

Description des paramètres d'entrée et représentation de la voie ferrée dans les modèles dynamiques

Maîtrise de système Interaction Véhicule/Voie ferrée à écartement métrique
Projet: 4 Rigidité de la voie
Module: 2 Modèle dynamique de la voie ferrée

Rapport technique - traduit «Management Summary»



ID: RAILPlusSF-00085

Date / Statut : 25.07.2025 / Approuvé

Nombre de pages 5

Niveau de confidentialité : Publique

Auteur de la traduction: Karim Fischer / TPF

Vérifié : Martin Siegen / MGBahn

Approuvé: RAILplus

Format de citation : Landgraf, Matthias, RAILplus: *Beschreibung der Eingangsparameter und Darstellung der Fahrbahn in den dynamischen Modellen*. Technischer Bericht, **RAILPlusSF-00048**, 25. Nov. 2024

La version allemande de ce rapport est l'original et fait donc foi.

Liste des changements

Version	Date	Responsable	Description
0.1	25.07.2025	K. Fischer	Premier brouillon
0.2	28.07.2025	M. Siegen	Rapport édité et finalisé
1.0	30.07.2025	RAILplus	Rapport approuvé

Management Summary

Dans le cadre de RAILplus, le sous-projet « P4 Rigidité de la voie » élabore différents modèles afin de pouvoir quantifier l'influence des composants choisis sur le comportement de la voie. Le présent livrable décrit les modèles de simulation et a pour objectif principal de documenter de manière structurée les résultats attendus du côté de la voie ferrée, ainsi que de présenter les paramètres d'entrée nécessaires pour le projet P4. Le développement des modèles a pu être finalisé en 2024 ; ce livrable inclut donc également la validation définitive des combinaisons de paramètres qui seront examinées en 2025. Les résultats principaux sont attendus en 2025, mais les premières conclusions disponibles sont déjà présentées dans ce document.

De manière générale, on peut distinguer deux types de modèles de voie : ceux qui simulent l'usure ainsi que la génération de bruit au niveau de la surface du rail et ceux qui évaluent le comportement du sous-sol en fonction des différentes natures de sol. Ces modèles permettent d'analyser les effets des divers composants de la voie sur l'usure du rail, la production de bruit (en particulier, le crissement en courbe) ainsi que la stabilité de la géométrie de la voie à long terme. La figure 1 (N.d.T en allemand) donne un aperçu des différents modèles, en précisant leur objectifs, les questions clés ainsi que les hypothèses posées et les limitations associées.

	Ziele	Zentrale Fragestellungen	Annahmen/ Limitierungen	
Statisch Feste Parameter, vereinfachte Annahmen zur Belastung.	 Quasi-statischer Schienenoberflächenverschleiss	Quantitativer Einfluss von - Belastung, Radius, - Schienenprofil, Schienengüte, - Spurweite/ Einbauneigung auf Verschleiss.	- Wahl der Schienenstahlgüte - Einfluss der Achslast/ Achsabstand? - Nominalprofil vs. Verschleissprofil? - Spurerweiterung sinnvoll?	Der direkte Einfluss von - Zwischenlagen - Schwellentyp - Schotterbett/ Untergrund auf den statischen Verschleiss wird als vernachlässigbar angenommen.
	 Dynamischer Schienenoberflächenverschleiss	Quantitativer Einfluss von - Belastung, Radius, - Schienenprofil, Schienengüte, - Zwischenlagen, - Verhalten der (bes.) Betonschwelle, - Spurweite/ Einbauneigung auf die Schlupfwellenentwicklung.	- Wahl der Schienenstahlgüte - Optimale Zwischenlage? - Einfluss der Achslast/ Achsabstand? - Nominalprofil vs. Verschleissprofil? - Spurerweiterung sinnvoll?	- Zwischenlagensteifigkeit über Feder/Dämpfung des gesamten Stützpunktes berücksichtigt. - Besohlung als separate Feder berücksichtigt, die variiert wird. Direkter Einfluss der Besohlung kann nicht dargestellt werden.
Dynamisch Berücksichtigen zeitabhängige Belastungen und wechselwirkende Kräfte.	 Lärmmodell (Fokus Kurvenkreischen)	Quantitativer Einfluss von - Belastung, Radius, - Schienengüte, - Zwischenlagen, - Verhalten der Betonschwelle und - Spurweite/ Einbauneigung auf Entstehung des Kurvenkreischen.	- Kann die Fahrbahn das Kurvenkreischen durch Komponentenwahl minimieren? - Wenn ja, welche Komponenten sollten eingesetzt werden? - Spurerweiterung sinnvoll?	- Schiene (Profil & Güte), Zwischenlagen und Schwellentyp wird als „Gesamtmobilität“ berücksichtigt und als solche variiert. - Besohlung, Schotterbett, Untergrund, Gleislage als nicht relevant definiert.
	 Baugrundmodell	Quantitativer Einfluss von - Belastung, - Elastischer Elemente, - unterschiedlicher Schwellentypen - Baugrundqualität auf Scherdehnungen und Spannungsverteilungen im Untergrund.	- Langfristiges Gleislageverhalten bei unterschiedlichem Untergrund? - Unterbausanieierung bei tiefliegendem schlechtem Baugrund ausreichend? - Können elastische Oberbauelemente die eingebrachten Spannungen an der Planie verringern?	- 2D-FE-Modell nicht hinreichend genau, um den Einfluss einzelner Komponenten darzustellen. - 3D-FE-Modell für 2025 geplant, um die Spannungsverteilung bei unterschiedlicher Komponentenwahl ausweisen zu können.

Figure 1: Vue d'ensemble des modèles, objectifs, questions clés et hypothèses/limitations

En 2025, des variations de paramètres sont prévues dans les différents modèles afin de pouvoir quantifier l'influence de divers composants et conditions limites sur l'usure et le développement du bruit. La figure 2 (N.d.T en allemand) donne un aperçu des variations validées cette année encore (N.d.T en 2024). Les variantes retenues ont été hiérarchisées en fin d'année afin de concentrer les travaux sur les questions essentielles et d'éviter les simulations longues pour lesquelles aucun impact significatif n'est attendu. Pour tous les modèles, la priorité a été donnée à l'analyse de la sollicitation, du rayon de courbe, du choix du rail (qualité d'acier et profil) et de l'écartement des voies ou de l'inclinaison de pose. La variation des semelles sous-rail et du type de traverse est intégrée, en fonction de la pertinence, dans chaque modèle.

	Verschleiss statisch	Verschleiss dynamisch	Lärm (Kurvenkreischen)
Belastung ¹	✓ Fahrzeuge Adler und Komet (Oberbaubeanspruchung und fahrdynamisches Verhalten).	✓ Fahrzeuge Adler und Komet (Oberbaubeanspruchung und fahrdynamisches Verhalten).	✓ Fahrzeuge Adler und Komet (fahrdynamisches Verhalten)
Radius ¹	✓ Wird abgebildet. Korrelation Verschleiß ~ Radien.	✓ Wird abgebildet. Korrelation Schlupfwellen ~ Radien.	✓ Radius wird in Modell abgebildet.
Schienenprofil ¹	✓ Variation Nominalprofile vs. Verschleißoptimiertes Profil RAILplus.	✓ Variation Nominalprofile vs. Verschleißoptimiertes Profil RAILplus.	✓ Profil wird in Simulation stationärer Kurvenfahrt variiert.
Schienengüte ¹	✓ 260 vs. 350 vs. 400	✓ 260 vs. 350 vs. 400	✗ E-Modul gleich, damit Variation nicht sinnvoll
Zwischenlagen	✓ ³ Über Feder/Dämpfung variierbar. Befestigung ist implizit berücksichtigt.	✓ ¹ Über Feder/Dämpfung variierbar. Befestigung ist implizit berücksichtigt.	✓ ¹ Variation möglich, jedoch aufwendig. Vermutlich wenig Relevanz.
Schwellentyp	✓ ³ Messungen Beton, keine Variation geplant. (Möglich: Massenvariation)	✓ ¹ Betonschwelle als flexibler Körper modelliert (Hohlagensimulation). Keine Variation der Materialien.	✓ ¹ Vergleich Übertragungsverhalten Beton/Holz/Stahl.
Besohlung	✓ ³ Besohlung wird als separate Feder im Modell berücksichtigt.	✓ ² Besohlung als separate Feder im Modell. <u>Entscheidung der Umsetzung, sobald „Formationsrichtung“ bekannt.</u>	✗ ³ Keine Relevanz
Schotterbett	✓ ³ Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	✓ ² Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	✗ ³ Keine Relevanz
Untergrund			
Spurweite/ Einbauneigung ¹	✓ Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm	✓ Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm	✓ Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm
Gleislage ³	✓ Variation Gleislage wird durchgeführt. GL zu definieren.	✓ Variation (gut, „ruppig“) auf Basis GL möglich.	✗ Vermutlich keine Relevanz

✓ Vorgesehen
✓ Variierbar, nicht geplant
✗ Variierbar, kein Einfluss (erwartet)
✗ Nicht variierbar
Priorität: ¹ ² ³

Figure 2: Choix des variations de paramètre dans les modèles de simulation par Virtual Vehicle et P4 ; état au 09.12.2024.

Dans le cadre du modèle de sous-sol, la vérification de la stabilité dynamique de la voie ferrée a été étudiée en 2024. Si cette stabilité ne peut pas être garantie par calcul, cela signifie que des tassements cumulatifs du sol ne peuvent pas être exclus. A long terme, cela peut conduire à un besoin accru en maintenance et éventuellement à une réduction de la durée de vie. Sur la base du « modèle de sous-sol 2D par éléments finis » élaboré par Baugrund Dresden, de premières conclusions ont déjà pu être tirées cette année :

- De manière générale, il peut être démontré qu'une stabilité dynamique à long terme ne peut pas être garantie en présence de couches profondes molles sans mesures de renforcement en profondeur (colonnes ballastées, pieux en béton coulés sur place, méthode FMI, etc.). L'analyse du rapport coût-bénéfice de telles mesures doit être effectuée au cas par cas, en fonction du projet.
- Une réduction de la sollicitation et une diminution de la vitesse de circulation des trains réduisent les déformations de cisaillements apparaissant dans le sous-sol. Dans le cas d'un sous-sol de mauvaise qualité, cet effet apparait encore plus distinctement.
- Le sous-sol de mauvaise qualité à disposition présente, malgré la pose d'une couche de protection des sols (PSS), un dépassement de la limite de déformation de cisaillement dans les 3 premiers mètres sous la face inférieure des traverses et ce, dès une vitesse de circulation de 50 km/h. Il peut toutefois être démontré que la PSS permet une réduction significative des déformations de cisaillement.

Le module 2 « Mise en place d'un modèle 3D-FE » prévu pour 2025 doit permettre d'intégrer un calcul dynamique du passage d'un train sous la forme d'une charge mobile correspondant à un essieu monté. Ainsi, une variation des paramètres des composants de la superstructure peut être envisagée afin de déterminer si, et lesquels, de ces composants peuvent réduire la répartition des contraintes – et par conséquent les sollicitations sur la couche de base.

Abréviations

Abr.	Abréviation
FBI	Flexible Body Interface
FEM	Finite Element Modell/Methode (modèle en éléments finis)
FMI	Fräss-Misch-Injektion (méthode d'injection FMI (fraisage, mélange, injection))
LCC	Life Cycle Costs (coûts du cycle de vie)
MGB	Matterhorn-Gotthard-Bahn
MKS	Mehrkörper-Simulation (simulation à corps multiples)
PSS	Planumsschutzschicht (couche de protection de la plate-forme)
SID	Standard Input Data
SKK	Schienenkopfkonditionierung (conditionnement du champignon du rail)
tpf	Transports publics fribourgeois
VÖV	Verband öffentlicher Verkehr (Union des Transports Publics, UTP)

Glossaire

Mot	Description
AC Rail	Couche d'étanchéité bitumineuse entre l'infrastructure et la superstructure (couche de ballast)