

# Prolongation de l'essai d'exploitation SKK sur le tronçon Täsch - Zermatt

Maîtrise de système Interaction Véhicule – Voie ferrée pour l'écartement métrique  
Projet : 2 SKS / SKK  
Module : 4a Réduction de l'usure par le SKK

## Rapport technique



---

ID:	RAILPlusSF-00092	
Date / Statut:	28.03.2024 / Freigegeben	Nombre de page 181
Auteur:	R. Müller / Gleislauftechnikmüller A. Seeberger / MGBahn	
Auteur de la traduction:	Thao Nhi La, TRAVYS SA	
Vérifié:	Michael Stalder / CE cideon engineering Schweiz AG	
Approuvé:	Nikolaus Ritter / zb Zentralbahn AG	

Citation: R. Müller / A. Seeberger, Railplus: Rapport final de la prolongation de l'essai d'exploitation SKK sur le tronçon Täsch – Zermatt. Rapport technique, RAILPlusSF-00038, 28.03.2024

## Suivi des modifications

Version	Date	Responsable	Description
0.1	08.03.2024	A. Seeberger	Premier brouillon
0.2	20.03.2024	R. Müller	Brouillon modifié
0.9	25.03.2024	M. Stalder	Rapport édité et finalisé
1.0	25.03.2024	N. Ritter	Modification finale et approbation par le chef de projet
1.1	18.04.2024	A. Seeberger	Ajout du Management Summary
2.0	08.05.2024	N. Ritter	Approbation par le chef de projet et publication

## Approbation par la direction de la maîtrise de système

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	28.03.2024
2.0	Management Board	13.06.2024

## Niveau de confidentialité

Public

## Management Summary

### Situation initiale

Dans le cadre de l'interaction véhicule/voie ferrée, des phénomènes d'usure massive ont été constatés ces dernières années sur divers trains à voie métrique, tant au niveau des véhicules que de l'infrastructure. Ces phénomènes d'usure sont parfois si graves qu'il n'est plus possible de garantir la disponibilité des véhicules, ni même celle de l'infrastructure. Dans le passé mais encore actuellement, la ligne Matterhorn Gotthard Bahn (MGBahn) est très fortement affectée par les phénomènes d'usure sur le tronçon Täsch - Zermatt. Diverses expériences avec des qualités de rail, des matériaux de roue et d'autres modifications dans la paramétrisation roue / rail n'ont donné que des résultats ponctuels. Plusieurs facteurs influençant l'interaction véhicule - voie ferrée ou roue - rail s'accumulent dans le cas du MGBahn. Des courbes étroites, des charges élevées sur les essieux, des guidages rigides pour les véhicules nouveaux et modernes et des chaussées rigides. Tous ces paramètres ne peuvent pas être modifiés facilement et dans un délai court qu'il s'agisse de modifications sur les véhicules ou la voie ferrée. Pour cette raison, la maîtrise de système Interaction Matériel roulant - Voie ferrée a considéré très rapidement conduire un essai d'exploitation au sein des MGB et ainsi mener un projet de recherche idéal.

Après des travaux préparatoires importants, des essais d'exploitation avec conditionnement embarqué de la tête du rail ont eu lieu sur la ligne Täsch - Zermatt d'octobre 2021 à octobre 2022. La période d'un an a été choisie afin de tenir compte des coefficients de frottement roue/rail sur les quatre saisons. Dans un premier temps, les quatre véhicules Shuttle 2051 à 2054 ont été équipés d'une installation embarquée pour le conditionnement de la tête du rail. La ligne a été analysée de manière approfondie sous différents angles et, par la suite, préparée pour la commande des installations en fonction des tronçons (balises RFID). Les rails ont été meulés et toutes les roues des véhicules Shuttle ont été reprofilées. Les profils après reprofilage sur toutes les roues ont été mesurés et au niveau des rails, la mesure des profils après meulage a été faite dans les trois courbes représentatives. Un rapport complet en allemand a été établi à l'occasion de cet essai d'exploitation, contenant des recommandations à donner pour la suite [1]. Le rapport conclut, entre autres, que l'élaboration de recommandations pour la mise en œuvre du SKK dans le secteur de la voie métrique nécessite des optimisations futures. Il a été recommandé de suivre l'évolution du comportement du système SKK au MGB pendant une année supplémentaire, ce qui a été rendu possible par l'acceptation de l'OFT au projet optionnel de prolongation des essais d'exploitation et une participation aux coûts des MGB. Ainsi, les tendances constatées lors des tests de 2021 / 2022 ont pu être testées sur leur reproductibilité, dans le respect de la limite des coûts de 50 000 CHF imposé pour la maîtrise de système. Il fallait tenir compte que, notamment pour les roues, aucun reprofilage n'a encore été effectué pendant cette période et que seule la réduction du diamètre effectuée permet une estimation sûre de l'allongement de la durée de vie des roues résultant de SKK. Il est également apparu que la période d'observation de l'usure des rails, soit un an pour évaluer les intervalles de meulage à prévoir, était trop courte. Les résultats de l'essai d'exploitation concernant les mois d'été extrêmement chauds de 2022 ont dû être consolidés, notamment par d'autres mesures d'usure au cours des mois d'été 2023. L'installation fixe de surveillance des écarts de circularité des roues et la surveillance embarquée du bruit et des dommages aux rails devaient être maintenues en service pendant 12 mois supplémentaires.

### Résultats de la prolongation de l'essai d'exploitation Täsch - Zermatt

#### **Sécurité, exploitation ferroviaire**

De manière générale, il peut être constaté qu'aucun incident de sécurité n'est survenu pendant l'ensemble du test d'exploitation.

### **Usure sur les roues et le profil des roues des véhicules**

Le conditionnement de la tête du rail a immédiatement eu un effet positif sur les roues des véhicules équipés. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- L'usure des boudins (épaisseur des boudins et mesure  $q_R$ ) est mineure sur tous les véhicules et toutes les roues. Ceci est principalement grâce à l'efficacité de la lubrification des boudins. Lors des contrôles des surfaces de roulement, aucune tendance à la formation de polygones n'a été observée et, à deux exceptions près, aucune fatigue des contacts de roulement n'a nui aux résultats.
- Sans dommages aux roues, les indicateurs d'usure des roues des essieux moteurs oscillent entre 15'000 et 20'000 km. Les écarts sont cependant considérables. Pour les roues porteuses, la variabilité est encore plus importante que pour les roues motrices. Dans le cas des roues porteuses, les indicateurs d'usure se situent entre 30'000 et 50'000 km. En comparaison avec les années 2021/2022, les valeurs sont légèrement plus basses pour les roues motrices et dans le même ordre de grandeur pour les roues porteuses. Dans l'ensemble, les valeurs avec conditionnement sont nettement plus élevées qu'en l'absence de conditionnement.
- Certains essieux ont dû être reprofilés principalement en raison de méplats et, sur un bogie moteur, les quatre essieux (compensation du diamètre des roues) ont dû être reprofilés en raison de la fatigue du contact de roulement sur l'une des huit roues (le matériau des roues KVR600 a été développé dans les années 1970). Tous les autres essieux n'ont jamais été reprofilés depuis le début des premiers essais en service en 2021 et présentaient un état irréprochable au niveau des surfaces de roulement des roues fin 2023.
- Les profils de roues montrent, au cours des deux années d'essai d'exploitation, une lente évolution vers un comportement plus favorable dans les courbes sans dégradation notable de l'indicateur d'usure pour la conduite en alignement. Les essieux porteurs s'adaptent plus rapidement aux rails extérieurs en courbe que les essieux moteurs. Cela est probablement dû aux différences de qualité d'acier des roues dans ces deux principes de roulements (courbe vs. alignement).
- Le profil de roue nominal RTE 29500A/B est totalement inadapté pour rouler dans les virages de rayons de courbe inférieur à 700 m. Ceci est particulièrement évident lors de modifications continues de ce profil de roue et de son adaptation à l'usure avec le rail extérieur en courbe. Il convient donc de procéder le plus rapidement possible à des essais d'exploitation avec des profils de roues adaptés à l'usure.

### **Usures sur les rails et le profil du rail**

Le conditionnement du champignon du rail a eu un effet positif immédiat sur les rails, et les résultats peuvent être résumés comme suit :

- L'usure du rail se produit globalement principalement dans la direction verticale (W1). L'usure sur les flancs du rail (W2) proche du centre de la voie est minime, ce qui est dû à une bonne lubrification des boudins de roue.
- Les rails ont été remplacés par de nouveaux rails dans la zone des trois courbes en 2019. En 2021, 2022 et 2023, deux essais successifs ont eu lieu avec le SKK. Les rails ont été meulés entre les deux essais. Cependant, comme le montrent les résultats des mesures, l'enlèvement de matière (par meulage) à la fin de 2022 était minime, ce qui signifie que la croissance des ondulations en courbe a été faible pendant le premier essai d'exploitation. Ainsi, la plus grande usure au niveau W1 devrait provenir de la période entre 2019 et fin 2021 et donc de la période précédant le conditionnement du champignon du rail. Cela prouve que le SKK a contribué à une réduction significative de l'usure des rails.
- On remarque que sur toutes les courbes, 12 mois après le meulage, la croissance de l'usure ondulatoire est nettement plus faible que lors de la période de mesure précédente, bien que le

système de conditionnement des rails était également en fonction. La croissance des ondulations a alors nettement augmenté durant les mois chauds de l'été 2022, ce qui n'a pas été observé en été 2023.

- Par rapport aux rails nominaux, les rails utilisés lors de l'essai d'exploitation possèdent un profil qui s'est modifié avec le temps. Ce profil, appelé profil d'usure, a un effet favorable sur l'indice de position radiale. Dans le cadre de ce projet, une comparaison des profils d'usure est complexe, voire impossible, car le nombre de mesure des profils d'usure est malheureusement trop faible.
- Les trois courbes (zum Biel-Portal, zum Biel-Brücke et Lüegelwang) spécialement étudiées montrent un comportement similaire tant en ce qui concerne les indices de position radiale que la variabilité. Il faut tenir compte du fait que les trois courbes ont pratiquement subi aucune usure latérale entraînant un élargissement significatif de la voie. En comparaison avec le rail nominal, cela résulte à un comportement en courbe bien plus favorable.
- Les analyses des courbes de la ligne entière donnent une appréciation similaire à celle des trois courbes spécialement surveillées. Des études approfondies sur tout le réseau et l'évaluation des courbes et profils de rail qui en résulte seront réalisées dans le cadre du projet P3 en 2024.

### **Surveillance des faux-ronds des roues**

Le système de mesure de la voie pour la détection des défauts de circularité (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies) fournit, depuis début mars 2022, des valeurs mesurées sur les polygones, les méplats et d'autres dommages éventuels dans la direction circonférentielle des surfaces de roulement des roues. Le poste de mesure est installé peu après Täsch sur la ligne vers Zermatt. Les résultats des écarts de circularité enregistrés peuvent être résumés comme suit :

- En 2023, 54 méplats ont été constatés sur les véhicules Komet, Shuttle et voitures de commande articulée. En 2022, le nombre de méplats était de 39. Le nombre de méplats a ainsi augmenté de 15 (+38%), les raisons n'étant pas évidentes.
- Les véhicules Komet et Shuttle présentent approximativement le même nombre de méplats (environ 3 par véhicule en 2023). Seules les voitures à commande articulée présentent moins de méplats (environ 1,5 par véhicule en 2023).
- Dans les Shuttle et les Komet, les méplats apparaissent à peu près aussi souvent sur les essieux porteurs que moteurs.

Ces résultats montrent que les méplats sont la cause la plus fréquente de reprofilage des roues pour la plupart des types de véhicules. On trouve alors ici un potentiel d'amélioration.

### **Surveillance de la formation d'ondulations de patinage et des crissements dans les courbes**

Les mois d'été de juillet et août 2022 ont connu des températures journalières très élevées. Cela a entraîné une augmentation des valeurs d'accélération sur les deux véhicules équipés de capteurs d'accélération (Komet 2026 et Shuttle 2052). À l'été 2023, les températures exceptionnellement élevées de l'année précédente n'ont pas été atteintes. Les températures de cet été 2023 étaient tout de même à un niveau normal pour cette saison. Le suivi a permis de constater que l'effet observé en 2022 ne se reproduisait pas. Les essais réalisés sur banc de test montrent que la performance des produits de conditionnement actuellement utilisés est réduite en cas de températures élevées.

Le crissement en courbe a pu être réduit de manière significative par le conditionnement du champignon du rail, mais pas complètement éliminé. Les véhicules de la MGB ont surtout des crissements en courbe sur les bogies moteurs. Cela peut être dû au fait que les essieux moteurs ne sont pas équipés d'absorbeurs de bruit, contrairement aux essieux porteurs. Lors des mesures sur la voie en octobre 2023 dans les courbes de zum Biel, le crissement était nettement moins prononcé pendant la phase de conditionnement que pendant la phase sans conditionnement. Le crissement en courbe était plus prononcé lors de la montée des véhicules que lors de leur descente. Concernant les résultats au niveau du véhicule pour le crissement en courbe, on observe sur la voie les points suivants :

- En montée, le crissement en courbe est plus important qu'en descente et se produit au niveau des virages.
- En été et lors de la montée, le crissement en courbe est plus intense que lors des autres saisons. Cependant, il n'est pas aussi audible en descente.
- En descente, le crissement en courbe est plus intense la nuit dans les zones de conditionnement que le jour.

### ***Bases d'explication de la formation d'ondulations de patinage et des crissements dans les courbes***

Parallèlement à l'essai d'exploitation au MGB, les partenaires scientifiques du projet (ViF, AC2T et l'université de Sheffield) travaillent au développement de modèles sur différents thèmes d'interaction concernant l'usure et le bruit. La phase de test en exploitation de Täsch - Zermatt, qui a connu un succès pendant près de deux ans jusqu'en octobre 2023, a donc été utilisée pour développer d'autres connaissances afin d'élargir les concepts du modèle. Pour ce faire, diverses mesures ont été effectuées sur la voie comme indiqué ci-après.

### **Caractéristiques tribométriques du SKK**

La caractérisation tribométrique de SKK est composée de deux parties principales, qui sont liées l'une à l'autre :

- Développement de méthodes et expériences en laboratoire pour les futures R RTE pour le SKK
- Développement de méthodes et expériences en laboratoire pour la fourniture de données d'entrée pour les modèles de contact roue-rail.

Différentes méthodes ont été utilisées pour mieux comprendre et quantifier l'accumulation et la dégradation du produit de conditionnement appliqué sur le rail (mesure de la valeur de frottement avec différents tribomètres, balayage des surfaces des rails, empreintes pour déterminer la rugosité de surface, méthodes de détection qualitative et quantitative du SKK sur les surfaces de contact roue/rail, etc.). Des échantillons ont également été prélevés sur les deux buses du véhicule afin de déterminer la quantité pulvérisée par les deux pompes, au niveau du rail gauche et droit.

### ***Bases d'explication de la formation d'ondulations de patinage***

La formation d'ondulation est associée à différents composants du système. Pour comprendre leur interaction et leur mise en œuvre dans les modèles, des mesures d'inertie ont été effectuées sur des rails, des traverses, des roues et des essieux. Les fréquences de résonance de ces composants du système ont pu être identifiées à partir des variations de fréquence de la superstructure et des essieux. Certains d'entre eux se situent dans la gamme de fréquences à dans laquelle on soupçonne des modes propres responsables de la formation d'usure ondulatoire.

### ***Bases d'explication des crissements en courbes***

Le bruit émis par la roue en cas de crissement en courbe est proche d'un mode propre de la roue. Pour déterminer les modes de la roue motrice et de la roue porteuse, des mesures en atelier ont été effectuées à l'aide d'un marteau à impulsions, où un mode pour le crissement en courbe a été identifié à 5200 Hz et un mode pour l'usure ondulatoire a été identifié à 1000 Hz. Les mesures sur la voie au moyen d'un marteau à impulsions ont été effectuées dans la courbe du zum Biel - Brücke. Ces mesures, associées à un modèle de simulation par éléments finis de la voie, sont utiles pour établir un premier modèle permettant de déterminer les effets du conditionnement. Lors de mesures sur la voie, des crissements en courbe ont été identifiés sur le rail intérieur à une fréquence de 5140 Hz. Les données obtenues peuvent être utilisées tant pour les modèles de bruit que pour l'usure ondulatoire.

### **Rentabilité**

Les simulations pour le calcul de la rentabilité du test d'exploitation « SKK Täsch – Zermatt » ont montré que l'installation du SKK est rentable dans chaque cas simulé en fonction des hypothèses formulées sur le parcours d'essai. Deux cas ont été définis à cet effet : un cas avec SKK et un cas sans SKK.

Pour ces deux cas, trois simulations différentes ont été effectuées avec des limites de système différentes. L'évaluation montre que sur le parcours d'essai, l'installation du SKK est rentable quel que soit le scénario analysé :

- Si l'on considère uniquement les effets sur les bogies, l'installation de la SKK est rentable avec une différence d'annuité équivalente (EA - equivalent annuity) d'environ 140 kCHF (entre 75 kCHF/an et 215 kCHF/an).
- Compte tenu de l'impact sur les bogies et la maintenance des rails, l'installation du SKK est rentable avec une différence d'EA d'environ 165 kCHF (entre 85 kCHF/an et 235 kCHF/an).
- Compte tenu de tous les effets systémiques, l'installation du SKK est rentable avec une différence d'EA d'environ 270 kCHF (entre 210 kCHF/an et 335 kCHF/an).

On peut donc conclure que l'installation du SKK sur la ligne Täsch - Zermatt sera amortie en un an, même dans le cas le plus défavorable sur le plan économique (économies de 140'000 CHF avec des coûts d'investissement de 120'000 CHF). Il est recommandé d'utiliser le conditionnement uniquement sur les courbes avec un rayon inférieur à 200 m ( $R \leq 200$  m).

En outre, une évaluation d'une possible extension du SKK sur l'ensemble du réseau des MGB a été effectuée sur la base d'un avis d'expert (38926 mètres de voie,  $R \leq 200$  m, 40 bogies). En résumé, l'introduction du SKK sera également rentable sur l'ensemble du réseau, et également si le système global (y compris les coûts d'infrastructure et les aspects socio-économiques (bruit)) est pris en compte.

## Conclusion

L'essai d'exploitation étendu sur l'année 2023 a renforcé les résultats du premier essai en 2021 / 2022. Il a comblé les manques de connaissances et favorisé les synergies avec les autres travaux de recherche. En outre, de nouvelles données et connaissances ont été exploitées et sont utilisées pour les recommandations, l'étalonnage ou comme données d'entrée pour des travaux supplémentaires (développement du modèle ou études sur banc de test). Les principes établis sur la base des essais de freinage et la mise en pratique du système ont fait leurs preuves au cours des deux années d'essai. La sécurité de conduite n'a jamais été remise en question et le personnel de bord s'est familiarisé avec la nouvelle situation, à savoir le comportement de conduite résultant du contact modifié entre la roue et le rail.

Les résultats obtenus lors de la prolongation de l'essai d'exploitation et les résultats globaux montrent qu'à court et moyen terme, avec une application ciblée du conditionnement du champignon du rail, l'usure à court et long terme des roues et des rails sur les lignes par adhérence en pente jusqu'à 25‰ (pente du tronçon entre Täsch et Zermatt) peut être considérablement réduit.

En raison des mois d'été extrêmement chauds de 2022, des ondulations de patinage se sont formées dans un délai très court et ont été éliminées par des meulages à la fin de l'essai d'exploitation. En comparaison, ils n'ont que légèrement augmenté à l'été 2023. Cela montre que les produits de conditionnement doivent encore être améliorés dans la plage des hautes températures ou que la quantité de produit de conditionnement doit être adaptée en fonction de la saison. Il faut s'attendre à ce que de telles adaptations ne soient pas nécessaires lors de l'application d'un conditionnement avec un système adapté aux besoins.

Certains essieux ont dû être reprofilés, principalement en raison de la présence de méplats. Étant donné que ce type de dommage n'est pas apparu de manière répétée sur les Shuttle (en comparaison avec d'autres véhicules) aucune relation avec le conditionnement est faite. Pour améliorer davantage la rentabilité des véhicules et des essieux, il serait judicieux de procéder à une optimisation dans ce domaine spécifique. Uniquement deux reprofilages ont été nécessaires pendant les deux années d'essai d'exploitation. Au vu de la faible usure de la bande de roulement et du faible nombre de dommages, des rentabilités très élevées du point de vue du reprofilage sont attendues.

Le dérèglement d'un ou de plusieurs composants du système ayant un impact sur le coefficient de frottement doit être évité en améliorant la fiabilité de l'ensemble du système. Ainsi, lors des essais sur la ligne en octobre 2023, une augmentation du coefficient de frottement a été observée pendant la journée. Des contrôles ultérieurs ont révélé que le relais de temporisation, qui désactive le système de conditionnement pendant la nuit pour éviter un surconditionnement, s'était dérèglé.

Le prélèvement d'échantillons de la quantité de conditionnement par intervalle de pulvérisation montre des variations très importantes et des différences irrégulières entre le côté gauche et le côté droit.

Le conditionnement du champignon du rail est très économique, avec un ROI (Return on investment) d'un an pour les MGBs. Ce dernier n'a pas changé par rapport au premier essai, malgré les quelques reprofilages non-engendrés par le SKK. Les intervalles de reprofilage des roues et les intervalles de meulage des rails pourraient encore être nettement augmentés si le système de conditionnement était alimenté avec des données actuelles voire prises au temps juste avant le conditionnement.

Le bruit (crissement en courbe, balancements dus aux ondulations de patinage) est nettement réduit par le SKK et le confort de conduite est amélioré.

Une étude approfondie a permis d'exclure toute incidence concernant l'impact du produit de conditionnement sur l'environnement (voir le rapport relatif au LO2.3 du projet P2, RAILPlusSF-00013).

### **Marche à suivre - recommandations**

Les recherches menées par les partenaires scientifiques concernant l'interaction roue/rail fournissent des connaissances pratiques et théoriques précieuses. Les résultats permettent d'utiliser le conditionnement de manière optimale et, ainsi, d'éviter différentes formes d'usure et d'émissions sonores dans différentes gammes de fréquences. En outre, les essais sur banc de test fournissent des informations qui ne peuvent être déterminées que difficilement par des essais sur la ligne. Cependant ces tests sont indispensables pour le développement de modèles. Tous les efforts doivent être soutenus par tous les moyens. Ils sont indispensables pour générer des connaissances nouvelles et exploitables en phase avec l'état actuel de la technique. La méthode par tâtonnement est certainement la mauvaise voie à suivre et doit donc être évitée.

Il faut poursuivre l'études sur les produits de conditionnement compatibles avec les conditions climatiques actuelles et futures. Même à des températures de rail de 60°C, le nombre de cycles de roulement jusqu'à l'augmentation du coefficient de frottement est considérablement réduit par rapport à celui à 25°C. Le coefficient de frottement est donc plus élevé sur les rails à haute température.

Le système de conditionnement installé sur le véhicule présente de grandes variations en termes de quantité pulvérisée par impulsion de pompe et de grandes différences entre les côtés gauche et droit du véhicule. Ce système doit être développé, notamment en vue de conditionner en fonction des besoins.

Le désavantage du conditionnement à chaque passage de train dans toutes les courbes choisies doit être contré par un conditionnement adapté aux besoins. Pour ce faire, les véhicules devrait reconnaître la nécessité d'un conditionnement afin d'obtenir un meilleur système et ainsi, les meilleurs résultats possibles (conditionnement adapté aux besoins). Il est également important de prendre en compte le comportement des substances du produit de conditionnement car ils possèdent une certaine dépendance avec la température (viscosité).

Dans une étape ultérieure, il convient de démontrer que le conditionnement du champignon du rail peut être utilisé avec succès sur des lignes atteignant une pente jusqu'à 70‰. A cet effet, il convient éventuellement d'envisager des produits de conditionnement augmentant la valeur d'adhérence, afin de déterminer si, avec ces produits, il y a une évolution positive de l'adhérence lors du passage du microglissement au macroglissement et si le crissement en courbe peut ainsi être réduit ou éliminé.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Situation initiale</b> .....	<b>12</b>
1.1	Objectifs de la prolongation de l'essai d'exploitation.....	12
1.2	Description du prototype et de la ligne d'essai.....	12
1.2.1	<i>Informations générale</i> .....	12
1.2.2	<i>Véhicules</i> .....	12
1.2.3	<i>Ligne ferroviaire</i> .....	13
<b>2</b>	<b>Mesures / surveillance et résultats sur l'usure des roues</b> .....	<b>14</b>
2.1	Stratégie de mesures de la prolongation de l'essai d'exploitation.....	14
2.1.1	<i>Agenda des mesures sur roues et rail</i> .....	14
2.1.2	<i>Analyse des mesures</i> .....	15
<b>3</b>	<b>Résultats des mesures d'usure des roues</b> .....	<b>16</b>
3.1	Indicateur de l'usure des roues « Nombre de kilomètres par réduction du diamètre des roues de 1 mm ».....	16
3.2	Usure abrasive des roues par rapport aux dimensions du boudin de roue.....	18
3.2.1	<i>Tendances des dimensions du boudin de roue</i> .....	18
3.2.2	<i>Conclusion concernant les dimensions du boudin de roue</i> .....	20
3.3	Défaut de circularité évalué par une installation de mesure sur la voie [4].....	20
3.3.1	<i>Système de surveillance des roues (WMS)</i> .....	21
3.3.2	<i>Polygonisation (cf. annexe 12.6.1)</i> .....	23
3.3.3	<i>Méplats (cf. annexe 12.6.2)</i> .....	23
3.3.4	<i>Conclusion / remarques principales sur la circularité</i> .....	24
3.4	État des surfaces de roulement.....	28
3.4.1	<i>Reprofilage</i> .....	28
3.4.2	<i>Fatigue du contact de roulement (RCF – Rolling Contact Fatigue) roue 4R sur le Shuttle 2051</i> .....	29
3.4.3	<i>Enregistrements de l'installation de mesure sur la voie pour le Shuttle 2051</i> .....	30
3.4.4	<i>Documentation photographique</i> .....	31
3.4.5	<i>Remarques sur l'état des surfaces de roulement</i> .....	32
<b>4</b>	<b>Résultats des mesures des rail</b> .....	<b>33</b>
4.1	Mesure de la rugosité du rail [6].....	33
4.1.1	<i>Évolution de la rugosité du rail [6]</i> .....	34
4.1.2	<i>Formation d'ondulations [6]</i> .....	39
4.1.3	<i>Mesures d'inertie</i> .....	40
4.1.4	<i>Impact de l'usure ondulatoire sur l'exploitation [6]</i> .....	45
4.1.5	<i>Vibration du rail situé entre les traverses</i> .....	46
4.1.6	<i>Émissions sonores</i> .....	47
4.1.7	<i>Remarques sur l'influence des ondulations sur l'exploitation</i> .....	48
4.2	Usure abrasive des rails.....	49
4.2.1	<i>Zum Biel – Portal, courbe à droite (courbe complète km: 41'935.977 - 41'951.93)</i> .....	51
4.2.2	<i>Zum Biel – Pont, courbe à gauche (courbe complète km : 42'053.3 - 42'024.7)</i> .....	53
4.2.3	<i>Lüegelwang, courbe à gauche (courbe complète km: 42'512.35 - 42'557.67)</i> .....	55
4.2.4	<i>Conclusion sur l'usure du rail</i> .....	57
4.3	Coefficient de frottement / mesures tribomètre.....	58

---

4.3.1	<i>Points de mesure et résultats des mesures</i> .....	58
4.3.2	<i>Constatations concernant les résultats de mesure</i> .....	60
<b>5</b>	<b>Contact entre la roue et le rail (profils de roue et de rail)</b> .....	<b>61</b>
5.1	Roue et rail nominaux .....	61
5.2	Évolution des profils de roues en utilisation opérationnelle .....	62
5.3	Développement des profils de rails en service .....	64
5.4	Influence du profil de la roue sur l'indice de position radiale sur les parcours complets .....	67
5.5	Influence de la semelle de frein sur la géométrie de contact .....	68
<b>6</b>	<b>Bruit : Mesures / Surveillance et résultats au niveau du bruit [10]</b> .....	<b>70</b>
6.1	Campagne de mesure de la courbe « Zum Biel », octobre 2023 .....	70
6.1.1	<i>Lieu de mesure</i> .....	70
6.1.2	<i>Investigations préliminaires</i> .....	71
6.2	Mesures .....	72
6.2.1	<i>Essieu</i> .....	72
6.2.2	<i>Mesures stationnaires en courbe</i> .....	73
6.3	Résultats des mesures .....	74
6.3.1	<i>Fréquences propres et impédances des essieux et des roues</i> .....	74
6.3.2	<i>Fréquences propres et inerties du rail</i> .....	75
6.4	Crissement en courbe lors du passage de train .....	77
<b>7</b>	<b>Mesures / surveillance et résultats généraux [11]</b> .....	<b>78</b>
7.1	Vibrations au niveau de la boîte d'essieu .....	78
7.1.1	<i>Valeurs mesurées des accélérations – Généralités</i> .....	78
7.1.2	<i>Conclusion sur les valeurs d'accélération – Usure ondulatoire générale</i> .....	80
7.2	Données mesurées relatives au bruit .....	81
7.2.1	<i>Filtre pour les crissements en courbe</i> .....	82
7.2.2	<i>Filtre pour l'usure ondulatoire</i> .....	82
7.2.3	<i>Résultats du crissement en courbe</i> .....	82
7.3	Résultats sur l'usure ondulatoire respectivement, sur les vibrations dans les longueurs d'onde de 40 – 90 mm .....	85
7.4	Discussions des résultats .....	87
7.4.1	<i>Modification depuis janvier 2022</i> .....	87
7.5	Différence très marquée entre les passages en montée et les passages en descente .....	89
7.6	Variation temporelle du crissement en courbe .....	90
<b>8</b>	<b>Caractérisation tribométrique du SKK [12]</b> .....	<b>91</b>
8.1	Caractérisation tribométrique du SKK .....	92
8.2	Méthodes analytiques complémentaires .....	95
8.2.1	<i>Profilomètre pour la mesure des géométries roue et rail</i> .....	95
8.2.2	<i>Empreintes pour la détermination de la rugosité de surface</i> .....	96
8.2.3	<i>Détection qualitative et quantitative du SKK</i> .....	97
8.3	Résultats des essais sur le terrain .....	98
<b>9</b>	<b>Rentabilité [13]</b> .....	<b>111</b>
9.1	Objectifs et méthode .....	111
9.2	Portée .....	111
9.3	Hypothèses retenues (voir annexe 12.5) .....	112

---

9.3.1	<i>Impact sur l'entretien des véhicules</i> .....	112
9.3.2	<i>Impact sur l'infrastructure</i> .....	112
9.3.3	<i>Hypothèses concernant les coûts</i> .....	112
9.3.4	<i>Hypothèses du modèle</i> .....	112
9.4	Résultats .....	112
9.4.1	<i>Au niveau du tronçon d'essai Täsch-Zermatt</i> .....	112
9.4.2	<i>Au niveau du réseau des MGBahn</i> .....	113
<b>10</b>	<b>Conclusion et suite des événements</b> .....	<b>115</b>
<b>11</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>124</b>
11.1	Références.....	124
11.2	Figures .....	124
11.3	Tableaux .....	127
<b>12</b>	<b>Annexes</b> .....	<b>128</b>
12.1	Dates des mesures .....	128
12.2	Étendue des analyses et répartition des tâches .....	129
12.3	Rugosité du rail – Appareil de mesure APT RSA – Rail Surface Analyser.....	130
12.4	Mesures au tribomètre .....	132
12.4.1	<i>Kalter Boden Voie 2 (rayon 100 m) avant la local à relais kilométrage 41.080</i> .....	132
12.4.2	<i>Courbe de Biel (110m) kilométrage 42.050</i> .....	132
12.4.3	<i>Alignement Biel kilométrage 42.100</i> .....	133
12.4.4	<i>Courbe étroite à Lüegelwang (95m) kilométrage 42.550</i> .....	133
12.5	Rentabilité générale – Hypothèses .....	134
12.5.1	<i>Investissement</i> .....	134
12.5.2	<i>Extrait de la simulation</i> .....	136
12.6	Défaut de circularité des roues.....	137
12.6.1	<i>Polygone</i> .....	137
12.6.2	<i>Plats aux roues</i> .....	158
12.7	Reprofilage des véhicules / Notes mesures tour en fosse .....	179

## 1 Situation initiale

Dans le cadre du programme national de recherche Véhicule / Voie ferrée pour la voie métrique, la Matterhorn Gotthard Bahn (MGBahn) a effectué un essai d'exploitation sur la ligne Täsch-Zermatt avec utilisation de conditionnements du champignon du rail (SKK) d'octobre 2021 à fin octobre 2022 contre l'usure de la roue et du rail.

Les résultats de cet essai d'exploitation ont été décrits en détail dans le rapport « Rapport final sur l'essai d'exploitation SKK sur la ligne Täsch – Zermatt » [1]. Comme recommandé dans ce rapport, l'essai d'exploitation a pu être prolongé d'un an pour confirmer les tendances constatées et notamment suivre de près le comportement du système durant les mois chauds. Les résultats de la prolongation du test d'exploitation Täsch - Zermatt sont décrits dans le présent rapport.

### 1.1 Objectifs de la prolongation de l'essai d'exploitation

La prolongation d'un an de l'essai d'exploitation vise à confirmer, approfondir et compléter les enseignements tirés de la première année de ce test. En particulier, il doit :

- Observer le comportement du système SKK durant l'été, à des températures élevées. On suppose que la durée d'exposition au soleil et les températures plus élevées entraînent une volatilisation plus rapide du produit de conditionnement que pendant le reste de l'année.
- Agrandir l'échantillon de données avec des mesures supplémentaires et ainsi confirmer les résultats de l'essai d'exploitation de 2021-2022.

### 1.2 Description du prototype et de la ligne d'essai

La description détaillée du prototype et de la ligne d'essai peut être consultée dans le rapport final de l'essai d'exploitation de 2021-2022 [1]. Le présent rapport résume les principaux résultats.

#### 1.2.1 Informations générale

En raison des courbes étroites et de la charge élevée entre Täsch et Zermatt, ce tronçon a été défini comme un parcours d'essai. Après le premier essai d'exploitation, l'installation du SKK est maintenant en service depuis octobre 2021 jusqu'à aujourd'hui (mars 2024). Il convient de noter que les paramètres du système SKK - n'ont pas été modifiés depuis le début.

#### 1.2.2 Véhicules

Pour l'opération SKK, les quatre Shuttle BDeh 4/8 2051 - 2054 de la MGBahn ont été équipées d'un système embarqué SKK (voir le rapport final sur l'essai d'exploitation SKK Täsch - Zermatt [1]). Les mesures sur le véhicule BDeh 4/8 2054 n'ont pas été poursuivies lors de la prolongation de l'essai d'exploitation, car on trouve sur les essieux moteurs (essieux les plus critiques) de ce véhicule les mêmes matériaux de roue que sur le véhicule 2051 (KVR 600). Les rames automotrices à trois éléments disposent de quatre essieux moteurs à crémaillère répartis sur deux bogies. Les deux wagons aux extrémités sont attelés au wagon central et disposent d'un bogie à deux essieux.

Les informations relatives aux roues et à leurs matériaux sont données dans le tableau suivant :

Shuttle - véhicule n° :	2051	2052	2053
<b>Matériau roue motrices</b> (bandagées, $\varnothing$ nominal = 796mm)	KVR600	B7T	B6Z
<b>Matériau roues porteuses</b> (Roue monobloc, $\varnothing$ nominal = 685mm)	ER7	ER7	ER7

Tableau 1 - Vue d'ensemble des équipements et matériaux des véhicules

### 1.2.3 Ligne ferroviaire

Pour le projet SKK, la ligne Täsch - Zermatt a été équipée de balises RFID. Les caractéristiques de la ligne, telles que les positions des balises RFID (RFID-tags), sont inchangées et peuvent être consultées dans le « Rapport final sur l'essai en service SKK Täsch - Zermatt » [1] et dans les documents de référence mentionnés.

En outre, pour ce tronçon, les données relatives au tracé et aux paramètres dynamiques de conduite sont désormais disponibles chez RAILplus dans la base de données des installations fixes de la ligne n°117 (Datenbank feste Anlagen - DfA). Les données des rails et les indicateurs qui en résultent, tels que l'indice de position radiale et la conicité équivalente résultant du contact roue/rail peuvent ainsi être liés précisément au tracé et en fonction de l'état du profil de roues.

## 2 Mesures / surveillance et résultats sur l'usure des roues

Les mesures des profils de roues et de rails sont effectuées par les appareils Calipri C42 avec les licences correspondantes. Les résultats de ces mesures servent d'une part à évaluer l'évolution de l'interaction géométrique (comportement dans les aiguillages et prévention contre le déraillement) et l'interaction géométrique de contact (points de contacts exacts entre la roue et la rail) ainsi que l'usure des roues et du rail. Pour les roues, le changement de diamètre des roues est également mesuré car ils servent d'indicateur pour l'évaluation de l'usure des roues (nombre de kilomètres parcourus par réduction de 1 mm du diamètre des roues). La mesure du diamètre est effectuée sur le tour en fosse (TEF) car cette mesure possède des tolérances plus exigeantes que les mesures avec l'appareil Calipri-Wheel. La mesure du profil de roues est plus fréquente que celle des rails car, par expérience, le taux d'usure des roues est plus élevé que celui des rails. De plus, les intervalles entre chaque mesure sur les rails diffèrent selon les mois d'été d'août ou de septembre. Ceci est dû aux résultats de l'essai de 2021-2022 où l'usure principale se concentrait sur les mois d'été les plus chauds.

### 2.1 Stratégie de mesures de la prolongation de l'essai d'exploitation

#### 2.1.1 Agenda des mesures sur roues et rail

Le Tableau 2 indique le type de mesures et la date de la mesure. En octobre 2023, dans le cadre de la collaboration entre Virtual Vehicle (ViF), AC2T, l'université de Sheffield et le groupe de projet 2 de RAILplus, d'autres mesures ont été effectuées sur un véhicule et sur l'une des trois courbes névralgiques. Un aperçu plus détaillé des dates est disponible en annexe (voir chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Mesures	Intervalle de mesure / point de mesure
<b>Roues : Mesures avec TEF et Calipri</b>	Tous les deux mois
<b>Roues : Mesures des faux-rond avec appareil stationnaire</b>	En continu
<b>Rail : Coefficient de frottement</b>	Mensuel, durant l'été plus régulier (prsque chaque semaine)
<b>Rail : Rugosité de la voie</b>	KW 21, KW 31, KW 37
<b>Rail : Profil de rail</b>	KW 13, KW 21, KW 31, KW 37
<b>Rail : Passage de Sersa – wagon de mesures</b>	KW 21, KW 37
<b>Technode: Mesure de vibrations et de bruit avec une installation de mesure sur véhicule</b>	En continu

Tableau 2 – Agenda des mesures sur roue et rail

### 2.1.2 Analyse des mesures

Le Tableau 3 indique la portée des analyses et les personnes/compagnies responsables. Il s'agit de mesures qui sont effectuées d'une part périodiquement et d'autre part en continu. Les mesures des deux projets K2 ne sont pas reprises dans ce tableau. Comme ces mesures sont liées aux essais d'exploitation et qu'elles fournissent des informations importantes pour la création de modèles pour les calculs de simulation, les premiers résultats en découlant sont présentés dans ce rapport. Un aperçu plus détaillé de l'évaluation est fourni en annexe (voir chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Mesures	Étendue (compétence)
<b>Roues : Mesures avec TEF et Calipri</b>	Effectuer les mesures, surveiller le kilométrage km/mm (MGB), évaluer les profils (Roland Müller)
<b>Roues : Mesures des faux-rond avec appareil stationnaire</b>	Analyse sur la prolongation de l'essai d'exploitation (Müller BBM)
<b>Rail : Coefficient de frottement</b>	Récolte des mesures de coefficients de frottement, surveillance de l'évolution des coefficients de frottement (MGBahn)
<b>Rail : Rugosité de la voie</b>	Collecte des mesures de formation d'ondes de patinage, rapport sur les mesures enregistrées, comparaison avec le passé / Développement (KPZ)
<b>Rail : Profil de rail</b>	Récolte des profils au moyen de Calipri (MGBahn), évaluation des profils (Roland Müller)
<b>Rail : Passage de Sersa – wagon de mesures</b>	Récolte des mesures (Sersa), analyse ou comparaison avec les autres mesures (Roland Müller)
<b>Technode: Mesure de vibrations et de bruit avec une installation de mesure sur véhicule</b>	Poursuite des activités avec Technode Messsystem et analyses des données (This Wiederkehr)

Tableau 3 – Étendue et évaluation des mesures

### 3 Résultats des mesures d'usure des roues

Pour évaluer les impacts sur le matériel roulant, on examine les différentes valeurs mesurées sur les roues. Cela inclut l'usure abrasive des roues sur les surfaces de roulement et le boudin, les écarts de circularité ou les dommages selon la documentation photographique.

#### Définition de l'usure des roues

Par usure des roues, on entend l'enlèvement de matière sur les surfaces de roulement des roues en contact avec le rail. On distingue l'usure périphérique dans le profil transversal (comportement à court terme) de l'usure périphérique sous forme d'écarts de circularité (comportement à long terme). En outre, l'usure par reprofilage est considérée comme une conséquence des dommages subis sur les surfaces de roulement (ponctuellement sous forme de méplats ou d'éclats locaux, périodiquement sous forme de polygones, etc.). On compare à ce sujet les reprofilages enregistrés dans l'annexe 12.7.

L'usure des roues est évaluée de quatre manières différentes :

- Indicateur de l'usure des roues sous forme de réduction du diamètre sur le plan de mesure circulaire, exprimé en nombre de kilomètres parcourus par réduction d'1 mm du diamètre de la roue (voir chapitre 3.1).
- Modification des dimensions du boudin de roue  $S_d$  et  $q_R$  pour l'interaction géométrique et également du  $S_h$  pour l'usure abrasive de la bande de roulement (voir chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).
- Les écarts de circularité sur les roues sous forme de méplats et de polygones (voir chapitre 3.3).
- L'état des roues et les autres dommages sont répertoriés dans le dossier des MGBahn sous forme de documentation photographique (voir chapitre 3.4).

#### 3.1 Indicateur de l'usure des roues « Nombre de kilomètres par réduction du diamètre des roues de 1 mm »

Les trois illustrations suivantes montrent l'indicateur de performance des roues en fonction du "nombre de kilomètres parcourus par réduction de 1 mm sur le diamètre des roues". Cette valeur agit comme indicateur pour évaluer l'usure des roues au niveau du plan de mesure circulaire. Les graphiques du haut contiennent les valeurs obtenues avec le Calipri - Roue pendant toute la durée de l'observation. Ils représentent l'indicateur par roue et par essieu pendant toute la période d'essai. Sur les graphiques du bas, on trouve la valeur par mesure déterminé par le tour en fosse. Dans les graphes du haut, toutes les roues des essieux moteurs et porteurs sont répertoriées. Les essieux 1, 2, 7 et 8 en vert représentent les essieux porteurs et les essieux 3, 4, 5 et 6 en rouge représentent les essieux moteurs. Les valeurs des mesures individuelles sont très variables. Ceci est dû, d'une part, aux mesures de Calipri et plus précisément à l'imprécision de mesure ; il faut savoir que les taux d'usure sont très faibles car les intervalles de mesure sont courts. D'autres parts, des reprofilages ont été nécessaires pendant l'essai d'exploitation en raison de dommages à la bande de roulement. Dans la plupart des cas, ces dommages étaient dus à des méplats. Dans un cas, les dommages ont été causés par la formation de RCF (Roll Contact Fatigue) et dans un second cas, ils ont été causés par la formation d'une cavité sous l'action des semelles de frein. Ces dommages ont été éliminés par des reprofilages. Cela a notamment conduit à des baisses massives de l'indicateur de l'usure des roues sur les essieux moteurs (Shuttle 2051 sur la Figure 1 et Shuttle 2053 sur la Figure 3). Pour le Shuttle 2053, les essieux moteurs sont couplés électriquement. Les quatre roues des essieux moteurs doivent alors avoir une différence minimale de diamètre entre elles. Ce diamètre a ainsi dû être réduit d'environ 6 mm en raison des éclats et de l'entaille au niveau du boudin de roue causé par le sabot de frein, à la position AA5R sur la roue. Cela explique la réduction massive de l'indicateur de l'usure des roues à des valeurs comprises entre 5000 et 10000 km.

Sans dommages aux roues, les indicateurs des essieux moteurs oscillent entre 15'000 et 20'000 km. Les écarts sont cependant considérables, et même plus importants chez les essieux porteurs que moteurs. Pour ces essieux, les indicateurs se situent entre 30'000 et 50'000 km. En comparaison avec les valeurs de 2022, en 2023, l'indicateur d'usure est légèrement plus bas pour les essieux moteurs et de même ampleur pour les essieux porteurs. Dans l'ensemble, les valeurs de l'indicateur "Nombre de kilomètre par réduction du diamètre d'1 mm" avec conditionnement sont nettement plus élevées qu'en l'absence de conditionnement. Comme on le verra plus tard dans les résultats de l'installation de détection sur la voie, les dommages sur la surface de roulement causés par les méplats ne sont pas dus au conditionnement.

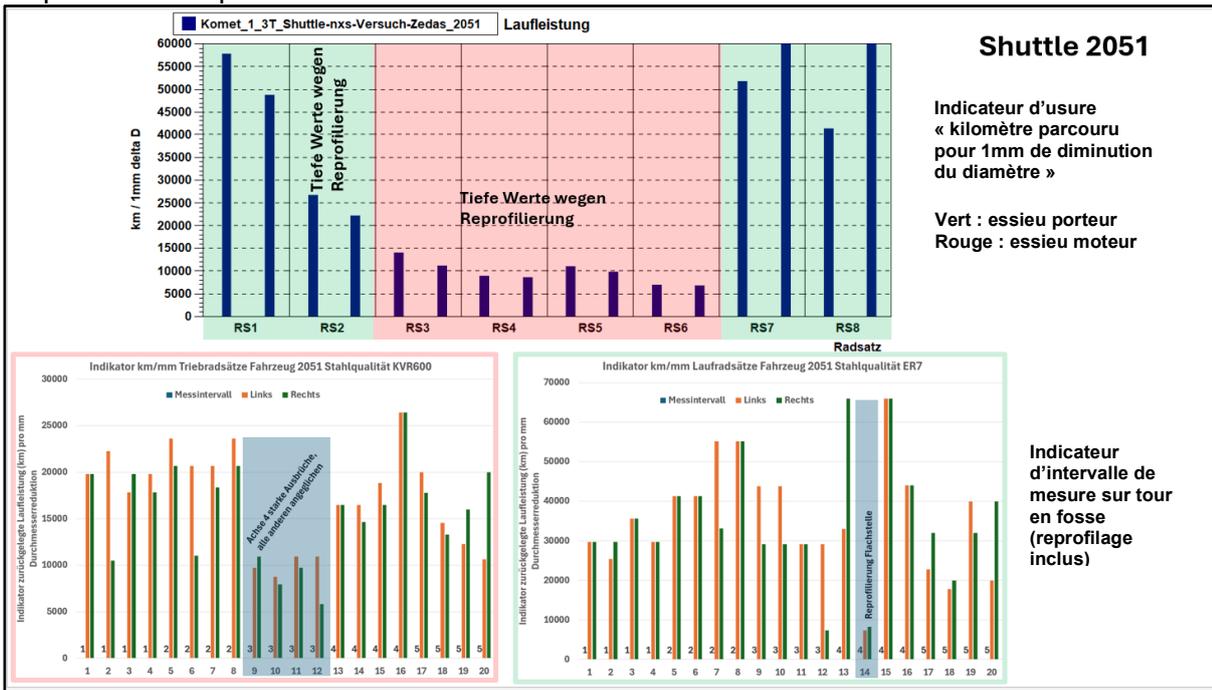


Figure 1 - Indicateur « Nombre de km par réduction de diamètre de 1 mm », Shuttle 2051

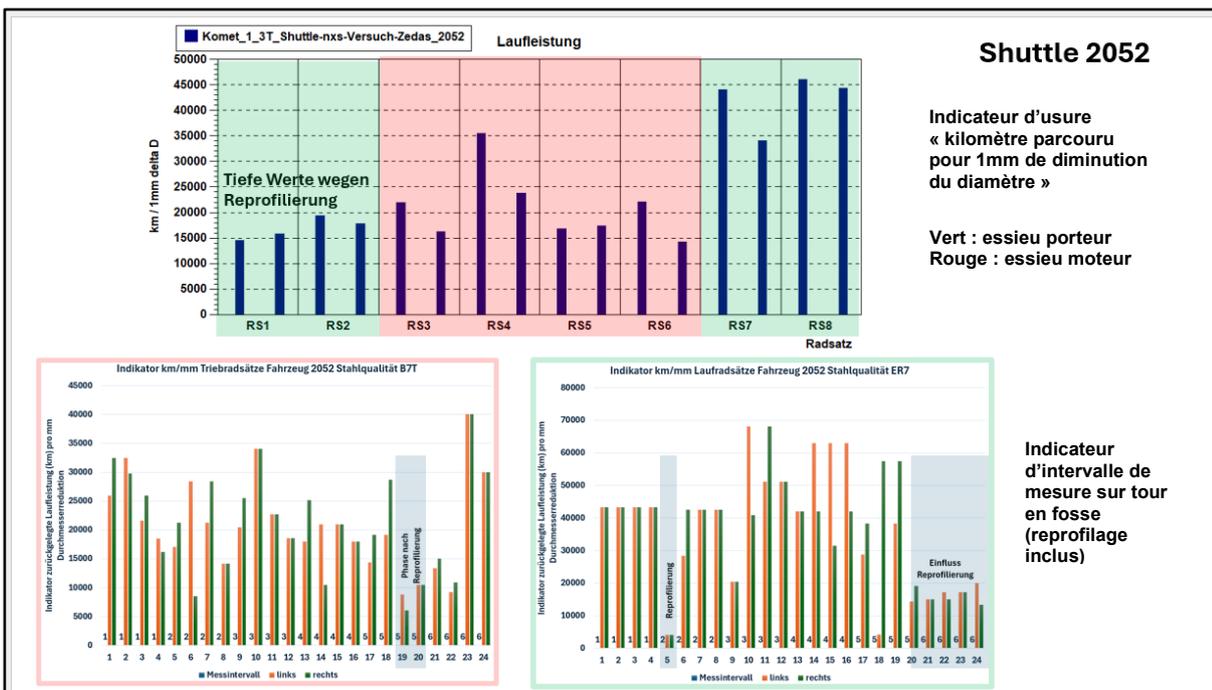


Figure 2 - Indicateur « Nombre de km par réduction de diamètre de 1 mm », Shuttle 2052



Figure 3 - Indicateur « Nombre de km par réduction de diamètre de 1 mm », Shuttle 2053

### 3.2 Usure abrasive des roues par rapport aux dimensions du boudin de roue

Pour l'usure abrasive sur le boudin de roue, les modifications des dimensions du boudins sont analysées. Les dimensions suivantes sont concernées : l'épaisseur  $S_d$ , la dimension  $q_R$  et la hauteur  $S_h$ . Les résultats pour les trois rames Shuttle sont présentés dans la Figure 4 à la Figure 6. Sur ces figures, les valeurs concernant la roue gauche sont en haut et celles pour la roue droite sont en bas. Les roues des essieux (appelées "Achse" sur la figure) sont de couleurs différentes. Les Achse 1, 2, 7 et 8 représentent les essieux porteurs et les Achse 3, 4, 5 et 6 représentent les essieux moteurs. L'axe des abscisses (horizontal) désigne la distance en km parcourue par le véhicule et l'axe des ordonnées (vertical), la valeur mesurée en mm.

#### 3.2.1 Tendances des dimensions du boudin de roue

Les essieux des trois rames motrices présentent un comportement similaire en termes de tendance. Les mesures de l'épaisseur des boudins  $sh$  et  $q_R$  montrent une courbe très plate et légèrement ascendante par rapport au kilométrage. Cela signifie que l'usure du boudin de roue est presque négligeable ou encore, extrêmement faible. Ceci est dû à une lubrification très efficace du boudin. Il faut toutefois tenir compte du fait que particulièrement dans les zones conditionnées, en comparaison avec les zones non-conditionnées, la force exercée sur le boudin (force de frottement sur le boudin) est réduite en conséquence de la diminution du coefficient de frottement sur la surface de roulement. La légère tendance à l'augmentation des dimensions sur les flancs des boudins indique une augmentation de l'épaisseur des boudins. Il existe un risque que l'épaisseur maximale du boudin autorisée par la norme RTE 29500 [2] pour les essieux de type A dépasse 27 mm pour des distances plus longues. Il convient de vérifier si cette tendance s'applique également aux rames plus modernes de la MGBahn et dans d'autres conditions d'utilisation. Si oui, il faudra prévoir un affaiblissement nominal des boudins. Comme on le verra ci-dessous, cette grandeur aura également un effet favorable sur l'indice de position radiale (cf. chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Les hauteurs des boudins ont naturellement tendance à augmenter avec l'augmentation du kilométrage. Malgré le conditionnement, cette valeur est nettement plus élevée pour les essieux moteurs que pour les essieux porteurs. Selon les études du projet P5 [3], il existe un lien direct entre le produit de la charge par essieu, l'empattement et la perte de charge dans les coudes. Rien que pour cette raison et en combinant avec la force de traction et le freinage dynamique, une usure des

surfaces de roulement des essieux moteurs nettement plus importante que celle des essieux porteurs est attendue. Par conséquent, l'augmentation de la hauteur des boudins en fonction du kilométrage est plus rapide pour les essieux moteurs que porteurs. Pour les deux types d'essieux, les forces de traction sont nettement réduites suite à la diminution du coefficient de frottement (résultat du conditionnement). Toutefois, comme la technique de freinage et de traction exige toujours un plus grand coefficient de frottement sur la bande de roulement que sur le boudin, il reste tout de même une certaine force d'adhérence produisant de l'usure lors des mouvements en courbe.

L'évolution des hauteurs de boudins sur les figures 4 à 6 montre que tous les véhicules ont dû être reprofilés plusieurs fois pendant l'essai d'exploitation. La cause se trouve au niveau des méplats et des dommages sur les surfaces de roulement (défaut de circularité). Ceci confirme encore une fois les constatations ci-dessus relatives à la réduction significative de l'indicateur d'usure lorsque les reprofilages doivent être effectués en raison de dommages de quelque nature que ce soit. Comme le montrent les illustrations, la hauteur maximale autorisée de la hauteur du boudin ne peut donc pas être utilisée.

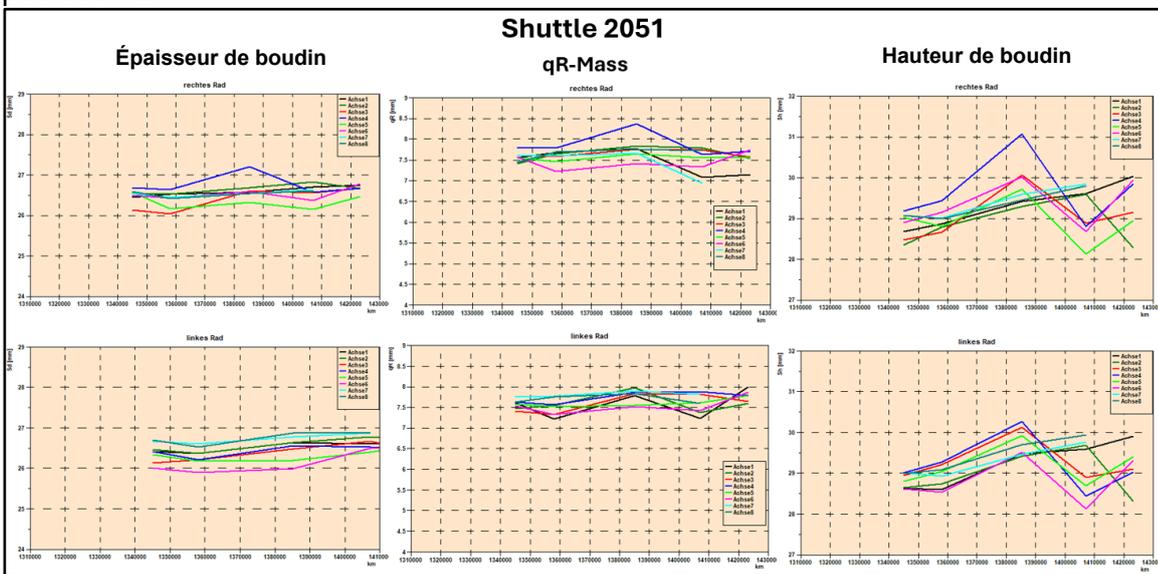


Figure 4 – Dimensions du boudin de roue, Shuttle 2051

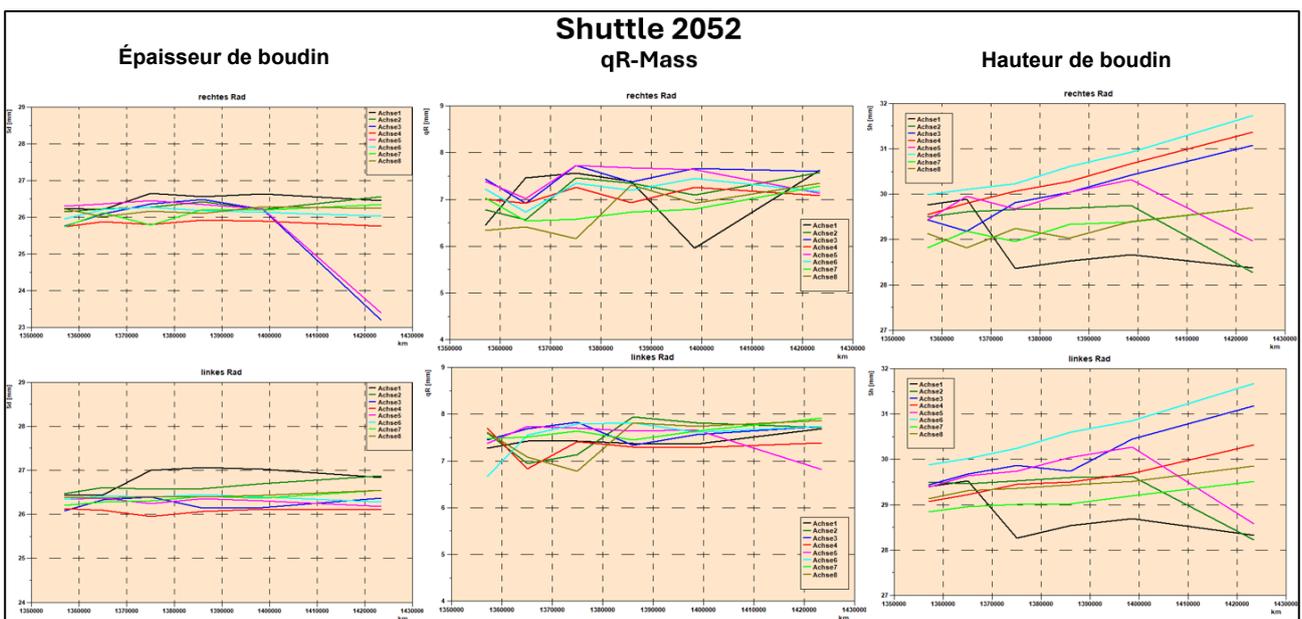


Figure 5 - Dimensions du boudin de roue, Shuttle 2052

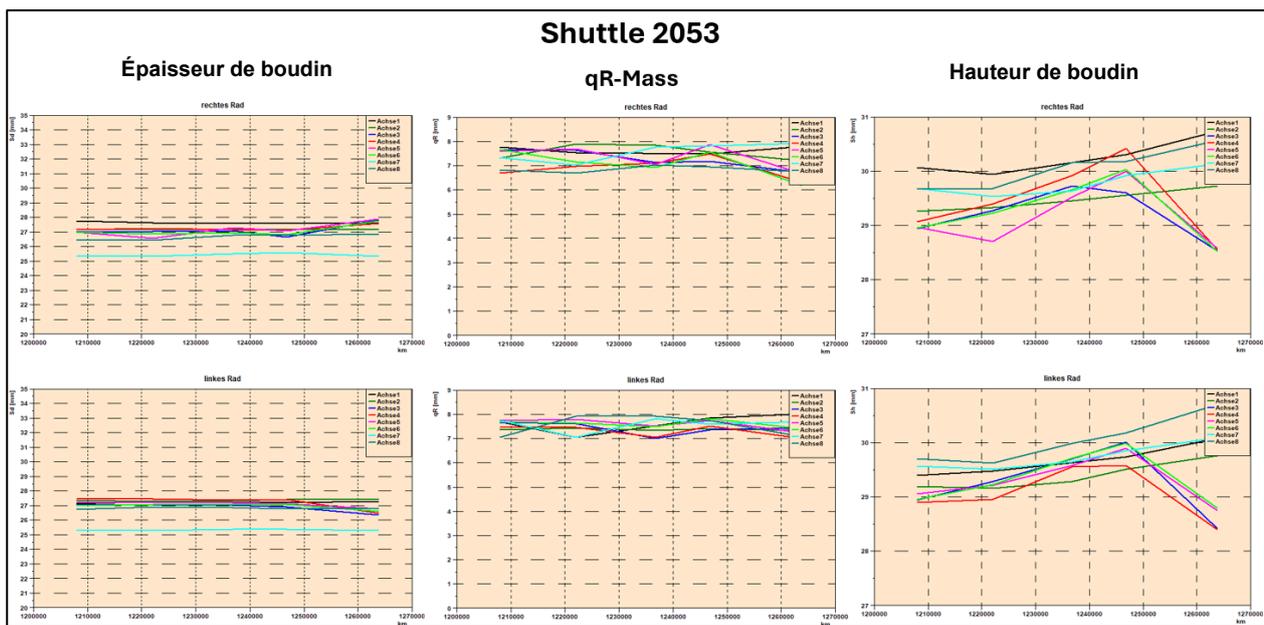


Figure 6 - Dimensions du boudin de roue, Shuttle 2053

### 3.2.2 Conclusion concernant les dimensions du boudin de roue

Les épaisseurs de boudin et la valeur  $q_R$  restent plus ou moins à leur valeur nominale ou augmentent légèrement. Cela peut être dû soit à la bonne lubrification des boudins de roue (SKS) soit au fait que les forces engendrées sur la roue dans les courbes restent faibles. Afin de vérifier cette deuxième hypothèse, il faudrait procéder à des simulations et analyser les flottes qui circulent sur le reste du réseau de la MGB. Si cette tendance se confirme, il faudrait s'attendre à un affaiblissement du boudin de roue. Comme le montre la géométrie de contact, cela aurait également un effet positif sur l'indice de position radiale dans les courbes étroites.

Pour les essieux moteurs, on constate une augmentation plus prononcée des hauteurs de boudins par rapport aux essieux porteurs. Ceci est dû d'une part à la charge plus élevée des essieux associé également à un empattement plus important, et d'autre part aux forces de traction. Il n'y a pas de différence entre les différentes qualités d'acier des bandages de roue. Le KVR 600 (Shuttle 2051) a toutefois subi des dommages dus à la fatigue de contact de roulement.

Dans l'ensemble, il est établi que les reprofilages dû à une hauteur de boudin maximale atteinte n'ont pas été nécessaires après les deux années d'essai, autant pour les essieux moteurs que porteurs. Cela signifie également que les réserves d'usure au niveau de la hauteur de boudin autorisée sur les Shuttle ne sont actuellement pas exploitées. Avec un indicateur d'usure de 1mm/20'000km, une performance de reprofilage très élevée serait possible.

### 3.3 Défaut de circularité évalué par une installation de mesure sur la voie [4]

Les défauts de circularité des roues peuvent prendre différentes formes. Ces phénomènes peuvent se produire de manière singulière et donc locale à un point sur la circonférence de la roue, périodiquement sur de la circonférence de la roue ou stochastiquement sous forme d'un mélange de phénomènes locaux et périodiques. Dans les courbes étroites, des écarts périodiques de circularité se produisent souvent, notamment en cas de charge par essieu plus élevée, ces défauts sont appelés « polygones ». Comme ces polygones sont provoquées par des forces de traction, on suppose que celles-ci ne se produisent plus grâce au conditionnement du contact rail-roue. En réduisant le coefficient de frottement avec le conditionnement, les risque est que le nombre de méplats augmentent. Pour détecter ces deux types de dommages sur la surface des roues (polygones et méplats), un système de détection a été installé en amont et à proximité immédiate de la gare de Täsch. Grâce à l'«intelligence artificielle», cette installation est non seulement capable de détecter les dommages, mais peut également distinguer s'il s'agit d'un méplat ou d'une

polygonisation en fonction de la forme du signal mesuré. Pendant les essais d'exploitation, le fournisseur du système a surveillé spécialement l'apparition de ces deux types de dommages sur les rames Shuttle. Par ailleurs, le trafic régulier a également été inclus dans la surveillance pour des raisons de comparabilité.

### 3.3.1 Système de surveillance des roues (WMS)

Le système de mesure de la circularité (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies [4], [5]) fournit depuis début mars 2022 des valeurs mesurées pour les polygones, les méplats et autres dommages éventuels dans le sens circonférentiel de la surface de roulement des roues. Le poste de mesure sur voies est installé peu après Täsch sur la ligne en direction de Zermatt.



Figure 7 - Installation du système de surveillance des roues WMS sur le Matterhorn Gotthard Bahn près de Täsch.

L'appareil de mesure de la voie identifie les trains ou véhicules entrants au moyen d'un système d'identification des véhicules. Le système d'identification des véhicules utilisé par les Chemins de fer rhétiques (RhB) a été mis en œuvre. Deux antennes RFID ont été installées sur la voie, qui lisent les étiquettes RFID installées à la MGBahn et au RhB et identifient ainsi les véhicules.

Des capteurs intégrés dans la voie enregistrent les vibrations et le WMS calcule les dommages de la bande de roulement à partir de signaux. Les dommages sont décrit par la mesure de deux indicateurs :

- Indicateur de polygones. Celui-ci indique le degré de polygonisation, la plage de longueur d'onde des polygones étant fixée à 4 cm - 40 cm.
- Indicateur de méplats. Il détecte les défauts singuliers, tels que les méplats
- Une échelle de 0 à 100 est utilisée pour évaluer les dommages. Les valeurs inférieures à 20 ne sont généralement pas critiques, les valeurs comprises entre 20 et 40 nécessitent une observation du véhicule, les valeurs supérieures à 40 indiquent un dommage significatif (Figure 8). Cette échelle s'applique aussi bien aux polygones qu'aux méplats.

Indicateur	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
État de la roue	Bon état		Défaut minime			Défaut significatif					

Figure 8 - État des roues et valeurs correspondantes de l'indicateur WMS (WMS = système de surveillance de la roue)

Le WMS peut être étalonné par une mesure comparative avec le l'appareil de mesure m|wheel, ce qui permet d'ajuster plus précisément les valeurs des indicateurs du WMS. La calibration permet également de définir plus précisément les limites d'exploitation des MGBahn ; limites à partir desquelles le remplacement des roues doit avoir lieu. Cet étalonnage n'a pas encore été effectué, mais le WMS fournit des résultats fiables même lorsqu'il n'est pas étalonné.

Les polygones sont généralement éliminés par reprofilage et, dans les cas extrêmes, un remplacement des essieux est effectué. Le système installé sur la voie à Täsch doit permettre de vérifier si :

- Le conditionnement sur le Shuttle a causé davantage de méplats sur les véhicules en raison de la valeur réduite du coefficient de frottement entre roue et rail.
- La formation et la croissance des polygones a diminué.

Les illustrations suivantes montrent à titre d'exemple les indicateurs de polygones et les indicateurs de méplats du Shuttle 2051 pour les essieux sélectionnés. Les points orange indiquent l'état des roues du côté droit, tandis que les points bleus indiquent l'état des roues du côté gauche. Le logiciel permet de visualiser individuellement l'état de chaque roue du véhicule.

La roue droite de l'essieu 4 du Shuttle 2051 montre une polygonisation qui commence à partir d'environ mi-juin 2022 et atteint une valeur de 25 en mars 2023. Le 22 mars, les roues de l'essieu ont été tournées (comme indiqué par la ligne verticale rouge). La polygonisation a été réduite, mais elle se régénère rapidement. Une cause de la formation rapide de nouveaux polygones peut être dû à une suppression incomplète du polygone lors du tournage. Le polygone augmente jusqu'à une valeur d'environ 20 en septembre 2023. Le 21.9.2023, un nouveau bogie a été installé. La polygonisation a donc été éliminée et n'est pas réapparu jusqu'à la fin de la période d'étude.

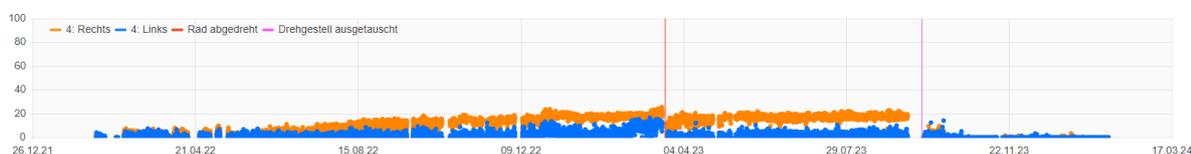


Figure 9 – Indicateur de polygones sur l'essieu 4 du véhicule Shuttle 2051, de mars 2022 à fin 2023

Le 22.03.2023, l'essieu a été tourné et un nouveau bogie a été installé le 21.9.

Début juin 2023, des méplats se sont formés sur les roues des essieux 7 et 8 du Shuttle 2054, qui ont ensuite commencé à se lisser (arrondi des roues ou des surfaces plates par un lissage). Fin décembre, il y a eu d'autres méplats sur les deux essieux qui ont dûs être éliminés par un tournage le 15.02.2023.

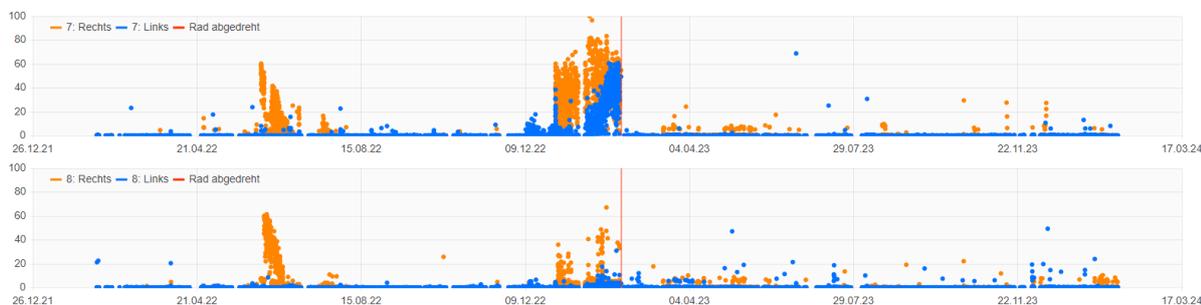


Figure 10 - Indicateur de méplats des essieux 5 et 6 du véhicule Shuttle 2054, de mars 2022 à fin 2023; les deux essieux ont été reprofilés le 15.02.2023

### 3.3.2 Polygonisation (cf. annexe 12.6.1)

La polygonisation du

- Véhicule Shuttle (2051 - 2054)
- Véhicule Komet (2011 – 2014 und 2021 - 2028)
- Voiture de commande articulée (non-motorisé) (2131 - 2134)

a été évaluée. Les résultats sont donnés pour tous les véhicules dans l'annexe.

Globalement, au cours de la période d'essai d'exploitation, plusieurs roues sur tous types de véhicules ont des polygones légers allant jusqu'à 20. Il n'y a cependant pas de polygonisation prononcée (valeurs > 40).

### 3.3.3 Méplats (cf. annexe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Pour la période 2022, 2023 et en particulier les mois d'octobre / novembre 2023, les méplats ont été comptés. Seul les méplats significatifs (valeurs d'indicateur élevées, > 40 sur plusieurs mesures) ont été prises en compte. Dans les tableaux suivants, le nombre de méplats en fonction des différents types de véhicules est indiqué.

Nombre de méplats Véhicule Komet (2011 – 2014)	Année 2022	Année 2023	Oct.-Nov. 2023
2011	3	0	0
2012	5	3	1
2013	0	4	0
2014	4	4	0
<b>Nombre de méplats total</b>	12	11	1
<b>Moyenne des méplats par véhicule</b>	3	2,75	0,25

Tableau 4 – Nombre de méplats sur la Komet (2011-2014) sur l'année 2022, 2023 et en particulier les mois d'octobre et novembre 2023

Nombre de méplats Véhicule Komet (2021 – 2028)	Année 2022	Année 2023	Oct.-Nov. 2023
2021	0	3	1
2022	3	4	0
2023	2	4	0
2024	2	3	2
2025	1	3	0
2026	1	1	0
2027	1	2	0
2028	4	5	0
<b>Nombre de méplats total</b>	14	25	3
<b>Moyenne des méplats par véhicule</b>	1,75	3,125	0,375

Tableau 5 - Nombre de méplats sur la Komet (2021-2028) sur l'année 2022, 2023 et en particulier les mois d'octobre et novembre 2023

<b>Nombre de méplats Véhicule Shuttle (2051 - 2054)</b>	<b>Année 2022</b>	<b>Année 2023</b>	<b>Oct.-Nov. 2023</b>
<b>2051</b>	4	4	1
<b>2052</b>	0	2	0
<b>2053</b>	0	3	1
<b>2054</b>	4	3	0
<b>Nombre de méplats total</b>	8	12	2
<b>Moyenne des méplats par véhicule</b>	2	3	0,5

Tableau 6 - Nombre de méplats sur les véhicules Shuttle (2051 - 2054) en 2022, 2023 et plus particulièrement au cours des mois d'octobre/novembre 2023

<b>Nombre de méplats Voiture de commande articulée (2131 - 2134)</b>	<b>Année 2022</b>	<b>Année 2023</b>	<b>Oct.-Nov. 2023</b>
<b>2131</b>	0	1	0
<b>2132</b>	1	0	0
<b>2133</b>	2	4	0
<b>2134</b>	2	1	0
<b>Nombre de méplats total</b>	5	6	0
<b>Moyenne des méplats par véhicule</b>	1,25	1,5	0

Tableau 7 - Nombre de méplats sur les voitures de commande articulée (2131 - 2134) en 2022, 2023 et plus particulièrement au cours des mois d'octobre/novembre 2023

### 3.3.4 Conclusion / remarques principales sur la circularité

Les tableaux sont analysés de la manière suivante :

- En 2023, 54 méplats ont été constatés sur les véhicules Komet, Shuttle et de commande articulée. En 2022, le nombre de méplats était de 39 et a augmenté de 15 (+38%).
- L'augmentation des méplats est principalement due à la hausse des véhicules Komet 2021-2028 et des Shuttle.
- Les véhicules Komet et les Shuttle présentent approximativement le même nombre de méplats (environ 3 par véhicule en 2023). C'est uniquement sur les véhicules de commande articulée, qu'on rencontre moins de méplats (environ 1,5 par véhicule en 2023).
- Sur les Shuttle, les méplats se trouvent à peu près aussi souvent sur les essieux porteurs que moteurs.
- Sur les véhicules Komet mesurés régulièrement, les méplats apparaissent à peu près aussi souvent sur les essieux porteurs que moteur.
- En 2023, aux mois d'octobre et de novembre, le nombre de méplats par mois était légèrement inférieur que le reste de l'année. Des coefficients de frottement plus élevés ont été constatés au cours de ces mois.

Les autres résultats sont:

- Les méplats sur les véhicules Komet sont plus fréquents en novembre et décembre que sur les autres mois (voir l'exemple à la Figure 11).
- Les véhicules Komet à trois compositions ont présenté un total de 23 méplats en 2022 et 2023, dont 8 en novembre et décembre (35%).
- Pour les véhicules Komet à quatre compositions, cela représentait un total de 39 méplats en 2022 et 16 en novembre et décembre 2023 (41%).
- Pour les véhicules Shuttle et les voitures de commande articulées, il n'y a pas eu d'augmentation particulière en novembre et décembre.

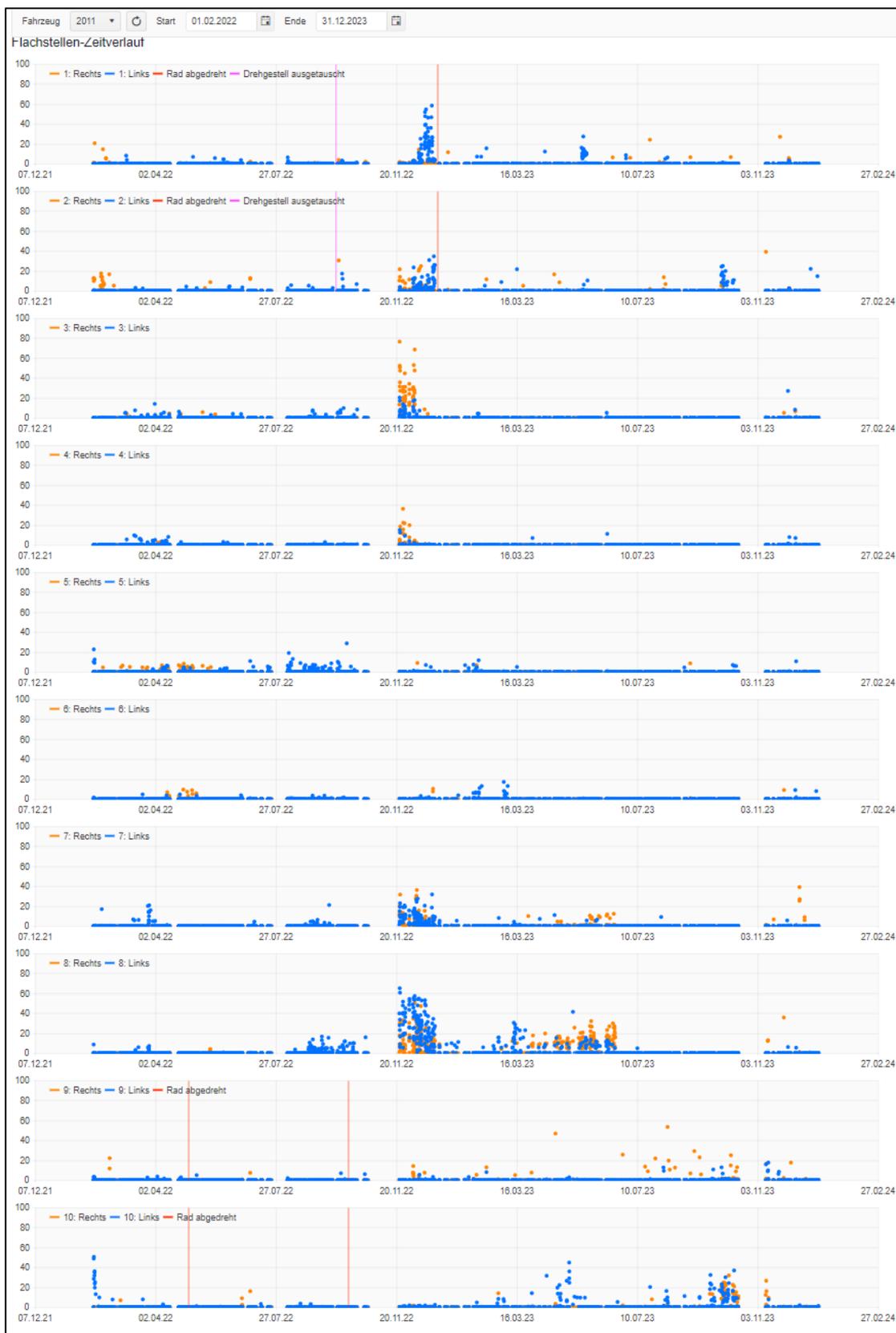


Figure 11 - Indicateur de méplat de la Komet 2021 de mars 2022 à fin 2023, où les méplats se produisent principalement en novembre et décembre.

Les méplats sont actuellement éliminés par reprofilage à partir d'une valeur d'indicateur de 60 et/ou après communications du personnel de conduite. Cela signifie toutefois que les véhicules présentant des méplats importants (mais avec indicateur < 60) peuvent rester en service pendant de longues périodes (également pour des raisons liées à la capacité du tour en fosse), et donc, les véhicules et leurs composants sollicitent grandement la zone de roulement non amortie ainsi que l'infrastructure.



Figure 12 - Indicateur de méplat des essieux 4 et 5 du Shuttle 2053 de mars 2022 à fin 2023. Les deux essieux présentent des méplats significatifs sur une longue période.

Müller BBM Rail Technologies recommande de réduire la valeur limite de l'indicateur à 40, valeur à partir de laquelle une roue est mise à reprofiler et de faire usiner les roues rapidement pour préserver les véhicules et l'infrastructure. Les petits méplats, quant à eux, restent intacts. Ils causent une charge moindre sur l'infrastructure et les véhicules et se lissent généralement d'eux-mêmes dans un délai raisonnable. Un indicateur de 40 représente généralement un bon compromis entre les dommages dus aux méplats et l'entretien.

### 3.4 État des surfaces de roulement

Les surfaces de roulement des roues ont été évaluées visuellement lors de chaque mesure du profil de roue. Chaque roue a été photographiée et enregistrée dans une base de données. De plus, d'éventuelles erreurs dans l'exploitation ont été détectées par le système de surveillance des roues WMS Müller BBM Rail Technologies installé à Täsch sur la voie (voir chapitre 3.3). Toutes les erreurs sur les surfaces de roulement corrigées par reprofilage sur le tour en fosse ont été enregistrées dans les bases de données relatives aux mesures du profil de roue et aux données de reprofilage.

#### 3.4.1 Reprofilage

Le Tableau 8 présente tous les reprofilages, les essieux concernés et les causes sous-jacentes. Les plus grandes réductions de diamètre sont dues à des dommages similaires à ceux constatés pour les Shuttle 2051 et 2053. Par rapport aux réductions de diamètre observées pour de plus grandes charges d'essieux sur voie normale, celles de l'essai d'exploitation sont nettement plus importantes. Sur les Shuttle 2051 et 2053, des erreurs sur un essieu ont conduit au reprofilage de tous les essieux moteurs (pour équilibrer les diamètres des roues). Ceci est dû à la liaison entre les deux essieux par le système de transmission électrique. Comme on peut le voir sur la Figure 1 et la Figure 3, cette liaison a entraîné une baisse significative de l'indicateur de performance de l'usure des roues des essieux moteurs. Le Shuttle 20252 a été touchée deux fois par les méplats, une fois sur le train n° 5 et une deuxième fois sur le premier bogie porteur. Cependant, étonnamment, dans certain cas, la réduction de diamètre lors de l'élimination du méplat est plutôt faible.

Sur le Shuttle 2051, des éclats de matière au niveau de la roue 4R ont déclenché un reprofilage et sur le Shuttle 2053, le reprofilage a été déclenché à cause de dommages causés par la formation d'un creux au niveau du congé qui relie le boudin à la surface de roulement de la roue. Ce creux a été lui-même formé par un contact avec la semelle de frein.

Véhicule Shuttle n°	Date du reprofilage	Essieux concernés	Cause	Réduction au diamètre de roue [mm]	
2051	22.03.2024	Essieu 4, équilibrage des roues restantes	Forts écaillages à la roue de l'essieu 4	RS 3L 1.70	RS 3R 2.40
				RS 4L 4.80	RS 4R 3.30
				RS 5L 2.90	RS 5R 3.30
				RS 6L 3.90	RS 6R 3.60
2052	26.06.2023	Essieu 5	Méplats	RS 5L 0.30	RS 5R 0.50
2052	14.08.2023	DG 1 (RS1 et RS2)	Méplats	RS 1L 0.70	RS 1R 0.60
				RS 2L 2.40	RS 2R 1.90
2053	25.07.2024	Essieu 5, équilibrage des roues restantes	Écaillages et creux sur le boudin de roue dû au sabot de frein RS 5R	RS 3L 3.50	RS 3R 3.90
				RS 4L 5.50	RS 4R 4.10
				RS 5L 4.20	RS 5R 3.50
				RS 6L 3.70	RS 6R 3.40

Tableau 8 – Rassemblement des reprofilages

### 3.4.2 Fatigue du contact de roulement (RCF – Rolling Contact Fatigue) roue 4R sur le Shuttle 2051

La Figure 13 présente, à gauche, deux images présentant chacune des tailles différentes d'écailllements dans le plan de mesure de la roue 4R du Shuttle 2051. Il s'agit certes d'une fatigue périphérique du contact de roulement, mais avec localement des caractéristiques différentes. Sur la droite, on peut observer une image pendant le processus de reprofilage. Les fissures sont encore visibles dans les zones les plus endommagées. Le reprofilage a eu lieu le 22.03.2023.

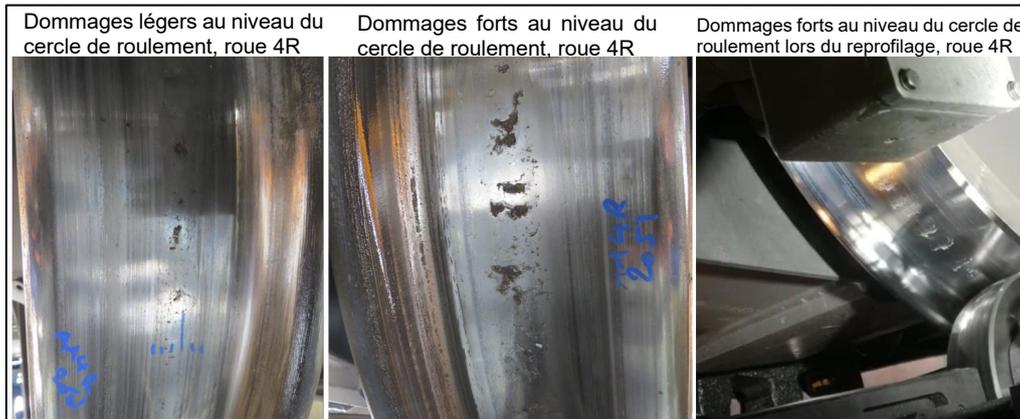


Figure 13 – Fatigue du contact de roulement à la roue 4R du Shuttle 2051

La Figure 14 montre les indicateurs géométriques de contact du Shuttle 2051 dans les passages en courbe avant le reprofilage du 22.03.2023. La courbe asymétrique du graphe de la fonction  $\Delta r$  indique une différence de diamètre entre les deux roues d'un même train. Après mesure des diamètres avec le Calipri - Wheel, la différence de diamètre est de 1,4 mm. En raison de la différence entre les hauteurs de boudin (de 1,6 mm), sur le tronçon de ligne entre Täschsand et Zermatt, l'indice de position radiale ne répond pas aux exigences pour les deux roues de l'essieu. Sur le tronçon entre Täschsand - Täsch, seule la roue gauche respecte les exigences. En règle générale, les différences de diamètre endommagent la roue qui possède le diamètre le plus faible.

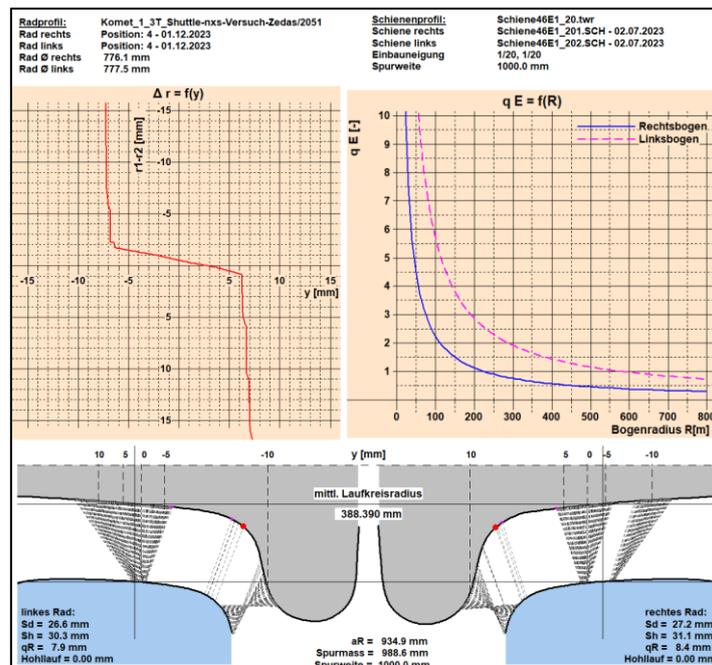


Figure 14 - Géométrie de contact de l'essieu 4 du Shuttle 2051 avant le reprofilage

### 3.4.3 Enregistrements de l'installation de mesure sur la voie pour le Shuttle 2051

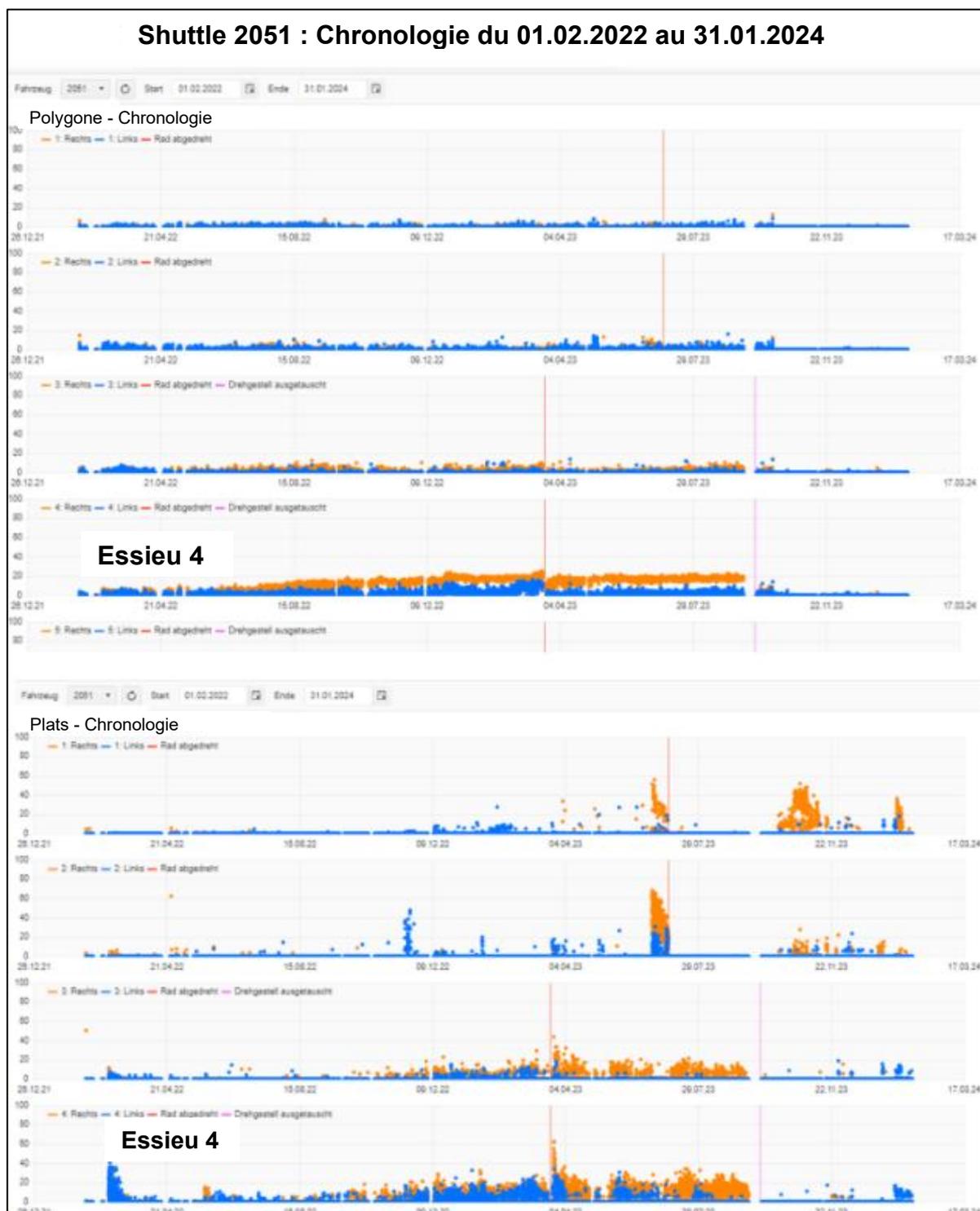


Figure 15 - Enregistrements des méplats et polygones au point de mesure du Wheel Monitoring System WMS Müller BBM sur les essieux 1 à 4 du Shuttle 2051

La Figure 15 présente les enregistrements des essieux 1 à 4 des passages du Shuttle 2051 entre le 01.02.2022 et le 30.01.2024. En haut de la figure, on retrouve l'évolution dans le temps des polygones et en bas celle des méplates. Le nuage de points oranges concerne les résultats de la roue droite et le nuage de points bleu, la roue de gauche.

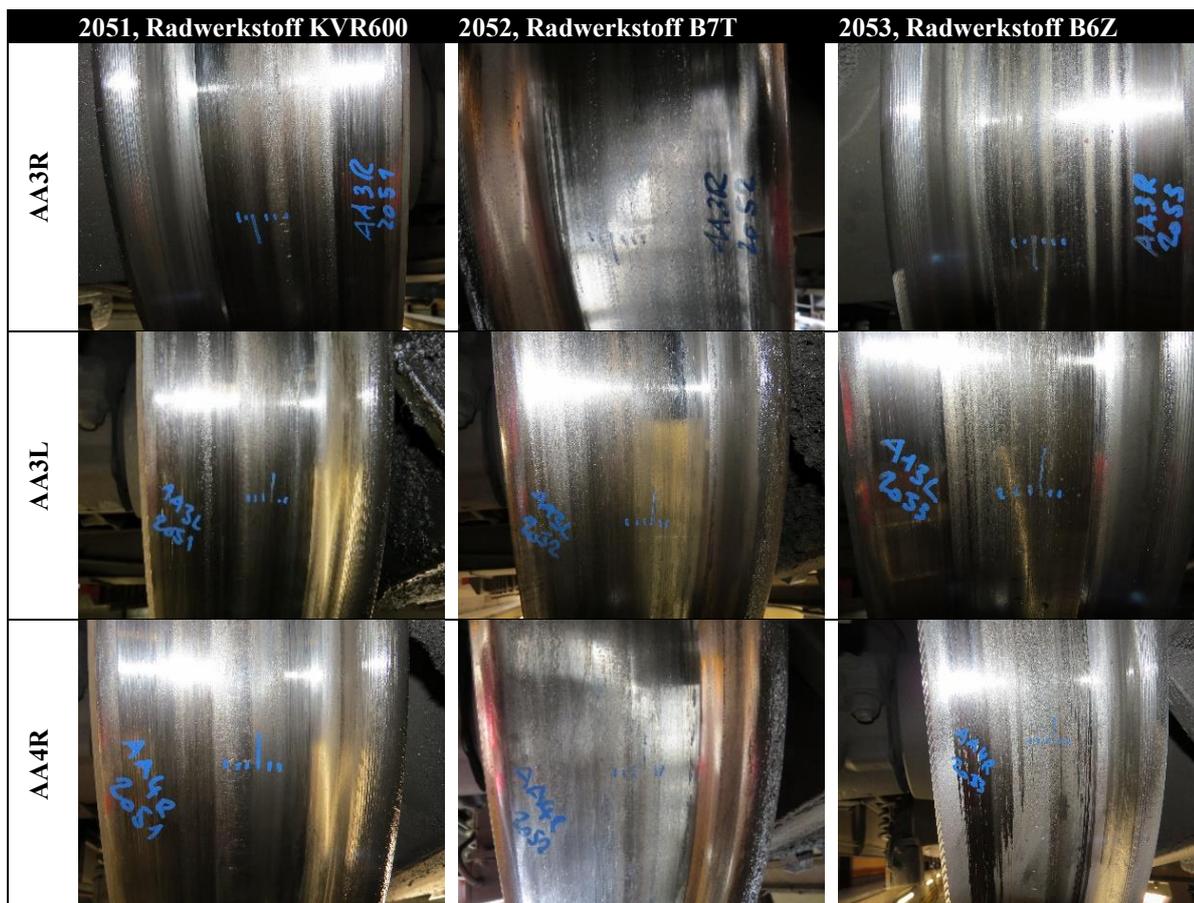
Pour la roue 4R, les polygones ont déjà montré une augmentation des valeurs bien avant le 22.03.2023 (date du reprofilage). Après le reprofilage, ces problèmes ont été réduits mais pas éliminés. En revanche, après le reprofilage, les valeurs ont augmenté pour la troisième et quatrième roue droite. Comme le diamètre de la roue 4R après reprofilage (773,7 mm) était déjà proche de la limite d'exploitation, un dernier reprofilage avant changement de bandage a été effectué.

La fatigue de contact périphérique a été interprétée comme un polygone. Étant donné que seules les classes « méplat » et « polygone » sont considérées pour l'identification du type de dommage, lorsqu'aucun méplat ne pouvait être identifié, les dommages et usures ont été affectés aux polygones. Dans le cas précédent, la fatigue de contact périphérique a donc été associée à un polygone. Ce manque de précision est dû à une coopération insuffisante entre le fabricant de l'installation et l'exploitant du réseau ferroviaire et au manque de retour d'expérience.

Le système devrait être étendu pour les applications futures conformément à la classification des écarts de circularité détaillé dans le livrable 3.2.1-3 du projet P3.

### 3.4.4 Documentation photographique

Les contrôles visuels ont donné une bonne image globale des surfaces de roulement des véhicules Shuttle. Pour illustrer ce point, le Tableau 9 présente la documentation photographique actuelle de chaque Shuttle et du train. Ces images constituent la preuve que les dommages sont très peu visibles. Dans l'ensemble, au niveau des roues, les surfaces de roulement étaient en parfait état pendant toute la durée de la prolongation de l'essai d'exploitation. Cette constatation s'est établie grâce à la documentation photographique établie par la MGB.



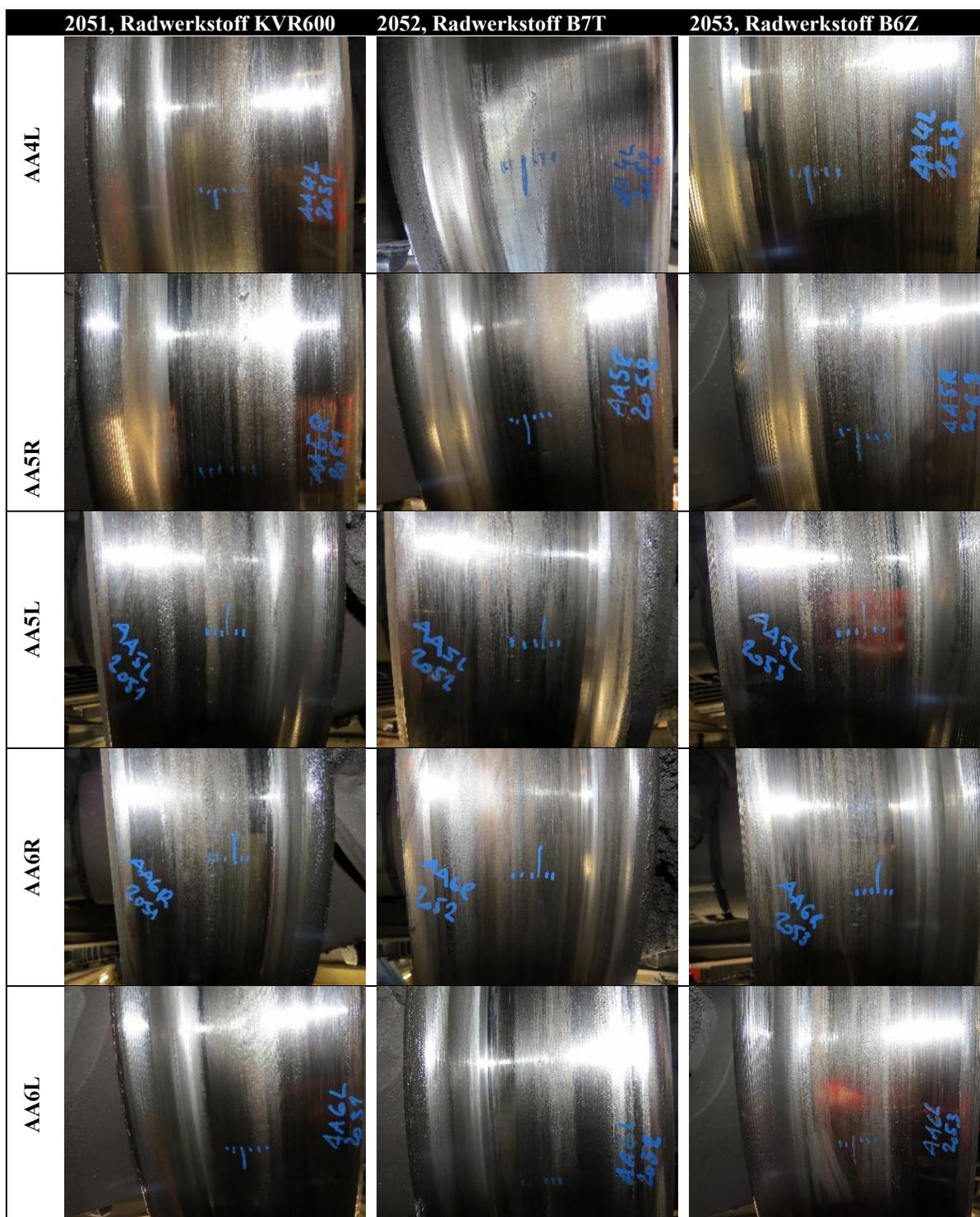


Tableau 9 - Documentation photographique des roues motrices du Shuttle après un kilométrage prolongé

### 3.4.5 Remarques sur l'état des surfaces de roulement

Les surfaces de roulement des roues sont en très bon état. Les matériaux de roue B6Z et B7T n'ont pas subi de dommages dus à la fatigue des contacts de roulement (RCF). La roue du véhicule 2051 de matériau KVR600 a parcouru environ 114000 km depuis le dernier reprofilage. En raison des deux zones au-dessus de la circonférence de la roue, qui sont dues à l'interaction avec les semelles de frein, une légère cavité s'est formée dans la zone intermédiaire de la bande de roulement. Cette surface présente une rugosité plus grande que les zones interagissant directement avec les semelles de frein.

## 4 Résultats des mesures des rail

Pour évaluer les effets sur le rail, les différentes valeurs enregistrées au niveau des rails sont récoltées et examinées. Il s'agit de la rugosité du rail (voir chapitre 4.1), de l'usure abrasive des rails (voir chapitre 4.2) et des mesures de coefficient de frottement (voir chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

### Définition de l'usure des rails

L'usure des rails est définie par l'enlèvement de matière sur les surfaces de roulement des rails en contact avec les roues. On distingue l'usure continue dans le sens de la voie dans le profil transversal (comportement survenant sur un temps court) et l'usure ondulatoire, notamment sur les surfaces de roulement des rails internes aux courbes (comportement sur le long terme). Par ailleurs, l'usure est considérée comme une conséquence des dommages subis sur les surfaces de roulement (empreinte de patinage, fissures (headchecks ou fissures locales). La suppression des ondulations et des petites fissures à un stade précoce est réalisée par meulage du rail, qui peut être considéré comme une solution analogue au reprofilage des roues. En cas de dommages plus graves, les rails sont remplacés.

Contrairement aux roues, où l'usure est influencée par un mélange de différentes zones de la voie, l'usure des rails est dépendante de la charge de parcours (généralement caractérisée en tonnes brutes par an) et des caractéristiques d'interaction avec les véhicules (guidage, traction), en particulier selon les conditions du parcours. Comme l'a montré l'expérience de la MGBahn, la dureté des rails utilisée a une influence significative sur la formation d'usure ondulatoire, en particulier dans les courbes avec de petits rayons. Les courbes spécialement surveillés lors de l'essai d'exploitation avec SKK ont une dureté de rail de 350HB.

En plus des dommages locaux importants et du remplacement des rails lorsque les valeurs limites W1, W2 et W3 affectant la résistance du rail sont atteintes, l'élimination de l'usure ondulatoire par meulage des rails entraîne des dépenses importantes. Ces derniers se produisent surtout sur les rails internes des courbes aux rayons plus faibles. Avant l'application de la SKK, les rails du tronçon Täsch-Zermatt devaient être meulés deux fois par an en raison de la formation d'ondulation excessive dans les très petits rayons de courbure.

### 4.1 Mesure de la rugosité du rail [6]

Des mesures ont été effectuées dans les trois courbes situées au-dessus de la zone de Kalter Boden. Ces courbes présentent des virages très serrés avec des rayons de 100 m et se situent dans une section non conditionnée.

On distingue en principe les tronçons de voie avec activation du conditionnement et ceux où le produit a été déporté. Le déport a lieu aussi bien en descente qu'en montée, tous les points de mesure se trouvant dans cette zone de déport. Les points de mesure sont nettement plus éloignés de la zone d'activation du conditionnement à Zum Biel (Brücke et Portal) qu'à Lüegelwang (voir Figure 34 et Tableau 10). Malgré cela, aux trois points de mesure, les valeurs de coefficient de frottement mesurées par le tribomètre ne diffèrent généralement guère entre elles (voir chapitre 0).

La rugosité des rails est mesurée à l'aide d'un appareil approprié (voir annexe 12.3 pour la description). Ce dernier s'utilise à la main en glissant l'appareil le long de la courbe. Il mesure, avec trois capteurs, la variation verticale du champignon du rail par rapport à une référence coulissante. La rugosité est ainsi mesurée sur trois endroits à une distance de 5 mm l'une de l'autre et les données mesurées sont évaluées conformément à la norme EN 15610 [7].

Les mesures de rugosité des rails sont effectuées dans les courbes suivantes :

Lieu	SKK	Rayon	De [km]	À [km]
Zum Biel Portal	Oui	110	41.951	41.941
Zum Biel Brücke	Oui	110	42.053	42.025
Lüegelwang	Oui	95	42.556	42.5197

Tableau 10 - Sélection de courbes pour les mesures de rugosité des rails

#### 4.1.1 Évolution de la rugosité du rail [6]

Les courbes considérés ont été meulées pour la dernière fois en octobre 2022. En 2023, les mesures de rugosité des rails ont été effectuées aux dates indiquées dans le Tableau 11.

Désignation	Date	Description	Remarques
T1	25.05.2023	8 mois après le meulage	
T2	03.08.2023	10 mois après le meulage	
T3	30.08.2023	11 mois après le meulage	
T4	22.09.2023	12 Mois après le meulage	

Tableau 11 - Dates des mesures de rugosité des rails en 2023

Des mesures supplémentaires sont utilisées pour établir une comparaison entre la croissance des ondulations au cours de cette période et des périodes de mesure précédentes. Pour cela, les mesures finales de rugosité avant le meulage des rails en 2018 et 2022 seront prises en considération. La première sert à comparer la croissance de l'ondulation avant l'utilisation du SKK et la seconde à comparer la croissance avec la période de mesure précédente où le SKK a déjà été utilisé. Le Tableau 12 ci-dessous résume les mesures supplémentaires.

Désignation	Date	Description	Remarques
Sans SKK - 2018	23.05.2018	8 mois après le meulage	
Avec SKK - 2022	27.09.2022	12 mois après le meulage	

Tableau 12 - Dates de mesure de la rugosité des rails avant 2023

Selon la norme EN 15610, la rugosité du rail est exprimée sous forme de niveau de rugosité acoustique  $L_r$  en dB et représentée dans un spectre de bandes en tiers d'octave en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ . Cette valeur est calculée à partir du spectre de rugosité acoustique, avec une valeur de référence de la rugosité de 1  $\mu\text{m}$ . Plusieurs mesures ont été effectuées dans les courbes considérées aux dates indiquées au Tableau 11. Les mesures présentées dans les diagrammes suivants se rapportent à la première mesure du point central du dispositif de mesure (capteur central dans le miroir de conduite) sur les rails intérieur et extérieur de la courbe. Les désignations indiquent également, en plus du nom des mesures (T1-T4), si le SKK a été utilisé et combien de mois après le dernier meulage la mesure a été effectuée (8M = 8 mois après la rectification). Lors de l'évaluation, on peut constater que la rugosité du rail est composée d'une multitude de longueurs d'onde. Toutefois, seules les valeurs qui se situent le plus au-dessus de la courbe limite EN ISO 3095 par ordre d'amplitude et qui ont connu la croissance la plus forte pendant cette période de mesure sont intéressantes. Ces dernières sont identifiés dans les courbes considérées et sont désormais désignées comme des longueurs d'onde dominantes.

#### 4.1.1.1 Zum Biel Portal

Douze mois après le dernier meulage, les mesures d'ondulation avec SKK sur le rail intérieur de la courbe montrent des ondulations dans une plage de longueurs d'onde de 50 à 63 mm. Ces résultats sont très légèrement supérieurs à la courbe limite que l'on trouve dans la norme EN ISO 3095 et montrent une croissance plus lente par rapport aux périodes de mesure précédentes (périodes sans SKK). On peut également voir que, dans les deux cas, la plage de longueur d'onde des ondulations est presque similaire (longueur de 50 mm qu'avec 63 mm). Ceci est la continuation de la tendance de la période de mesure précédente, bien qu'on constate un léger changement des longueurs d'onde dominantes depuis l'utilisation du SKK vers une plage de longueurs d'onde plus basse.

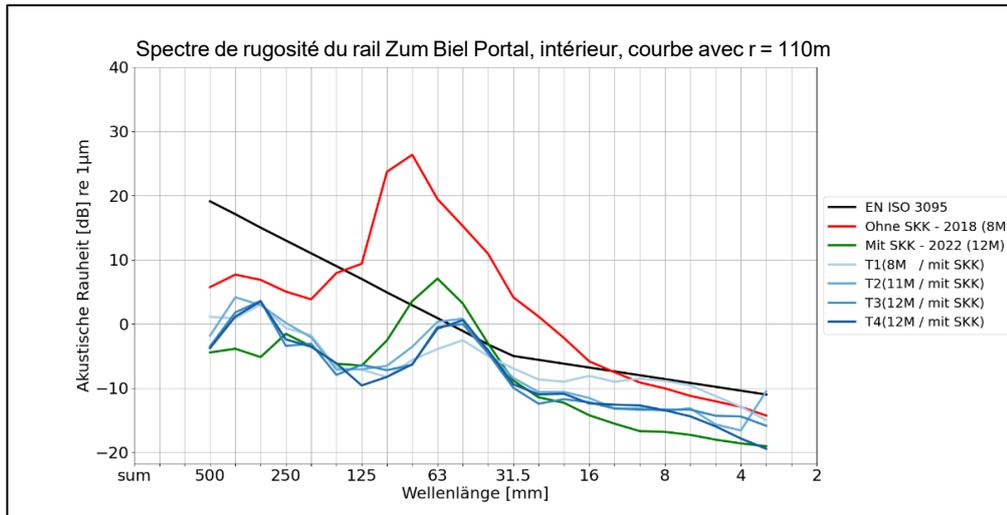


Figure 16 - Spectres de rugosité des rails «Zum Biel Portal», courbe intérieur

Avec l'utilisation de SKK, le rail extérieur de la courbe ne possède aucune trace d'ondulation ou de début de croissance d'ondulation. Ce rail peut être qualifié de lisse, selon l'évaluation de la Figure 17.

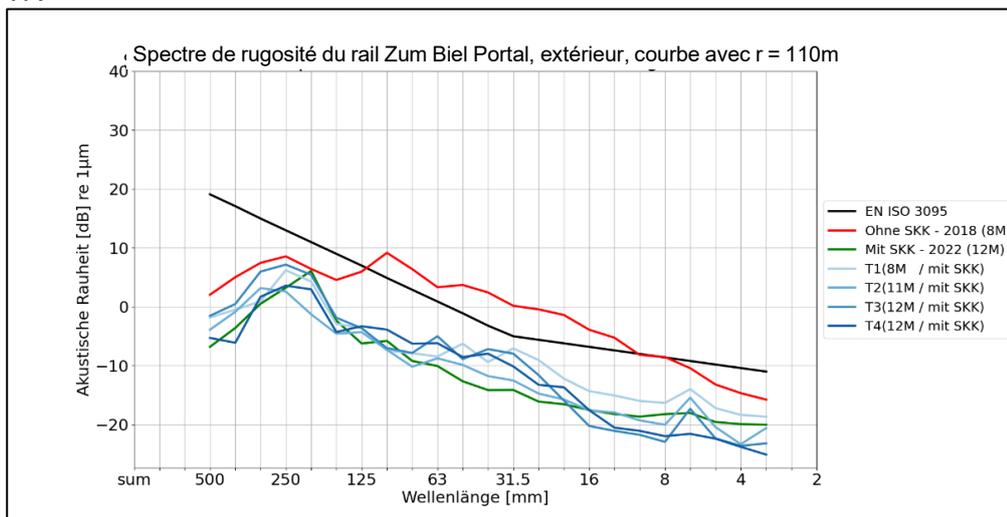


Figure 17 - Spectres de rugosité des rails «Zum Biel Portal», courbe extérieur

#### 4.1.1.2 Pont de Zum Biel

Douze mois après le dernier meulage, les mesures d'usure ondulatoire sur le rail intérieur de la courbe montrent des ondulations dans une plage de longueurs d'onde de 40 à 80 mm (voir Figure 18). Mais ce qui ressort particulièrement reste la croissance de l'usure ondulatoire dans la plage de longueurs d'onde de 40 à 50 mm. Ces derniers augmentent régulièrement sur toute la période de mesure jusqu'à ce qu'ils soient nettement au-dessus de la courbe limite de l'EN ISO 3095. Les ondulations dans la plage des 63-80 mm de longueur d'onde, eux, n'évoluent pas. Aucune mesure de référence n'ayant été effectuée après le meulage en octobre, il est impossible de déterminer si les ondulations ont été complètement supprimées. Ces résultats suivent la tendance de la période de mesure précédente, où on a également constaté un changement des longueurs d'onde dominantes depuis l'utilisation du SKK vers une plage de longueurs d'onde plus basse. Cette courbe montre également une croissance plus lente que lors des périodes de mesure précédentes.

Le pic dans la bande de tiers d'octave de 6,3 mm ( $\lambda < 1$  cm), visible sur presque tous les spectres de rugosité des rails, et en particulier sur les rails extérieurs à la courbe, est une conséquence du meulage par meules rotatives. Cette déformation est atténuée avec l'augmentation du passage des trains, ce qui signifie que le rail est nettement plus rugueux dans la zone à ondes courtes  $\lambda < 4$  cm.

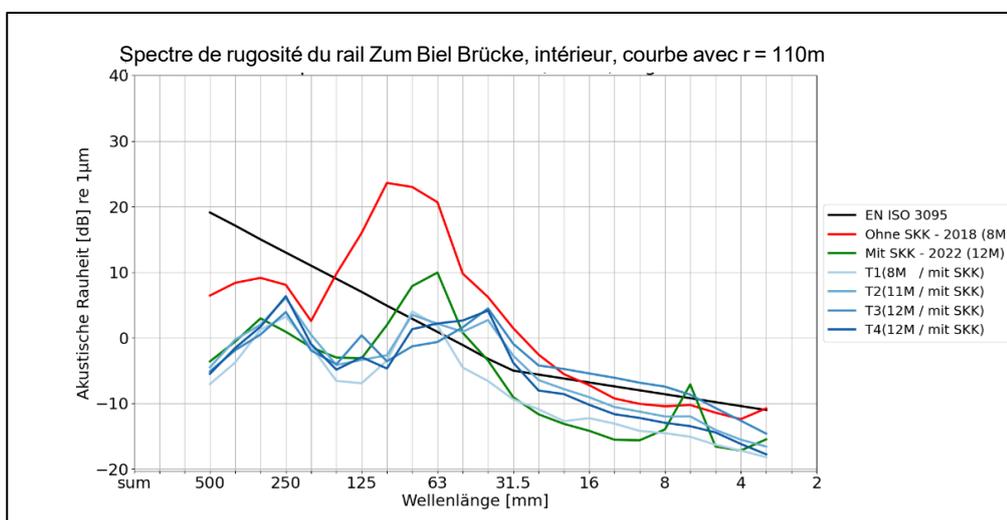


Figure 18 - Spectres de rugosité des rails «Pont de Zum Biel», courbe intérieure

Avec l'utilisation de SKK, le rail extérieur de la courbe ne possède aucune trace d'ondulation ou de début de croissance d'ondulation. Ce rail peut être qualifié de lisse, selon l'évaluation de la Figure 19.

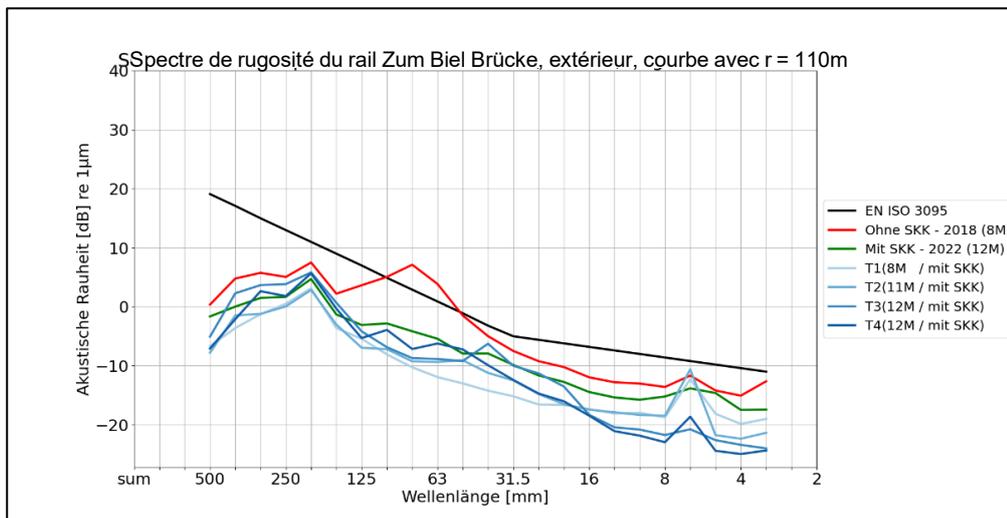


Figure 19 - Spectres de rugosité des rails «Pont de Zum Biel», courbe extérieur Lüegelwang

#### 4.1.1.3 Lüegelwang

Douze mois après le dernier meulage, les mesures d'ondulation sur le rail intérieur de la courbe montrent des ondulations dans une plage de 63 à 80 mm (voir figure 20). L'usure ondulatoire dominantes restent donc dans la même plage de longueurs d'onde que lors des périodes de mesure précédentes. Comme dans la courbe Zum Biel Portal, l'usure ondulatoire sont juste au-dessus de la courbe limite EN ISO 3095 et montrent une croissance plus lente par rapport à toutes les périodes de mesure passées. Cela correspond à une nette amélioration de la réduction des ondulations par le SKK, puisque dans la dernière période de mesure avec SKK, en plus de la croissance plus faible des plages de longueur d'onde autour des 100 mm, une évolution presque identique à la faible croissance de l'état non-conditionné a été atteinte.

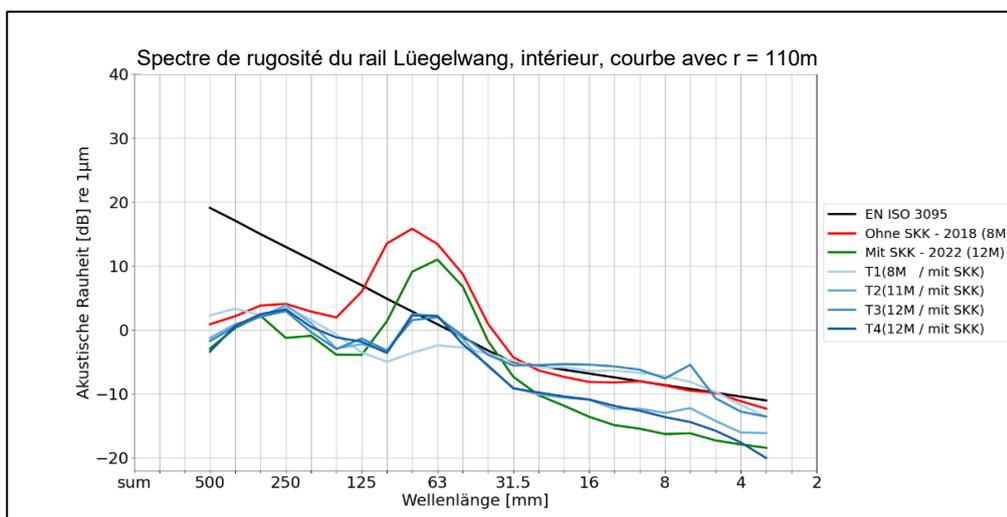


Figure 20 - Spectres de rugosité des rails «Lüegelwang», courbe intérieur

Avec l'utilisation de SKK, le rail extérieur de la courbe ne possède aucune trace d'ondulation ou de début de croissance d'ondulation. Ce rail peut être qualifié de lisse, selon l'évaluation de la Figure 20.

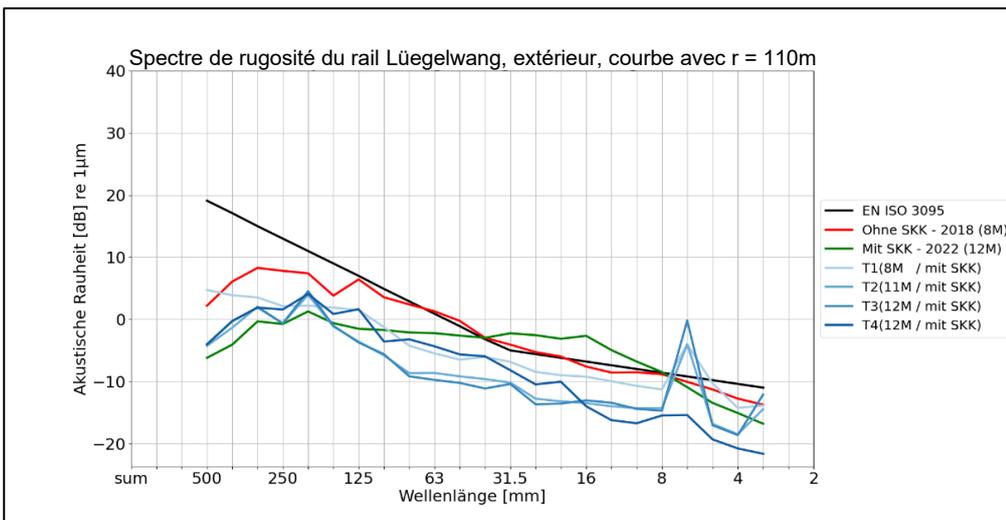


Figure 21 - Spectres de rugosité des rails «Lüegelwang», courbe extérieur

#### 4.1.1.4 Remarques sur l'évolution de la rugosité des rails

Si l'on compare les résultats avec les mesures de la période précédente, on constate que dans les courbes du portail et du pont de Zum Biel, la région des longueurs d'onde dominantes a continué à se déplacer vers des longueurs d'onde plus courtes. On ne peut pas encore donner de raison à cette tendance, mais des recherches plus approfondies seront nécessaires. En outre, 12 mois après le meulage, la croissance de l'usure ondulatoire est nettement inférieure dans toutes les courbes par rapport à la période de mesure précédente où le SKK a également été utilisé. La croissance de l'usure ondulatoire s'est nettement accrue durant les mois chauds d'été. Les mesures des ondulations n'ayant pas été effectuées aux mêmes intervalles en 2023, il est impossible d'évaluer la variation du taux de croissance sur l'année. Cette évaluation est effectuée sur la base des mesures d'accélération effectuées avec le système de mesure Technode (voir chapitre 7).

Étant donné qu'aucune mesure de référence n'a été effectuée après le dernier meulage en octobre 2022, il est impossible d'évaluer si l'usure ondulatoire développées au cours de la période de mesure 2021-2022 ont pu être complètement éliminées.

Le Tableau 13 résume les longueurs d'onde dominantes. Comme il n'y a pas qu'une seule longueur d'onde dominante dans les courbes considérées, la longueur d'onde la plus nettement au-dessus de la courbe limite ISO EN 3095 est indiquée par  $\lambda_1$  et la deuxième plus haute  $\lambda_2$ .

Lieu	Rayon [m]	$\lambda_1$ [mm]	$\lambda_2$ [mm]
Zum Biel Portal	110	50	63
Zum Biel Brücke	110	40	50
Lüegelwang	95	63	80

Tableau 13 - Longueurs d'onde dominantes dans les courbes observées

#### 4.1.2 Formation d'ondulations [6]

La formation d'usure ondulatoire est un phénomène à fréquence constante (engl. constant-frequency phenomena [8]). Cela signifie qu'à une fréquence constante, la variation du travail de la force de frottement, ou une autre grandeur physique pertinente pour l'usure, est responsable de la formation d'irrégularités de surface avec une longueur d'onde déterminée. Cette variation résulte de l'excitation d'une fréquence de résonance d'un composant du système. La relation entre la fréquence concernée et la longueur d'onde résultante est la suivante :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [1]$$

où  $\lambda$  représente la longueur d'onde,  $v$  la vitesse du véhicule et  $f$  la fréquence. La fréquence de résonance de chaque composant du système n'est pas clairement décrite dans la littérature. De telles informations sont impossible à déterminer, car les composants concernés peuvent présenter des fréquences propres différentes selon le type de véhicule et de voie. Il est principalement fait référence aux premiers modes de torsion et de flexion des essieux, mais aussi aux oscillations du rail dans le sens vertical ou latéral. En utilisant les mesures d'inertie des essieux et du rail décrites au chapitre 6, ce chapitre tente d'identifier une plage de fréquences dans laquelle se trouvent les modes qui pourraient être responsables de la formation des ondulations dans les courbes considérées.

Il convient de tenir compte de certains points lors de la détermination des fréquences à prendre en considération. Comme l'usure ondulatoire n'ont pas une longueur d'onde constante, mais se déplacent dans une zone, une plage de fréquences est calculée ici aussi. En outre, bien qu'une vitesse de véhicule soit définie pour les virages, des véhicules circulent dans la réalité dans ces virages à des vitesses inférieures. Ceci peut à son tour entraîner une augmentation, mais aussi une réduction théorique de la plage de fréquences considérée. La répartition réelle des vitesses n'étant pas connue, on calcule avec la vitesse prédéterminée du véhicule. En outre, l'évaluation des longueurs d'onde selon EN 15610 a été effectuée dans un spectre de bandes en tiers d'octave. Cela signifie que toutes les longueurs d'onde sont combinées dans une bande de tiers d'octave. Les informations permettant de déterminer si la longueur d'onde réelle de l'onde de glissement se trouve

à l'extrémité inférieure ou supérieure de la bande sont perdues, ce qui entraîne une dispersion supplémentaire de la gamme de fréquences. Bien que ces facteurs ne soient pas encore pris en compte dans l'évaluation du présent rapport, ils sont néanmoins mentionnés pour montrer qu'il subsiste encore quelques incertitudes. Les longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  indiquées dans le Tableau 13 sont ensuite converties en fréquences qui définissent la fréquence considérée de l'analyse de mobilité (voir Tableau 14).

Lieu	Vitesse du véhicule [km/h]	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]
Zum Biel Portal	38	211	167
Zum Biel Brücke	38	263	211
Lüegelwang	38	167	131

Tableau 14 - Limites de la gamme des fréquences considérées

Les limites de la gamme des fréquences considérées sont déterminées par les valeurs maximales et minimales de  $f_1$  et  $f_2$  à 131-263 Hz. Il est également à noter que, comme indiqué au chapitre 4.1.1.4, une usure ondulatoire avec des longueurs d'onde plus grandes se sont produites lors des périodes de mesure précédentes. Si l'on regarde l'équation [1], c'est une conséquence dues aux fréquences plus faibles. Dans ce rapport, la réflexion se concentre sur la période de mesure en 2023, voir les mesures T1-T4 dans le Tableau 11.

#### 4.1.3 Mesures d'inertie

Les mesures d'inertie sont utilisées pour évaluer les composants du système potentiellement excités. En découpant la gamme de fréquences indiquée dans le Tableau 14, on peut déterminer si les fréquences de résonance des différents composants du système se trouvent dans ces limites. Les réponses en fréquence représentées dans les diagrammes suivants montrent l'inertie (accélération/force d'excitation) des essieux moteurs et porteurs du type de véhicule «Komet» ainsi que l'inertie du rail dans la courbe «Pont de Zum Biel». La plage de fréquences définie ci-dessus est indiquée par des traitillés noirs. Il faut également noter que les réponses en fréquence ont été mesurées dans la même direction que les forces d'excitations.

#### 4.1.3.1 Essieux porteurs

La mesure de l'inertie de l'essieu porteur en cas d'excitation dans le sens latéral est donnée à la Figure 22. Celle-ci montre un pic nettement prononcé à environ 200 Hz, ce qui correspond avec une grande probabilité à un mode de flexion de l'essieu.

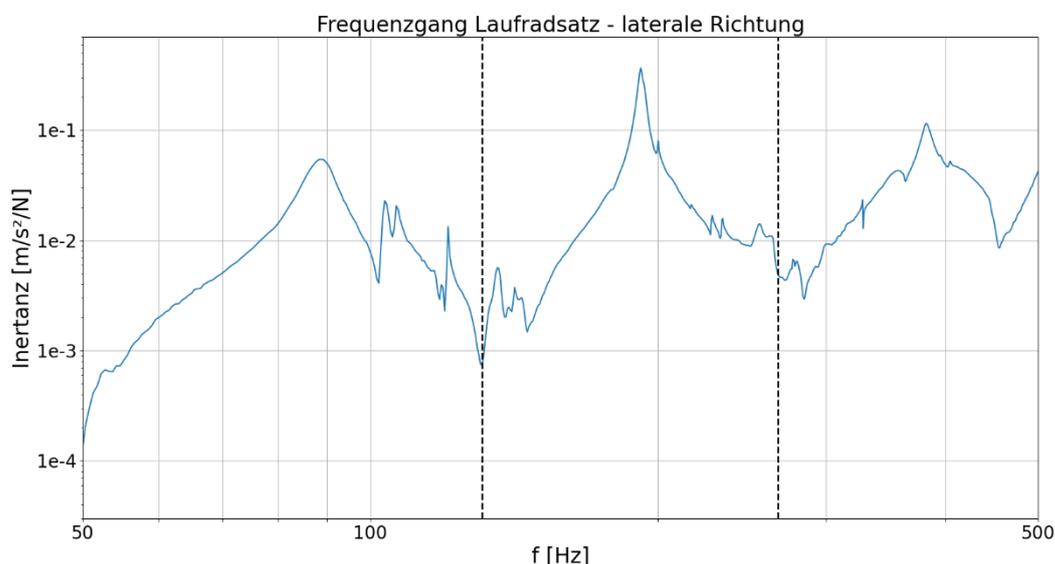


Figure 22 - Réponse en fréquence d'un essieu porteur par excitation dans la direction latérale

La réponse en fréquence de l'essieu porteur, lors d'une excitation dans le sens circonférentiel, comme indiqué sur la Figure 23, montre un petit pic dans la gamme de fréquences considérée. Cependant, comme il est à la même fréquence que le mode de flexion prononcé de la Figure 22, il s'agit probablement d'une vibration de flexion résultant du coup de marteau dans le sens périphérique et non d'une vibration de flexion.

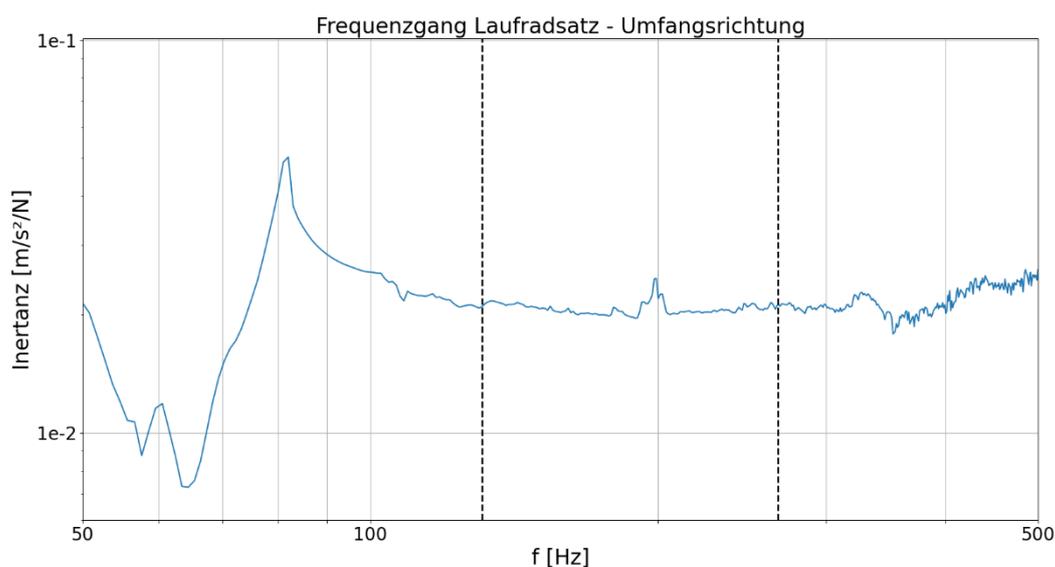


Figure 23 - Réponse en fréquence d'un essieu porteur par excitation dans la sens circonférentiel

### 4.1.3.2 Essieux moteurs

Lors d'excitation dans la direction latérale, les mesures d'inertie des essieux moteurs ne montrent pas de fréquences de résonance nettement prononcées, voir Figure 24. Comme les mesures ont été effectuées sur l'axe de transmission avec le frein à bande, il est très probable que cela influence sur les résultats des mesures et qu'il ne soit donc pas possible d'évaluer correctement l'influence des modes de flexion des essieux moteurs.

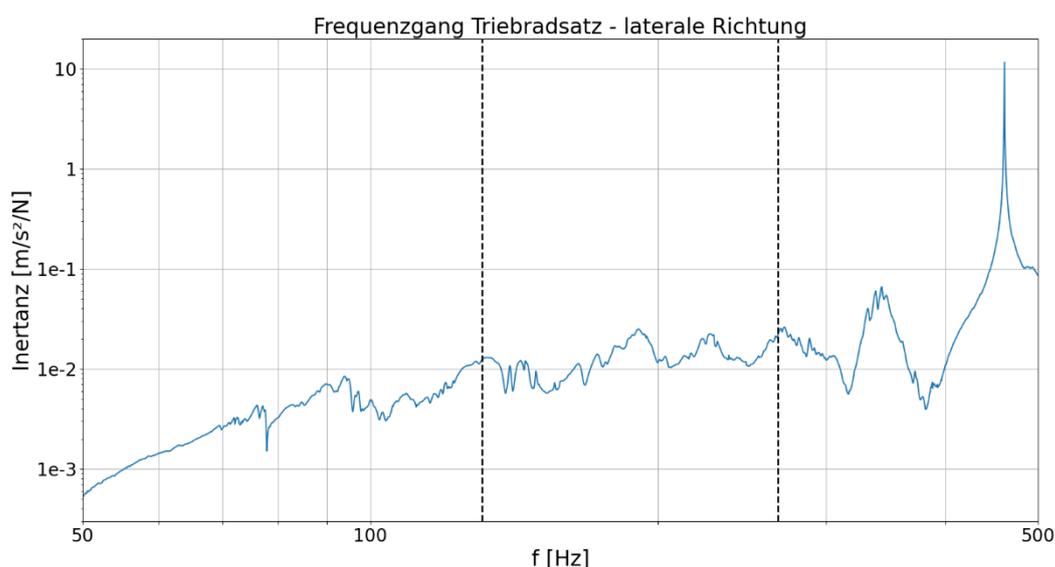


Figure 24 - Réponse en fréquence d'un essieu moteur par excitation dans la direction latérale

Lors d'une excitation dans le sens circonférentiel, il n'est également pas possible à cette date d'évaluer l'influence des modes de flexion sur la réponse en fréquence des essieux moteurs (voir Figure 25).

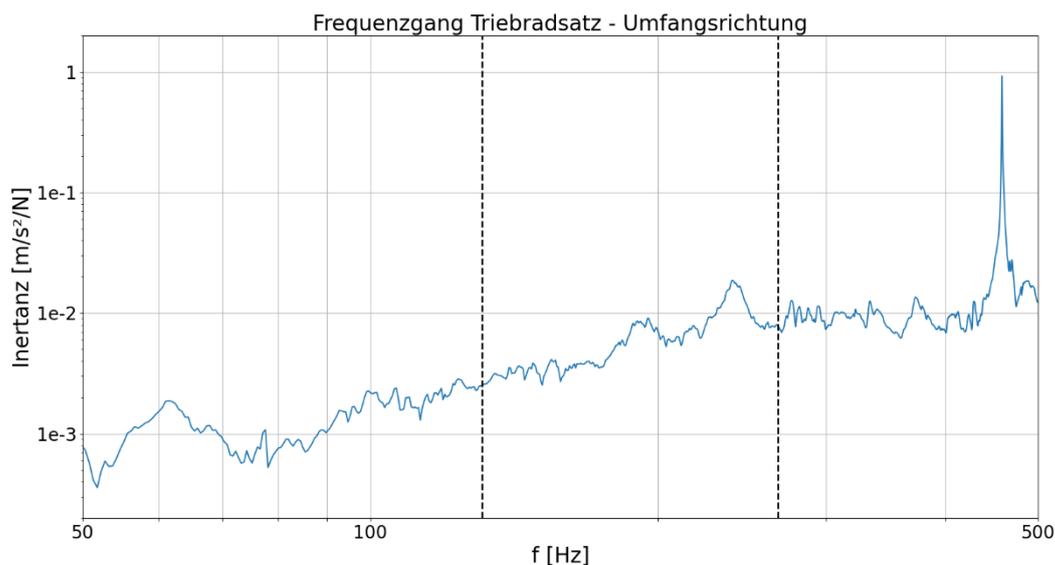


Figure 25 - Réponse en fréquence d'un essieu moteur par excitation dans la sens circonférentiel

### 4.1.3.3 Rail sur traverse

Les mesures de l'inertie au niveau du rail sur la traverse ne montrent pas de pic prononcé dans la gamme de fréquences considérée, voir Figure 26.

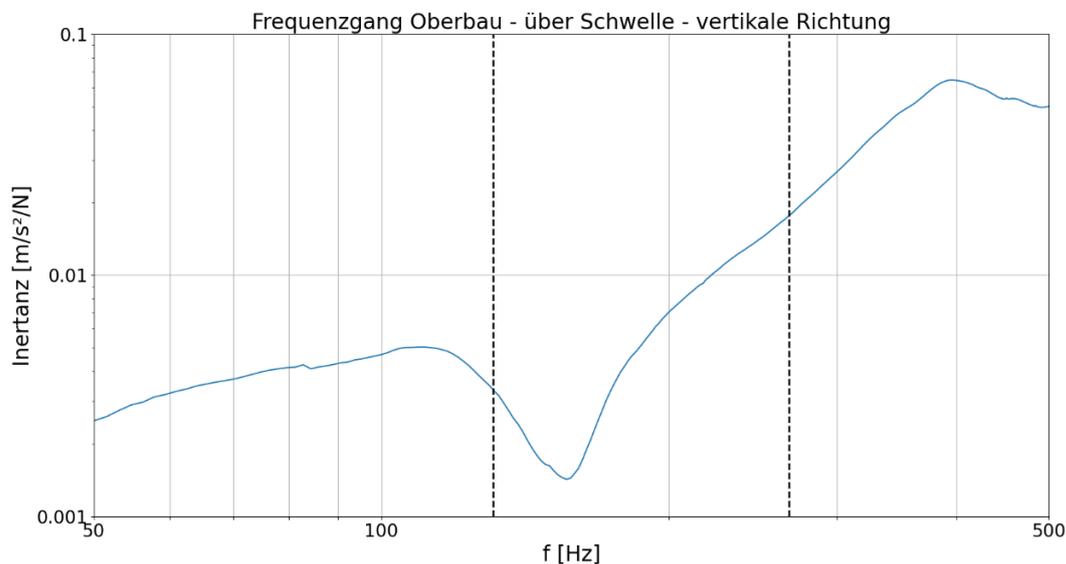


Figure 26 - Réponse en fréquence du rail sur traverse par excitation dans la direction verticale

Dans la gamme de fréquences considérée, au niveau du rail, la réponse en fréquence lors d'une excitation dans le sens latéral montre plusieurs pics faiblement marqués. Ceux-ci sont représentées à la Figure 27 et sont d'un ordre de grandeur très peu inférieur à ceux des essieux porteurs, mais supérieur à celui d'une excitation du rail dans le sens vertical.

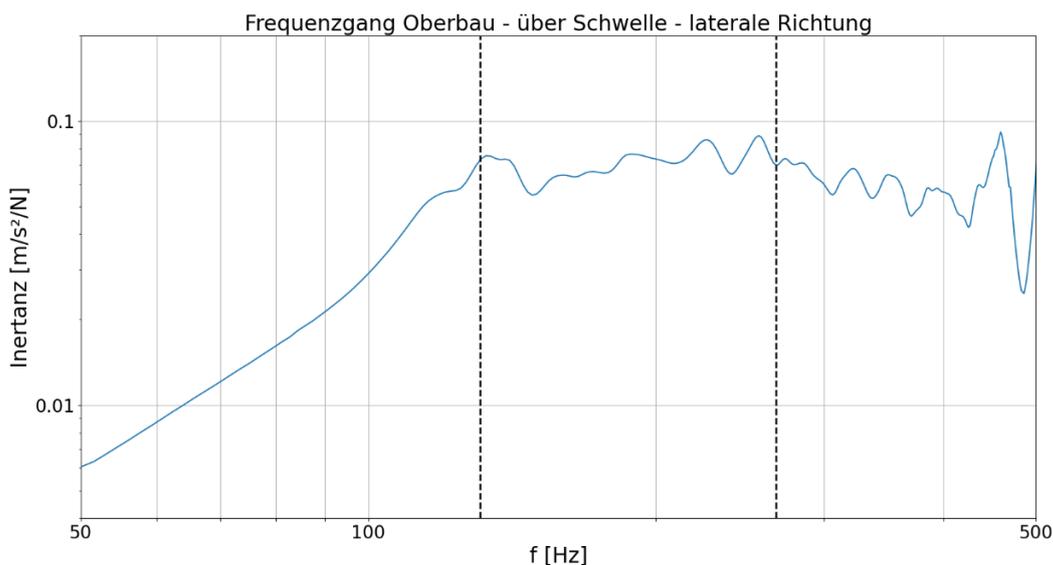


Figure 27 - Réponse en fréquence du rail sur traverse par excitation dans la direction latérale

#### 4.1.3.4 Rail entre les traverses

Les mesures d'inertie sur le rail entre les traverses donnent des résultats très similaires à ceux au-dessus de la traverse (chapitre 4.3.3). La réponse en fréquence lors d'une excitation dans le sens vertical, voir Figure 28, ne montre pas de pics prononcés dans la gamme de fréquences considérée.

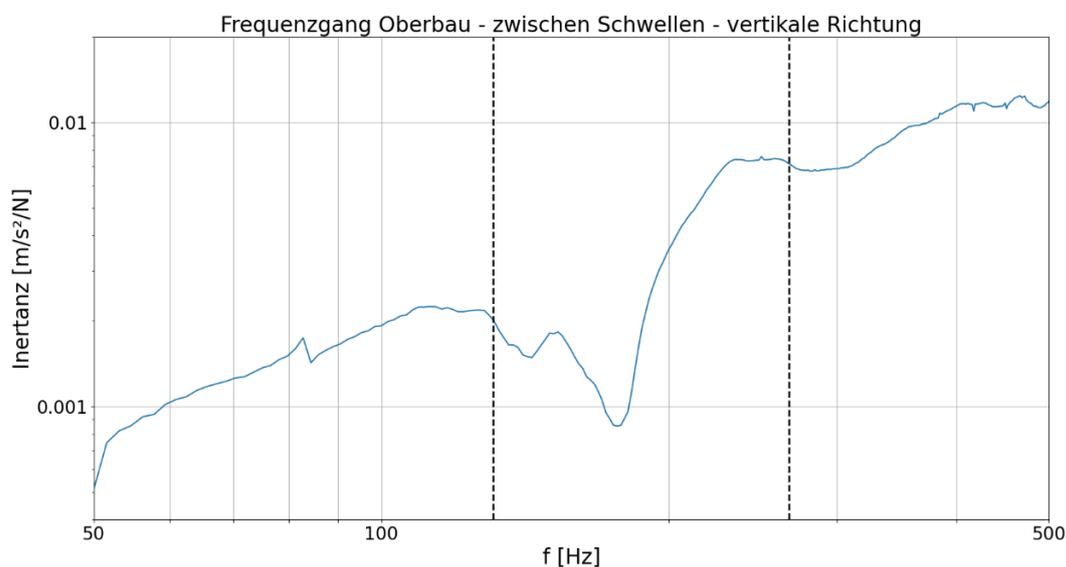


Figure 28 - Réponse en fréquence du rail entre traverse par excitation dans la direction verticale

De même, en cas d'excitation dans le sens latéral, voir Figure 29, on peut observer un tracé similaire à celui du rail sur traverse.

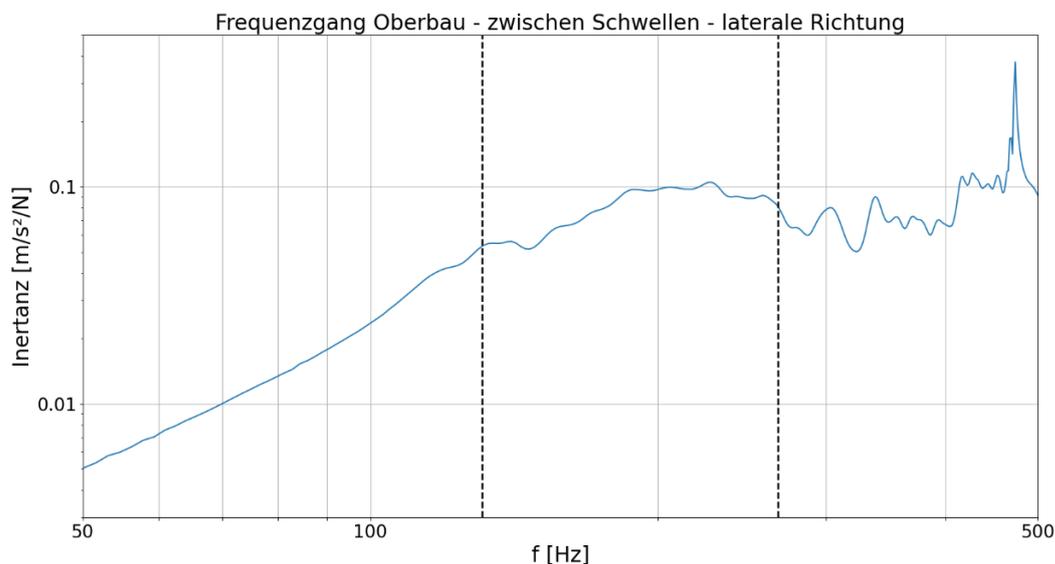


Figure 29 - Réponse en fréquence du rail sur traverse par excitation dans la direction latérale

#### 4.1.3.5 Remarques concernant les mesures de la force d'inertie

Les fréquences de résonance des composants du système mentionnés dans les chapitres précédents peuvent être identifiées à partir des variations de fréquence de la superstructure et des essieux. Certaines d'entre elles se situent dans la gamme de fréquences à l'intérieur de laquelle on suppose les modes propres responsables de la formation d'usure ondulatoire dans les courbes considérées. La roue porteuse présente une mode de flexion prononcé (légèrement inférieure à 200 Hz) et la superstructure, plusieurs modes moins prononcés dans le sens latéral. Cependant, dans la gamme de fréquences considérée, il n'est pas possible de détecter un pic de résonance prononcé sur les essieux moteurs. Malheureusement, comme le frein à bande était actif lors de la mesure, il n'est pas possible d'évaluer correctement l'influence des essieux moteurs avec ces mesures. Si ces essieux présentaient des pics de résonance aussi prononcés que les essieux porteurs, il serait très probable que ces éléments moteurs participent à la formation d'usure ondulatoire en raison leur charge par essieu plus élevée.

#### 4.1.4 Impact de l'usure ondulatoire sur l'exploitation [6]

Dans ce chapitre, les mesures acoustiques et les mesures de vibrations décrites au chapitre 6 sont évaluées sur le rail lors d'un passage dans la courbe «Pont de zum Biel». Les résultats de mesure présentés dans ce chapitre proviennent des essais effectués en octobre 2023, durant la phase d'essai sans conditionnement du rail. L'accent est mis sur l'influence de l'usure ondulatoire sur les grandeurs mesurées en service. Les résultats des mesures sont présentés sous forme de spectrogrammes pour indiquer les fréquences à partir desquelles le rail vibre lors d'un passage et si les émissions sonores liées à l'usure ondulatoire peuvent être détectées. Les résultats présentés se réfèrent à des mesures effectuées le 19.10.2023 à 12h48 lors d'un passage entre deux véhicules en trois parties (Komet et Shuttle). La réponse de chaque bogie des véhicules est clairement visible (motif vertical). Ceci est illustré sur la Figure 30 où, lors d'un passage, la vibration du rail entre deux traverses est représentée.

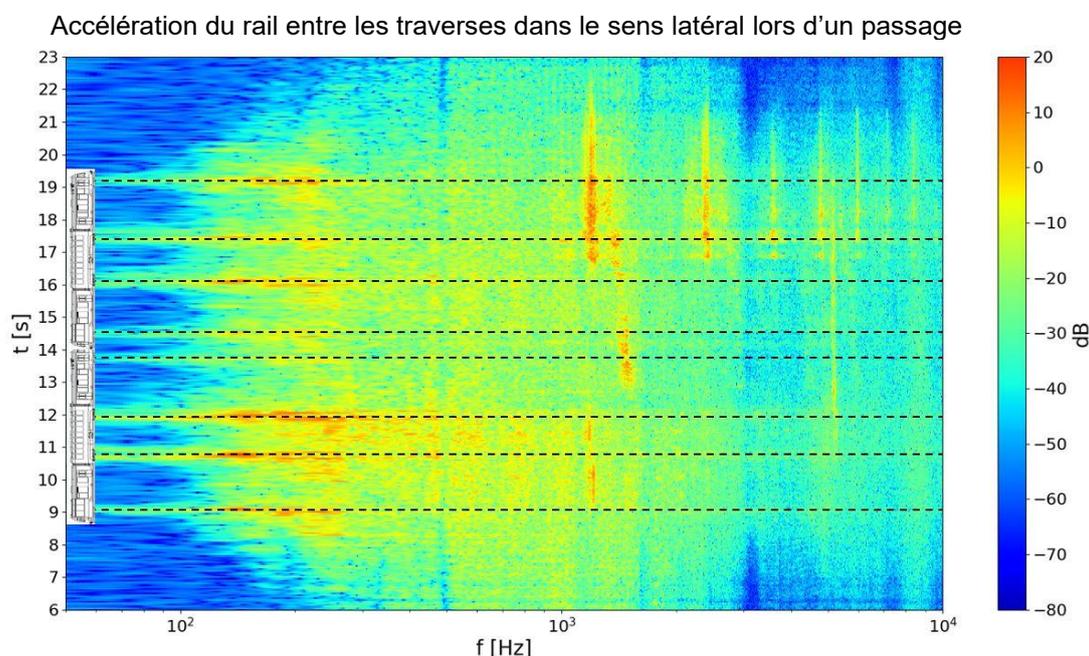


Figure 30 - Vibration du rail entre deux traverses lors du passage des bogies individuels

Les mesures ont été effectuées 27 jours après la mesure de l'onde de glissement T4 dans la courbe concernée. On peut donc supposer que l'usure ondulatoire a certes légèrement augmenté, mais qu'elle est présente dans la même plage de longueurs d'onde. Alors que le chapitre 4.1.1 examinait les longueurs d'onde qui ont connu la plus forte croissance dans la plage de temps de la dernière période de mesure (40-50 mm), ce chapitre analyse toutes les longueurs d'onde prononcées de cette courbe et leurs effets sur le fonctionnement afin de tirer des conclusions sur les causes de leur formation. Selon la Figure 16, cela inclut toute l'usure ondulatoire dans une plage de longueurs d'onde de 40 à 80 mm. Pour un passage à 38 km/h, cela correspond à une gamme de fréquences de 131-263 Hz. Cette plage de fréquences est soulignée par des traitillés dans les figures suivantes.

#### 4.1.5 Vibration du rail situé entre les traverses

Un capteur d'accélération a été monté entre deux traverses sur le champignon du rail. L'analyse dans le sens latéral montre une oscillation du rail avec plusieurs fréquences lors du passage. Certaines fréquences sont excitées sur une période plus longue et sont représentées par des bandes verticales sur la Figure 31. Un exemple est la fréquence de 450 Hz, entourée en rouge sur la Figure 31, où le rail "entre traverses" (Figure 29) et les essieux moteurs (Figure 24) présente un pic de résonance prononcé. Cependant, ces derniers se trouvent tous en dehors de la plage de fréquences correspondant à l'usure ondulatoire, marquée par les deux lignes noires verticales.

Dans la zone marquée de la Figure 31, une vibration du rail est clairement visible, mais uniquement aux moments distincts où un bogie passe au-dessus de l'endroit de mesure. On peut également voir que la vibration du rail n'est pas produite à une seule fréquence, mais s'étend sur une gamme de fréquences qui concorde très précisément à la gamme précédemment considérée. Bien que le passage d'une irrégularité de surface entraîne plutôt une excitation dans la direction verticale, il est également possible d'observer une excitation dans la direction latérale. La variation de l'effort normal entraîne également une variation des forces liés aux ondulations. Celles-ci sont particulièrement importantes dans le sens transversal dans les courbes étroites. Ceci est dû à une stimulation de l'usure ondulatoire lors du passage des trains.

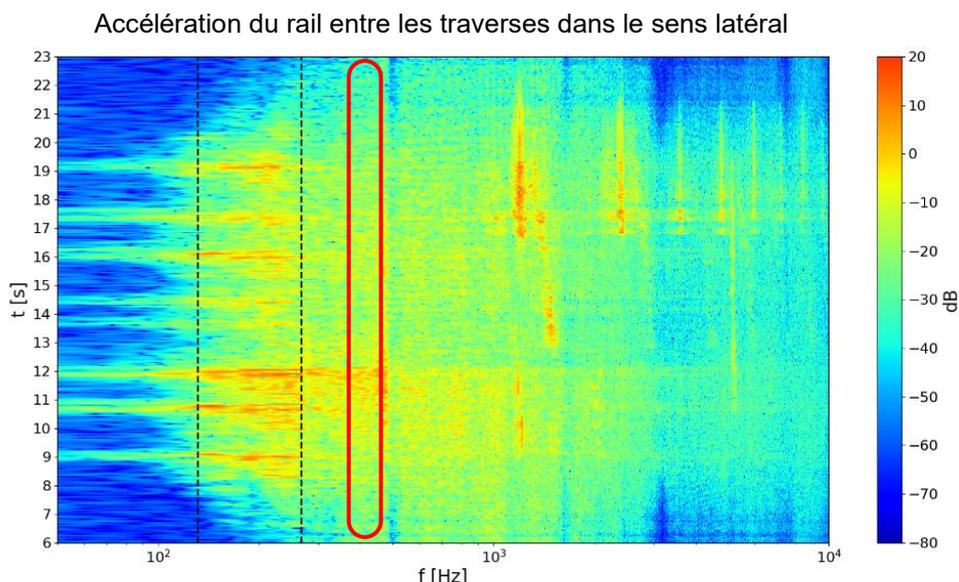


Figure 31 - Accélération du rail situé entre les traverses - direction latérale

Une analyse du même accéléromètre dans la direction verticale (Figure 32) montre une vibration du rail presque identique que dans la direction latérale. Ceci peut s'expliquer par le fait que la force normale et la force liée à l'usure ondulatoire varient avec la même fréquence. La faible amplitude de la vibration peut être expliquée par la comparaison de l'inertie du rail dans les directions verticale et latérale, voir chapitre 4.1.3.4. Dans la gamme de fréquences considérée, l'inertie du rail dans la direction verticale présente une inertie nettement plus basse que dans la direction latérale. Ceci entraîne une amplitude d'oscillation proportionnellement plus élevée dans la direction latérale.

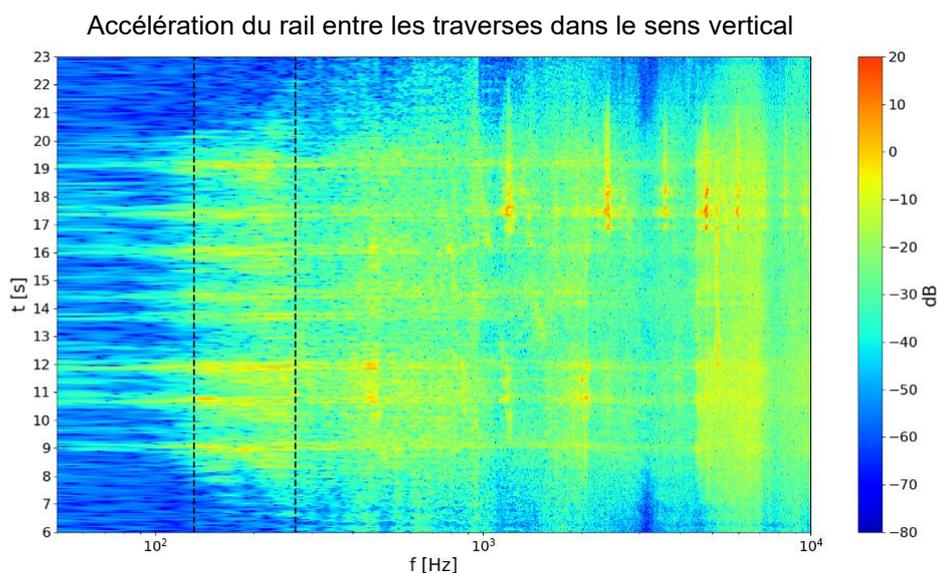


Figure 32 - Accélération du rail situé entre les traverses - direction verticale

#### 4.1.6 Émissions sonores

Avec l'enregistrement du 19.10.2023 à 12h48 des émissions sonores sur le rail intérieur de la courbe (Figure 33), il est possible d'étudier les bruits dans les courbures en zone de haute fréquence et de basse fréquence. Ces ondes indiquent également, dans la plage de fréquences définie, un bruit clairement identifiable qui doit être attribué au passage des trains sur un rail victime d'usure ondulatoire. Les niveaux sonores sont particulièrement élevés, surtout lors du passage des bogies moteurs, ce qui est dû à la masse non-amortie plus élevée.

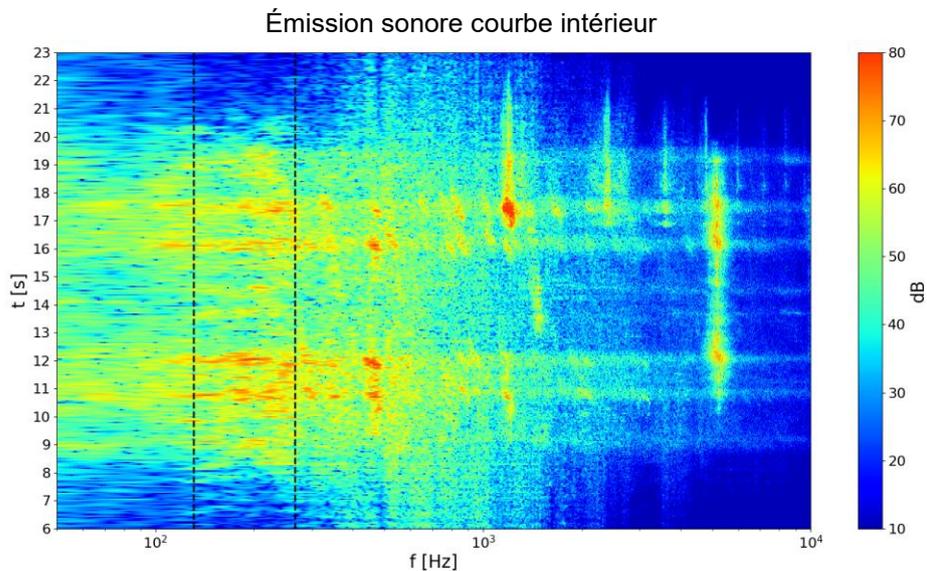


Figure 33 - Mesure des émissions sonores sur le rail intérieur de la courbe

#### 4.1.7 Remarques sur l'influence des ondulations sur l'exploitation

L'usure ondulatoire présentes dans la courbe « Zum Biel Portal » se traduisent par des vibrations du rail et des émissions sonores lors du roulement des trains dans le domaine de fréquence attendu. En raison de la plus grande inertie du rail dans le sens latéral, les vibrations mesurées dans ce sens ont également une amplitude plus élevée. Ces mesures donnent une idée des effets de l'usure ondulatoire, mais pas de ce qui pourrait en être la cause. Cela nécessiterait des mesures sur un rail meulé qui comporterait également des vibrations de torsion et de flexion sur les essieux du véhicule.

## 4.2 Usure abrasive des rails

Les profils de rail ont été validés avec l'appareil de mesure Calipri - Rail par la MGB selon le plan de mesure du Tableau 2. Les courbes mesurées ainsi que leur affectation sur le tracé sont indiquées à la Figure 34 par un encadré noir et une flèche. Comme pour les profils de vitesse du parcours (bande rose sur la Figure 34), toutes les courbes sont en accélération ou en décélération (32 km/h à 38 km/h). En comparaison avec la courbe de Lüegelwang, les deux courbes "zum Biel" sont situées un peu plus loin de la zone de pulvérisation active (zone traînée).

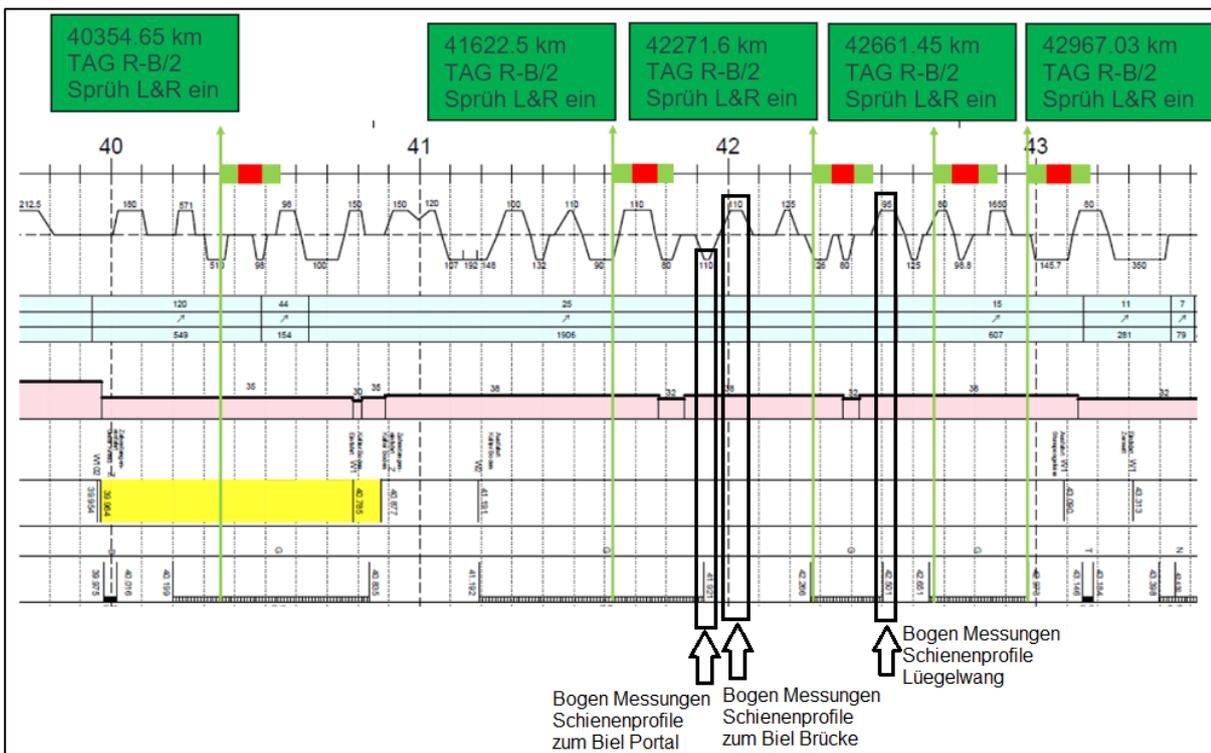


Figure 34 - Courbes mesurées et leur affectation au parcours

Dans le cas de Biel - Pont et Lüegelwang, on trouve respectivement de courbes à gauche dans le sens de circulation de Brig et d'une courbe à droite dans le sens de circulation de Biel - Portail. Les deux courbes à zum Biel ont un rayon de 110 m, celle de Lüegelwang, un rayon de 96m.

Pour faciliter la lecture des résultats dans les figures relatives à l'usure des rails, les deux figures suivantes (Figure 35 et Figure 36) expliquent les différences d'interprétation des résultats dans les deux directions de courbe (courbe à droite vs courbe à gauche). L'usure des rails est indiquée par les abréviations W1, W2 et W3 suivant la zone sur le champignon du rail. Pour W1, il s'agit de la valeur au centre du champignon du rail, pour W2, l'usure se situe sur la partie latérale du champignon et pour W3, elle se trouve sur le rayon du champignon du rail. W2 et W3 sont présents sur les deux fils de rail, avec une distinction entre le fil gauche et le fil droit (W2L (left), W2R (right), W3L, W3R). Sur le rail de gauche, dans le sens de la mesure, la partie latérale droite du champignon du rail se trouvent vers le milieu de la voie et, de la même manière, sur le rail de droite, la partie latérale gauche du champignon du rail se trouvent vers le milieu de la voie. Lors de l'analyse de l'usure par abrasion du champignon du rail causée par la roue, seules les valeurs mesurées au milieu du rail et celles dans la direction du milieu de la voie sont donc évaluées. En parcours libre, le flanc du rail et le rayon du champignon ne sont touchés que sur le rail extérieur à la courbe, par la roue à l'avant du train. Sur la base des expériences faites jusqu'à présent, seule ce schéma d'usure doit être pris en compte dans les trois courbes considérées. C'est pour cette raison qu'il est important de considérer, pour les courbes à gauche et à droite, le côté du champignon du rail touché par la roue extérieure de l'essieu avant :

- La Figure 35 montre le rail droit à l'extérieur de la courbe et il faut donc analyser le côté gauche du champignon du rail pour l'usure des flancs.
- La Figure 36 montre le rail gauche à l'extérieur de la courbe et c'est donc le côté droit du champignon du rail qui doit être analysé.

Les deux illustrations (Figure 35 et Figure 36) servent d'illustration aux dénominations de l'usure des rails (W1, W2, W3). Sur les deux images sont présentés une illustration réelle en haut et en bas, le schéma de l'usure W1, W2 et W3. Les usures sur les schémas ne représentent toutefois pas l'usure de l'image réelle.

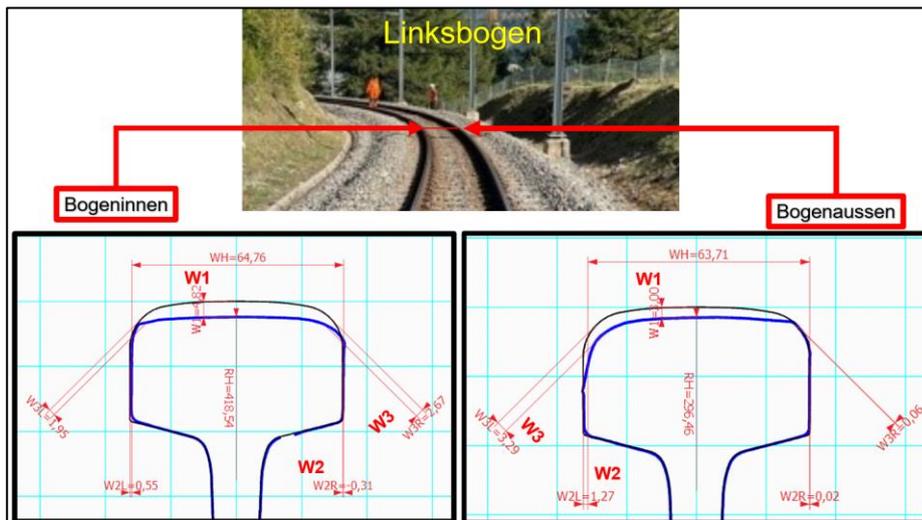


Figure 35 - Dénominations dans les courbes à gauche

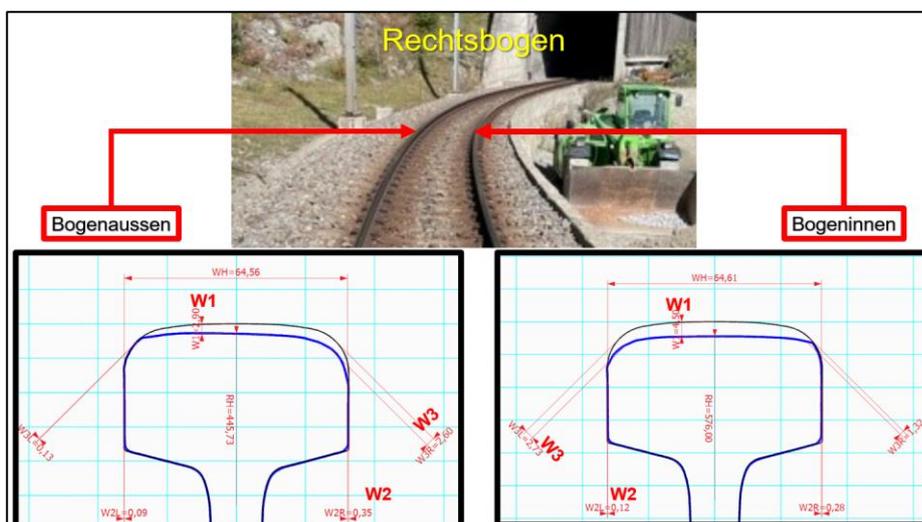
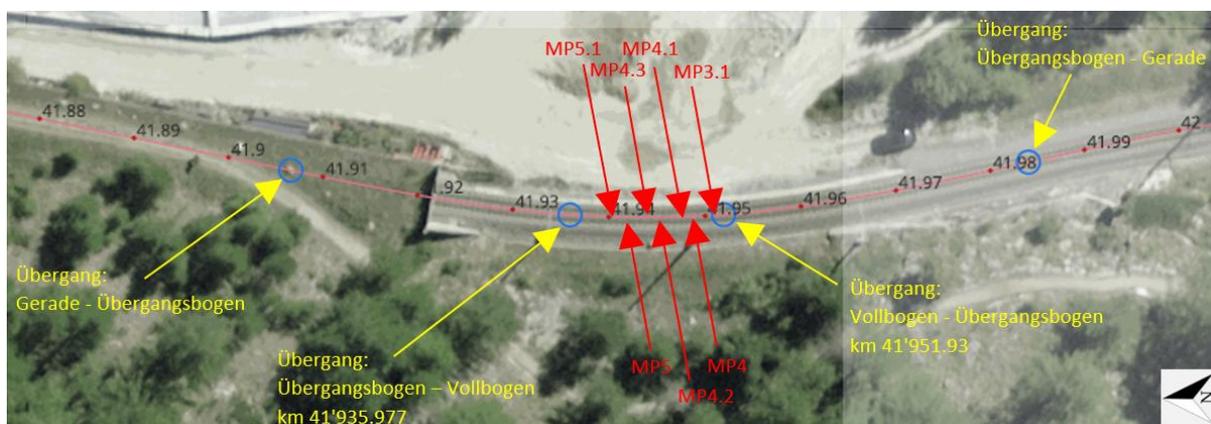


Figure 36 - Dénominations dans les courbes à droite

#### 4.2.1 Zum Biel – Portal, courbe à droite (courbe complète km: 41'935.977 - 41'951.93)

Les points de mesure de la courbe « Zum Biel - Portal » sont indiqués dans la Figure 37. Il s'agit d'une courbe à droite. Les points de mesure (MPs - Messpunkte) se trouvent à l'intérieur de la courbe complète et ont été indiqués par des marques de couleur sur les traverses afin de les localiser avec précision lors de mesures ultérieures.



Messpunkte: (MPs)	MP3.1	MP4	MP4.1	MP4.2	MP4.3	MP5	MP5.1
Kilometer:	41'951.7	41'949.7	41'948.1	41'946.4	41'944.2	41'942.5	41'940.9

Figure 37 - Points de mesure Zum Biel – Portal

La Figure 38 ci-dessous montre l'usure W1 au milieu du champignon, sur les deux rails pour la courbe à droite au zum Biel Portal. Conformément à la courbe à droite, le rail extérieur à la courbe est représenté sur la gauche de l'image et le rail intérieur à la courbe est sur la droite de l'image. Le tracé avant le meulage du rail est représenté en noir et celui pendant les essais en service est représenté par les autres couleurs. Tous les diagrammes d'usure des rails présentés par la suite correspondent à cette définition.

Il est frappant de constater que l'état d'usure W1 des rails intérieurs aux courbes est globalement plus important que celui des rails extérieurs aux courbes. En outre, il a fallu meuler nettement moins les rails extérieurs aux courbes que les rails intérieurs aux courbes. Dans l'ensemble, grâce au SKK, l'état d'usure W1 est très faible à tous les points de mesure.

La figure 39 montre l'usure W2 sur le flanc du rail, côté milieu de la voie. Dans l'ensemble, il n'y a pratiquement pas eu d'usure depuis la pose des nouveaux rails et en particulier pendant les essais d'exploitation. Comme il s'agit d'une courbe à droite à zum Biel-Portal, la roue extérieure à la courbe en amont se met en contact avec le flanc du rail gauche. Sur ce flanc également, l'usure abrasive était faible et se situait en-dessous des tolérances de l'appareil de mesure. Ces résultats sont certainement dus au fonctionnement efficace du système de lubrification des boudins.

La partie supérieure de la Figure 40 montre l'évolution de l'écartement des rails et la partie inférieure, qui permet d'interpréter la valeur de l'écartement, montre l'évolution de l'usure des flancs des deux rails (usure sur les flancs situés le plus au centre de la voie). Les écartements sont compris entre 1008 mm et 1010 mm. Comme on peut supposer que les rails ont été posés sans élargissement de l'écartement, cet écartement nettement plus grand que la valeur nominale ne peut pas être attribué à l'usure des rails. Ces élargissements de l'écartement doivent donc être attribués à d'autres causes.

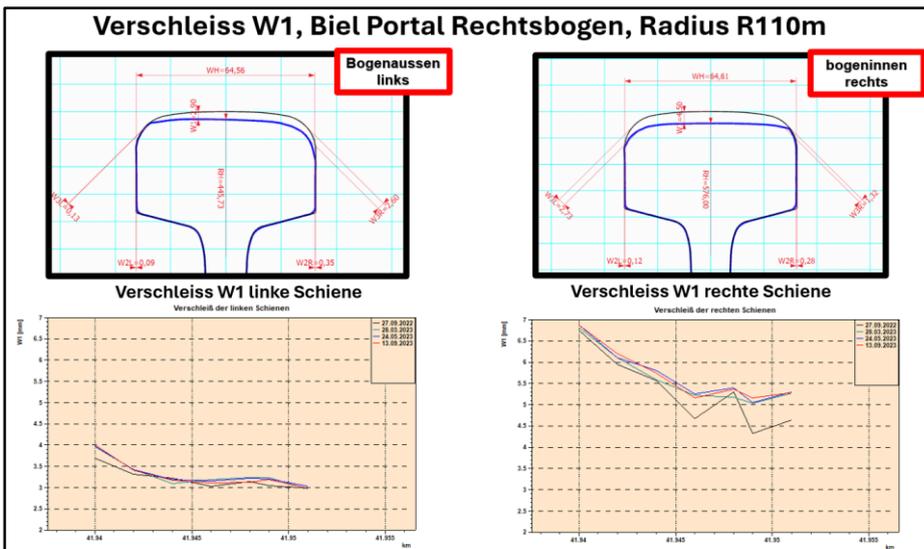


Figure 38 - Usure W1 à Biel Portal

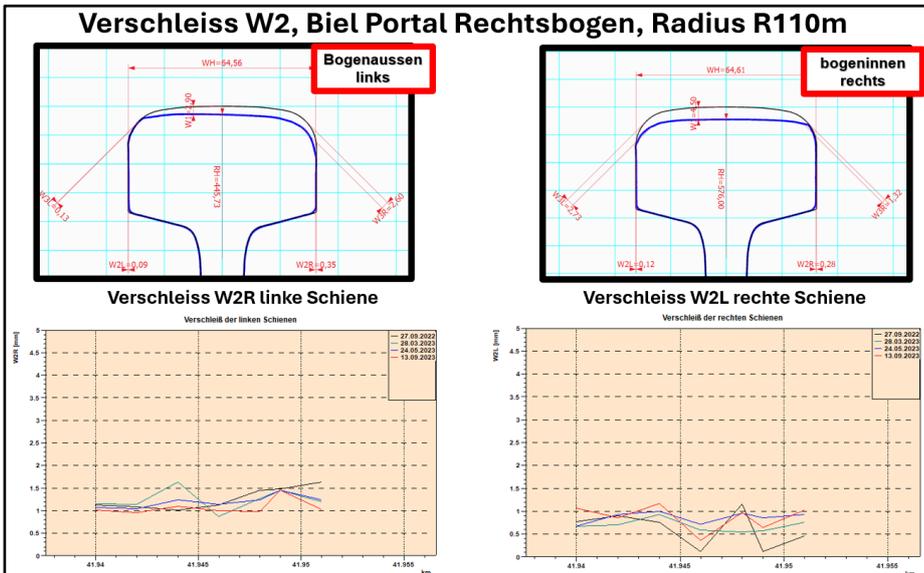


Figure 39 - Usure W2 à Biel Portal

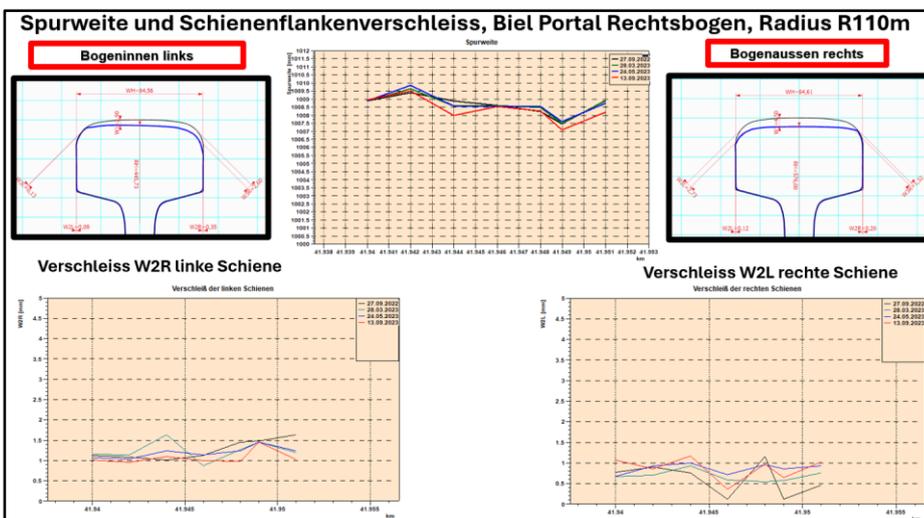
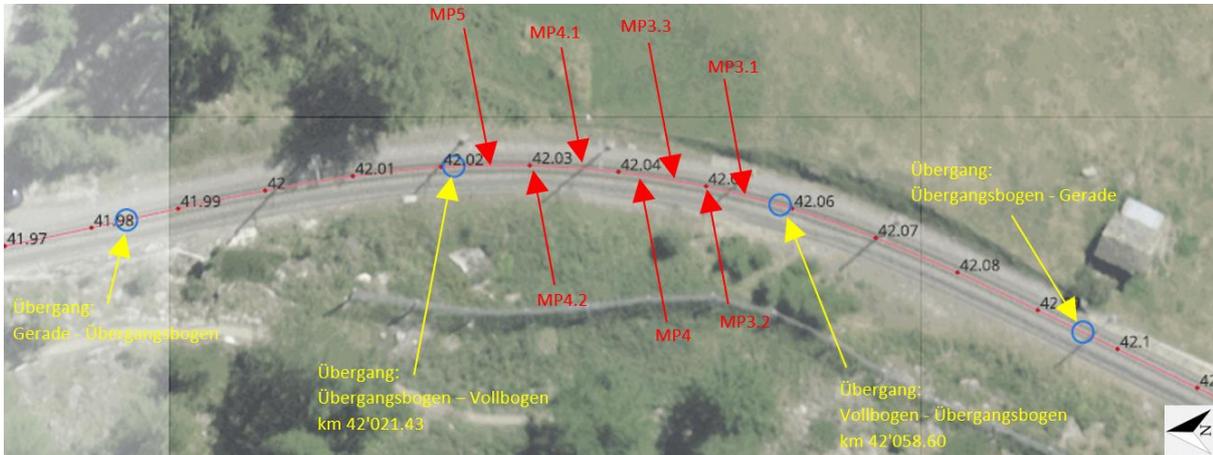


Figure 40 - Écartement des rails et variations des écartements + comparaison avec l'usure des flancs des rails

### 4.2.2 Zum Biel – Pont, courbe à gauche (courbe complète km : 42'053.3 - 42'024.7)

Les points de mesure de la courbe « Zum Biel - Brücke » sont indiqués dans la Figure 41. Il s'agit d'une courbe à gauche. Ici aussi, les points de mesure (MP) se trouvent à l'intérieur de la courbe complète et ont été marqués par des repères de couleur sur les traverses afin de les localiser avec précision lors de mesures ultérieures.



Messpunkte: (MPs)	MP3.1	MP3.2	MP3.3	MP4	MP4.1	MP4.2	MP5
Kilometer:	42'053.3	42'050.3	42'046.1	42'042.1	42'036.5	42'030.5	42'024.7

Figure 41 - Points de mesure Pont Zum Biel

L'illustration 42 montre l'usure W1, l'illustration 43, l'usure W2 et l'illustration 44 représente l'écartement des rails et la variation de l'écartement ainsi que la comparaison avec l'usure des flancs de rail au Pont zum Biel. En principe, on retrouve ici les mêmes constatations qu'à zum Biel Portal. Cela vaut aussi bien pour l'usure du rail à l'intérieur de la courbe, qui est nettement plus importante qu'à l'extérieur de la courbe, que pour l'élargissement de la voie, qui n'est pas dû à l'usure des flancs du rail. Il faut noter ici qu'il s'agit d'une courbe à gauche. Cela signifie que l'extérieur de la courbe se trouve sur le côté droit et l'intérieur de la courbe sur le côté gauche.

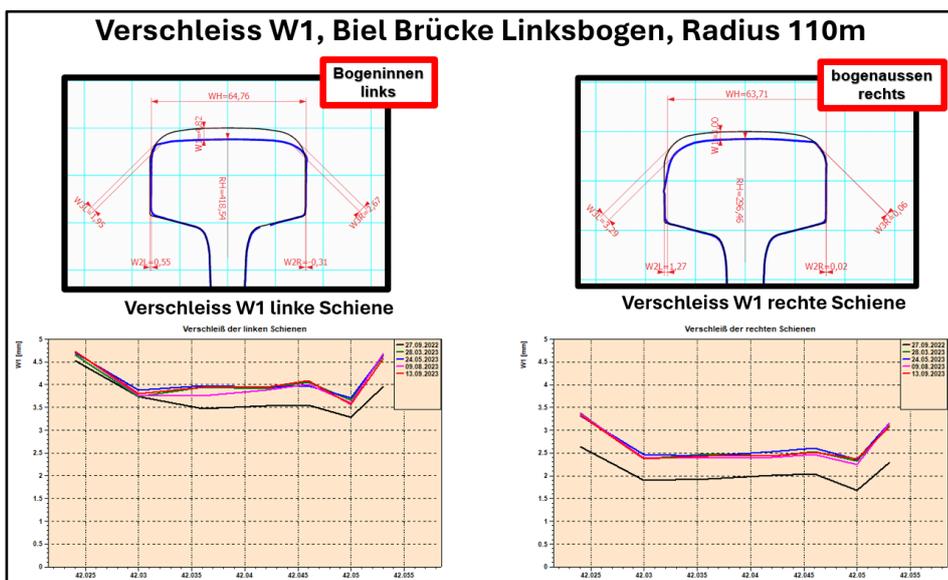


Figure 42 - Usure W1 au Pont zum Biel

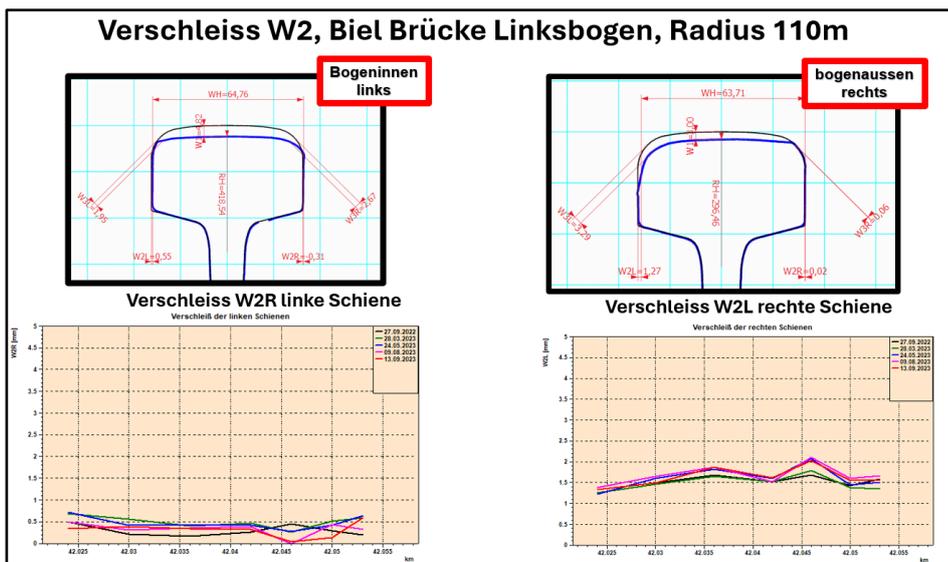


Figure 43 - Usure W2 au Pont zum Biel

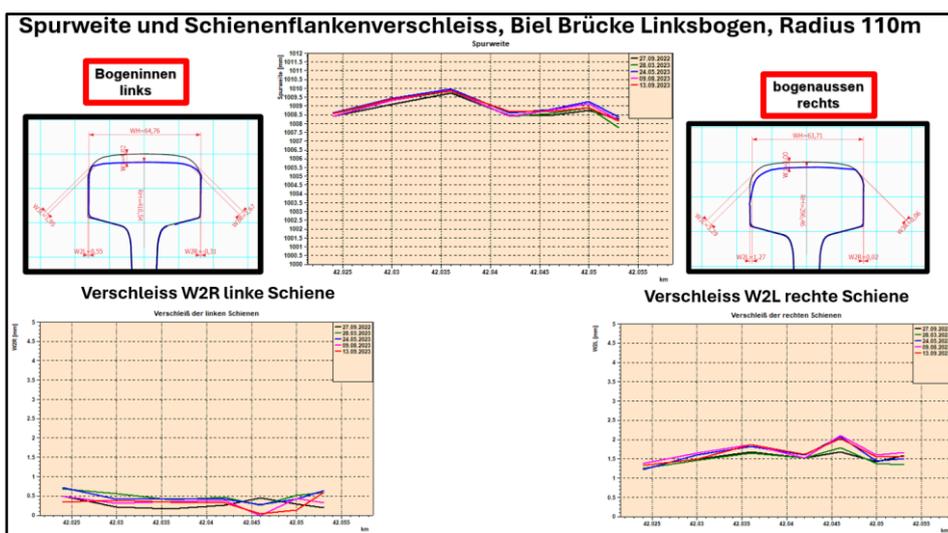
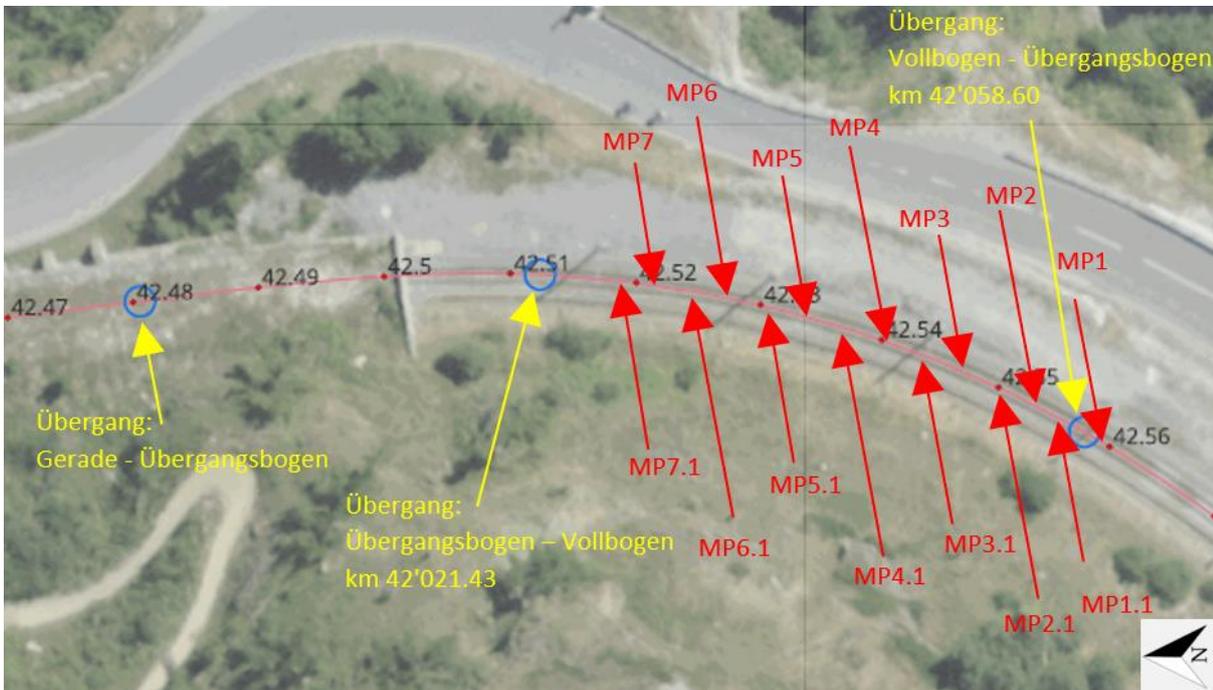


Figure 44 - Écartement des rails et variations des écartements + comparaison avec l'usure des flancs des rails

### 4.2.3 Lüegelwang, courbe à gauche (courbe complète km: 42'512.35 - 42'557.67)

Les points de mesure de la courbe « Lüegelwang » sont indiqués dans la Figure 45. Il s'agit d'une courbe à gauche. Ici aussi, les points de mesure (MP) se trouvent à l'intérieur de la courbe complète et ont été marqués par des repères de couleur sur les traverses afin de les localiser avec précision lors de mesures ultérieures.



Messpunkte (MPs)	MP1	MP1.2	MP2	MP2.1	MP3	MP3.1	MP4
Kilometer	42'558.8	42'555.7	42'552.8	42'550.3	42'546.6	42'543.7	42'540.6

MP4.1	MP5	MP5.1	MP6	MP6.1	MP7	MP7.1
42'537.6	42'534.7	42'531.7	42'528.7	42'525.7	42'522.7	42'519.7

Figure 45 - Points de mesure Lüegelwang

L'illustration 46 montre l'usure W1, l'illustration 47, l'usure W2 et l'illustration 48 montre l'écartement des rails et la variation de l'écartement ainsi que la comparaison avec l'usure des flancs de rail au Pont zum Biel. En principe, on retrouve ici les mêmes constatations que pour Biel Portal et Biel Brücke. Cela vaut aussi bien pour l'usure du rail à l'intérieur de la courbe, qui est nettement plus importante qu'à l'extérieur de la courbe, que pour l'élargissement de la voie, qui n'est pas dû à l'usure des flancs du rail. Comme pour le Biel Brücke, il faut tenir compte du fait qu'il s'agit d'une courbe à gauche. Cela signifie que l'extérieur de la courbe se trouve du côté droit et l'intérieur de la courbe, du côté gauche.

Bien que la courbe de Lüegelwang se trouve, selon la Figure 34, plus près de la zone où le produit est été entraîné plutôt que là où la dernière pulvérisation de SKK a eu lieu, l'usure du champignon de rail W1 ne diffère guère de celle des deux courbes de zum Biel.

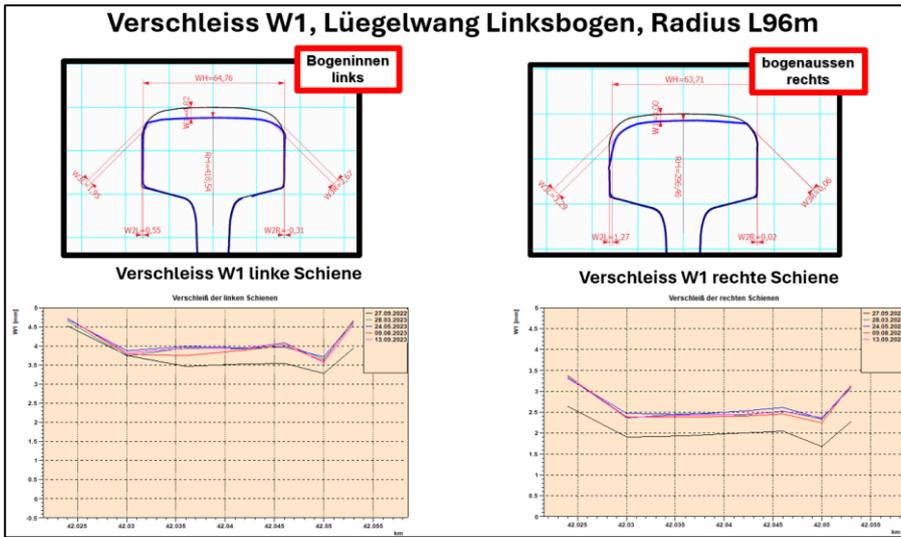


Figure 46 - Usure W1 à Lügelwang

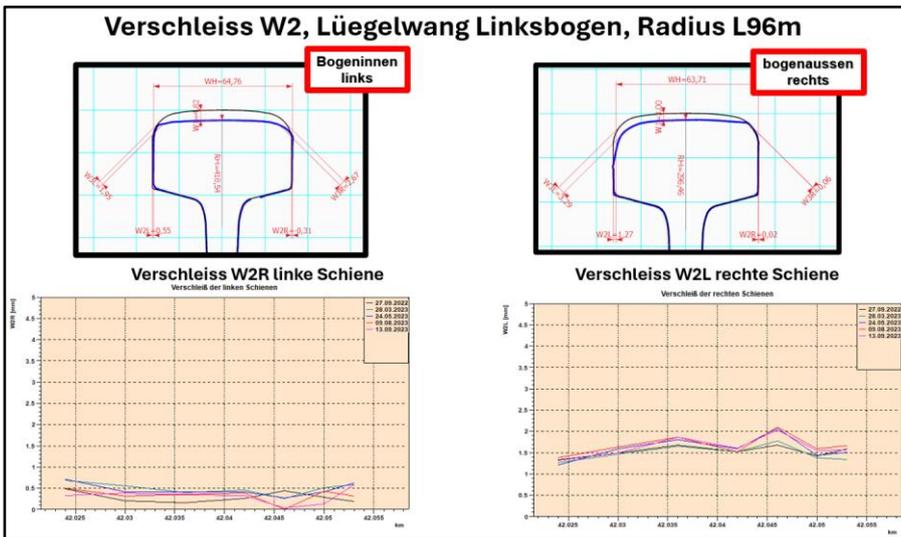


Figure 47 - Usure W2 à Lügelwang

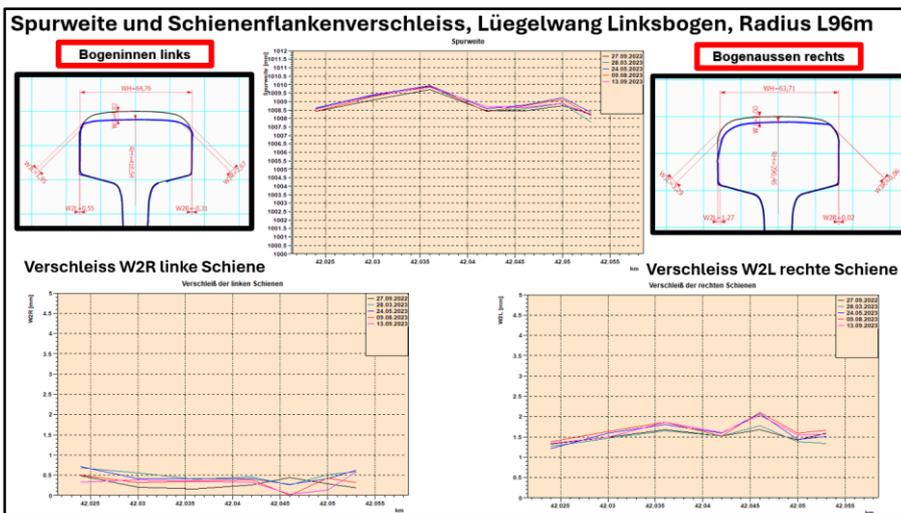


Figure 48 - Écartement des rails et variations des écartements + comparaison avec l'usure des flancs des rails

#### 4.2.4 Conclusion sur l'usure du rail

Sur la base de valeurs d'usure mesurées par Calipri - Rail dans les deux courbes à zum Biel et Lüegelwang, les constatations suivantes sont écrites :

- C'est dans la zone centrale du rail, caractérisée par W1, que, généralement, l'usure des rails est la plus importante. Cela vaut aussi bien pour les rails situés à l'intérieur que pour ceux situés à l'extérieur de la courbe.
- L'usure W1 est toujours, et parfois nettement, plus importante sur les rails intérieurs que sur les rails extérieurs à la courbe.
- La progression de l'usure W1 pendant les essais d'exploitation a été très faible. Cela vaut aussi bien pour les rails intérieurs que pour les rails extérieurs à la courbe.
- En 2019, les rails ont été remplacés par de nouveaux rails au niveau des trois courbes considérées. Deux essais d'exploitation avec SKK ont eu lieu successivement en 2022 et 2023. Les rails ont été meulés entre les deux essais. Cependant, comme le montrent les diagrammes, l'usure due au meulage a été très faible, ce qui résulte du fait que la croissance de l'usure ondulatoire a été faible pendant le premier essai d'exploitation. Ainsi, la plus grande usure de W1 devrait se situer entre 2019 et fin 2021. Cela signifie que le conditionnement SKK a contribué à une réduction significative de l'usure des rails.
- L'usure W2 sur les flancs de rails côté milieu de la voie, en particulier pour les rails extérieurs à la courbe, se situait dans la plage de précision de mesure pendant les essais d'exploitation et n'était donc guère significative. Sur la base des résultats de mesure, celui-ci devait déjà être très faible avant le début des essais de d'exploitation. Grâce à la lubrification efficace des boudins, l'usure des flancs et des congés de roulement des rails est restée pratiquement négligeable, indépendamment du SKK. L'usure des congés de roulement n'a pas été représentée ici sous forme de diagrammes. Les analyses montrent toutefois un comportement similaire à celui des flancs de rail.
- Bien que seule une usure négligeable des flancs de rail soit apparue depuis la pose des nouveaux rails, un élargissement significatif de l'écartement des rails apparaît dans toutes les courbes examinées. Il a été démontré que la cause principale du sur-écartement n'est pas l'usure du rail.

### 4.3 Coefficient de frottement / mesures tribomètre

Pour les mesures du coefficient de frottement, le rail intérieur et extérieur de la courbe sont mesurés trois fois au même endroit et la valeur moyenne est reprise. Outre le coefficient de frottement, l'heure de la journée et les conditions environnementales (température et humidité de l'air, voir annexe 12.4) sont enregistrées. Les côtés de la voie, c'est-à-dire le rail gauche (marqué en rouge) et le rail droit (marqué en jaune) ont été définis dans le sens de la circulation direction Brig (cf. annexe 12.4).

#### 4.3.1 Points de mesure et résultats des mesures

Depuis la fin du premier essai d'exploitation (octobre 2022), ces mesures ont été ou seront poursuivies tous les mois. L'intention était d'effectuer des mesures plus régulières pendant les mois chauds d'été, ce qui n'a été possible qu'en août 2024 en raison du manque de ressources dans l'équipe de la voie ferrée.

La Figure 49 montre les lieux de mesure où des mesures du coefficient de frottement ont été effectuées périodiquement avec le tribomètre "push". Il s'agit des trois courbes de Kalten Boden, de Biel-Brücke et de Lüegelwang, ainsi que de la ligne droite qui suit immédiatement la courbe de Biel-Brücke. La courbe de Kalten Boden se situe bien en dehors de la zone conditionnée. Dans cette station de croisement, il fallait veiller à ce que le coefficient de frottement ne descende pas trop bas en raison de l'arrêt de deux trains qui se rejoignent sur la même voie. La courbe de Biel - Brücke se situe entre deux tronçons conditionnés et donc sur ces quelques 200 m on trouve une zone où le produit est entraîné. La courbe de Lüegelwang se trouve immédiatement après la zone activement conditionnée (pulvérisation directe dans cette zone).

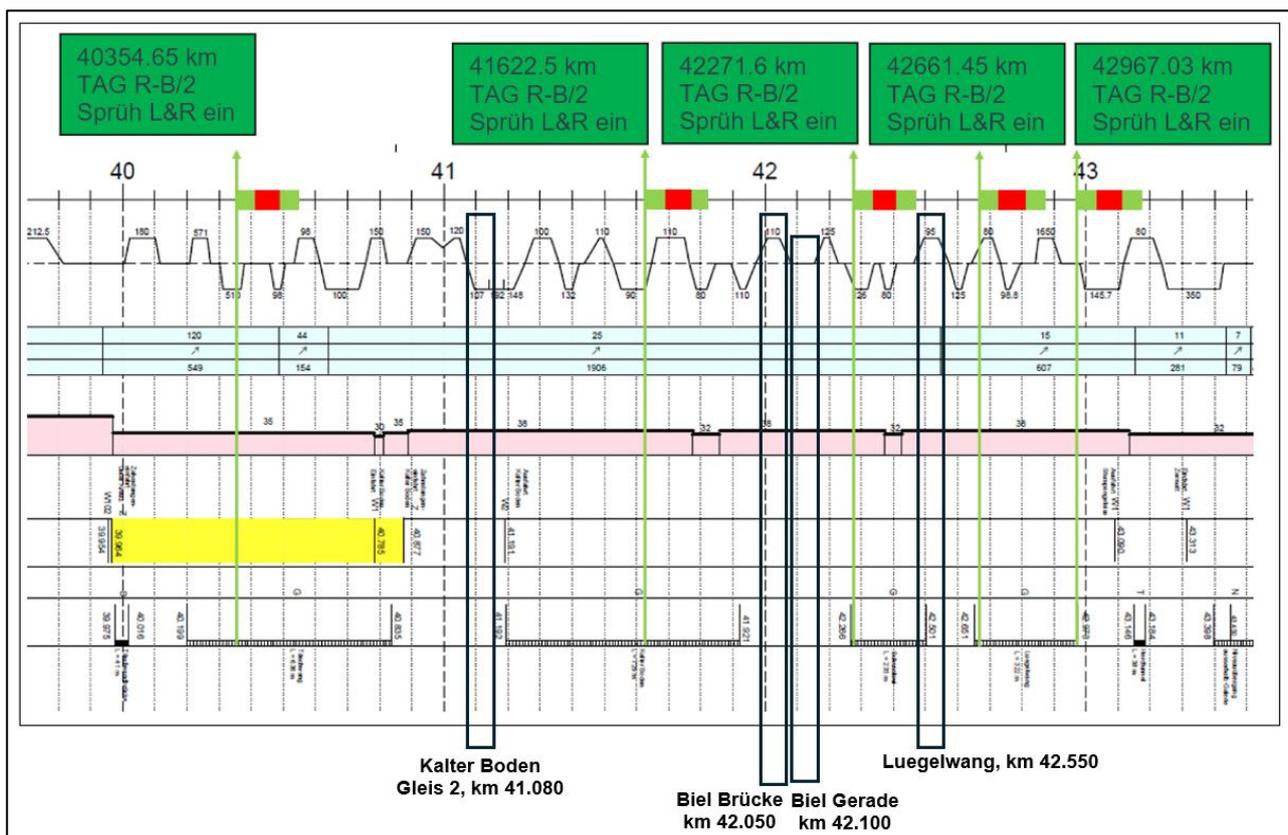
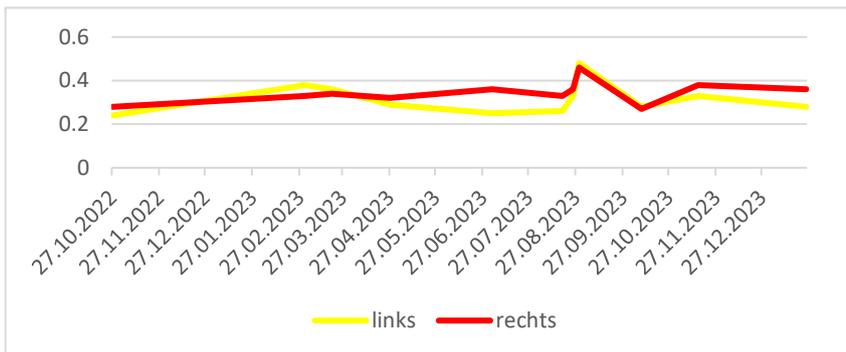


Figure 49 - Lieux de mesure du coefficient de frottement avec le tribomètre

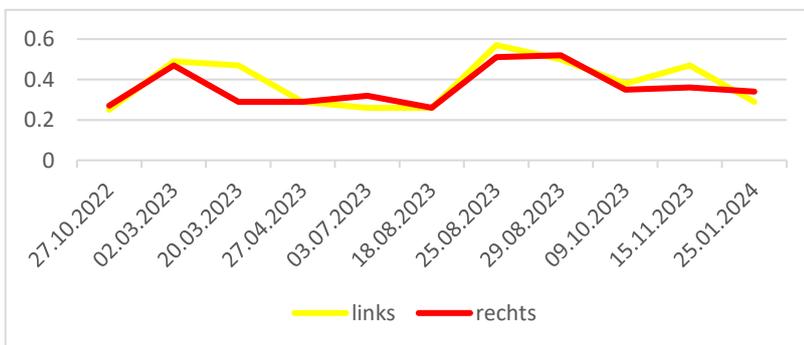
Les mesures tribologiques sont effectuées aux endroits indiqués ci-dessous (voir kilométrage). Dans les graphiques, les résultats des mesures sont effectués respectivement sur les rails de gauche et de droite (les rails de gauche et de droite sont respectivement observés en direction de Brig).

La figure 50 présente, pour les quatre lieux de mesure, l'évolution du coefficient de frottement au niveau des deux champignons de rail. Il s'agit de points de mesure reliés entre eux par des lignes droites au cours du temps. Celles-ci ne doivent pas représenter une tendance entre les points de mesure, mais permettre une meilleure lisibilité des graphiques.

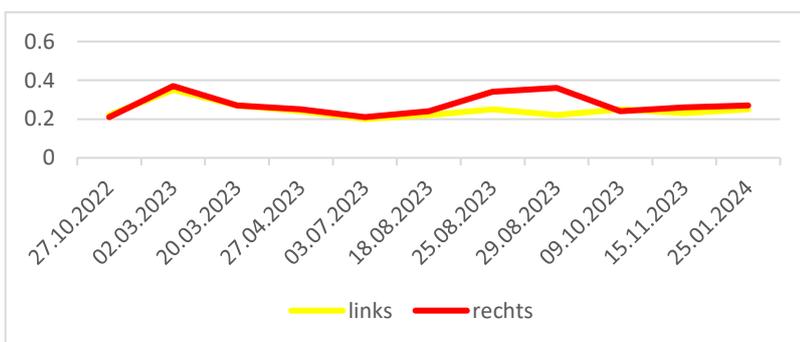
**1. Kalter Boden Voie 2 (rayon 100 m) avant le local relais kilomètre 41.080**



**2. Biel Kurve (110m) kilomètre 42.050**



**3. Biel Gerade kilomètre 42.100**



#### 4. Lüegelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550

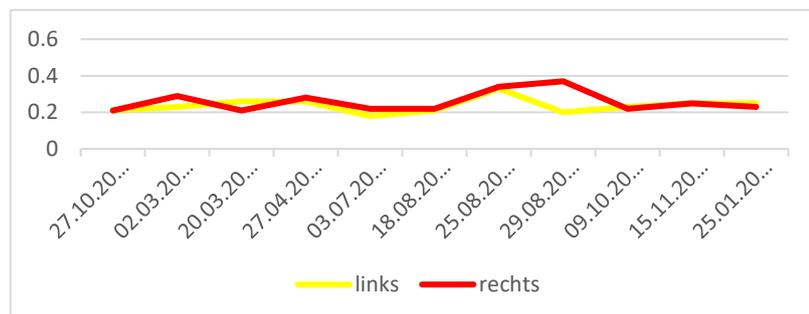


Figure 50 - Résultats de mesure des coefficients de frottement

#### 4.3.2 Constatations concernant les résultats de mesure

Les valeurs mesurées sont en grande partie constantes entre 0,2 et 0,3. Il y a cependant des valeurs de frottement élevées à tous les points de mesure entre février - mars et fin août.

L'hypothèse selon laquelle les coefficients de frottement augmenteraient sensiblement durant l'été 2023, comme durant l'été 2022, ne s'est pas confirmée comme attendu. Des valeurs de frottement plus élevées ont effectivement été mesurées fin août 2023, mais ce pic est moins élevé et moins long que lors de l'année précédente. Comme l'été 2023 a été moins chaud que l'été 2022, on part du principe que les « températures critiques » n'ont pas ou peu été atteintes.

Les coefficients de frottement se sont ensuite à nouveau stabilisés entre 0,2 et 0,3 aussi bien en février - mars 2023 qu'en août 2023.

Malgré des coefficients de frottement globalement constants, il faudra continuer à l'avenir à tenir compte des conditions météorologiques. Sur la base des derniers tests effectués par l'AC2T sur le banc d'essai à deux disques (Twin Disk) avec trois produits de conditionnement différents, il existe déjà un changement significatif dans les performances de ces produits à une température de rail de 60°C. Les résultats de ces essais et les recommandations qui en découlent seront présentés par AC2T dans un rapport à paraître.

## 5 Contact entre la roue et le rail (profils de roue et de rail)

Pendant les essais d'exploitation, les profils des roues et des rails ont été enregistrés à intervalles fixes avec Calipri - Rail et Calipri - Wheel et leur géométrie de contact a été évaluée. Cela a été fait pour les trois véhicules Shuttle (2051, 2052 et 2052) ainsi que pour les trois courbes menant au Biel - Brücke, au Biel - Portal et à Lüegelwang. Outre l'usure décrite au chapitre 3, l'évolution des profils des roues et des rails a également été étudiée. Le profil de rail utilisé par le MGBahn est le 46E1. Le profil de roue utilisé correspond à la norme RTE 29500 type A [2].

Pour l'évaluation des profils de roues issus de l'utilisation en service, différents appariements de roues et de rails sont utilisés. Pour cela, on prend en compte d'une part les profils nominaux et d'autre part les profils issus de l'utilisation en service. Dans ce rapport, nous considérons les couples décrits ci-dessous :

- Profil nominal des rails couplé avec les profils réels des roues tracés sur les véhicules.
- Profils de roues réels issus de l'utilisation en service avec les profils réels dans les trois courbes étudiées.
- Profils de roues réels et nominaux avec les profils de rails réels de l'ensemble du tronçon Täsch-Zermatt.

### 5.1 Roue et rail nominaux

Le profil nominal du rail est le rail 46E1 avec une inclinaison de montage de 1/20 et un écartement de 1000 mm. On distingue quatre profils de roues différents :

- Le profil de roue RTE 29500 type A [2]. Ce profil est utilisé par le MGBahn comme profil nominal et avait été monté sur les Shuttle avant le début des premiers essais en service.
- Le profil de roue « Triebradsatz.tww » s'est formé sur quelques essieux moteurs Shuttle après les deux années d'essais d'exploitation. Ces essieux n'ont jamais été reprofilés après le début des essais.
- Le profil de roue zb.Opt.tww est issu d'une adaptation à l'usure en service sur un véhicule du zb et est actuellement testé en service sur un Fink du Zentralbahn (zb). Ce type de profil de roue dispose d'une épaisseur de boudin réduite à 25mm (27mm en nominal dans la RTE 29500 [2]) et doit contrer un dépassement de l'épaisseur du boudin maximale autorisée de 27mm.
- Le profil de roue zb.Opt.\_27\_28.tww correspond au profil de roue zb.Opt.tww mais avec une épaisseur nominale de boudin de 27mm. Il est prévu de procéder à des essais en service au MGB avec ce type de profil de roue.

La Figure 51 montre, en haut, les couplages géométriques de ces quatre profils de roues en contact avec le rail nominal 46E1 (comme décrit ci-dessus). En bas, les mêmes couplages ont été réalisés, mais avec un écartement plus important (1010 mm). Ce dernier a été choisi parce que cet écartement a souvent été constaté lors des mesures ultérieures dans les courbes étroites. Comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, il s'agit d'un élargissement de la voie sans usure notable des flancs de boudin côté milieu de voie.

Les deux profils zb.opt présentent un comportement similaire, avec des valeurs légèrement plus favorables pour celui avec une diminution de l'épaisseur du boudin. Comme nous l'avons déjà montré dans [9], l'élargissement de la voie dans les courbes permet d'obtenir des valeurs plus favorables pour l'indice de position radiale et donc pour le passage dans les courbes. En examinant l'évolution de la conicité équivalente, on remarque que les profils de roues zb.Opt., plus favorables à la marche en courbe, ne présentent pas d'effets négatifs sur les tronçons en alignement à vitesse élevée. Cette constatation est valable pour le profil de rail théorique avec une pente de 1/20.

Le profil de roue RTE29500 et le profil de l'essieu moteur, qui évolue vers une adaptation à l'usure, montrent tous deux, une amélioration pour la circulation en courbe lors d'élargissement de la voie.

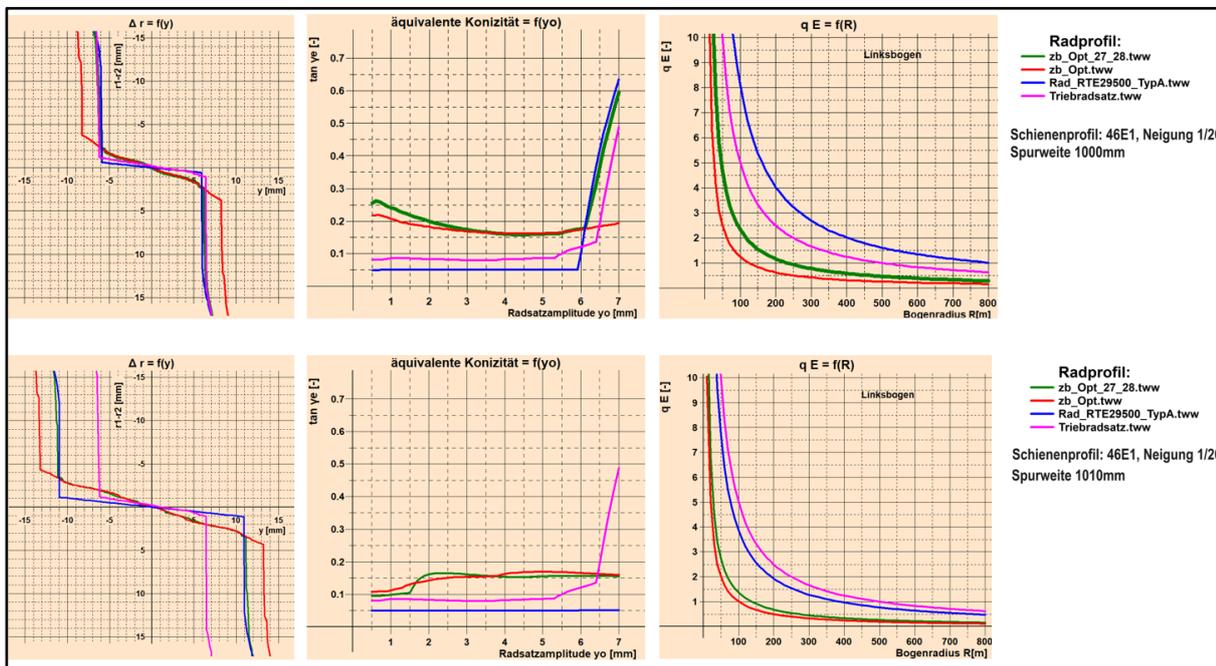


Figure 51 - Couplage de profils nominaux de roues et de rails

## 5.2 Évolution des profils de roues en utilisation opérationnelle

Dans le premier rapport final sur les essais d'exploitation Täsch-Zermatt [1], il avait déjà été constaté que le profil de roue RTE29500A utilisé par la plupart des chemins de fer à voie métrique de Suisse ne se comportait pas de manière stable en service. C'est la raison pour laquelle les profils de roues dessinés sur les trois Shuttle sont davantage documentés ici. Afin d'avoir une idée de l'évolution et des tendances des profils de roues réels, ceux-ci sont d'abord appariés avec les rails nominaux avec leurs inclinaisons de montage et leurs écartements nominaux.

La Figure 52 contient les fonctions géométriques de contact ( $\Delta r$ ,  $\tan \gamma_e$ ,  $q_E$  roue gauche et roue droite) des profils de roues tracés pendant les essais d'exploitation du Shuttle 2051. En haut sont représentés les résultats de tous les essieux, au milieu, ceux des essieux moteurs ainsi qu'en bas, les résultats des essieux porteurs. Avec l'augmentation du kilométrage, les fonctions géométriques de contact du véhicule Shuttle 2051 évoluent vers des indices de position radiale plus favorables, sans que les conicités ne soient modifiées de manière significative. Comme le coefficient de frottement roue/rail est fortement réduit par le SKK et que l'usure de la roue est ainsi diminuée, cette modification ou adaptation du profil d'usure de la roue se déroule toutefois très lentement. Un indice de position radiale  $\leq 1$  pour un rayon de courbure de  $R=200\text{m}$  ne suffit toutefois pas pour les caractéristiques de la ligne du MGBahn.

Pour évaluer l'évolution des profils de roues, on considère le profil nominal du rail 46E1 avec une inclinaison de 1/20 et un écartement de 1000 mm.

La Figure 53 contient les données géométriques de contact du véhicule 2052 et la Figure 54, celles du véhicule 2053. Pour ces véhicules également, les résultats et surtout les tendances sont similaires à ceux du Shuttle 2051. Pour le véhicule 2053, des conicités équivalentes plus élevées apparaissent pour quelques mesures. Celles-ci sont en partie dues à des discontinuités dans le tracé du point de contact, respectivement dans la fonction  $\Delta r$ .

On ne constate pas d'influence des différents matériaux des roues sur les essieux moteurs. Les essieux porteurs ont tendance à s'adapter plus rapidement aux rails en raison du matériau de roue ER7 moins résistant à l'usure.

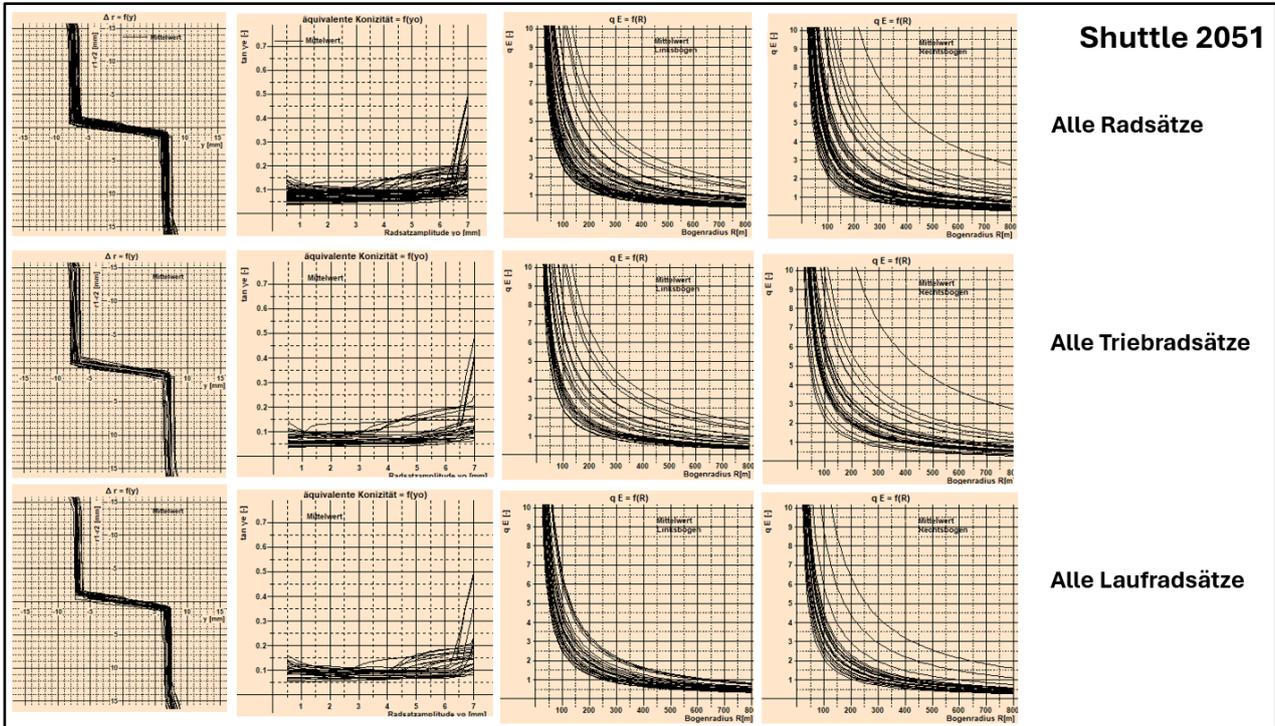


Figure 52 - Développement des profils de roues du Shuttle 2051

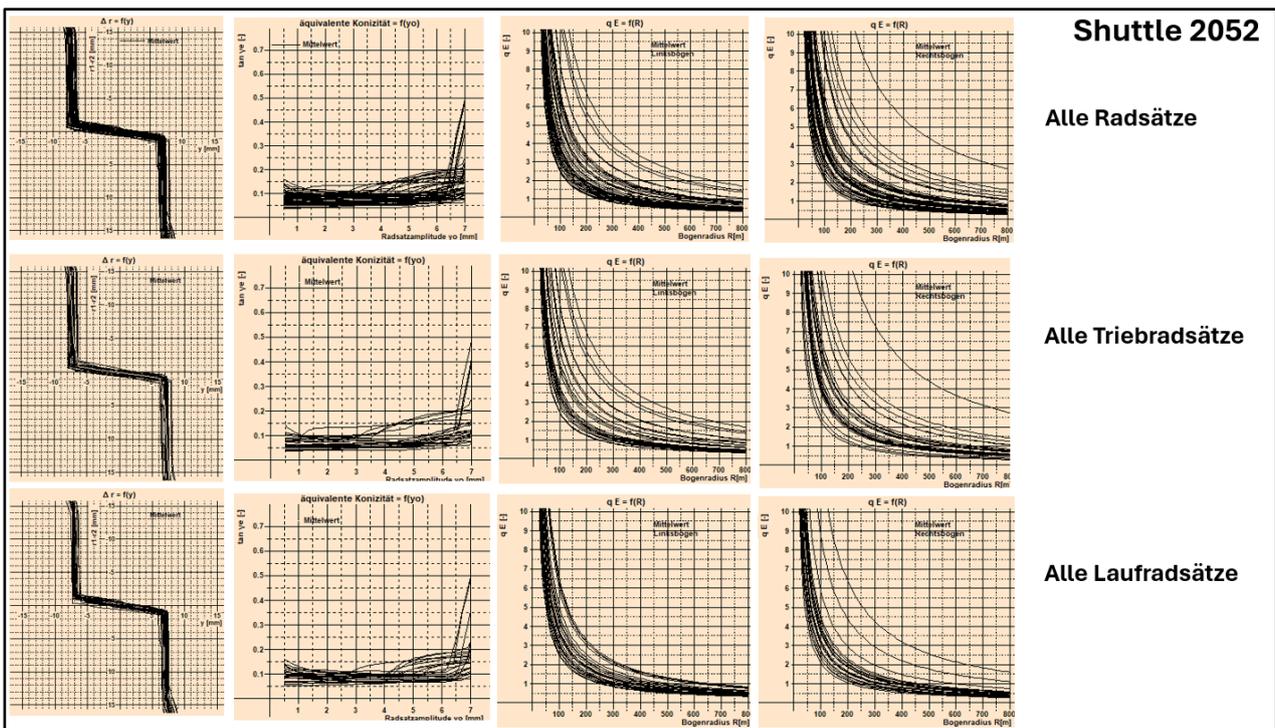


Figure 53 - Développement des profils de roues du Shuttle 2052

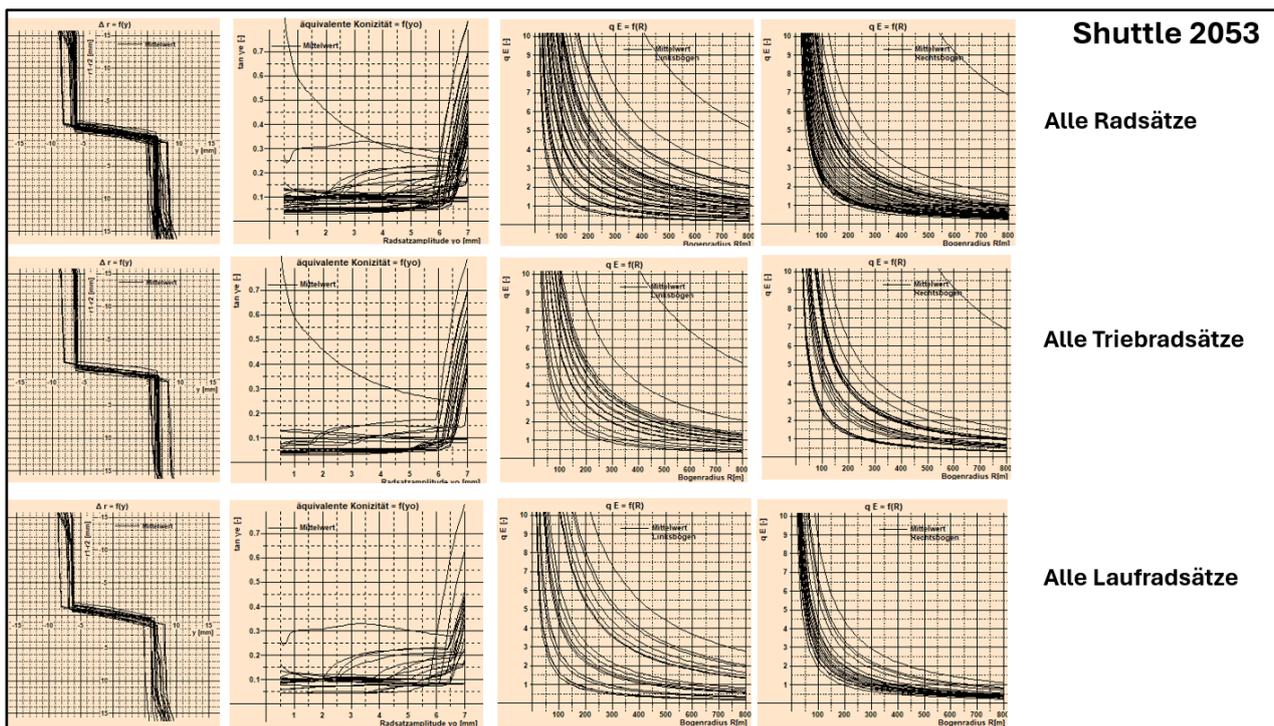


Figure 54 - Développement des profils de roues du Shuttle 2053

### Conclusion sur la géométrie de contact des profils de roue

Sur les deux années d'essai d'exploitation, les profils de roues montrent une lente évolution vers un comportement plus favorable en courbe, sans détérioration significative de l'indicateur relatif à la conduite en ligne droite. Les essieux porteurs s'adaptent plus rapidement aux rails extérieurs à la courbe que les essieux moteurs. Cela s'explique probablement par la différence de qualité de l'acier pour ces deux types de bogie. L'adaptation est plus rapide pour les courbes à droite que pour les courbes à gauche (courbes à gauche pour les graphiques de l'indice de position radiale à gauche).

### 5.3 Développement des profils de rails en service

La Figure 55, Figure 56 et Figure 57 montrent l'évolution des profils de rail en service. Afin de mettre en évidence les changements par rapport aux profils de rail nominaux, trois des quatre profils de roue de la figure 51 (sans le profil de roue zb.Opt.tww) sont appariés avec les rails des trois courbes Biel Brücke, Biel Portal et Lüegelwang. Par rapport aux profils de roues des véhicules Shuttle considérés ci-dessus, l'évolution des courbes de la fonction géométrique de contact des rails sont nettement moins dispersées. A gauche se trouvent les graphes  $\Delta r$ , au milieu les graphes des indices de position radiale pour les rails les plus à l'extérieur de la courbe et à droite la valeur moyenne de tous les indices de position radiale. Pour le profil de la roue :

- zb.Opt.tww zeigen sich in allen Bögen kaum Unterschiede und es stellt sich ein  $q_E \leq 1$  für einen Bogenradien bis 100m ein.
- RTE29500 zeigen sich in den drei Bögen leichte Unterschiede und es stellt sich ein  $q_E \leq 1$  für Bogenradien in der Spanne zwischen 350m und 450m ein.
- Triebradsatz.tww zeigen sich deutlich günstigere Werte als beim RTE-Profil und es stellt sich ein  $q_E \leq 1$  für Bogenradien in der Spanne zwischen 200m und 300m ein.

Vergleichsweise zu den nominellen Schienen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**. zeigen die Schienen bei längerem Betriebseinsatz Veränderungen, die sich günstiger auf

den Radialstellungsindex auswirken. Um eine Einschätzung zur gegenseitigen Anpassung von Radprofilen aus dem Betriebseinsatz und von Schienenprofilen aus längerer Liegedauer nach dem Schleifen vornehmen zu können ist die aus der Betriebserprobung verfügbare Stichprobe zu klein und bei den Schienen vor allem durch die Konditionierung beeinträchtigt. Es zeigt sich aber aus den vorliegenden Ergebnissen, dass vor allem die Räder im Betriebseinsatz deutliche Veränderungen erfahren. Bei den Schienen zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Diese ist aber nicht so ausgeprägt wie bei den Rädern. Es ist davon auszugehen, dass die Veränderung bei den Schienen weniger schnell voranschreitet, da bei diesen die Anzahl an Belastungszyklen deutlich geringer ist als bei den Rädern.

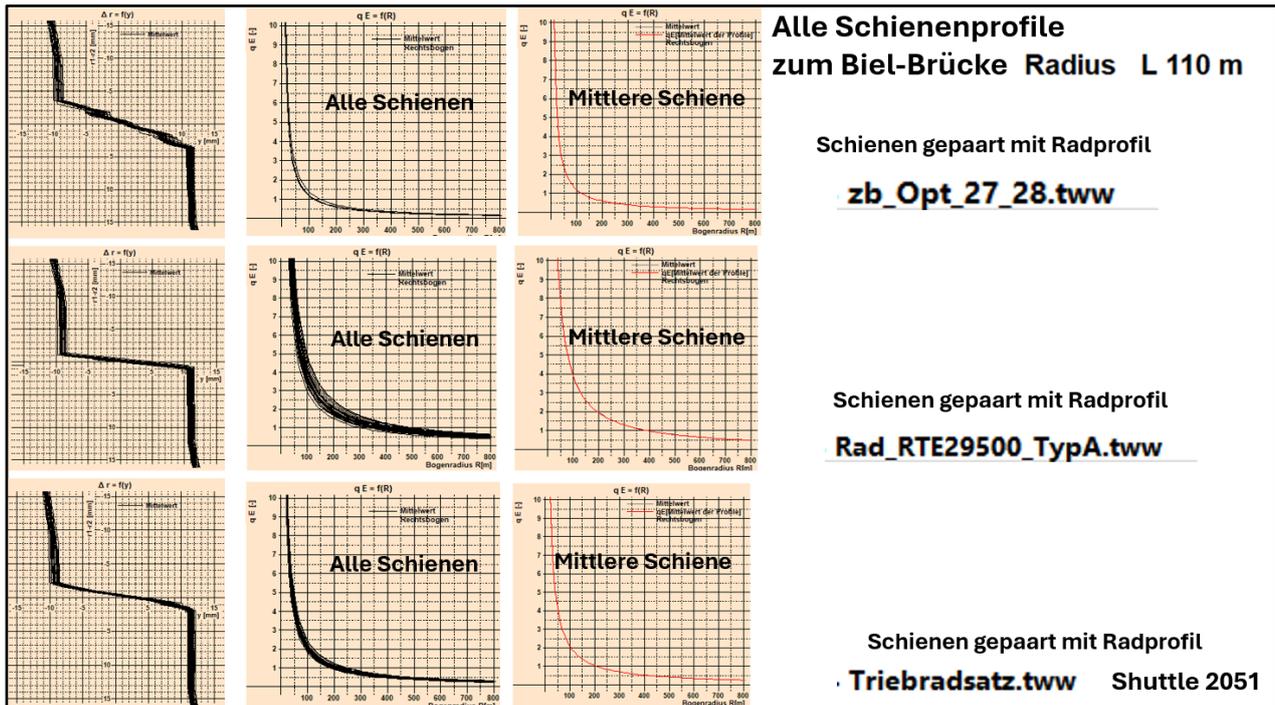


Figure 55 - Profils de roues sélectionnés, associés aux profils de rails de Biel Brücke

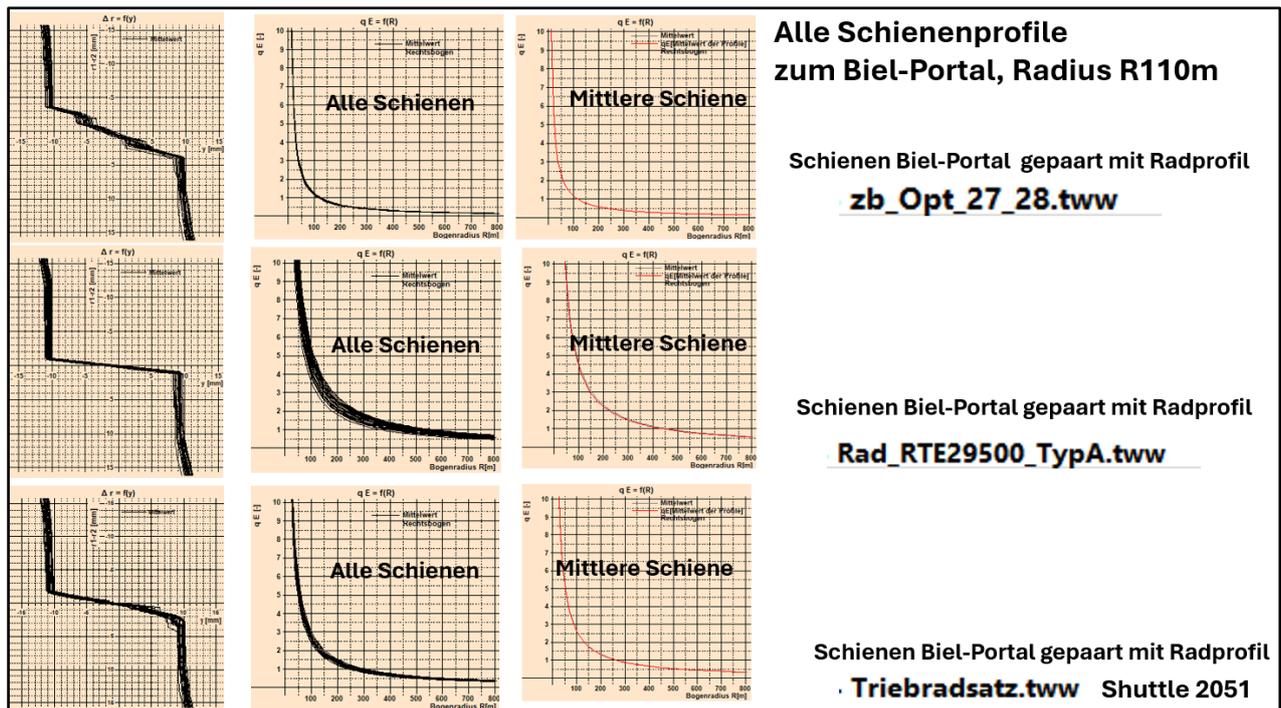


Figure 56 - Profils de roues sélectionnés, associés aux profils de rails de Biel Portal

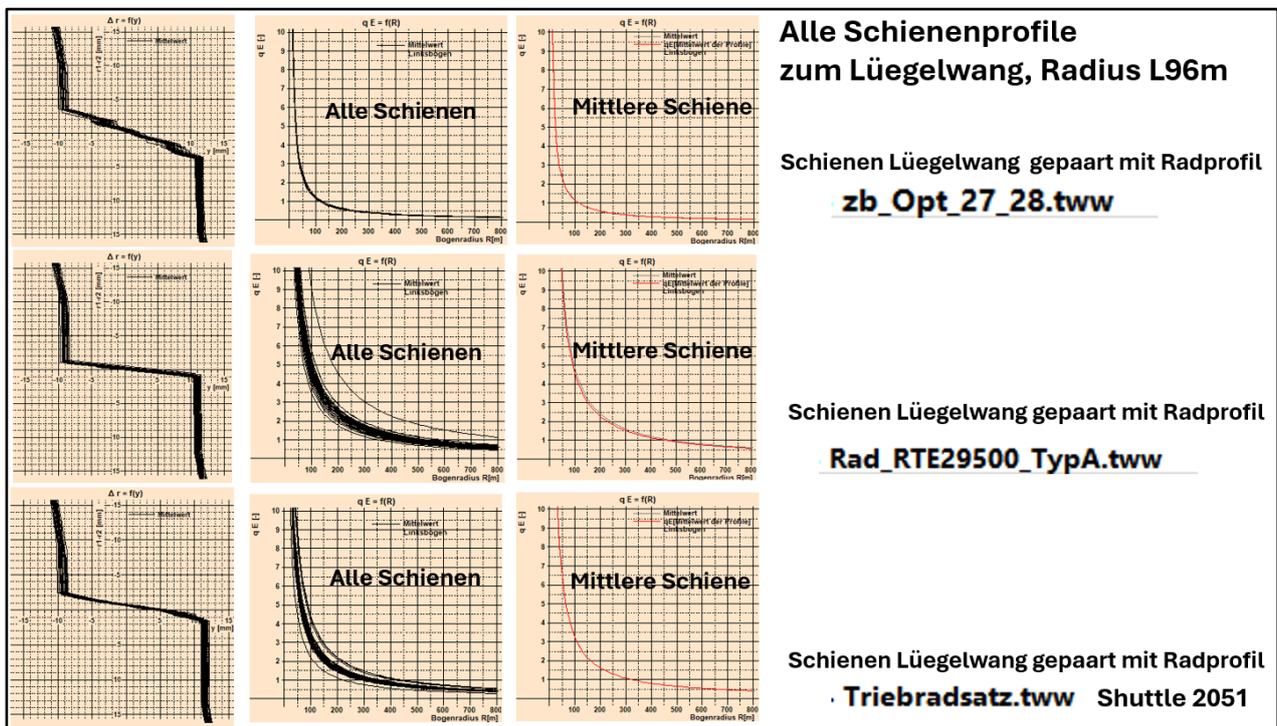


Figure 57 - Profils de roues sélectionnés, associés aux profils de rails de Lüegelwang

### Conclusion sur le développement géométrique par contact des profils de rail

Au niveau du développement des profils de rail, on s'intéresse essentiellement à la dispersion des valeurs. L'évaluation dépend du profil de roue utilisé. Les dispersions les plus faibles sont obtenues avec le profil de roue adapté à l'usure zb\_Opt\_27\_28. Après deux ans d'utilisation sur la ligne Täsch-

Zermatte, ce profil présente, sur la base de l'indice de position radiale, la meilleure adaptation à l'usure par rapport au profil nominal et à celui d'un essieu moteur. Les trois courbes considérées présentent un comportement similaire tant au niveau des indices de position radiale que de la dispersion. Il faut tenir compte du fait qu'un élargissement de la voie s'est produit pour les trois courbes. Cela se traduit par un comportement plus favorable en courbe par rapport au rail nominal.

### 5.4 Influence du profil de la roue sur l'indice de position radiale sur les parcours complets

Entre-temps, les MGBahn dispose des données des profils de rail pour toutes les lignes. Ces informations ont été enregistrées par le véhicule de diagnostic de Sersa. Les quatre profils de roues mentionnés plus haut ont été appariés avec les rails de l'ensemble des lignes du MGBahn. Pour cela, les profils de rails sont disponibles à une distance de 1m sur toute la longueur de la ligne. La Figure 58 montre l'appariement des profils de rail avec les quatre profils de roue du tronçon Täsch - Zermatt. En haut de la figure, le profil de la ligne est représenté avec les grandeurs tels que les rayons de courbure et la pente de la ligne. En bas, les profils de roue sont localisés et appariés avec les rails du tronçon. L'indice de position radiale est déterminé et indiqué uniquement pour les courbes. Pour chaque appariement, une légende est placée à droite, à partir de laquelle l'indice de position radiale peut être déterminé pour chaque courbe. Il en ressort clairement que les profils de roues RTE29500 et Triebradsatz.tww sont totalement inadaptés à ce tronçon de ligne. Le profil de roue le plus performant est le profil de roue zb\_Opt.tww (avec dimensions du boudin de roue réduites). Si l'on observe les résultats de l'indice de position radiale, on remarque que, sur certains tronçons, ce profil de roue n'est pas entièrement satisfaisant. Afin d'en comprendre la raison, une analyse approfondie du parcours et du profil est nécessaire.

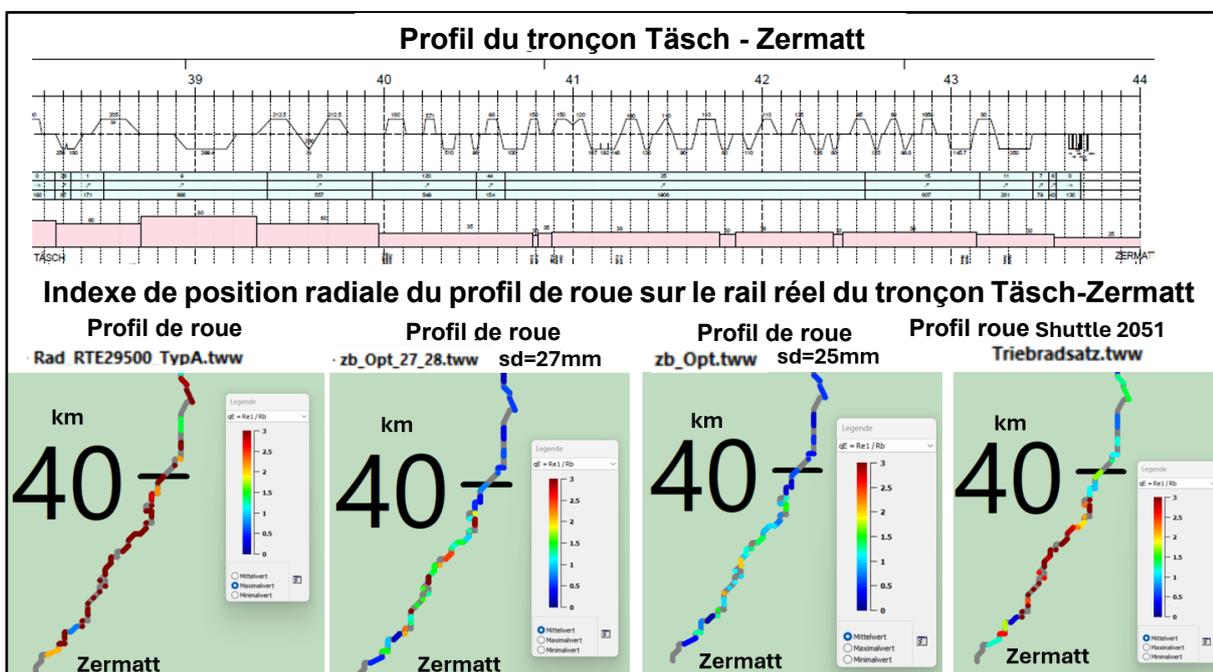


Figure 58 - Extraction Täsch-Zermatt du couple rail-roue Brigue-Zermatt

### Conclusion sur le comportement à adopter sur l'ensemble du trajet Täsch-Zermatt

Le comportement de l'interaction entre les différents profils de roue et de rail sur l'ensemble du tronçon Täsch-Zermatt est comparable à celui observé dans les trois courbes régulièrement

mesurés vers Biel et Lüegelwang. Même le profil de roue le plus favorable ne satisfera pas entièrement les résultats de l'indice de position radiale requis dans les courbes les plus étroites.

## 5.5 Influence de la semelle de frein sur la géométrie de contact

Sur le Shuttle 2053, tous les essieux moteurs (sur le Shuttle, tous les essieux sont reliés entre eux par la chaîne cinématique) ont dû être reprofilés en juillet 2023 en raison de la formation de creux et de l'endommagement de la surface de roulement sur une roue. Les diamètres des roues ont dû être réduits entre 3,5 mm et 5,5 mm, ce qui a eu de grandes répercussions sur l'indicateur d'usure calculé sur toute la période (voir Figure 3). La Figure 59 montre la dégradation sous forme d'arrachement de la surface de roulement et la cavité créée par la plaquette de frein. La Figure 60 montre le contact entre la roue et le rail dans un virage à gauche. La cavité empêche l'établissement de la différence de rayon de roulement. Par la suite, il se produit un contact en deux points et, probablement dans les courbes, un « va-et-vient » entre les deux contacts (surface de roulement et le flanc du boudin). La cavité ne s'est formée que sur la roue droite. Sur la roue gauche, un contact conforme semble s'établir entre le patin de frein et la surface de roulement de la roue.

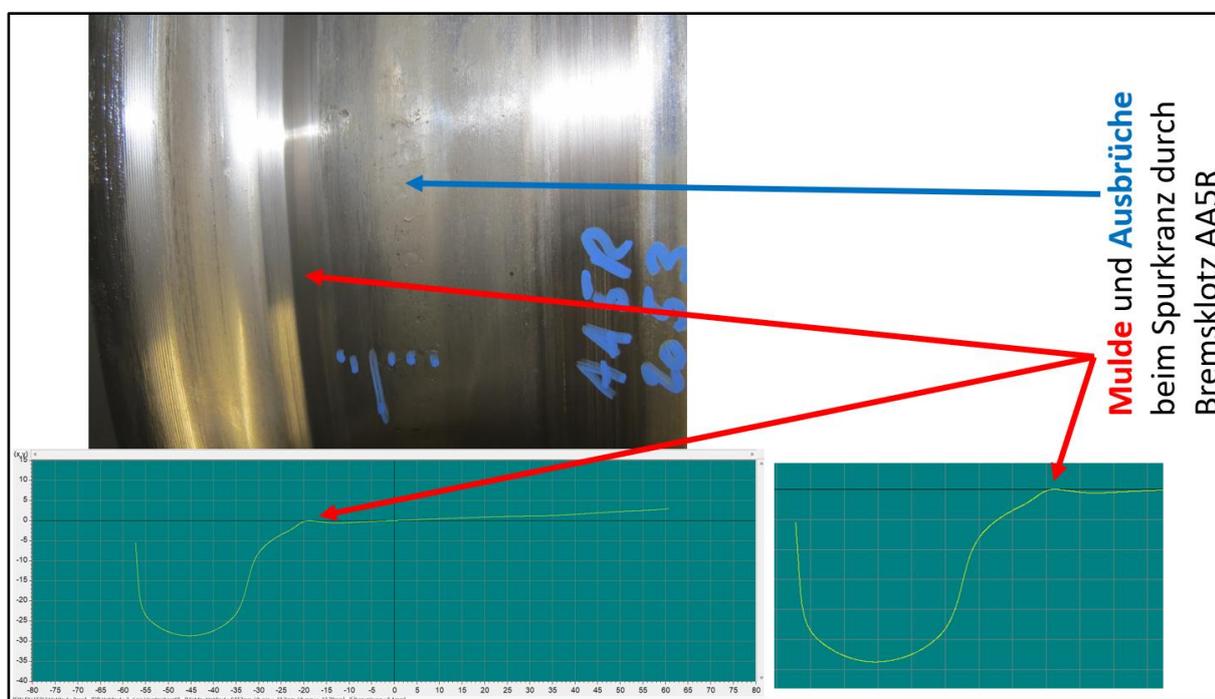


Figure 59 - Formation d'une cavité dans la zone de la gorge de la roue en raison de l'interaction de la roue avec la plaquette de frein

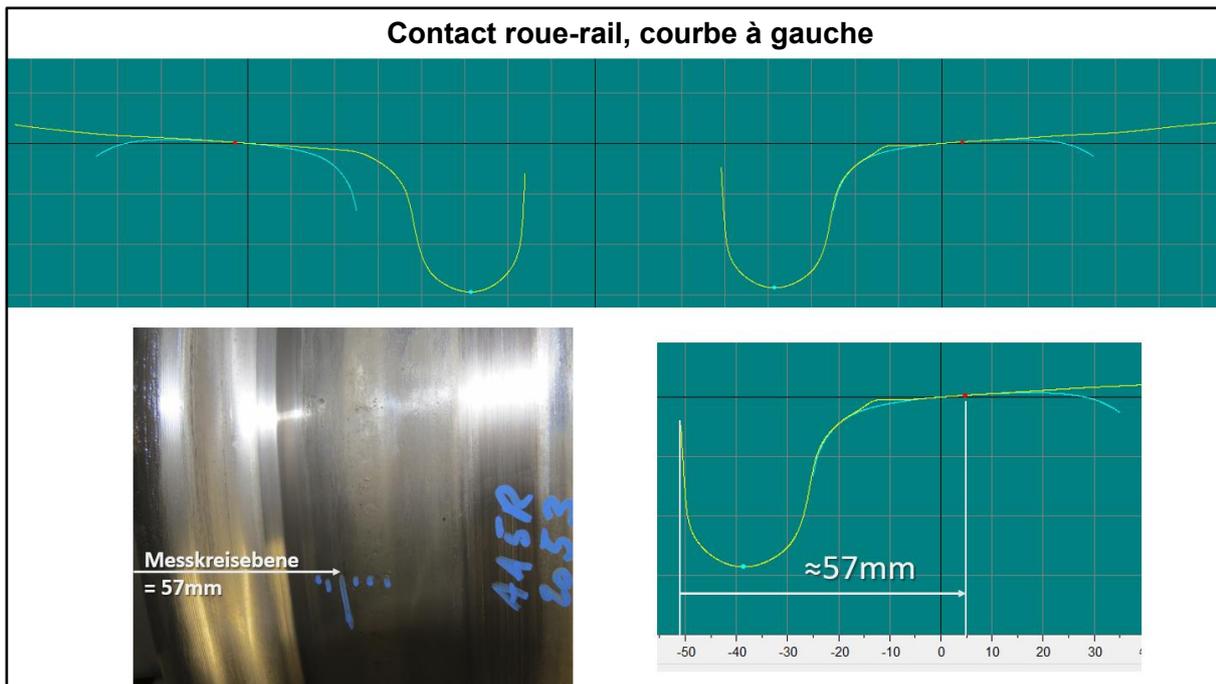


Figure 60 - Appariement de la roue et du rail dans un virage à gauche

## 6 Bruit : Mesures / Surveillance et résultats au niveau du bruit [10]

Dans ce chapitre, les études réalisées dans le cadre d'une campagne de mesures aux MGB sont décrites. Le but était de réaliser une étude phénoménologique de données de mesures afin d'analyser le crissement en courbe.

La Figure 61 donne une vue d'ensemble de la procédure d'analyse et de modélisation du phénomène de « crissement en courbe », laquelle a déjà été présentée dans le rapport précédent. La campagne de mesure réalisée et présentée ici constitue un essai préliminaire supplémentaire (mise en exergue) dans le but de planifier plus précisément et réaliser plus efficacement une vaste campagne de mesure à venir (mesures de terrain). Ainsi, des synergies ont pu être exploitées entre différents thèmes, par exemple avec d'autres projets de recherche (université de Sheffield, AC2T), afin de pouvoir tirer des conclusions communes.

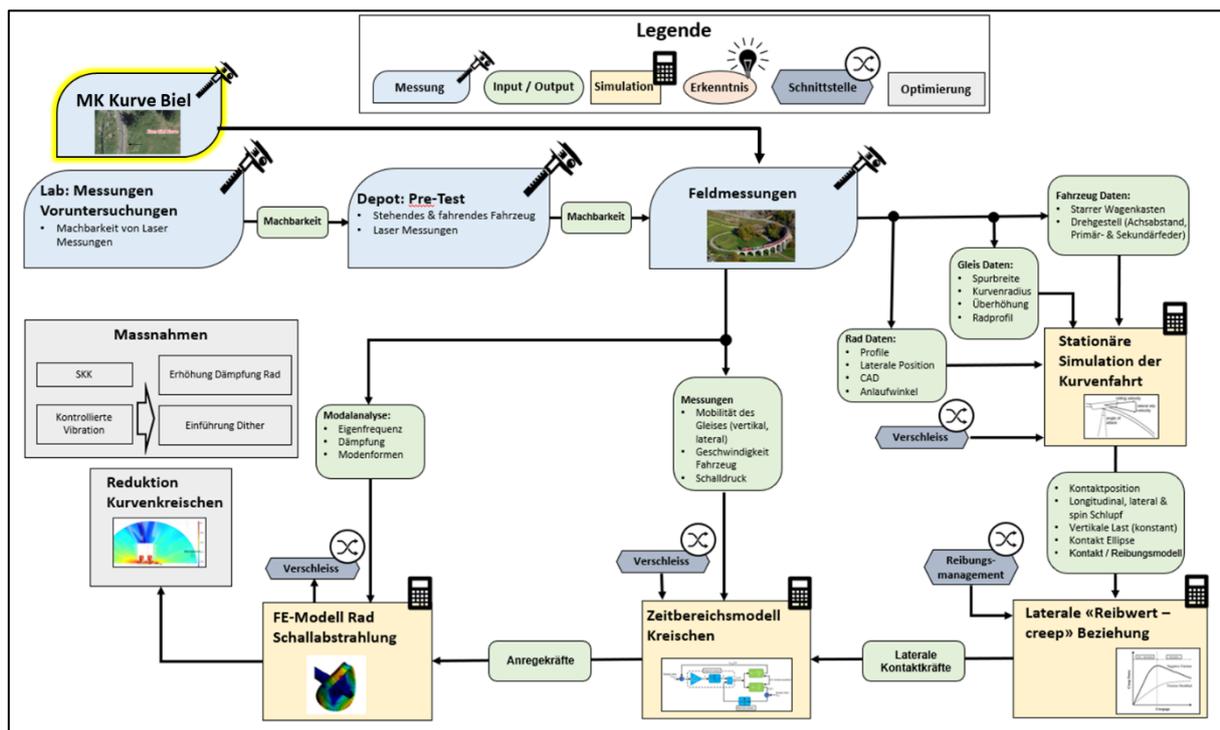


Figure 61 : Procédure schématique pour l'analyse et la modélisation du phénomène "crissement en courbe"

### 6.1 Campagne de mesure de la courbe « Zum Biel », octobre 2023

#### 6.1.1 Lieu de mesure

La Figure 62 montre une photo satellite de la courbe étudiée. La courbe se trouve entre Täsch et Zermatt, proche d'une entreprise de ballast et est bien accessible. Les mesures dans la courbe ont eu lieu le 19.10 (installation et mesures préliminaires) et le 20.10 (mesures principales). Des mesures acoustiques et vibratoires (lors du passage de trains) ainsi que des mesures au coup de marteau ont été effectuées pour caractériser dynamiquement la voie.



Figure 62 : Lieu de mesure : courbe "Zum Biel"

### 6.1.2 Investigations préliminaires

Des mesures des bruit et de vibrations sont effectuées depuis un certains temps sur un véhicule « Schuttle » par l'entreprise « Technode ». Avant la campagne de mesures de la courbe « Zum Biel », ces données ont été analysées via une interface web afin de s'assurer que du crissement en courbe a bel et bien lieu dans la courbe choisie afin de minimiser le risque d'échec de la campagne de mesures (par exemple, si aucun crissement en courbe n'avait lieu, les mesures perdraient de leur intérêt).

La Figure 63 montre une analyse des mesures acoustiques d'un essieu moteur d'une rame « Schuttle » équipée de l'instrumentation de mesure, à deux moments de la journée. A droite, la position géographique de la mesure est représentée par un « + ». A gauche, les spectres d'émissions sonores, en fonction du temps, sont représentés (les cercles noirs représentent la zone spectrale correspondant au passage dans la courbe au point « + »). Comme déjà constaté lors d'autres campagnes de mesure, le crissement en courbe apparait à une fréquence d'environ 5000 Hz. La réalisation de la campagne de mesure est donc conforme aux objectifs.

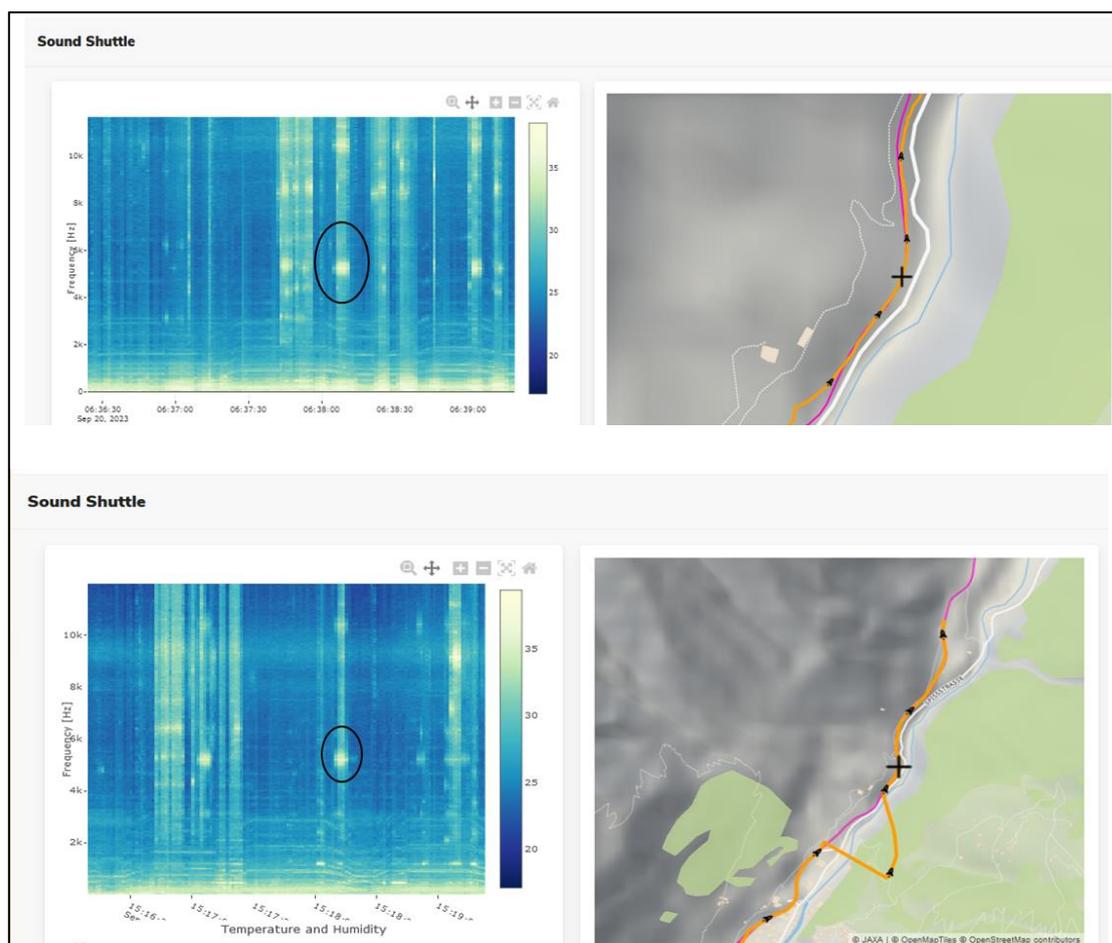


Figure 63 : Analyse des émissions de bruit émis par un essieu moteur d'une rame "Schuttle" équipée de l'instrumentation de mesure.

## 6.2 Mesures

### 6.2.1 Essieu

Lors du crissement en courbe, du bruit est émis par la roue à une fréquence proche d'un mode propre de la roue. Pour déterminer les modes propres de la roue, des mesures à l'aide de coups de marteau ont été réalisées à l'atelier. Pour ce faire, l'essieu

Lors du crissement en courbe, le son est émis par la roue à proximité d'un mode propre de celle-ci. Afin de déterminer les modes propres de la roue, des mesures ont été réalisées en atelier à l'aide de coups de marteau. Pour ce faire, l'essieu a été soulevé hydrauliquement au niveau du palier (ou boîte) d'essieu. Des accéléromètres ont été installés sur la roue et sur l'arbre d'essieu. La roue a été excitée à l'aide de différents coups de marteaux. La Figure 64 montre un capteur monté sur une roue. Des mesures ont été faites sur un essieu porteur ainsi qu'un essieu moteur.

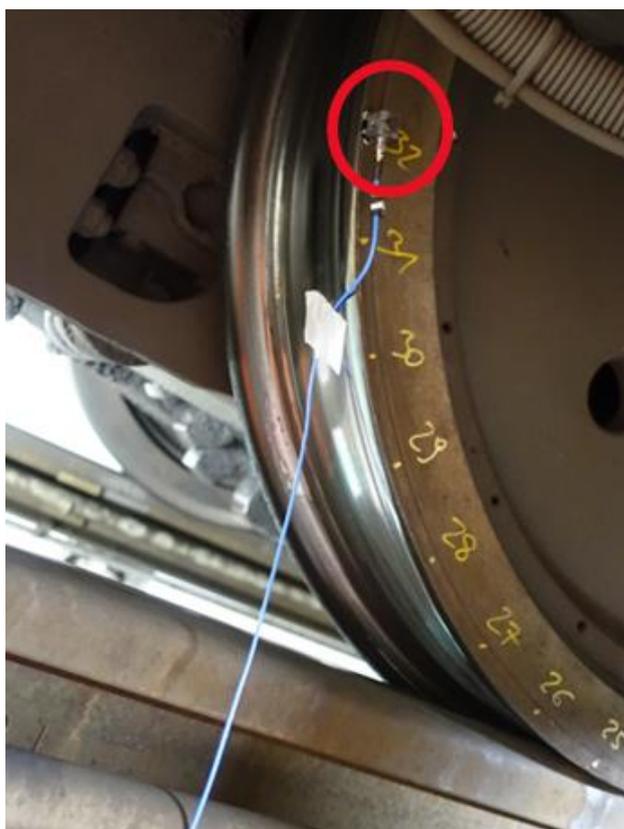


Figure 64 : Mesures au coup de marteau sur l'essieu dans un atelier

### 6.2.2 Mesures stationnaires en courbe

La Figure 65 montre le dispositif de mesure lors du passage d'une rame automotrice. Des microphones ont été positionnés de chaque côté de la voie, à hauteur de la table de roulement des roues. Sur le champignon du rail intérieur, des accéléromètres triaxiaux ont été installés, ainsi qu'un accéléromètre uniaxial sur la traverse.



Figure 65 - Instrumentation et passage d'une rame automotrice

Des mesures au marteau ont été réalisées sur la voie, ainsi que des enregistrements du bruit de passage de différents trains circulant dans les deux directions. Par ailleurs, les conditions

environnementales pertinentes, telles que la température et l'humidité de l'air, ont également été relevées.

### 6.3 Résultats des mesures

#### 6.3.1 Fréquences propres et impédances des essieux et des roues

La Figure 66 présente l'impédance d'entrée d'une roue d'un essieu moteur. La roue a été excitée à la position 32 (voir Figure 64) à l'aide d'un marteau, et l'accélération a été mesurée au même emplacement. La cohérence, utilisée comme critère de qualité, affiche des valeurs très élevées (>0,95) à partir d'une fréquence d'environ 200 Hz. Les modes propres de la roue sont clairement visibles (pics marqués), de même que le mode qui apparaît dans les mesures de bruit en passage (vers 5200 Hz).

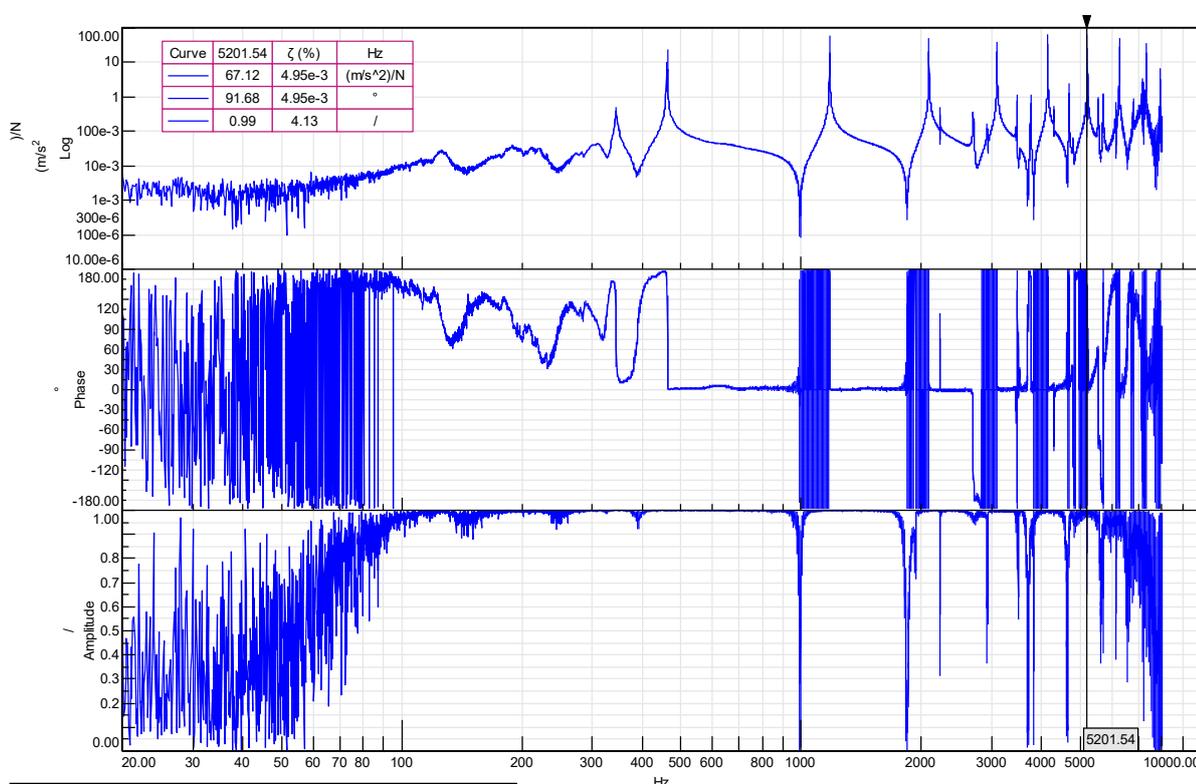


Figure 66 - Impédance d'entrée sur une roue d'un essieu moteur – Amplitude (en haut), Phase (au milieu), Cohérence (en bas)

D'autres mesures ont été réalisées sur un essieu porteur, avec un accent mis sur les basses fréquences, jusqu'à 1000 Hz, afin de recueillir des données utiles concernant l'usure (voir chapitre 3). L'essieu a été excité au niveau du disque de roue (figure 67, flèche rouge), et l'accélération a été enregistrée au même endroit. La figure 68 présente les résultats obtenus. Les modes propres de basse fréquence sont clairement visibles, jusqu'à environ 6 Hz. L'identification des modes et de leur formes correspondantes vont être analysé dans le futurs avec une simulation par éléments finis.

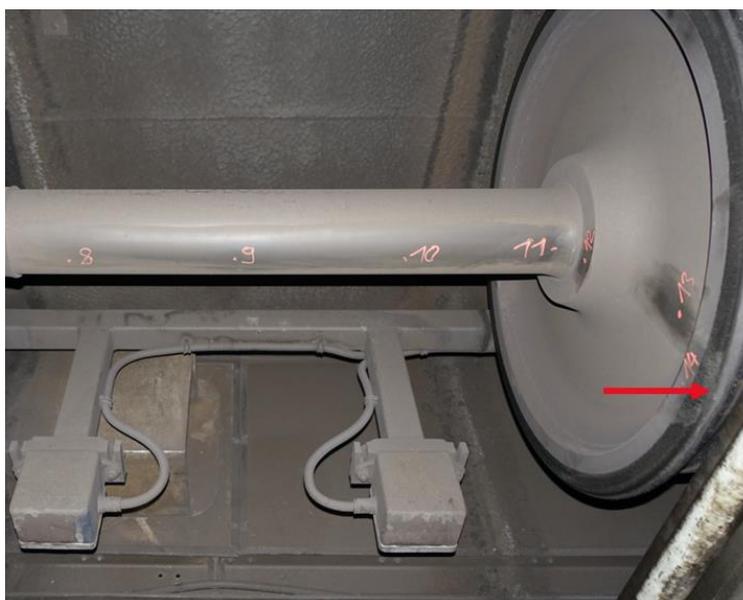


Figure 67 - Mesures en atelier au marteau sur un essieu porteur

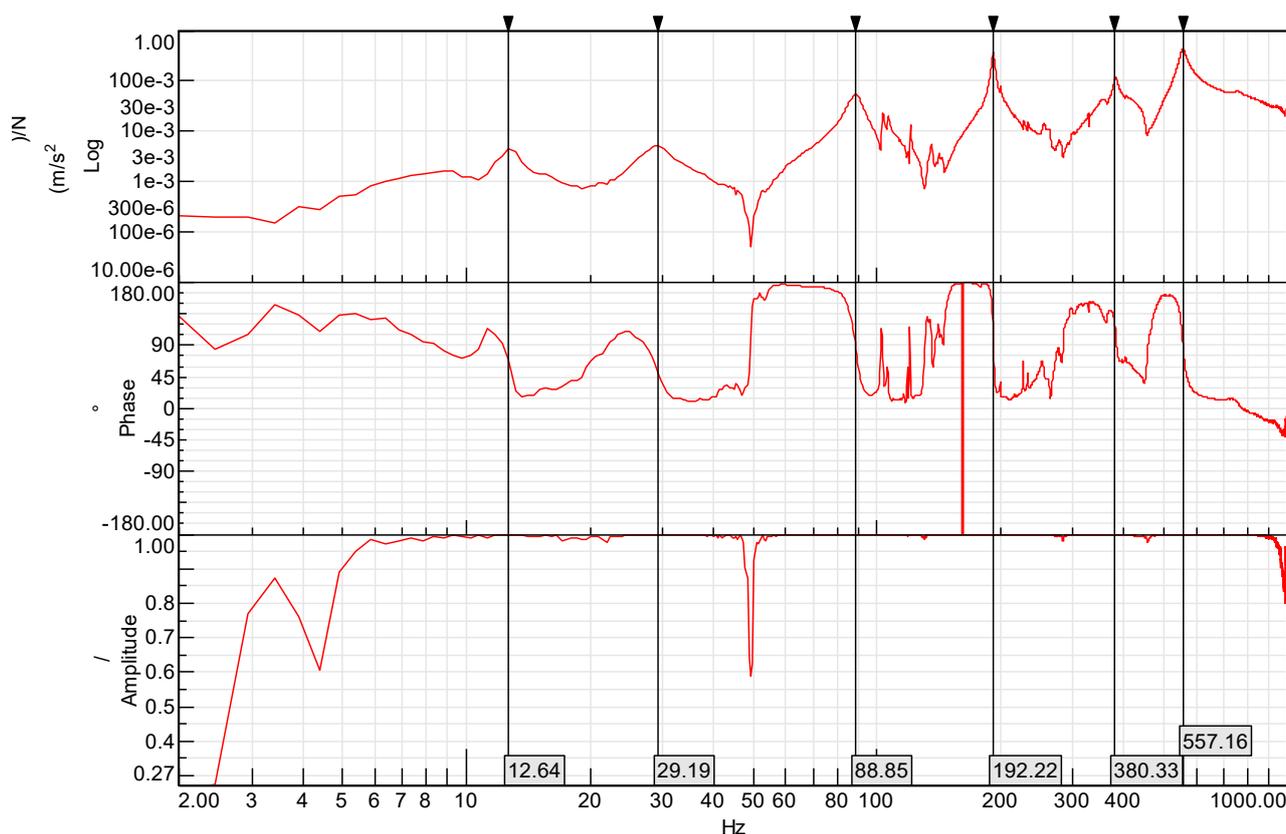


Figure 68 - Inertie d'entrée du bogie – Amplitude (en haut), Phase (au milieu), Cohérence (en bas)

### 6.3.2 Fréquences propres et inerties du rail

Le rail a été excité dans la direction verticale à l'aide d'un marteau impulsif, comme illustré dans la coupe de mesure de la Figure 69, et l'accélération a été mesurée par des capteurs (bleu et rouge). À partir de ces mesures, l'inertie d'entrée (bleu) et l'inertie de transfert (rouge) ont été déterminées pour la direction verticale. Les résultats sont présentés dans la Figure 70. Une bonne cohérence a été atteinte jusqu'à environ 700 Hz. À environ 159 Hz, une anti-résonance apparaît, bien qu'il ne soit pas encore clair d'où provient cette anti-résonance. Dans le cadre de futures recherches, un modèle

par éléments finis du rail sera développé, et ce modèle devrait permettre d'examiner plus en détail cet effet. Les mesures sont adéquates pour créer un premier modèle de ce type, bien que cette plage de fréquences soit davantage pertinente pour le thème de l'« usure dynamique » que pour le crissement en courbe. En général, des mesures dynamiques sont réalisées afin de couvrir au mieux les deux sujets.

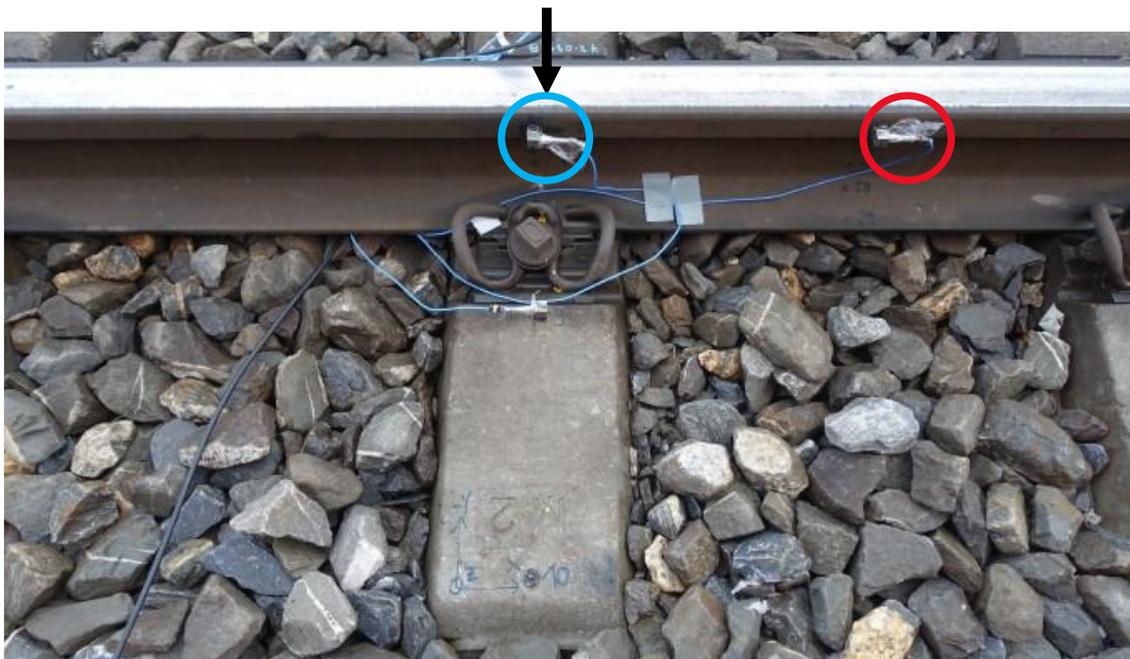


Figure 69 - Excitation (noir) et mesure de l'accélération (bleu ou rouge)

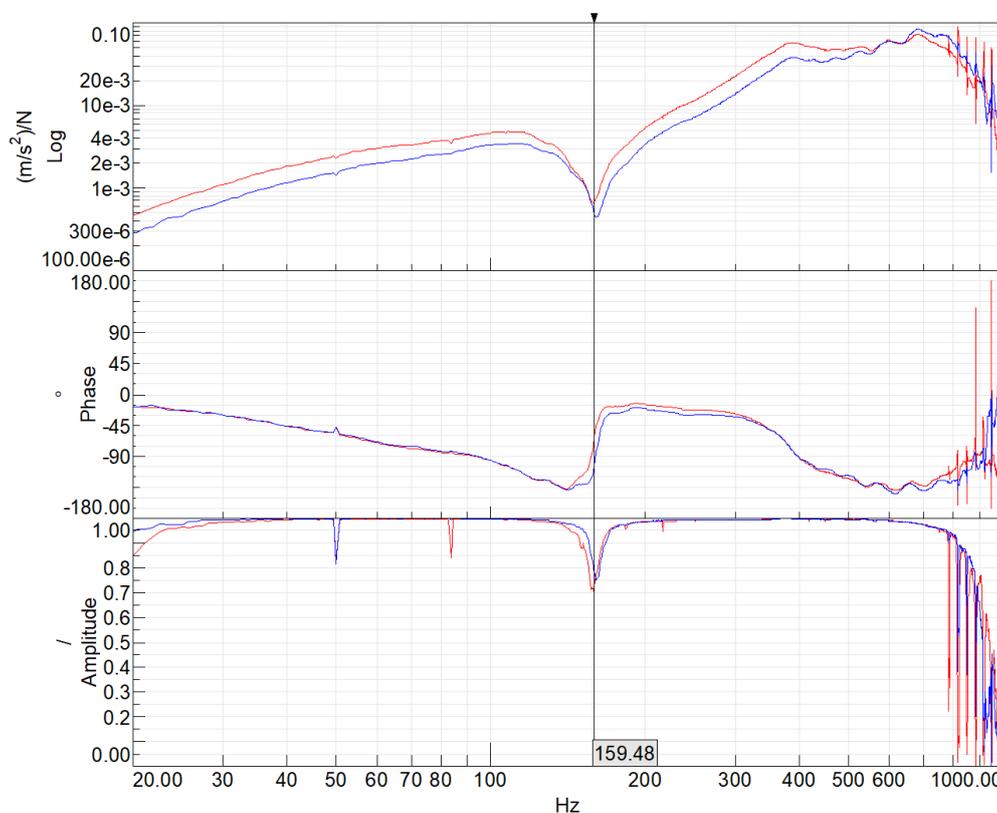


Figure 70 - Inertie d'entrée du rail lors de l'excitation au niveau du seuil – Amplitude (en haut), Phase (au milieu), Cohérence (en bas)

## 6.4 Crissement en courbe lors du passage de train

Le crissement en courbe est généralement un phénomène très complexe, qui dépend de nombreux paramètres tels que les conditions de frottement, le moment de la journée, la température et l'humidité de l'air, etc. Lors de la campagne de mesure, différents passages ont été enregistrés, mais le crissement en courbe n'est pas systématiquement survenu.

La Figure 71 montre la pression acoustique (densité spectrale de puissance, PSD) sur le rail intérieur lors du passage en direction de Täsch. Le crissement en courbe se manifeste autour de 5140 Hz. Cela correspond au mode déjà mis en évidence précédemment dans la Figure 66. La légère différence entre les fréquences mesurées lors de la mesure au marteau et celle du bruit de passage résulte du fait que la fréquence propre d'une roue en rotation est toujours légèrement inférieure à celle d'une roue à l'arrêt. De plus, les bogies porteurs (flèches vertes) et les bogies moteurs (flèches rouges) des deux automotrices ont été marqués ici. Il apparaît que le crissement en courbe se produit au niveau d'un bogie moteur particulier.

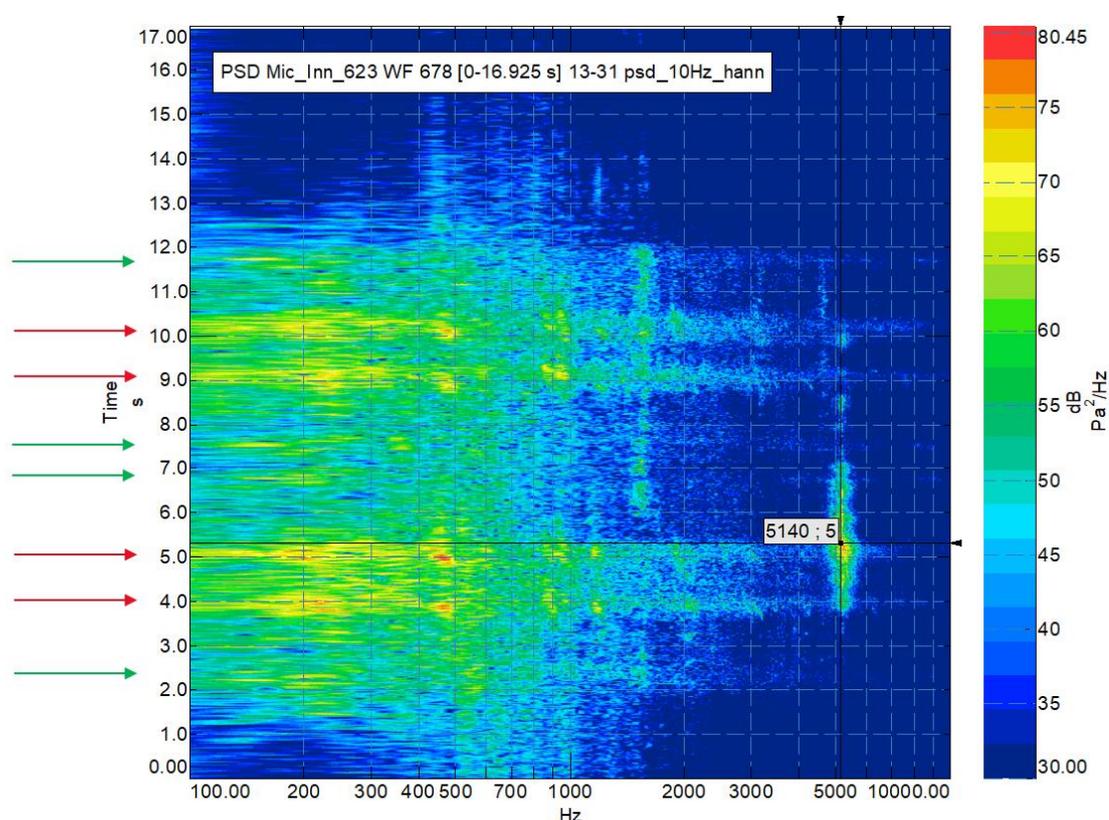


Figure 71 - Pression acoustique (densité spectrale de puissance, PSD) sur le rail intérieur lors du passage – direction Täsch – Crissement en courbe autour de 5140 Hz.

De plus, la dépendance directionnelle du crissement en courbe a été étudiée. Les premières analyses ont montré que le crissement en courbe se manifeste davantage lors de la descente en direction de Täsch que lors de la montée en direction de Zermatt. La Figure 72 montre une telle comparaison de la pression acoustique.

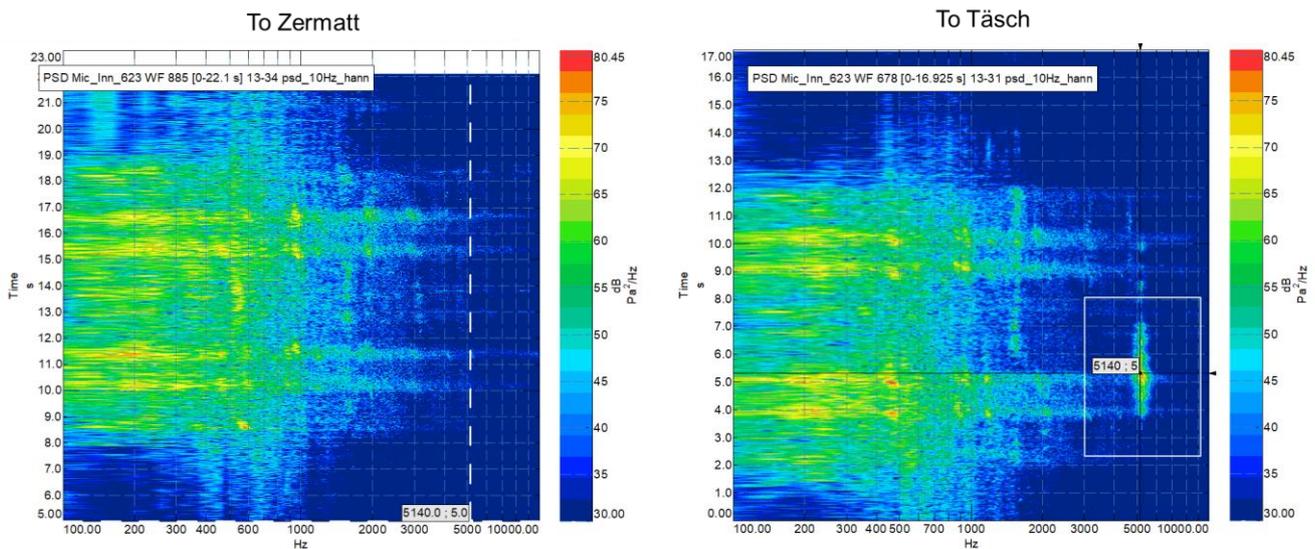


Figure 72 - Pression acoustique (densité spectrale de puissance, PSD) sur le rail intérieur lors du passage – Trajet en direction de Zermatt (à gauche) et Täsch (à droite) – Crissement en courbe autour des 5140 Hz

## 7 Mesures / surveillance et résultats généraux [11]

### 7.1 Vibrations au niveau de la boîte d'essieu

Le système de mesure est installé sur deux compositions de trains de la MGBahn, une Komet ABDeh 2026 et un Shuttle BDeh 2052. Les composants essentiels sont les capteurs d'accélération montés sur les paliers d'essieux du bogie qui est en aval lors de la montée, et des microphones montés à proximité de ce même bogie sur le châssis du train. De plus, le système de mesure dispose d'un système de localisation par GNSS (système de navigation par satellite global), utilisé pour déterminer la position lors du passage des véhicules .

Une documentation détaillée est disponible dans le « Rapport final sur l'essai de mise en service SKK sur la ligne Täsch-Zermatt » [1]. Par conséquent, aucune documentation complémentaire ne sera fournie ici.

#### 7.1.1 Valeurs mesurées des accélérations – Généralités

Afin d'obtenir un aperçu général des données de mesure, les valeurs d'accélération au niveau de la boîte d'essieux par mois pendant le deuxième essai de mise en service sont présentées dans la Figure 73. Il convient de noter que les sections de voie en vert indiquent de faibles vibrations, tandis que celles en rouge indiquent des vibrations fortes. En résumé, on peut dire que les valeurs de vibration sur la voie conditionnée restent dans la « zone verte » tout au long de l'année, ce qui suggère que les installations SKK fonctionnent bien.

**Octobre**  
01.10.22 – 01.11.22



**Novembre**  
01.11.22 – 01.12.22



**Décembre**  
01.12.22 – 01.11.23



**Janvier**  
01.01.23 – 01.02.23



**Février**  
01.02.23 – 01.03.23



**Mars**  
01.03.23 – 01.04.23



**Avril**  
01.04.23 – 01.05.23



**Mai**  
01.05.23 – 01.06.23



**Juin**  
01.06.23 – 01.07.23

**Juillet**  
01.07.23 – 01.08.23

**Août**  
01.08.23 – 01.09.23

**Septembre**  
01.09.23 – 01.10.23

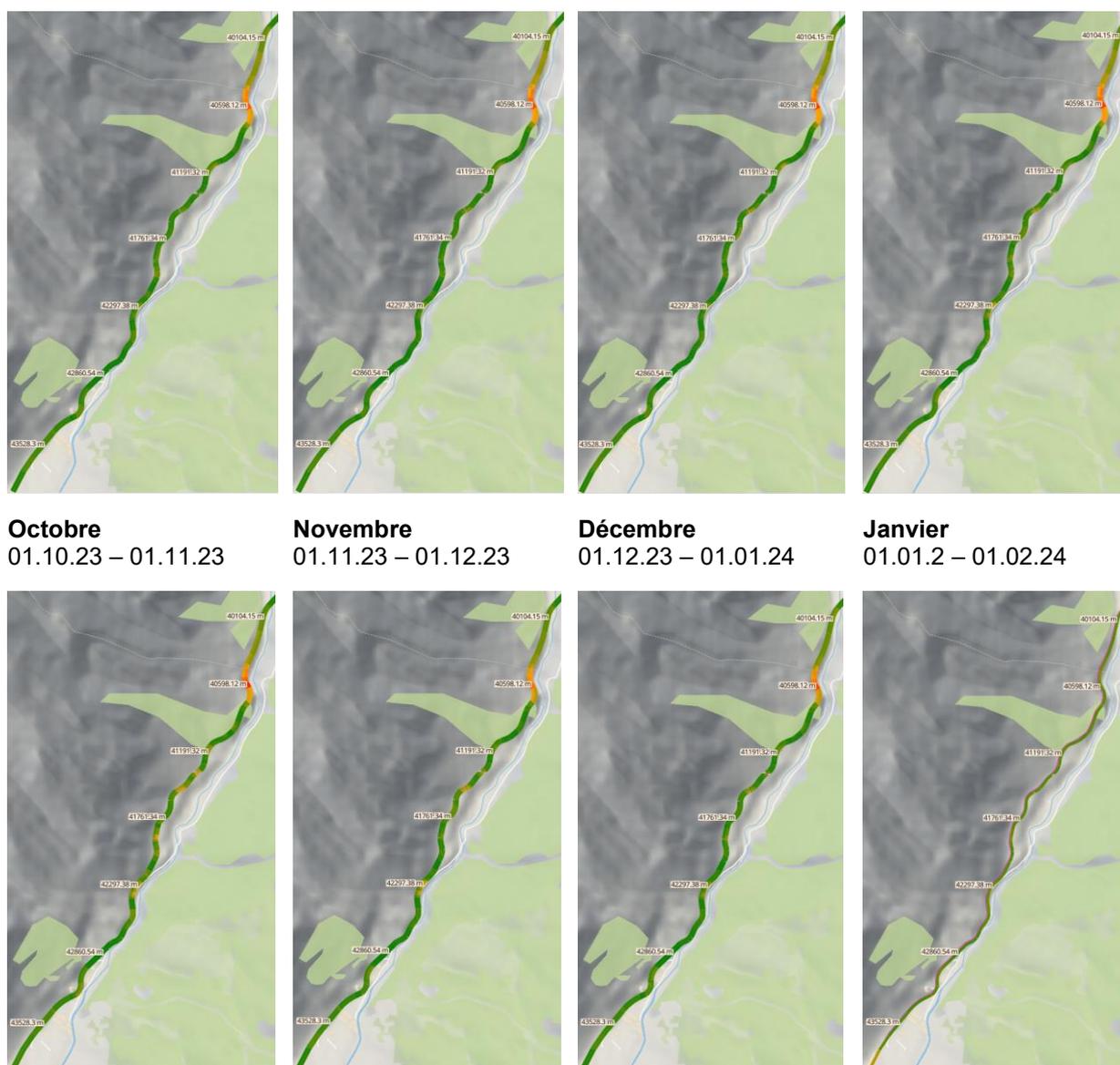


Figure 73 - Historique des vibrations « Täschsand » - Zermatt, octobre 2022 - décembre 2024

### 7.1.2 Conclusion sur les valeurs d'accélération – Usure ondulatoire générale

Durant les mois d'été de juillet et août 2022, des températures journalières très élevées ont été enregistrées. Cela a entraîné une augmentation des valeurs d'accélération sur les deux véhicules équipés de capteurs d'accélération (Komet 2026 et Shuttle 2052). C'est l'une des raisons pour lesquelles l'essai d'exploitation a été prolongé d'une année supplémentaire auprès de la MGBahn.

Pendant l'été 2023, les températures exceptionnellement élevées de l'année précédente n'ont pas été atteintes. Les températures sont restées dans une plage normale pour la même période de l'année. La surveillance a permis de constater que l'effet observé en 2022 ne s'est pas reproduit.

Des essais en laboratoire réalisés entre-temps sur la base de cette observation ont montré que l'efficacité des produits de conditionnement actuellement utilisés diminue lorsque la température du rail augmente.

## 7.2 Données mesurées relatives au bruit

Les données des mesures collectées par les deux systèmes sont traitées et préparées relativement au projet SKK comme décrit dans les deux chapitres suivants. Elles sont également géoréférencées par le système GNSS à l'aide des coordonnées projetées lors du passage des véhicules. Sauf mention explicite, toutes les données utilisées dans les analyses proviennent de l'année 2023. Les évaluations sont différenciées en fonction du véhicule mesuré et du sens de circulation. Afin de mettre en évidence des variations ou des écarts, les résultats sont présentés selon leur évolution au cours de la journée (heures 0 à 23) ou sur l'ensemble de l'année 2023 (semaines de service 1 à 52).

Le Shuttle 2052 circulant principalement sur le tronçon considéré entre Täsch et Zermatt, la base de données pour ce véhicule est très complète. C'est pourquoi l'analyse se concentre principalement sur ce véhicule. À l'inverse, pour le Komet 2026, il n'existe pas de données de mesure couvrant toutes les heures de la journée ou toutes les semaines calendaires sur le tronçon Täsch-Zermatt. La Figure 74ci-dessous présente une visualisation des résultats pour le crissement en courbe ; le graphique supérieur montre la montée et le graphique inférieur, la descente.

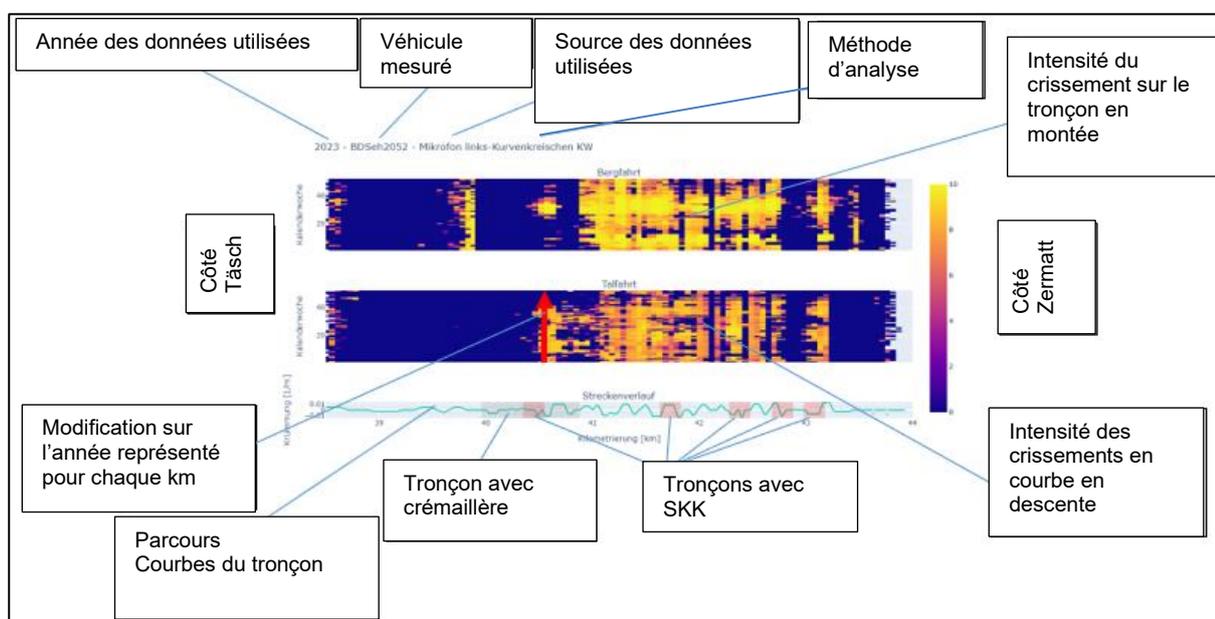


Figure 74 - Description des graphes d'analyse Technode (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

### 7.2.1 Filtre pour les crissements en courbe

Les données de mesure issues des microphones sont directement transformées dans le domaine fréquentiel (par transformée de Fourier) au niveau du capteur, et les amplitudes par fréquence sont moyennées sur une seconde. L'information relative à la phase est alors ignorée, afin d'obtenir un spectre représenté uniquement dans l'espace des nombres réels.

Le premier rapport final sur l'essai en service du SKK entre Täsch et Zermatt [1] a mis en évidence que le crissement en courbe apparaît au niveau des essieux moteurs, spécifiquement à une fréquence d'environ 5300 Hz. Ce constat s'applique aux deux compositions de trains, car elles utilisent les mêmes bogies et, en particulier, les mêmes essieux et roues.

Le crissement en courbe semble correspondre à une bande isolée dans le spectre.

Pour disposer d'un indicateur de présence du crissement en courbe, le filtre décrit dans le premier rapport final de l'essai SKK Täsch – Zermatt [1] a été utilisé. Celui-ci fournit une grandeur exploitable uniquement de manière relative.

### 7.2.2 Filtre pour l'usure ondulatoire

L'usure ondulatoire présente, selon l'expérience, une longueur d'onde comprise entre 40 mm et 90 mm. Pour pouvoir la détecter, il est donc nécessaire de filtrer dans le domaine des longueurs d'onde, et non dans le domaine fréquentiel. Le lien entre la longueur d'onde et la fréquence est donné par la vitesse du véhicule.

Pour le calcul d'une valeur caractéristique des ondes de glissement, on utilise le spectrogramme des accélérations. Les fréquences  $y$  sont converties en longueurs d'onde à l'aide de la vitesse instantanée du véhicule. Ensuite, les amplitudes discrètes du spectre situées dans la plage de longueurs d'onde mentionnée sont utilisées pour calculer la variance dans cette bande.

### 7.2.3 Résultats du crissement en courbe

Les deux graphiques suivants montrent l'évolution du crissement en courbe sur la ligne Täsch – Zermatt lors de la montée et de la descente au cours de l'année 2023 (la semaine calendaire étant représentée sur l'axe vertical).

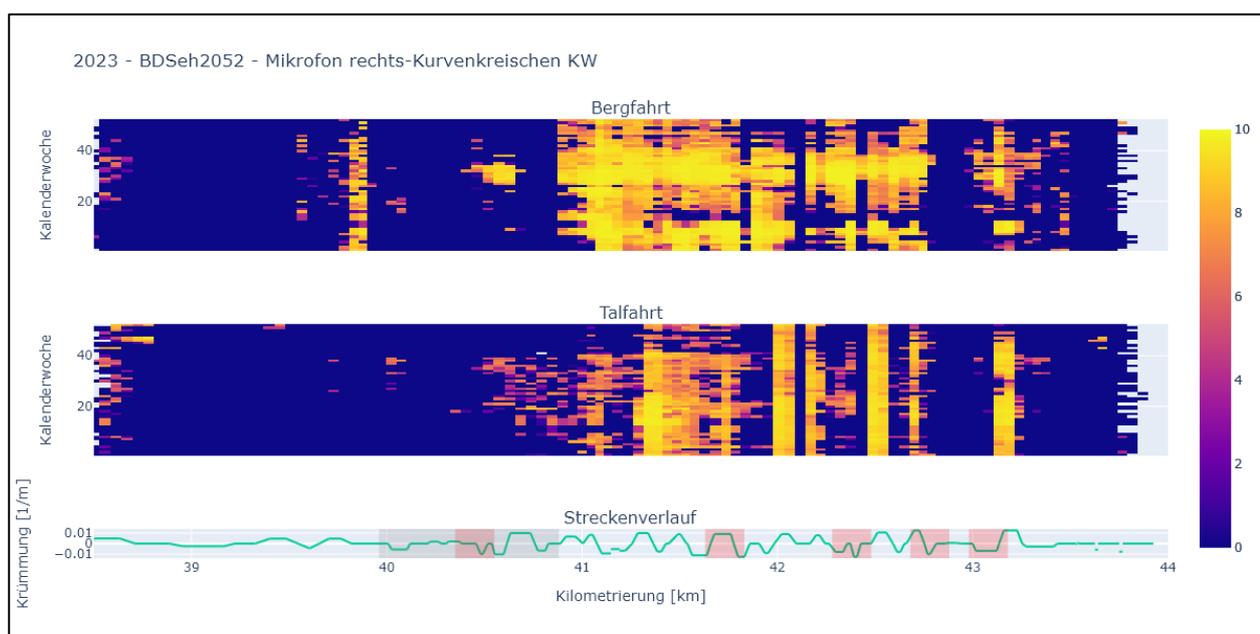


Figure 75 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone droit – Crissement en courbe – Semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

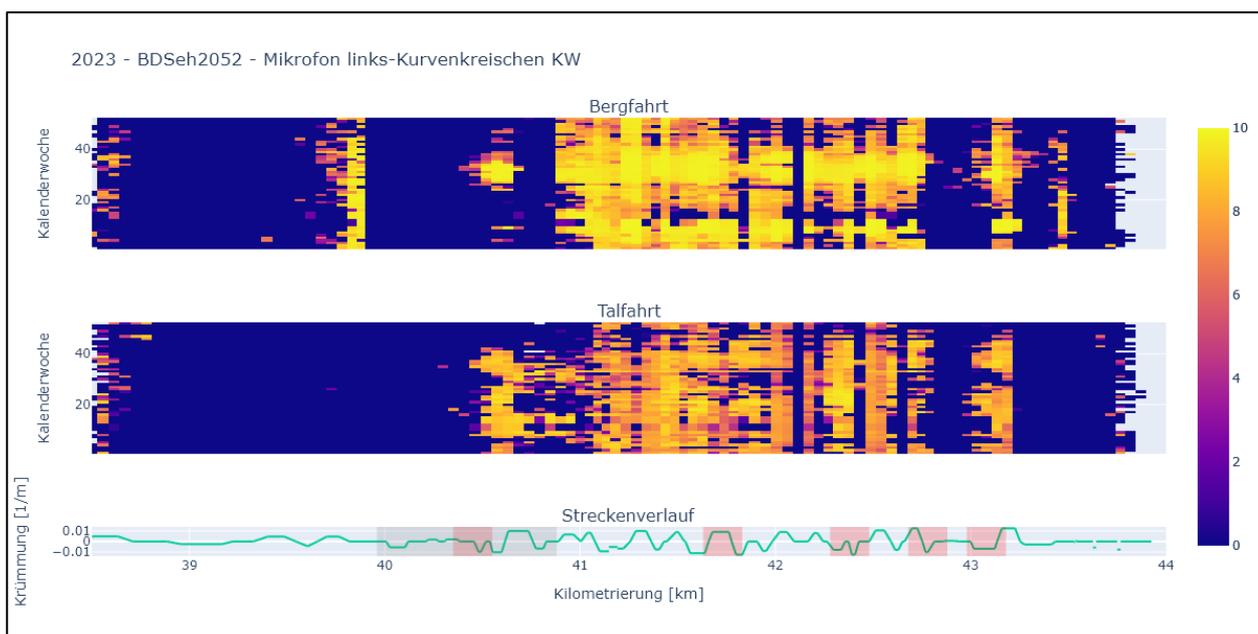


Figure 76 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone gauche – Crissement en courbe – Semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

Les deux graphiques suivants montrent l'évolution du crissement en courbe sur la ligne Täsch – Zermatt au cours de la journée.

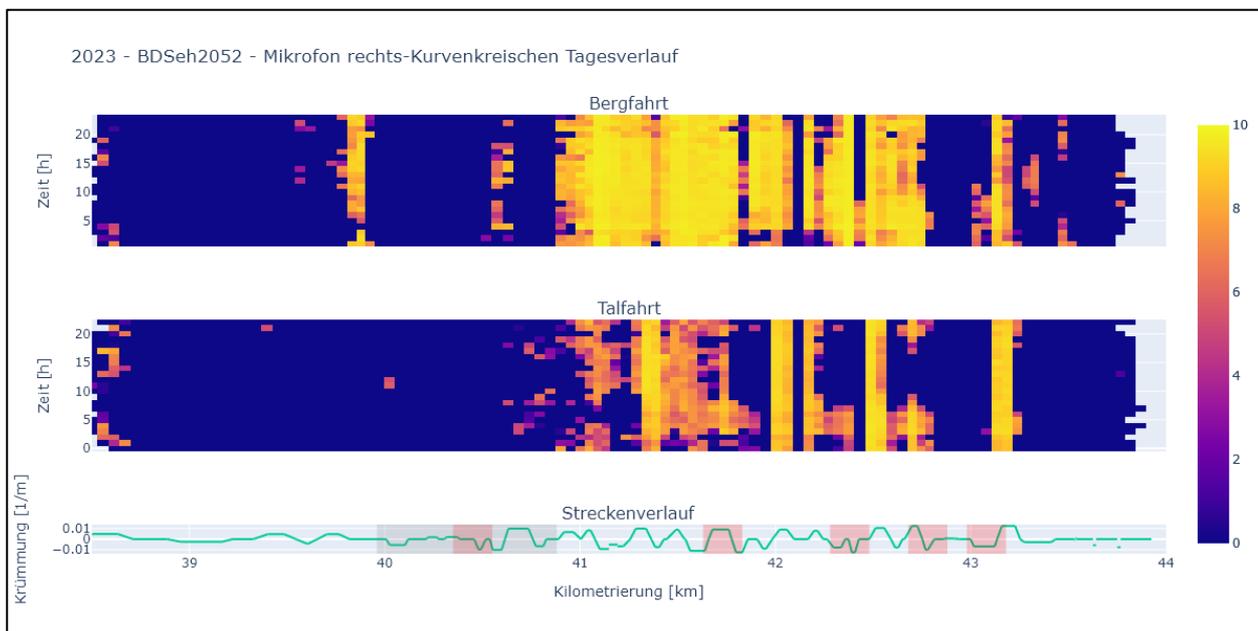


Figure 77 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone droite - Crissement en courbe - Courant de la journée (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

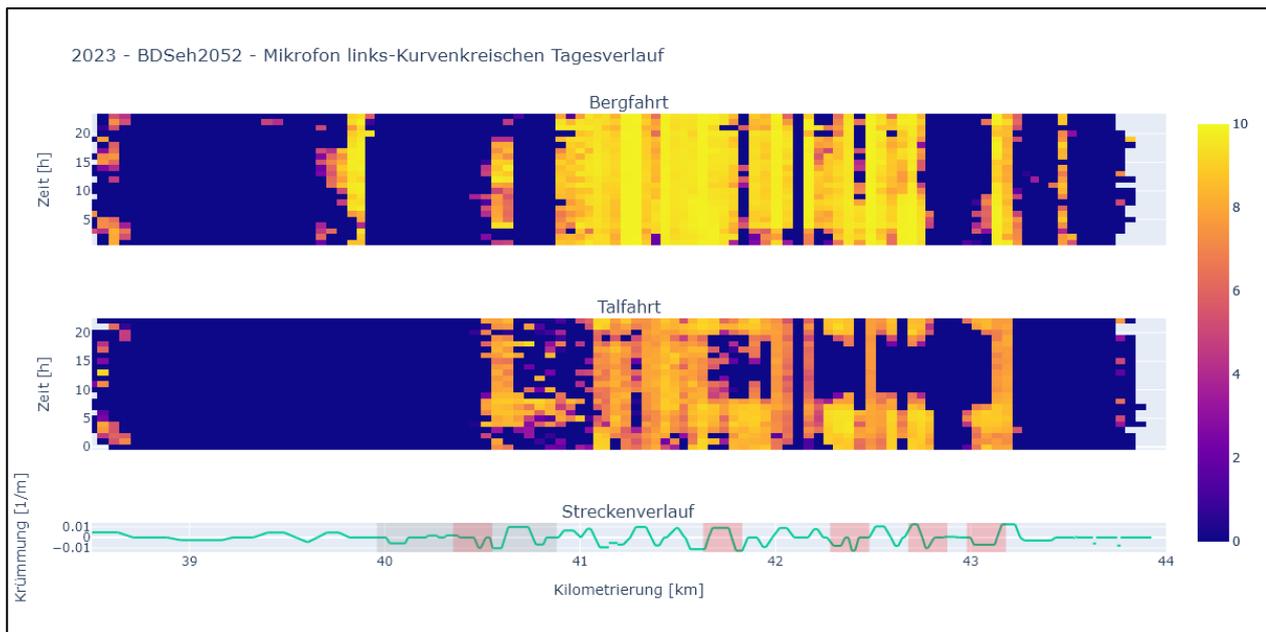


Figure 78 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone gauche - Crissement en courbe - Courant de la journée (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

Les conclusions suivantes ressortent de ces graphes :

- En montée, le crissement en courbe est plus important qu'en descente. Le crissement en courbe apparaît également dans un nombre de virages plus élevé en montée qu'en descente.
- Il est intéressant de noter que le tronçon situé au km 39,9 ne provoque du crissement en courbe uniquement en montée.
- En été et lors de la montée, le crissement en courbe est plus intense que pendant les autres saisons. En descente, cet effet n'est pas aussi visible.
- En descente et dans les zones de conditionnement, le crissement en courbe est plus intense la nuit que le jour.

### 7.3 Résultats sur l'usure ondulatoire respectivement, sur les vibrations dans les longueurs d'onde de 40 – 90 mm

Les deux graphes suivants (Figure 79Figure 80) montrent l'évolution de la variance de l'accélération verticale dans les longueurs d'onde de 40 – 90 mm sur le tronçon Täsch – Zermatt et sur l'année 2023.

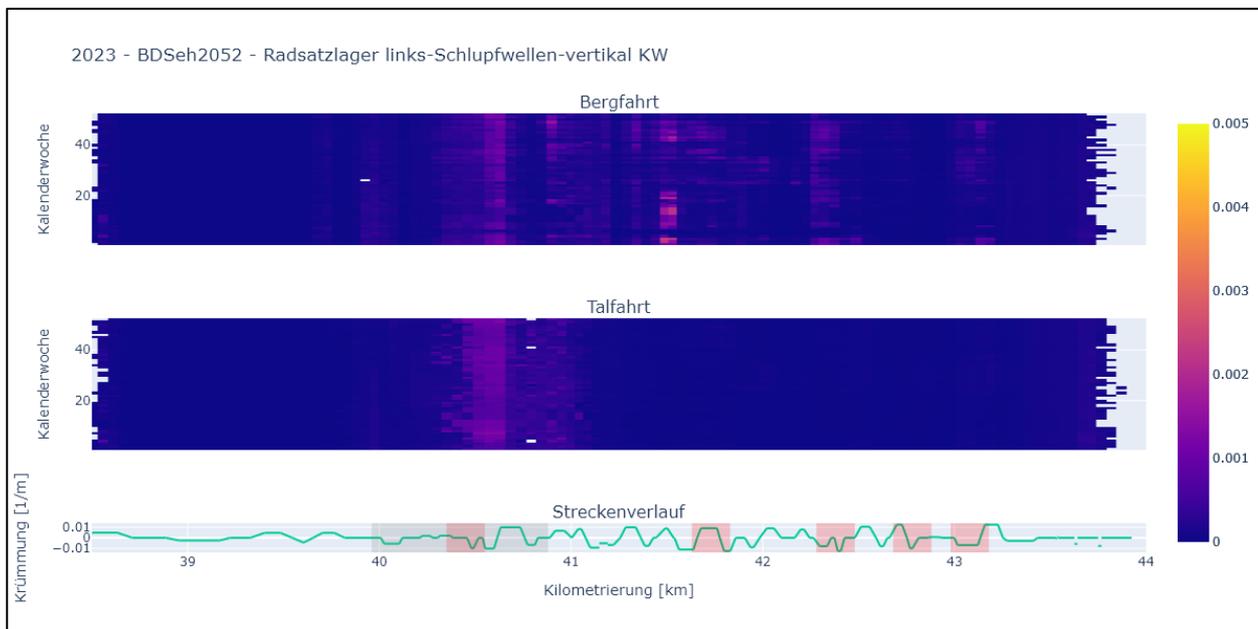


Figure 79 - 2023 – BDeh 2052 - Boîte d'essieux - gauche - usure ondulatoire verticale - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

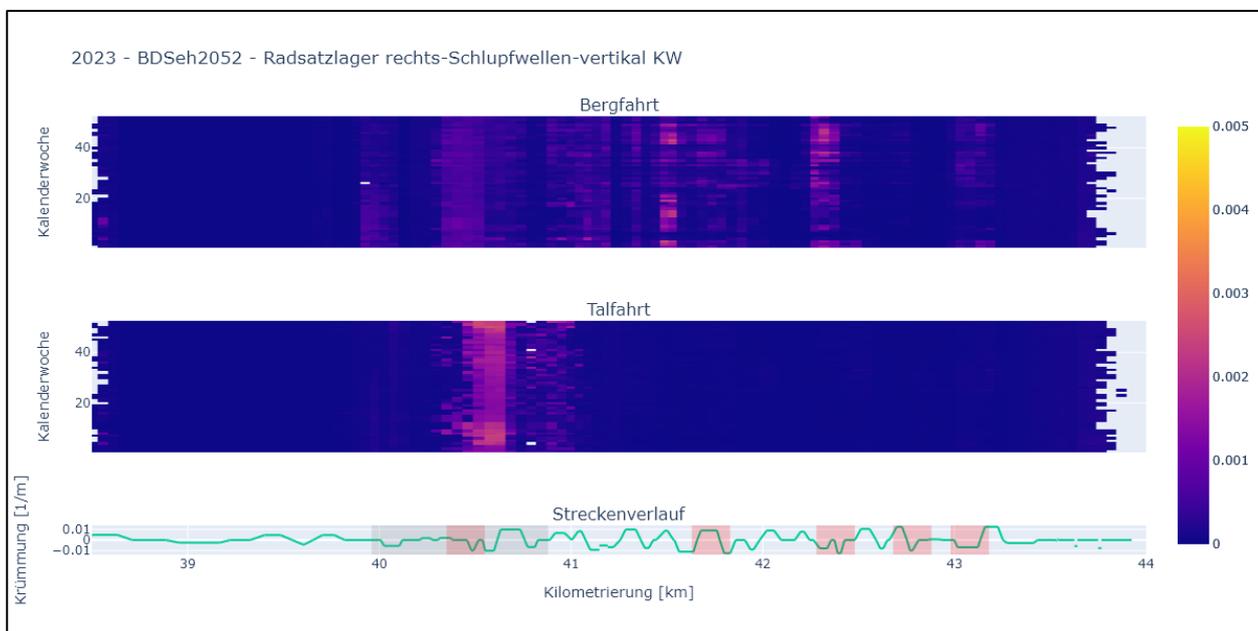


Figure 80 - 2023 – BDeh 2052 - Boît d'essieux - droite - usure ondulatoire - vertical - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

Les deux graphes suivants, Figure 81 et Figure 82, montrent l'évolution de la variance des accélérations latérales dans la gamme de longueurs d'onde de 40 à 90 mm sur le tronçon Täsch - Zermatt et sur l'année 2023. Attention à la différence d'échelle entre la barre de couleur et les graphes de la page précédente !

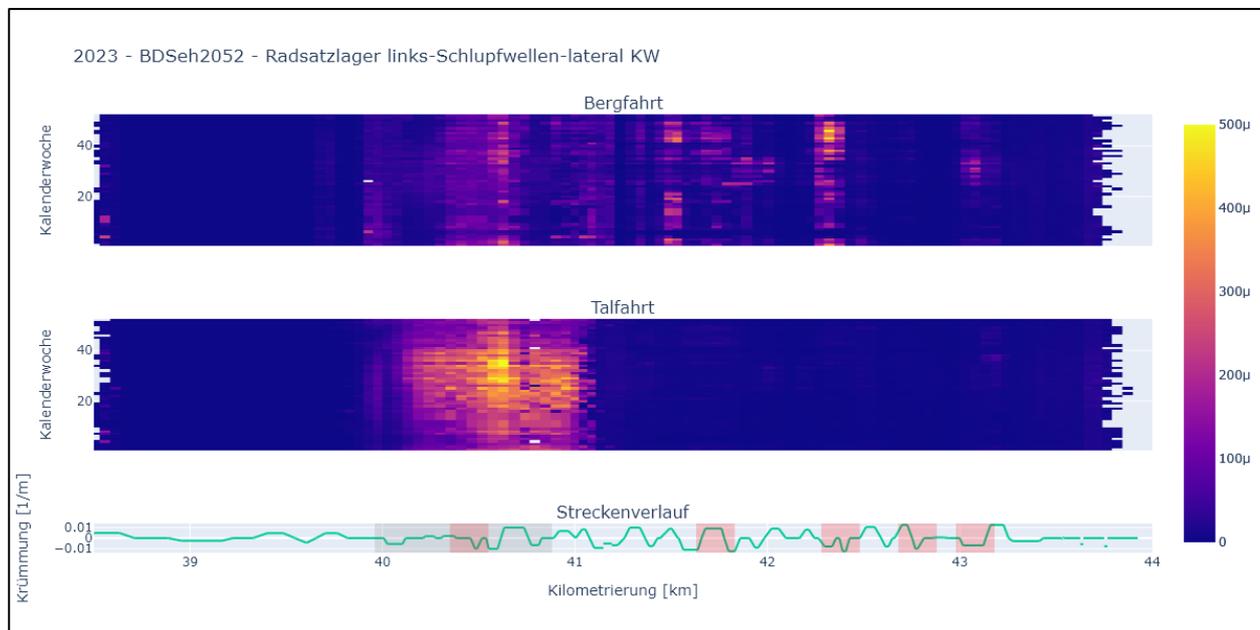


Figure 81 - 2023 – BDSch 2052 - boîte d'essieux - gauche - usure ondulatoire - latéral - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

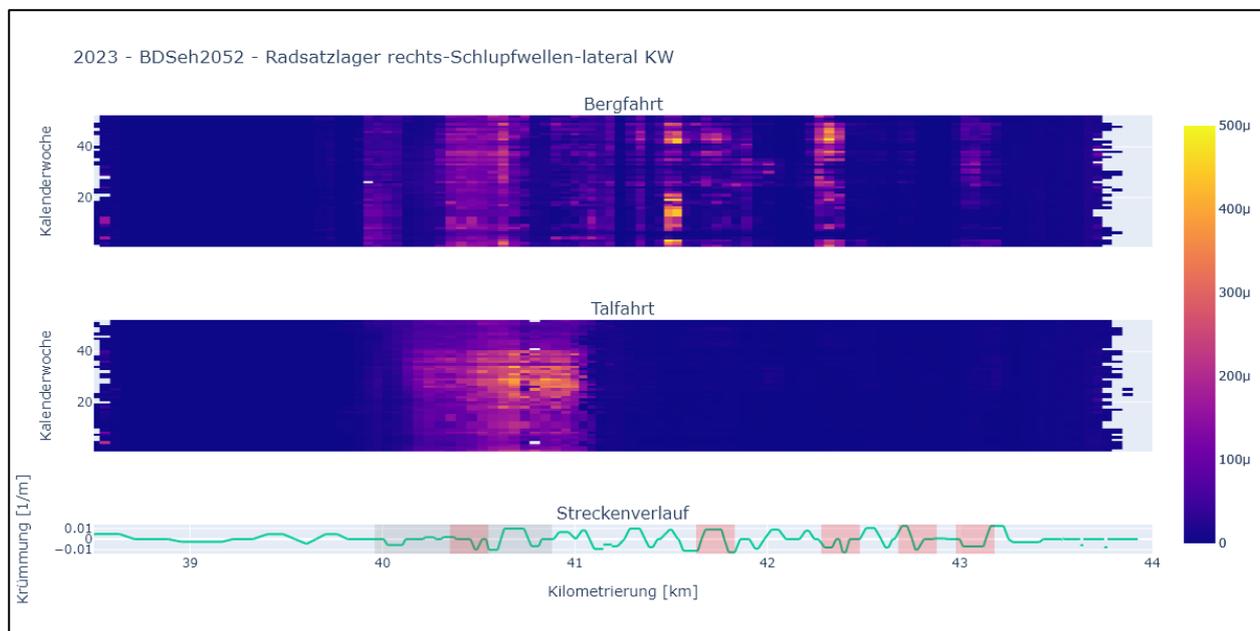


Figure 82 - 2023 – BDSch 2052 - boîte d'essieux - droite - usure ondulatoire - latéral - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

Les points suivants sont illustrés par les graphes ci-dessus :

- De manière générale, il est intéressant de noter que les représentations montrent toutes de grandes différences entre la montée et la descente. Les causes possibles sont les conditions de traction (freinage ou traction) et la position de l'essieu mesuré dans le train (essieu avant ou arrière sur le bogie ou également bogie avant ou arrière sur le véhicule).
- En montée, il y a plus de tronçons qui ont tendance à vibrer dans la plage de longueurs d'onde définie. Lors de la descente, les zones dans lesquelles des vibrations se produisent dans la plage de longueurs d'onde définie se trouvent exclusivement dans la zone des crémaillères.
- Les vibrations latérales dans la plage de longueurs d'onde définie se produisent sur une distance beaucoup plus longue dans la zone de la crémaillère que les vibrations verticales lors de la descente.

## 7.4 Discussions des résultats

### 7.4.1 Modification depuis janvier 2022

Le fait que le crissement en courbe soit aussi marqué lors de la montée est surprenant, car ce phénomène n'avait pas été observé de manière aussi évidente en 2022.

Son évolution a alors été analysée au fil des jours plus en détail. C'est ce que l'on observe sur les deux graphiques de la Figure 83 et Figure 84.

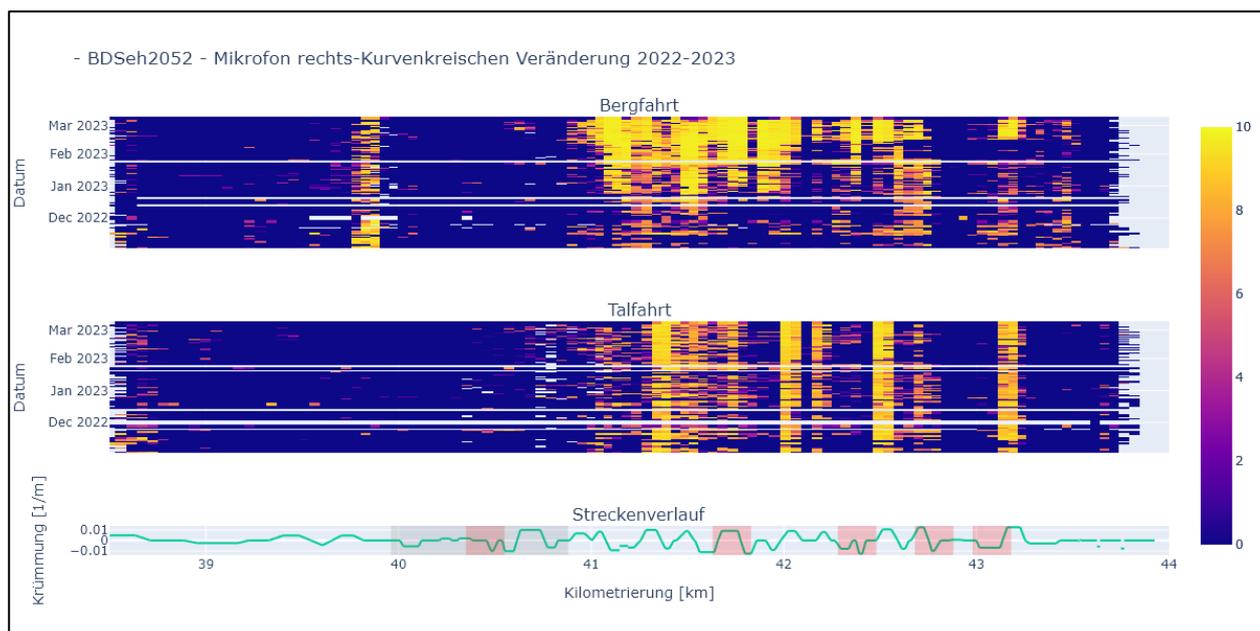


Figure 83 - BDeh 2052 – Microphone droit – Crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

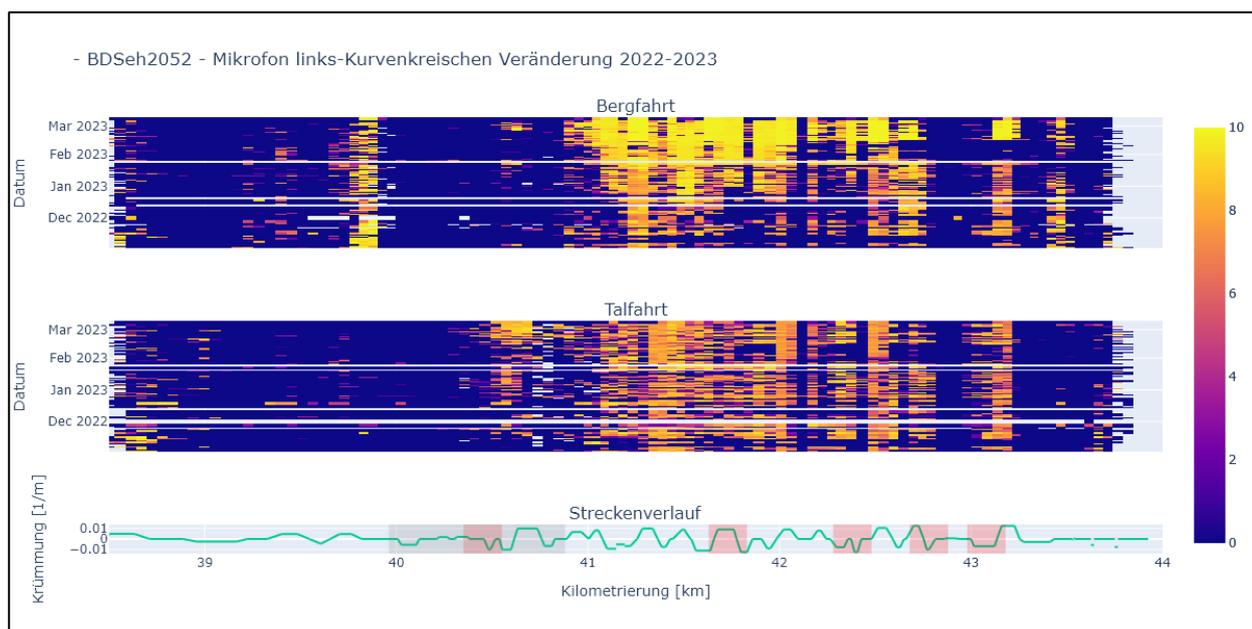


Figure 84 - Microphone gauche – Crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

Les graphiques montrent qu'à partir de fin janvier 2023, les conditions de génération du crissement en courbe lors de la montée ont effectivement changé.

Alors qu'en descente, le phénomène est resté relativement stable dans le temps, une augmentation notable du cri de courbe a été observée en montée à partir de cette période.

Le changement est tel que la situation s'est inversée : en décembre, le crissement en courbe était encore plus marqué en descente qu'en montée, tandis qu'à partir de fin janvier, l'inverse s'est produit.

Ce renversement est étonnant et n'a, jusqu'à présent, pas pu être expliqué.

Il se pose donc la question d'un éventuel changement sur le véhicule ou sur l'infrastructure. Les deux graphiques suivants, Figure 85 et Figure 86, montrent les mêmes analyses mais basées sur les données des microphones du véhicule Komet.

Durant la période en question, aucune variation similaire n'a été constatée pour la montée avec le Komet.

La comparaison des résultats obtenus avec le Shuttle et avec le Komet laisse penser que le crissement en courbe est nettement moins présent sur le véhicule Komet.

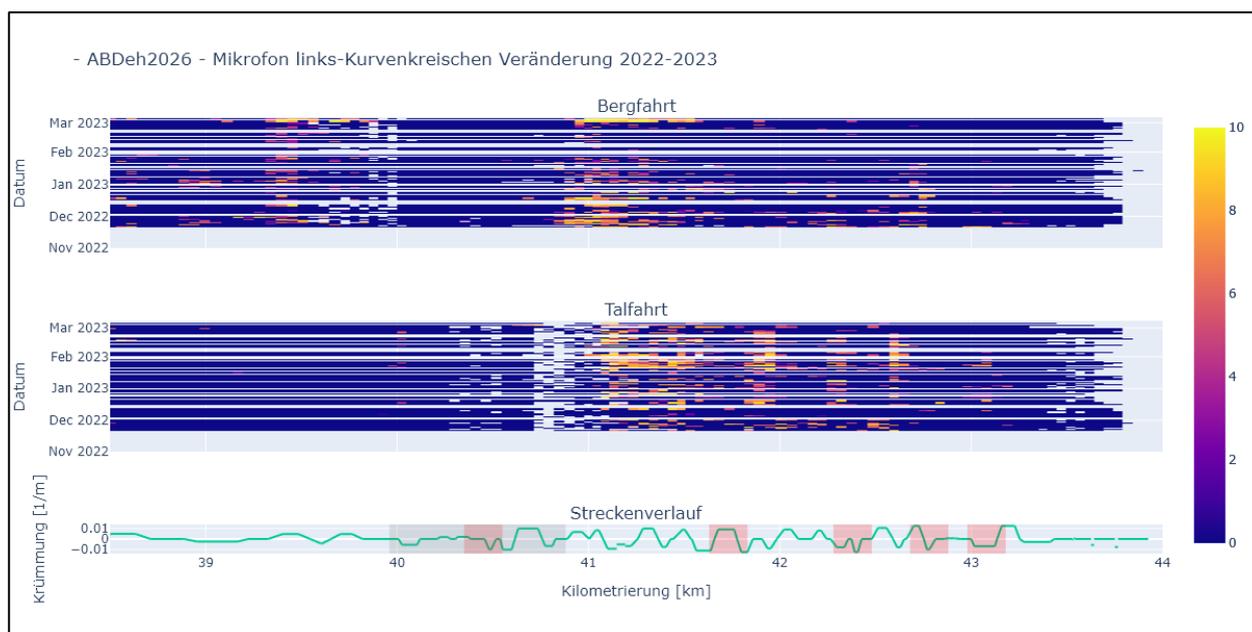


Figure 85 - Microphone gauche – Changement du crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

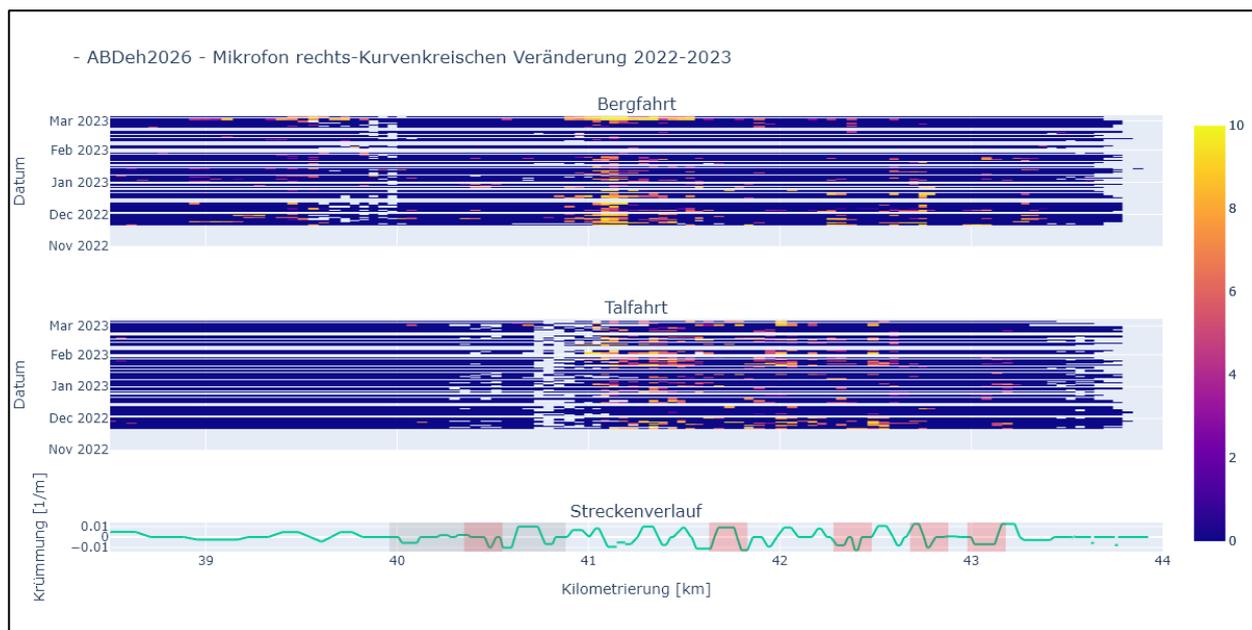


Figure 86 - Microphone droite – Changement du crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)

## 7.5 Différence très marquée entre les passages en montée et les passages en descente

Des écarts importants ont été observés entre la montée et la descente, tant au niveau du crissement en courbe que des vibrations.

Ces différences sont encore plus marquées pour les vibrations que pour le crissement en courbe. On suppose que cela est principalement dû à la position de l'essieu sur le véhicule, à son comportement sur la voie ainsi qu'aux conditions de traction spécifiques à chaque sens de circulation.

---

Il est également frappant de constater qu'en descente, les vibrations accrues ne se manifestent que dans la zone équipée de la crémaillère.

À noter aussi que les microphones enregistrent probablement les émissions sonores des deux essieux du même bogie.

Autrement dit, les signaux captés par les microphones intègrent toujours la contribution de deux essieux.

En revanche, les capteurs d'accélération sont sélectifs et ne mesurent que l'essieu équipé du capteur.

## **7.6 Variation temporelle du crissement en courbe**

L'évolution temporelle du crissement en courbe laisse penser qu'il survient plus fréquemment pendant les mois chauds et secs.

Cela s'explique probablement par la baisse de l'humidité de l'air, qui modifie les conditions de frottement entre la roue et le rail.

La variation observée tout au long de la journée lors de la montée semble cohérente, dans la mesure où le système SKK n'est pas utilisé durant la nuit.

## 8 Caractérisation tribométrique du SKK [12]

Les connaissances disponibles, notamment issues de publications scientifiques, sur l'efficacité des systèmes de conditionnement du champignon du rail (SKK) concernent principalement leur utilisation sur des lignes à écartement normal. En revanche, très peu d'informations existent pour les voies métriques.

Afin de combler cette lacune, des travaux expérimentaux et des modélisations sont menés, tenant compte des conditions particulières du contact roue-rail sur voie métrique, telles que les contraintes de contact plus élevées dans les courbes serrées.

La caractérisation tribométrique du SKK repose sur deux volets principaux, étroitement liés :

- le développement de méthodes et d'essais en vue de futures recommandations (R RTE) pour le SKK,
- le développement de méthodes et d'essais destinés à fournir des données d'entrée pour les modèles de contact roue-rail.

Dans une optique de rentabilité économique, une méthode bien définie, reproductible et peu coûteuse doit être développée afin d'évaluer les SKK au niveau du coefficient de frottement. L'objectif est de réduire significativement le recours aux essais d'exploitation au profit d'essais en laboratoire.

Dans l'idéal, les essais sur le terrain devraient pouvoir être entièrement remplacés par des essais en laboratoire.

L'essai d'exploitation a été mené sur la ligne Täsch – Zermatt, avec pour objectif d'évaluer l'influence du SKK sur le coefficient de frottement dans des conditions d'exploitation normales d'un chemin de fer à voie métrique.

Le conditionnement du champignon de rail est assuré de manière automatisée sur ce tronçon, au moyen d'un dispositif embarqué sur le véhicule Shuttle. Le déclenchement du système s'effectue via des balises RFID positionnées sur la voie, garantissant une application régulière et localisée du produit de conditionnement.

Des méthodes d'essai spécifiques ont été mises en œuvre afin de mieux comprendre le comportement du contact roue-rail en voie métrique et de générer des données d'entrée fiables pour les modèles de simulation correspondants.

Les essais en laboratoire et en ligne ont été réalisés par The University of Sheffield (USheffield) et AC2T research GmbH (AC<sup>2</sup>T), tandis que les travaux de modélisation ont été confiés à Virtual Vehicle GmbH.

Dans le cadre de l'essai d'exploitation, des mesures de frottement ont été réalisées, complétées par des méthodes analytiques additionnelles. Ces méthodes suivent une approche descendante (« top-down »), allant du profil de rail à la rugosité de surface, jusqu'à la chimie de surface.

Deux scénarios distincts ont été analysés lors des essais sur le terrain :

- Conditionnement en exploitation normale (le matin) : Il convient de noter qu'aucun conditionnement n'est effectué entre 20h00 et 8h00. Le conditionnement du champignon de rail commence donc chaque matin. L'objectif est d'observer en combien de temps un état de conditionnement stable s'installe, c'est-à-dire lorsqu'on atteint un niveau de frottement faible et constant. De plus, aucun conditionnement n'est appliqué lorsque l'humidité relative de l'air dépasse 85 %.
- Consommation du produit SKK en exploitation normale (au cours de la journée) : Une fois que l'on dispose d'un rail conditionné, le conditionnement est désactivé en supprimant l'activation des balises RFID. L'objectif est ici d'observer combien de temps s'écoule avant que le rail redevienne dans un état non conditionné (avec un niveau de frottement continuellement élevé).

Le schéma de disposition de la balise RFID ainsi que des points de mesure A, B et C, de même qu'un aperçu de la courbe Biel, sont présentés à la Figure 87. Les points de mesure se situent dans la zone de diffusion du conditionnement.

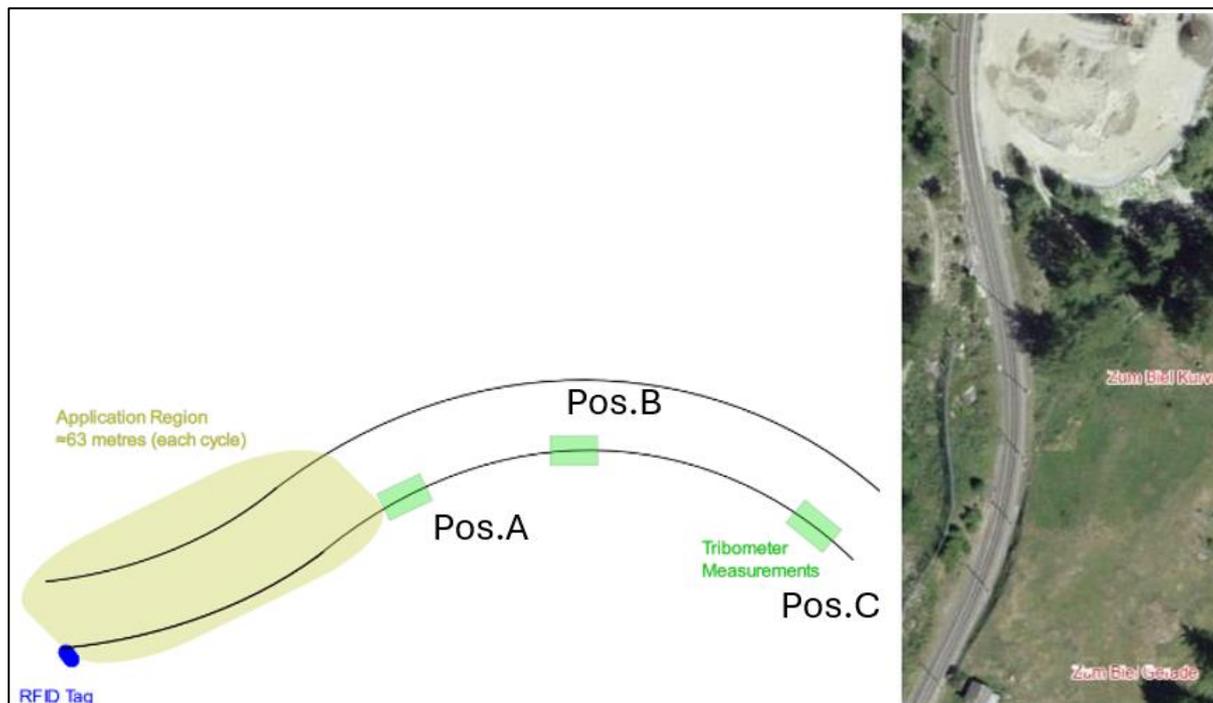


Figure 87 - Balise RFID et points de mesure (à gauche), vue d'ensemble de la courbe Biel (à droite)

### 8.1 Caractérisation tribométrique du SKK

Pour ces essais sur le terrain, deux tribomètres ont été utilisés : le tribomètre portable de Rivelin Rail (fourni par l'Université de Sheffield) et le tribomètre « Push » de Salient Systems (fourni par RAILplus).

Le tribomètre portable de Rivelin Rail se fixe magnétiquement sur le champignon du rail, comme illustré à la Figure 88. La mesure du coefficient de frottement s'effectue sur une longueur de contact de 300 mm.

Ce tribomètre utilise une roue de mesure en acier ER8 permettant de mesurer le frottement soit sur le champignon du rail, soit sur le flanc du rail. La force normale et le taux de glissement peuvent être ajustés. Les données mesurées sont enregistrées sous forme de fichiers CSV sur une carte SD.

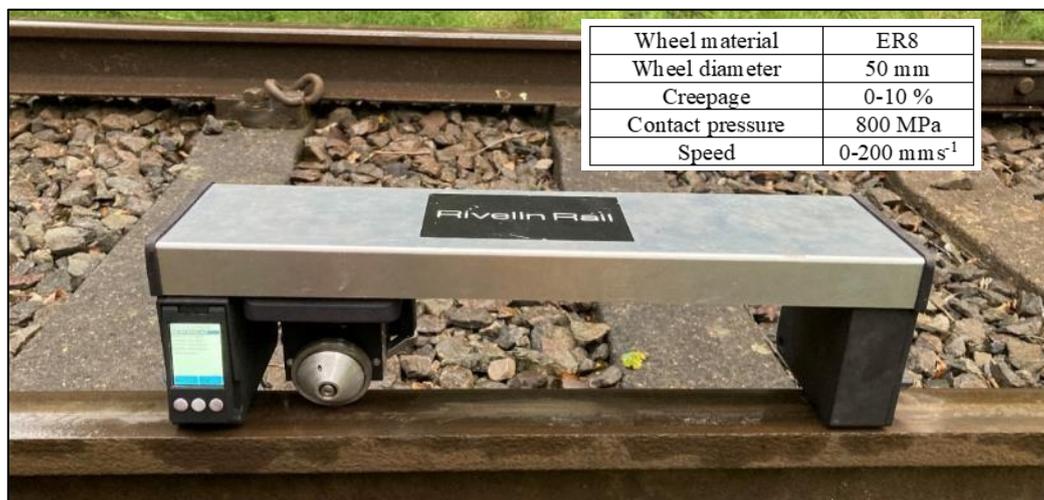


Figure 88 - Tribomètre portable de Rivelin Rail

Un exemple de box-plot issu de mesures réalisées au Royaume-Uni pendant la saison automnale est présenté à la Figure 89.

Il illustre les résultats obtenus sur un rail sec (*dry*) et un rail humide (*wet*) à l'aide du tribomètre portable de Rivelin Rail.

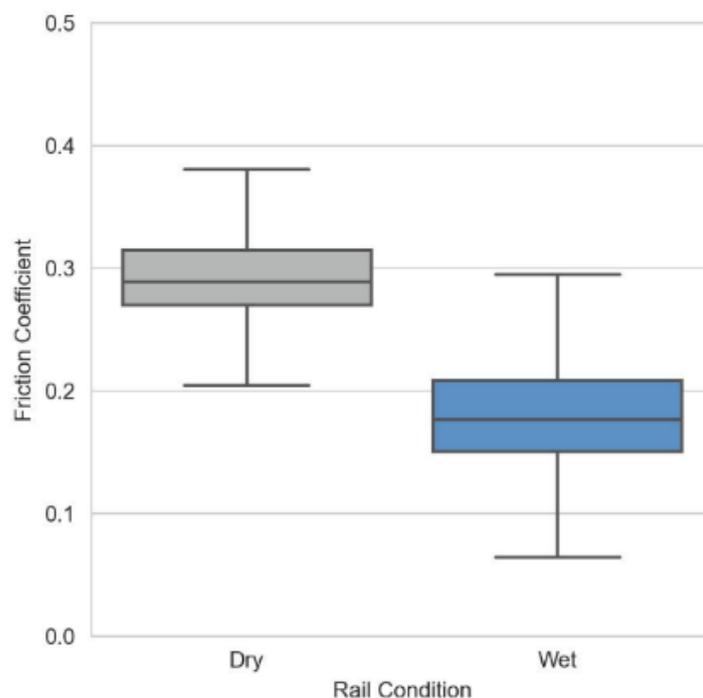


Figure 89 - Box-plot montrant des exemples de résultats de coefficient de frottement sur champignon du rail sec (*dry*) et mouillé (*wet*) (Grande-Bretagne, automne), mesurés avec le tribomètre portable Rivelin Rail

RAILplus a mis à disposition le tribomètre « Push » de Salient Systems, qui est déplacé de manière continue le long du rail, comme illustré à la figure 90.



Figure 90 - Tribomètre "Push" de Salient Systems

Pour ces essais sur le terrain, la majorité des mesures ont été réalisées avec une force normale de 100 N (environ 800 MPa), un glissement de 5 % et une vitesse de 200 mm/s. Certaines mesures comparatives ont été effectuées successivement avec des taux de glissement de 3 %, 5 % et 8 %.

Le tribomètre a été positionné sur le champignon du rail de manière que, vu de côté, la roue de mesure soit alignée avec la bande de contact des roues du train, afin de garantir la représentativité des résultats de friction pour les conditions d'exploitation réelles.

## 8.2 Méthodes analytiques complémentaires

### 8.2.1 Profilomètre pour la mesure des géométries roue et rail

#### 8.2.1.1 Appareil de mesure Calipri – Profil linéaire

Le dispositif de mesure du rail Calipri permet une évaluation rapide et précise de tous les profils de rail couramment utilisés, avec la possibilité d'étendre ses fonctionnalités via des modules logiciels. Grâce à une méthode de mesure sans contact, les résultats ne dépendent pas de l'opérateur. Tout dépassement des seuils est automatiquement mis en évidence en couleur sur la tablette-PC après la mesure. Les données mesurées sont documentées numériquement via diverses interfaces d'exportation et fonctions de rapport.



Figure 91 - Appareil de mesures Calipri

### 8.2.1.2 3D-Scanner – 3D-Topografie

Le scanner 3D portable de la société Artec (modèle LEO) permet la capture d'objets en 3D avec une précision ponctuelle latérale de  $\pm 0,05$  mm et une résolution 3D dans la direction normale de  $\pm 0,1$  mm (voir Figure 92). L'appareil offre un taux d'acquisition de données de 35 millions de points par seconde. Il est équipé d'un écran tactile de 5,5 pouces, d'un enregistrement vidéo en streaming et d'une capacité de stockage allant jusqu'à 512 Go. Son autonomie atteint 8 heures. Ce scanner 3D permet de numériser rapidement des pièces de grande taille, telles que des composants d'aiguillages ou des segments de rails, avec un haut niveau de fidélité géométrique.



Figure 92 - 3D-Scanner manuel: a) Artec LEO 3D-Scanner b) Tronçon de la voie ferrée scannée

### 8.2.2 Empreintes pour la détermination de la rugosité de surface

Une pâte d'empreinte à haute résolution est utilisée pour effectuer des mesures de rugosité de surface sur le terrain ou sur des pièces de grandes dimensions (voir figure 93). Pour cela, la pâte est appliquée sur la surface du rail puis aplatie à l'aide d'une fine plaque de verre. Après un temps de durcissement de 5 minutes (idéalement 10 minutes), l'empreinte est retirée avec la plaque de verre. Les empreintes obtenues peuvent ensuite être analysées en laboratoire à l'aide d'un profilomètre 3D, afin d'obtenir des informations détaillées sur la structure de surface, telles que les données de rugosité.



Figure 93 - Forensic Sil, photo : Loci Forensics B.V. (à gauche), pâte à empreinte sur une rail (à droite)

### 8.2.3 Détection qualitative et quantitative du SKK

Ces méthodes sont en principe applicables aussi bien aux surfaces d'échantillons de laboratoire qu'aux rails dans le cadre d'essais sur le terrain. Pour permettre une qualification et une (semi-) quantification fiable ainsi qu'une interprétation pertinente des résultats, la documentation précise du lieu de prélèvement et de la surface analysée est indispensable.

#### Prélèvement à l'aide de tampons et analyse en laboratoire (AC<sup>2</sup>T)

Pour analyser l'épaisseur du film lubrifiant, on utilise des feutres ou des tampons absorbants (voir Figure 94), capables d'absorber l'huile présente sur la surface. Le volume ou l'épaisseur de la couche peut être déterminé en fonction de la quantité d'huile absorbée et de sa densité. La méthode employée — que ce soit avec le feutre ou le tampon — est adaptée à la surface, à la position de prélèvement et au temps d'absorption.



Figure 94 - Prélèvement d'un film d'huile à l'aide d'un feutre (à gauche) ou d'un tampon et d'un cadre pour délimiter une surface définie (à droite)

Pour analyser l'échantillon prélevé à l'aide du tampon (illustration 95) sur la surface du rail, plusieurs méthodes de laboratoire sont disponibles :

- La microscopie électronique à balayage avec spectroscopie à dispersion d'énergie des rayons X (MEB-EDX), particulièrement adaptée à l'analyse des composants inorganiques.
- La spectroscopie de photoélectrons X (XPS), utilisée principalement pour identifier les composants inorganiques solides tels que les épaississants ou les métaux.
- La chromatographie en phase gazeuse (GC), destinée surtout à l'analyse des composants organiques comme l'huile de base.

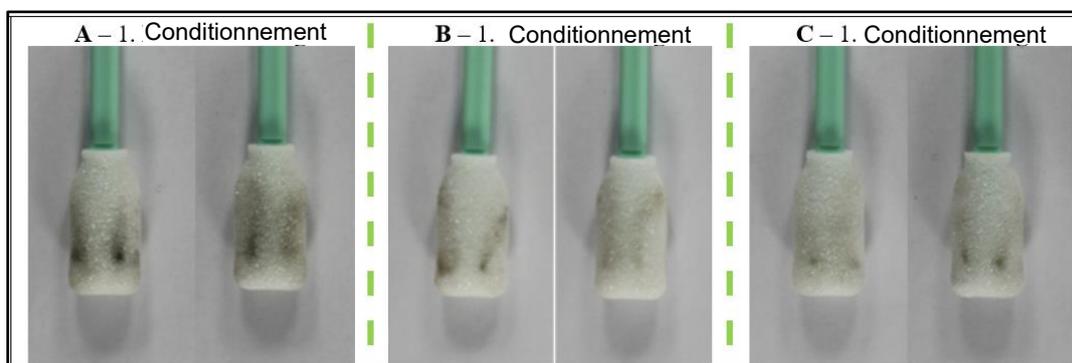


Figure 95 - Résultats qualitatifs des échantillons prélevés à l'aide du tampon aux positions de mesure A, B et C de l'aiguille intérieure pendant le conditionnement actif.

### 8.3 Résultats des essais sur le terrain

Le premier jour des essais sur le terrain (18.10.2023), la courbe de Biel a été inspectée et les installations pour les mesures prévues ont été préparées. Une documentation photographique des points de mesure A, B et C a été réalisée. L'état des rails intérieur et extérieur aux emplacements A, B et C est illustré à la Figure 96. Le degré d'usure varie selon les positions de mesure, les différences entre rail intérieur et extérieur étant courantes. La Figure 97 montre l'emplacement possible d'un mélange de SKK et SKS sur le flanc du rail. Par ailleurs, des résidus de SKK et/ou SKS ont été observés dans le ballast et sur les traverses.

Point de mesure	Rail intérieur	Rail extérieur
A		
B		
C		

Figure 96 - Vue d'ensemble des rails intérieurs et extérieurs aux points de mesure A, B et C



Figure 97 - Flanc de rail avec un mélange possible de SKK et de SKS (à gauche), résidus de SKK et/ou de SKS dans le ballast (au milieu) et sur la traverse (à droite).

Les résultats des empreintes prélevées sur le rail intérieur aux points de mesure A, B et C sont présentés à la Figure 98. Des mesures détaillées de la microrugosité ont été réalisées sur une zone de 5 x 5 mm à l'intérieur de la bande d'usure, sur la table de roulement. Les paramètres de rugosité de surface ont été déterminés selon la norme ISO 25178. La valeur quadratique moyenne de la hauteur est la plus élevée au point de mesure A ( $S_q = 1,690 \mu\text{m}$ ), nettement plus faible au point C ( $S_q = 1,406 \mu\text{m}$ ), et atteint son minimum au point B situé dans la courbe de Biel ( $S_q = 1,229 \mu\text{m}$ ). En ce qui concerne la hauteur moyenne arithmétique, les points de mesure A et C présentent des résultats similaires, avec respectivement  $S_a = 0,959 \mu\text{m}$  et  $S_a = 0,942 \mu\text{m}$ . La valeur la plus basse a également été relevée au centre de la courbe, au point de mesure B, avec un  $S_a$  de  $0,615 \mu\text{m}$ .

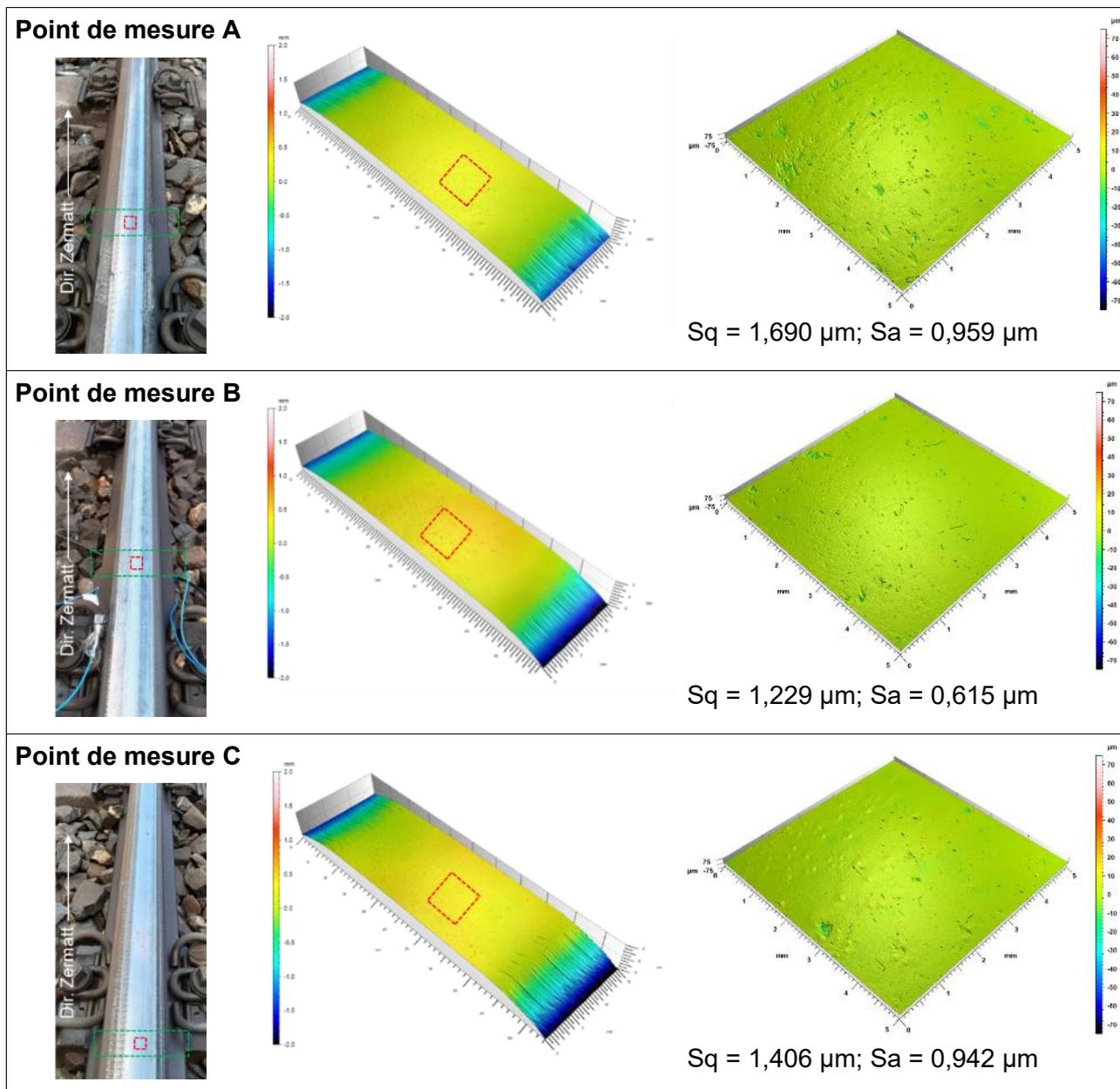


Figure 98 - Vue d'ensemble des empreintes des points de mesure A, B et C (colonne de gauche), illustration de la topographie (colonne du milieu) et mesure détaillée correspondante pour les paramètres de rugosité de surface (colonne de droite).

Les essais sur le terrain ont débuté le 19 octobre 2023, après des précipitations survenues durant la nuit. Au début des mesures, l'humidité relative de l'air était de 90,5 % et la température ambiante de 8,5 °C. Par conséquent, aucune pulvérisation de SKK n'était active sur les trains (seuil d'activation : 85 % d'humidité). Le trafic ferroviaire dans la courbe de Biel ainsi que les valeurs mesurées d'humidité et de température sont récapitulés dans le Tableau 15. Le premier train avec application active de SKK en direction de Zermatt a franchi la courbe de Biel à 10h50.

Date	Heure	N° train	Direc tion	Type train	État SKK	Humidité [%]	Temp. [°C]	Météo Temp. Rail [°C]	Description	
19.10.2023	09:35	1	Zermatt	Shuttle	aus	90,5	8,5	8,2	Nuageux, sec	
19.10.2023	09:48	2	Täsch	Shuttle						
19.10.2023	09:52	3	Zermatt	Shuttle						
19.10.2023	10:11	4	Täsch	Shuttle						
19.10.2023	10:14	5	Täsch	Fracht						
19.10.2023	10:17	6	Zermatt	Shuttle						
19.10.2023	10:31	7	Täsch	Shuttle						
19.10.2023	10:37	8	Zermatt	Shuttle						
19.10.2023	10:43	9	Täsch							
19.10.2023	10:50	10	Zermatt		an (1)	83,9	9,3	9,5	Qlq gouttes pluie	
19.10.2023	10:55	11	Zermatt	Fracht						
19.10.2023	11:10	12	Täsch	Fracht						
19.10.2023	11:13	13	Täsch							
19.10.2023	11:16	14	Zermatt		an (2)					
19.10.2023	11:31	15	Täsch							
19.10.2023	11:38	16	Zermatt			an (3)				
19.10.2023	11:48	17	Täsch							
19.10.2023	11:52	18	Zermatt	Fracht		an (4)				
19.10.2023	11:54	19	Zermatt			an (5)	71,9	12	12,7	Nuageux, sec
19.10.2023	12:10	20	Täsch							
19.10.2023	12:15	21	Zermatt			an (6)				
19.10.2023	12:32	22	Täsch							
19.10.2023	12:38	23	Zermatt			an (7)				
19.10.2023	12:48	24	Täsch			an (8)	72,2	11,8	12,9	Nuageux, sec
19.10.2023	12:52	25	Zermatt							
19.10.2023	12:58	26	Täsch	Fracht		an (9)	68,3	12,7	13,8	Nuages et soleil
19.10.2023	13:13	27	Täsch							
19.10.2023	13:17	28	Zermatt			an (10)				
19.10.2023	13:31	29	Täsch			aus (1)				
19.10.2023	13:36	30	Zermatt							
19.10.2023	13:48	31	Täsch			aus (2)	59,9	13,4	16,5	Qlq gouttes pluie
19.10.2023	13:51	32	Zermatt	Fracht						
19.10.2023	13:53	33	Zermatt			aus (3)				
19.10.2023	14:12	34	Täsch			aus (4)	52,3	14,3	17,0	Nuages et soleil
19.10.2023	14:15	35	Zermatt							
19.10.2023	14:31	36	Täsch			aus (5)				
19.10.2023	14:38	37	Zermatt							
19.10.2023	14:49	38	Täsch			aus (6)	51,8	14	17,2	Nuageux
19.10.2023	14:53	39	Zermatt			aus (7)				
19.10.2023	15:11	40	Täsch							
19.10.2023	15:15	41	Zermatt			aus (8)	52,6	14,2	16,8	Nuageux
19.10.2023	15:33	42	Täsch							
19.10.2023	15:48	43	Zermatt							
19.10.2023	15:50	44	Täsch							
19.10.2023	15:54	45	Zermatt							
19.10.2023	16:10	46	Täsch							
19.10.2023	16:16	47	Zermatt							
19.10.2023	16:30	48	Täsch							
19.10.2023	16:30	48	Täsch							
19.10.2023	15:35	49	Zermatt							

Tableau 15 - Aperçu de la circulation des trains, des périodes d'application du SKK et des données météorologiques au 19.10.2023

Les résultats des échantillonnages de SKK par prélèvement sur la surface sont illustrés par une documentation photographique de la face avant et arrière des tampons, voir Figure 99 à Figure 103. Étant donné que les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un gabarit défini au niveau de la zone de contact du champignon de rail, l'aspect des tampons après échantillonnage permet de tirer des conclusions sur la quantité de SKK présente. La Figure 99 montre les prélèvements réalisés sur les rails intérieurs et extérieurs aux points de mesure A, B et C, avant l'activation de l'application de SKK. Les résultats révèlent un noircissement marqué des tampons, d'intensité comparable aux

points A et C. Le point B présente un degré de coloration légèrement inférieur, avec une coloration plus prononcée sur le rail intérieur que sur le rail extérieur.

À 10h50, le premier train en direction de Zermatt a franchi la courbe de Biel avec l'application de SKK activée. À ce moment-là, l'humidité relative était de 83,9 %, la température de l'air de 9,3 °C et la température du champignon de rail de 9,5 °C. À noter que quelques gouttes de pluie ont été observées sur la voie. L'application de SKK est restée active jusqu'à 14h15. Durant cette période, 23 trains ont traversé la courbe de Biel, dont 10 trains voyageurs avec SKK actif en direction de Zermatt. Un changement léger de conditions météorologiques a été constaté sur cette plage horaire, passant de nuageux/pluvieux à nuageux/ensoleillé (voir tableau 15). Les prélèvements au tampon ont été réalisés sur les rails intérieurs aux positions de mesure A, B et C (voir Figure 100).

Au début de la période d'application de SKK, les tampons présentaient une légère coloration noire (après le premier passage de train à 10 h 50). À mesure que les passages se sont succédé, l'analyse visuelle des tampons aux positions A et C suggère une augmentation progressive de la quantité de SKK. À la position B, cette augmentation de coloration noire est restée nettement plus faible.

Après le 9<sup>e</sup> passage d'un train en direction de Zermatt avec l'application de SKK activée, les prélèvements ont révélé la plus grande quantité de SKK au point de mesure A, suivie du point C, tandis que le point B présentait la coloration la moins marquée (voir Figure 101). À toutes les positions, la quantité de SKK détectée était généralement plus élevée sur le rail intérieur que sur le rail extérieur.

Après la désactivation de l'application de SKK par les trains à 14h15, une réduction rapide de la quantité de produit SKK détectée par prélèvement a été observée sur les rails (voir Figure 102). Dès le deuxième passage d'un train en direction de Zermatt (14h38), les prélèvements indiquaient déjà une quantité nettement inférieure de SKK. Par la suite, en l'absence de toute application supplémentaire, très peu de changements ont été constatés.

Après 15 passages de trains dans la courbe de Biel sans application de SKK, le dernier prélèvement a été réalisé après le huitième passage en direction de Zermatt (voir Figure 103). À ce stade, aucun écart significatif n'a été observé dans l'aspect des tampons.

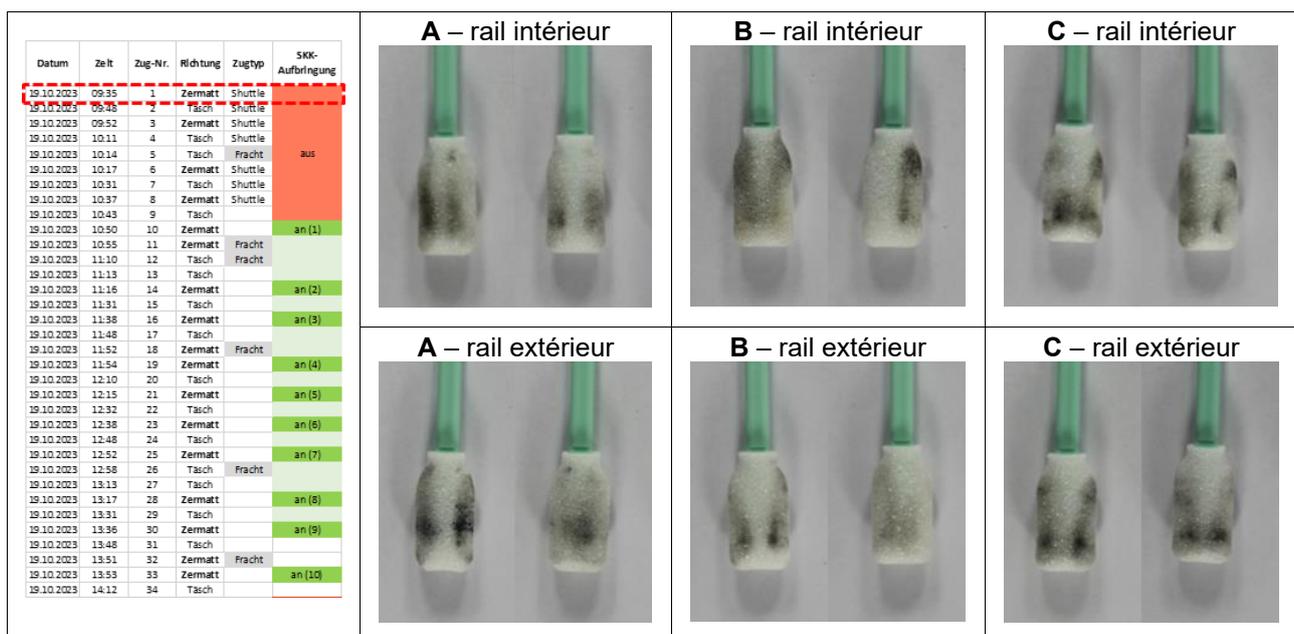


Figure 99 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C avant le conditionnement des rails intérieurs et extérieurs

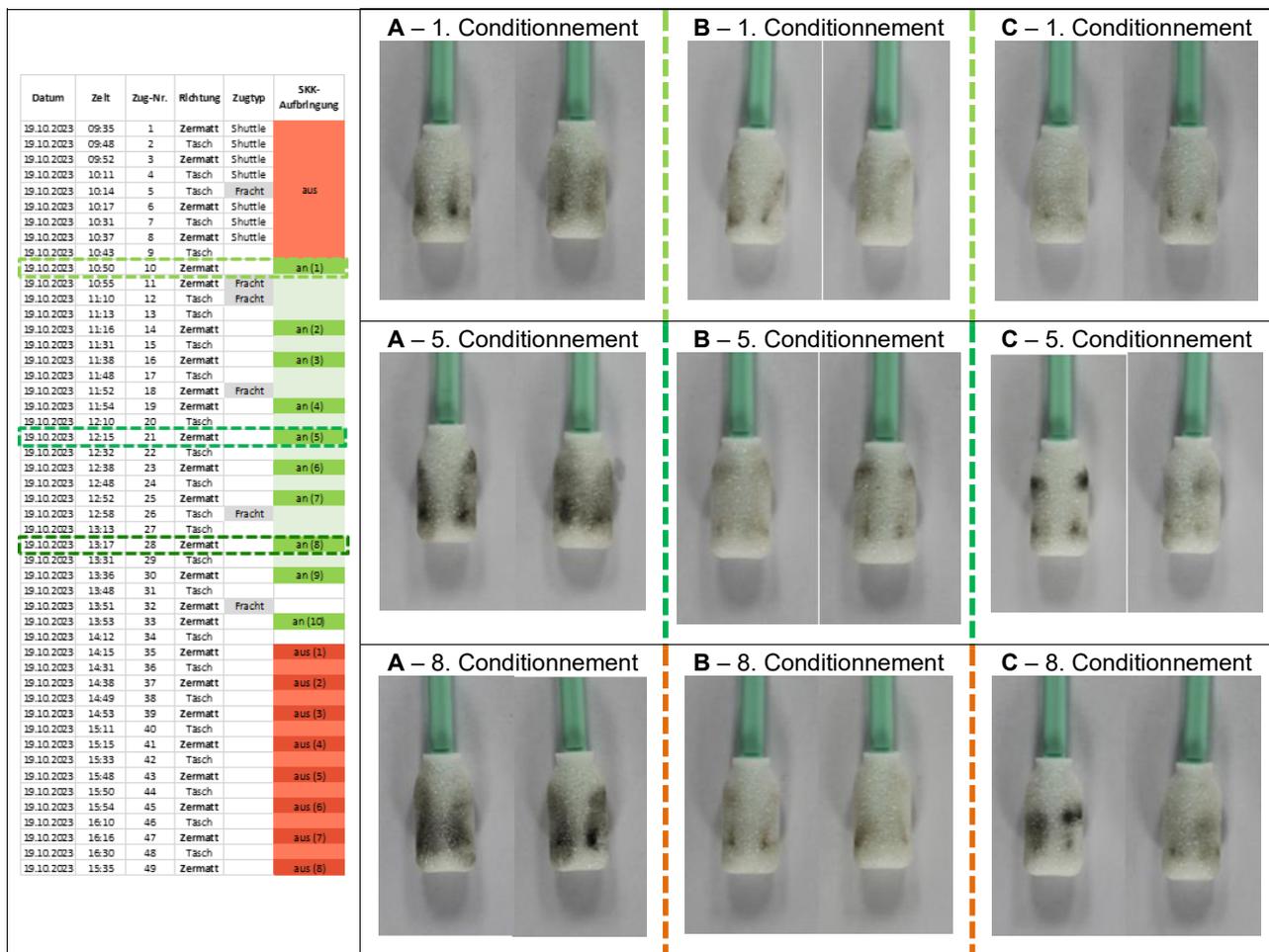


Figure 100 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C du rail interne pendant un conditionnement actif

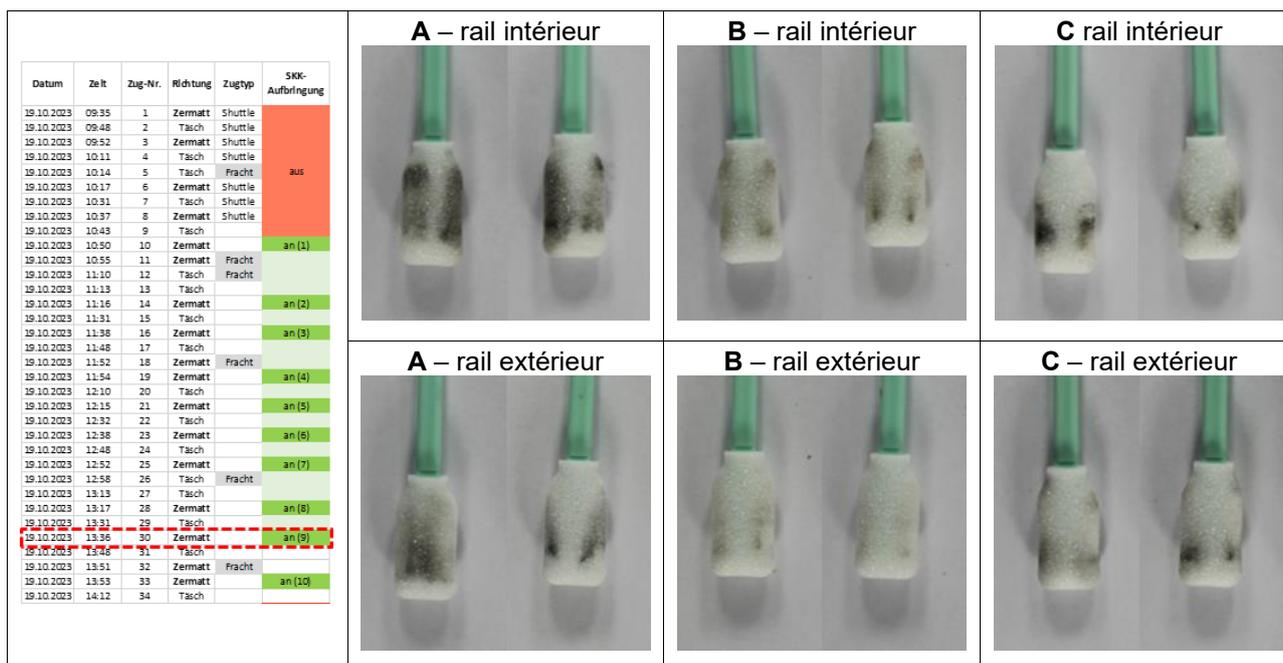


Figure 101 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C après le 9e passage pendant le conditionnement des rails intérieur et extérieur

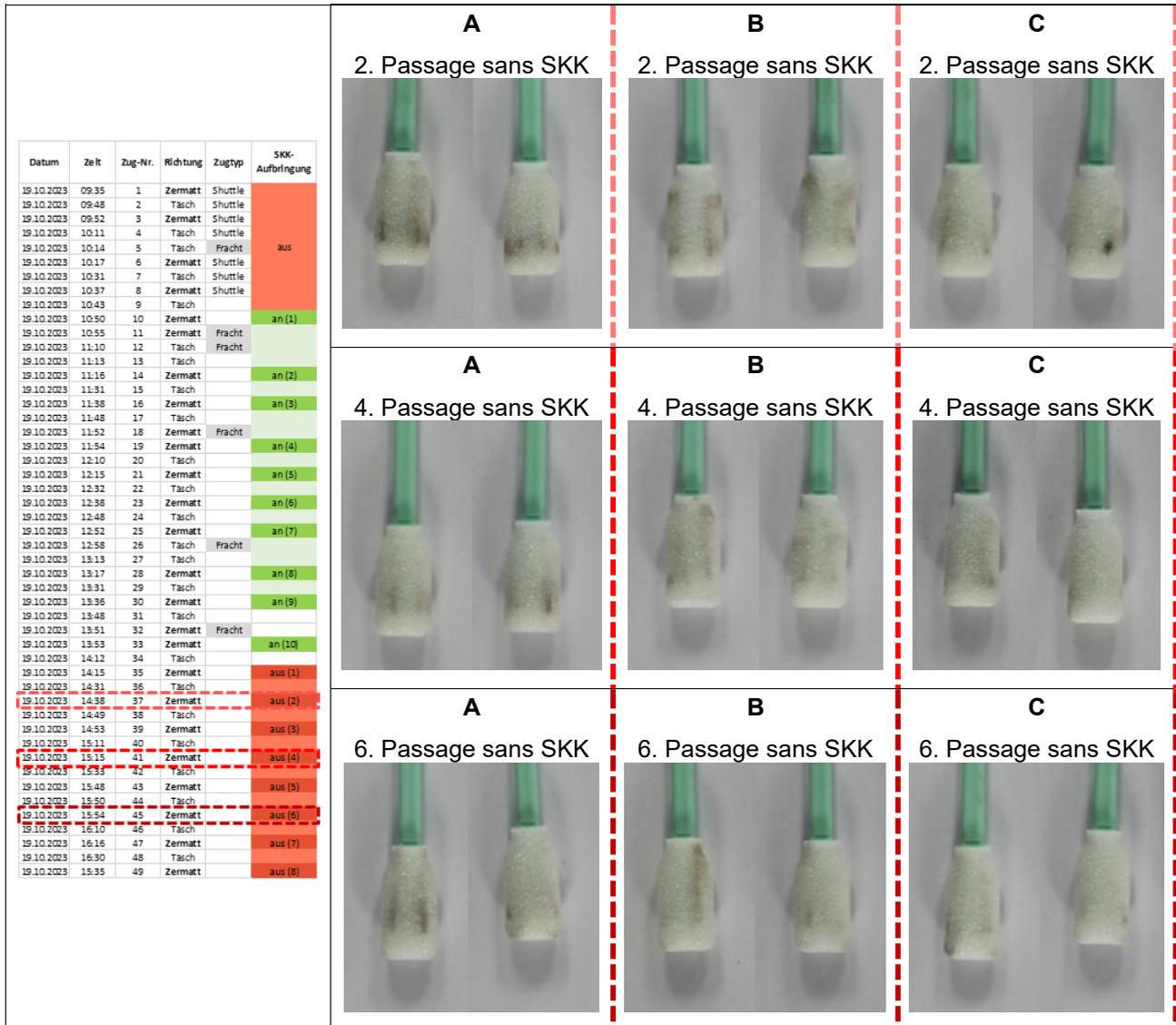


Figure 102 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C du rail interne après désactivation du conditionnement

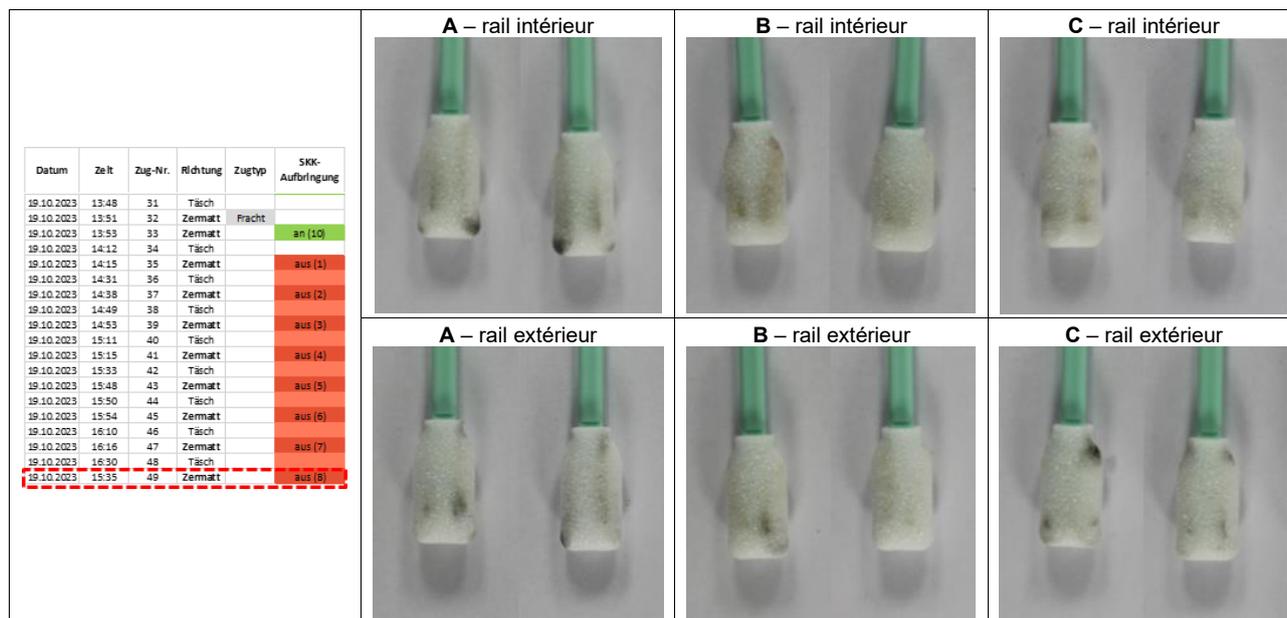


Figure 103 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C après le 8e passage sans conditionnement des rails intérieur et extérieur

Les résultats obtenus avec le tribomètre portatif de Rivelin Rail aux trois points de mesure A, B et C, sur les rails intérieur et extérieur, le 19 octobre 2023, sont présentés dans les Figure 104 à Figure 106. Les passages des trains à destination et en provenance de Zermatt y sont documentés, de même que les périodes pendant lesquelles le conditionnement du rail était activé ou désactivé.

La position de mesure A, située au plus proche de la zone de conditionnement, a montré la réduction la plus marquée du coefficient de frottement peu de temps après l'activation du conditionnement du rail. À la position C, la diminution du frottement a été observée avec un certain retard, en raison du rail. Après la désactivation du conditionnement, le coefficient de frottement moyen du rail extérieur a retrouvé plus rapidement des valeurs élevées que celui du rail intérieur.

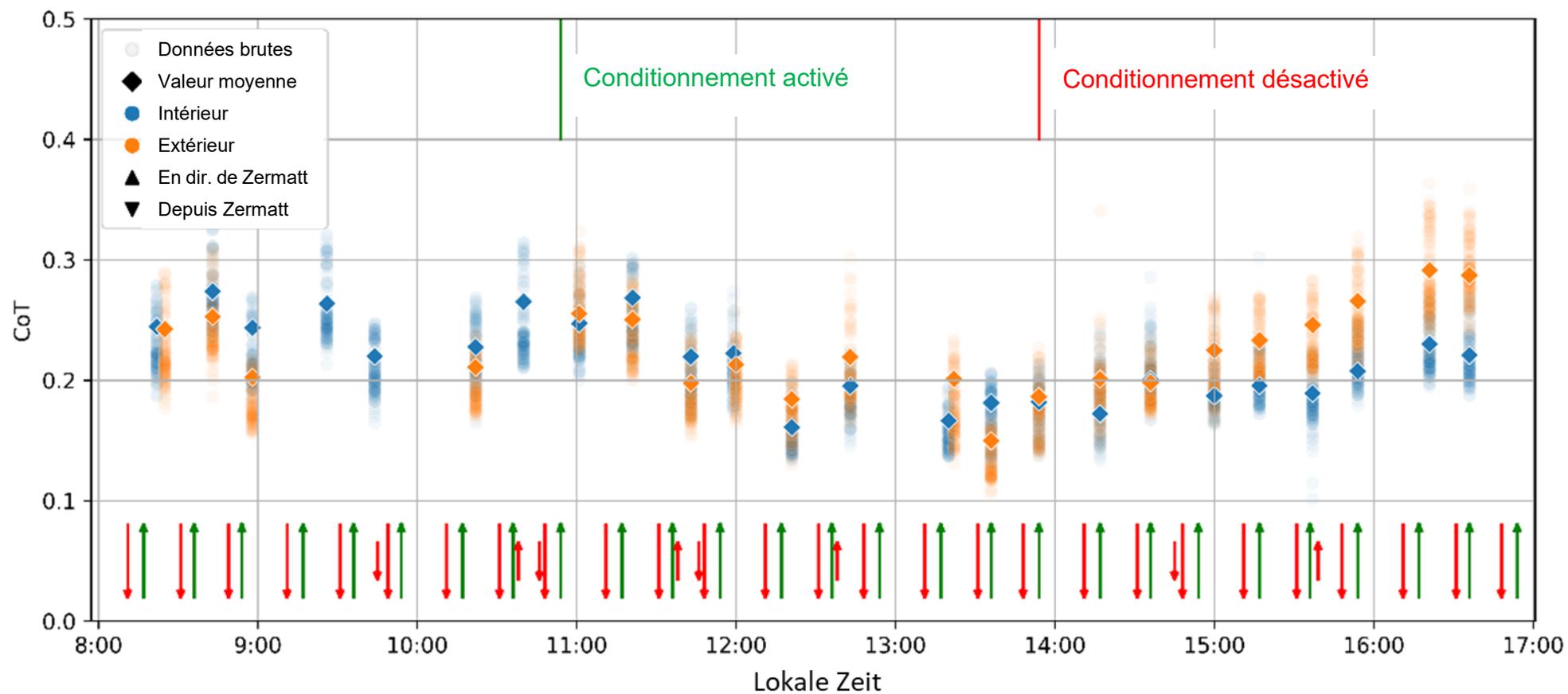


Figure 104 - Coefficient de frottement (Coefficient of Traction, CoT) au point de mesure A

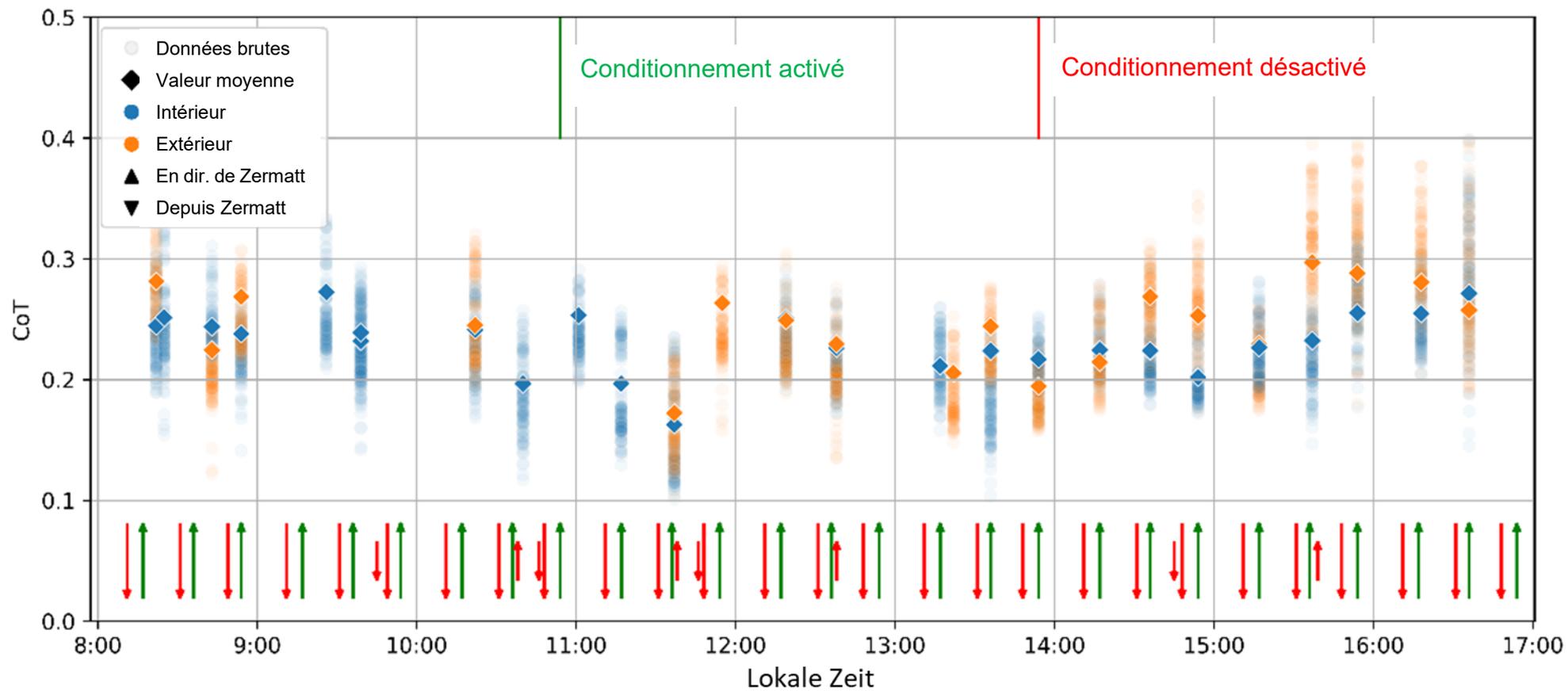


Figure 105 - Coefficient de frottement (Coefficient of Traction, CoT) au point de mesure B

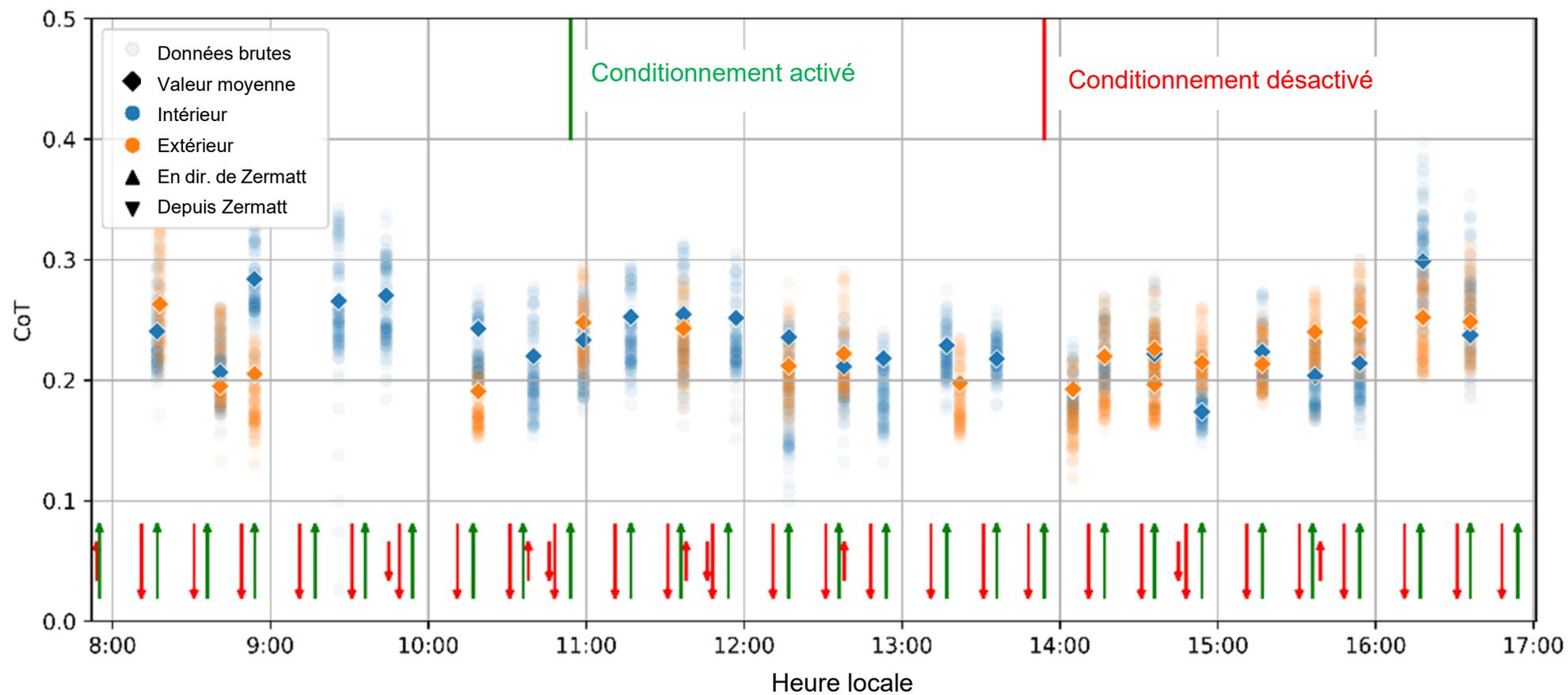


Figure 106 - Coefficient de frottement (Coefficient of Traction, CoT) au point de mesure C

Le dernier jour des essais sur le terrain (20.10.2023), aucune mesure n'a pu être effectuée en raison de la pluie. Cette journée a été mise à profit pour prélever des échantillons de SKK directement au niveau des buses du système embarqué du véhicule 2051 (voir Figure 107). En collectant l'intégralité de la quantité projetée de SKK dans des récipients en plastique pendant 6 secondes de pulvérisation (activation du bouton test), des échantillons ont pu être prélevés pour des mesures gravimétriques précises réalisées par AC<sup>2</sup>T.

Les échantillons de SKK recueillis ont été dissous ou dispersés dans de l'éther de pétrole à l'aide d'un bain à ultrasons, puis transférés dans des boîtes de Pétri. Celles-ci ont ensuite été placées dans une étuve pendant 2 à 2,5 heures à 80°C afin d'éliminer le solvant. Les résidus (SKK) ont ensuite été pesés sur une balance analytique. Les résultats sont résumés dans le Tableau 16.

Les valeurs mesurées varient fortement, avec une tendance à une quantité de SKK plus élevée sur le côté gauche. L'écart entre les deux côtés varie entre +137 % (échantillon 04) et -65 % (échantillon 02). La quantité totale de SKK (buses gauche et droite combinées) varie entre 371 mg (échantillon 03) et 1087 mg (échantillon 05). En tenant compte de possibles problèmes de pression d'air lors du prélèvement de l'échantillon 03, la quantité totale de SKK se situe entre 709 mg (échantillons 01 et 12) et 1087 mg (échantillon 05). L'échantillon le plus équilibré entre les deux buses est l'échantillon 06, avec une quantité de SKK d'environ 530 mg par côté.



Figure 107 - Véhicule 2051 dans l'atelier (en haut à gauche) et la buse du système embarqué pour l'application du SKK (en haut à droite). Échantillons de SKK (pulvérisation de 6 secondes) collectés dans des récipients en plastique (en bas) en vue d'une analyse ultérieure chez AC<sup>2</sup>T

Échantillon		Quantité de SKK (mg)	Quantité totale de SKK (mg)	Différence entre côté gauche et droite (mg)	Différence entre côté gauche et droite (%)	
20.10.2023	01	gauche droite	209 500	709	-291	-58
	02	gauche droite	205 578	783	-373	-65
	03	gauche droite	172 199	371	-27	-14
02.02.2024	04	gauche droite	593 250	843	343	137
	05	gauche droite	601 486	1087	115	24
	06	gauche droite	532 537	1069	-4	-1
	07	gauche droite	442 560	1002	-118	-21
	08	gauche droite	338 595	933	-257	-43
	09	gauche droite	335 519	854	-184	-35
	10	gauche droite	314 443	757	-129	-29
	11	gauche droite	307 417	724	-110	-26
	12	gauche droite	275 434	709	-159	-37

Tableau 16 - Résumé des mesures gravimétriques des échantillons SKK du système embarqué du véhicule 2051 après 6 secondes de pulvérisation

## 9 Rentabilité [13]

Pour évaluer la rentabilité globale de l'installation SKK, le bureau IMDM a été chargé, comme dans le premier rapport sur les essais d'exploitation SKK Täsch - Zermatt [1], de réaliser des simulations en tenant compte des coûts et des économies. Ces simulations doivent permettre de montrer si et dans quelle mesure l'installation et l'exploitation des installations SKK sont économiques. Ceci d'une part pour le tronçon Täsch - Zermatt et d'autre part dans la perspective d'une extension de l'application SKK à l'ensemble du réseau du MGBahn.

### 9.1 Objectifs et méthode

L'objectif de cette analyse est d'évaluer la rentabilité de la mise en œuvre du SKK sur la base des données collectées par la MGB sur le tronçon entre Täsch et Zermatt.

L'évaluation est basée sur une comparaison de l'annuité équivalente (EA) pour deux scénarios différents : avec SKK (1) et sans SKK (2). On obtient ainsi un cash-flow différentiel, dans lequel les dépenses supplémentaires sont considérées comme des « coûts » et les économies comme des « recettes ». Les flux de trésorerie différentiels pour ces deux scénarios comprennent :

- les dépenses liées à la SKK
- les économies réalisées grâce aux effets positifs du système SKK sur le matériel roulant et l'infrastructure.

Cette étude adopte le point de vue de l'entreprise de transport ferroviaire (ETF) ; les effets sur l'environnement et la collectivité (réduction des nuisances sonores) ne sont pas pris en compte dans cette analyse.

### 9.2 Portée

L'estimation de la rentabilité est d'abord appliquée à la phase de test du tronçon Täsch-Zermatt, puis étendue à l'ensemble de la ligne MGBahn. Les éléments pris en compte sont :

- le nombre de véhicules équipés de SKK,
- le nombre de bogies moteurs,
- les tracés en courbure de faible rayon (rayon  $\leq$  200 mètres).

	Täsch – Zermatt	Réseau de la MGBahn
<b>Nombre de véhicules avec SKK</b>	4 véhicules	20
<b>Nombre de bogies moteur</b>	8 bogies	40
<b>Longueur de voie (rayon <math>\leq</math> 200 mètres)</b>	2'511 mètres	38'926 mètres

Tableau 17 - Portée de l'analyse de l'économie globale

### 9.3 Hypothèses retenues (voir annexe 12.5)

Les effets du système SKK sur les véhicules et l'infrastructure ont été établis à partir des retours récents provenant du tronçon d'essai (janvier 2024). Ces interactions devraient pouvoir être transposées au réseau entier des MGB, hormis l'impact sur la durée de vie de la voie, qui reste tributaire des particularités de la couche d'infrastructure.

	Täsch – Zermatt	Réseau MGBahn
<b>(1) Effet sur la distance parcourue entre les révisions</b>	+ 207%	Identique
<b>(21) Effet sur la durée de vie du rail</b>	+ 78%	Identique
<b>(22) Effet sur la durée de vie de la voie</b>	+ 40%	Non-applicable
<b>(23) Effet sur l'intervalle de meulage</b>	+ 300%	Identique

Tableau 18 - Hypothèses retenues de l'analyse de l'économie globale

#### 9.3.1 Impact sur l'entretien des véhicules

La présente estimation se limite aux effets du SKK sur la maintenance des roues des bogies moteurs. Le kilométrage par millimètre d'usure des roues est évalué sur la base du nombre de kilomètres parcourus pour une réduction d'un millimètre du diamètre des roues.

Les variations des intervalles de maintenance en fonction du matériau des roues ne sont pas prises en compte dans cette évaluation.

#### 9.3.2 Impact sur l'infrastructure

L'évaluation des effets du système SKK se concentre sur les besoins en meulage et en remplacement des rails dans les courbes à faible rayon.

L'impact sur les opérations de bourrage est jugé négligeable, compte tenu de l'âge avancé de la voie.

Une estimation de l'influence du SKK sur la durée de vie globale de l'infrastructure a également été réalisée dans un second temps.

#### 9.3.3 Hypothèses concernant les coûts

Les coûts liés aux investissements SKK et aux différents types de maintenance proviennent de la MGB, avec les particularités suivantes :

- Les coûts de maintenance du système SKK sont intégrés aux intervalles d'entretien planifiés des véhicules, ce qui évite des passages supplémentaires sur la voie de maintenance avec fosse intégrée ;
- Les coûts de renouvellement de la voie ne concernent que la superstructure ;
- Les coûts de meulage des deux rails sont sensiblement équivalents à ceux du meulage d'un seul rail.

#### 9.3.4 Hypothèses du modèle

La méthode de Monte-Carlo est appliquée à l'évaluation afin d'augmenter la robustesse des décisions. La simulation introduit une variation de  $\pm 10\%$  sur les hypothèses de cycle de vie, en tenant compte d'un taux d'actualisation de 3 %.

## 9.4 Résultats

#### 9.4.1 Au niveau du tronçon d'essai Täsch-Zermatt

L'évaluation montre que, sur le tronçon d'essai, l'installation du SKK est rentable quel que soit le scénario analysé (cf. Figure 108).

Si l'on considère uniquement les effets sur les bogies (1), l'installation du SKK est rentable, avec une différence de l'annuité équivalente (EA – equivalent annuity) d'environ 140 kCHF (comprise entre 75 kCHF/an et 215 kCHF/an).

En tenant compte des effets sur les bogies (1) et sur la maintenance de la voie (23), l'installation du SKK reste rentable, avec une différence d'EA d'environ 165 kCHF (entre 85 kCHF/an et 235 kCHF/an). Lorsqu'on intègre l'ensemble des effets systémiques, l'installation du SKK est rentable, avec une différence d'EA d'environ 270 kCHF (comprise entre 210 kCHF/an et 335 kCHF/an). Sous réserve de la validité des hypothèses formulées, aucune simulation n'indique que l'installation du SKK ne serait pas rentable.

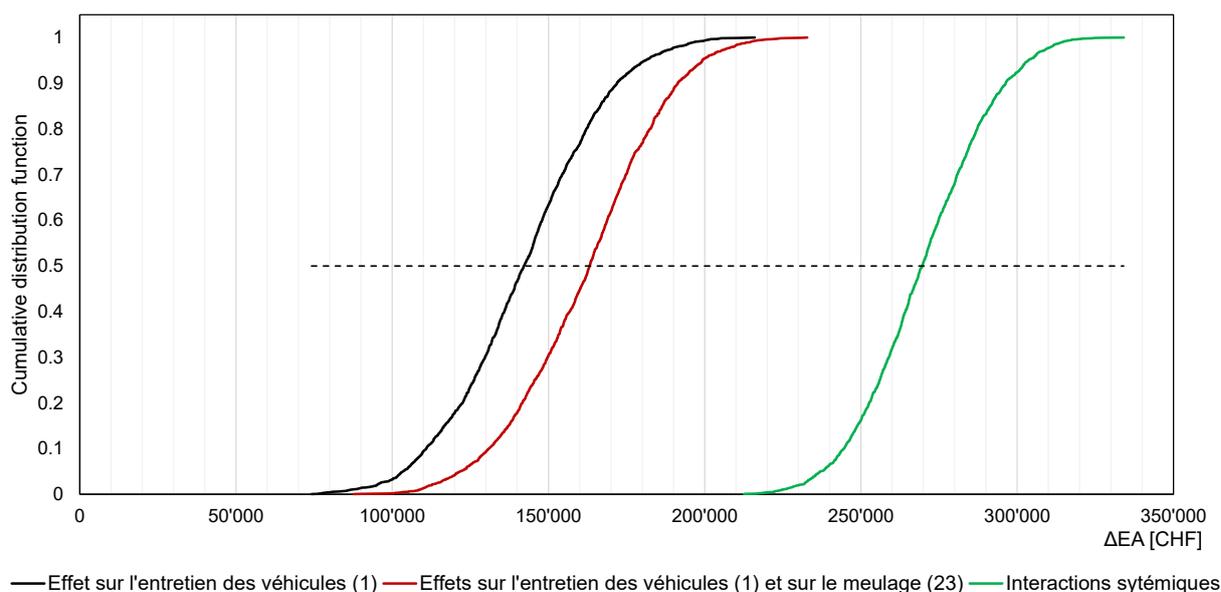


Figure 108 - Graphique de la rentabilité du SKK sur le tronçon Täsch-Zermatt

#### 9.4.2 Au niveau du réseau des MGBahn

Die Rentabilität der allgemeinen Einführung von SKK auf dem MGBahn – Netz hängt von der Länge der Abschnitte, die mit denselben Problemen wie die Teststrecke Täsch - Zermatt zu kämpfen haben, sowie von der Anzahl der auszurüstenden Fahrzeuge ab.

In einem ersten Ansatz wird der SKK bei 20 Fahrzeugen installiert und das Produkt systematisch auf kurvenreichen Strecken mit kleinen Radien angewendet.

Die Bewertung zeigt, dass die Installation des SKK auf dem gesamten Netz im Allgemeinen kosteneffizient ist (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Betrachtet man nur die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1), ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 720kCHF (zwischen -200kCHF/Jahr und 1'600kCHF/Jahr) rentabel.

Betrachtet man die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1) und den Schienenunterhalt (23), ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 1'050kCHF (zwischen 195kCHF/Jahr und 1'950kCHF/Jahr) rentabel.

Berücksichtigt man die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1), die Schienenwartung (23) und die Lebensdauer der Schiene (21), ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 2'300kCHF (zwischen 1'600kCHF/Jahr und 2'900kCHF/Jahr) rentabel.

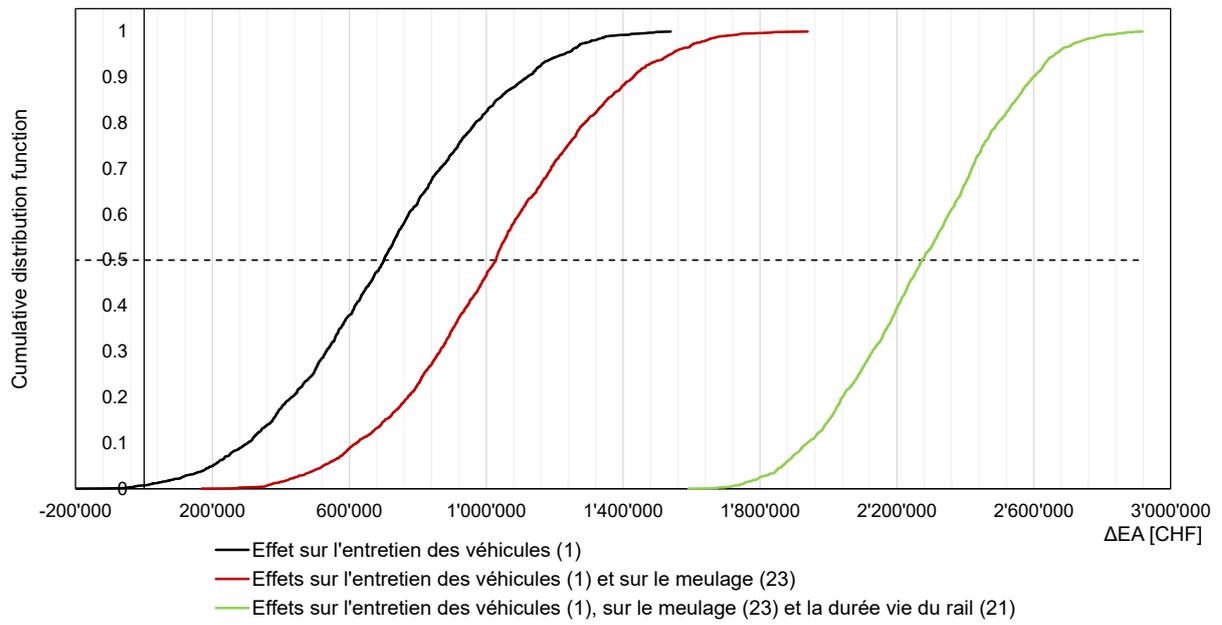


Figure 109 - Graphique sur le rentabilité du SKK au niveau du réseau entier de la MGB

## 10 Conclusion et suite des événements

Les premiers essais d'exploitation de la MGB sur la ligne Täsch - Zermatt avec conditionnement embarqué du champignon de rail ont eu lieu en 2022. Une augmentation de la croissance des ondulations a été constatée, surtout pendant les températures très élevées de l'été 2022. Afin de vérifier la signification de ce résultat dû à des températures journalières très élevées pendant une période prolongée et d'augmenter l'échantillon sur les quatre saisons par des données supplémentaires, l'essai d'exploitation a été prolongé d'un an. Dans le cadre de la maîtrise de système Interaction véhicule / voie ferrée métrique mandatée par l'OFT, plusieurs projets centraux ont été chargés par le programme d'étudier les phénomènes et de trouver des solutions. C'est pourquoi des études supplémentaires ont été menées sur le tronçon Täsch - Zermatt et sur des bancs d'essai en collaboration avec le ViF, l'AC2T et l'Université de Sheffield. Sur la base des expériences faites avec les températures élevées des rails, des essais supplémentaires ont donc été réalisés sur un banc d'essai à deux disques pour mieux comprendre cette influence sur le comportement de frottement des produits de conditionnement. Il a été démontré que l'exposition prolongée au soleil et, par conséquent, les températures élevées des rails entraînent une évaporation plus rapide du produit SKK.

Après la première phase de l'essai d'exploitation en 2022 et la constatation d'amplitudes légèrement plus élevées des ondulations, les rails ont été meulés sur le tronçon Täsch - Zermatt. Comme le Shuttle 2054 disposait des mêmes qualités d'acier pour les bandages de roues (KVR600) que celui du Shuttle 2051, les écarts de circularité ont certes été encore observés sur le Shuttle 2054 via l'installation de mesure fixe de Täsch, mais ils ont été écartés des contrôles supplémentaires au niveau des roues et des analyses des roues.

Le présent rapport contient les résultats concernant les aspects suivants du système roue-rail :

- a) l'usure et les dommages subis par les roues, en distinguant l'usure des boudins de celle des surfaces de roulement des roues.
- b) Les modifications des profils de roues en service par rapport au profil nominal RTE 29500A utilisé lors du reprofilage.
- c) Usure et détérioration des rails dans les courbes, en distinguant les différentes zones de contact entre la roue et le rail, et en distinguant les rails à l'intérieur et à l'extérieur de la courbe.
- d) Coefficient de frottement mesuré au tribomètre sur les surfaces de contact roue / rail sur les têtes de rail à l'intérieur et à l'extérieur des courbes sur trois virages significatifs.
- e) Rugosité des surfaces de roulement du rail dans le sens de la longueur, à l'intérieur et à l'extérieur de la courbe, conformément aux prescriptions de la norme EN 15610 [6] pour l'évaluation de la formation d'ondulation.
- f) Bases d'explication de la formation d'ondulation sur la voie et de leurs effets sur l'exploitation (vibrations des rails et des traverses, émission de bruit).
- g) Contact entre la roue et le rail (profils des roues et des rails)
- h) Bruit : mesures / surveillance et résultats concernant le rail
- i) Vibrations sur le rail
- j) Résultats concernant un système embarqué en service pour la détection d'ondulation et de crissements en courbe
- k) Écarts de circularité évalués à l'aide d'une installation de mesure sur la voie.
- l) Caractérisation tribométrique du SKK
- m) Prélèvement d'échantillons de SKK sur les buses du système embarqué du véhicule 2051
- n) Rentabilité globale

### **Concernant a) l'usure et les dommages au niveau des roues**

- L'usure des boudins (épaisseur des boudins et mesure qR) est inférieure pour tous les véhicules et toutes les roues. On constate une légère augmentation de l'épaisseur des boudins. Pour obtenir un profil de roue plus favorable lors du passage en courbe, il faudrait donc envisager une diminution de l'épaisseur des boudins. Cela présuppose toutefois un bon fonctionnement de la lubrification des boudins.
- Lors des visites de la ligne, on a constaté, comme l'année précédente, une tendance à la surlubrification sur les flancs des rails. Le lubrifiant est ainsi repoussé sur les surfaces de roulement des champignons de rail extérieurs à la courbe, ce qui peut entraîner une diminution de la traction. Une lubrification des boudins en fonction des besoins pourrait contribuer à une amélioration du système.
- Lors des contrôles des surfaces de roulement des roues, aucune tendance à la formation de polygones n'a été constatée et, à deux exceptions près, aucune fatigue des contacts de roulement n'a affecté les résultats.
- Dans un cas, une fatigue circonférentielle des contacts de roulement (RCF) a été constatée sur une roue après une longue période sans reprofilage. Cela est probablement dû au matériau de la roue, le KVR600, qui est moins résistant au RCF.
- Sur certaines roues, des creux périphériques ont été constatés sur les surfaces de roulement des roues dans la zone du congé. Ces creux sont dus à une interaction défavorable entre la roue et la semelle de frein. Dans un cas, cela a entraîné l'apparition de dommages RCF circonférentiels sur la roue.
- En l'absence de dommages sur les roues, des indicateurs d'usure compris entre 15'000km et 20'000km sont atteints pour les essieux moteurs. Les dispersions sont toutefois considérables. Pour les essieux porteurs, la dispersion est encore plus grande que pour les essieux moteurs. Pour ces derniers, les indicateurs se situent entre 30'000km et 50'000km. Les valeurs ont tendance à être légèrement plus basses pour les essieux moteurs et du même ordre de grandeur qu'en 2022 pour les essieux porteurs. Dans l'ensemble, les valeurs avec conditionnement sont nettement plus élevées que pendant la période sans conditionnement. Comme nous le verrons plus loin dans les résultats de l'installation de détection sur la voie, les dommages causés aux surfaces de roulement des roues à la suite de méplats ne sont pas liés au conditionnement.
- Les dommages sur les roues et le reprofilage qui s'ensuit réduisent massivement l'indicateur Nombre de kilomètres par réduction de 1 mm du diamètre de la roue, aussi bien à court terme que, surtout, sur une période d'observation plus longue.

### **Concernant b) les modifications apportées aux profils de roues**

- Sur les deux années d'essais d'exploitation, les profils des roues montrent une lente évolution vers un comportement plus favorable en courbe, sans détérioration notable de l'indicateur de conduite en alignement. Les essieux porteurs s'adaptent plus rapidement aux rails extérieurs à la courbe que les essieux moteurs. Cela s'explique probablement par la différence de qualité de l'acier pour ces deux types d'essieux. L'adaptation est plus rapide pour les courbes à droite que pour les courbes à gauche.
- La différence de comportement dans les deux directions de la courbe est due à des profils de roue asymétriques à gauche et à droite. Ces asymétries se traduisent généralement par des diamètres de roues différents pour les deux roues d'un même essieu.
- Grâce au conditionnement du champignon de rail et au coefficient de frottement roue / rail plus faible, l'usure des roues est réduite. L'adaptation à l'usure est donc nettement plus lente que sans conditionnement.

### **Concernant c) l'usure et les dommages au niveau des rails dans les courbes**

- C'est dans la zone centrale du rail, caractérisée par W1, que l'usure globale des rails est la plus importante. Cela vaut aussi bien pour les rails intérieurs que pour les rails extérieurs à la courbe.
- Sur les rails situés à l'intérieur de la courbe, l'usure W1 est toujours, et parfois même nettement, plus importante que sur les rails situés à l'extérieur de la courbe.
- La progression de l'usure W1 pendant les essais d'exploitation est très faible. Ceci est valable aussi bien pour les rails intérieurs que pour les rails extérieurs de la courbe.
- Les rails ont été remplacés par de nouveaux rails au niveau des trois courbes en 2019. Deux essais d'exploitation avec SKK ont eu lieu successivement en 2022 et 2023. Les rails ont été meulés entre les deux essais. Cependant, comme le montrent les graphiques, l'usure due au meulage a été très faible, ce qui résulte du fait que la croissance des ondulations a été faible pendant le premier essai d'exploitation. Ainsi, la plus grande usure de W1 devrait se situer entre 2019 et fin 2021. Cela signifie que le SKK a contribué à une réduction significative de l'usure des rails.
- L'usure W2 sur les flancs de rails situés en direction du milieu de la voie, en particulier pour les rails extérieurs à la courbe, se situait dans la plage de tolérance des mesures pendant les essais d'exploitation et n'était donc guère notable. Au vu des résultats des mesures, elle devait déjà être très faible avant le début des essais d'exploitation. Grâce à la lubrification efficace des boudins, l'usure des flancs et des congés de roulement des rails est restée pratiquement marginale, indépendamment du SKK. L'usure des congés de roulement n'a pas été représentée ici sous forme de graphiques. Les analyses révèlent un comportement similaire à celui des flancs de rail.
- Bien que seule une usure marginale des flancs de rail soit apparue depuis la pose des nouveaux rails, un élargissement significatif de la voie apparaît dans toutes les courbes examinées. Il a été démontré que les causes principales de ce phénomène ne sont pas liées à l'usure du rail. Des études plus approfondies sur ce comportement de la voie seront menées dans le cadre du projet P3.

#### **Pour d) le coefficient de frottement mesuré sur les surfaces de contact roue/rail avec le tribomètre Push**

- Les valeurs mesurées sont en grande partie constantes entre 0,2 et 0,3. Il y a cependant des valeurs coefficient de frottement élevées à tous les points de mesure en février - mars et fin août.
- L'hypothèse selon laquelle les coefficients de frottement augmenteraient considérablement durant l'été 2023, comme durant l'été 2022, ne s'est pas confirmée. Des valeurs coefficients de frottement plus élevées ont effectivement été mesurées à la fin du mois d'août 2023, mais ce pic est moins élevé et moins long que l'année précédente. Comme l'été 2023 a été moins chaud que l'été 2022, on part du principe que les « températures critiques » n'ont pas ou peu été atteintes.
- Les coefficients de frottement se sont ensuite à nouveau stabilisés entre 0,2 et 0,3, sans changement, aussi bien en février - mars 2023 qu'en août 2023.
- Malgré des coefficients de frottement globalement constants, il faudra continuer à l'avenir à tenir compte des conditions météorologiques. Sur la base des derniers tests effectués par l'AC2T sur le banc d'essai à deux disques avec trois produits de conditionnement différents, il existe déjà un changement significatif dans les performances de ces produits à une température de rail de 60°C. Les résultats de ces essais et les recommandations qui en découlent seront présentés par AC2T dans un rapport à venir.

#### **Concernant e) la rugosité des surfaces de roulement du rail dans le sens longitudinal à l'intérieur et à l'extérieur de la courbe**

- Si l'on compare les résultats avec les mesures de la période de mesure précédente, on constate que dans les courbes Zum Biel Portal et Zum Biel Brücke, la zone des longueurs d'onde des

ondulations dominantes s'est encore déplacée vers des longueurs d'onde plus faibles. Il n'est pas possible de donner une raison à cette tendance à l'heure actuelle, mais elle devra être étudiée plus en détail dans le cadre d'études futures.

- La croissance des ondulations 12 mois après le meulage est nettement plus faible dans toutes les courbes que lors de la période de mesure précédente, au cours de laquelle SKK avait également été utilisé. A l'époque, la croissance des ondulations avait nettement augmenté pendant les mois chauds de l'été 2022. Ce comportement n'a pas été observé durant l'été 2023.
- Le pic dans la bande de tiers d'octave de 6,3 mm ( $\lambda < 1\text{cm}$ ) visible sur presque tous les spectres de rugosité des rails, en particulier sur les rails extérieurs aux courbes, est une conséquence du meulage des rails avec les meules rotatives. Ce pic est lissé au fur et à mesure du roulement. En revanche, le rail est ensuite nettement plus rugueux dans la zone des ondes courtes  $\lambda < 4\text{cm}$ .

### **Concernant f) les bases d'explication de la formation d'ondulation sur la voie et de leurs effets sur l'exploitation**

- La formation des ondulations est un phénomène à fréquence constante (*constant-frequency phenomena*). Cela signifie que la variation du travail de frottement, ou d'une autre grandeur physique pertinente pour l'usure, à fréquence fixe, est responsable de la création d'irrégularités de surface présentant une longueur d'onde spécifique.
- Afin d'identifier les composants du système susceptibles d'être excités, les mesures d'inertance réalisées sur le Shuttle et dans la courbe de Biel Brücke ont été analysées, portant sur les essieux porteurs et moteurs, les traverses ainsi que les rails, aussi bien au-dessus des traverses qu'entre elles.
- L'analyse des réponses fréquentielles de la superstructure et des essieux permet d'identifier les fréquences de résonance des différents éléments du système. Certaines de ces fréquences se situent dans la plage dans laquelle sont attendus les modes propres responsables de la formation des ondulations dans les courbes étudiées.
- Les ondulations observées dans la courbe « Zum Biel Portal » engendrent des vibrations du rail et des émissions sonores lors du passage des trains, dans la plage de fréquences prévue. En raison d'une inertance plus élevée du rail dans la direction latérale, les vibrations mesurées dans cette direction présentent également des amplitudes supérieures.  
Ces mesures donnent un aperçu des effets des ondulations, mais pas des causes de leur formation. Pour en comprendre l'origine, il serait nécessaire de réaliser des mesures complémentaires sur un rail fraîchement meulé, associées à l'analyse des vibrations de torsion et de flexion sur les essieux du véhicule.

### **Zu g) le contact entre la roue et le rail**

- Dans l'évolution et l'altération des profils de rails, l'attention se porte principalement sur leur dispersion. L'évaluation dépend du profil de roue utilisé. Les plus faibles dispersions ont été observées avec le profil de roue adapté à l'usure zb\_Opft\_27\_28, qui montre la meilleure adaptation à l'usure en termes d'indice de position radiale par rapport au profil nominal et à celui d'un essieu moteur après deux ans d'exploitation sur la ligne Täsch-Zermatt.
- Comparés aux rails neufs, les rails en service depuis plus longtemps présentent des évolutions favorables de l'indice de position radiale. Toutefois, l'échantillon disponible pour évaluer l'adaptation mutuelle entre les profils de roues issus de l'exploitation et les profils de rails après une longue durée de service post-meulage reste trop limité, d'autant plus que l'état des rails est également influencé par le conditionnement.
- Les trois courbes étudiées (« Zum Biel » et « Lüegelwang ») présentent un comportement similaire en termes d'indice de position radiale et de dispersion. Il est important de noter que dans les trois cas, un élargissement significatif de l'écartement s'est produit sans usure latérale marquée, ce qui améliore le comportement dynamique en courbe par rapport aux rails nominaux.

- La MGB dispose désormais d'un relevé complet des profils de rails sur l'ensemble de ses lignes (un profil de rail tous les mètres), réalisé par le véhicule de diagnostic de Sersa. Quatre profils de roue différents ont été croisés avec les profils de rails sur toutes les lignes de la MGB. La géométrie de contact sur l'ensemble du tronçon Täsch-Zermatt a été comparée qualitativement à celle observée dans les trois courbes testées. Les quatre profils de roue présentent sur l'ensemble du réseau un comportement similaire à celui observé dans les courbes d'essai. Le meilleur comportement a été constaté pour le profil adapté à l'usure zb\_Opt.tww utilisé sur la Zentralbahn.  
Cependant, pour comprendre pourquoi même ce profil n'atteint pas toujours les valeurs cibles de l'indice de position radiale sur certains tronçons, une analyse approfondie des lignes et des profils est nécessaire.

### **Concernant h) le bruit : mesures sur les voies / surveillance et résultats concernant le rail - bruit**

- Lors du crissement en courbe, le bruit est émis par la roue à proximité d'une fréquence propre (mode) de la roue. Afin d'identifier les modes des roues motrices et porteuses, des mesures au marteau d'impact ont été réalisées en atelier. Des mesures complémentaires ont été effectuées sur la voie, dans la courbe « Zum Biel – Brücke ».
- Les modes de la roue sont clairement visibles (pics nets), notamment celui qui apparaît également lors des mesures d'un passage de train (environ 5200 Hz). D'autres mesures ont été réalisées sur un essieu porteur, avec un focus sur les basses fréquences jusqu'à 1000 Hz afin d'étudier les phénomènes liés à l'usure. Les modes à basse fréquence sont nettement détectables jusqu'à environ 6 Hz. L'attribution de ces modes aux formes de vibration correspondantes est prévue ultérieurement dans le projet, grâce à des comparaisons avec des calculs par éléments finis (FEM) de l'essieu.
- Concernant les rails, une bonne cohérence des résultats a été atteinte jusqu'à environ 700 Hz. Une anti-résonance est observée vers 159 Hz, dont l'origine reste encore à élucider. Des investigations ultérieures, basées sur un modèle éléments finis de la voie, permettront d'explorer ce phénomène plus en détail. Les mesures réalisées sont suffisantes pour établir un premier modèle de ce type, bien que cette plage de fréquences soit davantage pertinente pour étudier l'usure dynamique que pour le crissement en courbe.
- Lors de la campagne de mesures, différents passages de trains ont été enregistrés, mais le crissement en courbe ne s'est pas manifesté systématiquement. Lorsqu'il apparaît, il se produit sur le rail intérieur à une fréquence d'environ 5140 Hz, correspondant au mode identifié précédemment par les mesures au marteau d'impact. Les signaux acoustiques des essieux moteurs des deux automotrices testées ont également été analysés : il en ressort que le crissement n'est observé qu'avec un seul essieu moteur.
- La dépendance directionnelle du crissement a également été étudiée. Les premières analyses indiquent qu'il est plus fréquent en descente, en direction de Täsch, qu'en montée vers Zermatt. La Figure 72 illustre une telle comparaison des niveaux de pression acoustique.
- Lors de l'enregistrement des émissions sonores sur le rail intérieur le 19.10.2023 à 12h48, dans le cadre de l'étude du crissement en courbe, des bruits en basses fréquences ont également été détectés. Ils correspondent clairement, dans la bande de fréquences considérée, aux vibrations causées par le franchissement des ondulations. Les niveaux sonores sont particulièrement élevés lors du passage des bogies moteurs, ce qui est attribué à leur masse non suspendue plus importante.

### **Concernant i) les vibrations sur le rail**

- L'analyse des accélérations mesurées au niveau du champignon du rail, entre les traverses, dans la direction latérale, montre que lors du passage d'un train, le rail vibre selon plusieurs fréquences. Certaines de ces fréquences sont excitées sur une période prolongée. L'une

d'elles, située autour de 450 Hz, correspond à un pic de résonance marqué du rail entre les traverses ainsi que de l'essieu moteur.

- Bien que le franchissement d'une irrégularité de surface génère une excitation principalement dans la direction verticale, il peut également induire une excitation latérale. La variation de la force normale entraîne en effet une variation des forces de glissement (ou forces latérales), qui sont particulièrement élevées dans les courbes serrées. Cela suggère que l'excitation latérale observée est liée au franchissement des ondulations.

#### **Concernant j) les résultats relatifs à un système embarqué (technode) en service pour la détection d'ondulations et de crissement en courbe**

- Le système de mesure est installé sur deux compositions de trains de la MGBahn : un Komet ABDeh 2026 et une rame Shuttle BDeh 2052. Les principaux composants du système comprennent des accéléromètres montés sur les paliers de l'essieu en aval et en montée, ainsi que des microphones fixés sur la caisse du véhicule, à proximité de ce même essieu. Le système dispose en outre d'une localisation GNSS (Global Navigation Satellite System) permettant de déterminer précisément la position sur la voie lors des circulations.
- Les données de mesure sont enregistrées en continu pendant les trajets et présentées sous forme de graphiques couvrant toute l'année dans le rapport.
- Durant les mois d'été 2022 (juillet et août), les températures diurnes exceptionnellement élevées ont conduit à une augmentation des valeurs d'accélération mesurées sur les deux véhicules équipés de capteurs (Komet 2026 et Shuttle 2052). À l'été 2023, bien que les températures extrêmes de l'année précédente n'aient pas été atteintes, les températures relevées restaient dans une plage saisonnière normale. Grâce au suivi permanent, il a pu être constaté que l'effet observé en 2022 ne s'est pas reproduit. Des essais en laboratoire réalisés depuis lors ont confirmé que la performance des produits de conditionnement utilisés actuellement diminue à des températures de rail élevées.
- L'analyse des graphiques relatifs au crissement en courbe conduit aux conclusions suivantes :
  - o En montée, le crissement est plus marqué qu'en descente, et se manifeste également dans un plus grand nombre de courbes.
  - o En été, le crissement lors de la montée est plus intense que pendant les autres saisons, tandis que ce phénomène est moins perceptible en descente.
  - o Lors des descentes, le crissement est plus prononcé la nuit dans les zones équipées du SKK qu'en journée.

#### **Concernant k) les écarts de circularité évalués à l'aide d'une installation de mesure sur la voie**

- Depuis début mars 2022, l'installation de mesure des défauts de circularité des roues (Wheel Monitoring System, WMS, de Müller BBM Rail Technologies) fournit des données sur les polygones, plats et autres éventuelles détériorations de la surface de roulement des roues, réparties suivant la circonférence. Le dispositif est installé sur la voie peu après Täsch, sur la ligne en direction de Zermatt.
- Le système de mesure identifie les trains ou véhicules entrants à l'aide d'un système d'identification des véhicules. À cet effet, le système utilisé par les Chemins de fer rhétiques a été implanté. Deux antennes RFID ont été installées dans la voie pour lire les étiquettes RFID montées sur les véhicules de la MGB et des Chemins de fer rhétiques, permettant ainsi leur identification.
- Des capteurs intégrés dans la voie enregistrent les vibrations, et le WMS calcule à partir de ces signaux l'état de détérioration de la surface de roulement. Deux indicateurs sont utilisés pour décrire l'état des surfaces :
  - o Indicateur de polygonisation : il caractérise le degré de polygonisation, avec une plage de longueurs d'onde définie entre 4 cm et 40 cm.
  - o Indicateur de plat : il détecte les défauts localisés tels que les plats.
- Les résultats concernant les écarts de circularité mesurés peuvent être résumés comme suit :

- En 2023, un total de 54 plats a été recensé sur les véhicules Komet, Shuttle et voitures-pilotes articulées, contre 39 en 2022, soit une augmentation de 15 plats (+38 %).
- Cette augmentation est principalement attribuable aux véhicules Komet (2021–2028) et Shuttle.
- Les véhicules Komet et Shuttle présentent un nombre comparable de plats (environ 3 par véhicule en 2023), alors que les voitures-pilotes articulées affichent une occurrence plus faible (environ 1,5 plat par véhicule en 2023).
- Pour les véhicules Shuttle, les plats apparaissent à une fréquence similaire sur les essieux porteurs et moteurs.
- Pour les véhicules Komet mesurés régulièrement, la répartition entre essieux porteurs et moteurs est également similaire.
- En 2023, le nombre de plats par mois a été légèrement inférieur en octobre et novembre par rapport aux autres mois, période pendant laquelle des coefficients de frottement élevés ont été constatés.
- Les plats apparaissent plus fréquemment sur les véhicules Komet en novembre et décembre. Sur les rames Komet à trois éléments, 23 plats ont été enregistrés en 2022 et 2023, dont 8 en novembre et décembre (35 %).
- Sur les rames Komet à quatre éléments, 39 plats ont été enregistrés sur les deux années, dont 16 en novembre et décembre (41 %).
- Aucun pic saisonnier en novembre/décembre n'a été observé sur les véhicules Shuttle et les voitures-pilotes articulées.

### Concernant I) la caractérisation tribométrique de SKK

La caractérisation tribométrique du SKK (Schienenkopfkonditionierung, conditionnement du rail) se compose de deux volets principaux, étroitement liés :

- Développement de méthodes et expérimentations pour les futurs essais R RTE liés au SKK,
- Développement de méthodes et expérimentations pour fournir des données d'entrée aux modèles de contact roue-rail.

Dans une optique d'efficacité économique, l'objectif est de mettre au point une méthode bien définie, reproductible et peu coûteuse pour évaluer le SKK en termes de coefficient de frottement. Il s'agit notamment de réduire autant que possible le recours aux essais sur le terrain au profit d'essais en laboratoire, voire, idéalement, de remplacer entièrement les essais de terrain par des essais en laboratoire.

L'essai de terrain visait à déterminer l'influence du SKK sur le coefficient de frottement dans le cadre de l'exploitation régulière d'une voie métrique. Différentes méthodes d'essai ont été utilisées pour mieux comprendre le contact roue-rail sur voie métrique et générer des données d'entrée pour la modélisation de tels contacts. Les essais de laboratoire et de terrain ont été réalisés par The University of Sheffield (USheffield) et AC<sup>2</sup>T research GmbH (AC<sup>2</sup>T), tandis que la modélisation est assurée par Virtual Vehicle GmbH (Virtual Vehicle). Lors de l'essai sur le terrain, des mesures de frottement ont été réalisées, complétées par des méthodes analytiques.

Deux tribomètres ont été utilisés pour la caractérisation tribométrique du SKK :

- Le tribomètre portatif de Rivelin Rail (fourni par USheffield),
- Le tribomètre "Push" de Saliend Systems (fourni par RAILplus).

Deux scénarios ont été étudiés lors de l'essai de terrain :

- **Conditionnement en exploitation normale (matin)** : Il est important de noter qu'aucun conditionnement du rail n'a lieu entre 20h00 et 8h00. Ainsi, le conditionnement de la surface du rail doit se rétablir le matin. La durée nécessaire pour atteindre un état de rail conditionné (niveau de frottement constamment bas) a été mesurée. De plus, aucun conditionnement n'est effectué lorsque l'humidité de l'air dépasse 85 %.

- **Consommation de SKK en exploitation normale (journée)** : Une fois qu'un rail est conditionné, le conditionnement est désactivé par arrêt du tag RFID. Ensuite, l'évolution vers un état de rail non conditionné (niveau de frottement constamment élevé) est observée.

Les mesures ont été effectuées à trois positions successives. Le point de mesure A, la plus proche de la zone de conditionnement, a montré la plus forte diminution du coefficient de frottement immédiatement après l'activation du conditionnement. Au point de mesure C, une réduction retardée du frottement a été observée en raison du transport du SKK sur le champignon du rail par passage des roues ("carry-on"). Après la désactivation du conditionnement, le coefficient de frottement moyen a augmenté plus rapidement sur le rail extérieur que sur le rail intérieur.

Des méthodes analytiques complémentaires ont également été mises en œuvre pour documenter les données de mesure et représenter les structures de surface dans les zones de contact roue-rail :

- Profilomètre : utilisé pour relever les géométries des roues et des rails,
- Scanner 3D : employé pour une cartographie 3D de la topographie des surfaces de roulement, permettant une représentation détaillée des surfaces et leur association aux zones de contact spécifiques des différentes roues sur les rails,
- Empreintes : réalisées à l'aide d'une pâte d'empreinte à haute résolution pour déterminer la rugosité des surfaces. Ces empreintes ont ensuite été analysées en laboratoire à l'aide d'un profilomètre 3D pour extraire des informations précises sur la structure de surface, notamment les paramètres de rugosité selon la norme ISO 25178.

Les empreintes de la face intérieure du rail ont été relevées aux positions de mesure successives A, B et C, dans une zone de 5x5 mm centrée sur la bande de roulement du rail.

Les méthodes de détection qualitative et quantitative (semi-quantitative) du SKK sont applicables aussi bien aux surfaces d'échantillons de laboratoire qu'aux rails en conditions réelles. Pour garantir la qualification, la quantification et l'interprétation correcte des résultats, il est essentiel de documenter précisément le lieu de prélèvement et la surface analysée.

Le prélèvement sur les rails s'est effectué par tamponnage, suivi d'une analyse en laboratoire (AC<sup>2</sup>T). Les résultats de l'analyse des tampons ont montré un comportement similaire à celui observé lors des mesures de coefficient de frottement : dans un premier temps, après activation du conditionnement, la quantité maximale de produit de conditionnement a été atteinte après neuf passages de trains en direction de Zermatt. Après désactivation du système de conditionnement, une réduction marquée de la quantité disponible a été constatée dès le deuxième passage. Par la suite, en l'absence de toute nouvelle application de conditionneur, les quantités sont restées pratiquement stables.

### **Concernant m) le prélèvement d'échantillons SKK sur les buses du système embarqué du véhicule 2051**

Lors du processus de pulvérisation d'une durée de 6 secondes (par pression sur le bouton de test), l'ensemble du volume de SKK projeté a été collecté dans des récipients en plastique afin de réaliser des mesures gravimétriques précises en laboratoire (AC<sup>2</sup>T). Les échantillons collectés ont été dissous ou dispersés dans du pétrole-éther à l'aide d'un bain à ultrasons, puis transférés dans des boîtes de Petri. Ces dernières ont ensuite été placées dans une étuve pendant 2 à 2,5 heures à 80 °C afin d'évaporer complètement le solvant. Après séchage, les résidus (SKK) ont été pesés à l'aide d'une balance analytique.

Les résultats obtenus présentent de fortes variations : il a été observé qu'une quantité de SKK légèrement supérieure était généralement projetée du côté gauche du véhicule. L'écart par rapport au côté droit varie entre +137 % (échantillon 04) et -65 % (échantillon 02). La quantité totale de SKK projetée (somme des buses gauche et droite) fluctue entre 371 mg (échantillon 03) et 1087 mg (échantillon 05).

### **Concernant n) l'économie générale**

L'évaluation repose sur une comparaison de l'annuité équivalente (AE) pour deux scénarios différents : avec SKK et sans SKK. Cela permet d'obtenir un flux de trésorerie différentiel, dans lequel les

dépenses supplémentaires sont considérées comme des « coûts » et les économies réalisées comme des « revenus ». Les différences de flux de trésorerie entre les deux scénarios comprennent :

- Les dépenses liées au système SKK ;
- Les économies générées par les effets positifs du système SKK sur le matériel roulant et l'infrastructure.

Cette étude adopte le point de vue de l'entreprise ferroviaire ; les impacts environnementaux et sociétaux (par exemple, la réduction des nuisances sonores) ne sont pas pris en compte dans cette évaluation.

- L'évaluation montre que, sur le tronçon d'essai, l'installation du SKK est rentable, quel que soit le scénario analysé.
- En considérant uniquement les effets sur les bogies, l'installation du SKK est rentable avec une différence d'AE d'environ 140 kCHF (variant entre 75 kCHF/an et 215 kCHF/an).
- En prenant en compte les effets sur les bogies et la maintenance de la voie, l'installation du SKK reste rentable avec une différence d'AE d'environ 165 kCHF (variant entre 85 kCHF/an et 235 kCHF/an).
- En intégrant tous les effets systémiques, l'installation du SKK est rentable avec une différence d'AE d'environ 270 kCHF (variant entre 210 kCHF/an et 335 kCHF/an).
- Sous réserve de la validité des hypothèses de départ, aucune simulation n'indique que l'utilisation du SKK serait non rentable.

## 11 Bibliographie

### 11.1 Références

- [1] RAILplus: Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt, Technischer Bericht V1.0 20.10.2022
- [2] R-RTE 29500: Standardisierung Radsätze und Weichen Meterspur
- [3] RAILplus: FIMO LO-1, Konzeptionelle Bewertung, 2023
- [4] Müller BBM: Radunrundheit beurteilt anhand Messanlage im Gleis, März 2024
- [5] Müller BBM RAIL TECHNOLOGIES: OPTIMISING VEHICLE MAINTENANCE BY CONDITION BASED MAINTENANCE, WHEEL MONITORING SYSTEM WMS
- [6] ViF: Entwicklung der Schienenrauheit, Formation von Schlupfwellen und deren Auswirkungen auf den Betrieb, März 2024
- [7] SN EN 15610:2019-11: Bahnanwendungen – Akustik – Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen
- [8] Grassie, S. (2009). Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments. Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit, 223, 581-596
- [9] RAILplus: Gedanken zur Spurerweiterung in engen Bögen, 2023
- [10] ViF: Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene – Noise, März 2024
- [11] technode: Auswertung der Messdaten des Systems technode für das Jahr 2023, März 2024
- [12] AC2T: P2 – Top-of-rail friction management and flange lubrication, Module 5 – Theoretical fundamentals of top-of-rail friction modifiers and flange lubricants, 11.03.2024
- [13] IMDM: Business case – rentabilité globale SKK - MGB23, 27.02.2024

### 11.2 Figures

Figure 1 - Indicateur « Nombre de km par réduction de diamètre de 1 mm », Shuttle 2051 .....	17
Figure 2 - Indicateur « Nombre de km par réduction de diamètre de 1 mm », Shuttle 2052 .....	17
Figure 3 - Indicateur « Nombre de km par réduction de diamètre de 1 mm », Shuttle 2053 .....	18
Figure 4 – Dimensions du boudin de roue, Shuttle 2051 .....	19
Figure 5 - Dimensions du boudin de roue, Shuttle 2052.....	19
Figure 6 - Dimensions du boudin de roue, Shuttle 2053.....	20
Figure 7 - Installation du système de surveillance des roues WMS sur le Matterhorn Gotthard Bahn près de Täsch. ....	21
Figure 8 - État des roues et valeurs correspondantes de l'indicateur WMS (WMS = système de surveillance de la roue).....	21
Figure 9 – Indicateur de polygones sur l'essieu 4 du véhicule Shuttle 2051, de mars 2022 à fin 2023 .....	22
Figure 10 - Indicateur de méplats des essieux 5 et 6 du véhicule Shuttle 2054, de mars 2022 à fin 2023; les deux essieux ont été reprofilés le 15.02.2023.....	22
Figure 11 - Indicateur de méplat de la Komet 2021 de mars 2022 à fin 2023, où les méplats se produisent principalement en novembre et décembre. ....	26
Figure 12 - Indicateur de méplat des essieux 4 et 5 du Shuttle 2053 de mars 2022 à fin 2023. Les deux essieux présentent des méplats significatifs sur une longue période.....	27
Figure 13 – Fatigue du contact de roulement à la roue 4R du Shuttle 2051 .....	29
Figure 14 - Géométrie de contact de l'essieu 4 du Shuttle 2051 avant le reprofilage .....	29
Figure 15 - Enregistrements des méplats et polygones au point de mesure du Wheel Monitoring System WMS Müller BBM sur les essieux 1 à 4 du Shuttle 2051 .....	30
Figure 16 - Spectres de rugosité des rails «Zum Biel Portal», courbe intérieur .....	35
Figure 17 - Spectres de rugosité des rails «Zum Biel Portal», courbe extérieur .....	35
Figure 18 - Spectres de rugosité des rails «Pont de Zum Biel», courbe intérieure.....	36
Figure 19 - Spectres de rugosité des rails «Pont de Zum Biel», courbe extérieur Lüegelwang.....	37
Figure 20 - Spectres de rugosité des rails «Lüegelwang», courbe intérieur.....	37
Figure 21 - Spectres de rugosité des rails «Lüegelwang», courbe extérieur.....	38

Figure 22 - Réponse en fréquence d'un essieu porteur par excitation dans la direction latérale.....	41
Figure 23 - Réponse en fréquence d'un essieu porteur par excitation dans la sens circonférentiel ....	41
Figure 24 - Réponse en fréquence d'un essieu moteur par excitation dans la direction latérale.....	42
Figure 25 - Réponse en fréquence d'un essieu moteur par excitation dans la sens circonférentiel ....	42
Figure 26 - Réponse en fréquence du rail sur traverse par excitation dans la direction verticale.....	43
Figure 27 - Réponse en fréquence du rail sur traverse par excitation dans la direction latérale .....	43
Figure 28 - Réponse en fréquence du rail entre traverse par excitation dans la direction verticale.....	44
Figure 29 - Réponse en fréquence du rail sur traverse par excitation dans la direction latérale .....	44
Figure 30 - Vibration du rail entre deux traverses lors du passage des bogies individuels .....	45
Figure 31 - Accélération du rail situé entre les traverses - direction latérale .....	46
Figure 32 - Accélération du rail situé entre les traverses - direction verticale .....	47
Figure 33 - Mesure des émissions sonores sur le rail intérieur de la courbe .....	48
Figure 34 - Courbes mesurées et leur affectation au parcours .....	49
Figure 35 - Dénominations dans les courbes à gauche.....	50
Figure 36 - Dénominations dans les courbes à droite .....	50
Figure 37 - Points de mesure Zum Biel – Portal.....	51
Figure 38 - Usure W1 à Biel Portal.....	52
Figure 39 - Usure W2 à Biel Portal.....	52
Figure 40 - Écartement des rails et variations des écartements + comparaison avec l'usure des flancs des rails .....	52
Figure 41 - Points de mesure Pont Zum Biel.....	53
Figure 42 - Usure W1 au Pont zum Biel .....	53
Figure 43 - Usure W2 au Pont zum Biel .....	54
Figure 44 - Écartement des rails et variations des écartements + comparaison avec l'usure des flancs des rails .....	54
Figure 45 - Points de mesure Lüegelwang.....	55
Figure 46 - Usure W1 à Lüegelwang.....	56
Figure 47 - Usure W2 à Lüegelwang.....	56
Figure 48 - Écartement des rails et variations des écartements + comparaison avec l'usure des flancs des rails .....	56
Figure 49 - Lieux de mesure du coefficient de frottement avec le tribomètre .....	58
Figure 50 - Résultats de mesure des coefficients de frottement .....	60
Figure 51 - Couplage de profils nominaux de roues et de rails.....	62
Figure 52 - Développement des profils de roues du Shuttle 2051 .....	63
Figure 53 - Développement des profils de roues du Shuttle 2052 .....	63
Figure 54 - Développement des profils de roues du Shuttle 2053 .....	64
Figure 55 - Profils de roues sélectionnés, associés aux profils de rails de Biel Brücke .....	65
Figure 56 - Profils de roues sélectionnés, associés aux profils de rails de Biel Portal .....	66
Figure 57 - Profils de roues sélectionnés, associés aux profils de rails de Lüegelwang .....	66
Figure 58 - Extraction Täsch-Zermatt du couple rail-roue Brigue-Zermatt.....	67
Figure 59 - Formation d'une cavité dans la zone de la gorge de la roue en raison de l'interaction de la roue avec la plaquette de frein.....	68
Figure 60 - Appariement de la roue et du rail dans un virage à gauche.....	69
Figure 61 : Procédure schématique pour l'analyse et la modélisation du phénomène "crissement en courbe" .....	70
Figure 62 : Lieu de mesure : courbe "Zum Biel" .....	71
Figure 63 : Analyse des émissions de bruit émis par un essieu moteur d'une rame "Schuttle" équipée de l'instrumentation de mesure. ....	72
Figure 64 : Mesures au coup de marteau sur l'essieu dans un atelier .....	73
Figure 65 - Instrumentation et passage d'une rame automotrice .....	73
Figure 66 - Impédance d'entrée sur une roue d'un essieu moteur – Amplitude (en haut), Phase (au milieu), Cohérence (en bas).....	74
Figure 67 - Mesures en atelier au marteau sur un essieu porteur .....	75
Figure 68 - Inertie d'entrée du bogie – Amplitude (en haut), Phase (au milieu), Cohérence (en bas) ..	75
Figure 69 - Excitation (noir) et mesure de l'accélération (bleu ou rouge).....	76

Figure 70 - Inertie d'entrée du rail lors de l'excitation au niveau du seuil – Amplitude (en haut), Phase (au milieu), Cohérence (en bas).....	76
Figure 71 - Pression acoustique (densité spectrale de puissance, PSD) sur le rail intérieur lors du passage – direction Täsch – Crissement en courbe autour de 5140 Hz.....	77
Figure 72 - Pression acoustique (densité spectrale de puissance, PSD) sur le rail intérieur lors du passage – Trajet en direction de Zermatt (à gauche) et Täsch (à droite) – Crissement en courbe autour des 5140 Hz.....	78
Figure 73 - Historique des vibrations « Täschsand » - Zermatt, octobre 2022 - décembre 2024 .....	80
Figure 74 - Description des graphes d'analyse Technode (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente)	81
Figure 75 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone droit – Crissement en courbe – Semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	82
Figure 76 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone gauche – Crissement en courbe – Semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	83
Figure 77 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone droite - Crissement en courbe - Courant de la journée (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	83
Figure 78 - 2023 – BDeh 2052 - Microphone gauche - Crissement en courbe - Courant de la journée (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	84
Figure 79 - 2023 – BDeh 2052 - Boîte d'essieux - gauche - usure ondulatoire verticale - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	85
Figure 80 - 2023 – BDeh 2052 - Boîte d'essieux - droite - usure ondulatoire - vertical - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	85
Figure 81 - 2023 – BDeh 2052 - boîte d'essieux - gauche - usure ondulatoire - latéral - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	86
Figure 82 - 2023 – BDeh 2052 - boîte d'essieux - droite - usure ondulatoire - latéral - semaine calendaire (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	86
Figure 83 - BDeh 2052 – Microphone droit – Crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente).....	87
Figure 84 - Microphone gauche – Crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente).....	88
Figure 85 - Microphone gauche – Changement du crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente) .....	89
Figure 86 - Microphone droite – Changement du crissement en courbe 2022–2023 (Bergfahrt = montée, Talfahrt = descente).....	89
Figure 87 - Balise RFID et points de mesure (à gauche), vue d'ensemble de la courbe Biel (à droite) .....	92
Figure 88 - Tribomètre portable de Rivelin Rail .....	92
Figure 89 - Box-plot montrant des exemples de résultats de coefficient de frottement sur champignon du rail sec (dry) et mouillé (wet) (Grande-Bretagne, automne), mesurés avec le tribomètre portable Rivelin Rail.....	93
Figure 90 - Tribomètre "Push" de Salient Systems.....	93
Figure 91 - Appareil de mesures Calipri .....	95
Figure 92 - 3D-Scanner manuel: a) Artec LEO 3D-Scanner b) Tronçon de la voie ferrée scannée .....	96
Figure 93 - Forensic Sil, photo : Loci Forensics B.V. (à gauche), pâte à empreinte sur un rail (à droite) .....	96
Figure 94 - Prélèvement d'un film d'huile à l'aide d'un feutre (à gauche) ou d'un tampon et d'un cadre pour délimiter une surface définie (à droite) .....	97
Figure 95 - Résultats qualitatifs des échantillons prélevés à l'aide du tampon aux positions de mesure A, B et C de l'aiguille intérieure pendant le conditionnement actif.....	97
Figure 96 - Vue d'ensemble des rails intérieurs et extérieurs aux points de mesure A, B et C .....	98
Figure 97 - Flanc de rail avec un mélange possible de SKK et de SKS (à gauche), résidus de SKK et/ou de SKS dans le ballast (au milieu) et sur la traverse (à droite). .....	99
Figure 98 - Vue d'ensemble des empreintes des points de mesure A, B et C (colonne de gauche), illustration de la topographie (colonne du milieu) et mesure détaillée correspondante pour les paramètres de rugosité de surface (colonne de droite). .....	100
Figure 99 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C avant le conditionnement des rails intérieurs et extérieurs.....	102

Figure 100 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C du rail interne pendant un conditionnement actif .....	103
Figure 101 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C après le 9e passage pendant le conditionnement des rails intérieur et extérieur.....	103
Figure 102 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C du rail interne après désactivation du conditionnement .....	104
Figure 103 - Résultats qualitatifs des prélèvements aux points de mesure A, B et C après le 8e passage sans conditionnement des rails intérieur et extérieur.....	105
Figure 104 - Coefficient de frottement (Coefficient of Traction, CoT) au point de mesure A .....	106
Figure 105 - Coefficient de frottement (Coefficient of Traction, CoT) au point de mesure B .....	107
Figure 106 - Coefficient de frottement (Coefficient of Traction, CoT) au point de mesure C .....	108
Figure 107 - Véhicule 2051 dans l'atelier (en haut à gauche) et la buse du système embarqué pour l'application du SKK (en haut à droite). Échantillons de SKK (pulvérisation de 6 secondes) collectés dans des récipients en plastique (en bas) en vue d'une analyse ultérieure chez AC <sup>2</sup> T .....	109
Figure 108 - Graphique de la rentabilité du SKK sur le tronçon Täsch-Zermatt.....	113
Figure 109 - Graphique sur la rentabilité du SKK au niveau du réseau entier de la MGB.....	114

### 11.3 Tableaux

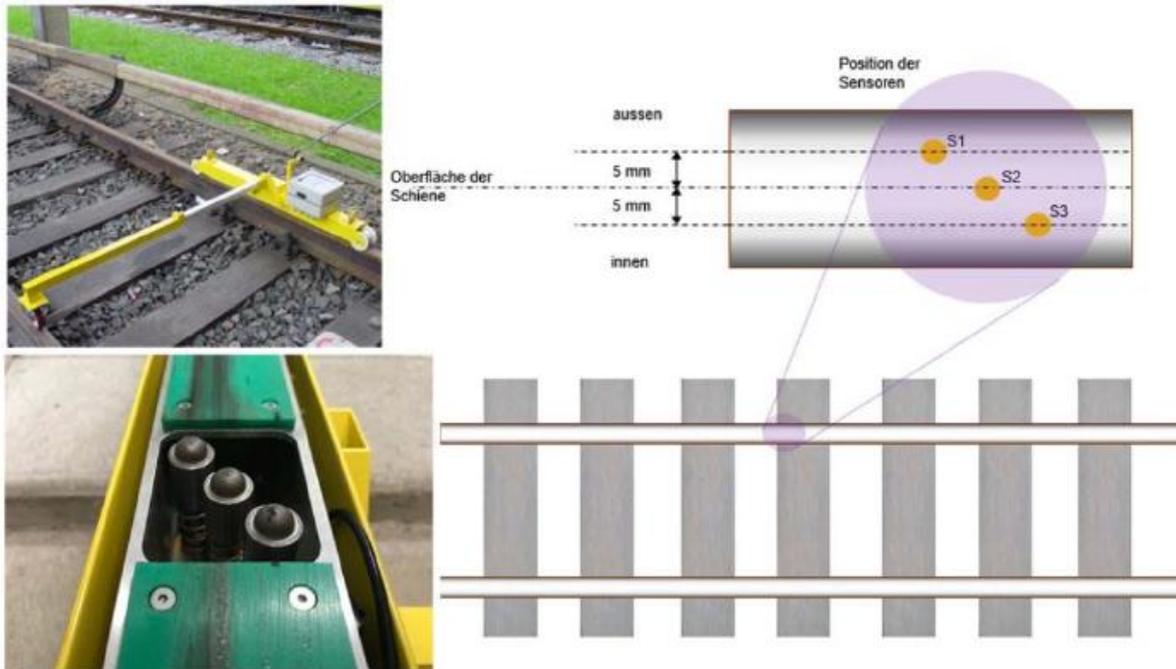
Tableau 1 - Vue d'ensemble des équipements et matériaux des véhicules.....	13
Tableau 2 – Agenda des mesures sur roue et rail.....	14
Tableau 3 – Étendue et évaluation des mesures .....	15
Tableau 4 – Nombre de méplats sur la Komet (2011-2014) sur l'année 2022, 2023 et en particulier les mois d'octobre et novembre 2023 .....	23
Tableau 5 - Nombre de méplats sur la Komet (2021-2028) sur l'année 2022, 2023 et en particulier les mois d'octobre et novembre 2023 .....	23
Tableau 6 - Nombre de méplats sur les véhicules Shuttle (2051 - 2054) en 2022, 2023 et plus particulièrement au cours des mois d'octobre/novembre 2023.....	24
Tableau 7 - Nombre de méplats sur les voitures de commande articulée (2131 - 2134) en 2022, 2023 et plus particulièrement au cours des mois d'octobre/novembre 2023 .....	24
Tableau 8 – Rassemblement des reprofilages .....	28
Tableau 9 - Documentation photographique des roues motrices du Shuttle après un kilométrage prolongé.....	32
Tableau 10 - Sélection de courbes pour les mesures de rugosité des rails .....	34
Tableau 11 - Dates des mesures de rugosité des rails en 2023 .....	34
Tableau 12 - Dates de mesure de la rugosité des rails avant 2023 .....	34
Tableau 13 - Longueurs d'onde dominantes dans les courbes observées .....	39
Tableau 14 - Limites de la gamme des fréquences considérées .....	40
Tableau 15 - Aperçu de la circulation des trains, des périodes d'application du SKK et des données météorologiques au 19.10.2023.....	101
Tableau 16 - Résumé des mesures gravimétriques des échantillons SKK du système embarqué du véhicule 2051 après 6 secondes de pulvérisation .....	110
Tableau 17 - Portée de l'analyse de l'économie globale.....	111
Tableau 18 - Hypothèses retenues de l'analyse de l'économie globale.....	112



## 12.2 Étendue des analyses et répartition des tâches

Actions	Étendue des tâches	Responsable
<i>Roue</i>		
Tour en fosse / mesure Calipri tous les 2 mois (MGB)	Effectuer des mesures, surveiller le kilométrage km/mm Evaluation des profils	MGB (atelier, Odilo Ruppen)  Roland Müller
Tour en fosse / mesure Calipri mensuel (MGB)	Effectuer des mesures, surveiller le kilométrage km/mm Evaluation des profils	MGB (atelier, Odilo Ruppen)  Roland Müller
Saisie des écarts de circularité des roues (point de mesure sur la voie à proximité de Täsch) en continu	Surveillance des méplats et des polygones sur les véhicules des essais en service et du trafic régulier	Müller-BBM
<i>Rail</i>		
Mesure tribométriques mensuel (MGB)	Saisie des coefficients de frottement, surveillance de l'évolution des coefficients de frottement	MGB (Infrastructure, Aaron Seeberger)
Mesures tribométriques hebdomadaires (MGB)	Saisie des coefficients de frottement, surveillance de l'évolution des coefficients de frottement	MGB (Infrastructure, Aaron Seeberger)
Rugosité du rail (KPZ)	Enregistrement de la formation d'ondulation, rapport sur les mesures enregistrées (comparaison entre avant et après / évolution)	KPZ
Usure du rail : Mesure profil de rail (MGB)	Saisie des profils à l'aide de Calipri Evaluation des profils	MGB (Aaron Seeberger) Roland Müller
Train de mesure Sersa (Sersa)	Selon le véhicule de mesure Sersa Evaluation ou comparaison avec les autres mesures	Sersa Roland Müller
Technode	Poursuite de l'exploitation du système de mesure Technode comme auparavant	This Wiederkehr

### 12.3 Rugosité du rail – Appareil de mesure APT RSA – Rail Surface Analyser



#### Utilisation

- Quantification de la rugosité des rails et des ondulations
- Évaluation de la qualité du meulage des rails
- Comme base pour les mesures et les prévisions de bruit

#### Possibilités de mesures

- Mesure la variation verticale du champignon du rail par rapport à une référence glissante d'une longueur de 1 m en fonction de la distance
- Mesures selon ISO 3095: 2005 (E)
- Longueur de mesure illimitée
- Guidage léger et maniable sur la voie ferrée

#### Capteur de mesure

- Plage de mesure dynamique :  $\pm 5000 \mu\text{m}$
- Type de capteur : capteur de déplacement (LVDT)
- Nombre de capteurs : 3 (positionnés indépendamment sur le champignon du rail)
- Capteur de bruit de fond :  $0.1 \mu\text{m}$
- Codeur pour la détermination de la position, 128 impulsions par tour

#### Enregistrement des données

- Appareil d'enregistrement : 4 canaux simultanés- Convertisseur A/N 16 bits
- Rééchantillonnage post-traitement de 1000 échantillons par mètre
- Capacité de mémoire : 1 gigaoctet de mémoire
- 6 heures de mesure
- Téléchargement de données sur ordinateur de bureau : USB-1

### Data Processing

- Logiciel flexible pour la sortie de données sous différentes formes
- Spectres de rugosité en : 1/3 de bande d'octave, bande étroite, PSD
- Cartes de couleurs
- Niveau RMS versus distance

Les mesures de rugosité des rails ont été effectuées aux moments suivants :

Datum	Beschreibung	Bemerkung
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		

## 12.4 Mesures au tribomètre

### 12.4.1 Kalter Boden Voie 2 (rayon 100 m) avant la local à relais kilometrage 41.080

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	08.00	Schön	-2	links	0.40	0.37	0.37	0.38
				rechts	0.32	0.33	0.34	0.33
20.03.23	13.30	Schön	9	links	0.36	0.36	0.36	0.36
				rechts	0.39	0.33	0.31	0.34
27.04.23	13.15	Bewölkt	14	links	0.28	0.28	0.30	0.29
				rechts	0.30	0.33	0.31	0.32
03.07.23	14.30	Schön	21	links	0.23	0.26	0.25	0.25
				rechts	0.34	0.37	0.36	0.36
18.08.2023	13.30	Schön	26	links	0.24	0.28	0.27	0.26
				rechts	0.32	0.34	0.32	0.33
25.08.2023	6.15	Schön	17	links	0.29	0.35	0.36	0.33
				rechts	0.34	0.36	0.39	0.36
29.08.2023	13.30	Bewölkt	9	links	0.46	0.49	0.48	0.48
				rechts	0.42	0.45	0.51	0.46
09.10.2023	14.00	Schön	19.5	links	0.22	0.31	0.31	0.28
				rechts	0.27	0.25	0.29	0.27
15.11.2023	13.35	Schön	8	links	0.31	0.33	0.34	0.33
				rechts	0.39	0.39	0.37	0.38
25.01.2024	15.00	Schön	8	links	0.28	0.30	0.26	0.28
				rechts	0.34	0.36	0.38	0.36

### 12.4.2 Courbe de Biel (110m) kilometrage 42.050

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	08.20	Schön	-2	links	0.47	0.46	0.54	0.49
				rechts	0.43	0.43	0.54	0.47
20.03.23	14.10	Schön	9	links	0.46	0.47	0.47	0.47
				rechts	0.29	0.30	0.27	0.29
27.04.23	14.00	Bewölkt	14	links	0.29	0.29	0.28	0.29
				rechts	0.29	0.30	0.29	0.29
03.07.23	13.30	Schön	21	links	0.24	0.26	0.28	0.26
				rechts	0.34	0.31	0.32	0.32
18.08.2023	13.50	Schön	26	links	0.24	0.27	0.26	0.26
				rechts	0.27	0.25	0.25	0.26
25.08.2023	6.40	Schön	17	links	0.62	0.58	0.53	0.57
				rechts	0.55	0.51	0.47	0.51
29.08.2023	14.30	Bewölkt	8	links	0.45	0.53	0.54	0.50
				rechts	0.49	0.52	0.56	0.52
09.10.2023	14.35	Schön	20	links	0.36	0.40	0.37	0.38
				rechts	0.34	0.31	0.41	0.35
15.11.2023	13.45	Schön	8	links	0.43	0.48	0.51	0.47
				rechts	0.42	0.32	0.35	0.36
25.01.2024	14.20	Schön	8	links	0.27	0.29	0.30	0.29
				rechts	0.32	0.34	0.35	0.34

### 12.4.3 Alignement Biel kilometrage 42.100

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	08.45	Schön	-2	links	0.34	0.35	0.37	0.35
				rechts	0.38	0.37	0.37	0.37
20.03.23	13.50	Schön	9	links	0.24	0.28	0.25	0.27
				rechts	0.26	0.27	0.29	0.27
27.04.23	13.40	Bewölkt	14	links	0.23	0.24	0.24	0.24
				rechts	0.24	0.26	0.26	0.25
03.07.23	14.00	Schön	21	links	0.20	0.19	0.22	0.20
				rechts	0.23	0.21	0.20	0.21
18.08.2023	14.15	Schön	26	links	0.21	0.21	0.25	0.22
				rechts	0.23	0.24	0.24	0.24
25.08.2023	7.00	Schön	17	links	0.25	0.24	0.26	0.25
				rechts	0.35	0.34	0.32	0.34
29.08.2023	14.15	Bewölkt	8	links	0.21	0.22	0.23	0.22
				rechts	0.35	0.40	0.32	0.36
09.10.2023	14.50	Schön	20	links	0.26	0.25	0.24	0.25
				rechts	0.24	0.24	0.25	0.24
15.11.2023	14.15	Schön	8	links	0.23	0.24	0.23	0.23
				rechts	0.26	0.26	0.26	0.26
25.01.2024	14.00	Schön		links	0.25	0.24	0.27	0.25
				rechts	0.25	0.29	0.27	0.27

### 12.4.4 Courbe étroite à Lüegelwang (95m) kilometrage 42.550

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	09.00	Schön	-2	links	0.24	0.24	0.22	0.23
				rechts	0.30	0.31	0.26	0.29
20.03.23	14.30	Schön	9	links	0.21	0.28	0.28	0.26
				rechts	0.22	0.20	0.21	0.21
27.04.23	13.00	Bewölkt	14	links	0.26	0.26	0.27	0.26
				rechts	0.25	0.29	0.29	0.28
03.07.23	13.30	Schön	21	links	0.17	0.18	0.19	0.18
				rechts	0.21	0.22	0.24	0.22
18.08.2023	14.30	Schön	26	links	0.23	0.20	0.21	0.21
				rechts	0.22	0.21	0.22	0.22
25.08.2023	7.00	Schön	17	links	0.32	0.30	0.37	0.33
				rechts	0.35	0.34	0.33	0.34
29.08.2023	14.00	Bewölkt	9	links	0.23	0.19	0.18	0.20
				rechts	0.37	0.40	0.35	0.37
09.10.2023	13.50	Schön	19	links	0.18	0.27	0.23	0.23
				rechts	0.24	0.22	0.21	0.22
15.11.2023	14.30	Schön	9	links	0.25	0.25	0.25	0.25
				rechts	0.25	0.25	0.24	0.25
25.01.2024	13.45	Schön	8	links	0.24	0.25	0.25	0.25
				rechts	0.24	0.23	0.21	0.23

## 12.5 Rentabilité générale – Hypothèses

<b>SKK</b>	Scénario avec SKK	Scénario sans SKK
Durée de vie	40 ans	
Installation 1 <sup>er</sup> véhicule	34'760 CHF/vhl	
Installation véhicules suivants	28'856 CHF/vhl	
Frais de maintenance et d'exploitation par an	1'375CHF/vhl/an	
<b>Rollmaterial</b>		
Radreifenwechsel pro Drehgestell	27'040 CHF/bogie	27'040 CHF/bogie
Kilometerleistung pro mm Radverschleiss	<b>10'750 km/mm</b>	<b>3'500 km/mm</b>
Kilometerleistung pro Jahr	80'000 km	80'000 km
<b>Infrastruktur</b>		
Lebensdauer Schiene	<b>16 ans</b>	<b>9 ans</b>
Kosten Schiene	600 CHF/m	600 CHF/m
Lebensdauer Fahrbahn	<b>63 ans</b>	<b>45 ans</b>
Kosten Fahrbahn (Oberbau)	2'000 CHF/m	2'000 CHF/m
Kosten Schienenschleifen	6 CHF/m	6 CHF/m
Schleifintervall	<b>2 ans</b>	<b>6 mois</b>

### 12.5.1 Investissement

#### Matériel roulant

- Durée de vie: 40 ans- avec 50% réinvestissement après 20 ans
- Matériel, incl. supports, plaques de montage etc.
  - Commandes : 17'300 CHF par véhicule (installation, supports, RFID Tags, plaques (sol) + env. 2'000 CHF matériel propre (installation, borniers, vis) → 20'000 CHF / véhicule
- Installation, premier véhicule :
  - 41 h \* 4 Pers. \* 90 CHF = 14'760 CHF frais de personnel
- Installation, weitere Fahrzeuge:
  - 4 Pers. \* 24.6 h \* 90 CHF = 8'856 CHF frais de personnel / véhicule
- Engineering (estimation 4 jours pour les commandes, les adaptations de schémas, etc.):
  - 32.8 h \* 130 CHF = 4'264 CHF (*One shot*)

#### Infrastructure

- Rail
  - Fr. 600.- par mètre linéaire de rail,
  - Durée de vie sans SKK: 9 ans, avec SKK: 16 ans
- Voie
  - Fr. 2000.- par mètre linéaire de voie, rail inclu
  - Durée de vie sans SKK: 45 ans, avec SKK: 63 ans

## Frais de maintenance et d'exploitation

### Matériel roulant

- Coût matériel
  - (Produit SKK) = env. 3'500 CHF / an
- Frais de personnel
  - env. 1 h par mois (P1), ->  $12 * 90 = 1'080$  CHF
  - 2 \* 4 h par année (P3) ->  $8 * 90 = 720$
  - env. 2'000 CHF de frais de personnel
- 5'500 CHF / an

### Infrastructure

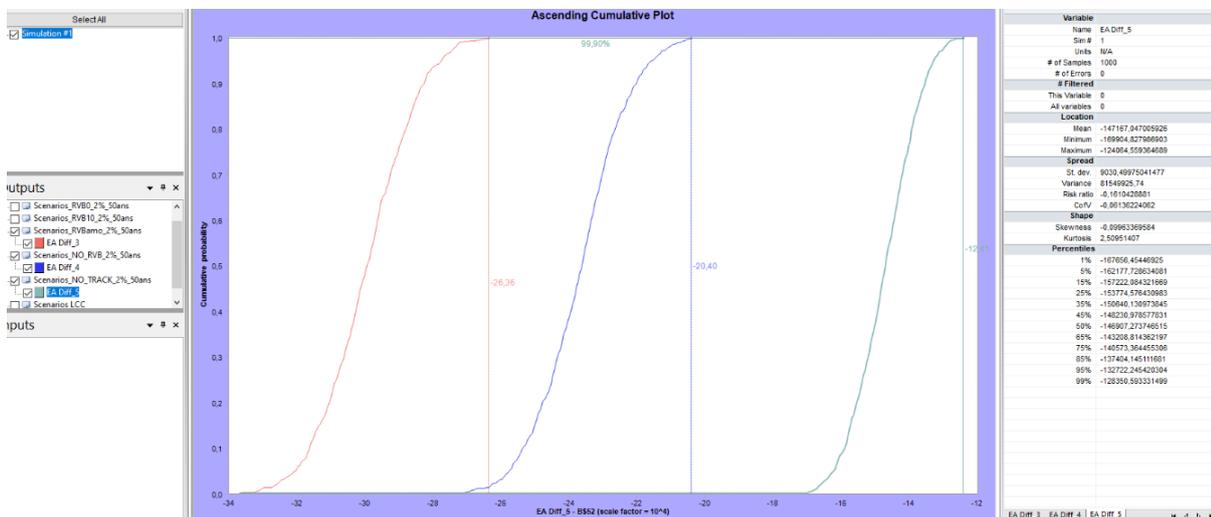
- Sans SKK
  - Meulage: 6 CHF/m, bourrage: 4 CHF/m
  - Remplacement des rails : 150'000 CHF / 5000m -> dans les 150'000 francs sont compris environ 250m de remplacement pur de rails, comme toute la ligne n'est pas à rayons serrés, seuls les rails dans les courbes sont remplacés. (5000m / 9 Jahre = 555m -> env. 1/2 dans les courbes serrées -> env. 250m \* Fr. 600.- = Fr. 150'000.-
- Avec SKK :
  - Meulage: 4 CHF/m, bourrage: 4 CHF/m
  - Durée de vie du rail (tous les 9 ans), durée de vie de la voie (bourrage). 16 ans
  - Remplacement du rail : 90'000 CHF / 5000m

### Coûts d'exploitation changement de bogie / changement de bandage avant / après SKK

- Changement de bogie:
  - $20*90=1'800$ , nettoyage bogie:  $15*90=1'350$ , Komponenten spritzen:  $5*90=450$ , Ein-Ausbau Achsantriebe:  $30*90=2'700$ , Drehkranz versetzen um 90°:  $2*90=180$  → Gesamt Stunden = 6'480 CHF
  - Externe Leistung: NB Radsatz (extern) ohne Antrieb zerlegen:  $2*4900=9'800$ , Transportkosten = 1'500, → Gesamt externe Leistungen = 11'300 CHF
  - Material: Reinigung TDG= 100, Komponenten spritzen= 100, Ein- Ausbau Achsantriebe = 3'500, Bandagen = 1'980, Rissprüfung =  $250*2 = 500$ , Widerstandsmessung =  $130*2 = 260$ ,
  - Tarollager revidieren = 1'400 → Gesamt Material = 7'840 CHF
  - DG / Radreifenwechsel Gesamt: 25'620 pro Drehgestell
- Annahmen:
  - Laufleistungen vor SKK = 3'500km/mm
  - Laufleistungen während SKK = 16'000km/mm
  - Benötigte Laufleistung Fz pro Jahr = 80'000 km
  - Anzahl DG / Radreifenwechsel über ein Jahr vor SKK = ca. 8
  - Anzahl DG / Radreifenwechsel während Betriebserprobung SKK = ca. 2
- Kosten DG Wechsel pro Jahr (vor / na

- Jährliche Kosten vor SKK:  $8 \cdot 25620 = 204'960$
- Jährliche Kosten während Betriebserprobung SKK:  $2 \cdot 25620 = 51'240$
- Differenz ca.:  $204'960 - 51'240 = \underline{153'720 \text{ CH}}$

### 12.5.2 Extrait de la simulation



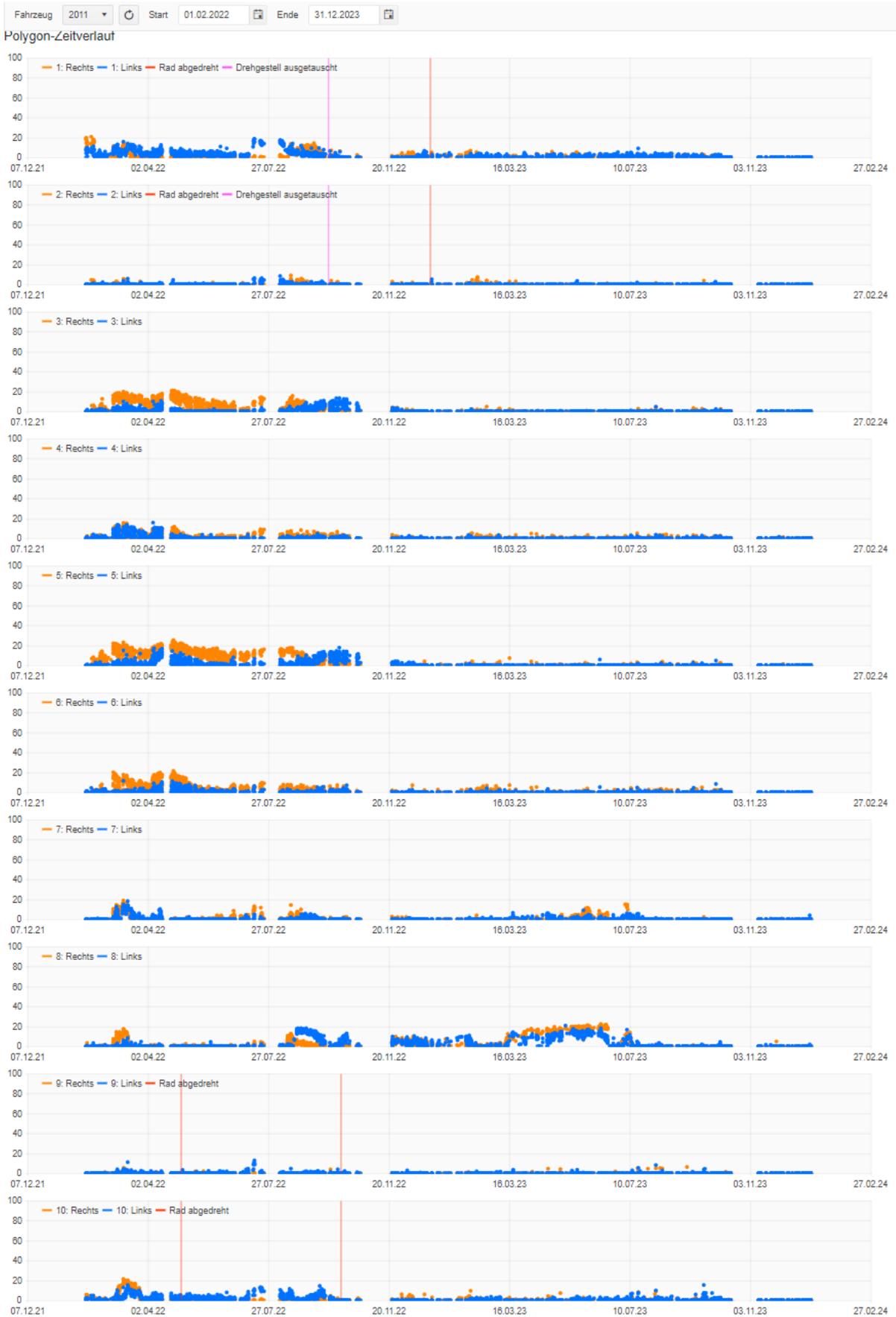
## 12.6 Défaut de circularité des roues

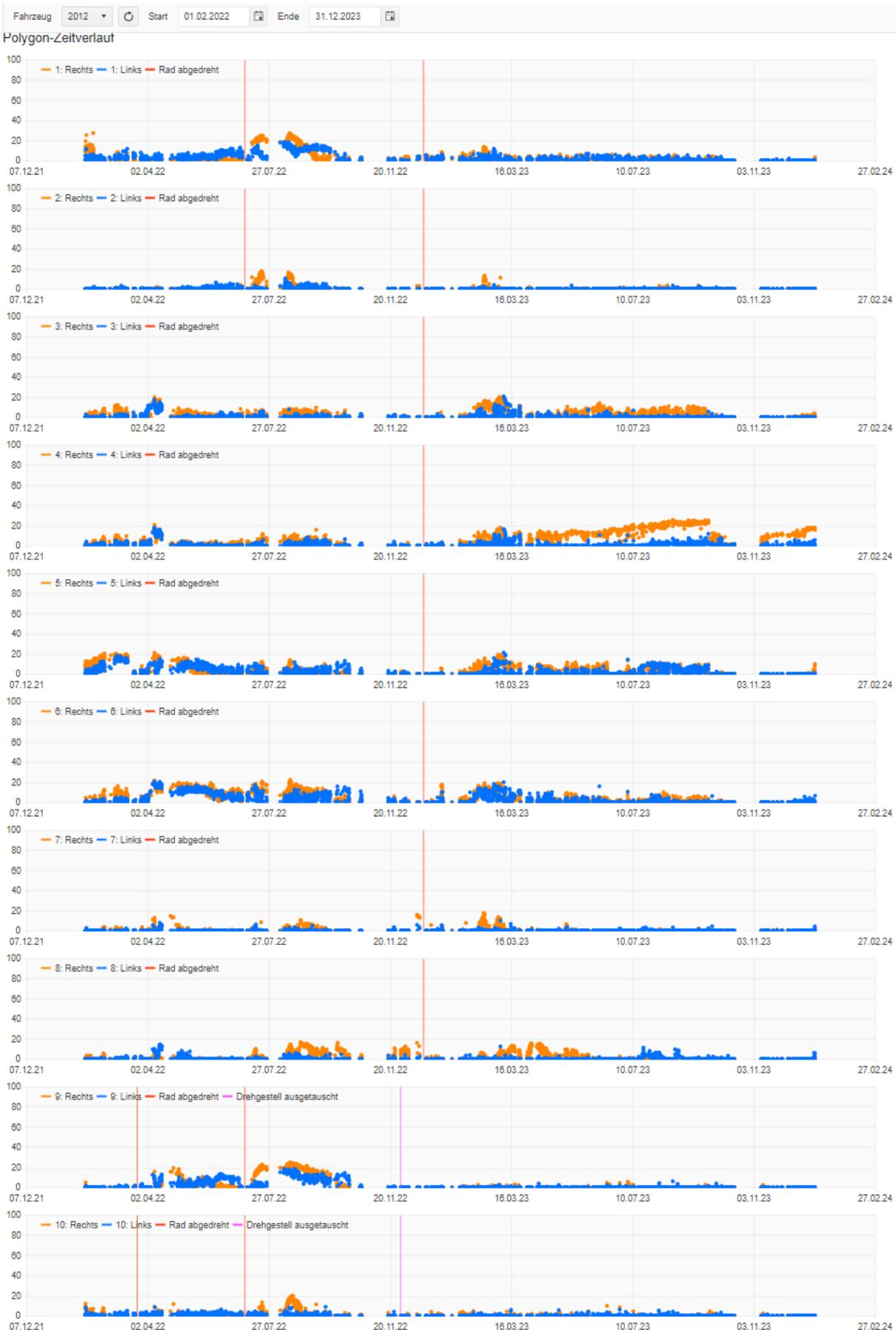
In den unten aufgeführten Tabellen sind für jedes der Fahrzeuge vom Typ Komet (3-teilig, 4-teilig), Shuttle und GSW jeweils auf den ersten Seiten die Rundheitsabweichungen des Typs Polygon und auf den zweiten Seiten die Rundheitsabweichungen des Typs Flachstelle aufgeführt. Dargestellt sind die Messwerte aller Räder pro Überfahrt auf der Messstelle vom 23.02.2022 bis Anfangs Oktober 2022.

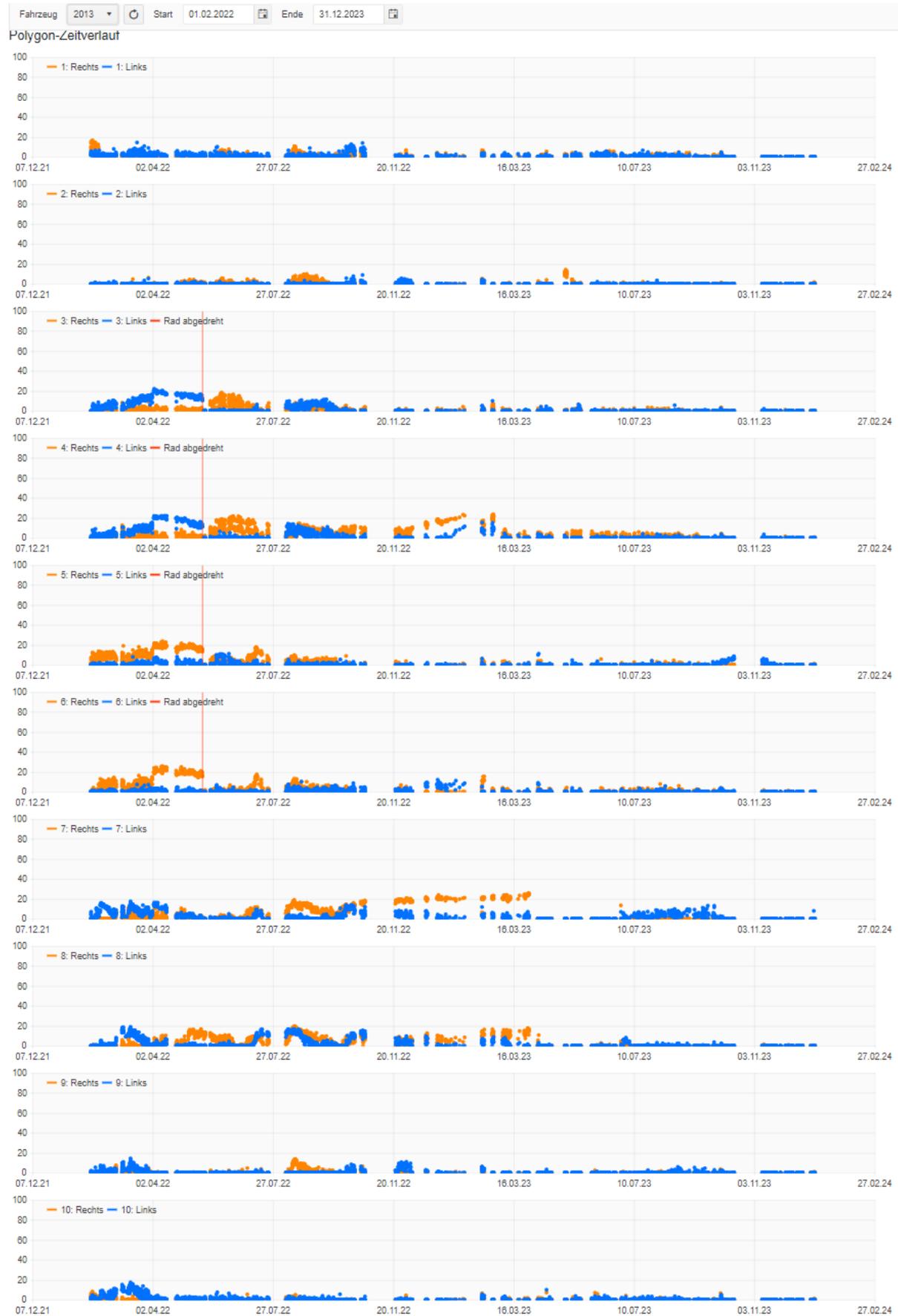
 <p><b>Komet</b></p>	<table border="1"> <tr> <td>Bauartbezeichnung:</td> <td>ABDeh 4/10</td> <td>ABDeh 4/8</td> </tr> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2011–2014</td> <td>2021–2028</td> </tr> <tr> <td>Anzahl:</td> <td>4</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Baujahre:</td> <td colspan="2">2007–2008, 2014</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Achsformel:</td> <td>4-teilig</td> <td>3-teilig</td> </tr> <tr> <td>2'Bo'zz Bo'zz 2'2'</td> <td>2'Bo'zz Bo'zz 2'</td> </tr> </table>	Bauartbezeichnung:	ABDeh 4/10	ABDeh 4/8	Nummerierung:	2011–2014	2021–2028	Anzahl:	4	8	Baujahre:	2007–2008, 2014		Achsformel:	4-teilig	3-teilig	2'Bo'zz Bo'zz 2'2'	2'Bo'zz Bo'zz 2'
Bauartbezeichnung:	ABDeh 4/10	ABDeh 4/8																
Nummerierung:	2011–2014	2021–2028																
Anzahl:	4	8																
Baujahre:	2007–2008, 2014																	
Achsformel:	4-teilig	3-teilig																
	2'Bo'zz Bo'zz 2'2'	2'Bo'zz Bo'zz 2'																
 <p><b>Shuttle</b></p>	<table border="1"> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2051–2054</td> </tr> <tr> <td>Baujahr(e):</td> <td>2003, 2005</td> </tr> <tr> <td>Achsformel:</td> <td>2'Bo'zz Bo'zz 2'</td> </tr> </table>	Nummerierung:	2051–2054	Baujahr(e):	2003, 2005	Achsformel:	2'Bo'zz Bo'zz 2'											
Nummerierung:	2051–2054																	
Baujahr(e):	2003, 2005																	
Achsformel:	2'Bo'zz Bo'zz 2'																	
 <p><b>GSW</b></p>	<table border="1"> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2131-2134</td> </tr> </table>	Nummerierung:	2131-2134															
Nummerierung:	2131-2134																	

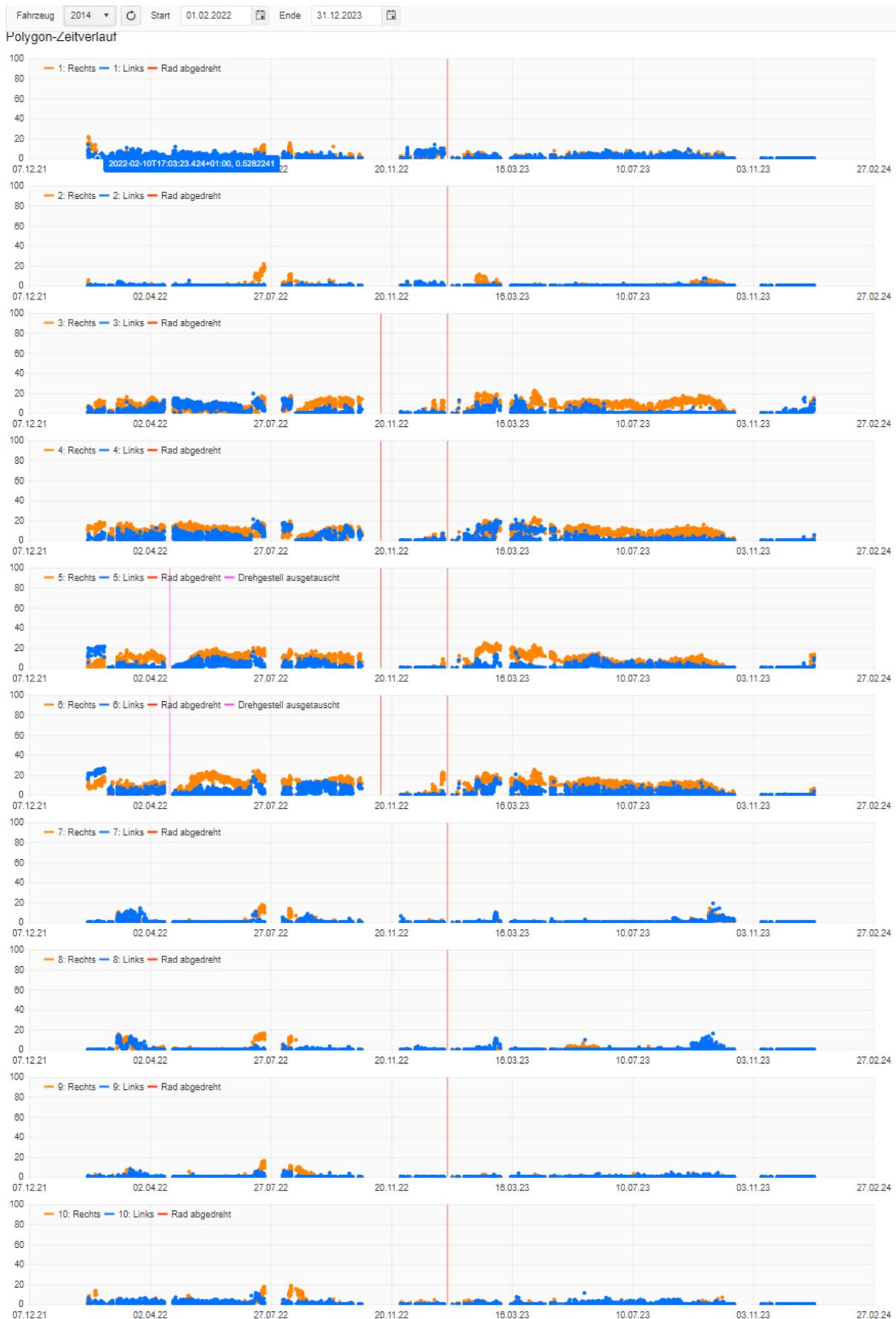
### 12.6.1 Polygone

#### 2011 - 2014 Komet3teilig

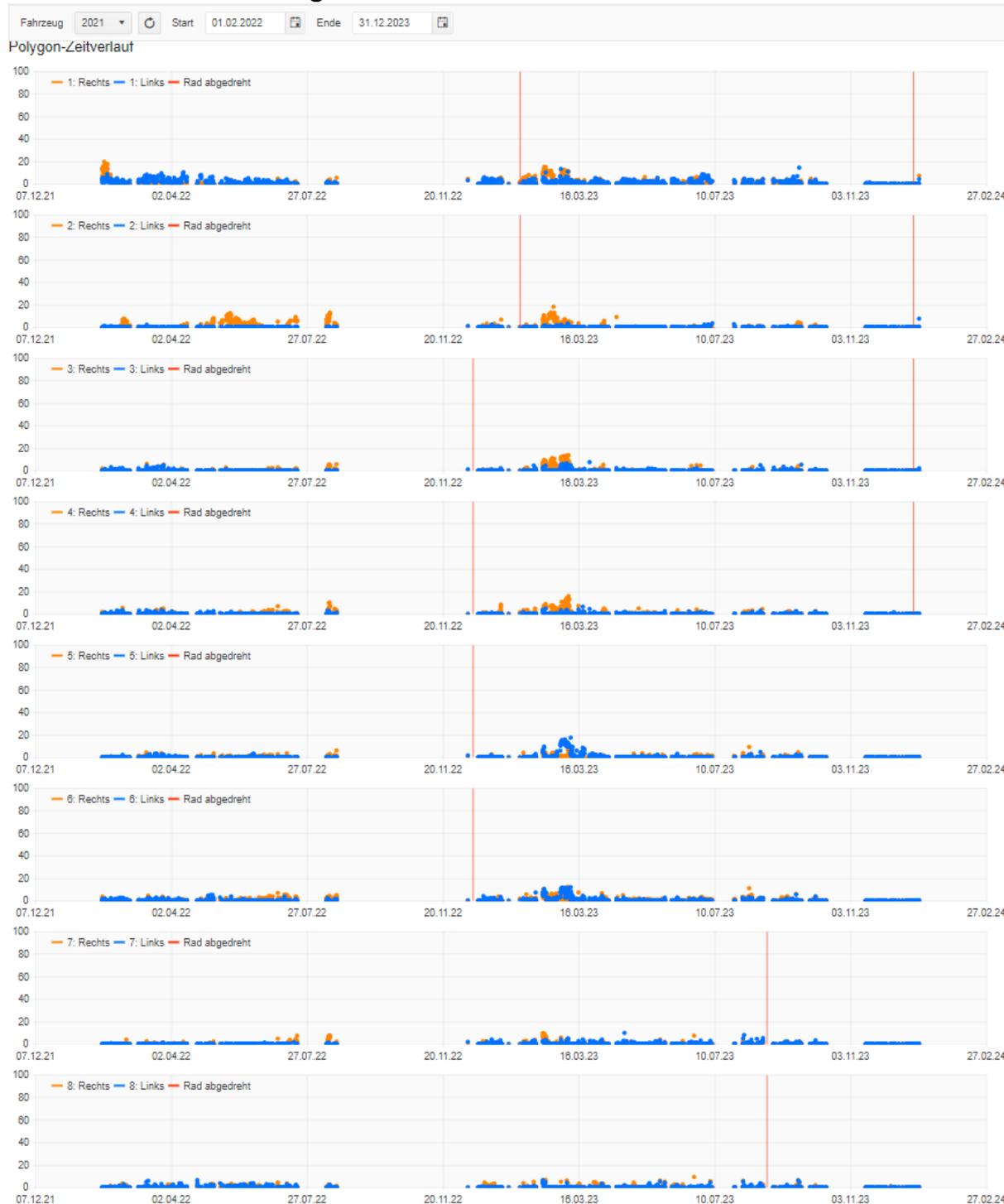


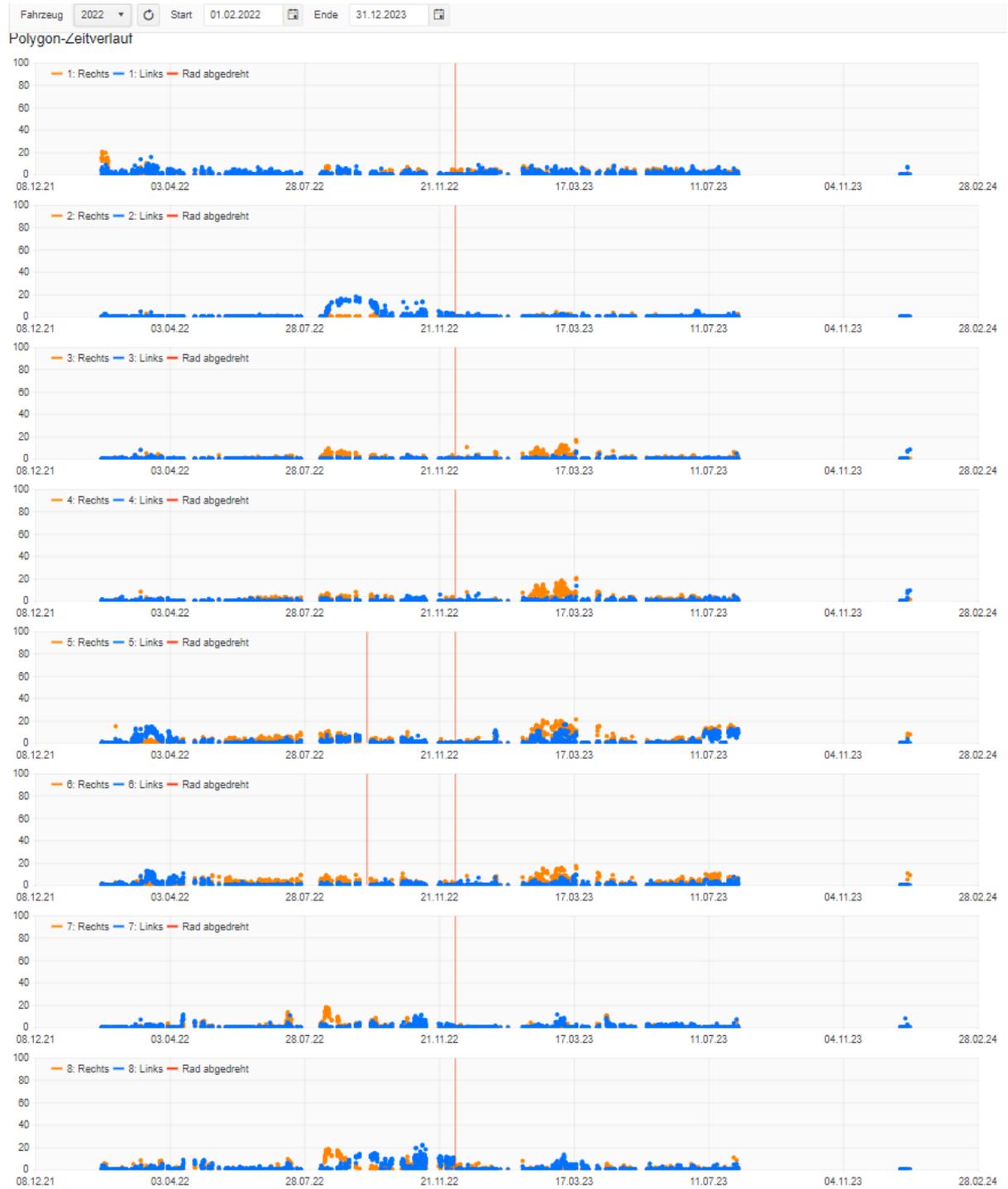


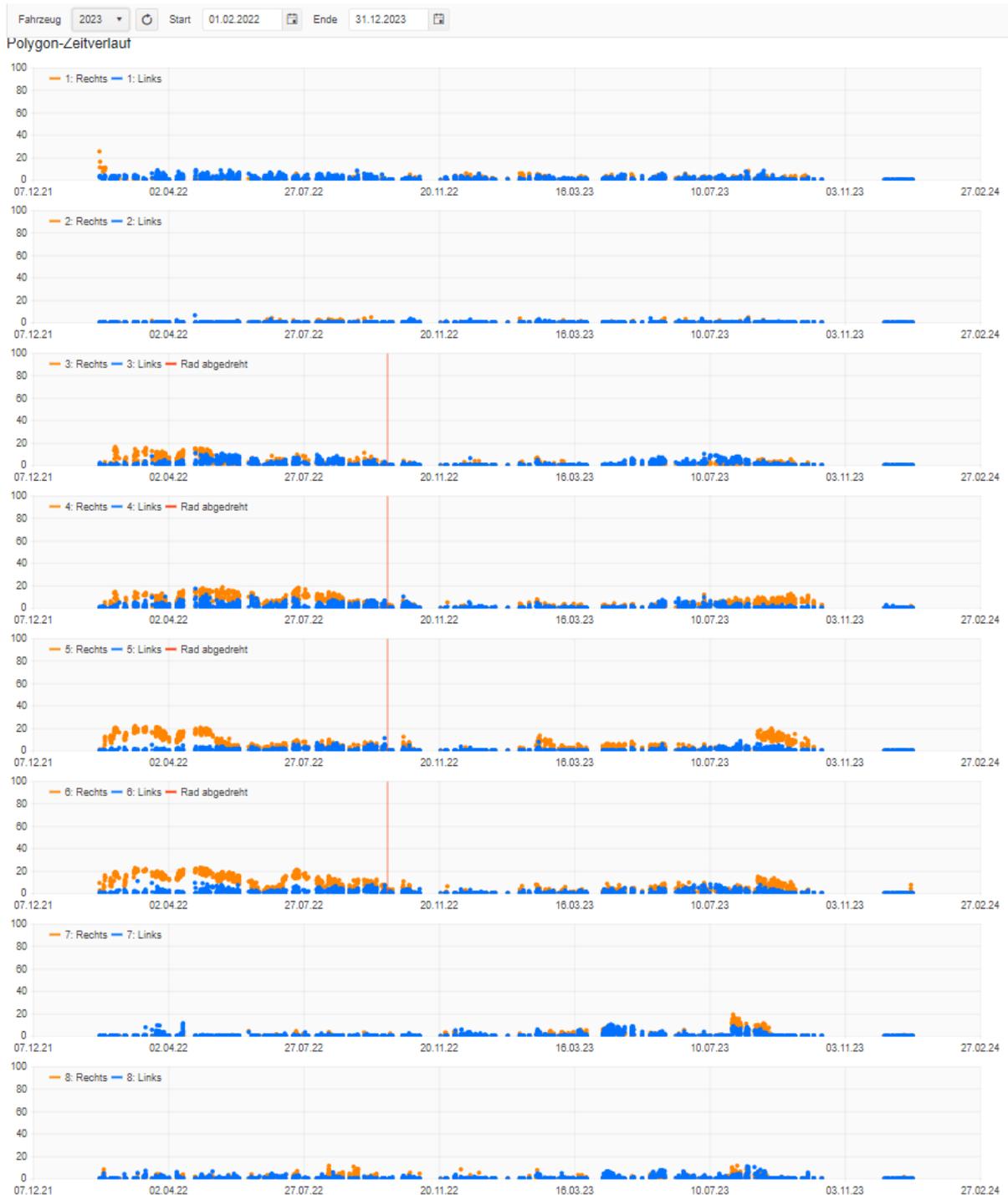


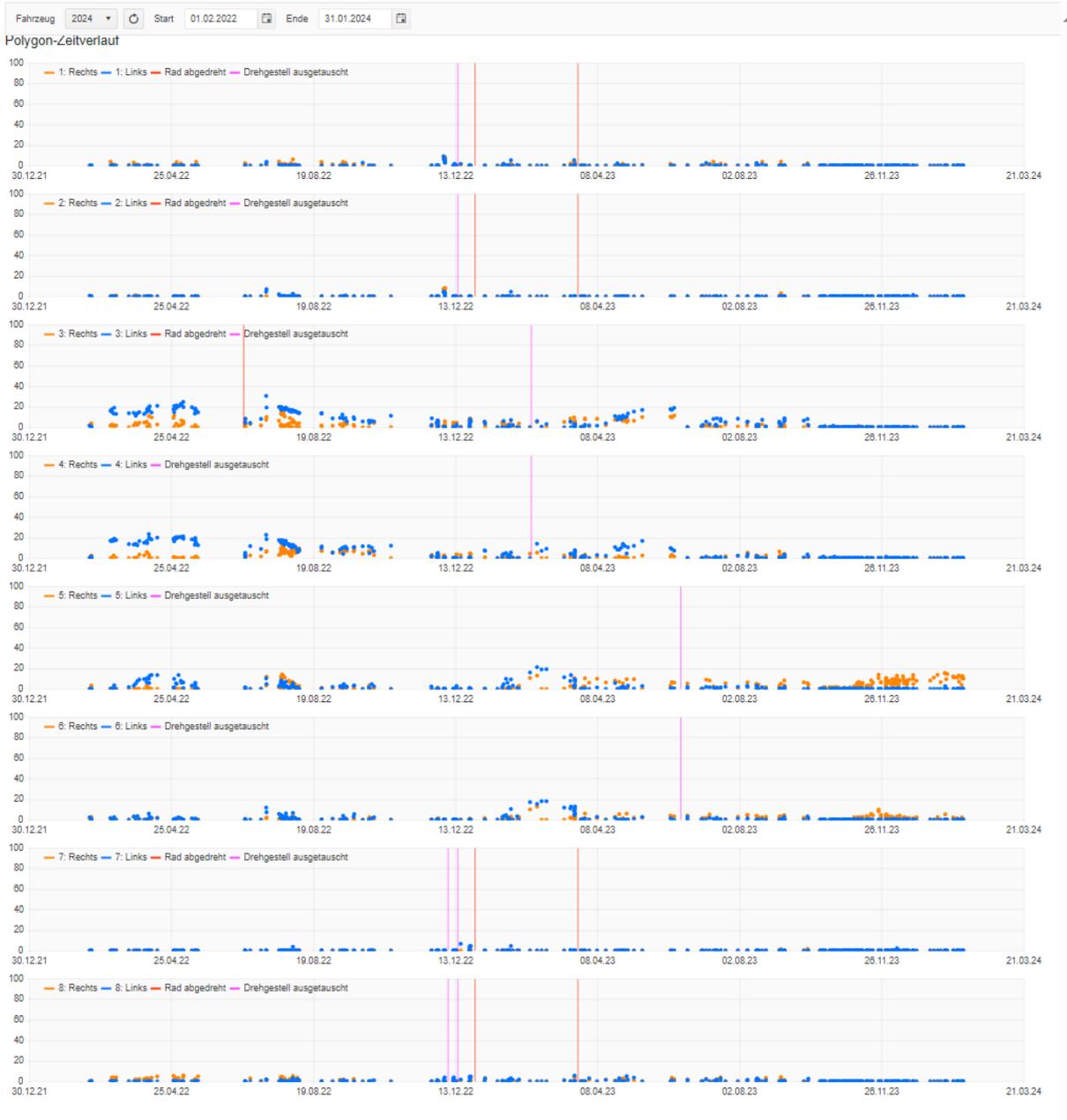


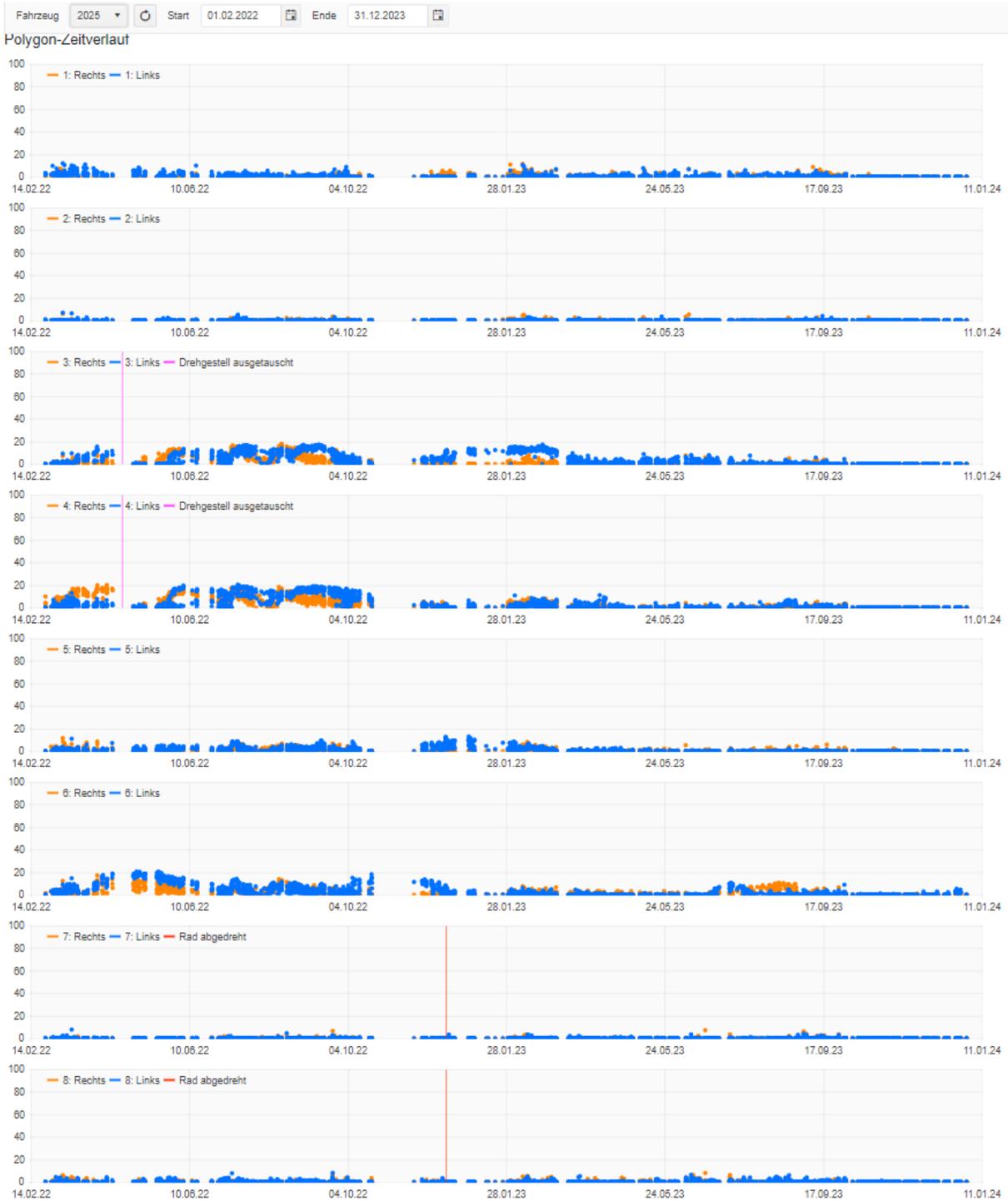
## 2021 - 2028 Komet3teilig



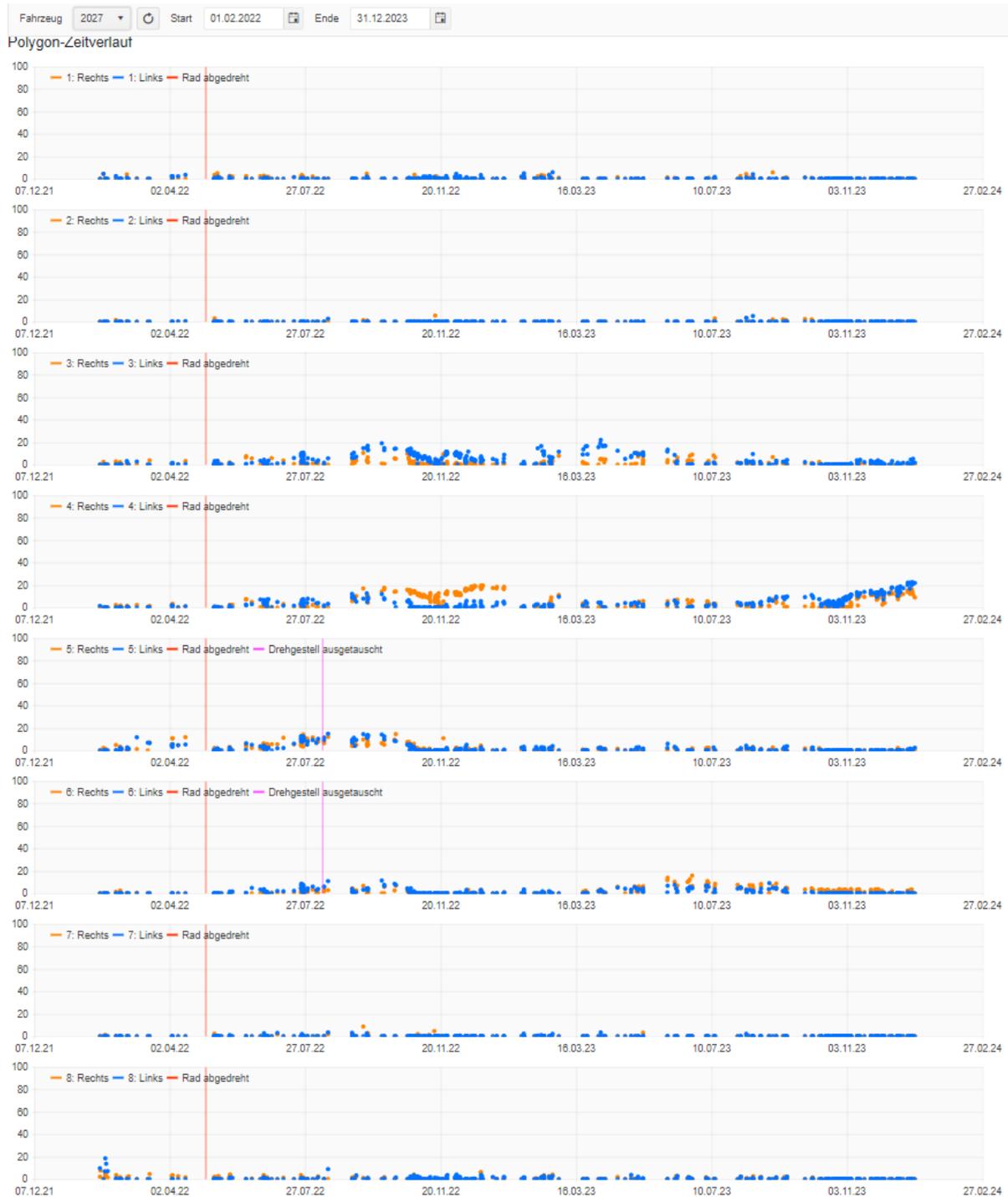










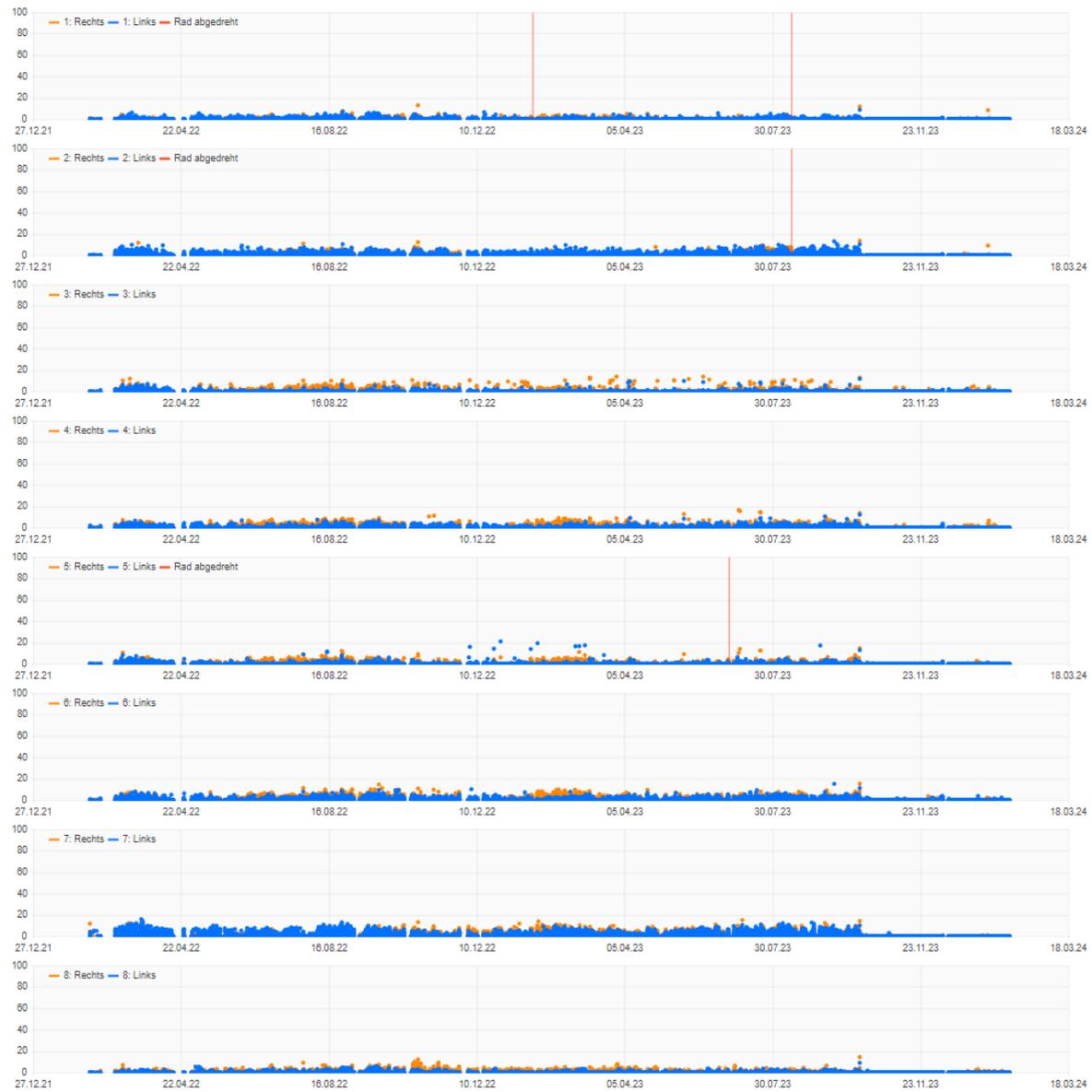


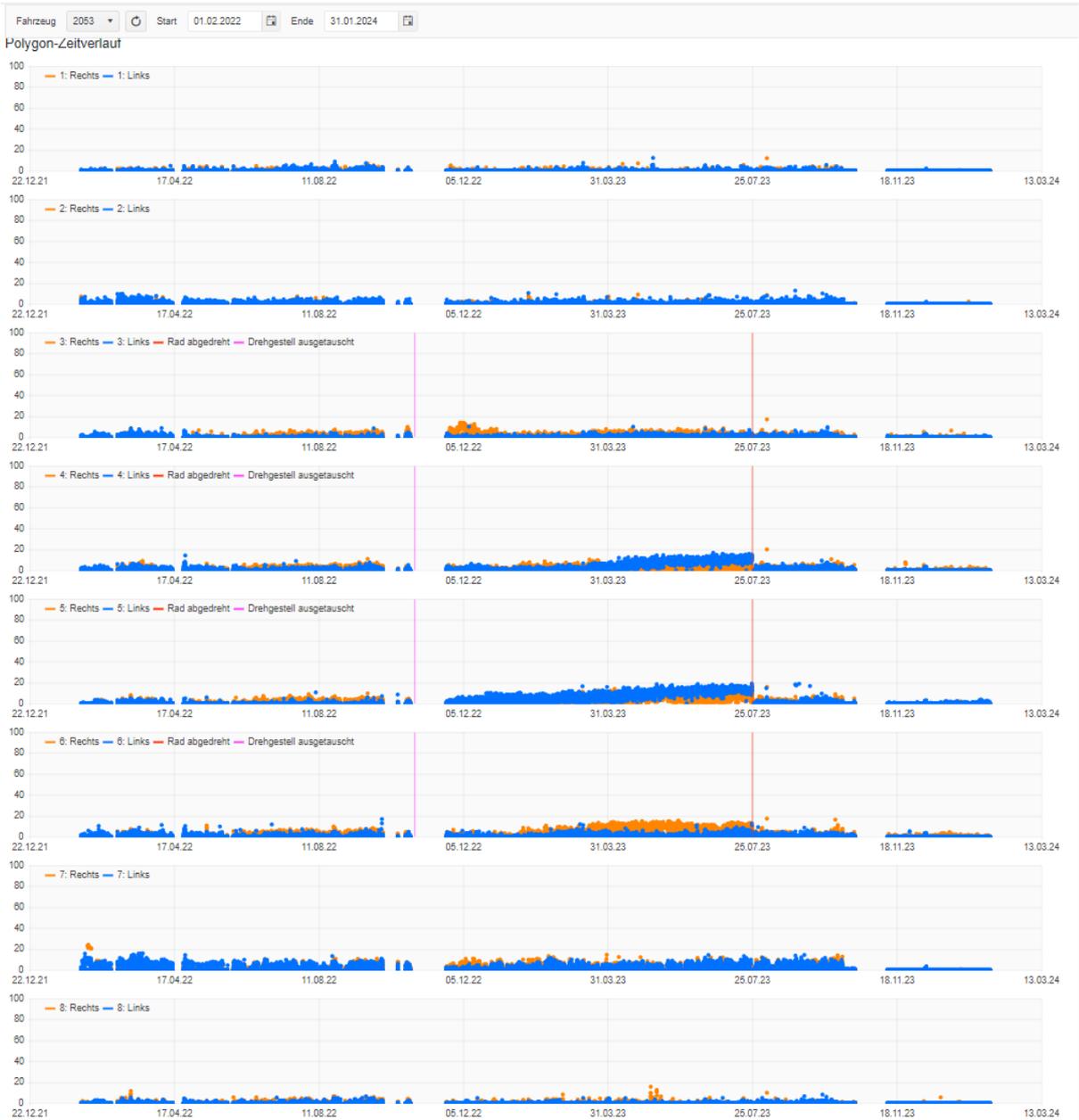


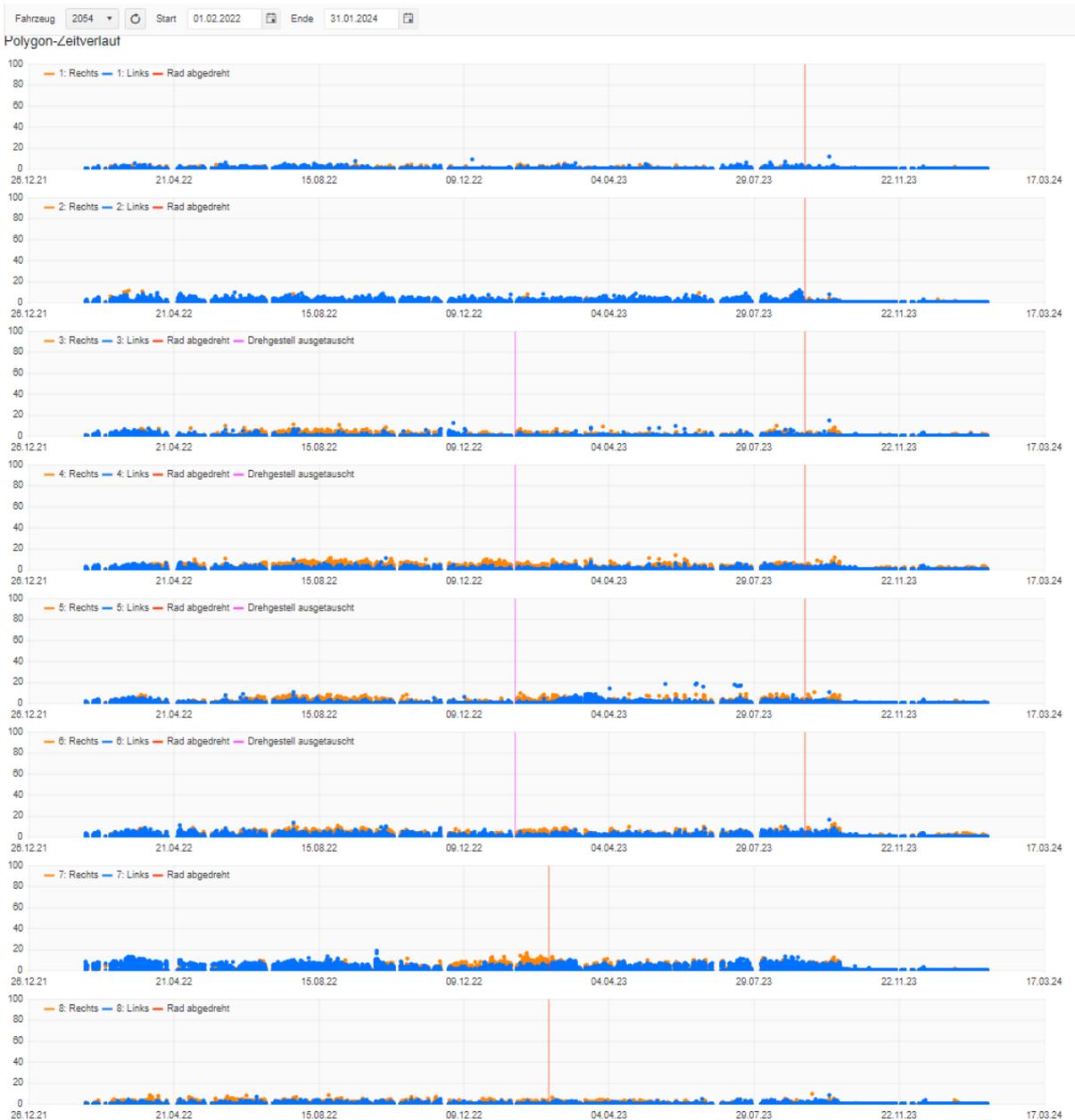
## 2051 - 2054 Shuttle



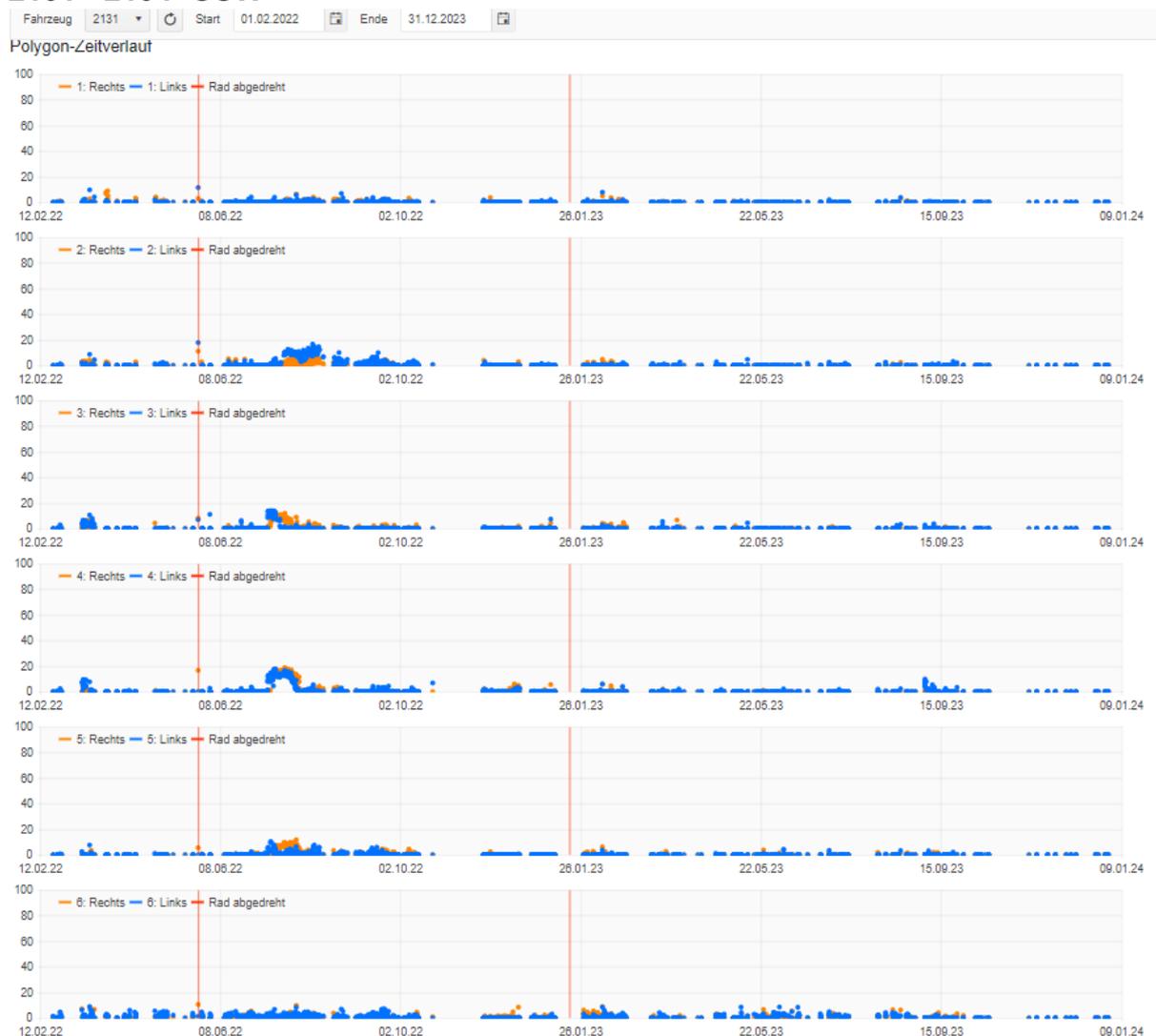
Polygon-Zeitverlauf



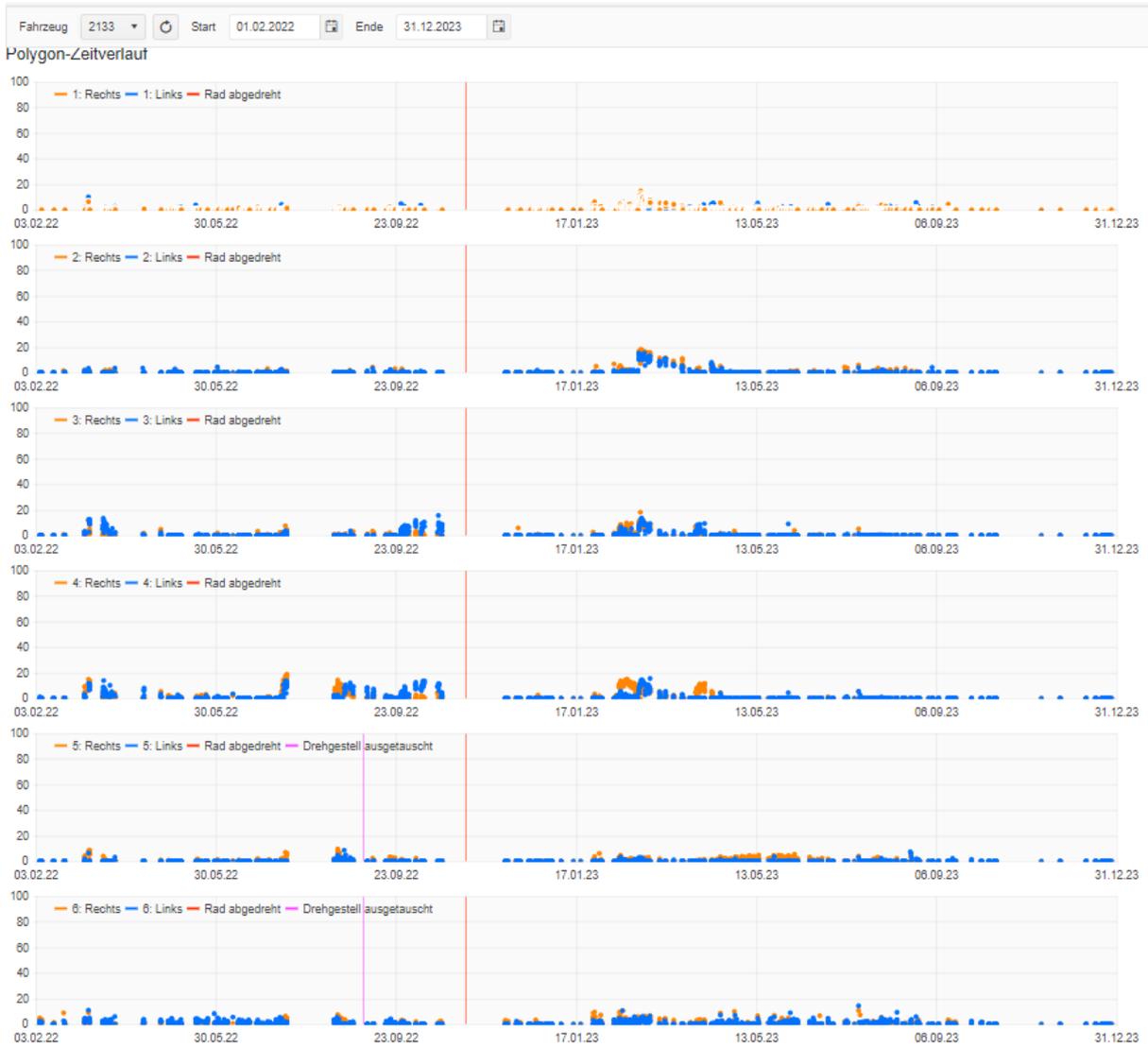




## 2131 - 2134 GSW







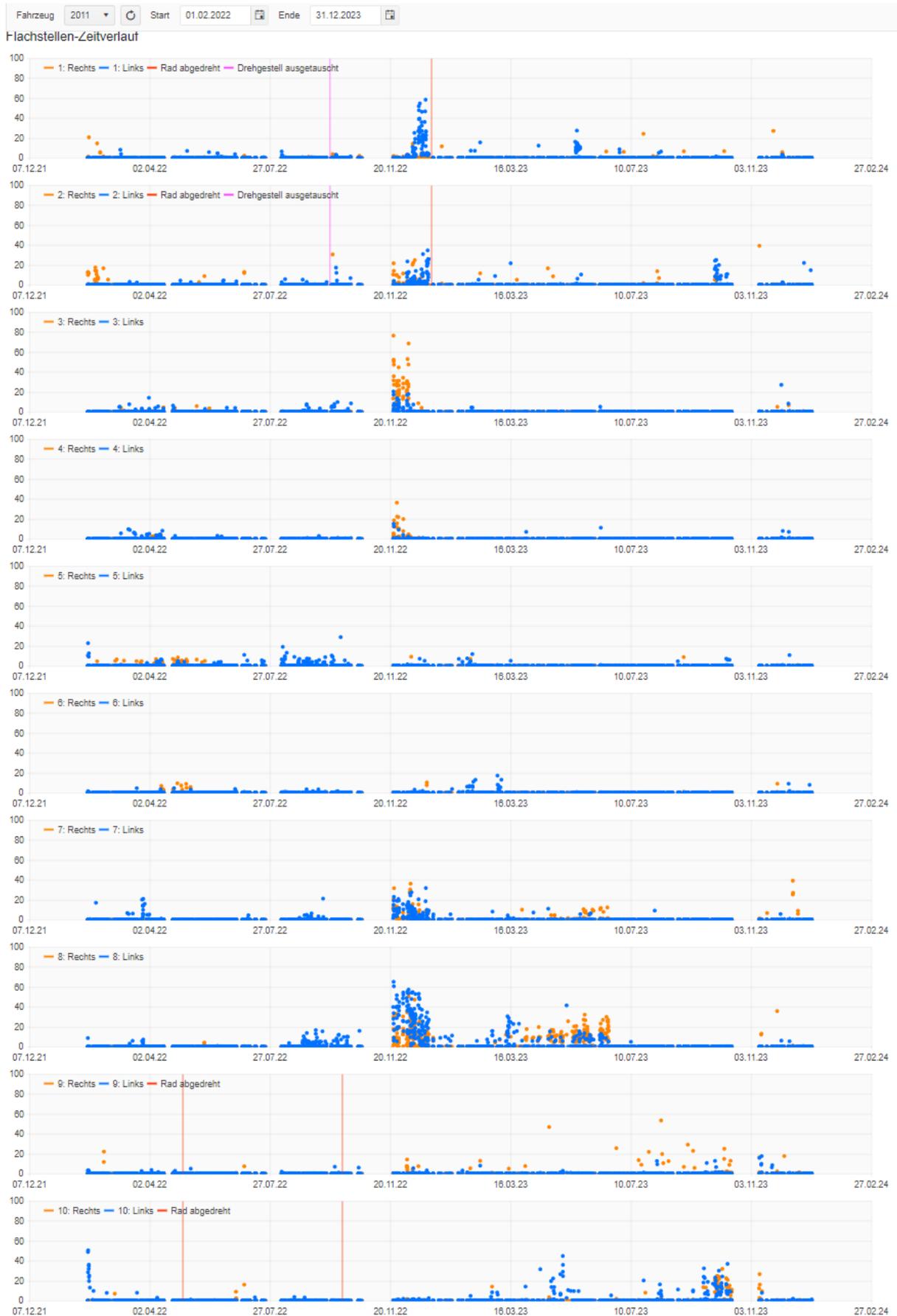
Fahrzeug 2134 Start 01.02.2022 Ende 31.12.2023

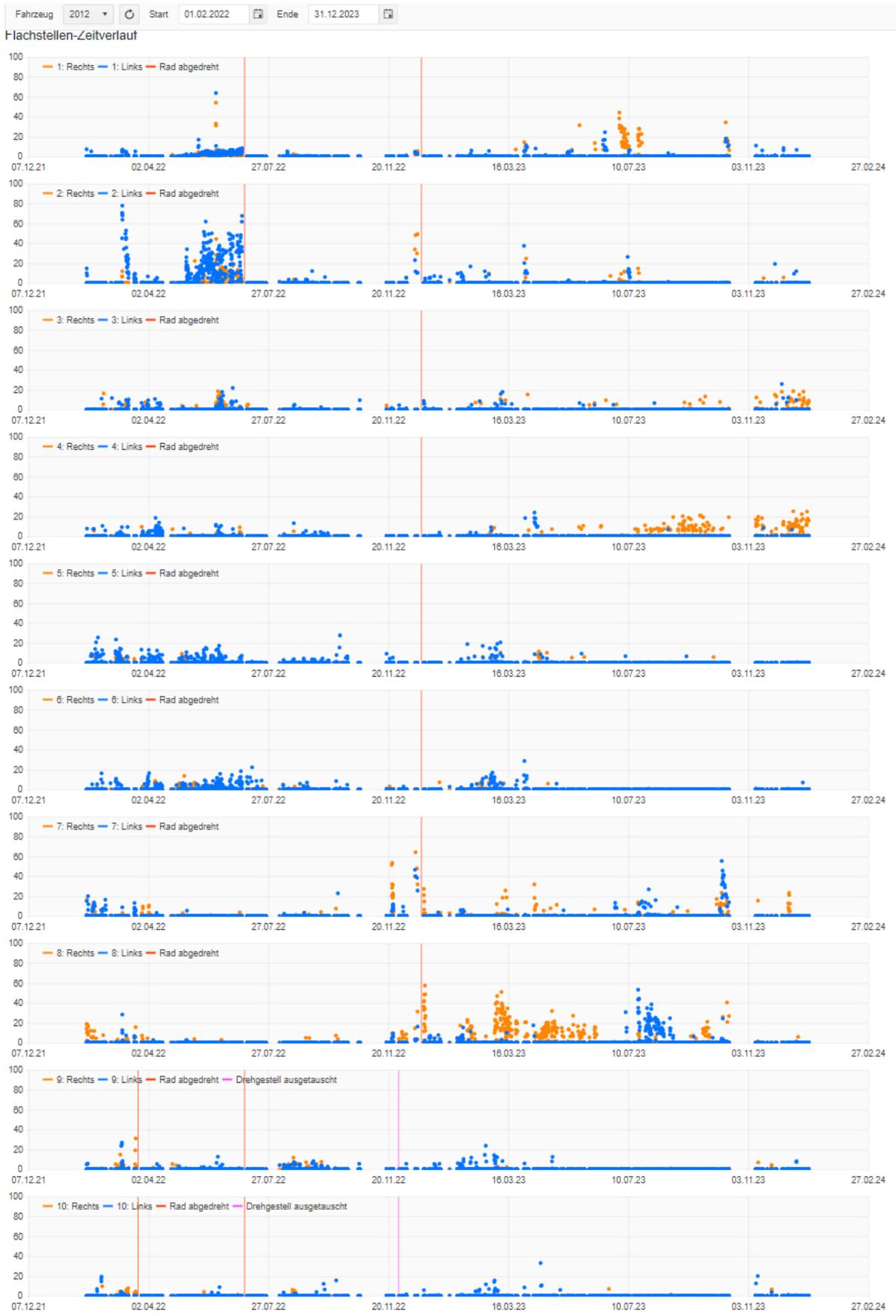
Polygon-Zeitverlauf

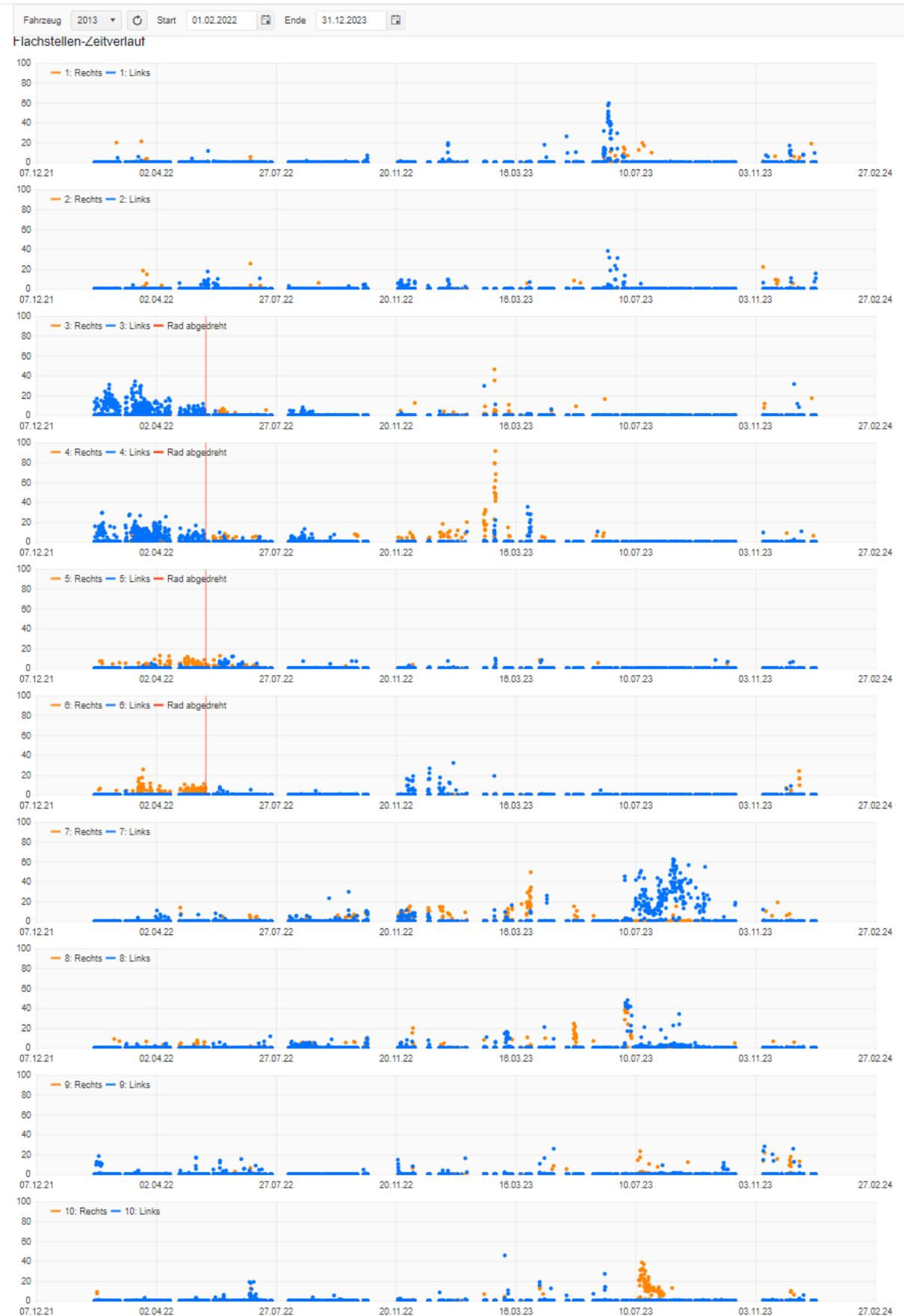


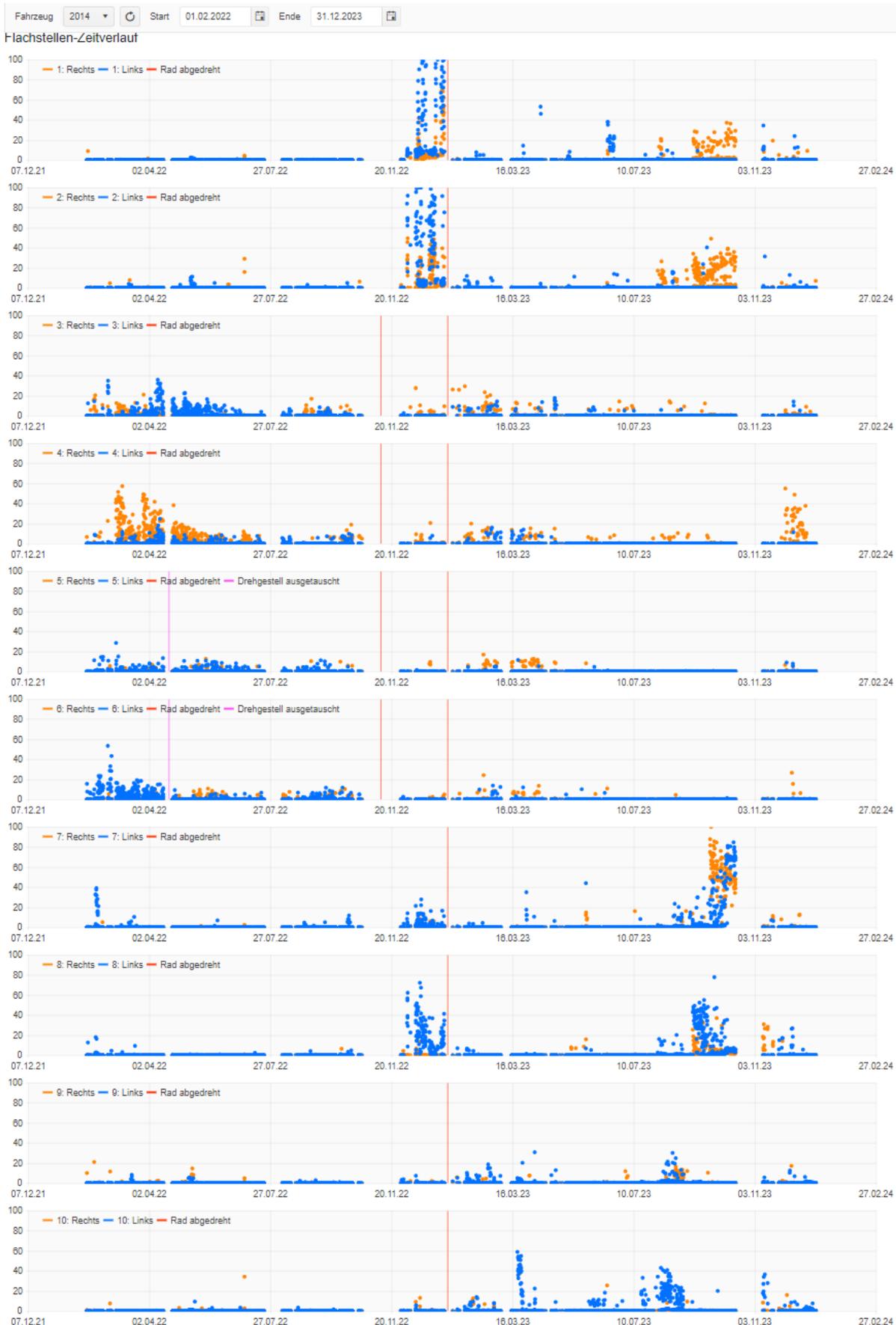
## 12.6.2 Plats aux roues

### **2011 - 2014 Komet3teilig**

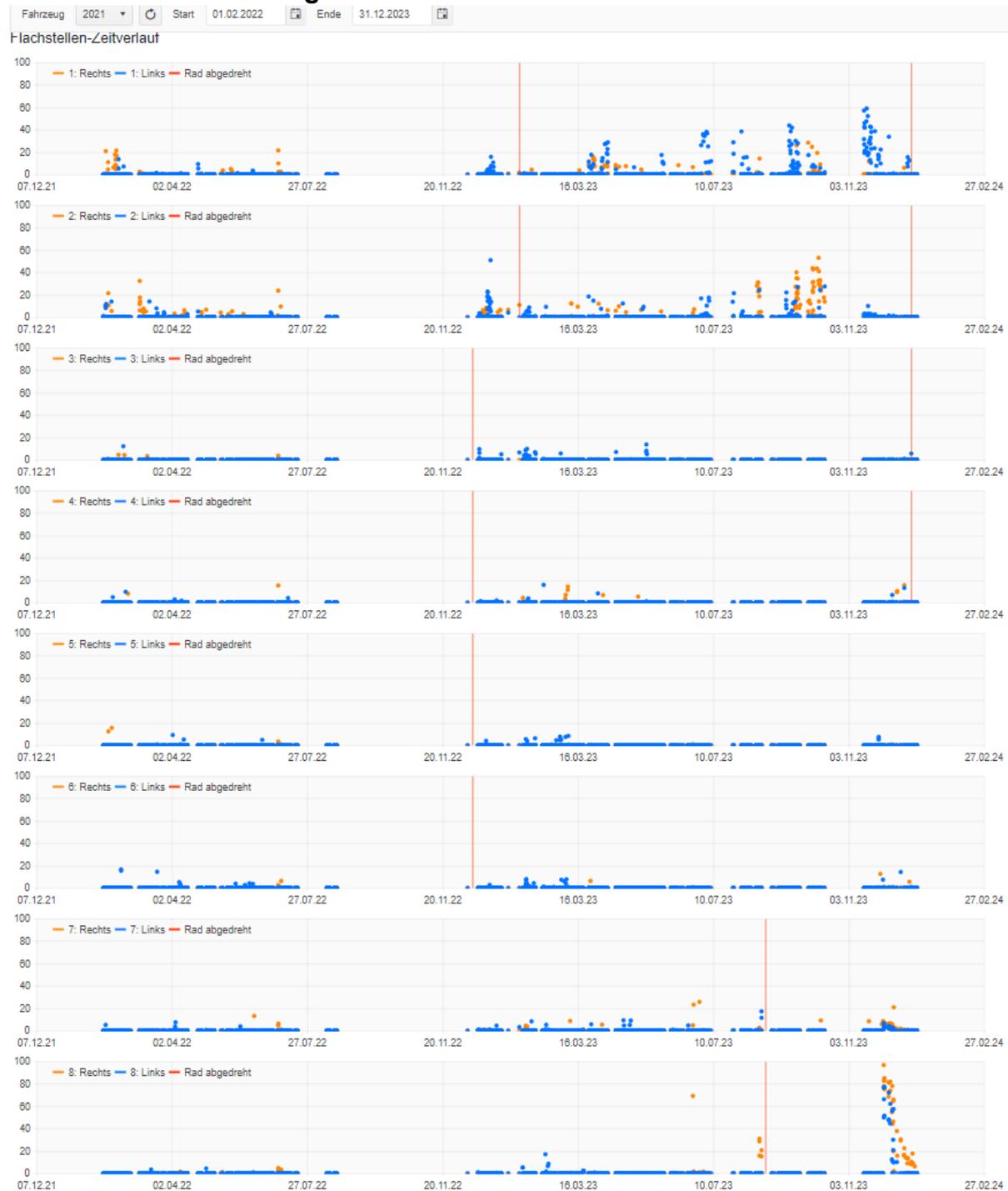


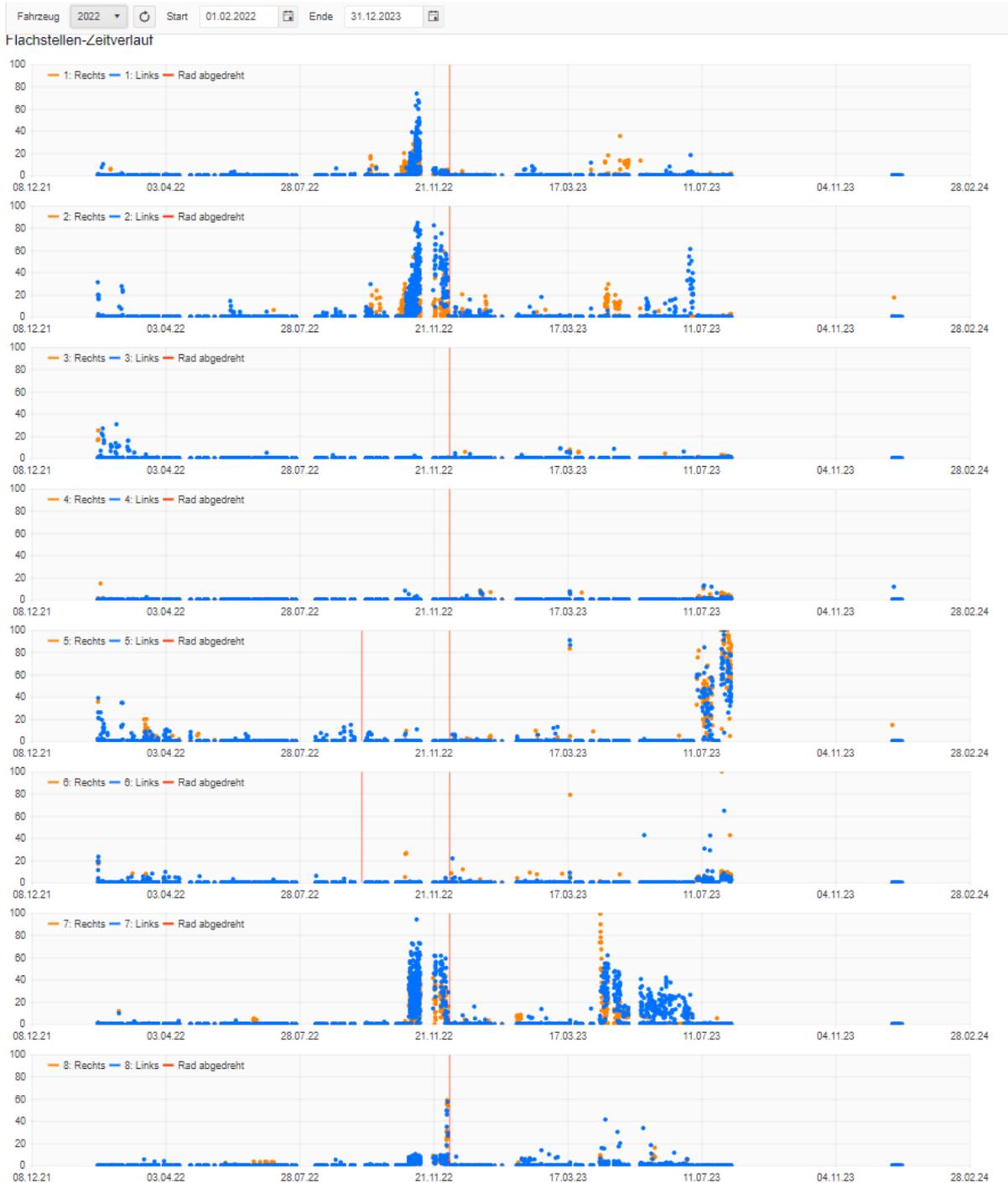






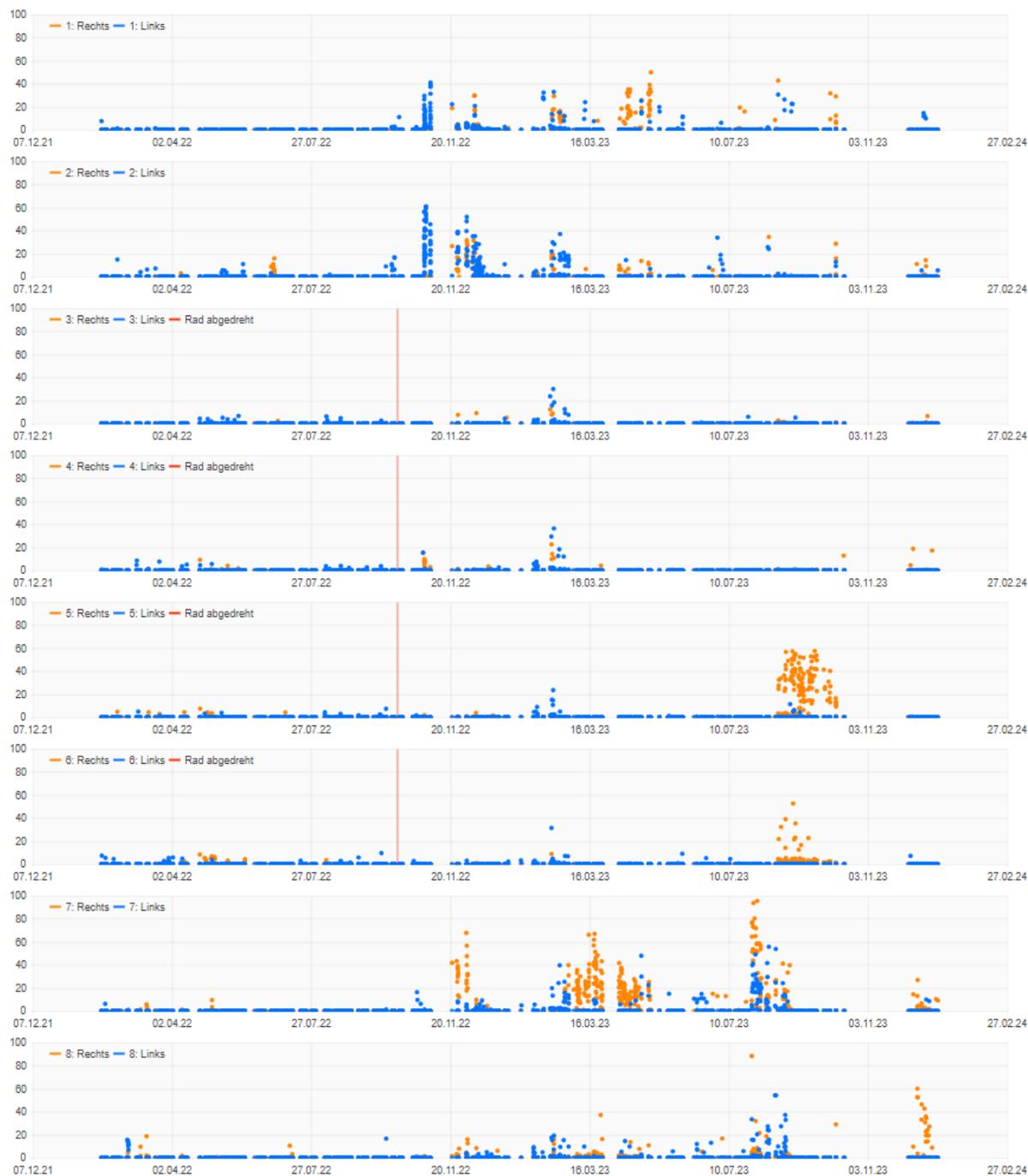
## 2021 - 2028 Komet3teilig



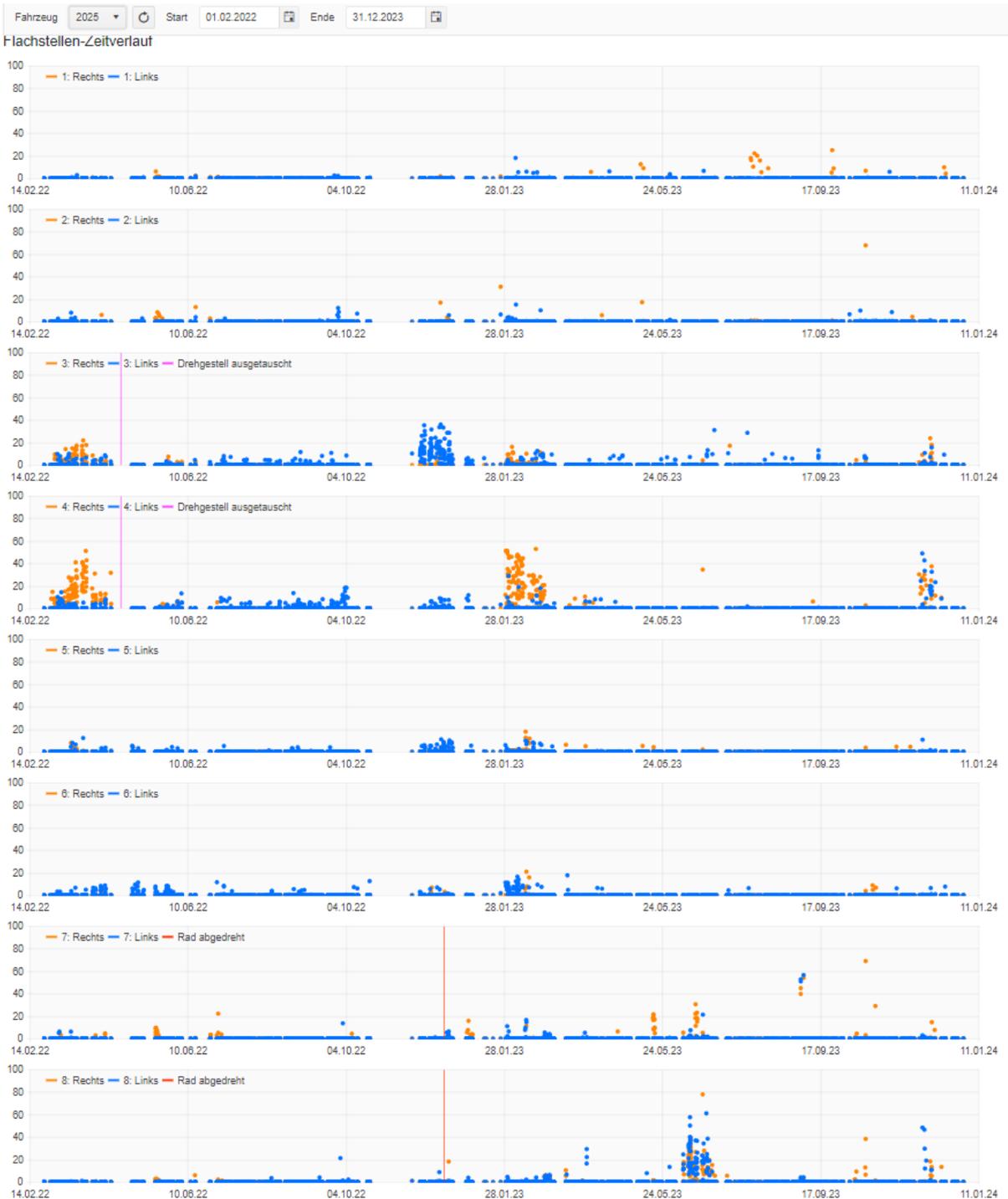


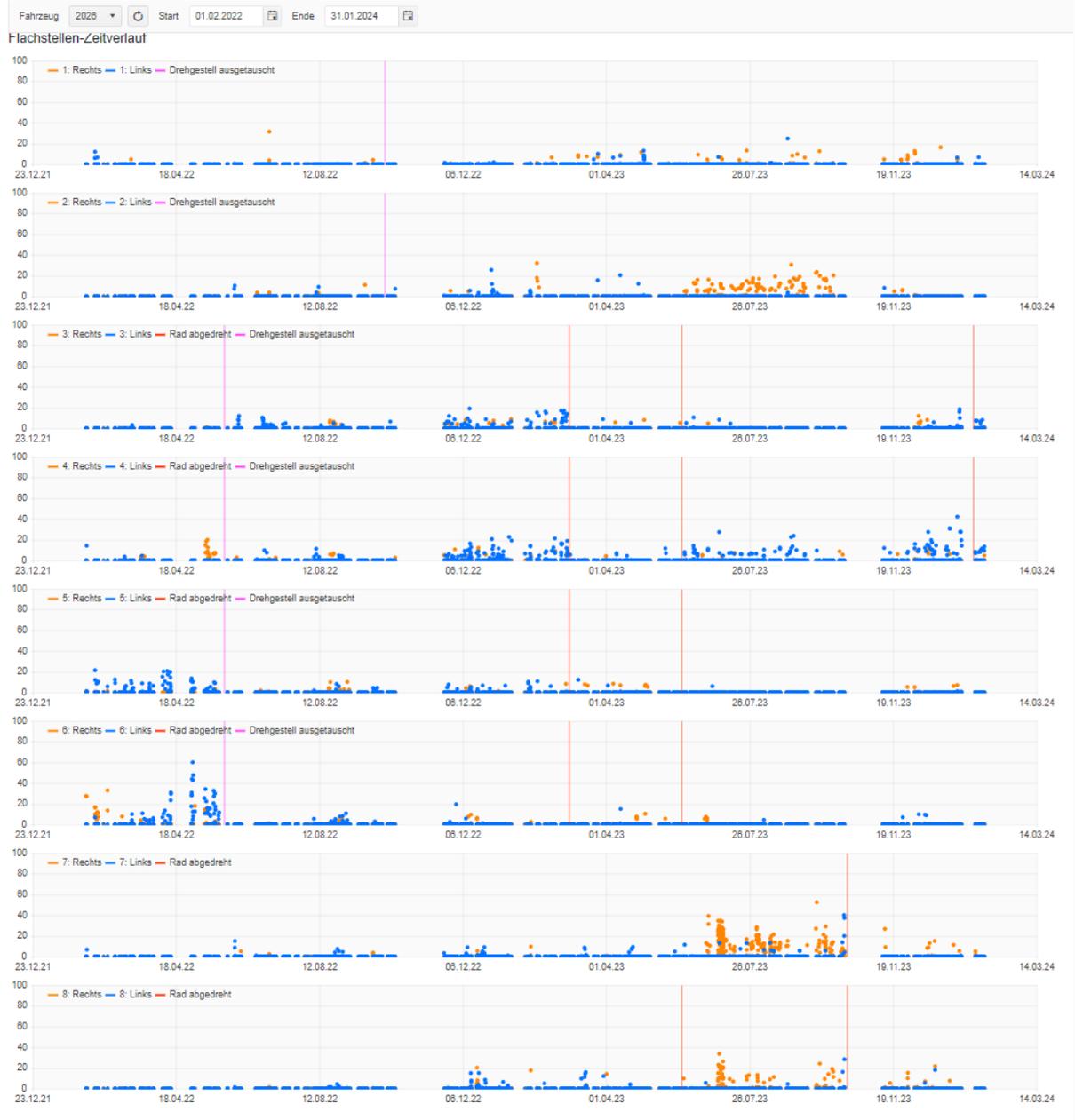
Fahrzeug 2023 Start 01.02.2022 Ende 31.12.2023

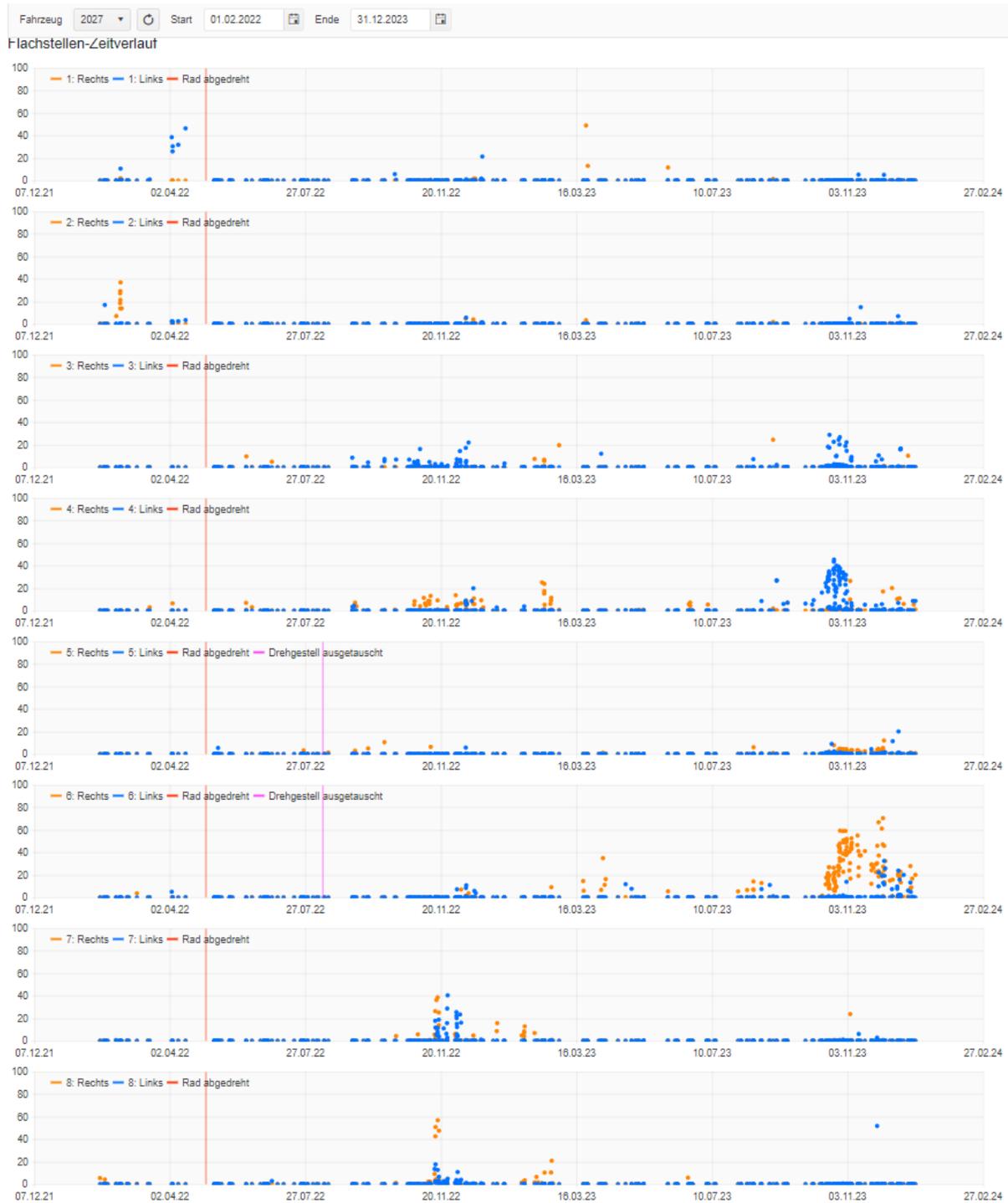
### Fachstellen-Zeitverlauf





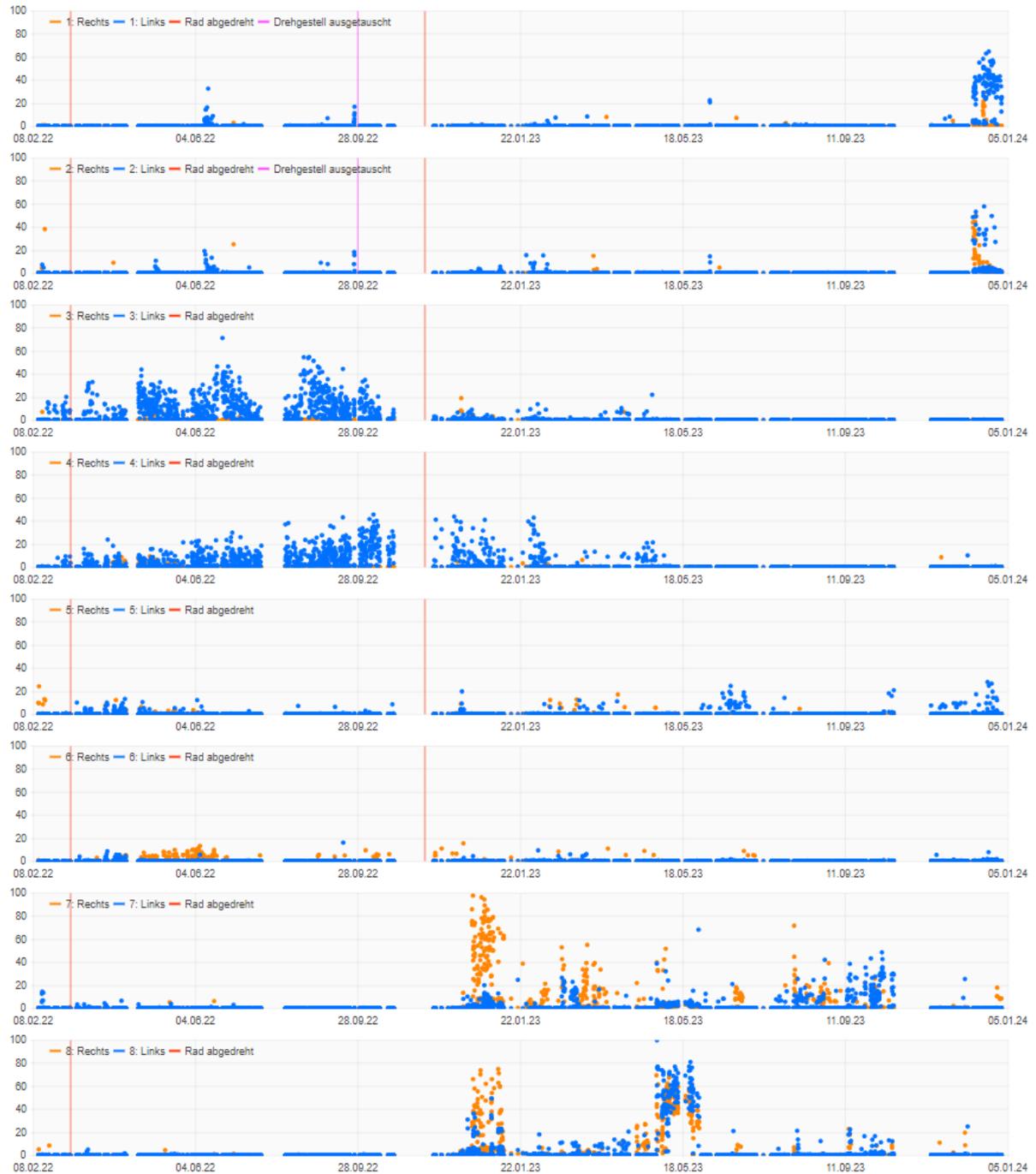




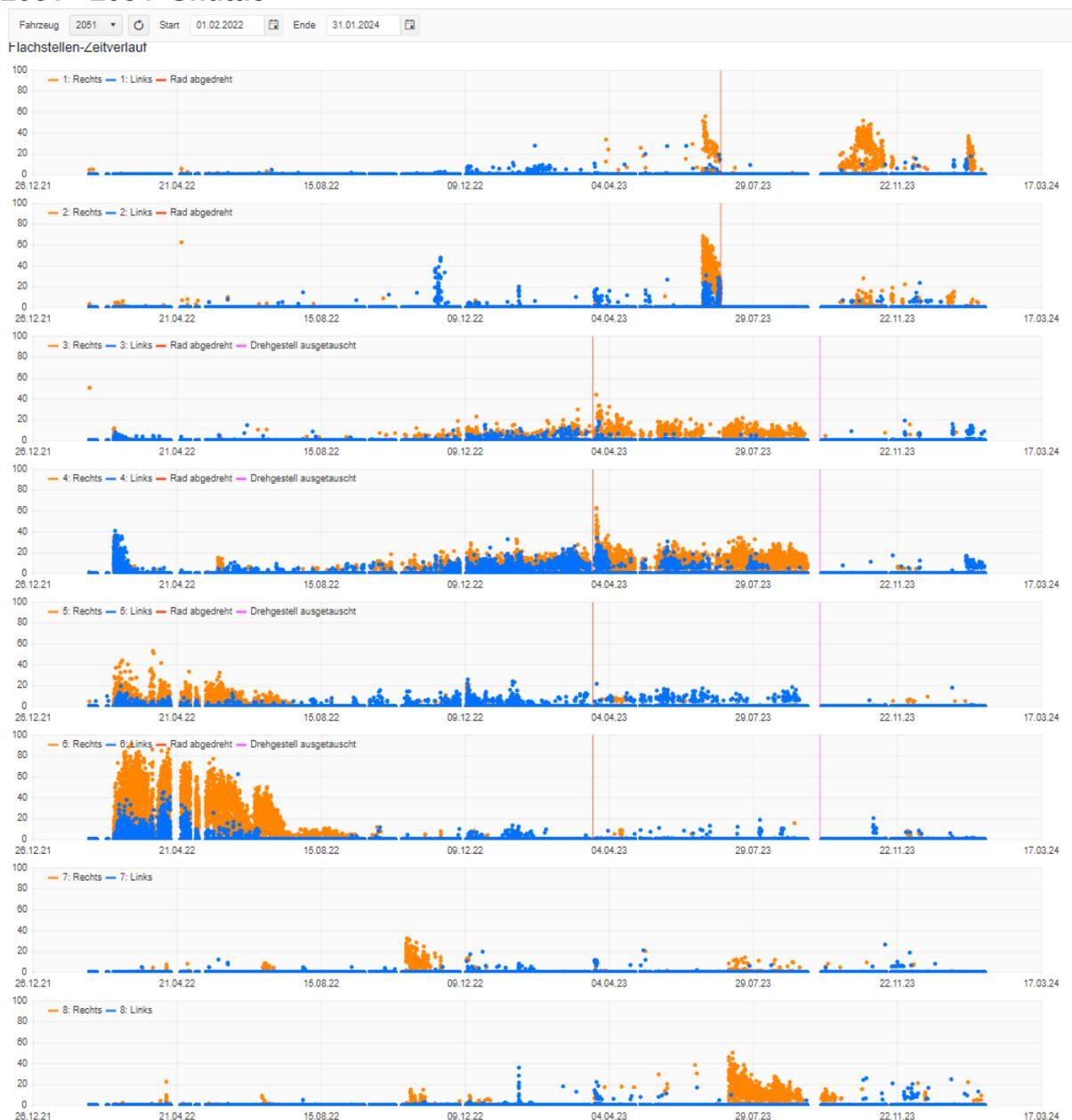


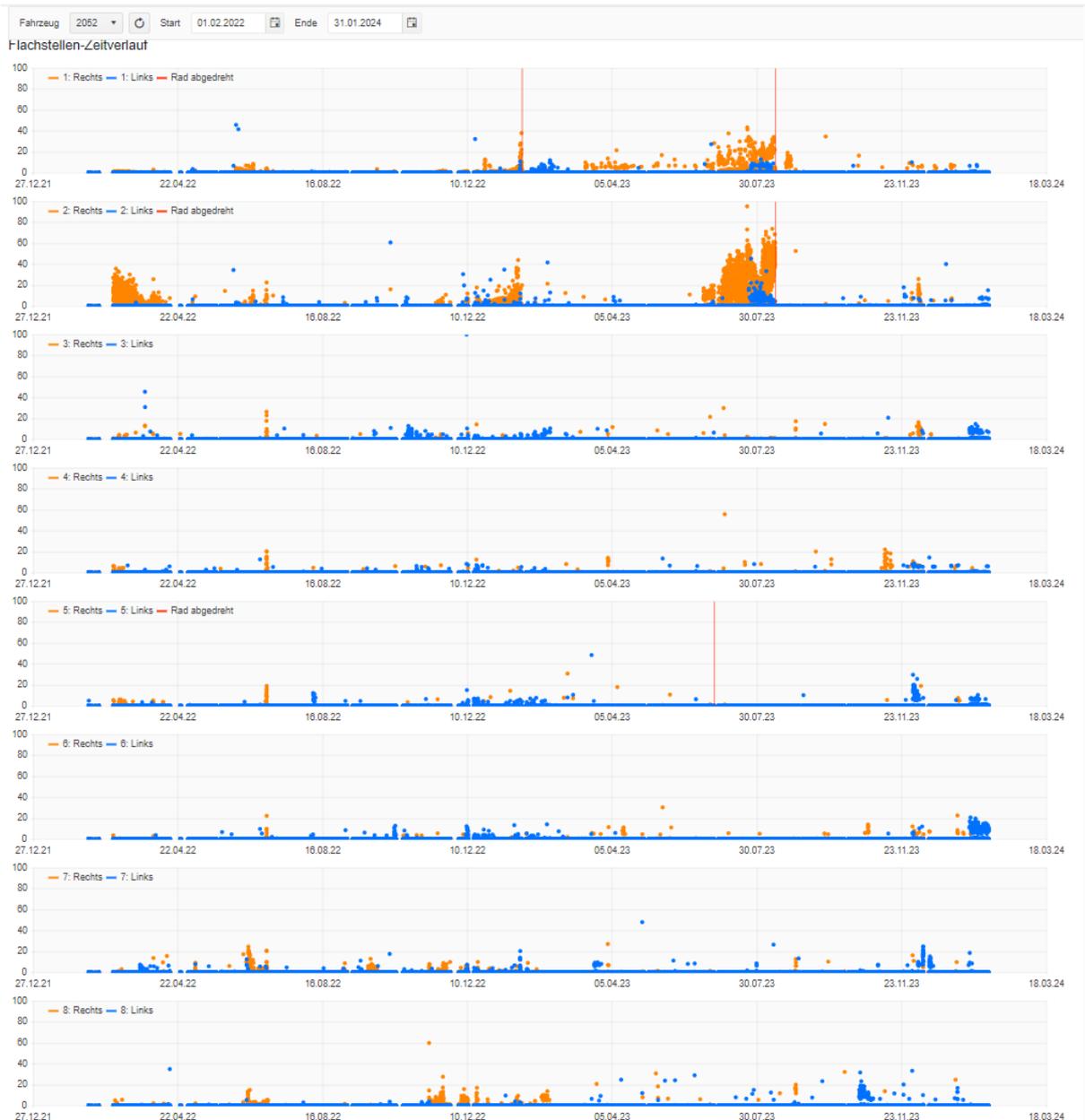
Fahrzeug 2028 Start 01.02.2022 Ende 31.12.2023

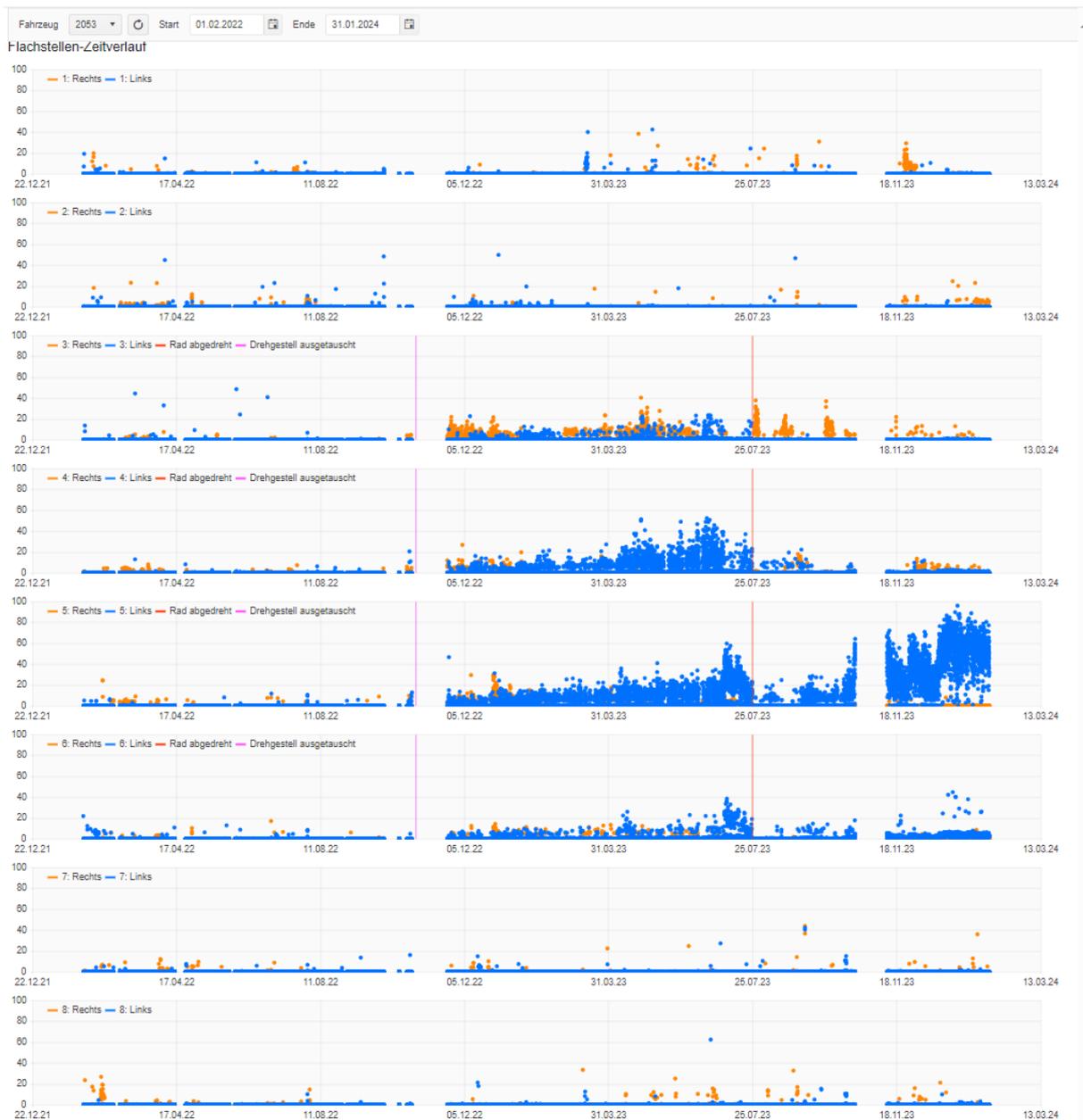
Fachstellen-Zeitverlauf

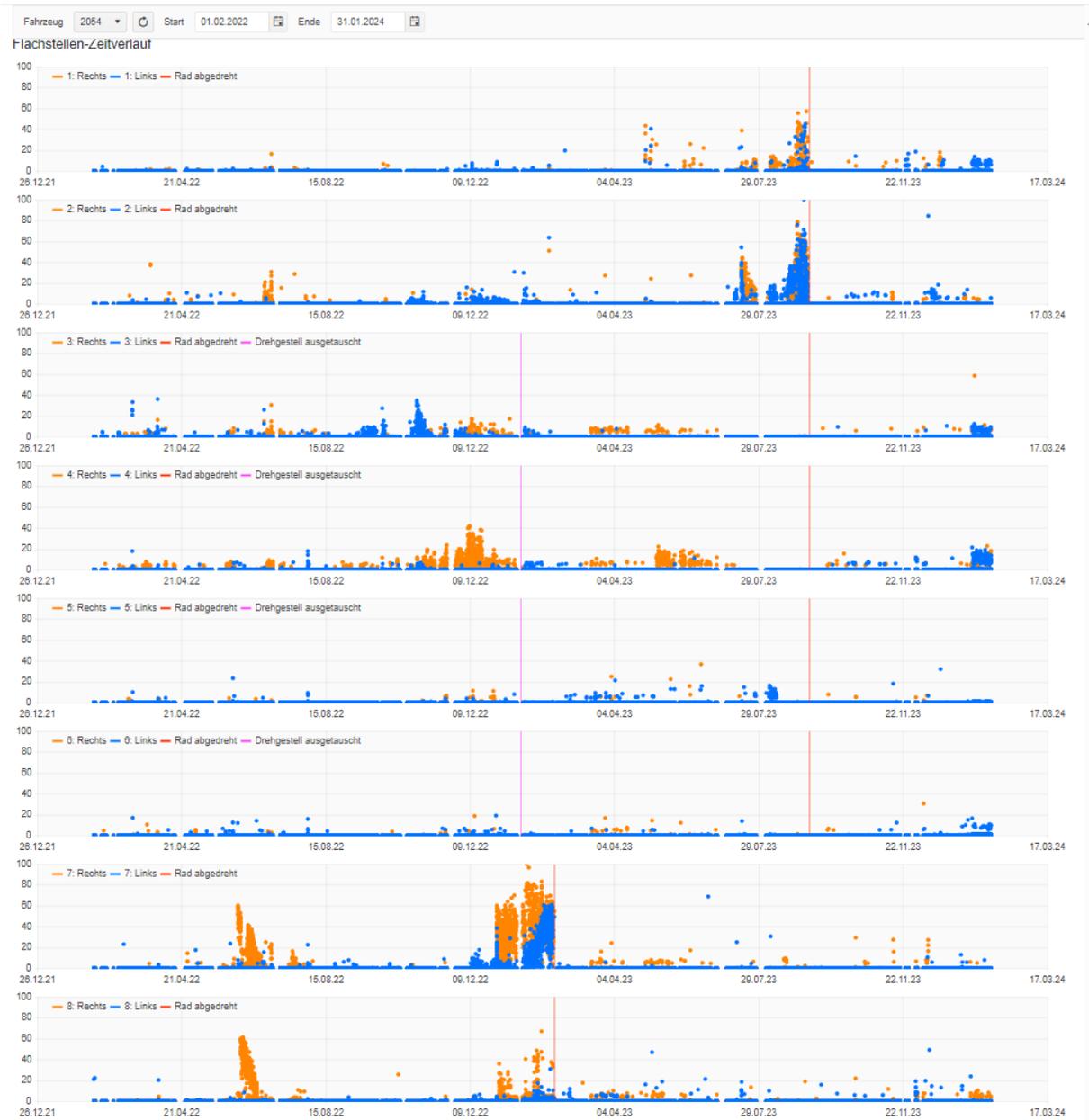


## 2051 - 2054 Shuttle





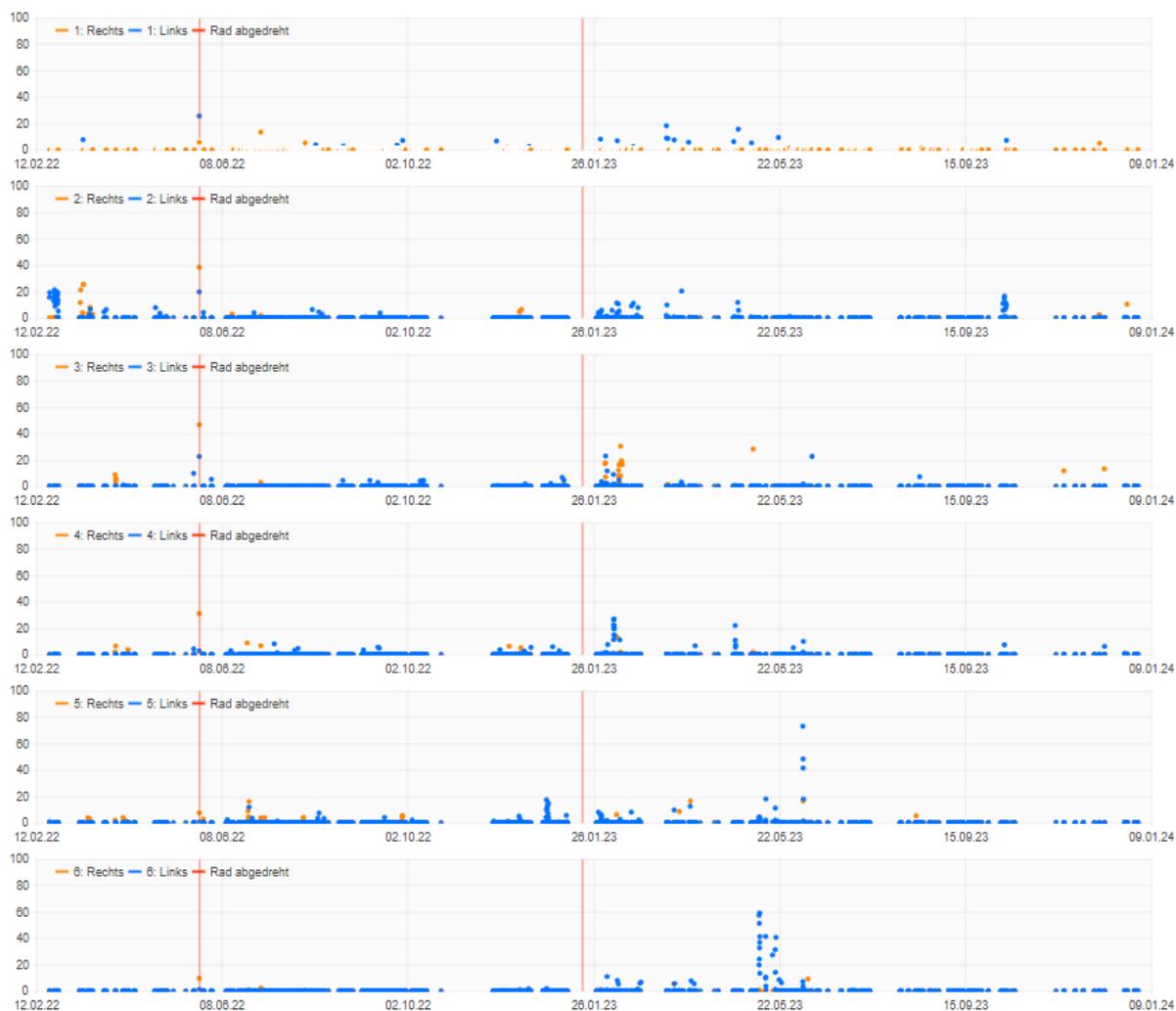




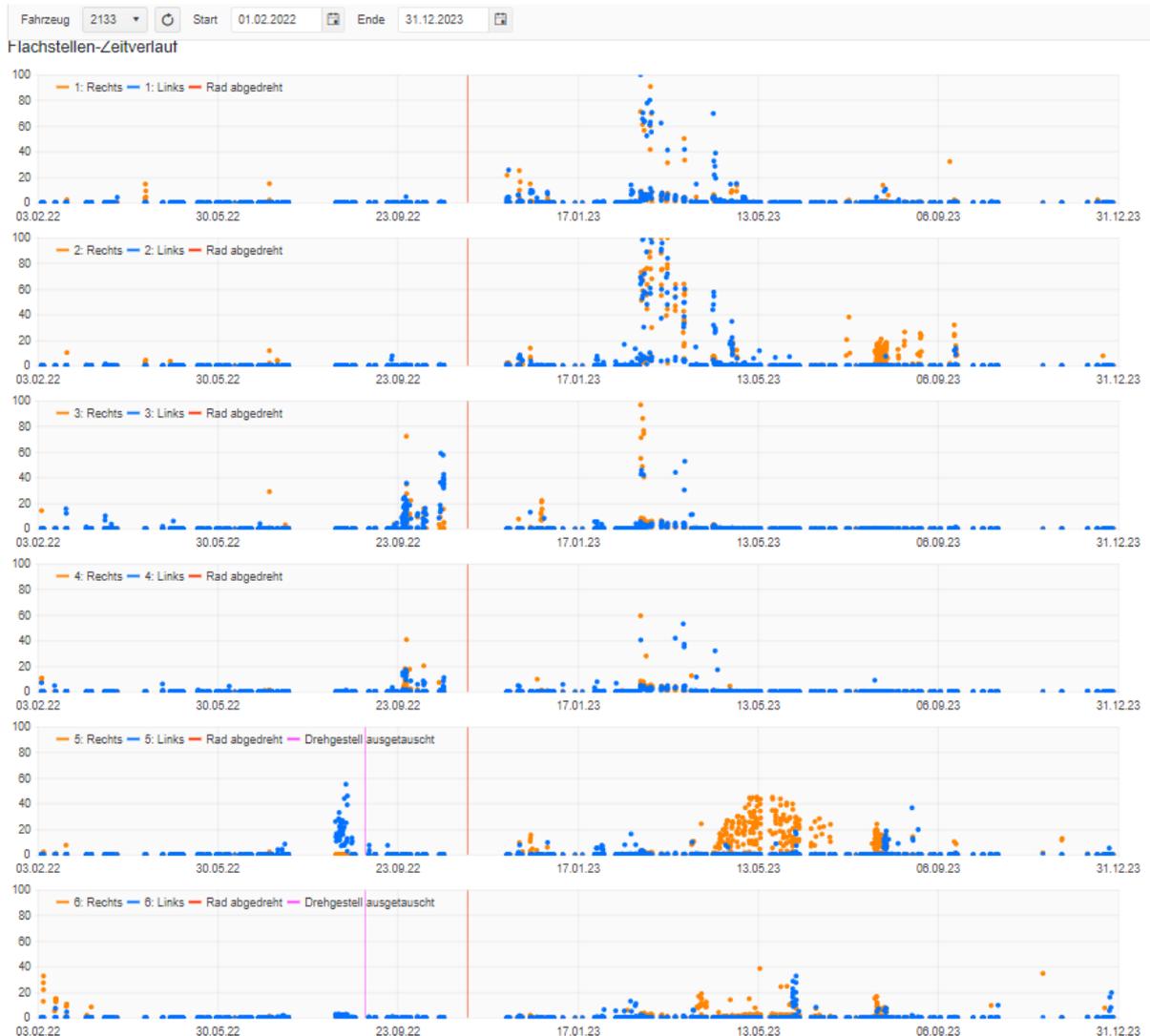
## 2131 - 2134 GSW

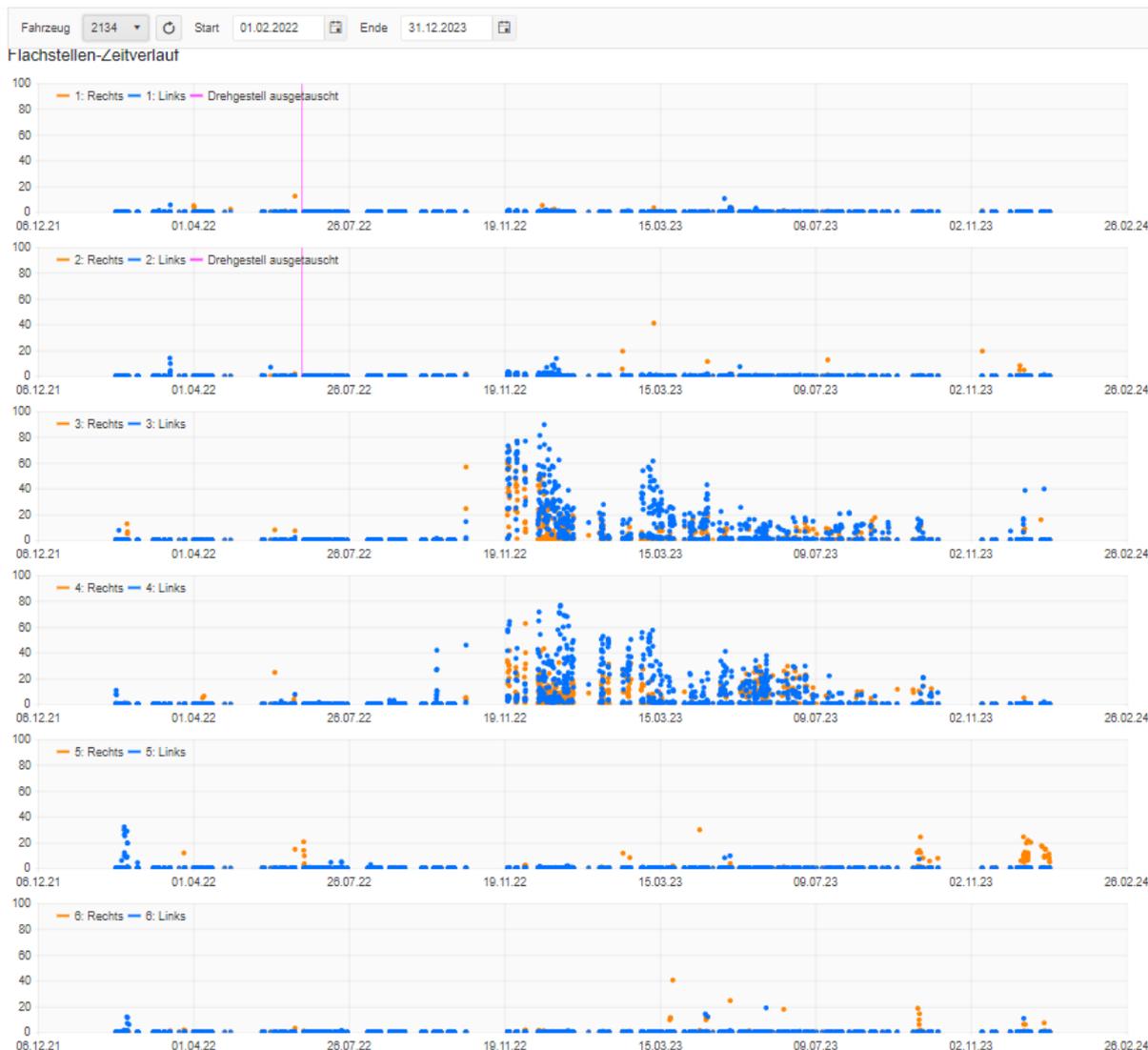
Fahrzeug 2131 Start 01.02.2022 Ende 31.12.2023

### Flachstellen-Zeitverlauf









## 12.7 Reprofilage des véhicules / Notes mesures tour en fosse

### Fz 2051:

Date	Quoi ?
22.03.23	Achse 3-6 überdreht (Ausbrüche Achse 4)
22.03.2023	1385171 4 1 671.20 671.10 16541 0.40 0.40 41353 41353 UFD
22.03.2023	1385171 3 2 671.00 671.30 16541 0.40 0.40 41353 41352 UFD
22.03.2023	1385171 6229/6229 3 777.50 778.20 775.80 775.80 16541 0.70 0.80 23630 20676 KVR 600 UFD
22.03.2023	1385171 8270/163 4 778.50 777.00 773.70 773.70 16541 0.80 1.50 20676 11027 KVR 600 UFD
22.03.2023	1385171 8292/192 5 778.90 779.10 776.00 775.80 16541 0.80 0.90 20676 18379 KVR 600 UFD
22.03.2023	1385171 6111/6111 6 779.70 779.40 775.80 775.80 16541 0.70 0.80 23630 20676 KVR 600 UFD
03.07.23	Achse 1-2 überdreht (Flachstelle Achse 1 und / oder 2)
03.07.2023	1407134 4 1 670.60 670.50 670.60 670.60 13200 0.40 0.20 33000 66000 UFD
03.07.2023	1407134 3 2 670.40 670.70 669.00 669.40 13200 1.80 1.60 7333 8250 UFD
03.07.2023	1407134 6229/6229 3 774.10 774.20 13200 0.80 0.80 16500 16500 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 8270/163 4 771.90 771.70 13200 0.80 0.90 16500 14667 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 8292/192 5 774.50 774.10 13200 0.70 0.80 18857 16500 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 6111/6111 6 774.50 774.10 13200 0.50 0.70 26400 18857 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 49 7 663.40 662.60 13200 0.20 1.20 66000 11000 UFD
03.07.2023	1407134 51 8 663.30 663.60 13200 0.30 -0.70 44000 -18857 UFD
21.09.23	Achse 3-6 neue DGs
11.09.2023	1423124 4 1 669.90 670.10
11.09.2023	1423124 3 2 668.10 668.60
21.09.2023	1423194 6214/6214 3 796.00 796.00
21.09.2023	1423194 6212/6212 4 796.00 796.00
21.09.2023	1423194 6228/6228 5 796.00 796.00
21.09.2023	1423194 6218/6218 6 796.00 796.00
11.09.2023	1423124 49 7 663.00 662.10
11.09.2023	1423124 51 8 662.50 663.20

### Fz 2052:

Date	Quoi ?
23.01.23	Achse 1 überdreht (kein Grund)
23.01.2023	1 679.60 679.60 677.90 677.80 8516 2.10 2.10 4055 4055 UFD
23.01.2023	2 680.50 680.50 680.50 680.50 8516 0.30 0.20 28387 42580 UFD
23.01.2023	3 788.40 789.30 8516 0.50 -0.40 17032 -21290 B7T UFD
23.01.2023	4 789.20 788.10 8516 0.30 1.00 28387 8516 B7T UFD
23.01.2023	5 788.70 789.00 8516 0.40 0.30 21290 28387 B7T UFD
23.01.2023	6 788.30 787.60 8516 0.60 0.60 14193 14193 B7T UFD
23.01.2023	7 680.10 680.00 8516 0.20 0.20 42580 42580 UFD
23.01.2023	8 680.00 680.20 8516 0.20 0.20 42580 42580 UFD
26.06.23	Achse 5 überdreht (Flachstelle)
26.06.2023	1 676.60 676.50 12592 0.30 0.30 41973 41973 UFD
26.06.2023	2 680.00 679.70 12592 0.20 0.30 62960 41973 UFD
26.06.2023	3 786.70 788.00 12592 0.70 0.50 17989 25184 B7T UFD
26.06.2023	4 788.00 786.30 12592 0.60 1.20 20987 10493 B7T UFD
26.06.2023	5 787.20 787.50 786.90 787.00 12592 0.60 0.60 20987 20987 B7T UFD
26.06.2023	6 786.50 785.80 786.50 785.80 12592 0.70 0.70 17989 17989 B7T UFD
26.06.2023	7 679.50 679.30 12592 0.20 0.40 62960 31480 UFD
26.06.2023	8 679.40 679.50 12592 0.20 0.30 62960 41973 UFD
14.08.23	Achse 1-2 überdreht
14.08.2023	1410054 85 1 676.20 676.20 675.50 675.60
14.08.2023	1410054 86 2 679.70 679.50 677.30 677.60
14.08.2023	1410054 6224 / 6031 3 785.90 787.40
14.08.2023	1410054 8291 / 187 4 785.90 787.40
14.08.2023	1410054 8264 / 1189 5 785.90 785.60
14.08.2023	1410054 8263 / 1184 6 785.40 784.70
14.08.2023	1410054 2119 7 679.20 679.10
14.08.2023	1410054 2110 8 678.60 678.90

### Fz 2053:

Date	Quoi ?
27.10.22	Neue DGs Achse 3-6
27.10.2022	1191073 11 1 670.70 670.30 10915 0.50 0.20 21830 54575 UFD
27.10.2022	1191073 11 2 669.40 669.10 10915 0.30 0.20 36383 54575 UFD
27.10.2022	1191073 6210/6210 3 796.30 796.20 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 6029/6029 4 796.20 796.10 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 6222/6222 5 796.30 796.20 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 6031/6134 6 796.20 796.20 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 2112 7 644.30 644.30 10915 0.30 0.10 36383 109150 UFD
27.10.2022	1191073 2116 8 644.60 644.70 10915 0.30 0.20 36383 54575 UFD
25.07.22	Achsen 3-6 überdreht (Ausbrüche und Kerben beim Spurkranz durch Bremsklotz)
25.07.2023	1246819 12 1 670.10 668.60 10036 0.20 0.50 50180 20072 UFD
25.07.2023	1246819 11 2 668.40 667.60 10036 0.30 0.50 33453 20072 UFD
25.07.2023	1246819 6210/6210 3 792.10 792.60 788.60 788.70 10036 1.50 1.00 6691 10036 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 6029/6029 4 793.30 791.90 787.80 787.80 10036 0.70 1.30 14337 7720 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 6222/6222 5 793.00 792.50 788.80 789.00 10036 0.70 1.00 14337 10036 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 6031/6134 6 792.90 792.50 789.20 789.10 10036 0.80 1.00 12545 10036 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 2112 7 643.30 642.40 10036 0.20 0.60 50180 16727 UFD
25.07.2023	1246819 2116 8 643.00 642.90 10036 0.50 0.10 20072 10036 UFD

### Fz 2054:

Date	Quoi ?
19.01.23	<b>Achse 3-6 neu DG's</b>
	24.11.2022 1183254 2 1 647.90 647.90
	24.11.2022 1183254 1 2 652.40 652.90
	19.01.2023 1183254 6213/6213 3 796.00 796.00
	19.01.2023 1183254 8267/8267 4 796.00 796.00
	19.01.2023 1183254 6023/6023 5 796.00 796.00
	19.01.2023 1183254 6220/6220 6 796.00 796.00
	15.02.2023 1200448 8827 7 648.70 648.50 645.90 645.90
	15.02.2023 1200448 8828 8 649.70 649.70 647.90 648.00
	15.02.23
24.11.2022 1183254 2 1 647.90 647.90	
24.11.2022 1183254 1 2 652.40 652.90	
19.01.2023 1183254 6213/6213 3 796.00 796.00	
19.01.2023 1183254 8267/8267 4 796.00 796.00	
19.01.2023 1183254 6023/6023 5 796.00 796.00	
19.01.2023 1183254 6220/6220 6 796.00 796.00	
15.02.2023 1200448 8827 7 648.70 648.50 645.90 645.90	
15.02.2023 1200448 8828 8 649.70 649.70 647.90 648.00	
08.09.23	
	08.09.2023 1239214 2 1 646.00 646.20 644.90 644.90
	08.09.2023 1239214 1 2 650.90 651.40 648.60 648.80
	08.09.2023 1239214 6213/6213 3 793.70 794.00 788.40 788.20
	08.09.2023 1239214 8267/8267 4 793.90 793.80 787.50 787.10
	08.09.2023 1239214 6023/6023 5 787.10 789.00 785.80 786.30
	08.09.2023 1239214 6220/6220 6 794.20 794.10 787.10 787.60
	15.02.2023 1200448 8827 7 648.70 648.50 645.90 645.90
	15.02.2023 1200448 8828 8 649.70 649.70 647.90 648.00

**Fz 2021:**

Date	Quoi ?
16.12.2 2	<b>Achse 3-6 überdreht (Flachstelle)</b>
	16.12.2022 1263228 2113 1 668.20 669.70 3816 0.30 -1.70 12720 -2245
	16.12.2022 1263228 2115 2 669.50 669.70 3816 0.30 0.40 12720 9540
	16.12.2022 1263228 8279 / 1187 3 788.60 789.10 782.10 782.10 3816 0.50 0.30 7632 12720 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 8278 / 1185 4 789.90 789.70 783.30 783.30 3816 0.40 0.30 9540 12720 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 11249 / 11247 5 788.20 787.10 782.80 782.80 3816 0.50 0.40 7632 9540 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 11246 / 11249 6 787.80 787.10 782.40 782.40 3816 0.50 0.20 7632 19080 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 246 (60) 7 667.90 668.80 3816 0.20 0.40 19080 9540
	16.12.2022 1263228 258 (55) 8 668.00 668.40 3816 0.20 0.50 19080 7632
	25.01.2 3
25.01.2023 1276124 2113 1 667.10 666.70 664.60 664.70 12896 3.60 5.00 3582 2579	
25.01.2023 1276124 2115 2 668.50 669.10 666.70 666.80 12896 2.80 2.90 4606 4447	
25.01.2023 1276124 8279 / 1187 3 780.90 780.70 775.60 775.60 12896 1.20 1.40 10747 9211 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 8278 / 1185 4 781.90 782.10 775.60 775.60 12896 1.40 1.10 9211 11724 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 11249 / 11247 5 781.70 781.70 775.60 775.60 12896 1.10 1.10 11724 11724 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 11246 / 11249 6 781.40 781.00 775.60 775.60 12896 1.00 1.40 12896 9211 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 246 (60) 7 666.80 668.40 12896 1.10 0.40 11724 32240	
25.01.2023 1276124 258 (55) 8 667.20 667.90 12896 0.80 0.50 16120 25792	
24.08.2 3	
	24.08.2023 1339241 2113 1 661.10 660.80 19100 0.50 1.00 38200 19100
	24.08.2023 1339241 2115 2 662.60 662.90 19100 0.70 1.00 27286 19100
	24.08.2023 1339241 8279 / 1187 3 777.90 777.70 19100 0.60 1.00 31833 19100 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 8278 / 1185 4 779.50 779.20 19100 0.60 0.90 31833 21222 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 11249 / 11247 5 778.90 778.30 19100 0.60 0.90 31833 21222 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 11246 / 11249 6 778.80 778.00 19100 0.70 0.90 27286 21222 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 246 (60) 7 664.40 665.80 662.60 662.90 19100 2.20 3.80 8682 5026
	24.08.2023 1339241 258 (55) 8 665.00 665.60 662.60 662.70 19100 2.80 3.80 6821 5026
	27.12.2 3
27.12.2023 1372396 2113 1 658.50 658.50 657.70 657.30 33155 3.40 3.50 9751 9473	
27.12.2023 1372396 2115 2 659.70 660.50 658.60 658.30 33155 4.00 4.60 8289 7208	
27.12.2023 1372396 8279 / 1187 3 775.10 775.20 774.30 774.00 33155 3.60 3.70 9210 8961 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 8278 / 1185 4 776.50 777.10 775.60 775.80 33155 3.90 3.40 8501 9751 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 11249 / 11247 5 776.70 776.10 776.70 776.10 33155 2.20 2.20 15070 15070 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 11246 / 11249 6 776.20 775.80 776.20 775.80 33155 2.60 2.20 12752 15070 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 246 (60) 7 660.40 661.00 33155 2.20 1.90 15070 17450	
27.12.2023 1372396 258 (55) 8 660.60 660.70 33155 2.00 2.00 16578 16578	

