

Format de citation : Marschnig Stefan, Ehrhart Ursula, Knabl Dieter, Gerhold Florian, RAILplus / Technische Universität Graz: *Anwendbarkeit und Empfehlungen aus Ergebnissen zur Einteilung der Standardelemente Meterspur*. Technischer Bericht, **RAILPlusSF-00049**, 20. Nov. 2024

Liste des changements

Version	Date	Responsable	Description
0.1	15.10.2024	S.Marschnig	Premier brouillon
0.2	11.11.2024	J. Buckner	Brouillon modifié
0.3	20.11.2024	J. Buckner	Rapport édité et finalisé
0.4	03.02.2024	K. Fischer	Rédaction du Management Summary
1.0	28.02.2025	M. Siegen	Modification finale et approbation par le chef de projet
1.0	19.09.2025	K. Fischer	Premier brouillon de la traduction
1.0	28.10.2025	RAILplus	Rapport approuvé

Management Summary

But

Les éléments standards doivent être vus comme un outil intermédiaire permettant une meilleure gestion globale de l'asset « voie ferrée » qui tombe sous la responsabilité du gestionnaire de l'infrastructure.

Il s'agit d'une segmentation du réseau ferrée en éléments montrant, en moyenne, les mêmes besoins en cycles d'entretien et ayant une durée de vie équivalente. Pour ce faire, plusieurs caractéristiques cruciales ont été définies comme ayant un impact significatif sur l'évolution de l'usure de chaque élément standard, comme la charge de trafic, le rayon de courbe, le type de traverse, la nuance de l'acier, le profil du rail, le profil en long du tracé, le type d'infrastructure et le type d'évacuation des eaux de la voie. Les quatre derniers paramètres cités ont été, pour l'heure, écartés de cette étude, par manque de données disponibles.

La segmentation d'un réseau en éléments standards, que ce soit dans un logiciel de gestion des assets ou de maintenance (par exemple, IRISYS, GMAO, etc.) permet ensuite le calcul de différents scénarios permettant l'optimisation de la gestion de l'infrastructure, d'un point de vue économique et des ressources engagées.

Au niveau de la maintenance de la voie ferrée, il serait ainsi possible de mettre en place des stratégies plus efficaces de maintenance de la qualité de la voie ferrée, en accord avec l'art. 5, lettre c (OCPF) en ciblant plus finement les zones nécessitant un entretien (notamment, meulage, bourrage et changement de rails). De plus, des prédictions précises des besoins en entretiens et renouvellements pourraient être faites de manière plus uniforme, transparente et benchmarkable avec une méthodologie commune à toutes les compagnies de voie métrique.

Lorsqu'on combine les éléments standards avec les coûts d'entretien, ils représentent les coûts de la voie et constituent ainsi la base pour d'autres calculs de rentabilité, par exemple la comparaison de différentes structures de voie, ou encore la détermination du facteur d'usure¹ de la voie métrique.

Méthodes

Pour définir des éléments standards, il est nécessaire de s'appuyer sur des données historiques. Ces données doivent, d'une part, décrire le type de superstructure et d'infrastructure des réseaux étudiés, et d'autre part, fournir un résumé des mesures de maintenance déjà réalisées sur ces réseaux. Les éléments standards qui en résultent représentent un instantané, fondé à la fois sur ces données et sur l'expérience des différentes compagnies ferroviaires. Toutefois, ils ne sont pas figés : ils sont soumis à une évolution continue — qu'il s'agisse des avancées des connaissances, de l'apparition de nouveaux produits sur le marché, ou de l'adaptation des stratégies dans le domaine de la construction et de la maintenance des voies.

Ce rapport décrit, de manière scientifique, la méthode utilisée pour définir les premiers éléments standards des chemins de fer à voie métrique en Suisse. L'élaboration de ces éléments standards repose sur les retours d'expérience et l'analyse des données d'infrastructure et de maintenance de cinq compagnies participantes (AB, MGB, RBS, RhB et ZB).

Résultats

Par la combinaison des quatre catégories considérées (groupe de charge, rayon de courbe, type de traverse et qualité de l'acier des rails), et pour les conditions existantes, 90 éléments standards ont été définis. Ceux-ci permettent une catégorisation standardisée de l'ensemble des sections de ligne du réseau métrique suisse.

¹ Le facteur d'usure décrit l'usure de l'infrastructure ferroviaire causée par les véhicules. Il sert à évaluer quantitativement l'usure exercée par différents types de véhicules sur la voie. Il peut, par exemple, être utilisé pour une tarification des sillons basée sur le principe du pollueur-payeur ou pour optimiser l'acquisition de matériel roulant en vue de minimiser l'usure de l'infrastructure.

Lors de la comparaison des résultats en termes de durée de vie et de besoins en maintenance entre les différents éléments standards, les points suivants méritent une attention particulière. Il ne s'agit ni de recommandations ni d'une classification qualitative des éléments standards, mais simplement d'une analyse de l'état actuel du réseau ferroviaire suisse à voie métrique, basée sur la considération systématique des éléments standards :

- Les évaluations et discussions montrent que les voies équipées de traverses en béton et en bois dans des rayons $R \leq 300$ m présentent des durées de vie et des intervalles de maintenance similaires. Ce résultat contredit l'attente selon laquelle les traverses en béton offriraient une durée de vie supérieure à celle des traverses en bois. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet écart, notamment le fait que l'utilisation de traverses en béton sur les chemins de fer à voie métrique suisses est relativement récente, et que l'historique de données pour ces sections ne couvre pas toute leur durée d'exploitation. Cela ne constitue toutefois pas une évaluation de la qualité des traverses en béton par rapport à celles en bois.
- Les traverses en acier avec des rayons $R \leq 300$ m présentent des intervalles de maintenance légèrement plus longs que les autres types de traverses et une durée de vie nettement plus élevée, de 60 à 80 ans.
- Pour des rayons supérieurs à 300 m, les durées de vie augmentent de manière différenciée selon le type de traverse. Dans ces cas, les éléments standards montrent une durée de vie plus élevée pour les traverses en béton par rapport aux traverses en bois.
- Pour les éléments standards avec des rayons au-dessus de 300 m, les durées de vie et les intervalles de maintenance liés au bourrage (sans meulage ni remplacement des rails) restent constants entre les deux classes de rayon et peuvent être considérés comme des voies en alignement.
- Des charges accrues entraînent une légère réduction des intervalles de maintenance, sans affecter la durée de vie. Cela contredit l'attente selon laquelle une augmentation de la charge réduirait également la durée de vie. Une explication possible est que seules quelques compagnies à voie métrique présentent des charges élevées (N1/E1) — principalement les données de RBS et des RhB pour les traverses en bois et en béton — et que l'expérience ainsi que l'historique de données pour ces conditions restent limités.
- Dans les sections équipées de rails en acier R350HT, les rails ont été remplacés et meulés environ deux fois moins souvent que pour la qualité d'acier standard R260. Pour la qualité R400HT, aucune conclusion spécifique n'a pu être tirée en raison du manque de données et d'expérience.
- Les cycles historiques de bourrage montrent des similitudes entre les compagnies, bien que les discussions aient révélé des stratégies de bourrage parfois très différentes.
- Sur les chemins de fer à voie métrique, l'usure ondulatoire constitue la principale cause menant au meulage des rails.
- Les stratégies de meulage et de remplacement des rails diffèrent d'une compagnie à l'autre. Les raisons de ces divergences méritent une analyse approfondie, mais une première tendance indique un manque de recommandations claires dans ce domaine. L'intégration des éléments standards dans les modèles d'aide à la décision représente ainsi un soutien essentiel, bien que cela dépasse le cadre de ce rapport.

Recommandations

Aucune recommandation concrète en matière de stratégies de maintenance ou de renouvellement ne peut être formulée uniquement sur la base des éléments standards car les opérations de maintenance devraient idéalement être planifiées en fonction de l'état de la voie (sur la base de mesures). Toutefois, les recommandations suivantes peuvent être dégagées, en ce qui concerne les éléments standards à proprement parler :

- Attirer l'attention des compagnies sur l'existence des éléments standards pour le réseau à voie métrique.
- Segmenter le réseau en éléments standards constitue une première étape nécessaire vers des stratégies de maintenance et de renouvellement intégrées, précises, comparables et économiquement optimisées.
- Intégrer cette segmentation dans des outils tels qu'IRISSYS ou les systèmes de GMAO peut contribuer à mieux comprendre l'état du réseau, à prévoir plus précisément son évolution future et à prioriser plus efficacement les investissements, en réunissant différentes sources d'information. Cela nécessite toutefois un travail de développement. Le calcul de scénarios économiques futurs par variation de l'élément standard d'un tronçon est facilité par l'utilisation d'éléments standards moyens.
- Encourager les compagnies à enregistrer et stocker systématiquement les données de tracé, les types de superstructure et les fréquences de maintenance. Une collaboration commune est nécessaire afin d'améliorer l'interopérabilité des données et de permettre une mise à jour plus simple (idéalement automatique) des éléments standards. Cela devrait également tenir compte des évolutions stratégiques ou de nouveaux produits encore peu utilisés, tels que les traverses avec semelles.
- L'utilisation systématique des éléments standards permettrait également de faciliter l'élaboration du rapport sur l'état du réseau (RTE 29900, partie voie, voir A2) pour les entreprises, ainsi qu'une lecture plus fluide et une meilleure comparaison entre les compagnies.

Prochaines étapes

En raison du manque de données et d'expérience, il n'a pas été possible de prendre en compte l'influence des traverses avec semelles ni de la qualité d'acier R400HT dans les éléments standards. Les hypothèses concernant ces matériaux devraient être étudiées dans les plus brefs délais dans le cadre de P4 et mises à disposition. Par ailleurs, les éléments standards présentent un potentiel d'extension afin d'intégrer les effets de fortes pentes longitudinales, de différents types de sous-structures et de systèmes de drainage fonctionnels ou non fonctionnels.

De manière générale, les éléments standards doivent être mis à jour régulièrement. De plus, sur la base des expériences et enseignements issus de la maîtrise de système, il est à prévoir que les stratégies de maintenance et d'investissement pour la voie puissent évoluer, ce qui pourrait nécessiter une actualisation des éléments standards.

Table des matières

1	Situation initiale.....	8
2	Méthode	9
2.1	Eléments standards pour la voie : paramètres, valeur des paramètres et entretien des voies	9
2.1.1	<i>Paramètres et valeurs des paramètres.....</i>	<i>9</i>
2.1.2	<i>Travaux sur la voie</i>	<i>11</i>
2.2	Cycles de travail.....	12
2.2.1	<i>Traitement des données.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Interprétation des données et des diagrammes.....</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Discussion et détermination des cycles de travail.....</i>	<i>17</i>
3	Résultats	19
4	Enseignements et recommandations.....	22
4.1	Comparaison des cycles de travaux.....	22
4.2	Conservation des données.....	22
4.3	Extension des éléments standards et leurs possibilités d'application	22
4.3.1	<i>Mise en place des éléments standards.....</i>	<i>22</i>
4.3.2	<i>Extension des éléments standards.....</i>	<i>23</i>
4.3.3	<i>Utilisation</i>	<i>23</i>
4.3.4	<i>Utilisation dans le modèle d'usure pour la voie métrique</i>	<i>24</i>
5	Bibliographie	25
5.1	Références.....	25
5.2	Figures.....	25
5.3	Tableaux	25
6	Annexe	26

Abréviations

Abr.	Abréviation
AB	Appenzeller Bahnen AG
LN	Déclivité (en allemand, Längsneigung)
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn AG
MOB	Compagnie de chemin de fer Montreux Oberland Bernois SA
ND	Durée d'utilisation (en allemand, Nutzungsdauer)
QVW	Résistance au ripage latérale (en allemand, Querverschiebewiderstand)
R	Rayon
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn AG
RhB	Chemins de fer rhétiques SA
StdE	Elément standard
tpf	Transports publics fribourgeois Holding (TPF) SA
ZB	Zentralbahn AG

1 Situation initiale

Dans le cadre et parallèlement au projet de la mise en place et de l'application d'un modèle d'usure pour la voie métrique, des éléments standards pour la voie ferrée ont été définis. Les éléments standards seront eux-mêmes utilisés pour la calibration des coûts du modèle d'usure. Les principes de base des éléments standards ont été publiés dans [1]. Ils peuvent aussi être utilisés pour la dérivation de stratégies d'investissement et d'entretien. Les travaux résumés dans ce rapport peuvent donc aussi servir de base aux deux stratégies précitées, bien que ce ne soit pas le but recherché ici.

Il n'est pas exclu que des expressions différentes des conditions marginales d'influence mènent à des usures différentes et donc à des fréquences d'entretien et, finalement, à des durées d'utilisation différentes. Ainsi, les conditions cadres (paramètres) et leurs influences peuvent être discutées en profondeur et définies grâce à la mise en place d'éléments standards.

Au niveau de la voie métrique, les domaines de courbure sont naturellement différents de ceux de la voie normale. Les rayons pour lesquels l'usure latérale du rail extérieur, respectivement, à partir desquels l'usure ondulatoire devient dominante seront intensivement discutés. Les profils longitudinaux sont également singuliers chez les chemins de fer à voie métrique : des pentes de 60‰ et plus y sont aussi possibles en adhésion. Les pentes encore plus fortes et avec crémaillères ne sont pas considérées ici, bien que ces conditions pourraient et devraient être intéressantes pour les compagnies à voie métrique concernées.

2 Méthode

Dans ce chapitre, les principes fondamentaux de la construction et de la mise en place des paramètres des éléments standards pour la voie sont expliqués (chapitre 2.1) (les appareils de voie ne sont pas considérés pour l'instant). Ensuite, le chapitre 2.2 présente les données de base nécessaires et leur traitement. Finalement, les cycles d'entretien définis seront discutés.

En préambule, il faut préciser que les éléments standards proposés se basent principalement sur les données et les expériences des cinq compagnies suivantes et uniquement sur des tronçons de voie métrique à adhérence :

- AB – Appenzeller Bahnen AG
- MGB – Matterhorn Gotthard Bahn AG
- RBS – Regionalverkehr Bern-Solothurn AG
- RhB – Rhätische Bahn AG
- ZB – Zentralbahn AG

Ces compagnies ont pu mettre à disposition, dans le cadre du projet, les données nécessaires pour l'élaboration des éléments standards et ont partagé leurs expériences dans diverses discussions.

En plus, l'expérience des compagnies suivantes a été prise en compte :

- MOB – Montreux Berner Oberland Bahn AG
- tpf – Transports publics fribourgeois Holding (TPF) SA

2.1 Éléments standards pour la voie : paramètres, valeur des paramètres et entretien des voies

Globalement, un élément standard décrit le cycle de vie moyen d'une installation. Dans le présent projet, des éléments standards pour la voie ferrée ont été développés. Les éléments standards pour la voie ferrée indiquent les fréquences des travaux d'entretien et les durées d'utilisation moyennes et ce, en fonction du type de superstructure, du rayon et de la charge de trafic.

2.1.1 Paramètres et valeurs des paramètres

Lors de la première étape de développement des éléments standards pour la voie métrique, les paramètres et leurs valeurs possibles ont été discutés avec les compagnies. Partant, ce sont les paramètres et les valeurs qui exercent une influence significative sur les activités d'entretien, leur fréquence et la durée d'utilisation d'une voie qui ont été retenus. Les huit paramètres suivants ont été identifiés comme déterminants pour la description du cycle de vie moyen d'une voie :

- Groupe de charge de trafic [code A]
- Pente longitudinale [code B]
- Rayon de courbe [code C]
- Type de traverse [code D]
- Profil du rail [code E]
- Nuance d'acier du rail [code F]
- Infrastructure [code G]
- Evacuation de l'eau [code H]

L'université technique de Graz (TU Graz) identifie les éléments standards via un code à 8 chiffres : « ABCDEFGH » où, pour chaque position A à H des paramètres, une numérotation des valeurs définies permet d'identifier le type de voie. Les paramètres et leurs valeurs possibles sont résumés à la Figure 1.

Groupe de charge	A	Pente (LN)	B	Rayon	C	Traverses	D
N1/E1	1	$LN \leq 40\text{‰}$	1	$R > 600\text{m}$	1	Béton	1
N2/E2	2	$40\text{‰} < LN \leq 60\text{‰}$	2	$600\text{m} \geq R > 300\text{m}$	2	Béton USP	2
N3/E3 & N4/E4	3	$60\text{‰} < LN$	3	$300\text{m} \geq R > 120\text{m}$	3	Bois	3
				$120\text{m} \geq R > 80\text{m}$	4	Acier	4
				$R \leq 80\text{m}$	5	Acier (traverse Y)	5
						Voie sans ballast (train)	6
						Voie sans ballast (tram)	7

Profil de rail	E	Nuance d'acier	F	Infrastructure	G	Evacuation de l'eau	H
54 E2	1	R260	1	bon/suffisant	1	bon/fonctionne	1
46 E1 / 49 E1	2	R350HT	2	rocher	2	mauvais	2
Ri	3	R400HT	3	PSS	3		
				AC-Rail	4		

Figure 1 : Eléments standards pour la voie avec les paramètres et leurs valeurs possibles. Note : les éléments grisés ne sont pas intégrés dans les cycles d'entretien dû à un manque de données ou d'expériences.

La répartition des valeurs des paramètres se base sur des réflexions concernant la durée d'utilisation des voies, les activités d'entretien, les fréquences d'entretien et les mécanismes d'usure. Ces valeurs ont été intensivement discutées avec les compagnies. Les huit paramètres cités et leurs valeurs ont été intégrés dans la description des éléments standards, étant autant de facteurs influençant significativement le cycle de vie d'une voie. Dans ce projet, certaines valeurs de paramètre ont été exclues (éléments grisés à la Figure 1). Ces valeurs ne pouvaient pas être clairement identifiées sur la base des données des tronçons étudiés ou alors, des informations/expériences à propos des travaux d'entretien effectués sur ces voies n'ont pas pu être obtenues dans le cadre du projet. Le parachèvement des éléments standards est une tâche qui incombera ensuite à P4, respectivement au centre de compétence pour la voie ferrée. La priorité est placée sur l'influence des traverses en béton avec semelles.

La répartition des **rayons de courbe** et la définition de leurs rayons limites peuvent être justifiées par les réflexions suivantes :

- Durant les discussions, les représentants des compagnies se sont accordés sur le fait que de l'usure ondulatoire apparaît dans des tronçons en courbe avec des rayons compris entre 80 m et 300 m².
 - En règle générale, il a été constaté que l'usure ondulatoire apparaît plus souvent dans la classe de rayons $80\text{ m} < R \leq 120\text{ m}$. En plus, des exigences spéciales au niveau de la rigidité du cadre et de la résistance au ripage latérale (en allemand, *Querverschiebewiderstand*, QVW) sont données à partir d'un rayon de $R \leq 120\text{ m}$.
 - Dans la classe de rayons $120\text{ m} < R \leq 300\text{ m}$, l'usure ondulatoire apparaît partiellement et il n'y a aucune exigence particulière au niveau de la rigidité de l'infrastructure à partir d'un rayon de $R > 120\text{ m}$.
- Lors des discussions, il a pu être défini que les tronçons de voie en courbe ayant un rayon de $R > 600\text{ m}$ se comportent comme des tronçons de voie en alignement.
- La classe de rayon $300\text{ m} < R \leq 600\text{ m}$ a été définie comme un cas intermédiaire dans lequel de la fatigue de contact de roulement (RCF) peut apparaître.
- Les courbes avec un rayon $R \leq 80\text{ m}$ sont nommées « courbes très serrées ». Une inscription en courbe libre ne peut plus être garantie dans ces courbes.

La classification de la **déclivité** se base sur les considérations techniques suivantes :

² Remarque : Il va de soi que les limites des plages de rayons ne peuvent pas être définies de manière aussi stricte qu'elles l'ont été. Néanmoins, le comportement moyen et majoritaire des voies est décrit sur la base de cette classification.

- Une déclivité $LN \leq 40\text{‰}$ est définie, pour les chemins de fer à voie métrique, comme étant le cas « normal ».
- Une déclivité $40\text{‰} < LN \leq 60\text{‰}$ se présente comme un cas où les véhicules mus par adhésion doivent démontrer une capacité de freinage supplémentaire.
- Une déclivité $LN > 60\text{‰}$ est considérée comme « très forte » et pour laquelle la traction doit être surveillée. De plus, les véhicules circulant en adhésion sur ces déclivités doivent être équipés d'un deuxième système de freinage autonome.

Les valeurs des paramètres « **groupe de charge** », « **type de traverse** », « **profil de rail** » et « **nuance d'acier** » peuvent être trouvées pour chaque tronçon de voie, à partir des données de superstructure.

Les paramètres « **infrastructure** » et « **évacuation de l'eau** » sont des grandeurs qui ont une influence sur la durée d'utilisation de la voie et sur la fréquence des travaux d'entretien.

Un élément standard est donc composé des huit paramètres précités, avec leurs valeurs spécifiques. A la Figure 2, un élément standard est exemplifié pour une voie avec des traverses en béton, le groupe de charge <15'000 Bt/Jour (N3/E3 & N4/E4), une déclivité de $LN \leq 40\text{‰}$, un rayon de courbe $120\text{ m} < R \leq 300\text{ m}$, un profil de rail 46E1, une nuance d'acier R260, une infrastructure de bonne qualité et un bon drainage. Cet élément standard peut donc être identifié avec le code « 31312111 ».

Groupe de charge	Rayon de courbe	31312111			
N3/E3 & N4/E4	$300\text{m} \geq R > 120\text{m}$				
Pente (LN)	Traverse	Profil de rail	Nuance d'acier	Infrastructure	Evac. de l'eau
$LN \leq 40\text{‰}$	Béton	46 E1 / 49 E1	R260	gut/ausreichend	gut/funktioniert

Figure 2: Élément standard 31312111

2.1.2 Travaux sur la voie

Les travaux sur la voie pris en compte dans ce projet pour chaque élément standard sont :

- bourrage,
- meulage du rail,
- changement de rails, des deux côtés et
- petit entretien.

Par petit entretien, on entend les travaux listés dans le Tableau 1. Ceux-ci sont partiellement dépendant du rayon et/ou du type de traverse.

Tableau 1: Travaux d'entretien entrant dans l'expression "petit entretien"

Travail	Type de traverse	Rayon
Entretien du perçage de la traverse/Résinification des trous de tirefonds	Bois	Alignement et courbe
Changement de selle à nervure	Bois	Courbe
Changement de traverse (unique)	Bois	Alignement et courbe
Changement de coupon/ Changement de rail court: défaut de rail, cassure de rail (Squats)	Tous	Alignement et courbe
Bourrage de défaut isolé/Petit entretien avec machine/Bourrage à la main (gauche, passage à niveau, lien pont, joint isolé)	Tous	Alignement et courbe
Entretien de joint isolé	Tous	Alignement et courbe
Meulage à la main	Tous	Alignement et courbe
Assainissement des remontées de boue	Tous	Alignement et courbe
Remplacement et serrage des attaches	Tous	Alignement et courbe
Changement de semelle sous-rail* - traverse en béton - changement de semelle sous-rail avec traverse en bois car elles perdent de la longueur avec le temps	Béton (bois)	(N'est en général pas fait)

En se basant sur les discussions menées avec les responsables de la voie et sur l'évaluation des données (données d'entretien pour le bourrage, le meulage et le changement de rail), les durées d'utilisation et les cycles d'entretien ont pu être définis pour chaque élément standard. La Figure 3 montre un exemple de travaux et de cycles de travail pour une voie avec traverses en béton, une classe de charge 3 (<15'000 Bt/Jour) et une classe de rayon 120 m < R ≤ 300 m.

Groupe de charge	Rayon	31312111										
N3/E3 & N4/E4	300m ≥ R > 120m											
Pente	Traverse	Profil de rail	Nuance d'acier				Infrastructure			Evac. eau		
LN ≤ 40‰	Beton	46 E1 / 49 E1	R260				Bon/suffisant			Bon/fonctionne		
Travaux	Durée d'util. (DU)	30.0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Neulage (Schotteroberbau)		0.0										
Bourrer	Tous les x ans	5.0							1			
Meulage des rails	# durant DU	5.0	1							1		
Remplacement des rails	# durant DU	0.0										
Track Work X	# durant DU	0.0										
Track Work Y	# durant DU	0.0										
Track Work Z	# durant DU	0.0										
Petites réparations	# durant DU	30	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

...

...

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
		1					1					1				1			
				1						1						1			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

Figure 3: Élément standard 31312111: travaux et cycles de travail

L'élément standard représenté a une durée d'utilisation de 30 ans. Les facteurs d'influence sont ici le groupe de charge, le rayon de courbe et le type de traverse. Sur la Figure 3, on peut voir que la voie avec traverses en béton, une charge faible et la classe de rayon 120 m < R ≤ 300 m doit être bourrée pour la première fois 6 ans après l'installation et présente, sur toute sa durée de vie, un cycle de bourrage de 6-6-5-5-4. Le cycle de meulage suit un intervalle 7-7-6-6, bien qu'un meulage soit fait sur le rail neuf. Le petit entretien est effectué chaque année puisque, d'un côté il résume plusieurs travaux (voir Tableau 1) et, d'un autre côté, ces activités sont plus fréquentes. De plus, l'intervalle entre ces petits entretiens diminue, en règle générale, avec la durée d'utilisation.

Le chapitre 2.2.3 présente les réflexions techniques concernant les fréquences d'entretien lors de la mise en place des éléments standards. Les résultats des éléments standards proposés peuvent être consultés au chapitre 3.

En plus du bourrage, du meulage, du changement de rail et du petit entretien, de la place a été laissée pour pouvoir intégrer de futurs travaux d'entretien de la voie (« Track Work X », « Track Work Y », « Track Work Z »). Cela peut inclure, par exemple, le nettoyage du ballast, le changement de semelles sous-rail, le bourrage de défauts locaux, l'entretien des joints de rail, le changement du rail extérieur, etc.

Pour l'utilisation des éléments standards dans un modèle d'usure, les coûts d'installation ne sont pas pertinents ; c'est pourquoi, au temps 0, aucune entrée n'apparaît dans les éléments standards.

2.2 Cycles de travail

Les cycles de travail bourrage, meulage des rails et remplacement des rails ont été discutés et établis de manière interentreprise. Le chapitre suivant décrit le processus général de préparation des données pour ces travaux. Il est important de noter que, selon le réseau ferroviaire, les données ont été fournies sous diverses formes, ce qui nécessite parfois de sauter ou d'adapter certaines étapes. Les données utilisées provenaient des entreprises suivantes :

- **MGB.** Toutes les informations ont été fournies par tronçon de voie. Le traitement des données suit donc la procédure standard. La séparation des données en fonction des différentes lignes permet une composition plus simple des profils³.
- **RhB.** Les informations des RhB sont déjà sous la forme de sections de 25 cm. La procédure est donc simplifiée puisque seuls le type de traverse, la forme du rail, la nuance d'acier, la charge de trafic, le rayon et les travaux d'entretien doivent être renseignés.
- **AB.** Toutes les informations concernant la superstructure ont déjà été livrées sous la forme de tronçons homogènes, ce qui supprime le recoupement de celles-ci après la création des profils.
- **RBS.** Toutes les informations sont livrées sous la forme de tronçons. Ceux-ci sont partiellement déjà coupés et donc, la procédure de traitement se rapproche de la procédure standard.
- **ZB.** Les informations sont toutes disponibles sous forme de tronçons distincts, c'est pourquoi le processus ressemble à celui décrit de manière générale. Malheureusement, le jeu de données n'est pas complet et présente certaines lacunes.
- **TPF.** Des tronçons déjà assemblés sont disponibles, mais certaines informations, comme la géométrie de la voie, doivent encore être attribuées après la création des sections.
- **MOB.** Le MOB n'a malheureusement pas pu fournir de données suffisantes. Toutefois, l'expérience du MOB a été sollicitée afin de confirmer et compléter les données provenant des autres réseaux.

Les compagnies ont pu fournir leurs données d'entretien à des degrés divers, voir Table 2. Ce qui ressort particulièrement, c'est le long historique des données d'entretien des MGB.

Tableau 2: Historique des données d'entretien

<i>Compagnie</i>	<i>Bourrage de</i>	<i>Bourrage à</i>	<i>Meulage de</i>	<i>Meulage à</i>
MGB	1990	2023	2004	2023
RhB	2014	2023	2014	2022
AB	2009	2023	2009	2023
RBS	2016	2023	2016	2023
ZB	2012	2023	2012	2023
TPF	2012	2023	2012	2023

En raison des différentes méthodes d'enregistrement décrites ci-dessus pour chaque réseau, les périodes d'analyse varient également. Dans certains cas, après la fusion de plusieurs compagnies en une nouvelle entité, les anciennes données ne sont plus reproductibles.

2.2.1 Traitement des données

Tout d'abord, les données disponibles sont généralement discrétisées, car elles sont le plus souvent fournies sous forme de sections homogènes. Pour cela, un profil est créé tous les 25 cm dans chaque section. Ceux-ci se situent toujours aux mêmes points à l'intérieur d'un mètre, c'est-à-dire X.00, X.25, X.50 et X.75. Cette étape a été réalisée pour toutes les sources d'information relatives à la superstructure. Les profils obtenus sont ensuite fusionnés, c'est-à-dire que les différentes informations sont regroupées sur la base de la ligne, du kilométrage et de la désignation de la voie.

Afin d'éviter le problème de doublons dû à des affectations non univoques, toutes les zones comportant des erreurs de kilométrage ont été exclues de l'analyse. De même, toutes les sections avec crémaillère

³ N.d.T : Le terme « profil » décrit ici chaque tronçon de voie défini lors de la discrétisation des réseaux telle que décrite au chapitre 2.2.1, soit tous les 25 cm et toujours aux mêmes points à l'intérieur d'un mètre X.00, X.25, X.50 et X.75. « Profil » est le terme choisi ici pour tenter de traduire au mieux le terme « *Querschnitt* » tel que décrit dans la version allemande du document.

ont été retirées du jeu de données. Ensuite, chaque profil se voit attribuer, selon ses conditions, l'élément standard correspondant avec le code approprié. À ce stade, un filtrage supplémentaire est effectué : tous les profils ne possédant pas d'élément standard valide sont exclus de l'étude.

Pour l'attribution des interventions des machines, chaque profil est comparé à chaque intervention afin de vérifier s'il se situe dans la zone d'intervention. Le cas échéant, celui-ci est enregistré avec la date correspondante. Cette procédure a été appliquée à toutes les opérations de maintenance disponibles, telles que le meulage/fraisage des rails, le bourrage/compactage, le nettoyage du ballast et le remplacement des rails.

Avec les informations désormais consolidées, des diagrammes sont élaborés pour les éléments standards présents dans les données. Pour l'analyse de la durée d'utilisation (analyse de survivabilité), l'âge actuel de tous les profils d'un élément standard est représenté sous forme d'un histogramme. Pour les cycles de travail des différentes interventions mécaniques, deux diagrammes ont été produits. Le premier montre, sous forme d'un histogramme, le nombre de profils présents dans les données pour un certain âge de l'élément standard. Le second montre la proportion relative des profils d'un élément standard ayant fait l'objet d'une intervention à un âge donné.

2.2.2 Interprétation des données et des diagrammes

L'interprétation des données de superstructure et de l'historique de maintenance permet d'extraire deux informations essentielles pour chaque élément standard : (1) sa durée de vie totale ; (2) la fréquence de chaque intervention de maintenance (bourrage, meulage, remplacement de rails) au cours de sa durée de vie (nombre par an). À titre d'exemple, le processus d'interprétation des données est présenté ci-dessous pour l'intervention de maintenance « bourrage » appliquée à l'élément standard 3111XX11 (charge : N3/E3 & N4/E4, pente < 40‰, rayon > 600 m, traverses en béton, tout type de profil et qualité d'acier de rail, infrastructure ou drainage : bon/suffisant/fonctionnel). Ce processus a été réalisé pour chaque intervention de maintenance et chaque élément standard défini dans le cadre de ce projet.

2.2.2.1 Remarque liminaire

Afin d'obtenir des analyses représentatives, les éléments standards pour lesquels moins de 1000 profils (ce qui correspond à une longueur de 250 m) ont été identifiés ont été exclus des évaluations ultérieures. De plus, les périodes durant lesquelles moins de 1000 profils d'un élément standard sont disponibles n'ont pas été prises en compte ni intégrées dans les moyennes.

Pour l'évaluation de la mesure de maintenance « bourrage », le rail (tant le profil que la qualité de l'acier) n'a pas été pris en considération, car ces paramètres n'influencent pas les cycles de maintenance. Ainsi, dans les figures suivantes, la 5^e et la 6^e position du code de l'élément standard sont remplacées par « X ».

2.2.2.2 Durée d'utilisation

La Figure 4 montre à titre d'exemple la répartition des âges des éléments standards de type 3111XX11 dans le réseau d'une compagnie ferroviaire. À partir de ces représentations, des conclusions ont été tirées concernant la durée de vie de chaque élément standard (analyse de survivabilité). Dans cet exemple, on constate qu'aucun profil de voie n'a plus de 25 ans.

Lors de l'interprétation, il est essentiel de distinguer si les sections de voie appartenant à un élément standard concernent :

- a) des tronçons posés pour la première fois il y a 25 ans et toujours en service, ou
- b) des tronçons réellement limités par leur durée d'utilisation.

Dans le cas de la Figure 4, il s'agit de traverses en béton, ce qui indique en grande majorité le cas a). Tous les éléments standards analysés ne relèvent pas du cas a). Cette représentation des données par élément standard permet d'obtenir une vue d'ensemble de la distribution actuelle des âges, incluant la fréquence / longueur des sections correspondant à un élément standard. Sur cette base, une durée de vie moyenne est ensuite estimée à l'aide de l'expertise et de l'expérience.

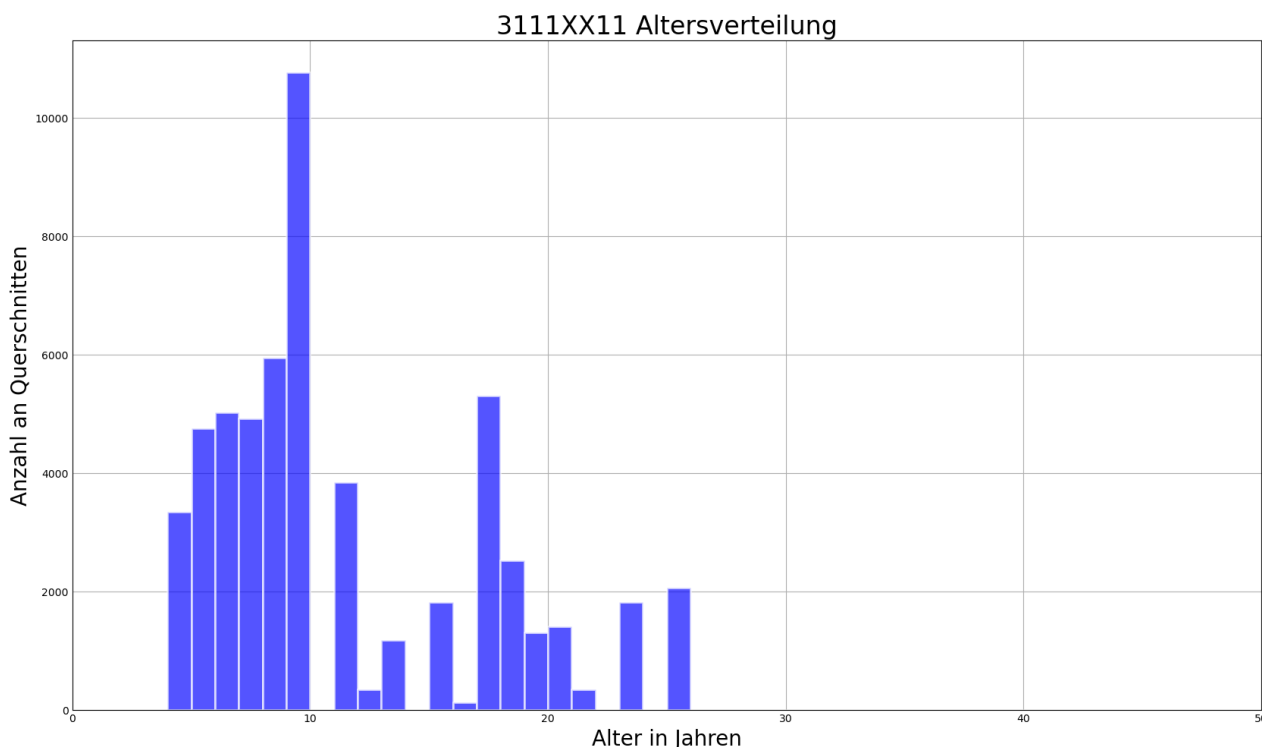


Figure 4: Répartition des âges de l'élément standard 3111XX11 sur le réseau d'une compagnie (comme exemple).

2.2.2.3 Détermination de la fréquence du travail d'entretien « bourrage » pour l'élément standard 3111XX11

La Figure 5 présente le nombre de profils pertinents pour le travail de maintenance « bourrage » sur la période considérée. Chaque barre de la Figure 5 représente le nombre de profils, pour un certain âge de la voie d'un élément standard donné (ici 3111XX11) pour lesquels des informations de maintenance sont disponibles. Par exemple, il existe 33 000 profils âgés de 9 ans pour lesquels des informations de maintenance (ici: bourrage) sont présentes. Ce diagramme est le résultat du croisement entre les données de superstructure et de maintenance, et sert uniquement à valider la représentation des données de la Figure 6.

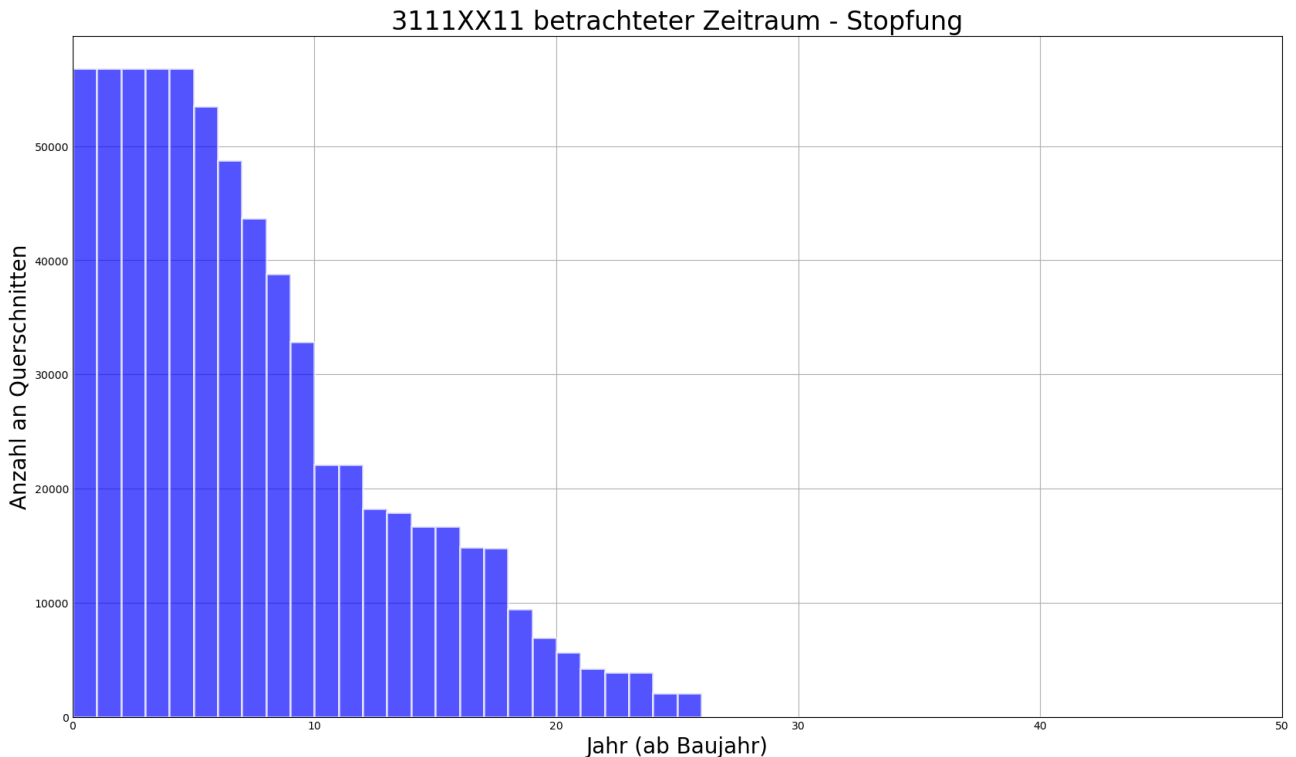


Figure 5: Nombre de profils pour le bourrage sur la durée de vie (élément standard 3111XX11)

À partir de la Figure 6, il est possible de lire les cycles moyens de maintenance (ici, par exemple, pour le bourrage). Seules les barres correspondant aux âges de voie ayant au moins 1000 profils transversaux dans la Figure 5 sont considérées comme pertinentes. La limite de 1000 profils a été définie afin de garantir des analyses représentatives (nombre suffisant de données). Dans l'exemple représenté par la Figure 5, il y a suffisamment de profils transversaux pour tous les âges de voie, de sorte que toutes les barres de la Figure 6 sont pertinentes. Pour l'interprétation de la Figure 6, il convient de noter que la somme de toutes les barres correspond à environ 500 % (valable pour cet exemple). Cela signifie que 500 % des profils transversaux ont été soumis à une opération de bourrage sur la période considérée (25 ans, voir ci-dessus), ce qui équivaut à 5 interventions de bourrage sur 25 ans, soit un intervalle de bourrage de 5 ans ($25 / 5 = 5$).

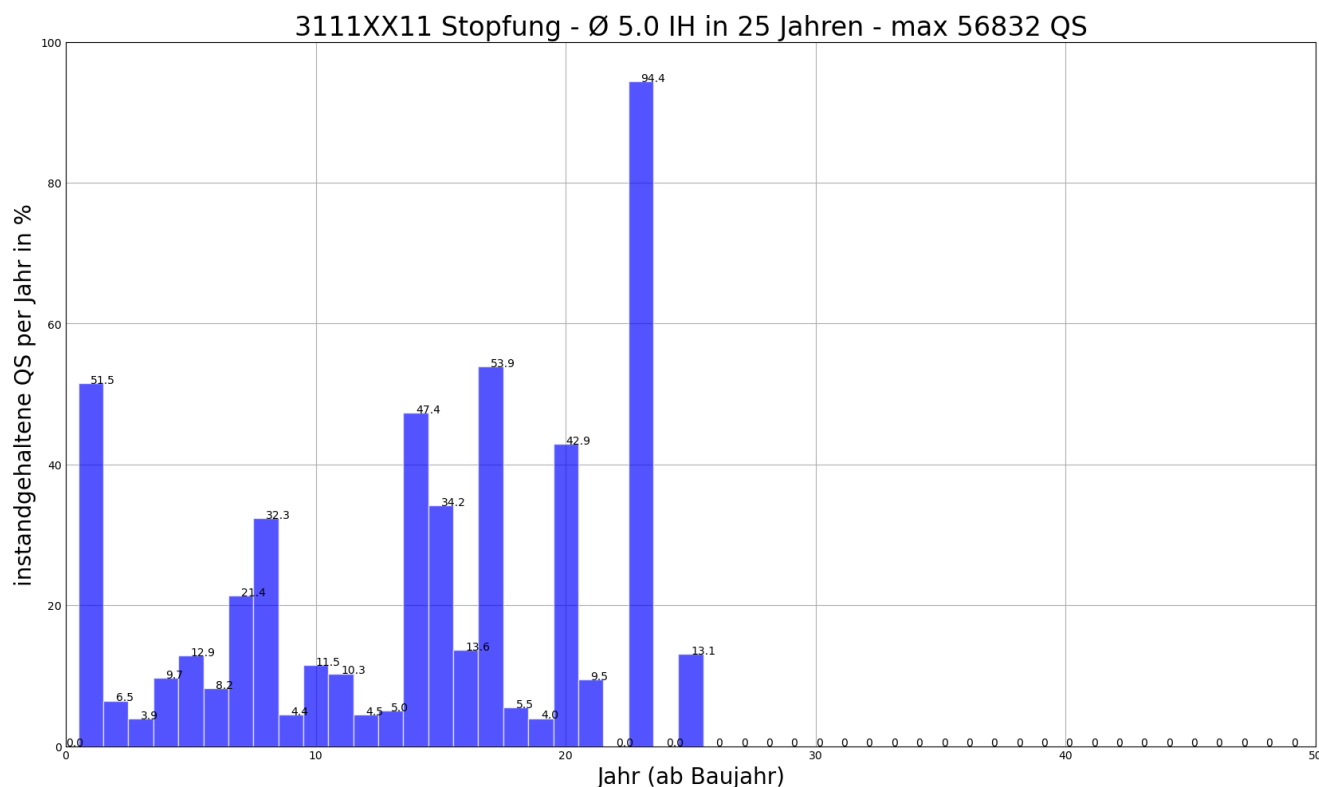


Figure 6: Nombre de profils entretenus par bourrage sur toute la durée de vie, à partir de l'année d'installation (élément standard 3111XX11)

2.2.2.4 Robustesse des données par rapport à la durée d'utilisation et de la fréquence des travaux d'entretien

Le même processus a été appliqué de manière analogue pour la mesure de maintenance du meulage des rails. Pour la mesure de maintenance du remplacement des rails, les analyses n'ont pas pu être réalisées pour toutes les compagnies en raison d'un manque de données. En principe, pour les phases d'utilisation passées des rails, les années d'installation et de remplacement historiques ont été prises en compte, afin de pouvoir représenter un cycle de vie complet du rail. La durée d'utilisation actuelle d'un rail encore en service a été utilisée pour l'analyse de survivabilité.

Comme décrit précédemment, l'évaluation des cycles de maintenance a d'abord été réalisée spécifiquement pour chaque réseau ferroviaire, puis dans une seconde étape — en concertation avec les compagnies — les résultats ont été consolidés en un résultat global, permettant ainsi d'obtenir une moyenne générale.

2.2.3 Discussion et détermination des cycles de travail

Les durées d'utilisation et les cycles de bourrage se situent dans une plage attendue lorsqu'on les compare à l'expérience des chemins de fer à voie normale. Cependant, certaines différences apparaissent et doivent être discutées ici :

La durée de vie des voies à traverses en acier, estimée à 80 ans, est élevée. Les discussions sur l'âge atteignable des traverses en acier ont été intenses, mais ont finalement conduit à un consensus autour de 80 ans. Il a toutefois été souligné que, sur les anciennes traverses en acier, le remplacement des rails peut parfois devenir impossible en raison d'éléments de fixation rouillés ou bloqués. Bien que de tels remplacements ne soient pas observés dans les éléments standards analysés, ils peuvent néanmoins s'avérer nécessaires localement.

L'aspect le plus frappant est la fréquence élevée d'apparition de l'usure ondulatoire (en allemand, *Schlupfwellen*) et les intervalles de meulage extrêmement courts dans les courbes de rayon inférieur à 120 m. Cet effet est déjà très marqué dans les fréquences de meulage observées ici, en comparaison avec les voies à écartement normal. Les RhB rapportent en outre que, dans leur réseau, ces fréquences de meulage pourtant élevées sont parfois insuffisantes et que les efforts de meulage peuvent doubler,

voire tripler. Les rails en acier R400 atténuent certes l'apparition de l'usure ondulatoire, mais nécessitent néanmoins un effort de meulage important. En raison du phénomène de l'usure ondulatoire, le remplacement des rails en courbe serrée est, chez les chemins de fer à voie métrique, majoritairement effectué sur les deux files de rails : sur le rail extérieur à cause de l'usure et des forts enlèvements dus au meulage, sur le rail intérieur à cause de l'usure ondulatoire et des enlèvements tout aussi importants.

C'est également pour cette raison que le modèle d'usure pour les chemins de fer à voie métrique est élargi par un terme spécifique décrivant la problématique de l'usure ondulatoire.

3 Résultats

Dans ce chapitre, sont abordées la durée de vie prévue des éléments standards ainsi que les fréquences d'entretien définies et mises en œuvre pour le bourrage, le meulage des rails et le remplacement des deux files de rail. Les schémas d'entretien reposent à la fois sur les analyses de données et sur les retours d'expérience des compagnies ferroviaires mentionnées au début du document. Les résultats ont été complétés grâce à l'expérience du MOB et des tpf. Les principaux enseignements sont résumés en point, ci-dessous. Des propositions d'interprétation issues du groupe de travail P4 de la maîtrise de système « Interaction » de RAILplus sont également ajoutées (identifiables par un astérisque).

Un aperçu des durées de vie retenues et des intervalles d'entretien pour les éléments standards X1XX2111 (acier R260) et X1XX2211 (acier R350 HT) est présenté dans la Figure 7 et la Figure 8.

Durée d'utilisation (ND) : Cela concerne la Figure 7 et la Figure 8.

- Les analyses de données ont montré que les voies à traverses en bois et en béton présentent une durée de vie similaire dans les classes de charge pour des rayons ≤ 300 m.
- ** Cause possible : l'utilisation de traverses en béton par les chemins de fer à voie métrique est relativement récente. Il est donc très probable que pratiquement aucune d'entre elles n'ait encore atteint sa durée de vie réelle.*
- La ND des traverses en acier est fixée à 80 ans (respectivement à 60 ans pour des rayons ≤ 80 m) car, selon l'analyse des données, elles ont été posées il y a plusieurs années et n'ont, pour certaines, pas encore été remplacées.

Bourrage : Cela concerne la Figure 7 et la Figure 8.

- Les voies à traverses en bois et en béton sont entretenues de manière très similaire au sein d'une même classe de charge, respectivement de manière identique lorsque la ND est la même ($R \leq 300$ m).
- L'intervalle de bourrage pour les traverses en acier est équivalent à celui des traverses en bois et en béton dans une même classe de charge.
- Avec une augmentation de la charge, l'intervalle de bourrage se réduit de 1 à 2 ans, quelle que soit le type de traverse.
- À mesure que le rayon de courbe diminue, l'intervalle de bourrage se raccourcit pour chaque type de traverse. Entre la plus grande et la plus petite classe de rayon, cet intervalle varie d'un facteur de 2 à 3, selon la classe de charge.

Meulage (nuance d'acier R260) : Cela concerne la Figure 7.

- Un meulage initial (à la mise en service) est systématiquement réalisé au début de la durée de vie.
- Les interventions de meulage sont principalement motivées par la formation d'usure ondulatoire ce qui impose un meulage régulier dès que les rayons sont $R \leq 300$ m.
- En moyenne, d'après l'expérience des compagnies, les intervalles de meulage sont similaires pour les voies à traverses en béton, bois ou acier, au sein d'une même classe de charge.
- Selon l'expérience et les analyses de données, les intervalles de meulage se réduisent avec l'augmentation de la charge.

Changement de rail (nuance d'acier R260) : Cela concerne la Figure 7.

- Le terme « remplacement de rails » désigne l'échange des rails gauche et droit, ou intérieur et extérieur.
- Un remplacement de rail durant la durée de vie considérée est principalement effectué dans les rayons serrés ($R \leq 120$ m). Dans ces zones, on observe une forte formation d'usure ondulatoire

sur le rail intérieur et parfois une usure latérale sur le rail extérieur (notamment dans les courbes très serrées et avec superstructure avec traverses en béton).

- Comme pour le meulage, l'intervalle de remplacement des rails est, d'après l'expérience des compagnies, similaire pour les voies à traverses en béton, bois ou acier au sein d'une même classe de charge. Voir à ce sujet la remarque au chapitre 4.3.1.
- Avec l'augmentation de la charge, l'intervalle de remplacement (au sein d'une même classe de rayon) est réduit d'environ un facteur 2.
- Avec la diminution du rayon de courbe (au sein d'une même classe de charge), l'intervalle de remplacement diminue en moyenne d'environ un facteur 3.

Meulage et changement de rail (nuance d'acier R350HT) : Cela concerne la Figure 7.

- Une qualité d'acier de rail plus élevée (R350HT) n'a, selon les analyses de données, aucune influence sur la durée de vie ni sur les intervalles de bourrage.
- Les analyses et les échanges avec les responsables de l'entretien des voies ont toutefois montré qu'une nuance d'acier de qualité supérieure réduit en moyenne d'un facteur 2 les intervalles des opérations de meulage et de remplacement des rails. Cette conclusion a été prise en compte lors de la mise en œuvre des éléments standards⁴.

LN≤40‰ (B=1), 46E1/49E1 (E=2), R260 (F=1)									
Nutzungsdauer	N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)			N2/E2 (15.000-30.000 Bt/Tag)			N1/E1 (>30.000 Bt/Tag)		
	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	35	50	80	35	50	80	35	50	-*
600m ≥ R > 300m	35	50	80	35	50	80	35	50	-*
300m ≥ R > 120m	30	30	80	30	30	80	30	30	-*
120m ≥ R > 80m	30	30	80	30	30	80	30	30	-*
R ≤ 80m	25	25	60	25	25	60	-*	-*	-*

Stopfen	N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)			N2/E2 (15.000-30.000 Bt/Tag)			N1/E1 (>30.000 Bt/Tag)		
	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	10 10 7	10 10 10 10	10 10 10 ...	10 10 7	10 10 10 7 7	10 10 10 7 7...	8 7 7 5 4	8 8 7 7 7 7	-*
600m ≥ R > 300m	10 10 7	10 10 10 10	10 10 10 ...	10 10 7	10 10 10 7 7	10 10 10 7 7...	8 7 7 5 4	8 8 7 7 7 7	-*
300m ≥ R > 120m	6 6 5 5 4	6 6 5 5 4	6 6 5 5 5 ...	5 5 5 4 4 4	5 5 5 4 4 4	5 5 5 5 4 4	4 4 4 4 3 3 3 3	4 4 4 4 3 3 3 3	-*
120m ≥ R > 80m	5 5 5 5 4 3	5 5 5 5 4 3	5 5 4 4 4 4 ...	4 4 4 4 4 4 3	4 4 4 4 4 4 3	4 4 4 4 4 4 3 3	4 4 3 3 3 3 ... 2	4 4 3 3 3 3 ... 2	-*
R ≤ 80m	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 3 3 ...	3 3 3 3 3 3 3 2	3 3 3 3 3 3 3 2	3 3 3 3 3 3 3 2	-*	-*	-*

Schleifen	N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)			N2/E2 (15.000-30.000 Bt/Tag)			N1/E1 (>30.000 Bt/Tag)		
	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
600m ≥ R > 300m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
300m ≥ R > 120m	7 7 6 6	7 7 6 6	7 7 6 6... 6 6 6 5 5	4 4 4 3 ...	4 4 4 3 ...	4 4 4 3 3 ...	3 3 2 2 2 1 1 1 1 ...	3 3 2 2 2 1 1 1 1 ...	-*
120m ≥ R > 80m	5 5 5 4 4 4	5 5 5 4 4 4	5 5 ... 4 4 4	3 3 3 2 2 2 3 3 2 2 2	3 3 3 2 2 2 3 3 2 2 2	3 3 3 2 2 2 3 3 2 2 2	2 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 ...	2 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 ...	-*
R ≤ 80m	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 ...	2 2 ... 1 1 1 1	2 2 ... 1 1 1 1	2 2 2 2 2 ...	-*	-*	-*

Schienenwechsel (beide)	N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)			N2/E2 (15.000-30.000 Bt/Tag)			N1/E1 (>30.000 Bt/Tag)		
	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
600m ≥ R > 300m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
300m ≥ R > 120m	-	-	-	-	-	-	15	15	-*
120m ≥ R > 80m	-	-	35	16	16	16 16 16 16	8 8 8	8 8 8	-*
R ≤ 80m	12	12	12 12 12 12	8 8	8 8	8 8 8 8 8 6	-*	-*	-*

StdE	N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)			N2/E2 (15.000-30.000 Bt/Tag)			N1/E1 (>30.000 Bt/Tag)		
	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	31132111	31112111	31142111	21132111	21112111	21142111	11132111	11112111	11142111*
600m ≥ R > 300m	31232111	31212111	31242111	21232111	21212111	21242111	11232111	11212111	11242111*
300m ≥ R > 120m	31332111	31312111	31342111	21332111	21312111	21342111	11332111	11312111	11342111*
120m ≥ R > 80m	31432111	31412111	31442111	21432111	21412111	21442111	11432111	11412111	11442111*
R ≤ 80m	31532111	31512111	31542111	21532111	21512111	21542111	11532111*	11512111*	11542111*

*Infrastrukturdaten bzw. Erfahrungen zu Gleisarbeiten sind nicht vorhanden

Pour les termes en allemand dans la figure : Nutzungsdauer = durée d'utilisation, Stopfen = bourrage, Schleifen = meulage, Schienenwechsel (beide) = changement des deux files de rail, StdE = élément standard, Holz = bois, Beton = béton, Stahl = acier, Tag = jour.

Figure 7: Résultats pour les éléments standards avec les propriétés LN≤40‰, 46E1/49E1, R260 (« X1XX2111 »). Entre la figure 7 et la figure 8, seule la nuance d'acier change.

⁴ Voir la remarque du chapitre 4.3.1

LN≤40‰ (B=1), 46E1/49E1 (E=2), R350HT (F=2)									
N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)			N2/E2 (15.000-30.000 Bt/Tag)			N1/E1 (>30.000 Bt/Tag)			
Nutzungsdauer	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	35	50	80	35	50	80	35	50	-*
600m ≥ R > 300m	35	50	80	35	50	80	35	50	-*
300m ≥ R > 120m	30	30	80	30	30	80	30	30	-*
120m ≥ R > 80m	30	30	80	30	30	80	30	30	-*
R ≤ 80m	25	25	60	25	25	60	-*	-*	-*

N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)									
Stopfen	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	10 10 7	10 10 10 10	10 10 10 ...	10 10 7	10 10 10 7 7	10 10 10 7 7 ...	8 7 7 5 4	8 8 7 7 7 7	-*
600m ≥ R > 300m	10 10 7	10 10 10 10	10 10 10 ...	10 10 7	10 10 10 7 7	10 10 10 7 7 ...	8 7 7 5 4	8 8 7 7 7 7	-*
300m ≥ R > 120m	6 6 5 5 4	6 6 5 5 4	6 6 5 5 5 ...	5 5 5 4 4 4	5 5 5 4 4 4	5 5 5 5 4 4	4 4 4 4 3 3 3 3	4 4 4 4 3 3 3 3	-*
120m ≥ R > 80m	5 5 5 5 4 3	5 5 5 5 4 3	5 5 4 4 4 4 ...	4 4 4 4 4 4 3	4 4 4 4 4 4 3	4 4 4 4 4 4 3 3	4 4 3 3 3 3 ... 2	4 4 3 3 3 3 ... 2	-*
R ≤ 80m	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 3 3 ...	3 3 3 3 3 3 3 2	3 3 3 3 3 3 3 2	3 3 3 3 3 3 3 2	-*	-*	-*

N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)									
Schleifen	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
600m ≥ R > 300m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
300m ≥ R > 120m	12 10	12 10	12 12 12 12 12 10	7 7 6 6	7 7 6 6	7 7 6 6 ...	4 4 4 3 ...	4 4 4 3 ...	-*
120m ≥ R > 80m	9 8 7	9 8 7	9 9 9 9 9 9 9 9	6 6 5 5 5	6 6 5 5 5	6 6 5 5 5 6 6 5 5 5 ...	4 4 3 2 2 4 3 2 2 2 2	4 4 3 2 2 4 3 2 2 2 2	-*
R ≤ 80m	7 7 6	7 7 6	8 7 7 8 7 7 6 5	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 3 3	4 4 4 4 ... 3 3 3 3	-*	-*	-*

N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)									
Schienenwechsel (beide)	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
600m ≥ R > 300m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
300m ≥ R > 120m	-	-	-	-	-	-	-	-	-*
120m ≥ R > 80m	-	-	-	-	-	32 32	15	15	-*
R ≤ 80m	-	-	22 22	12	12	16 16 15	-*	-*	-*

N3/E3 & N4/E4 (<15.000 Bt/Tag)									
StdE	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl	Holz	Beton	Stahl
R > 600m	31132211	31112211	31142211	21132211	21112211	21142211	11132211	11112211	11142211*
600m ≥ R > 300m	31232211	31212211	31242211	21232211	21212211	21242211	11232211	11212211	11242211*
300m ≥ R > 120m	31332211	31312211	31342211	21332211	21312211	21342211	11332211	11312211	11342211*
120m ≥ R > 80m	31432211	31412211	31442211	21432211	21412211	21442211	11432211	11412211	11442211*
R ≤ 80m	31532211	31512211	31542211	21532211	21512211	21542211	11532211*	11512211*	11542211*

*Infrastrukturdaten bzw. Erfahrungen zu Gleisarbeiten sind nicht vorhanden

Pour les termes en allemand dans la figure : Nutzungsdauer = durée d'utilisation, Stopfen = bourrage, Schleifen = meulage, Schienenwechsel (beide) = changement des deux files de rail, StdE = élément standard, Holz = bois, Beton = béton, Stahl = acier, Tag = jour.

Figure 8 : Résultats pour les éléments standards avec les propriétés LN≤40‰, 46E1/49E1, R350HT (« X1XX2111 »). Entre la figure 7 et la figure 8, seule la nuance d'acier change.

Les éléments standards élaborés ont été fournis sous la forme d'un fichier Excel (« 2024-10-15_RailPlus_StdE.xlsx ») et sont joints en annexe au présent rapport de projet.

4 Enseignements et recommandations

4.1 Comparaison des cycles de travaux

Comme déjà mentionné au point 2.2.2, les cycles de travail des éléments standards des chemins de fer à voie métrique sont plausibles même en comparaison avec ceux des chemins de fer à voie normale. À l'exception de la problématique de l'usure ondulatoire, les fréquences d'entretien et les durées d'utilisation du présent ensemble d'éléments standards sont similaires à celles des charges comparables, par exemple aux CFF. Il convient de noter que, bien que les charges par essieu moyennes des chemins de fer à voie métrique soient nettement inférieures à celles des voies normales, les dimensions de la voie sont naturellement différentes. Par exemple, la surface d'appui déterminante des traverses en béton à voie métrique est plus petite, ce qui entraîne — selon la charge — une pression plus élevée sur le ballast que dans le cas de la voie normale.

4.2 Conservation des données

Lors du traitement des données, diverses propositions d'amélioration concernant la conservation des données sont apparues selon les différentes compagnies ferroviaires. D'une part, une base de données uniforme et déjà consolidée serait très avantageuse, qu'elle soit fondée sur des profils ou sur des sections. Toutefois, cela n'est pas indispensable, à condition que les informations puissent être clairement mises en relation, ce qui n'a malheureusement pas toujours été une tâche simple. Selon l'usage prévu des données, une structure différente peut s'avérer utile, mais le principal avantage découle d'une gestion rigoureuse des données.

L'historique des opérations de maintenance devrait être conservé sur le long terme. Sur ce point, la plupart des compagnies présentent un important potentiel d'amélioration. Là encore, la structure des données est déterminante : bien qu'un tableau listant les sections ne soit pas toujours facile à utiliser, il faudrait éviter d'enregistrer les opérations de maintenance sous forme graphique, par exemple sous forme de bande de ligne.

4.3 Extension des éléments standards et leurs possibilités d'application

4.3.1 Mise en place des éléments standards

Les éléments standards, dans leur forme actuelle, représentent des valeurs moyennes issues des compagnies ferroviaires ayant participé aux discussions dans le cadre du projet et ayant pu fournir des données sur l'infrastructure et l'entretien (principalement AB, MGB, RBS, RhB et ZB). Au cours du projet, il est apparu que des différences parfois importantes existent entre les compagnies en ce qui concerne les installations d'infrastructure, la réalisation des activités de maintenance et les intervalles de maintenance (régimes). Cela indique que, selon le domaine d'application, les éléments standards relatifs aux travaux de voie et à leurs intervalles peuvent et doivent être adaptés ou révisés.

Par exemple, les RhB signalent, en ce qui concerne le meulage des rails sur des sections de ligne à charge moyenne (15'000–30'000 Bt/jour) et avec des rayons de courbure de 100 à 120 m, des écarts importants par rapport aux intervalles de maintenance définis dans les éléments standards :

- Selon les RhB, le meulage des rails dépend du type de traverse. L'apparition d'usure ondulatoire est significativement plus élevée sur les installations avec traverses en béton que sur celles avec des traverses en bois ou en acier.
- De plus, les RhB indiquent que l'intervalle de meulage dans la section de voie mentionnée est nettement plus court que l'intervalle moyen représenté dans l'élément standard pour l'ensemble des compagnies. Les RhB font état d'interventions de meulage semestrielles pour les rails R260, annuelles pour les R350HT, et tous les trois ans pour les rails R400HT. Ainsi, le facteur 2 appliqué dans les éléments standards pour l'intervalle de meulage entre les rails R260 et R350HT se retrouve également dans ce cas.

Ces constatations peuvent également être confirmées par des mesures directes sur la voie.

4.3.2 Extension des éléments standards

Les éléments standards présentés couvrent les installations de voie « courantes » des compagnies AB, MGB, RBS, RhB et ZB. Cependant, certaines combinaisons d'éléments standards n'ont pas pu être élaborées en raison d'un manque d'informations sur les activités de maintenance. Le répertoire des éléments standards pourrait donc être élargi avec les points suivants :

- Pente longitudinale : en cas de forte déclivité longitudinale, il faut s'attendre à une augmentation des efforts liés à la maintenance des rails. Les compagnies rapportent qu'à partir de 60 ‰, une influence sur les coûts de bourrage (forces de freinage) devient également visible.
- Infrastructure : par exemple, en présence d'un sol rocheux avec voie sur traverses en béton, une sollicitation accrue du ballast est à prévoir.
- Drainage : un drainage fonctionnel ou non fonctionnel influe sur la maintenance du lit de ballast (nettoyage).
- Qualité de l'acier des rails : les interventions de meulage pour un acier de type R400HT différeront de celles pour les rails R350HT ou R260.
- Type de traverse : les sections de voie avec d'autres types de traverses (par ex. traverses en Y ou traverses en béton munies de semelles) se distingueront nettement en termes de durée de vie et d'activités de maintenance par rapport aux éléments standard existants.
- Travaux de voie : si des travaux de voie sont réalisés mais ne sont pas représentés dans cette version des éléments standards, ils pourront être ajoutés. Certaines compagnies ont, par exemple, indiqué que jusqu'à présent aucune ou très peu d'opérations de nettoyage du ballast ne sont effectuées. Or, avec les traverses en béton, ce n'est plus l'état de la traverse mais celui du ballast qui devient déterminant pour le renouvellement ; des nettoyages de ballast sont donc prévus à l'avenir.
- Il convient également de souligner à ce stade que des éléments standards peuvent être établis non seulement pour les voies, mais aussi pour d'autres installations, par exemple les aiguillages.

4.3.3 Utilisation

Si des coûts sont associés aux éléments standards et que, dans une étape ultérieure, les fréquences de maintenance sont multipliées par les coûts unitaires correspondants, on obtient les coûts moyens de maintenance sur le cycle de vie d'une voie donnée. L'ajout de données de coûts permet des analyses et des approches économiques dans le domaine de la gestion des installations : des stratégies de maintenance, d'investissement et de réinvestissement peuvent être dérivées à partir des éléments standards. Par ailleurs, l'utilisation du modèle d'usure permet de réaliser des analyses de scénarios. Des questions possibles sont formulées ci-dessous.

Gestion de l'infrastructure :

- Stratégie de maintenance : Comment un certain tronçon de voie doit-il être entretenu ? (Pour cela, des cycles de maintenance alternatifs sont nécessaires.)
- Stratégie d'investissement : Quelle superstructure devrait être utilisée dans certaines conditions cadres ?
- Stratégies de réinvestissement : Quand la voie doit-elle être renouvelée ? (Cela nécessite des cycles de maintenance alternatifs, incluant dans ce cas des mesures prolongeant la durée de vie.)

Analyses de scénarios et leur impact sur les efforts (et coûts) de maintenance :

- Changement de flotte de véhicules : Comment les efforts de maintenance évoluent-ils lorsque d'autres types de véhicules sont utilisés ?
- Modifications d'exploitation : Comment les efforts de maintenance changent-ils en cas d'augmentation ou de diminution du trafic ?

4.3.4 Utilisation dans le modèle d'usure pour la voie métrique

Les éléments standards pour la voie métrique ont été définis principalement parce qu'ils sont nécessaires au développement d'un modèle d'usure. Les résultats des éléments standards sont intégrés dans le modèle d'usure pour la voie métrique aux points suivants :

- Ils sont utilisés pour modéliser, dans le cadre du facteur d'usure, les interactions entre les charges générées par les véhicules et l'usure de l'infrastructure.
- Les éléments standards servent à évaluer dans quelle mesure des types de véhicules spécifiques ou des conditions d'exploitation influencent la fréquence et l'ampleur des travaux de maintenance. Ils constituent ainsi la base du comportement à l'usure de la voie sous charge.
- Aux cycles de travail élaborés dans le cadre des éléments standards peuvent être associés, de manière structurée, les coûts unitaires des différentes activités. Cela permet une monétarisation du comportement à l'usure.

5 Bibliographie

5.1 Références

- [1] Marschnig Stefan et al: *New Research on Railway Engineering and Transportation. Assessing Average Maintenance Frequencies and Service Lives of Railway Tracks: The Standard Element Approach*. Rijeka: IntechOpen (3), 2023 // 2024.

5.2 Figures

Figure 1 : Eléments standards pour la voie avec leurs paramètres et les valeurs possibles. Note : les éléments grisés ne sont pas intégrés dans les cycles d'entretien dû à un manque de données ou d'expériences.....	10
Figure 2: Elément standard 31312111	11
Figure 3: Elément standard 31312111: Travaux et cycles de travail.....	12
Figure 4: Répartition des âges de l'élément standard 3111XX11 sur le réseau d'une compagnie (comme exemple).....	15
Figure 5: Nombre de profils pour le bourrage sur la durée de vie (élément standard 3111XX11).....	16
Figure 6: Nombre de profils entretenus par bourrage sur toute la durée de vie, à partir de l'année d'installation (élément standard 3111XX11)	17
Figure 7: Résultats pour les éléments standards avec les propriétés $LN \leq 40\%$, 46E1/49E1, R260 (« X1XX2111 »)	20
Figure 8 : Résultats pour les éléments standards avec les propriétés $LN \leq 40\%$, 46E1/49E1, R350HT (« X1XX2111 »). Entre la figure 7 et la figure 8, seule la nuance d'acier change.....	21

5.3 Tableaux

Tableau 1: Travaux d'entretien entrant dans l'expression "petit entretien".....	11
Tableau 2: Historique des données d'entretien	13

6 Annexe

Le fichier Excel « 2024-10-15_RailPlus_StdE.xlsx » ne contient pas seulement les éléments standards expliqués et élaborés, mais intègre également, à partir de la colonne *CH*, la base de calcul pour les analyses économiques de ces éléments standard. À cet effet, les coûts de maintenance pour chaque type d'intervention doivent être saisis ou ajustés dans l'onglet « TrackWorkCost ». Les coûts indiqués pour le bourrage de voie, le meulage des rails et le remplacement des deux rails correspondent à une moyenne calculée sur la base des informations des compagnies AB, MGB, RBS et ZB. Le fichier fourni « 2024-10-15_Unterhaltskosten im Vergleich.xlsx » contient une comparaison des postes de coûts liés aux activités de maintenance mentionnées entre ces compagnies.

Ci-dessous sont présentés les éléments standard élaborés.

Seite 27 / 36

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

Seite 28 / 36

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

Seite 29 / 36

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Belastungsgruppen	Bogenradius	21512111																									
N2/E2	R ≤ 80m																										
Längsneigung	Schwellen		Schienenprofil	Schienenstahlgüte						Unterbau		Entwässerung															
LN ≤ 40‰	Beton	46 E1 / 49 E1	R260						gut/ausreichend		gut/funktioniert																
Gleisarbeiten	Nutzungsdauer	25.0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Neulage (Schotteroberbau)		0.0																									
Gleisstopfung	alle 4 Jahre	2.8				1				1			1			1		1			1			1		1	
Schienenschleifen	Anzahl während der ND	14.0	1		1			1									1		1					1		1	
Schienenwechsel (beide)	Anzahl während der ND	2.0									1							1							1	1	
Arbeit X	Anzahl während der ND	0.0																									
Arbeit Y	Anzahl während der ND	0.0																									
Arbeit Z	Anzahl während der ND	0.0																									
Kleinunterhalt	Anzahl während der ND	26	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	

[illegible][illegible][illegible]

Annexe

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

Seite 32 / 36

[illegible]

Seite 33 / 36

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Belastungsgruppen	Bogenradius	31512111																											
N3/E3 & N4/E4	R ≤ 80m																												
Längsneigung	Schwellen	Schienenprofil	Schienenstahlgüte						Unterbau		Entwässerung																		
LN ≤ 40‰	Beton	46 E1 / 49 E1	R260						gut/ausreichend		gut/funktioniert																		
Gleisarbeiten	Nutzungsdauer	25.0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
Neulage (Schotteroberbau)		0.0																											
Gleisstopfung	alle 4 Jahre	3.6						1				1			1				1			1			1				
Schienenwechseln	Anzahl während der ND	2.0	1					1							1				1			1			1				
Schienenwechsel (beide)	Anzahl während der ND	1.0													1														
Arbeit X	Anzahl während der ND	0.0																											
Arbeit Y	Anzahl während der ND	0.0																											
Arbeit Z	Anzahl während der ND	0.0																											
Kleinunterhalt	Anzahl während der ND	26	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5		

[illegible][illegible][illegible]

Seite 34 / 36

[illegible]

Seite 35 / 36

Annexe

[illegible]