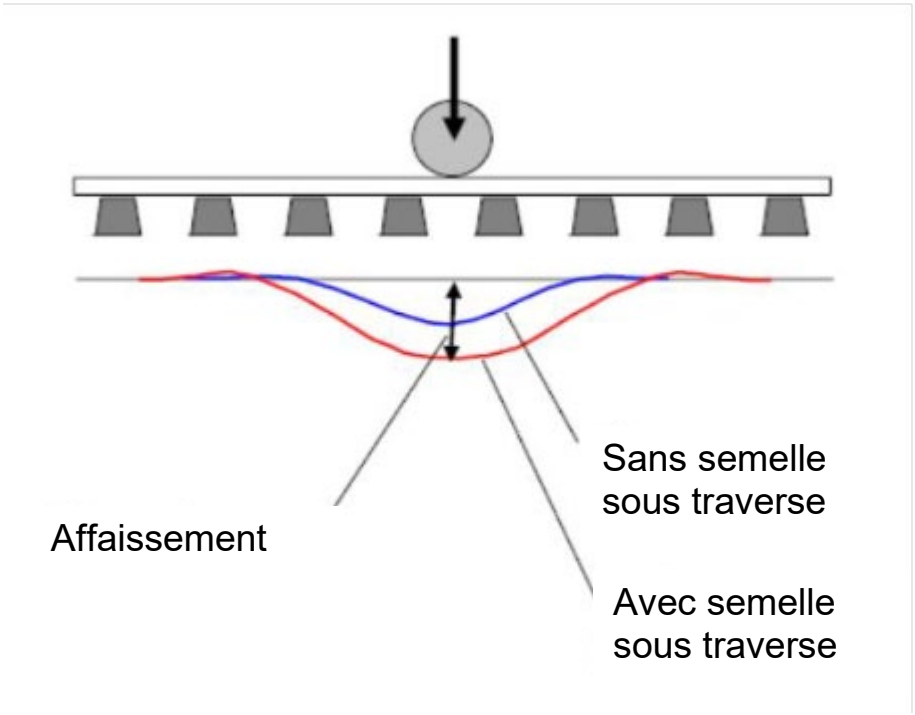
Mode d’emploi Outil de calcul

Maîtrise de système Interaction matériel roulant – voie ferrée Voie métrique
Projet: 4 Rigidité de la voie
Module: Module 1

Conseils d'utilisation et informations générales



Date / Statut:	14.09.2022 / Ebauche	Nombre de page 15
Auteur:	Stefan Werner / KPZ Fahrbahn AG	
Contrôle:	Vorname Name / Firma	
Libération	Vorname Name / Firma	

Libération par la maîtrise de système

Version	Responsable	Date
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Table des matières

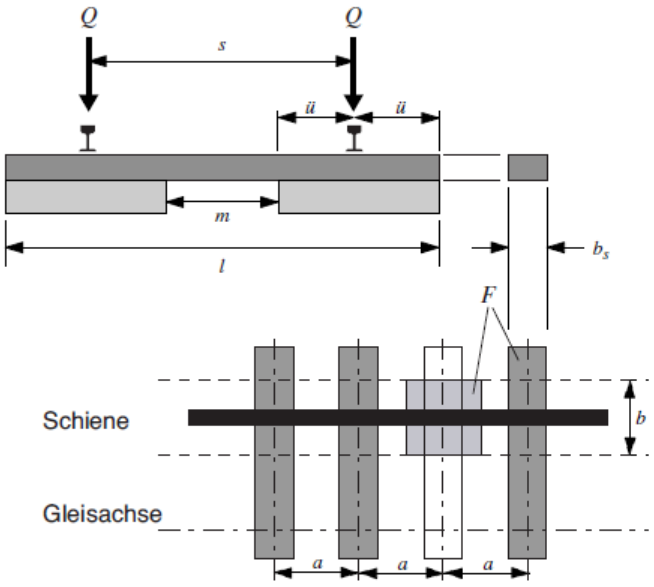
1 Généralités 4
1.1 Description du modèle de calcul 4
1.2 Concept de vérification selon DE-OCF ad art. 31 6
1.3 Influence de la vitesse (calcul dynamique) 7
2 Ecran de saisie Superstructure ballastée 8
2.1 Voie principale/secondaire 8
2.2 Charge par essieu 8
2.3 Profil de rail 9
2.4 Type de traverse 9
2.5 Semelle sous rail 9
2.6 Semelle sous traverse 10
2.7 Epaisseur de ballast 10
2.8 Tapis sous bballast 10
2.9 Infrastructure et terrain naturel 10
3 Ecran de saisie voie sur dalle (LVT) 13
3.1 Charge par essieu 13
3.2 Profil de rail 13
3.3 Blochet LVT 14
3.4 Semelle sous rail 14
3.5 Semelle élastique sous blochet 14
4 Répertoires 15
4.1 Revisions 15
4.2 Figures 15
4.3 Tableaux 15

1 Généralités

L'outil de calcul Zimmermann_MS Version 1.3 sert à déterminer l'enfoncement statique des rails et les contraintes de traction par flexion dans les rails dues à la charge par essieu verticale.

1.1 Description du modèle de calcul

Le calcul de la superstructure ferroviaire est effectué à l'aide de la méthode de calcul Zimmermann. Une poutre de longueur infinie, avec appui continu sur un lit élastique en est la base.



s = Stützweite (Abstand Schienenkopfmitten)

Q = Radlast

a = Schwellenabstand

l = Schwellenlänge

b_s = Schwellenbreite

m = auflagefreier, nicht unterstopfter Mittelteil

F = effektive Schwellen-auflagefläche unter einer Schiene

b = Breite der stellvertretenden Langschwelle

Figure 1: Conversion de la superstructure avec traverses perpendiculaires à la voie en une superstructure avec traverses longitudinales

Le modèle part d'une répartition des surfaces qui diffère de la situation réelle, mais cela n'a aucune influence sur les résultats, car la taille de la surface et les charges restent identiques. La pression sur les surfaces ne varie pas non plus. La surface d'appui efficace est déjà définie dans l'outil de calcul pour chaque type de traverse et ne doit pas être recalculée. L'équation pour la détermination de la ligne de flexion de la poutre à appui élastique est la suivante:

$$E_{rail} I_{rail} \cdot \omega^{IV} + k_{tot} \cdot \omega = Q_{charge\ roue} \cdot \delta(x)$$

La longueur élastique de cette poutre est déterminée par la formule suivante:

$$L_{élastique} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_{rail} \cdot I_{rail} \cdot a}{k_{tot}}}$$

où l'équation suivante est valable pour la superstructure ballastée:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_{Zw}} + \frac{1}{k_{USM}} + \frac{1}{k_{ballast+infrastructure+terrain\ naturel}}}$$

tandis que l'équation suivante est valable pour la voie sur dalle avec système LVT:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_{Zw}} + \frac{1}{k_{semelle\ élastique\ sous\ blochet}} + \frac{1}{k_{chausson\ en\ caoutchouc}}}$$

Les contraintes du rail dues à la charge verticale sont déterminées à partir du moment de flexion. Le moment de flexion représente la deuxième dérivée de la fonction.

$$M_k(x) = -E_{rail} I_{rail} \cdot \omega^{II}$$

Les contraintes de traction par flexion sont déterminées comme suit:

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

L'enfoncement et le moment peuvent être déterminés à partir des lignes d'influence en tenant compte de l'influence des axes voisins. Les composants élastiques, tels que les semelles sous rail, les semelles sous traverses, les USM, etc. sont caractérisés par leurs propriétés spécifiques. La plupart des produits présentent une caractéristique élastique non linéaire, qui n'est explicitement pas prise en compte dans cet outil de calcul. Toutes les autres composantes d'élasticité existantes, p.ex. de l'infrastructure ou du terrain naturel, sont prises en compte dans les calculs soit en tant que rigidité [kN/mm], module d'élasticité (module de young) [N/mm²] ou module d'élasticité [N/mm³].

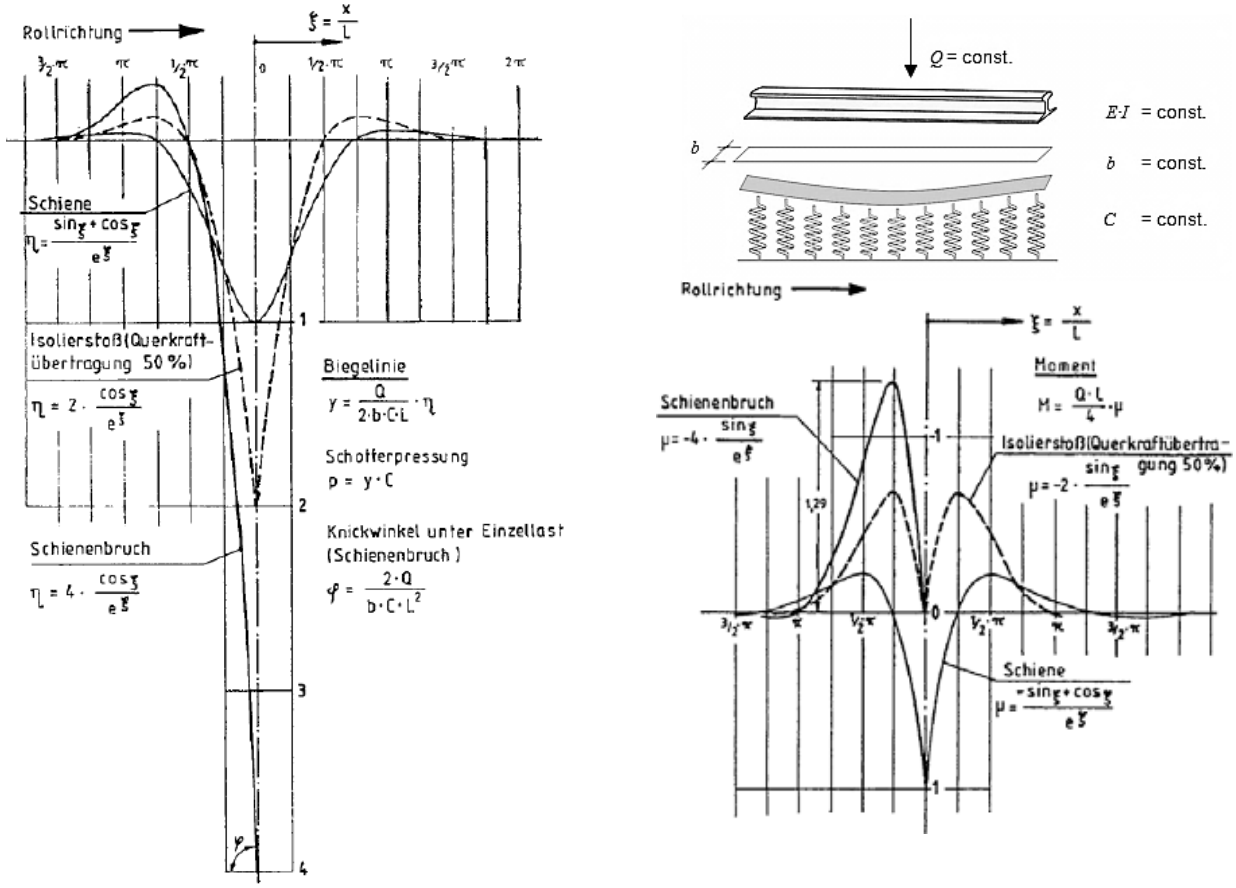


Figure 2: Lignes d'influence comme base pour le calcul de l'enfoncement du rail / moment de flexion

1.2 Concept de vérification selon DE-OCF ad art. 31

Les prescriptions selon DE-OCF ad art. 31, voie normale, DE 31, ch. 4 pour les vérifications structurales s'appliquent également à la voie métrique par analogie. La charge maximale par roue est déterminée à partir de la charge statique moyenne Q en tenant compte d'un facteur d'amplification. Ce facteur d'amplification $(1 + t \cdot s)$ tient compte de l'influence de la vitesse φ ainsi que de la qualité géométrique de la voie n.

L'influence de la vitesse est calculée selon la formule suivante:

V < 60 km/h → $\varphi = 1$

V > 60 km/h → Trains voyageurs $\varphi = 1 + \frac{0.5 \cdot (V-60)}{140}$

→ Trains marchandises $\varphi = 1 + \frac{0.5 \cdot (V-60)}{60}$

L'influence de la qualité géométrique de la voie est considérée de la manière suivante:

- Très bon état de la superstructure n = 0.1
- Bon état de la superstructure n = 0.2
- Mauvais état de la superstructure n = 0.3

On applique alors: $s = n \cdot \varphi$

La variable statique t est déterminée selon la sécurité statique choisie:

99.6 % → t = 3
96.0 % → t = 2
67.0 % → t = 1

Le supplément pour la redistribution des forces est pris en compte selon EN 164321-1:2017, 5.1.2.5 (kq = 1.25). Ce supplément peut être défini par l'utilisateur en fonction des besoins (p.ex. 1.20).

Les contraintes dans le patin du rail sont déterminées comme suit:

$$\sigma_{D\,max}(Q_{max}) = \frac{M(Q_{max})}{W_{rail}}$$

La vérification des contraintes du rail selon DE-OCF ad art. 31, voie normale, DE 31, chiff. 4.5 est remplie si:

$$\frac{\sigma_{D\,adm\,max}}{\sigma_{D\,max}} \geq 1.5$$

1.3 Influence de la vitesse (calcul dynamique)

Les propriétés dynamiques des élastomères dépendent, entre autres, de la vitesse. Celles-ci sont caractérisées par le module d'élasticité dynamique [N/mm³] ou la rigidité dynamique [kN/mm], qui sont des paramètres essentiels à prendre en compte lors du dimensionnement si un calcul dynamique est nécessaire. Pour cela, les valeurs caractéristiques doivent être obtenues auprès du fournisseur concerné. En principe, l'outil Zimmermann calcule de manière statique.

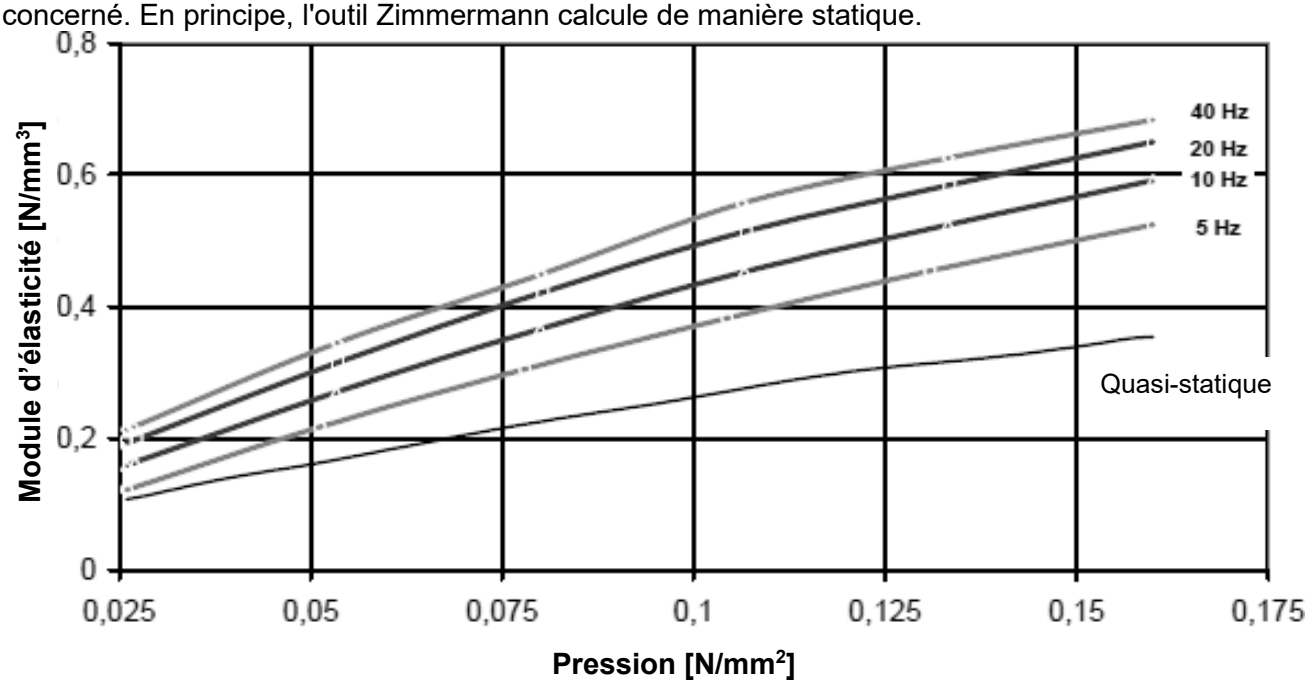


Figure 3: Module d’élasticité dynamique d’un élastomère en fonction de la pression et de la fréquence

2 Ecran de saisie Superstructure ballastée

L'écran de saisie de l'outil de calcul pour superstructure ballastée est présenté en Figure 4:

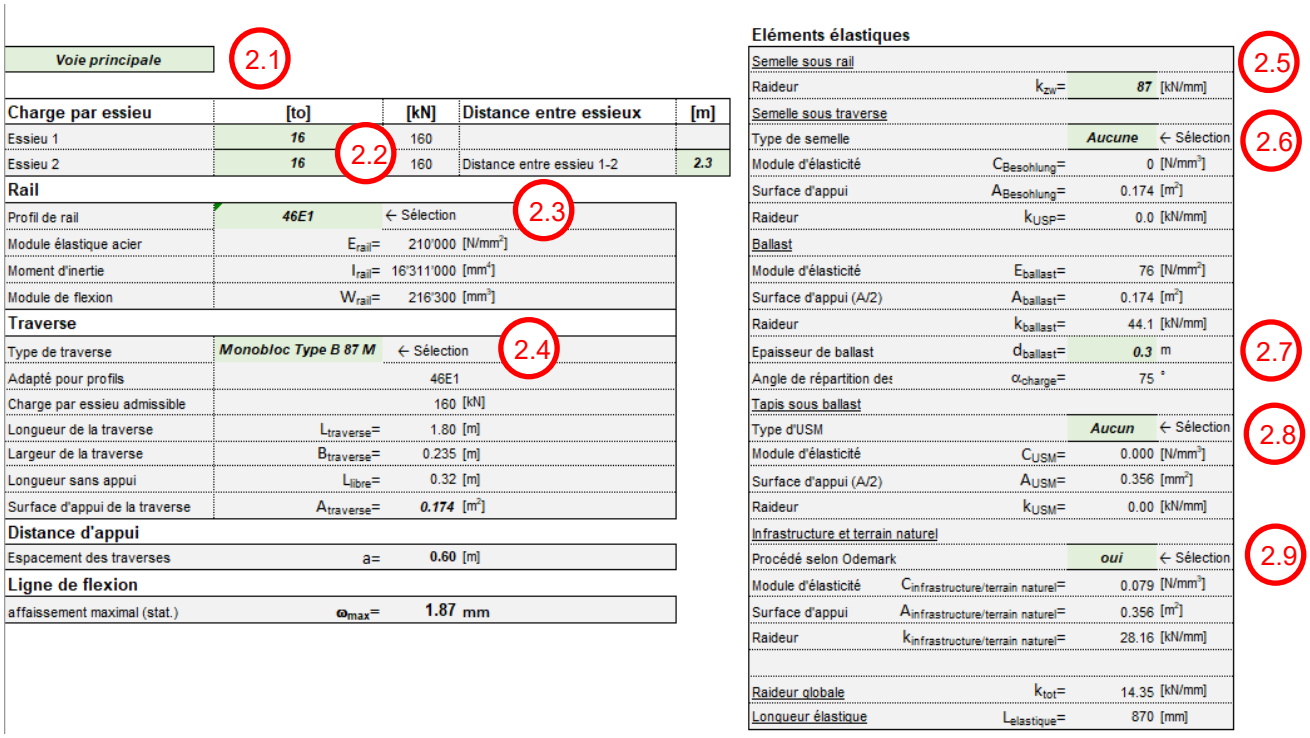


Figure 4: Ecran de saisie outil de calcul superstructure ballastée

Les chapitres ci-dessous expliquent quelles options (cercles rouges) sont disponibles dans l'outil de calcul. Tous les champs de saisie sont représentés sur fond vert.

2.1 Voie principale/secondaire

Il est possible de choisir entre voie principale et voie secondaire. La sélection "Voie principale" fixe automatiquement l'espacement des traverses à 0.6 m, tandis que pour la "Voie secondaire", l'espacement des traverses est fixé à 0.67 m.

2.2 Charge par essieu

Il est possible de définir jusqu'à deux charges par essieu. La charge par essieu est saisie en tonnes. En règle générale, la charge par essieu autorisée pour la voie métrique est de 16 tonnes. L'entraxe entre les deux essieux doit être saisi en [m].

2.3 Profil de rail

Les profils de rail suivants sont disponibles:

Bref aperçu de l'état actuel des connaissances basé sur la littérature existante

Profil	*Module de flexion [mm³]*	*Moment d'inertie [mm⁴]*
VST-C		
36E3	153000	10093000
41E1	199300	13821000
46E1	217000	16411000
49E1	240300	18160000
54E1	278700	23379000
54E2	276400	23070000

Tableau 1: Profils de rail de la voie métrique

Les valeurs de modules de flexion resp. du moment d'inertie définies dans l'outil de calcul sont présentées dans le Tableau 1.

2.4 Type de traverse

Les traverses suivantes sont disponibles pour la superstructure ballastée:

Bref aperçu de l'état actuel des connaissances basé sur la littérature existante

Type de traverse	*Surface d'appui de la traverse [m²]*
Monobloc Type B 87 M	0.174
Monobloc Type B 94 M	0.221
UTP-E M2/M4	0.221
Monobloc Type B 84 M	0.185
Monobloc Type B 84 M II	0.18
Traverse bois (2.0/0.24)	0.226
Traverse bois (2.0/0.26)	0.244
Traverse bois (1.8/0.24)	0.178
Traverse bois (1.8/0.26)	0.192
Traverse en acier Y Type S15	0.216
Traverse en acier	

Tableau 2: Types de traverses disponibles

Pour le système LVT, les blochets LVT (0.169 m^2) et LVT-HA (0.218 m^2) sont disponibles. Sous le champ de sélection du type de traverse, le profil de rail approprié est indiqué simultanément. Si le profil de rail choisi ne correspond pas au profil approprié, le profil de rail doit être défini en conséquence sous 2.3.

2.5 Semelle sous rail

La rigidité statique ou dynamique de la semelle sous rail doit être demandée au fournisseur et inscrite. Pour les semelles sous rail rigides (Zw), on indique en général comme paramètre statique 700 kN/mm, pour les Zw moyennement rigides 200 kN/mm et pour les Zw souples 100 kN/mm.

2.6 Semelle sous traverse

Les types de semelles sous traverses suivants sont disponibles pour la superstructure ballastée:

Bref aperçu de l'état actuel des connaissances basé sur la littérature existante

Type de semelle sous traverse	*Module d'élasticité statique [N/mm³]*
Pas de semelle	-
SLB 3007	0.37
SLB 2210	0.25
SLS 1308	0.07
USP-7-S-3035	0.36
Müller M02	0.35

Tableau 3: Types de semelles sous traverses disponibles

Les modules d'élasticité statique définis sont présentés dans le Tableau 3.

2.7 Epaisseur de ballast

L'épaisseur du lit de ballast sous la traverse est à introduire en [m] dans la case «Epaisseur de ballast»

2.8 Tapis sous bballast

Les tapis sous ballast suivants sont disponibles pour la superstructure ballastée

Bref aperçu de l'état actuel des connaissances basé sur la littérature existante

Type de tapis sous ballast	*Module d'élasticité statique [N/mm³]*
Pas d'USM	-
D1019	0.12
D1519	0.18
D619	0.072
DN619	0.066
DN319	0.033
CN225	0.0242

Tableau 4: Types d'USM disponibles

Les modules d'élasticité statiques définis dans l'outil sont présentés dans le Tableau 4.

2.9 Infrastructure et terrain naturel

Ici, l'outil Zimmermann offre deux options. Soit on calcule le module d'élasticité via la méthode d'Odemark, soit on se réfère aux valeurs de la littérature. Il faut cependant faire attention au fait que les données de la littérature varient et se réfèrent généralement au ballast, à l'infrastructure et au terrain naturel. Les valeurs (sans ballast) selon Tableau 5 conviennent bien pour les calculs d'enfoncement du rail.

Nature de l'infrastructure/terrain naturel	***Module d'élasticité statique [N/mm³]***
Très mauvais Terrains organiques (p.ex. marais), sable à grain uniforme, argile meuble	0.02
Mauvais Sols cohésifs (p.ex. argile, limon)	0.05
Bon Gravier argileux et sableux, sable à gravier, gravier, Infrastructure avec couche d'étanchéité	0.1 à 0.15
Très rigide Infrastructure intensément compactée de nouvelles lignes, rocher, dalle en béton	0.35

Tableau 5: Valeurs indicatives du module d'élasticité pour différentes caractéristiques de l'infrastructure et du terrain naturel

Pour calculer le module d'élasticité des systèmes à plusieurs couches, on peut utiliser la théorie d'Odemark. Cette approche est recommandée dans le cas d'une infrastructure avec AC-Rail. L'image ci-dessous représente schématiquement un système à deux couches (deux couches au-dessus du ballast, p.ex. PSS et ballast). En connaissant l'épaisseur et le module d'élasticité du ballast, ainsi que des couches d'infrastructure et le module d'élasticité du terrain naturel, il est possible de calculer le module d'élasticité de l'ensemble du système à plusieurs couches. Le système porteur est alors converti en ce que l'on appelle un demi-espace équivalent. La méthode d'approximation d'Odemark est utilisée à cet effet:

$$h^* = 0.83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_u}} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_u}}$$

où:

c = 0.83 pour dalles en béton et couches à liant hydraulique

c = 0.9 pour couches à liant bitumineux ou non liées

Le module d'élasticité fictif est calculé selon la formule suivante:

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

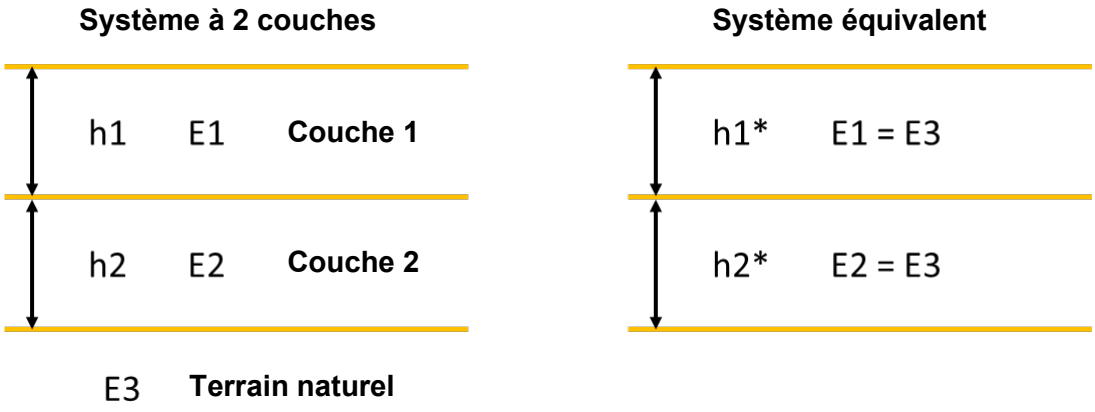


Figure 5: Aperçu schématique d'un système à plusieurs couches

Dans le règlement actuel R RTE 21110 "infrastructure et ballast", les valeurs limites inférieures et supérieures de la portance ainsi que les termes sont définies. Les prescriptions sont représentées dans l'illustration suivante, extraites du règlement et complétées.

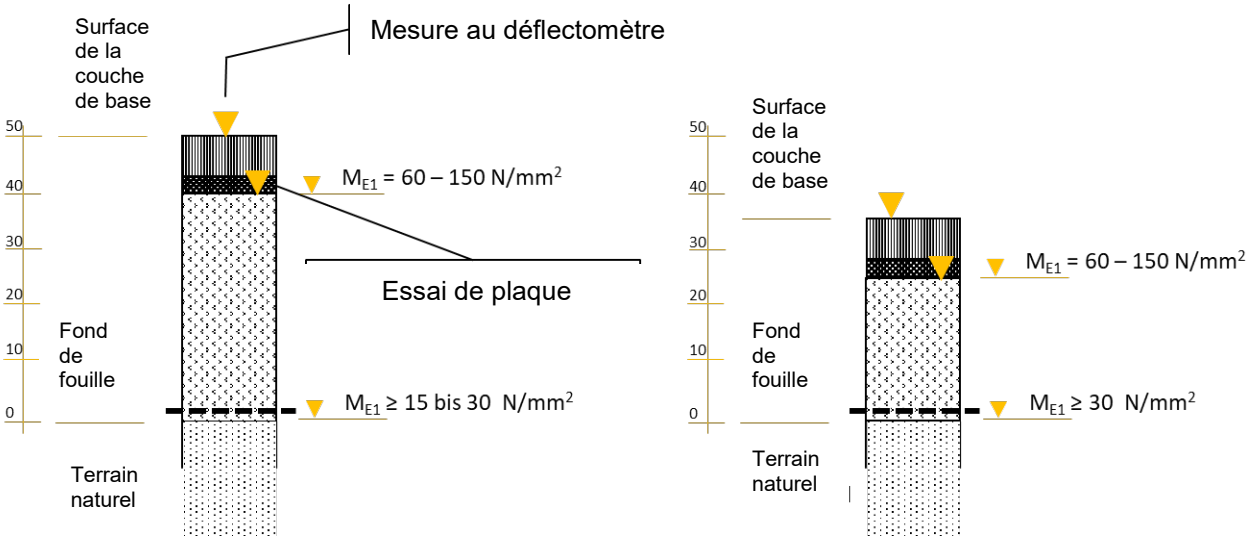


Figure 6: Exemple nouvelle construction – groupe de charge des voies N1 avec AC-Rail (asphalte)

Selon la méthode de calcul choisie, la feuille correspondante doit être ouverte et traitée dans l'outil Excel. La valeur est transférée automatiquement.

Figure 7: Remarque sur le calcul du module d'élasticité

3 Ecran de saisie voie sur dalle (LVT)

L'écran de saisie de l'outil de calcul pour voie sur dalle est présenté dans la Figure 8:

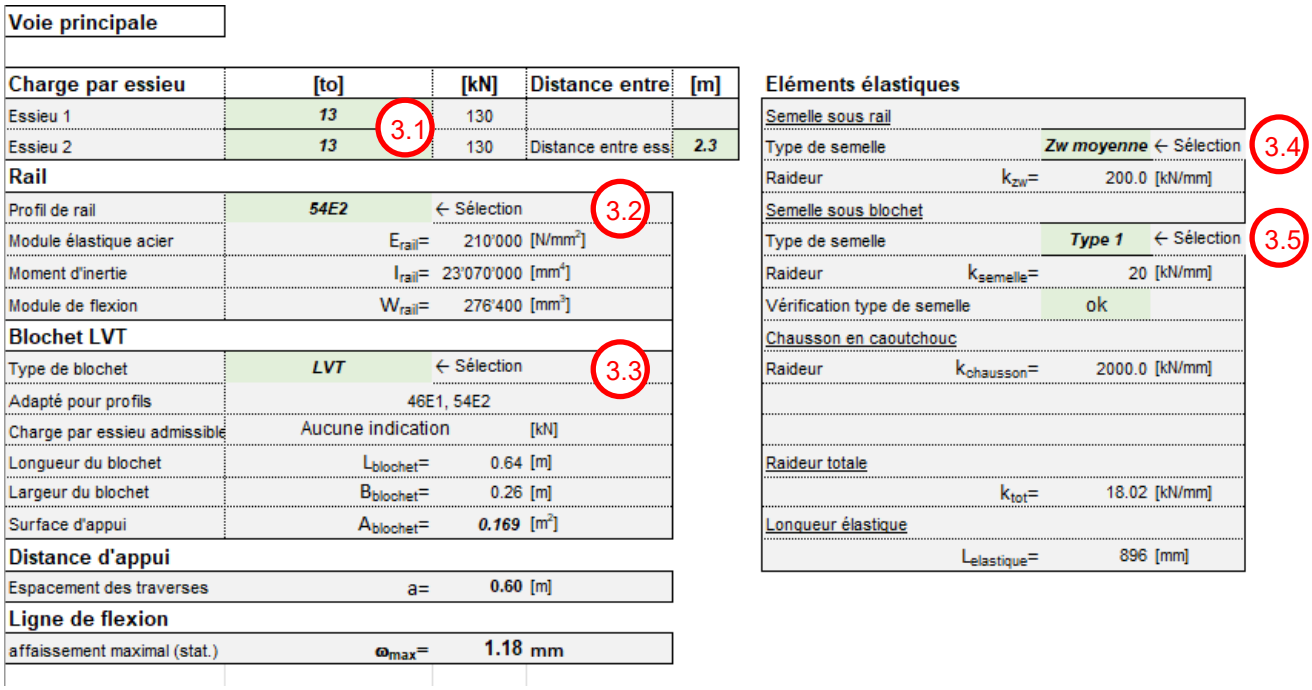


Figure 8: Ecran de saisie outil de calcul voie sur dalle

Les options (cercles rouges) disponibles dans l'outil de calcul sont présentées dans les chapitres suivants. Tous les champs de saisie sont représentés sur fond vert. La vérification des contraintes dans les rails n'est pas effectuée ici, puisque l'on peut partir du principe que toutes les vérifications sont respectées pour le système LVT.

3.1 Charge par essieu

Il est possible de définir jusqu'à deux charges par essieu. La charge par essieu est saisie en tonnes. En règle générale, la charge par essieu autorisée pour la voie métrique est de 16 tonnes. L'entraxe entre les deux essieux doit être saisi en [m].

3.2 Profil de rail

Les profils de rail suivants sont disponibles:

Bref aperçu de l'état actuel des connaissances basé sur la littérature existante

Profil	*Module de flexion [mm³]*	*Moment d'inertie [mm⁴]*
46E1	217000	16411000
54E2	276400	23070000

Tableau 6: Profils de rail pour la voie métrique

Les valeurs de modules de flexion resp. du moment d'inertie définies dans l'outil de calcul sont présentées dans le Tableau 6.

3.3 Blochet LVT

Il existe deux types de blochets LVT différents, qui se distinguent par leurs dimensions. Plus les blochets sont lourds (LVT-HA), plus l'isolation d'insertion du système global est élevée. Les deux variantes peuvent être sélectionnées dans l'outil de calcul.

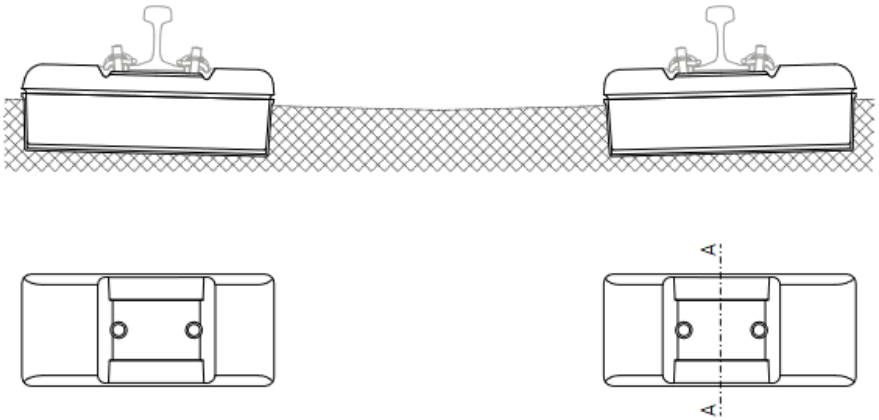


Figure 9: Système LVT Standard

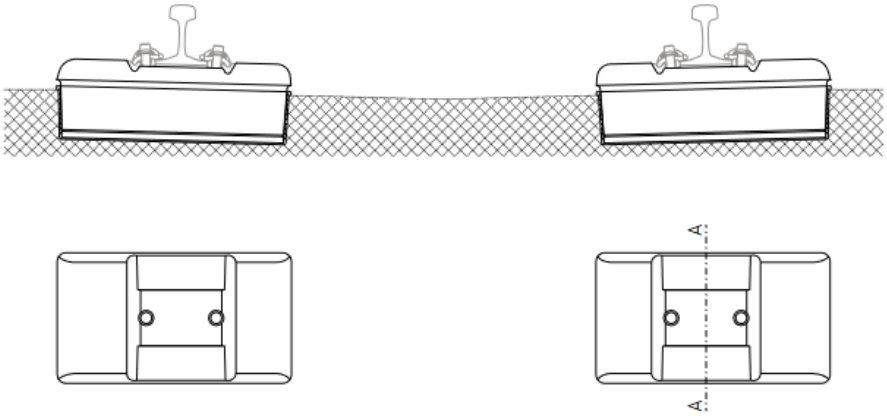


Figure 10: Système LVT-HA

3.4 Semelle sous rail

Les semelles sous rail souples, moyennement rigides ou rigides peuvent être selectionnées. Il convient de tenir compte des indications du fournisseur.

3.5 Semelle élastique sous blochet

Selon les exigences en matière de protection contre les vibrations, il existe différents types de semelles sous blochets pour les différents types de blochets LVT. Si les semelles sous blochets ne sont pas adaptées au blochet, un "avertissement" l'indique. Il existe deux types de semelles sous blochezs par blochet LVT.

Rigidité en [kN/mm]	***LVT***	***LVT-HA***
Typ 1	20	12
Typ 2	25	16

Tableau 7: Variantes de semelles sous blochets avec leur rigidité

4 Répertoires

4.1 Revisions

Rev.	*Date*	*Auteur*	*Description*
1.0	14.09.2022	Stefan Werner	Finalisation ébauche

4.2 Figures

Figure 1: Conversion de la superstructure avec traverses perpendiculaires à la voie en une superstructure avec traverses longitudinales 4
Figure 2: Lignes d'influence comme base pour le calcul de l'enfoncement du rail / moment de flexion 5
Figure 3: Module d'élasticité dynamique d'un élastomère en fonction de la pression et de la fréquence 7
Figure 4: Ecran de saisie outil de calcul superstructure ballastée 8
Figure 5: Aperçu schématique d'un système à plusieurs couches 11
Figure 6: Exemple nouvelle construction – groupe de charge des voies N1 avec AC-Rail (asphalte). 12
Figure 7: Remarque sur le calcul du module d'élasticité....12
Figure 8: Ecran de saisie outil de calcul voie sur dalle 13
Figure 9: Système LVT Standard 14
Figure 10: Système LVT-HA 14

4.3 Tableaux

Tableau 1: Profils de rail de la voie métrique....9
Tableau 2: Types de traverses disponibles 9
Tableau 3: Types de semelles sous traverses disponibles....10
Tableau 4: Types d'USM disponibles....10
Tableau 5: Valeurs indicatives du module d'élasticité pour différentes caractéristiques de l'infrastructure et du terrain naturel....11
Tableau 6: Profils de rail pour la voie métrique 13
Tableau 7: Variantes de semelles sous blochets avec leur rigidité....14