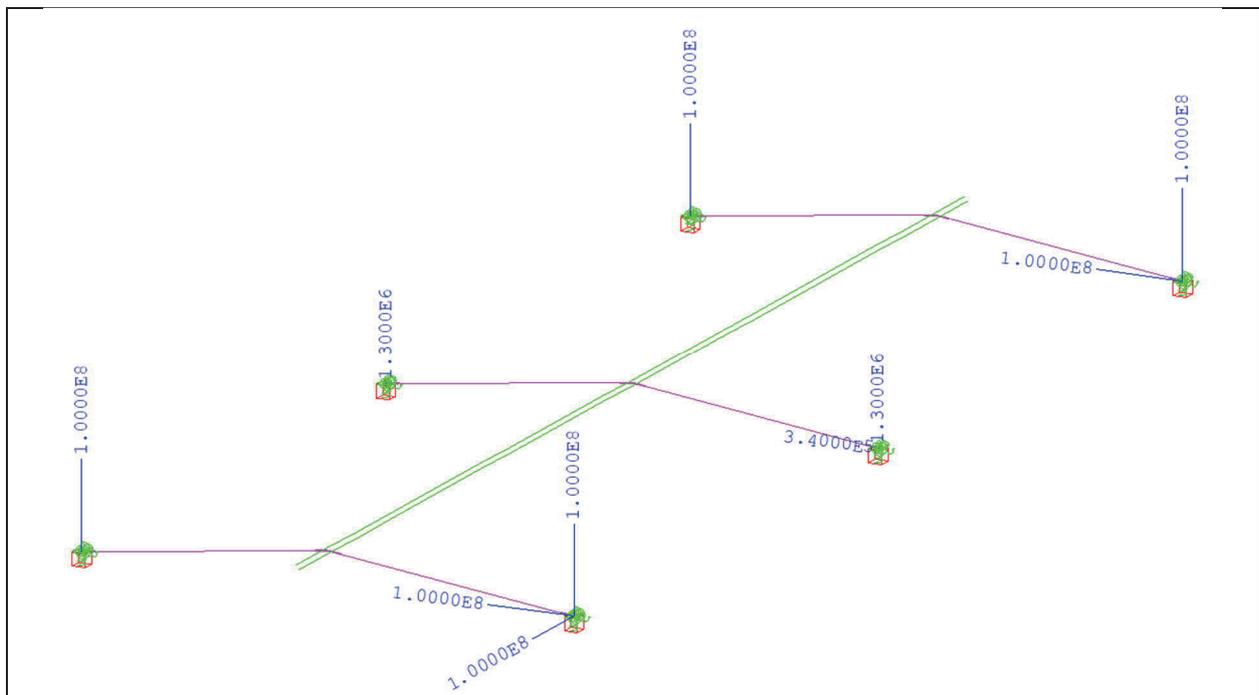


Bild H7: Lagerungsbedingungen für statische Lastfälle, minimale dynamische Federkonstante [kN/m]

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m³ ermittelt.

Das Konstruktionseigengewicht der Stahlträger wird programmintern mit einer Wichte von 78,5 kN/m³ ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität als Linienlast in der Stabachse angeordnet.

Querträger:

Da sowohl ein Stahlbeton- als auch ein Stahlquerträger verwendet werden kann, wird die gleiche Belastung wie für den Betonträger angesetzt. Das noch nicht berücksichtigte Eigengewicht der Querträger beim Plattenbalkenquerschnitt wird bei den Ausbaulasten als Punktlast mitberücksichtigt. Die Breite der Querträger wird mit 2 m angenommen. Damit ergibt sich ein Zusatzgewicht zwischen den Stegen in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe von

$$\text{ca. } 25 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * (h_k - 0,45 \text{ m}) * 2 \text{ m} = 250 \text{ kN/m} * (h_k - 0,45 \text{ m})$$

Der Überstand von 1 m an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Fahrbahnbelag:

$$g_{k, \text{Belag}} = 2,5 * 13 \text{ m} = 32,5 \text{ kN/m}$$

Kappe:

$$g_{k, \text{Kappe}} = 23,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,2} = 32,5 \text{ kN/m} + 23,0 \text{ kN/m} = 55,5 \text{ kN/m}$$

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von 2,5 kN/m² x 1,2 wird zwischen den Geländern auf einer Breite von (17,1 – 2x0,25 m) = 16,6 m angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

$$\text{Grundlast: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 16,6 \text{ m} = 49,8 \text{ kN/m} \quad (e_y = 0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Hauptspur: } 9,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 27,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 5,0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Nebenspur: } 3,0 \text{ kN/m}^2 * 3,0 \text{ m} = 9,0 \text{ kN/m} \quad (e_y = 2,0 \text{ m})$$

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

$$\text{HS: } 4 * 150 \text{ kN} \quad (e_y = 6,0 \text{ m}; e_y = 4,0 \text{ m})$$

$$\text{NS1: } 4 * 100 \text{ kN} \quad (e_y = 3,0 \text{ m}; e_y = 1,0 \text{ m})$$

$$\text{NS2: } 4 * 50 \text{ kN} \quad (e_y = 0,0 \text{ m}; e_y = -2,0 \text{ m})$$

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist.

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3,6 \times L_{\text{ges}} < 900$ kN und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{e,\min} = -24 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$$

$$T_{e,\max} = 37 \text{ °C} + 4 \text{ °C} = 41 \text{ °C}$$

$$T_{N,\text{con}} = -10 - 20 = -30 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{N,\text{exp}} = 41 - 10 = 31 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{M,\text{heat}} = 15 \text{ °C} \times 1,0 = 15 \text{ °C} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

$$T_{M,\text{cool}} = 18 \text{ °C} \times 1,0 = 18 \text{ °C} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

Wind

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$$wk = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (hk + 0,18 \text{ m}) \quad ez = (hk + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1$ m

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow \text{vereinfachend } w = 0,60 \text{ kN/m}^2$$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 2,08 \text{ m}) \quad e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild H8: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitt 7.5

Mindestbewehrung

Flächige Mindestbewehrung

Es kann davon ausgegangen werden, dass oben und unten je Ø12 /15 eingelegt sind. Daraus ergibt sich folgende absolute Bewehrung:

Oben: $A_{s,min,o} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 15,5 = 123,7 \text{ cm}^2$

Unten: $A_{s,min,u} = 1,2^2 / 4 \times \pi \times 100 / 15 \times 15,5 = 123,7 \text{ cm}^2$

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

- Momente in X-Richtung
- Momente in Y-Richtung
- Querkraft in Y-Richtung
- Querkraft in Z-Richtung
- Torsionsmoment
- Auflagerfederkräfte
- Verschiebungen am Längsauflager
- Vergleichsspannung

Ergebnisse s. Excel

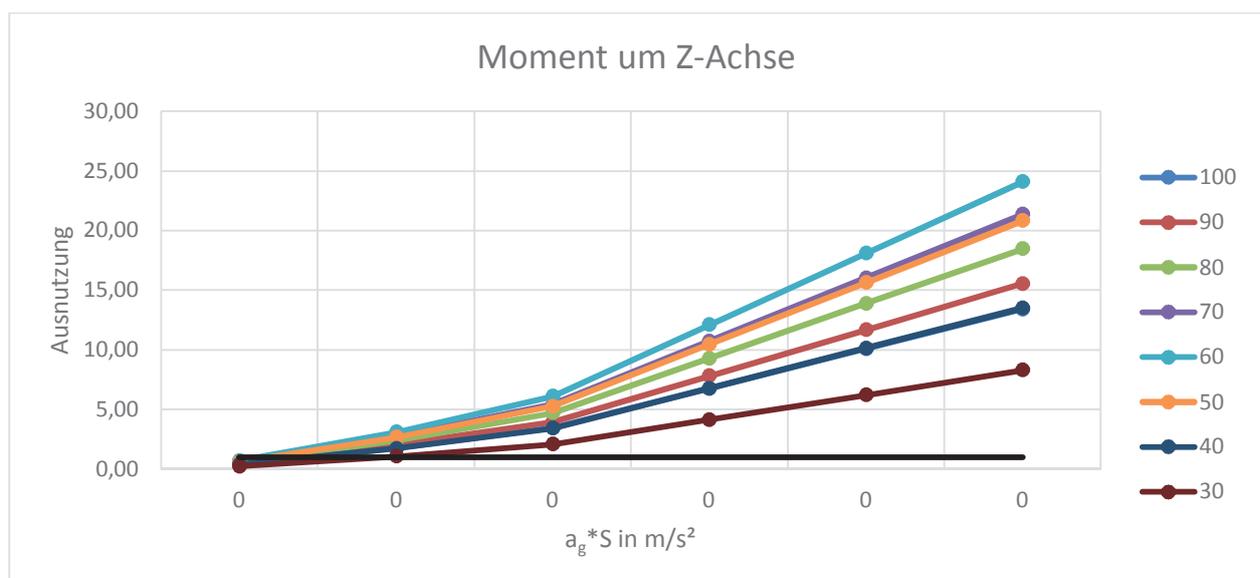
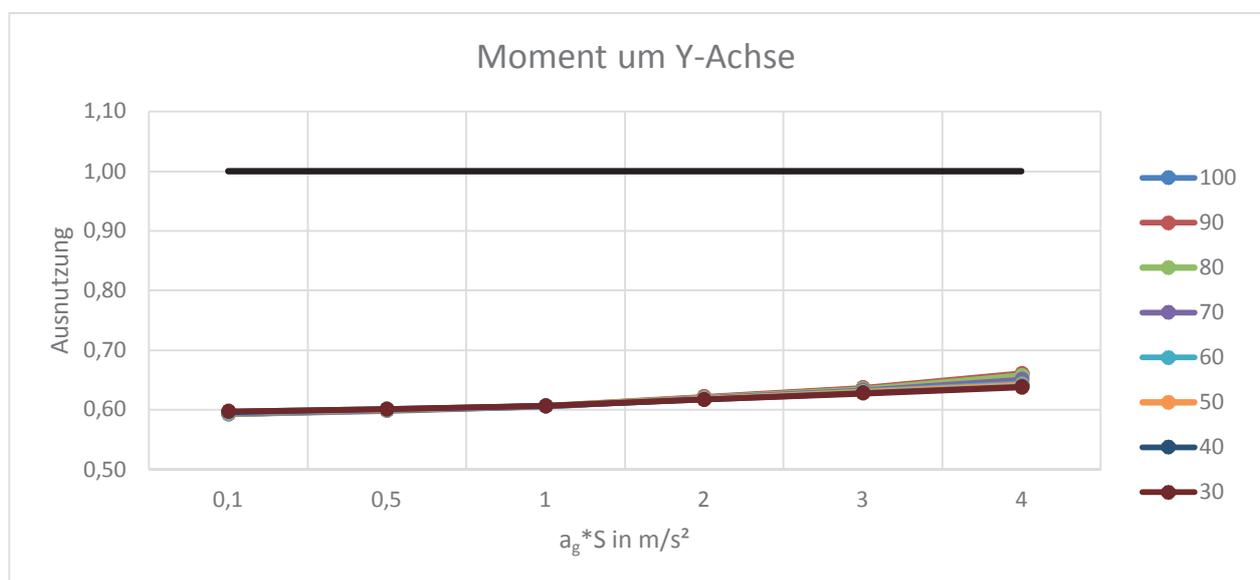
Die erforderliche Schubbewehrung ergibt sich aus der Mindestquerkraftbewehrung sowie aus der erforderlichen Bewehrung für den Schubabtrag. Bei einem Einfeldträger tritt der größte Schub in der Regel im Bereich der Auflager auf. Da in diesem Abschnitt die Auflagerfedern beurteilt werden, kann auf eine gesonderte Betrachtung der Schubbewehrung verzichtet werden.

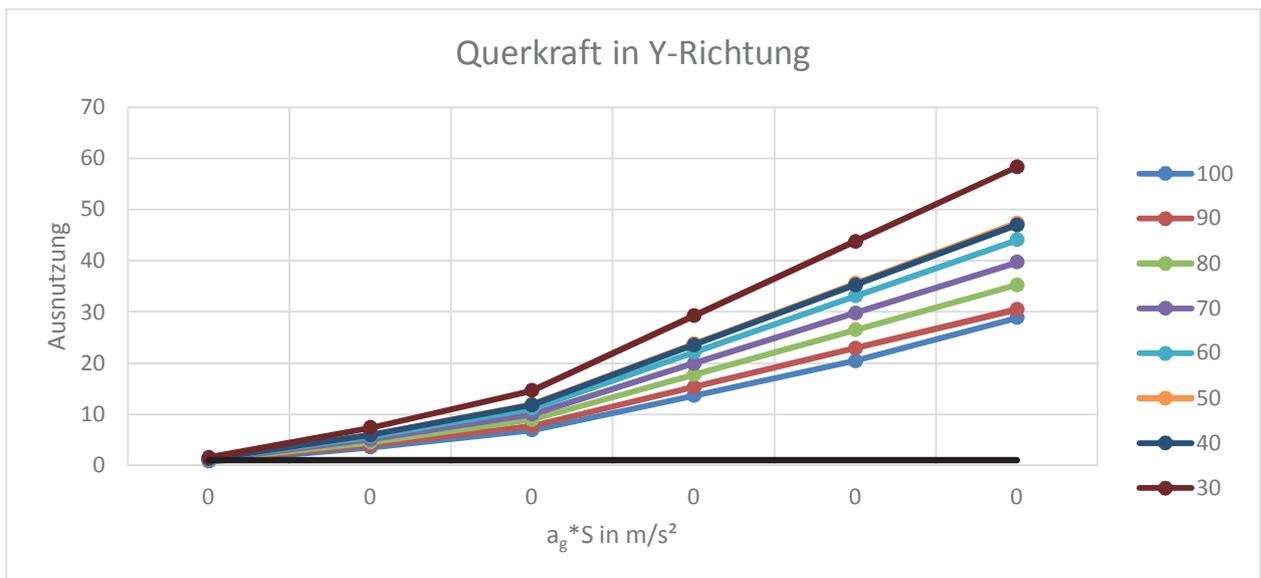
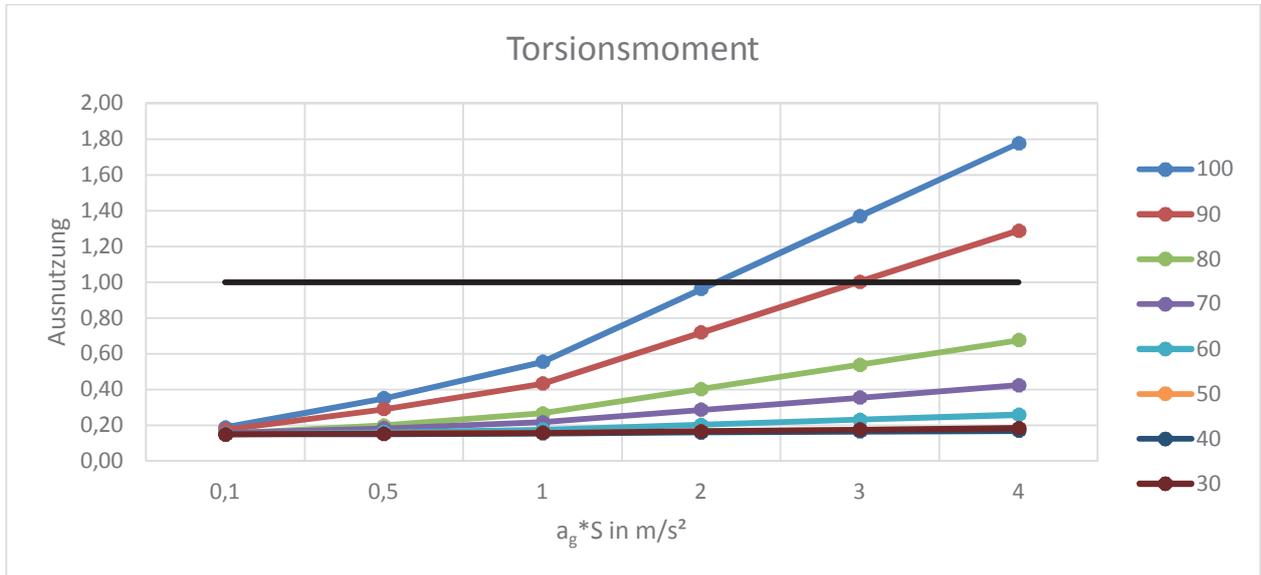
Die Ergebnisse sind einhüllend für die Modelle mit der minimalen und der maximalen Bettung.

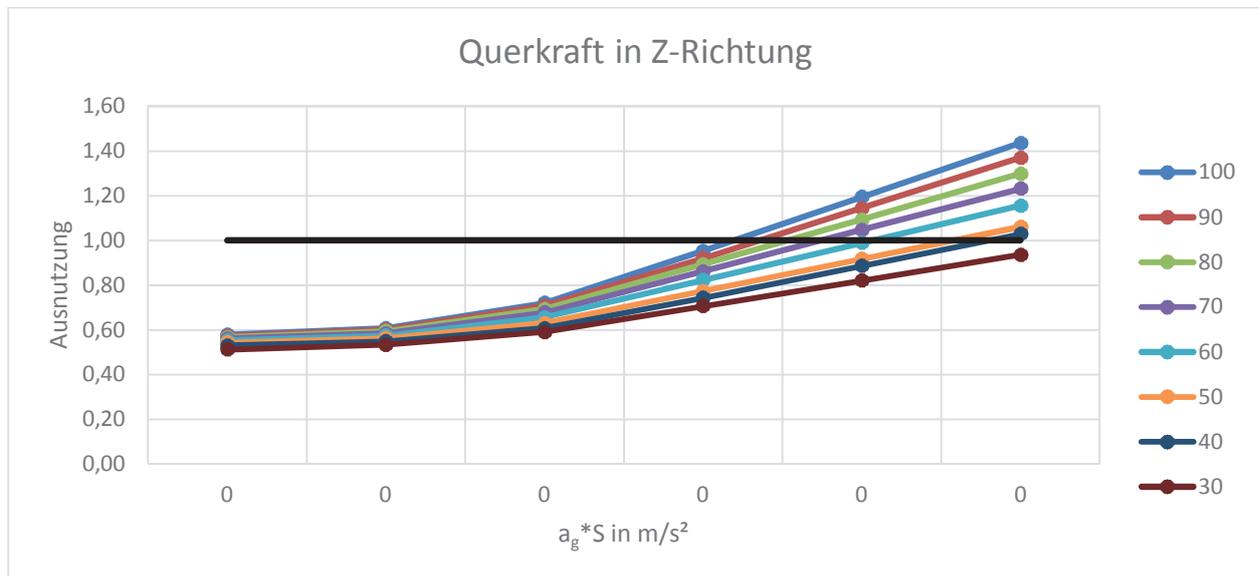
Schnittgrößen

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Schnittgrößen, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Schnittgrößen, die durch die Erdbebenbelastung resultieren, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{SGR_{\text{Erdbeben}}}{SGR_{\text{GZT}}}$$





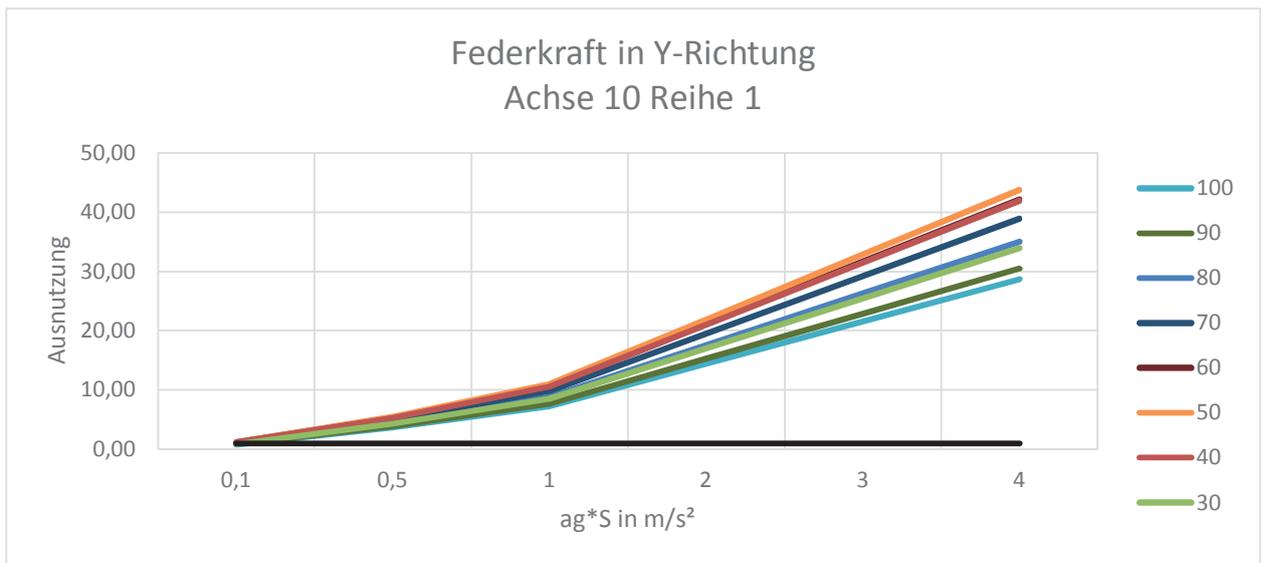
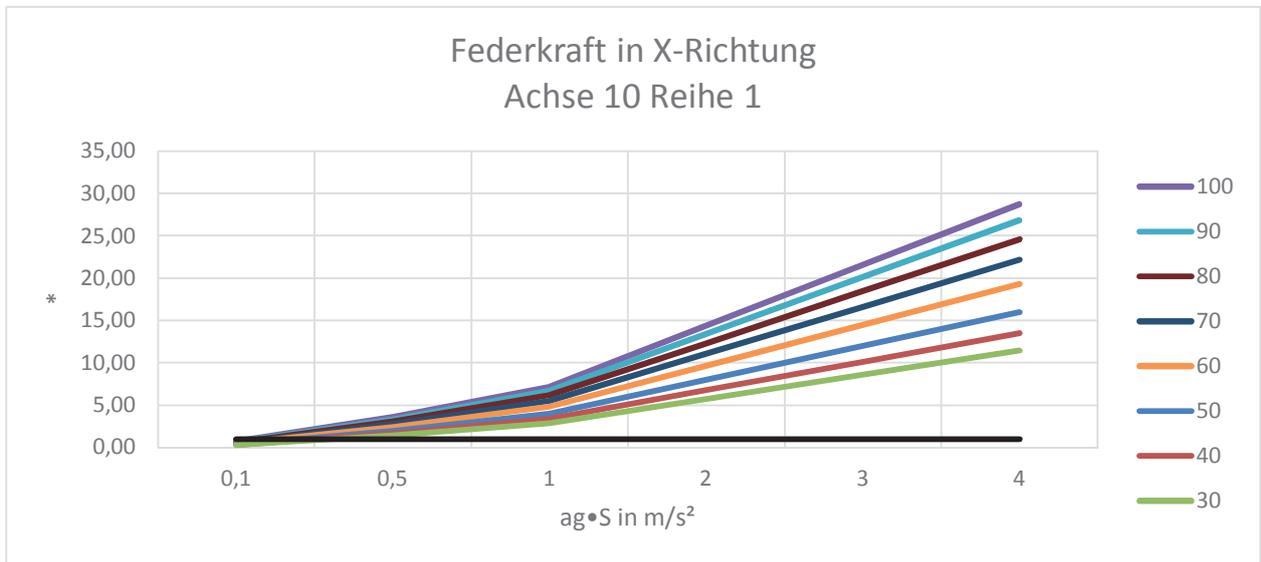


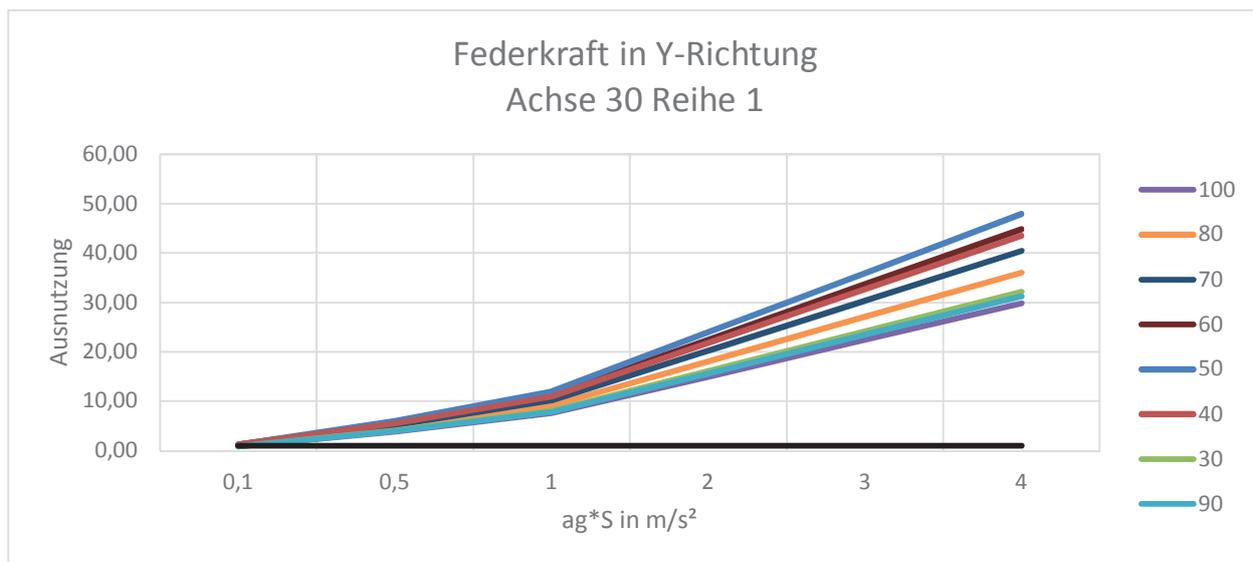
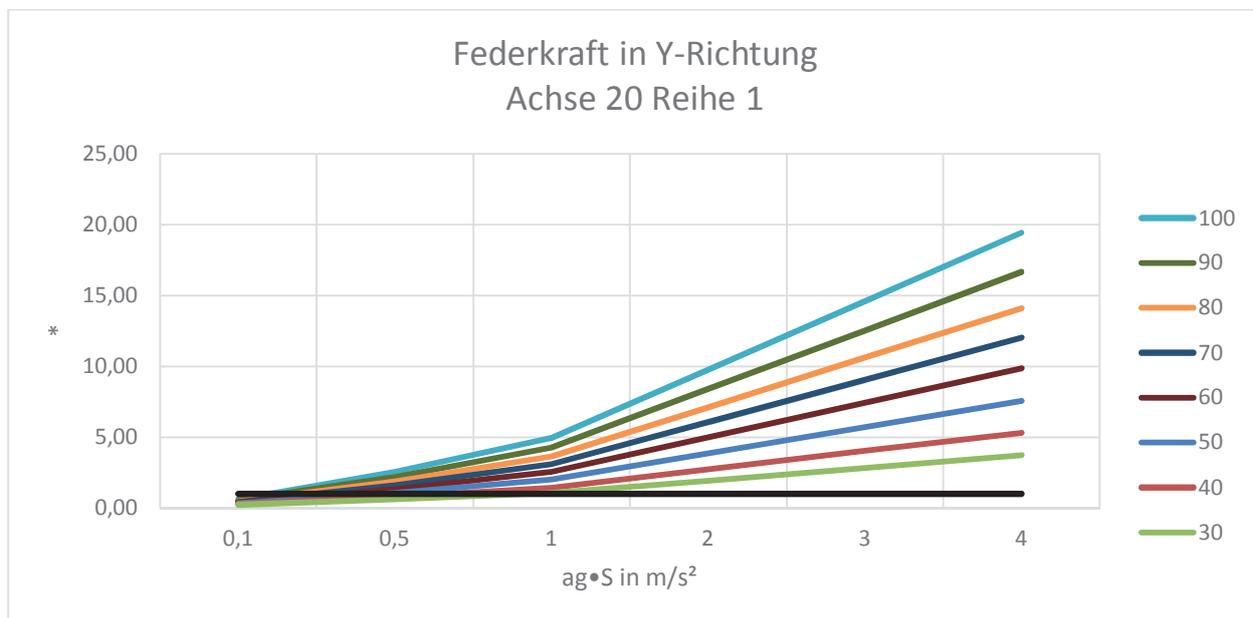
Auflagerfederkräfte

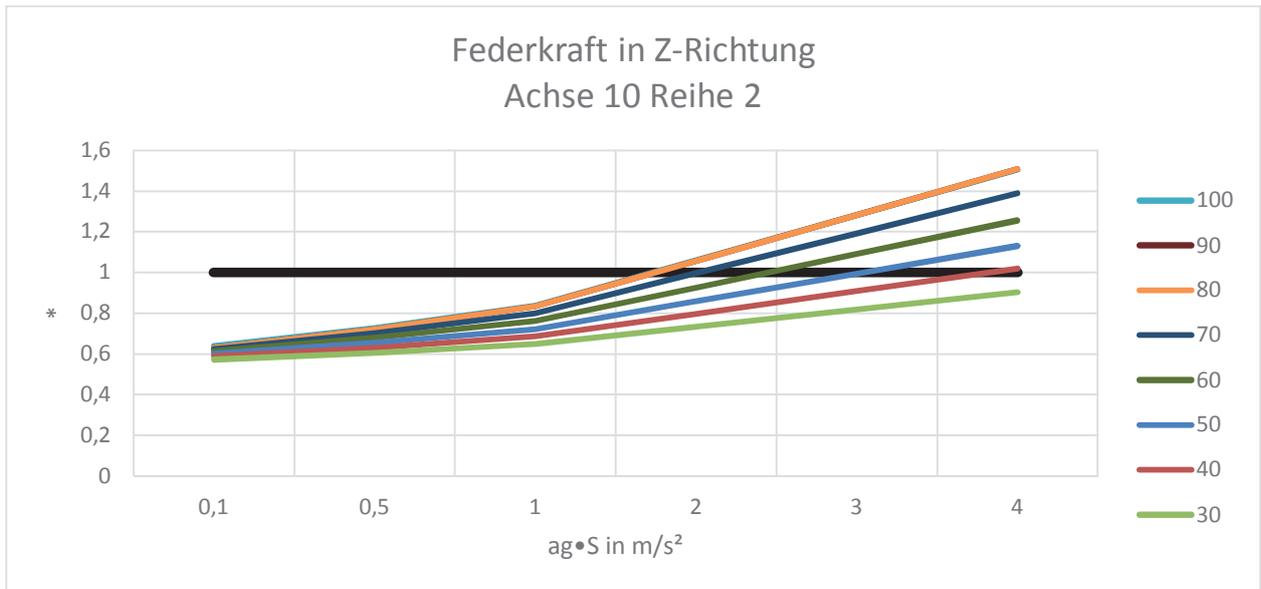
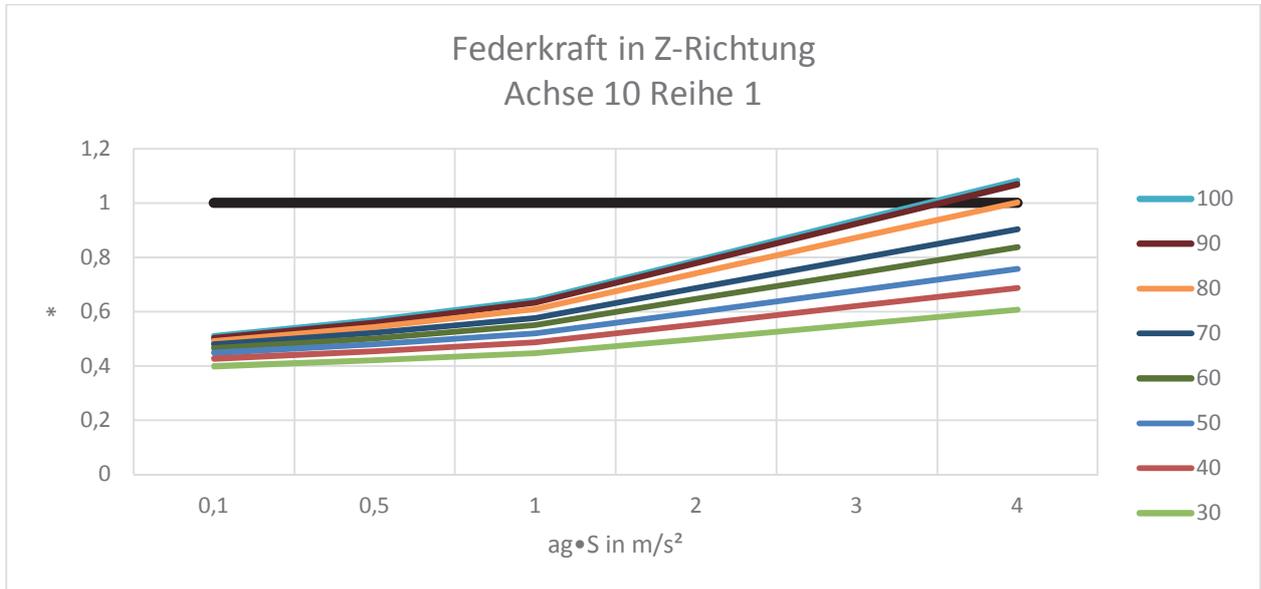
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

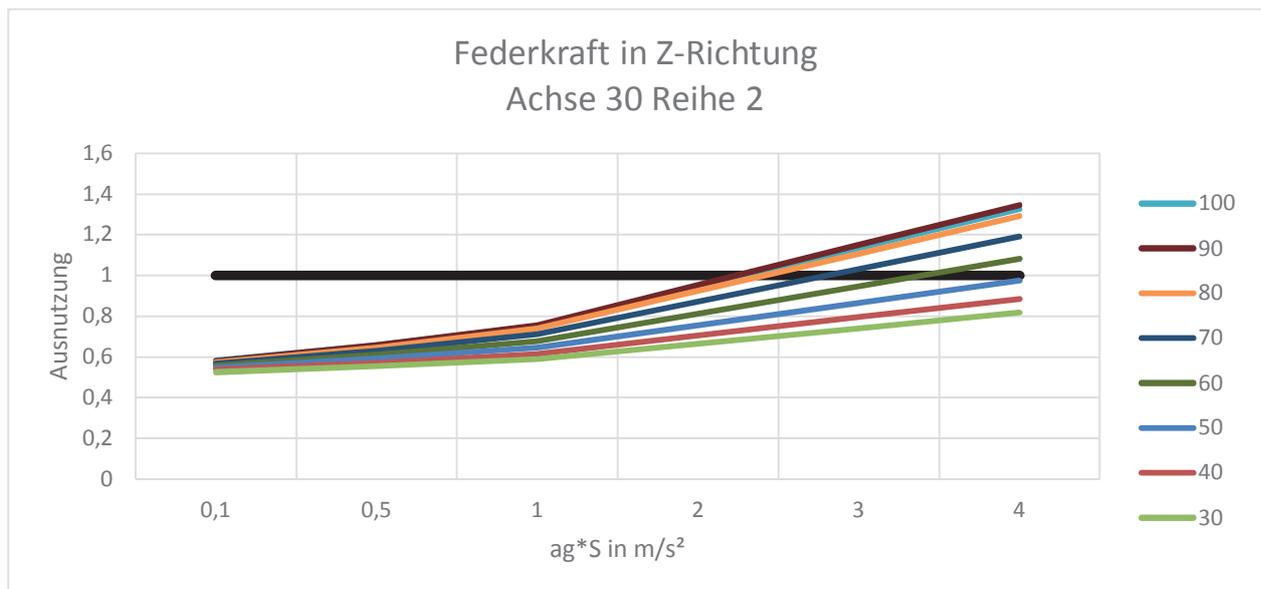
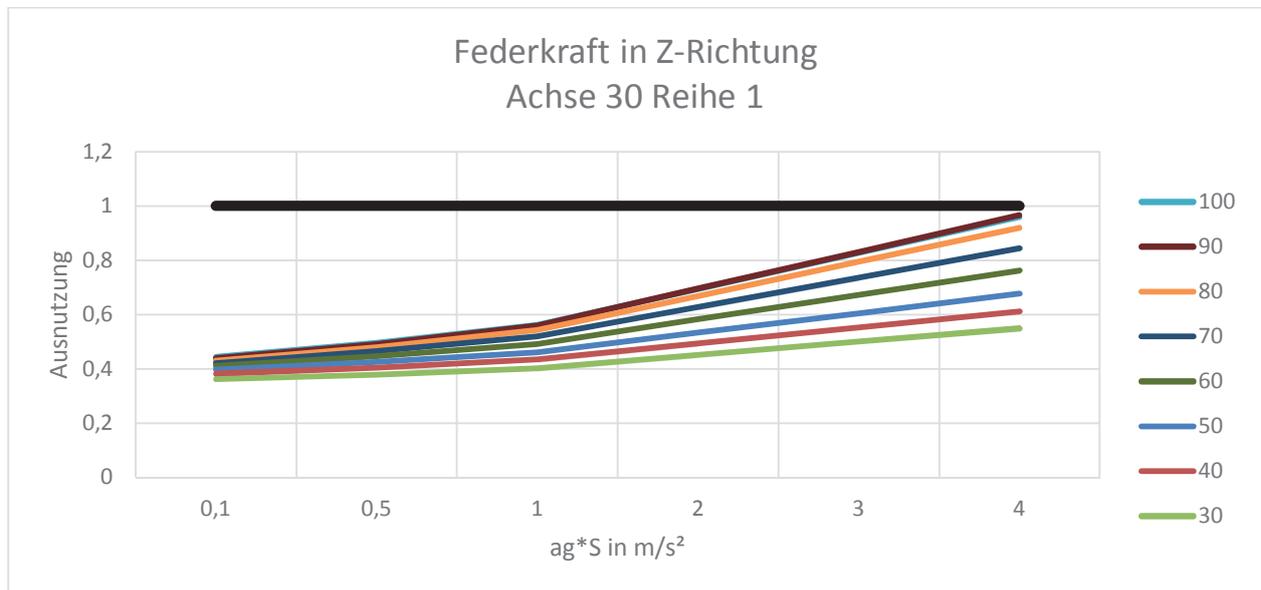
$$Ausnutzung \cong \frac{F_{i,Erdbeben}}{F_{i,GZT}}$$

Mit $i = X; Y; Z$

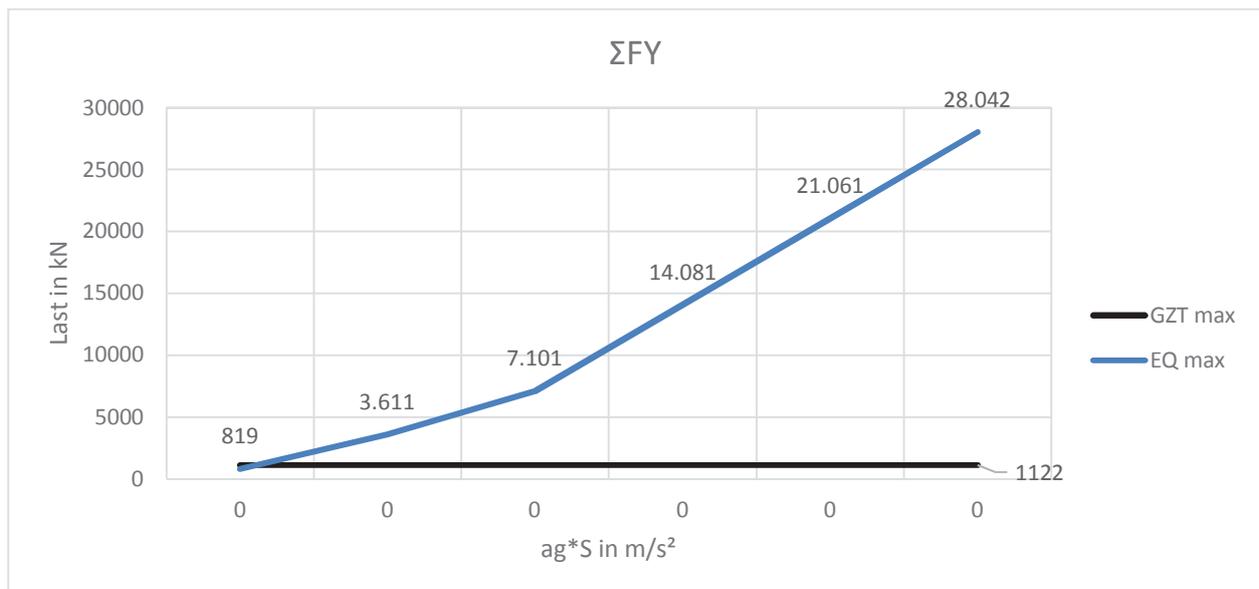
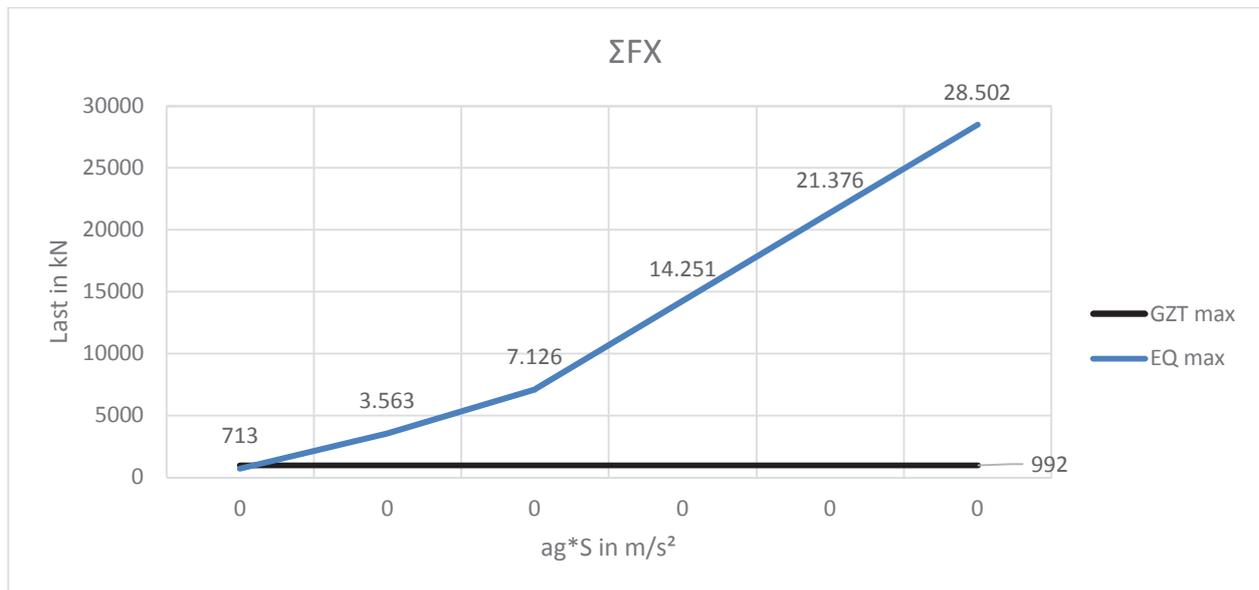


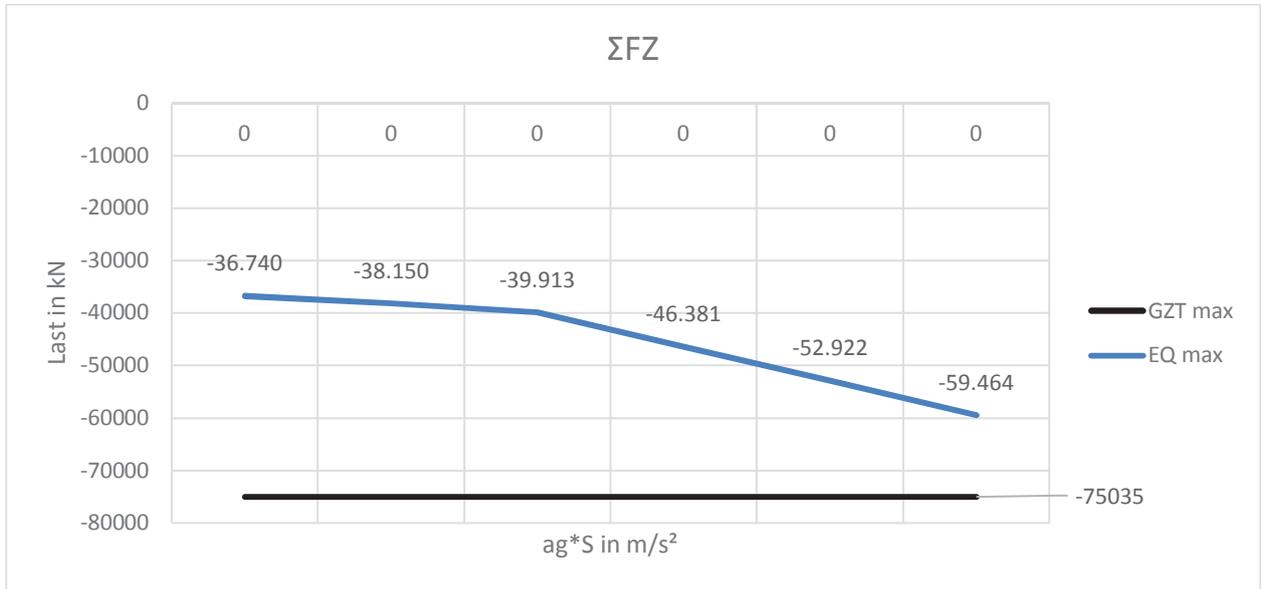






Exemplarisch werden in den nachfolgenden Diagrammen die Zahlenwerte der Federkraft für das Modell mit einer Stützweite von $L = 100$ m und der maximal berücksichtigten Bettung an der Mittelstütze angegeben.



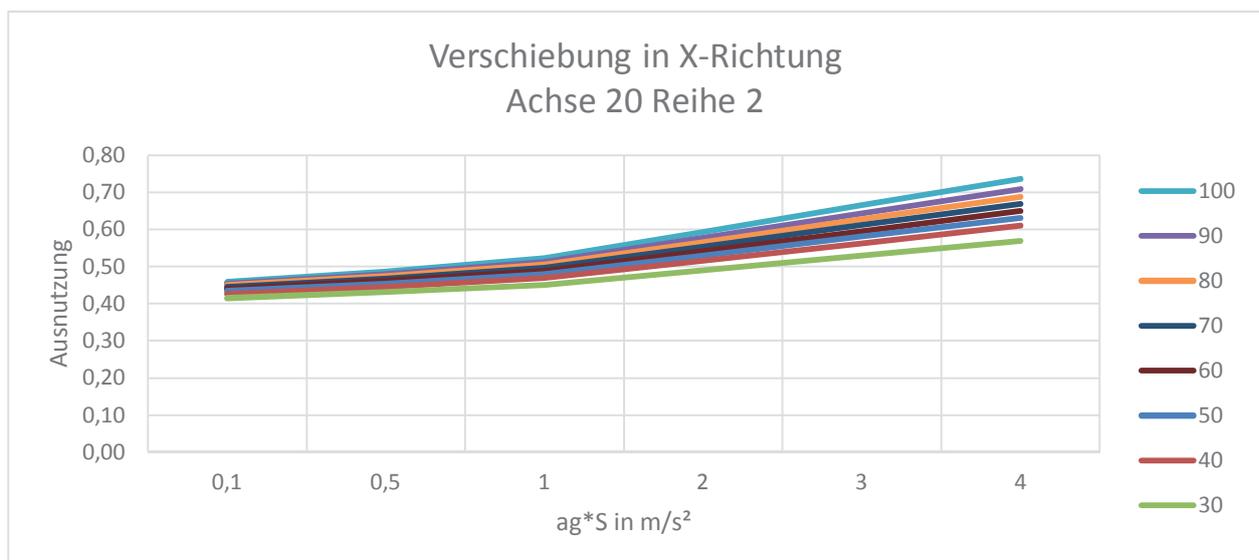
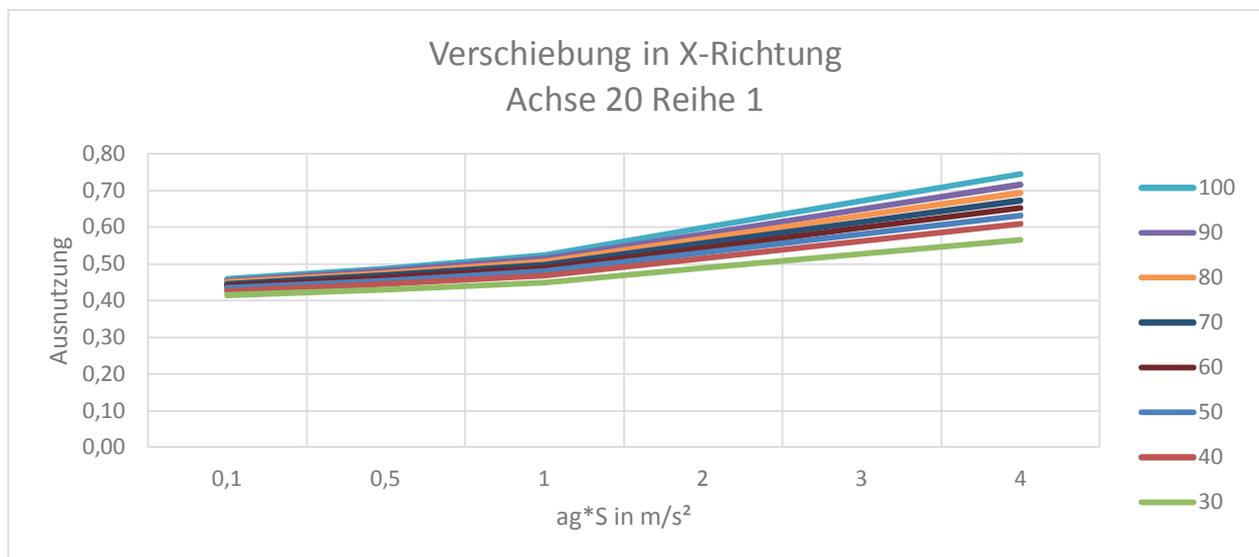


Verschiebung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{u_{i,\text{Erdbeben}}}{u_{i,\text{GZT}}}$$

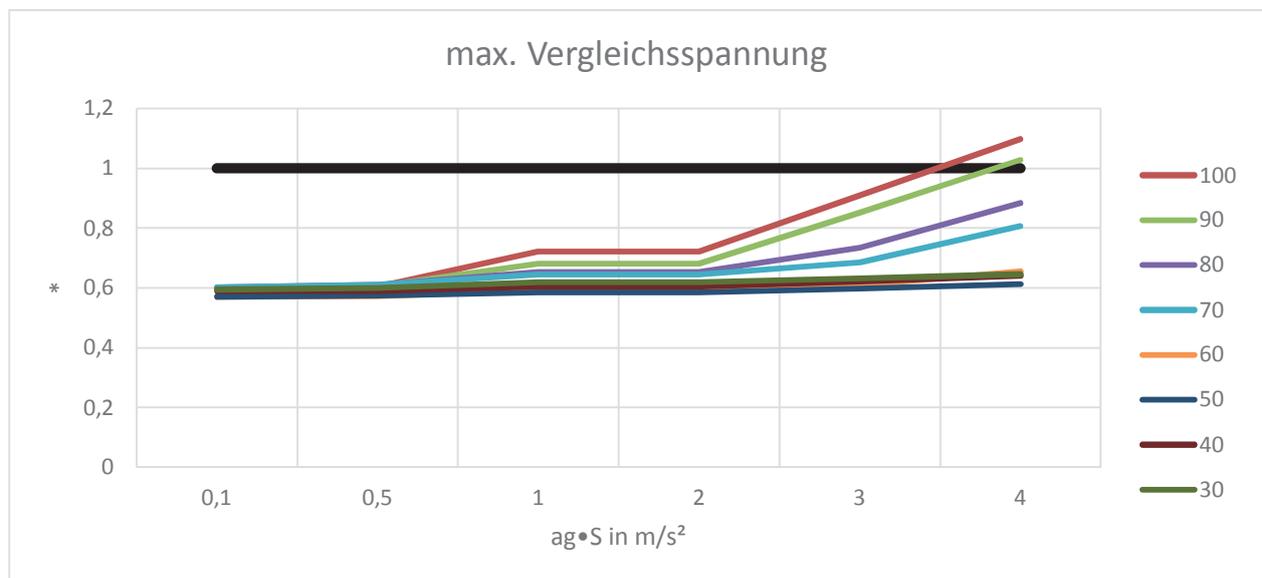
Mit $i = X; Y; Z$



Vergleichsspannung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Vergleichsspannung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Vergleichsspannung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{\sigma_{V, \text{Erdbeben}}}{\sigma_{V, \text{GZT}}}$$



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die Auflagerlasten in Längs- und Querrichtung im Betrieb die Auflagerlasten in Querrichtung unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
100	0,5	0,5
90	0,5	0,5
80	0,5	0,5
70	0,5	0,5
60	0,5	0,5
50	0,5	0,5
40	0,5	0,5
30	0,5	0,5

Tabelle H1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis $l/30$

Die Anwendung von Stufe 2 ist für den Verbund DLT nicht möglich, da die Bemessung unter ständigen / vorübergehenden Einwirkungen die Erdbebenbemessung in keinem der Fälle abdeckt.

Die Berechnung wurde für das größten Schlankheitsverhältnis $l/30$ durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind bis zu einem Schlankheitsverhältnis $l/18$ abdeckend.

Anhang I: Brückentyp 3.1

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbrücke (s. Bild I1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldrig freiaufliegend (s. Bild I2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Stahlbeton</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Vollplatte</i>
	<i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild I1</i>
Bauwerkslänge	$\leq 10 \text{ m}$
Konstruktionshöhe	$L/16$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i>

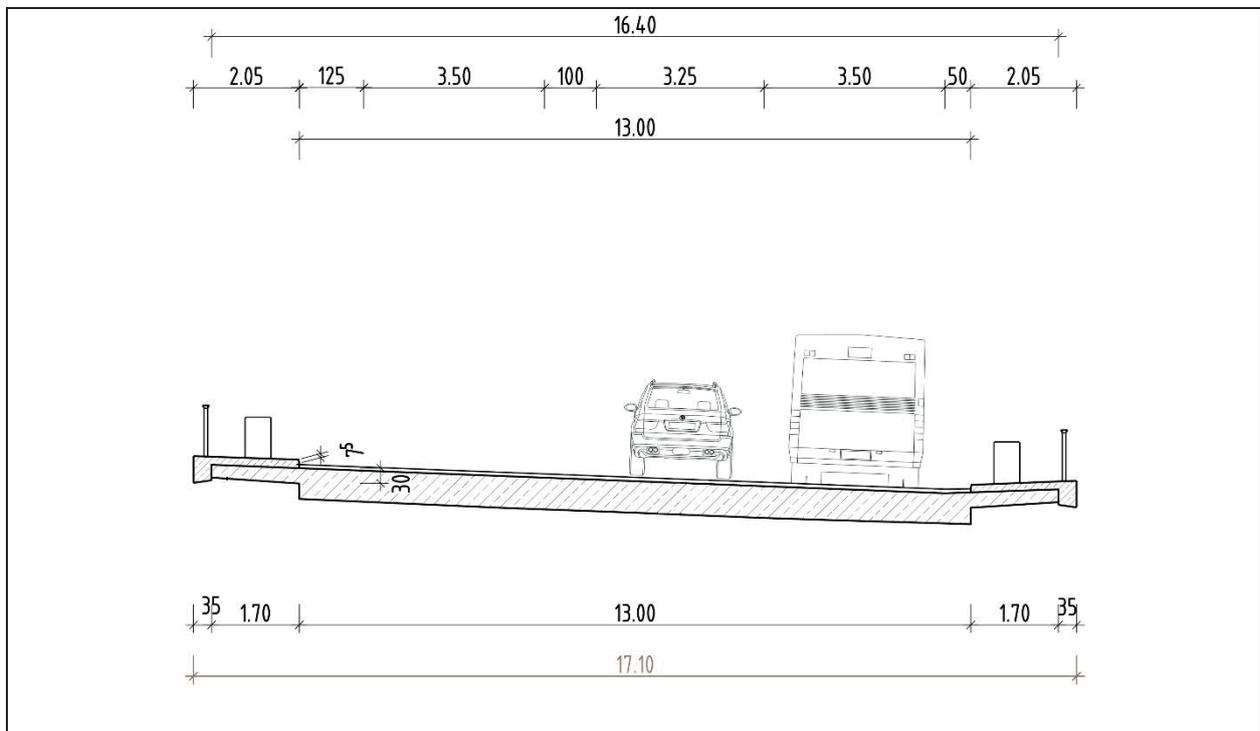


Bild I1: Querschnittswerte

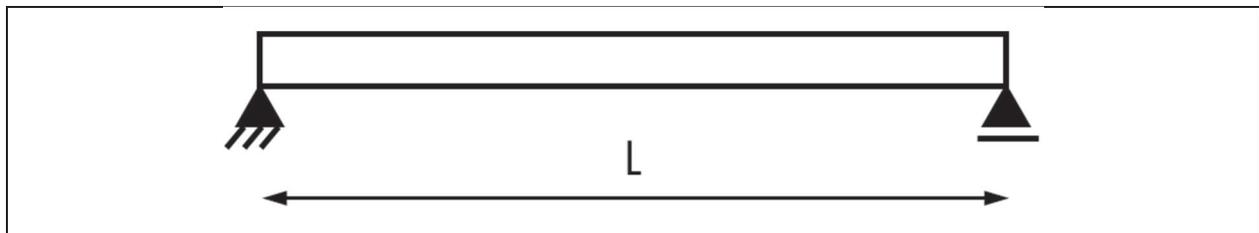


Bild I2: Statisches System

Modellierung

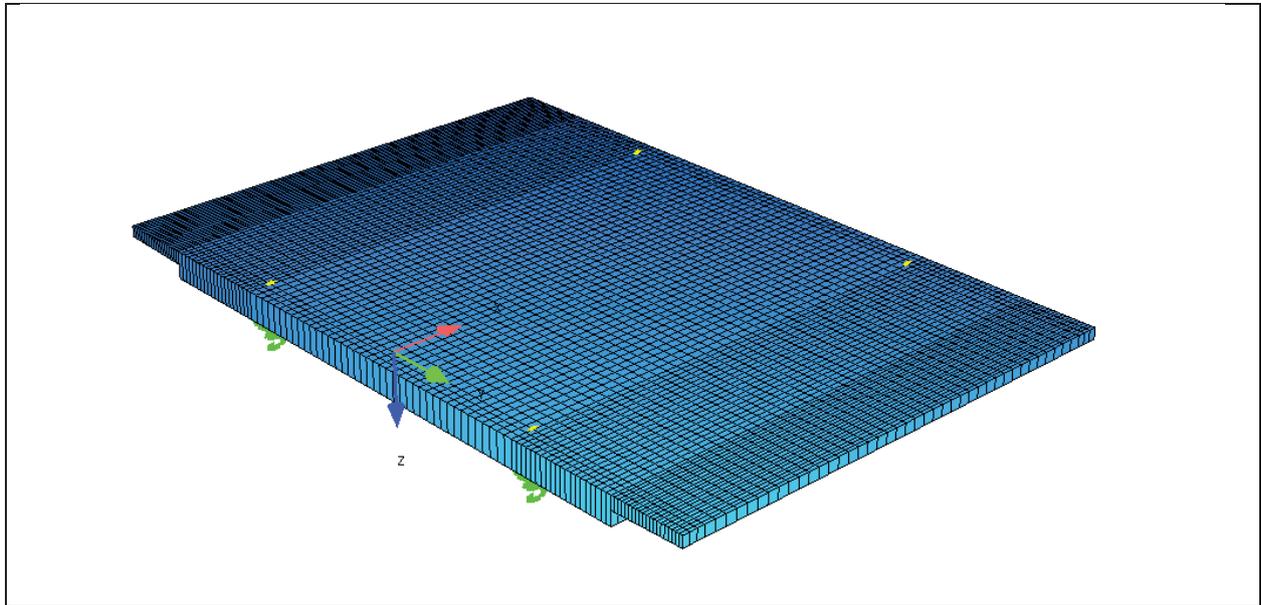


Bild I3: Modell

Die Lagerung des Überbaus erfolgt mit Kalottenlagern.
Der Festpunkt befindet sich hierbei in einer der Widerlagerachsen.

Achse \ Reihe	10	20
1		
2		

Legende:

- Kalottenlager - allseitig beweglich
- Kalottenlager - längs beweglich
- Kalottenlager - quer beweglich
- Kalottenlager - allseitig fest

Bild I4: Lagerschema

Die Auflager wurden als starre Federn mit einem Lagerabstand von 2 x 3,95 m modelliert.

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Der Überstand von je $0,5 \text{ m}$ an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten werden als Flächen- und Linienlasten in ihrer tatsächlichen Lage aufgebracht. Bei der Ermittlung der Eigenformen sind entsprechend keine Rotationsmassen manuell hinzuzufügen.

Fahrbahnbelag:

Der Belagsaufbau wird mit 8 cm und einer Wichte von 25 kN/m^3 inkl. einem Mehreinbau von $0,5 \text{ kN/m}^2$ über die 13 m breite Fahrbahn angesetzt [ARS 22/2012]:

$$g_{k,\text{Belag}} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Kappe:

Die Kappen werden analog zu Kap1 der RiZ-ING ausgebildet. Das Eigengewicht der Kappe ohne Gesimsbalken ergibt sich zu

$$g_{k,\text{Kappe},1} = 0,25 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 / 1,70 \text{ m} = 3,68 \text{ kN/m}^2$$

Das Eigengewicht des Gesimsbalkens inkl. Geländer (je $0,5 \text{ kN/m}$) und Schutzplanke (1 kN/m) ergibt sich zu:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 0,15 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 + 1,5 \text{ kN/m} = 5,25 \text{ kN/m}$$

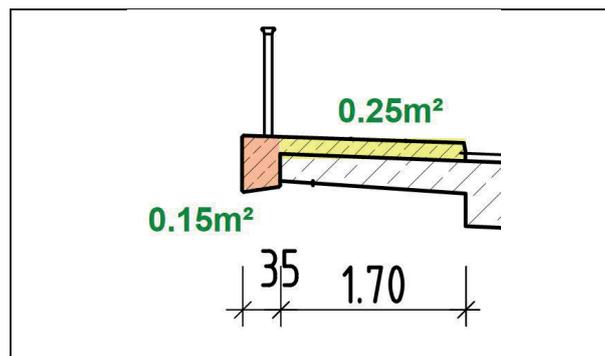
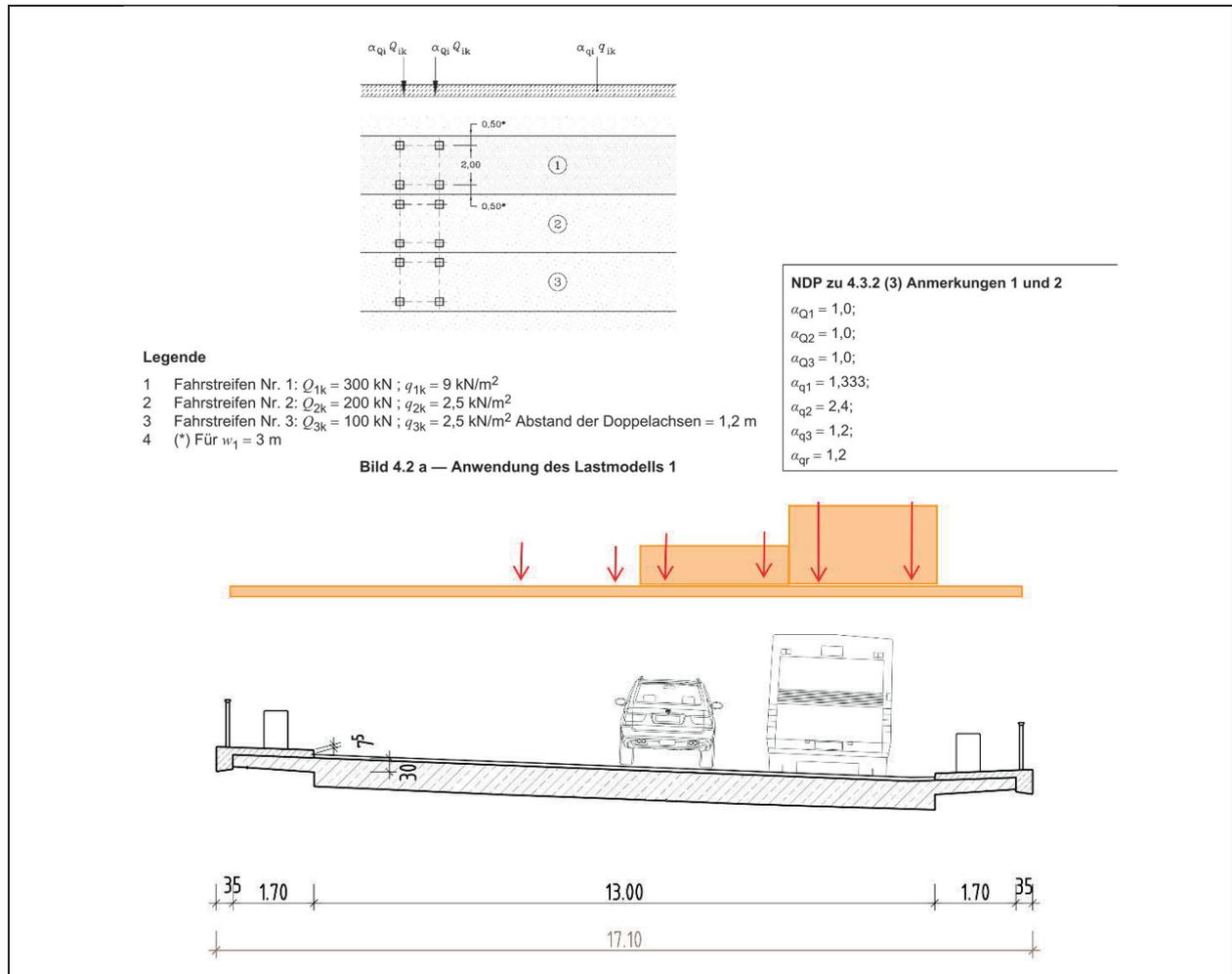


Bild I5: Darstellung der Kappe aus /30/

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):



UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 \times 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

Grundlast: $1,20 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($b=16,6 \text{ m}$)

Überlast Hauptspur: $1,33 \times 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 5,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

Überlast Nebenspur: $(2,40 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 2,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

HS: $4 \times 150 \text{ kN}$ ($e_y = 6,0 \text{ m}$; $e_y = 4,0 \text{ m}$)

NS1: $4 \times 100 \text{ kN}$ ($e_y = 3,0 \text{ m}$; $e_y = 1,0 \text{ m}$)

NS2: $4 \times 50 \text{ kN}$ ($e_y = 0,0 \text{ m}$; $e_y = -2,0 \text{ m}$)

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6xL_{\text{ges}} < 900$ kN und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Betonkonstruktion (Typ 3) (EC 1-5, 6.1.3)

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Ed,max}} = 37 \text{ °C} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{\text{N,con}} = -10 - 16 = -26 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{\text{N,exp}} = 39 - 10 = 29 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Betonkonstruktion –Träger/Platte (EC 1-5, 6.1.4)

$$T_{\text{M,heat}} = 15 * 0,82 = 12,3 \text{ K} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 0,82$; 80 mm Belagsdicke)

$$T_{\text{M,cool}} = 8 * 1,00 = 8,0 \text{ K} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$; 80 mm Belagsdicke)

Wind

Die Windlasten werden gemäß DIN EN 1991-4 ermittelt. Es werden jeweils die niedrigsten Windlasten angesetzt (Annahme: Windzone I, Binnenland, $z_e \leq 20$ m).

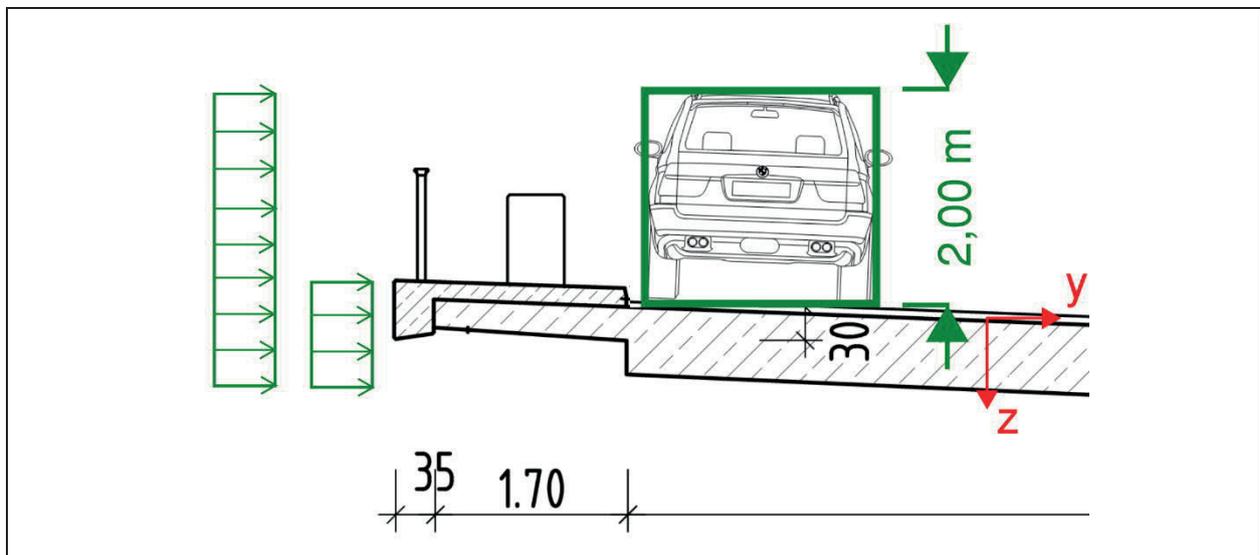


Bild I7: Darstellung Windlastmodell nach DIN EN 1991-1-4

Anmerkung: Die Windlasten werden als Linienlast und Krepelmoment ($w_k \cdot e_z$) am Kragarmrand der Platte aufgebracht.

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 0,18 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow$ vereinfachend $w = 0,60 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 2,08 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild I8: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitte 7.5.

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

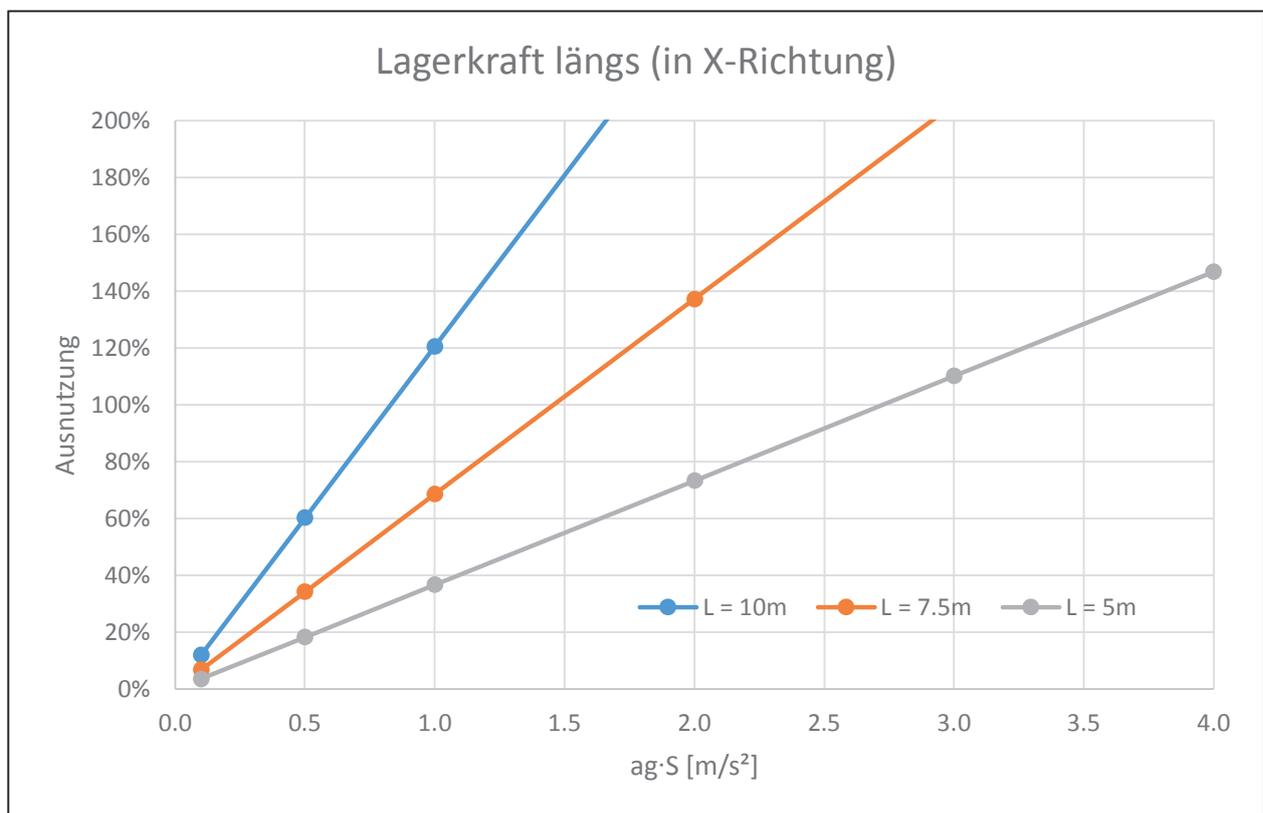
- Auflagerkräfte
- Lagerwege
- Längsbewehrung unten
- Längsbewehrung oben
- Querbewehrung unten
- Querbewehrung oben

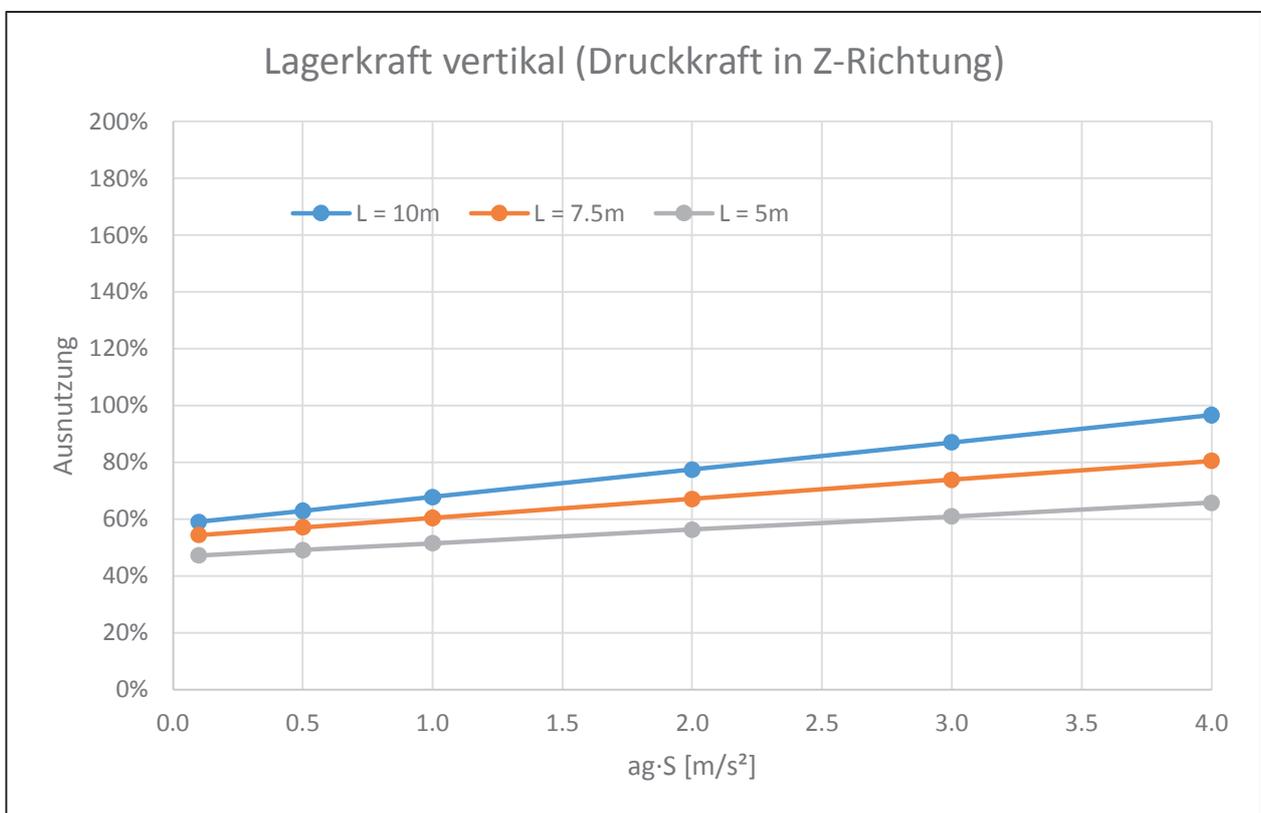
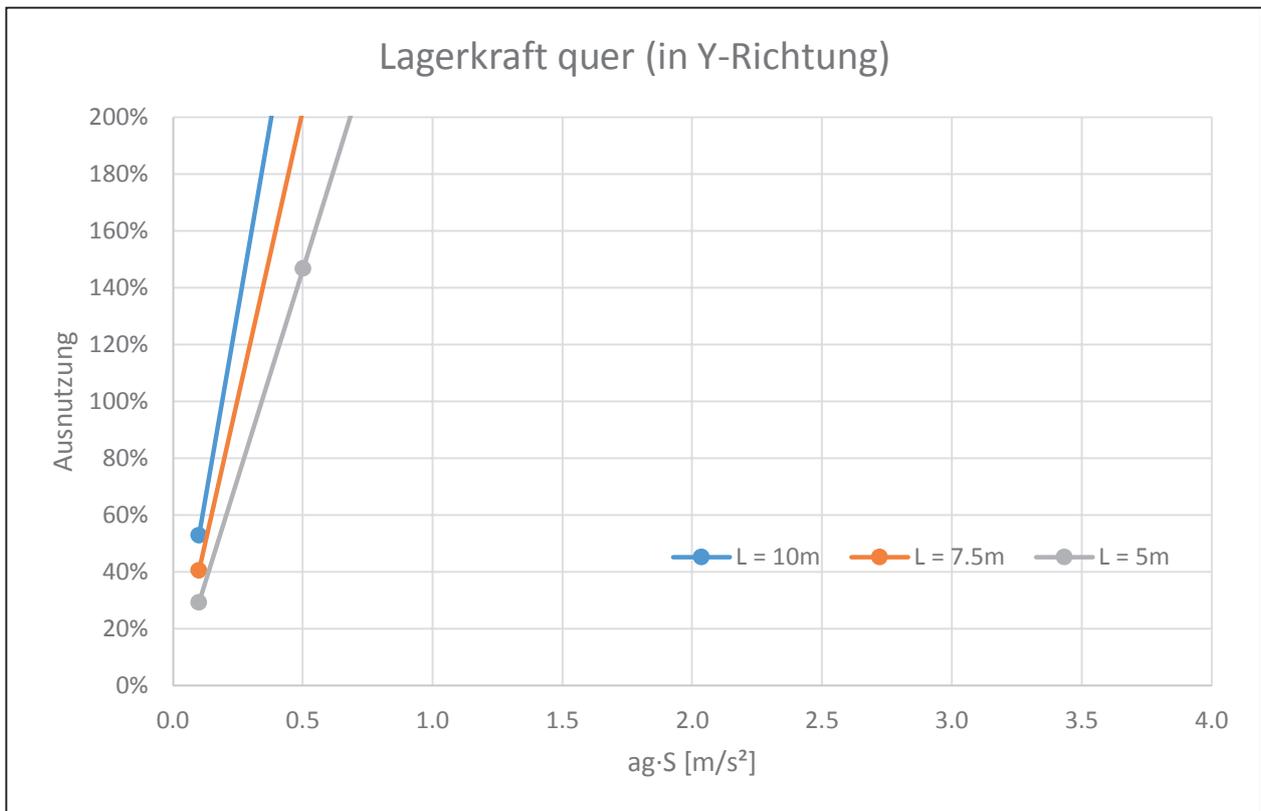
Auflagerkräfte

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \hat{=} \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

mit $i = X; Y; Z$





Abhebende Lagerkräfte sind nicht aufgetreten.

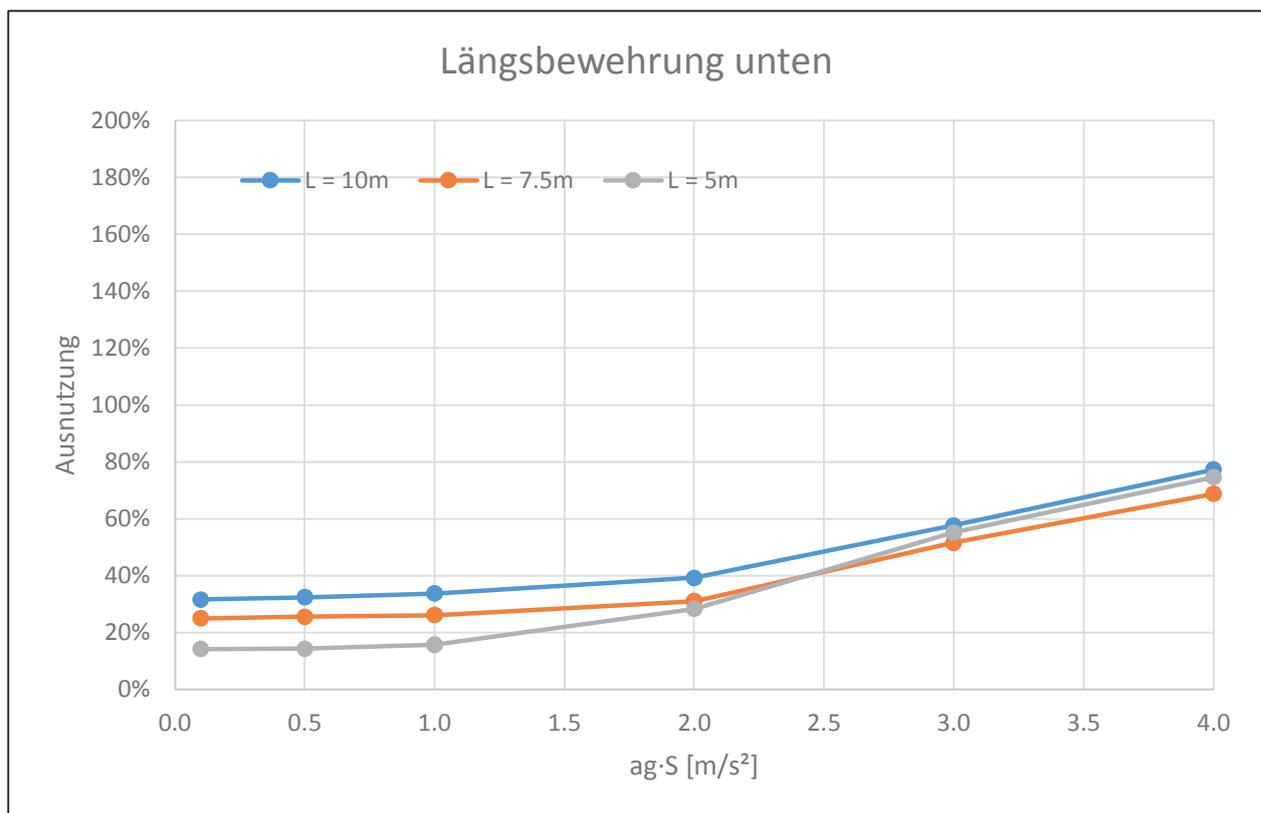
Lagerwege

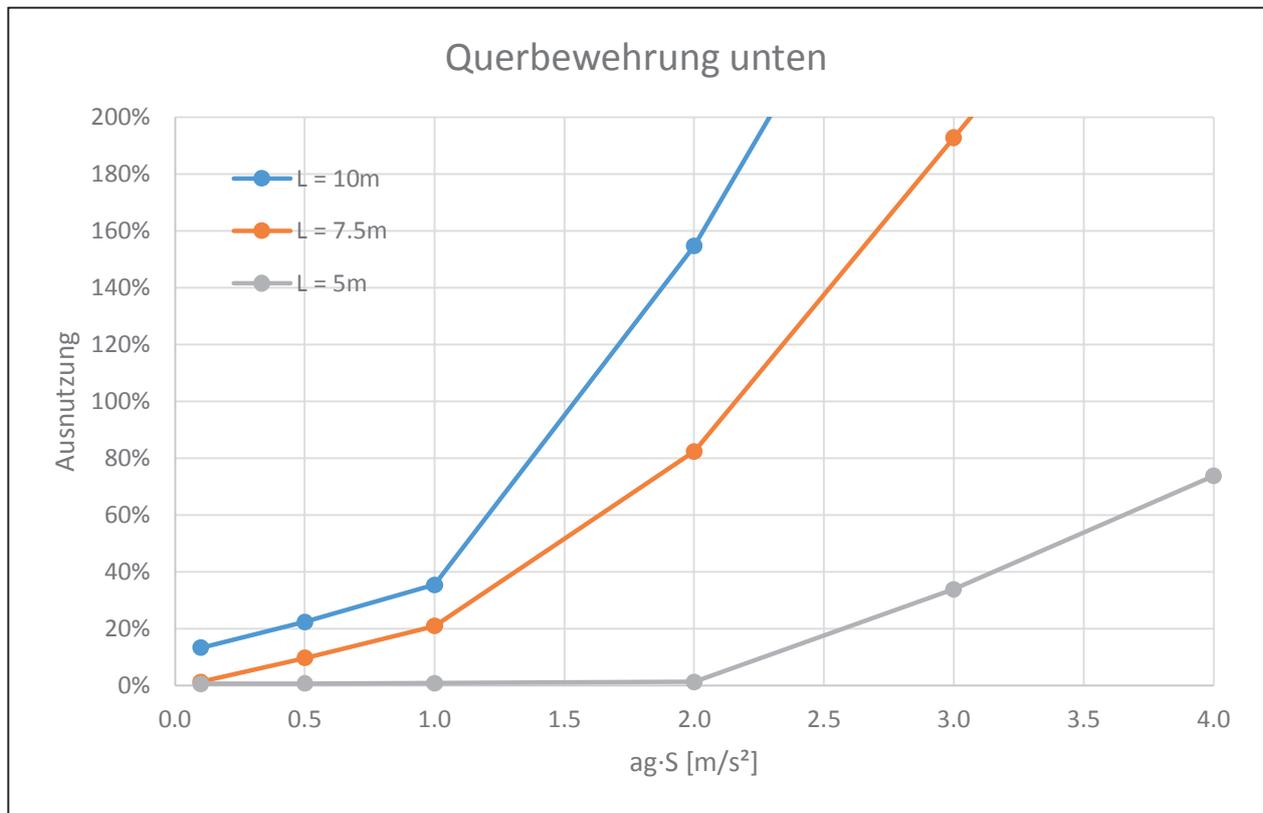
Bei den hier betrachteten starren Auflagern sind die Horizontalverschiebungen längs und quer auf ca. 10 mm begrenzt. Es wird vorausgesetzt, dass Lagerwege von 10 mm in jedem Falle aufgenommen werden können.

Bewehrung

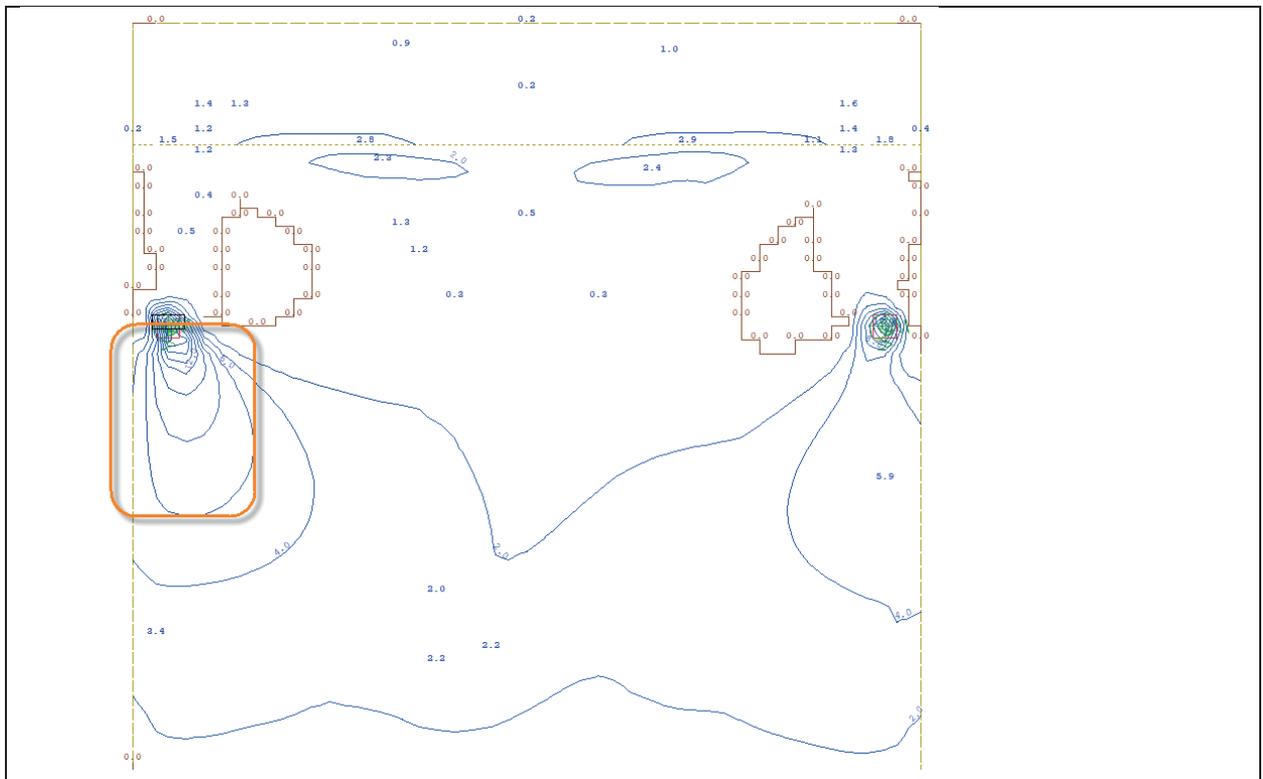
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

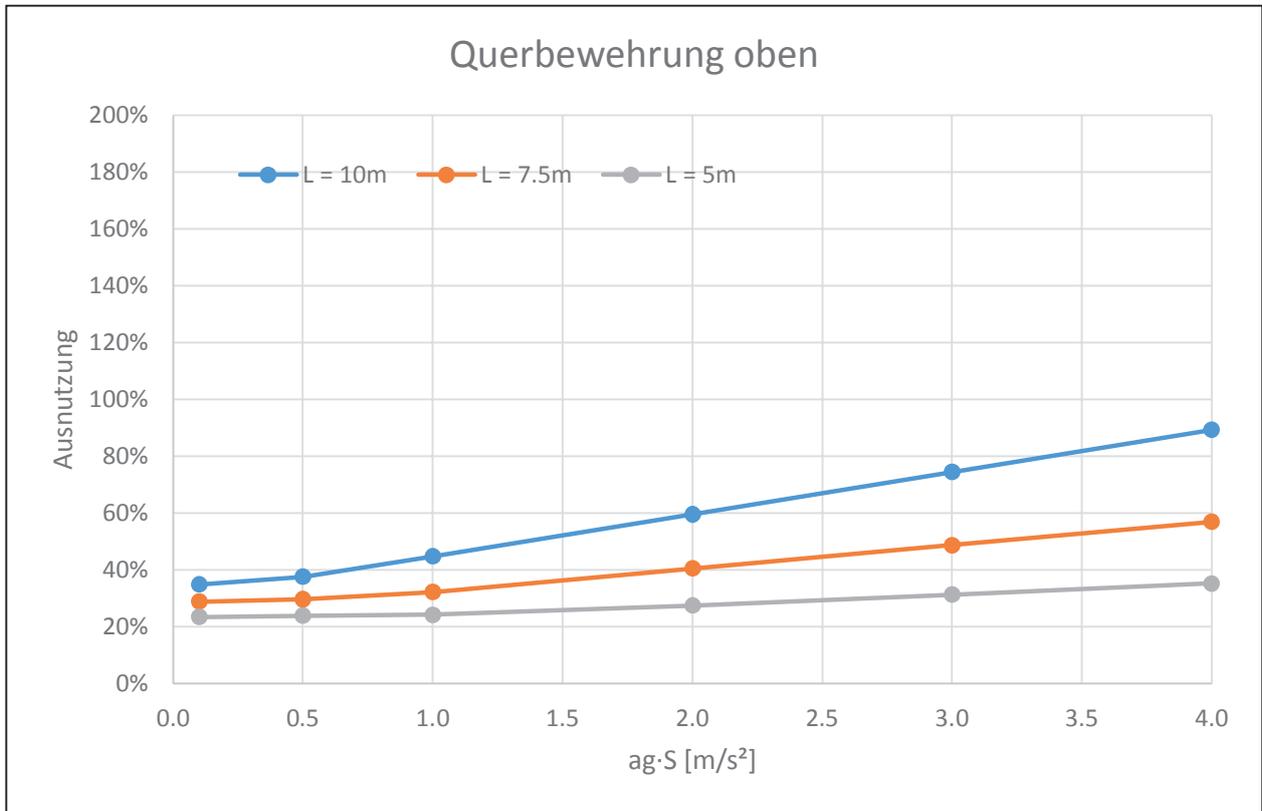
$$\text{Ausnutzung} \hat{=} \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$



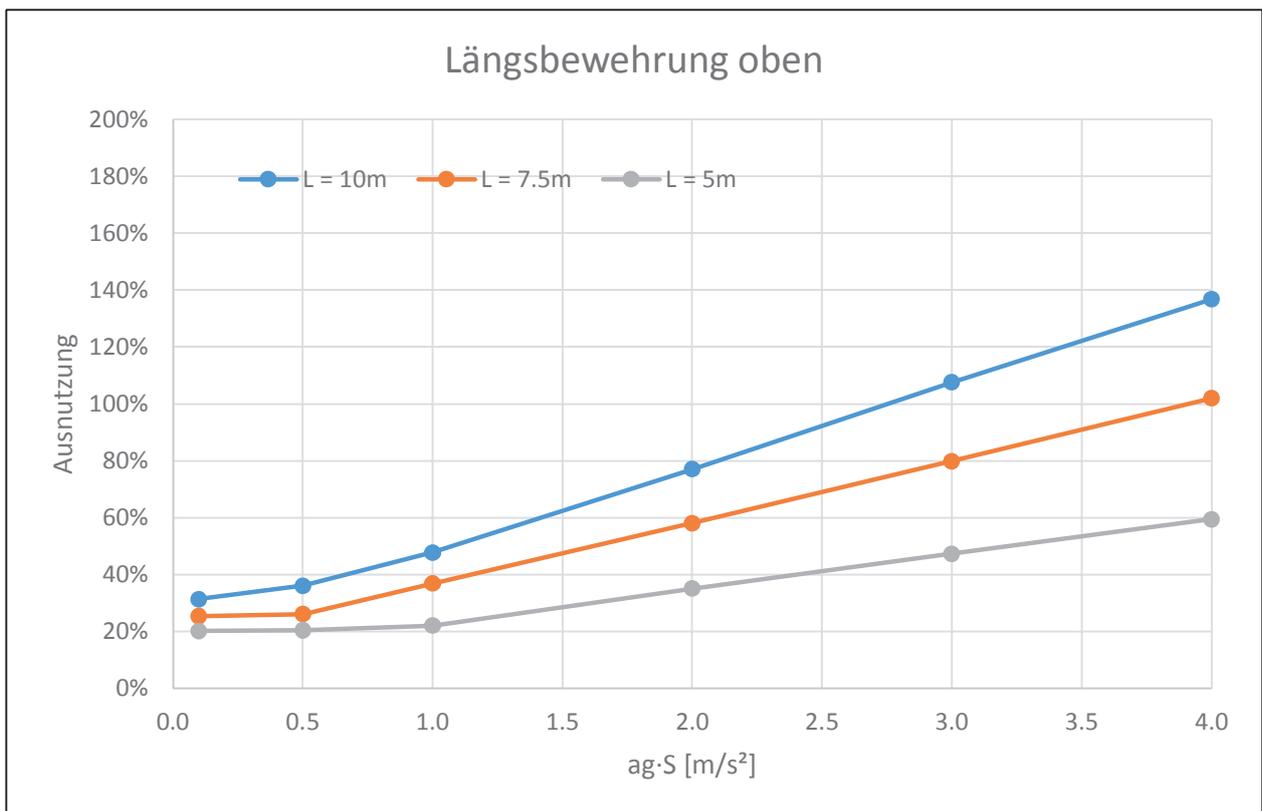


Die erhöhte Anforderung ergibt sich nur lokal in Auflagernähe.





Ein Erfordernis für Längsbewehrung oben ergibt sich für den Erdbebenfall nur lokal über dem Auflager. Die Ausnutzung der Längsbewehrung oben wird hier dennoch ausgewertet:



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die Auflagerlasten in Querrichtung im Betrieb die Auflagerlasten in Querrichtung unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
10,00	0,5	4,0
7,50	0,5	4,0
5,00	0,5	4,0

Tabelle I1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis //16

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_X \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_Y \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G1 + G2 + 0,2 \cdot UDL$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_1 \cdot S$$

η : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

Zusätzlich muss die Einleitung der horizontalen Lagerkräfte nachgewiesen und durch Zulagebewehrung im Auflagerbereich aus dem Querschnitt ausgeleitet werden.

Anhang J: Brückentyp 3.2

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Plattenbrücke (s. Bild J1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Zweifeldträger (s. Bild J2)</i>
Anzahl der Felder	2
Material des Überbaus	<i>Stahlbeton</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Vollplatte</i>
	<i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild J1</i>
Bauwerkslänge	$\leq 2 \times 10$ m
Konstruktionshöhe	$L/20$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten ≥ 150 m/s</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Verwendung von Kalottenlagern</i> - <i>Mindestbewehrung von $\emptyset 12/15$ vorhanden</i> - <i>starre Unterbauten</i>

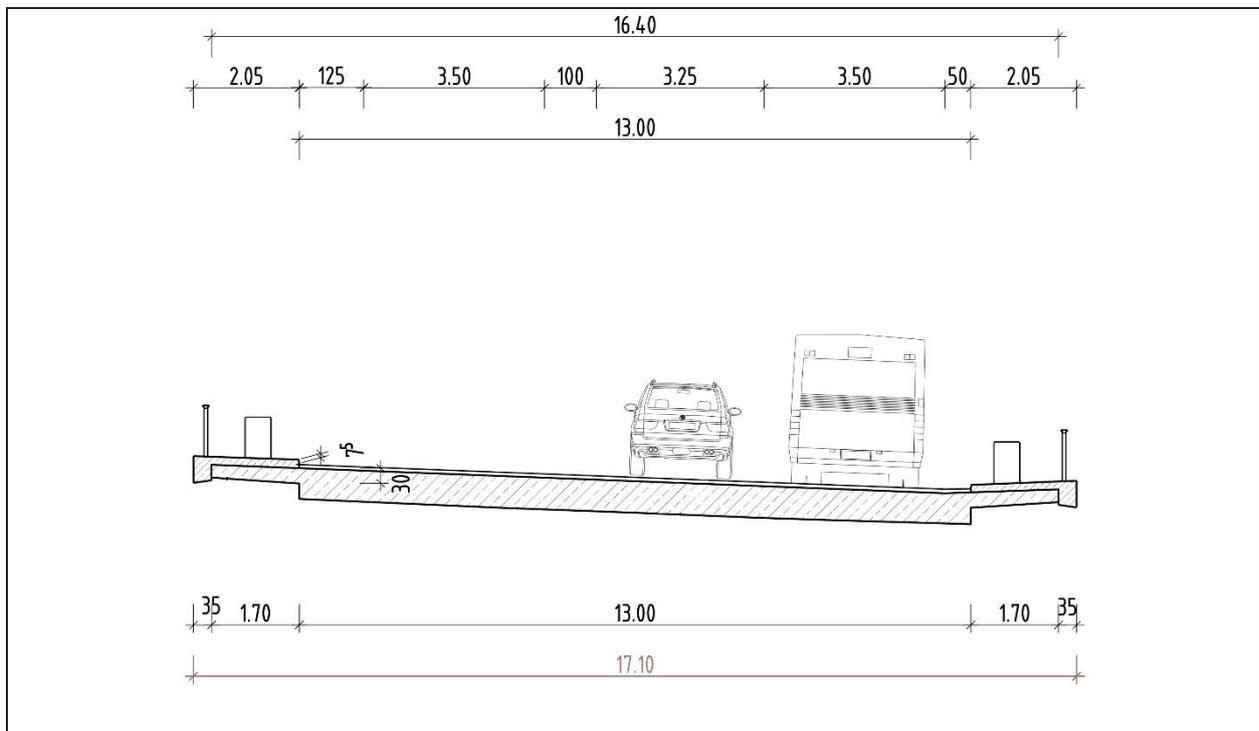


Bild J1: Querschnittswerte

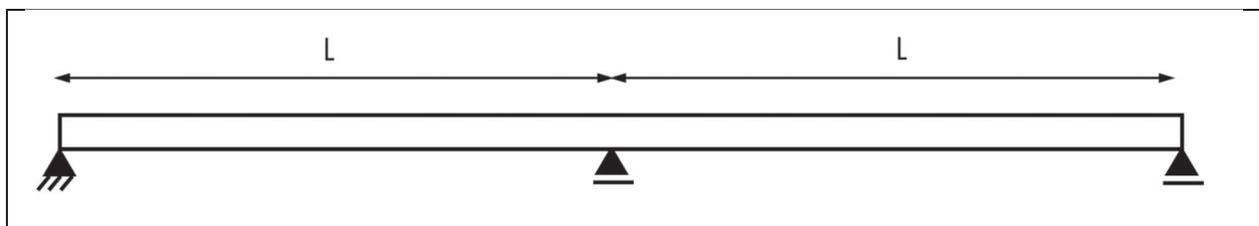


Bild J2: Statisches System

Modellierung

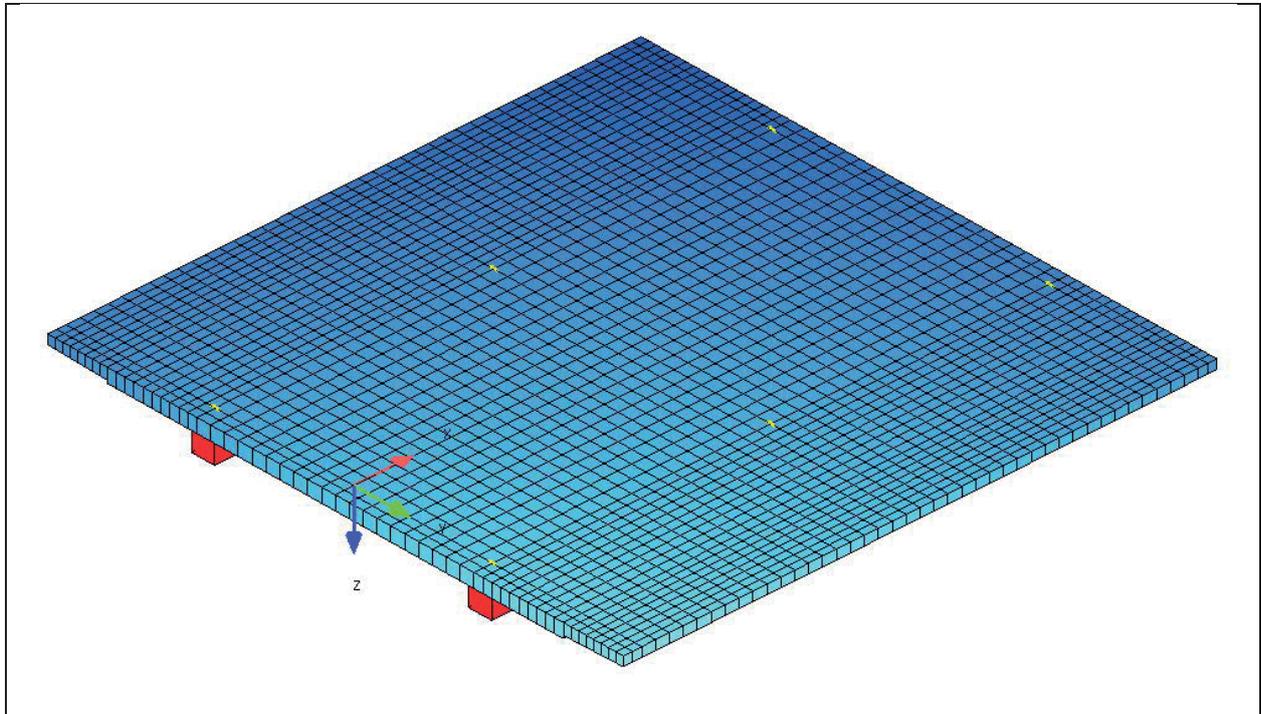


Bild J3: Modell

Die Lagerung des Überbaus erfolgt mit Kalottenlagern.
Der Festpunkt befindet sich hierbei in einer der Widerlagerachsen.

Achse \ Reihe	10	20	30	Legende:
1				
2				

Bild J4: Lagerschema

Die Auflager wurden als starre Federn mit einer Lagerspreizung von 2 x 3,95 m modelliert.

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Der Überstand von je $0,5 \text{ m}$ an den Widerlagerenden wird im System berücksichtigt.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten werden als Flächen- und Linienlasten in ihrer tatsächlichen Lage aufgebracht. Bei der Ermittlung der Eigenformen sind entsprechend keine Rotationsmassen manuell hinzuzufügen.

Fahrbahnbelag:

Der Belagsaufbau wird mit 8 cm und einer Wichte von 25 kN/m^3 inkl. einem Mehreinbau von $0,5 \text{ kN/m}^2$ über die 13 m breite Fahrbahn angesetzt [ARS 22/2012]:

$$g_{k,\text{Belag}} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Kappe:

Die Kappen werden analog zu Kap1 der RiZ-ING ausgebildet. Das Eigengewicht der Kappe ohne Gesimsbalken ergibt sich zu

$$g_{k,\text{Kappe},1} = 0,25 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 / 1,70 \text{ m} = 3,68 \text{ kN/m}^2$$

Das Eigengewicht des Gesimsbalkens inkl. Geländer (je $0,5 \text{ kN/m}$) und Schutzplanke (1 kN/m) ergibt sich zu:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 0,15 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 + 1,5 \text{ kN/m} = 5,25 \text{ kN/m}$$

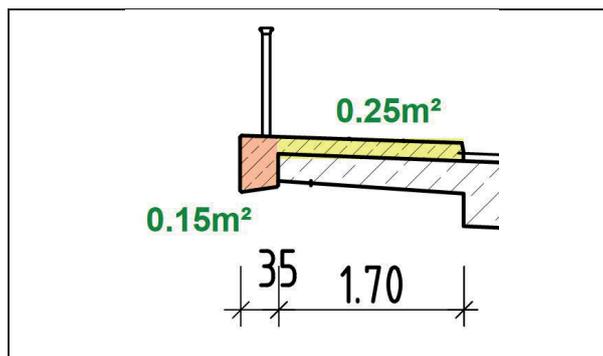
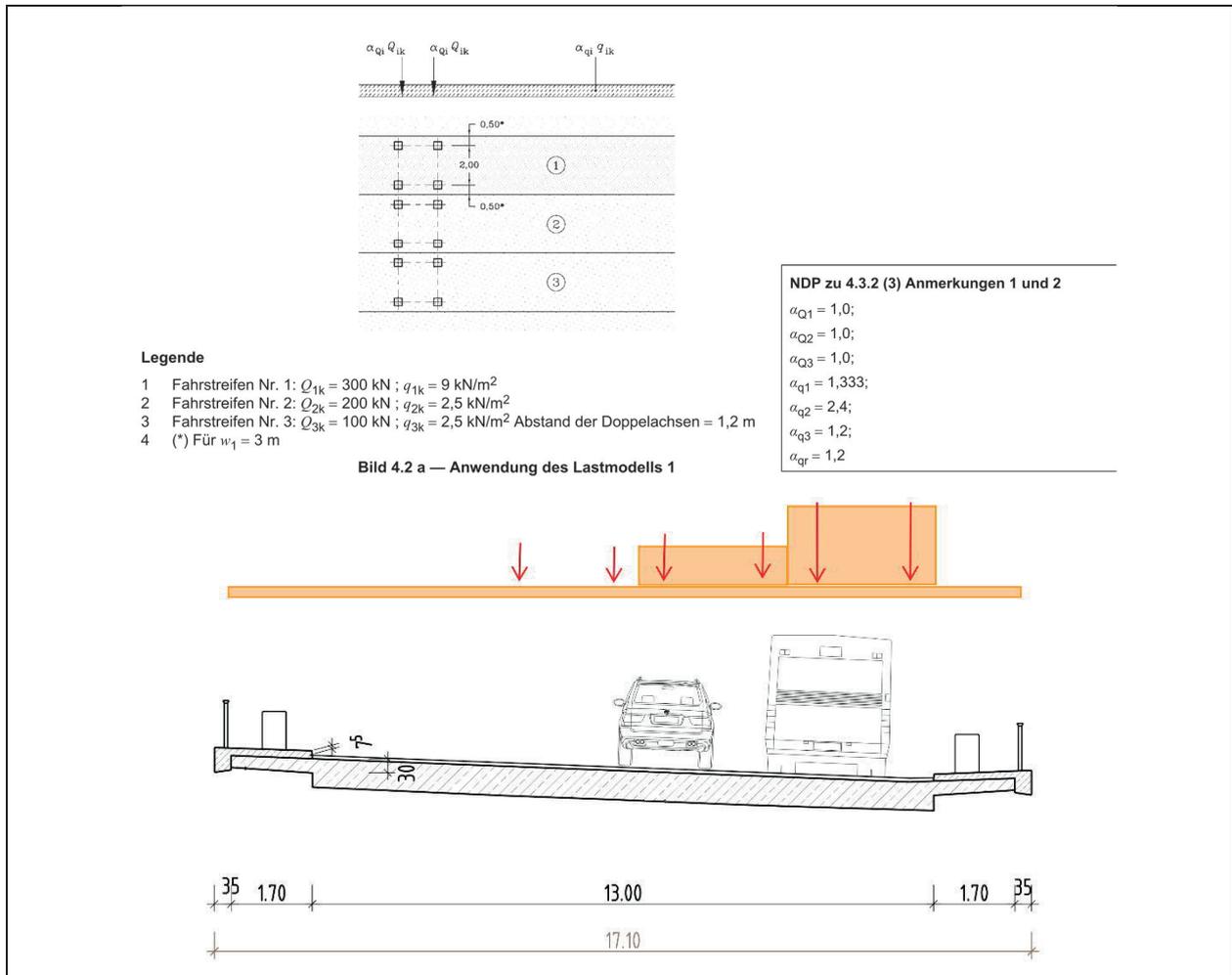


Bild J5: Darstellung der Kappe aus /30/

Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):



UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 \times 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

Grundlast: $1,20 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($b=16,6 \text{ m}$)

Überlast Hauptspur: $1,33 \times 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 5,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

Überlast Nebenspur: $(2,40 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 2,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

HS: $4 \times 150 \text{ kN}$ ($e_y = 6,0 \text{ m}$; $e_y = 4,0 \text{ m}$)

NS1: $4 \times 100 \text{ kN}$ ($e_y = 3,0 \text{ m}$; $e_y = 1,0 \text{ m}$)

NS2: $4 \times 50 \text{ kN}$ ($e_y = 0,0 \text{ m}$; $e_y = -2,0 \text{ m}$)

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6xL_{\text{ges}} < 900 \text{ kN}$ und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Betonkonstruktion (Typ 3) (EC 1-5, 6.1.3)

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Ed,max}} = 37 \text{ °C} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{\text{N,con}} = -10 - 16 = -26 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{\text{N,exp}} = 39 - 10 = 29 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Betonkonstruktion –Träger/Platte (EC 1-5, 6.1.4)

$$T_{\text{M,heat}} = 15 * 0,82 = 12,3 \text{ K} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 0,82$; 80 mm Belagsdicke)

$$T_{\text{M,cool}} = 8 * 1,00 = 8,0 \text{ K} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$; 80 mm Belagsdicke)

Wind

Die Windlasten werden gemäß DIN EN 1991-4 ermittelt. Es werden jeweils die niedrigsten Windlasten angesetzt (Annahme: Windzone I, Binnenland, $z_e \leq 20 \text{ m}$).

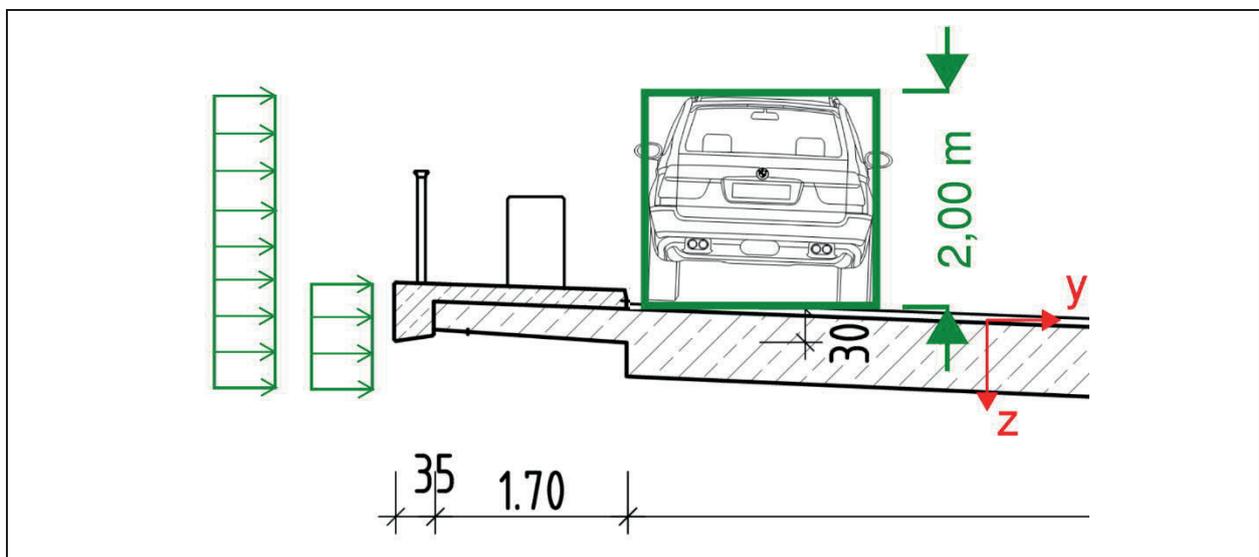


Bild J7: Darstellung Windlastmodell nach DIN EN 1991-1-4

Anmerkung: Die Windlasten werden als Linienlast und Krepelmoment ($w_k \cdot e_z$) am Kragarmrand der Platte aufgebracht.

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 0,18 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow$ vereinfachend $w = 0,60 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 2,08 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild J8: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitte 7.5.

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

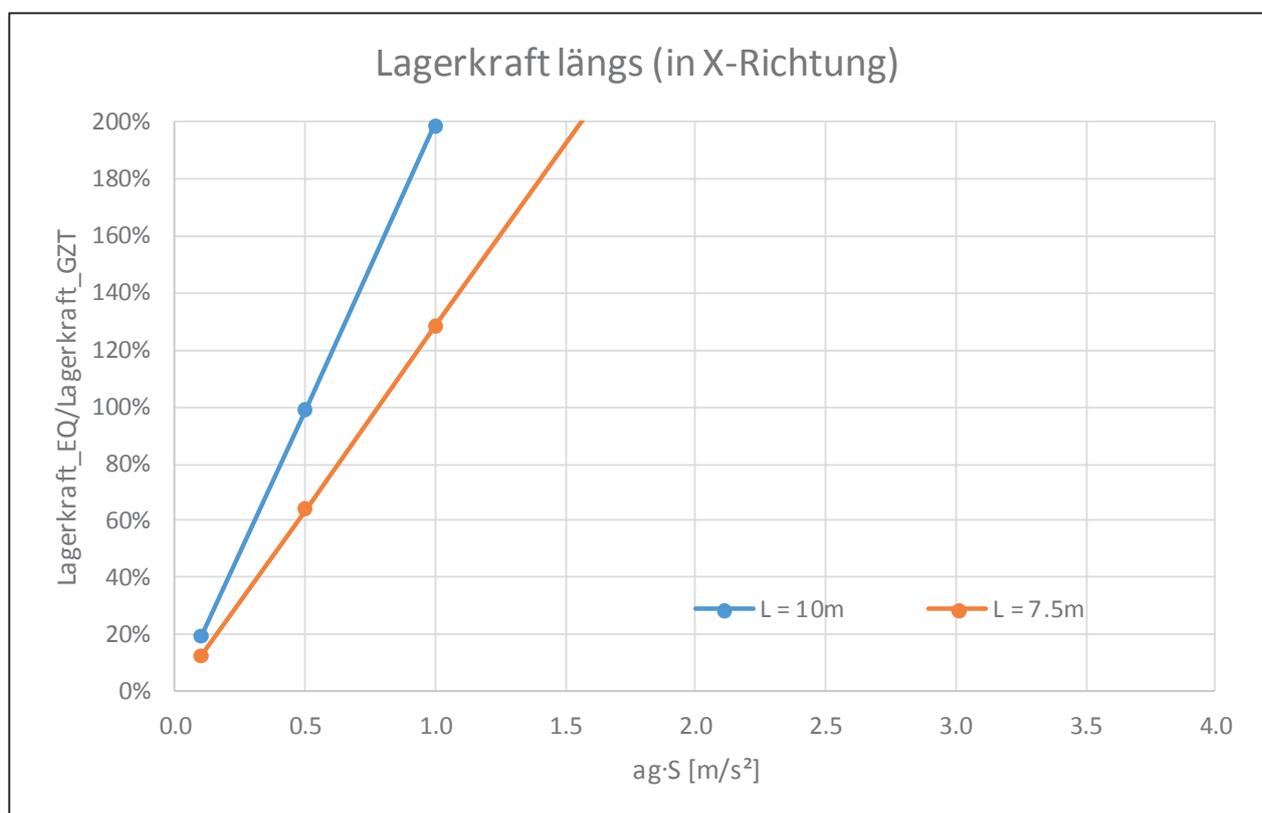
- Auflagerkräfte
- Lagerwege
- Längsbewehrung unten
- Längsbewehrung oben
- Querbewehrung unten
- Querbewehrung oben

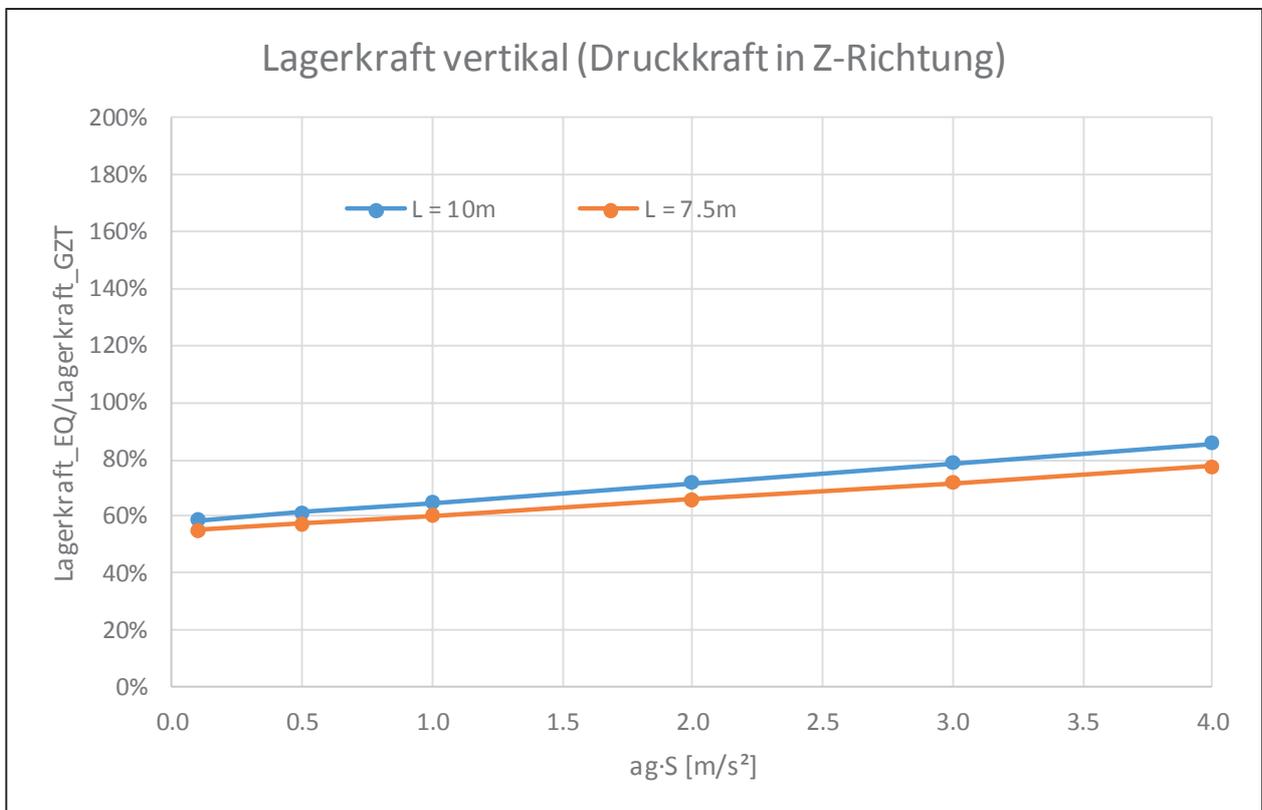
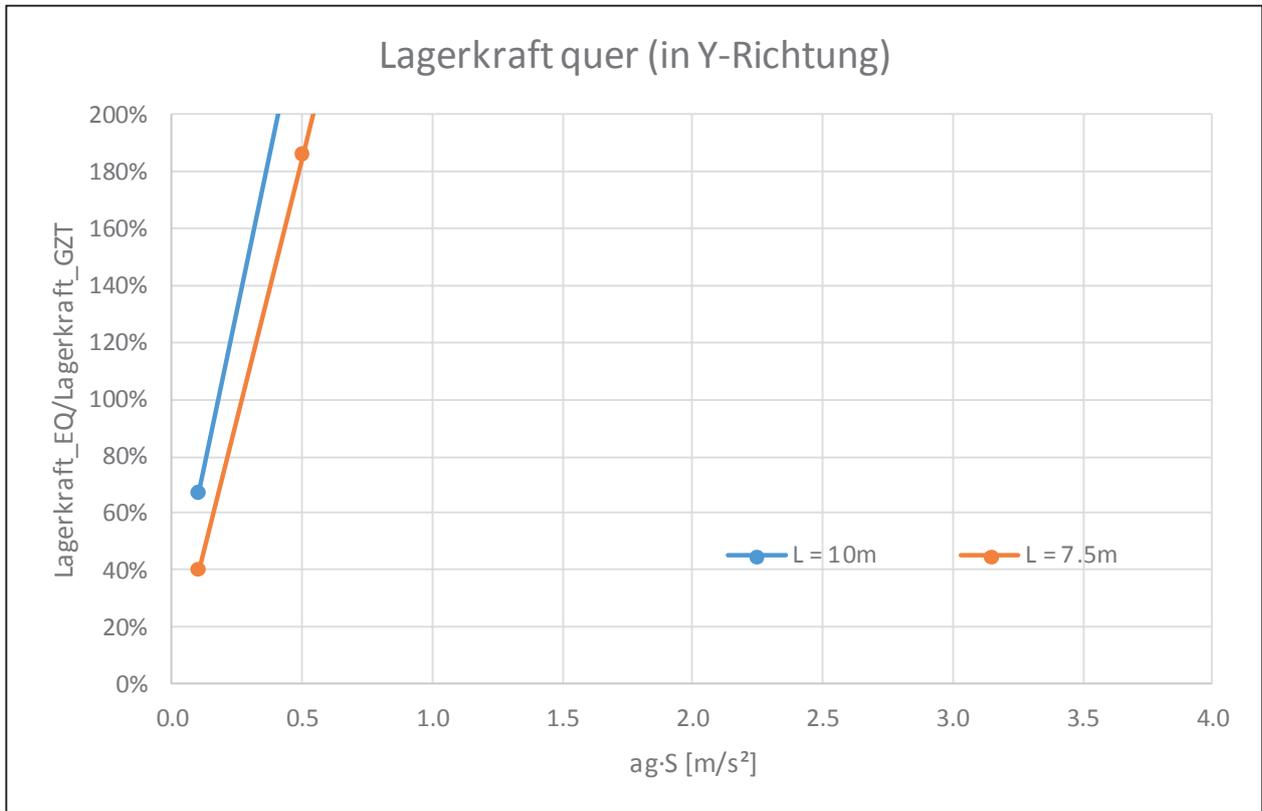
Auflagerkräfte

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Auflagerkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Auflagerkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \hat{=} \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

mit $i = X; Y; Z$





Abhebende Lagerkräfte sind nicht aufgetreten.

Lagerwege

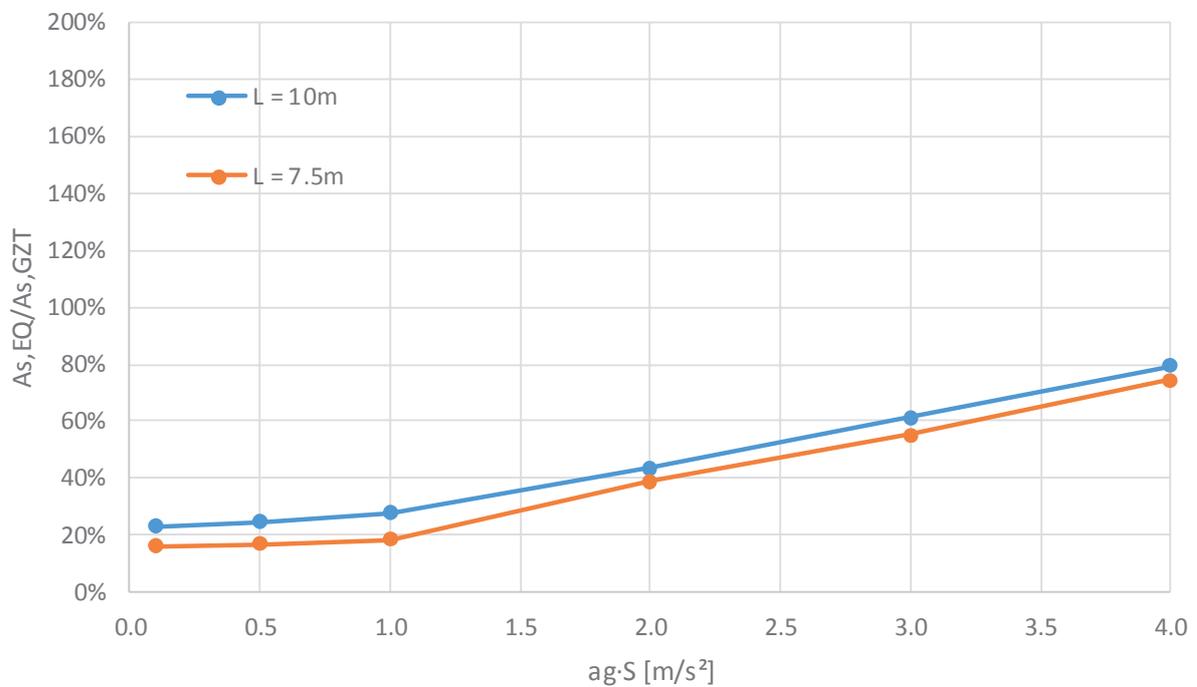
Bei den hier betrachteten starren Auflagern sind die Horizontalverschiebungen längs und quer auf ca. 10 mm begrenzt. Es wird vorausgesetzt, dass Lagerwege von 10 mm in jedem Falle aufgenommen werden können.

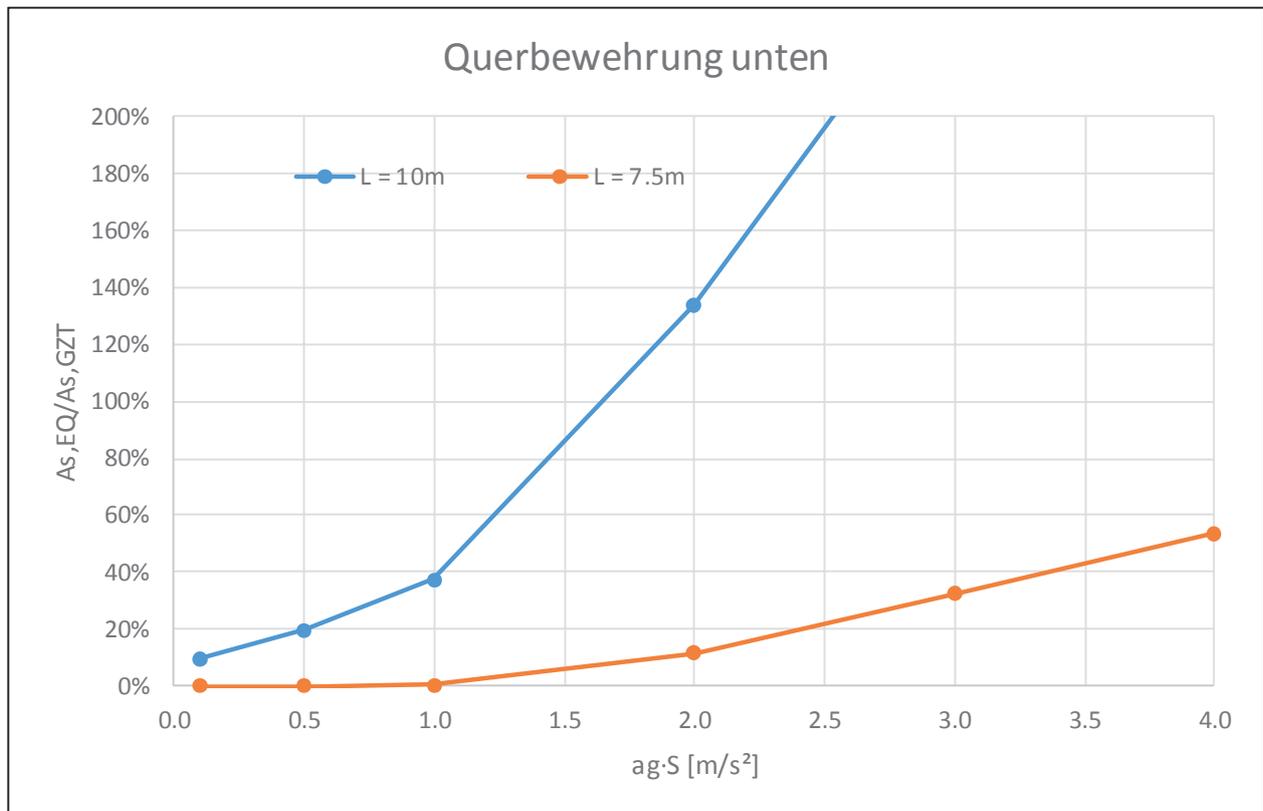
Bewehrung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet. Bei der Ermittlung der Bewehrung im Betrieb werden auch die erforderlichen Mindestbewehrungen berücksichtigt.

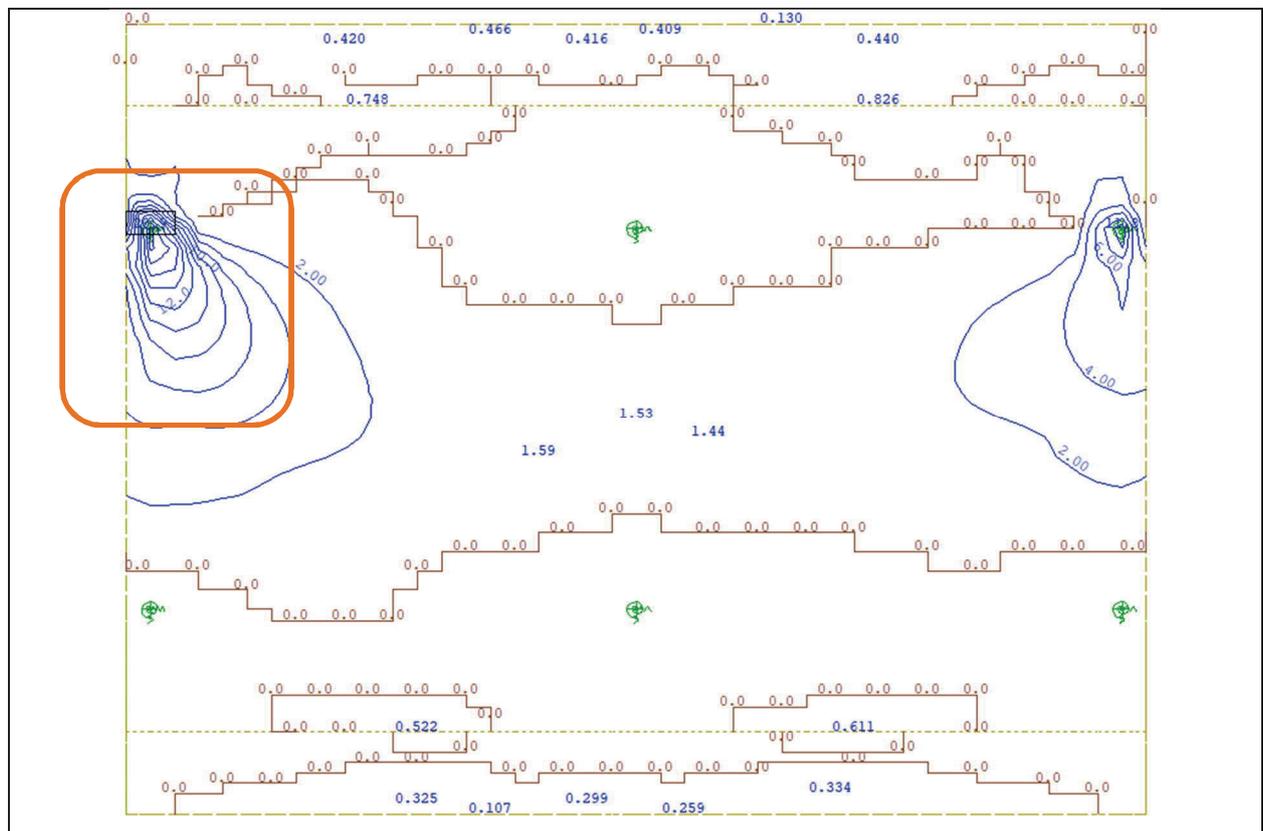
$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s,\text{Erdbeben}}}{A_{s,\text{GZT}}}$$

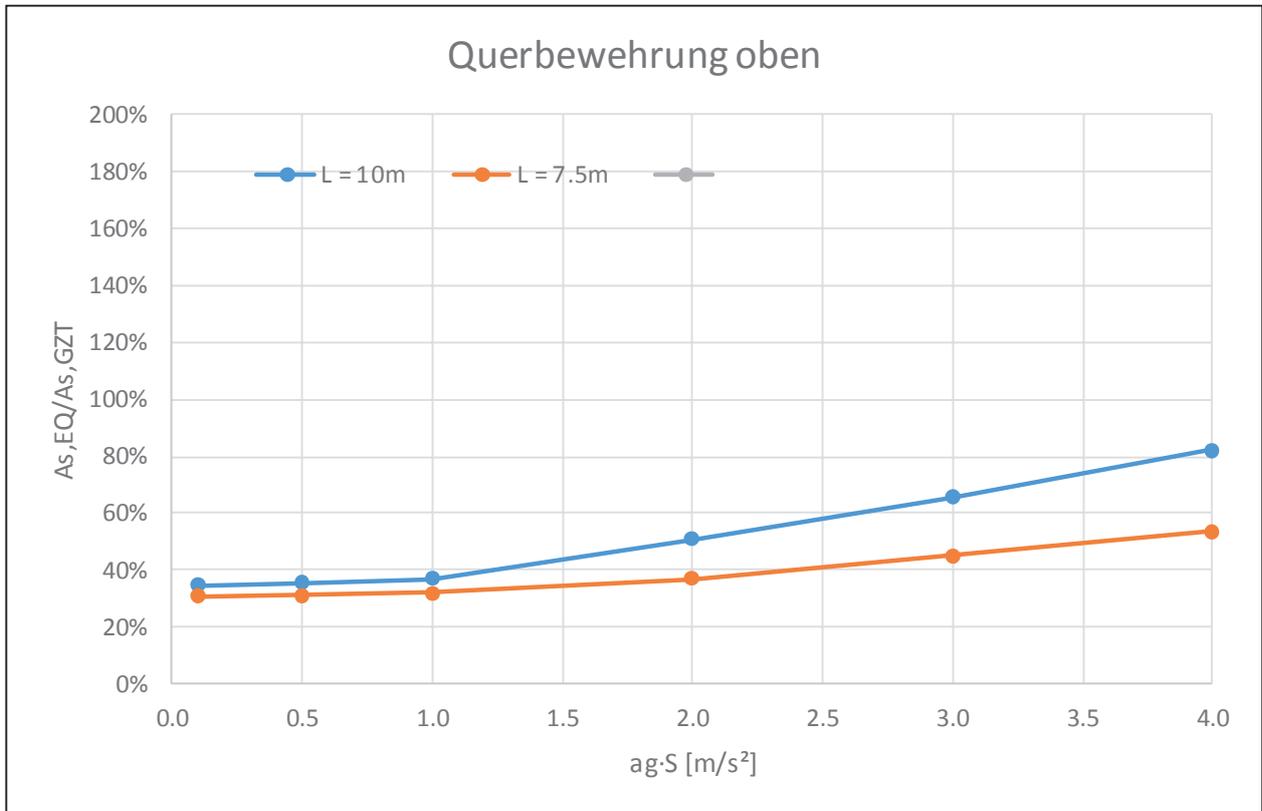
Längsbewehrung unten



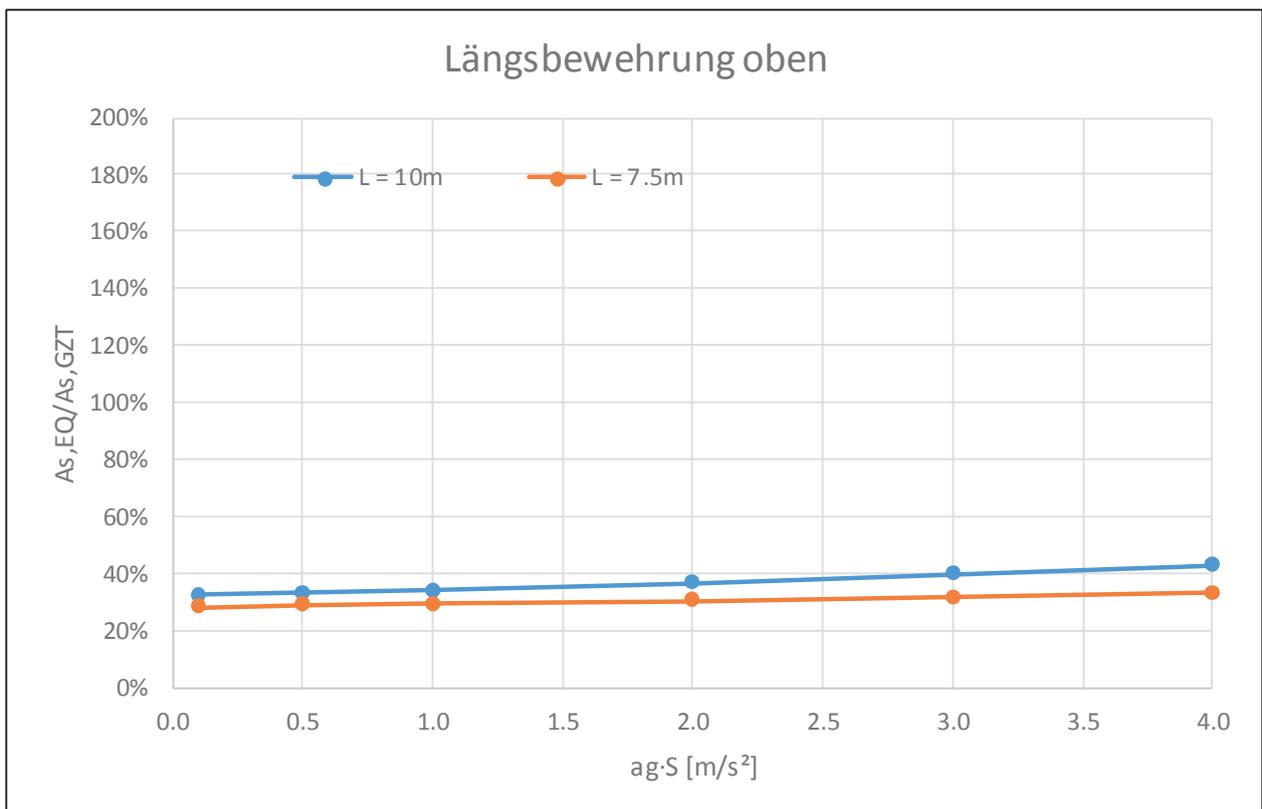


Die erhöhte Anforderung ergibt sich nur lokal in der Nähe der Endauflager.





Ein Erfordernis für Längsbewehrung oben ergibt sich für den Erdbebenfall nur lokal über dem Auflager. Die Ausnutzung der Längsbewehrung oben wird hier dennoch ausgewertet:



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die Auflagerlasten in Querrichtung im Betrieb die Auflagerlasten in Querrichtung unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
10,00	0,5	4,0
7,50	0,5	4,0
5,00	0,5	4,0

Tabelle I1: Grenzwerte für Schlankheitsverhältnis $l/20$

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Auflager in Brückenlängsrichtung mit

$$A_x \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S)$$

- Ermittlung der horizontalen Auflagerlast in Brückenquerrichtung

$$A_y \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 3 \text{ (bei starren Unterbauten, sonst } <3)$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. 20 % der UDL ($M = G1 + G2 + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_1 \cdot S$$

η : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

Zusätzlich muss die Einleitung der horizontalen Lagerkräfte nachgewiesen und durch Zulagebewehrung im Bereich der Endauflager aus dem Querschnitt ausgeleitet werden.

Anhang K: Brückentyp 4.1

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Integrale Rahmenbrücke (s. Bild K1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldträger (s. Bild K2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Beton: Mindestens C30/37 Betonstahl: B 500B</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Vollplatte</i>
	<i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild K1</i>
Bauwerkslänge	$\leq 15 \text{ m}$
Konstruktionshöhe	$L/15$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Mindestbewehrung von $\text{Ø}12/15$ vorhanden</i> - <i>Durchgehende Fundamentplatte</i> - <i>Höhe des Widerlagers $\leq 6 \text{ m}$</i> - <i>Bauteildicke der Widerlagerwand ca. $1,00 \text{ m}$</i> - <i>Bauteildicke der Flügelwände ca. $0,75 \text{ m}$</i> - <i>Flügelwände parallel, Schiefwinkligkeit $\leq 20^\circ$</i>

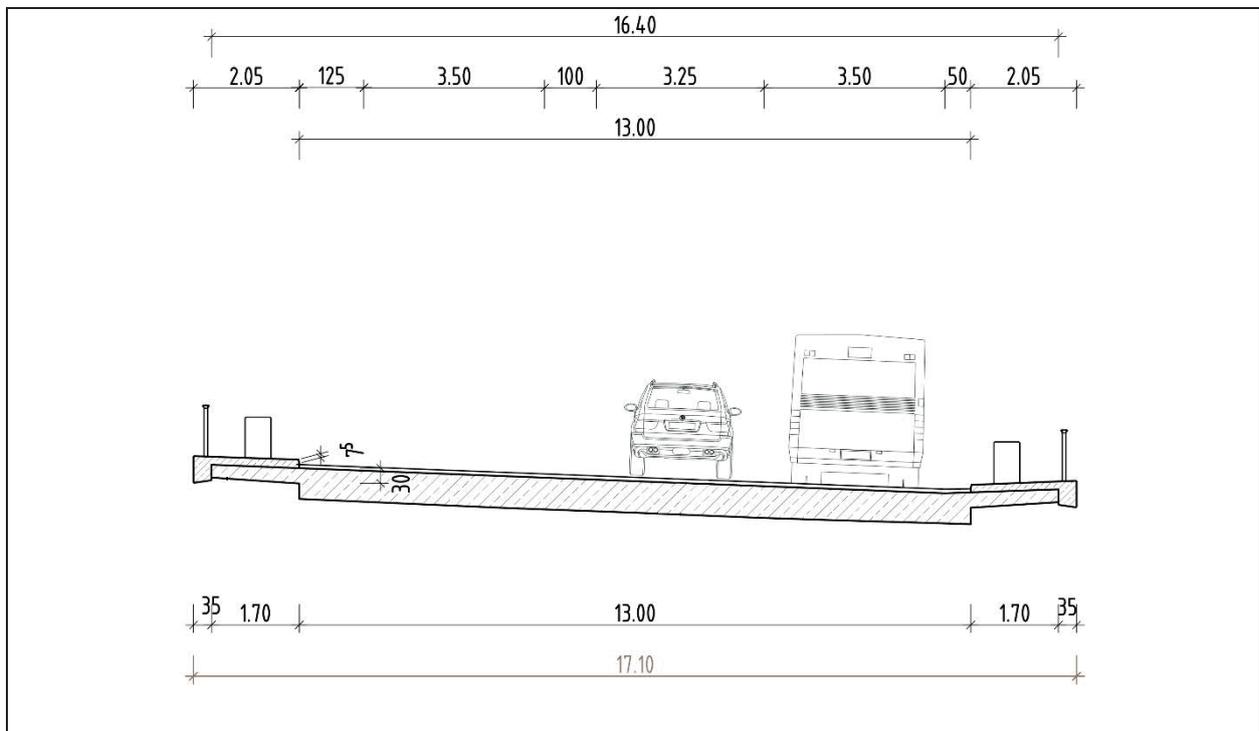


Bild K1: Querschnittswerte

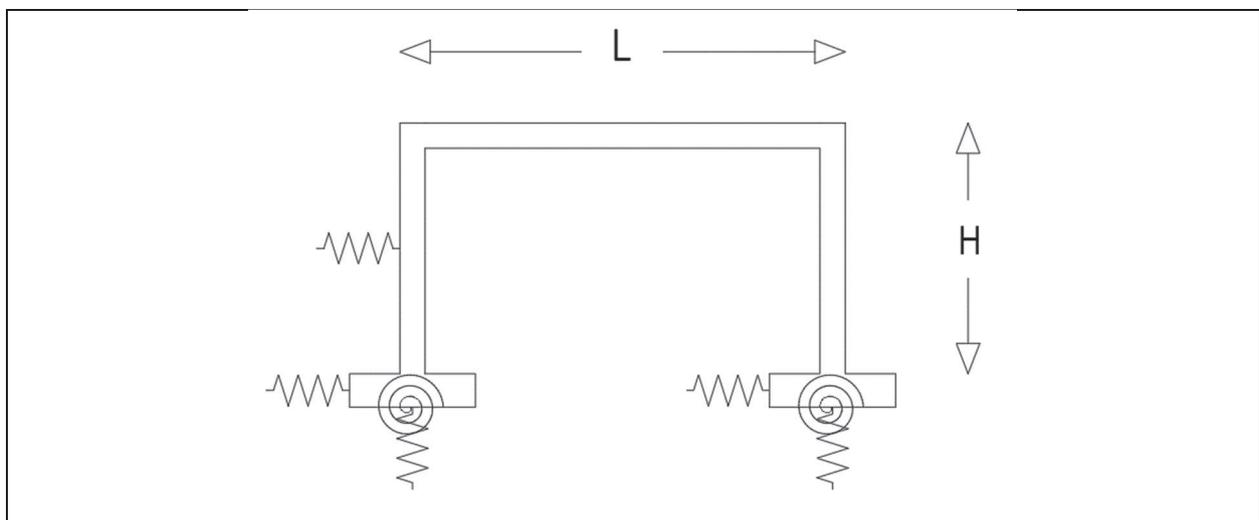


Bild K2: Statisches System

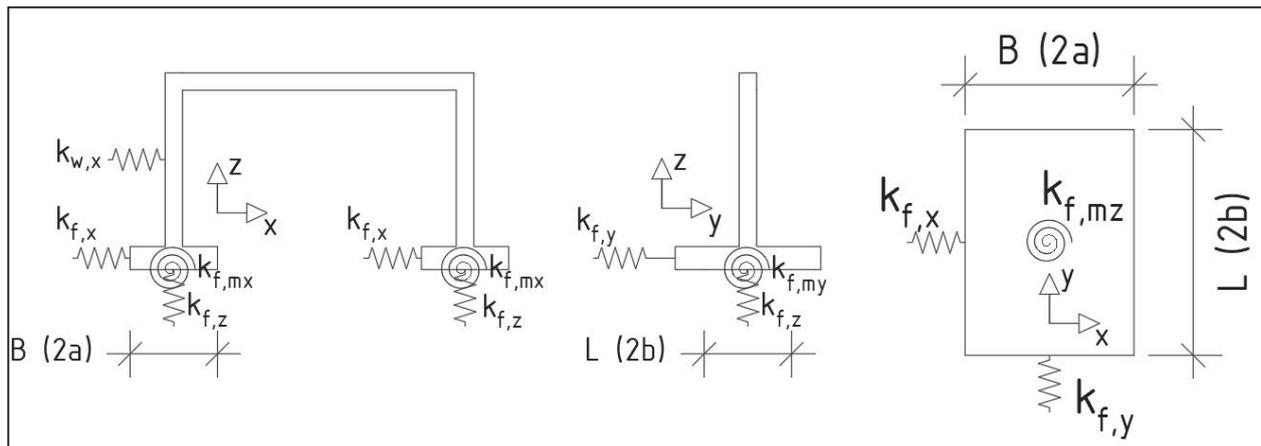
H hier gewählt zu 5,125 m.

Bauteildicke der Flügelwand: 0,75 m

Bauteildicke der Widerlagerwand: 1,00 m

Bodeneigenschaften und Gründungssteifigkeiten

Zwei extreme Bodeneigenschaften von mitteldichtem Sand und dichtem Kies werden in dieser Untersuchung gemäß folgender Tabelle berücksichtigt. Die Bettung der Widerlagerwand wird nur in der Lastkombination Erdbeben angesetzt.



Parameter	Sand - Mitteldicht	Kies - dicht	Einheit	Referenz
gamma	19	19	[kN/m ³]	Schneider S. 11.24
ρ	1937	1937	[kg/m ³]	
φ	35	35	[degree]	Schneider S. 11.24
vs	150	234	[m/s]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 849
α x S (var)	0.30	0.30	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
vs / vs,max	0.60	0.60	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
vs,max	251	390	[m/s]	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
L oder 2b	17.80	17.80	[m]	
B oder 2a	5.80	5.80	[m]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 17
d	1.20	1.20	[m]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 6
fz	1.15	1.15	-	Schneider S. 11.23
Es_stat	35	150	[MN/m ²]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 850
v	0.25	0.25	-	Grundlagen der Geotechnik (Hans-Henning Schmidt) s. 95
G_stat	11.7	50.0	[MN/m ²]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 11
Gmax	124	300	[MN/m ²]	Grundlagen der Geotechnik (Hans-Henning Schmidt) s. 512
G / Gmax	0.36	0.36	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
G_dyn	45	108	[MN/m ²]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 30
Es_dyn	134	324	[MN/m ²]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 849
Statische Federsteifigkeiten				
kf,z	461	1977	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,y	394	1687	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,x	1841	4423	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,mz	inf	inf	[MNm/rad]	
kf,my	5400	23142	[MNm/rad]	George Gazetas, Analysis of machine foundation vibration, state of the art (1983), Tables 2 and 8
kf,mx	24622	105524	[MNm/rad]	
Dynamische Federsteifigkeiten				
kf,z	1765	4270	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,y	1506	3643	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,x	1441	3485	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,mz	inf	inf	[MNm/rad]	
kf,my	20662	49988	[MNm/rad]	George Gazetas, Analysis of machine foundation vibration, state of the art (1983), Tables 2 and 8
kf,mx	94212	227932	[MNm/rad]	

Bettung $k_{f,x}$ der Wand:

Die Bettung der Widerlagerwand ergibt sich nach Christos Vrettos, 2019 ‚Pseudostatische Ansätze für Erddruck und Widerlagerbettung bei der seismischen Auslegung gängiger Rahmenbrücken‘ zu:

$$k_x^* = (20 \cdot \tan \varphi - 8,4) \cdot H = (20 \cdot \tan 35 - 8,4) \cdot 5,125 = 28,7 \text{ MN/m}^2$$

Linear über die Tiefe z wird der seismischen Berechnung und der Gesamtkombination Erdbeben die folgende Bettung zugrunde gelegt:

$$k_x = k_x^* \cdot \frac{z}{H^2} \leq 5604 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

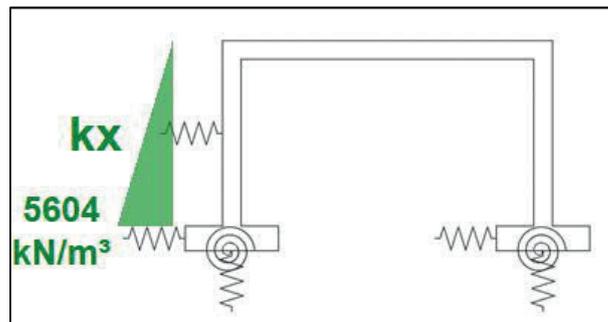


Bild K3: Bettung der Wand

Modellierung

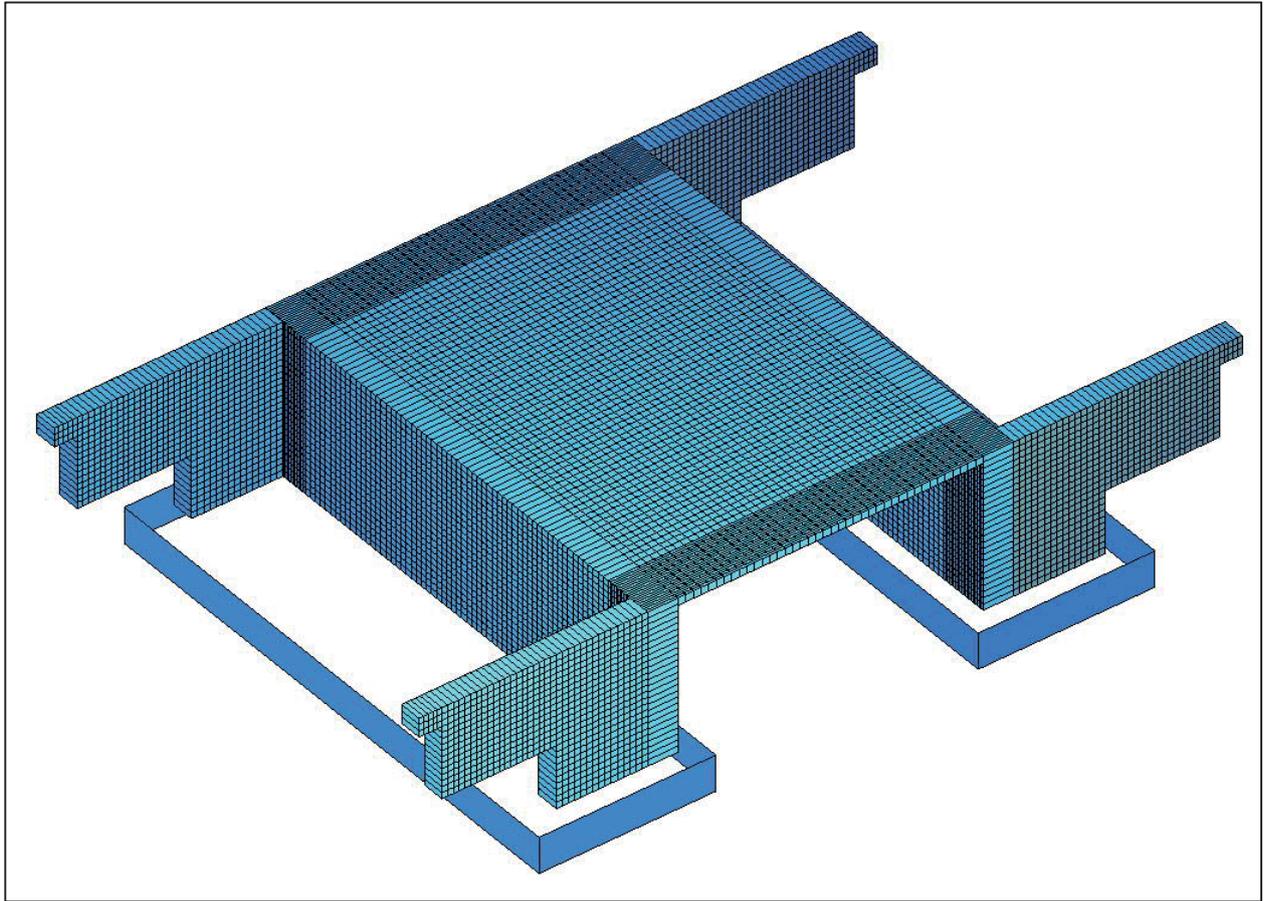


Bild K4: Modell

Das gesamte Tragwerk mit Ausnahme der Fundamentplatte wurde mittels Flächenelementen modelliert.

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte und der Widerlager wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten werden als Flächen- und Linienlasten in ihrer tatsächlichen Lage aufgebracht. Bei der Ermittlung der Eigenformen sind entsprechend keine Rotationsmassen manuell hinzuzufügen.

Fahrbahnbelag:

Der Belagsaufbau wird mit 8 cm und einer Wichte von 25 kN/m^3 inkl. einem Mehreinbau von $0,5 \text{ kN/m}^2$ über die 13 m breite Fahrbahn angesetzt [ARS 22/2012]:

$$g_{k,\text{Belag}} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Kappe:

Die Kappen werden analog zu Kap1 der RiZ-ING ausgebildet. Das Eigengewicht der Kappe ohne Gesimsbalken ergibt sich zu

$$g_{k,\text{Kappe},1} = 0,25 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 / 1,70 \text{ m} = 3,68 \text{ kN/m}^2$$

Das Eigengewicht des Gesimsbalkens inkl. Geländer (je $0,5 \text{ kN/m}$) und Schutzplanke (1 kN/m) ergibt sich zu:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 0,15 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 + 1,5 \text{ kN/m} = 5,25 \text{ kN/m}$$

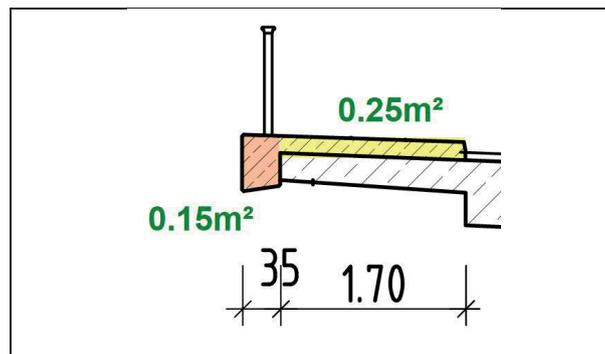


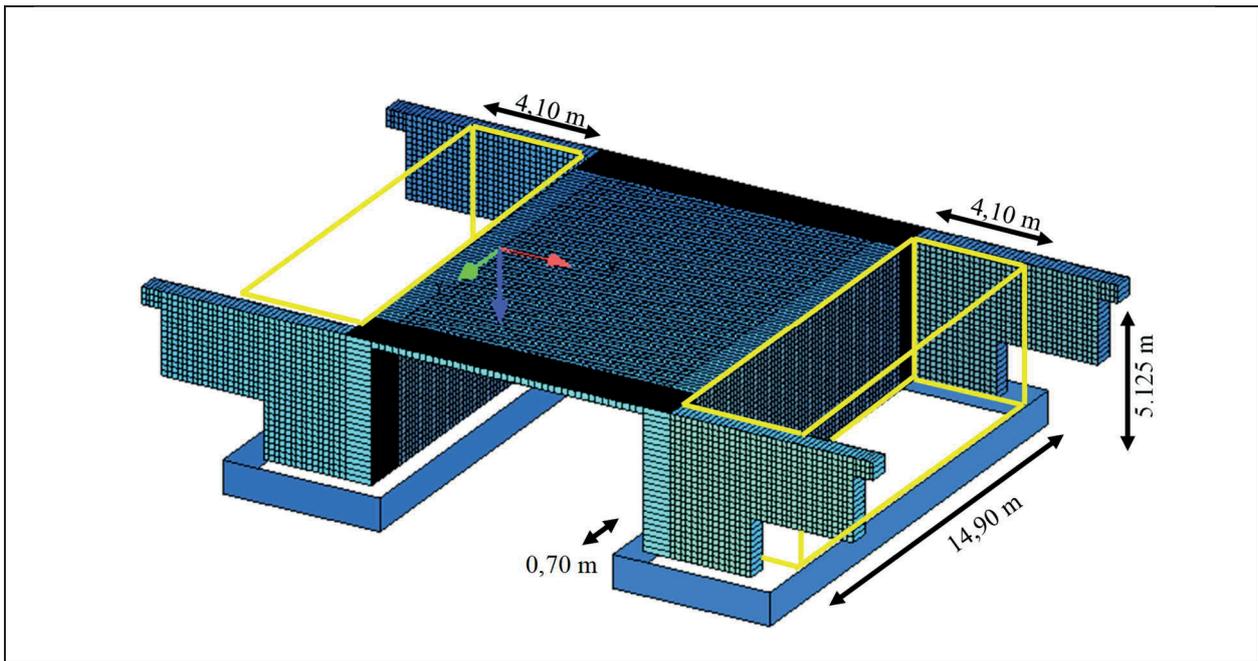
Bild K5: Darstellung der Kappe aus /30/

Erddrucklasten

Die folgenden Erddrucklasten sind in der Berechnung angesetzt:

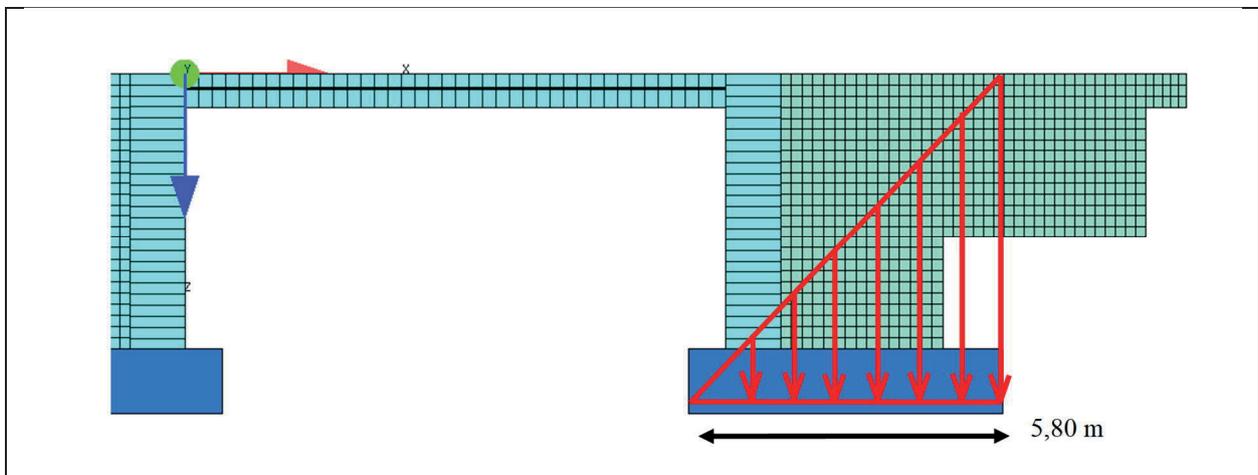
1. Vertikaler Erddruck aus Bodeneigengewicht und 20 % der Verkehrslast. Diese sind als Masse in der Berechnung der Eigenfrequenzen berücksichtigt.

Masse des Bodens zwischen Widerlagerwand und -flügel:



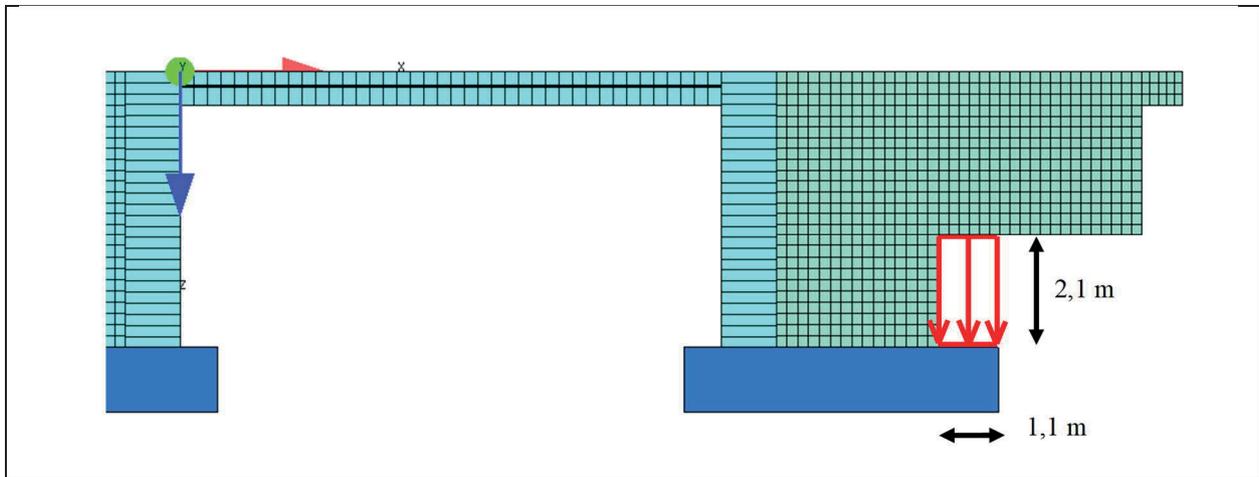
$$M_{Erde,1} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (14,9m \times 5,125m \times 4,10m) = 595,0 t$$

Masse des geneigten Bodens an der Außenseite der Widerlagerflügel:



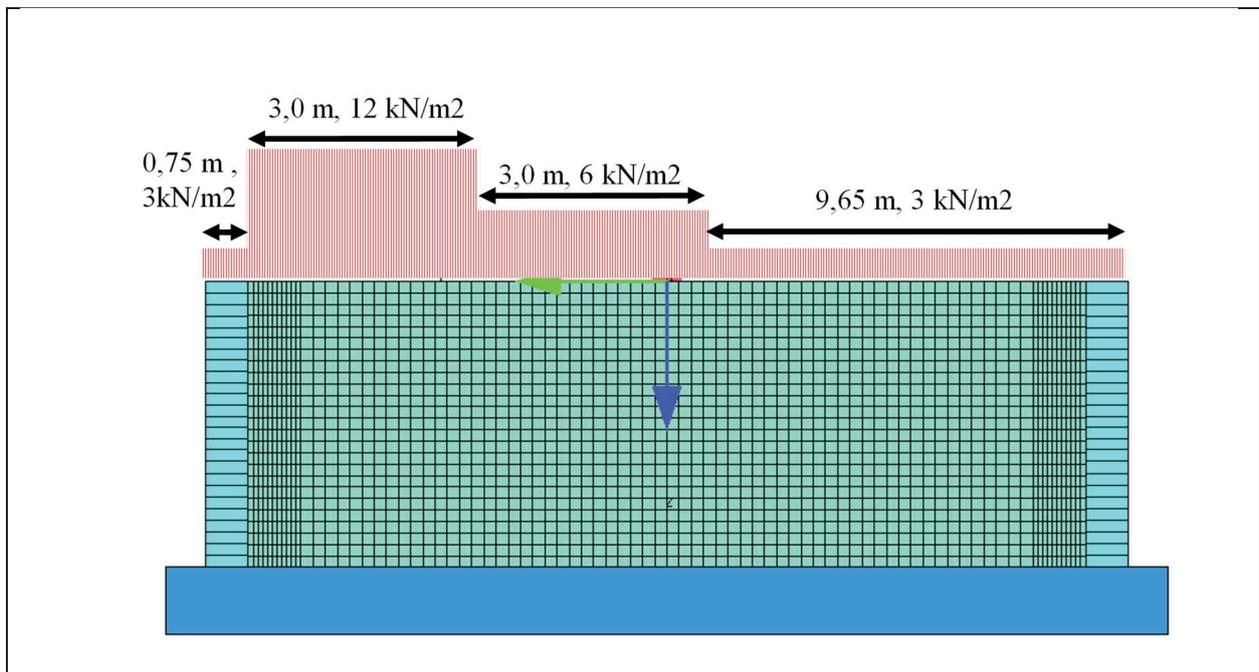
$$M_{Erde,2} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (0,7m \times 5,125m \times 5,80m/2) \times 2 = 39,5 t$$

Masse im Bereich unter den Widerlagerflügeln:



$$M_{Erde,3} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (0,75 m \times 2,1 m \times 1,1 m) \times 2 = 6,6 t$$

Die Masse aus den Verkehrslasten:



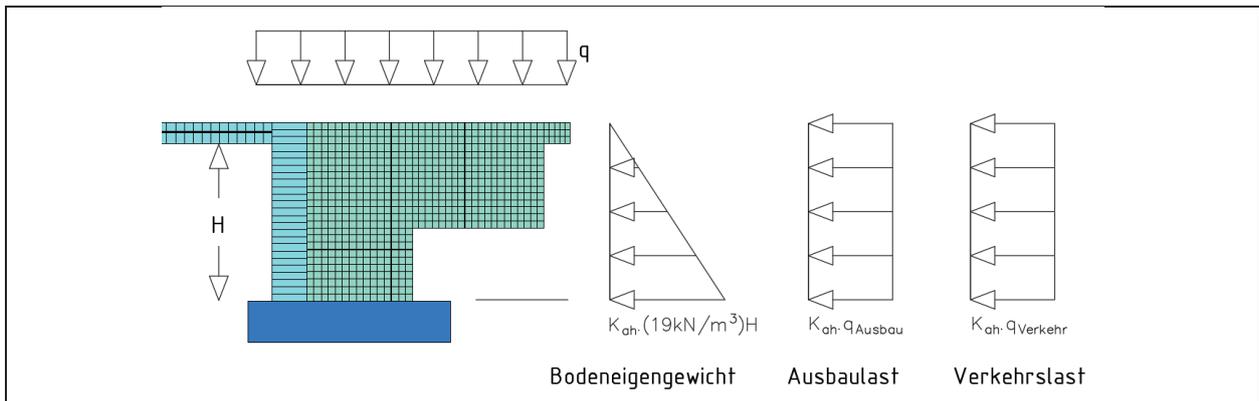
$$M_{Verkehr} = \left(3 \frac{kN}{m^2} \times 10,4 m + 12 \frac{kN}{m^2} \times 3 m + 6 \frac{kN}{m^2} \times 3 m \right) \times 4,10 m = 349 kN$$

$$\cong 35 t$$

Hiervon werden 20 % berücksichtigt.

$$M_{total} = 595 + 39,5 + 6,6 + 0,2 \times 35 = 648,1 t$$

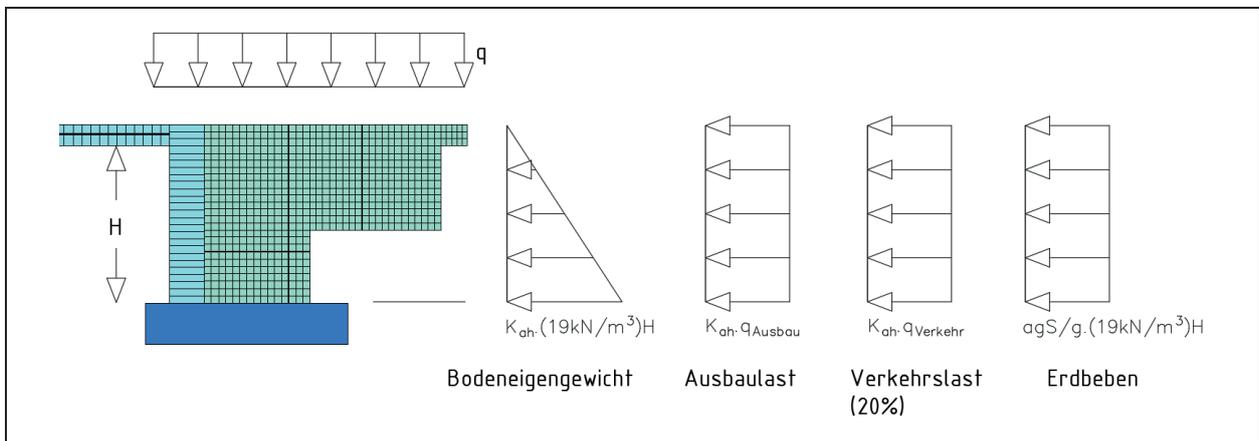
2. Horizontaler Erddruck aus Bodeneigengewicht und Ausbaulast. Dieser ist mittels des aktiven Erddruckbeiwerts (K_{ah}) berechnet.
3. Horizontaler Erddruck aus Verkehrslast, mit dem aktiven Erddruckbeiwert (K_{ah}) berechnet.



4. Horizontaler Erddruck in der Erdbebensituation aus Bodeneigengewicht, Ausbaulast und 20% des Durchschnittswerts der Verkehrslast. Dieser ist mit dem Erdruhedruckbeiwert (K_0) berechnet.
5. Horizontaler seismischer Erddruck:

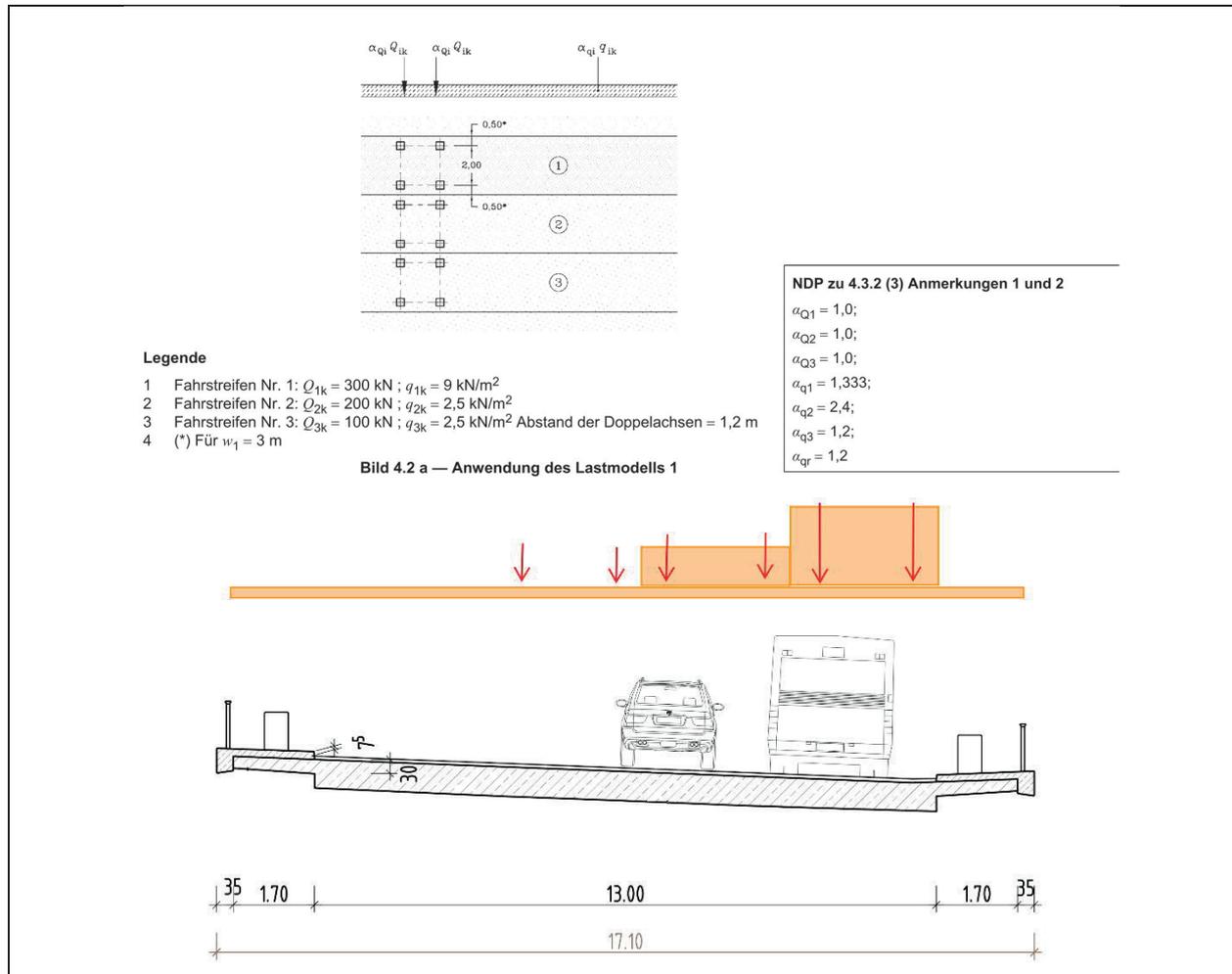
$$\Delta E_d = \frac{agS}{g} \cdot \gamma_s \cdot h$$

$$E_d = E_0 + \Delta E_d$$



Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):



UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 \times 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

Grundlast: $1,20 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($b=16,6 \text{ m}$)

Überlast Hauptspur: $1,33 \times 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 5,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

Überlast Nebenspur: $(2,40 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 2,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

HS: $4 \times 150 \text{ kN}$ ($e_y = 6,0 \text{ m}$; $e_y = 4,0 \text{ m}$)

NS1: $4 \times 100 \text{ kN}$ ($e_y = 3,0 \text{ m}$; $e_y = 1,0 \text{ m}$)

NS2: $4 \times 50 \text{ kN}$ ($e_y = 0,0 \text{ m}$; $e_y = -2,0 \text{ m}$)

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6 \times L_{\text{ges}} < 900$ kN und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Betonkonstruktion (Typ 3) (EC 1-5, 6.1.3)

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Ed,max}} = 37 \text{ °C} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{\text{N,con}} = -10 - 16 = -26 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{\text{N,exp}} = 39 - 10 = 29 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Temperaturdifferenz zwischen Überbau und Widerlager: $\pm 15 \text{ K}$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Betonkonstruktion –Träger/Platte (EC 1-5, 6.1.4)

$$T_{\text{M,heat}} = 15 * 0,82 = 12,3 \text{ K} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 0,82$; 80 mm Belagsdicke)

$$T_{\text{M,cool}} = 8 * 1,00 = 8,0 \text{ K} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$; 80 mm Belagsdicke)

Wind

Die Windlasten werden gemäß DIN EN 1991-4 ermittelt. Es werden jeweils die niedrigsten Windlasten angesetzt (Annahme: Windzone I, Binnenland, $z_e \leq 20$ m).

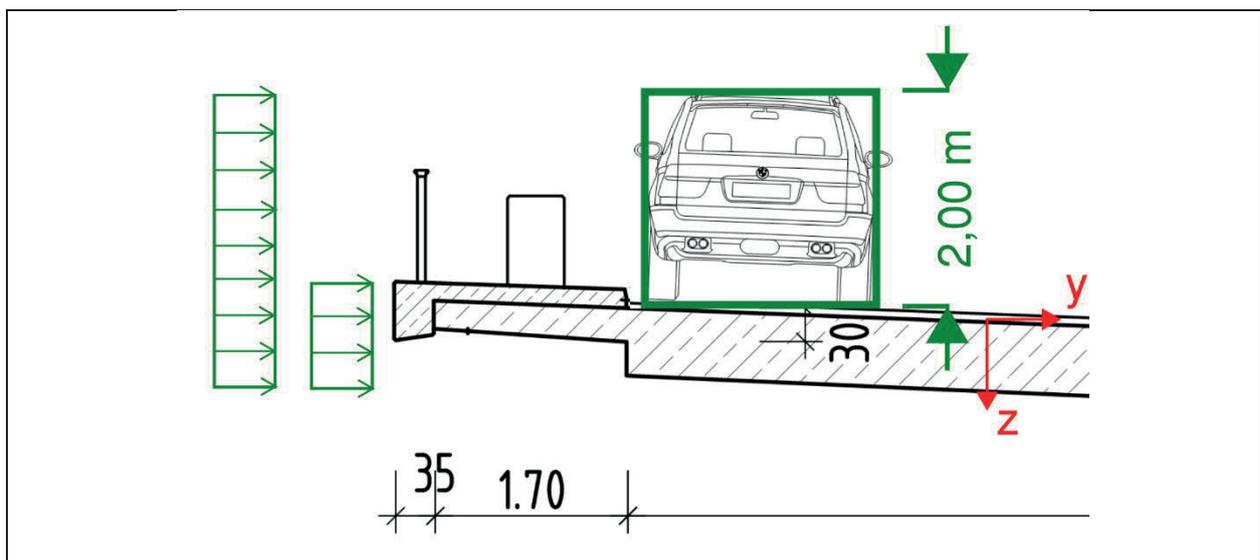


Bild K7: Darstellung Windlastmodell nach DIN EN 1991-1-4

Anmerkung: Die Windlasten werden als Linienlast und Krepelmoment ($w_k \cdot e_z$) am Kragarmrand der Platte aufgebracht.

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 0,18 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow$ vereinfachend $w = 0,60 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 2,08 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild K8: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitte 7.5.

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

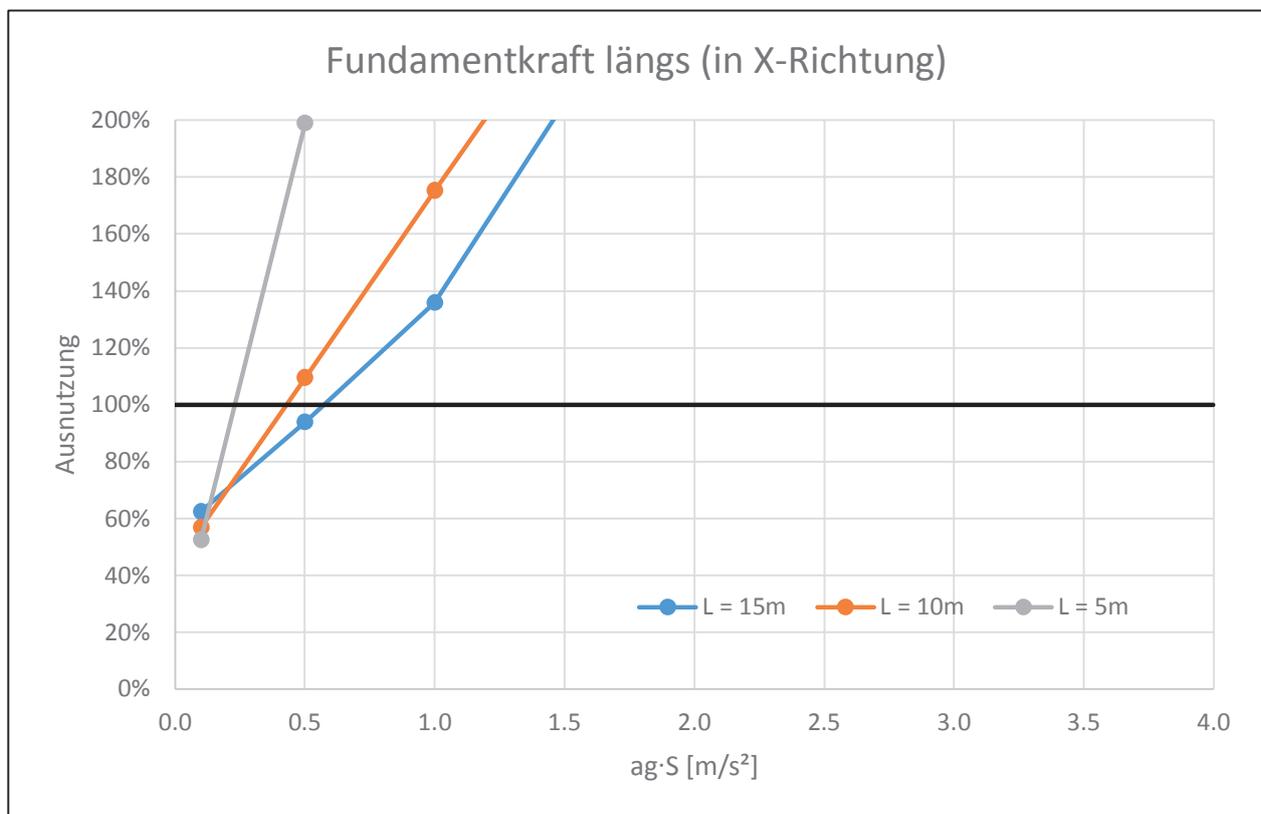
- Fundamentkräfte
- Bewehrung im Überbau
- Bewehrung in der Widerlagerwand
- Bewehrung in den Flügelwänden

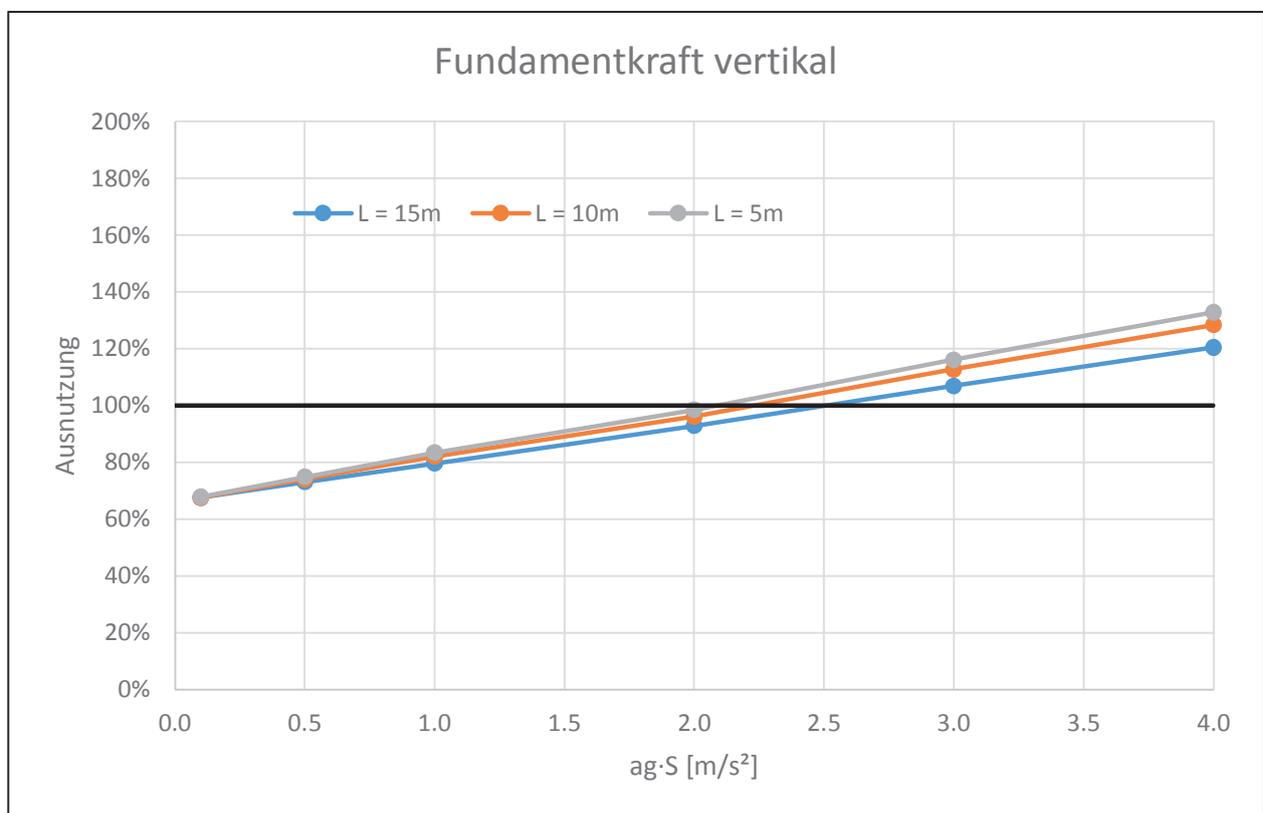
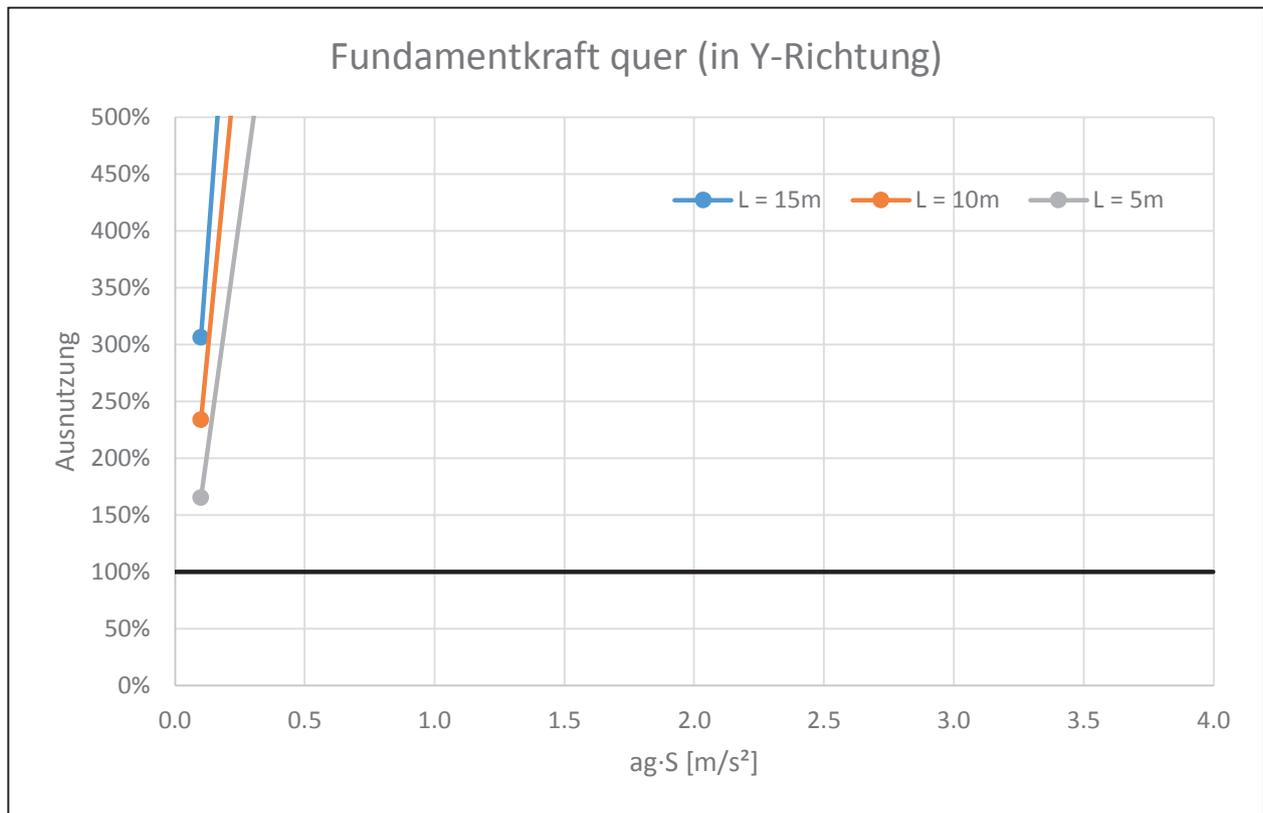
Fundamentkräfte

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Fundamentkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Fundamentkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

mit $i = X; Y; Z$



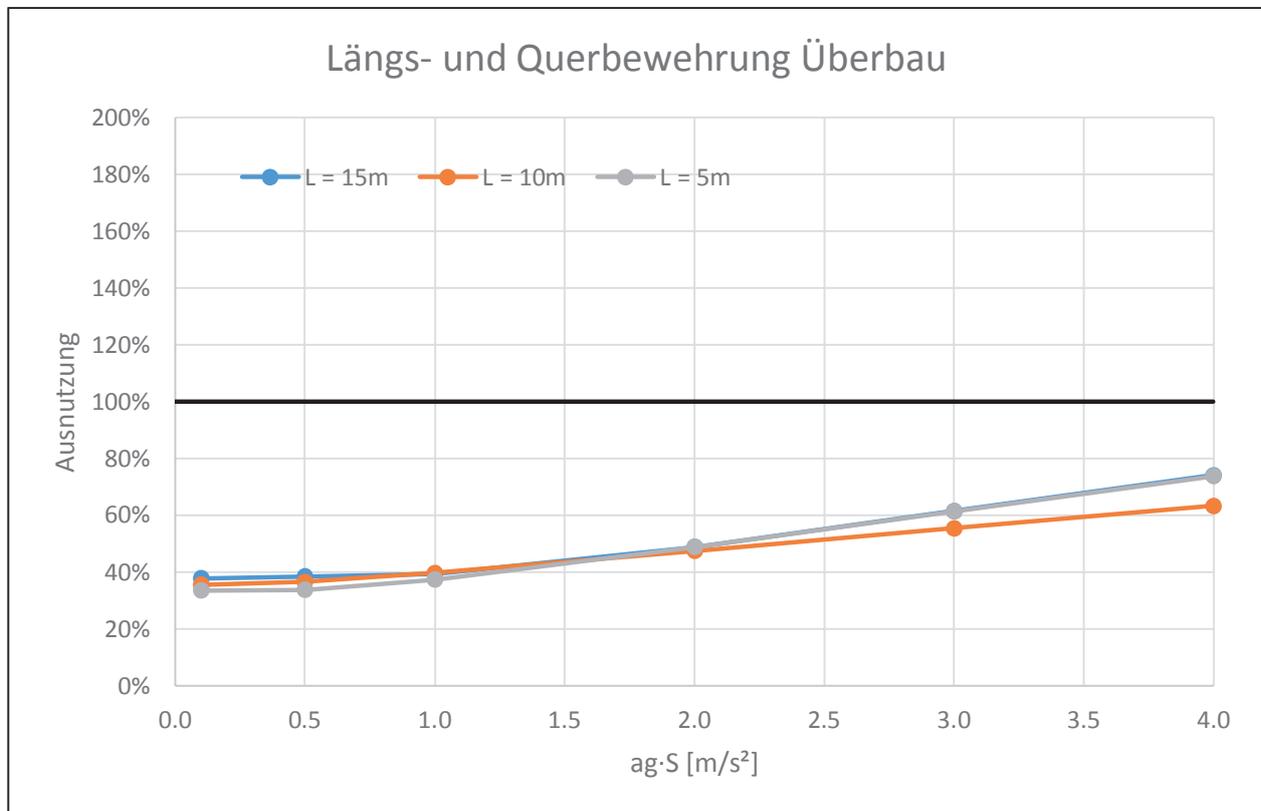


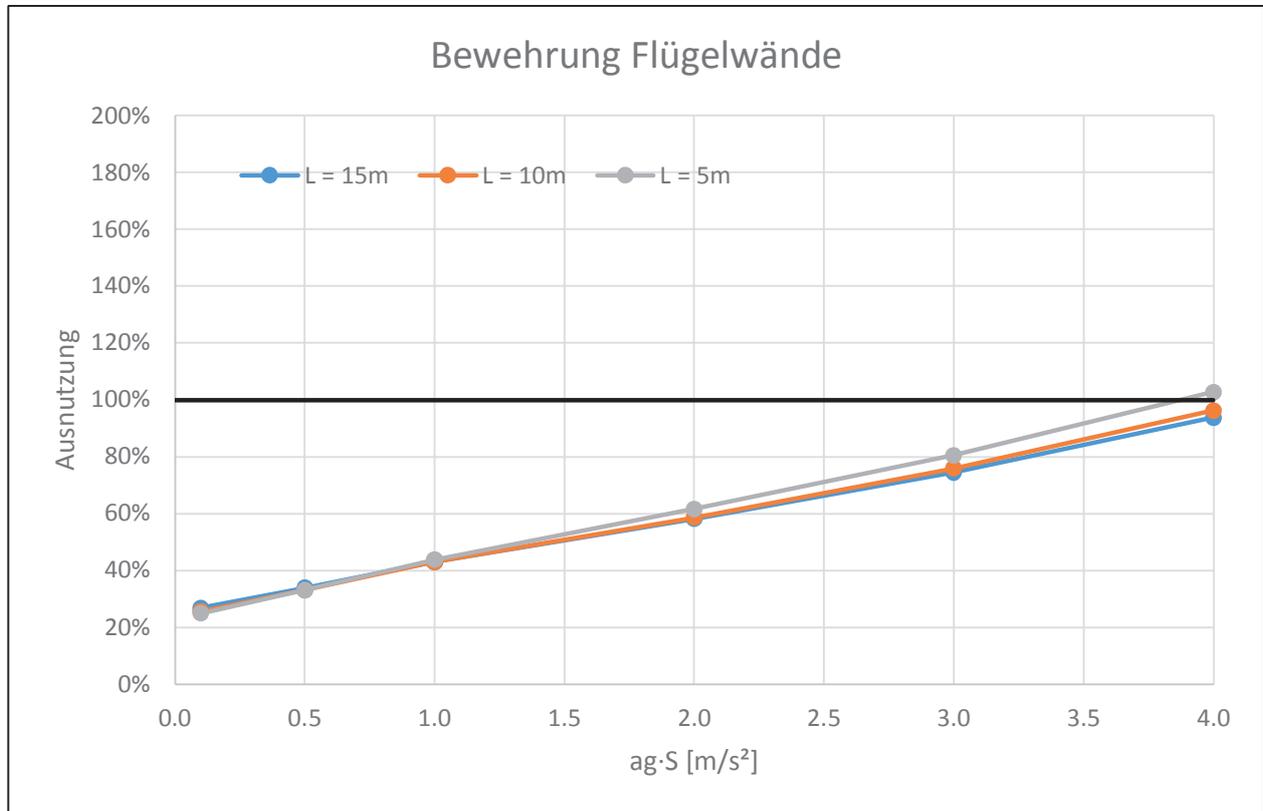
Bewehrung im Überbau

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$

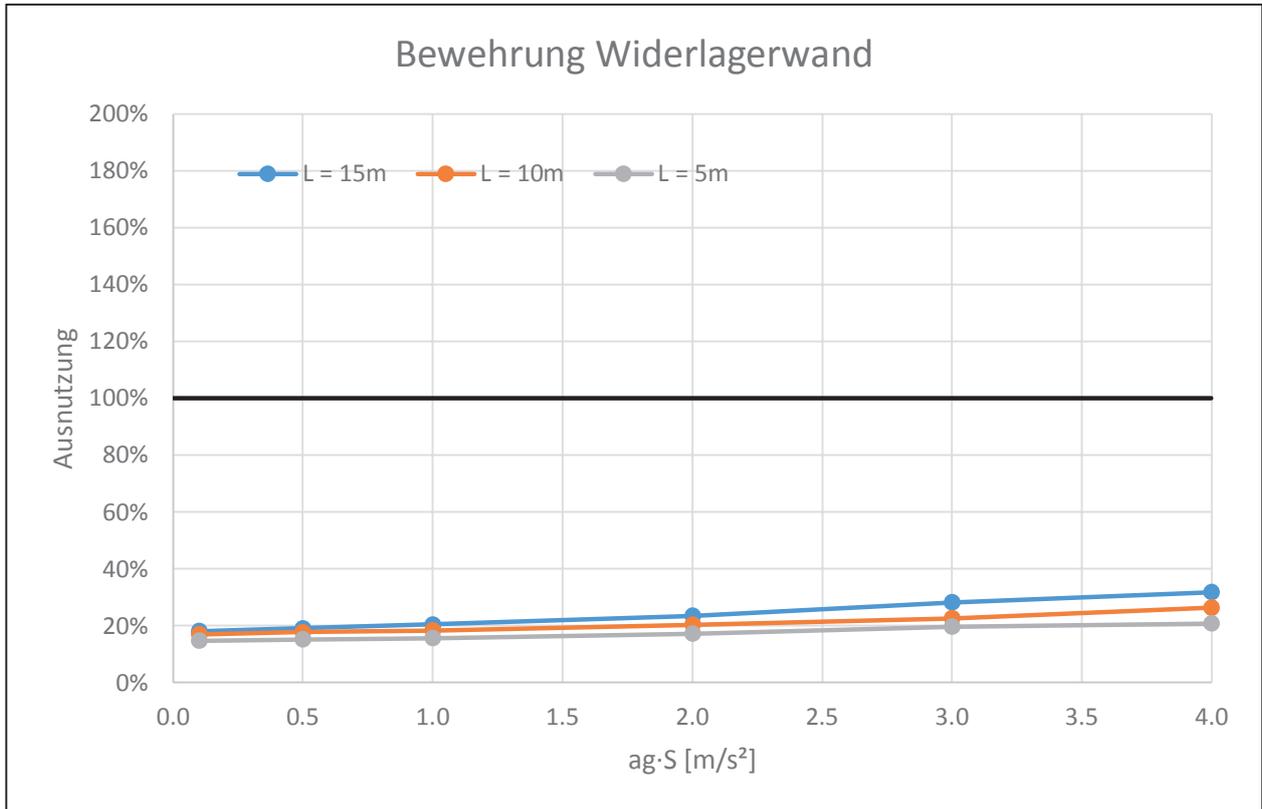
Da die Kraftübertragung im Falle der Rahmenbrücke homogen verläuft, wurden Mittelwerte der erforderlichen Bewehrung miteinander verglichen. Lokale Spitzen treten auf, sind jedoch der Modellierung geschuldet und nicht real.



Bewehrung der Flügelwände

Bewehrung der Widerlagerwände

Im Falle der Widerlagerwände wurde der Maximalwert der erforderlichen Bewehrung ohne lokale Spitzen ausgewertet.



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Fundamentkräfte im Betrieb die Fundamentkräfte unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Oberhalb von $a_g \cdot S = 2.0 \text{ m/s}^2$ gilt dies auch für die vertikalen Fundamentlasten.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S \text{ [m/s}^2\text{]}$	Stufe 2 $a_g \cdot S \text{ [m/s}^2\text{]}$
15,00	0,5	4,0
10,00	0,5	4,0
5,00	0,5	4,0

Tabelle K1: Grenzwerte

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Fundamente in Brückenlängsrichtung mit

$$A_x \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2 + E_d / 2$$

- Auslegung der Fundamente in Brückenquerrichtung mit

$$A_y \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2 + E_d / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. Hinterfüllung und 20 % der UDL
($M = G_1 + G_2 + E + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

η : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

E_d : dynamischer Erddruck

Ergänzende Betrachtung

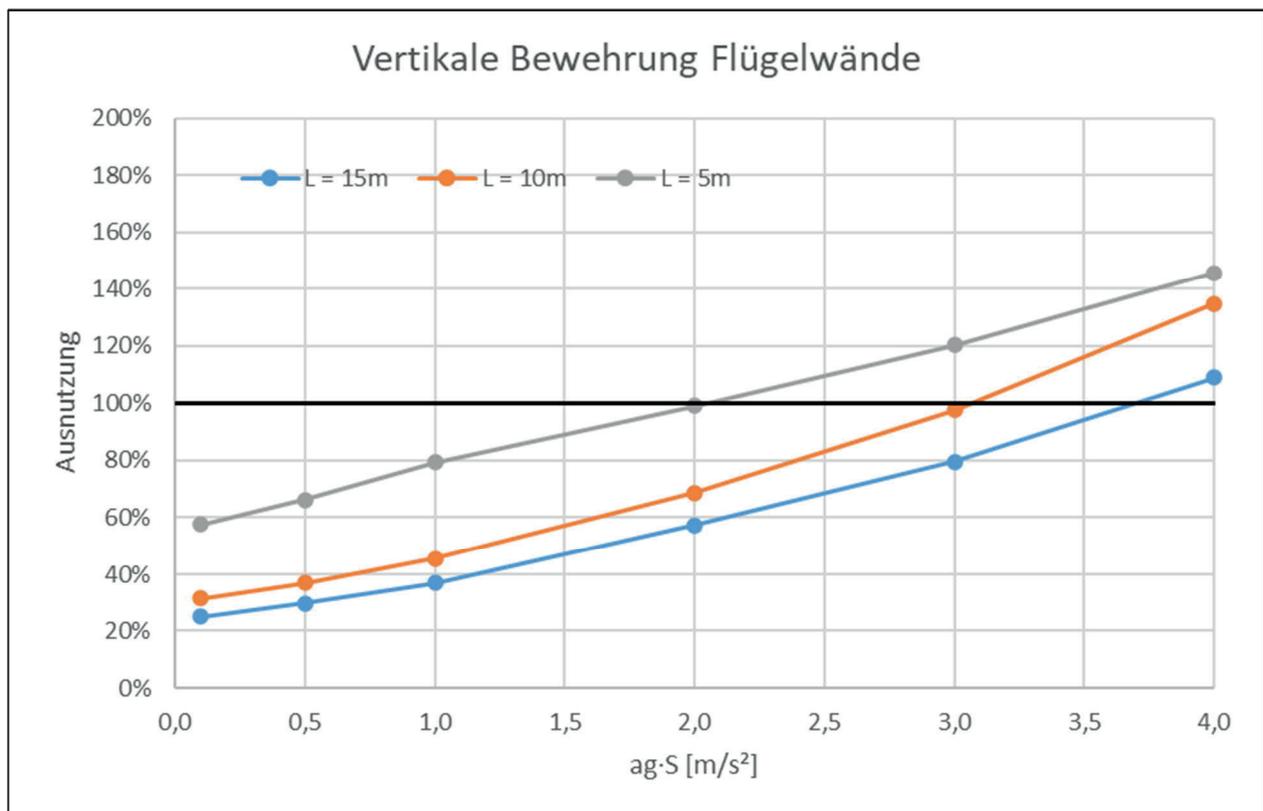
Die Berechnung wurde für folgende Parameter wiederholt:

- Schlankheit des Brückenträgers: $l/12$
- Dicke der Flügelwände: 60 cm
- Dicke der Widerlagerwand: 60 cm

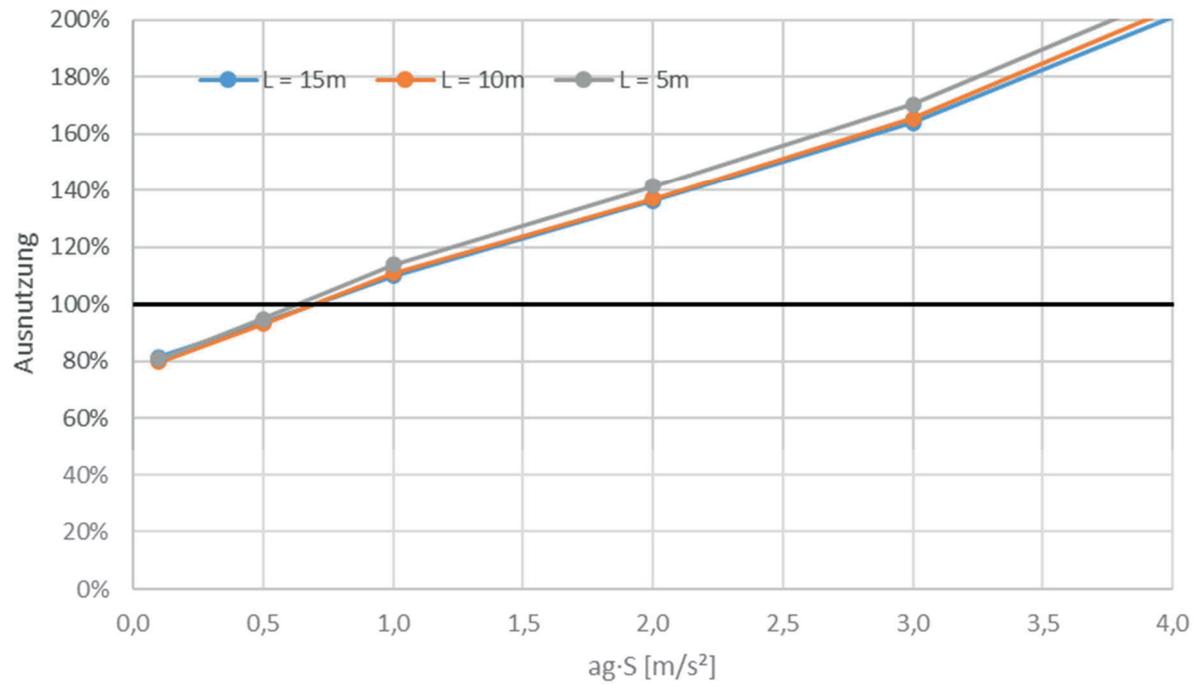
Dies hat keine Auswirkung auf die Schlussfolgerungen für die Bewehrung des Brückenträgers und der Widerlagerwand, deren Ausnutzung unter 100 % verbleibt.

Die Ausnutzung der Flügelwände übersteigt jedoch 100 %, wie nachfolgend dargestellt.

Bewehrung der Flügelwände



Horizontale Bewehrung Flugelwande



Somit verschieben sich die Grenzwerte wie folgt:

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
15,00	0,5	3,5
10,00	0,5	3,0
5,00	0,5	2,0

Tabelle K2: Grenzwerte

Der Anwendungsbereich der Stufe 2 wird für alle Spannweiten auf $a_g \cdot S = 2,0 \text{ m/s}^2$ limitiert.

Zusätzliche konstruktive Regel für Stufe 2:

Die Flügelwände sind in horizontaler Richtung für die Summe aus Erddruck und Massenbeschleunigung der Flügelwand zu bemessen.

$$E_d = E_0 + \Delta E_d + M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S)$$

mit

E_d : seismische Beanspruchung

E_0 : Erdruhedruck inkl. Erddruck aus G2 und 20 % UDL

ΔE_d : dynamischer Erddruck infolge Erdbeben

M: Masse der Flügelwand

Anhang L: Brückentyp 4.2

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Integrale Rahmenbrücke (s. Bild L1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldträger (s. Bild L2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Beton: Mindestens C30/37 Betonstahl: B 500B Spannstahl: Y 1770</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Vollplatte</i>
	<i>Erläuterung der Querschnittswerte in Bild L1</i>
Bauwerkslänge	$\leq 15 \text{ m}$
Konstruktionshöhe	$L/15$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ m/s}$</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Mindestbewehrung von $\varnothing 12/15$ vorhanden</i> - <i>Vorspannung entsprechend einer mittleren Betondruckspannung von 5 MPa wie nachfolgend beschrieben</i> - <i>Durchgehende Fundamentplatte</i> - <i>Höhe des Widerlagers $\leq 8 \text{ m}$</i> - <i>Bauteildicke der Widerlagerwand ca. 1,00 m</i> - <i>Bauteildicke der Flügelwände ca. 0,75 m</i> - <i>Flügelwände parallel, Schiefwinkligkeit $\leq 20^\circ$</i>

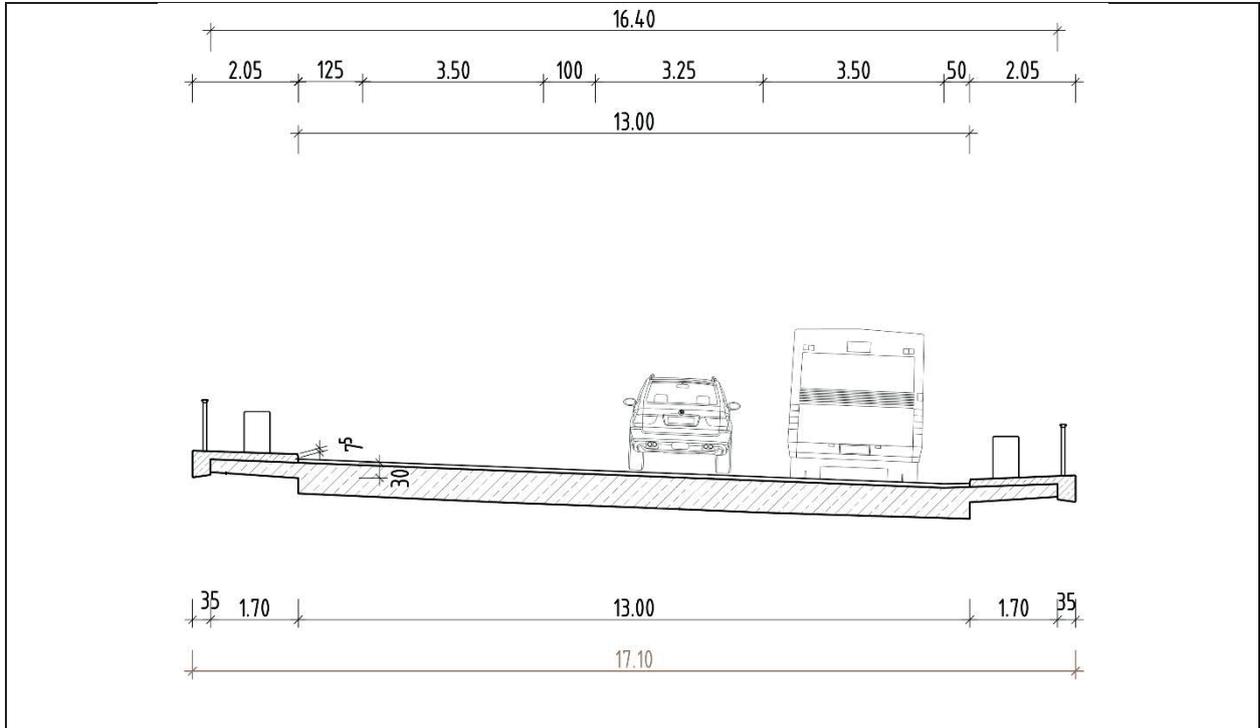


Bild L1: Querschnittswerte

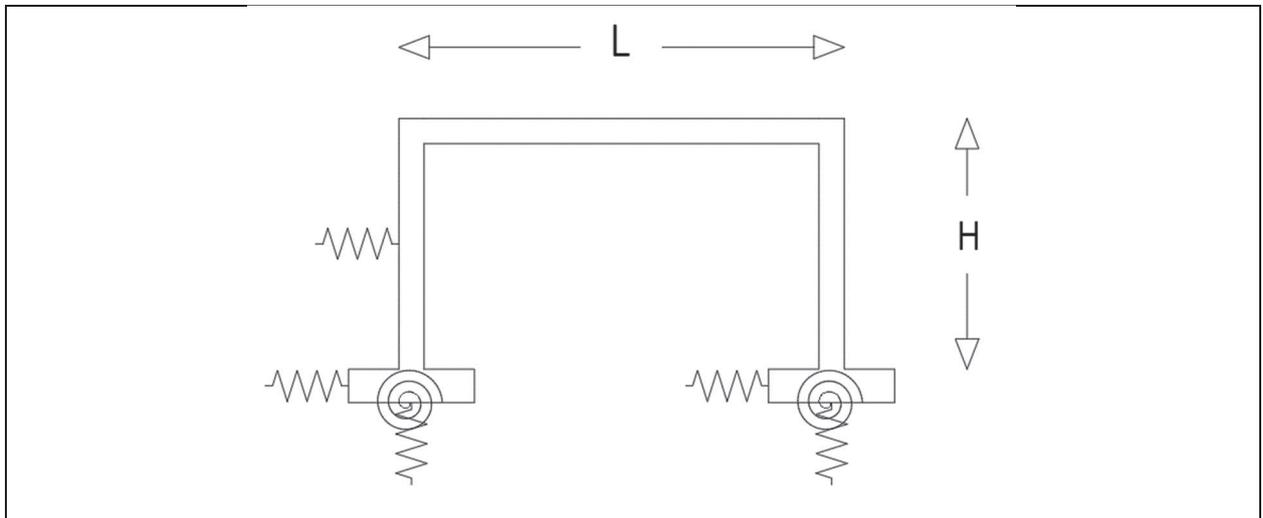


Bild L2: Statisches System

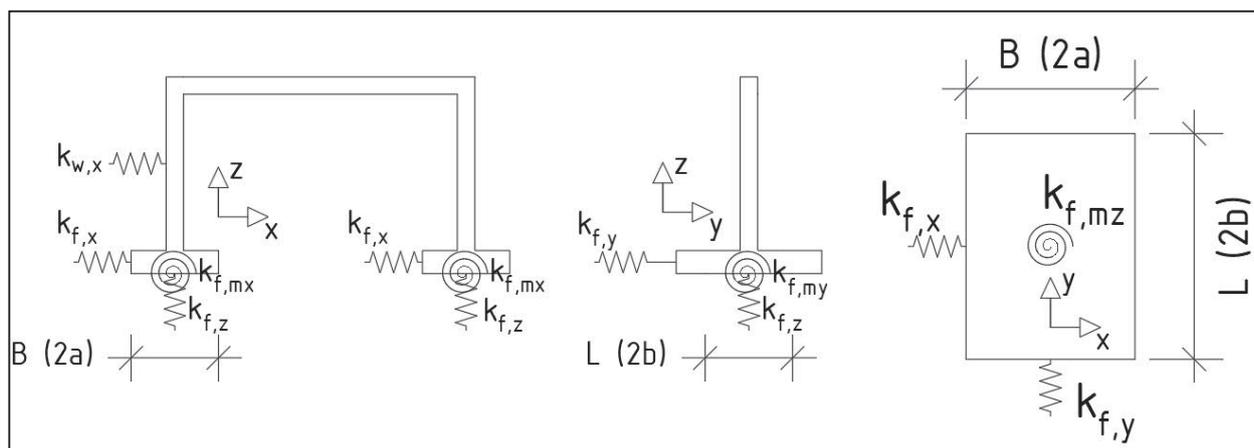
H hier gewählt zu 7,750 m.

Bauteildicke der Flügelwand: 0,75 m

Bauteildicke der Widerlagerwand: 1,00 m

Bodeneigenschaften und Gründungssteifigkeiten

Zwei extreme Bodeneigenschaften von mitteldichtem Sand und dichtem Kies werden in dieser Untersuchung gemäß folgender Tabelle berücksichtigt. Die Bettung der Widerlagerwand wird nur in der Lastkombination Erdbeben angesetzt.



Parameter	Sand - Mitteldicht	Kies - dicht	Einheit	Referenz
gamma	19	19	[kN/m ³]	Schneider S. 11.24
ρ	1937	1937	[kg/m ³]	
φ	35	35	[degree]	Schneider S. 11.24
vs	150	234	[m/s]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 849
α x S (var)	0.30	0.30	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
vs / vs,max	0.60	0.60	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
vs,max	251	390	[m/s]	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
L oder 2b	17.80	17.80	[m]	
B oder 2a	5.80	5.80	[m]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 17
d	1.20	1.20	[m]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 6
fz	1.15	1.15	-	Schneider S. 11.23
Es_stat	35	150	[MN/m ²]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 850
v	0.25	0.25	-	Grundlagen der Geotechnik (Hans-Henning Schmidt) s. 95
G_stat	11.7	50.0	[MN/m ²]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 11
Gmax	124	300	[MN/m ²]	Grundlagen der Geotechnik (Hans-Henning Schmidt) s. 512
G / Gmax	0.36	0.36	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
G_dyn	45	108	[MN/m ²]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 30
Es_dyn	134	324	[MN/m ²]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 849
Statische Federsteifigkeiten				
kf,z	461	1977	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,y	394	1687	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,x	1841	4423	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,mz	inf	inf	[MNm/rad]	
kf,my	5400	23142	[MNm/rad]	George Gazetas, Analysis of machine foundation vibration, state of the art (1983), Tables 2 and 8
kf,mx	24622	105524	[MNm/rad]	
Dynamische Federsteifigkeiten				
kf,z	1765	4270	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,y	1506	3643	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,x	1441	3485	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
kf,mz	inf	inf	[MNm/rad]	
kf,my	20662	49988	[MNm/rad]	George Gazetas, Analysis of machine foundation vibration, state of the art (1983), Tables 2 and 8
kf,mx	94212	227932	[MNm/rad]	

Bettung $k_{f,x}$ der Wand:

Die Bettung der Widerlagerwand ergibt sich nach Christos Vrettos, 2019 ‚Pseudostatische Ansätze für Erddruck und Widerlagerbettung bei der seismischen Auslegung gängiger Rahmenbrücken‘ zu:

$$k_x^* = (20 \cdot \tan \varphi - 8,4) \cdot H = (20 \cdot \tan 35 - 8,4) \cdot 7,750 = 43,4 \text{ MN/m}^2$$

Linear über die Tiefe z wird der seismischen Berechnung und der Gesamtkombination Erdbeben die folgende Bettung zugrunde gelegt:

$$k_x = k_x^* \cdot \frac{z}{H^2} \leq 5604 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

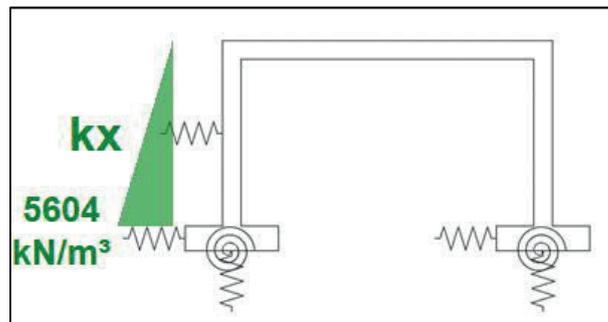


Bild L3: Bettung der Wand

Modellierung

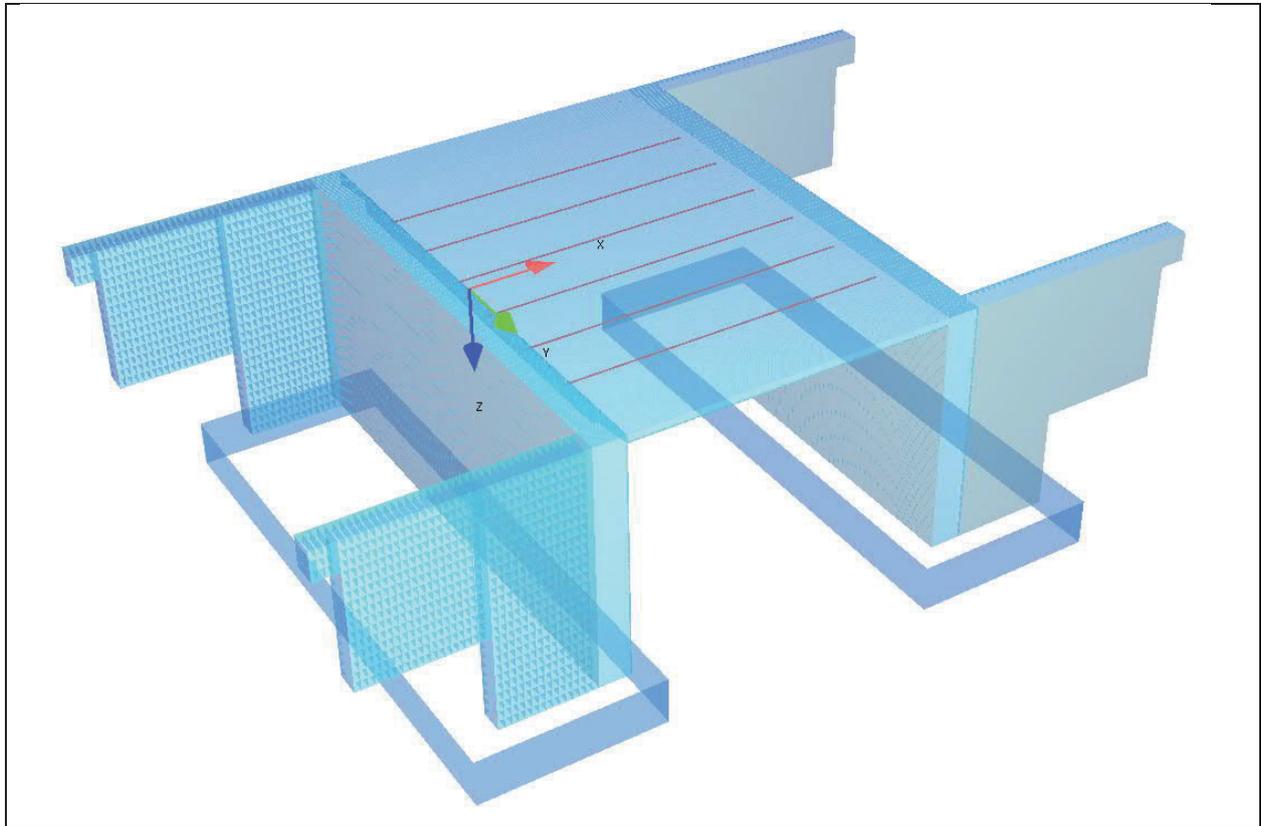


Bild L4: Modell

Vorspannung

In Bild N3 ist der Spanngliedverlauf für die betrachtete Spannbetonbrücke mit $L = 10$ m exemplarisch dargestellt. Für alle Längen wurden die Spannglieder im Schwerpunkt des Querschnittes (ohne Exzentrizität) berücksichtigt.

Vorspannkraft:	5 MPa = 5000 kN/m ² in Abhängigkeit der Querschnittsfläche des Betons
μ Reibungskennwert	0,2
Keilschlupf am vorgespannten Anker	3,0 mm
Verluste am vorgespannten Anker	0,8 %
Keilschlupf am nicht vorgespannten Anker	4,0 mm
Verluste am nicht vorgespannten Anker	0,0 %
Keilschlupf am Koppler	3,0 mm
Verluste am Koppler	1,0 %

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht der Platte und der Widerlager wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m^3 ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten werden als Flächen- und Linienlasten in ihrer tatsächlichen Lage aufgebracht. Bei der Ermittlung der Eigenformen sind entsprechend keine Rotationsmassen manuell hinzuzufügen.

Fahrbahnbelag:

Der Belagsaufbau wird mit 8 cm und einer Wichte von 25 kN/m^3 inkl. einem Mehreinbau von $0,5 \text{ kN/m}^2$ über die 13 m breite Fahrbahn angesetzt [ARS 22/2012]:

$$g_{k,\text{Belag}} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Kappe:

Die Kappen werden analog zu Kap1 der RiZ-ING ausgebildet. Das Eigengewicht der Kappe ohne Gesimsbalken ergibt sich zu

$$g_{k,\text{Kappe},1} = 0,25 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 / 1,70 \text{ m} = 3,68 \text{ kN/m}^2$$

Das Eigengewicht des Gesimsbalkens inkl. Geländer (je $0,5 \text{ kN/m}$) und Schutzplanke (1 kN/m) ergibt sich zu:

$$g_{k,\text{Kappe}} = 0,15 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 + 1,5 \text{ kN/m} = 5,25 \text{ kN/m}$$

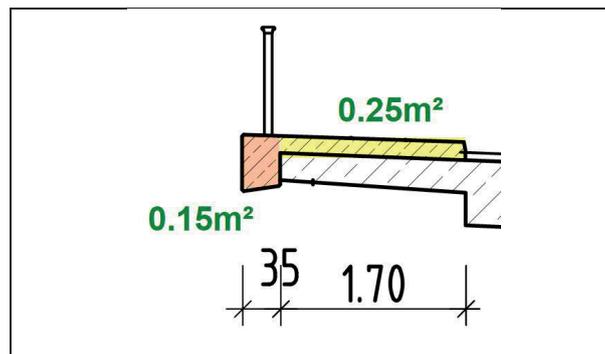


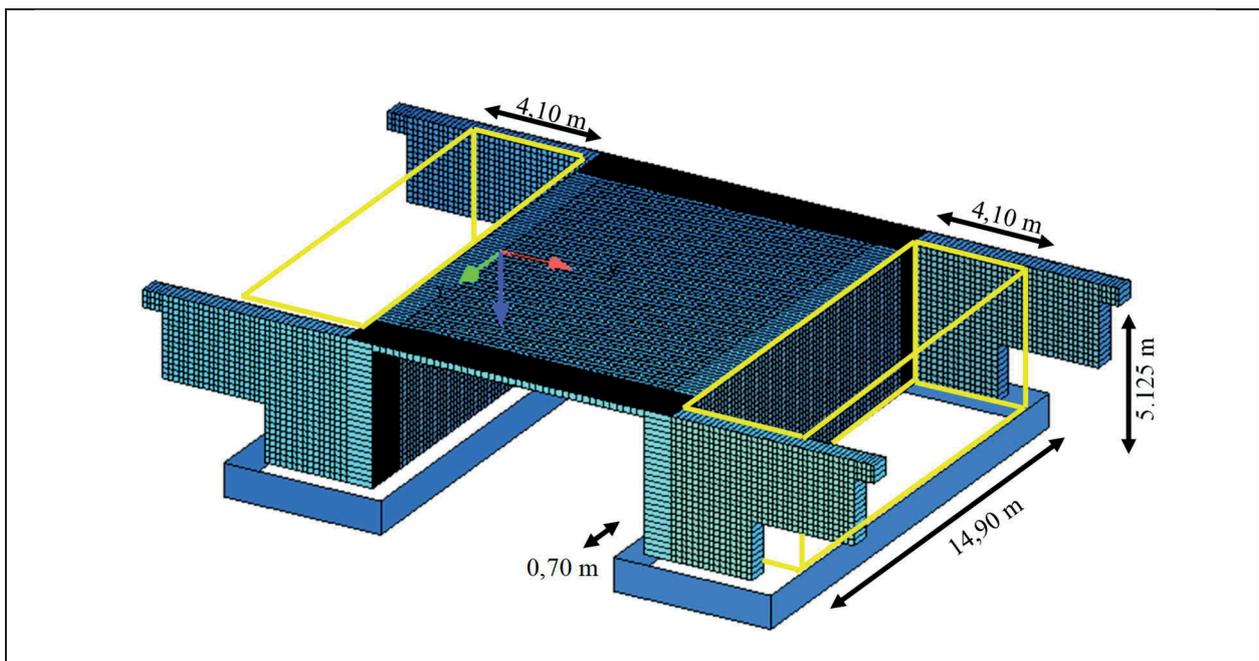
Bild L5: Darstellung der Kappe aus /30/

Erddrucklasten

Die folgenden Erddrucklasten sind in der Berechnung angesetzt:

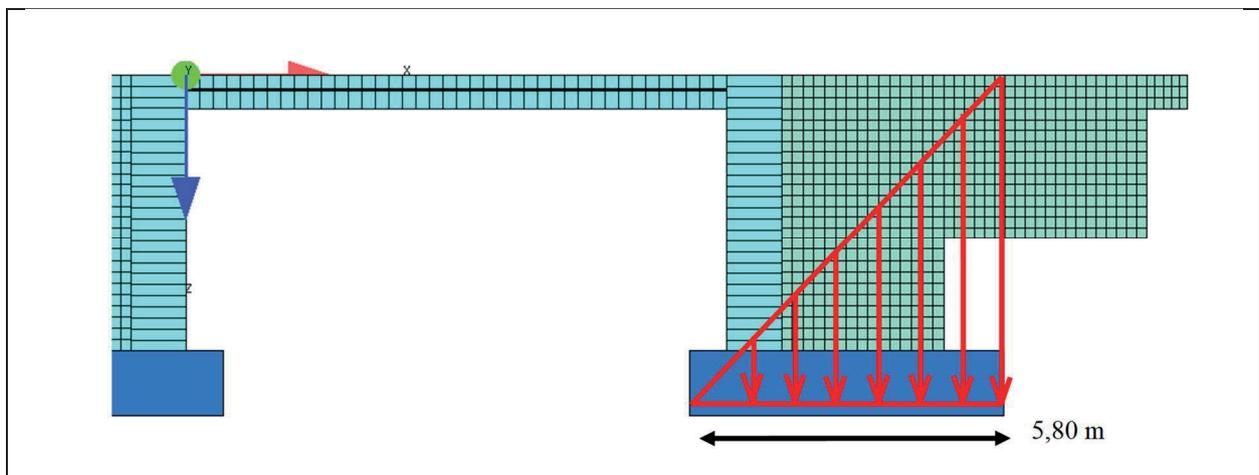
1. Vertikaler Erddruck aus Bodeneigengewicht und 20 % der Verkehrslast. Diese sind als Masse in der Berechnung der Eigenfrequenzen berücksichtigt.

Masse des Bodens zwischen Widerlagerwand und -flügel:



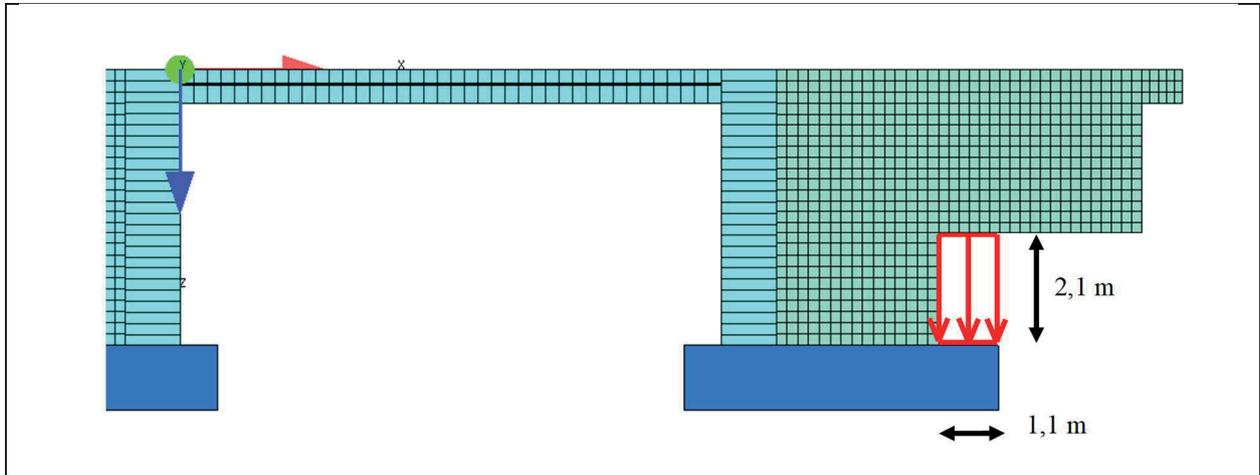
$$M_{Erde,1} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (14,9 \text{ m} \times 7,750 \text{ m} \times 4,10 \text{ m}) = 900,0 \text{ t}$$

Masse des geneigten Bodens an der Außenseite der Widerlagerflügel:



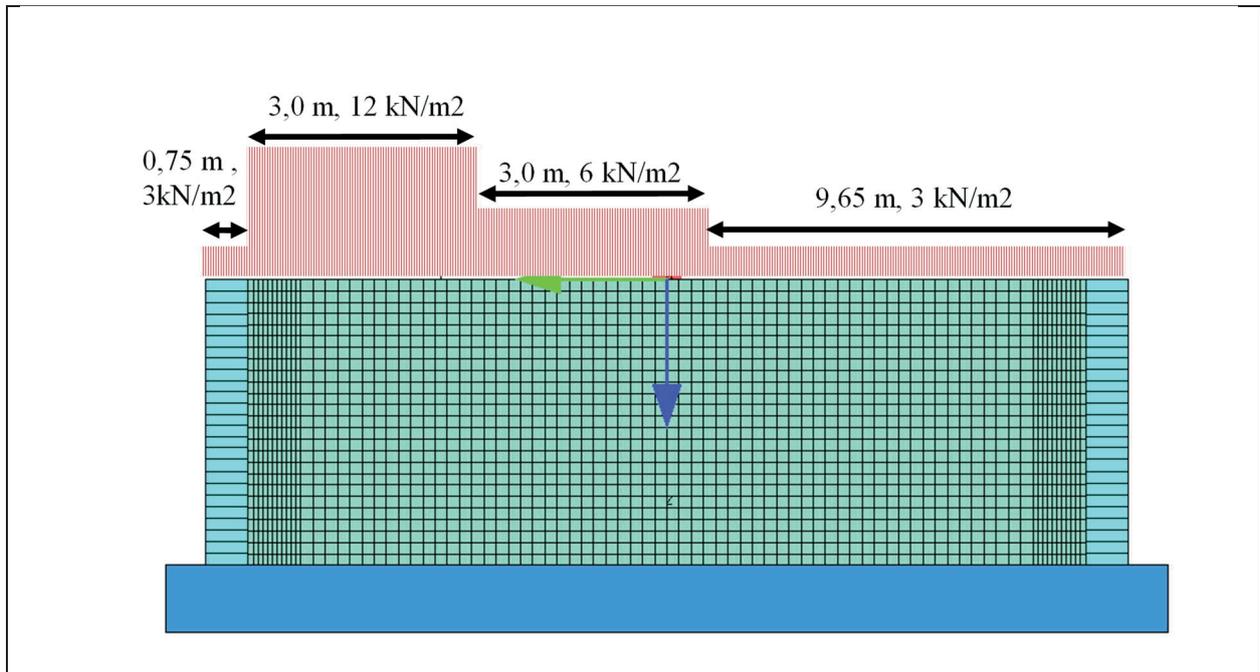
$$M_{Erde,2} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (0,7 \text{ m} \times 7,750 \text{ m} \times 5,80 \text{ m}/2) \times 2 = 59,7 \text{ t}$$

Masse im Bereich unter den Widerlagerflügeln:



$$M_{Erde,3} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (0,75 \text{ m} \times 2,1 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}) \times 2 = 6,6 \text{ t}$$

Die Masse aus den Verkehrslasten:



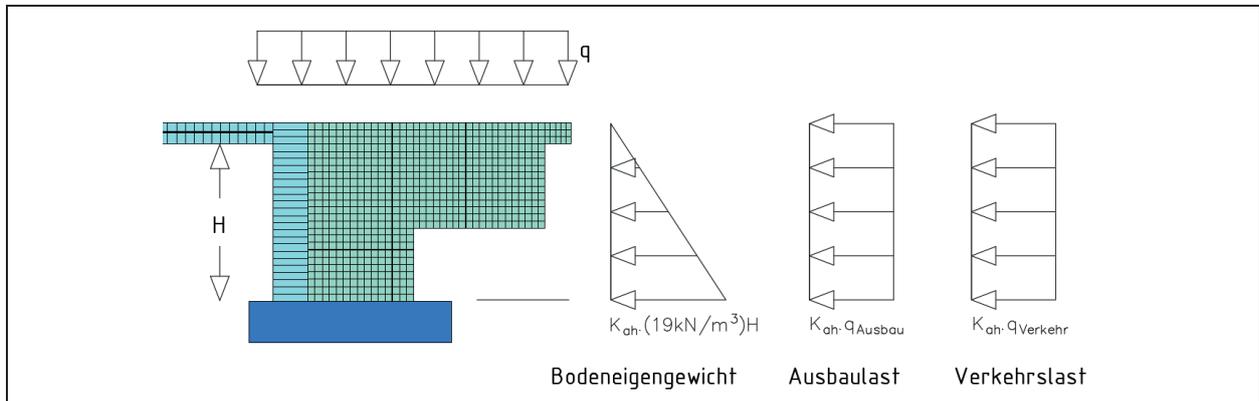
$$M_{Verkehr} = \left(3 \frac{kN}{m^2} \times 10,4 \text{ m} + 12 \frac{kN}{m^2} \times 3 \text{ m} + 6 \frac{kN}{m^2} \times 3 \text{ m} \right) \times 4,10 \text{ m} = 349 \text{ kN}$$

$$\cong 35 \text{ t}$$

Wovon 20 % berücksichtigt werden.

$$M_{total} = 900 + 59,7 + 6,6 + 0,2 \times 35 = 973,3 \text{ t}$$

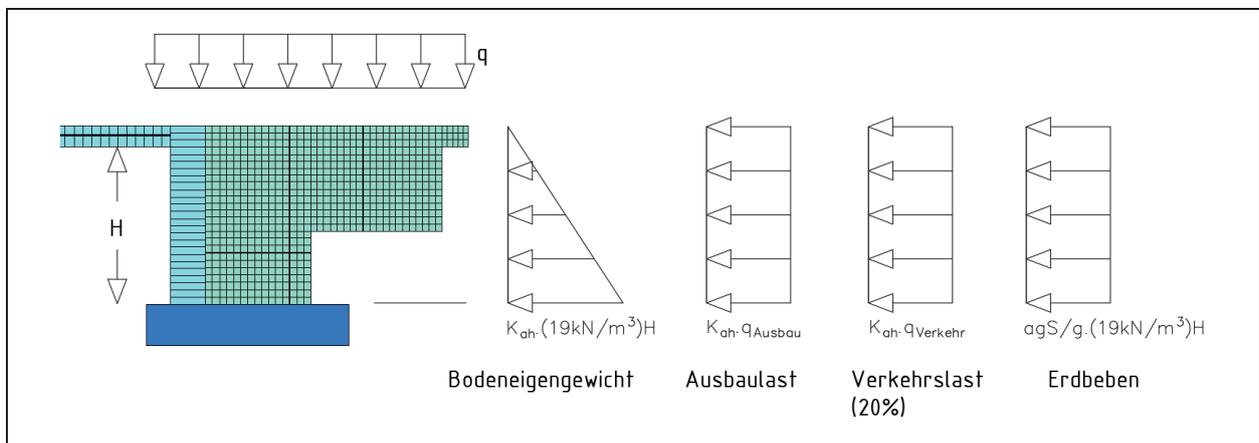
2. Horizontaler Erddruck aus Bodeneigengewicht und Ausbaulast. Dieser ist mittels des aktiven Erddruckbeiwerts (K_{ah}) berechnet.
3. Horizontaler Erddruck aus Verkehrslast, mit dem aktiven Erddruckbeiwert (K_{ah}) berechnet.



4. Horizontaler Erddruck in der Erdbebensituation aus Bodeneigengewicht, Ausbaulast und 20% des Durchschnittswerts der Verkehrslast. Dieser ist mit dem Erddruckbeiwert (K_0) berechnet.
5. Horizontaler seismischer Erddruck:

$$\Delta E_d = \frac{agS}{g} \cdot \gamma_s \cdot h$$

$$E_d = E_0 + \Delta E_d$$



Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach Eurocode 1):

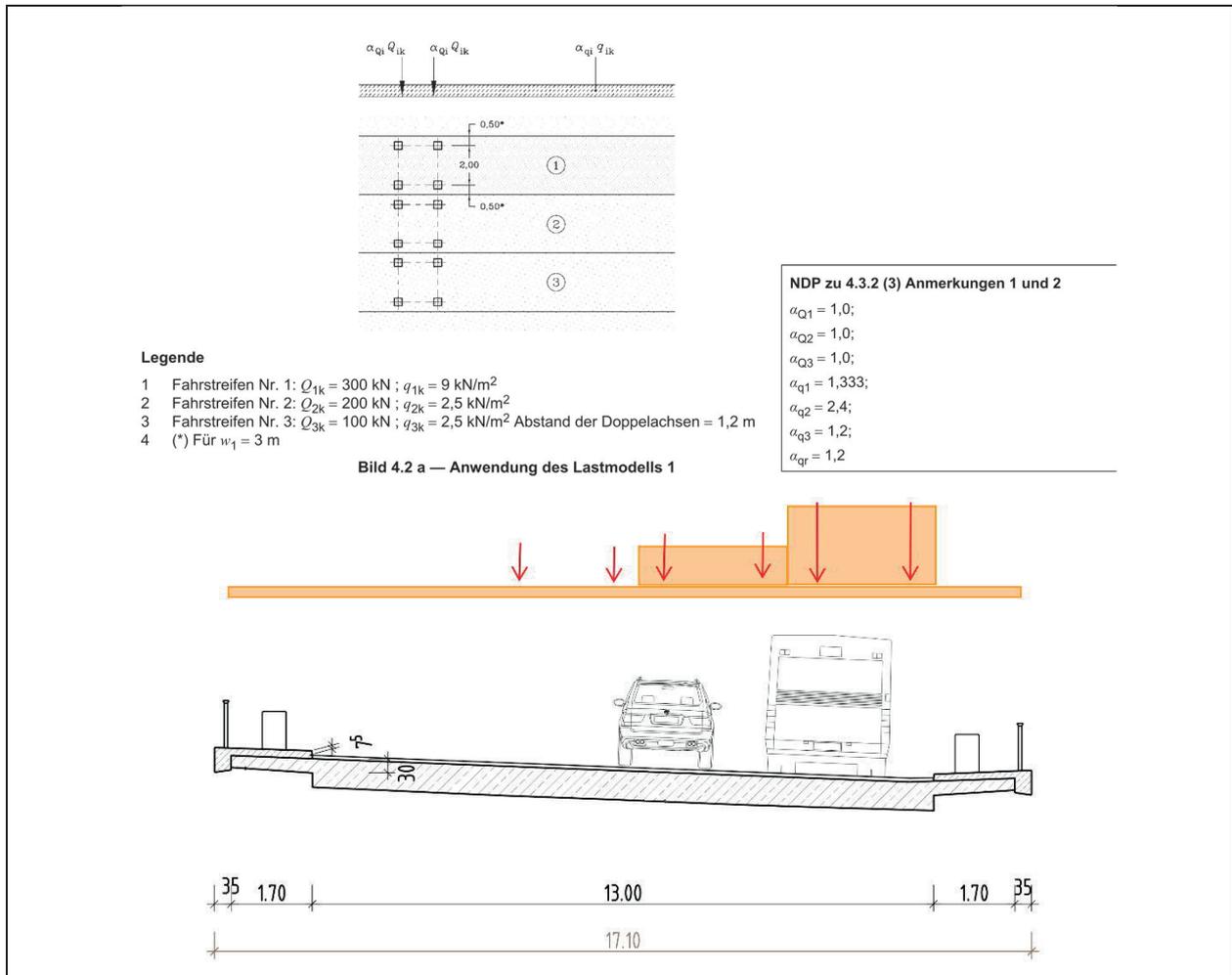


Bild L6: Darstellung Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2 /18/

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 \times 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

Grundlast: $1,20 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($b=16,6 \text{ m}$)

Überlast Hauptspur: $1,33 \times 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 5,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

Überlast Nebenspur: $(2,40 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) = 3,0 \text{ kN/m}^2$ ($e_y = 2,0 \text{ m}$, $b=3,0 \text{ m}$)

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

HS: $4 \times 150 \text{ kN}$ ($e_y = 6,0 \text{ m}$; $e_y = 4,0 \text{ m}$)

NS1: $4 \times 100 \text{ kN}$ ($e_y = 3,0 \text{ m}$; $e_y = 1,0 \text{ m}$)

NS2: $4 \times 50 \text{ kN}$ ($e_y = 0,0 \text{ m}$; $e_y = -2,0 \text{ m}$)

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6 \times L_{\text{ges}} < 900 \text{ kN}$ und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Betonkonstruktion (Typ 3) (EC 1-5, 6.1.3)

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = -16 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Ed,max}} = 37 \text{ °C} + 2 \text{ °C} = 39 \text{ °C}$$

$$T_{\text{N,con}} = -10 - 16 = -26 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{\text{N,exp}} = 39 - 10 = 29 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Temperaturdifferenz zwischen Überbau und Widerlager: $\pm 15 \text{ K}$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Betonkonstruktion –Träger/Platte (EC 1-5, 6.1.4)

$$T_{\text{M,heat}} = 15 * 0,82 = 12,3 \text{ K} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 0,82$; 80 mm Belagsdicke)

$$T_{\text{M,cool}} = 8 * 1,00 = 8,0 \text{ K} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$; 80 mm Belagsdicke)

Wind

Die Windlasten werden gemäß DIN EN 1991-4 ermittelt. Es werden jeweils die niedrigsten Windlasten angesetzt (Annahme: Windzone I, Binnenland, $z_e \leq 20 \text{ m}$).

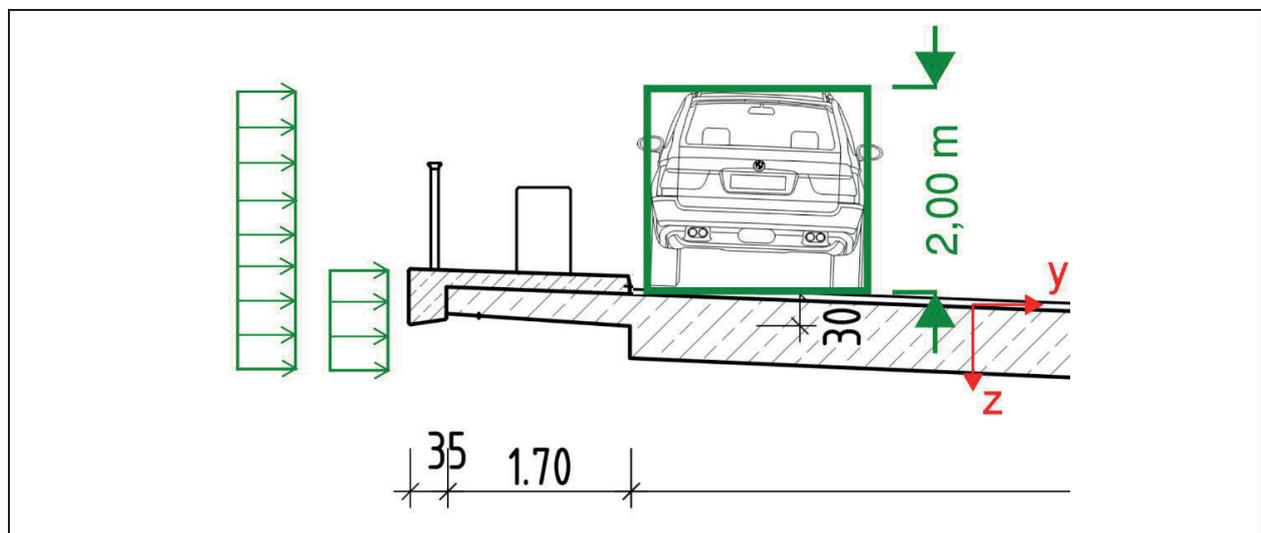


Bild L7: Darstellung Windlastmodell nach DIN EN 1991-1-4

Anmerkung: Die Windlasten werden als Linienlast und Krepelmoment ($w_k \cdot e_z$) am Kragarmrand der Platte aufgebracht.

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 0,18 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow$ vereinfachend $w = 0,60 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 \cdot (h_k + 2,08 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Tabelle 4.9 — Empfohlene Werte für durch Fahrzeugrückhaltesysteme übertragene Horizontalkräfte

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild L8: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitte 7.5.

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

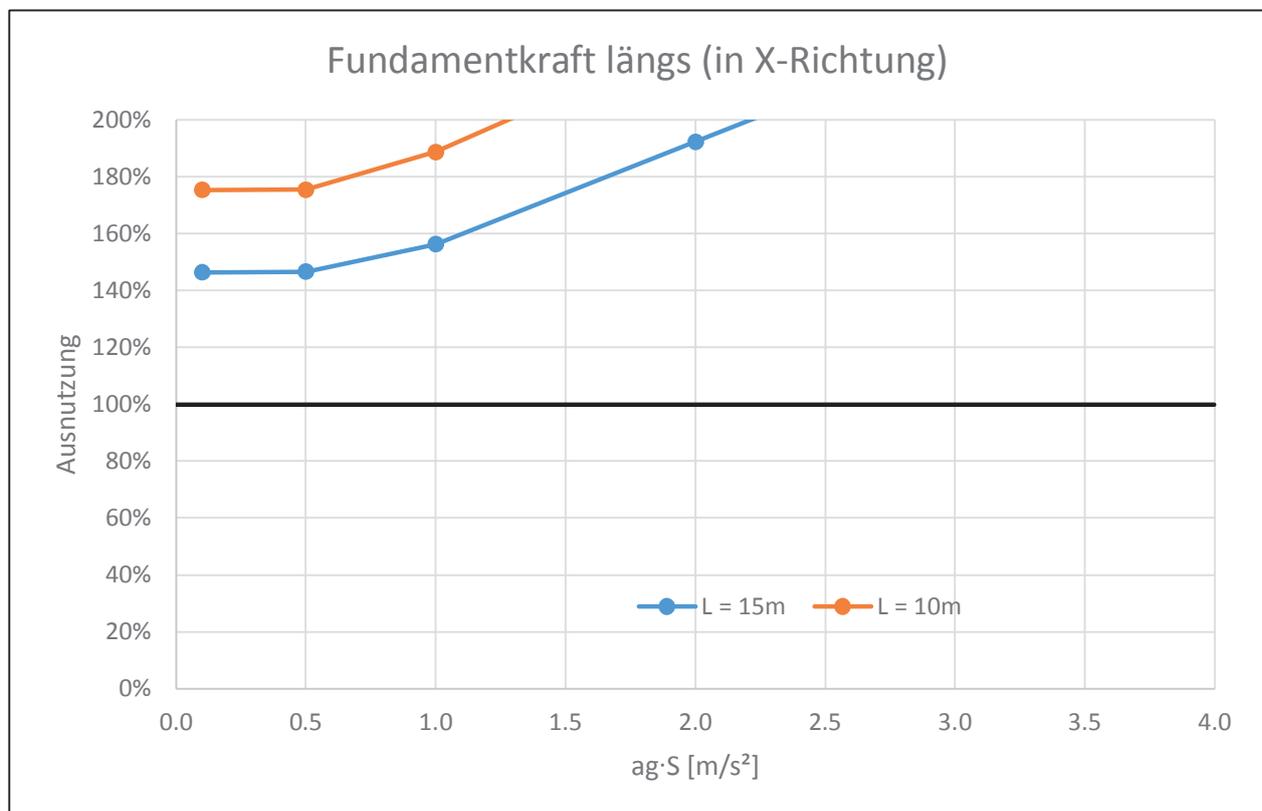
- Fundamentkräfte
- Bewehrung im Überbau
- Bewehrung in der Widerlagerwand
- Bewehrung in den Flügelwänden

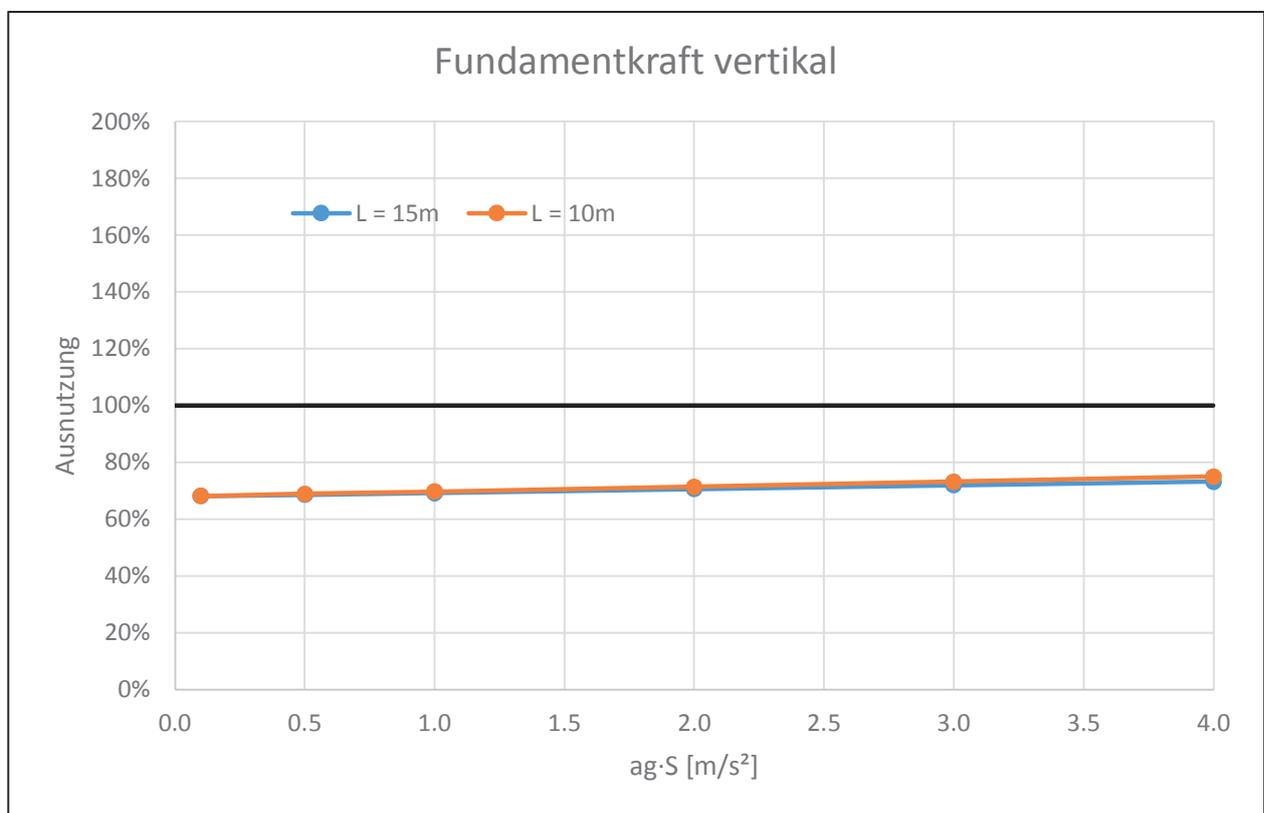
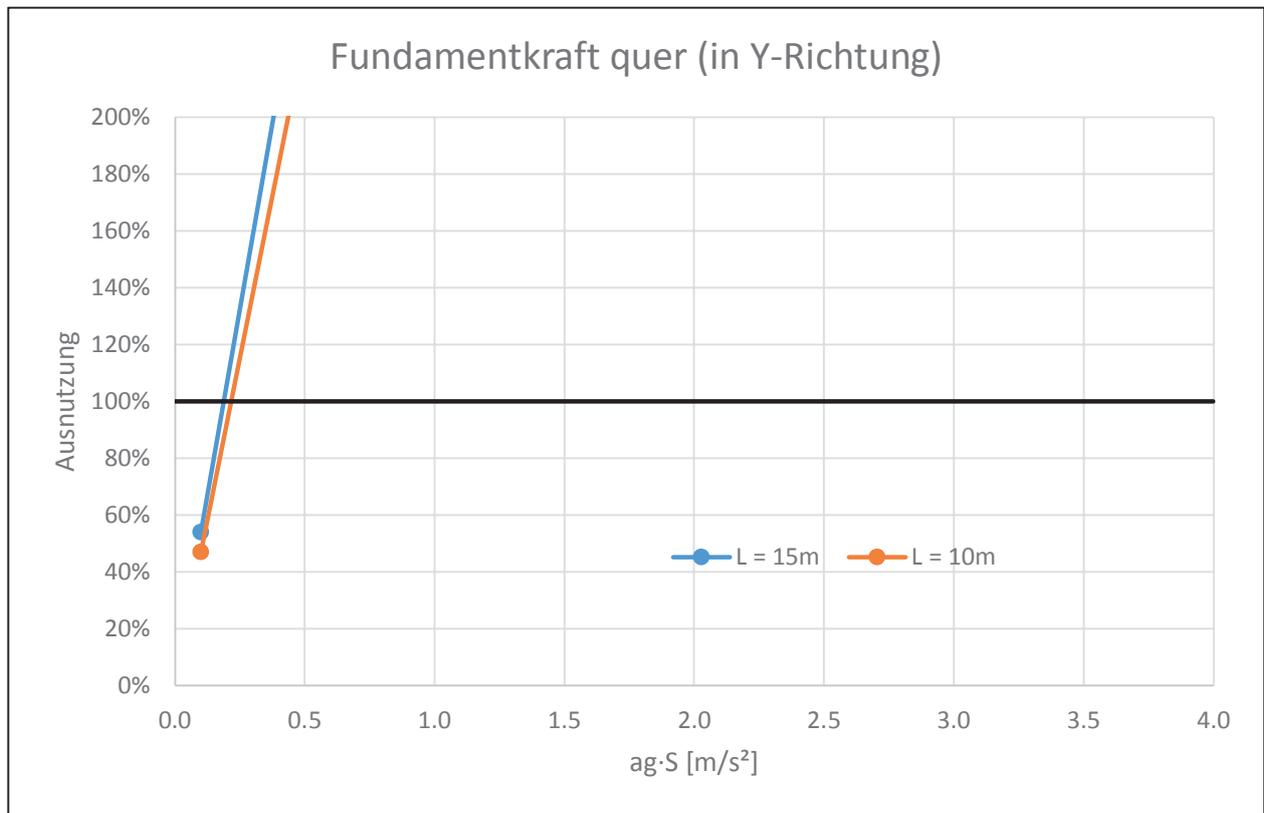
Fundamentkräfte

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Fundamentkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Fundamentkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

mit $i = X; Y; Z$



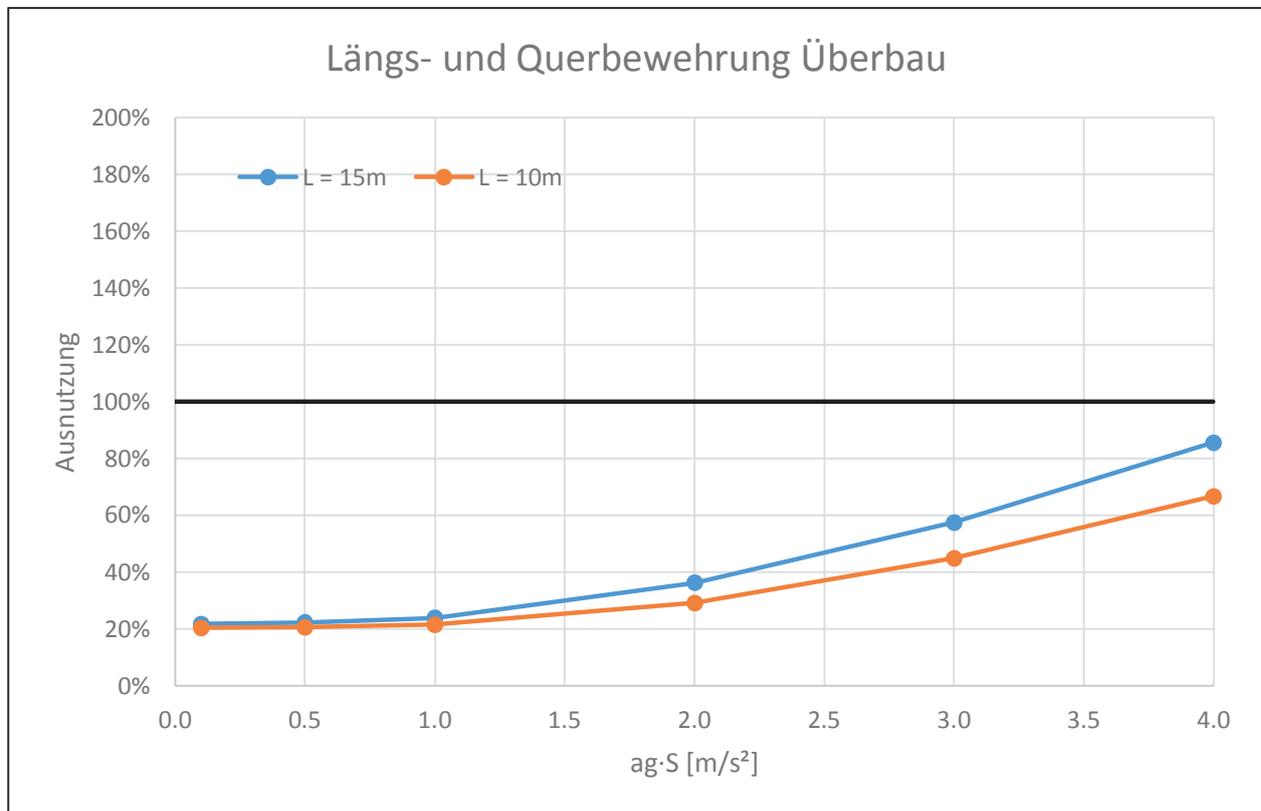


Bewehrung im Überbau

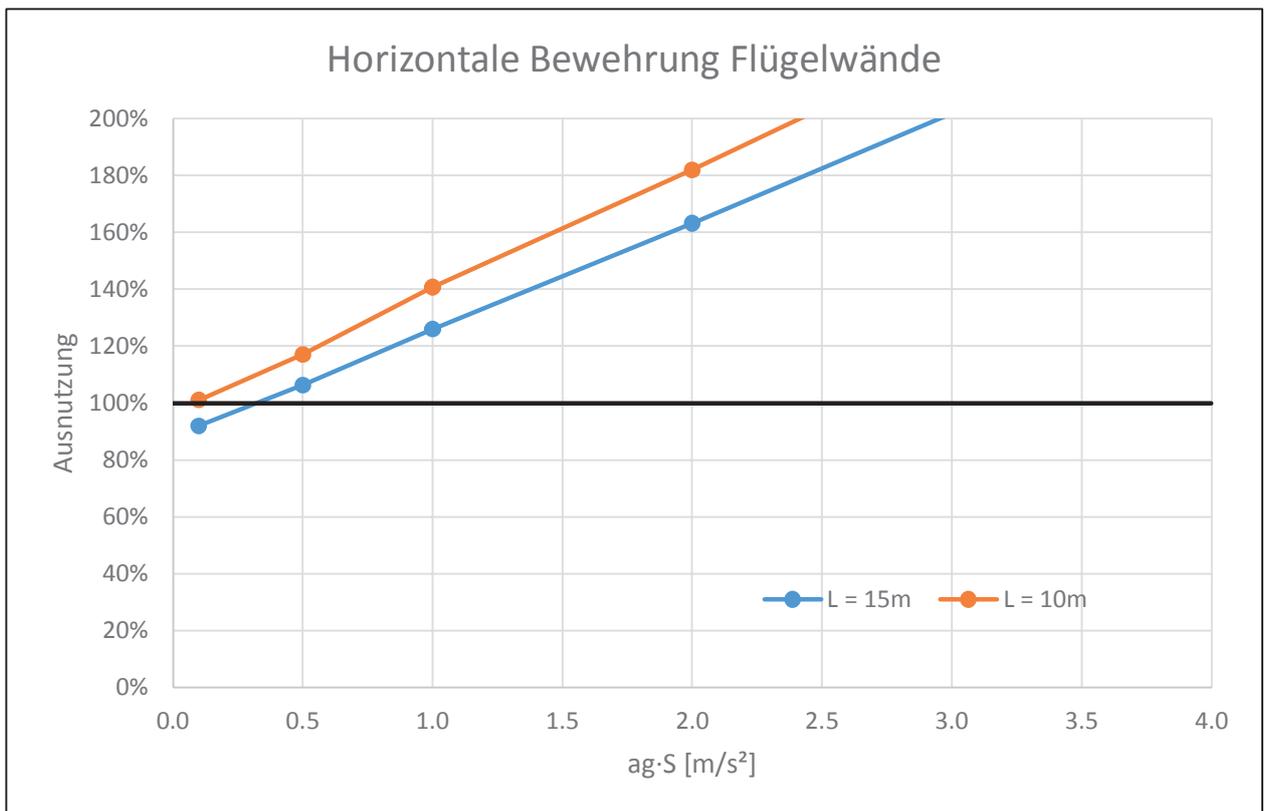
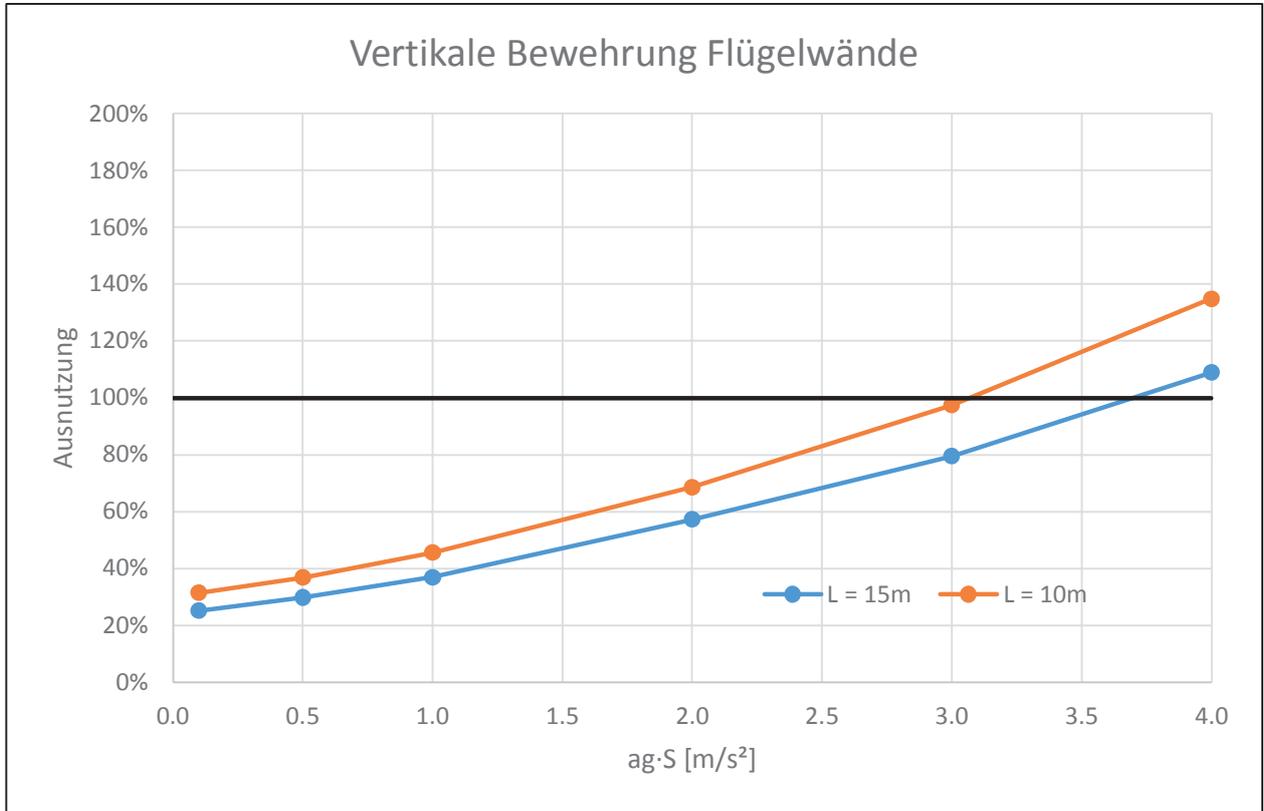
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$

Da die Kraftübertragung im Falle der Rahmenbrücke homogen verläuft, wurden Mittelwerte der erforderlichen Bewehrung miteinander verglichen. Lokale Spitzen treten auf, sind jedoch der Modellierung geschuldet und nicht real.

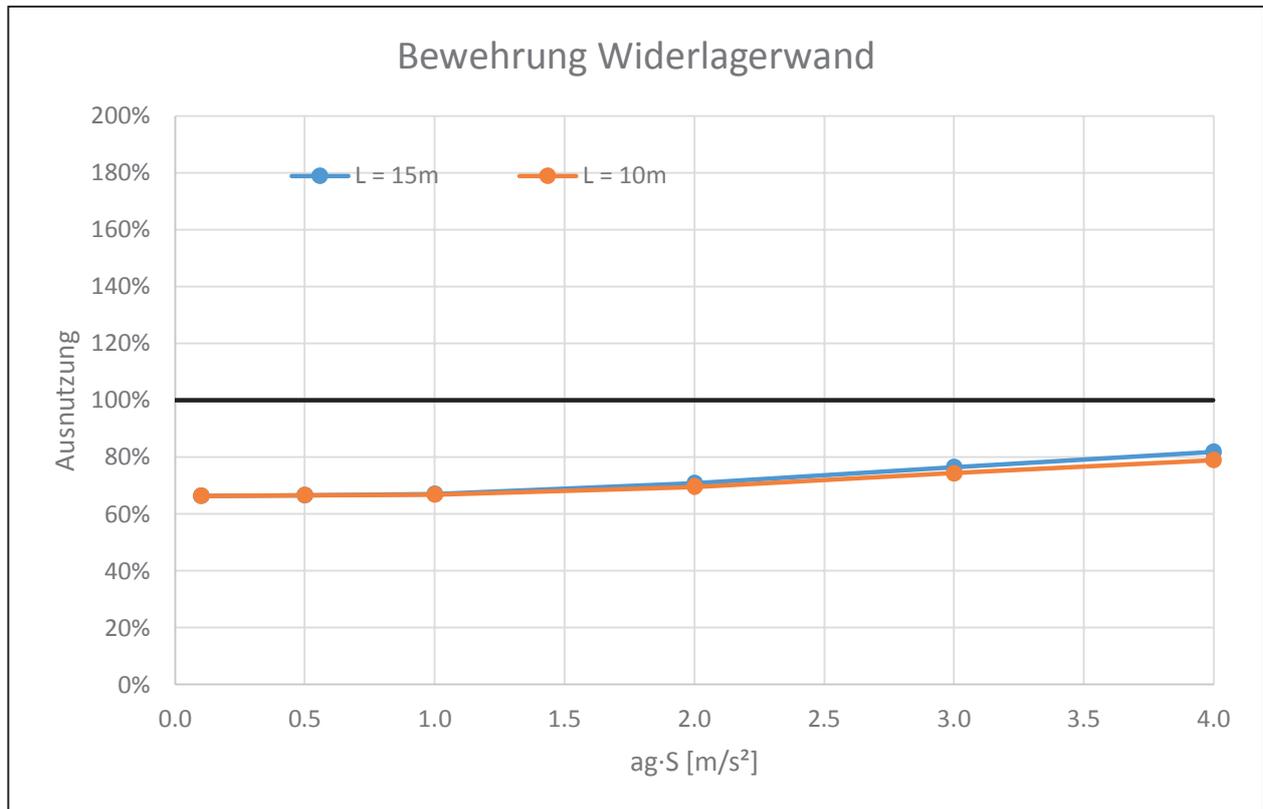


Bewehrung der Flügelwände



Bewehrung der Widerlagerwände

Im Falle der Widerlagerwände wurde der Maximalwert der erforderlichen Bewehrung ohne lokale Spitzen ausgewertet.



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Fundamentkräfte im Betrieb die Fundamentkräfte unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Für die Bemessung der Flügelwände gelten zusätzliche Anforderungen.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
15,00	0,5	3,5
10,00	0,5	3,0

Tabelle L1: Grenzwerte

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Fundamente in Brückenlängsrichtung mit

$$A_x \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

- Auslegung der Fundamente in Brückenquerrichtung mit

$$A_y \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. Hinterfüllung und 20 % der UDL
($M = G_1 + G_2 + E + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

η : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

Die Flügelwände sind mindestens für die Summe aus Erddruck und Massenbeschleunigung der Flügelwand zu bemessen.

$$E_d = E_0 + \Delta E_d + M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S)$$

mit

E_d : seismische Beanspruchung

E_0 : Erdruchdruck inkl. Erddruck aus G_2 und 20 % UDL

ΔE_d : dynamischer Erddruck infolge Erdbeben

M: Masse der Flügelwand

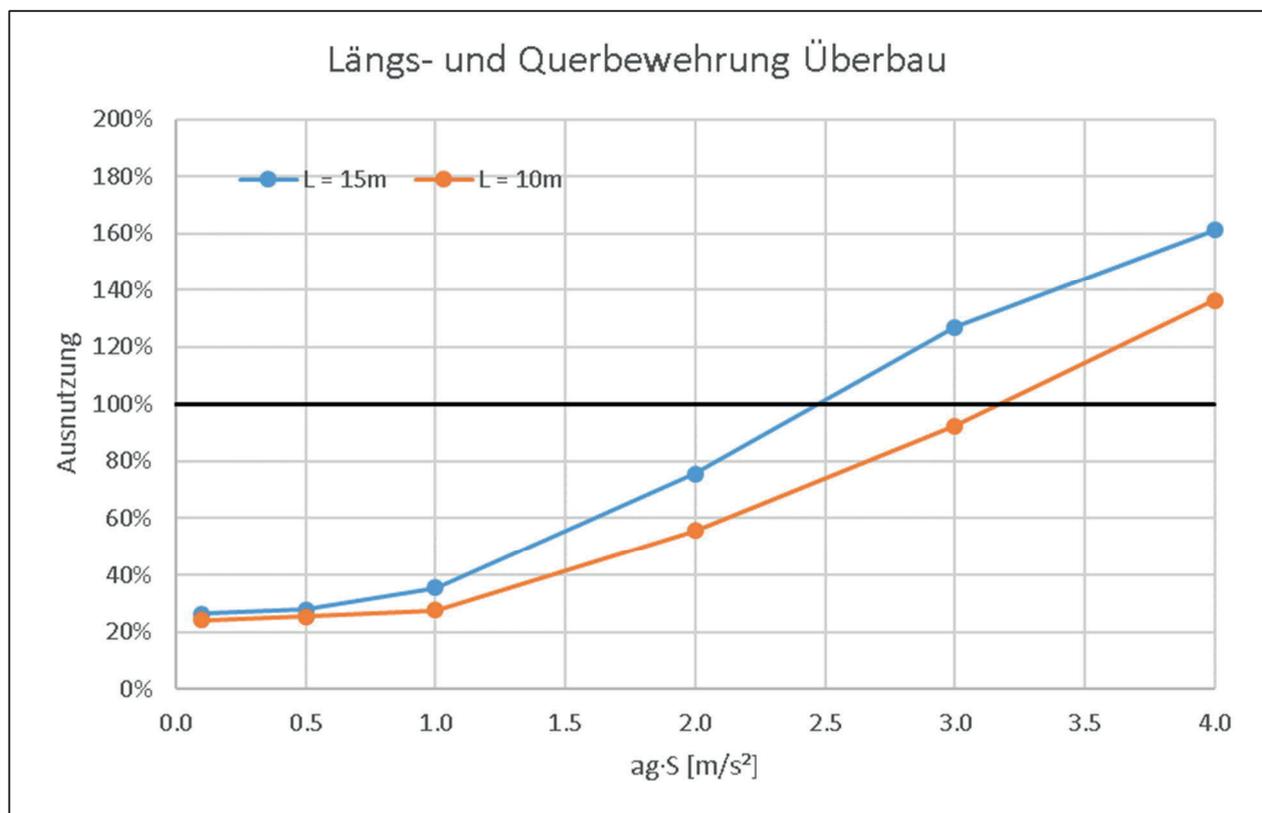
Ergänzende Betrachtung

Die Berechnung wurde für folgende Parameter wiederholt:

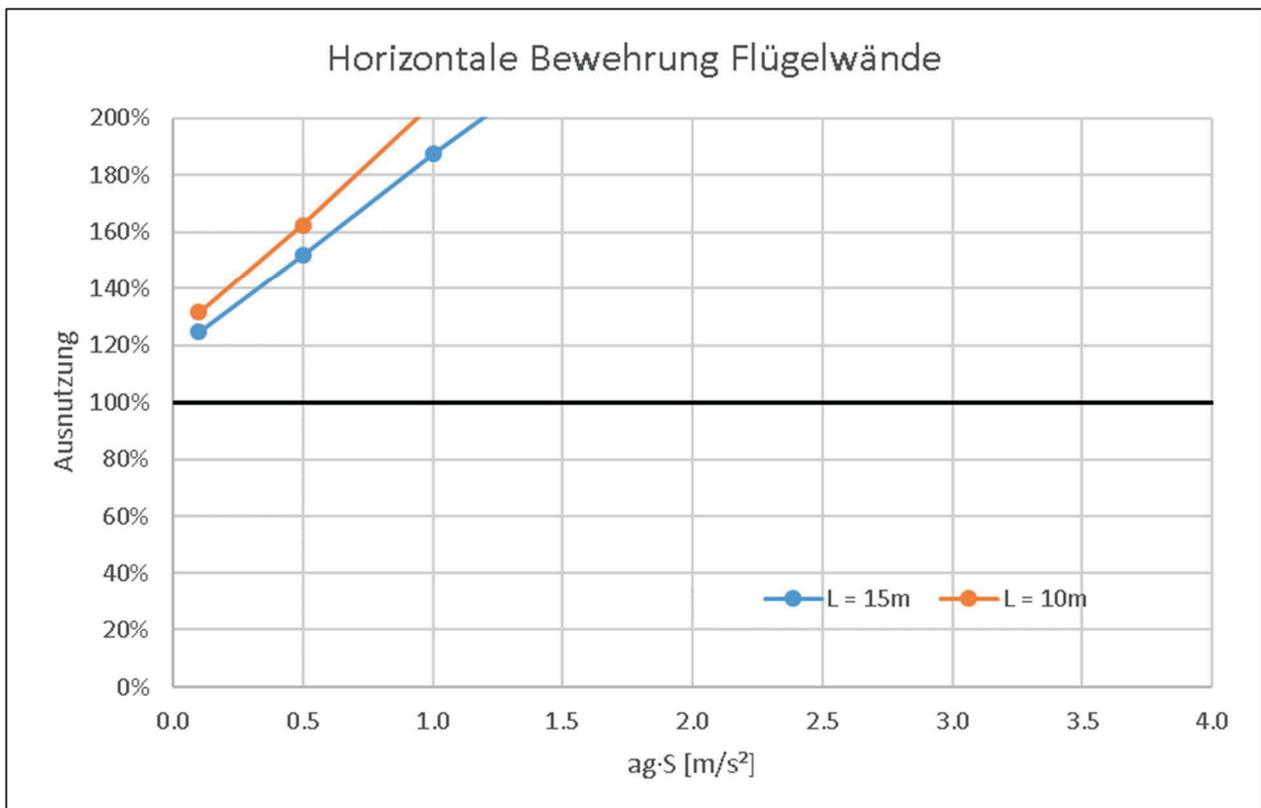
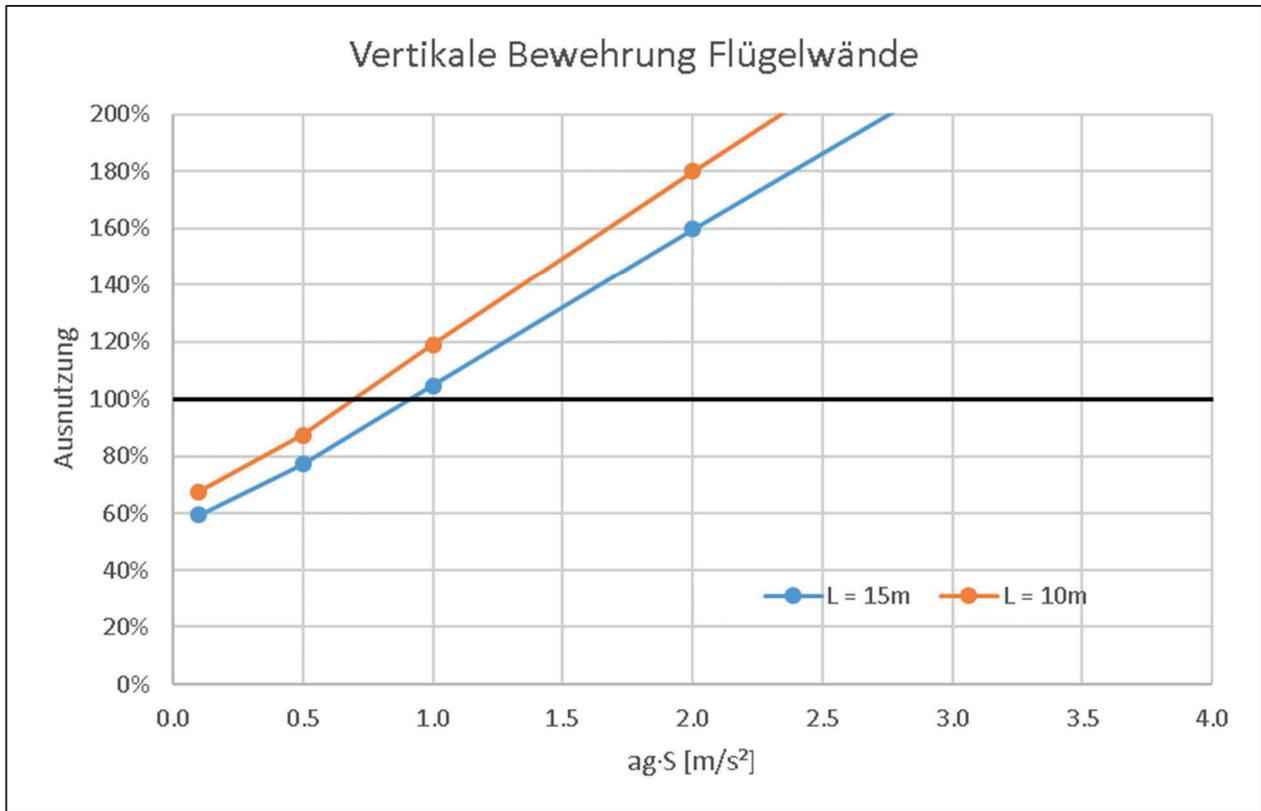
- Schlankheit des Brückenträgers: 1/12
- Dicke der Flügelwände: 60 cm
- Dicke der Widerlagerwand: 60 cm

Aus dieser zusätzlichen Betrachtung ergeben sich die nachfolgend dargestellten Ergebnisse für die Ausnutzung der Bewehrung.

Bewehrung im Überbau



Bewehrung der Flögelwände



Mit diesen Ergebnissen verschieben sich die Grenzwerte wie folgt:

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
15,00	0,5	1,0
10,00	0,5	1,0

Tabelle K2: Grenzwerte

Anhang M: Brückentyp 4.3

Systembeschreibung

Entwurfsparameter	
System in Querrichtung	<i>Integrale Rahmenbrücke (s. Bild M1)</i>
System in Längsrichtung	<i>Einfeldträger (s. Bild M2)</i>
Anzahl der Felder	<i>1</i>
Material des Überbaus	<i>Verbundbauweise mit offenen Stahlprofilen</i> <i>Beton: Mindestens C30/37</i> <i>Betonstahl: B 500B</i> <i>Baustahl: S355</i>
Querschnitt des Überbaus	<i>Plattenbalken</i> <i>Darstellung des Querschnitts in Bild M1</i>
Bauwerkslänge	≤ 50 m
Konstruktionshöhe	$L/30$
Schiefwinkligkeit	$\leq 20^\circ$
Baugrund/Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Untergrundverhältnis A-R, B-R, C-R, B-T, C-T, B-S oder C-S</i> - <i>keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort</i> - <i>keine tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz</i> - <i>dominierende Scherwellengeschwindigkeiten ≥ 150 m/s</i> - <i>homogene Bodeneigenschaft entlang der Brücke</i>
Seismische Isolation	<i>nein</i>
Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Mindestbewehrung von $\varnothing 12/15$ vorhanden</i> - <i>Durchgehende Fundamentplatte</i> - <i>Höhe des Widerlagers ≤ 8 m</i> - <i>Bauteildicke der Widerlagerwand ca. 1.00 m</i> - <i>Bauteildicke der Flügelwände ca. 0.75 m</i> - <i>Flügelwände parallel, Schiefwinkligkeit $\leq 20^\circ$</i>

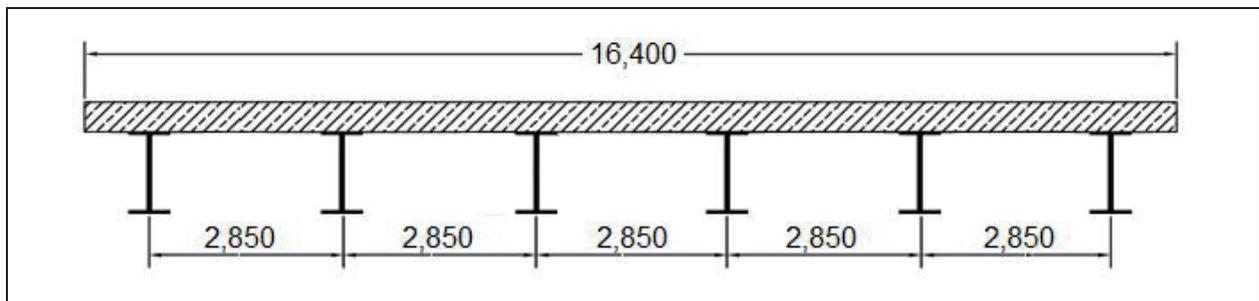


Bild M1: Brückenquerschnitt

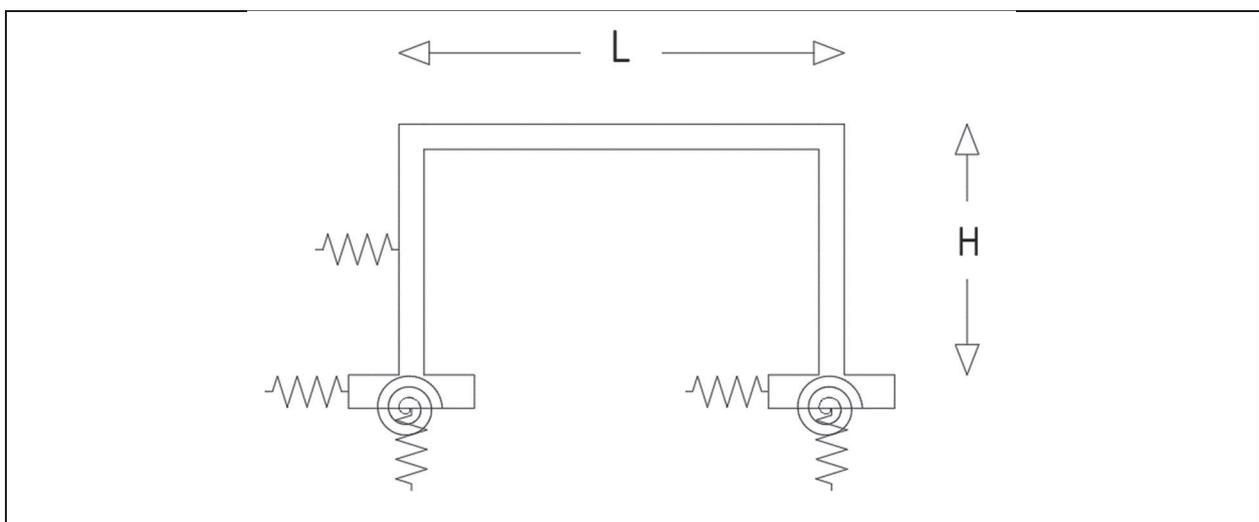


Bild M2: Statisches System

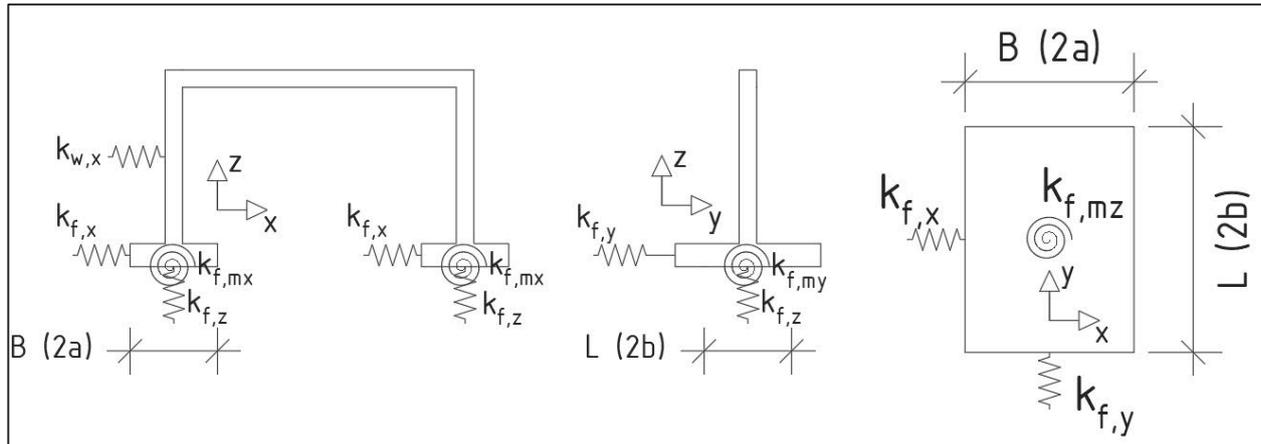
H hier gewählt zu 7,750 m.

Bauteildicke der Flügelwand: 0,75 m

Bauteildicke der Widerlagerwand: 1,00 m

Bodeneigenschaften und Gründungssteifigkeiten

Zwei extreme Bodeneigenschaften von mitteldichtem Sand und dichtem Kies werden in dieser Untersuchung gemäß folgender Tabelle berücksichtigt.



Parameter	Sand - Mitteldicht	Kies - dicht	Einheit	Referenz
γ	19	19	[kN/m ³]	Schneider S. 11.24
ρ	1937	1937	[kg/m ³]	
φ	35	35	[degree]	Schneider S. 11.24
v_s	150	234	[m/s]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 849
$\alpha \times S$ (var)	0.30	0.30	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
$v_s / v_{s,max}$	0.60	0.60	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
$v_{s,max}$	251	390	[m/s]	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
L oder 2b	17.80	17.80	[m]	
B oder 2a	5.80	5.80	[m]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 17
d	1.20	1.20	[m]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 6
fz	1.15	1.15	-	Schneider S. 11.23
E_{s_stat}	35	150	[MN/m ²]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 850
ν	0.25	0.25	-	Grundlagen der Geotechnik (Hans-Henning Schmidt) s. 95
G_stat	11.7	50.0	[MN/m ²]	Beispiel zum Leitfaden (Bezug: TM 1-2019-10335) s. 11
G_{max}	124	300	[MN/m ²]	Grundlagen der Geotechnik (Hans-Henning Schmidt) s. 512
G / G_{max}	0.36	0.36	-	DIN EN 1998 Teil 5 Tabelle 4.1
G_dyn	45	108	[MN/m ²]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 30
E_{s_dyn}	134	324	[MN/m ²]	Betonkalender 1978 Teil II Seite 849
Statische Federsteifigkeiten				
$k_{f,z}$	461	1977	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
$k_{f,y}$	394	1687	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
$k_{f,x}$	1841	4423	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
$k_{f,mz}$	inf	inf	[MNm/rad]	
$k_{f,my}$	5400	23142	[MNm/rad]	George Gazetas, Analysis of machine foundation vibration, state of the art (1983), Tables 2 and 8
$k_{f,mx}$	24622	105524	[MNm/rad]	
Dynamische Federsteifigkeiten				
$k_{f,z}$	1765	4270	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
$k_{f,y}$	1506	3643	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
$k_{f,x}$	1441	3485	[MN/m]	Leitfaden zu TM 1-2019-10335 s. 42
$k_{f,mz}$	inf	inf	[MNm/rad]	
$k_{f,my}$	20662	49988	[MNm/rad]	George Gazetas, Analysis of machine foundation vibration, state of the art (1983), Tables 2 and 8
$k_{f,mx}$	94212	227932	[MNm/rad]	

Bettung $k_{f,x}$ der Wand:

Die Bettung der Widerlagerwand ergibt sich nach Christos Vrettos, 2019, Pseudostatische Ansätze für Erddruck und Widerlagerbettung bei der seismischen Auslegung gängiger Rahmenbrücken' zu:

$$k_x^* = (20 \cdot \tan \varphi - 8,4) \cdot H = (20 \cdot \tan 35 - 8,4) \cdot 7,750 = 43,4 \text{ MN/m}^2$$

Linear über die Tiefe z wird der seismischen Berechnung und der Gesamtkombination Erdbeben die folgende Bettung zugrunde gelegt:

$$k_x = k_x^* \cdot \frac{z}{H^2} \leq 5604 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

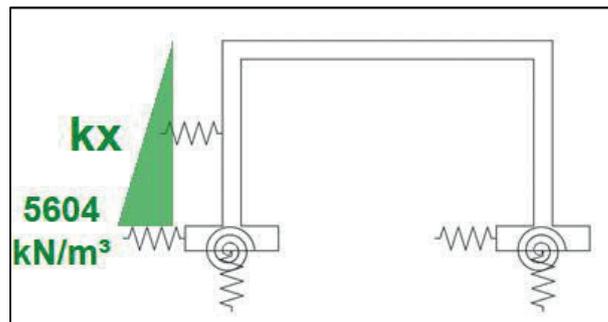


Bild M3: Bettung der Wand

Modellierung

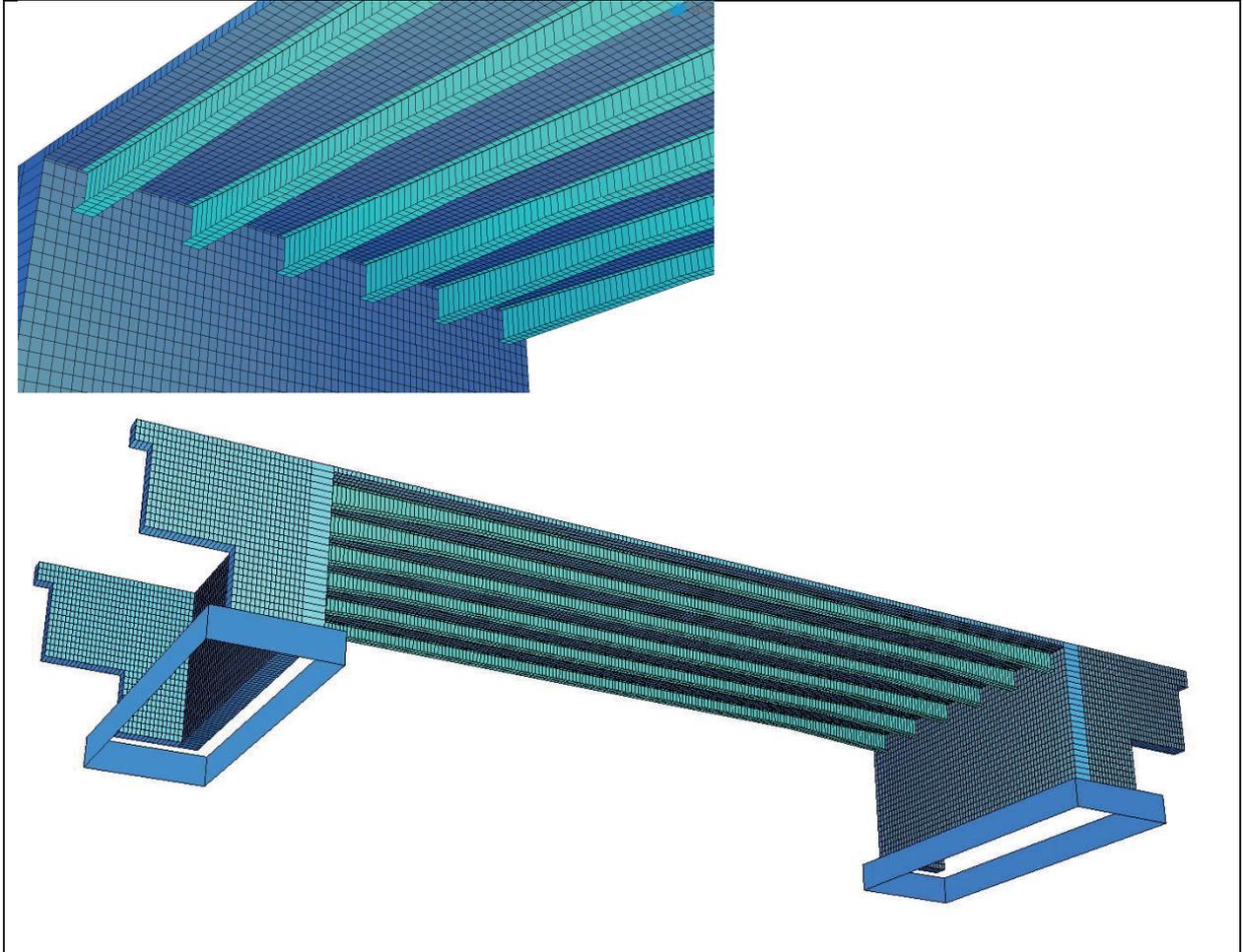


Bild M4: Modell

Einwirkungen

Eigengewicht und Ausbaulasten

Konstruktionseigengewicht – G1

Das Konstruktionseigengewicht des Überbaus und der Widerlager wird programmintern mit einer Wichte von 25 kN/m³ für Beton und von 78.5 kN/m³ für Stahl ermittelt und variiert dabei in Abhängigkeit der Konstruktionshöhe.

Ausbaulasten – G2

Die Ausbaulasten werden als Flächen- und Linienlasten in ihrer tatsächlichen Lage aufgebracht. Bei der Ermittlung der Eigenformen sind entsprechend keine Rotationsmassen manuell hinzuzufügen.

Fahrbahnbelag:

Der Belagsaufbau wird mit 8 cm und einer Wichte von 25 kN/m³ inkl. einem Mehreinbau von 0,5 kN/m² über die 13 m breite Fahrbahn angesetzt [ARS 22/2012]:

$$g_{k, \text{Belag}} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Kappe:

Die Kappen werden analog zu Kap1 der RiZ-ING ausgebildet. Das Eigengewicht der Kappe ohne Gesimsbalken ergibt sich zu

$$g_{k, \text{Kappe}, 1} = 0,25 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 / 1,70 \text{ m} = 3,68 \text{ kN/m}^2$$

Das Eigengewicht des Gesimsbalkens inkl. Geländer (je 0,5 kN/m) und Schutzplanke (1 kN/m) ergibt sich zu:

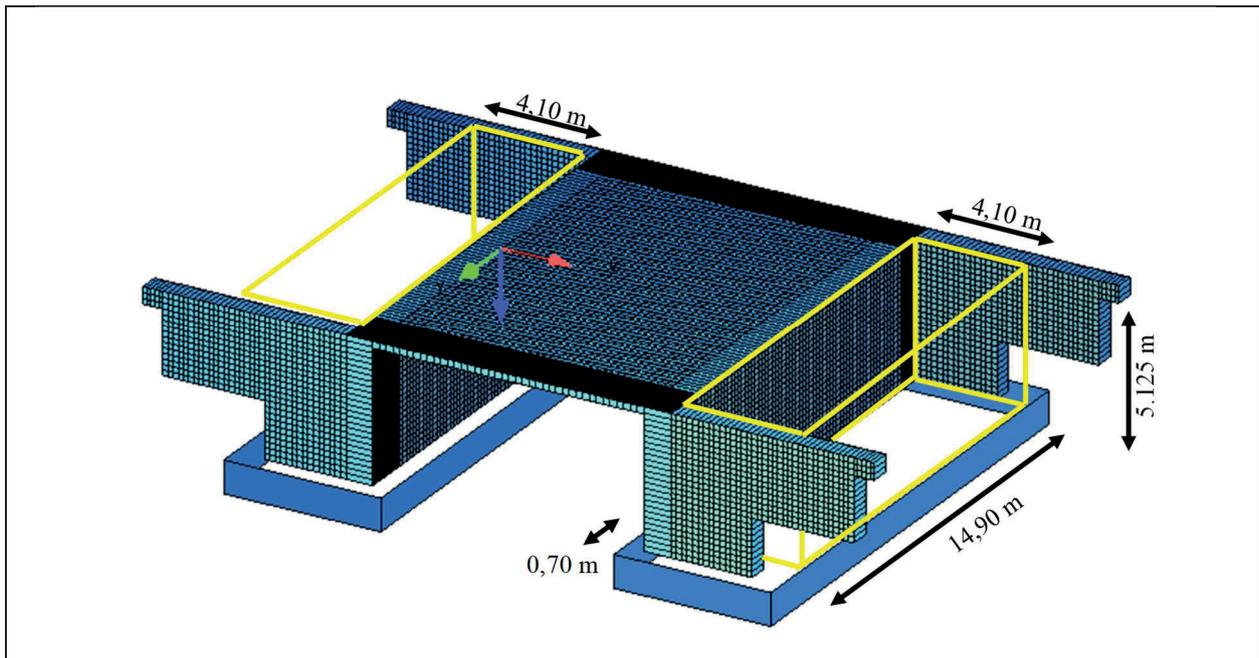
$$g_{k, \text{Kappe}} = 0,15 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 + 1,5 \text{ kN/m} = 5,25 \text{ kN/m}$$

Erddrucklasten

Die folgenden Erddrucklasten sind in der Berechnung angesetzt:

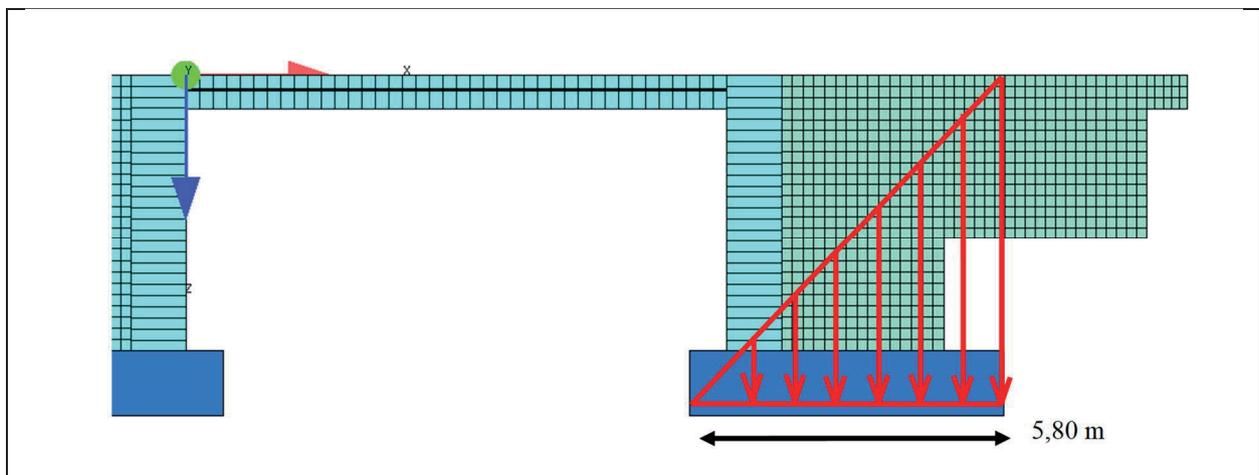
1. Vertikaler Erddruck aus Bodeneigengewicht und 20 % der Verkehrslast. Diese sind als Masse in der Berechnung der Eigenfrequenzen berücksichtigt.

Masse des Bodens zwischen Widerlagerwand und -flügel:



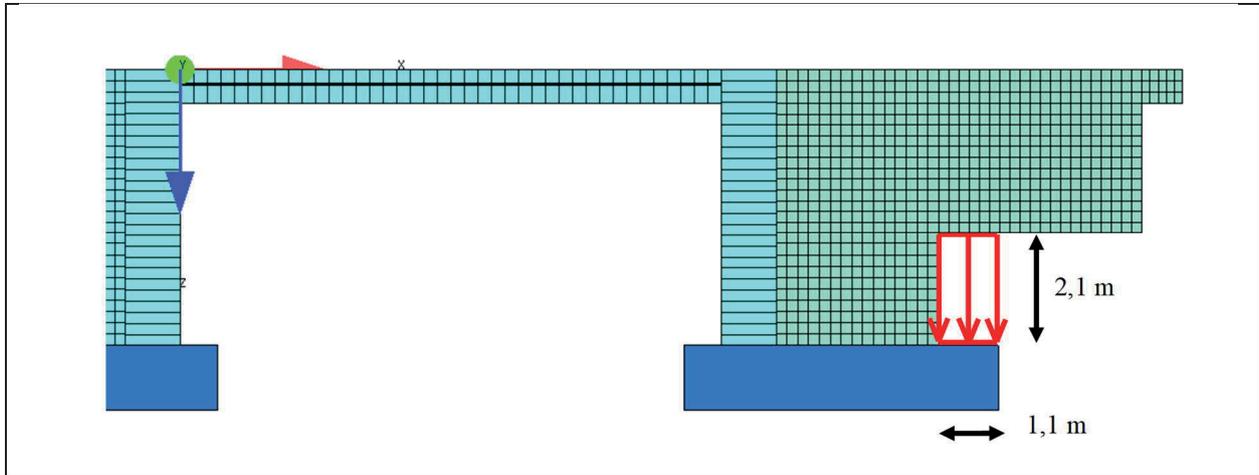
$$M_{Erde,1} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (14,9m \times 7,750m \times 4,10m) = 900,0 t$$

Masse des geneigten Bodens an der Außenseite der Widerlagerflügel:



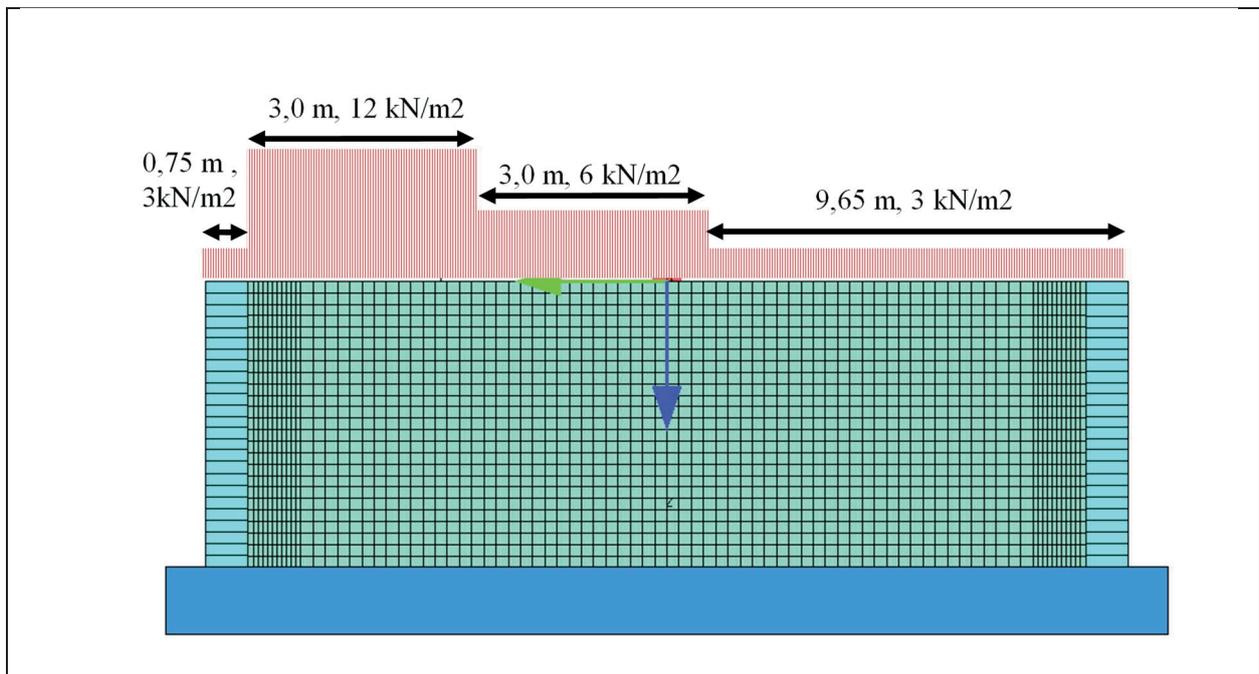
$$M_{Erde,2} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (0,7 m \times 7,750 m \times 5,80 m/2) \times 2 = 59,7 t$$

Masse im Bereich unter der Widerlagerflügel:



$$M_{Erde,3} = 1,9 \frac{t}{m^3} \cdot (0,75 m \times 2,1 m \times 1,1 m) \times 2 = 6,6 t$$

Die Masse aus den Verkehrslasten:



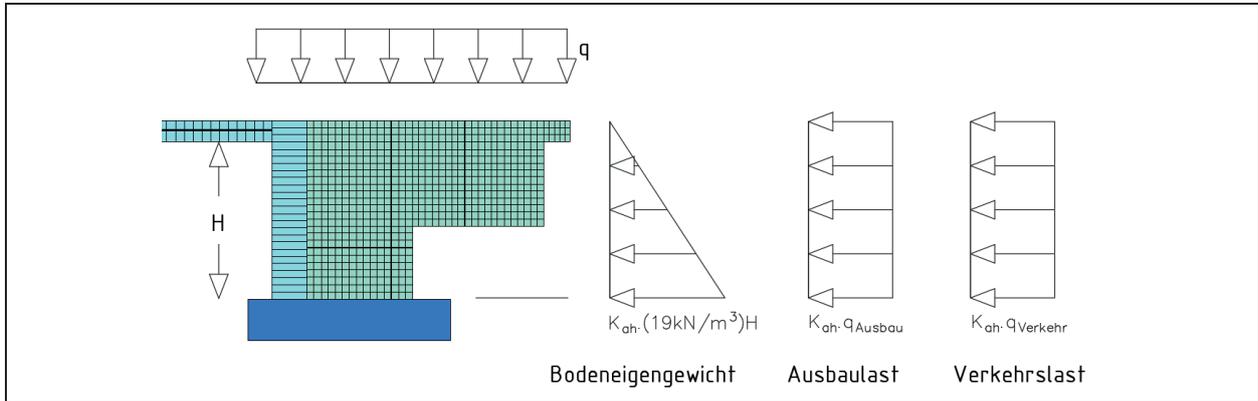
$$M_{Verkehr} = \left(3 \frac{kN}{m^2} \times 10,4 m + 12 \frac{kN}{m^2} \times 3 m + 6 \frac{kN}{m^2} \times 3 m \right) \times 4,10 m = 349 kN$$

$$\cong 35 t$$

Hiervon werden 20 % berücksichtigt.

$$M_{total} = 900 + 59,7 + 6,6 + 0,2 \times 35 = 973,3 t$$

2. Horizontaler Erddruck aus Bodeneigengewicht und Ausbaulast. Dieser ist mittels des aktiven Erddruckbeiwerts (K_{ah}) berechnet.
3. Horizontaler Erddruck aus Verkehrslast, mit dem aktiven Erddruckbeiwert (K_{ah}) berechnet.

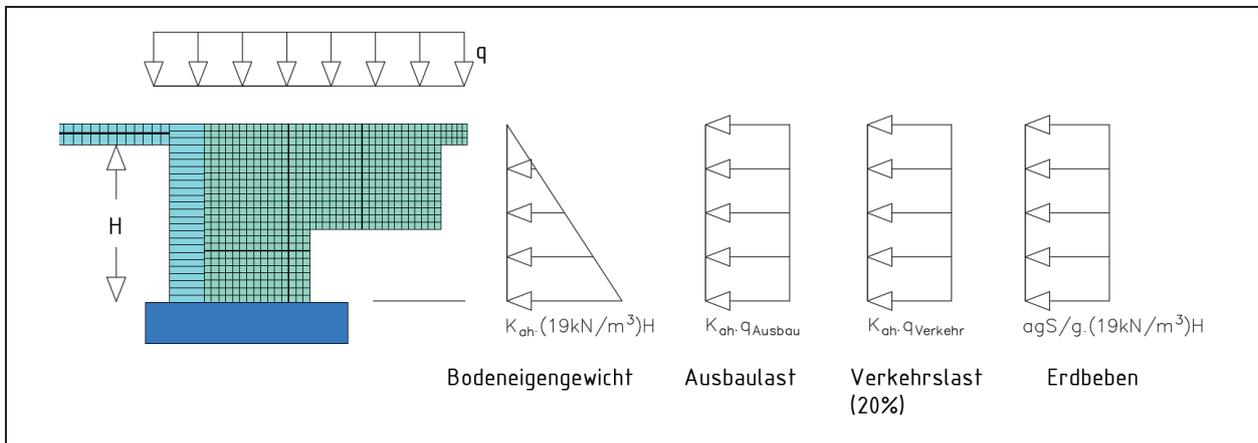


Horizontaler Erddruck in der Erdbebensituation aus Bodeneigengewicht, Ausbaulast und 20% des Durchschnittswerts der Verkehrslast. Dieser ist mit dem Erddruckbeiwert (K_0) berechnet.

4. Horizontaler seismischer Erddruck:

$$\Delta E_d = \frac{agS}{g} \cdot \gamma_s \cdot h$$

$$E_d = E_0 + \Delta E_d$$



Verkehrslasten

UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Grundlast von $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$ wird zwischen den Geländern auf einer Breite von $(17,1 - 2 \times 0,25 \text{ m}) = 16,6 \text{ m}$ angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand.

$$\text{Grundlast:} \quad 1,20 * 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{b}=16,6 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Hauptspur:} \quad 1,33 * 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{e}_y = 5,0 \text{ m}, \text{ b}=3,0 \text{ m})$$

$$\text{Überlast Nebenspur:} \quad (2,40 * 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2) = 3,0 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{e}_y = 2,0 \text{ m}, \text{ b}=3,0 \text{ m})$$

(e_y - Exzentrizität zur Stabachse)

TS (Einzellasten aus Verkehr)

$$\text{HS:} \quad 4 * 150 \text{ kN} \quad (\text{e}_y = 6,0 \text{ m}; \text{ e}_y = 4,0 \text{ m})$$

$$\text{NS1:} \quad 4 * 100 \text{ kN} \quad (\text{e}_y = 3,0 \text{ m}; \text{ e}_y = 1,0 \text{ m})$$

$$\text{NS2:} \quad 4 * 50 \text{ kN} \quad (\text{e}_y = 0,0 \text{ m}; \text{ e}_y = -2,0 \text{ m})$$

Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu $360 + 3.6 \times L_{\text{ges}} < 900 \text{ kN}$ und wird als Linienlast über die gesamte Länge aufgebracht.

Temperatur

Konstanter Temperaturanteil (ΔT_N)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{e,\text{min}} = -24 \text{ }^\circ\text{C} + 4 \text{ }^\circ\text{C} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{e,\text{max}} = 37 \text{ }^\circ\text{C} + 4 \text{ }^\circ\text{C} = 41 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{N,\text{con}} = -10 - 20 = -30 \text{ K} \quad (\text{LF 54}) / \text{Überbau}$$

$$T_{N,\text{exp}} = 41 - 10 = 31 \text{ K} \quad (\text{LF 55}) / \text{Überbau}$$

Linear veränderlicher Temperaturanteil (DTZ)

Verbundkonstruktion (Typ 2) (DIN EN 1991-1-5, 6.1.3)

$$T_{M,\text{heat}} = 15 \text{ }^\circ\text{C} \times 1,0 = 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{LF 64})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

$$T_{M,\text{cool}} = 18 \text{ }^\circ\text{C} \times 1,0 = 18 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{LF 65})$$

($k_{\text{sur}} = 1,0$ für 80 mm Belagsdicke)

Wind

Wind ohne Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 0,18 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$b/d \geq 5 \rightarrow w = 0,95 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind ohne Verkehrsband:

$w_k = 0,95 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 0,18 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 0,18 \text{ m})/2 - 0,18 \text{ m}$

Wind mit Verkehrsband

Gesamtbreite der Brücke $b = 17,1 \text{ m}$

Oberkante Kappe bis Unterkante Steg $d = 2,08 + h$ - h var. (ca. $0,67 \text{ m} < h < 1,67 \text{ m}$)

$4,6 \leq b/d \leq 6,2 \rightarrow$ vereinfachend $w = 0,60 \text{ kN/m}^2$

Die Eingabe im Modell erfolgt als resultierende Linienlast mit Exzentrizität:

Wind mit Verkehrsband:

$w_k = 0,60 \text{ kN/m}^2 * (h_k + 2,08 \text{ m})$ $e_z = (h_k + 2,08 \text{ m})/2 - 2,08 \text{ m}$

Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt.

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Bild M5: Anpralllasten nach DIN EN DIN EN 1991-2/NA:2012-08 /19/

Es wird die Klasse A berücksichtigt.

Erdbeben

Das Erdbeben wird wie im Hauptteil, Abschnitt 7.4 beschrieben aufgebracht.

Überlagerungen

s. Hauptteil, Abschnitte 7.5.

Ergebnisse

Es werden folgende Parameter ausgewertet:

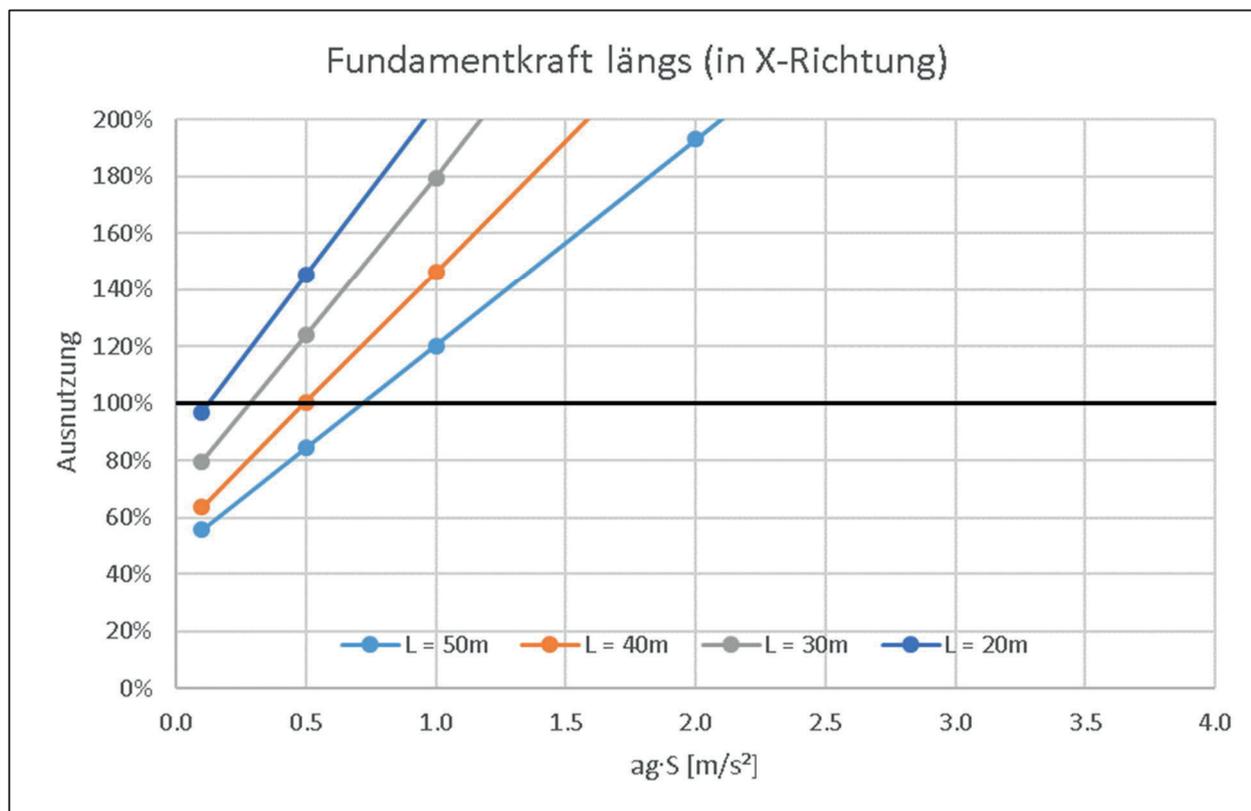
- Fundamentkräfte
- Bewehrung im Überbau
- Bewehrung in der Widerlagerwand
- Bewehrung in den Flügelwänden
- Stahlspannungen im Verbundträger (Aspekt der Stabilität nicht untersucht)

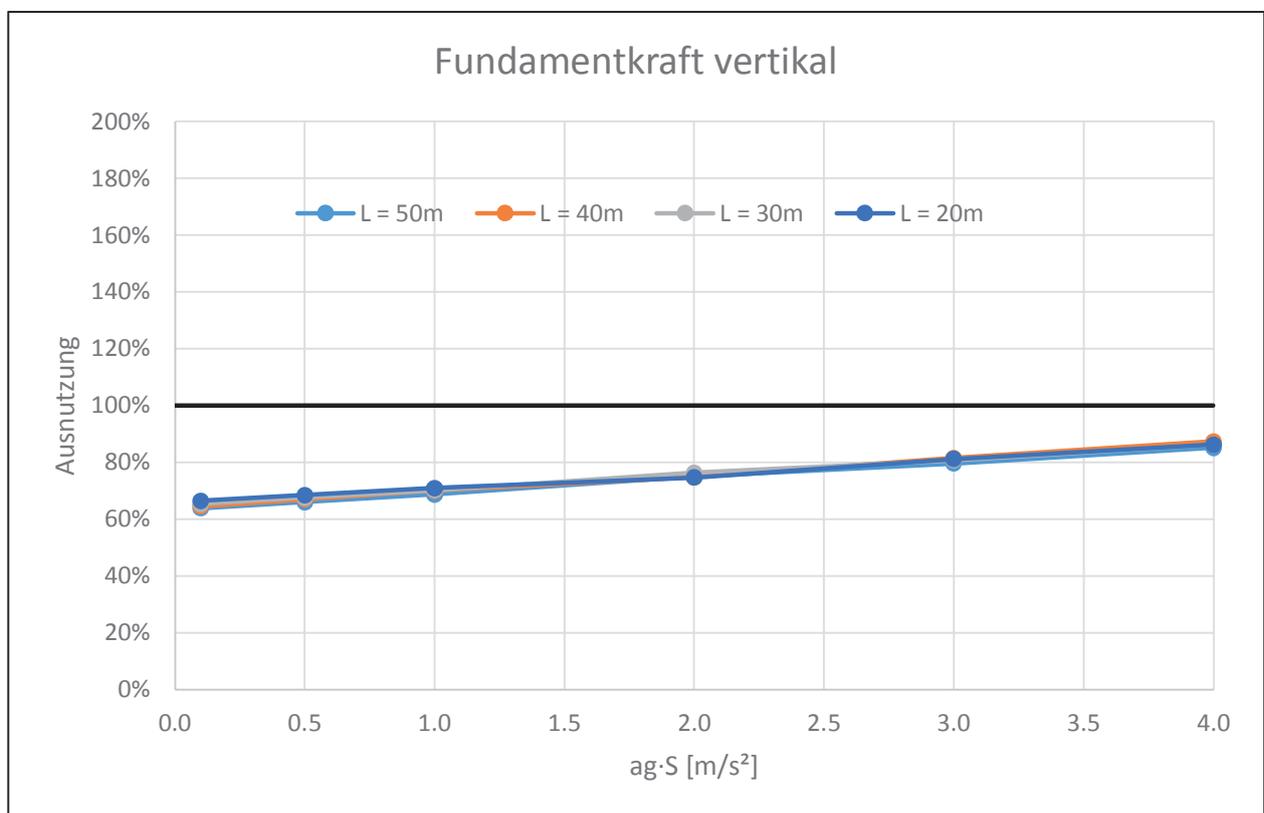
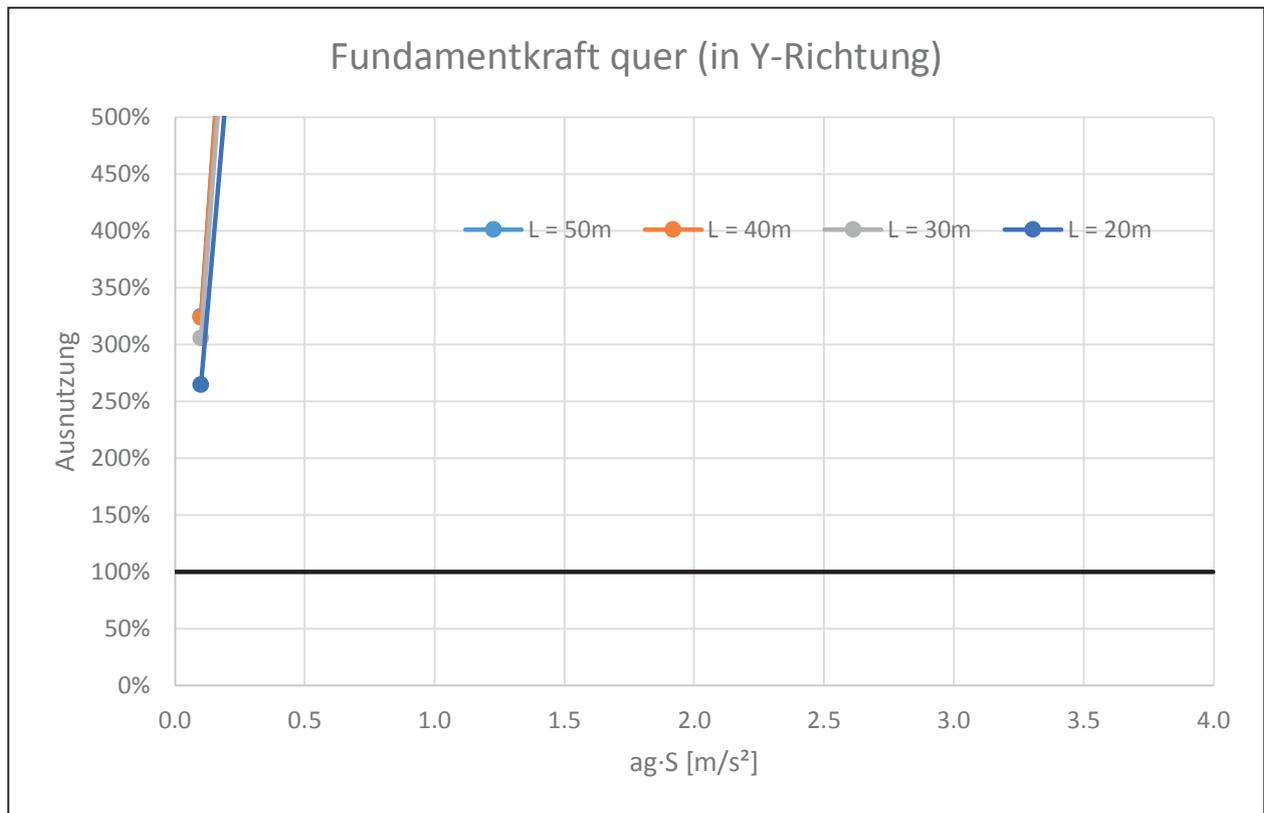
Fundamentkräfte

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s²] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Fundamentkräfte, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurden, zu den Fundamentkräften, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig sind, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{F_{i,\text{Erdbeben}}}{F_{i,\text{GZT}}}$$

mit $i = X; Y; Z$



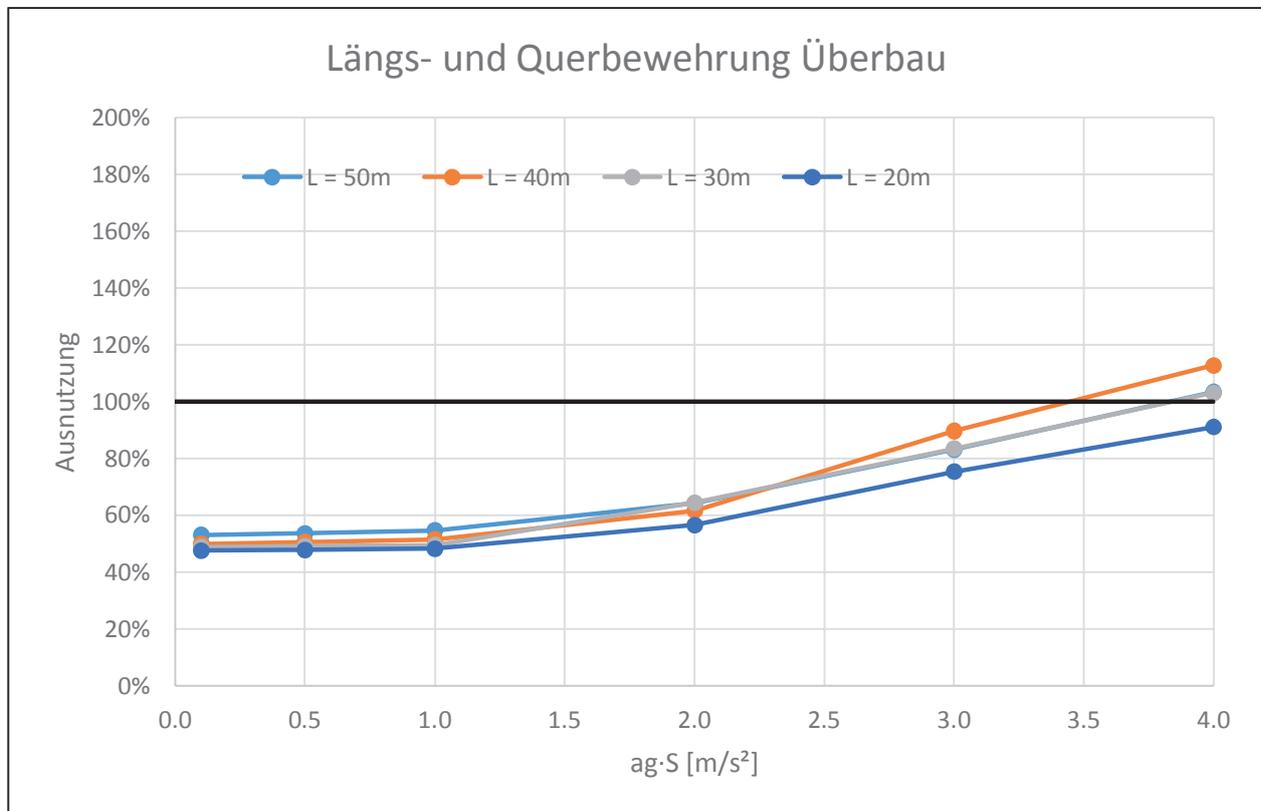


Bewehrung im Überbau

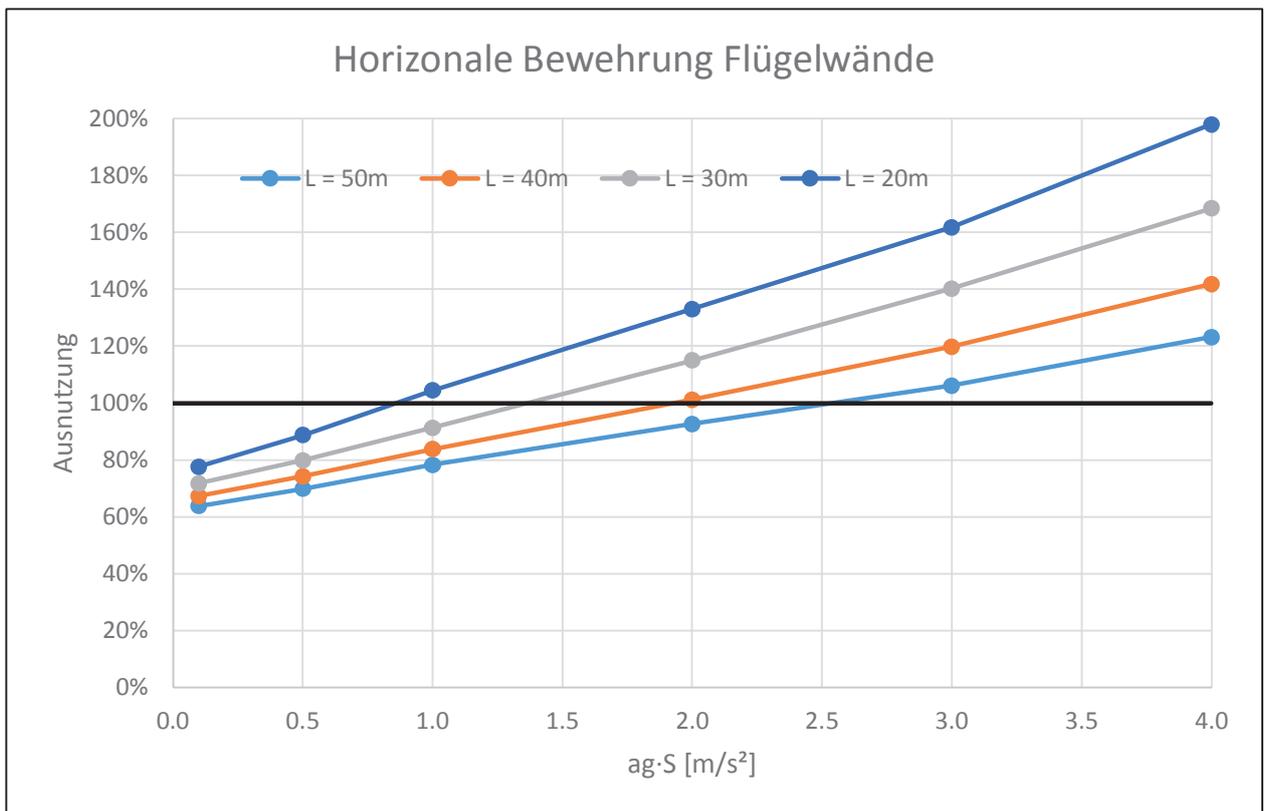
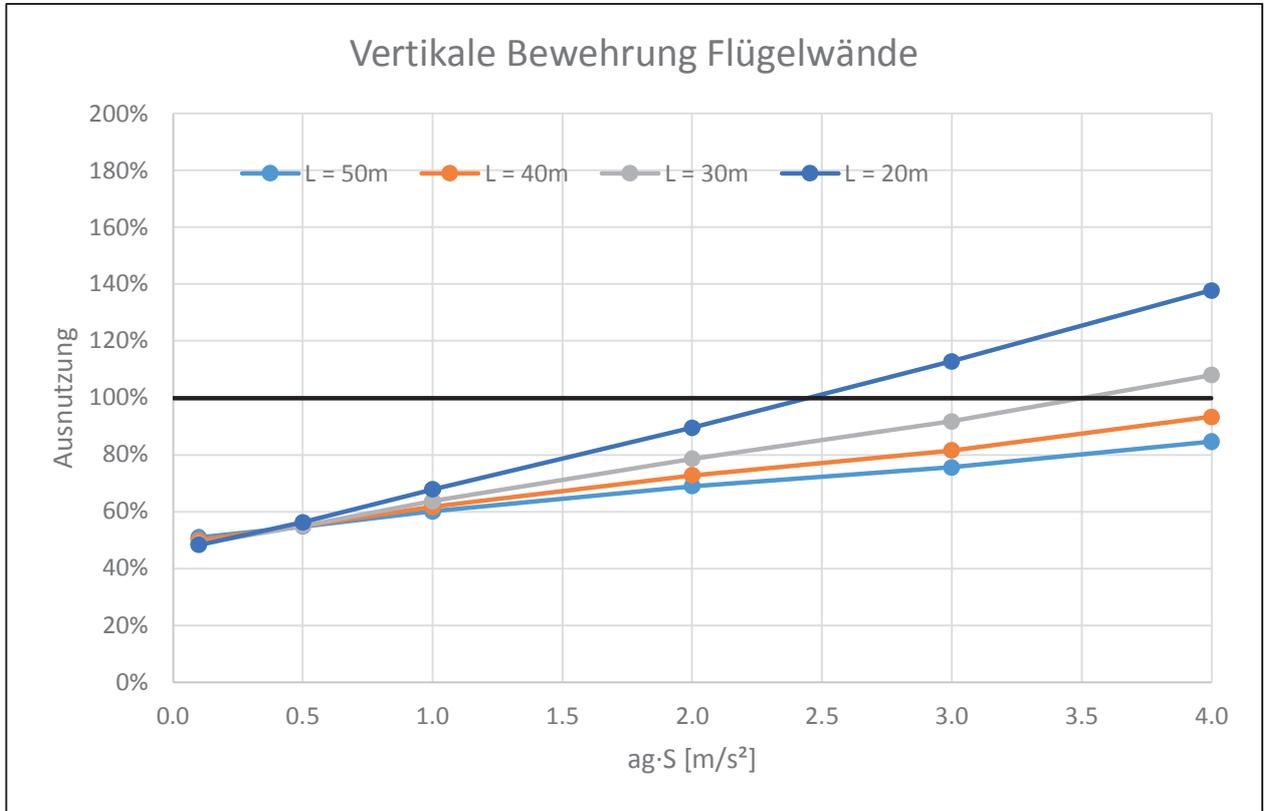
In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Bewehrung, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Bewehrung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in den Tabellen als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{A_{s, \text{Erdbeben}}}{A_{s, \text{GZT}}}$$

Da die Kraftübertragung im Falle der Rahmenbrücke homogen verläuft, wurden Mittelwerte der erforderlichen Bewehrung miteinander verglichen. Lokale Spitzen treten auf, sind jedoch der Modellierung geschuldet und nicht real.

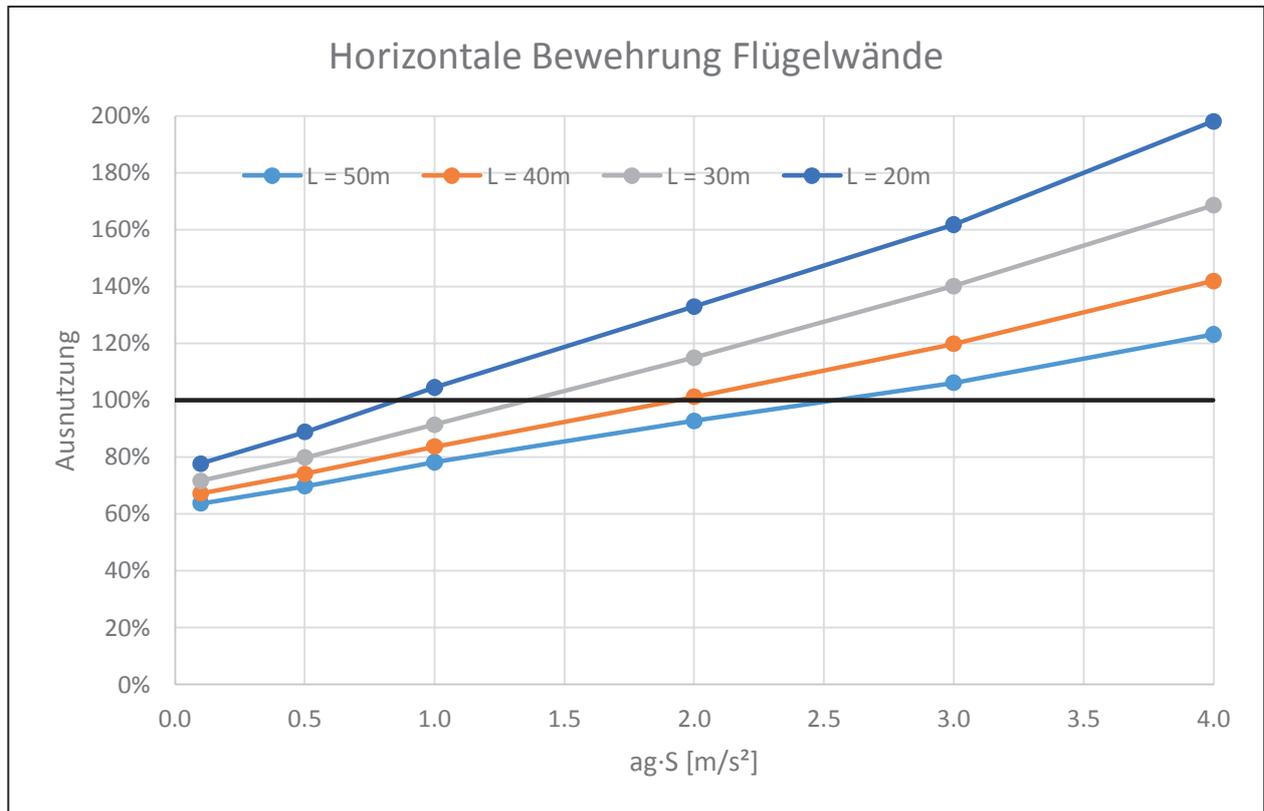


Bewehrung der Flügelwände



Bewehrung der Widerlagerwände

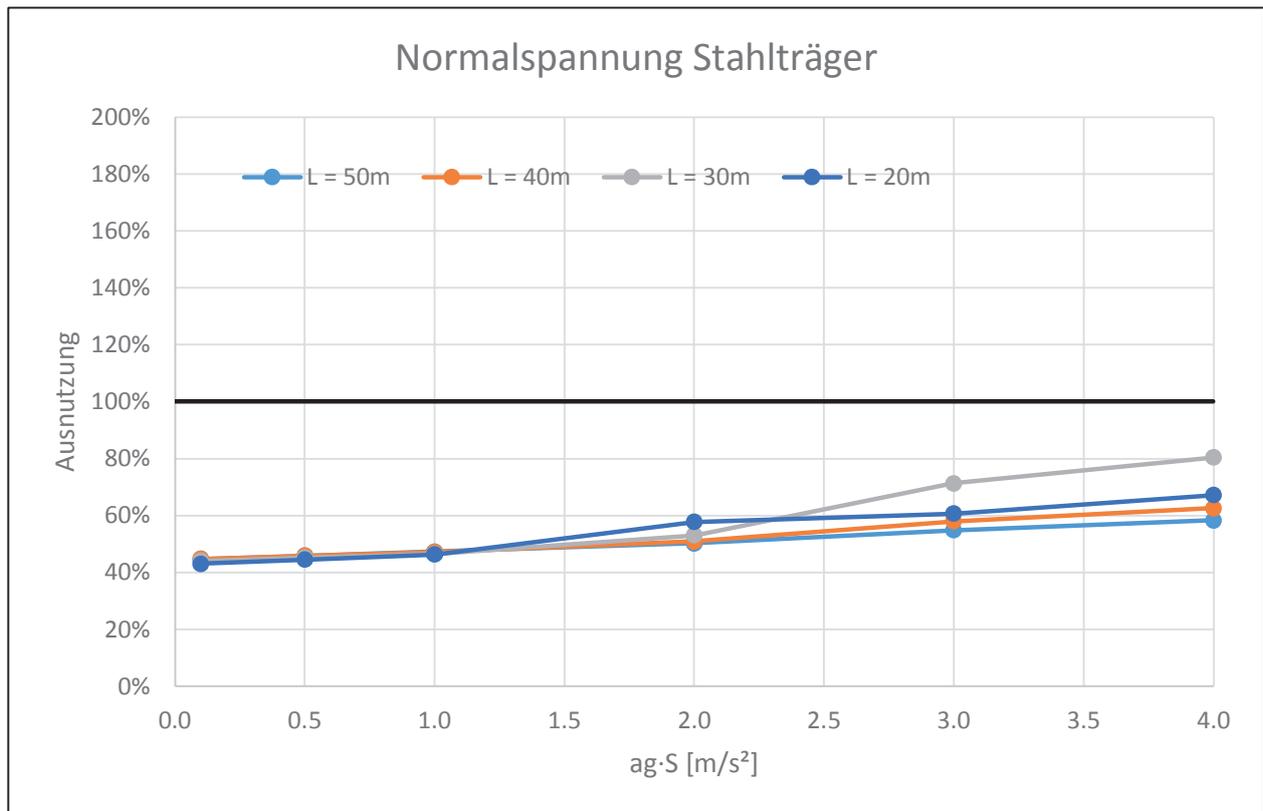
Im Falle der Widerlagerwände wurde der Maximalwert der erforderlichen Bewehrung ohne lokale Spitzen ausgewertet.



Stahlspannung

In den nachfolgenden Tabellen wird auf der X-Achse die Erdbebeneinwirkung über den Parameter $a_g \cdot S$ [m/s^2] aufgetragen. Auf der Y-Achse wird das Verhältnis der Normalspannung im Stahlträger, die durch eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Betriebslasten ermittelt wurde, zu der Normalspannung, die aufgrund einer Erdbebenauslegung notwendig ist, dargestellt. Dieses Verhältnis wird in der Tabelle als Ausnutzung bezeichnet.

$$\text{Ausnutzung} \cong \frac{\sigma_{S, \text{Erdbeben}}}{\sigma_{S, \text{GZT}}}$$



Auswertung

Für keine der untersuchten Längen decken die horizontalen Fundamentkräfte im Betrieb die Fundamentkräfte unter Erdbeben ab. Daher bestimmt sich Stufe 1 durch die Grenze für sehr niedrige Seismizität nach DIN EN 1998-1/NA:2020-02.

Für die Bemessung der Flügelwände gelten zusätzliche Anforderungen.

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50,00	0,5	4,0
40,00	0,5	4,0
30,00	0,5	3,5
20,00	0,5	2,5

Tabelle M1: Grenzwerte

Konstruktive Regeln für Stufe 2:

Für alle in diesem Anhang betrachteten Brücken müssen in Stufe 2 folgende Regeln eingehalten werden.

- Auslegung der Fundamente in Brückenlängsrichtung mit

$$A_x \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

- Auslegung der Fundamente in Brückenquerrichtung mit

$$A_y \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / 2$$

mit

M: Gesamtmasse der Brücke inkl. Hinterfüllung und 20 % der UDL
($M = G_1 + G_2 + E + 0,2 \cdot \text{UDL}$)

$$a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$$

η : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

Die Flügelwände sind in horizontaler Richtung für die Summe aus Erddruck und Massenbeschleunigung der Flügelwand zu bemessen.

$$E_d = E_0 + \Delta E_d + M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S)$$

mit

E_d : seismische Beanspruchung

E_0 : Erdruchedruck inkl. Erddruck aus G_2 und 20 % UDL

ΔE_d : dynamischer Erddruck infolge Erdbeben

M: Masse der Flügelwand

Ergänzende Betrachtung

Die Berechnung wurde für folgende Parameter wiederholt:

- Dicke der Flügelwände: 60 cm
- Dicke der Widerlagerwand: 60 cm

Mit diesen Parametern verschieben sich die Grenzwerte wie folgt:

Länge [m]	Stufe 1 $a_g \cdot S$ [m/s ²]	Stufe 2 $a_g \cdot S$ [m/s ²]
50,00	0,5	3,5
40,00	0,5	3,5
30,00	0,5	2,0
20,00	0,5	2,0

Tabelle L2: Grenzwerte

Der Anwendungsbereich der Stufe 2 wird für alle Spannweiten auf $a_g \cdot S = 2,0$ m/s² limitiert.

Anhang N: Diskussion des Bedeutungsbeiwerts bei Brücken

Definition des Bedeutungsbeiwertes

Die Zuverlässigkeit eines Tragwerkes ergibt sich aus der Auftretenswahrscheinlichkeit der Einwirkung und der Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks. In probabilistischen Erdbebenanalysen wird die Einwirkung eines Standorts durch eine Gefährdungskurve (hazard curve) beschrieben, die die Überschreitungswahrscheinlichkeit einer bestimmten Erdbebenintensität (in DIN EN 1998-1 /3/) ausgedrückt als Referenz-Bodenspitzenbeschleunigung a_{gR} in Abhängigkeit von der Erdbebenintensität darstellt (Bild N1, gestrichelte Linie). Der Widerstand eines Tragwerkes wird durch eine Fragilitätsfunktion (fragility curve) beschrieben, die die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerks in Abhängigkeit von der Erdbebenintensität darstellt (Bild N1, durchgezogene Linie). Beide Kurven werden durch ihren Medianwert und ihre Streuung charakterisiert: Kurven mit einer großen Streuung verlaufen flach, Kurven mit einer kleinen Streuung verlaufen steil. Durch Kombination der Gefährdungskurve mit der Fragilitätskurve und Integration über die Erdbebenintensität wird die absolute Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt. Dementsprechend wird die absolute Versagenswahrscheinlichkeit beeinflusst vom Abstand der Medianwerte sowie den Streuungen.

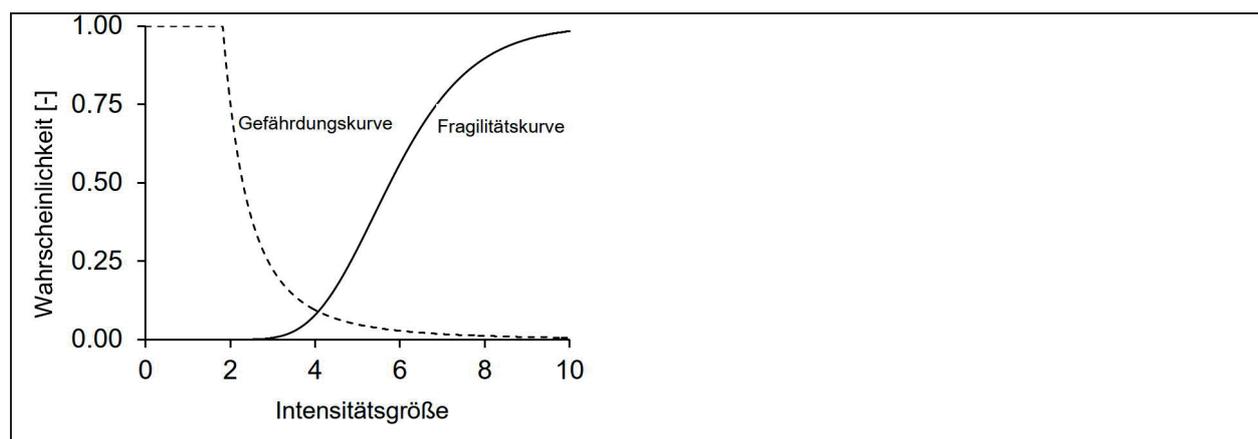


Bild N1: Gefährdungskurve und Fragilitätskurve ($H = k_0 \cdot a_{gR}^{-k}$), schematisch

In DIN EN 1998-1 ist die Bemessungs-Bodenspitzenbeschleunigung a_g so festgelegt, dass bei einer normgerechten Auslegung des Tragwerks die Versagenswahrscheinlichkeit ausreichend klein ist. Für gewöhnliche Bauwerke (Bedeutungskategorie II) ist die Bemessungs-Bodenspitzenbeschleunigung a_g gleich der Referenz-Bodenspitzenbeschleunigung a_{gR} , welche für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_R = 10\%$ und einer Nutzungsdauer von $T_L = 50$ Jahren definiert ist.

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Erdbebens kann i. d. R. durch eine Poisson-Verteilung angenähert werden. Die mittlere Wiederkehrperiode T_R ist der Kehrwert der Auftretensrate ν ; zur Überschreitungswahrscheinlichkeit P_R und der Nutzungsdauer T_L besteht folgender Zusammenhang:

$$T_R = 1/\nu = -T_L/\ln(1 - P_R) \quad (\text{N1})$$

Für das Referenz-Erdbeben ergibt sich mit Gleichung (1) eine mittlere Wiederkehrperiode von 475 Jahren. Die Wiederkehrperiode T_R nimmt mit größerer Nutzungsdauer T_L und kleinerer Überschreitungswahrscheinlichkeit P_R zu. Das Bemessungs-Erdbeben ist größer, je größer die Wiederkehrperiode ist.

Wird für Bauwerke eine höhere Zuverlässigkeit gefordert, so wird eine Bemessungs-Bodenspitzenbeschleunigung mit einer geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit gewählt (z.B. 2 % in 50 Jahren bzw. eine Wiederkehrperiode von 2475 Jahren). Dies erfolgt in der Praxis durch Multiplikation der Referenz-Bodenbeschleunigung mit dem sogenannten Bedeutungsbeiwert γ_I . Der Bedeutungsbeiwert nimmt in Abhängigkeit mit der Bedeutungskategorie I, II, III und IV Werte von 0,8, 1,0, 1,2 und 1,4 an. Der Zusammenhang zwischen Bedeutungsbeiwert γ_I und Ziel-Überschreitungswahrscheinlichkeit P_R stellt sich wie folgt dar; die Nutzungsdauer bleibt hierbei unverändert und ist nach DIN EN 1998-1 auf 50 Jahre festgelegt:

$$\gamma_I \sim (P_L/P_{NCR})^{-1/k} \quad (N2)$$

mit P_{NCR} Referenz-Überschreitungswahrscheinlichkeit (10 %), k Exponent der Gefährdungsfunktion.

Mit Gleichung (1) kann auch der Zusammenhang zwischen Bedeutungsbeiwert γ_I und Ziel-Wiederkehrperiode T_R beschrieben werden:

$$\gamma_I \sim (T_{NCR}/T_R)^{-1/k} \quad (N3)$$

mit T_{NCR} Referenz-Wiederkehrperiode (475 Jahre), k Exponent der Gefährdungsfunktion.

In DIN EN 1998-1 Absatz 2.1(4) wird angemerkt, dass der Exponent k von der Seismizität abhängig ist und im Allgemeinen in der Größenordnung von 3 liegt. Der Einfluss des Exponenten auf den Bedeutungsbeiwert ist in Bild N2 dargestellt.

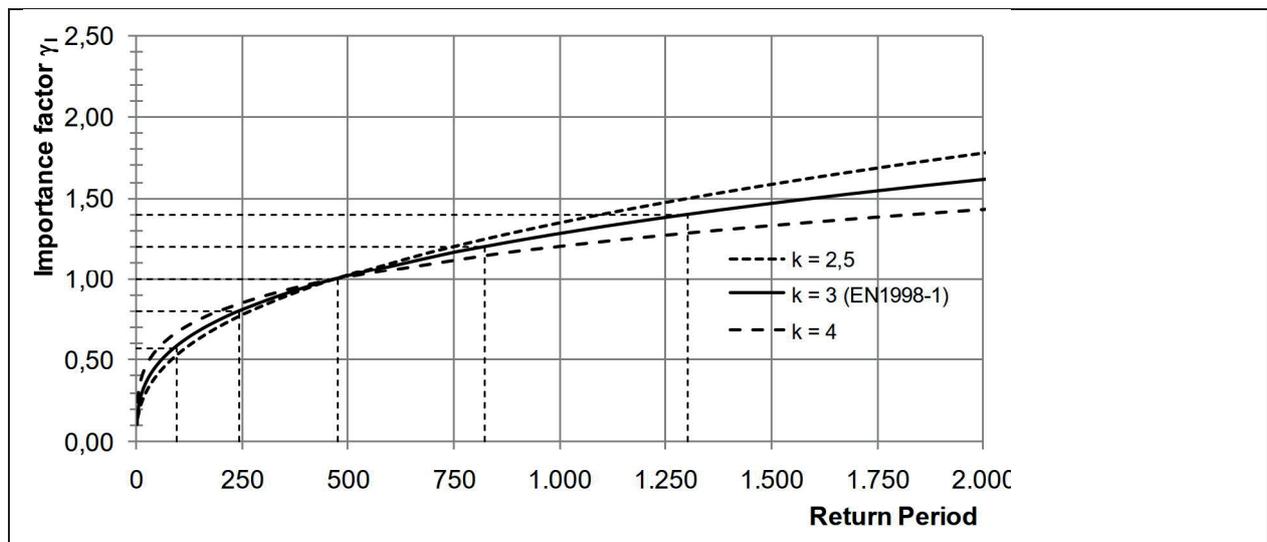


Bild N2: Zusammenhang zwischen Bedeutungsbeiwert γ_I und mittlerer Wiederkehrperiode T_L für verschiedene Exponenten k /34/

Aus neuen Erdbebenkarten für Deutschland /3/ für Wiederkehrperioden von 475, 950 und 2475 Jahren wurden in /25/ Gefährdungskurven für alle Standorte in Deutschland hergeleitet. Es zeigt sich, dass der Exponent der Gefährdungskurven in Deutschland zwischen 1,4 und 2,2 liegt, Bild N3. Die Korrelation von Bedeutungsfaktoren mit sonst üblichen Wiederkehrperioden ist für Deutschland daher nicht gegeben.

Im deutschen Nationalen Anhang DIN EN 1998-1/NA /5/ NCI zu 2.1 (4) wird angemerkt, dass ein Exponent von 3 für deutsche Erdbebengebiete zu nicht treffenden Ergebnissen führt. Dennoch werden in DIN EN 1998-1/NA die Bedeutungsfaktoren aus DIN EN 1998-1 übernommen und auf einen Bezug zu den Wiederkehrperioden verzichtet. Die Anhebung des Zuverlässigkeitslevels für Bauwerke mit höherer Bedeutungskategorie ist dadurch in Deutschland geringer als in Gebieten mit einem größeren Exponenten, wie er in höher seismischen Gebieten vorkommt.

Der Exponent k beeinflusst auch die Umrechnung des Bemessungs-Erdbebens infolge anderer Nutzungsdauern.

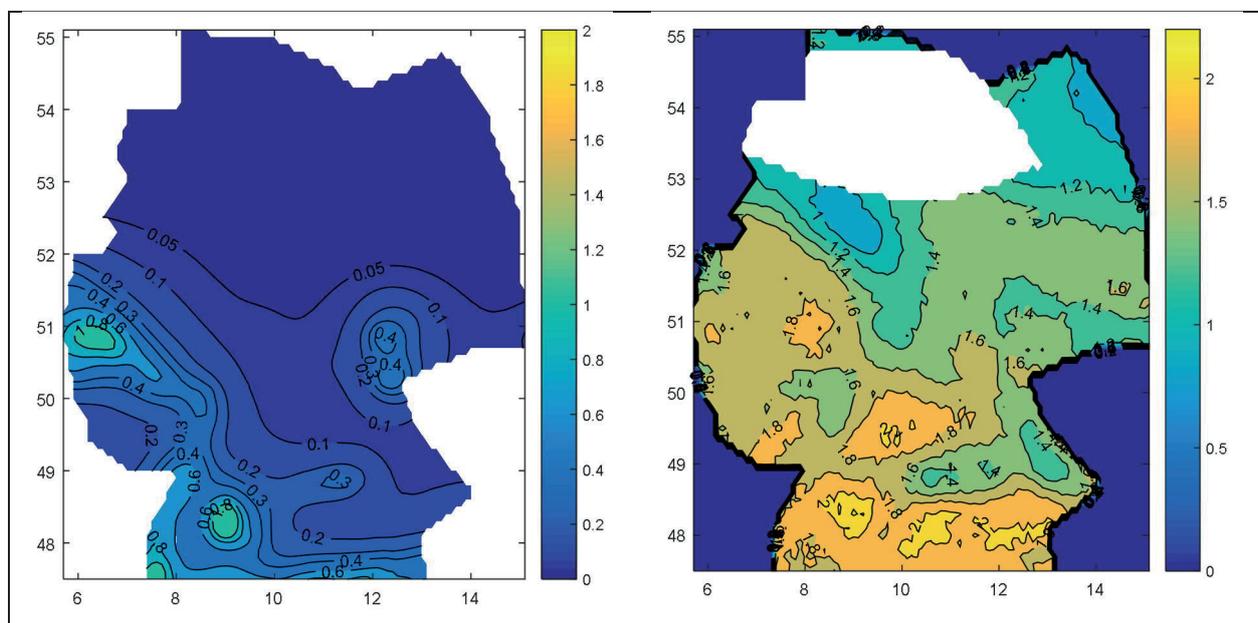


Bild N3: Boden-Referenzbeschleunigung für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren nach /3/ (links) und Exponent k der Gefährdungsfunktion /25/ (rechts).

Einfluss der Nutzungsdauer auf den Bedeutungsbeiwert

In DIN EN 1998-1 ist die Nutzungsdauer für Hochbauten auf 50 Jahre festgelegt. Das angestrebte Zuverlässigkeitsniveau für Bauwerke verschiedener Bedeutungskategorien wird über eine Anpassung der Überschreitungswahrscheinlichkeit bei gleicher Nutzungsdauer von 50 Jahren erreicht, siehe Abschnitt zuvor. Das Bemessungs-Erdbeben muss entsprechend angepasst werden. Dies erfolgt über die Multiplikation der Referenz-Bodenspitzenbeschleunigung a_{gR} mit einem Bedeutungsbeiwert γ_I :

$$\gamma_I \sim (P_L/P_{NCR})^{-1/k} \quad (\text{N4})$$

mit P_{NCR} Referenz-Überschreitungswahrscheinlichkeit (10 %), k Exponent der Gefährdungsfunktion.

Eine Anpassung des Bemessungs-Erdbebens muss auch erfolgen, wenn eine andere Nutzungsdauer als 50 Jahre gewünscht ist. Gleichung (1) kann mit Gleichung (2) auch in Abhängigkeit der Nutzungsdauer formuliert werden:

$$\gamma_L \sim (T_{LR}/T_L)^{-1/k} \quad (\text{N5})$$

mit T_{LR} Nutzungsdauer der Referenz-Erdbebeneinwirkung (in DIN EN 1998-1 $T_{LR} = 50$ Jahre) und T_L Ziel-Nutzungsdauer.

In DIN EN 1998-2/NA Absatz NDP zu 2.1(4)P Anmerkung 2 werden beide Effekte kombiniert. Allerdings ist die Beschreibung der Bedeutungskategorien unglücklich: Die Bedeutung einer Kategorie wird hier auch anhand der angestrebten Nutzungsdauer beschrieben; in diesem Fall, wären die Effekte aus höherer Nutzungsdauer und höherem Zuverlässigkeitsniveau doppelt enthalten.

In TM 1-2018-10705 /11/ wird dagegen nur eine Anpassung der Nutzungsdauer vorgenommen und keine Anpassung Zuverlässigkeit.

Für die Auslegung von Brücken gegen Windlasten werden die gleichen Lastansätze für Hochbauten (Auslegungslebensdauer 50 Jahre) und Brücken verwendet (Auslegungslebensdauer 100 Jahre), siehe DIN EN 1991-1-4 und DIN EN 1991-1-4/NA. Es ist daher naheliegend, dass die Auslegungslebensdauer für Brücken von 100 Jahre als Anforderung an die Dauerhaftigkeit zu sehen ist. Eine Anpassung der Lasteinwirkungen an eine Auslegungslebensdauer für 100 Jahre im Verhältnis zu Hochbauten für 50 Jahre erfolgt für ständige / vorübergehende Einwirkungen nicht.

Es wird daher empfohlen, dies auch für Erdbebeneinwirkungen zu übernehmen. Die Bedeutungsbeiwerte für Brücken sollten nach DIN EN 1998-2/NA ohne eine Anpassung für die Auslegungslebensdauer auf 100 Jahre verwendet werden. Die Bedeutungsbeiwerte betragen dann für Bedeutungskategorie I, II und III $\gamma_i = 0,85, 1,00$ und $1,30$.

Es ist zu beachten, dass die Bedeutungsbeiwerte in Deutschland als Sicherheitselement zu betrachten sind und keine Korrelation zur mittleren Wiederkehrperiode aufweisen (siehe auch DIN EN 1998-1/NA). Der in DIN EN 1998-1 empfohlene Wert des Exponenten zu 3,0 ist für die Seismizität in Deutschland nicht geeignet; der in Deutschland tatsächlich vorhandene Exponenten liegt zwischen 1,4 und 2,2.