

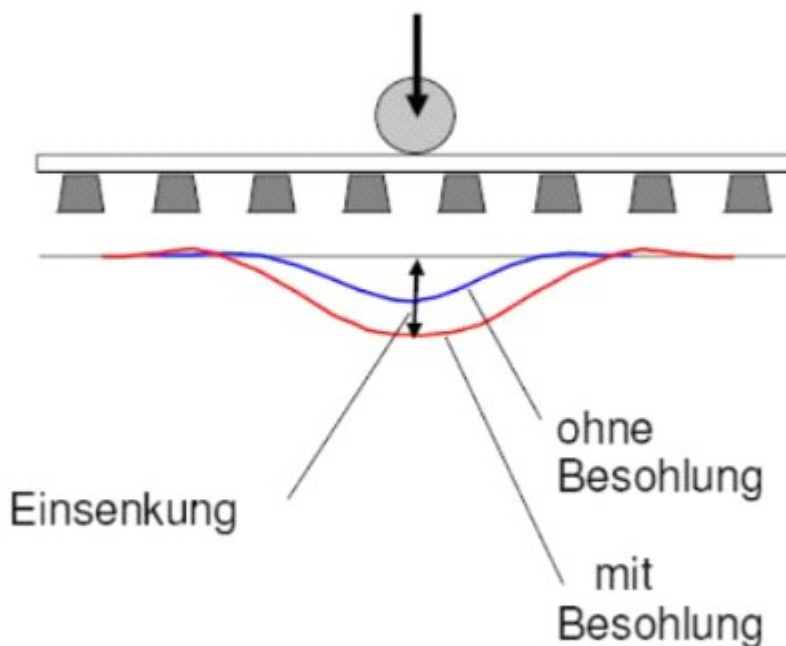
Anleitung Berechnungstool

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 4 Fahrbahnsteifigkeit

Modul: Modul 1

Bedienungshinweise und Hintergrundinformationen



Datum / Status:	14.09.2022 / Entwurf
Verfasser:	Stefan Werner / KPZ -Fahrbahn AG
Geprüft:	Vorname Name / Firma
Freigegeben:	Vorname Name / Firma

Seitenanzahl 15

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Inhalt

1	Allgemeines	4
1.1	Beschreibung des Rechenmodells	4
1.2	Nachweiskonzept gemäss AB EBV Art. 31 Ziffer 4.5	6
1.3	Einfluss der Geschwindigkeit (dynamische Berechnung).....	6
2	Eingabemaske Schotteroberbau.....	8
2.1	Hauptgleis/Nebengleis	8
2.2	Achslast	8
2.3	Schienenprofil	8
2.4	Schwellentyp	9
2.5	Zwischenlage	9
2.6	Schwellenbesohlung	10
2.7	Schotterstärke	10
2.8	Unterschottermatte.....	10
2.9	Untergrund	10
3	Eingabemaske Feste Fahrbahn (LVT)	13
3.1	Achslast	13
3.2	Schienenprofil	13
3.3	LVT-Block	13
3.4	Zwischenlage	14
3.5	Einlegeplattentyp.....	14
4	Verzeichnisse	15
4.1	Revisionen	15
4.2	Abbildungen	15
4.3	Tabellen	15

1 Allgemeines

Das Berechnungstool Zimmermann_MS Version 1.3 dient der Ermittlung der statischen Schieneneinsenkung und der Biegezugspannungen in den Schienen infolge der vertikalen Achslast.

1.1 Beschreibung des Rechenmodells

Die Berechnung des Eisenbahnoberbaus erfolgt mit dem Rechenverfahren nach Zimmermann. Grundlage ist der unendlich lange, kontinuierlich gelagerte Balken auf elastischer Bettung.

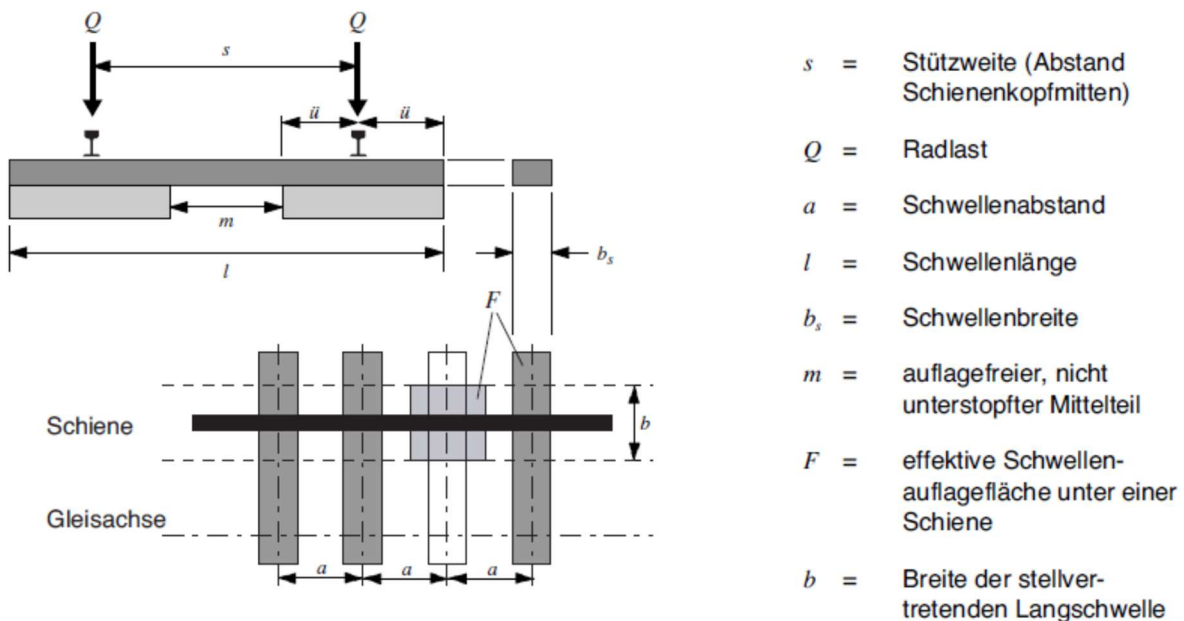


Abbildung 1: Umrechnung des Querschwellenoberbaus in einen Längsschwellenoberbau

Das Modell geht von einer Flächenverteilung aus, die von der realen Situation abweicht, was aber auf die Resultate keinen Einfluss hat, da die Grösse der Fläche und die Belastungen gleichbleiben. Die Flächenpressung ändert sich auch nicht. Die wirksame Auflagerfläche ist bereits im Berechnungstool für jeden Schwellentyp hinterlegt und muss nicht neu berechnet werden. Die Gleichung für die Ermittlung der Biegelinie des elastisch gelagerten Trägers lautet:

$$E_{\text{Schiene}} I_{\text{Schiene}} \cdot \omega^{IV} + k_{\text{tot}} \cdot \omega = Q_{\text{Radlast}} \cdot \delta(x)$$

Die elastische Länge für diesen Träger wird mit folgender Formel bestimmt:

$$L_{\text{elastisch}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_{\text{Schiene}} \cdot I_{\text{Schiene}} \cdot a}{k_{\text{tot}}}}$$

wobei für den Schotteroberbau gilt:

$$k_{\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{zw}}} + \frac{1}{k_{\text{USM}}} + \frac{1}{k_{\text{Schotter+Untergrund}}}}$$

während für die Feste Fahrbahn mit LVT-System gilt:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_{zw}} + \frac{1}{k_{Einlage\ Gummischuh}} + \frac{1}{k_{Gummischuh}}}$$

Die Schienenspannungen infolge der vertikalen Belastung werden aus dem Biegemoment ermittelt. Das Biegemoment stellt die zweite Ableitung der Funktion dar.

$$M_k(x) = -E_{Schiene} I_{Schiene} \cdot \omega''$$

Die Biegezugspannungen werden wie folgt ermittelt:

$$\sigma_k = \frac{M_k(x)}{W_{Schiene}}$$

Die Einsenkung und das Moment können unter Berücksichtigung des Einflusses von Nachbarachsen aus den Einflusslinien bestimmt werden. Elastische Komponenten, wie Zwischenlagen, Schwellenbesohlungen, USM etc. werden durch ihre spezifischen Eigenschaften charakterisiert. Die meisten Produkte weisen eine nichtlineare Federkennlinie auf, die in diesem Berechnungstool explizit nicht berücksichtigt wird. Alle weiteren vorhandenen Elastizitätsanteile, z.B. aus dem Unterbau oder Untergrund gehen entweder als Steifigkeit [kN/mm], E-Modul [N/mm²] oder Bettungsmodul [N/mm³] in die Berechnungen mit ein.

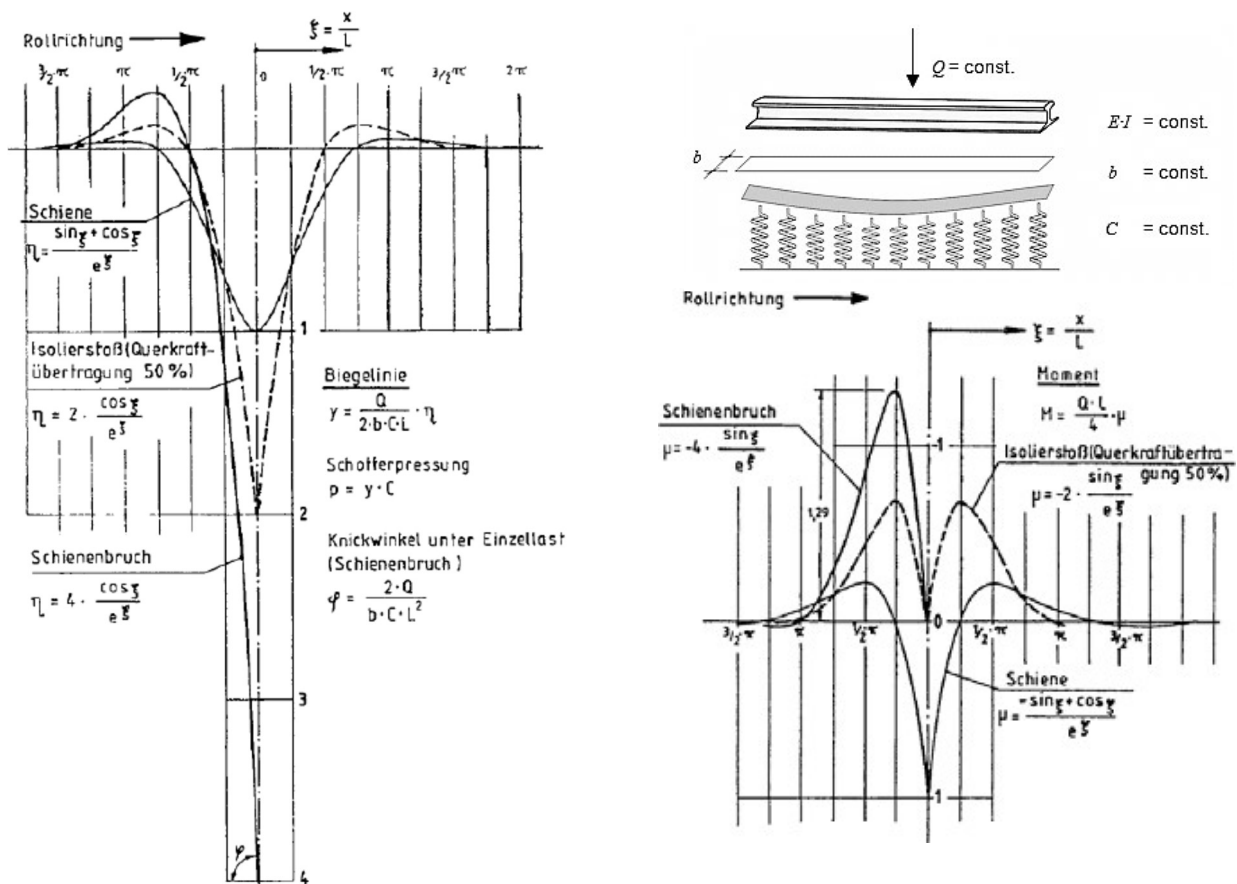


Abbildung 2: Einflusslinien als Grundlage zur Berechnung von Schieneneinsenkung / Biegemoment

1.2 Nachweiskonzept gemäss AB EBV Art. 31 Ziffer 4.5

Für Tragfähigkeitsnachweise gelten die Vorgaben in AB-EBV zu Art. 31, Normalspur, AB 31, Ziff. 4 für Meterspur sinngemäss. Die maximale Radlast wird aus der mittleren statischen Last Q unter Berücksichtigung eines Verstärkungsfaktor bestimmt. Dieser Verstärkungsfaktor $(1 + t \cdot s)$ berücksichtigt den Geschwindigkeitseinfluss φ sowie die Gleisqualität n .

Der Geschwindigkeitseinfluss berechnet sich gemäss folgender Formel:

$$V < 60 \text{ Km/h} \rightarrow \varphi = 1.0$$

$$V > 60 \text{ Km/h} \rightarrow \text{Personenzüge } \varphi = 1 + \frac{0.5 \cdot (V - 60)}{140}$$

$$\rightarrow \text{Güterzüge } \varphi = 1 + \frac{0.5 \cdot (V - 60)}{60}$$

Der Einfluss der Gleisqualität wird folgendermassen berücksichtigt:

- Sehr guter Oberbauzustand $n = 0.1$
- Guter Oberbauzustand $n = 0.2$
- Schlechter Oberbauzustand $n = 0.3$

Es gilt dann: $s = n \cdot \varphi$

Die statistische Variable t ergibt sich je nach gewählter statistischer Sicherheit:

$$99.6 \% \rightarrow t = 3$$

$$96.0 \% \rightarrow t = 2$$

$$67.0 \% \rightarrow t = 1$$

Der Zuschlag für die Radkraftumlagerung wird gemäss EN 164321-1:2017, 5.1.2.5 ($k_q = 1.25$) berücksichtigt. Nach Bedarf kann dieser Zuschlag vom Anwender definiert werden (z.B. 1.20).

Die Spannungen im Schienenfuss werden wie folgt bestimmt:

$$\sigma_{D \max}(Q_{\max}) = \frac{M(Q_{\max})}{W_{\text{Schiene}}}$$

Der Nachweis der Schienenspannung gemäss AB EBV Art. 31 Ziffer 4.5 ist erfüllt, wenn gilt:

$$\frac{\sigma_{D \text{ Zul max}}}{\sigma_{D \max}} \geq 1.5$$

1.3 Einfluss der Geschwindigkeit (dynamische Berechnung)

Elastomere unterliegen hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften u.a. einer gewissen Geschwindigkeitsabhängigkeit. Diese wird charakterisiert durch den dynamischen Bettungsmodul $[\text{N/mm}^3]$ oder die dynamische Steifigkeit $[\text{kN/mm}]$, die als wesentliche Kenngrössen Eingang in die Auslegungen finden, falls dynamisch gerechnet werden soll. Dazu müssen die Kennwerte vom jeweiligen Hersteller in Erfahrung gebracht werden. Grundsätzlich rechnet das Zimmermann-Tool statisch.

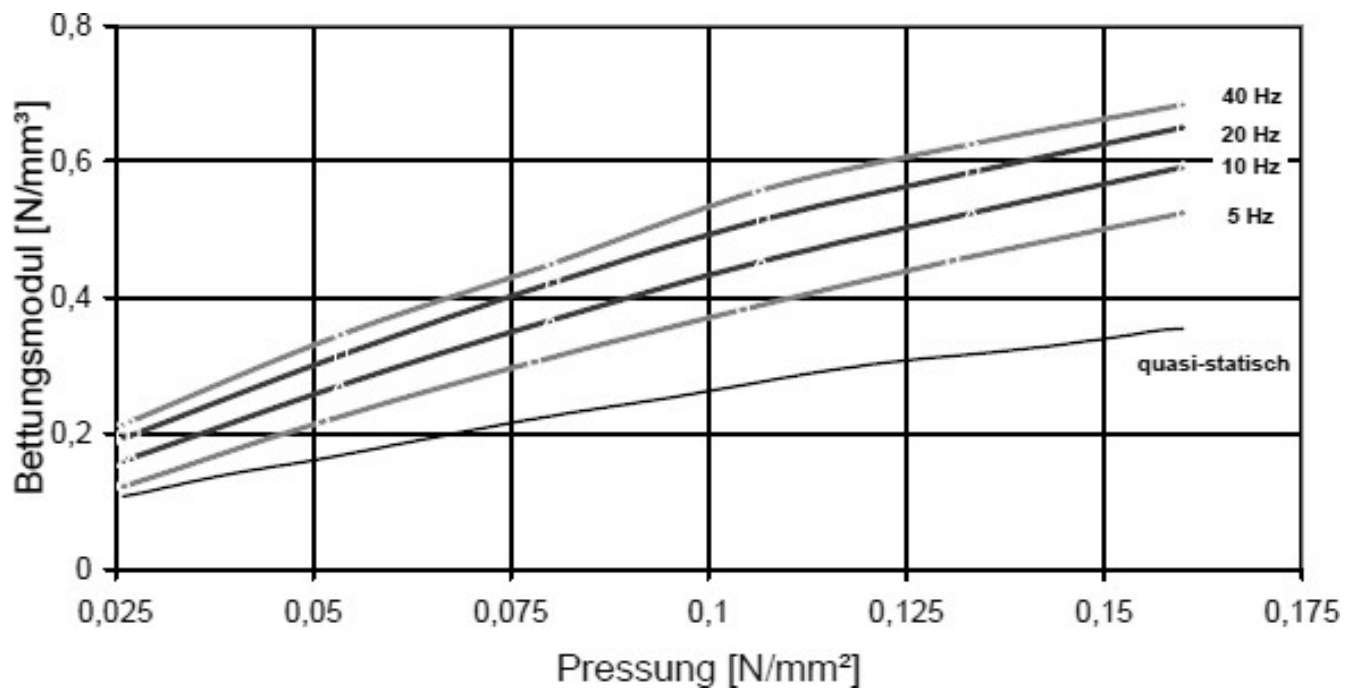


Abbildung 3: Dynamischer Bettungsmodul eines Elastomers in Abh. von Pressung und Frequenz

2 Eingabemaske Schotteroberbau

Die Eingabemaske des Berechnungstools für Schotteroberbau sieht gemäss Abbildung 4 aus:

Hauptgleis			
Achslasten	[to]	[kN]	Achsabstände [m]
Achse 1	13	130	
Achse 2	13	130	Achsabstand 1-2 2.3
Schiene			
Schienenprofil	46E1	← Auswahl	
E-Modul Stahl	E _{Schiene} = 210'000 [N/mm ²]		
Trägheitsmoment	I _{Schiene} = 16'411'000 [mm ⁴]		
Widerstandsmoment	W _{Schiene} = 217'000 [mm ³]		
Schwelle			
Schwellentyp	Holzschwelle (1.8 m, 0.24) ← Auswahl		
geeignet für Profile	36E1, 46E1, 49E1		
zulässige Achslast	keine Angabe [kN]		
Länge der Schwelle	L _{Schwelle} = 1.80 [m]		
Breite der Schwelle	B _{Schwelle} = 0.240 [m]		
Auflagerfreie Länge	L _{frei} = 0.32 [m]		
Schwellenauflagerfläche	A _{Schwelle} = 0.178 [m ²]		
Stützpunktstand			
Schwellenabstand	a = 0.60 [m]		
Biegelinie			
maximale Einsenkung (stat.)	w _{max} = 0.85 mm		

Elastische Elemente	
Zwischenlage	
Federsteifigkeit	k _{Zw} = 700 [kN/mm]
Beschlung	
Beschlungstyp	keine ← Auswahl
Bettungsmodul	C _{Beschlung} = 0 [N/mm ²]
Stützfläche	A _{Beschlung} = 0.178 [m ²]
Federsteifigkeit	k _{Beschlung} = 0.0 [kN/mm]
Schotter	
E-Modul	E _{Schotter} = 76 [N/mm ²]
Stützfläche (A/2)	A _{Schotter} = 0.178 [m ²]
Federsteifigkeit	k _{Schotter} = 45.0 [kN/mm]
Schotterstärke	d _{Schotter} = 0.3 m
Lastausbreitungswinkel	α _{Last} = 75 °
Unterschottermatte	
USM-Typ	keine ← Auswahl
Bettungsmodul	C _{USM} = 0.000 [N/mm ²]
Stützfläche (A/2)	A _{USM} = 0.361 [m ²]
Federsteifigkeit	k _{USM} = 0.00 [kN/mm]
Untergrund	
Verfahren nach Odemark	nein ← Auswahl
Bettungsmodul	C _{Untergrund} = 0.300 [N/mm ²]
Stützfläche	A _{Untergrund} = 0.361 [m ²]
Federsteifigkeit	k _{Untergrund} = 108.30 [kN/mm]
Federsteifigkeit total	
k _{tot}	30.41 [kN/mm]
Elastische Länge	
L _{elastisch}	722 [mm]

Abbildung 4: Eingabemaske Berechnungstool Schotteroberbau

In den unteren Kapiteln wird jeweils erläutert welche Optionen (rote Kreise) im Berechnungstool vorhanden sind. Sämtliche Eingabefelder sind mit der Hintergrundfarbe grün hinterlegt.

2.1 Hauptgleis/Nebengleis

Es kann zwischen Haupt- und Nebengleis gewählt werden. Die Auswahl «Hauptgleis» setzt den Schwellenabstand automatisch auf 0.6 m, während beim «Nebengleis» der Schwellenabstand auf 0.67 m festgelegt wird.

2.2 Achslast

Es können bis zu zwei Achslasten definiert werden. Die Achslast wird in Tonnen eingegeben. Die zulässige Achslast für Meterspur beträgt in der Regel 16 t. Der Achsabstand zwischen den beiden Achsen muss in [m] angegeben werden.

2.3 Schienenprofil

Folgende Schienenprofile stehen zur Auswahl:

Profil	Widerstandsmoment [mm ³]	Trägheitsmoment [mm ⁴]
VST-C		
36E3	153000	10093000

41E1	199300	13821000
46E1	217000	16411000
49E1	240300	18160000
54E1	278700	23379000
54E2	276400	23070000

Tabelle 1: Schienenprofile bei der Meterspur

Die im Berechnungstool hinterlegten Werte für Widerstands- bzw. Trägheitsmoment sind in Tabelle 1 dargestellt.

2.4 Schwellentyp

Folgende Schwellentypen stehen beim Schotteroberbau zur Auswahl:

<i>Schwellentyp</i>	<i>Schwellenauflagerfläche [m²]</i>
Monoblock Typ B 87 M	0.174
Monoblock Typ B 94 M	0.221
VöV-4 M2 M4	0.221
Monoblock Typ B 84 M	0.185
Monoblock Typ B 84 M II	0.18
Holzschwelle (2.0/0.24)	0.226
Holzschwelle (2.0/0.26)	0.244
Holzschwelle (1.8/0.24)	0.178
Holzschwelle (1.8/0.26)	0.192
Y-Stahlschwelle Typ S15	0.216
Stahlschwelle	

Tabelle 2: Mögliche Schwellenarten

Beim LVT-System stehen die Blöcke LVT (0.169 m²) und LVT-HA (0.218 m²) zur Auswahl. Unter dem Auswahlfeld Schwellentyp wird simultan auf das geeignete Schienenprofil hingewiesen. Sollte das gewählte Schienenprofil nicht mit dem geeigneten Profil zusammenpassen, muss das Schienenprofil unter 2.3 entsprechend definiert werden.

2.5 Zwischenlage

Für die eingebaute Zwischenlage ist die statische bzw. dynamische Steifigkeit der Zwischenlage beim Hersteller zu erfragen und einzutragen. Für steife Zwischenlagen (Zw) gibt man in der Regel als statischen Parameter 700 kN/mm ein, für mittelsteife Zw 200 kN/mm und für weiche Zw 100 kN/mm.

2.6 Schwellenbesohlung

Folgende Schwellenbesohlungstypen stehen beim Schotteroberbau zur Auswahl:

<i>Schwellentyp</i>	<i>Stat. Bettungsmodul [N/mm³]</i>
Keine Besohlung	-
SLB 3007	0.37
SLB 2210	0.25
SLS 1308	0.07
USP-7-S-3035	0.36
Müller M02	0.35

Tabelle 3: Mögliche Besohlungstypen

Der hinterlegte statische Bettungsmodul ist in Tabelle 3 ersichtlich.

2.7 Schotterstärke

Im Eingabefeld «Schotterstärke» ist die Dicke des Schotterbettes unterhalb der Schwelle in [m] einzutragen.

2.8 Unterschottermatte

Folgende Unterschottermattentypen stehen beim Schotteroberbau zur Auswahl:

<i>Unterschottermattentyp</i>	<i>Stat. Bettungsmodul [N/mm³]</i>
Keine USM	-
D1019	0.12
D1519	0.18
D619	0.072
DN619	0.066
DN319	0.033
CN225	0.0242

Tabelle 4: Mögliche USM-Typen

Der im Programm hinterlegte statische Bettungsmodul ist in Tabelle 4 ersichtlich.

2.9 Untergrund

An dieser Stelle bietet das Zimmermantool zwei Optionen. Entweder wird der Bettungsmodul über das Verfahren von Odemark berechnet oder man greift auf Werte in der Literatur zurück. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Angaben in der Literatur variieren und sich meist auf Schotter, Unterbau

und Untergrund beziehen. Nachfolgende Werte (ohne Schotter) aus Tabelle 5 eignen sich gut, um eine Berechnung der Schieneneinsenkung durchzuführen.

Beschaffenheit von Untergrund/Unterbau	Stat. Bettungsmodul [N/mm ³]
Sehr schlecht Organische Böden (z.B. Moor), gleichkörniger Sand, weicher Ton	0.02
Schlecht Bindige Böden (z.B. Ton, Schluff)	0.05
Gut Lehmiger und sandiger Kies, Kiessand, Kies, Tragsysteme mit Schutzschicht	0.1 bis 0.15
Sehr steif, starr Intensiv verdichteter Erdkörper von Neubaustrecken, Fels, Betonplatten	0.35

Tabelle 5: Anhaltswerte Bettungsmodul für unterschiedliche Unterbau-Beschaffenheiten

Um den Bettungsmodul mehrschichtiger Systeme zu berechnen, kann die Theorie nach Odemark verwendet werden. Dieses Vorgehen wird bei einer Unterbauausführung mit AC-Rail empfohlen. Das Bild unten stellt schematisch ein zweischichtiges System dar (zwei Schichten über dem Schotter z.B. PSS und Schotter). Bei Kenntnis der Dicke und des Elastizitätsmoduls des Schotters, sowie zwischengeschalteter Schutzschichten und des E-Moduls des Untergrundes kann der Bettungsmodul des gesamten mehrschichtigen Systems berechnet werden. Das Tragsystem wird dabei in einen so genannten äquivalenten Halbraum umgerechnet. Dazu wird das Näherungsverfahren von Odemark angewendet. Es gilt:

$$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_u}} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_u}}$$

Mit:

c = 0,83 für Betondecken und hydraulisch gebundene Schichten

c = 0,9 für bitumengebundene oder ungebundene Schichten.

Das fiktive Bettungsmodul errechnet sich dann entsprechend nachfolgender Formel:

$$k = \frac{E_u}{h^*}$$

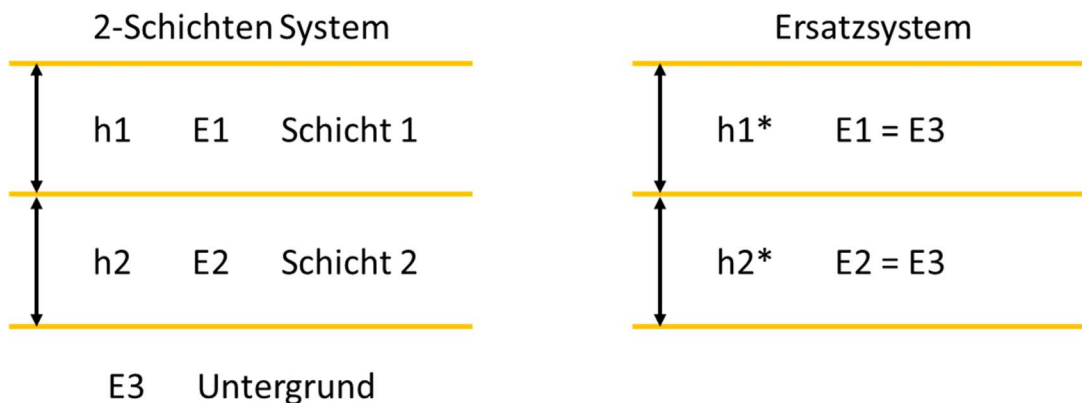


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Mehrschichtensystems

Im aktuellen Regelwerk R RTE21110 „Unterbau und Schotter“ sind untere und obere Grenzwerte der Tragfähigkeiten sowie die Begrifflichkeiten definiert. Die Vorgaben sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, die dem Reglement entnommen und ergänzt wurden.

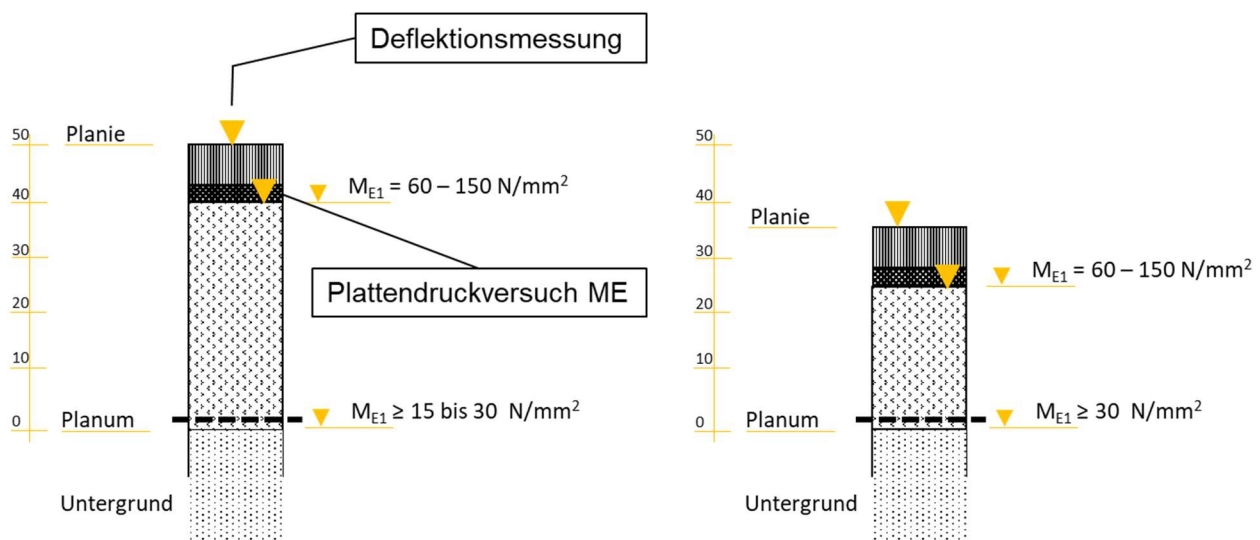


Abbildung 6: Beispiel Neubau – Gleisbelastungsgruppe N1 mit AC Rail (Asphalt)

Ja nach gewählter Berechnungsmethode muss im Excel-Tool das entsprechende Blatt aufgerufen und bearbeitet werden. Der Wert wird automatisch übertragen.

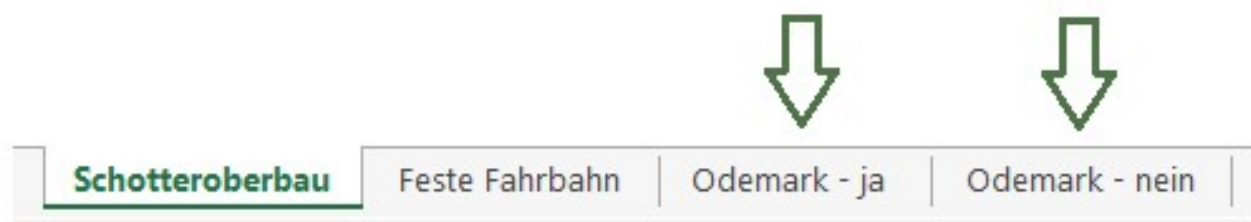


Abbildung 7: Hinweis zur Berechnung des Bettungsmoduls

3 Eingabemaske Feste Fahrbahn (LVT)

Die Eingabemaske des Berechnungstools für feste Fahrbahn sieht entsprechend Abbildung 8 aus:

Hauptgleis			
Achslasten	[t]	[kN]	Achsabstände [m]
Achse 1	13	130	
Achse 2	13	130	Achsabstand 1-2 2.3
Schiene			
Schienenprofil	54E2	← Auswahl	
E-Modul Stahl	E _{Schiene} = 210'000 [N/mm ²]		
Trägheitsmoment	I _{Schiene} = 13'821'000 [mm ⁴]		
Widerstandsmoment	W _{Schiene} = 199'300 [mm ³]		
LVT-Block			
Blocktyp	LVT-HA	← Auswahl	
geeignet für Profile	46E1, 54E2		
zulässige Achslast	keine Angabe [kN]		
Länge des Blocks	L _{Schwelle} = 0.64 [m]		
Breite des Blocks	B _{Schwelle} = 0.34 [m]		
Auflagerfläche	A _{Schwelle} = 0.218 [m ²]		
Stützpunktabstand			
Schwellenabstand	a= 0.60 [m]		
Biegelinie			
maximale Einsenkung (stat.)	w _{max} = 1.41 mm		

Elastische Elemente	
Zwischenlage	
Typ	Zw weich ← Auswahl
Federsteifigkeit	k _{zw} = 100.0 [kN/mm]
Einlegeplatten	
Plattentyp	Typ 1 ← Auswahl
Federsteifigkeit	k _{Beschulung} = 20 [kN/mm]
Prüfung Plattentyp	Achtung
Gummischuh	
Federsteifigkeit	Gummischuh= 2000.0 [kN/mm]
Federsteifigkeit total	
k _{tot} = 16.53 [kN/mm]	
Elastische Länge	
L _{elastisch} = 806 [mm]	

Abbildung 8: Eingabemaske Berechnungstool Feste Fahrbahn

In den nachfolgenden Kapiteln wird jeweils erläutert welche Optionen (rote Kreise) im Berechnungstool vorhanden sind. Sämtliche Eingabefelder sind mit der Hintergrundfarbe grün hinterlegt. Der Nachweis der Schienenspannungen wird hier nicht geführt, da davon ausgegangen werden kann, dass sämtliche Nachweise beim LVT-System eingehalten werden.

3.1 Achslast

Es können bis zu zwei Achslasten definiert werden. Die Achslast wird in Tonnen eingegeben. Die zulässige Achslast für Meterspur beträgt in der Regel 16 t. Der Achsabstand zwischen den beiden Achsen muss in [m] angegeben werden.

3.2 Schienenprofil

Folgende Schienenprofile stehen zur Auswahl:

Profil	Widerstandsmoment [mm ³]	Trägheitsmoment [mm ⁴]
46E1	217000	16411000
54E2	276400	23070000

Tabelle 6: Schienenprofile bei der Meterspur

Die im Berechnungstool hinterlegten Werte für Widerstands- bzw. Trägheitsmoment sind in Tabelle 6 dargestellt.

3.3 LVT-Block

Beim LVT-System existieren zwei unterschiedliche LVT-Blöcke, die sich in ihren Dimensionen unterscheiden. Je schwere die Blöcke (LVT-HA) desto höher ist die Einfügedämmung des Gesamtsystems. Im Berechnungstool können beide Varianten ausgewählt werden.

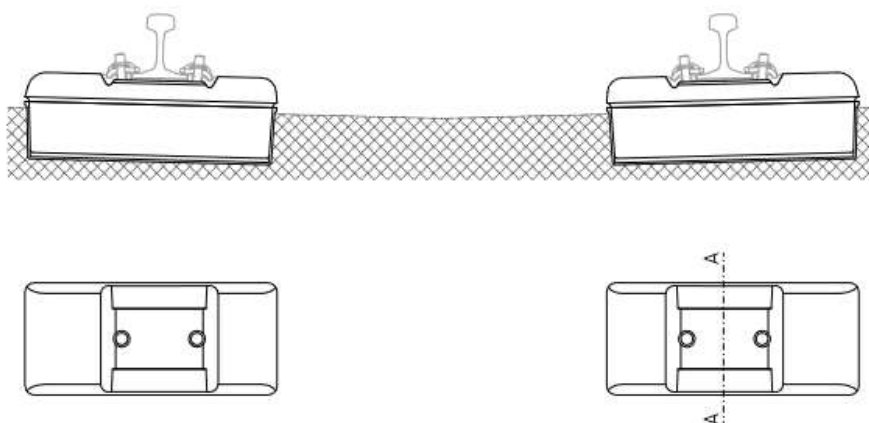


Abbildung 9: LVT-System Standard

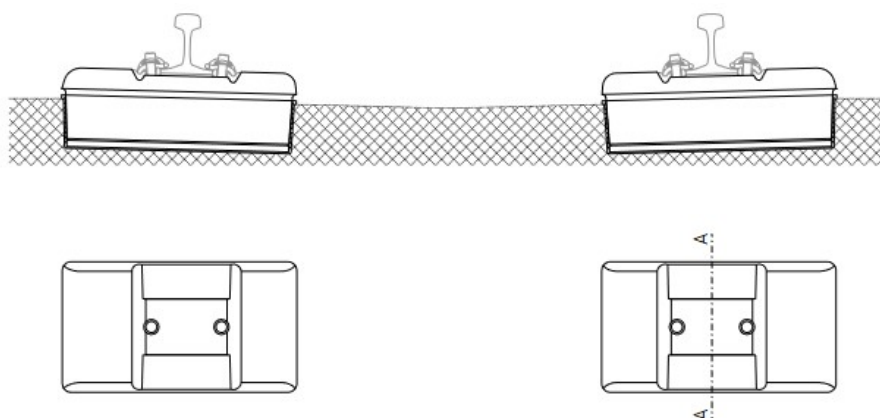


Abbildung 10: LVT-HA System

3.4 Zwischenlage

Zur Auswahl stehen weiche, mittelsteife oder harte Zwischenlagen. Es ist zu beachten, dass die Herstellerangaben zu berücksichtigen ist.

3.5 Einlegeplattentyp

Je nach Anforderungen bzgl. des Erschütterungsschutzes gibt es verschiedene Typen von Einlegeplatten, wobei die jeweiligen Typen abhängig vom LVT-Block sind. Sollten die Einlegeplatten nicht zum Block passen, deutet eine «Warnung» darauf hin. Pro LVT-Block gibt es zwei Typen.

Steifigkeit in [kN/mm]	LVT	LVT-HA
Typ 1	20	12
Typ 2	25	16

Tabelle 7: Varianten der Einlegeplatten mit zugehöriger Steifigkeit

4 Verzeichnisse

4.1 Revisionen

<i>Rev.</i>	<i>Datum</i>	<i>Bearbeiter</i>	<i>Beschrieb der Anpassung</i>
1.0	14.09.2022	Stefan Werner	Fertigstellung Entwurf

4.2 Abbildungen

Abbildung 1: Umrechnung des Querswellenoberbaus in einen Längsswellenoberbau.....	4
Abbildung 2: Einflusslinien als Grundlage zur Berechnung von Schieneneinsenkung / Biegemoment .	5
Abbildung 3: Dynamischer Bettungsmodul eines Elastomers in Abh. von Pressung und Frequenz	7
Abbildung 4: Eingabemaske Berechnungstool Schotteroberbau	8
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Mehrschichtensystems.....	12
Abbildung 6: Beispiel Neubau – Gleisbelastungsgruppe N1 mit AC Rail (Asphalt)	12
Abbildung 7: Hinweis zur Berechnung des Bettungsmoduls.....	12
Abbildung 8: Eingabemaske Berechnungstool Feste Fahrbahn	13
Abbildung 9: LVT-System Standard	14
Abbildung 10: LVT-HA System.....	14

4.3 Tabellen

Tabelle 1: Schienenprofile bei der Meterspur	9
Tabelle 2: Mögliche Schwellenarten	9
Tabelle 3: Mögliche Besohlungstypen	10
Tabelle 4: Mögliche USM-Typen	10
Tabelle 5: Anhaltswerte Bettungsmodul für unterschiedliche Unterbau-Beschaffenheiten.....	11
Tabelle 6: Schienenprofile bei der Meterspur	13
Tabelle 7: Varianten der Einlegeplatten mit zugehöriger Steifigkeit.....	14