

DIPLOMARBEIT MASTER'S THESIS

Untersuchung lokaler Lastfälle nach EN 1991-2 für ÖBB – Trogbrücken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Stefan Kuss
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Kirchhofer

Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau / E212
der Technischen Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von
Nikola RUŽIČIĆ
0427262
Draskovichgasse 5/1/4
1140 Wien

Wien, April 2009

.....

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen jenen bedanken, die mich im Laufe meines Studiums so kräftig unterstützt haben.

Besonderen Dank möchte ich an meine Familie aussprechen, die mein Studium durch ihre emotionelle und finanzielle Unterstützung ermöglicht hat.

Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink und Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Kirchhoffer möchte ich für ihre gute Betreuung und Unterstützung danken.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Freunden: Vladimir Vlahovic, Ljubisa Bujak, Katarina und Sonja Miljevic, Zoran Birovljev und Tijana Milinkovic, sowie allen anderen, mit denen ich die Studienzeit verbracht habe, herzlich bedanken, dass sie mich immer wieder tatkräftig unterstützt und motiviert haben.

Ein Dankeschön möchte ich auch Herrn Josef Ringhofer und allen Mitarbeitern des RCE Ringhofer ZT-GmbH Büros, wo ich während des Studiums gearbeitet habe, ausrichten.

KURZFASSUNG

Für die Schnittgrößenermittlung, sowie die Bemessung von Grobblechen für die Quertragwirkung von Trogbrücken unter Eisenbahnbelastung gibt die EN 1991-2 [5] eine Vielzahl möglicher Lastfälle an. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich damit, diese zu untersuchen und die maßgebenden zu bestimmen.

In Rahmen dieser Arbeit werden durch die Anwendung der [5] viele mögliche Lastfälle untersucht. Das Ziel war die Einwirkungen (aus dem Eisenbahnverkehr) in Form von Lastmodellen, innerhalb der vorgegebenen Randbedingungen zu kombinieren, um die maßgebenden Lastfälle zu bestimmen. Die Lasten wurden in verschiedene Gruppen aufgeteilt:

- 1) Ständige Einwirkungen:
 - a) Eigengewicht des Grobbleches
 - b) Ausbaulast
- 2) Veränderliche Einwirkungen:
 - a) vertikale Einwirkungen
 - b) horizontale Einwirkungen

Das statische System des Grobblechs der untersuchten Trogbrücke ergibt sich als Einfeldträger mit 4,20 m Länge.

Alle Berechnungen wurden in Microsoft EXCEL ausgeführt, kategorisiert nach den Radien der Gleisachse und der Geschwindigkeit des Zuges. Die Berechnungsweise wird anhand eines Beispiels für eine beliebige Lage präsentiert. Es werden die einzelnen Schnittgrößen aus den Einwirkungen ermittelt und anhand diesen, lt. [5] Tab. 6.11 (siehe Kapitel 4.5.2), Lastgruppen gebildet. Die in den Lastgruppen erhaltenen Ergebnisse werden bereits mit allen relevanten Beiwerten ($\alpha, \Phi, f, \dots$) multipliziert. Schließlich werden die Bemessungswerte M_{sd} und Q_{sd} ermittelt. Kombinationsregeln für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, Lastgruppen sowie Beiwerte werden in Kapitel 6 dargestellt.

Die Endergebnisse werden in Kapitel 8 tabellarisch präsentiert und bewertet. Am Ende werden die maßgebenden Lastfälle anhand der Radien der Gleisachse dargestellt.

ABSTRACT

The EN 1991-2 [5] provides a number of possible load cases for the assessment of the state of strain as well as dimensioning of Plate for trough bridges. This master's thesis deals with testing these load cases and determining the leading load cases.

Within the scope of this thesis, many load cases are being analyzed using the [5]. The Intention is to combine the loads from railway traffic (in form of load models) within the boundary conditions in order to determine the leading loads cases. The loads are divided in different groups:

- 1) Constant loads:
 - a) self-weight of the Plate
 - b) weight of track system
- 2) Variable loads:
 - a) vertical loads
 - b) horizontal loads

The Plate's structural system (from analyzed trough bridge) is a single-span girder with the 4,20 m span length.

All calculations were made in Microsoft Excel and the results were categorized according to track axel radius and train velocity. The Method of calculation will be explained on the basis of an example for a random radius. The first step is to define the internal force variables (stress resultants) from loads. These variables are than used to form load groups according to [5] Table 6.11 (see chapter 4.5.2). The results from load groups contain all relevant coefficients ($\alpha, \Phi, f, \dots$). Finally the design stress resultants will be determined. Combinations rules for ultimate limit state, load groups as well as coefficients will be presented in chapter 6.

The end results are compared and summarized in chapter 8. Finally the leading load cases will be presented according to different radiuses.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	10
1.1 Aufgabenstellung.....	10
1.2 Zielsetzung.....	11
2. Bauwerksdaten	12
2.1 Übersicht.....	12
2.2 Materialkennwerte.....	13
2.2.1 Stahl.....	13
2.2.2 Beton.....	13
2.2.3 Schotterbett.....	13
2.2.4 Schienen.....	13
3. Eingabedaten	14
3.1 Radius (R).....	14
3.2 Geschwindigkeit (V).....	14
3.3 Überhöhung (ü) (Absatz lt. [7]).....	14
3.4 Ermittlung der zulässigen Überhöhungen.....	14
4. Einwirkungen	16
4.1 Ständige Einwirkungen.....	17
4.1.1 Tragwerkseigengewicht.....	17
4.1.2 Ausbaulast.....	17
4.2 Veränderliche Einwirkungen.....	20
4.2.1 Die Exzentrizität.....	20
4.2.2 Lastverteilung.....	21
4.2.2.1 Lastverteilung durch die Schiene.....	21
4.2.2.2 Lastenverteilung durch Schwellen und Schotterbett.....	22
4.2.3 Vertikale Einwirkungen.....	23
4.2.3.1 Lastmodell 71.....	23
4.2.3.2 Lastmodelle SW/0 und SW/2.....	30
4.2.4 Horizontale Einwirkungen.....	33
4.2.4.1 Fliehkräft.....	33
4.2.4.2 Der Seitenstoß.....	43
5. Statisches System – Berechnungsgrundlagen	46
5.1 Schnittgrößen aus ständigen Einwirkungen.....	46
5.2 Schnittgrößen aus veränderlichen Einwirkungen.....	47
5.2.1 Vertikale Einwirkungen lokal.....	47
5.2.1.1 Lastmodel 71.....	47
5.2.1.2 Lastmodelle SW/0 und SW/2.....	48
5.2.2 Horizontale Einwirkungen.....	50
5.2.2.1 Fliehkraft.....	50
5.2.2.2 Der Seitenstoß.....	51

6. Lastkombinationen	53
6.1 Beiwerte und Faktoren.....	53
6.1.1 Lastklassenbeiwert α	53
6.1.2 Dynamischer Beiwert $\Phi(\Phi_2)$	53
6.1.3 Teilsicherheitsbeiwert γ	54
6.2 Lastfälle und Lastgruppen.....	54
6.2.1 Lastfälle.....	54
6.2.2 Lastgruppen für Eisenbahnverkehr.....	54
6.3 Grenzzustände - Beanspruchungen.....	55
6.3.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit ULS.....	55
6.3.2 Kombinationsregeln für den Tragfähigkeitsnachweis ULS.....	56
6.3.3 Bemessungswerte der Einwirkungen ULS (STR).....	57
7. Berechnungen	58
7.1 Angabe Daten und Geometrie.....	59
7.2 Einwirkungen.....	62
7.2.1 Ständige Einwirkungen.....	62
7.2.1.1 Schnittgrößenermittlung - Ständige Einwirkungen.....	63
7.2.2 Veränderliche Einwirkungen.....	64
7.2.2.1 Lastfall a: $V = V_{\max}$	64
7.2.2.1.1 Schnittgrößenermittlung (Lastfall a).....	69
7.2.2.1.2 Lastkombinationen (Lastfall a).....	74
7.2.2.2 Lastfall b: $V = 120 \text{ km/h}$	79
7.2.2.2.1 Schnittgrößenermittlung (Lastfall b).....	81
7.2.2.2.2 Lastkombinationen (Lastfall b).....	85
7.2.2.3 Lastfall c: $V = 0 \text{ km/h}$	90
7.2.2.3.1 Schnittgrößenermittlung (Lastfall c).....	91
7.2.2.3.2 Lastkombinationen (Lastfall c).....	92
7.3 Gegenüberstellung von Ergebnissen.....	96
7.3.1 $R = 1000 \text{ m}$ ($e^* = 10 \text{ cm}$).....	96
7.3.2 $R = 1000 \text{ m}$ ($e^* = 0$).....	98
7.3.3 $R = 250 \text{ m}$ ($e^* = 40 \text{ cm}$).....	100
7.3.4 $R = 250 \text{ m}$ ($e^* = 0 \text{ cm}$).....	102
7.3.5 $R = \infty$ ($e^* = 0$).....	104
8. Schlussfolgerungen	106
8.1 Maßgebende Lastfälle.....	108
9. Literaturverzeichnis	115
9.1 Abbildungsverzeichnis.....	116
9.2 Tabellenverzeichnis.....	119
Anhang A	122

FORMELZEICHEN

a	Schwellenanstand (siehe Kap. 4.2.3)
A	Auflagerreaktion A (siehe Kap. 5)
A_{vk}, A_{tk}, A_{sk}	Auflagerreaktion aus den Vertikallasten, der Fliehkraft oder dem Seitenstoß (siehe Kap. 5)
A_S	Einflussfläche (siehe Kap. 4.3.1)
B	Auflagerreaktion B (siehe Kap. 5)
B_{vk}, B_{tk}, B_{sk}	Auflagerreaktion aus den Vertikallasten, der Fliehkraft oder dem Seitenstoß (siehe Kap. 5)
b_L, b_R, B, b_i	Breite der Einflussfläche in Längsrichtung (siehe Kap. 4.3.1)
b	Breite der Einflussfläche in Querrichtung (siehe Kap. 4.3.1)
d	Dicke des Grobblechs (siehe Kap. 2.1)
e	Exzentrizität bei Vertikallasten (siehe Kap.
e_1	seitliche Exzentrizität der Vertikallast lt. [5] (siehe Kap. 4.3.1.4)
e_2	Exzentrizität der Betonschwellen (siehe Kap. 4.3.1.4)
e_{vk}	Exzentrizität der Vertikallast (konzentrierte Last) zu Schwerpunkt der Einflussfläche (siehe Kap. 4.3.1.1)
f	Abminderungsfaktor für Fliehkraft (siehe Kap. 4.3.3.1)
f_y	Festigkeit des Stahls (siehe Kap. 2.2)
g	Eigengewicht (siehe Kap. 3), Erdbeschleunigung [9,81 m/s ²] (siehe Kap. 4.2.4.1)
g_a	Eigengewicht des Stahlquerschnitts (siehe Kap. 4.2.1)
g_s	Eigengewicht des Schotterbetts (siehe Kap. 4.2.2)
Δg_b	Eigengewicht der Betonschwelle (siehe Kap. 4.2.2)
g_{aus}	Gewicht der Ausbaulasten (siehe Kap. 4.2.2)
Δg_{sch}	Gewicht der Schienen (siehe Kap. 4.2.2)
$G_{k,j}$	charakteristischer Wert einer ständiger Einwirkung j (siehe Kap. 4.6.2)
$gr11$	Lastgruppe (siehe Kap. 4.5.2)
h_s	Schotterbettshöhe
h_{smin}, h_{smax}	Schotterbettshöhe (Variation)
h_t	Höhe der Horizontalkraft (allgemein) (siehe Kap. 4.1)
h_{tk}	Höhe des charakteristischen Wertes der Fliehkraft (siehe Kap. 4.3.3.1)
h_{sk}	Höhe des charakteristischen Wertes des Seitenstoßes (siehe Kap. 4.3.3.2)
l_0	Überhöhungsfehlbetrag (siehe Kap. 3.3)
L_f	lt. [1] die Einflusslänge der belasteten Teile des Gleisbogens auf der Brücke, die am ungünstigsten für die Bemessung des jeweils betrachteten Bauteils ist, in m (siehe Kap. 4.3.3.1)
L_Φ	lt. [1] die „maßgebende“ Länge (zu Φ gehörende Länge), in m, wie in Tab. 6.2 angegeben (siehe Kap. 4.4.2)
LM	Lastmodell (siehe Kap. 4)
L	Länge der Einfeldträger (siehe Kap. 5)
l_1, l_2	Hilfswerte (siehe Kap. 5)
$M(x)$	Biegemoment an der Stelle x (siehe Kap. 5)
$M_g(x)$	Biegemoment an der Stelle x aus ständigen Lasten
$M_{vk}(x)$	Biegemoment an der Stelle x aus Vertikallast (siehe Kap. 5)
$M_{tk}(x)$	Biegemoment an der Stelle x aus Fliehkraft (siehe Kap. 5)
$M_{sk}(x)$	Biegemoment an der Stelle x aus dem Seitenstoß (siehe Kap. 5)

$M_{sd}(x)$	Biegemoment an der Stelle x aus ständigen und veränderlichen Lasten unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte (siehe Kap. 7.1)
$M_{vk,}$	Biegemoment nach der Lastumordnung aus der Vertikallast (siehe Kap. 5)
M_{tk}	Biegemoment nach der Lastumordnung aus der Fliehkraft (siehe Kap. 5)
M_{sk}	Biegemoment nach der Lastumordnung aus dem Seitenstoß (siehe Kap. 5)
$N_{vk,}$	Biegemoment nach der Lastumordnung aus der Vertikallast (siehe Kap. 5)
N_{tk}	Biegemoment nach der Lastumordnung aus der Fliehkraft (siehe Kap. 5)
N_{sk}	Biegemoment nach der Lastumordnung aus dem Seitenstoß (siehe Kap. 5)
P	maßgebender repräsentativer Wert einer Vorspannung (siehe Kap. 6.3.2)
Q_{tk}, q_{tk}	Charakteristische Werte der Fliehkraft, in kN, kN/m (siehe Kap. 4.2.4.1)
Q_{vk}, q_{vk}	Charakteristische Werte für Lastmodelle 71, SW/0 und SW/2 ohne eine Vergrößerung für dynamische Auswirkungen, in kN, kN/m (siehe Kap. 4.2.3.1 und Kap. 4.2.3.2)
$Q(x)$	Querkraft an der Stelle x (siehe Kap. 5)
$Q_g(x)$	Querkraft an der Stelle x aus ständigen Lasten
$Q_{vk}(x)$	Querkraft an der Stelle x aus Vertikallast (siehe Kap. 5)
$Q_{tk}(x)$	Querkraft an der Stelle x aus Fliehkraft (siehe Kap. 5)
$Q_{sk}(x)$	Querkraft an der Stelle x aus dem Seitenstoß (siehe Kap. 5)
Q_h	Horizontalkraft (allgemein) (siehe Kap. 4.1)
Q_v	vertikale Achslast (allgemein) (siehe Kap. 4.1)
Q_{sk}	charakteristischer Wert des Seitenstoßes (siehe Kap. 4.2.4.2)
Q_{tk}	charakteristischer Wert der Fliehkraft (siehe Kap. 4.2.4.1)
Q_{vk}	charakteristischer Wert der vertikalen Last (konzentrierte Last) (siehe Kap. 4.2.3.1)
$Q_{sd}(x)$	Querkraft an der Stelle x aus ständigen und veränderlichen Lasten unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte (siehe Kap. 7.1)
q_{vkL}, q_{vkR}	charakteristischer Wert der vertikalen Last links und rechts (gleichmäßig verteilte Last) (siehe Kap. 4.2.3.1)
q_{tkL}, q_{tkR}	charakteristischer Wert der gleichmäßig verteilte Fliehkraft links und rechts (siehe Kap. 4.2.4.1)
q_{skL}, q_{skR}	charakteristischer Wert der gleichmäßig verteilten Seitenstoß links und rechts (siehe Kap. 4.2.4.2)
$q_{L,gr12,d},$ $q_{R,gr12,d}$	Wert der gleichmäßig verteilten Last für Lastgruppe gr12 links und rechts (siehe Kap. 4.2.4.2)
$Q_{k,1}$	charakteristischer Wert einer führenden veränderlichen Einwirkung 1 (Leiteinwirkung) (siehe Kap. 4.6.2)
$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert einer nicht führenden veränderlichen Einwirkung i (Begleiteinwirkung) (siehe Kap. 4.6.2)
r	Radabstand in Querrichtung (siehe Kap. 4.2.3)
R, r	Radius des Gleisbogens, in m (siehe Kap. 3.1 und Kap. 4.2.4.1)
SOK	Schienenoberkante (siehe Kap. 4.1)
$\ddot{u}$	Überhöhung (siehe Kap. 3.3)
V	Geschwindigkeit in km/h (siehe Kap. 3.2)
Max. V	Maximalgeschwindigkeit in km/h (siehe Kap. 3.2)
W_L, W_R	Widerstandsmomente links bzw. rechts (siehe Kap. 4.3.2.1)
X_{sp}	Hilfswert, horizontale Entfernung zwischen Auflager links und Schwerpunkt des Zuges (siehe Kap. 4.3.1.1)

X_L	Hilfswert, Länge zwischen Auflager links und veränderlichen Einwirkung (siehe Kap. 5)
X_R	Hilfswert, Länge zwischen Auflager rechts und veränderlichen Einwirkungen (siehe Kap. 5)
x_1, x_2	Hilfswerte
y_s	Schwerpunkt der Einflussfläche (siehe Kap. 4.3.2.1)

Griechische Formelzeichen

α	Lastklassenbeiwert (siehe Kap. 4.4.1)
Φ_2	Dynamischer Beiwert (siehe Kap. 4.4.2)
γ	Teilsicherheitsbeiwert (siehe Kap. 4.4.4)
$\gamma_{G,j}$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkung G_j (siehe Kap. 4.6.2)
$\gamma_{Q,1}$	Teilsicherheitsbeiwert für die führende veränderliche Einwirkung Q_1 (siehe Kap. 4.6.2)
$\gamma_{Q,i}$	Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen Q_i (siehe Kap. 4.6.2)
$\Psi_{0,i}$	Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen (siehe Kap. 4.6.2)
γ_a	Stahlwichte (siehe Kap. 2.2.1)
γ_s	Schotterwichte (siehe Kap. 2.2.3)
γ_b	Betonwichte (siehe Kap. 2.2.2)
$\sigma_{vKL}, \sigma_{vKR}$	Spannung links und rechts aus den Vertikallasten (siehe Kap. 4.2.3.1)
$\sigma_{tKL}, \sigma_{tKR}$	Spannung links und rechts aus der Fliehkraft (siehe Kap. 4.2.4.1)
$\sigma_{sKL}, \sigma_{sKR}$	Spannung links und rechts aus dem Seitenstoß (siehe Kap. 4.2.4.2)

1. Einleitung

Die Abb. 1 zeigt eine Übersicht des Brückenquerschnittes mit einem Lichtraumprofil in Kurvenlage. Es handelt sich um eine eingleisige Eisenbahn- Trogbrücke in Stahlbauweise.

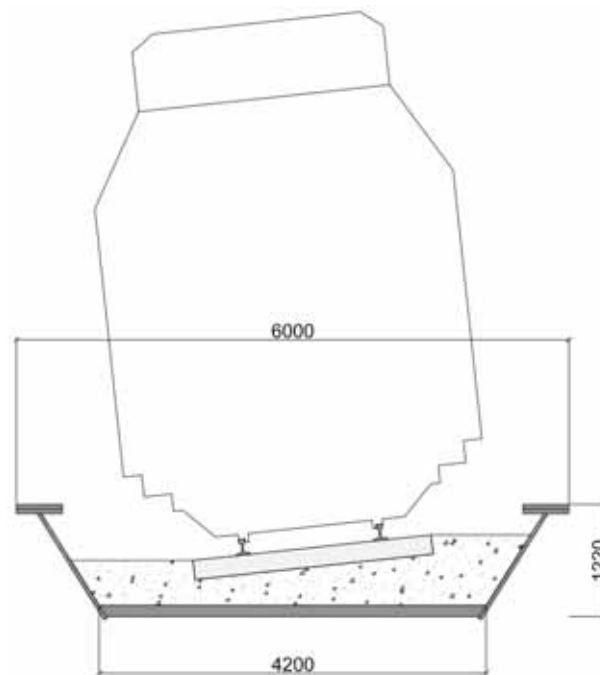


Abb. 1: Brückenquerschnitt

1.1 Aufgabenstellung

In Rahmen dieser Arbeit wird ermittelt, welche Lastfallkombinationen resultierend aus der Tab. 1 für die unterschiedlichen Radien der Gleisachse maßgebend werden.

Tab. 1: Lastfälle lt. [5] - Tab. 6.8

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times 1 \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times \alpha \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	
		0	-	-	-	

Die Tab. 1 ist ein Auszug aus der Tab. 6.8 lt. [5], für die Fälle $\alpha > 1$.

Da die Brücke in einer Kurve liegt, werden die Lastfälle für jeden Radius neu berechnet. Unterschiedliche Geschwindigkeiten und Überhöhungen der Gleisachse, die sich daraus ergeben, werden mitberücksichtigt. Näheres dazu finden Sie in Kapitel 3. Es werden drei Lastmodelle aus [5] gegenübergestellt:

- Lastmodell 71
- SW/0
- SW/2

Die Modelle werden in den Kapitel 4.3 näher untersucht.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel ist, die für die Bemessung des Grobbleches maßgebenden Fälle für verschiedene Radien und verschiedene Geschwindigkeiten (anhand Tab. 1) zu bestimmen. Es soll geprüft werden, ob für einen bestimmten Radius nur einzelne oder doch mehrere Lastmodelle bzw. Lastfälle zu untersuchen sind. Die Ergebnisse werden tabellarisch dargestellt und bewertet.

2. Bauwerksdaten

2.1 Übersicht

Bei der zu untersuchenden Brücke handelt es sich um eine Trogbrücke aus Stahl mit einem Grobblech ($d = 120 \text{ mm}$), Steg ($d = 40 \text{ mm}$) und Gurt ($d = 2 \times 50 \text{ mm}$) laut Abb. 2. Die Besonderheit dieser Ausführung ist, dass es keine orthotrope Platte gibt. Der Oberbau (Ausbau) besteht aus einem Regeloberbau der ÖBB:

- Schotterbett ($h = 55,0 \text{ cm}$)
- vorgespannte Betonschwellen ($l/b/h = 260/26/21 \text{ cm}$)
- Schienen UIC 60

Der Oberbau ist in Abb. 3 dargestellt.

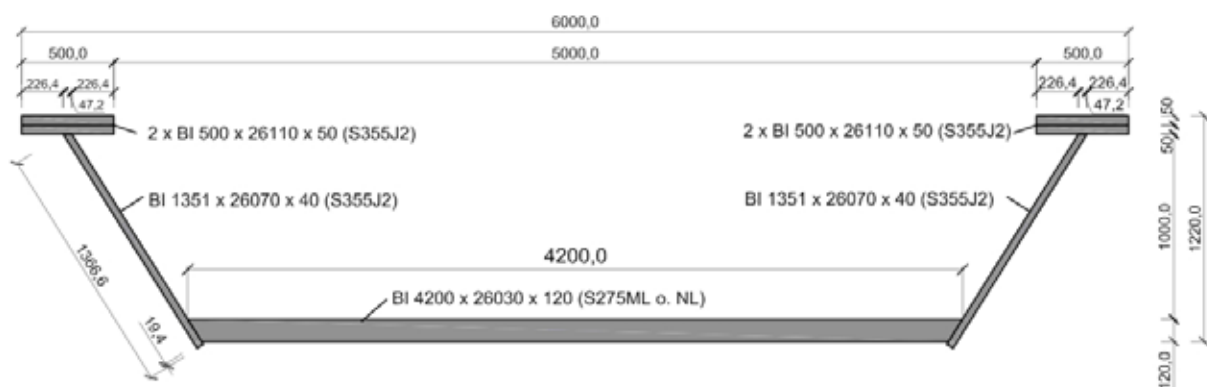


Abb. 2: Brückenquerschnitt, Trogbrücke, Stahl

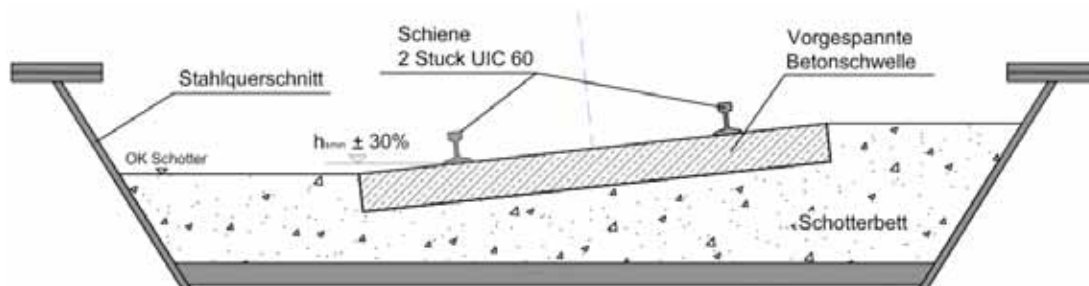


Abb. 3: Oberbau in Kurvenlage $R = 1000 \text{ m}$

2.2 Materialkennwerte

2.2.1 Stahl

Für die Untersuchungen wird ein Stahl S275 mit $f_y = 27,5 \text{ kN/cm}^2$ und einer Wichte von $\gamma_a = 78,5 \text{ kN/m}^3$ verwendet. Die Abb. 2 (siehe Seite 12) zeigt den Stahlquerschnitt.

2.2.2 Beton

Es werden vorgespannte Betonschwellen ($l/b/h = 260/26/21 \text{ cm}$) mit einer Wichte von $\gamma_b = 25,0 \text{ kN/m}^3$ verwendet. Es wird angenommen, dass die Schwellen unendlich steif sind (siehe Abb. 10).

2.2.3 Schotterbett

Für das Schotterbett darf laut [1] mit einer Wichte von $\gamma_s = 20,0 \text{ kN/m}^3$ gerechnet werden. Die Lastausbreitung durch das Schotterbett wird mit einer Neigung 4:1 berechnet (siehe Abb. 10).

2.2.4 Schienen

Es werden Schienen vom Typ UIC 60 mit folgenden Abmessungen verwendet:
 $h/b = 170/150 \text{ mm}$.

3. Eingabedaten

3.1 Radius (R)

Der Radius der Gleisachse ergibt sich aus den Trassierungsgrundsätzen der ÖBB und ist vom Streckentyp und der Entwurfsgeschwindigkeit abhängig. Der minimale Radius beträgt 250 m und der maximale Radius ist ∞ (gerade führende Gleisachse). Der Radius wird für diese Studie immer um 250 m ($R = 250$ m, 500 m, ...) bis 3000 m vergrößert, wobei auch noch zwei weitere Radien (3150 m, wenn $\ddot{u} = 20$ mm, und 3630 m für $\ddot{u} = 0$ mm) untersucht werden. Ab einem Radius von 3630 m ist die Überhöhung gleich Null und wird somit mit dem gleichen rechnerischen Modell wie $R = \infty$ berechnet.

3.2 Geschwindigkeit (V)

Die Maximalgeschwindigkeit, die untersucht wird, ist auf 200 km/h festgelegt. Es werden für jeden Lastfall verschiedene Geschwindigkeiten untersucht (mehr dazu in Kap. 4.2.4.1). Zusätzlich werden alle Lastfälle mit einer Geschwindigkeit von 0 km/h (stehender Zug ohne Einflüsse aus Fliehkraft oder Seitenstoß) überprüft.

3.3 Überhöhung ($\ddot{u}^1$) (Absatz lt. [7])

Durch die Fahrt im Bogen entsteht abhängig vom Radius, der Geschwindigkeit und der Masse die Fliehkraft. Durch Einführen einer Überhöhung kann ein Teil der entstehenden Fliehkraft kompensiert werden, höhere Geschwindigkeiten sind daher möglich. Eine weiterhin wirkende freie Seitenbeschleunigung wird durch Grenzwerte (Überhöhungsfehlbetrag) nach oben limitiert.

Größter zulässiger Überhöhungsfehlbetrag l_0

Ein Überhöhungsfehlbetrag entsteht, wenn die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bei der Bogendurchfahrt größer als die ausgeglichene Geschwindigkeit ist. Die zweite Möglichkeit ist die Wankbewegung eines Fahrzeugs zufolge einer sich ändernden Gleisverwindung. Die Überhöhung ist in diesen Fällen zu niedrig, der Überhöhungsfehlbetrag entspricht somit der Differenz zur ausgeglichenen Überhöhung.

3.4 Ermittlung der zulässigen Überhöhungen

Der Radius (R), die Geschwindigkeit (V) und die Überhöhung ($\ddot{u}$) stellen die Variablen dar, anhand welcher die Lastmodelle und Lastfälle untersucht werden. Die mathematische Beziehung zwischen den Variablen lautet wie folgt:

¹ Laut [7] wird die Überhöhung mit „D“ bezeichnet. Im [5] wird jedoch die Bezeichnung „ $\ddot{u}$ “ verwendet, welche auch in dieser Arbeit beibehalten wird.

$$\ddot{u} = 11,80227 \frac{V^2}{R} - I_0 = \ddot{u}_{\min} \quad (1)$$

mit $l_0 = 130 \text{ mm}$

Aus (1) werden dann die Formeln für V bzw. R abgeleitet:

$$V = 0,29108032 \sqrt{R(I_0 + \ddot{u})} \quad (2)$$

$$R = \frac{11,80227 V^2}{\ddot{u} + I_0} \quad (3)$$

Es werden die Radien für die Grenzwerte der Überhöhung ($\ddot{u} = 20 \text{ mm}$ und $\ddot{u} = 0 \text{ mm}$) berechnet.

Wenn $\ddot{u} = \ddot{u}_{\min} = 20 \text{ mm}$:

$$R = \frac{11,80227 \cdot 200^2}{20 + 130} = 3147,405 \text{ m} \approx 3150 \text{ m}$$

Wenn $\ddot{u} = 0 \text{ mm}$

$$R = \frac{11,80227 \cdot 200^2}{0 + 130} = 3631,62 \text{ m} \approx 3630 \text{ m}$$

Tab. 2: Die Radien, Überhöhungen und maximale Geschwindigkeiten

R	$\ddot{u}$	V max.
[m]	[mm]	[km/h]
250	160	78,38
500	160	110,84
750	160	135,75
1000	160	156,75
1250	160	175,25
1500	160	191,98
1750	139,77	200
2000	106,05	200
2250	79,82	200
2500	58,84	200
2750	41,67	200
3000	27,36	200
3150	20	200
3630	0,0	200

Bei Radien 250 m bis 1500 m wird die maximale Überhöhung von 160 mm ausgenutzt. Die Maximalgeschwindigkeiten werden dann anhand der Formel (2) für jede Lage (Radius) gerechnet.

Bei Radien 1750 bis 3630 m überschreitet die rechnerische Maximalgeschwindigkeit die Maximalgeschwindigkeit von 200 km/h. Hier werden die entsprechende Überhöhungen für die Geschwindigkeit von 200 km/h, berechnet nach Formel (1), eingesetzt.

Die Tab. 2 zeigt die ausgewählten Radien, die Geschwindigkeiten und die daraus folgenden Überhöhungen. So ergeben sich verschiedene Lagen für die Untersuchungen.

4. Einwirkungen

Die Abb. 4 zeigt den Brückenquerschnitt mit allen veränderlichen Lasten:

- Vertikallast (Q_v)
- Horizontallast (Q_h)
- Seitenstoß (Q_{sk})

Die ständige Einwirkungen ergeben sich aus:

- den Eigengewicht
- den Ausbaulasten

In den Kapiteln 4.1 und 4.2 wird auf die oben genannten Einwirkungen noch genauer eingegangen.

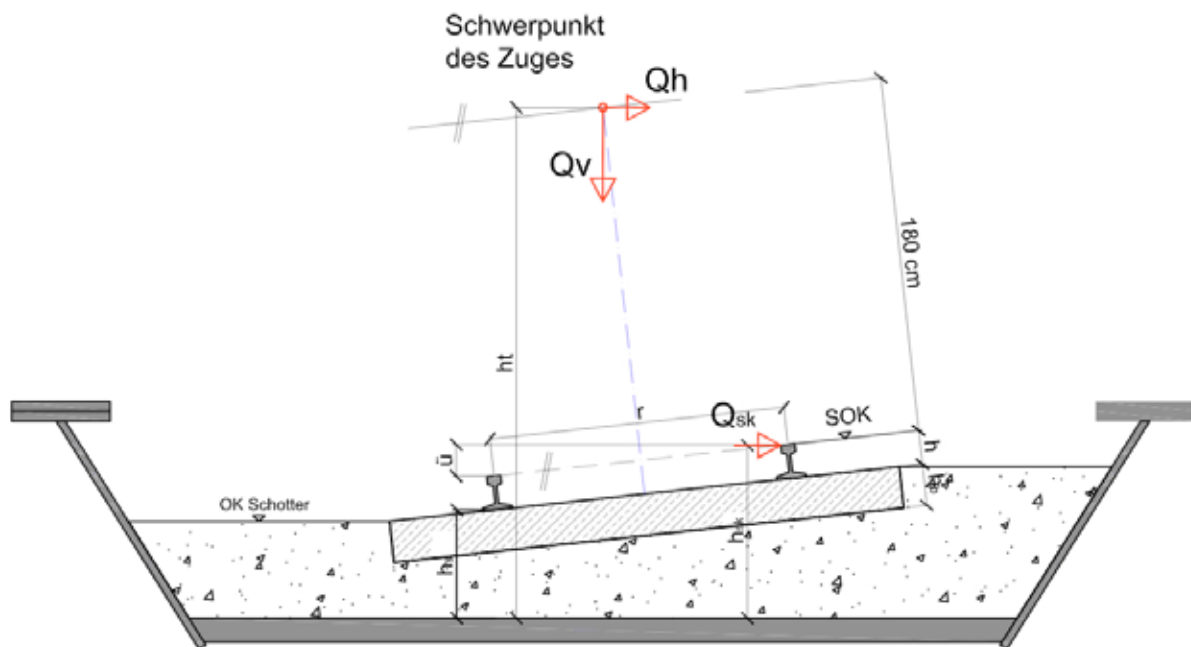


Abb. 4: Brückenquerschnitt mit veränderlichen Einwirkungen

Legende:

- Q_h Horizontalkraft (allgemein)
- Q_v vertikale Achslast
- Q_{sk} Charakteristischer Wert des Seitenstoßes
- h_t Höhe der Horizontalkraft über die Stahlplatte
- h_{sk} Höhe des charakteristischen Wertes des Seitenstoßes
- $\ddot{u}$ Überhöhung
- SOK Schienenoberkante
- r Radabstand in Querrichtung

Die Lasten werden aus den Lastmodellen lt. [5] entnommen (siehe Kap. 4.2.3 und Kap. 4.2.4). In Abhängigkeit der Radien und der Geschwindigkeiten ergeben sich die Höhen h_{tk} und h_{sk} bzw. die Überhöhung $\ddot{u}$. Der Radabstand in Querrichtung ist in [6] mit $r = 1500 \text{ mm}$ vorgegeben.

4.1 Ständige Einwirkungen

4.1.1 Tragwerkseigengewicht

Aus der Abb. 5 ist die Geometrie des Grobbleches ablesbar. Die Materialkennwerte können dem Kapitel 2.2.1 entnommen werden. Das Eigengewicht des Grobbleches wird in Tab. 3 ermittelt.

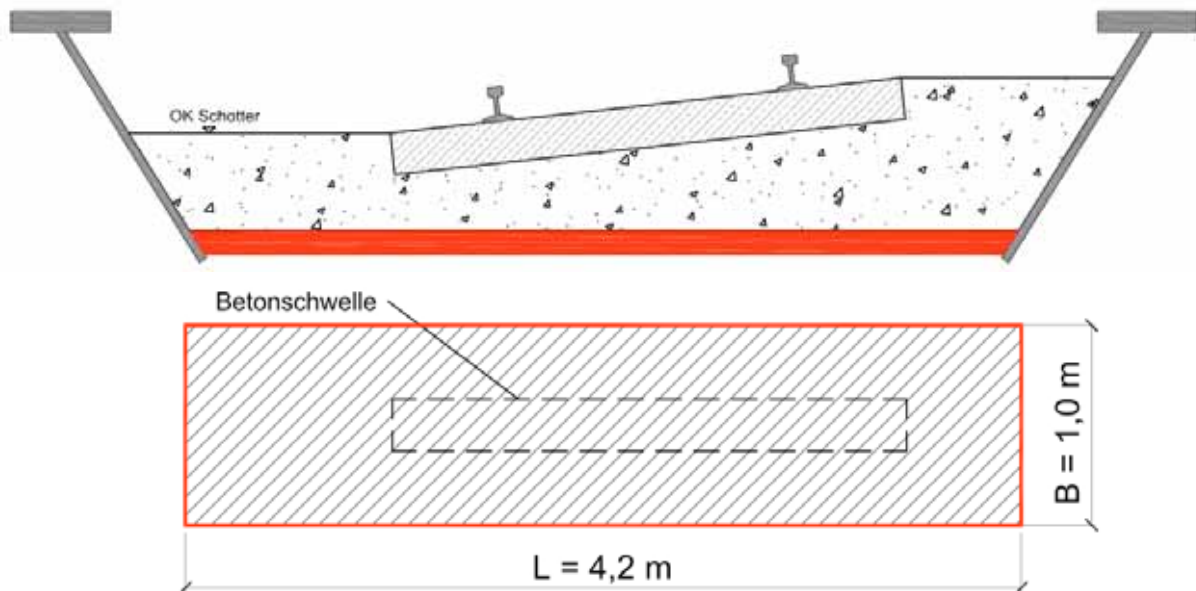


Abb. 5: Darstellung des Grobbleches, Querschnitt und Draufsicht

Tab. 3: Eigengewicht (g_a)

Position	Bemerkung		charakteristische Last
Grobblech	Wichte:	$\gamma_a = 78,5 \text{ kN/m}^3$	$g_a = 9,42 \text{ kN/m}$
	Breite:	$B = 1,0 \text{ m}$	
	Höhe:	$h = 0,12 \text{ m}$	

Breite B $\rightarrow$ 1m Streifen

4.1.2 Ausbaulast

Die Abb. 6 zeigt die Ausbaulasten, welche sich aus dem Schotterbett, der Betonschwellen mit Schienenbefestigungen und den Schienen zusammensetzen. Die charakteristischen Werte der Ausbaulasten werden in der Tab. 4 ermittelt.

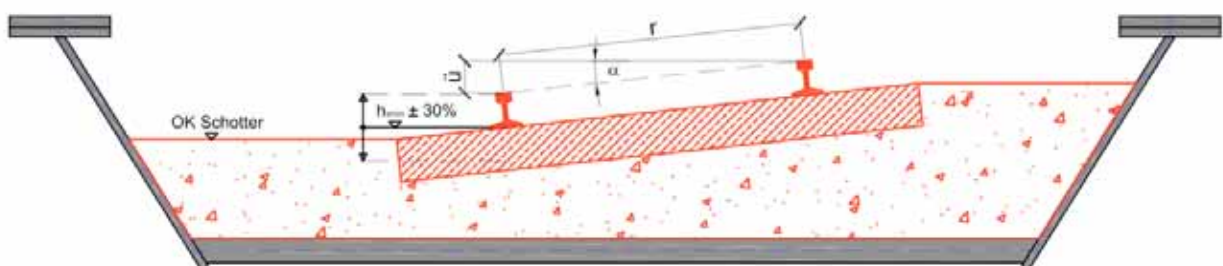


Abb. 6: Ausbaulasten

Tab. 4: Ausbaulasten (g_{aus})

Position	Bemerkung	
Schotterbett	Wichte:	$\gamma_s = 20 \text{ kN/m}^3$
	Breite:	$B = 1,0 \text{ m}$
	Höhe:	$h_{\text{smin}} = 38,5 \text{ cm}$
		$h_s = 55,0 \text{ cm}$
Vorgespannte Betonschwelle inkl. Schienenbefestigung	Wichte:	$\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$
	l/b/h:	260/26/21 cm
Schienen	2 Stück UIC 60	

Laut [3] beträgt die Schotterwichte 20 kN/m^3 . Das Gewicht bzw. die charakteristische Last des Schotterbetts ändert sich anhand verschiedener Überhöhungen. Laut [4] beträgt die Nennhöhe des Schotterbettes $h_s = 55 \text{ cm}$, sofern in speziellen Fällen kein anderer Wert angegeben ist. Die lt. [4] vorgeschriebene Variation des Schotterbetts von $\pm 30\%$ wird berücksichtigt. Dadurch werden die Höhen $h_{\text{smin}} = 38,5 \text{ cm}$ und $h_{\text{smax}} = 71,5 \text{ cm}$ vorgegeben.

Die charakteristische Last des Schotterbetts in Querrichtung lautet:

$$g_s = \frac{\gamma_s A_s B}{L} \quad (4)$$

mit:

$$A_s = 0,6273 h_s^2 + h_s (94,1 \sin \alpha + 420) + 31500 \sin \alpha - 37090,1 \sin^2 \alpha^2 \quad (5)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{\ddot{u}}{r} \quad (6)$$

$$L = 4,2 \text{ m}$$

$$r = 150 \text{ cm}$$

Das Eigengewicht der Betonschwelle mit Schienenbefestigung ist lt. [3] (Tab. A.6) mit $4,8 \text{ kN/m}$ angegeben.

In Längsrichtung:

$$\Delta g_b = g \cdot \frac{\gamma_b - \gamma_s}{\gamma_b} = 4,8 \cdot \frac{25 - 20}{25} = 0,96 \text{ kN/m} \approx 1,0 \text{ kN/m}$$

In Querrichtung:

$$\Delta g_b = \frac{\gamma_b \cdot l \cdot b \cdot h}{L} = \frac{25 \cdot 2,6 \cdot 0,21 \cdot 0,26}{4,2} = 0,845 \text{ kN/m} \approx 1,0 \text{ kN/m}$$

Das Eigengewicht von 2 Stück Schienen UIC 60 ergibt sich lt [3] (Tab. A.6) mit $1,2 \text{ kN/m}$ in Längsrichtung. Umgerechnet in Querrichtung:

$$\Delta g_{\text{sch}} = \frac{g_{\text{sch}} B}{L} = \frac{1,2 \cdot 1,0}{4,2} = 0,286 \text{ kN/m} \approx 0,3 \text{ kN/m}$$

² Die Formel (5) für A_s gilt nur für den untersuchten Querschnitt lt. Abb. 2 (Seite 12)

Die charakteristischen Lasten werden pro Laufmeter Brückenbreite gerechnet. Die resultierenden, ständigen Einwirkungen, die sich aus dem Eigengewicht und den Ausbaulasten ergeben, sind in Tab. 5 dargestellt:

$$g = g_a + g_s + \Delta g_b + \Delta g_{sch} = g_a + g_s + \Delta g_{b+sch} \quad (7)$$

Tab. 5: resultierende charakteristische Lasten **g**

h_s	$\ddot{u}$	α	A_s		g_a	g_s	Δg_{b+sch}	g
(cm)	(mm)	(rad)	(cm ²)	(m ²)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
38,5	160,00	0,11	20424,25	2,04	9,42	9,73	1,30	20,45
	139,77	0,09	20050,53	2,01	9,42	9,55	1,30	20,27
	106,05	0,07	19397,61	1,94	9,42	9,24	1,30	19,96
	79,82	0,05	18863,79	1,89	9,42	8,98	1,30	19,70
	58,84	0,04	18420,50	1,84	9,42	8,77	1,30	19,49
	41,67	0,03	18046,90	1,80	9,42	8,59	1,30	19,31
	27,36	0,02	17728,12	1,77	9,42	8,44	1,30	19,16
	0,00	0,00	17099,82	1,71	9,42	8,14	1,30	18,86
55,0	160,00	0,11	28487,63	2,85	9,42	13,57	1,30	24,29
	139,77	0,09	28092,97	2,81	9,42	13,38	1,30	24,10
	106,05	0,07	27405,15	2,74	9,42	13,05	1,30	23,77
	79,82	0,05	26844,18	2,68	9,42	12,78	1,30	23,50
	58,84	0,04	26379,17	2,64	9,42	12,56	1,30	23,28
	41,67	0,03	25987,80	2,60	9,42	12,38	1,30	23,10
	27,36	0,02	25654,20	2,57	9,42	12,22	1,30	22,94
	0,00	0,00	24997,58	2,50	9,42	11,90	1,30	22,62
71,5	160,00	0,11	36892,58	3,69	9,42	17,57	1,30	28,29
	139,77	0,09	36476,98	3,65	9,42	17,37	1,30	28,09
	106,05	0,07	35754,25	3,58	9,42	17,03	1,30	27,75
	79,82	0,05	35166,14	3,52	9,42	16,75	1,30	27,47
	58,84	0,04	34679,41	3,47	9,42	16,51	1,30	27,23
	41,67	0,03	34270,27	3,43	9,42	16,32	1,30	27,04
	27,36	0,02	33921,86	3,39	9,42	16,15	1,30	26,87
	0,00	0,00	33236,91	3,32	9,42	15,83	1,30	26,55

4.2 Veränderliche Einwirkungen

4.2.1 Die Exzentrizität

Es werden zwei verschiedene Arten von Exzentrizitäten untersucht:

Laut [5] ist die seitliche Exzentrizität der Vertikallasten durch ein Verhältnis der beiden Radlasten aller Achsen von 1,25 auf einem Gleis zu berücksichtigen. Die seitliche Exzentrizität der Vertikallast e_1 (Abb. 7), ergibt sich aus unterschiedlich beladenen Zügen, bzw. nicht symmetrisch geladenen Zügen und lässt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$\frac{q_{v2}}{q_{v1}}, \frac{Q_{v2}}{Q_{v1}} \leq 1,25 \quad (8)$$

$$e_1 \leq \frac{r}{18} \quad (9)$$

r Radabstand in Querrichtung

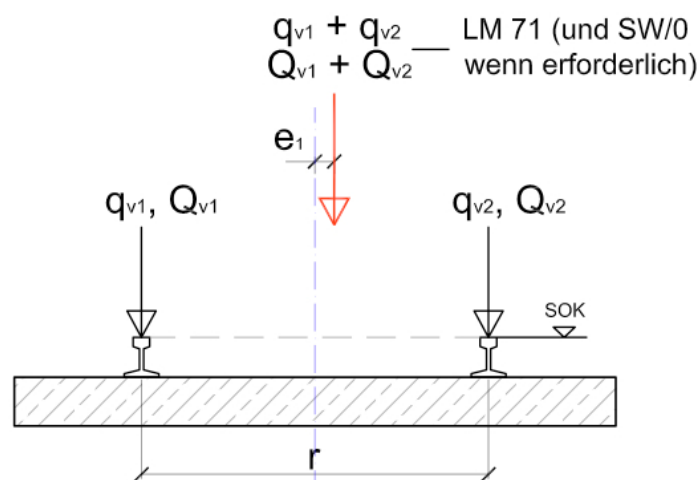


Abb. 7: Exzentrizität e_1

Lt. [6] ist der Abstand zwischen den Radlasten bei Normalspurbahnen $r = 1500$ mm. So ergibt sich die seitliche Exzentrizität e_1 zu:

$$e_1 \leq \frac{1500}{18} = 83,3 \text{ mm} = 8,33 \text{ cm}$$

Laut [6] wird bei Tragwerken mit offener Fahrbahn, sowie bei eingleisigen Tragwerken mit Schotterbett die Gleislage vom Infrastrukturbetreiber bekannt gegeben. Von der bekannt gegebenen Lage ist (falls vom Infrastrukturbetreiber keine anderen Angaben vorliegen) eine Abweichung von 0,10 m (100 mm) nach jeder Seite zu berücksichtigen. Diese Abweichung wird auch in dieser Arbeit untersucht und als Exzentrizität e_2 dargestellt.

$$e_2 = \pm 100,0 \text{ mm} = \pm 10,0 \text{ cm}$$

In Fällen, wenn sich die Brücke in einem Bogenteil der Strecke befindet, entsteht zwischen Bogenachse und Tragwerksachse eine Exzentrizität e^* . Diese wird aus der Geometrie des Kreises abgeleitet:

$$l_{KS} = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \quad \text{und} \quad h = R - R \cos \frac{\alpha}{2} \quad (8) \text{ und } (9)$$

l_{KS} Länge Kreissehne (Tragwerksachse)

h Höhe (Kreissegment) (zweifache Exzentrizität e^*)

Daraus folgt:

$$h = R - R \cos \left(\arcsin \frac{L}{2R} \right) \Rightarrow e^* = \frac{h}{2} \quad (8)$$

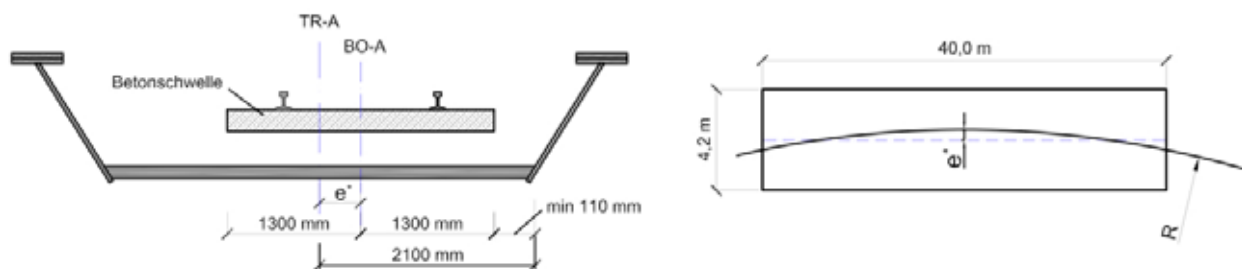


Abb. 8: Schnitt und Draufsicht der Exzentrizität e^*

TR-A Tragwerksachse

BO-A Bogenachse

Der Exzentrizität e^* hängt von geometrischen Bedingungen ab (Länge und Breite der Brücke, Radius der Gleisachse,...). Wenn möglich ist das Tragwerk so zu legen, dass sich e^* wie in Formel (8) ergibt.

4.2.2 Lastverteilung

4.2.2.1 Lastverteilung durch die Schiene

Abb. 9 zeigt wie die Vertikallast, Einzellast des LM 71, auf die Betonschwellen (Schienenstützpunkten) verteilt werden darf.

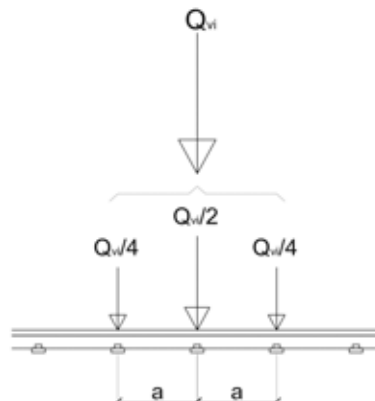


Abb. 9: Lastverteilung durch die Schiene

Legende:

Q_{vi} charakteristische Vertikallast

a Schwellenabstand

4.2.2.2 Lastenverteilung durch Schwellen und Schotterbett

Die Abb. 10 zeigt die Ausbreitung der Vertikallast durch die Betonschwelle und das Schotterbett in Quer- und Längsrichtung.

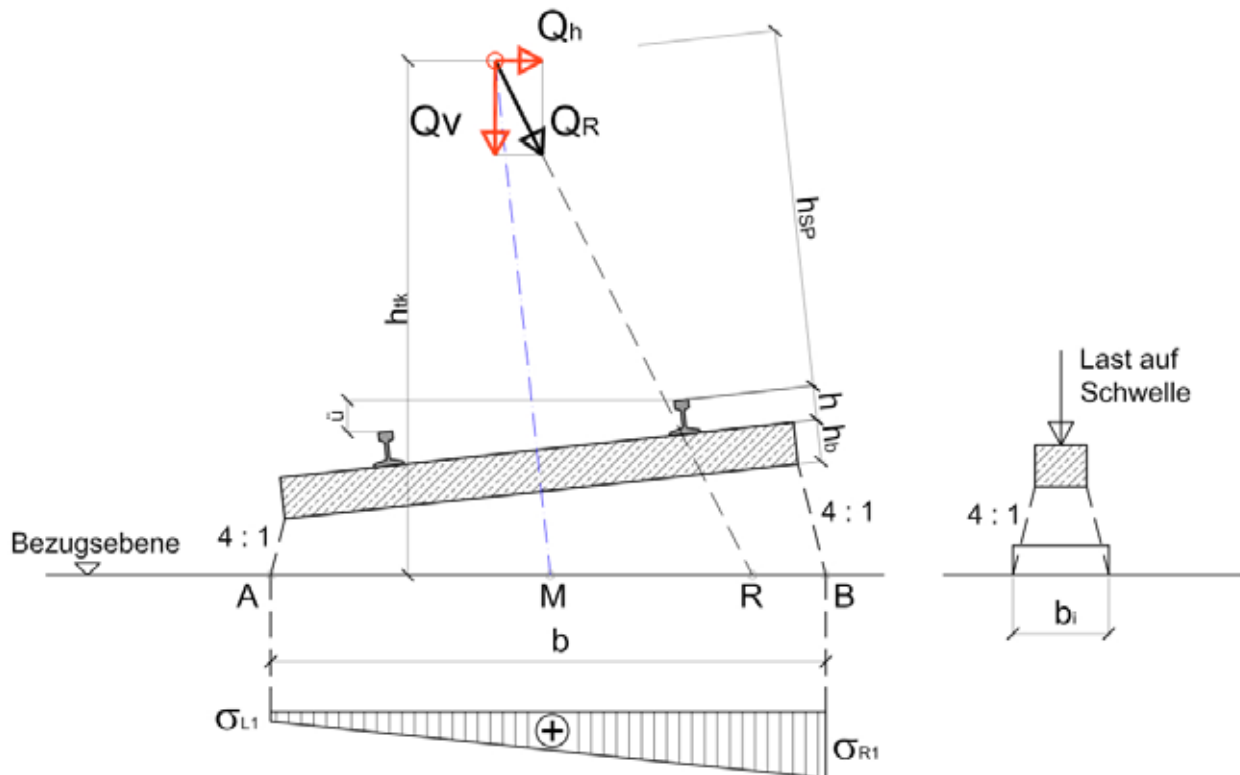


Abb. 10: Lastverteilung in Quer- und Längsrichtung

Legende:

Q_v	Vertikalkraft
Q_h	Horizontalkraft
Q_r	resultierende Kraft
A, B	Randpunkte
M	Mittelpunkt
R	Angriffspunkt der resultierenden Kraft
b	Breite in Querrichtung
b_i	Breite in Längsrichtung
h	Schienenhöhe
h_{tk}	Höhe des Angriffspunktes der Horizontalkraft
h_{sp}	Höhe des Schwerpunktes über SOK (Schienenoberkante)
h_b	Höhe der Betonschwelle
σ_L, σ_R	Spannungen links und rechts

Als Bezugsebene ist lt. [5] die OK des Grobbleches zu wählen.

Die vertikale und horizontale Kraft, sowie die resultierende Kraft ergeben sich aus den Lastmodellen lt. [5] (siehe Kap. 4.2.3 bzw. 4.2.4). Werte für h_{sp} , h_b , h , sowie die Neigung der Lastausbreitung sind durch die Norm vorgegeben. Breiten b bzw. b_i und die Spannungen ergeben sich aus den unterschiedlichen Größen der Überhöhung $\ddot{u}$ (für Überhöhung siehe Kap. 3.3).

4.2.3 Vertikale Einwirkungen

Die Lastmodelle für die veränderlichen Einwirkungen werden aus der [5] entnommen. Die ÖNORM bietet unterschiedliche Lastmodelle zur Brückenbemessung unter der Einwirkung des Eisenbahnverkehrs. Es werden folgende Lastmodelle untersucht:

4.2.3.1 Lastmodell 71

Das Lastmodell 71 stellt die Einflüsse der Einwirkungen aus dem Regelverkehr auf Hauptstrecken dar und wirkt als Vertikallast auf das Gleis. Die charakteristischen Werte des Lastmodells 71 sind in Abb. 11 dargestellt.

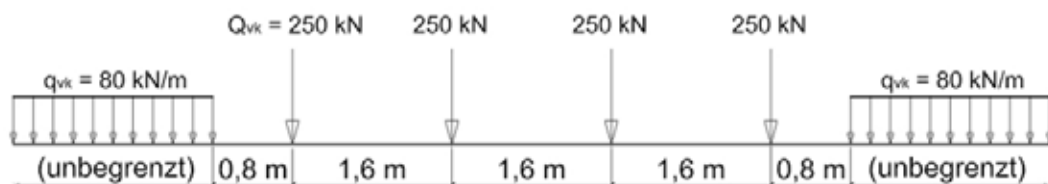
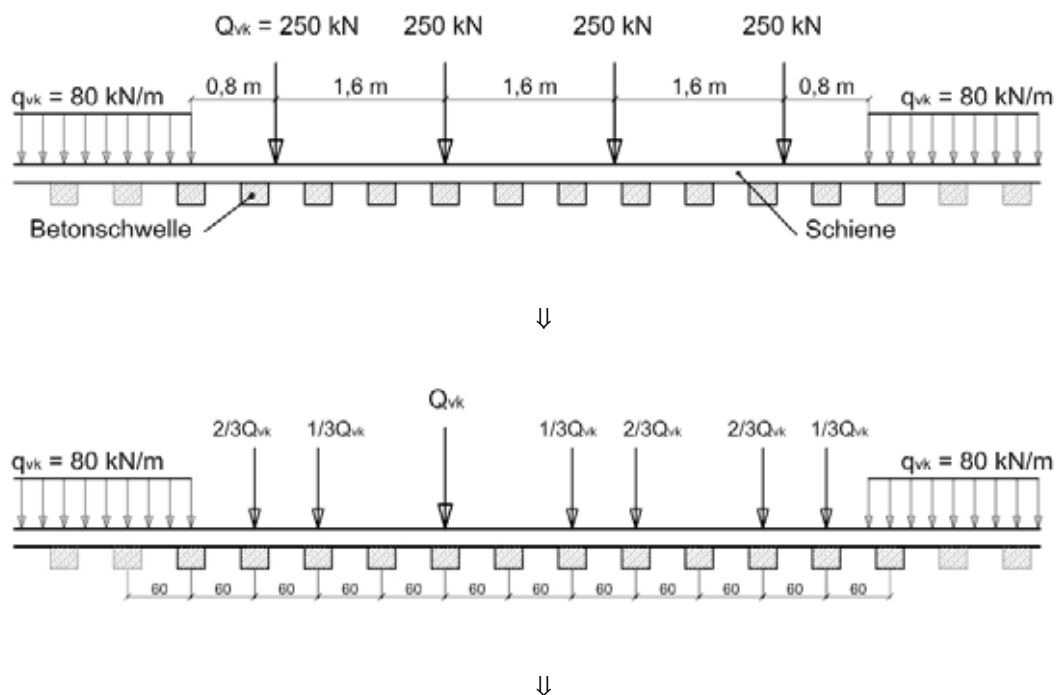


Abb. 11: Lastmodell 71

Laut [5] dürfen die Einzellasten wie in Abb. 12 verteilt werden. Es ergeben sich folgende Lasten:



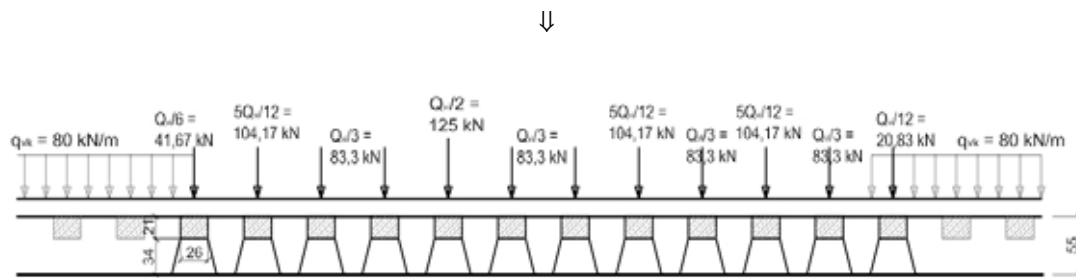


Abb. 12: Lastverteilung der Lastmodell 71 in Längsrichtung (siehe Kapitel 4.2.3.2)

Die charakteristischen Lasten werden zentrisch über den Schwellen positioniert und lt. Kapitel 4.2.2.2 (Lastverteilung durch die Schiene) auf einzelne Lasten verteilt. Somit ergibt sich die $Q_{vk}/2 = 125 \text{ kN}$ als maßgebende Schwellenlast.

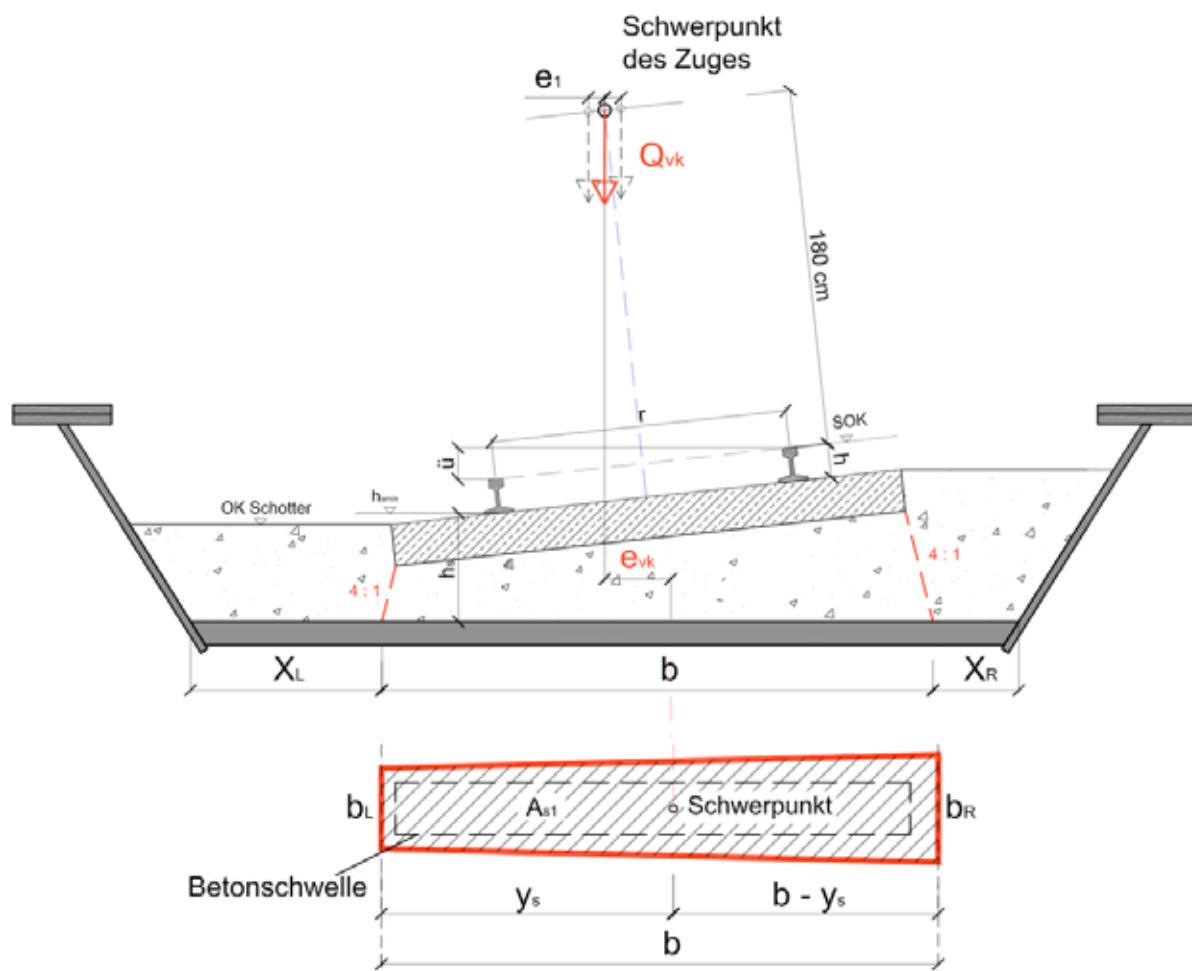


Abb. 13: Vertikallast Q_{vk} (LM 71)

Legende:

- Q_{vk} charakteristische Vertikallast, die durch Lastverteilung (Kap. 4.2.2.2) ermittelt wurde ($Q_{vk}/2$)
- e_1 seitliche Exzentrizität der Vertikallast
- e_{vk} Exzentrizität der charakteristischen Vertikallast

Die Einwirkungen in Plattenebene werden als Gleichlasten, die pro Laufmeter Breite auf das Grobblech wirken, angenommen. Aus den Vertikallasten (LM 71) werden die Normalkraft N_{vk} und das Biegemoment M_{vk} ausgerechnet (Abb. 14). Danach werden die Spannungen σ_{vkl} und σ_{vkr} ermittelt. Schließlich wird die Gleichlast anhand der Spannungen und Breiten der Einflussfläche b_L und b_R ermittelt.

Die Einflussfläche A_{s1} ergibt sich durch die Lastausbreitung im Schotterbett. Die Breiten b_L und b_R sind auf Grund der Überhöhung der Gleisachse unterschiedlich groß. Die Länge b ergibt sich aus der Lastverteilung in Querrichtung (siehe Kap. 4.2.2.2, Abb. 10). Die Abb. 13 (Seite 24) zeigt die erhaltene Fläche:

Die Abmessungen der Einflussfläche werden wie folgt ermittelt:

- Seiten:

$$b = \frac{1}{2} [h_s + 75 \sin \alpha + 499 \cos \alpha] \quad (10)$$

$$b_L = 26 + \frac{1}{2} [h_s - 55 \sin \alpha - 21 \cos \alpha] \quad (11)$$

$$b_R = 26 + \frac{1}{2} [h_s + 205 \sin \alpha - 21 \cos \alpha] \quad (12)$$

- Schwerpunkt y_s :

$$y_s = \frac{b}{3} \frac{b_L + 2b_R}{b_L + b_R} \quad (13)$$

- Fläche:

$$A_s = \frac{b_L + b_R}{2} b \quad (14)$$

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Schotterbetthöhen und der unterschiedlichen Überhöhungen werden die Abmessungen der Einflussfläche in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Geometrie der Einflussfläche³

h_s [cm]	$\ddot{u}_i$ [mm]	b [cm]	b_L [cm]	b_R [cm]	y_s [cm]	A_{s1} [m ²]	W_L m ³	W_R m ³
38,5	160,00	271,33	31,88	45,74	143,74	1,053	-0,445	0,501
	139,77	271,16	32,23	44,35	142,73	1,038	-0,442	0,491
	106,05	270,78	32,83	42,02	140,93	1,013	-0,437	0,474
	79,82	270,39	33,30	40,22	139,44	0,994	-0,433	0,461
	58,84	270,03	33,68	38,78	138,18	0,978	-0,429	0,450
	41,67	269,70	33,99	37,60	137,12	0,965	-0,426	0,441
	27,36	269,39	34,25	36,62	136,20	0,955	-0,424	0,433
	20,00	269,23	34,38	36,12	135,72	0,949	-0,422	0,429
	0,00	268,75	34,75	34,75	134,38	0,934	-0,418	0,418

³ h_s - Höhe des Schotterbetts

55	160,00	279,58	40,13	53,99	146,65	1,316	-0,580	0,640
	139,77	279,41	40,48	52,60	145,76	1,300	-0,577	0,629
	106,05	279,03	41,08	50,27	144,19	1,275	-0,572	0,611
	79,82	278,64	41,55	48,47	142,89	1,254	-0,567	0,597
	58,84	278,28	41,93	47,03	141,80	1,238	-0,563	0,585
	41,67	277,95	42,24	45,85	140,87	1,224	-0,559	0,575
	27,36	277,64	42,50	44,87	140,08	1,213	-0,556	0,566
	20,00	277,48	42,63	44,37	139,66	1,207	-0,554	0,562
	0,00	277,00	43,00	43,00	138,50	1,191	-0,550	0,550
71,5	160,00	287,83	48,38	62,24	149,93	1,592	-0,729	0,793
	139,77	287,66	48,73	60,85	149,13	1,576	-0,726	0,781
	106,05	287,28	49,33	58,52	147,72	1,549	-0,720	0,762
	79,82	286,89	49,80	56,72	146,55	1,528	-0,714	0,746
	58,84	286,53	50,18	55,28	145,57	1,511	-0,710	0,733
	41,67	286,20	50,49	54,10	144,74	1,497	-0,706	0,722
	27,36	285,89	50,75	53,12	144,03	1,485	-0,702	0,713
	20,00	285,73	50,88	52,62	143,66	1,479	-0,700	0,708
	0,00	285,25	51,25	51,25	142,63	1,462	-0,695	0,695

Die Widerstandsmomente werden wie folgt gerechnet:

$$W_L = \frac{b^2(b_L^2 + 4b_L b_R + b_R^2)}{12(2b_R + b_L)} \quad (15)$$

$$W_R = \frac{b^2(b_L^2 + 4b_L b_R + b_R^2)}{12(b_R + 2b_L)} \quad (16)$$

Aus der Einzellast gemäß Lastmodell 71 (die Vertikallast Q_{vk}) werden durch eine Lastumordnung laut Abb. 14 folgende neuen Beanspruchungen ermittelt. Es ergeben sich die Normalkraft N_{vk} und das Biegemoment M_{vk} , welche wie folgt berechnet werden:

$$N_{vk} = Q_{vk} \quad (17)$$

$$M_{vk} = -Q_{vk} \times e_{vk} \quad (18)$$

$$e_{vk} = (X_L + y_S) - (210 - 180 \cdot \sin(\alpha) + e_1) \quad (19)$$

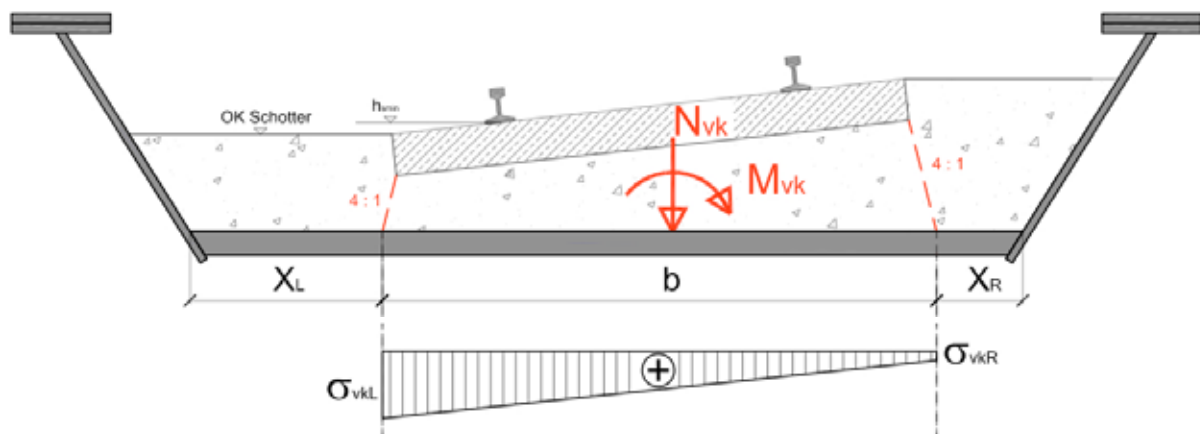
$$X_L = 210 + 51,75 \sin \alpha - 124,75 \cos \alpha - 0,25 h_S + e^* + e_2^4 \quad (20)$$

Die Tab. 7 stellt Werte der N_{vk} , e_{vk} und M_{vk} anhand der unterschiedlichen Höhen des Schotterbetts und Überhöhungen dar.

⁴ Ableitung der Formel (20) für X_L wird im Anhang A dargestellt

Tab. 7: Werte der e_{vk} und M_{vk}

h_s [cm]	$\ddot{u}_i$ [mm]	N_{vk} (kN)	$e_1 = -8,33$ cm		$e_1 = 0$ cm		$e_1 = 8,33$ cm	
			e_{vk} (cm)	M_{vk} (kNm)	e_{vk} (cm)	M_{vk} (kNm)	e_{vk} (cm)	M_{vk} (kNm)
38,5	160,00	125,00	43,13	-53,92	34,80	-43,50	26,47	-33,08
	139,77	125,00	38,82	-48,53	30,49	-38,11	22,16	-27,70
	106,05	125,00	31,58	-39,48	23,25	-29,06	14,92	-18,65
	79,82	125,00	25,90	-32,38	17,57	-21,96	9,24	-11,55
	58,84	125,00	21,33	-26,66	12,99	-16,24	4,66	-5,83
	41,67	125,00	17,56	-21,95	9,23	-11,53	0,89	-1,12
	27,36	125,00	14,40	-18,01	6,07	-7,59	-2,26	2,83
	20,00	125,00	12,78	-15,97	4,44	-5,55	-3,89	4,86
	0,00	125,00	8,33	-10,42	0,00	0,00	-8,33	10,42
55	160,00	125,00	41,92	-52,40	33,59	-41,98	25,25	-31,56
	139,77	125,00	37,74	-47,17	29,40	-36,75	21,07	-26,34
	106,05	125,00	30,72	-38,40	22,39	-27,99	14,06	-17,57
	79,82	125,00	25,23	-31,54	16,90	-21,12	8,57	-10,71
	58,84	125,00	20,82	-26,02	12,48	-15,61	4,15	-5,19
	41,67	125,00	17,19	-21,49	8,86	-11,07	0,52	-0,66
	27,36	125,00	14,16	-17,70	5,82	-7,28	-2,51	3,14
	20,00	125,00	12,59	-15,74	4,26	-5,33	-4,07	5,09
	0,00	125,00	8,33	-10,42	0,00	0,00	-8,33	10,42
71,5	160,00	125,00	41,07	-51,33	32,73	-40,92	24,40	-30,50
	139,77	125,00	36,97	-46,22	28,64	-35,80	20,31	-25,39
	106,05	125,00	30,12	-37,65	21,79	-27,24	13,46	-16,82
	79,82	125,00	24,77	-30,96	16,44	-20,54	8,10	-10,13
	58,84	125,00	20,47	-25,59	12,14	-15,17	3,80	-4,75
	41,67	125,00	16,94	-21,17	8,61	-10,76	0,27	-0,34
	27,36	125,00	13,99	-17,49	5,66	-7,07	-2,68	3,35
	20,00	125,00	12,47	-15,59	4,14	-5,17	-4,20	5,24
	0,00	125,00	8,33	-10,42	0,00	0,00	-8,33	10,42

Abb. 14: Äußere Belastung und Spannungsdiagramm für Q_{vk} (LM 71)

In Abb. 14 ist M_{vk} negativ (siehe Tab. 7), wodurch sich im Spannungsdiagramm auf der rechten Seite größere Werte ergeben. Aus N_{vk} , M_{vk} und den Widerstandsmomenten W_L und W_R lassen sich die Spannungen mit den Formeln (21) und (22) errechnen.

$$\sigma_{vKL} = \frac{N_{vk}}{A_{S_1}} + \frac{M_{vk}}{W_L} \quad (21)$$

$$\sigma_{vKR} = \frac{N_{vk}}{A_{S_1}} + \frac{M_{vk}}{W_R} \quad (22)$$

In Tab. 8 sind die Spannungen, welche sich aus dem Lastmodell 71 ergeben, in Abhängigkeit der Parameter h_s , $\ddot{u}_i$ und e_{vk} dargestellt.

Tab. 8: Spannungen aus der Vertikallast (LM71)

		$e_1 = -8,33 \text{ cm}$		$e_1 = 0 \text{ cm}$		$e_1 = 8,33 \text{ cm}$	
h_s	$\ddot{u}_i$	σ_{vKL}	σ_{vKR}	σ_{vKL}	σ_{vKR}	σ_{vKL}	σ_{vKR}
[cm]	[mm]	(kN/m²)	(kN/m²)	(kN/m²)	(kN/m²)	(kN/m²)	(kN/m²)
38,5	160,00	239,96	11,08	216,53	31,88	193,11	52,67
	139,77	230,19	21,60	206,62	42,80	183,05	64,01
	106,05	213,65	40,13	189,82	62,09	166,00	84,04
	79,82	200,53	55,53	176,48	78,12	152,42	100,72
	58,84	189,85	68,55	165,59	91,69	141,34	114,83
	41,67	180,96	79,71	156,53	103,33	132,10	126,95
	27,36	173,44	89,39	148,85	113,43	124,27	137,47
	20,00	169,53	94,51	144,86	118,77	120,20	143,04
55	0,00	158,75	108,94	133,85	133,85	108,94	158,75
	160,00	185,33	13,14	167,37	29,42	149,42	45,69
	139,77	177,86	21,19	159,81	37,74	141,76	54,29
	106,05	165,27	35,24	147,04	52,29	128,82	69,33
	79,82	155,31	46,80	136,94	64,26	118,56	81,72
	58,84	147,24	56,48	128,72	74,29	110,21	92,11
	41,67	140,54	64,71	121,91	82,84	103,28	100,96
	27,36	134,88	71,80	116,15	90,20	97,42	108,60
71,5	20,00	131,95	75,54	113,16	94,08	94,38	112,62
	0,00	123,89	86,00	104,95	104,95	86,00	123,89
	160,00	148,91	13,77	134,63	26,91	120,35	40,05
	139,77	142,99	20,16	128,64	33,49	114,29	46,82
	106,05	133,02	31,24	118,54	44,92	104,06	58,60
	79,82	125,16	40,29	110,57	54,26	95,99	68,23
	58,84	118,80	47,82	104,12	62,03	89,43	76,25
	41,67	113,53	54,19	98,77	68,62	84,00	83,05
71,5	27,36	109,10	59,65	94,26	74,27	79,42	88,88
	20,00	106,80	62,52	91,92	77,23	77,04	91,94
	0,00	100,49	70,52	85,50	85,50	70,52	100,49

Die resultierende Belastung wird mit den Formeln (23) und (24) ermittelt:

$$q_{vKL} = \sigma_{vKL} b_L \quad (23)$$

$$q_{vKR} = \sigma_{vKR} b_R \quad (24)$$

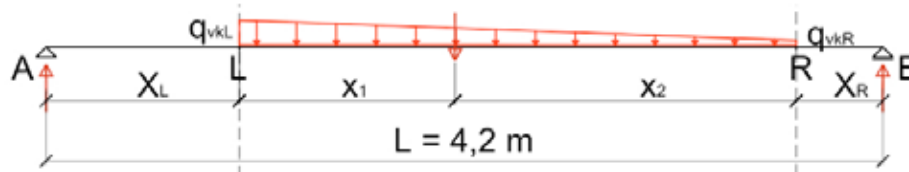


Abb. 15: Lasten auf das Grobblech

Legende:

x_1, x_2 Hilfswerte, Position der Resultierende Einzelkraft aus der Belastung

Die Werte der Einwirkungen aus dem Lastmodell 71 (Q_{vk}) werden unter Berücksichtigung der Exzentrizität e_1 , der unterschiedlichen Schotterbetthöhen und den verschiedenen Überhöhungen in Tab. 9 dargestellt.

Tab. 9: Einwirkungen von LM 71

		$e_1 = -8,33 \text{ cm}$		$e_1 = 0 \text{ cm}$		$e_1 = 8,33 \text{ cm}$	
h_s	$\ddot{u}_i$	q_{vKL}	q_{vKR}	q_{vKL}	q_{vKR}	q_{vKL}	q_{vKR}
[cm]	[mm]	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
38,5	160,00	76,49	5,07	69,02	14,58	61,56	24,09
	139,77	74,20	9,58	66,60	18,98	59,00	28,39
	106,05	70,15	16,87	62,32	26,09	54,50	35,32
	79,82	66,78	22,33	58,77	31,42	50,76	40,51
	58,84	63,94	26,58	55,77	35,56	47,60	44,53
	41,67	61,51	29,97	53,20	38,85	44,90	47,73
	27,36	59,40	32,73	50,98	41,54	42,56	50,34
	20,00	58,29	34,13	49,81	42,90	41,33	51,66
	0,00	55,16	37,86	46,51	46,51	37,86	55,16
55	160,00	74,37	7,10	67,16	15,88	59,96	24,67
	139,77	72,00	11,14	64,70	19,85	57,39	28,55
	106,05	67,90	17,72	60,41	26,29	52,92	34,85
	79,82	64,54	22,68	56,90	31,15	49,26	39,61
	58,84	61,74	26,56	53,97	34,94	46,21	43,32
	41,67	59,36	29,67	51,49	37,98	43,62	46,29
	27,36	57,33	32,22	49,36	40,47	41,40	48,73
	20,00	56,26	33,51	48,25	41,74	40,24	49,97
	0,00	53,27	36,98	45,13	45,13	36,98	53,27
71,5	160,00	72,04	8,57	65,13	16,75	58,22	24,93
	139,77	69,68	12,27	62,69	20,38	55,70	28,49
	106,05	65,62	18,28	58,48	26,29	51,34	34,29
	79,82	62,33	22,85	55,07	30,77	47,80	38,70
	58,84	59,61	26,43	52,24	34,29	44,88	42,15
	41,67	57,32	29,32	49,87	37,12	42,41	44,93
	27,36	55,37	31,69	47,84	39,45	40,31	47,21
	20,00	54,34	32,90	46,77	40,64	39,20	48,38
	0,00	51,50	36,14	43,82	43,82	36,14	51,50

4.2.3.2 Lastmodelle SW/0 und SW/2

Das Lastmodell SW/0 stellt die Einflüsse der Einwirkungen aus dem Regelverkehr auf Hauptstrecken für Durchlaufträgerbrücken dar. Die Lastanordnung ist anhand Abb. 16 dargestellt. Die charakteristischen Werte sind in der Tab. 10 angegeben.

Das Lastmodell SW/2 stellt die Einflüsse der Einwirkungen aus dem Schwerverkehr dar. Die charakteristischen Werte sind ebenfalls in der Tab. 10 angegeben und die Lastanordnung aus Abb. 16 ersichtlich.



Abb. 16: Lasteinordnung für SW/0 und SW/2

Tab. 10: charakteristische Werte für Lastmodelle SW/0 und SW/2

Lastmodell	q_{vk} in kN/m	a in m	c in m
SW/0	133	15	5,3
SW/2	150	25	7,0

Die festgelegten Lastmodelle beschreiben keine tatsächlichen Lasten. Sie wurden so gewählt, dass sie unter Berücksichtigung der dynamischen Beiwerte, die Einwirkung des Zugverkehrs wiedergeben.

Die Lastmodelle werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tab. 11: charakteristische Werte der Lastmodelle

Lastmodell	Q_{vk}	q_{vk}
71	250	80
SW/0	-	133
SW/2	-	150

Die charakteristischen Werte der Lastmodelle sind mit α -Werten zu multiplizieren. Auf den Lastklassenbeiwert α wird in Kapitel 4.4.1 näher eingegangen.

Bei den Lastmodellen SW/0 und SW/2 wird die Belastung anders ermittelt. Es wird angenommen, dass die charakteristischen Lasten (q_{vk}) aus den Lastmodellen SW/0 und SW/2 direkt auf das Grobblech wirken. Daraus wird die Gleichlast q durch Verteilung der charakteristischen Lasten auf eine Länge b (siehe Formel 25) in Querrichtung ermittelt. Die Abb. 17 zeigt die Einflussfläche.

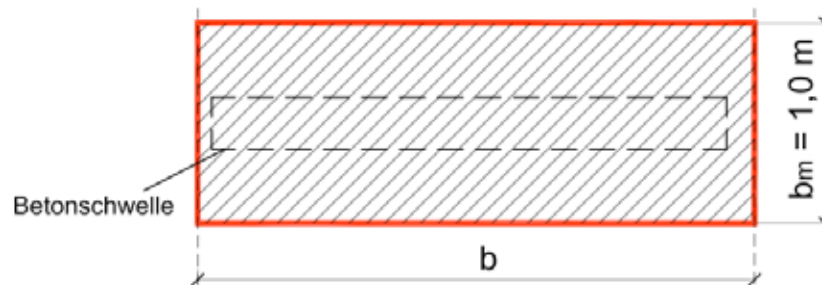


Abb. 17: Einflussfläche für Lastmodelle SW/0 und SW/2

Die Resultierende Belastung wird mit dem Formel (25) ermittelt:

$$q_L = q_R = q = \frac{q_{vk}}{b} \quad (25)$$

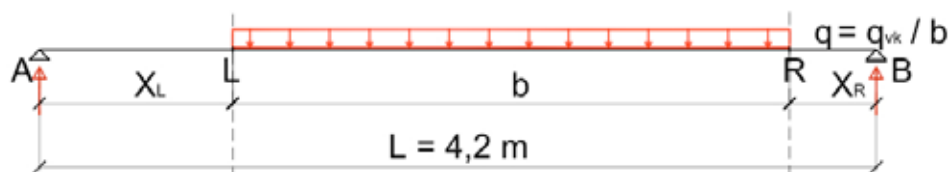


Abb. 18: Lasten auf das Grobblech

Die charakteristischen Werte der lokalen Gleichlasten sind in der Tab. 12 anhand der Überhöhungen und Schotterbetthöhen dargestellt.

Tab. 12: Lokale Gleichlasten für Lastmodelle SW/0 und SW/2

h_s [cm]	$\ddot{u}_i$ [mm]	SW/0	SW/2
		q (kN/m)	q (kN/m)
38,5	160,00	49,02	55,28
	139,77	49,05	55,32
	106,05	49,12	55,40
	79,82	49,19	55,48
	58,84	49,25	55,55
	41,67	49,31	55,62
	27,36	49,37	55,68
	20,00	49,40	55,71
	0,00	49,49	55,81
55	160,00	47,57	53,65
	139,77	47,60	53,69
	106,05	47,67	53,76
	79,82	47,73	53,83
	58,84	47,79	53,90
	41,67	47,85	53,97
	27,36	47,90	54,03
	20,00	47,93	54,06
	0,00	48,01	54,15
71,5	160,00	46,21	52,12
	139,77	46,24	52,15
	106,05	46,30	52,21
	79,82	46,36	52,28
	58,84	46,42	52,35
	41,67	46,47	52,41
	27,36	46,52	52,47
	20,00	46,55	52,50
	0,00	46,63	52,59

4.2.4 Horizontale Einwirkungen

4.2.4.1 Fliehkraft

Die Fliehkräfte und die Überhöhungen sind bei Brücken, welche in einem Gleisbogen liegen, zu berücksichtigen. Die Fliehkräfte sind immer mit der Vertikalbelastung zu kombinieren und wirken 1,80 m über SOK nach außen (siehe Abb. 19).

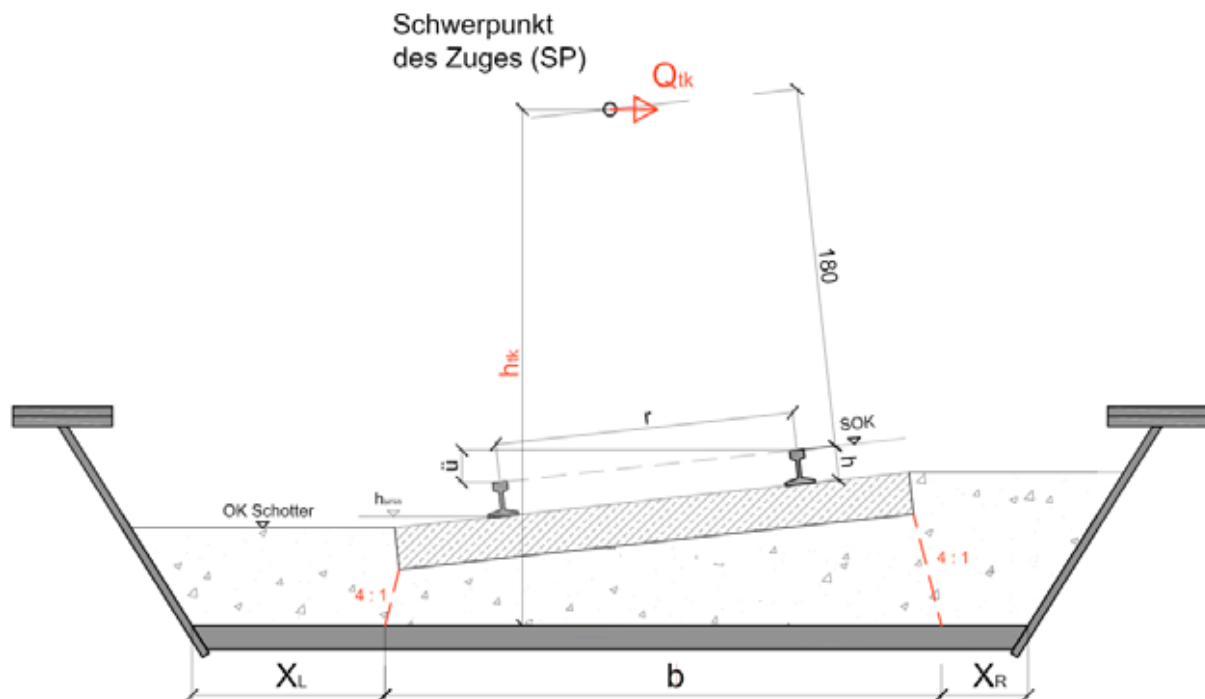


Abb. 19: Wirkung der Fliehkraft auf den Querschnitt

Legende:

Q_{tk} charakteristischer Wert der Horizontalkraft (Fliehkraft)
 h_{tk} Höhe der Fliehkraft über dem Grobblech

Das Biegemoment M_{tk} ergibt sich aus der Fliehkraft und der Höhe des Angriffspunktes dieser über dem Grobblech.

Die charakteristischen Werte der Fliehkraft werden in [5] wie folgt angegeben:

$$Q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} \cdot (f \times Q_{vk}) = \frac{V^2}{127 \cdot R} \cdot (f \times Q_{vk}) \quad (26)$$

$$q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} \cdot (f \times q_{vk}) = \frac{V^2}{127 \cdot R} \cdot (f \times q_{vk}) \quad (27)$$

Legende:

Q_{tk}, q_{tk} charakteristische Werte der Fliehkraft, in kN, kN/m,
 Q_{vk}, q_{vk} charakteristische Werte für Lastmodelle 71, SW/0 und SW/2 ohne eine Vergrößerung für dynamische Auswirkungen, in kN, kN/m

V Höchstgeschwindigkeit in km/h
 R Radius des Gleisbogens, in m
 f Abminderungsfaktor für Fliehkraft

Der Abminderungsfaktor f für die Fliehkraft wird wie folgt berechnet:

$$f = \left[1 - \frac{V - 120}{1000} \left(\frac{814}{V} + 1,75 \right) \left(1 - \sqrt{\frac{2,88}{L_f}} \right) \right] \geq 0,35 \quad (28)$$

mit $L_f = 4,2m$

Legende:

L_f Die Einflusslänge des belasteten Teiles des Gleisbogens auf der Brücke, die am ungünstigsten für die Bemessung des jeweils betrachteten Bauteils ist, in m
 V Höchstgeschwindigkeit

Da die Fliehkraft auch von der Geschwindigkeit abhängig ist, werden die Fliehkräfte für folgende 3 Geschwindigkeiten angegeben:

- Maximalgeschwindigkeit (welche sich über die ausgeführte Überhöhung ergibt)
- $V = 120 \text{ km/h}$
- $V = 80 \text{ km/h}$

Für das Lastmodell SW/2 kann lt. [5] eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h angesetzt werden. In den Tabellen 13, 14 und 15 finden sich die Werte für die Fliehkräfte in Abhängigkeit der verschiedenen Geschwindigkeiten.

Tab. 13: Fliehkräfte für Maximalgeschwindigkeit⁵

Geometrie, Geschwindigkeiten und Faktoren				Lastmodelle		
				71	SW/0	SW/2
R	ü	max. V	f	Q_{tk}	q_{tk}	q_{tk}
(m)	(mm)	(km/h)	-	(kN)	(kN/m)	(kN/m)
250,0	160,00	78,38	1,000	24,2	25,7	29,0
500,0	160,00	110,84	1,000	24,2	25,7	-
750,0	160,00	135,75	0,979	23,7	25,2	-
1000,0	160,00	156,75	0,956	23,1	24,6	-
1250,0	160,00	175,25	0,939	22,7	24,2	-
1500,0	160,00	191,98	0,926	22,4	23,8	-
1750,0	139,77	200,00	0,920	20,7	22,0	-
2000,0	106,05	200,00	0,920	18,1	19,3	-
2250,0	79,82	200,00	0,920	16,1	17,1	-
2500,0	58,84	200,00	0,920	14,5	15,4	-
2750,0	41,67	200,00	0,920	13,2	14,0	-
3000,0	27,36	200,00	0,920	12,1	12,8	-
3150,0	20,00	200,00	0,920	11,5	12,2	-
3630,0	0,00	200,00	0,920	10,0	10,6	-

⁵ Maximalgeschwindigkeiten würden in Tab. 2, Seite 15 ermittelt

Tab. 14: Fliehkräfte für $V = 120$ km/h

Geometrie, Geschwindigkeiten und Faktoren				Lastmodelle		
				71	SW/0	SW/2
R	ü	V	f	Q_{tk}	q_{tk}	q_{tk}
(m)	(mm)	(km/h)	-	(kN)	(kN)	(kN)
750,0	160,00	120,0	1,00	18,9	20,1	-
1000,0	160,00	120,0	1,00	14,2	15,1	-
1250,0	160,00	120,0	1,00	11,3	12,1	-
1500,0	160,00	120,0	1,00	9,4	10,1	-
1750,0	139,77	120,0	1,00	8,1	8,6	-
2000,0	106,05	120,0	1,00	7,1	7,5	-
2250,0	79,82	120,0	1,00	6,3	6,7	-
2500,0	58,84	120,0	1,00	5,7	6,0	-
2750,0	41,67	120,0	1,00	5,2	5,5	-
3000,0	27,36	120,0	1,00	4,7	5,0	-
3150,0	20,00	120,0	1,00	4,5	4,8	-
3630,0	0,00	120,0	1,00	3,9	4,2	-

Tab. 15: Fliehkräfte für $V = 80$ km/h

Geometrie, Geschwindigkeiten und Faktoren				Lastmodelle		
				71	SW/0	SW/2
R	ü	V	f	Q_{tk}	q_{tk}	q_{tk}
(m)	(mm)	(km/h)	-	(kN)	(kN/m)	(kN/m)
250,0	160,00	78,38	1,00	24,2	25,7	29,0
500,0	160,00	80,00	1,00	12,6	13,4	15,1
750,0	160,00	80,00	1,00	8,4	8,9	10,1
1000,0	160,00	80,00	1,00	6,3	6,7	7,6
1250,0	160,00	80,00	1,00	5,0	5,4	6,0
1500,0	160,00	80,00	1,00	4,2	4,5	5,0
1750,0	139,77	80,00	1,00	3,6	3,8	4,3
2000,0	106,05	80,00	1,00	3,1	3,4	3,8
2250,0	79,82	80,00	1,00	2,8	3,0	3,4
2500,0	58,84	80,00	1,00	2,5	2,7	3,0
2750,0	41,67	80,00	1,00	2,3	2,4	2,7
3000,0	27,36	80,00	1,00	2,1	2,2	2,5
3150,0	20,00	80,00	1,00	2,0	2,1	2,4
3630,0	0,00	80,00	1,00	1,7	1,8	2,1

Da die Einflussfläche A_{s1} nur von den geometrischen Randbedingungen und der Lastausbreitung durch das Schotterbett abhängt, ergibt sie sich wie in Kapitel 4.2.3.1. Die Werte sind in der Tab. 6 dargestellt.

Die Belastungen und die Spannungen werden wie folgt ermittelt:

Die Horizontalkraft Q_{tk} wird über den Hebelarm h_{tk} auf ein M_{tk} an der Oberkante des Grobbleches umgerechnet:

$$N_{tk} = 0 \text{ kN} \quad (29)$$

$$h_{tk} = h_s + 75 \sin \alpha + 197 \cos \alpha^6 \quad (30)$$

$$M_{tk} = Q_{tk} \times h_{tk} \quad (31)$$

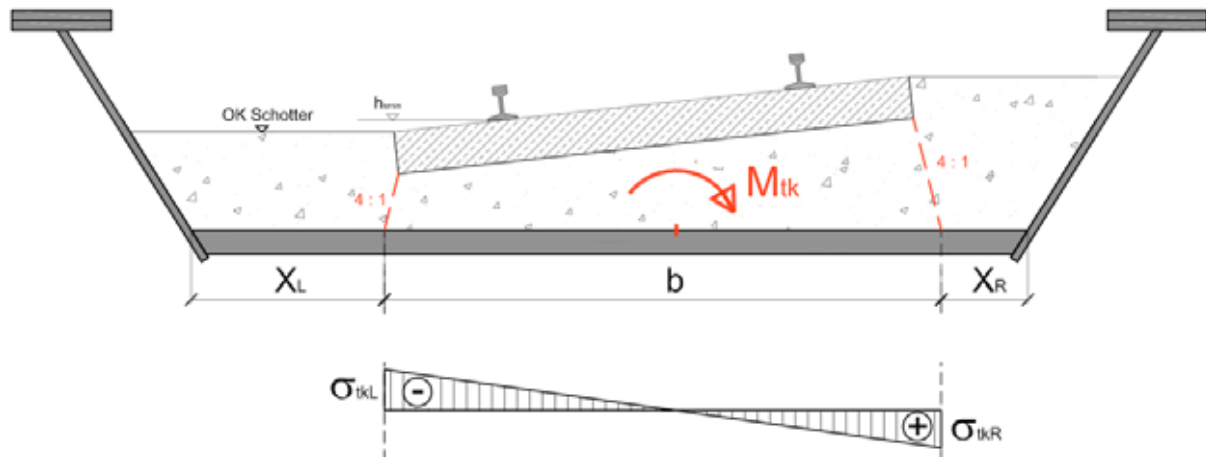


Abb. 20: Biegemoment aus der Fliehkraft und zugehöriges Spannungsdiagramm

Die Spannungen (Abb. 20) werden mit den Formeln (30) und (31) berechnet:

$$\sigma_{tkL} = \frac{M_{tk}}{W_L} \quad (32)$$

$$\sigma_{tkR} = \frac{M_{tk}}{W_R} \quad (33)$$

Die Tab. 16 zeigt die Werte M_{tk} , welche sich bei Anwendung der unterschiedlichen Lastmodellen ergibt. Tab. 17 zeigt die Werte der Spannungen σ_{tkL} und σ_{tkR} .

In den Tabellen 16 und 17 werden die Spannungen für das Lastmodell SW/2 aufgrund der niedrigeren Höchstgeschwindigkeit (80 km/h), nicht für alle Radien berechnet. Bei den Radien mit der Maximalgeschwindigkeit über 80 km/h wird die Spannungsrechnung aus SW/2 vernachlässigt.

⁶ Ableitung der Formel (30) für h_{tk} wird im Anhang A dargestellt

Tab. 16: Biegemomente der Fliehkräfte für die maximale Geschwindigkeit

hs [cm]	R (m)	üi [mm]	V _{max.} (km/h)	h _{tk} (cm)	LM 71	SW/0	SW/2
					M _{tk} (kNm)	M _{tk} (kNm)	M _{tk} (kNm)
38,5	250,0	160,00	78,38	242,38	58,62	62,37	70,34
	500,0	160,00	110,84	242,38	58,62	62,37	-
	750,0	160,00	135,75	242,38	57,39	61,06	-
	1000,0	160,00	156,75	242,38	56,05	59,63	-
	1250,0	160,00	175,25	242,38	55,06	58,58	-
	1500,0	160,00	191,98	242,38	54,27	57,74	-
	1750,0	139,77	200,00	241,63	50,01	53,21	-
	2000,0	106,05	200,00	240,31	43,52	46,30	-
	2250,0	79,82	200,00	239,21	38,51	40,97	-
	2500,0	58,84	200,00	238,29	34,52	36,73	-
	2750,0	41,67	200,00	237,51	31,28	33,28	-
	3000,0	27,36	200,00	236,84	28,59	30,42	-
	3150,0	20,00	200,00	236,48	27,21	28,95	-
	3630,0	0,00	200,00	235,50	23,50	25,00	-
55	250,0	160,00	78,38	258,88	62,61	66,61	75,13
	500,0	160,00	110,84	258,88	62,61	66,61	-
	750,0	160,00	135,75	258,88	61,29	65,22	-
	1000,0	160,00	156,75	258,88	59,86	63,69	-
	1250,0	160,00	175,25	258,88	58,80	62,57	-
	1500,0	160,00	191,98	258,88	57,97	61,68	-
	1750,0	139,77	200,00	258,13	53,42	56,84	-
	2000,0	106,05	200,00	256,81	46,51	49,48	-
	2250,0	79,82	200,00	255,71	41,16	43,80	-
	2500,0	58,84	200,00	254,79	36,91	39,28	-
	2750,0	41,67	200,00	254,01	33,45	35,59	-
	3000,0	27,36	200,00	253,34	30,58	32,54	-
	3150,0	20,00	200,00	252,98	29,11	30,97	-
	3630,0	0,00	200,00	252,00	25,14	26,75	-
71,5	250,0	160,00	78,38	275,38	66,60	70,86	79,92
	500,0	160,00	110,84	275,38	66,60	70,86	-
	750,0	160,00	135,75	275,38	65,20	69,37	-
	1000,0	160,00	156,75	275,38	63,68	67,75	-
	1250,0	160,00	175,25	275,38	62,55	66,56	-
	1500,0	160,00	191,98	275,38	61,66	65,61	-
	1750,0	139,77	200,00	274,63	56,84	60,48	-
	2000,0	106,05	200,00	273,31	49,49	52,66	-
	2250,0	79,82	200,00	272,21	43,82	46,62	-
	2500,0	58,84	200,00	271,29	39,30	41,82	-
	2750,0	41,67	200,00	270,51	35,63	37,91	-
	3000,0	27,36	200,00	269,84	32,58	34,66	-
	3150,0	20,00	200,00	269,48	31,01	32,99	-
	3630,0	0,00	200,00	268,50	26,79	28,50	-

Tab. 17: Spannungen der Fliehkraft für die maximale Geschwindigkeit

		LM 71		SW/0		SW/2	
hs	R	σ_{tkL}	σ_{tkR}	σ_{tkL}	σ_{tkR}	σ_{tkL}	σ_{tkR}
[cm]	(m)	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²
38,5	250,0	-131,83	117,01	-140,27	124,50	-158,19	140,41
	500,0	-131,83	117,01	-140,27	124,50	-	-
	750,0	-129,06	114,56	-137,32	121,89	-	-
	1000,0	-126,05	111,88	-134,11	119,04	-	-
	1250,0	-123,82	109,90	-131,75	116,94	-	-
	1500,0	-122,06	108,34	-129,87	115,27	-	-
	1750,0	-113,14	101,81	-120,38	108,32	-	-
	2000,0	-99,54	91,72	-105,92	97,59	-	-
	2250,0	-88,92	83,51	-94,61	88,86	-	-
	2500,0	-80,38	76,70	-85,53	81,61	-	-
	2750,0	-73,36	70,93	-78,05	75,47	-	-
	3000,0	-67,48	65,99	-71,80	70,21	-	-
	3150,0	-64,44	63,39	-68,56	67,45	-	-
	3630,0	-56,17	56,17	-59,77	59,77	-	-
55	250,0	-107,92	97,81	-114,83	104,07	-129,50	117,38
	500,0	-107,92	97,81	-114,83	104,07	-	-
	750,0	-105,65	95,76	-112,42	101,89	-	-
	1000,0	-103,18	93,52	-109,79	99,51	-	-
	1250,0	-101,36	91,87	-107,85	97,75	-	-
	1500,0	-99,92	90,56	-106,31	96,36	-	-
	1750,0	-92,57	84,87	-98,50	90,31	-	-
	2000,0	-81,37	76,09	-86,58	80,96	-	-
	2250,0	-72,62	69,00	-77,27	73,41	-	-
	2500,0	-65,60	63,14	-69,80	67,18	-	-
	2750,0	-59,83	58,21	-63,66	61,94	-	-
	3000,0	-55,00	54,01	-58,52	57,47	-	-
	3150,0	-52,50	51,81	-55,86	55,13	-	-
	3630,0	-45,72	45,72	-48,65	48,65	-	-
71,5	250,0	-91,33	84,00	-97,17	89,38	-109,59	100,80
	500,0	-91,33	84,00	-97,17	89,38	-	-
	750,0	-89,41	82,24	-95,13	87,50	-	-
	1000,0	-87,32	80,32	-92,91	85,46	-	-
	1250,0	-85,78	78,90	-91,27	83,95	-	-
	1500,0	-84,56	77,77	-89,97	82,75	-	-
	1750,0	-78,31	72,75	-83,32	77,40	-	-
	2000,0	-68,79	64,99	-73,19	69,15	-	-
	2250,0	-61,36	58,76	-65,29	62,52	-	-
	2500,0	-55,40	53,64	-58,94	57,07	-	-
	2750,0	-50,50	49,35	-53,73	52,51	-	-
	3000,0	-46,40	45,70	-49,37	48,63	-	-
	3150,0	-44,29	43,80	-47,12	46,60	-	-
	3630,0	-38,55	38,55	-41,01	41,01	-	-

Die resultierenden charakteristischen Lasten auf das Grobblech werden durch Multiplikation der Spannungen σ_{tkL} und σ_{tkR} mit den Breiten b_L und b_R berechnet. Die Formeln für q_{tkL} und q_{tkR} lauten wie folgt:

$$q_{tkL} = \sigma_{tkL} b_L \quad (34)$$

$$q_{tkR} = \sigma_{tkR} b_R \quad (35)$$

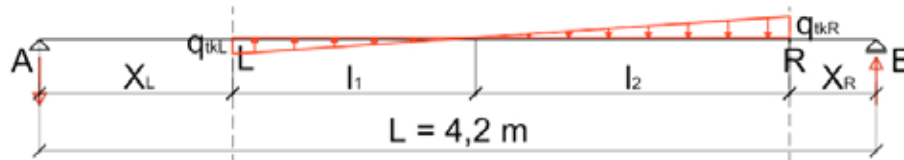


Abb. 21: Lasten aus der Fliehkraft

Da die Fliehkraft von der Geschwindigkeit des Zuges und der Radien der Gleisachse abhängig ist, werden die Lasten tabellarisch für drei charakteristische Geschwindigkeiten berechnet. Die Werte q_{tkL} und q_{tkR} sind in Abhängigkeit der Radien und Geschwindigkeit in Tabellen 18, 19 und 20 dargestellt.

Wie bereits erwähnt, ist das Lastmodell SW/2 nur bis zu einer Geschwindigkeit von 80 km/h zu berücksichtigen. Bei den Radien mit höherer Maximalgeschwindigkeit (Tab. 18) wird die Belastung aus SW/2 nicht mitgerechnet.

Tab. 18 (Teil 1): Lasten aus der Fliehkraft für die maximale Geschwindigkeit

hs	R	LM 71		SW/0		SW/2	
		q_{tkL}	q_{tkR}	q_{tkL}	q_{tkR}	q_{tkL}	q_{tkR}
[cm]	(m)	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
38,5	250,0	-42,02	53,52	-44,71	56,95	-50,43	64,23
	500,0	-42,02	53,52	-44,71	56,95	-	-
	750,0	-41,14	52,40	-43,77	55,76	-	-
	1000,0	-40,18	51,18	-42,75	54,45	-	-
	1250,0	-39,47	50,27	-42,00	53,49	-	-
	1500,0	-38,91	49,56	-41,40	52,73	-	-
	1750,0	-36,47	45,15	-38,80	48,04	-	-
	2000,0	-32,68	38,54	-34,77	41,01	-	-
	2250,0	-29,61	33,59	-31,51	35,74	-	-
	2500,0	-27,07	29,74	-28,80	31,65	-	-
	2750,0	-24,93	26,67	-26,53	28,38	-	-
	3000,0	-23,11	24,17	-24,59	25,71	-	-
	3150,0	-22,16	22,89	-23,57	24,36	-	-
	3630,0	-19,52	19,52	-20,77	20,77	-	-

Tab. 18 (Teil 2): Lasten aus der Fliehkraft für die maximale Geschwindigkeit

hs [cm]	R (m)	LM 71		SW/0		SW/2	
		q _{tkL} kN/m	q _{tkR} kN/m	q _{tkL} kN/m	q _{tkR} kN/m	q _{tkL} kN/m	q _{tkR} kN/m
55	250,0	-43,30	52,81	-46,08	56,19	-51,96	63,38
	500,0	-43,30	52,81	-46,08	56,19	-	-
	750,0	-42,40	51,71	-45,11	55,01	-	-
	1000,0	-41,40	50,50	-44,05	53,73	-	-
	1250,0	-40,67	49,61	-43,28	52,78	-	-
	1500,0	-40,09	48,90	-42,66	52,03	-	-
	1750,0	-37,48	44,64	-39,87	47,50	-	-
	2000,0	-33,43	38,25	-35,57	40,70	-	-
	2250,0	-30,18	33,44	-32,11	35,58	-	-
	2500,0	-27,51	29,69	-29,27	31,59	-	-
	2750,0	-25,27	26,69	-26,89	28,40	-	-
	3000,0	-23,37	24,24	-24,87	25,79	-	-
	3150,0	-22,38	22,99	-23,82	24,46	-	-
	3630,0	-19,66	19,66	-20,92	20,92	-	-
71,5	250,0	-44,18	52,29	-47,01	55,63	-53,02	62,74
	500,0	-44,18	52,29	-47,01	55,63	-	-
	750,0	-43,25	51,19	-46,02	54,46	-	-
	1000,0	-42,24	49,99	-44,95	53,19	-	-
	1250,0	-41,50	49,11	-44,15	52,25	-	-
	1500,0	-40,91	48,41	-43,52	51,51	-	-
	1750,0	-38,16	44,26	-40,61	47,10	-	-
	2000,0	-33,93	38,03	-36,11	40,47	-	-
	2250,0	-30,56	33,33	-32,51	35,46	-	-
	2500,0	-27,80	29,65	-29,58	31,55	-	-
	2750,0	-25,50	26,70	-27,13	28,41	-	-
	3000,0	-23,55	24,28	-25,06	25,83	-	-
	3150,0	-22,54	23,04	-23,98	24,52	-	-
	3630,0	-19,75	19,75	-21,02	21,02	-	-

Tab. 19: Lasten aus der Fliehkräfte für $V = 120 \text{ km/h}$

h_s [cm]	R (m)	$V_{\max.}$ (km/h)	h_{tk} (cm)	LM 71		SW/0	
				q_{tkL} kN/m	q_{tkR} kN/m	q_{tkL} kN/m	q_{tkR} kN/m
38,5	750,0	120,0	242,37	-32,84	41,82	-34,94	44,50
	1000,0	120,0	242,37	-24,63	31,37	-26,20	33,38
	1250,0	120,0	242,37	-19,70	25,09	-20,96	26,70
	1500,0	120,0	242,37	-16,42	20,91	-17,47	22,25
	1750,0	120,0	241,62	-14,27	17,67	-15,18	18,80
	2000,0	120,0	240,31	-12,79	15,08	-13,61	16,05
	2250,0	120,0	239,21	-11,59	13,14	-12,33	13,99
	2500,0	120,0	238,29	-10,59	11,64	-11,27	12,38
	2750,0	120,0	237,51	-9,76	10,44	-10,38	11,11
	3000,0	120,0	236,84	-9,04	9,46	-9,62	10,06
	3150,0	120,0	236,48	-8,66	8,95	-9,22	9,53
	3630,0	120,0	235,50	-7,64	7,64	-8,13	8,13
55	750,0	120,0	258,87	-33,84	41,27	-36,00	43,91
	1000,0	120,0	258,87	-25,38	30,95	-27,00	32,93
	1250,0	120,0	258,87	-20,30	24,76	-21,60	26,35
	1500,0	120,0	258,87	-16,92	20,63	-18,00	21,95
	1750,0	120,0	258,12	-14,67	17,47	-15,60	18,59
	2000,0	120,0	256,81	-13,08	14,97	-13,92	15,93
	2250,0	120,0	255,71	-11,81	13,09	-12,56	13,92
	2500,0	120,0	254,79	-10,76	11,62	-11,45	12,36
	2750,0	120,0	254,01	-9,89	10,45	-10,52	11,11
	3000,0	120,0	253,34	-9,15	9,48	-9,73	10,09
	3150,0	120,0	252,98	-8,75	8,99	-9,31	9,56
	3630,0	120,0	252,00	-7,69	7,69	-8,19	8,19
71,5	750,0	120,0	275,37	-34,52	40,86	-36,73	43,47
	1000,0	120,0	275,37	-25,89	30,64	-27,55	32,60
	1250,0	120,0	275,37	-20,71	24,51	-22,04	26,08
	1500,0	120,0	275,37	-17,26	20,43	-18,37	21,74
	1750,0	120,0	274,62	-14,93	17,32	-15,89	18,43
	2000,0	120,0	273,31	-13,28	14,88	-14,13	15,84
	2250,0	120,0	272,21	-11,96	13,04	-12,72	13,88
	2500,0	120,0	271,29	-10,88	11,60	-11,57	12,35
	2750,0	120,0	270,51	-9,98	10,45	-10,62	11,12
	3000,0	120,0	269,84	-9,22	9,50	-9,81	10,11
	3150,0	120,0	269,48	-8,81	9,01	-9,38	9,59
	3630,0	120,0	268,50	-7,73	7,73	-8,23	8,23

Tab. 20: Lasten aus der Fliehkräfte für V= 80 km/h

hs [cm]	R (m)	LM 71		SW/0		SW/2	
		q _{tkL} kN/m	q _{tkR} kN/m	q _{tkL} kN/m	q _{tkR} kN/m	q _{tkL} kN/m	q _{tkR} kN/m
38,5	250,0	-42,02	53,52	-44,71	56,95	-50,43	64,23
	500,0	-21,89	27,88	-23,29	29,67	-26,27	33,46
	750,0	-14,59	18,59	-15,53	19,78	-17,51	22,31
	1000,0	-10,95	13,94	-11,65	14,83	-13,13	16,73
	1250,0	-8,76	11,15	-9,32	11,87	-10,51	13,38
	1500,0	-7,30	9,29	-7,76	9,89	-8,76	11,15
	1750,0	-6,34	7,85	-6,75	8,35	-7,61	9,42
	2000,0	-5,68	6,70	-6,05	7,13	-6,82	8,04
	2250,0	-5,15	5,84	-5,48	6,22	-6,18	7,01
	2500,0	-4,71	5,17	-5,01	5,50	-5,65	6,21
	2750,0	-4,34	4,64	-4,61	4,94	-5,20	5,57
	3000,0	-4,02	4,20	-4,28	4,47	-4,82	5,04
	3150,0	-3,85	3,98	-4,10	4,23	-4,62	4,77
	3630,0	-3,39	3,39	-3,61	3,61	-4,07	4,07
55	250,0	-43,30	52,81	-46,08	56,19	-51,96	63,38
	500,0	-22,56	27,51	-24,00	29,27	-27,07	33,02
	750,0	-15,04	18,34	-16,00	19,52	-18,05	22,01
	1000,0	-11,28	13,76	-12,00	14,64	-13,54	16,51
	1250,0	-9,02	11,01	-9,60	11,71	-10,83	13,21
	1500,0	-7,52	9,17	-8,00	9,76	-9,02	11,01
	1750,0	-6,52	7,76	-6,94	8,26	-7,82	9,32
	2000,0	-5,81	6,65	-6,19	7,08	-6,98	7,98
	2250,0	-5,25	5,82	-5,58	6,19	-6,30	6,98
	2500,0	-4,78	5,16	-5,09	5,49	-5,74	6,20
	2750,0	-4,40	4,64	-4,68	4,94	-5,27	5,57
	3000,0	-4,07	4,22	-4,33	4,49	-4,88	5,06
	3150,0	-3,89	3,99	-4,14	4,25	-4,67	4,79
	3630,0	-3,42	3,42	-3,64	3,64	-4,10	4,10
71,5	250,0	-44,18	52,29	-47,01	55,63	-53,02	62,74
	500,0	-23,02	27,24	-24,49	28,98	-27,62	32,68
	750,0	-15,34	18,16	-16,33	19,32	-18,41	21,79
	1000,0	-11,51	13,62	-12,24	14,49	-13,81	16,34
	1250,0	-9,21	10,89	-9,80	11,59	-11,05	13,07
	1500,0	-7,67	9,08	-8,16	9,66	-9,21	10,89
	1750,0	-6,64	7,70	-7,06	8,19	-7,97	9,24
	2000,0	-5,90	6,61	-6,28	7,04	-7,08	7,94
	2250,0	-5,31	5,80	-5,65	6,17	-6,38	6,96
	2500,0	-4,83	5,16	-5,14	5,49	-5,80	6,19
	2750,0	-4,43	4,64	-4,72	4,94	-5,32	5,57
	3000,0	-4,10	4,22	-4,36	4,49	-4,92	5,07
	3150,0	-3,92	4,00	-4,17	4,26	-4,70	4,81
	3630,0	-3,44	3,44	-3,66	3,66	-4,12	4,12

4.2.4.2 Der Seitenstoß

Der Seitenstoß ist lt. [5] als horizontal in Schienenoberkante angreifende Einzellast rechtwinklig zur Gleisachse anzusetzen (siehe Abb. 22). Er ist sowohl bei geraden als auch bei gebogenen Gleisen zu berücksichtigen.

Der charakteristische Wert wird lt. [5] mit $Q_{sk} = 100 \text{ kN}$ vordefiniert und ist mit dem α -Wert zu multiplizieren, jedoch nicht mit dem Beiwert Φ noch mit dem Beiwert f . Der Seitenstoß ist immer mit einer Vertikalbelastung zu kombinieren.

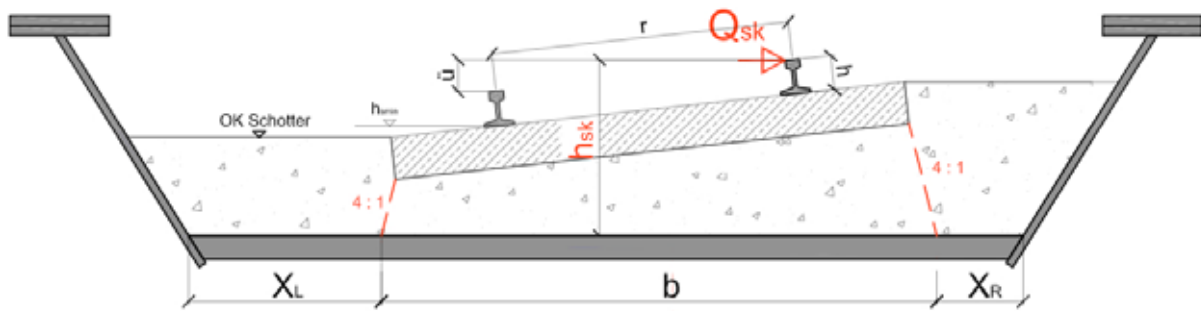


Abb. 22: Querschnitt mit dem Seitenstoß

Legende:

Q_{sk} charakteristischer Wert der Horizontalkraft (der Seitenstoß)
 h_{sk} Höhe des Seitenstoßes

Für den Seitenstoß wird die gleiche belastete Fläche wie bei der Fliehkraft bzw. der Vertikallasten angenommen. Die Werte sind in der Tab. 6 und 7 dargestellt. Die Lastumordnung (Abb. 23) wird mit den Formeln (36) und (37) berechnet:

$$N_{sk} = 0 \text{ kN} \quad (36)$$

$$h_{sk} = h_s + 150 \sin \alpha + 17 \cos \alpha^7 \quad (37)$$

$$M_{sk} = Q_{sk} \times h_{sk} \quad (38)$$

Die Spannungen werden mit folgenden Formeln berechnet:

$$\sigma_{skL} = \frac{M_{sk}}{W_L} \quad (39)$$

$$\sigma_{skR} = \frac{M_{sk}}{W_R} \quad (40)$$

Die resultierenden Lasten auf das Grobblech ergeben sich mit den Formeln (41) und (42):

$$q_{skL} = \sigma_{skL} b_L \quad (41)$$

$$q_{skR} = \sigma_{skR} b_R \quad (42)$$

⁷ Ableitung der Formel (37) für h_{sk} wird im Anhang A dargestellt.

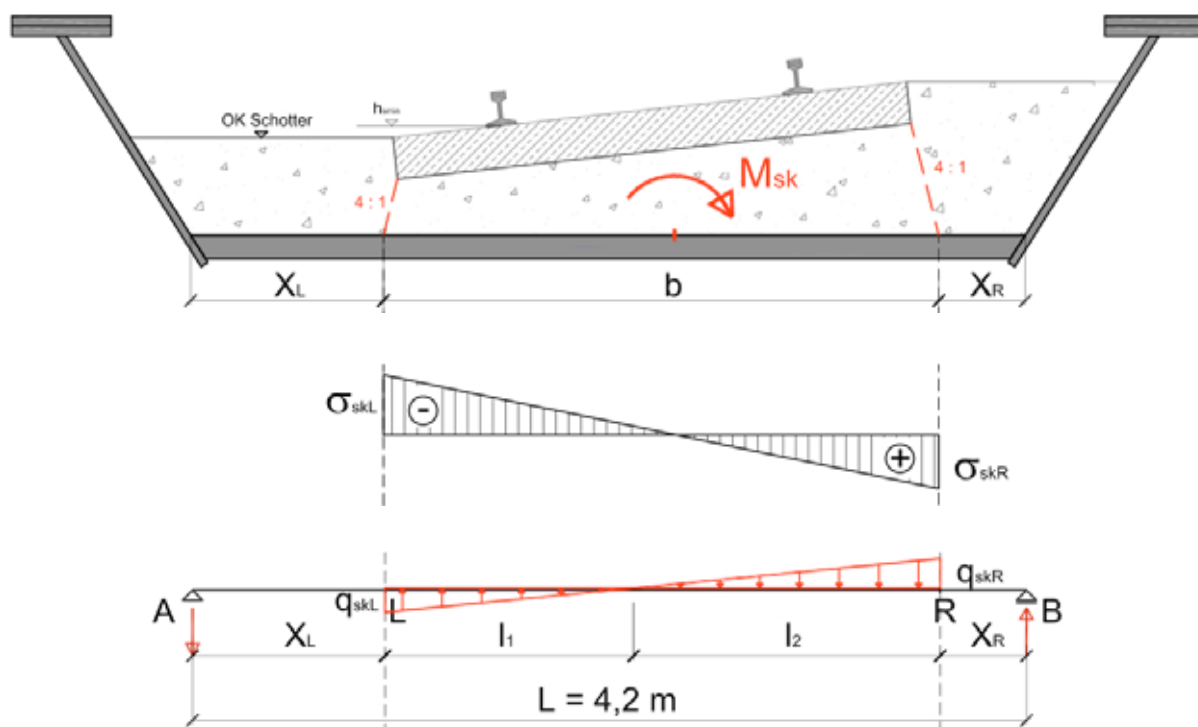


Abb. 23: Lastumordnung, Spannungsdigramm und Lasten aus dem Seitenstoß

Die Werte der Einwirkungen aus dem Seitenstoß werden in Abhängigkeit verschiedener Schotterbetthöhen und Überhöhungen in Tab. 21 dargestellt.

Tab. 21: Belastung aus dem Seitenstoß

h_s [cm]	$\ddot{u}_i$ [mm]	h_{sk} (cm)	M_{sk} (kNm)	σ_{skL} (kN/m ²)	σ_{skR} (kN/m ²)	q_{skL} (kN/m)	q_{skR} (kN/m)
38,5	160,00	71,40	71,40	-160,59	142,53	-51,19	65,20
	139,77	69,40	69,40	-157,02	141,29	-50,61	62,66
	106,05	66,06	66,06	-151,11	139,23	-49,61	58,51
	79,82	63,46	63,46	-146,54	137,63	-48,80	55,35
	58,84	61,37	61,37	-142,90	136,35	-48,13	52,87
	41,67	59,66	59,66	-139,92	135,29	-47,56	50,87
	27,36	58,23	58,23	-137,43	134,40	-47,07	49,22
	20,00	57,50	57,50	-136,15	133,94	-46,82	48,38
55	0,00	55,50	55,50	-132,68	132,68	-46,10	46,10
	160,00	87,90	87,90	-151,52	137,34	-60,80	74,15
	139,77	85,90	85,90	-148,85	136,47	-60,26	71,78
	106,05	82,56	82,56	-144,45	135,08	-59,35	67,91
	79,82	79,96	79,96	-141,07	134,03	-58,62	64,96
	58,84	77,87	77,87	-138,39	133,20	-58,03	62,64
	41,67	76,16	76,16	-136,21	132,53	-57,53	60,77
	27,36	74,73	74,73	-134,39	131,98	-57,12	59,22
71,5	20,00	74,00	74,00	-133,46	131,70	-56,90	58,43
	0,00	72,00	72,00	-130,94	130,94	-56,30	56,30
	160,00	104,40	104,40	-143,17	131,69	-69,26	81,97
	139,77	102,40	102,40	-141,09	131,06	-68,76	79,75
	106,05	99,06	99,06	-137,68	130,07	-67,92	76,12
	79,82	96,46	96,46	-135,07	129,35	-67,27	73,36
	58,84	94,37	94,37	-133,01	128,79	-66,74	71,19
	41,67	92,66	92,66	-131,34	128,35	-66,31	69,44
71,5	27,36	91,23	91,23	-129,96	127,99	-65,95	67,99
	20,00	90,50	90,50	-129,25	127,81	-65,77	67,25
	0,00	88,50	88,50	-127,34	127,34	-65,26	65,26

5. Statisches System – Berechnungsgrundlagen

Das statische System des Grobbleches wird als Einfeldträger modelliert. Die Einwirkungen werden in der Form von veränderlichen Streckenlasten berücksichtigt.

5.1 Schnittgrößen aus ständigen Einwirkungen

Das statische System:

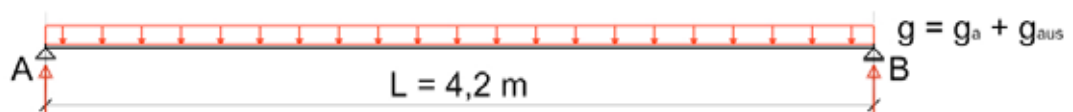


Abb. 24: ständige Lasten

Schnittgrößenermittlung:

- Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A = B = \frac{gL}{2} \quad (43)$$

- Berechnung der Biegemomente, $M_g(x)$;

$$M(x) = Ax - \frac{gx^2}{2} = \frac{gx}{2}(L - x) \quad (44)$$

- Berechnung der Querkräfte, $Q_g(x)$;

$$Q(x) = A - gx = g\left(\frac{L}{2} - x\right) \quad (45)$$



Abb. 25: Verlauf von $M(x)$ und $Q(x)$ aus ständigen Lasten

5.2 Schnittgrößen aus veränderlichen Einwirkungen

5.2.1 Vertikale Einwirkungen lokal

5.2.1.1 Lastmodel 71

Die Abb. 26 (15) zeigt das statische System des Grobbleches mit der Belastung lt. LM 71, welche vorher ermittelt wurde (siehe Tab. 9):

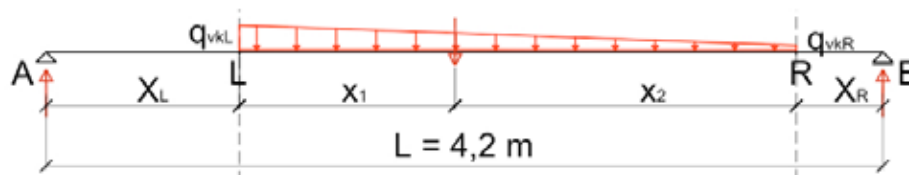


Abb. 26 (15): Lastmodel 71 lokal

- Abmessungen:

$$X_L = 210 + 51,75 \sin \alpha - 124,75 \cos \alpha - 0,25 h_s + e^* + e_2 \quad (46)$$

$$X_R = L - X_L - b \quad (47)$$

$$x_1 = \frac{b}{3} \frac{q_{vkL} + 2q_{vkR}}{q_{vkL} + q_{vkR}} \quad (48)$$

$$x_2 = \frac{b}{3} \frac{2q_{vkL} + q_{vkR}}{q_{vkL} + q_{vkR}} \quad (49)$$

- Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A = \frac{q_{vkL} + q_{vkR}}{2} b \frac{X_R + x_2}{L} \quad (50)$$

$$B = \frac{q_{vkL} + q_{vkR}}{2} b \frac{X_L + x_1}{L} \quad (51)$$

- Berechnung der Biegemomente, $M(x)$:

$$x \leq X_L \quad M(x) = Ax; \quad (52)$$

$$X_L < x \leq (X_L + b) \quad M(x) = Ax - q_{vkL} \frac{(x - X_L)^2}{2} + \frac{(q_{vkL} - q_{vkR})}{6b} (x - X_L)^3; \quad (53)$$

$$(X_L + b) \leq x \leq L \quad M(x) = B(L - x) \quad (54)$$

- Berechnung der Querkräfte, $Q(x)$:

$$x \leq X_L \quad Q(x) = A; \quad (55)$$

$$X_L < x \leq (X_L + b) \quad Q(x) = A - q_{vkL} (x - X_L) + \frac{q_{vkL} - q_{vkR}}{2b} (x - X_L)^2; \quad (56)$$

$$(X_L + b) \leq x \leq L \quad Q(x) = -B; \quad (57)$$

- Stelle des maximalen Momentes:

$$X = X_L + \frac{1}{2} \left[q_{vKL} \frac{2b}{q_{vKL} - q_{vKR}} - \sqrt{\frac{2b}{q_{vKL} - q_{vKR}} \left(\frac{q_{vKL}^2 2b}{q_{vKL} - q_{vKR}} - 4A \right)} \right] \quad (58)$$

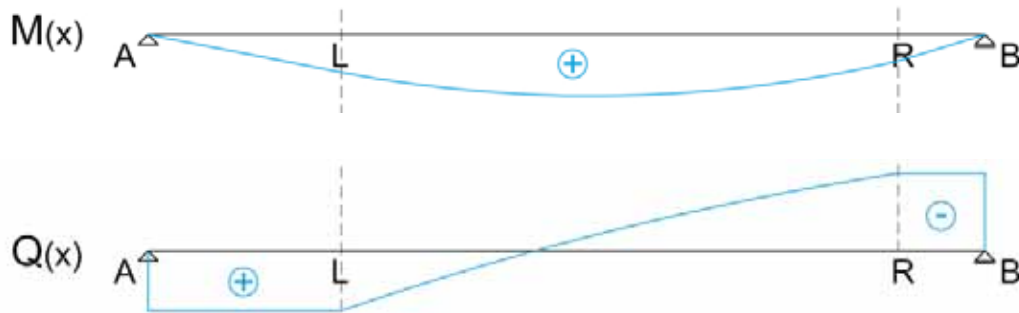


Abb. 27: Schnittgrößenverlauf - M(x) und Q(x) aus dem Lastmodell 71

5.2.1.2 Lastmodelle SW/0 und SW/2

Das System:

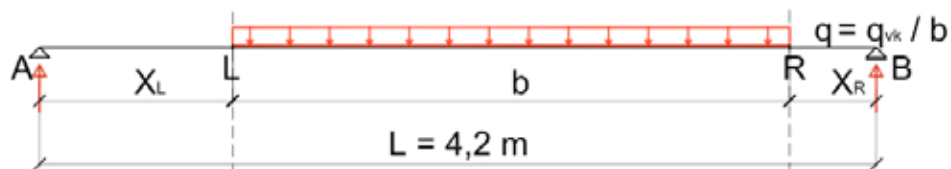


Abb. 28 (18): Lasten aus der SW/0 bzw. SW/2

Die Abmessungen X_L und X_R des Systems werden mit den Formeln (46) und (47) berechnet. Die Länge b wird nach der Formel (10) berechnet.

- Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A = \frac{qb(2X_R + b)}{2L} \quad (59)$$

$$B = \frac{qb(2X_L + b)}{2L} \quad (60)$$

- Berechnung der Biegemomente, $M(x)$:

$$x \leq X_L \quad M(x) = Ax ; \quad (61)$$

$$X_L < x \leq (X_L + b) \quad M(x) = Ax - \frac{q(x - X_L)^2}{2} ; \quad (62)$$

$$(X_L + b) \leq x \leq L \quad M(x) = B(L - x) ; \quad (63)$$

- Berechnung der Querkräfte, $Q(x)$:

$$x \leq X_L \quad Q(x) = A ; \quad (64)$$

$$X_L < x \leq (X_L + b) \quad Q(x) = A - q(x - X_L) ; \quad (65)$$

$$(X_L + b) \leq x \leq L \quad Q(x) = -B ; \quad (66)$$

- Stelle des maximalen Momentes:

$$X = \frac{A}{q} + X_L = \frac{b(2X_R + b)}{2L} + X_L \quad (67)$$

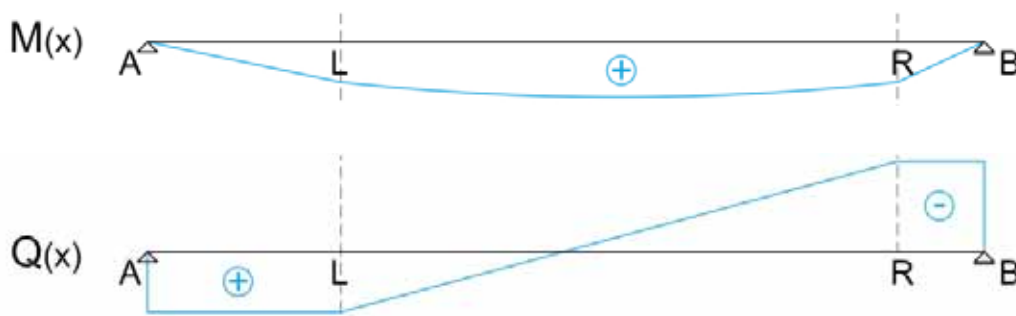


Abb. 29: Schnittgrößenverlauf - $M(x)$ und $Q(x)$ aus den Vertikallasten für die Lastmodelle SW/0 und SW/2

- Stelle des minimalen Momentes:

$$X = X_L + l_1 \pm \sqrt{l_1^2 - \frac{2l_1 A_{tk}}{q_{tkL}}} \quad \text{für} \quad X_L < X \leq X_L + l_1 \quad (80)$$

- Stelle des maximalen Momentes:

$$X = X_L + l_1 + \sqrt{\left(A_{tk} - \frac{q_{tkL} l_1}{2}\right) \frac{2l_2}{q_{tkR}}} \quad \text{für} \quad X_L + l_1 < X \leq X_L + l_1 + l_2 \quad (81)$$

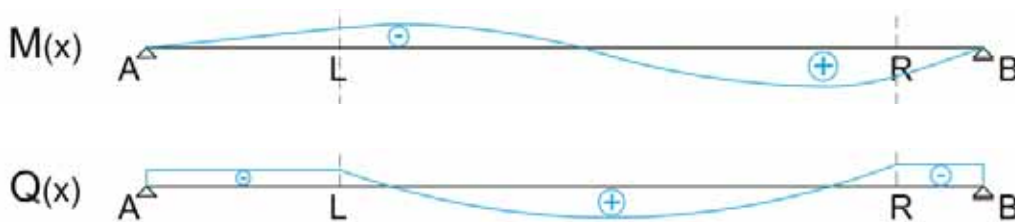


Abb. 31: Diagramm M(x) und Q(x) für Horizontallasten aus der Fliehkraft

5.2.2.2 Der Seitenstoß

Das System:

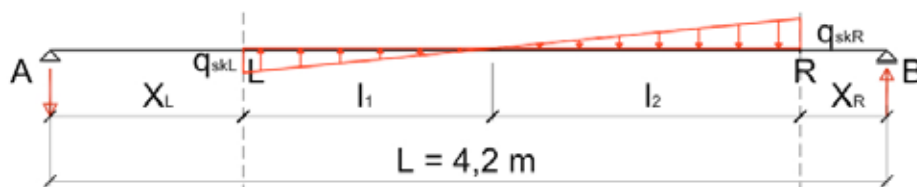


Abb. 32: Lasten aus dem Seitenstoß

- Die Abmessungen X_L und X_R wurden in Kapitel 5.2.1.1 berechnet. Die Hilfswerte l_1 und l_2 werden mit folgenden Formeln berechnet:

$$l_1 = \frac{|q_{skL}|b}{q_{skR} - |q_{skL}|} \quad (82)$$

$$l_2 = b - l_1 \quad (83)$$

- Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A = \frac{1}{L} \left[\frac{q_{skL} l_1}{2} \left(\frac{2}{3} l_1 + l_2 + X_R \right) + \frac{q_{skR} l_2}{2} \left(\frac{1}{3} l_1 + X_R \right) \right] \quad (84)$$

$$B = Q_{skL} + Q_{skR} - A \quad (85)$$

- Berechnung der Biegemomente, $M(x)$:

$$x \leq X_L \quad M(x) = Ax; \quad (86)$$

$$X_L < x \leq (X_L + l_1) \quad M(x) = Ax - q_{skL} \frac{(x - X_L)^2}{6} \frac{X_L + 3l_1 - x}{l_1}; \quad (87)$$

$$(X_L + l_1) < x \leq (X_L + l_1 + l_2) \quad M(x) = Ax - \frac{q_{skL} l_1}{2} \left(x - \frac{1}{3} l_1 - X_L \right) - q_{skR} \frac{(x - l_1 - X_L)^3}{6l_2}; \quad (88)$$

$$(X_L + l_1 + l_2) \leq x \leq L \quad M(x) = B(L - x); \quad (89)$$

- Berechnung der Querkräfte, $Q(x)$:

$$x \leq X_L \quad Q(x) = A; \quad (90)$$

$$X_L < x \leq (X_L + l_1) \quad Q(x) = A - \frac{q_{skL}}{2} \frac{X_L + 2l_1 - x}{l_1} (x - X_L); \quad (91)$$

$$(X_L + l_1) < x \leq (X_L + l_1 + l_2) \quad Q(x) = A - \frac{q_{skL} l_1}{2} - \frac{q_{skR}}{2l_2} (x - l_1 - X_L)^2; \quad (92)$$

$$(X_L + l_1 + l_2) \leq x \leq L \quad Q(x) = -B; \quad (93)$$

- Stelle des minimalen Momentes:

$$X = X_L + l_1 \pm \sqrt{l_1^2 - \frac{2l_1 A_{sk}}{q_{skL}}} \quad \text{für} \quad X_L < X \leq X_L + l_1 \quad (94)$$

- Stelle des maximalen Momentes:

$$X = X_L + l_1 + \sqrt{\left(A_{sk} - \frac{q_{skL} l_1}{2} \right) \frac{2l_2}{q_{skR}}} \quad \text{für} \quad X_L + l_1 < X \leq X_L + l_1 + l_2 \quad (95)$$

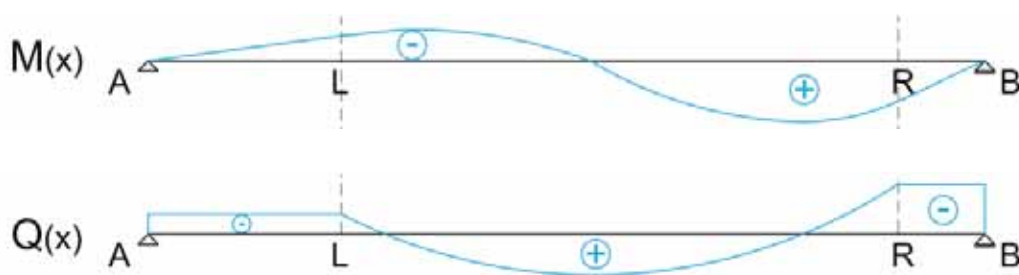


Abb. 33: Schnittgrößenverlauf - $M(x)$ und $Q(x)$ für Horizontallasten aus dem Seitenstoß

6. Lastkombinationen

6.1 Beiwerte und Faktoren

6.1.1 Lastklassenbeiwert α

Alle Lasten aus dem Regel- oder Schwerverkehr sind im Eisenbahnwesen mit dem Lastklassenbeiwert α zu multiplizieren. Dies gilt sowohl für die vertikale Einwirkungen lt. Kapitel 4.2.3 als auch für die horizontale Einwirkungen lt. Kapitel 4.2.4. In Österreich ist auf Normalspurstrecken lt. [5] generell mit $\alpha = 1,21$ zu rechnen. Laut [5] - Tab. 6.8, Zeile für $\alpha > 1,0$ wird jedoch für Geschwindigkeiten über 120 km/h $\alpha = 1,0$ eingesetzt. Die Tab. 22 (siehe Seite 54) stellt einen Auszug der Tab. 6.8 aus der [5] dar.

6.1.2 Dynamischer Beiwert $\Phi(\Phi_2)$

Der dynamische Beiwert Φ berücksichtigt die dynamische Vergrößerung von Beanspruchungen und Schwingungen (Verformungen) im Tragwerk aber nicht die Resonanz und übermäßigen Schwingungen der Brücke.

Der dynamische Beiwert Φ wird wie folgt berechnet:

- für sorgfältig instand gehaltene Gleise:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82 \quad \text{mit} \quad 1,0 \leq \Phi \leq 1,67 \quad (96)$$

L_Φ die „maßgebende“ Länge (zu Φ gehörende Länge), in m, wie in [1] Tab. 6.2 angegeben.

- für Gleise mit normaler Instandhaltung:

$$\Phi_2 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,73 \quad \text{mit} \quad 1,0 \leq \Phi \leq 2,0 \quad (97)$$

L_Φ die „maßgebende“ Länge (zu Φ gehörende Länge), in m, wie in Tab. 6.2 angegeben.

Es wird der dynamische Beiwert für das Grobblech, mit Formel (96) für sorgfältig instand gehaltene Gleise, berechnet. Bei Fahrbahnplatten von Trogbrücken für die Tragwirkung rechtwinklig zu den Hauptträgern (Querrichtung) wird lt. [5] - Tab. 6.2 Fall 4.1 L_Φ als dreifache Plattenstützweite (entspricht in sinnvoller Näherung der Wirkung des Grobblechs) genommen. Das ergibt:

$$L_\Phi = 3L = 3 \cdot 4,2 = 12,6 \text{ m}$$

Der dynamische Beiwert:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{12,6} - 0,2} + 0,82 = 1,2499 \approx 1,25$$

6.1.3 Teilsicherheitsbeiwert γ

Die Teilsicherheitsbeiwerte werden der [2] - Tab. A.2.4(B) entnommen und sind in Tab. 26 (siehe Seite 57) dargestellt.

6.2 Lastfälle und Lastgruppen

6.2.1 Lastfälle

Die Lastfälle unterscheiden sich durch die verschiedenen Radien und Geschwindigkeiten. Für jeden Radius werden mehrere Geschwindigkeiten untersucht (siehe Kapitel 4.2.4.1), um festzustellen welche maßgebend ist. Die Aufteilung und Auswahl der Geschwindigkeiten wird anhand der Tab. 1 bzw. 22 durchgeführt. Die Tab. 22 ist ein Auszug aus der [5] Tab. 6.8. (für α -Werte siehe Kap. 6.2.1)

Tab. 22: Lastfälle lt. [5]

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times 1 \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times \alpha \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	
		0	-	-	-	

6.2.2 Lastgruppen für Eisenbahnverkehr

Die gleichzeitige Wirkung von mehreren veränderlichen Einwirkungen wird durch Lastgruppen berücksichtigt. Laut [5] - Kap.6.8.2 ist jede Lastgruppe als eine einzelne veränderliche Last anzusehen. Die Lastgruppen schließen sich gegenseitig aus und sind mit einer Nicht-Verkehrslast als einzelne veränderliche charakteristische Einwirkung zu kombinieren. Die Lastgruppen und die Beiwerte für die verschiedenen charakteristischen Einwirkungen werden in der Tab. 23 dargestellt. Die Tab. 23 ist ein Auszug aus der [5] - Tab. 6.11 und stellt alle für diese Arbeit relevanten Lastgruppen dar.

Tab. 23: Auszug Lastgruppen lt. [5] Tab. 6.11

Lastgruppen		Vertikalkräfte		Horizontalkräfte		Bemerkungen
Anzahl belastete Gleise	Lastgruppe	LM 71, SW/0	SW/2	Fliehkraft	der Seitenstoß	
1	gr11	1,0		0,5	0,5	Max. vertikal 1 mit max. längs
1	gr12	1,0		1,0	1,0	Max. vertikal 2 mit max. quer
1	gr14	0,5		1,0	1,0	Max. quer
1	gr16		1,0	0,5	0,5	SW/2 mit max. längs
1	gr17		1,0	1,0	1,0	SW/2 mit max. quer

In den Gruppen sind schon alle relevanten Beiwerte ($\alpha, \Phi, f, \dots$) berücksichtigt worden.

6.3 Grenzzustände - Beanspruchungen

Grenzzustände sind Zustände, bei deren Überschreitungen das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt. Es werden folgende Grenzzustände unterschieden:

- 1) Grenzzustand der Tragfähigkeit ULS (Ultimate Limit State): Zustände, die im Zusammenhang mit Einsturz oder anderen Formen des Tragwerksversagens stehen
- 2) Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit SLS (Serviceability Limit State): Zustände, bei deren Überschreitung die festgelegten Bedingungen für die Gebrauchstauglichkeit eines Tragwerks oder eines Bauteils nicht mehr erfüllt sind. Wird in dieser Arbeit nicht untersucht.

6.3.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit ULS

Es sind folgende Nachweise der Grenzzustände der Tragfähigkeit, lt. ÖNORM EN 1990 [1] erforderlich:

- a) EQU: Verlust der Lagesicherheit des Tragwerks oder eines seiner Teile durch kleine Abweichungen der Größe oder räumlicher Verteilung der Einwirkungen. Eigenschaften der Baustoffe und Bauproduktion bzw. Baugrundeigenschaften haben im Allgemeinen keinen Einfluss.
- b) STR: Versagen oder übermäßige Verformungen des Tragwerks oder seiner Teile einschließlich der Fundamente, Fundamentkörper, Pfähle, wobei die Tragfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen entscheidend ist.
- c) GEO: Versagen oder übermäßige Verformungen des Baugrundes, wobei die Festigkeit von Boden oder Fels wesentlich an der Tragsicherheit beteiligt sind.
- d) FAT: Ermüdungsversagen des Tragwerks oder seiner Teile.

In dieser Arbeit wird nur der Nachweis für ULS (STR) näher untersucht.

6.3.2 Kombinationsregeln für den Tragfähigkeitsnachweis ULS

Tab. 24: Bemessungswerte der Einwirkungen F_d

Bezeichnung	Variable der Einwirkung
Basisvariable	F
Charakteristischer Wert	F_k
Bemessungswert (design)	$F_d (\gamma_s, F_k, \Psi)$

Tab. 25: Grenzzustand der Tragfähigkeit

Bemessungswerte der Einwirkungen bei der Kombination von Einwirkungen				
Bemessungs-situation	Ständige Einwirkungen G_d	Veränderliche Einwirkungen Q_d		Außergewöhnliche Einwirkungen A_d
		Führende veränderliche Einwirkung	Begleitende veränderliche Einwirkung	
ständig und vorübergehend	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_Q \cdot Q_k$	$\Psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot Q_k$	
außergewöhnlich	$\gamma_{GA} \cdot G_k$	$\Psi_1 \cdot Q_k$	$\Psi_2 \cdot Q_k$	$\gamma_A \cdot A_d$ (sofern A_d nicht direkt festgelegt wird)

Drei Arten von Bemessungssituationen (ULS) nach [1]:

- Ständige und vorübergehende Bemessungssituation:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_G P_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (98)$$

- Außergewöhnliche Bemessungssituationen:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + A_d + (\Psi_{1,1} \text{ oder } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (99)$$

- Bemessungssituationen bei Erdbeben:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (100)$$

Legende:

- $G_{k,j}$ charakteristischer Wert einer ständiger Einwirkung j
- $Q_{k,1}$ charakteristischer Wert einer führenden veränderlichen Einwirkung 1 (Leiteinwirkung)
- $Q_{k,i}$ charakteristischer Wert einer nicht führenden veränderlichen Einwirkung i (Begleiteinwirkung)
- P maßgebender repräsentativer Wert einer Vorspannung
- $\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkung G_j
- $\gamma_{Q,1}$ Teilsicherheitsbeiwert für die führende veränderliche Einwirkung Q_1
- $\gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen Q_i
- $\Psi_{0,i}$ Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

In dieser Arbeit wird nur die ständige und vorübergehende Bemessungssituation untersucht.

6.3.3 Bemessungswerte der Einwirkungen ULS (STR)

Die Bemessungswerte sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tab. 26: Bemessungswerte ULS

Einwirkung			ULS		
			γ	Φ_2	α
Ständige Einwirkungen		Wirkung ungünstig	1,35	-	-
		Wirkung günstig	1,0	-	-
Veränderliche Einwirkungen	Vertikal	LM 71	1,45	1,273 ^{a)}	Siehe Kapitel 4.4.1
		SW/0			
		SW/2	1,20		
	Horizontal	Fliehkraft	1,45	-	
		Der Seitenstoß		-	

a) Wert mit der Formel (76) (Kapitel 6.1.2) für das Grobblech berechnet.

Tab. 27: Quellen für die Bemessungswerte

Bemessungswert	Quelle
γ	ÖNORM EN 1990 A1, Tab. A.2.4(B)
Φ_2	ÖNORM B 1991-2
α	ÖNORM B 1991-2

7. Berechnungen

Die Vorgangsweise der Berechnungen wird anhand des folgenden Beispiels dargestellt. Dafür wurde die Lage 4 ausgewählt. Das folgende Schema zeigt die Berechnungsschritte:

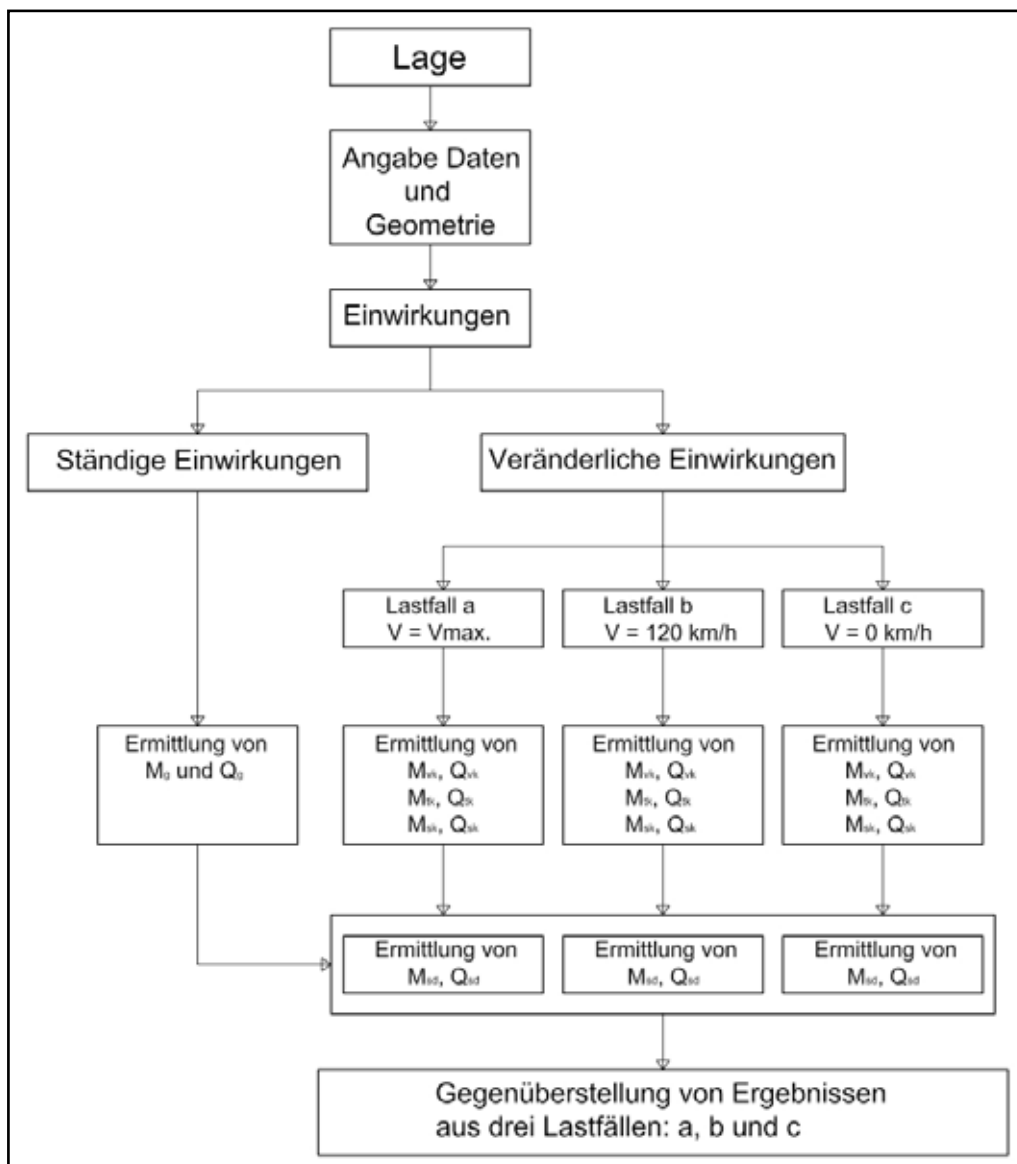


Abb. 34: Schema der Berechnungen

Tab. 28: Eckdaten für Lage 4 (R = 1000 m)

Position	Wert
Radius	1000 m
Überhöhung	160 mm
Maximale Geschwindigkeit	156,75 km/h
Schotterbetthöhe h_s	55 cm
$e^* = 0$ (Gleisachse = Bauwerksachse)	

Die Werte der restlichen Schnittgrößen, unter Berücksichtigung der Exzentrizitäten und der verschiedenen Schotterhöhen und Geschwindigkeiten, werden in den Excel Tabellen ausgerechnet und in Anhang A tabellarisch präsentiert.

Die Formeln für die Berechnung der geometrischen Maße wurden bereits in Kapitel 4.2.3.1 (Formeln (10) bis (12)) und Kapitel 5.2.1.1 (Formeln (45) und (46)) angegeben und werden hier direkt angewendet.

Neigung der Betonschwellen:

$$\alpha = \arcsin \frac{\ddot{u}}{r} = \arcsin \frac{16}{150} = 6,123^\circ$$

Längen der unbelasteten Teile des statischen Systems:

$$X_L = 210 + 51,75 \sin(6,123) - 124,75 \cos(6,123) - 0,25 \cdot 55 + 0 + 0 = 77,73 \text{ cm}$$

$$X_R = L - X_L - b = 420 - 77,73 - 279,58 = 62,69 \text{ cm}$$

Längen und Breiten der belasteten Fläche:

$$b = \frac{1}{2} [55 + 75 \sin(6,123) + 499 \cos(6,123)] = 279,58 \text{ cm}$$

$$b_L = 26 + \frac{1}{2} [55 - 55 \sin(6,123) - 21 \cos(6,123)] = 40,13 \text{ cm}$$

$$b_R = 26 + \frac{1}{2} [55 + 205 \sin(6,123) - 21 \cos(6,123)] = 53,99 \text{ cm}$$

$$y_s = \frac{b}{3} \frac{b_L + 2b_R}{b_L + b_R} = \frac{279,58}{3} \frac{40,13 + 2 \cdot 53,99}{40,13 + 53,99} = 146,65 \text{ cm}$$

Fläche und Widerstandsmomente:

$$As_1 = \frac{b_L + b_R}{2} b = \frac{40,13 + 53,99}{2} \cdot 279,58 = 13157,03 \text{ cm}^2 = 1,32 \text{ m}^2$$

$$W_L = -\frac{279,58^2 \cdot (40,13^2 + 4 \cdot 40,13 \cdot 53,99 + 53,99^2)}{12 \cdot (2 \cdot 53,99 + 40,13)} \cdot \frac{1}{100^3} = -0,580 \text{ m}^3$$

$$W_R = \frac{279,58^2 \cdot (40,13^2 + 4 \cdot 40,13 \cdot 53,99 + 53,99^2)}{12 \cdot (53,99 + 2 \cdot 40,13)} \cdot \frac{1}{100^3} = 0,640 \text{ m}^3$$

Analog zu den oben dargestellten Berechnungen werden auch die Werte, die durch die Abweichungen in Schotterbetthöhe entstehen, ausgerechnet und in der Tab. 29 dargestellt.

Tab. 29: Geometrie der Einflussfläche

h_s	x_L	x_R	b	b_L	b_R	y_s	W_L	W_R
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[m³]	[m³]
38,5	81,86	66,82	271,33	31,88	45,74	143,74	-0,445	0,501
55	77,73	62,69	279,58	40,13	53,99	146,65	-0,580	0,640
71,5	73,61	58,57	287,83	48,38	62,24	149,93	-0,729	0,793

7.2 Einwirkungen

7.2.1 Ständige Einwirkungen

Die Berechnungsschritte und Formeln für die Schnittgrößenermittlung aus den ständigen Einwirkungen wurden in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 dargestellt. An dieser Stelle werden diese angewendet um charakteristische Lasten für die Gleislage 4 (R=1000 m) zu ermitteln.

Eigengewicht des Grobblechs:

$$g_a = \gamma_a h_a B = 78,5 \cdot 0,12 \cdot 1,0 = 9,42 \text{ kN/m}$$

Schotterbett:

Fläche des Schotterbetts:

$$A_s = 0,6273 \cdot 55^2 + 55 \cdot (94,1 \cdot \sin(6,123) + 420) + 31500 \cdot \sin(6,123) - 37090,1 \cdot \sin^2(6,123)$$

$$A_s = 28487,63 \text{ cm}^2 = 2,85 \text{ m}^2$$

Eigengewicht des Schotterbetts:

$$g_s = \frac{\gamma_s A_s B}{L} = \frac{20 \cdot 2,85 \cdot 1,0}{4,2} = 13,57 \text{ kN/m}$$

Betonschwelle mit Schienen und Schienen Befestigung:

$$\Delta g_{b+sch} = \Delta g_b + \Delta g_{sch} = 1,0 + 0,3 = 1,3 \text{ kN/m}$$

Charakteristische ständige Last:

$$g = g_a + g_s + \Delta g_{b+sch} = 9,42 + 13,57 + 1,30 = 24,29 \text{ kN/m}$$

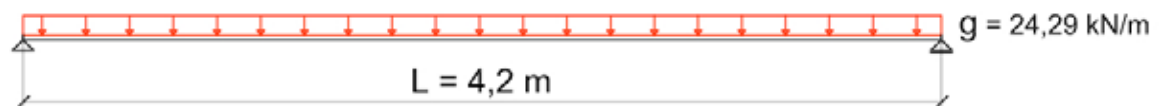


Abb. 37: charakteristische Lasten aus ständigen Einwirkungen

Die Werte für eine Variation des Schotterbetts sind aus Tab. 31 ersichtlich. Alle Lasten wurden auf 1 m Breite (1 m Streifen) bezogen.

Tab. 30: Auszug aus der Tab. 5 (Kap. 4.1.2)

h_s	$\ddot{u}$	α	A_s		g_a	g_s	Δg_{b+sch}	g
(cm)	(mm)	(°)	(cm ²)	(m ²)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
38,5	160,00	6,123	20424,25	2,04	9,42	9,73	1,30	20,45
55,0	160,00	6,123	28487,63	2,85	9,42	13,57	1,30	24,29
71,5	160,00	6,123	36892,58	3,69	9,42	17,57	1,30	28,29

7.2.1.1 Schnittgrößenermittlung - Ständige Einwirkungen

Die Berechnungsschritte für die Schnittgrößenermittlung (Biegemoment und Querkraft) für die einzelnen Lastfälle wurden in Kapitel 5 dargestellt. Hier wird die Schnittgrößenermittlung für Lage 4 dargestellt.

Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A = B = \frac{gL}{2} = \frac{24,29 \cdot 4,2}{2} = 51 \text{ kN}$$

Der Momentenverlauf aus ständigen charakteristischen Lasten wird in $x = L/10$ Schritten der Stützweite des Einfeldbalkens in Tab. 31 präsentiert.

Tab. 31: Momentenverteilung aus ständigen Lasten

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	168,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$M_g(X)$ [kNm]	0,00	19,28	34,27	44,98	51,41	53,55	51,41	44,98	34,27	19,28	0,00

Tab. 32: Querkraftverteilung aus ständigen Lasten

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	168,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$Q_g(X)$ [kN]	51,00	40,80	30,60	20,40	10,20	0,00	-10,2	-20,40	-30,60	-40,80	-51,00

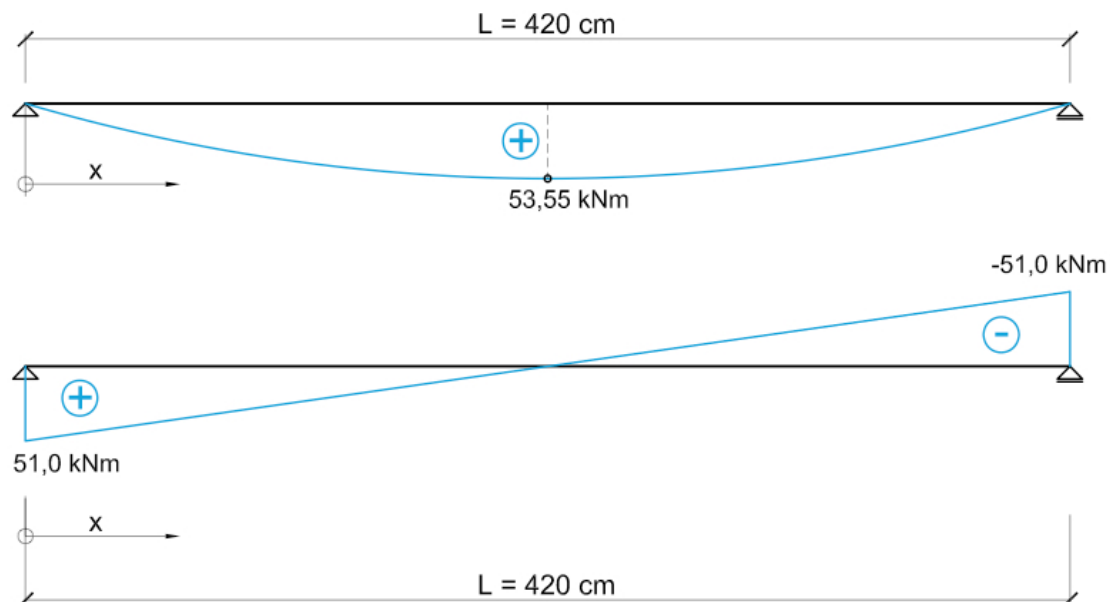


Abb. 38: Momenten- und Querkraftverteilung aus ständigen Lasten

7.2.2 Veränderliche Einwirkungen

Die veränderliche vertikale und horizontale Einwirkungen werden nach der Geschwindigkeit des Zuges in drei verschiedenen Lastfälle aufgeteilt:

- 1) Lastfall a - Zug fährt mit Höchstgeschwindigkeit
- 2) Lastfall b - Zug fährt mit 120 km/h
- 3) Lastfall c - Zug bleibt steht (Einfluss der horizontalen Einwirkungen, Fliehkraft und Seitenstoß, wird vernachlässigt)

7.2.2.1 Lastfall a: $V = V_{\max}$

Tab. 33: Zeigt die gewählten Lastfall a

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times 1 \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times \alpha \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	
		0	-	-	-	

Vertikale Einwirkungen

Die Vorgangsweise der Berechnungen und Formeln für veränderliche Einwirkungen wurden bereits in Kapitel 4.2.3 präsentiert. Für das Beispiel wurde das Lastmodell 71 ausgewählt. Die Berechnung wurde für den folgenden Fall ausgeführt:

- Exzentrizität $e_1 = -8,33$ cm
- Exzentrizität $e_2 = 0$ cm
- Exzentrizität $e^* = 0$ cm⁸

Exzentrizität der Vertikallast (e_{vk}) zum Schwerpunkt der belasteten Fläche.

$$e_{vk} = (77,73 + 146,65) - (210 - 180 \sin(6,123) + (-8,33)) = 41,92 \text{ cm}$$

Lastumordnung lt. LM 71:

$$N_{vk} = Q_{vk} = 125 \text{ kN}$$

$$M_{vk} = -Q_{vk} \times e_{vk} = -125 \cdot \frac{41,92}{100} = -52,40 \text{ kNm}$$

⁸ Exzentrizität e^* ist aus der Abb. 36 (siehe Seite 59) ersichtlich.

Spannungen:

$$\sigma_{vkL} = \frac{N_{vk}}{A_{s1}} + \frac{M_{vk}}{W_L} = \frac{125}{1,32} + \frac{-52,40}{-0,58} = 185,33 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{vkR} = \frac{N_{vk}}{A_{s1}} + \frac{M_{vk}}{W_R} = \frac{125}{1,32} + \frac{-52,40}{0,64} = 13,14 \text{ kN/m}^2$$

Resultierende Belastung auf das Grobblech:

$$q_{vkL} = \sigma_{vkL} b_L = 185,33 \cdot \frac{40,13}{100} = 74,36 \text{ kN/m}$$

$$q_{vkR} = \sigma_{vkR} b_R = 13,14 \cdot \frac{53,99}{100} = 7,10 \text{ kN/m}$$

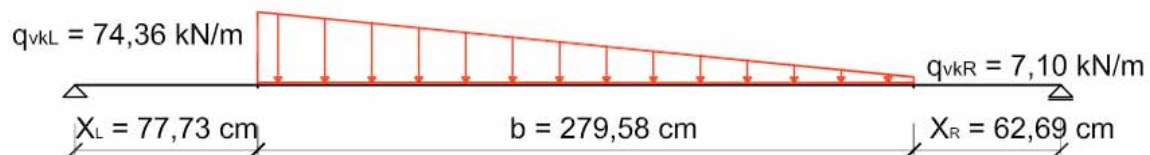


Abb. 39: charakteristische Last aus der vertikalen Einwirkungen (LM 71)

Die Werte der charakteristischen Lasten q_{vkL} und q_{vkR} für variierende Schotterhöhen, h_{smin} und h_{smax} , werden in gleicher Weise berechnet. Die Ergebnisse werden in Tab. 34 angegeben.

Tab. 34: charakteristische Lasten aus den vertikalen Einwirkungen (LM 71)

h_s [cm]	LM	e_1 [cm]	q_{vkL} (kN/m)	q_{vkR} (kN/m)
38,5	71	-8,3	76,49	5,07
	71	0,0	69,02	14,58
	71	8,3	61,56	24,09
	SW/0	-	49,02	49,02
	SW/2	-	55,28	55,28
55	71	-8,3	74,36	7,10
	71	0,0	67,16	15,88
	71	8,3	59,96	24,67
	SW/0	-	47,57	47,57
	SW/2	-	53,65	53,65
71,5	71	-8,3	72,04	8,57
	71	0,0	65,13	16,75
	71	8,3	58,22	24,92
	SW/0	-	46,21	46,21
	SW/2	-	52,11	52,11

Die Tabelle stellt charakteristische Werte der vertikalen Einwirkungen aus LM 71 dar, die mit allen relevanten Beiwerten ($\alpha, \Phi, f, \dots$) und Teilsicherheitsbeiwerten (γ) multipliziert und mit den ständigen Lasten addiert werden.

Horizontale Einwirkungen

Fliehkraft

Die Geschwindigkeit wird mit der Formel (2) berechnet:

$$V = 0,29108032 \cdot \sqrt{1000 \cdot (130 + 160)} = 156,75 \text{ km/h}$$

Für das Beispiel wird die maximale Geschwindigkeit von $V = 156,75 \text{ km/h}$ angesetzt.

Abminderungsfaktor

$$f = \left[1 - \frac{156,75 - 120}{1000} \left(\frac{814}{156,75} + 1,75 \right) \left(1 - \sqrt{\frac{2,88}{4,2}} \right) \right] = 0,956$$

Fliehkraft:

$$Q_{tk} = \frac{V^2}{127 \cdot R} (f \times Q_{vk}) = \frac{156,75^2}{127 \cdot 1000} \cdot (0,956 \cdot 125) = 23,1 \text{ kN}$$

Höhe der Angriffspunktes der Fliehkraft über dem Grobblech:

$$h_{tk} = h_s + 75 \sin \alpha + 197 \cos \alpha = 55 + 75 \sin(6,123) + 197 \cos(6,123) = 258,88 \text{ cm}$$

Lastumordnung:

$$N_{tk} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{tk} = Q_{tk} \times h_{tk} = 23,1 \cdot \frac{258,88}{100} = 59,8 \text{ kNm}$$

Spannungen:

$$\sigma_{tkL} = \frac{M_{tk}}{W_L} = \frac{59,8}{-0,580} = -103,18 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{tkR} = \frac{M_{tk}}{W_R} = \frac{59,8}{0,640} = 93,52 \text{ kN/m}^2$$

Resultierende Belastung auf das Grobblech:

$$q_{tkL} = \sigma_{tkL} b_L = -103,18 \cdot \frac{40,13}{100} = -41,40 \text{ kN/m}$$

$$q_{tkR} = \sigma_{tkR} b_R = 93,52 \cdot \frac{53,99}{100} = 50,50 \text{ kN/m}$$

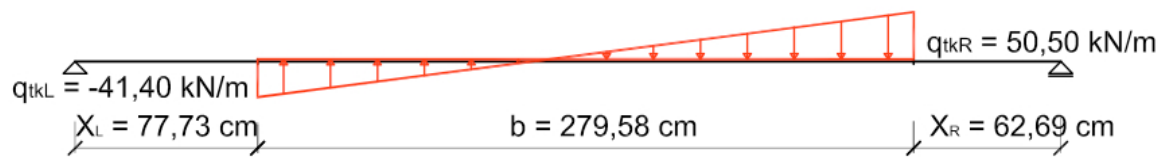


Abb. 40: charakteristische Last aus der Fliehkraft

Für die Ermittlung der charakteristischen Lasten q_{tkL} und q_{tkR} für variierende Schotterhöhen, h_{smin} und h_{smax} , wird die gleiche Vorgangsweise angewendet. Die Werte werden anhand der Geschwindigkeit in Tab. 35 angegeben.

Tab. 35: charakteristische Lasten aus der Fliehkraft für verschiedene Geschwindigkeiten

		V = 80 km/h		V = 120 km/h		V = 156,75 km/h	
h_s	LM	q_{tkL}	q_{tkR}	q_{tkL}	q_{tkR}	q_{tkL}	q_{tkR}
[cm]	-	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
38,5	71	-10,95	13,94	-24,63	31,37	-40,18	51,18
	SW/0	-11,65	14,83	-26,20	33,38	-42,75	54,45
	SW/2	-13,13	16,73	0,00	0,00	0,00	0,00
55	71	-11,28	13,76	-25,38	30,95	-41,40	50,50
	SW/0	-12,00	14,64	-27,00	32,93	-44,05	53,73
	SW/2	-13,54	16,51	0,00	0,00	0,00	0,00
71,5	71	-11,51	13,62	-25,89	30,64	-42,24	49,99
	SW/0	-12,24	14,49	-27,55	32,60	-44,95	53,19
	SW/2	-13,81	16,34	0,00	0,00	0,00	0,00

Die Tabelle stellt charakteristische Werte aus der Fliehkraft dar, welche mit allen relevanten Beiwerten ($\alpha, \Phi, f, \dots$) und Teilsicherheitsbeiwerten (γ) multipliziert und mit den ständigen Lasten addiert werden.

Der Seitenstoß:

Charakteristischer Wert $Q_{sk} = 100 \text{ kN}$

Höhe des Angriffspunktes des Seitenstoßes über dem Grobblech:

$$h_{sk} = h_s + 150 \sin \alpha + 17 \cos \alpha = 55 + 150 \sin(6,123) + 17 \cos(6,123) = 87,90 \text{ cm}$$

Lastumordnung:

$$N_{sk} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{sk} = Q_{sk} \times h_{sk} = 100 \cdot \frac{87,90}{100} = 87,90 \text{ kNm}$$

Spannungen:

$$\sigma_{skL} = \frac{M_{sk}}{W_L} = \frac{87,9}{-0,580} = -151,52 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{skR} = \frac{M_{sk}}{W_R} = \frac{87,9}{0,640} = 137,34 \text{ kN/m}^2$$

Resultierende Belastung auf das Grobblech:

$$q_{skL} = \sigma_{skL} b_L = -151,52 \cdot \frac{40,13}{100} = -60,80 \text{ kN/m}$$

$$q_{skR} = \sigma_{skR} b_R = 137,34 \cdot \frac{53,99}{100} = 74,15 \text{ kN/m}$$

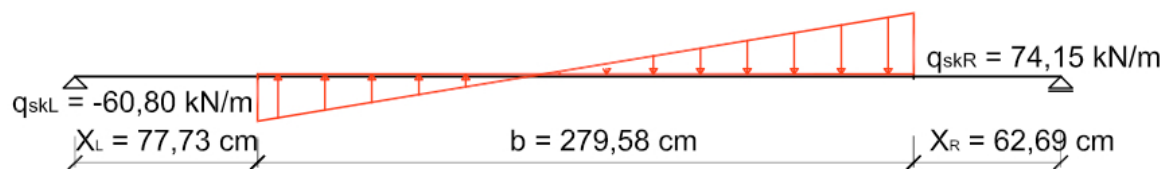


Abb. 41: charakteristische Last aus dem Seitenstoß

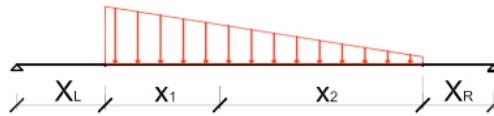
Auf die gleiche Weise werden die charakteristische Lasten aus dem Seitenstoß für andere Schotterhöhen, $h_{smin} = 38,5 \text{ cm}$ und $h_{smax} = 71,5 \text{ cm}$, berechnet. Diese werden in Tab. 36 dargestellt.

Tab. 36: charakteristische Lasten aus dem Seitenstoß

h_s	q_{skL}	q_{skR}
[cm]	(kN/m)	(kN/m)
38,50	-51,19	65,20
55,00	-60,80	74,15
71,50	-69,26	81,97

7.2.2.1.1 Schnittgrößenermittlung (Lastfall a)

Vertikallast - LM 71



Hilfswerte für die Ermittlung von Schnittgrößen aus der Vertikallast:

$$x_1 = \frac{b}{3} \frac{q_{vkL} + 2q_{vkR}}{q_{vkL} + q_{vkR}} = \frac{279,58}{3} \frac{74,36 + 2 \cdot 7,10}{74,36 + 7,10} = 101,31 \text{ cm}$$

$$x_2 = \frac{b}{3} \frac{2q_{vkL} + q_{vkR}}{q_{vkL} + q_{vkR}} = \frac{279,58}{3} \frac{2 \cdot 74,36 + 7,10}{74,36 + 7,10} = 178,26 \text{ cm}$$

Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A_{vk} = \frac{q_{vkL} + q_{vkR}}{2} b \frac{X_R + x_2}{L} = \frac{74,36 + 7,10}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{62,69 + 178,26}{420} = 65,33 \text{ kN}$$

$$B_{vk} = \frac{q_{vkL} + q_{vkR}}{2} b \frac{X_L + x_1}{L} = \frac{74,36 + 7,10}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{77,73 + 101,31}{420} = 48,55 \text{ kN}$$

Stelle des maximalen Momentes:

$$X = 0,7773 + \frac{1}{2} \left[74,36 \frac{2 \cdot 2,7958}{74,36 - 7,10} - \sqrt{\frac{2 \cdot 2,7958}{74,36 - 7,10} \cdot \left(\frac{74,36^2 \cdot 2 \cdot 2,7958}{74,36 - 7,10} - 4 \cdot 65,33 \right)} \right] = 1,84 \text{ m}$$

$$M_{vk}(x) = 65,33 \cdot 1,84 - 74,36 \frac{(1,84 - 0,7773)^2}{2} + \frac{(74,36 - 7,10)}{6 \cdot 2,7958} (1,84 - 0,7773)^3 = 83,03 \text{ kNm}$$

Tab. 37: Momentenverteilung aus der Vertikallast (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	184,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
M _{vk} (X) [kNm]	0,0	27,44	54,73	74,1	83,03	81,42	75,37	58,73	40,58	20,39	0,0

Tab. 38: Querkraftverteilung aus der Vertikallast (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	184,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
Q _{vk} (X) [kN]	65,33	65,33	60,72	32,24	0,0	-11,98	-24,6	-39,23	-46,49	-48,55	-48,55

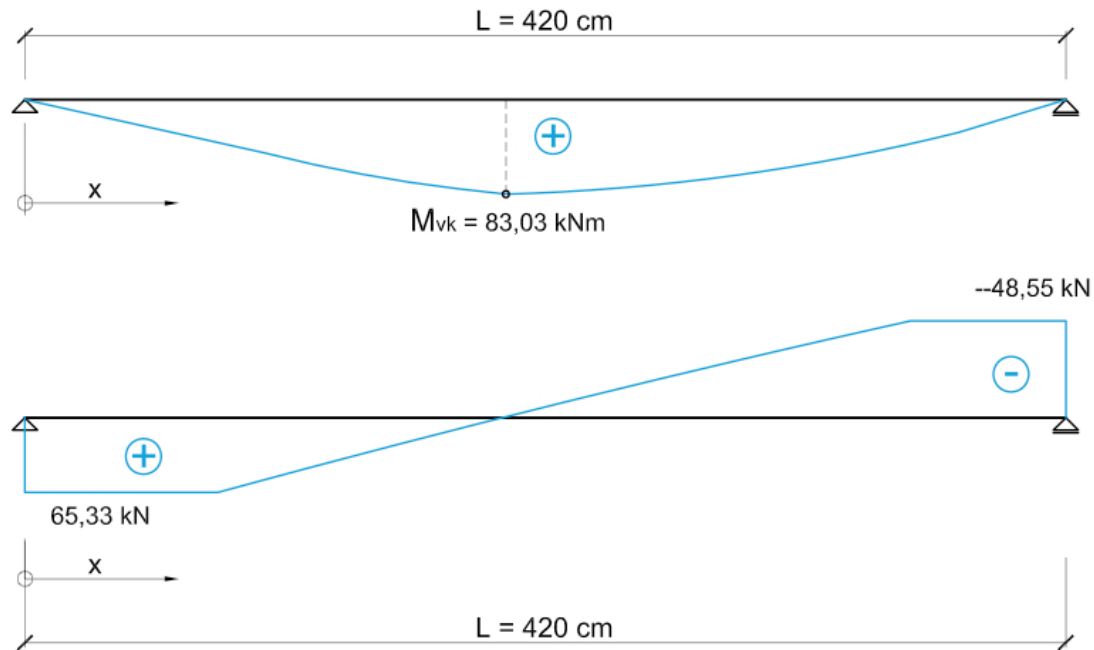
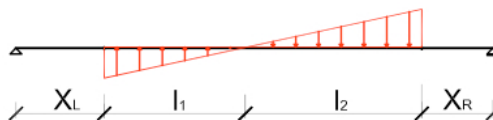


Abb. 42: Momenten- und Querkraftverteilung aus der Vertikallast

Horizontallast

Fliehkraft



Längen für die Ermittlung von Schnittgrößen aus der Fliehkraft:

$$l_1 = \frac{|q_{tkL}|b}{q_{tkR} + |q_{tkL}|} = \frac{|-41,40|}{50,50 + |-41,40|} \cdot \frac{279,58}{100} = 1,26 \text{ m}$$

$$l_2 = b - l_1 = \frac{279,58}{100} - 1,26 = 1,54 \text{ m}$$

Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A_{tk} = \frac{1}{4,20} \left[\frac{-41,4 \cdot 1,26}{2} \left(\frac{2}{3} \cdot 1,26 + 1,54 + \frac{62,69}{100} \right) + \frac{50,50 \cdot 1,54}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 1,26 + \frac{62,69}{100} \right) \right] = -8,12 \text{ kN}$$

$$B_{tk} = \frac{q_{tkL}l_1}{2} + \frac{q_{tkR}l_2}{2} - A_{tk} = \frac{-41,4 \cdot 1,26}{2} + \frac{50,5 \cdot 1,54}{2} - (-8,12) = 20,83 \text{ kN}$$

Min $M(x)$:

$$X = X_L + l_1 - \sqrt{l_1^2 - \frac{2l_1 A_{tk}}{q_{tkL}}} = 0,7773 + 1,26 - \sqrt{1,26^2 - \frac{2 \cdot 1,26 \cdot (-8,12)}{-41,4}} = 0,99 \text{ m}$$

$$M_{tk}(x) = -8,12 \cdot 0,99 - (-41,4) \cdot \frac{(0,99 - 0,7773)^2}{6} \cdot \frac{0,7773 + 3 \cdot 1,26 - 0,99}{1,26} = -7,16 \text{ kNm}$$

Max $M(x)$:

$$X = X_L + l_1 + \sqrt{\left(A_{tk} - \frac{q_{tkL} l_1}{2}\right) \frac{2l_2}{q_{tkR}}} = 0,7773 + 1,26 + \sqrt{\left(-8,12 - \frac{-41,4 \cdot 1,26}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot 1,545}{50,5}} = 3,08 \text{ m}$$

$$M_{tk}(x) = -8,12 \cdot 3,08 - \frac{-41,4 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(3,08 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773\right) - 50,5 \cdot \frac{(3,08 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

$$M_{tk}(x) = 17,85 \text{ kNm}$$

Tab. 39: Momentenverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$M_{tk}(X)$ [kNm]	0,0	-3,41	-7,16	-6,03	-0,81	6,48	12,02	17,58	16,41	8,75	0,0

Tab. 40: Querkraftverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{tk}(X)$ [kN]	-8,12	-8,12	0,0	8,03	15,86	17,89	15,45	0,0	-10,82	-20,83	-20,83

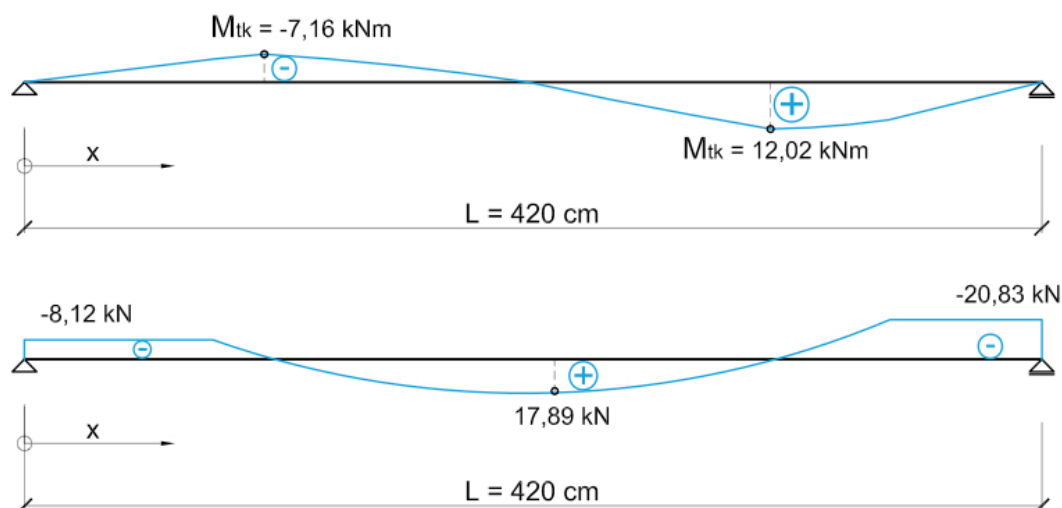
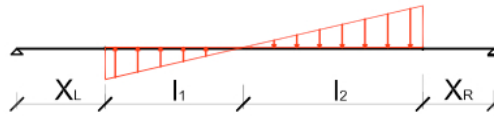


Abb. 43: Momenten- und Querkraftverteilung aus der Fliehkraft

Der Seitenstoß

Längen für Ermittlung von Schnittgrößen aus dem Seitenstoß:

$$l_1 = \frac{|q_{skL}|b}{q_{skR} - |q_{skL}|} = \frac{|-60,80|}{74,15 - |-60,80|} \cdot \frac{279,58}{100} = 1,26 \text{ m}$$

$$l_2 = b - l_1 = \frac{279,58}{100} - 1,26 = 1,54 \text{ m}$$

Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A_{sk} = \frac{1}{4,20} \left[\frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} \left(\frac{2}{3} \cdot 1,26 + 1,54 + \frac{62,69}{100} \right) + \frac{74,15 \cdot 1,54}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 1,26 + \frac{62,69}{100} \right) \right] = -11,93 \text{ kN}$$

$$B_{sk} = \frac{q_{skL}l_1}{2} + \frac{q_{skL}l_2}{2} - A_{sk} = \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} + \frac{74,15 \cdot 1,54}{2} - (-11,93) = 30,60 \text{ kN}$$

Min $M(x)$:

$$X = X_L + l_1 - \sqrt{l_1^2 - \frac{2l_1A_{sk}}{q_{skL}}} = 0,7773 + 1,26 - \sqrt{1,26^2 - \frac{2 \cdot 1,26 \cdot (-11,93)}{-60,8}} = 0,99 \text{ m}$$

$$M_{sk}(x) = -11,93 \cdot 0,99 - (-60,8) \cdot \frac{(0,99 - 0,7773)^2}{6} \cdot \frac{0,7773 + 3 \cdot 1,26 - 0,99}{1,26} = -10,51 \text{ kNm}$$

Max $M(x)$:

$$X = X_L + l_1 + \sqrt{\left(A_{sk} - \frac{q_{skL}l_1}{2} \right) \frac{2l_2}{q_{skR}}} = 0,7773 + 1,26 + \sqrt{\left(-11,93 - \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} \right) \cdot \frac{2 \cdot 1,545}{74,15}} = 3,08 \text{ m}$$

$$M_{sk}(x) = -11,93 \cdot 3,08 - \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(3,08 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773 \right) - 74,15 \cdot \frac{(3,08 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

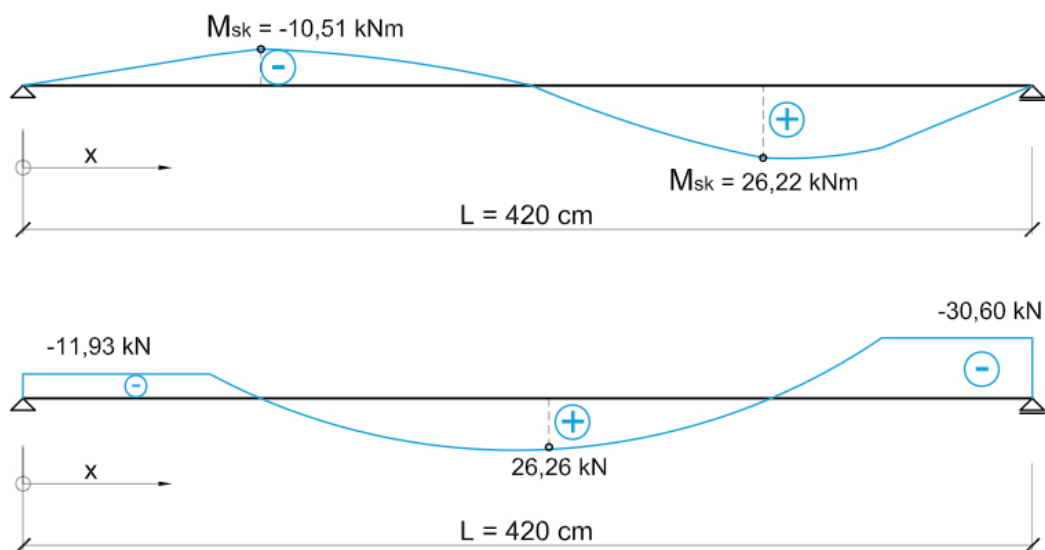
$$M_{sk}(x) = 26,22 \text{ kNm}$$

Tab. 41: Momentenverteilung aus dem Seitenstoß

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$M_{sk}(X)$ [kNm]	0,0	-5,01	-10,51	-8,86	-1,19	9,51	17,65	26,22	24,09	12,85	0,0

Tab. 42: Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{sk}(X)$ [kN]	-11,93	-11,93	0,0	11,79	23,29	26,26	22,69	0,0	-15,89	-30,6	-30,6

**Abb. 44:** Momenten- und Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß

7.2.2.1.2 Lastkombinationen (Lastfall a)

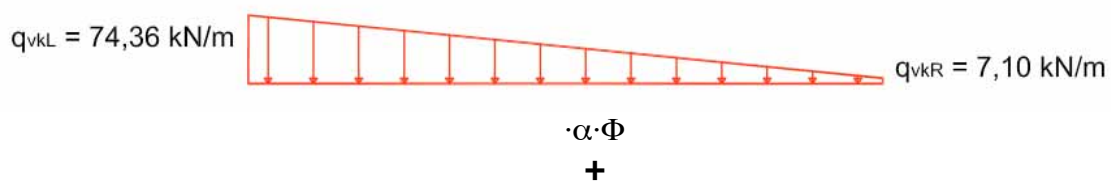
Aus den einzelnen Schnittgrößen werden nun die Lastgruppen gebildet. Die Berechnungsschritte werden anhand Lastgruppe gr12 dargestellt.

Ermittlung der Belastung für Lastgruppe gr12:

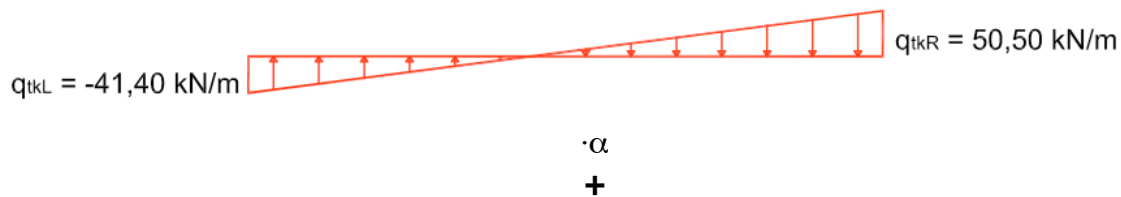
$$q_{L,gr12,d} = 1,45(q_{vKL} \alpha \Phi + q_{tkL} \alpha + q_{skL} \alpha)$$

$$q_{R,gr12,d} = 1,45(q_{vKR} \alpha \Phi + q_{tkR} \alpha + q_{skR} \alpha)$$

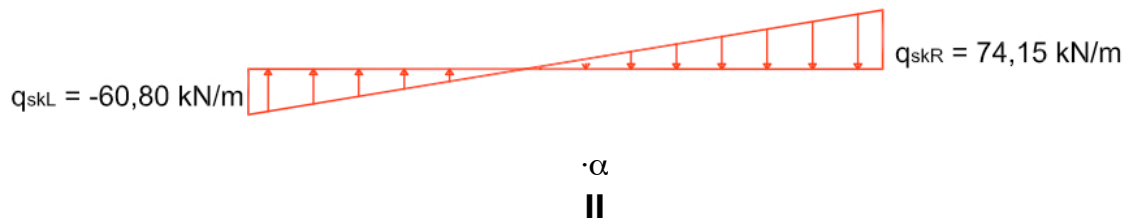
Lastmodell 71: Vertikallast



Lastmodell 71: Fliehkraft



Lastmodell 71: Seitenstoß



Lastgruppe gr12 für LM 71

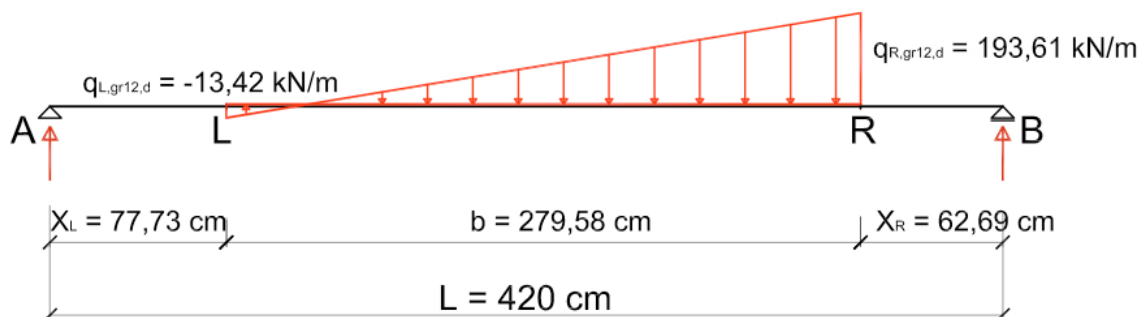
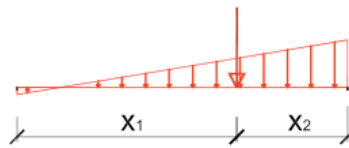


Abb. 45: Superposition der Einzelnen Lasten

$$q_{L,gr12,d} = 1,45 \cdot (74,36 \cdot 1,0 \cdot 1,25 + (-41,4) \cdot 1,0 + (-60,8) \cdot 1,0) = -13,42 \text{ kN/m}$$

$$q_{R,gr12,d} = 1,45 \cdot (7,1 \cdot 1,0 \cdot 1,25 + 50,5 \cdot 1,0 + 74,15 \cdot 1,0) = 193,61 \text{ kN/m}$$

Abmessungen und Auflagerreaktionen



$$x_2 = \frac{b}{3} \frac{2q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}} = \frac{279,58}{3} \frac{2 \cdot (-13,42) + 193,61}{-13,42 + 193,61} = 86,25 \text{ cm} = 0,86 \text{ m}$$

$$x_1 = b - x_2 = 279,58 - 86,25 = 193,33 \text{ cm} = 1,93 \text{ m}$$

$$A_{gr12,d} = \frac{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{2} b \frac{x_2}{L} = \frac{-13,42 + 193,61}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{62,69 + 86,25}{420} = 89,32 \text{ kN}$$

$$B_{gr12,d} = \frac{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{2} b \frac{x_1}{L} = \frac{-13,42 + 193,61}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{77,73 + 193,33}{420} = 162,56 \text{ kN}$$

Veränderliche Lasten: Lastgruppe gr12



+

Ständige Lasten



II

Lastfall für Lage 4: ständige und veränderliche Lasten

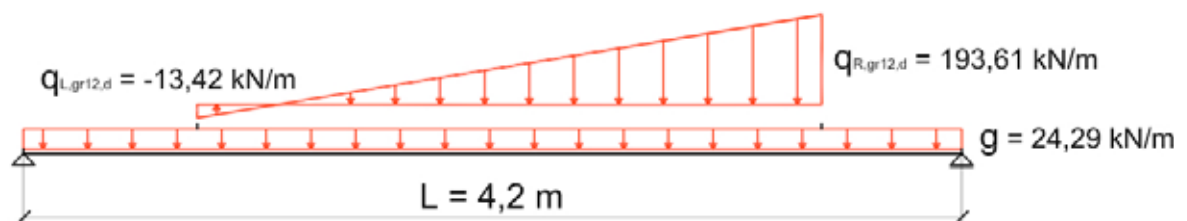


Abb. 46: Superposition der ständigen und veränderlichen Last

Stelle des maximalen Biegemomentes eingesetzt für Lastgruppe gr12:

$$X = X_L - \frac{b(1,35g + q_{L,gr12,d})}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \pm \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{2b(1,35g + q_{L,gr12,d})}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \right)^2 + \frac{8b}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \left(1,35g \left(\frac{L}{2} - X_L \right) + A_{gr12,d} \right)} \right]$$

$$X = \frac{77,73}{100} - \frac{2,7958 \cdot (1,35 \cdot 24,29 + (-13,42))}{193,61 - (-13,42)} +$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2,7958 \cdot (1,35 \cdot 24,29 + (-13,42))}{193,61 - (-13,42)} \right)^2 + \frac{8 \cdot 2,7958}{193,61 - (-13,42)} \cdot \left(1,35 \cdot 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - \frac{77,73}{100} \right) + 89,32 \right)} \right]$$

$$X = 2,43 \text{ m}$$

Biegemoment an der Stelle $X = 2,43 \text{ m}$:

$$M(X) = \frac{1,35gX}{2} (L - X) + A_{gr12,d}X - q_{L,gr12,d} \frac{(X - X_L)^2}{2} - (q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}) \frac{(X - X_L)^3}{6b}$$

$$M(X) = \frac{1,35 \cdot 24,29 \cdot 2,43}{2} \cdot (4,2 - 2,43) + 89,32 \cdot 2,43$$

$$- (-13,42) \cdot \frac{(2,43 - 0,7773)^2}{2} - (193,61 - (-13,42)) \cdot \frac{(2,43 - 0,7773)^3}{6 \cdot 2,7958}$$

$$M(X = 2,43) = 250,18 \text{ kNm}$$

Querkraft an der Stelle $X = 2,43 \text{ m}$:

$$Q(X) = g \left(\frac{L}{2} - X \right) + A_{gr12,d} - q_{L,gr12,d} (X - X_L) - (q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}) \frac{(X - X_L)^2}{2b}$$

$$Q(X) = 1,35 \cdot 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - 2,43 \right) + 89,32 - (-13,42) \cdot (2,43 - 0,7773) - (193,61 - (-13,42)) \cdot \frac{(2,43 - 0,7773)^2}{2 \cdot 2,7958}$$

$$Q(X = 2,43) = 0 \text{ kN}$$

Berechnung der Schnittgrößen $M_i(x)$ und $Q_i(x)$ an der Stelle $x = 242,7 \text{ cm} = 2,43 \text{ m}$:

Ständige Last:

$$M(x) = Ax - \frac{gx^2}{2} = \frac{gx}{2} (L - x) = \frac{24,29 \cdot 2,43}{2} \cdot (4,2 - 2,43) = 52,25 \cdot \text{kNm}$$

$$Q(x) = A - gx = g \left(\frac{L}{2} - x \right) = 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - 2,43 \right) = -8,01 \text{ kN}$$

Veränderliche Lasten:

Vertikallast LM 71:

$$M_{vk}(x) = 65,33 \cdot 2,43 - 74,36 \frac{(2,43 - 0,7773)^2}{2} + \frac{(74,36 - 7,10)}{6 \cdot 2,7958} (2,43 - 0,7773)^3 = 75,37 \text{ kNm}$$

$$Q_{vk}(x) = 65,33 - 74,36 \cdot (2,43 - 0,7773) + \frac{74,36 - 7,10}{2 \cdot 2,7958} \cdot (2,43 - 0,7773)^2 = -24,55 \text{ kN}$$

Fliehkraft:

$$M_{tk}(x) = -8,12 \cdot 2,43 - \frac{-41,4 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(2,43 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773\right) - 50,5 \cdot \frac{(2,43 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

$$M_{tk}(x) = 12,02 \text{ kNm}$$

$$Q_{tk}(x) = -8,12 - \frac{-41,4 \cdot 1,26}{2} - \frac{50,5}{2 \cdot 1,545} \cdot (2,43 - 1,26 - 0,7773)^2 = 15,45 \text{ kN}$$

Seitenstoß:

$$M_{sk}(x) = -11,93 \cdot 2,43 - \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(2,43 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773\right) - 74,15 \cdot \frac{(2,43 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

$$M_{sk}(x) = 17,65 \text{ kNm}$$

$$Q_{sk}(x) = -11,93 - \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} - \frac{74,15}{2 \cdot 1,545} \cdot (2,43 - 1,26 - 0,7773)^2 = 22,69 \text{ kN}$$

Ermittlung von $M_{sd}(x)$ und $Q_{sd}(x)$:

$$M_{sd}(x) = M_{g,d}(x) + M_{gr12,d}(x) = 1,35M_g + 1,45(M_{vk}(x)\alpha\Phi + M_{tkR}(x)\alpha + M_{sk}(x)\alpha)$$

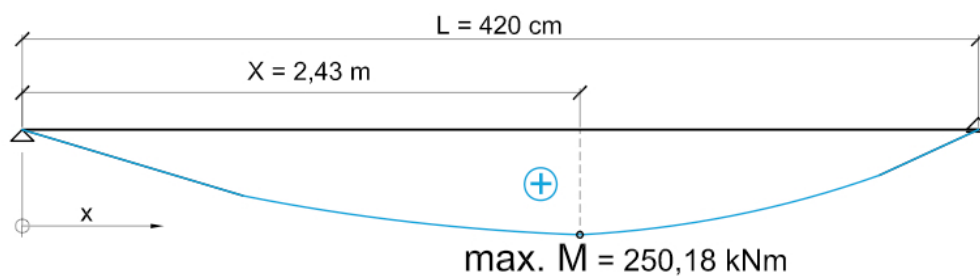
$$M_{sd}(x) = 1,35 \cdot 52,25 + 1,45 \cdot (75,37 \cdot 1,0 \cdot 1,25 + 12,02 \cdot 1,0 + 17,65 \cdot 1,0) = 250,18 \text{ kNm}$$

$$Q_{sd}(x) = Q_{g,d}(x) + Q_{gr12,d}(x) = 1,35Q_g + 1,45(Q_{vk}(x)\alpha\Phi + Q_{tkR}(x)\alpha + Q_{sk}(x)\alpha)$$

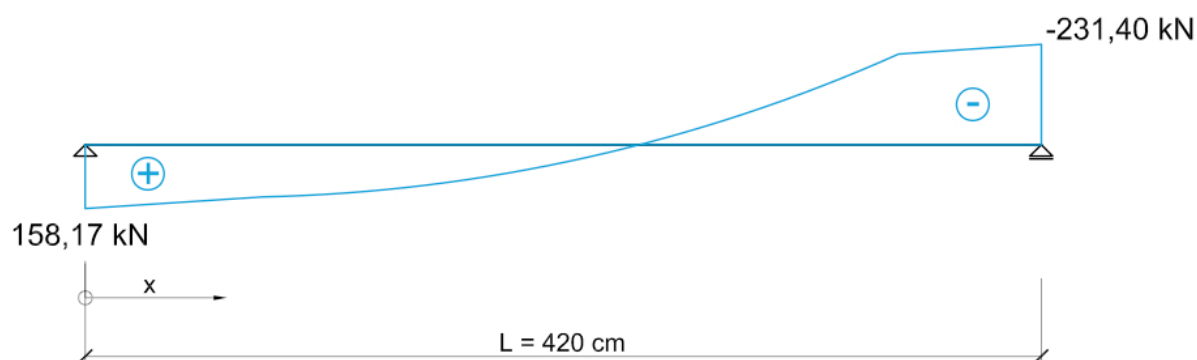
$$Q_{sd}(x) = 1,35 \cdot (-8,01) + 1,45 \cdot (-24,55 \cdot 1,0 \cdot 1,25 + 15,45 \cdot 1,0 + 22,69 \cdot 1,0) = 0,0 \text{ kN}$$

Tab. 43: Werte der $M_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	168,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$M_{sd}(X)$ [kNm]	0,0	63,54	121,32	173,44	215,85	243,05	250,18	229,88	178,54	94,3	0,0

**Abb. 47:** Momentenverteilung der M_{sd} für gr12**Tab. 44:** Werte der $Q_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	168,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{sd}(X)$ [kN]	158,17	144,4	131,33	114,71	85,04	42,3	0,0	-82,36	-164,29	-217,63	-231,4

**Abb. 48:** Querkraftverteilung der Q_{sd} für gr12

7.2.2.2 Lastfall b: $V = 120 \text{ km/h}$

Tab. 45: zeigt die ausgewählte Lastfall b

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times 1 \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times \alpha \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	
		0	-	-	-	

Da die ständigen Lasten nicht von der Geschwindigkeit abhängig sind, können sie direkt aus Lastfall a übernommen werden.

Charakteristische ständige Last:

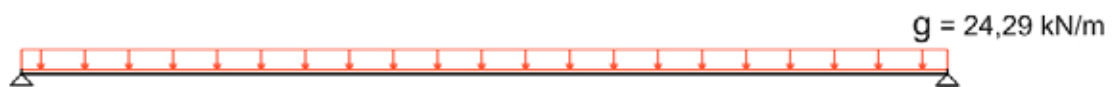


Abb. 49: charakteristische Lasten aus ständigen Einwirkungen

Veränderlichen Einwirkungen

Vertikallast

Die charakteristischen Werte der Vertikallast ändern sich ebenfalls nicht und werden aus dem Lastfall a übernommen.

Die resultierende Belastung auf das Grobblech aus den vertikalen Einwirkungen (LM 71) ergibt sich wie:

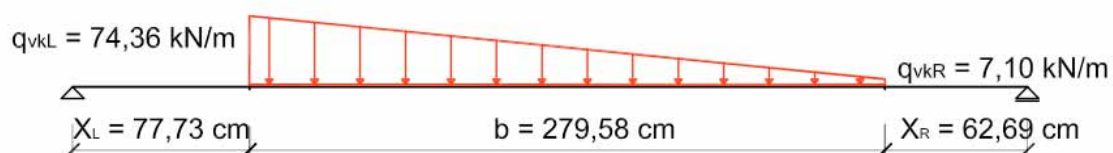


Abb. 50: charakteristische Last aus der vertikalen Einwirkungen (LM 71)

Horizontallast

Fliehkraft

Die Geschwindigkeit wird lt. Tab. 46 auf 120 km/h festgesetzt.

Abminderungsfaktor

$$f = 1$$

Fliehkraft:

$$Q_{tk} = \frac{V^2}{127 \cdot R} (f \times Q_{vk}) = \frac{120^2}{127 \cdot 1000} \cdot (1,0 \cdot 125) = 14,17 \text{ kN}$$

Höhe der Angriffspunktes der Fliehkraft über dem Grobblech:

$$h_{tk} = h_s + 75 \sin \alpha + 197 \cos \alpha = 55 + 75 \sin(6,123) + 197 \cos(6,123) = 258,88 \text{ cm}$$

Lastumordnung:

$$N_{tk} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{tk} = Q_{tk} \times h_{tk} = 14,17 \cdot \frac{258,88}{100} = 36,7 \text{ kNm}$$

Spannungen:

$$\sigma_{tkL} = \frac{M_{tk}}{W_L} = \frac{36,7}{-0,580} = -63,25 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{tkR} = \frac{M_{tk}}{W_R} = \frac{36,7}{0,640} = 57,32 \text{ kN/m}^2$$

Resultierende Belastung auf das Grobblech:

$$q_{tkL} = \sigma_{tkL} b_L = -63,25 \cdot \frac{40,13}{100} = -25,38 \text{ kN/m}$$

$$q_{tkR} = \sigma_{tkR} b_R = 57,32 \cdot \frac{53,99}{100} = 30,95 \text{ kN/m}$$

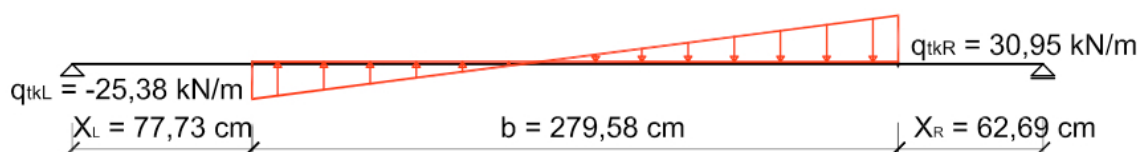


Abb. 51: charakteristische Last aus der Fliehkraft

Der Seitenstoß

Der Seitenstoß ist ebenfalls von der Geschwindigkeit unabhängig und wird hier aus Lastfall a übernommen.

Resultierende Belastung auf das Grobblech:

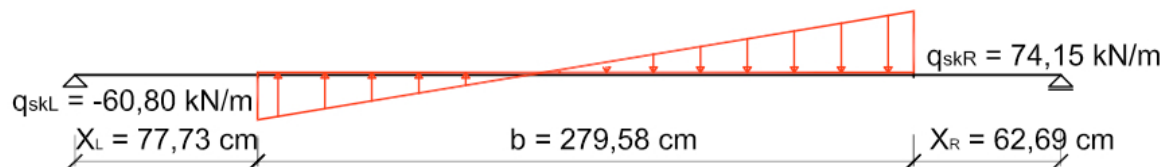


Abb. 52: charakteristische Last aus dem Seitenstoß

7.2.2.2.1 Schnittgrößenermittlung (Lastfall b)

Vertikallast

Die Vertikallast wird aus dem Lastfall a übernommen, da sie nicht von der Geschwindigkeit des Zuges abhängig ist.

Tab. 46: Momentenverteilung aus der Vertikallast (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	184,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
M _{vk} (X) [kNm]	0,0	27,44	54,73	74,1	83,03	81,42	75,37	58,73	40,58	20,39	0,0

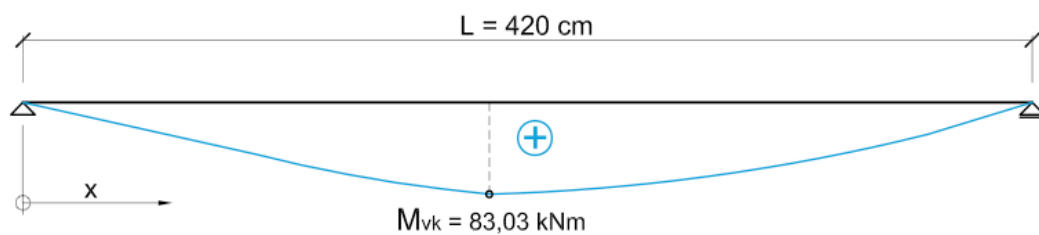
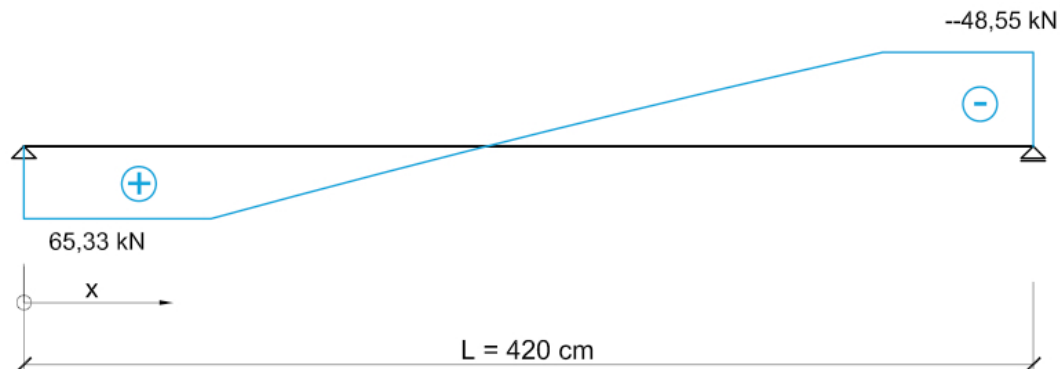


Abb. 53: Momentenverteilung aus der Vertikallast

Tab. 47: Querkraftverteilung aus der Vertikallast (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	184,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{vk}(X)$ [kN]	65,33	65,33	60,72	32,24	0,0	-11,98	-24,6	-39,23	-46,49	-48,55	-48,55

**Abb. 54:** Querkraftverteilung aus der Vertikallast

Horizontallast

Fliehkraft

Längen für Ermittlung von Schnittgrößen aus der Fliehkraft:

$$l_1 = \frac{|q_{tkL}|b}{q_{tkR} + |q_{tkL}|} = \frac{|-25,38|}{30,95 + |-25,38|} \cdot \frac{279,58}{100} = 1,26 \text{ m}$$

$$l_2 = b - l_1 = \frac{279,58}{100} - 1,26 = 1,54 \text{ m}$$

Berechnung der Auflagerkräfte:

$$A_{tk} = \frac{1}{4,20} \left[\frac{-25,38 \cdot 1,26}{2} \left(\frac{2}{3} \cdot 1,26 + 1,54 + \frac{62,69}{100} \right) + \frac{30,95 \cdot 1,54}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 1,26 + \frac{62,69}{100} \right) \right] = -4,98 \text{ kN}$$

$$B_{tk} = \frac{q_{tkL}l_1}{2} + \frac{q_{tkR}l_2}{2} - A_{tk} = \frac{-25,38 \cdot 1,26}{2} + \frac{30,95 \cdot 1,54}{2} - (-4,98) = 12,77 \text{ kN}$$

Min $M(x)$:

$$X = X_L + l_1 - \sqrt{l_1^2 - \frac{2l_1A_{tk}}{q_{tkL}}} = 0,7773 + 1,26 - \sqrt{1,26^2 - \frac{2 \cdot 1,26 \cdot (-4,98)}{-25,38}} = 0,99 \text{ m}$$

$$M_{tk}(x) = -4,98 \cdot 0,99 - (-25,38) \cdot \frac{(0,99 - 0,7773)^2}{6} \cdot \frac{0,7773 + 3 \cdot 1,26 - 0,99}{1,26} = -4,39 \text{ kNm}$$

Max $M(x)$:

$$X = X_L + l_1 + \sqrt{\left(A_{tk} - \frac{q_{tkL} l_1}{2}\right) \frac{2l_2}{q_{tkR}}} = 0,7773 + 1,26 + \sqrt{\left(-4,98 - \frac{-25,38 \cdot 1,26}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot 1,545}{30,95}} = 3,08 \text{ m}$$

$$M_{tk}(x) = -4,98 \cdot 3,08 - \frac{-25,38 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(3,08 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773\right) - 30,95 \cdot \frac{(3,08 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

$$M_{tk}(x) = 10,94 \text{ kNm}$$

Tab. 48: Momentenverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$M_{tk}(X)$ [kNm]	0,0	-2,09	-4,39	-3,7	-0,5	3,97	7,37	10,94	10,06	5,36	0,0

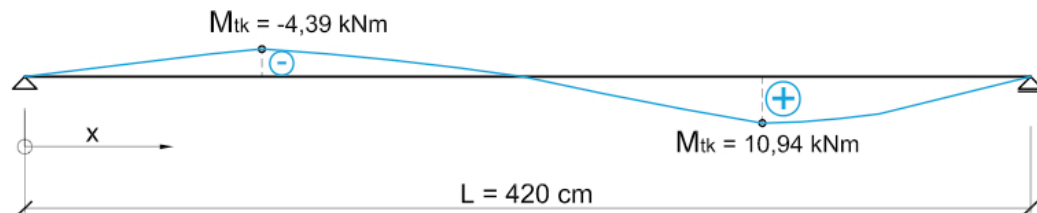


Abb. 55 Momentenverteilung aus der Fliehkraft

Tab. 49: Querkraftverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{tk}(X)$ [kN]	-4,98	-4,98	0,0	4,92	9,72	10,96	9,47	0,0	-6,63	-12,77	-12,77

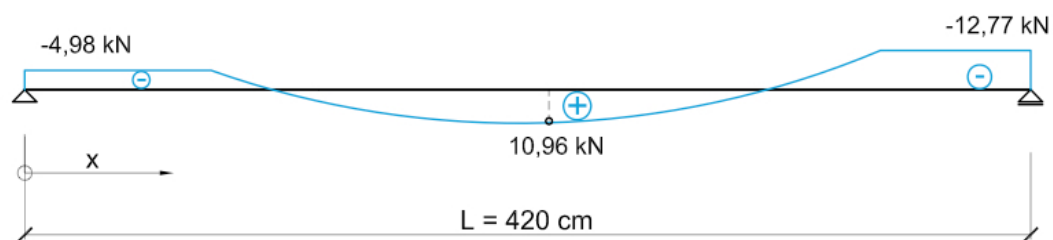


Abb. 56 Querkraftverteilung aus der Fliehkraft

Der Seitenstoß

Aufgrund der Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit ergibt sich der Seitenstoß gleich zum Lastfall a.

Tab. 50: Momentenverteilung aus dem Seitenstoß

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$M_{sk}(X)$ [kNm]	0,0	-5,01	-10,51	-8,86	-1,19	9,51	17,65	26,22	24,09	12,85	0,0

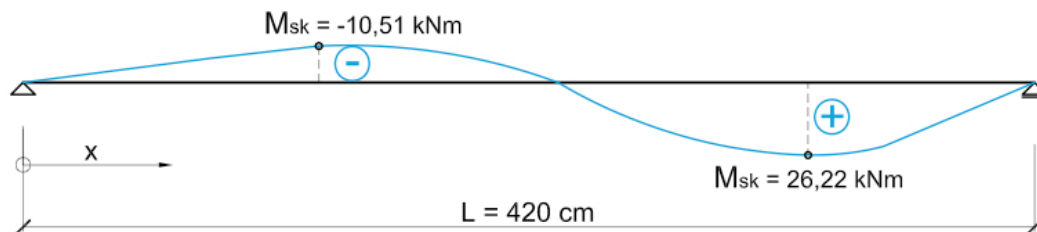


Abb. 57: Momentenverteilung aus dem Seitenstoß

Tab. 51: Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß

X [cm]	0,0	42,0	99,0	126,0	168,0	210,0	242,7	308,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{sk}(X)$ [kN]	-11,93	-11,93	0,0	11,79	23,29	26,26	22,69	0,0	-15,89	-30,6	-30,6

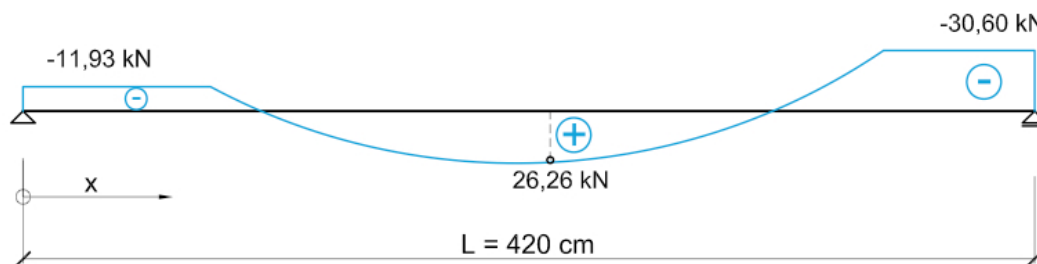


Abb. 58: Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß

7.2.2.2.2 Lastkombinationen (Lastfall b)

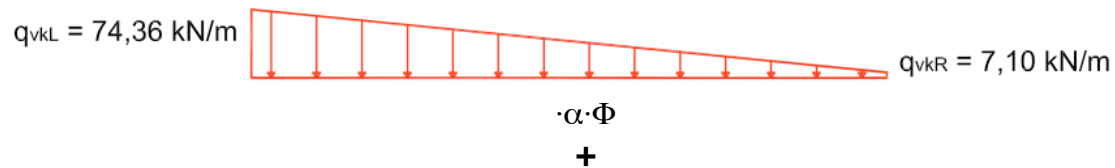
Aus den einzelnen Schnittgrößen werden nun die Lastgruppen gebildet. Die Berechnungsschritte werden anhand Lastgruppe gr12 dargestellt.

Ermittlung der Belastung für Lastgruppe gr12:

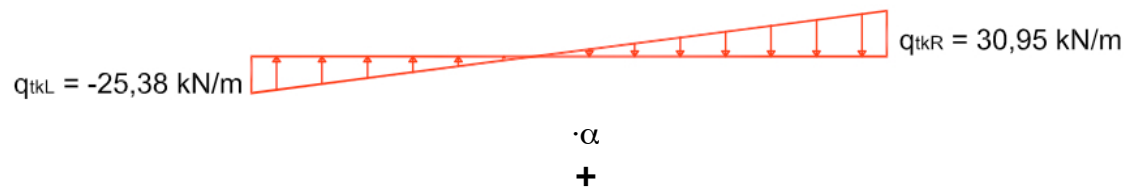
$$q_{L,gr12,d} = 1,45(q_{vKL} \alpha \Phi + q_{tkL} \alpha + q_{skL} \alpha)$$

$$q_{R,gr12,d} = 1,45(q_{vKR} \alpha \Phi + q_{tkR} \alpha + q_{skR} \alpha)$$

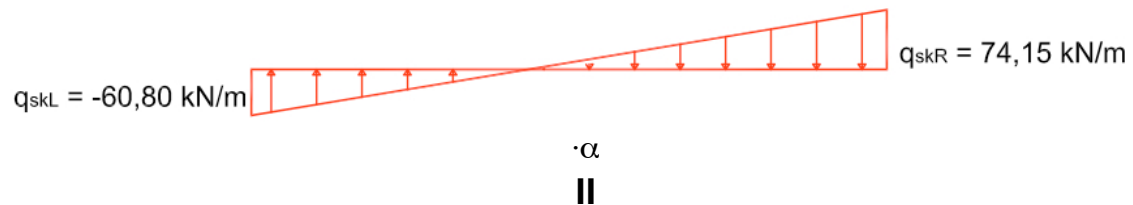
Lastmodell 71: Vertikallast



Lastmodell 71: Fliehkraft



Lastmodell 71: Seitenstoß



Lastgruppe gr12 für LM 71

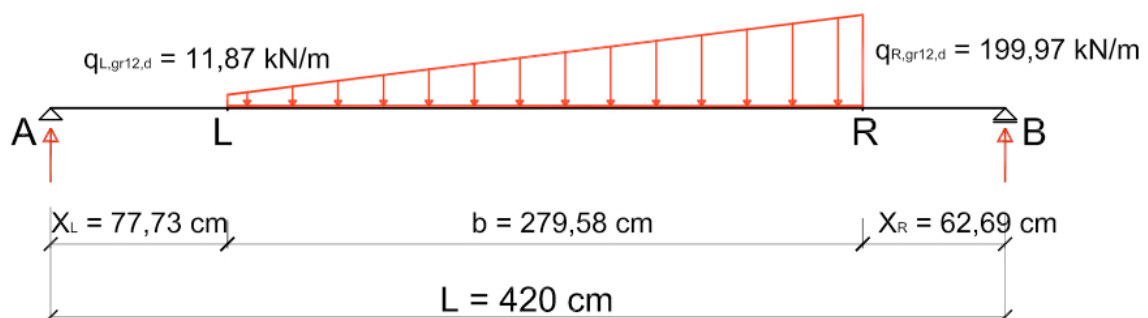
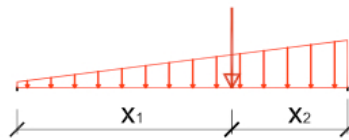


Abb. 59: Superposition der Einzelnen Lasten

$$q_{L,gr12,d} = 1,45 \cdot (74,36 \cdot 1,21 \cdot 1,25 + (-25,38) \cdot 1,21 + (-60,8) \cdot 1,21) = 11,87 \text{ kN/m}$$

$$q_{R,gr12,d} = 1,45 \cdot (7,1 \cdot 1,21 \cdot 1,25 + 30,95 \cdot 1,21 + 74,15 \cdot 1,21) = 199,97 \text{ kN/m}$$

Abmessungen und Auflagerreaktionen .



$$x_2 = \frac{b}{3} \frac{2q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}} = \frac{279,58}{3} \frac{2 \cdot 11,87 + 199,97}{11,87 + 199,97} = 98,41 \text{ cm} = 0,98 \text{ m}$$

$$x_1 = b - x_2 = 279,58 - 98,41 = 181,17 \text{ cm} = 1,81 \text{ m}$$

$$A_{gr12,d} = \frac{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{2} b \frac{x_R + x_2}{L} = \frac{11,87 + 199,97}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{62,69 + 98,41}{420} = 113,59 \text{ kN}$$

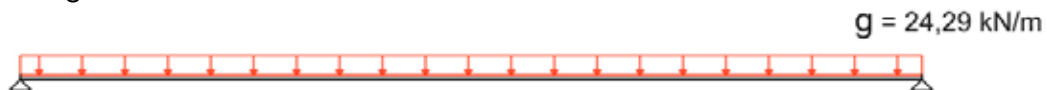
$$B_{gr12,d} = \frac{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{2} b \frac{x_L + x_1}{L} = \frac{11,87 + 199,97}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{77,73 + 181,17}{420} = 182,54 \text{ kN}$$

Veränderliche Lasten: Lastgruppe gr12



+

Ständige Lasten



||

Lastfall für Lage 4: ständige und veränderliche Lasten

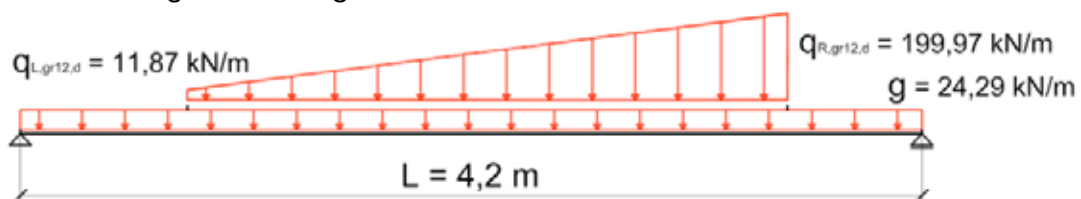


Abb. 60: Superposition der ständigen und veränderlichen Last

Stelle des maximalen Biegemomentes eingesetzt für Lastgruppe gr12:

$$X = X_L - \frac{b(1,35g + q_{L,gr12,d})}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \pm \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{2b(1,35g + q_{L,gr12,d})}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \right)^2 + \frac{8b}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \left(1,35g \left(\frac{L}{2} - X_L \right) + A_{gr12,d} \right)} \right]$$

$$X = \frac{77,73}{100} - \frac{2,7958 \cdot (1,35 \cdot 24,29 + 11,87)}{199,97 - 11,87} + \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2,7958 \cdot (1,35 \cdot 24,29 + 11,87)}{199,97 - 11,87} \right)^2 + \frac{8 \cdot 2,7958}{199,97 - 11,87} \cdot \left(1,35 \cdot 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - \frac{77,73}{100} \right) + 113,59 \right)} \right]$$

$$X = 2,37 \text{ m}$$

Biegemoment an der Stelle $X = 2,37 \text{ m}$:

$$M(X) = \frac{1,35gX}{2}(L - X) + A_{gr12,d}X - q_{L,gr12,d} \frac{(X - X_L)^2}{2} - (q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}) \frac{(X - X_L)^3}{6b}$$

$$M(X) = \frac{1,35 \cdot 24,29 \cdot 2,37}{2} \cdot (4,2 - 2,37) + 113,59 \cdot 2,37 - (11,87) \cdot \frac{(2,37 - 0,7773)^2}{2} - (199,97 - 11,87) \cdot \frac{(2,37 - 0,7773)^3}{6 \cdot 2,7958}$$

$$M(X = 2,43) = 279,96 \text{ kNm}$$

Querkraft an der Stelle $X = 2,37 \text{ m}$:

$$Q(X) = g \left(\frac{L}{2} - X \right) + A_{gr12,d} - q_{L,gr12,d} (X - X_L) - (q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}) \frac{(X - X_L)^2}{2b}$$

$$Q(X) = 1,35 \cdot 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - 2,37 \right) + 113,59 - 11,87 \cdot (2,37 - 0,7773) - (199,97 - 11,87) \cdot \frac{(2,37 - 0,7773)^2}{2 \cdot 2,7958}$$

$$Q(X = 2,37) = 0 \text{ kN}$$

Berechnung der Schnittgrößen $M_i(x)$ und $Q_i(x)$ an der Stelle $x = 242,7 \text{ cm} = 2,43 \text{ m}$:

Ständige Last:

$$M(x) = Ax - \frac{gx^2}{2} = \frac{gx}{2}(L - x) = \frac{24,29 \cdot 2,43}{2} \cdot (4,2 - 2,43) = 52,25 \cdot \text{kNm}$$

$$Q(x) = A - gx = g \left(\frac{L}{2} - x \right) = 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - 2,43 \right) = -8,01 \text{ kN}$$

Veränderliche Lasten:

Vertikallast LM 71:

$$M_{vk}(x) = 65,33 \cdot 2,43 - 74,36 \frac{(2,43 - 0,7773)^2}{2} + \frac{(74,36 - 7,10)}{6 \cdot 2,7958} (2,43 - 0,7773)^3 = 75,37 \text{ kNm}$$

$$Q_{vk}(x) = 65,33 - 74,36 \cdot (2,43 - 0,7773) + \frac{74,36 - 7,10}{2 \cdot 2,7958} \cdot (2,43 - 0,7773)^2 = -24,55 \text{ kN}$$

Fliehkraft:

$$M_{tk}(x) = -4,98 \cdot 2,43 - \frac{-25,38 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(2,43 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773\right) - 30,95 \cdot \frac{(2,43 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

$$M_{tk}(x) = 7,37 \text{ kNm}$$

$$Q_{tk}(x) = -4,98 - \frac{-25,38 \cdot 1,26}{2} - \frac{30,95}{2 \cdot 1,545} \cdot (2,43 - 1,26 - 0,7773)^2 = 9,47 \text{ kN}$$

Seitenstoß:

$$M_{sk}(x) = -11,93 \cdot 2,43 - \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} \cdot \left(2,43 - \frac{1}{3} \cdot 1,26 - 0,7773\right) - 74,15 \cdot \frac{(2,43 - 1,26 - 0,7773)^3}{6 \cdot 1,545}$$

$$M_{sk}(x) = 17,65 \text{ kNm}$$

$$Q_{sk}(x) = -11,93 - \frac{-60,8 \cdot 1,26}{2} - \frac{74,15}{2 \cdot 1,545} \cdot (2,43 - 1,26 - 0,7773)^2 = 22,69 \text{ kN}$$

Ermittlung von $M_{sd}(x)$ und $Q_{sd}(x)$:

$$M_{sd}(x) = M_{g,d}(x) + M_{gr12,d}(x) = 1,35M_g + 1,45(M_{vk}(x)\alpha\Phi + M_{tkR}(x)\alpha + M_{sk}(x)\alpha)$$

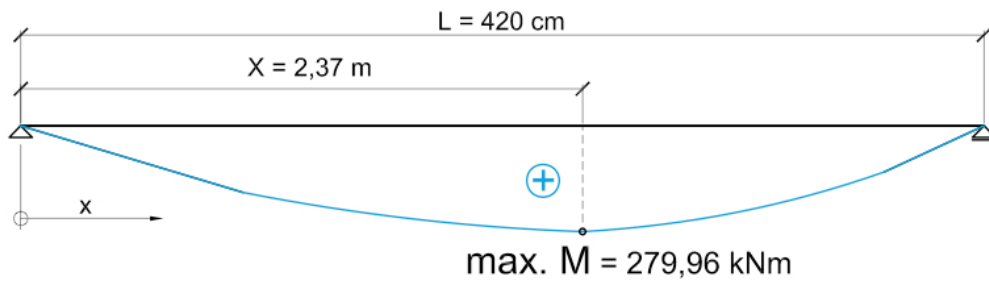
$$M_{sd}(x) = 1,35 \cdot 52,25 + 1,45 \cdot (75,37 \cdot 1,21 \cdot 1,25 + 7,37 \cdot 1,21 + 17,65 \cdot 1,21) = 279,74 \text{ kNm}$$

$$Q_{sd}(x) = Q_{g,d}(x) + Q_{gr12,d}(x) = 1,35Q_g + 1,45(Q_{vk}(x)\alpha\Phi + Q_{tkR}(x)\alpha + Q_{sk}(x)\alpha)$$

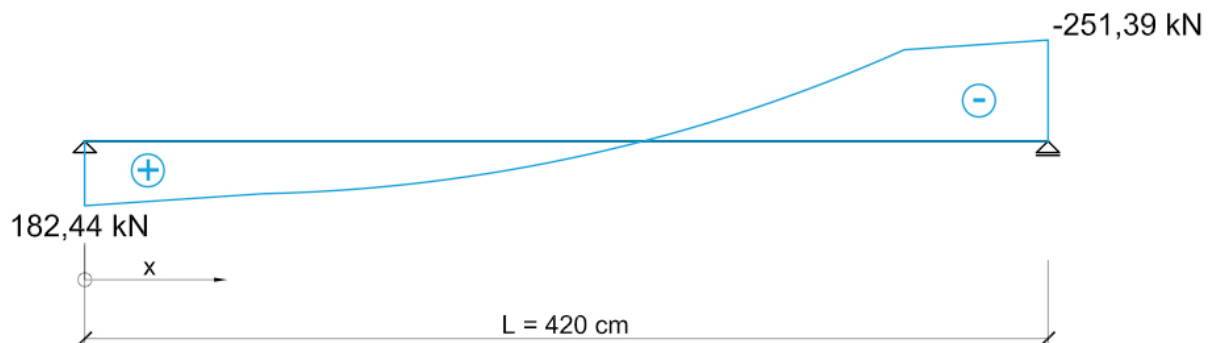
$$Q_{sd}(x) = 1,35 \cdot (-8,01) + 1,45 \cdot (-24,55 \cdot 1,21 \cdot 1,25 + 9,47 \cdot 1,21 + 22,69 \cdot 1,21) = -8,24 \text{ kN}$$

Tab. 52: Werte der $M_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	168,0	237,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$M_{sd}(X)$ [kNm]	0,0	73,73	141,66	201,21	247,15	279,96	279,74	253,5	195,17	102,69	0,0

**Abb. 61:** Momentenverteilung der M_{sd} für gr12**Tab. 53:** Werte der $Q_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	168,0	237,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{sd}(X)$ [kN]	182,44	168,67	154,03	127,57	89,24	0,0	-8,24	-96,96	-182,77	-237,62	-251,39

**Abb. 62:** Querkraftverteilung der Q_{sd} für gr12

7.2.2.3 Lastfall c: $V = 0 \text{ km/h}$

Tab. 54: Lastfall c

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times 1 \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	$\Phi \times \alpha \times 1 \times$ (LM71“+“SW/0)
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times$ (LM71“+“SW/0)	
		0	-	-	-	

Im Lastfall c befindet sich der Zug im Stillstand. Nachdem Horizontallasten (Fliehkraft und Seitenstoß) nur bei der Zugfahrt wirken, sind sie in diesem Fall zu vernachlässigen.

Die ständige Lasten bleiben gleich.

Charakteristische *ständige Last*:

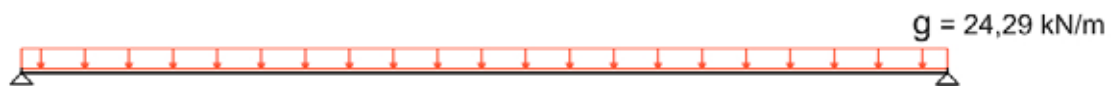


Abb. 63: charakteristische Last aus ständigen Einwirkung

Veränderliche Einwirkungen

Wie oben erwähnt, werden die Horizontallasten (Fliehkraft und Seitenstoß) im Lastfall c nicht betrachtet. Die Vertikallast verbleibt als einzige veränderliche Einwirkung. Die Werte der Belastung bzw. die Schnittgrößen sind gleich wie bei den Lastfällen a und b und können daher übernommen werden.

Die resultierende Belastung auf das Grobblech aus den vertikalen Einwirkung (LM 71):

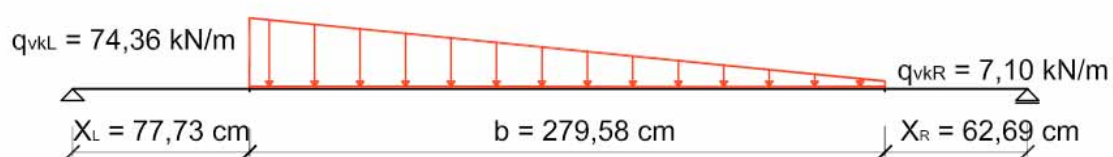


Abb. 64: charakteristische Last aus der vertikalen Einwirkungen (LM 71)

7.2.2.3.1 Schnittgrößenermittlung (Lastfall c)

Vertikallast

Tab. 55: Momentenverteilung aus der Vertikallast (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	184,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$M_{vk}(X)$ [kNm]	0,0	27,44	54,73	74,1	83,03	81,42	75,37	58,73	40,58	20,39	0,0

Tab. 56: Querkraftverteilung aus der Vertikallast (LM 71)

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	184,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{vk}(X)$ [kN]	65,33	65,33	60,72	32,24	0,0	-11,98	-24,6	-39,23	-46,49	-48,55	-48,55

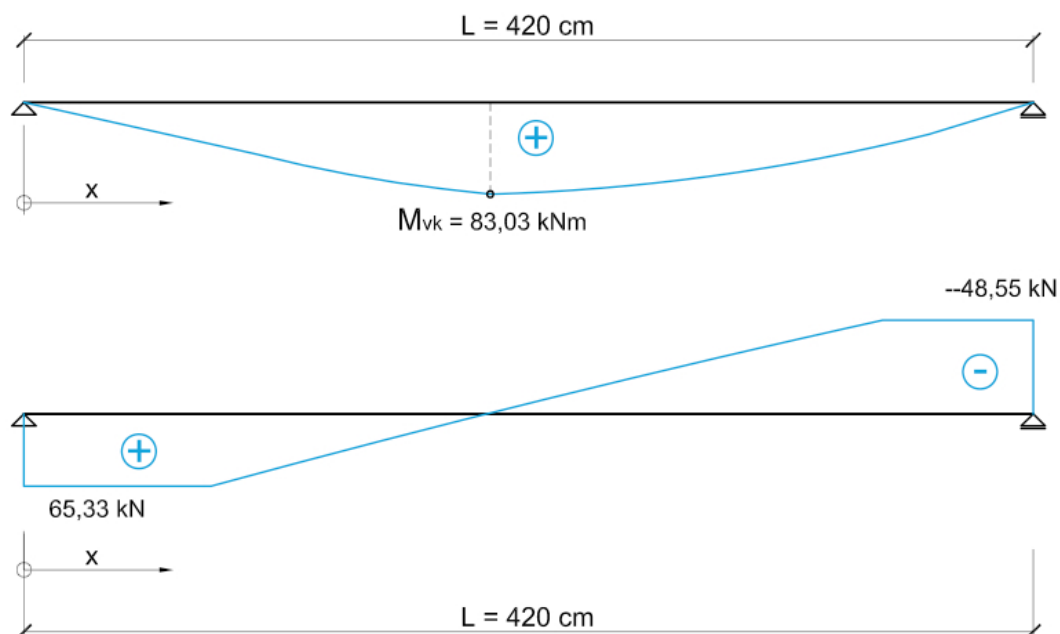


Abb. 65: Momenten- und Querkraftverteilung aus der Vertikallast

7.2.2.3.2 Lastkombinationen (Lastfall c)

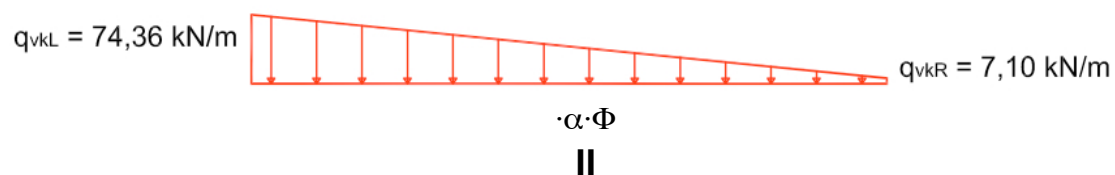
Aus den einzelnen Schnittgrößen werden nun die Lastgruppen gebildet. Die Berechnungsschritte werden anhand Lastgruppe gr12 dargestellt.

Ermittlung der Belastung für Lastgruppe gr12:

$$q_{L,gr12,d} = 1,45(q_{vKL}\alpha\Phi + q_{tkL}\alpha + q_{skL}\alpha)$$

$$q_{R,gr12,d} = 1,45(q_{vKR}\alpha\Phi + q_{tkR}\alpha + q_{skR}\alpha)$$

Lastmodell 71: Vertikallast



Lastgruppe gr12 (LM 71)

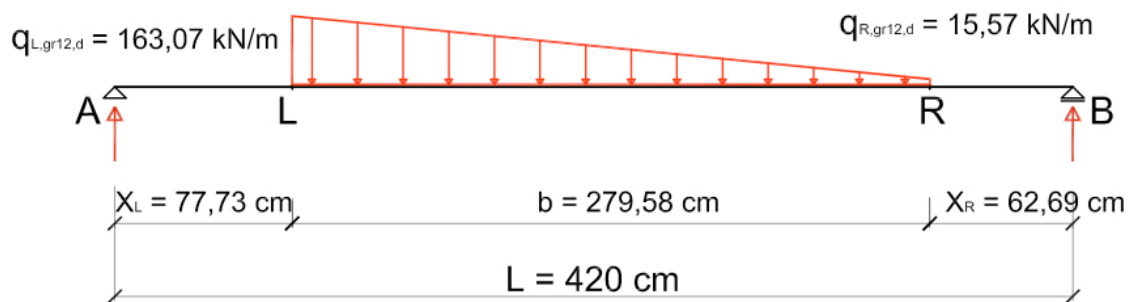
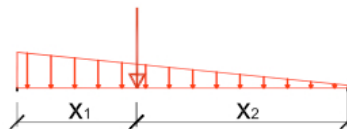


Abb. 66: Superposition der Einzelnen Lasten

$$q_{L,gr12,d} = 1,45 \cdot (74,36 \cdot 1,21 \cdot 1,25) = 163,07 \text{ kN/m}$$

$$q_{R,gr12,d} = 1,45 \cdot (7,1 \cdot 1,21 \cdot 1,25) = 15,57 \text{ kN/m}$$

Abmessungen und Auflagerreaktionen:



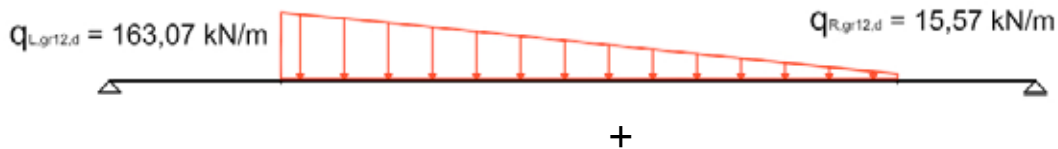
$$x_2 = \frac{b}{3} \frac{2q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}} = \frac{279,58}{3} \frac{2 \cdot 163,07 + 15,57}{163,07 + 15,57} = 178,26 \text{ cm} = 1,78 \text{ m}$$

$$x_1 = b - x_2 = 279,58 - 178,26 = 101,32 \text{ cm} = 1,013 \text{ m}$$

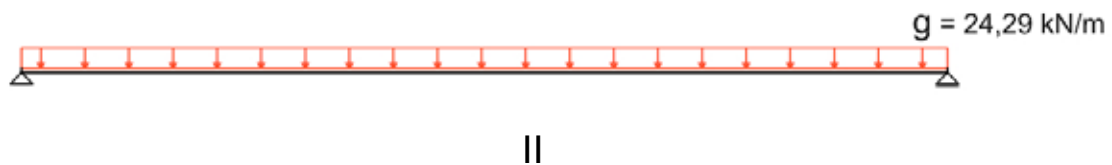
$$A_{gr12,d} = \frac{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{2} b \frac{X_R + x_2}{L} = \frac{163,07 + 15,57}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{62,69 + 178,26}{420} = 143,27 \text{ kN}$$

$$B_{gr12,d} = \frac{q_{L,gr12,d} + q_{R,gr12,d}}{2} b \frac{X_L + x_1}{L} = \frac{163,07 + 15,57}{2} \cdot \frac{279,58}{100} \cdot \frac{77,73 + 101,32}{420} = 106,46 \text{ kN}$$

Veränderliche Lasten aus dem LM 71:



Ständige Lasten:



Lastfall für Lage 4: Lastgruppe gr12 ($V = 0 \text{ km/h}$):

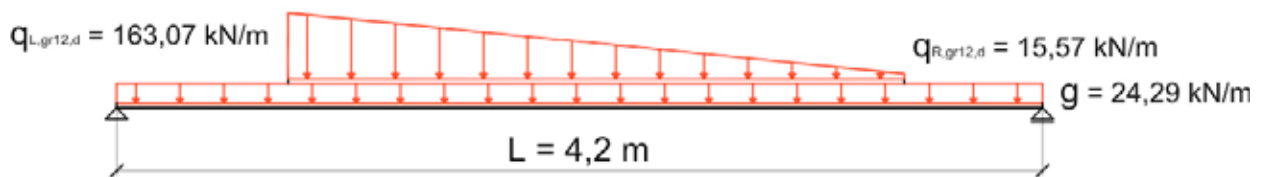


Abb. 67: Superposition der ständigen und veränderlichen Last

Stelle des maximalen Biegemomentes eingesetzt für Lastgruppe gr12:

$$X = X_L - \frac{b(1,35g + q_{L,gr12,d})}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \pm \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{2b(1,35g + q_{L,gr12,d})}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \right)^2 + \frac{8b}{q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}} \left(1,35g \left(\frac{L}{2} - X_L \right) + A_{gr12,d} \right)} \right]$$

$$X = \frac{77,73}{100} - \frac{2,7958 \cdot (1,35 \cdot 24,29 + 163,07)}{15,57 - 163,07} +$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2,7958 \cdot (1,35 \cdot 24,29 + 163,07)}{15,57 - 163,07} \right)^2 + \frac{8 \cdot 2,7958}{15,57 - 163,07} \cdot \left(1,35 \cdot 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - \frac{77,73}{100} \right) + 143,27 \right)} \right]$$

$$X = 1,90 \text{ m}$$

Biegemoment an der Stelle $X = 1,90$ m:

$$M(X) = \frac{1,35gX}{2}(L - X) + A_{gr12,d}X - q_{L,gr12,d} \frac{(X - X_L)^2}{2} - (q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}) \frac{(X - X_L)^3}{6b}$$

$$M(X) = \frac{1,35 \cdot 24,29 \cdot 1,90}{2} \cdot (4,2 - 1,90) + 143,27 \cdot 1,90$$

$$- 163,07 \cdot \frac{(1,90 - 0,7773)^2}{2} - (15,57 - 163,07) \cdot \frac{(1,90 - 0,7773)^3}{6 \cdot 2,7958}$$

$$M(X = 1,90) = 253,51 \text{ kNm}$$

Querkraft an der Stelle $X = 1,90$ m:

$$Q(X) = g\left(\frac{L}{2} - X\right) + A_{gr12,d} - q_{L,gr12,d}(X - X_L) - (q_{R,gr12,d} - q_{L,gr12,d}) \frac{(X - X_L)^2}{2b}$$

$$Q(X) = 1,35 \cdot 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - 1,90\right) + 143,27 - 163,07 \cdot (1,90 - 0,7773) - (15,57 - 163,07) \cdot \frac{(1,90 - 0,7773)^2}{2 \cdot 2,7958}$$

$$Q(X = 1,90) = 0 \text{ kN}$$

Berechnung der Schnittgrößen $M_i(x)$ und $Q_i(x)$ an der Stelle $x = 242,7 \text{ cm} = 2,43 \text{ m}$:

Ständige Last:

$$M(x) = Ax - \frac{gx^2}{2} = \frac{gx}{2}(L - x) = \frac{24,29 \cdot 2,43}{2} \cdot (4,2 - 2,43) = 52,25 \cdot \text{kNm}$$

$$Q(x) = A - gx = g\left(\frac{L}{2} - x\right) = 24,29 \cdot \left(\frac{4,2}{2} - 2,43\right) = -8,01 \text{ kN}$$

Veränderliche Lasten:

Vertikallast LM 71:

$$M_{vk}(x) = 65,33 \cdot 2,43 - 74,36 \frac{(2,43 - 0,7773)^2}{2} + \frac{(74,36 - 7,10)}{6 \cdot 2,7958} (2,43 - 0,7773)^3 = 75,37 \text{ kNm}$$

$$Q_{vk}(x) = 65,33 - 74,36 \cdot (2,43 - 0,7773) + \frac{74,36 - 7,10}{2 \cdot 2,7958} \cdot (2,43 - 0,7773)^2 = -24,55 \text{ kN}$$

Fliehkraft und der Seiten Stoß sind gleich null.

$$M_{tk}(x) = 0 \text{ kNm}, \quad Q_{tk}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$M_{sk}(x) = 0 \text{ kNm}, \quad Q_{sk}(x) = 0 \text{ kN}$$

Ermittlung von $M_{sd}(x)$ und $Q_{sd}(x)$:

$$M_{sd}(x) = M_{g,d}(x) + M_{gr12,d}(x) = 1,35M_g + 1,45(M_{vk}(x)\alpha\Phi)$$

$$M_{sd}(x) = 1,35 \cdot 52,25 + 1,45 \cdot (75,37 \cdot 1,21 \cdot 1,25) = 235,83 \text{ kNm}$$

$$Q_{sd}(x) = Q_{g,d}(x) + Q_{gr12,d}(x) = 1,35Q_g(x) + 1,45(Q_{vk}(x)\alpha\Phi)$$

$$Q_{sd}(x) = 1,35 \cdot (-8,01) + 1,45 \cdot (-24,55 \cdot 1,21 \cdot 1,25) = -64,67 \text{ kN}$$

Tab. 57: Werte der $M_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	190,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$M_{sd}(X)$ [kNm]	0,0	86,2	166,29	223,23	253,51	250,85	235,83	189,51	135,25	70,74	0,0

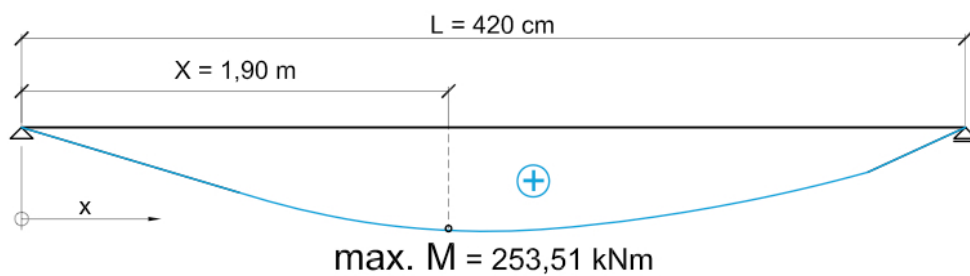


Abb. 68: Momentenverteilung der M_{sd} für gr12

Tab. 58: Werte der $Q_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12

X [cm]	0,0	42,0	84,0	126,0	190,0	210,0	242,7	294,0	336,0	378,0	420,0
$Q_{sd}(X)$ [kN]	212,12	198,35	174,46	98,24	0,0	-26,28	-64,67	-113,57	-143,25	-161,54	-175,31

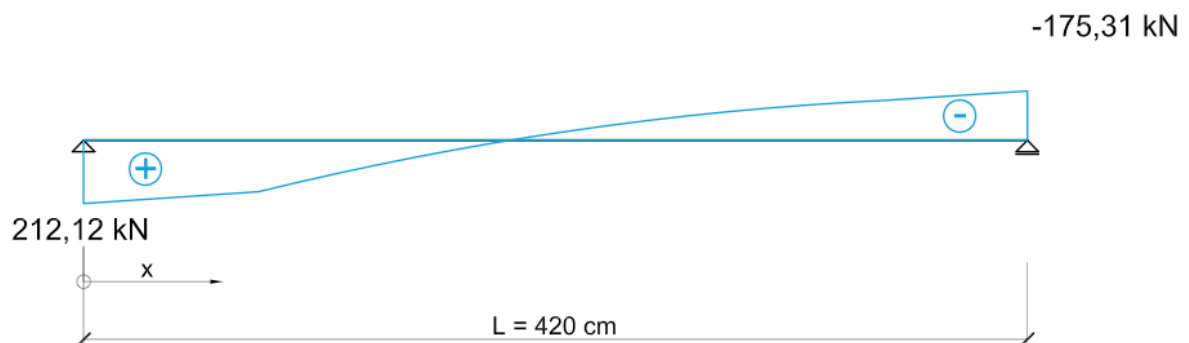


Abb. 69: Querkraftverteilung der Q_{sd} für gr12

7.3 Gegenüberstellung von Ergebnissen

Die Ergebnisse der M_{sd} bzw. Q_{sd} aus verschiedenen Lastgruppen (gr11, gr12 und gr14) bzw. Lastfällen (a, b und c) werden in den Tabellen 59 bis 68 dargestellt. Es werden 3 ausgewählte Radien dargestellt:

- Radius von 1000 m - wurde in Kapitel 7.1 für die Darstellung der Berechnungsschritte ausgearbeitet
- Minimaler Radius ($R = 250$ m)
- Maximaler Radius ($R = \infty$)

Pro Radius werden zwei verschiedene Querschnittsstellen betrachtet:

- Querschnitt in der Brückenmitte (maximales e^*)
- Querschnitt, in dem sich die Tragwerks- und Bogenachse schneiden ($e^* = 0$)

7.3.1 $R = 1000$ m ($e^* = 10$ cm)

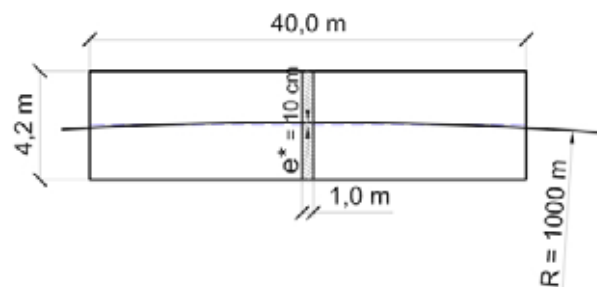


Abb. 70: Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches

Tab. 59: Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 10$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall b		Lastfall a	
			V = 0 km/h		V = 120 km/h		V = 156,75 km/h	
-	[cm]	[cm]	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$
			[m]	[kNm]	[m]	[kNm]	[m]	[kNm]
gr11	-8,3	0,0	1,93	256,75	2,17	261,11	2,21	229,68
	0,0	0,0	1,98	257,03	2,23	263,01	2,26	231,47
	8,3	0,0	2,03	257,63	2,28	265,25	2,31	233,51
	-8,3	-10	1,90	253,51	2,15	262,83	2,19	231,92
	0,0	-10	1,95	254,79	2,20	265,81	2,24	234,59
	8,3	-10	2,00	256,41	2,25	269,13	2,28	237,52
	-8,3	10	1,97	259,08	2,20	258,49	2,24	226,70
	0,0	10	2,01	258,38	2,25	259,30	2,28	227,58
	8,3	10	2,06	257,97	2,30	260,46	2,33	228,72

gr12	-8,3	0,0	1,93	256,75	2,40	273,17	2,46	243,03
	0,0	0,0	1,98	257,03	2,45	276,54	2,50	246,08
	8,3	0,0	2,03	257,63	2,48	280,16	2,53	249,30
	-8,3	-10	1,90	253,51	2,37	279,95	2,43	250,18
	0,0	-10	1,95	254,79	2,41	284,34	2,46	254,05
	8,3	-10	2,00	256,41	2,45	288,94	2,49	258,07
	-8,3	10	1,97	259,08	2,43	265,37	2,49	234,98
	0,0	10	2,01	258,38	2,48	267,69	2,53	237,18
	8,3	10	2,06	257,97	2,52	270,28	2,56	239,57
gr14	-8,3	0,0	1,97	164,34	2,62	190,28	2,66	175,75
	0,0	0,0	2,00	164,57	2,64	192,56	2,68	177,71
	8,3	0,0	2,04	164,93	2,66	194,88	2,69	179,70
	-8,3	-10	1,94	162,64	2,58	198,52	2,61	184,01
	0,0	-10	1,98	163,39	2,60	201,25	2,63	186,34
	8,3	-10	2,02	164,29	2,61	204,02	2,64	188,69
	-8,3	10	1,99	165,57	2,66	181,32	2,70	166,83
	0,0	10	2,03	165,28	2,68	183,13	2,72	168,41
	8,3	10	2,07	165,12	2,70	184,99	2,74	170,03

Tab. 60: Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 10$ cm

			Lastfall c		Lastfall b		Lastfall a	
			V = 0 km/h		V = 120 km/h		V = 156,75 km/h	
Gruppe	e_1	e_2	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$
-	[cm]	[cm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
gr11	-8,3	0,0	206,17	-181,25	190,78	-219,85	167,25	-199,57
	0,0	0,0	202,95	-189,32	187,57	-227,91	164,60	-206,24
	8,3	0,0	199,74	-197,38	184,35	-235,97	161,94	-212,90
	-8,3	-10	212,11	-175,31	197,28	-213,35	172,71	-194,12
	0,0	-10	209,02	-183,25	194,18	-221,30	170,15	-200,69
	8,3	-10	205,92	-191,20	191,08	-229,24	167,59	-207,25
	-8,3	10	200,22	-187,20	184,28	-226,35	161,80	-205,03
	0,0	10	196,89	-195,38	180,95	-234,52	159,05	-211,79
	8,3	10	193,56	-203,56	177,62	-242,70	156,29	-218,55
gr12	-8,3	0,0	206,17	-181,25	175,39	-258,44	152,17	-237,40
	0,0	0,0	202,95	-189,32	172,18	-266,51	149,51	-244,07
	8,3	0,0	199,74	-197,38	168,96	-274,57	146,86	-250,73
	-8,3	-10	212,11	-175,31	182,44	-251,39	158,17	-231,41
	0,0	-10	209,02	-183,25	179,34	-259,34	155,61	-237,97
	8,3	-10	205,92	-191,20	176,24	-267,29	153,05	-244,54
	-8,3	10	200,22	-187,20	168,34	-265,49	146,17	-243,40
	0,0	10	196,89	-195,38	165,01	-273,67	143,42	-250,16
	8,3	10	193,56	-203,56	161,68	-281,85	140,67	-256,92

gr14	-8,3	0,0	137,51	-125,05	106,73	-202,24	95,43	-190,95
	0,0	0,0	135,90	-129,08	105,13	-206,27	94,10	-194,29
	8,3	0,0	134,29	-133,11	103,52	-210,31	92,77	-197,62
	-8,3	-10	140,48	-122,08	110,81	-198,16	98,97	-187,41
	0,0	-10	138,93	-126,05	109,26	-202,14	97,69	-190,70
	8,3	-10	137,38	-130,03	107,71	-206,11	96,41	-193,98
	-8,3	10	134,54	-128,02	102,65	-206,32	91,89	-194,49
	0,0	10	132,87	-132,11	100,99	-210,41	90,51	-197,87
	8,3	10	131,21	-136,20	99,32	-214,50	89,14	-201,25

7.3.2 R = 1000 m ($e^* = 0$)

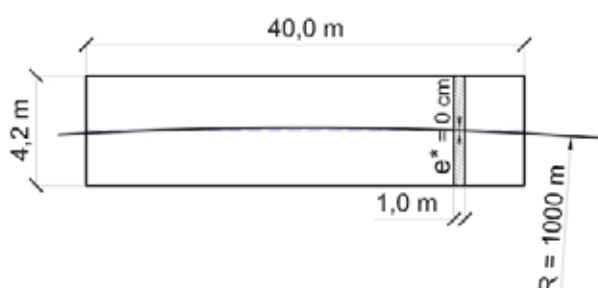


Abb. 71: Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches

Tab. 61: Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall b		Lastfall a	
			$V = 0$ km/h		$V = 120$ km/h		$V = 156,75$ km/h	
			X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$
-	[cm]	[cm]	[m]	[kNm]	[m]	[kNm]	[m]	[kNm]
gr11	-8,3	0,0	1,90	253,51	2,15	262,83	2,19	231,92
	0,0	0,0	1,95	254,79	2,20	265,81	2,24	234,60
	8,3	0,0	2,00	256,41	2,25	269,13	2,28	237,52
	-8,3	-10	1,87	249,38	2,12	263,67	2,17	233,40
	0,0	-10	1,92	251,66	2,17	267,70	2,21	236,94
	8,3	-10	1,98	254,31	2,22	272,06	2,26	240,73
	-8,3	10	1,93	256,75	2,17	261,11	2,21	229,68
	0,0	10	1,98	257,03	2,23	263,01	2,26	231,47
	8,3	10	2,03	257,63	2,28	265,25	2,31	233,51
gr12	-8,3	0,0	1,90	253,51	2,37	279,96	2,43	250,18
	0,0	0,0	1,95	254,79	2,41	284,34	2,46	254,05
	8,3	0,0	2,00	256,41	2,45	288,94	2,49	258,07
	-8,3	-10	1,87	249,38	2,34	285,70	2,39	256,41
	0,0	-10	1,92	251,66	2,38	291,06	2,42	261,06
	8,3	-10	1,98	254,31	2,41	296,61	2,45	265,84
	-8,3	10	1,93	256,75	2,40	273,17	2,46	243,03
	0,0	10	1,98	257,03	2,45	276,54	2,50	246,08
	8,3	10	2,03	257,63	2,48	280,16	2,53	249,30

gr14	-8,3	0,0	1,94	162,64	2,58	198,52	2,61	184,01
	0,0	0,0	1,98	163,39	2,60	201,25	2,63	186,34
	8,3	0,0	2,02	164,29	2,61	204,02	2,64	188,69
	-8,3	-10	1,91	160,49	2,53	206,03	2,57	191,60
	0,0	-10	1,96	161,77	2,55	209,19	2,58	194,27
	8,3	-10	2,00	163,20	2,56	212,39	2,59	196,97
	-8,3	10	1,97	164,34	2,62	190,28	2,66	175,75
	0,0	10	2,00	164,57	2,64	192,56	2,68	177,71
	8,3	10	2,04	164,93	2,66	194,89	2,69	179,71

Tab. 62: Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall b		Lastfall a	
			V = 0 km/h		V = 120 km/h		V = 156,75 km/h	
			$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$
-	[cm]	[cm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
gr11	-8,3	0,0	212,12	-175,31	197,28	-213,35	172,71	-194,12
	0,0	0,0	209,02	-183,25	194,18	-221,30	170,15	-200,69
	8,3	0,0	205,92	-191,20	191,08	-229,24	167,59	-207,25
	-8,3	-10	218,06	-169,36	203,78	-206,85	178,17	-188,66
	0,0	-10	215,08	-177,19	200,79	-214,68	175,70	-195,13
	8,3	-10	212,09	-185,02	197,81	-222,52	173,23	-201,61
	-8,3	10	206,17	-181,25	190,78	-219,85	167,25	-199,57
	0,0	10	202,95	-189,31	187,57	-227,91	164,60	-206,24
	8,3	10	199,74	-197,38	184,35	-235,97	161,94	-212,90
gr12	-8,3	0,0	212,12	-175,31	182,44	-251,39	158,17	-231,40
	0,0	0,0	209,02	-183,25	179,34	-259,34	155,61	-237,97
	8,3	0,0	205,92	-191,20	176,25	-267,29	153,05	-244,54
	-8,3	-10	218,06	-169,36	189,49	-244,34	164,17	-225,41
	0,0	-10	215,08	-177,19	186,51	-252,17	161,70	-231,88
	8,3	-10	212,09	-185,02	183,53	-260,01	159,23	-238,35
	-8,3	10	206,17	-181,25	175,39	-258,44	152,17	-237,40
	0,0	10	202,95	-189,31	172,18	-266,51	149,52	-244,07
	8,3	10	199,74	-197,38	168,96	-274,57	146,86	-250,73
gr14	-8,3	0,0	140,48	-122,08	110,81	-198,16	98,97	-187,41
	0,0	0,0	138,93	-126,05	109,26	-202,14	97,69	-190,70
	8,3	0,0	137,38	-130,03	107,71	-206,11	96,41	-193,98
	-8,3	-10	143,46	-119,10	114,89	-194,09	102,51	-183,87
	0,0	-10	141,96	-123,02	113,40	-198,00	101,28	-187,11
	8,3	-10	140,47	-126,94	111,90	-201,92	100,04	-190,35
	-8,3	10	137,51	-125,05	106,73	-202,24	95,43	-190,95
	0,0	10	135,90	-129,08	105,13	-206,27	94,10	-194,29
	8,3	10	134,29	-133,11	103,52	-210,30	92,77	-197,62

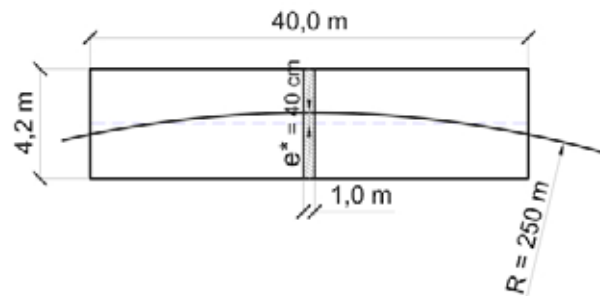
7.3.3 R = 250 m ($e^* = 40$ cm)

Abb. 72: Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches

Tab. 63: Werte der $M_{sd}(x)$ für R = 250 m aus den Lastfällen wenn $e^* = 40$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall d	
			V = 0 km/h		V = 78,38 km/h	
-	[cm]	[cm]	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$
			[m]	[kNm]	[m]	[kNm]
gr11	-8,3	0,0	2,04	260,94	2,29	249,18
	0,0	0,0	2,08	258,32	2,34	248,10
	8,3	0,0	2,12	255,92	2,39	247,34
	-8,3	-10	2,00	260,48	2,27	254,67
	0,0	-10	2,05	258,81	2,32	254,71
	8,3	-10	2,09	257,40	2,37	255,07
	-8,3	10	2,08	260,45	2,32	242,81
	0,0	10	2,12	256,90	2,36	240,61
	8,3	10	2,15	253,53	2,41	238,71
gr12	-8,3	0,0	2,04	260,94	2,58	247,28
	0,0	0,0	2,08	258,32	2,62	247,96
	8,3	0,0	2,12	255,92	2,66	248,89
	-8,3	-10	2,00	260,48	2,55	259,25
	0,0	-10	2,05	258,81	2,59	261,02
	8,3	-10	2,09	257,40	2,63	263,03
	-8,3	10	2,08	260,45	2,60	234,30
	0,0	10	2,12	256,90	2,64	233,85
	8,3	10	2,15	253,53	2,69	233,67
gr14	-8,3	0,0	2,05	166,60	2,83	164,84
	0,0	0,0	2,08	165,30	2,85	165,88
	8,3	0,0	2,12	164,10	2,87	166,99
	-8,3	-10	2,02	166,33	2,79	177,18
	0,0	-10	2,06	165,53	2,81	178,72
	8,3	-10	2,09	164,84	2,82	180,30
	-8,3	10	2,09	166,37	2,87	151,75
	0,0	10	2,11	164,59	2,89	152,29
	8,3	10	2,14	162,89	2,91	152,89

Tab. 64: Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 250$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 40$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall d	
			$V = 0$ km/h		$V = 78,38$ km/h	
-	[cm]	[cm]	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$
			[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
gr11	-8,3	0,0	188,29	-199,13	167,70	-247,76
	0,0	0,0	184,73	-207,54	164,14	-256,17
	8,3	0,0	181,17	-215,95	160,57	-264,58
	-8,3	-10	194,24	-193,18	174,31	-241,15
	0,0	-10	190,79	-201,48	170,86	-249,44
	8,3	-10	187,35	-209,77	167,42	-257,74
	-8,3	10	182,35	-205,07	161,08	-254,37
	0,0	10	178,67	-213,60	157,41	-262,90
	8,3	10	174,99	-222,12	153,73	-271,42
gr12	-8,3	0,0	188,29	-199,13	147,10	-296,39
	0,0	0,0	184,73	-207,54	143,54	-304,80
	8,3	0,0	181,17	-215,95	139,98	-313,21
	-8,3	-10	194,24	-193,18	154,38	-289,11
	0,0	-10	190,79	-201,48	150,93	-297,41
	8,3	-10	187,35	-209,77	147,49	-305,70
	-8,3	10	182,35	-205,07	139,82	-303,67
	0,0	10	178,67	-213,60	136,14	-312,20
	8,3	10	174,99	-222,12	132,47	-320,72
gr14	-8,3	0,0	128,57	-133,99	87,38	-231,25
	0,0	0,0	126,79	-138,19	85,60	-235,46
	8,3	0,0	125,01	-142,40	83,82	-239,66
	-8,3	-10	131,54	-131,02	91,69	-226,95
	0,0	-10	129,82	-135,16	89,96	-231,09
	8,3	-10	128,10	-139,31	88,24	-235,24
	-8,3	10	125,60	-136,96	83,07	-235,56
	0,0	10	123,76	-141,22	81,23	-239,82
	8,3	10	121,92	-145,49	79,39	-244,09

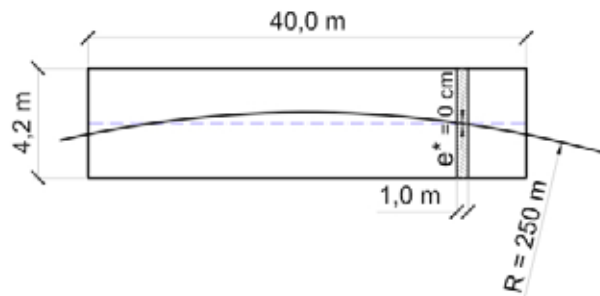
7.3.4 R = 250 m ($e^* = 0$ cm)

Abb. 73: Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches

Tab. 65: Werte der $M_{sd}(x)$ für R = 250 m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall d	
			V = 0 km/h		V = 78,38 km/h	
-	[cm]	[cm]	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$
			[m]	[kNm]	[m]	[kNm]
gr11	-8,3	0,0	1,90	253,51	2,20	265,80
	0,0	0,0	1,95	254,79	2,25	269,11
	8,3	0,0	2,00	256,41	2,30	272,74
	-8,3	-10	1,87	249,38	2,17	267,69
	0,0	-10	1,92	251,66	2,22	272,04
	8,3	-10	1,98	254,31	2,27	276,70
	-8,3	10	1,93	256,75	2,23	263,00
	0,0	10	1,98	257,03	2,38	265,24
	8,3	10	2,03	257,63	2,32	267,81
gr12	-8,3	0,0	1,90	253,51	2,45	288,91
	0,0	0,0	1,95	254,79	2,48	293,71
	8,3	0,0	2,00	256,41	2,51	298,70
	-8,3	-10	1,87	249,38	2,41	296,56
	0,0	-10	1,92	251,66	2,44	302,30
	8,3	-10	1,98	254,31	2,47	308,19
	-8,3	10	1,93	256,75	2,48	280,13
	0,0	10	1,98	257,03	2,52	283,97
	8,3	10	2,03	257,63	2,55	288,00
gr14	-8,3	0,0	1,94	162,64	2,64	209,64
	0,0	0,0	1,98	163,39	2,66	212,52
	8,3	0,0	2,02	164,29	2,67	215,43
	-8,3	-10	1,91	160,49	2,59	218,82
	0,0	-10	1,96	161,77	2,61	222,11
	8,3	-10	2,00	163,20	2,62	225,43
	-8,3	10	1,97	164,34	2,69	199,64
	0,0	10	2,00	164,57	2,71	202,09
	8,3	10	2,04	164,93	2,72	204,58

Tab. 66: Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 250$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall d	
			$V = 0$ km/h		$V = 78,38$ km/h	
-	[cm]	[cm]	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$
			[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
gr11	-8,3	0,0	212,12	-175,31	194,19	-221,26
	0,0	0,0	209,02	-183,25	191,09	-229,21
	8,3	0,0	205,92	-191,20	187,99	-237,16
	-8,3	-10	218,06	-169,36	200,81	-214,65
	0,0	-10	215,08	-177,19	197,82	-222,48
	8,3	-10	212,09	-185,02	194,84	-230,32
	-8,3	10	206,17	-181,25	187,58	-227,88
	0,0	10	202,95	-189,31	184,36	-235,94
	8,3	10	199,74	-197,38	181,15	-244,00
gr12	-8,3	0,0	212,12	-175,31	176,27	-267,22
	0,0	0,0	209,02	-183,25	173,17	-275,17
	8,3	0,0	205,92	-191,20	170,07	-283,12
	-8,3	-10	218,06	-169,36	183,55	-259,94
	0,0	-10	215,08	-177,19	180,57	-267,77
	8,3	-10	212,09	-185,02	177,58	-275,61
	-8,3	10	206,17	-181,25	168,99	-274,50
	0,0	10	202,95	-189,31	165,77	-282,57
	8,3	10	199,74	-197,38	162,56	-290,63
gr14	-8,3	0,0	140,48	-122,08	104,64	-213,99
	0,0	0,0	138,93	-126,05	103,09	-217,97
	8,3	0,0	137,38	-130,03	101,54	-221,94
	-8,3	-10	143,46	-119,10	108,95	-209,69
	0,0	-10	141,96	-123,02	108,46	-213,60
	8,3	-10	140,47	-126,94	110,51	-217,52
	-8,3	10	137,51	-125,05	100,33	-218,30
	0,0	10	135,90	-129,08	98,72	-222,33
	8,3	10	134,29	-133,11	97,11	-226,36

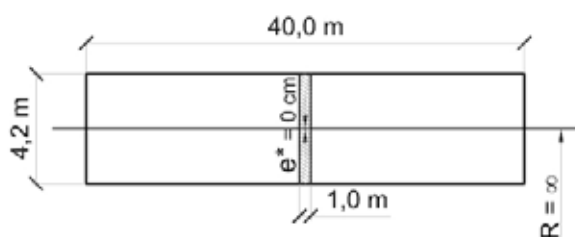
7.3.5 $R = \infty$ ($e^* = 0$)

Abb. 74: Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches

Tab. 67: Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = \infty$ aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall b		Lastfall a	
			V = 0 km/h		V = 120 km/h		V = 200 km/h	
-	[cm]	[cm]	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$	X	$M_{sd}(X)$
			[m]	[kNm]	[m]	[kNm]	[m]	[kNm]
gr11	-8,3	0,0	2,05	260,44	2,19	260,83	2,19	227,23
	0,0	0,0	2,10	260,26	2,25	261,65	2,24	227,88
	8,3	0,0	2,15	260,44	2,29	262,81	2,29	228,80
	-8,3	-10	2,02	258,94	2,17	262,24	2,16	228,41
	0,0	-10	2,07	259,81	2,22	264,09	2,21	229,92
	8,3	-10	2,13	261,04	2,26	266,25	2,26	231,68
	-8,3	10	2,07	261,04	2,22	258,50	2,22	225,29
	0,0	10	2,13	259,80	2,27	258,28	2,27	225,07
	8,3	10	2,18	258,93	2,32	258,42	2,32	225,13
gr12	-8,3	0,0	2,05	260,44	2,33	263,93	2,32	229,70
	0,0	0,0	2,10	260,26	2,38	265,65	2,37	231,07
	8,3	0,0	2,15	260,44	2,42	267,65	2,41	232,65
	-8,3	-10	2,02	258,94	2,30	268,13	2,29	233,22
	0,0	-10	2,07	259,81	2,34	270,81	2,33	235,39
	8,3	-10	2,13	261,04	2,38	273,73	2,37	237,76
	-8,3	10	2,07	261,04	2,36	258,76	2,35	225,37
	0,0	10	2,13	259,80	2,41	259,50	2,40	225,91
	8,3	10	2,18	258,93	2,46	260,54	2,44	226,70
gr14	-8,3	0,0	2,06	163,88	2,48	170,69	2,46	152,43
	0,0	0,0	2,10	163,80	2,51	171,98	2,48	153,44
	8,3	0,0	2,14	163,87	2,53	173,35	2,51	154,52
	-8,3	-10	2,04	163,10	2,44	175,53	2,42	156,51
	0,0	-10	2,08	163,57	2,46	177,26	2,44	157,90
	8,3	-10	2,12	164,19	2,49	179,06	2,47	159,35
	-8,3	10	2,08	164,19	2,52	165,26	2,49	147,86
	0,0	10	2,12	163,57	2,55	166,10	2,52	148,49
	8,3	10	2,16	163,10	2,58	167,03	2,55	149,19

Tab. 68: Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = \infty$ aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm

Gruppe	e_1	e_2	Lastfall c		Lastfall b		Lastfall a	
			V = 0 km/h		V = 120 km/h		V = 200 km/h	
-	[cm]	[cm]	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$	$Q_{sd}(x=0)$	$Q_{sd}(x=4,2)$
			[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
gr11	-8,3	0,0	206,61	-195,79	191,54	-210,85	169,39	-185,43
	0,0	0,0	201,17	-201,22	186,10	-216,29	164,90	-189,92
	8,3	0,0	195,73	-206,66	180,67	-221,73	160,40	-194,42
	-8,3	-10	213,13	-189,26	198,07	-204,33	174,78	-180,04
	0,0	-10	207,70	-194,70	192,63	-209,76	170,29	-184,53
	8,3	-10	202,26	-200,13	187,19	-215,20	165,80	-189,02
	-8,3	10	200,08	-202,31	185,01	-217,38	164,00	-190,82
	0,0	10	194,64	-207,75	179,58	-222,82	159,50	-195,32
	8,3	10	189,21	-213,19	174,14	-228,25	155,01	-199,81
gr12	-8,3	0,0	206,61	-195,79	176,47	-225,92	156,90	-197,92
	0,0	0,0	201,17	-201,22	171,03	-231,36	152,40	-202,41
	8,3	0,0	195,73	-206,66	165,60	-236,80	147,91	-206,91
	-8,3	-10	213,13	-189,26	183,00	-219,40	162,29	-192,53
	0,0	-10	207,70	-194,70	177,56	-224,83	157,80	-197,02
	8,3	-10	202,26	-200,13	172,12	-230,27	153,31	-201,51
	-8,3	10	200,08	-202,31	169,94	-232,45	151,50	-203,32
	0,0	10	194,64	-207,75	164,51	-237,89	147,01	-207,81
	8,3	10	189,21	-213,19	159,07	-243,32	142,52	-212,30
gr14	-8,3	0,0	135,37	-129,96	105,24	-160,10	98,03	-143,52
	0,0	0,0	132,65	-132,68	102,52	-162,82	95,78	-145,77
	8,3	0,0	129,94	-135,40	99,80	-165,54	93,53	-148,01
	-8,3	-10	138,64	-126,70	108,50	-156,84	100,72	-140,82
	0,0	-10	135,92	-129,42	105,78	-159,55	98,48	-143,07
	8,3	-10	133,20	-132,14	103,06	-162,27	96,23	-145,32
	-8,3	10	132,11	-133,23	101,97	-163,36	95,33	-146,22
	0,0	10	129,39	-135,94	99,25	-166,08	93,08	-148,46
	8,3	10	126,67	-138,66	96,54	-168,80	90,84	-150,71

In Tab. 69 werden maximale Werte der Biegemoment zusammengefasst.

Tab. 69: maximale Werte der M_{sd} aus der Gegenüberstellung von Ergebnissen

R	e^*	Lastfall	gr11	gr12	gr14
			M(x)	M(x)	M(x)
[m]	[cm]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
250	40,0	d	260,94	263,03	180,30
	0,0	d	276,70	308,19	225,43
1000	10,0	b	269,13	288,94	204,02
	0,0	b	272,06	296,61	212,39
∞	0,0	b	266,25	273,73	179,06

8. Schlussfolgerungen

Tab. 70: Übersicht über die Untersuchten Radien

Lage	Radius	Maximale Geschwindigkeit	Überhöhung	Untersuchte Geschwindigkeiten			
				V max.	120 km/h	80 km/h	0 km/h
-	[m]	[km/h]	[mm]				
1	250	78,38	160,00	ja	-	-	ja
2	500	110,84	160,00	ja	-	ja	ja
3	750	135,75	160,00	ja	ja	ja	ja
4	1000	156,75	160,00	ja	ja	ja	ja
5	1250	175,25	160,00	ja	ja	ja	ja
6	1500	191,98	160,00	ja	ja	ja	ja
7	1750	200,00	139,77	ja	ja	ja	ja
8	2000	200,00	106,05	ja	ja	ja	ja
9	2250	200,00	79,82	ja	ja	ja	ja
10	2500	200,00	58,84	ja	ja	ja	ja
11	2750	200,00	41,67	ja	ja	ja	ja
12	3000	200,00	27,36	ja	ja	ja	ja
13	3150	200,00	20,00	ja	ja	ja	ja
14	3630	200,00	0,00	ja	ja	ja	ja

In der Tab. 70 wurden alle untersuchten Radien (Lagen) mit deren maximalen Geschwindigkeiten und Überhöhungen aufgelistet. Die Tabelle zeigt, dass jeder Radius unter mehreren Geschwindigkeiten untersucht wurde. Radien von 500 m bzw. 250 m haben eine Höchstgeschwindigkeit kleiner als 120 km/h bzw. 80 km/h und werden daher nicht auf alle Geschwindigkeiten untersucht.

Die Berechnung zeigt, dass sich mit der Änderung der Schotterhöhen nur die Schnittgrößen (Biegemoment und Querkraft) direkt proportional erhöhen bzw. vermindern. Der maßgebende Lastfall und die maßgebende Lastgruppe werden von der Änderung der Schotterbetthöhe nicht beeinflusst.

Aus der Gegenüberstellung von Ergebnissen in Kapitel 7.3 (Tabellen 59 bis 68) sind folgende Schlüsse zu ziehen:

- Die maßgebende Werte der Biegemomentes ergeben sich mit folgenden Exzentrizitätsgrößen:

$$\begin{aligned} e_1 &= +8,33 \text{ cm} && \text{(Verschiebung der Vertikallast nach außen)} \\ e_2 &= -10,0 \text{ cm} && \text{(Verschiebung aller Lasten nach innen)} \end{aligned}$$

- Für die Querkraft sind folgenden Exzentrizitätsgrößen maßgebend:

$$\begin{aligned} e_1 &= +8,33 \text{ cm} && \text{(Verschiebung der Vertikallast nach außen)} \\ e_2 &= +10,0 \text{ cm} && \text{(Verschiebung aller Lasten nach außen)} \end{aligned}$$

- Aus der Berechnungen ist ersichtlich, dass der maßgebende Querschnitt für die maximalen Querkkräfte immer in der Brückenmitte liegt. Der Grund hierfür ist, dass die Lasten in der Brückenmitte Richtung Auflager verschoben sind.

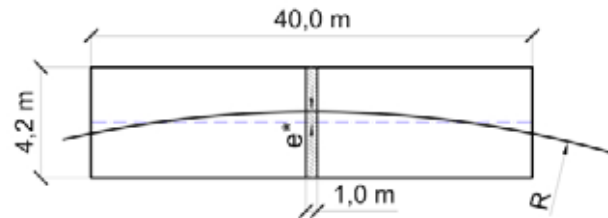


Abb. 75: maßgebende Querschnitt für Querkraft

- Für die Ermittlung des maßgebenden Biegemoment ist der Querschnitt an der Schnittstelle zwischen Tragwerksachse und Bogenachse ($e^* = 0$) zu untersuchen.

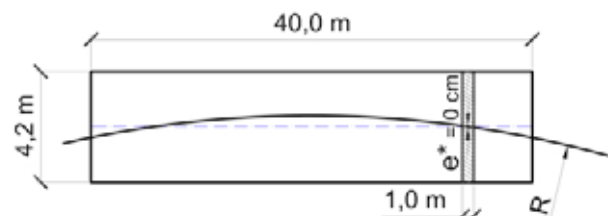


Abb. 76: maßgebende Querschnitt für Biegemomente

- Gruppen gr12 und gr17, in denen Vertikal- und Horizontalkräfte nicht abgemindert werden bzw. Multiplikationsfaktoren sich gleich 1,0 ergeben, sind für die Berechnung maßgebend (siehe Kapitel 6.2.2).

Tab. 71: maßgebende Lastgruppen

Lastgruppen		Vertikalkräfte		Horizontalkräfte		Bemerkungen
Anzahl belastete Gleise	Lastgruppe	LM 71, SW/0	SW/2	Fliehkraft	der Seitenstoß	
1	gr11	1,0		0,5	0,5	Max. vertikal 1 mit max. längs
1	gr12	1,0		1,0	1,0	Max. vertikal 2 mit max. quer
1	gr14	0,5		1,0	1,0	Max. quer
1	gr16		1,0	0,5	0,5	SW/2 mit max. längs
1	gr17		1,0	1,0	1,0	SW/2 mit max. quer

8.1 Maßgebende Lastfälle

Die maximalen Werte der Biegemomente und Querkräfte werden anhand definierte maßgebender Exzentrizitäten und Lastgruppen in Tabellen 72 bis 77 dargestellt. Die Auflistung der Werte geschieht anhand der Radien und Lastfälle.

Tab. 72: maximale Werte der M_{sd} (LM 71) für $h_s = 55$ cm

$M_{sd}(x)$			Lastfall			
R	e*	Lastgruppe	a	b	c	d
[m]	[cm]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
250	40,00	gr12	-	-	260,94	263,03
	0,00	gr12	-	-	257,63	308,19
500	20,00	gr12	-	-	260,48	287,99
	0,00	gr12	-	-	257,63	308,18
750	13,34	gr12	255,68	290,35	259,65	-
	0,00	gr12	266,38	301,99	257,63	-
1000	10,00	gr12	258,07	288,94	259,08	-
	0,00	gr12	265,84	296,61	257,63	-
1250	8,00	gr12	259,36	287,84	258,68	-
	0,00	gr12	265,45	293,46	257,63	-
1500	6,67	gr12	260,14	286,99	258,40	-
	0,00	gr12	265,14	291,39	257,63	-
1750	5,71	gr12	258,36	285,81	259,45	-
	0,00	gr12	262,52	289,48	258,76	-
2000	5,00	gr12	254,70	284,02	260,93	-
	0,00	gr12	258,20	287,22	260,09	-
2250	4,45	gr12	251,65	282,23	261,63	-
	0,00	gr12	254,66	285,07	261,07	-
2500	4,00	gr12	249,07	280,53	261,90	-
	0,00	gr12	251,72	283,08	261,52	-
2750	3,64	gr12	246,85	278,94	261,90	-
	0,00	gr12	249,22	281,27	261,66	-
3000	3,33	gr12	244,94	277,46	261,75	-
	0,00	gr12	247,07	279,61	261,60	-
3150	3,17	gr12	241,56	274,39	261,04	-
	0,00	gr12	243,60	276,45	261,04	-
3630	2,76	gr12	241,07	274,33	261,05	-
	0,00	gr12	242,78	276,08	261,04	-
∞	0,00	gr12	237,78	273,75	261,04	-

Tab. 73: maximale Werte der Q_{sd} (LM 71) für $h_s = 55$ cm

$Q_{sd}(x)$		Lastfall			
R	e*	a	b	c	d
[m]	[cm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
250	40,00	-	-	-222,12	-320,72
	0,00	-	-	-197,38	-290,63
500	20,00	-	-	-209,74	-305,65
	0,00	-	-	-197,38	-290,62
750	13,34	-259,73	-292,00	-205,61	-
	0,00	-251,46	-282,15	-197,38	-
1000	10,00	-256,92	-281,85	-203,56	-
	0,00	-250,73	-274,57	-197,38	-
1250	8,00	-255,13	-275,80	-202,32	-
	0,00	-250,19	-270,02	-197,38	-
1500	6,67	-253,87	-271,77	-201,50	-
	0,00	-249,76	-266,99	-197,38	-
1750	5,71	-249,60	-268,17	-204,14	-
	0,00	-246,12	-264,11	-200,55	-
2000	5,00	-243,25	-264,41	-208,31	-
	0,00	-240,28	-260,91	-205,12	-
2250	4,45	-238,22	-261,14	-210,89	-
	0,00	-235,64	-258,07	-208,02	-
2500	4,00	-234,13	-258,30	-212,52	-
	0,00	-231,85	-255,57	-209,92	-
2750	3,64	-230,74	-255,81	-213,56	-
	0,00	-228,70	-253,36	-211,19	-
3000	3,33	-227,88	-253,62	-214,22	-
	0,00	-226,04	-251,40	-212,05	-
3150	3,17	-223,87	-250,05	-215,23	-
	0,00	-222,16	-247,97	-213,16	-
3630	2,76	-222,32	-249,15	-214,96	-
	0,00	-220,83	-247,35	-213,16	-
∞	0,00	-212,28	-243,30	-213,16	-

Tab. 74: maximale Werte der M_{sd} (SW/0) für $h_s = 55$ cm

$M_{sd}(x)$			Lastfall			
R	e*	Lastgruppe	a	b	c	d
[m]	[cm]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
250	40,00	gr12	-	-	269,87	282,75
	0,00	gr12	-	-	276,58	337,96
500	20,00	gr12	-	-	275,14	313,08
	0,00	gr12	-	-	276,58	337,96
750	13,34	gr12	277,58	316,43	276,05	-
	0,00	gr12	290,83	331,09	276,58	-
1000	10,00	gr12	280,57	315,20	276,34	-
	0,00	gr12	290,24	325,09	276,58	-
1250	8,00	gr12	282,21	314,17	276,46	-
	0,00	gr12	289,80	321,55	276,58	-
1500	6,67	gr12	283,22	313,37	276,53	-
	0,00	gr12	289,46	319,22	276,58	-
1750	5,71	gr12	278,67	309,05	276,09	-
	0,00	gr12	283,70	313,72	276,05	-
2000	5,00	gr12	270,78	302,57	275,28	-
	0,00	gr12	274,77	306,33	275,16	-
2250	4,45	gr12	264,92	297,68	274,60	-
	0,00	gr12	268,20	300,79	274,55	-
2500	4,00	gr12	260,42	293,87	274,04	-
	0,00	gr12	263,18	296,51	274,06	-
2750	3,64	gr12	256,87	290,81	273,57	-
	0,00	gr12	259,23	293,09	273,64	-
3000	3,33	gr12	254,01	288,31	273,20	-
	0,00	gr12	256,06	290,31	273,29	-
3150	3,17	gr12	249,28	283,74	272,55	-
	0,00	gr12	251,11	285,53	272,60	-
3630	2,76	gr12	248,77	283,66	272,57	-
	0,00	gr12	250,30	285,17	272,60	-
∞	0,00	gr12	245,41	282,92	272,60	-

Tab. 75: maximale Werte der Q_{sd} (SW/0) für $h_s = 55$ cm

$Q_{sd}(x)$		Lastfall			
R	e*	a	b	c	d
[m]	[cm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
250	40,00	-	-	-254,67	-355,89
	0,00	-	-	-226,85	-322,58
500	20,00	-	-	-240,74	-339,21
	0,00	-	-	-226,85	-322,58
750	13,34	-286,98	-324,47	-236,11	-
	0,00	-277,83	-313,55	-226,85	-
1000	10,00	-283,90	-313,56	-233,79	-
	0,00	-277,04	-305,49	-226,85	-
1250	8,00	-281,94	-307,06	-232,40	-
	0,00	-276,47	-300,66	-226,85	-
1500	6,67	-280,57	-302,73	-231,48	-
	0,00	-276,01	-297,43	-226,85	-
1750	5,71	-272,36	-294,46	-229,62	-
	0,00	-268,55	-290,01	-225,65	-
2000	5,00	-260,14	-283,85	-227,10	-
	0,00	-256,94	-280,06	-223,62	-
2250	4,45	-251,10	-275,89	-225,10	-
	0,00	-248,34	-272,60	-222,01	-
2500	4,00	-244,15	-269,71	-223,48	-
	0,00	-241,72	-266,80	-220,70	-
2750	3,64	-238,67	-264,78	-222,13	-
	0,00	-236,50	-262,17	-219,61	-
3000	3,33	-234,23	-260,76	-221,01	-
	0,00	-232,26	-258,39	-218,69	-
3150	3,17	-227,72	-254,23	-219,12	-
	0,00	-225,90	-252,03	-216,91	-
3630	2,76	-226,07	-253,28	-218,83	-
	0,00	-224,49	-251,36	-216,91	-
∞	0,00	-215,39	-247,05	-216,91	-

Tab. 76: maximale Werte der M_{sd} (SW/2) für $h_s = 55$ cm

$M_{sd}(x)$		Lastgruppe	Lastfall	
R	e^*		c	d
[m]	[cm]	[-]	[kNm]	[kNm]
250	40,00	gr17	256,69	272,09
	0,00	gr17	262,97	329,11
500	20,00	gr17	261,62	291,08
	0,00	gr17	262,97	312,02
750	13,34	gr17	262,47	293,86
	0,00	gr17	262,97	306,07
1000	10,00	gr17	262,74	294,65
	0,00	gr17	262,97	303,15
1250	8,00	gr17	262,86	294,93
	0,00	gr17	262,97	301,41
1500	6,67	gr17	262,92	295,04
	0,00	gr17	262,97	300,26
1750	5,71	gr17	262,47	291,65
	0,00	gr17	262,44	295,87
2000	5,00	gr17	261,65	286,04
	0,00	gr17	261,54	289,46
2250	4,45	gr17	260,97	281,77
	0,00	gr17	260,92	284,62
2500	4,00	gr17	260,40	278,40
	0,00	gr17	260,41	280,83
2750	3,64	gr17	259,92	275,68
	0,00	gr17	259,99	277,79
3000	3,33	gr17	259,54	273,44
	0,00	gr17	259,63	275,30
3150	3,17	gr17	258,88	269,16
	0,00	gr17	258,92	270,83
3630	2,76	gr17	258,89	269,23
	0,00	gr17	258,92	270,65
∞	0,00	gr17	258,92	269,51

Tab. 77: maximale Werte der Q_{sd} (SW/2) für $h_s = 55$ cm

$Q_{sd}(x)$		Lastfall	
R	e*	c	d
[m]	[cm]	[kN]	[kN]
250	40,00	-242,29	-330,68
	0,00	-216,32	-299,91
500	20,00	-229,29	-296,29
	0,00	-216,32	-281,46
750	13,34	-224,96	-284,53
	0,00	-216,32	-274,77
1000	10,00	-222,80	-278,69
	0,00	-216,32	-271,42
1250	8,00	-221,50	-275,21
	0,00	-216,32	-269,42
1500	6,67	-220,64	-272,89
	0,00	-216,32	-268,08
1750	5,71	-218,87	-267,03
	0,00	-215,17	-262,97
2000	5,00	-216,45	-258,97
	0,00	-213,21	-255,50
2250	4,45	-214,54	-252,87
	0,00	-211,66	-249,84
2500	4,00	-212,98	-248,10
	0,00	-210,39	-245,41
2750	3,64	-211,70	-244,27
	0,00	-209,34	-241,85
3000	3,33	-210,61	-241,12
	0,00	-208,45	-238,92
3150	3,17	-208,79	-235,77
	0,00	-206,73	-233,72
3630	2,76	-208,52	-235,22
	0,00	-206,73	-233,44
∞	0,00	-206,73	-231,65

Bei der Ermittlung der maßgebenden Schnittgrößen (Biegemoment und Querkraft), in Bezug auf die maßgebenden Lastfälle, werden folgende Schlüsse gezogen:

1) maßgebender *Lastfall*:

- Für Radien, die mit gleicher oder höherer Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h befahren werden, ist **Lastfall b ($V = 120$ km/h)** maßgebend.

Tab. 78: Lastfall b

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times (LM71 + "SW/0)$	$\Phi \times 1 \times 1 \times (LM71 + "SW/0)$
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times (LM71 + "SW/0)$	$\Phi \times \alpha \times 1 \times (LM71 + "SW/0)$
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times (LM71 + "SW/0)$	
		0	-	-	-	

- Für Radien mit einer Höchstgeschwindigkeit, die kleiner als 120 km/h ist, wird **Lastfall d ($0 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$)** zum maßgebenden Lastfall.

Tab. 79: Lastfall d

α -Wert	Maximale örtliche Geschwindigkeit in km/h	Fliehkraft				Zugehörige Vertikale Verkehrslast
		V in km/h	α	f		
$\alpha > 1$	> 120	V	1,0	f	$1 \times f \times (LM71 + "SW/0)$	$\Phi \times 1 \times 1 \times (LM71 + "SW/0)$
		120	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times (LM71 + "SW/0)$	$\Phi \times \alpha \times 1 \times (LM71 + "SW/0)$
		0	-	-	-	
	< 120	V	$\alpha = 1,21$	1,0	$\alpha \times f \times (LM71 + "SW/0)$	
		0	-	-	-	

9. Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung. März 2003
- [2] ÖNORM EN 1990 A1: Grundlagen der Tragwerksplanung – Anhang A2: Anwendung bei Brücken. Dezember 2005
- [3] ÖNORM EN 1991-1-1: Einwirkungen auf Tragwerke
Teil 1.1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewichte, Nutzlasten im Hochbau
- [4] ÖNORM B 1991-1-1: Einwirkungen auf Tragwerke
Teil 1.1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewichte, Nutzlasten im Hochbau, Jänner 2006
Nationale Festlegung zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen
- [5] ÖNORM EN 1991-2: Einwirkungen auf Tragwerke
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken
- [6] ÖNORM B 1991-2: Einwirkungen auf Tragwerke
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-2 und nationale Ergänzungen. August 2004
- [7] Rüger, Bernhard; Miltner, Klaus: Übungen aus Eisenbahnwesen, Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswesen und Seilbahnen, Neubearbeitung November 2007
- [8] Technische Richtlinien für Eisenbahnbrücken RVE 06.00.01
Ausgabe 1. November 2005
- [9] Zarić, Branko; Buđevac, Dragan; Stipanić Bratislav: Čelične Konstrukcije u Građevinarstvu, Građevinska knjiga Beograd, Beograd 2002

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Brückenquerschnitt	10
Abb. 2	Brückenquerschnitt, Trogbrücke, Stahl	12
Abb. 3	Der Oberbau in Kurvenlage $R = 1000$ m	12
Abb. 4	Brückenquerschnitt mit veränderlichen Einwirkungen	16
Abb. 5	Darstellung des Grobbleches, Querschnitt und Draufsicht	17
Abb. 6	Ausbaulasten	17
Abb. 7	Exzentrizität e_1	20
Abb. 8	Schnitt und Draufsicht der Exzentrizität e^*	21
Abb. 9	Lastverteilung durch die Schiene	21
Abb. 10	Lastverteilung in Quer- und Längsrichtung	22
Abb. 11	Lastmodell 71	23
Abb. 12	Lastverteilung der Lastmodell 71 in Längsrichtung (siehe Kapitel 4.2.3.2)	23/24
Abb. 13	Vertikallast Q_{vk} (LM 71)	24
Abb. 14	Äußere Belastung und Spannungsdiagramm für Q_{vk} (LM 71)	27
Abb. 15	Lasten auf das Grobblech	29
Abb. 16	Lasteinordnung für SW/0 und SW/2	30
Abb. 17	Einflussfläche für Lastmodelle SW/0 und SW/2	31
Abb. 18	Lasten auf das Grobblech	31
Abb. 19	Wirkung der Fliehkraft auf den Querschnitt	33
Abb. 20	Biegemoment aus der Fliehkraft und zugehöriges Spannungsdiagramm	36
Abb. 21	Lasten aus der Fliehkraft	39
Abb. 22	Querschnitt mit dem Seitenstoß	43
Abb. 23	Lastumordnung, Spannungsdiagramm und Lasten aus dem Seitenstoß	44
Abb. 24	ständige Lasten	46
Abb. 25	Verlauf von $M(x)$ und $Q(x)$ aus ständigen Lasten	46
Abb. 26	Lastmodell 71 lokal	47
Abb. 27	Schnittgrößenverlauf - $M(x)$ und $Q(x)$ aus dem Lastmodell 71	48

Abb. 28	Lasten aus der SW/0 bzw. SW/2	48
Abb. 29	Schnittgrößenverlauf - $M(x)$ und $Q(x)$ aus den Vertikallasten für die Lastmodelle SW/0 und SW/2	49
Abb. 30	Lasten aus der Fliehkraft	50
Abb. 31	Diagramm $M(x)$ und $Q(x)$ für Horizontallasten aus der Fliehkraft	51
Abb. 32	Lasten aus dem Seitenstoß	51
Abb. 33	Schnittgrößenverlauf - $M(x)$ und $Q(x)$ für Horizontallasten aus dem Seitenstoß	52
Abb. 34	Schema der Berechnungen	58
Abb. 35	Brückenquerschnitt mit allen Einwirkungen und die Draufsicht auf die Einflussfläche	59
Abb. 36	Darstellung des untersuchten Teils des Grobbleches	59
Abb. 37	charakteristische Lasten aus ständigen Einwirkungen	62
Abb. 38	Momenten- und Querkraftverteilung aus ständigen Lasten	63
Abb. 39	charakteristische Last aus der vertikalen Einwirkungen (LM 71)	65
Abb. 40	charakteristische Last aus der Fliehkraft	67
Abb. 41	charakteristische Last aus dem Seitenstoß	68
Abb. 42	Momenten- und Querkraftverteilung aus der Vertikallast	70
Abb. 43	Momenten- und Querkraftverteilung aus der Fliehkraft	71
Abb. 44	Momenten- und Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß	73
Abb. 45	Superposition der Einzelnen Lasten	74
Abb. 46	Superposition der ständigen und veränderlichen Last	75
Abb. 47	Momentenverteilung der M_{sd} für gr12	78
Abb. 48	Querkraftverteilung der Q_{sd} für gr12	78
Abb. 49	charakteristische Lasten aus ständigen Einwirkungen	79
Abb. 50	charakteristische Last aus der vertikalen Einwirkungen (LM 71)	79
Abb. 51	charakteristische Last aus der Fliehkraft	80
Abb. 52	charakteristische Last aus dem Seitenstoß	81
Abb. 53	Momentenverteilung aus der Vertikallast	81
Abb. 54	Querkraftverteilung aus der Vertikallast	82
Abb. 55	Momentenverteilung aus der Fliehkraft	83
Abb. 56	Querkraftverteilung aus der Fliehkraft	83

Abb. 57	Momentenverteilung aus dem Seitenstoß	84
Abb. 58	Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß	84
Abb. 59	Superposition der Einzelnen Lasten	85
Abb. 60	Superposition der ständigen und veränderlichen Last	86
Abb. 61	Momentenverteilung der Msd für gr12	89
Abb. 62	Querkraftverteilung der Qsd für gr12	89
Abb. 63	charakteristische Last aus ständigen Einwirkung	90
Abb. 64	charakteristische Last aus der vertikalen Einwirkungen (LM 71)	90
Abb. 65	Momenten- und Querkraftverteilung aus der Vertikallast	91
Abb. 66	Superposition der Einzelnen Lasten	92
Abb. 67	Superposition der ständigen und veränderlichen Last	93
Abb. 68	Momentenverteilung der Msd für gr12	95
Abb. 69	Querkraftverteilung der Qsd für gr12	95
Abb. 70	Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches	96
Abb. 71	Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches	98
Abb. 72	Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches	100
Abb. 73	Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches	102
Abb. 74	Darstellung der untersuchten Teils des Grobbleches	104
Abb. 75	maßgebende Querschnitt für Querkraft	107
Abb. 76	maßgebende Querschnitt für Biegemomente	107
Abb. 77	Orientierungsschema für die Excel Berechnung	116
Abb. 78	X_L	116
Abb. 79	h_{tk}	117
Abb. 80	h_{sk}	117
Abb. 81	Ableitung der Momentengleichung an der Stelle x	118

9.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Lastfälle lt. [5] - Tab. 6.8	10
Tab. 2	Die Radien, Überhöhungen und maximale Geschwindigkeiten	15
Tab. 3	Eigengewicht (g_a)	17
Tab. 4	Ausbaulasten (g_{aus})	18
Tab. 5	resultierende charakteristische Lasten g	19
Tab. 6	Geometrie der Einflussfläche	25/26
Tab. 7	Werte der e_{vk} und M_{vk}	27
Tab. 8	Spannungen aus der Vertikallast (LM71)	28
Tab. 9	Einwirkungen von LM 71	29
Tab. 10	charakteristische Werte für Lastmodelle SW/0 und SW/2	30
Tab. 11	charakteristische Werte der Lastmodelle	30
Tab. 12	Lokale Gleichlasten für Lastmodelle SW/0 und SW/2	32
Tab. 13	Fliehkräfte für Maximalgeschwindigkeit	34
Tab. 14	Fliehkräfte für $V = 120$ km/h	35
Tab. 15	Fliehkräfte für $V = 80$ km/h	35
Tab. 16	Biegemomente der Fliehkräfte für die maximale Geschwindigkeit	37
Tab. 17	Spannungen der Fliehkraft für die maximale Geschwindigkeit	38
Tab. 18	Lasten aus der Fliehkraft für die maximale Geschwindigkeit	39/40
Tab. 19	Lasten aus der Fliehkräfte für $V = 120$ km/h	41
Tab. 20	Lasten aus der Fliehkräfte für $V = 80$ km/h	42
Tab. 21	Belastung aus dem Seitenstoß	45
Tab. 22	Lastfälle lt. [5]	54
Tab. 23	Auszug Lastgruppen lt. [5] Tab. 6.11	55
Tab. 24	Bemessungswerte der Einwirkungen F_d	56
Tab. 25	Grenzzustand der Tragfähigkeit	56
Tab. 26	Bemessungswerte ULS	57
Tab. 27	Quellen für die Bemessungswerte	57
Tab. 28	Eckdaten für Lage 4 ($R = 1000$ m)	60
Tab. 29	Geometrie der Einflussfläche	61

Tab. 30	Auszug aus der Tab. 5 (Kap. 4.1.2)	62
Tab. 31	Momentenverteilung aus ständigen Lasten	63
Tab. 32	Querkraftverteilung aus ständigen Lasten	63
Tab. 33	Zeigt die gewählten Lastfall a	64
Tab. 34	charakteristische Lasten aus den vertikalen Einwirkungen (LM 71)	65
Tab. 35	charakteristische Lasten aus der Fliehkraft für verschiedene Geschwindigkeiten	67
Tab. 36	charakteristische Lasten aus dem Seitenstoß	68
Tab. 37	Momentenverteilung aus der Vertikallast (LM 71)	69
Tab. 38	Querkraftverteilung aus der Vertikallast (LM 71)	69
Tab. 39	Momentenverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)	71
Tab. 40	Querkraftverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)	71
Tab. 41	Momentenverteilung aus dem Seitenstoß	73
Tab. 42	Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß	73
Tab. 43	Werte der $M_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12	78
Tab. 44	Werte der $Q_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12	78
Tab. 45	zeigt die ausgewählte Lastfall b	79
Tab. 46	Momentenverteilung aus der Vertikallast (LM 71)	81
Tab. 47	Querkraftverteilung aus der Vertikallast (LM 71)	82
Tab. 48	Momentenverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)	83
Tab. 49	Querkraftverteilung aus der Fliehkraft (LM 71)	83
Tab. 50	Momentenverteilung aus dem Seitenstoß	84
Tab. 51	Querkraftverteilung aus dem Seitenstoß	84
Tab. 52	Werte der $M_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12	89
Tab. 53	Werte der $Q_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12	89
Tab. 54	Lastfall c	90
Tab. 55	Momentenverteilung aus der Vertikallast (LM 71)	91
Tab. 56	Querkraftverteilung aus der Vertikallast (LM 71)	91
Tab. 57	Werte der $M_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12	95
Tab. 58	Werte der $Q_{sd}(x)$ aus der Lastgruppe gr12	95

Tab. 59	Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 10$ cm	96/97
Tab. 60	Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 10$ cm	97/98
Tab. 61	Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm	98/99
Tab. 62	Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 1000$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm	99
Tab. 63	Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = 250$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 40$ cm	100
Tab. 64	Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 250$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 40$ cm	101
Tab. 65	Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = 250$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm	102
Tab. 66	Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = 250$ m aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm	103
Tab. 67	Werte der $M_{sd}(x)$ für $R = \infty$ aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm	104
Tab. 68	Werte der $Q_{sd}(x)$ für $R = \infty$ aus den Lastfällen wenn $e^* = 0$ cm	105
Tab. 69	maximale Werte der M_{sd} aus der Gegenüberstellung von Ergebnissen	105
Tab. 70	Übersicht über die Untersuchten Radien	106
Tab. 71	maßgebende Lastgruppen	107
Tab. 72	maximale Werte der M_{sd} (LM 71) für $h_s = 55$ cm	108
Tab. 73	maximale Werte der Q_{sd} (LM 71) für $h_s = 55$ cm	109
Tab. 74	maximale Werte der M_{sd} (SW/0) für $h_s = 55$ cm	110
Tab. 75	maximale Werte der Q_{sd} (SW/0) für $h_s = 55$ cm	111
Tab. 76	maximale Werte der M_{sd} (SW/2) für $h_s = 55$ cm	112
Tab. 77	maximale Werte der Q_{sd} (SW/2) für $h_s = 55$ cm	113
Tab. 78	Lastfall b	114
Tab. 79	Lastfall d	114

$$X_L = 210 + 17\sin\alpha - 130\cos\alpha + 21\sin\alpha - 0,25h_L' + e^* + e_2$$

$$h_L' = h_s - 55\sin\alpha - 21\cos\alpha$$

$$X_L = 210 - 130\cos\alpha + 38\sin\alpha - 0,25[h_s - 55\sin\alpha - 21\cos\alpha] + e^* + e_2$$

$$X_L = 210 - 130\cos\alpha + 38\sin\alpha - 0,25h_s + 13,75\sin\alpha + 5,25\cos\alpha + e^* + e_2$$

$$X_L = 210 - 124,75\cos\alpha + 51,75\sin\alpha - 0,25h_s + e^* + e_2$$

A3: Ableitung der Formel (30) für h_{tk} :

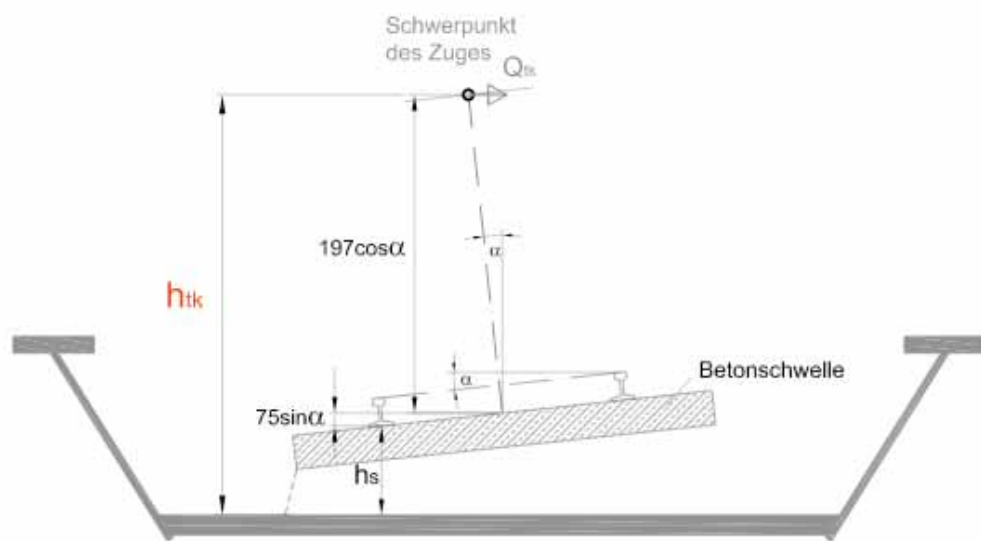


Abb. 79: h_{tk}

$$h_{tk} = h_s + \left(\frac{260}{2} - 55 \right) \sin\alpha + (180 + 17) \cos\alpha$$

$$h_{tk} = h_s + 75\sin\alpha + 197\cos\alpha$$

A4: Ableitung der Formel (37) für h_{sk} :

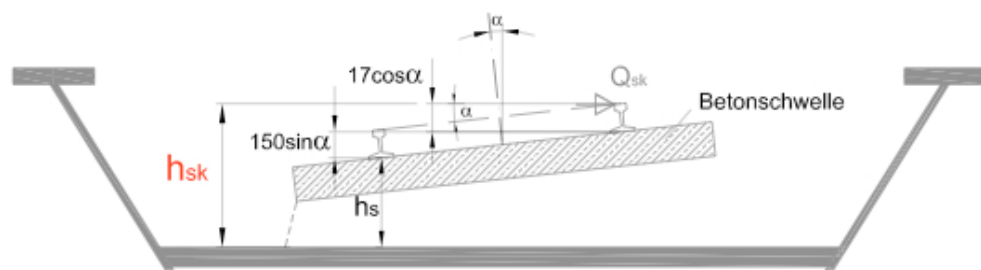


Abb. 80: h_{sk}

$$h_{sk} = h_s + 150\sin\alpha + 17\cos\alpha$$

A5: Ableitung der Formel (73) für $M_{tk}(x)$ und der Formel (77) für $Q_{tk}(x)$:
Formel (73):

$$X_L < x \leq (X_L + l_1) \quad M(x) = Ax - q_{tkL} \frac{(x - X_L)^2}{6} \frac{X_L + 3l_1 - x}{l_1}; \quad (73)$$

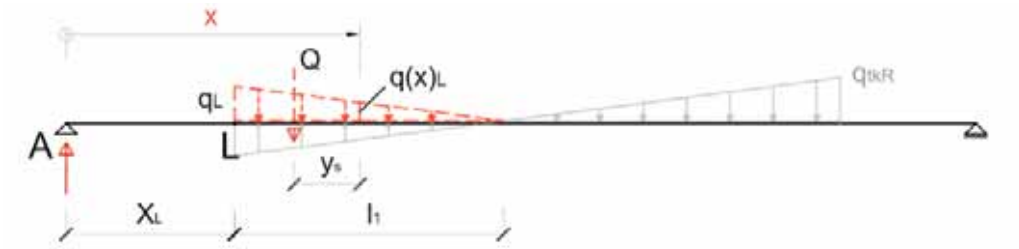


Abb. 81: Ableitung der Momentengleichung an der Stelle x

$$\frac{q(x)_L}{y} = \frac{q_L}{l_1} \Rightarrow q(x)_L = \frac{y}{l_1} q_L$$

mit

$$y = X_L + l_1 - x \quad q(x)_L = \frac{X_L + l_1 - x}{l_1} q_L$$

und

$$y_s = \frac{x - X_L}{3} \frac{2q_L + q(x)_L}{q_L + q(x)_L} \quad Q = \frac{q_L + q(x)_L}{2} (x - X_L)$$

folgt

$$M(x) = Ax - \frac{q_L + q(x)_L}{2} (x - X_L) \frac{(x - X_L)}{3} \frac{2q_L + q(x)_L}{q_L + q(x)_L}$$

$$M(x) = Ax - \frac{(x - X_L)^2}{6} \left(2q_L + q_L \frac{X_L + l_1 - x}{l_1} \right)$$

$$M(x) = Ax - q_L \frac{(x - X_L)^2}{6} \left(2 + \frac{X_L + l_1 - x}{l_1} \right)$$

$$M(x) = Ax - q_L \frac{(x - X_L)^2}{6} \frac{X_L + 3l_1 - x}{l_1}$$

Formel (77)

$$X_L < x \leq (X_L + l_1) \quad Q(x) = A - \frac{q_{tkL}}{2} \frac{(X_L + 2l_1 - x)}{l_1} (x - X_L); \quad (77)$$

Es gelten die gleiche Formeln für Q und $q(x)_L$:

$$Q = \frac{q_L + q(x)_L}{2} (x - X_L) \qquad q(x)_L = \frac{X_L + l_1 - x}{l_1} q_L$$

$$Q(x) = A - Q$$

$$Q(x) = A - \frac{q_L + q(x)_L}{2} (x - X_L)$$

$$Q(x) = A - \frac{q_L}{2} \left(1 + \frac{X_L + l_1 - x}{l_1} \right) (x - X_L)$$

$$Q(x) = A - \frac{q_L}{2} \frac{X_L + 2l_1 - x}{l_1} (x - X_L)$$

Das gleiche Prinzip wird bei der Ableitung von Momenten- und Querkraftgleichungen für die Vertikallasten und den Seitenstoß angewendet.