

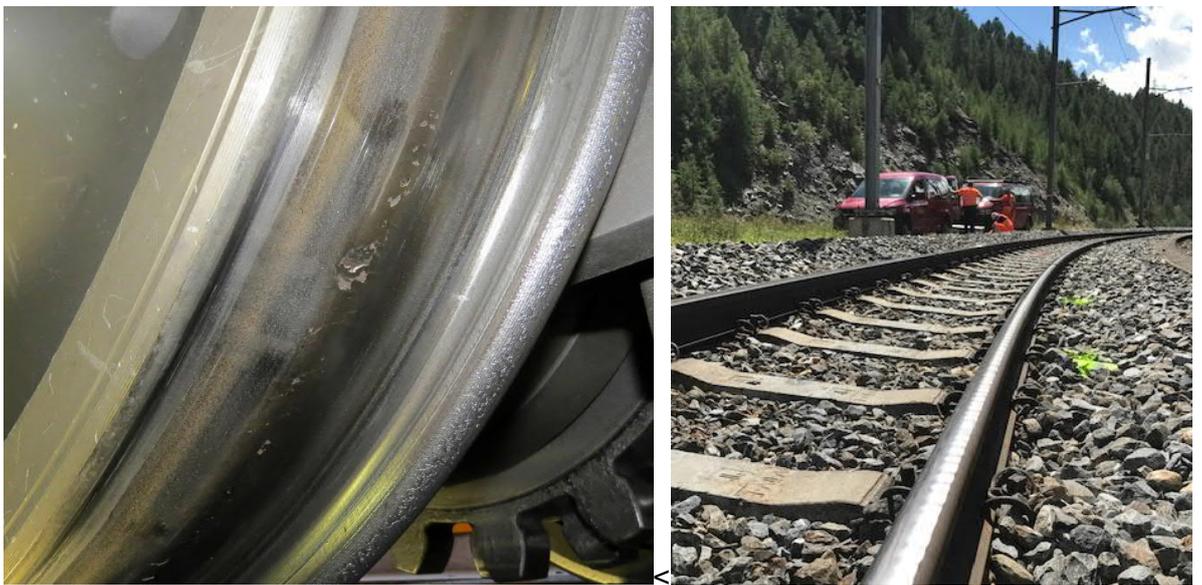
Rapport final sur l'essai d'exploitation SKK sur la ligne Täsch - Zermatt

Maîtrise de système Interaction véhicule - voie métrique

Projet: 2 SKS / SKK

Module : 4 Réduction d'usure par SKK

Rapport technique



Date / état	20.10.2022 / Validé	Nombre de pages 174
Auteur:	R. Müller / Gleislauftechnikmüller A. Seeberger / MGBahn	
Vérifié:	V. Walz / Zentralbahn	
Validé:	N. Ritter / Zentralbahn	

Mode de citation : R. Müller / A. Seeberger, Railplus : Rapport final sur l'essai d'exploitation SKK sur la ligne Täsch - Zermatt. Rapport technique, 20.10.2022

Liste des modifications

Version	Date	Responsable	Description
0.1	29.04.2022	A. Seeberger	Première version
0.2	26.07.2022	R. Müller	Version corrigée
0.3	30.09.2022	A. Seeberger	Rapport rédigé et finalisé.
1.0	20.10.2022	N. Ritter	Correction finale DE et validation par le responsable du projet
1.1	13.11.2023	M. Wiegleb	Traduction en FR
2.0	17.11.2023	N. Ritter	Correction finale et validation par le responsable du projet

Validation par la maîtrise de système

Version	Responsable	Date
1.0	direction technique	27.10.2022
1.0	direction générale	31.10.2022

Synthèse

Donne

Ces dernières années, l'interaction entre le véhicule et la voie a fait apparaître des signes d'usure massifs auprès de diverses sociétés ferroviaires à voie métrique, tant sur les véhicules que sur l'infrastructure. Ces phénomènes d'usure sont parfois si graves que la disponibilité des véhicules et de l'infrastructure ne peut plus être assurée. C'est notamment le cas de la Matterhorn-Gotthard-Bahn, qui a déjà dû remplacer trois fois des trains par des bus au cours des deux dernières années. Outre la disponibilité, les coûts d'entretien des véhicules et de l'infrastructure n'ont cessé d'augmenter.

Dans le cadre de la tâche système Interaction véhicule/voie à écartement métrique confiée par l'OFT, plusieurs projets principaux ont été mandatés par le programme pour étudier les phénomènes et trouver des solutions. Ces projets ont des périodes d'observation de différentes longueurs, car les modifications fondamentales du système au niveau du matériel roulant et de l'infrastructure sont liées à de temps de réaction de 20 à 40 ans. D'une part, un travail de fond à long terme doit être effectué pour étudier les paramètres d'influence et les solutions qui y sont liées, et d'autre part, de solutions doivent être mises à disposition dans l'avenir proche afin d'augmenter à nouveau considérablement la rentabilité et la disponibilité du système. Ceci dans le contexte de la considération globale du système (rentabilité). Jusqu'à ce que les causes soient identifiées au moyen du projet P3 Roue / Rail, émanant du projet de recherche national Véhicule / Voie et que des constructions de véhicules adaptées soient disponibles, à développer au sein du projet P5 Véhicule, des mesures de réduction de l'usure à court et moyen terme s'imposent.

Des essais préliminaires, réalisés sur des chemins de fer à voie métrique, mais aussi en particulier sur des tramways, ont prouvé dans le passé qu'en plus de la lubrification des boudins de roue (LBR), le conditionnement du champignon du rail (SKK) avait fourni de bons résultats pour réduire l'usure des roues et des rails. Cependant, comme le conditionnement du champignon du rail a toujours mis l'accent sur le sujet sécuritaire du freinage, le conditionnement n'a été appliqué que ponctuellement et, quant aux tramways, surtout au moyen d'installations stationnaires.

Par le passé et actuellement, la Matterhorn-Gotthard-Bahn a été très fortement touchée par les phénomènes d'usure sur le tronçon Täsch-Zermatt. Divers essais portant sur la qualité des rails, les matériaux des roues et d'autres modifications du paramétrage roue / rail n'ont fourni que des succès limités. L'enchaînement de plusieurs facteurs d'influence de l'interaction véhicule - voie ou roue - rail se superpose sur la MGBahn. Des rayons de courbure étroits, des charges par essieu élevées, des guidages d'essieux montés rigides des nouveaux véhicules modernes et des voies rigides. Autant de paramètres qui ne peuvent pas être facilement modifiés à court terme, tant au niveau véhicules que pour la voie. C'est la raison pour laquelle la maîtrise de système Interaction Véhicule Voie a considéré dès le début la MGBahn comme un objet de recherche optimal. Les travaux déjà entamés par la MGBahn ont pu être poursuivis et mis en place de manière systématique. Le fait que le tronçon bien déterminé entre Täsch et Zermatt est exploité par une flotte de matériel roulant relativement homogène (Navette) s'est révélé particulièrement avantageux.

Le conditionnement du champignon de rail (SKK)

L'usure des roues (plan de roulement) et des rails (ondulations de patinage), qui prédomine aujourd'hui, est due au "glissement" transversal des essieux montés sur les champignons de rails dans les courbes. Les bogies à essieux montés rigides, associés à des charges par essieu relativement élevées, favorisent les forces horizontales générées par le frottement au contact de la roue et du rail et, par conséquent, la recrudescence de l'usure et la génération de nuisances sonores. Le conditionnement des rails sert à maintenir un coefficient de frottement défini sur les surfaces de roulement des champignons de rail. Les forces dues au frottement aux plans de roulement des roues sont ainsi réduites, ce qui diminue l'usure des roues et des rails ainsi que le bruit. Contrairement aux installations de conditionnement stationnaires, qui sont surtout utilisées pour les tramways et qui obtiennent en toute connaissance de cause des résultats très ponctuels, le conditionnement à partir du véhicule présenté ici permet d'obtenir une réduction continue du coefficient de frottement, même le long d'une ligne entière et dans toutes les courbes névralgiques.

L'essai d'exploitation SKK Täsch-Zermatt

Les essais d'exploitation avec conditionnement embarqué du champignon de rail ont eu lieu d'octobre 2021 à octobre 2022 à la Matterhorn-Gotthard Bahn (MGB) sur la ligne Täsch - Zermatt. La période d'un an a été choisie afin de tenir compte des rapports de frottement roue/rail pendant les quatre saisons. Avant de commencer les essais sur la ligne conditionnée, les quatre véhicules Navette 2051 à 2054 ont été équipés d'une installation embarquée pour le conditionnement des surfaces de roulement roue/rail. Le tronçon a été analysé en détail sous différents angles et ensuite préparé spécifiquement à la commande des installations (étiquettes RFID). Les rails ont été meulés et toutes les roues des véhicules Navette ont été reprofilées, et les profils initiaux de toutes les roues et des rails ont été relevés. Les profils de rail ont été enregistrés dans trois rayons représentatifs.

La preuve de sécurité à la suite d'une la modification aux véhicules ferroviaires a été effectuée selon la directive D RTE 49100 [12], vérifiée en matière de sécurité et documentée selon les instructions de la RTE.

Les quatre véhicules Navette ont été équipés d'installations embarquées selon la configuration utilisée par le Zentralbahn.

Les tests de produits effectués dans une première phase avec trois agents de conditionnement différents et déjà utilisés chez d'autres chemins de fer ont montré que pour l'utilisation par la MGB, un seul agent (HeadLub 90) satisfaisait dans un premier temps les exigences au respect des distances de freinage en service et en même temps celles à la répartition de l'agent le long de la voie. Partant des essais de freinage, il a été décidé de réaliser les essais d'exploitation avec le produit de conditionnement HeadLub 90 de la société IGRALUB AG. Les mécaniciens de conduite ont également été informés et sensibilisés au début des essais d'exploitation, afin de pouvoir enregistrer en temps réel les incidents et les observations ayant potentiellement une incidence sur la sécurité.

Pendant toute la durée des essais en service, les essieux montés des véhicules Navette mais aussi les champignons de rail ont été mesurés à des intervalles définis dans le plan d'essai, afin d'enregistrer les modifications des profils (usure, indicateurs de contact entre la roue et le rail) sur les surfaces de roulement des roues et des rails. De plus, les valeurs de frottement au champignon de rail ont été mesurées à l'aide d'un tribomètre, ainsi que les rugosités des surfaces de roulement des rails dans le sens longitudinal, afin de vérifier la formation d'ondulations de patinage. Pour ce faire, il a fallu acquérir et définir des systèmes de mesure (tribomètre, appareils supplémentaires pour la mesure de profil) et des processus (surveillance des défauts sur les surfaces de roulement des roues et des rails).

Résultats de l'essai d'exploitation Täsch - Zermatt

Sécurité, exploitation ferroviaire, installations embarquées

D'une manière générale, on peut dire qu'aucun incident lié à la sécurité n'est survenu pendant toute la durée des essais d'exploitation. En raison d'une utilisation défavorable des véhicules Navette (conditionnement excessif en raison de l'horaire de nuit le week-end) ou de conditions météorologiques humides, cinq incidents de traction ont été signalés, en particulier avec des trains de marchandises lourds, dans lesquels les conditions de traction étaient difficiles. Malgré cela, aucun train n'est resté bloqué en raison de problèmes de traction dus au SKK.

L'équipement d'une rame automotrice a généré un investissement d'environ 40 000 CHF. L'installation et l'exploitation des équipements ont pu être effectuées par les propres ateliers de l'entreprise et se sont avérées simples. L'équipement de la ligne avec des étiquettes RFID a également été facile à réaliser. Les deux systèmes (embarqués et fixes) ont fonctionné sans problème.

Usure des roues des véhicules

Le conditionnement du champignon de rail a eu un effet positif immédiat sur les roues des véhicules équipés. Les contrôles visuels des surfaces de roulement des roues n'ont plus révélé de tendance à la formation de polygones ou de fissures susceptibles de croître (fatigue des contacts de roulement).

Les réductions du diamètre des roues dues à l'usure ont diminué de manière significative grâce à l'effet du conditionnement. L'indicateur d'usure des roues des véhicules Navette (nombre de kilomètres parcourables par millimètre de réduction du diamètre des roues) a pu être augmenté de 5'000 à 10'000 jusqu'à 18'000 à 30'000 pour les roues motrices et de 10'000 à 20'000 jusqu'à 30'000 à 50'000 pour les roues porteuses (environ 300%). Ceci indépendamment de la qualité d'acier des roues. L'échantillon est encore trop petit pour permettre une conclusion statistiquement significative.

Par conséquent, on peut constater qu'aucun essieu des véhicules Navette n'a dû être reprofilé en raison de l'usure des roues pendant la période considérée. Sans SKK, les essieux montés moteurs ont dû être reprofilés deux à trois fois par an.

Une fois de plus, il a toutefois été constaté que les véhicules équipés d'un seul convertisseur de traction sont moins rentables si tous les essieux montés doivent être reprofilés en raison de différences de diamètre trop importantes. (Ceci n'est pourtant pas sujet de l'essai d'exploitation, mais à considérer dans les coûts de vie).

Les roues de la MGBahn disposent d'un profil de roue W98. Sur tous les véhicules, les profils de roue ont considérablement évolué au cours des essais en service, ce qui a également entraîné une modification du contact entre la roue et le rail. Pour la MGB, le profil de roue W98 n'est pas adapté à l'usure et ne convient pas à l'amélioration de la qualité de passage en courbe. Dans le projet P3 Roue / Rail, les phénomènes doivent être étudiés de manière approfondie afin de pouvoir fournir des directives plus optimales par rapport à la géométrie du profil de roue et celui du champignon de rail.

Sur certaines roues, des discontinuités sont apparues sur les surfaces de roulement des roues dans le profil transversal sous l'effet des sabots de frein. Celles-ci s'étendent sur toute la circonférence de la roue et n'ont aucun rapport avec l'essai d'exploitation. Ces discontinuités affectent la sécurité sur le flanc du boudin (ne sont pas admissibles selon le catalogue des défauts de l'OFT [13]) et le comportement en courbe au niveau de la gorge de la roue. Ces aspects seront approfondis dans le cadre des travaux du projet P3, feront l'objet d'une solution en collaboration avec la MGB et seront pris en compte dans la spécification du mécanisme de traction dans le projet P5.

Surveillance des faux-ronds des roues

L'installation de mesure des faux ronds des roues entre Täsch et Zermatt (WMS [9, 10]) fournit depuis début mars 2022 des données par rapport aux polygones, aux méplats et aux éventuels autres dommages dans le sens de la circonférence sur les surfaces de roulement des roues. L'historique de ces données de mesure a été analysé et permet d'aboutir à des conclusions suivantes :

- Les véhicules (Navette) qui circulent uniquement dans la zone conditionnée présentent une polygonation plus faible que ceux qui circulent sur l'ensemble du réseau (Comète).
- Les roues porteuses sont plus touchées par la polygonisation et les aplatissements que les roues motrices.
- Pendant la saison chaude (juillet - août), les polygones sont apparus plus fréquemment qu'avant ou après, ce qui indique des coefficients de frottement plus élevés dus aux conditions météorologiques.

Ces données ont pu être vérifiées avec succès au moyen d'une comparaison des données de maintenance (reprofilage de la roue, échange du bogie) et de l'effet sur les données de mesure (valeurs de formation de polygones plus basses). Ainsi, les observations des irrégularités des roues coïncident avec les conclusions tirées des autres données saisies et elles les confirment.

Usure du rail

Dans les deux courbes d'essai de la voie Zum Biel, on n'a plus constaté de formation d'ondulations de patinage au fil intérieur des courbes dès le début du conditionnement du champignon de rail. Ceci contrairement à ce qui se passait auparavant (sans SKK), où les rugosités d'une longueur d'onde de celle de la longueur de l'ondulation de patinage (longueur d'environ 80 mm) avaient pratiquement retrouvé après 260 jours le niveau analogue à celui d'avant le meulage des rails.

Dans la courbe de Lüegelwang uniquement, la mesure après 246 jours avec SKK montre une légère augmentation de la longueur des ondulations de patinage, ce qui indique toutefois une croissance nettement plus faible par rapport à la situation avant le conditionnement.

Ces observations ont pu être confirmées jusqu'à la mesure de la rugosité des rails en septembre 2022. L'augmentation de la formation d'ondulations de patinage observées en septembre est probablement due aux mois d'été chauds de juillet et août 2022. On suppose que la cause est une combinaison de journées plus longues en été et du système SKK désactivé le soir et le matin. On suppose en outre que le produit de conditionnement perd de son efficacité lorsque la température des rails augmente. Ce phénomène doit être étudié scientifiquement et lors de l'utilisation en exploitation, en particulier pour les étés plus chauds à long terme (réchauffement climatique).

En général, on observe que les véhicules n'ont provoqué qu'une usure minimale pendant l'année d'essai d'exploitation. Les valeurs d'usure mesurées varient en partie fortement à l'intérieur de la courbe. Toutefois, au vu de la réserve résiduelle d'usure, on peut supposer que la formation d'ondulations de patinage ait été plus importante sur le rail intérieur de courbe et qu'il a donc fallu le meuler davantage. Grâce à la croissance plus faible des ondulations de patinage due au SKK (surtout à l'intérieur de courbe), l'intervalle de meulage a pu être augmenté de deux fois par an à une fois par an, ce qui a un effet positif sur les coûts du cycle de vie.

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

Pour enregistrer les vibrations et le bruit, des capteurs d'accélération ont été installés sur une Navette (et une Comète) au niveau de chacun des deux roulements des essieux montés et des microphones ont été installés à côté des deux roues d'un essieu. Ceux-ci étaient déjà en service avant le début des essais d'exploitation SKK, ce qui permet de comparer les accélérations (formation d'ondulations de patinage, effet stick-slip) et l'émission sonore avant et après le début des essais d'exploitation. Cela permet de suivre l'évolution des ondulations de patinage à l'aide de l'historique des données de vibration et de surveiller l'efficacité du conditionnement en service.

Les résultats obtenus jusqu'à présent dans le cadre de ce suivi peuvent être résumés comme suit :

- Sur la base des mesures de vibrations, aucune croissance des ondulations de patinage n'a été enregistrée pendant la période suivant le meulage des rails (octobre 2021) jusqu'à début juillet 2022. Au cours de la période estivale chaude qui a suivi, le système a constaté une légère croissance des ondulations de patinage. Cela coïncide avec les mesures de rugosité du rail.
- Sur la base des mesures acoustiques, il existe des zones spécifiques entre les sections de pulvérisation par les installations SKK qui ont tendance à provoquer des crissements et qui sont très constantes sur toute la durée des mesures. En outre, les véhicules ont tendance à grincer aux heures creuses de la journée. Cela s'explique par le fait que les installations sont arrêtées le soir après 19 heures et le matin avant 7 heures au moyen d'un relais temporisé.

De plus, selon les retours d'information du personnel de conduite, le bruit a diminué sur le tronçon qui était objet des essais d'exploitation (crissements dans les courbes, ondulations de patinage). Cette impression a également pu être confirmée lors d'une visite commune de ce tronçon. Lors de cette visite, pendant les essais d'exploitation, le bruit et les crissements dans les courbes étaient nettement moins intenses que lors des visites effectuées avant les essais d'exploitation SKK.

Rentabilité

Les simulations pour le calcul de la rentabilité de l'essai d'exploitation "SKK Täsch - Zermatt" ont montré que l'installation SKK est rentable dans chaque cas simulé, compte tenu des hypothèses retenues sur la ligne d'essai. Pour cela, deux cas de figure ont été définis, l'un avec SKK, l'autre sans SKK. Pour ces deux cas de figure, trois simulations différentes ont à nouveau été réalisées, chacune avec des limites de système différentes.

- Dans un premier temps, les effets du SKK ont été analysés seulement sur les véhicules Navette. Dans cette optique, des économies annuelles d'environ 150'000 CHF ont pu être évaluées.
- Dans la deuxième simulation, les effets sur les véhicules Navette ont été analysés en combinaison avec les effets sur l'entretien des voies. Dans ce cas, des économies annuelles d'environ 235 000 CHF ont pu être déterminées.
- Dans la troisième simulation, les effets sur les véhicules Navette, sur l'entretien des voies et sur les investissements dans le renouvellement des voies (durée de vie) ont été analysés. Pour ce cas, des économies annuelles d'environ 300'000 CHF ont pu être calculées.

On peut donc affirmer que l'installation SKK de Täsch - Zermatt sera ou a été amortie en l'espace d'un an, même dans le cas le plus défavorable sur le plan économique (économies de 150 000 CHF avec des coûts d'investissement de 120 000 CHF).

En outre, un avis d'expert a permis d'évaluer la possibilité d'une extrapolation ou d'une extension du SKK à l'ensemble du réseau de la MGBahn. En résumé, l'introduction du SKK sera

également rentable sur l'ensemble du réseau, en particulier si le système global (y compris les coûts d'infrastructure et les aspects socio-économiques (bruit)) sont pris en compte.

Conclusion

La sécurité est garantie en cas d'utilisation correcte du conditionnement du champignon de rail sur la base d'essais de freinage approfondis sur des pentes allant jusqu'à 40‰, et elle a été maîtrisée en toute sécurité à tout moment lors des essais d'exploitation Täsch-Zermatt sur des pentes allant jusqu'à 25‰.

Les résultats obtenus lors des essais d'exploitation montrent qu'à court et moyen terme, l'application ciblée du conditionnement du champignon de rail permet de réduire significativement l'usure à court et long terme sur les lignes présentant des pentes jusqu'à 25‰.

Les essais ont toutefois aussi montré que des optimisations supplémentaires sont nécessaires pour élaborer des recommandations sur la mise en œuvre du SKK dans le domaine de la voie métrique. Cela concerne avant tout le contact entre la roue et le rail, l'interaction entre le SKK et la LBR ainsi que la surveillance avec les opportunités de numérisation qui y sont liées dans l'optique de la maîtrise de l'ensemble du système (mot-clé : conditionnement en fonction des besoins).

Le conditionnement du champignon de rail est très économique. Le rendement de l'investissement est d'un an dans le cas de la MGBahn.

L'émission de bruit (crissements dans les courbes, passage sur les ondulations de patinage) est nettement réduite par le SKK et le confort de roulement est amélioré.

Les aspects environnementaux du conditionnement ne peuvent pas encore être entièrement évalués.

Marche à suivre- recommandations

Il est recommandé d'observer le comportement du système SKK à la MGB pendant une année supplémentaire. Cela permettra de consolider les tendances constatées ici. Il faut tenir compte du fait qu'en particulier aucun reprofilage de roues n'a encore été effectué, et que seule la réduction de diamètre qui en résulte permet une estimation fiable de la prolongation de la longévité des roues à la suite du SKK. En outre, la période d'observation de l'usure des rails, fixée à un an, semble trop courte pour évaluer les intervalles de meulage à prévoir. Les résultats de l'essai d'exploitation doivent être consolidés, notamment par d'autres mesures d'usure durant les mois d'été. L'installation fixe de surveillance des faux ronds des roues et le dispositif embarqué de surveillance du bruit et des dommages causés aux rails par les véhicules doivent être exploités pendant 12 mois supplémentaires. (Option : poursuite de l'essai Täsch-Zermatt).

Les aspects environnementaux du conditionnement doivent être étudiés et consolidés sur le plan économique dans l'essai d'exploitation des tpf.

L'industrie doit poursuivre le développement d'agents de conditionnement dégradables et respectueux de l'environnement.

Dans une prochaine étape de développement, il faudra apporter la preuve que le conditionnement du champignon de rail peut également être utilisé avec succès sur des déclivités allant jusqu'à 70‰. (Option 70‰)

L'inconvénient du conditionnement continu à chaque passage de train dans toutes les courbes spécifiées à cet effet doit être contré par un conditionnement adapté aux besoins. Pour ce faire, les véhicules doivent être en mesure de reconnaître la nécessité du conditionnement et de communiquer entre eux afin de pouvoir tirer le meilleur parti du système. (Option de conditionnement en fonction des besoins).

Table des matières

1.	Situation de départ.....	12
2.	Objectifs des essais d'exploitation.....	12
3.	Description du prototype et de la ligne d'essai	13
3.1.	Description équipement véhicules, système SKK embarqué [2].....	13
3.2.	Description du parcours et équipement pour les essais d'exploitation SKK [3].....	14
4.	Déroulement chronologique des essais d'exploitation [1].....	18
5.	Mesures / surveillance et résultats de l'usure des roues	19
5.1.	Usure abrasive des roues motrices et porteuses à leurs surfaces de roulement.....	19
5.1.1.	Dimensions du boudin.....	20
5.1.2.	Spezifischen Reduktionen der Raddurchmesser ΔD_{LCC}	23
5.1.3.	État des surfaces de roulement des roues sur la circonférence de la roue.....	31
5.1.4.	État des surfaces de roulement des roues dans le sens transversal	35
5.1.4.1.	Profil de portance dans le profil transversal des roues.....	35
5.1.4.2.	Discontinuités dans le profil transversal des roues	39
5.2.	Géométrie de contact.....	41
5.2.1.	Géométrie de contact Navette.....	41
5.2.2.	Géométrie de contact des rames Comète.....	50
5.3.	Irrégularité des roues évaluée à l'aide d'une installation de mesure sur la voie [9]..	55
6.	Mesures / surveillance et résultats du rail	58
6.1.	Mesure de la rugosité du rail [1]].....	58
6.1.1.	Rugosité du rail [5].....	59
	Zum Biel - Portail	61
	Zum Biel - Pont.....	62
	Lüegelwang	63
6.1.2.	Constatations croissance des ondulations de patinage dans les courbes/ développement de la rugosité des rails.....	63
6.2.	Mesures tribométriques.....	64
6.2.1.	Points de mesure et résultats des mesures.....	64
6.2.2.	Constatations sur les résultats de mesure.....	66
6.3.	Usure abrasive des rails.....	67
6.3.1.	Zum Biel – Portail (courbe complète km : 41'935.977 - 41'951.93).....	69
6.3.2.	Zum Biel – Pont (courbe complète km: 42'021.43 - 42'058.60)	70
6.3.3.	Lüegelwang (Vollbogen km: 42'512.35 - 42'557.67).....	71
6.3.4.	Conclusions sur l'usure des rails.....	73
6.4.	Vibrations des rails et des traverses.....	75
6.5.	Largeur de voie.....	75
7.	Mesures / surveillance et résultats généraux	78

7.1.	Crissements dans les courbes	78
7.2.	Vibrations au niveau du palier de l'essieu et bruit causé par le crissement des roues	78
7.2.1.	Description du système de mesure «Technode».....	78
7.2.2.	Vibrations du palier d'essieu détectées par le système de mesure « Technode » ...	81
7.2.3.	Émission sonore enregistrée avec le système de mesure «Technode»	83
7.3.	Informationen aus dem Betriebseinsatz	91
7.3.1.	Retour d'exploitation (mécanicien / direction de l'exploitation).....	91
7.3.2.	Données d'exploitation.....	91
8.	Rentabilité globale	92
8.1.	Description de la méthode	92
8.2.	Hypothèses retenues	92
8.3.	Résultats.....	93
9.	Conclusion et prochaines étapes	94
10.	Répertoires	101
10.1.	Liste des figures.....	101
10.2.	Liste des tableaux.....	103
10.3.	Références	104
11.	Annexe	105
11.1.	Rugosité du rail.....	105
11.1.1.	Appareil de mesure APT RSA – Rail Surface Analyser	105
11.1.2.	Täschsand intérieur	106
11.1.3.	Täschsand extérieur	108
11.1.4.	Zum Biel Portail intérieur.....	109
11.1.5.	Zum Biel Portail extérieur.....	111
11.1.6.	Zum Biel Pont intérieur.....	112
11.1.7.	Zum Biel pont extérieur	114
11.1.8.	Lüegelwang intérieur.....	116
11.1.9.	Lüegelwang extérieur.....	118
11.2.	Mesures tribomètre	120
11.2.1.	Kalter Boden voie 2 (Rayon 100 m) avant l'espace de relais Kilomètre de ligne 41.080 120	
11.2.2.	Bienne courbe (110m) kilomètre de ligne 42.050	122
11.2.3.	Bienne droite kilomètre de ligne 42.100	125
11.2.4.	Luegelwang courbe serrée (95m) kilomètre de ligne 42.550	127
11.3.	Rentabilité globale – Hypothèses.....	130
11.3.1.	Investissement.....	130
11.3.2.	Extrait Simulation	131
11.4.	Faux-ronds des roues	132
11.4.1.	2011 – 2014: Comète 3 modules	133

11.4.2.2021 – 2028: Comète 3 modules	141
11.4.3.2051 – 2054: Navette.....	157
11.4.4.2131 – 2134: GSW	165
11.5. Usure des rails.....	172
11.5.1.Usure des rails Zum Biel Portail.....	172
11.5.2.Usure des rails zum Biel Pont	173
11.5.3.Usure des rails Lüegelwang.....	174

1. Situation de départ

Dans le cadre du programme national de recherche véhicule / voie métrique, la MGB étudie, en collaboration avec tpf et zb pour la branche, la réduction de l'usure des essieux montés des véhicules et des rails grâce à l'utilisation du conditionnement du champignon de rail (SKK) et de la lubrification des boudins de roue (LBR). L'étude de la réduction de l'usure des essieux montés et des rails dans les courbes étroites sera réalisée dans le cadre d'un projet au sein de la MGB et tpf. Le présent rapport décrit les résultats obtenus jusqu'à présent et les expériences faites à la MGB depuis octobre 2021.

Avec l'introduction des nouvelles générations de véhicules, l'usure des essieux montés mais aussi des rails a augmenté de manière dramatique. Jusqu'à ce que les causes soient étudiées dans le cadre du sous-projet roue/rail du projet de recherche national véhicule / voie et que des constructions de véhicules adaptées soient disponibles, il est impératif de prendre des mesures de réduction de l'usure à court et moyen terme. Ceci afin d'améliorer à nouveau la disponibilité et la rentabilité. L'essai d'exploitation chez MBG, traité ci-après, doit permettre d'élaborer les bases de recommandations pour l'utilisation du conditionnement du champignon de rail auprès d'autres compagnies ferroviaires.

2. Objectifs des essais d'exploitation

L'essai d'exploitation compris dans le module 4 du projet P2 (dans le cadre du projet de recherche national) a pour but d'étudier l'effet sur l'usure du contact roue-rail au moyen du SKK. Cela devrait permettre de réduire la maintenance et d'augmenter la disponibilité de véhicule et voie. On s'attend également à ce que les émissions sonores (crissements dans les courbes) puissent être réduites. En outre, auprès des chemins de fer à voie métrique, il n'existe pas encore de bases scientifiques concernant le SKK et l'usure de l'interface roue-rail. Le projet doit permettre de développer ce savoir-faire, d'élaborer des recommandations et de les mettre à la disposition de l'ensemble de la branche.

Le document "MGB Verschleiss SKK Versuchskonzept" [1] décrit le concept d'essai du projet SKK de la MGB sur la ligne Täsch - Zermatt dans le but de déterminer la réduction de l'usure des roues par le SKK et d'améliorer ainsi la disponibilité et la rentabilité des véhicules. Parallèlement, il s'agit également de réduire l'usure des rails dans les courbes étroites (réduction de la formation d'ondulations de patinage) afin de prolonger les intervalles de meulage et la longévité des rails. En ce qui concerne l'usure des surfaces de roulement de la roue et du rail, il faut tenir compte du fait que l'usure de la roue est plusieurs fois supérieure à celle du rail. Cela s'explique par le fait que l'usure de la roue s'effectue par tour de roue, alors que celle du rail s'effectue par roue ayant roulé sur le rail. On distingue l'usure du boudin et du flanc du rail, d'une part, et l'usure des surfaces de roulement des deux partenaires en contact, d'autre part. L'objectif premier de la SKK est de réduire l'usure et les dommages sur les surfaces de roulement. La réduction des forces d'adhérence sur les surfaces de roulement entraîne également une diminution des forces s'exerçant sur le boudin ou le flanc du rail, et donc une réduction de l'usure due à ces forces.

3. Description du prototype et de la ligne d'essai

Le dispositif SKK est un système embarqué de conditionnement du champignon de rail, qui provient de la société REBS Zentralschmiertechnik GmbH et qui est équipé de l'agent de conditionnement HeadLub® 90 de la société Igralub Holding GmbH. Pour les essais d'exploitation sur la ligne MGB entre Täsch et Zermatt, quatre véhicules Navette BDeh 4/8 ont été équipés du système embarqué (voir chapitre 3). Depuis le début des essais d'exploitation en octobre 2021, ces véhicules conditionnent sur des tronçons définis de la ligne entre Täschsand et Zermatt (cf. chapitre 3.2).

3.1. Description équipement véhicules, système SKK embarqué [2]

La modification apportée aux quatre véhicules de type BDeh 4/8 concerne l'installation des composants pour le conditionnement embarqué. La Figure 1 montre la disposition des composants du système :

- Réservoir d'agent de conditionnement de 10 litres avec deux pompes d'alimentation pneumatiques intégrées, fixé sous le véhicule au chaudron sur la poutre en U du châssis, à gauche derrière le premier bogie.
- Buses de pulvérisation réglées pour pulvériser les surfaces de roulement des rails, boulonnées au moyen de consoles sur les supports du récepteur du dispositif de sécurité des trains.
- Antenne fixée sous le véhicule directement sous l'armoire PT1 sur la poutre en U du châssis à gauche derrière le premier bogie.
- Ha-VIS RFID Reader RF-R400, EU pour l'activation du conditionnement du champignon de rail.
- Le long du parcours, des étiquettes RFID sont fixées aux rails à des points prédéfinis [3].
- La commande, l'unité de commande et les lecteurs sont installés dans l'armoire fermée à clé PTE 1 de la Navette, dans l'espace voyageurs, juste au-dessus du bogie équipé des composants extérieurs (à gauche, derrière la porte, près de la première entrée en direction de Disentis). Les câbles de connexion sont ainsi aussi courts que possible.
- Capteur de température et d'humidité avec sortie active sert à saisir la température et l'humidité de l'air à l'extérieur. Ce capteur est monté sur le toit de la cabine de conduite en direction de Disentis.
- Câblage de la commande, y compris le capteur de pluie. L'alimentation 36V DC (04A13) et 0V DC (04A14) ainsi que les signaux du sens de marche (F1 = 140.1/2 et F2 = 140.2/2) sont dérivés de la cabine de conduite (415 / 50 / 601 / 611) et raccordés à un IDI ou au bornier correspondant dans l'armoire PTE 1.

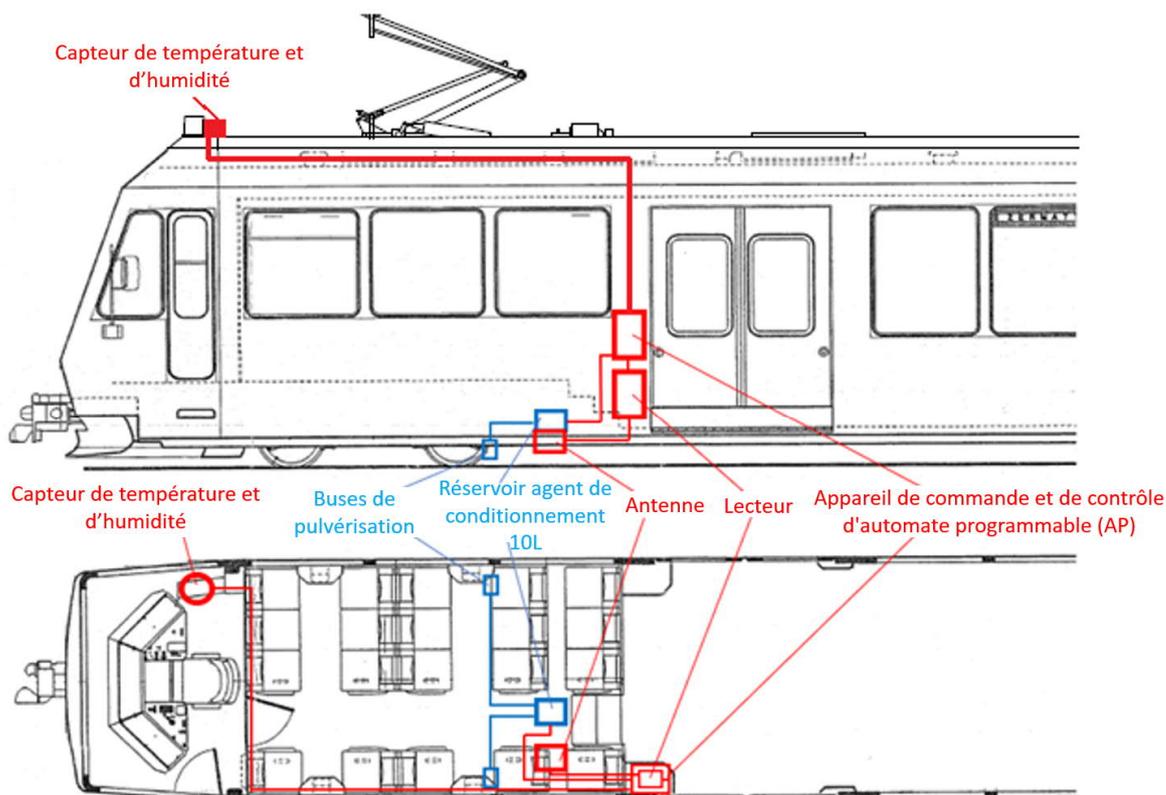


Figure 1: Disposition des composants du système de conditionnement Navette

3.2. Description du parcours et équipement pour les essais d'exploitation SKK [3]

La ligne Zermatt - Täsch peut être divisée en trois sections du point de vue de la mécanique de guidage dans la voie (voir Figure 2):

- Tronçon Täsch - Täschsand : dans ce secteur, les rayons des plus petites courbes se situent entre 180m et 230m.
- Section Täschsand - Kalter Boden : Dans ce secteur se trouvent trois courbes très étroites (rayon 2x98m et 1x100m), deux courbes de rayon 150m, une courbe de rayon 180m et deux courbes de très grands rayons (510m, 571m).
- Tronçon Kalter Boden - Zermatt : dans ce secteur, pratiquement toutes les courbes sont très étroites, avec des rayons compris entre 80m et 125m.

Les raisons de l'usure élevée des roues sont à rechercher dans la zone de tracé des très petits rayons de courbure et donc surtout sur le tronçon de ligne Kalter Boden - Zermatt. Ce tronçon présente une accumulation massive de courbes à très petits rayons.

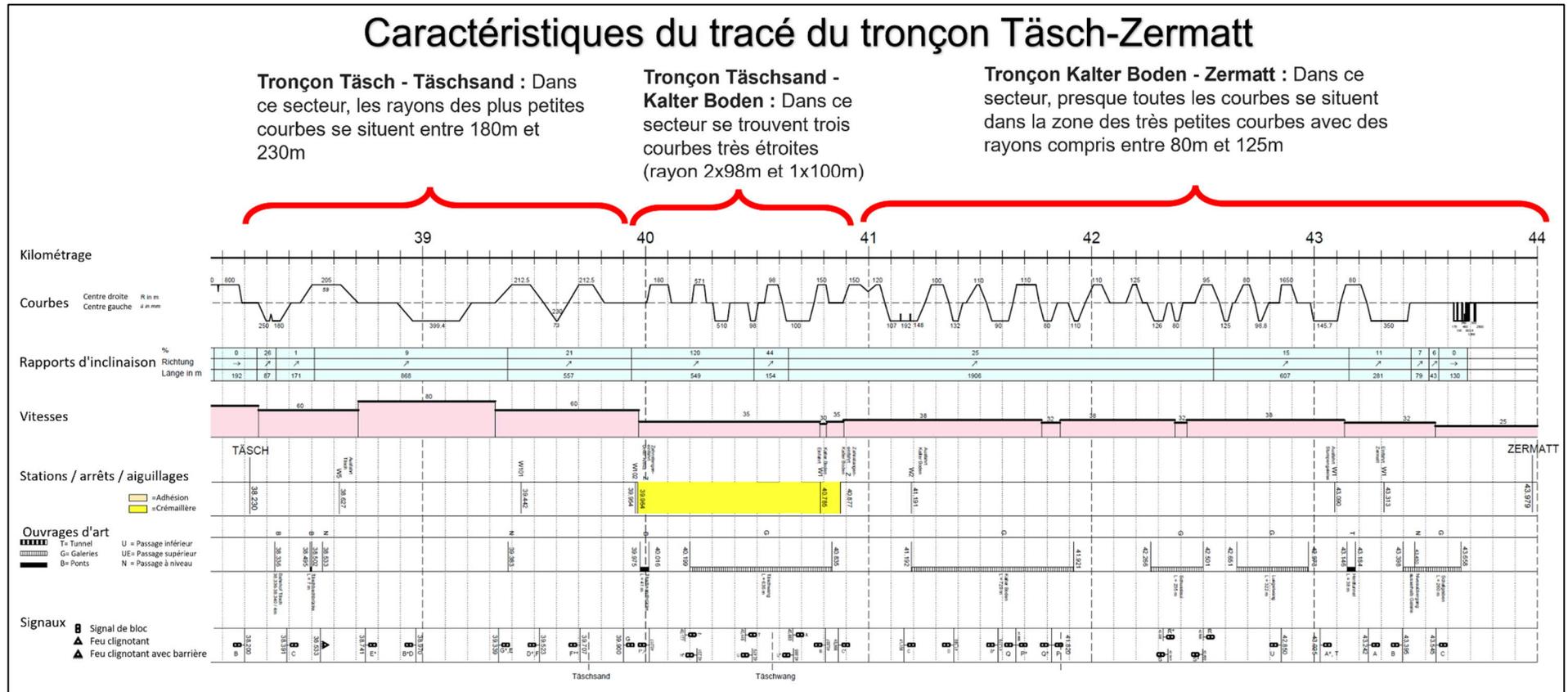


Figure 2: Caractéristiques du tracé du tronçon Täsch-Zermatt

La commande du conditionnement du champignon de rail est réglée en fonction du type de véhicule. Le conditionnement du champignon de rail fonctionne aux intervalles entre pulvérisation et durée d'attente, réglés au moyen du module de commande et du nombre de conditionnements prédéfinis (nombre de cycles, voir Figure 3).

Le long de la ligne, des étiquettes RFID sont fixés sur les rails à des points prédéfinis, qui envoient au dispositif SKK embarqué l'ordre de démarrer le conditionnement à chaque fois. Une balise d'arrêt n'est pas nécessaire, car l'installation s'arrête automatiquement après deux cycles définis dans le système.

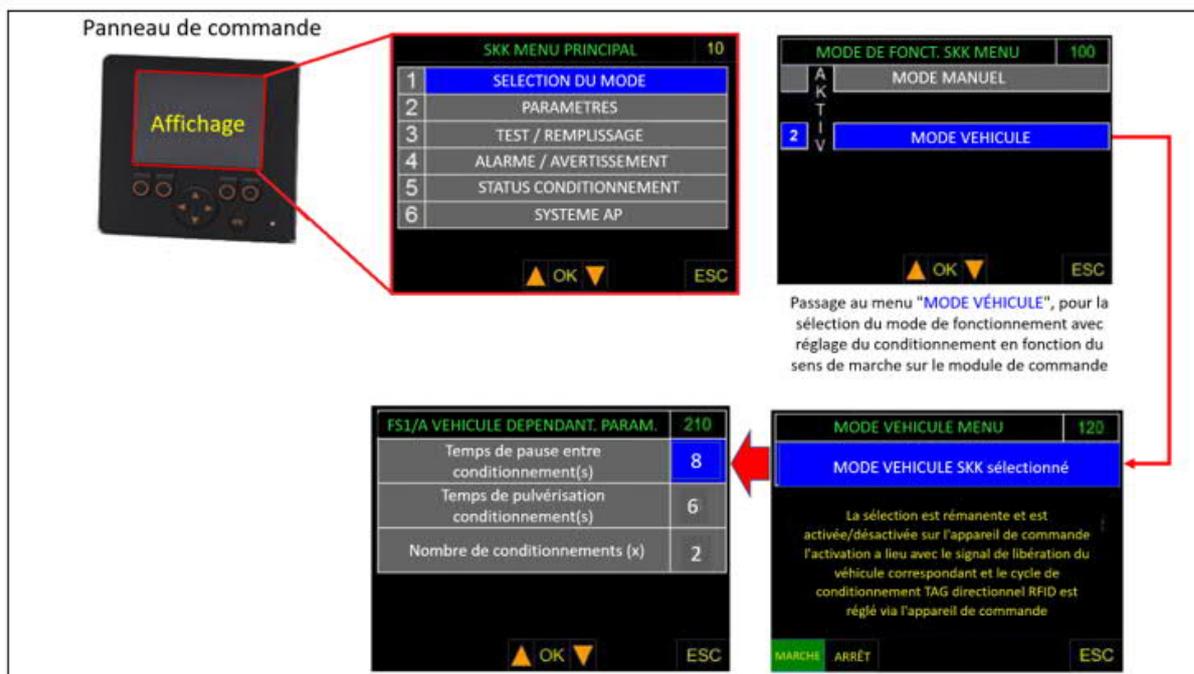


Figure 3: Réglage du conditionnement à l'écran de commande embarquée, en fonction du type de véhicule Le nombre de conditionnements est défini à l'aide de ce module de commande.

La Figure 2 montre les tronçons à conditionner entre Täschsand et Zermatt. Il est renoncé au conditionnement dans les grands rayons de courbe juste avant Zermatt ainsi que dans les deux courbes situées juste en amont de Täschsand. Entre Täschsand et Täsch se trouvent des zones de protection des eaux sur lesquelles aucun conditionnement ne doit être appliqué jusqu'à ce que les analyses de la HES-Berne soient disponibles. Il est également renoncé au conditionnement avant et après Kalter Boden, car des trains en attente (entrée occupée) sont présents dans cette station de croisement, l'arrêt de précision doit par conséquent être assuré.

La Figure 5 représente la disposition des –étiquettes RFID de déclenchement, pendant les essais d'exploitation Täsch - Zermatt, à chaque fois au début du tronçon correspondant. Le conditionnement n'est effectué que dans le sens Täsch - Zermatt. La définition des tronçons de conditionnement a été effectuée en tenant particulièrement compte de l'expertise sur le comportement de freinage (voir expertise sur le comportement de freinage [4]).

A gauche, la Figure 4 illustre la fixation au rail de l'étiquette RFID . Cette fixation est possible sur tous les types de rails (VST36, CFF I et CFF IV) de voie métrique.

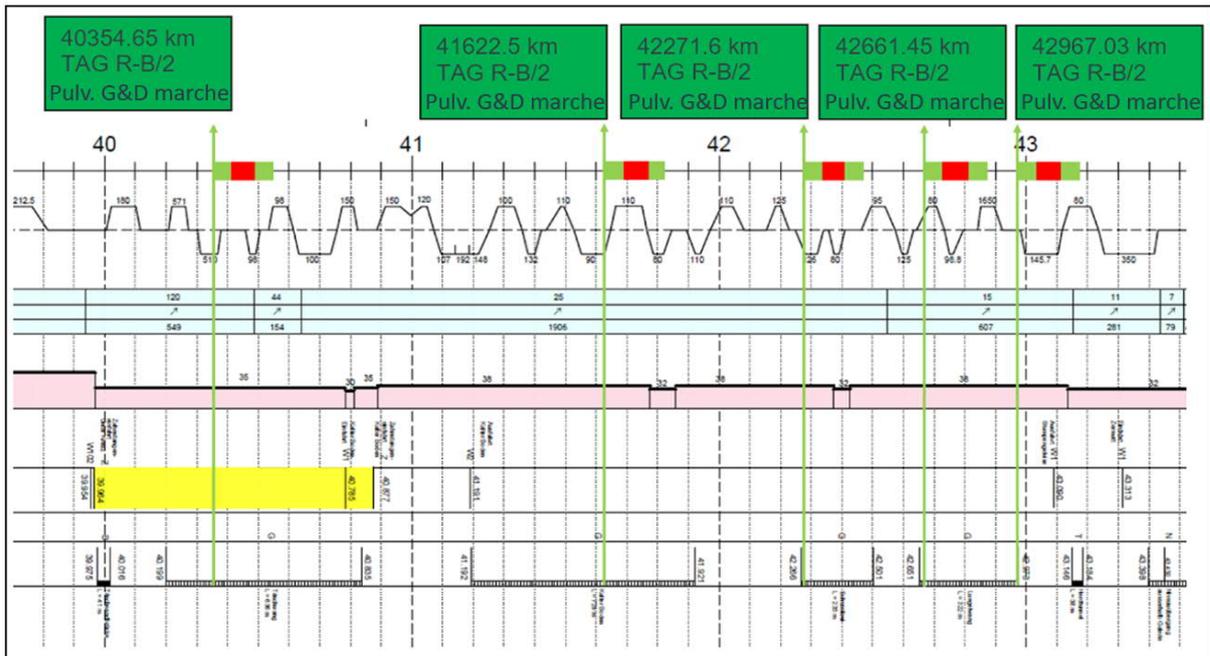


Figure 5: La disposition des étiquettes RFID pendant l'essai d'exploitation Täsch-Zermatt (vert = conditionnement, rouge = intervalle). La flèche verte pointant vers le haut indique l'emplacement de la balise de déclenchement.

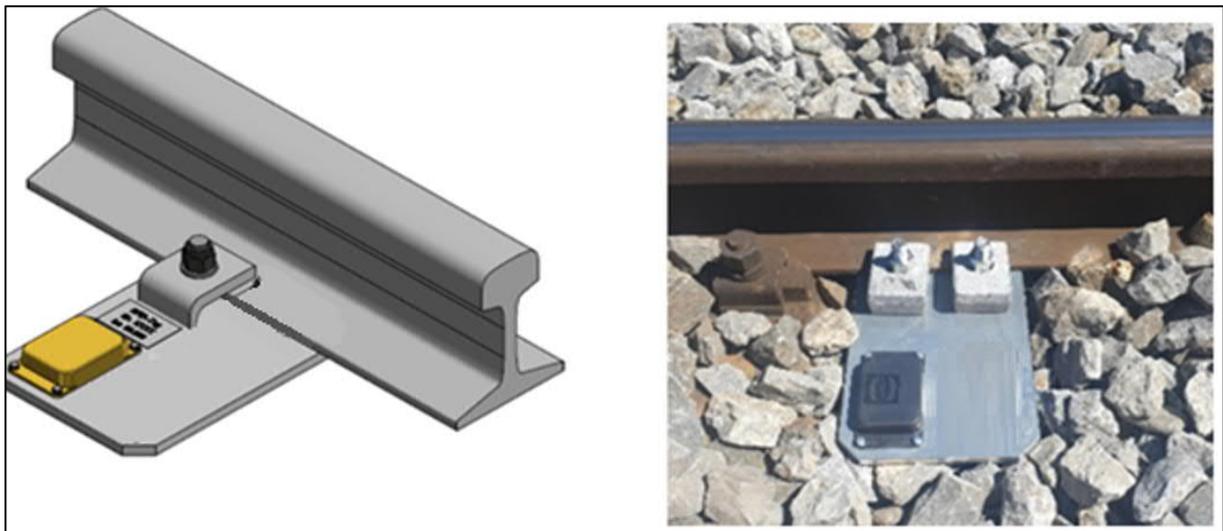


Figure 4: Fixation de l'étiquette RFID aurail : schématiquement à gauche et en réalité à droite

Le conditionnement [2] démarre aussitôt qu'à la fois se présentent les conditions du signal d'enclenchement 5 km/h (la vitesse de marche doit être $>5^{\circ}$ km/h), du poste de conduite armé du véhicule (signal de sens de marche dans la cabine de conduite en direction de Zermatt) et de la non-atteinte du seuil limite d'humidité (l'humidité relative de l'air doit être $< 85\%$).

La localisation des positions de départ (flèche verte) indiquée dans la Figure 5 a été réalisée après le début de l'essai d'exploitation et suite aux premiers retours du personnel d'exploitation. D'autres optimisations pourront être réalisées si nécessaire pendant l'essai d'exploitation, mais jusqu'à présent, elles n'ont pas été effectuées après les corrections initiales et les décisions conformément à la Figure 5. Il est essentiel de s'assurer que dans les sections non soumises au conditionnement, aucun produit de conditionnement n'est appliqué ou entraîné. C'est pourquoi plusieurs balises de départ ont été placées et le nombre de cycles a été limité à deux. Les mesures requises par l'expertise sur les performances de freinage [4] pour la localisation des sections de conditionnement sont couvertes par les dispositions de la Figure 5.

4. Déroulement chronologique des essais d'exploitation [1]

Peu avant le début des essais d'exploitation, les rails entre Täsch et Zermatt ont été meulés. De plus, les roues de tous les véhicules Navette ont été reprofilées. On disposait ainsi d'une situation de départ définie pour suivre l'usure des roues et des rails. Les essais d'exploitation ont ensuite débuté en octobre 2021 et sont donc actifs depuis environ un an au moment de la rédaction du présent rapport final.

Afin de pouvoir évaluer les effets, des mesures et des évaluations correspondantes ont été effectuées sur les roues et les rails, les constatations faites lors des contrôles visuels sur les véhicules et sur la voie ont été documentées, et les expériences tirées du comportement en service ont été consignées. Les résultats sont présentés dans les chapitres 5, 6 et 0.. L'accent a été mis sur la distinction entre les différents aspects de la roue et du rail.

Les essais d'exploitation durent jusqu'à fin octobre 2022 et englobent donc les différentes conditions et influences des quatre saisons.

5. Mesures / surveillance et résultats de l'usure des roues

Afin de pouvoir évaluer l'effet du SKK sur la roue, les différentes valeurs relevées sont examinées en relation avec le SKK. Parmi les valeurs relevées, on trouve l'usure par abrasion des surfaces de roulement (plans de roulement et boudins) des roues motrices et des roues porteuses des Navettes (véhicules BDeh 4/8, chapitre 0), le comportement des profils de roues (chapitre 5.2) et les défauts au plan de roulement sur la circonférence de la roue (chapitre 0). Les résultats des mesures se rapportent aux véhicules Navette (2051 à 2054), car ils sont les seuls à circuler sur le trajet Täsch - Zermatt et donc exclusivement sur les tronçons conditionnés. L'impact du conditionnement sur l'usure des roues des autres véhicules n'a pas été étudié.

5.1. Usure abrasive des roues motrices et porteuses à leurs surfaces de roulement

Les observations et les mesures effectuées sur les essieux montés moteurs et les essieux montés porteurs des Navettes sont décrites ci-dessous. En ce qui concerne l'usure, on distingue d'une part celle au niveau des boudins et d'autre part celle au niveau des plans de roulement. L'évaluation au niveau des boudins concerne la sécurité de conduite et tient compte de leur hauteur (S_h), de leur épaisseur (S_d) et de la forme des flancs de boudin (q_R). L'évaluation des plans de roulement concerne la rentabilité et tient compte des diminutions du diamètre des roues en fonction du kilométrage et de l'évolution des différences de diamètre.

Il faut partir du principe que pour la MGB, à condition que la lubrification des boudins de roue fonctionne correctement, les indicateurs déterminants pour la rentabilité et la disponibilité sont en premier lieu les dommages aux plans de roulement des roues et l'évolution des diamètres des roues. L'évaluation des résultats des essais s'effectue donc à l'aide de l'indicateur "kilométrage en km par réduction de 1 mm du diamètre de la roue" (cf. chapitre "Évaluation des résultats des essais"). 5.1.2). Afin de mettre en évidence l'importance de la modification apportée par le SKK, les résultats de mesure obtenus pour chaque véhicule avant les essais d'exploitation sont comparés à ceux obtenus pendant les essais. Il faut toutefois tenir compte du fait qu'avant et pendant les essais d'exploitation, les véhicules étaient utilisés avec des matériaux de roues différents pour les essieux montés moteurs (TRZ) et, dans un cas, avec des profils de roues nominaux différents (cf. Tableau 1). Les essieux montés porteurs disposent de roues monoblocs et consistent en matériau de roue ER7. L'influence des différents matériaux de roue est abordée ci-dessous.

Véhicule	Profil de roue sans SKK	Profil de roue avec SKK	Matériau de la roue TRZ sans SKK	Matériau de la roue TRZ avec SKK
2051	W98	W98	B5	KVR 600
2052	W98	W98	Excellent	B7T
2053	EV02	W98	B6	B6T
2054	Pas de données	W98	Pas de données	KVR 600

Tableau 1: aperçu des matériaux de roue des véhicules avant (sans SKK) et pendant les essais d'exploitation (avec SKK)

5.1.1. Dimensions du boudin

La Figure 6 et la Figure 7 montrent les dimensions des boudins de toutes les roues de tous les véhicules Navette participant aux essais d'exploitation. Il s'agit de l'état au mois de mai 2022 et de leur évolution depuis le début du reprofilage au début de l'essai d'exploitation avec SKK en octobre 2021. Comme on le verra plus loin, le reprofilage des différents véhicules a eu lieu à des moments différents en octobre 2021. Jusqu'au début des essais d'exploitation (28 octobre 2021), les véhicules ont circulé sans SKK.

Globalement, on constate ce qui suit :

- Les épaisseurs de boudin S_d et la cote q_R n'ont que très peu changé par rapport aux dimensions nominales. En tendance, les épaisseurs de boudin ont légèrement augmenté et se situent en partie légèrement au-dessus de la limite supérieure. Il convient donc de continuer à observer l'évolution de cette dimension. On constate également une légère augmentation de la cote q_R . Pour cette mesure, aucune limite supérieure n'est toutefois indiquée dans les règlements. Ces constatations concernent aussi bien les essieux montés porteurs que les essieux montés moteurs.
- Quant aux hauteurs de boudin S_h , la tendance est légèrement à la hausse, ce qui est dû à l'usure des plans de roulement. Elles sont cependant loin de la limite supérieure. De ce point de vue, les roues disposent d'une réserve d'usure très importante. On peut donc supposer que l'évolution de la durée de vie des roues ne dépend guère de l'atteinte de la hauteur maximale de boudin S_h , mais est déterminée par d'autres paramètres d'influence.
- Les déformations latérales S sont marginales et indépendantes du matériau utilisé pour les roues, et sont également loin de la limite supérieure.
- Les différences de diamètre entre les deux roues de chaque essieu sont parfois considérables. Toutefois, cette question nécessite une étude plus approfondie en raison d'investigations sur le comportement dynamique dans la voie au sein du projet P3 (roue - rail).

Shuttle 2051, 11-05-2022		Dimensionen sortiert nach Objekten													
	Radprofil	Berechne_Diff_Bogel						Berechne_DDiff_Coach						Lfk	
		DDI1	DDA1	DDA2	DDD1	DDD2	DDW1	AR	BR	PH	qR	S	Sd		Sh
LDG-Radsatz_1	Radprofil-1L														
	Radprofil-1R							125,16	0,00	7,72	0,14	26,99	28,07		
	Durchmesser-1L													674,15	
	Durchmesser-1R													673,82	
	D-Diff-1	0,33													
	Radinnenabstand_Achse_1						934,55								
LDG-Radsatz_2	Radprofil-2L							125,45	0,00	7,69	0,08	27,01	27,96		
	Radprofil-2R							125,01	0,00	7,63	0,00	26,78	28,25		
	Durchmesser-2L													673,55	
	Durchmesser-2R													673,37	
	D-Diff-2	0,19													
	DDiLauf1+2		0,33												
	Radinnenabstand_Achse_2						934,64								
TDG-Radsatz_3	Radprofil-3L							125,79	0,00	8,01	0,61	27,57	29,95		
	Radprofil-3R							125,33	0,00	8,05	0,29	26,71	29,86		
	Durchmesser-3L													780,54	
	Durchmesser-3R													781,34	
	D-Diff-3	0,80													
	Radinnenabstand_Achse_3						933,64								
TDG-Radsatz_4	Radprofil-4L							125,58	0,00	7,80	0,34	26,85	28,43		
	Radprofil-4R							125,11	0,00	7,78	0,30	26,78	28,58		
	Durchmesser-4L													782,53	
	Durchmesser-4R													781,97	
	D-Diff-4	0,57													
	Radinnenabstand_Achse_4						934,09								
TDG-Radsatz_5	Radprofil-5L							125,60	0,00	8,05	0,43	27,29	29,90		
	Radprofil-5R							125,50	0,00	7,93	0,29	26,79	30,07		
	Durchmesser-5L													781,67	
	Durchmesser-5R													782,57	
	D-Diff-5	0,70													
	Radinnenabstand_Achse_5						934,35								
TDG-Radsatz_6	Radprofil-6L							125,60	0,00	8,30	0,38	27,05	29,53		
	Radprofil-6R							125,28	0,00	8,08	0,37	26,92	29,85		
	Durchmesser-6L													783,03	
	Durchmesser-6R													782,31	
	D-Diff-6	0,72													
	DDiTrieb			2,00	1,17	2,50									
	Radinnenabstand_Achse_6						934,36								
LDG-Radsatz_9	Radprofil-9L							125,16	0,00	7,75	0,08	26,43	28,40		
	Radprofil-9R							124,91	0,00	7,39	0,00	25,76	28,27		
	Durchmesser-9L													665,03	
	Durchmesser-9R													664,78	
	D-Diff-9	0,25													
	Radinnenabstand_Achse_9						934,59								
LDG-Radsatz_10	Radprofil-10L							125,15	0,00	7,73	0,06	26,55	28,37		
	Radprofil-10R							124,94	0,00	7,64	0,08	26,24	28,31		
	Durchmesser-10L													665,03	
	Durchmesser-10R													665,14	
	D-Diff-10	0,11													
	DDiLauf9+10		0,11												
	Radinnenabstand_Achse_10						934,37								

Shuttle 2052, 24-05-2022		Dimensionen sortiert nach Objekten													
	Radprofil	Berechne_Diff_Bogel						Berechne_DDiff_Coach						Lfk	
		DDI1	DDA1	DDA2	DDD1	DDD2	DDW1	AR	BR	PH	qR	S	Sd		Sh
LDG-Radsatz_1	Radprofil-1L														
	Radprofil-1R							125,20	0,00	8,00	0,23	27,08	29,06		
	Durchmesser-1L							124,90	0,00	8,06	0,00	27,03	29,11		
	Durchmesser-1R													680,76	
	D-Diff-1	0,02												680,74	
	Radinnenabstand_Achse_1						934,27								
LDG-Radsatz_2	Radprofil-2L							124,81	0,00	8,17	0,00	27,27	29,03		
	Radprofil-2R							124,99	0,00	7,98	0,00	27,31	29,06		
	Durchmesser-2L													681,44	
	Durchmesser-2R													681,41	
	D-Diff-2	0,03													
	DDiLauf1+2		0,02												
	Radinnenabstand_Achse_2						934,65								
TDG-Radsatz_3	Radprofil-3L							124,68	0,00	8,12	0,18	26,76	29,48		
	Radprofil-3R							125,05	0,00	7,94	0,00	26,01	28,51		
	Durchmesser-3L													790,62	
	Durchmesser-3R													792,48	
	D-Diff-3	1,87													
	Radinnenabstand_Achse_3						935,06								
TDG-Radsatz_4	Radprofil-4L							125,08	0,00	8,13	0,11	26,91	29,30		
	Radprofil-4R							124,88	0,00	7,10	0,10	26,45	29,37		
	Durchmesser-4L													790,79	
	Durchmesser-4R													790,35	
	D-Diff-4	0,44													
	Radinnenabstand_Achse_4						935,60								
TDG-Radsatz_5	Radprofil-5L							125,10	0,00	7,92	0,14	26,62	29,51		
	Radprofil-5R							125,10	0,00	8,04	0,00	26,26	28,95		
	Durchmesser-5L													790,64	
	Durchmesser-5R													791,59	
	D-Diff-5	0,95													
	Radinnenabstand_Achse_5						934,86								
TDG-Radsatz_6	Radprofil-6L							125,06	0,00	7,67	0,11	26,64	29,18		
	Radprofil-6R							124,88	0,00	8,05	0,16	26,96	29,68		
	Durchmesser-6L													790,91	
	Durchmesser-6R													789,97	
	D-Diff-6	0,94													
	DDiTrieb			2,14	1,62	2,51									
	Radinnenabstand_Achse_6						934,59								
LDG-Radsatz_9	Radprofil-9L							125,15	0,00	8,01	0,16	27,33	29,12		
	Radprofil-9R							125,46	0,00	8,11	0,00	27,16	29,03		
	Durchmesser-9L													680,97	
	Durchmesser-9R													680,93	
	D-Diff-9	0,03													
	Radinnenabstand_Achse_9						934,57								
LDG-Radsatz_10	Radprofil-10L							124,92	0,00	7,94	0,19	27,10	28,96		
	Radprofil-10R							125,08	0,00	8,19	0,06	27,33	29,10		
	Durchmesser-10L													681,48	
	Durchmesser-10R													680,85	
	D-Diff-10	0,63													
	DDiLauf9+10		0,63												
	Radinnenabstand_Achse_10						934,32								

Abbréviation	Désignation Essieu type A	Cote mm	Etat de neuf non chargé		En exploitation sous charge	
			Tolérance supérieure mm	Tolérance inférieure mm	Tolérance supérieure mm	Tolérance inférieure mm
s	Ecartement de cercles de roulement	(1050)				
S_m	Ecartement	989	1	4 ¹⁾	1 ³⁾	-14 ³⁾
A_R	Ecartement des faces internes des roues	935	1	0	1 ³⁾	-2 ³⁾
L	Cote de guidage ¹⁾	(962)				
b	Largeur de la roue	125	1	-1	5	-3
γ	Angle du flanc de boudin	75° ⁴⁾				
S_d	Epaisseur de boudin	27	0		0	-7
S_h	Hauteur du boudin	28		0	10 ²⁾	0

Figure 6: Dimensions des boudins lors de la dernière mesure en mai 2022 (Navettes 2051 & 2052)

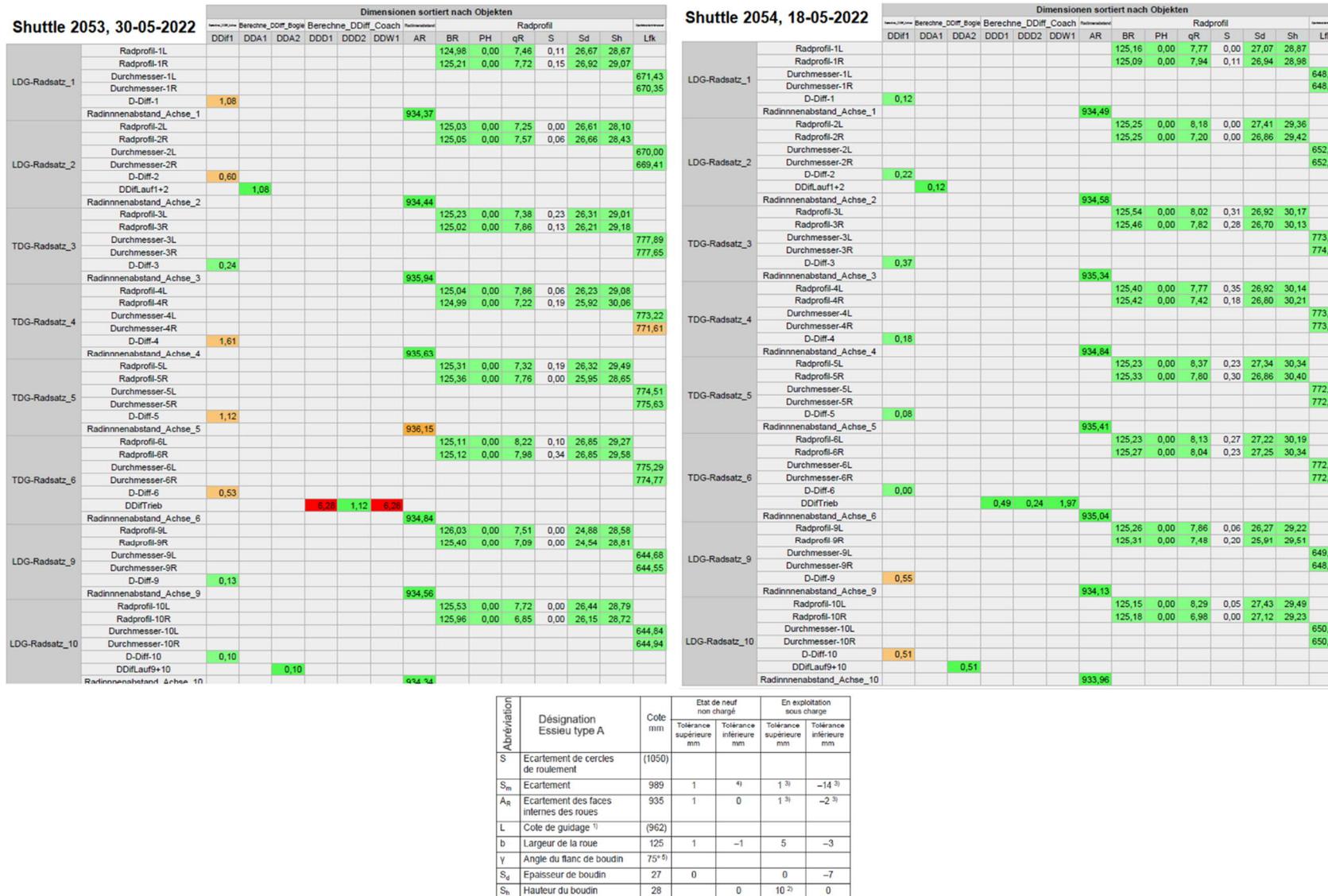


Figure 7: Dimensions des boudins lors de la dernière mesure en mai 2022 (Navettes 2053 & 2054)

5.1.2. Spezifischen Reduktionen der Raddurchmesser ΔD_{LCC}

La Figure 8 et la Figure 9 montrent les réductions spécifiques des diamètres de roue ΔD_{LCC} (kilométrage atteint pour 1mm de réduction de diamètre) pour tous les véhicules Navette, en distinguant les roues gauches et les roues droites,

- sans et avec application du SKK (pour la Navette 2054, aucune valeur de mesure n'était disponible avant l'application du SKK),
- essieux montés porteurs et essieux montés moteurs,
- De différentes nuances d'acier des roues.

Dans les deux figures, les réductions de diamètre spécifiques ont été déterminées sur l'ensemble de la période considérée et non pas entre les différentes mesures. Pour les véhicules des essais d'exploitation avec SKK, les diamètres des roues mesurés sur le tour en fosse et le kilométrage des véhicules au début des essais (lors du reprofilage) et lors de la dernière mesure disponible ont été extraits du tableau de saisie de la MGB. L'indicateur kilométrage par 1 mm d'usure du diamètre a ensuite été calculé à partir de ces résultats de mesure. Une procédure analogue a été choisie pour déterminer les indicateurs avant l'essai d'exploitation avec SKK. Comme nous le verrons plus loin, il faut s'assurer, pour ce type d'évaluation, que les données utilisées à cet effet correspondent statistiquement à la même population. Dans la figure 9 pour les essieux montés porteurs et dans la figure 10 pour les essieux montés moteurs, on constate des évolutions différentes de la réduction du diamètre dans la phase d'essai immédiatement après le reprofilage jusqu'à la mesure suivante et dans la phase d'essai suivante. En raison de cet état de fait, il faut partir du principe que ces deux phases d'essai constituent des populations différentes au sens statistique. A l'exception du véhicule 2053, les autres véhicules de la première phase d'essai ont parcouru une partie significative du kilométrage sur la ligne pas encore conditionnée, immédiatement après le reprofilage et jusqu'au début de l'essai. Cela explique en partie l'usure plus importante des roues avec des coefficients de frottement roue / rail plus élevés dans cette phase d'essai par rapport à l'usure plus faible des roues avec des coefficients de frottement roue / rail nettement réduits par le conditionnement. Pour l'évaluation finale de l'usure des roues suite au conditionnement, la première phase d'essai n'a donc pas été prise en compte.

La Figure 8 montre ΔD_{LCC} d'une part avant le reprofilage sans SKK et d'autre part après le reprofilage avec SKK jusqu'aux dernières mesures disponibles. Pour faciliter la comparaison, les mêmes échelles de mesure ont été choisies pour les axes des ordonnées dans les différents diagrammes pour tous les véhicules (maximum 30'000km).

Pendant la période précédant l'essai d'exploitation, les essieux montés porteurs présentent des kilométrages plus élevés que les essieux montés moteurs, bien que cela soit moins prononcé pour la Navette 2052. Cependant, il convient de noter que pour la Navette

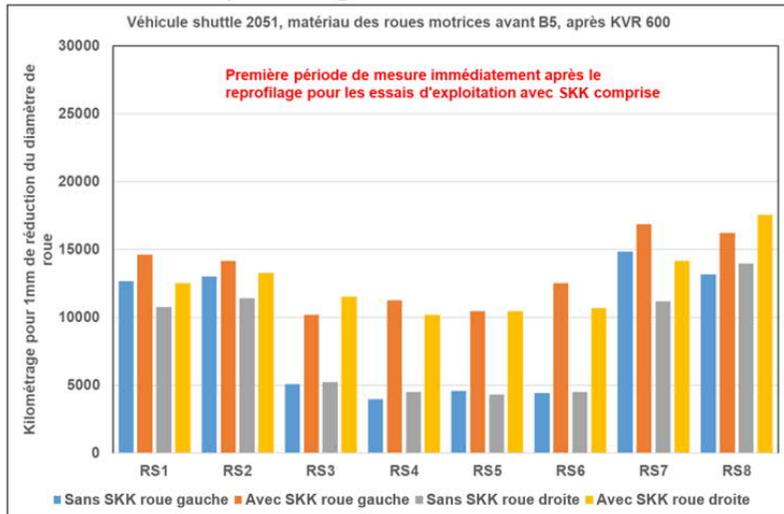
- l'empattement des essieux montés porteurs est nettement plus court que celui des essieux montés moteurs (essieux montés porteurs 1800mm, essieux montés moteurs 2540mm), ce qui entraîne un angle d'attaque roue/rail nettement plus important dans les courbes pour les essieux montés moteurs ;
- la charge brute par roue est environ deux fois plus élevée pour les essieux montés moteurs que pour les essieux montés porteurs

Aucune valeur de mesure n'est disponible pour la Navette 2054 durant cette période. Pour les essieux montés moteurs, les performances du matériau de roue B6 semblent être plus favorables que celles des deux matériaux de roue excellent et B5. Sur la Navette 2054, les roues de l'essieu monté porteur 1 semblent présenter un comportement à l'usure moins favorable que les roues des autres essieux montés porteurs. Cependant, la taille de l'échantillon est trop petite pour tirer des conclusions statistiquement valables concernant l'effet du matériau de la roue sur les essieux montés moteurs. Dans l'ensemble, l'indicateur ΔD_{LCC} augmente significativement en cas d'utilisation du SKK par rapport à l'état avant l'utilisation du SKK.

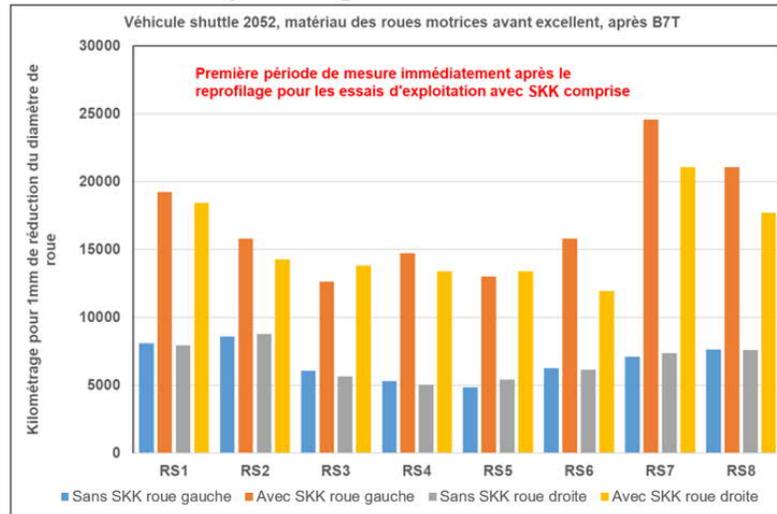
La figure 8 montre les résultats de la première mesure après le reprofilage jusqu'aux dernières mesures disponibles. Pour faciliter la comparaison, les mêmes échelles de mesure ont été choisies pour les axes des ordonnées de tous les véhicules dans les différents diagrammes (maximum 60'000km).

Cette représentation a été choisie parce qu'après le reprofilage et pendant la première période de saisie des valeurs de mesure, une autre tendance à l'usure s'est installée que pendant les périodes suivantes. Pour tous les essieux montés porteurs, l'indicateur augmente de manière significative en cas d'utilisation du SKK par rapport à l'état non conditionné. Pour certaines roues, les performances sont en partie très élevées. Pour les essieux montés moteurs également, on constate, à quelques exceptions près, une nette tendance à des performances nettement plus élevées. Avec l'application du SKK, la Navette 2054 présente également un comportement comparable à celui des autres véhicules. Comme décrit plus haut, le comportement l'essieu porteur 1 diffère nettement de celui des autres essieux montés porteurs.

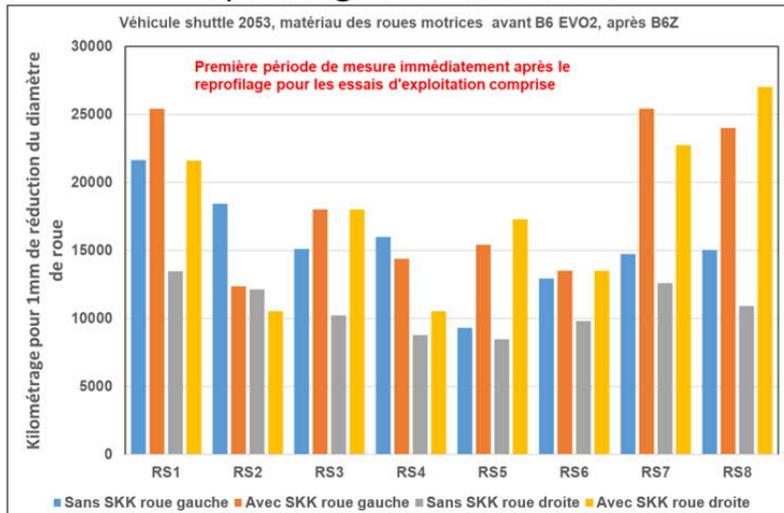
Reprofilage le 07.10.2021



Reprofilage le 11.10.2021



Reprofilage le 22.10.2021



Reprofilage le 01.10.2021

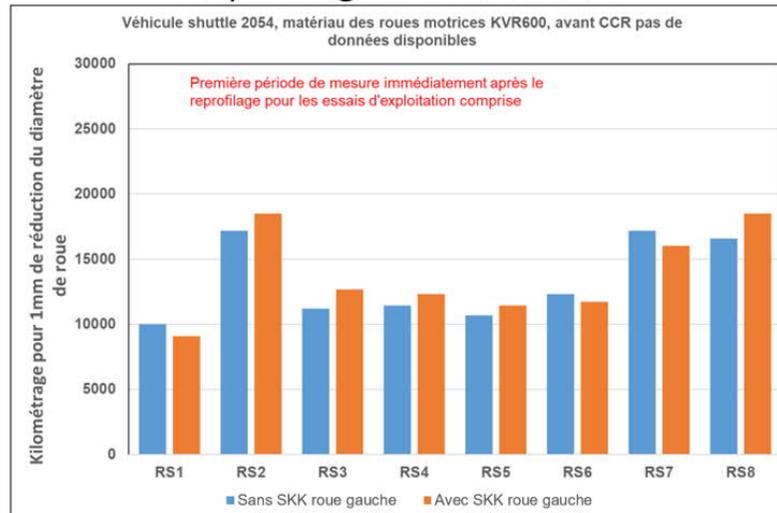
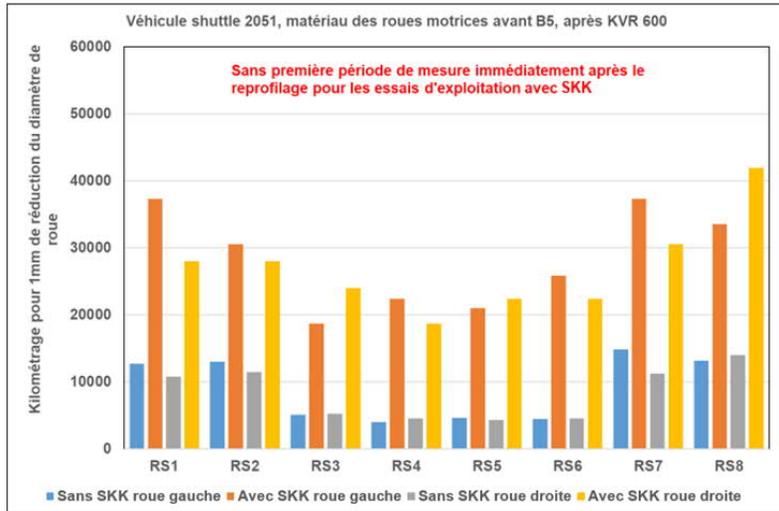
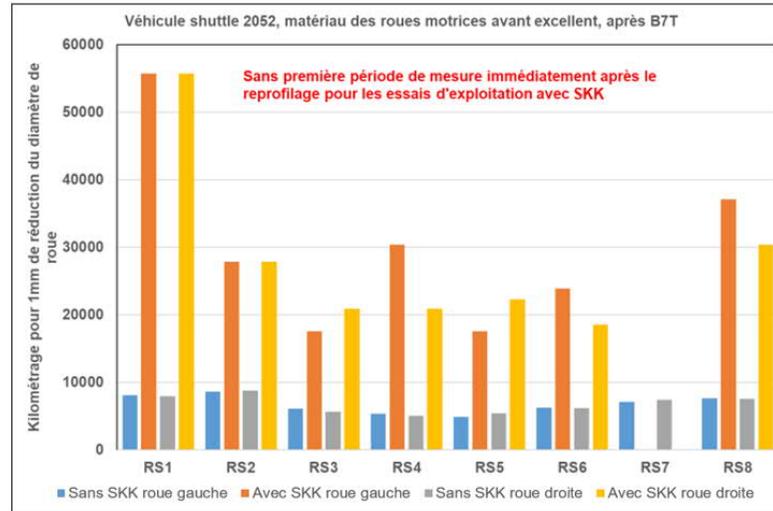


Figure 8: Indicateurs de l'usure spécifique du diamètre de la roue ΔD_{LCC} y compris la première période de mesure

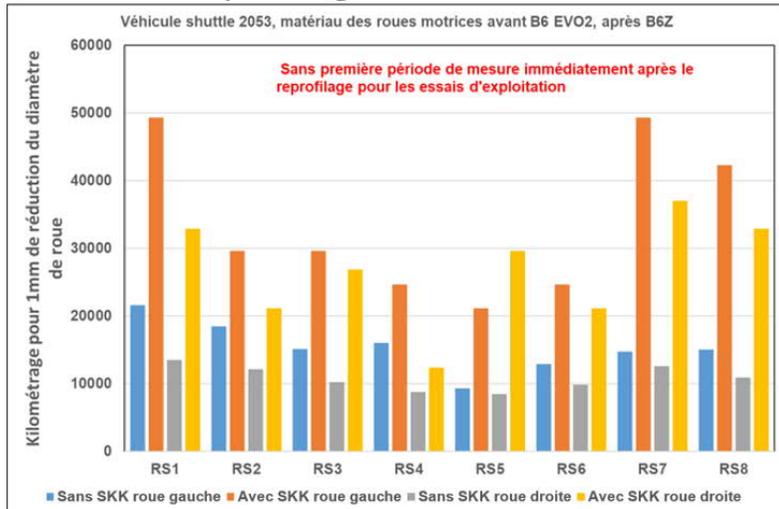
Reprofilage le 07.10.2021



Reprofilage le 11.10.2021



Reprofilage le 22.10.2021



Reprofilage le 01.10.2021

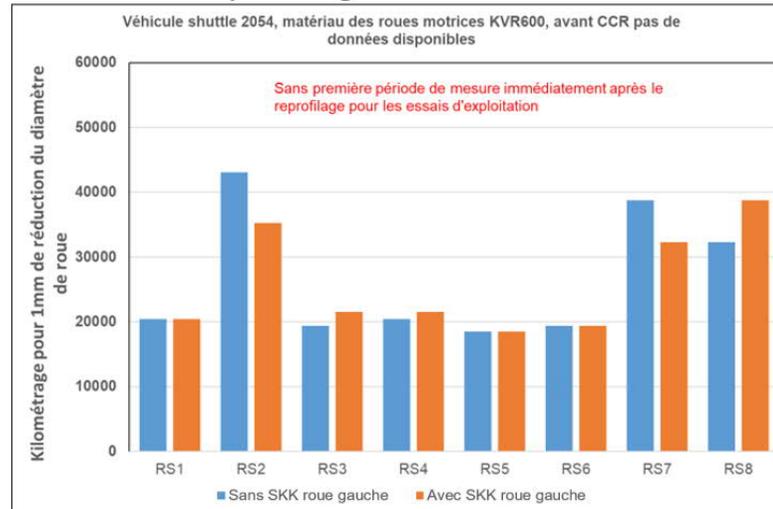


Figure 9: Indicateurs de l'usure spécifique du diamètre de la roue ΔD_{LCC} sans première période de mesure

Les résultats présentés dans la Figure 8 (y compris la première période de mesure) et Figure 9 (à l'exclusion de la première période de mesure) indiquent une tendance similaire de la performance en cas d'application de la méthode du SKK. Pour les indicateurs de la Figure 9 on constate toutefois pour tous les véhicules des valeurs ΔD_{LCC} nettement plus élevées que pour ceux de la Figure 8. La Figure 10 (roues porteuses) et la Figure 11 (roues motrices) montrent les causes de cette différence de comportement. Dans les deux figures, toutes les valeurs mesurées de toutes les roues sont reportées pour tous les véhicules sur l'ensemble de la période d'essai.

La Figure 10 contient toutes les mesures effectuées sur les essieux montés porteurs, en haut, en tenant compte de la première période de mesure, et en bas, toutes les mesures sans celles de la première période de mesure. Pour tous les véhicules, on constate une ligne de tendance plus raide pour la réduction du diamètre, en particulier pendant la première période de mesure (sans SKK), par rapport aux périodes de mesure suivantes (avec SKK). Pour illustrer ce phénomène, les diagrammes correspondants sont présentés ci-dessous sans tenir compte de la première période de mesure.

La Figure 11 présente les résultats correspondants pour les essieux montés moteurs. On constate un comportement comparable à celui des essieux montés porteurs. Une tendance légèrement différente est observée pour la Navette 2053 au cours de la dernière période de mesure. Pour ce véhicule, cette période de mesure coïncide avec l'augmentation du coefficient de frottement constatée lors des mesures tribométriques (voir les figures relatives aux mesures du coefficient de frottement au chapitre 6.2).

Les comparaisons de l'indicateur de réduction du diamètre des roues montrent à quel point celui-ci est sensible à de petites modifications de l'usure. Le changement significatif lors de la première phase d'essai a une très grande influence sur l'évaluation des résultats sur toute la période d'essai. La raison en est, comme on le sait en statistique, le mélange de populations physiques différentes. La Figure 10 et la Figure 11 permettent de déterminer le moment du reprofilage. Celui-ci a eu lieu à des moments différents pour les différents véhicules. Dans Figure 12 on peut voir que les essais d'exploitation avec un rail conditionné ont commencé dans les derniers jours du mois d'octobre 2021 (voir mesures tribométriques du 28.10.2021). Cependant, à l'exception de la Navette 2053, le reprofilage a eu lieu dans la première moitié du mois d'octobre. Les Navettes 2051, 2052 et 2054 ont donc circulé sur la ligne pas conditionnée pendant la première phase suivant le reprofilage. Comme le montrent les diagrammes dans Figure 10 et dans Figure 11, on constate que le diamètre des roues de ces véhicules a été nettement plus réduit durant cette phase que durant les phases suivantes. Cette influence est particulièrement visible si l'on compare le comportement du véhicule 2053, qui n'a été reprofilé que le 22 octobre. Ce résultat montre également que les interruptions ou les perturbations lors du conditionnement ont un impact immédiat sur l'usure. Il est donc important de garantir la fiabilité du système sur le long terme.

Le comportement observé ici est en grande partie dû à la proportion de kilomètres parcourus sur des rails non conditionnés. Lors d'autres essais d'exploitation avec différents matériaux de roues (cf. Comète 2021 / MGB), il s'est toutefois également révélé qu'un ΔD_{LCC} plus important était apparu sur les surfaces de roulement des roues au cours de la première période après le reprofilage que lors de la période suivante. Il n'a pas encore été possible d'expliquer à quoi est dû ce comportement. On suppose que cet effet soit dû au durcissement du matériau de la surface de roulement de la roue sous l'effet des contraintes de service pendant la première phase après le reprofilage.

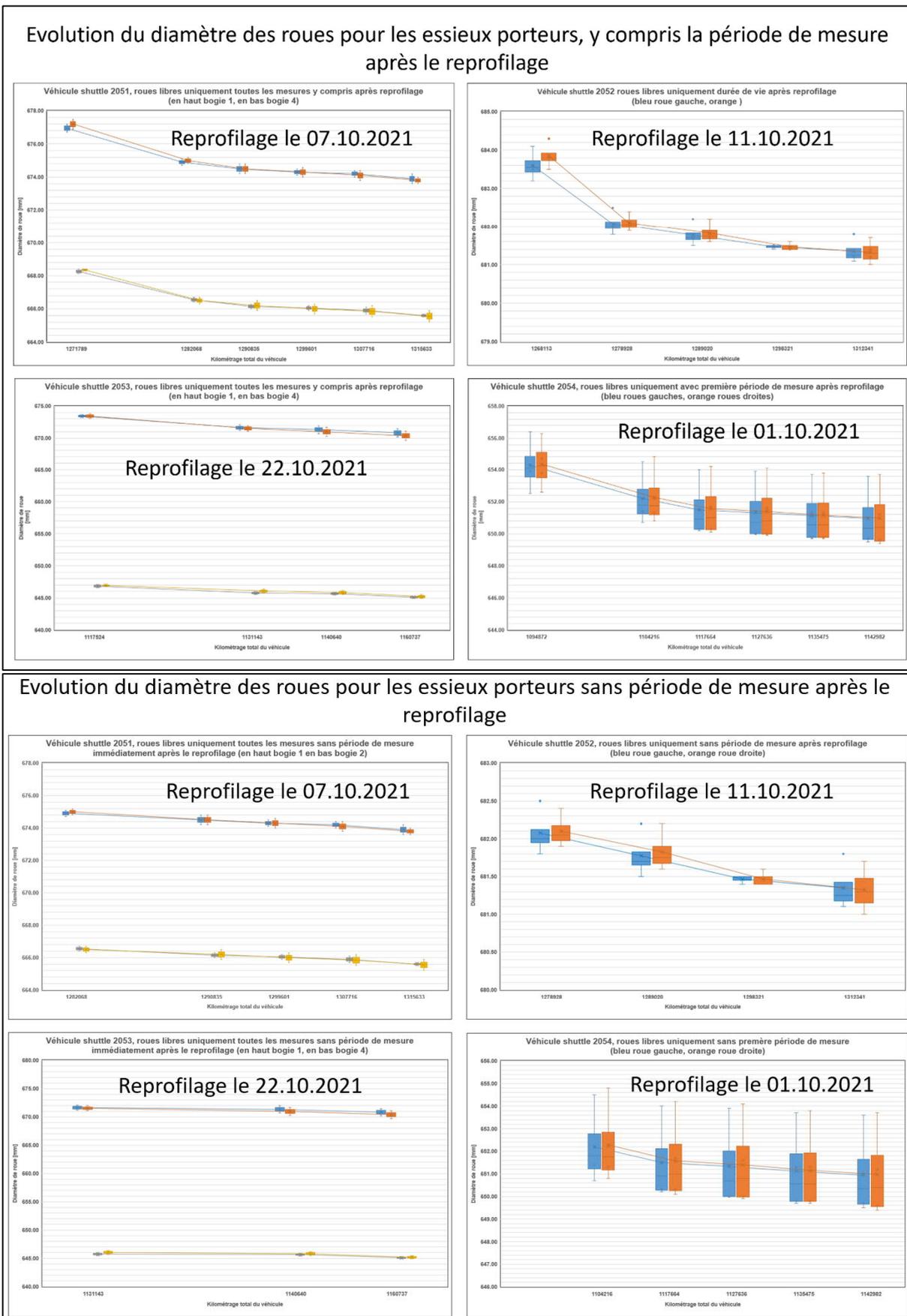


Figure 10: Evolution des diamètres des roues pour les essieux montés porteurs, y compris la première période de mesure après reprofilage en haut et sans la première période de mesure après reprofilage en bas.

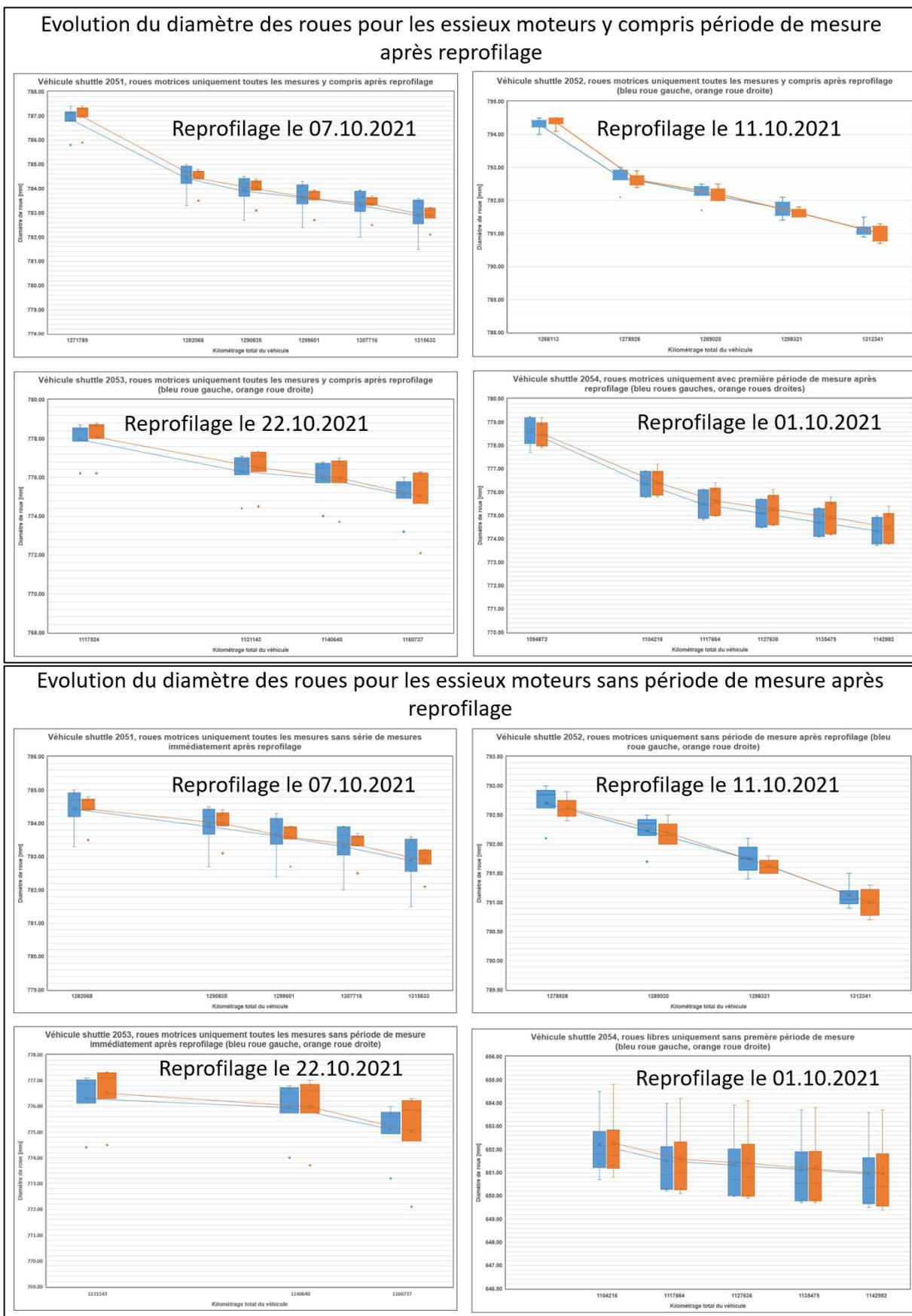


Figure 11: Toutes les mesures d'essieux montés moteurs sans la première période de mesure après reprofilage

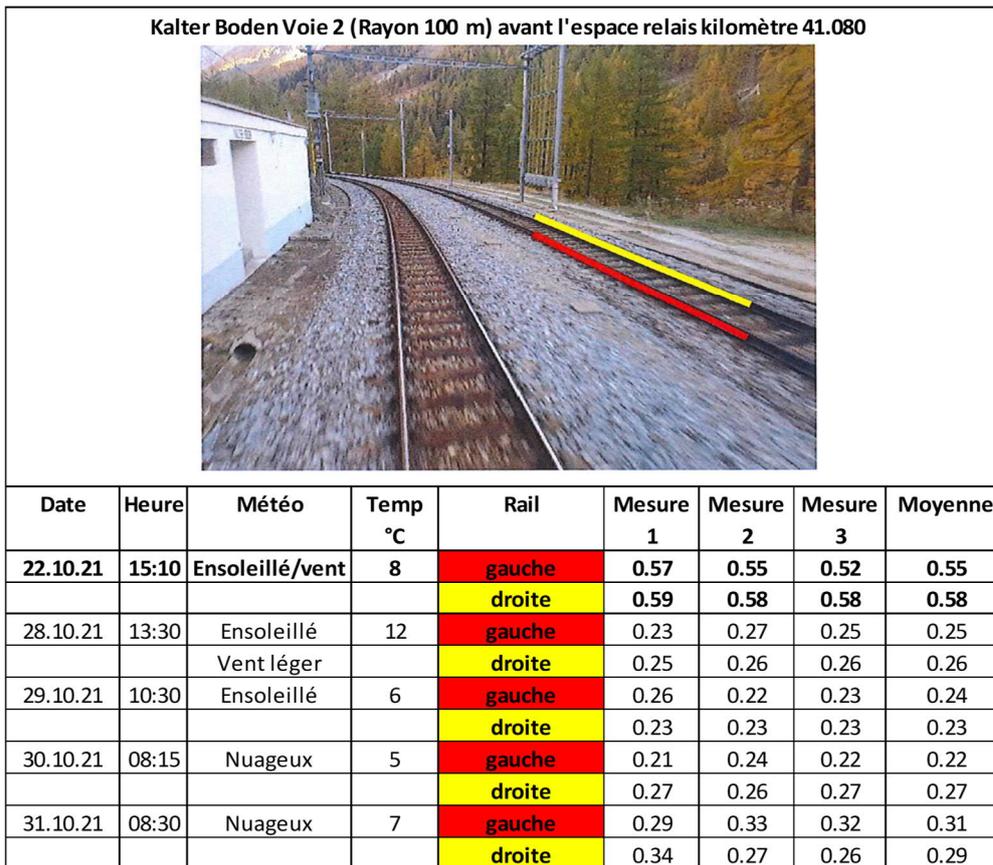


Figure 12: Mesures tribométriques quotidiennement au début des essais d'exploitation

5.1.3. État des surfaces de roulement des roues sur la circonférence de la roue

Avant le début des essais d'exploitation, les collaborateurs de la MGB ont été formés au contrôle visuel des roues et en particulier à l'évaluation de l'état de la bande de roulement. En outre, il a été décidé de la manière dont les inscriptions pour le marquage des roues des différents véhicules devaient être appliquées ou conçues sur leurs surfaces de roulement. Figure 13 en donne un exemple. Si des dommages circonférentiels devaient apparaître, il est possible de les localiser et d'en déduire les causes à l'aide des traits de division (à côté du cercle de mesure et à gauche / à droite).

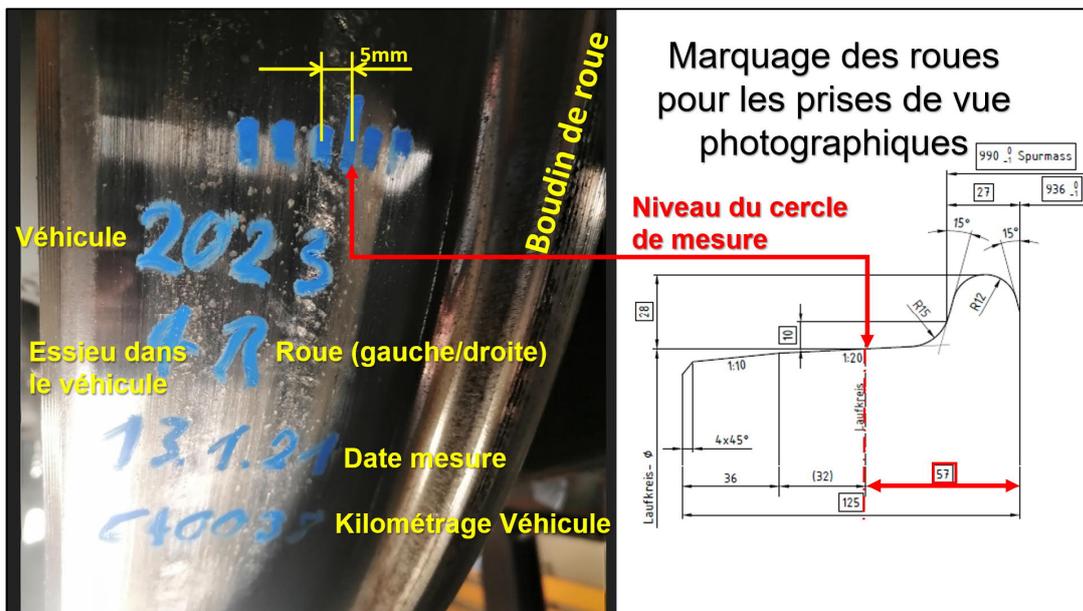


Figure 13: Marquage des roues lors de l'expertise visuelle

Le Tableau 2 contient des informations supplémentaires sur les roues des quatre véhicules Navette. Il indique les matériaux utilisés pour les essieux montés moteurs ainsi que le kilométrage parcouru depuis le dernier reprofilage et donc depuis le début des essais d'exploitation.

Véhicule Navette N°	Matériau de la roue	Kilométrage depuis le reprofilage
2051: Essieux montés moteurs	KVR 600	43844 km
2052: Essieux montés moteurs	B7T	44228 km
2053: Essieux montés moteurs	B6Z	43213 km
2054: Essieux montés moteurs	KVR 600	48110 km

Tableau 2: Informations sur les essieux montés des véhicules Navette en mai 2022

Du Tableau 3 au Tableau 6 sont présentées les illustrations des surfaces de roulement de toutes les roues motrices des différents Navettes. Les zones partielles des roues représentées ici sont représentatives de l'état circonférentiel total des surfaces de roulement de chaque roue. Elles ne comprennent pas les éventuels défauts individuels sur la circonférence de la roue. Celles-ci devraient être détectées par le point de mesure fixe sur la voie (Wheel Monitoring System WMS, MüllerBBM, voir chap. 0) en amont de Täsch ou être signalées par les collaborateurs de la MGB chargés de l'objet. Selon les déclarations de la MGB, aucune détérioration de ce type n'a été constatée, qui serait attribuable au conditionnement des rails. En ce qui concerne les dommages circonférentiels des roues, les constatations suivantes ont été faites :

- Le Tableau 3 montre l'état des roues motrices de la Navette 2051. Sur trois des huit roues, aucun dommage de type RCF (fatigue des contacts de roulement) n'a été constaté sur les surfaces de roulement. Sur les autres roues, on constate en grande partie des dommages légers à très légers et, sur une roue, des dommages moyens. Parmi les dégradations légères, on constate des fissures superficielles dans les zones où il existe un risque de formation d'écailllements à un stade avancé. Aucune mesure ne doit être prise dans un premier temps sur les roues présentant des dommages. L'évolution des dégradations doit toutefois être suivie par des observations plus approfondies.
- Le Tableau 4 montre l'état des roues motrices de la Navette 2052. Aucune roue ne présente de dommages sur les surfaces de roulement.
- Le Tableau 5 montre l'état des roues motrices de la Navette 2053. Sur un total de huit roues, on constate des dommages de type RCF [11] sur deux d'entre elles. Sur l'une des roues endommagées, on constate de légères détériorations (fissures de surface) et sur l'autre des détériorations moyennes (légers éclats). Comme pour la Navette 2051, aucune mesure n'est nécessaire pour ces roues, mais une observation supplémentaire s'impose.
- Le Tableau 6 montre l'état des roues motrices de la Navette 2054. Aucune roue ne présente de dommages sur les surfaces de roulement.

Dans l'ensemble, les roues de tous les véhicules sont visuellement en très bon état. Ce constat est valable indépendamment du matériau utilisé pour les roues.

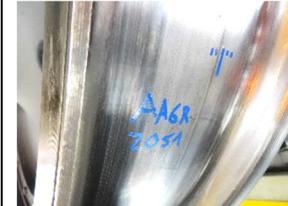
État de la bande de roulement de la Navette 2051 avec matériau de roue KVR 600 le 11.05.2022			
Roue 3 gauche RCF léger	Roue 3 droite Pas de détérioration	Roue 4 gauche RCF moyen	Roue 4 droite RCF léger
			
Roue 5 gauche RCF léger	Roue 5 droite RCF très léger	Roue 6 gauche Pas de détérioration	Roue 6 droite Pas de détérioration
			

Tableau 3: Etat visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 43 844 km après le reprofilage

État de la bande de roulement de la Navette 2052 avec matériau de roue B7T le 24.05.2022			
Roue 3 gauche Pas de détérioration	Roue 3 droite Pas de détérioration	Roue 4 gauche Pas de détérioration	Roue 4 droite Pas de détérioration
			
Roue 5 gauche Pas de détérioration	Roue 5 droite Pas de détérioration	Roue 6 gauche Pas de détérioration	Roue 6 droite Pas de détérioration
			

Table 4: Etat visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 44'228 km après le reprofilage

État de la bande de roulement de la Navette 2053 avec matériau de roue B6Z le 30.05.2022			
Roue 3 Gauche RCF léger 	Roue 3 Rechts Pas de détérioration 	Roue 4 Gauche Pas de détérioration 	Roue 4 Droite RCF moyen 
Roue 5 Gauche Pas de détérioration 	Roue 5 Droite Pas de détérioration 	Roue 6 Gauche Pas de détérioration 	Roue 6 Droite Pas de détérioration 

Tableau 5: État visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 43 213 km après le reprofilage

État de la bande de roulement de la Navette 2054 avec matériau de roue KVR 600 le 19.05.2022			
Roue 3 Gauche Pas de détérioration 	Roue 3 Droite Pas de détérioration 	Roue 4 Gauche Pas de détérioration 	Roue 4 Droite Pas de détérioration 
Roue 5 Gauche Pas de détérioration 	Roue 5 Droite Pas de détérioration 	Roue 6 Gauche Pas de détérioration 	Roue 6 Droite Pas de détérioration 

Tableau 6: État visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 48 110 km après le reprofilage

5.1.4. État des surfaces de roulement des roues dans le sens transversal

5.1.4.1. Profil de portance dans le profil transversal des roues

Dans l'ensemble, les contrôles visuels des roues permettent de constater que les bandes de roulement sont en très bon état. Dans une zone de transition qui doit encore être examinée de plus près, de petites fissures isolées, toutefois partiellement floues, sont observées (voir Figure 14 et Figure 15)

- entre la zone abrasée essentiellement par le sabot de frein et
- celle due à l'usure prépondérante causée par le contact lié au glissement transversal entre la roue et le rail.

Ces fissures apparaissent dans la même zone sur toute la circonférence de la roue et sont dues à la fatigue du contact de roulement. Dans certains cas, ces fissures continuent à se développer et entraînent par la suite de petits écailllements (voir Figure 16). Ce phénomène touche surtout les Navettes 2051 et 2054, qui sont équipés du matériau de roue KVR 600. Ce phénomène de formation locale de fissures suivies de légers écailllements a déjà été observé lors des essais d'exploitation avec les nuances B7T et B6Z sur les Comètes. Il semble toutefois qu'un équilibre s'y établisse entre les dommages et l'usure. Lors d'un "reprofilage préventif" à ce sujet sur la Comète 2021, il s'est révélé que cette dégradation était déjà éliminée à partir d'une épaisseur de copeau de 0,4 mm. Ce dommage a été éliminé par une usure normale en exploitation. Cette usure fait maintenant manifestement défaut à la suite du conditionnement en exploitation des véhicules Navette. C'est pourquoi il convient de continuer à observer ces roues et, en cas de constatation d'anomalies, de faire appel à un expert pour expertise.

Globalement, la question se pose ici de savoir pourquoi il y a formation de fissures dans la zone observée. De nombreux essais et essais d'exploitation avec des sabots de frein en matériau composite sur les véhicules du transport de marchandises (réduction du bruit par le passage de sabots de frein en fonte grise à des sabots de frein en matériau composite) ont montré que les sabots de frein en fonte grise ne participent guère à l'usure des roues et qu'elles s'adaptent ensuite aux surfaces de roulement des roues en raison d'une forte usure propre. Cependant, il s'est également avéré qu'il existe différentes qualités de sabots de frein en matériau composite. Ces sabots de frein se comportent de manière très résistante à l'usure (favorable à leur durée de vie), mais attaquent ensuite les surfaces de roulement des roues et les usent plus ou moins selon la qualité du sabot de frein. Cela signifie également que, dans certaines circonstances, le profil de la roue s'adapte davantage à la forme du sabot de frein qu'à celle du rail. Cet aspect devrait être examiné de plus près, car on suppose qu'il ait une influence sur le développement des profils de roue et sur les dommages subis par les surfaces de roulement des roues.

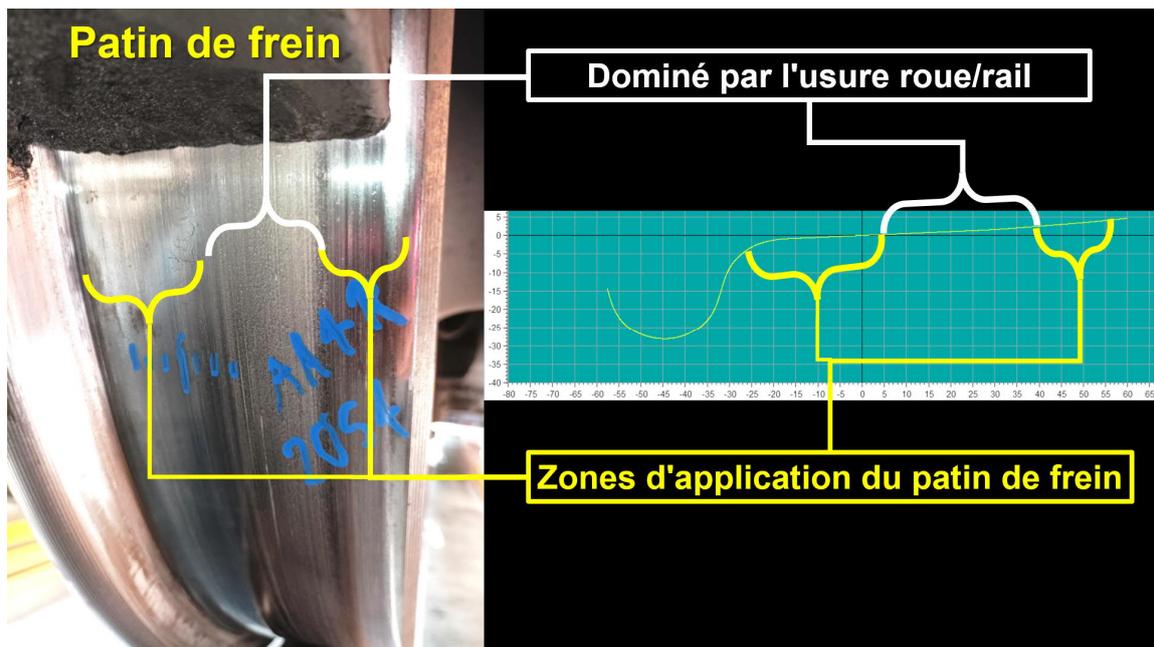


Figure 14: Zones dans le profil transversal des roues et leur origine (sabot de frein CoFren C333)

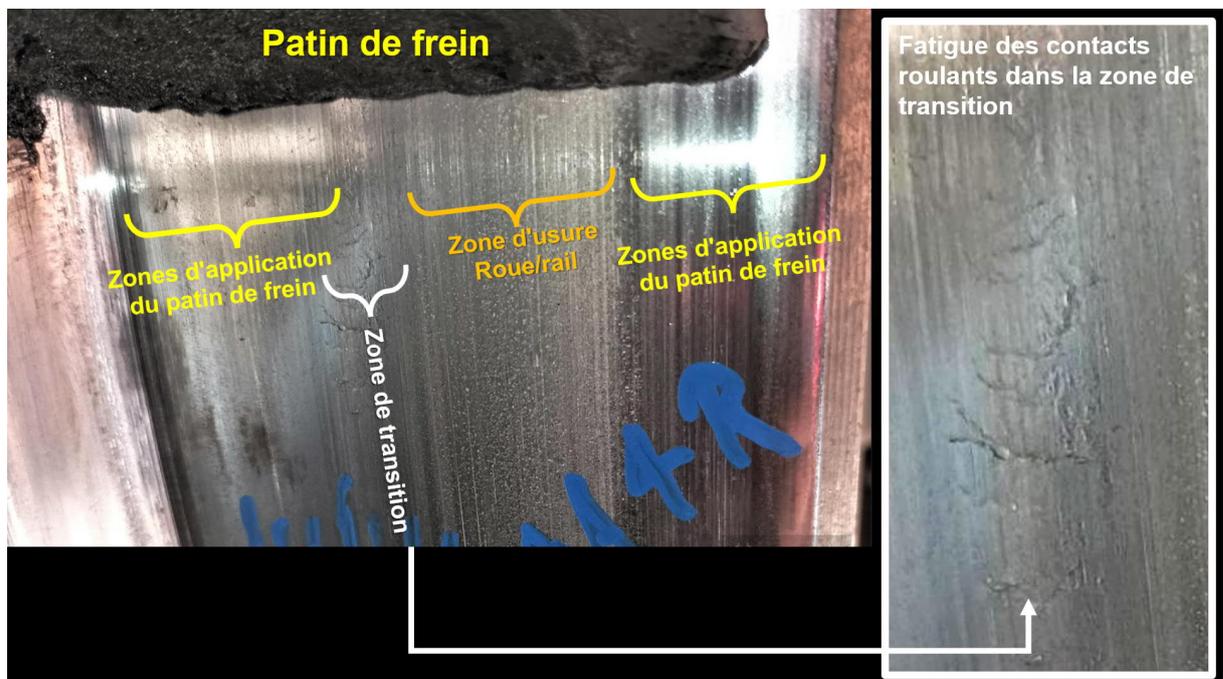


Figure 15: Formation de fissures dans la zone de transition entre le sabot de frein (CoFren C333) et la zone d'usure par glissement transversal



Figure 16: Les fissures dans la zone de transition se sont transformées en légers écailllements

La Figure 17 montre à gauche les profils de Δr de tous les essieux montés de la Navette 2051, 43'844km après reprofilage. Pour comparaison, le côté droit montre l'évolution du profil nominal en exploitation. Cette comparaison démontre, pratiquement aucun changement par rapport au profil nominal. De plus, on constate un comportement identique pour tous les essieux montés. Il faut partir du principe qu'en raison du taux de frottement roue/rail plus faible, dans les courbes plus étroites il n'y a pas d'adaptation des profils de roue aux profils de rail. Il faut également tenir compte du fait que dans la zone contre la gorge, qui est décisive pour l'évolution de la fonction Δr , on suppose qu'une part non négligeable de l'usure est due à l'action des sabots de frein. De plus, lors de l'évolution de la fonction Δr dans les courbes, les roues extérieures menantes sont en contact avec deux points simultanément (cf. Figure 18).

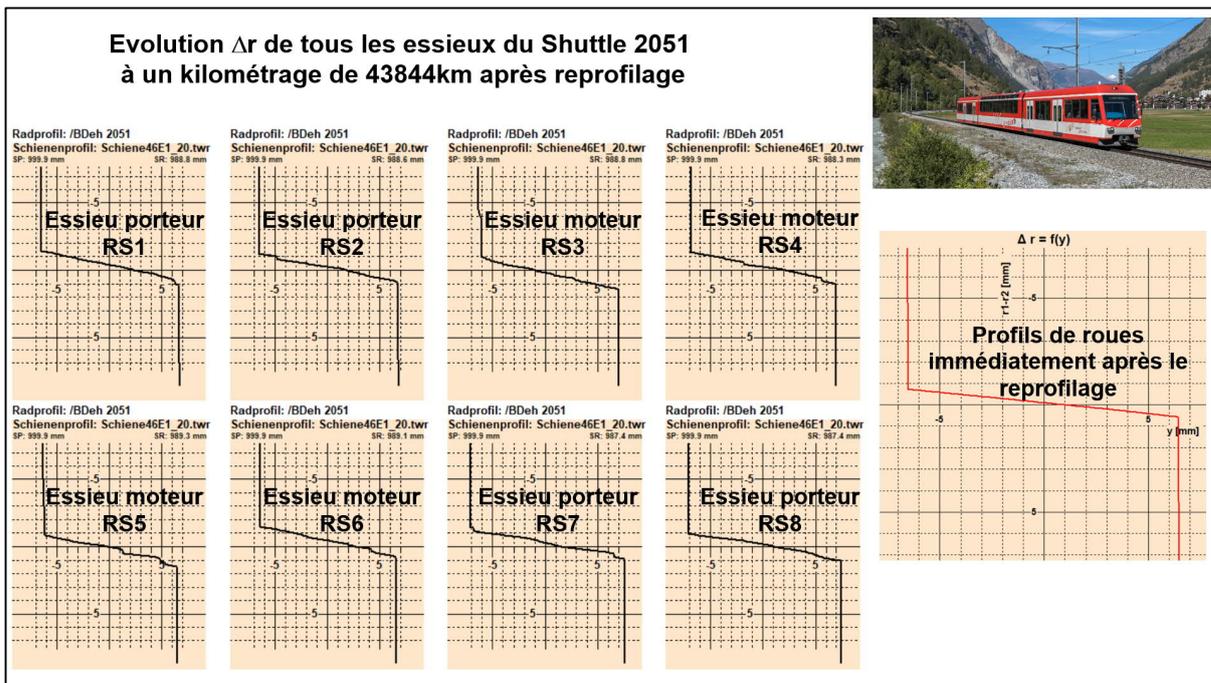


Figure 17: Profil Δr de la Navette 43'844km après reprofilage sur la ligne conditionné Täsch-Zermatt

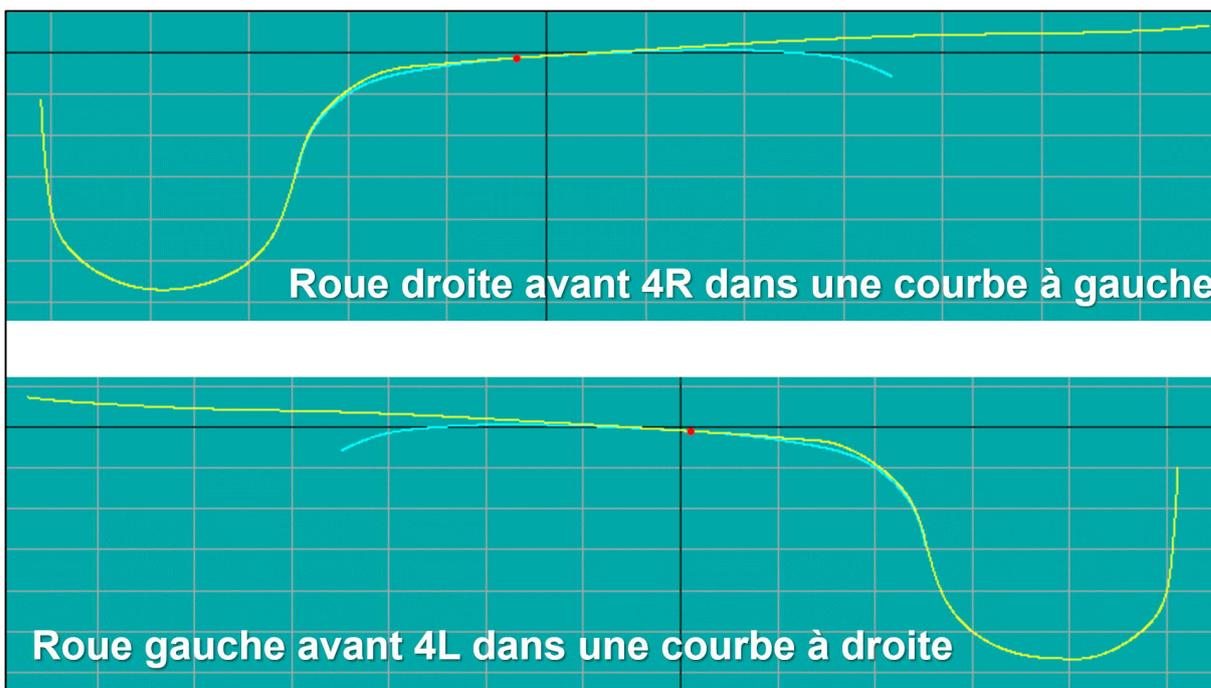


Figure 18: contact en deux points lors de la circulation en courbe, à l'exemple du 4e essieu (essieu moteur) de Figure 17

5.1.4.2. Discontinuités dans le profil transversal des roues

Outre les discontinuités dans la surface de roulement des roues mentionnées ci-dessus, des discontinuités beaucoup plus prononcées ont été constatées dans la zone des gorges sur plusieurs essieux montés. La Figure 19 montre une discontinuité importante sur la roue gauche et une discontinuité plus légère sur la roue droite du 3ème essieu de la Navette 2054. Dans les deux cas, ces discontinuités sont dues à l'action des sabots de frein. La Figure 20 montre l'effet de la discontinuité sur la roue gauche lorsque celle-ci doit s'épouser avec le rail extérieur dans une courbe à droite. Le creux qui apparaît ici a une grande influence sur le comportement en courbe dans toutes les zones de tracé et ne peut pas être atténuée par l'usure de la roue et du rail. Un reprofilage serait ici nécessaire.

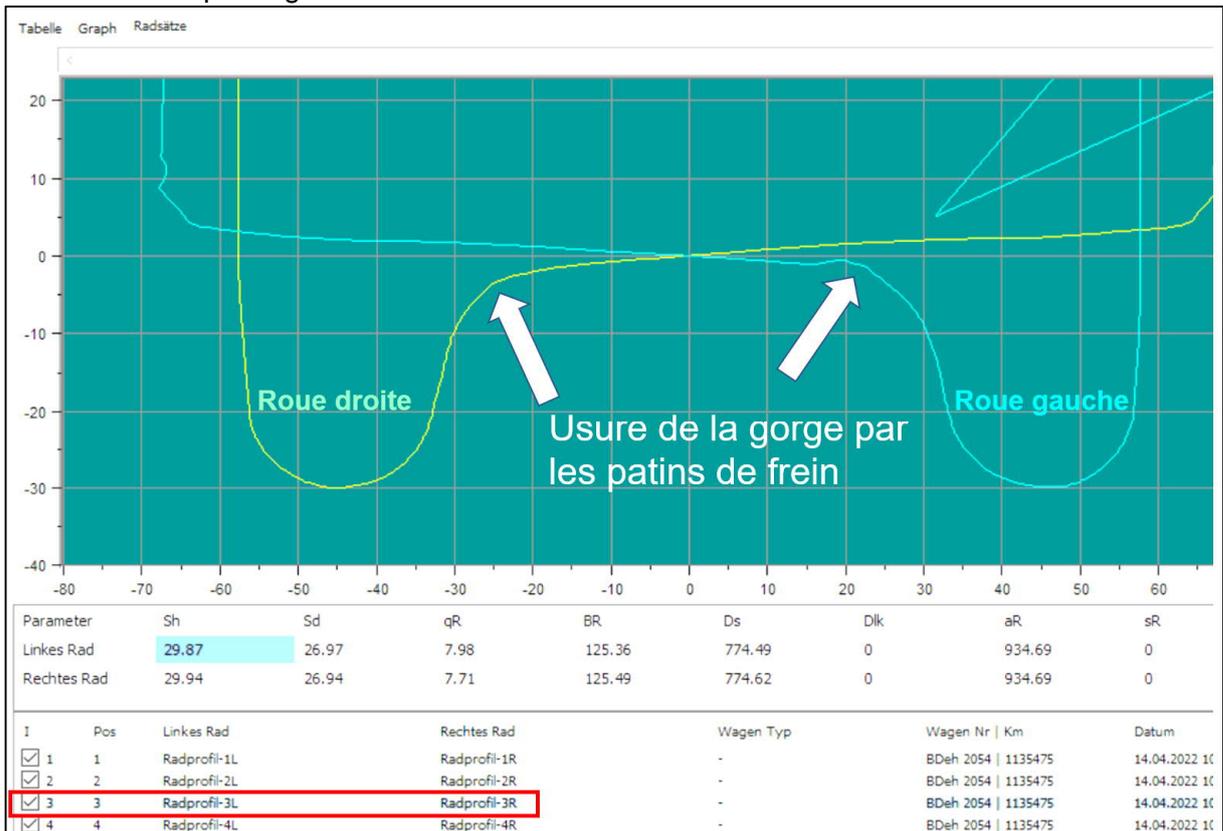


Figure 19: Forte discontinuité sur la roue gauche et légère discontinuité sur la roue droite de l'essieu 3 de la Navette 2054 (causées par l'interaction roue / sabot de frein)

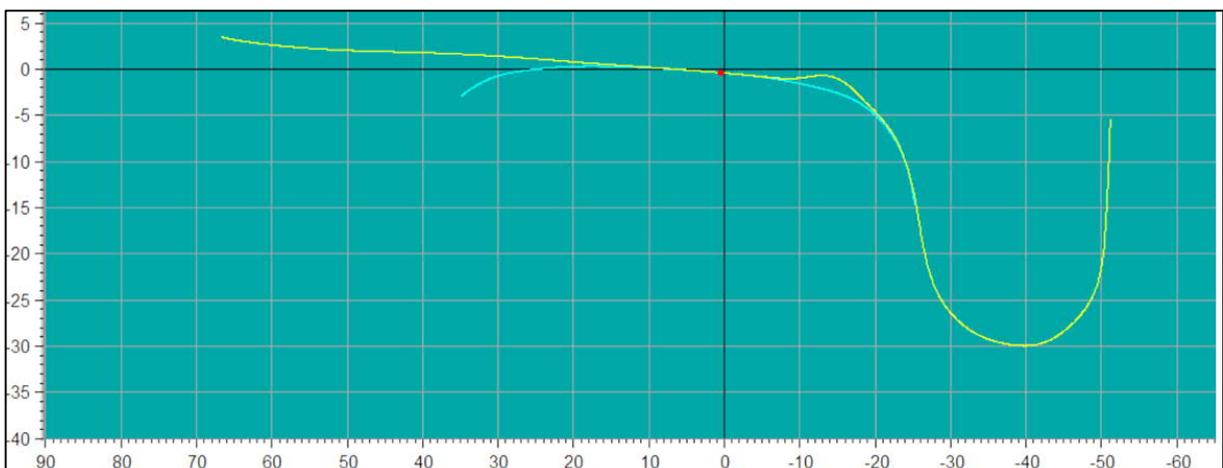


Figure 20: Situation du contact roue / rail lorsque l'essieu est en tête dans une courbe à droite

Le 4e essieu de la Navette 2054 présente également de légères discontinuités au niveau des gorges des deux roues (Figure 21). Celles-ci se répercutent également sur la course en courbe et sont dues à l'interaction roue / sabot de frein.

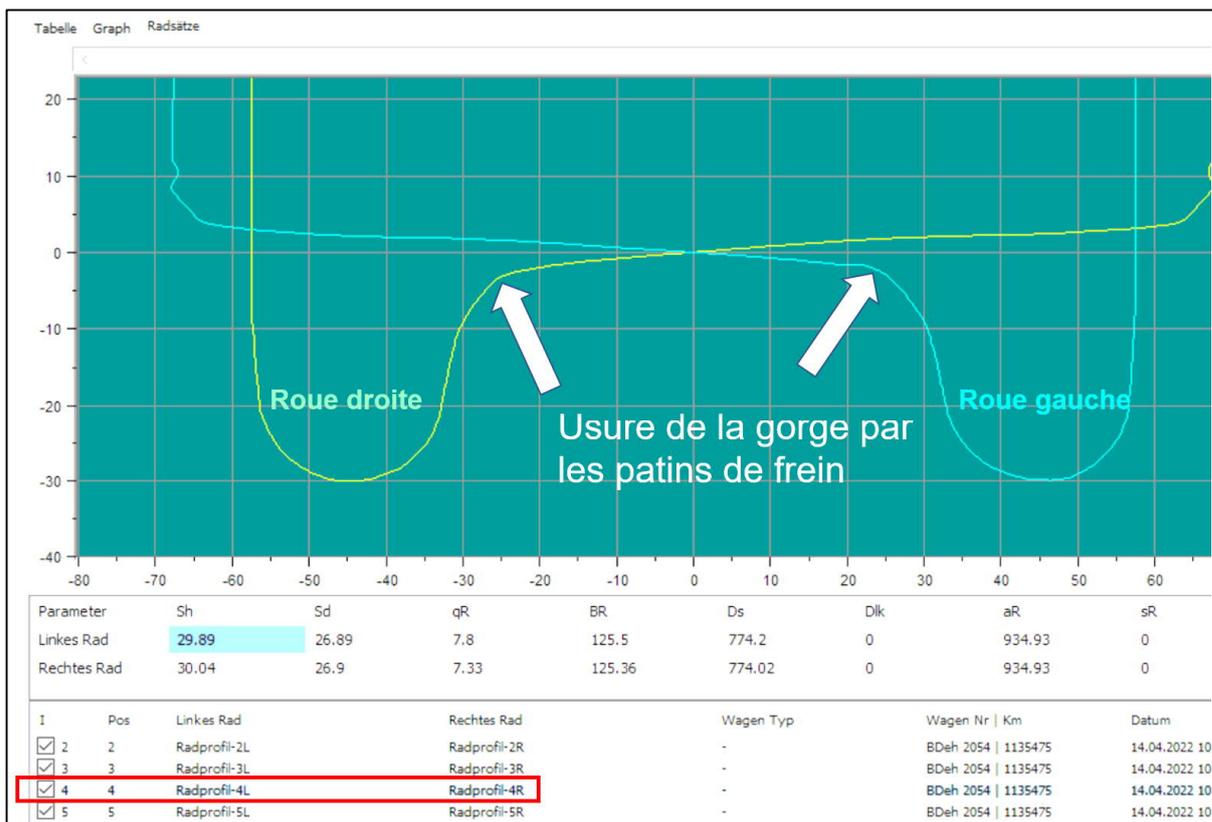


Figure 21: Légères discontinuités sur les deux roues de l'essieu 4 dans la zone de la gorge (causées par l'interaction roue / sabot de frein).

La Figure 22 montre une discontinuité créée par le sabot de frein sur le flanc du boudin de la roue droite du 8ème essieu de la Navette 2053. La roue droite est représentée en jaune sur la figure. La roue gauche du même essieu est représenté en rouge, en miroir. Aucune discontinuité n'est visible sur la roue gauche. La discontinuité n'exerce aucune influence sur le comportement en courbe. Toutefois, selon la réglementation en vigueur, les discontinuités ne sont pas autorisées dans cette zone du flanc du boudin. Cet aspect sera examiné de manière approfondie dans le cadre des travaux du projet P3.

Les discontinuités dont il est question dans ce paragraphe n'ont pas été détectées lors de l'enregistrement des profils de roues ni lors de leur contrôle visuel. Comme ces discontinuités sont également détectables lors de la mesure avec Calipri C42, le personnel de maintenance devrait être sensibilisé à ces phénomènes. Comme les véhicules concernés se trouvaient à Glis sur la fosse au moment de la détection des discontinuités, il a été possible de les observer visuellement sur la base d'indications ciblées et d'images transmises en conséquence, et d'en déterminer les causes sur place. L'interaction roue / sabot de frein, altérée par les sabots de frein, a alors été constatée sous le véhicule.

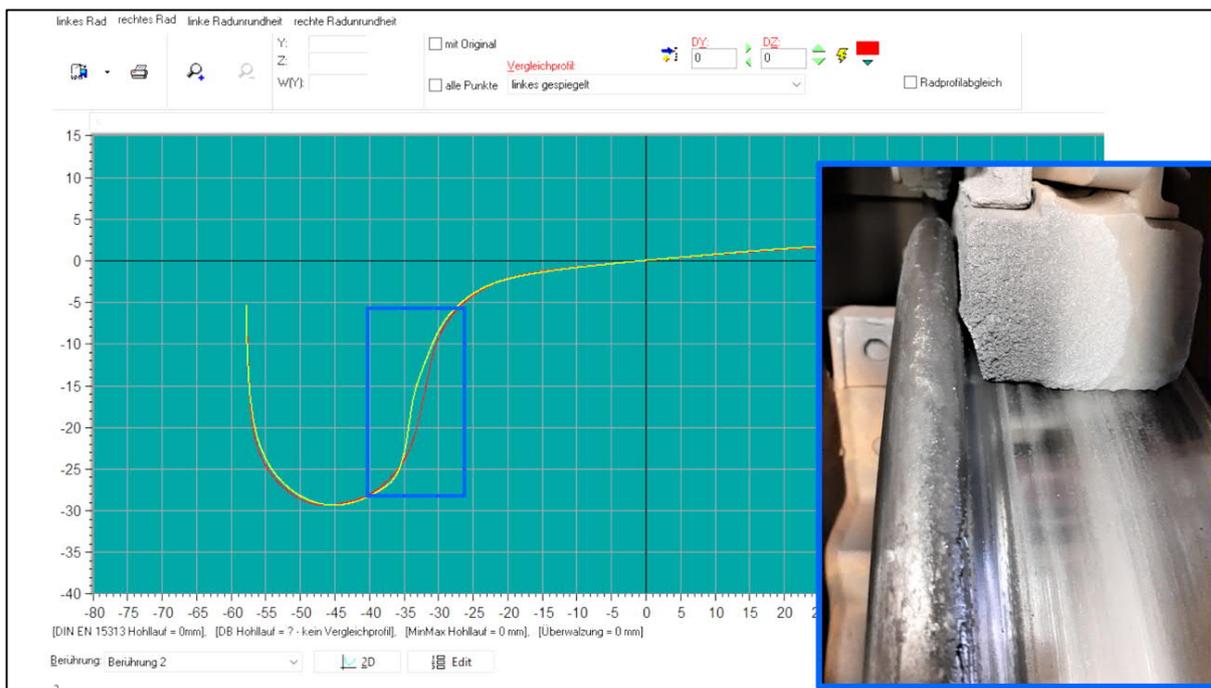


Figure 22: Discontinuité au niveau du boudin de la roue droite de l'essieu 8 de la Navette 2053

5.2. Géométrie de contact

La géométrie de contact est considérée ici de différents points de vue. Il s'agit d'une part des fonctions géométriques de contact que sont la différence de rayon de roulement et la conicité équivalente ainsi que toutes les variations qui en découlent en fonction des valeurs de référence de performance. Étant donné que tous les véhicules d'essai d'exploitation (Navette) se ressemblent en ce qui concerne le contact entre la roue et le rail, les résultats de la géométrie de contact ont été présentés en prenant en compte l'une des quatre Navettes. Pour pouvoir établir la comparaison rail conditionné / non conditionné, on a fait appel à la Comète 2021, qui se trouve depuis environ un an, pour d'autres raisons, en phase d'essai d'exploitation à la MGB et qui est soumise régulièrement à des contrôles visuels et à des mesures de profil. Les appariements roue/rail ont été effectués pour les essieux montés avec des profils de roue réels (à l'exception du profil nominal) et pour le rail, par manque de profils de rail réels, avec le profil de rail théorique CFF I avec un écartement de 1000m et une inclinaison des rails de 1/20.

5.2.1. Géométrie de contact Navette

La Figure 23 montre les fonctions Δr de tous les essieux montés de la Navette 2053 après un kilométrage de 43'213km après reprofilage. Du côté droit sont représentées toutes les évolutions et en haut à gauche la comparaison entre tous les essieux montés porteurs (rouge) et les essieux montés moteurs (bleu). En bas à gauche est représentée l'évolution du profil nominal W98. De manière générale, il en résulte les constatations suivantes :

- Les profils Δr dans la zone de la surface de roulement jusqu'au début de la gorge présentent une évolution similaire, indépendamment du type d'essieu (porteur/moteur). Par rapport au profil nominal, la courbe est devenue légèrement plus raide en utilisation opérationnelle, ce qui indique une augmentation de la conicité équivalente.
- Les écartements entre boudins sont proches parmi les essieux montés moteurs, ce qui indique une usure réduite du flanc de la roue pour toutes les roues de ce type d'essieu. Pour deux des quatre essieux montés, les écartements entre boudins sont nettement plus élevés que pour les deux autres. Pour ces dernières, ils sont proches de ceux des essieux montés moteurs.
- A l'exception des essieux montés moteurs 4 et 5 (asymétriques), les profils Δr sont symétriques par rapport au point de départ. Pour les caractéristiques symétriques, on

peut partir du principe que les diamètres des deux roues d'un même essieu sont presque identiques. Dans le cas des caractéristiques asymétriques, il existe des différences de diamètre plus importantes entre les deux roues du même essieu. L'asymétrie est nettement plus importante pour l'essieu 4 que pour l'essieu 5.

- La transition entre la surface de roulement de la roue et les valeurs Δr plus élevées dans la zone gorge / boudin est caractérisée pour toutes les roues par un coude et une augmentation abrupte de la fonction Δr qui suit immédiatement. Pour les profils de roue réels, le coude se situe à un Δr légèrement supérieur à celui du profil nominal. Cela indique que le profil nominal est modifié lors de l'utilisation en service.
- L'altération du profil de roue se fait également ressentir sur certaines roues par la discontinuité qui se dessine légèrement dans la "section à forte progression" de la fonction Δr .

La Figure 24 montre les fonctions $\tan\gamma_e$ de tous les essieux montés de la Navette 2053 après un kilométrage de 43'213km après reprofilage. Toutes les évolutions sont représentées du côté droit et la comparaison entre tous les essieux montés porteurs (rouge) et les essieux montés moteurs (bleu) est représentée en haut à gauche. En bas à gauche, l'évolution du profil nominal W98 est représentée. Bien que les avis scientifiques divergent à ce sujet, la valeur de la conicité équivalente pour une amplitude d'essieu de 3 mm est utilisée pour l'interprétation. Il en résulte en principe les constatations suivantes :

- Jusqu'à une amplitude d'essieu de 3 mm, les fonctions de 7 essieux montés sur 8 évoluent de manière identique et sans dispersion notable.
- L'essieu moteur 4 s'écarte de cette tendance. Cela s'explique par l'écart plus important entre les diamètres des deux roues d'un même essieu. En conséquence, la conicité équivalente de cet essieu est un peu plus de deux fois supérieure à celle des autres essieux montés.
- Pour les autres essieux montés, la conicité équivalente a doublé par rapport au profil nominal. Cela indique que le profil nominal est altéré en service. Ce fait est ainsi confirmé par les deux caractéristiques Δr et $\tan\gamma_e$.

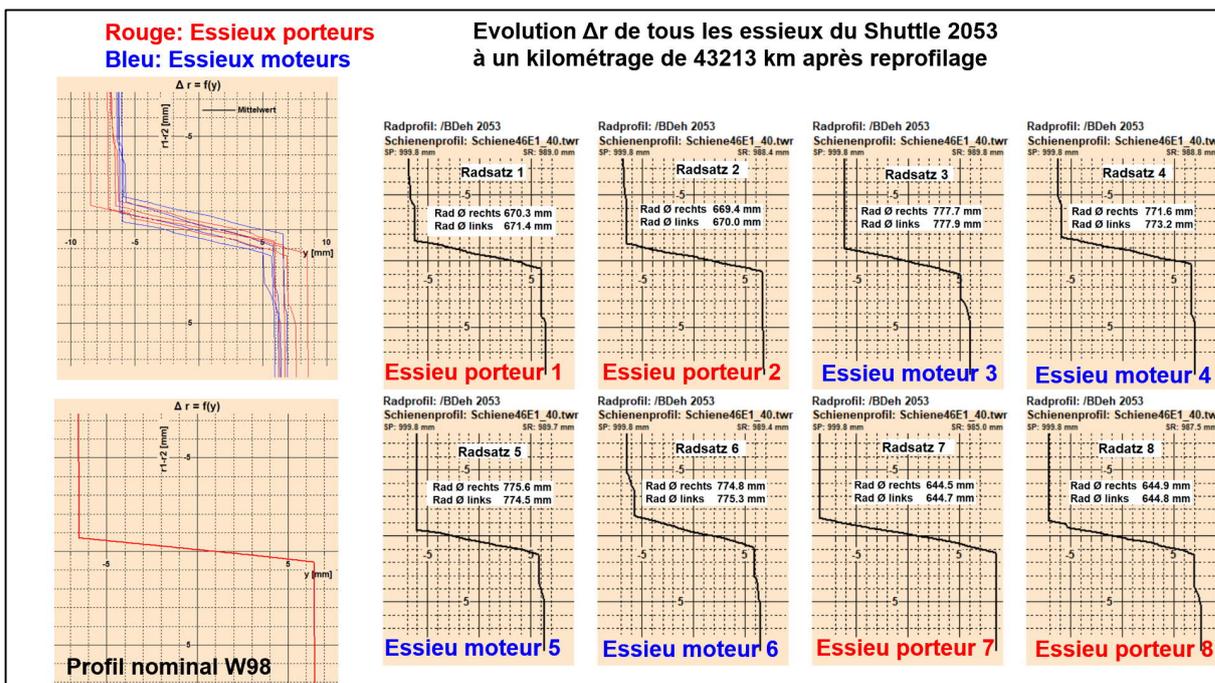


Figure 23: Différences de rayons de roulement Δr pour la Navette 2053, 43213km après reprofilage

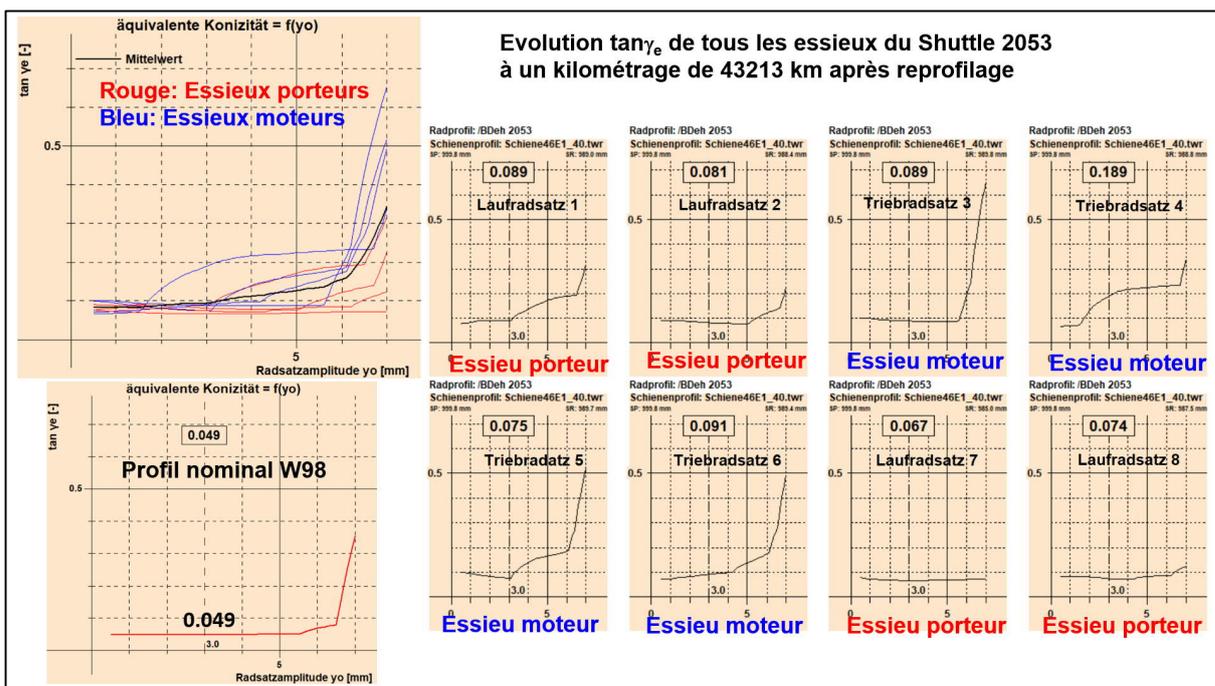


Figure 24: Conicité équivalente $\tan \gamma_e$ de la Navette 2053, 43213km après reprofilage

Figure 25 montre les allocations des points de contact entre la roue et le rail de tous les essieux montés du Navette 2053 après un kilométrage de 43'213km après reprofilage et la figure 26 celle avec le profil nominal W98. Dans l'ensemble, cela vaut aussi bien pour les profils de roue issus de l'utilisation en service des essais d'exploitation que pour le profil nominal :

- Le contact sur les lignes droites a lieu dans une zone étroite des surfaces de roulement des roues et des rails et devrait, en cas de circulation dans cette zone de tracé, entraîner une usure ponctuelle de la roue et du rail dans cette zone de roulement des roues et des rails.
- Il y a un manque de points de contact dans la zone de la tracé, allant des très petits aux moyens rayons de courbure (600m). Ainsi, dans cette zone de tracé, en présence de telles combinaisons de profils, une auto-direction des essieux montés n'est pas possible.
- La position centrale de l'essieu dans le canal de la voie est légèrement décalée vers le centre de la voie par rapport au profil nominal pour les profils de roues utilisés en exploitation, ce qui explique d'une part l'augmentation du Δr au point d'inflexion de la fonction Δr et donc l'augmentation du $\tau\alpha\gamma_6$ pour les essieux montés en exploitation par rapport au profil nominal.
- Sur certaines roues en service opérationnel, les premiers points de contact apparaissent dans la zone de la gorge. Ceci et d'autres caractéristiques indiquent que le profil nominal est altéré en service opérationnel.

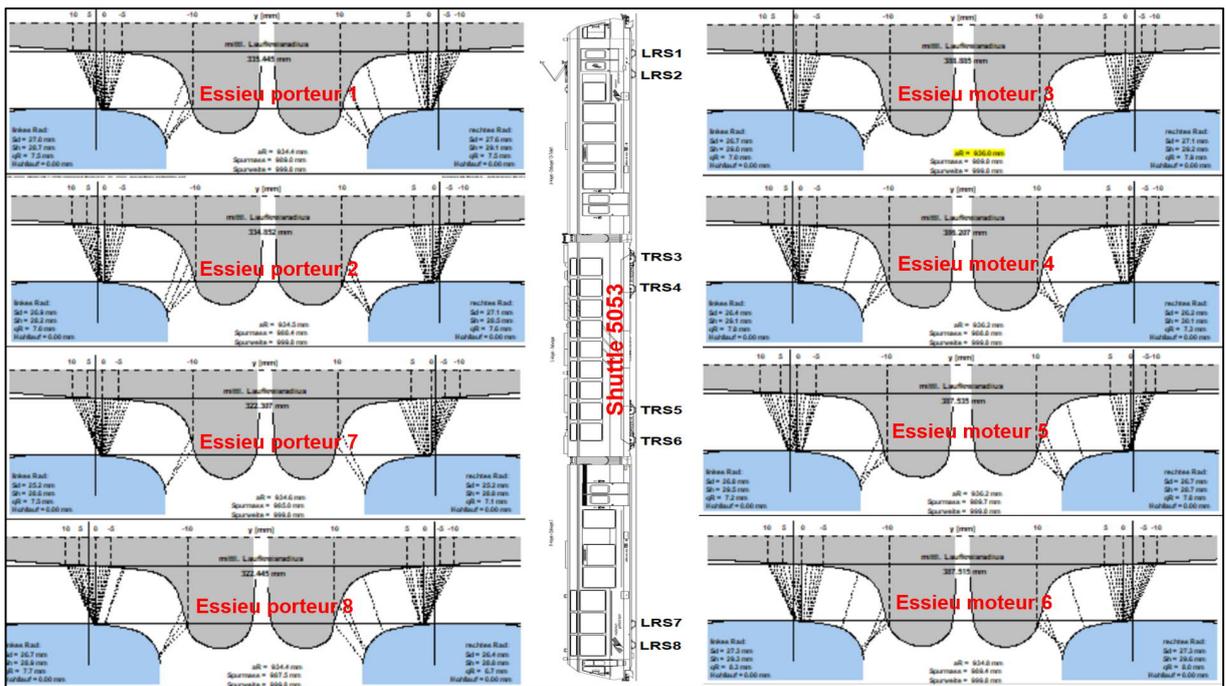


Figure 25: Affectation des points de contact de la Navette 2053, 43213km après reprofilage

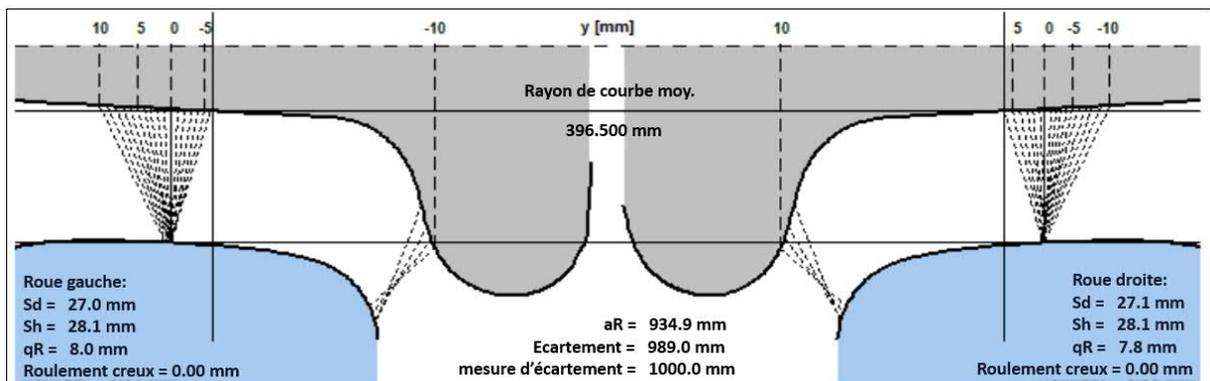


Figure 26: Affectation des points de contact pour le profil nominal W98

La Figure 27 montre l'une des altérations de la fonction Δr en exploitation commerciale et son impact sur l'indice de contrôle radial à l'exemple de l'essieu moteur 3 de la Navette 2053. Sur la roue droite, une selle s'est formée dans la section quasi-verticale de la fonction Δr . Si celle-ci peut être approchée sans discontinuités dynamiques (à démontrer par des calculs de vérification), l'autoguidage de l'essieu monté en courbe gauche serait possible à partir d'un rayon de courbe de 250m. Pour la roue gauche, cela serait possible à partir d'un rayon de courbure de 550 m. Cet exemple montre également que les profils de roue tentent d'altérer vers la zone favorable à la course en courbe, mais que la compréhension de ce processus n'est pas encore achevée. On peut supposer que le faible taux de frottement entrave considérablement le processus d'altération des profils de roue. Il est possible que l'interaction roue/sabot de frein joue un rôle non négligeable en tant que "trouble-fête".

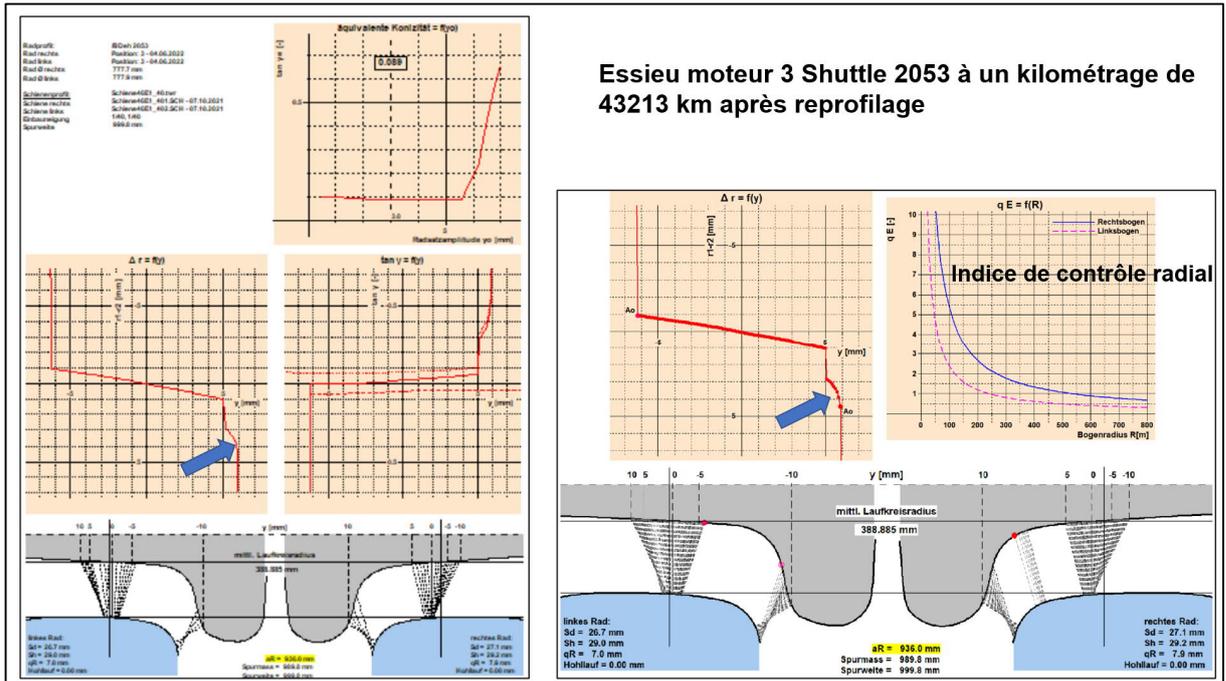


Figure 27: Caractéristiques particulières pour la fonction Δr et effets sur l'indice d'alignement radial

Dans la Figure 28, les principales différences entre les profils de roue d'un essieu représentatif de l'essai d'exploitation Täsch-Zermatt (ici, l'essieu moteur 3 de la Navette 2053) et le profil nominal W98 sont à nouveau présentées. Bien que les différences soient encore faibles, elles montrent néanmoins une tendance à l'adaptation à l'usure. Pour le confirmer, d'autres études sont nécessaires, notamment avec des échantillons plus importants et surtout avec des profils de rail réels. Toutefois, si l'on veut mettre en évidence les modifications apportées aux profils de roues, il convient de ne pas modifier au moins l'un des deux partenaires en contact.

La Figure 28 jusqu'à la Figure 31 illustre à nouveau cette situation à partir des images de positionnement des combinaisons de profils présentées dans la Figure 28. Dans les figures, la position de l'essieu dans le canal de la voie est représentée en haut lorsque le rayon de roulement est nul (différence de rayon de roulement nulle). Dans chaque image du milieu, l'essieu est déplacé contre le flanc de la roue jusqu'à ce que le dernier point de contact soit atteint, juste avant que le point de contact ne franchisse la zone non contractables (la zone non contactable est l'espace entre la roue et le rail). Dans l'image du bas, l'essieu est déplacé jusqu'à ce qu'il passe au-dessus de l'espace.

Dans les deux cas (Figure 29 et Figure 30) dans les courbes à droite, les essieux montés doivent franchir un écart très large et atterrir dans le flanc de la roue. L'essieu ne pourra pas adhérer dans cette zone, même avec des forces centrifuges très élevées, et par conséquent, le bogie empruntera le virage en deux points de contact.

Dans les courbes à gauche, le profil nominal se comportera exactement comme décrit ci-dessus (Figure 31). En revanche, le profil de roue adapté en service (Figure 32) bénéficie de conditions plus favorables dans cette direction de courbe.

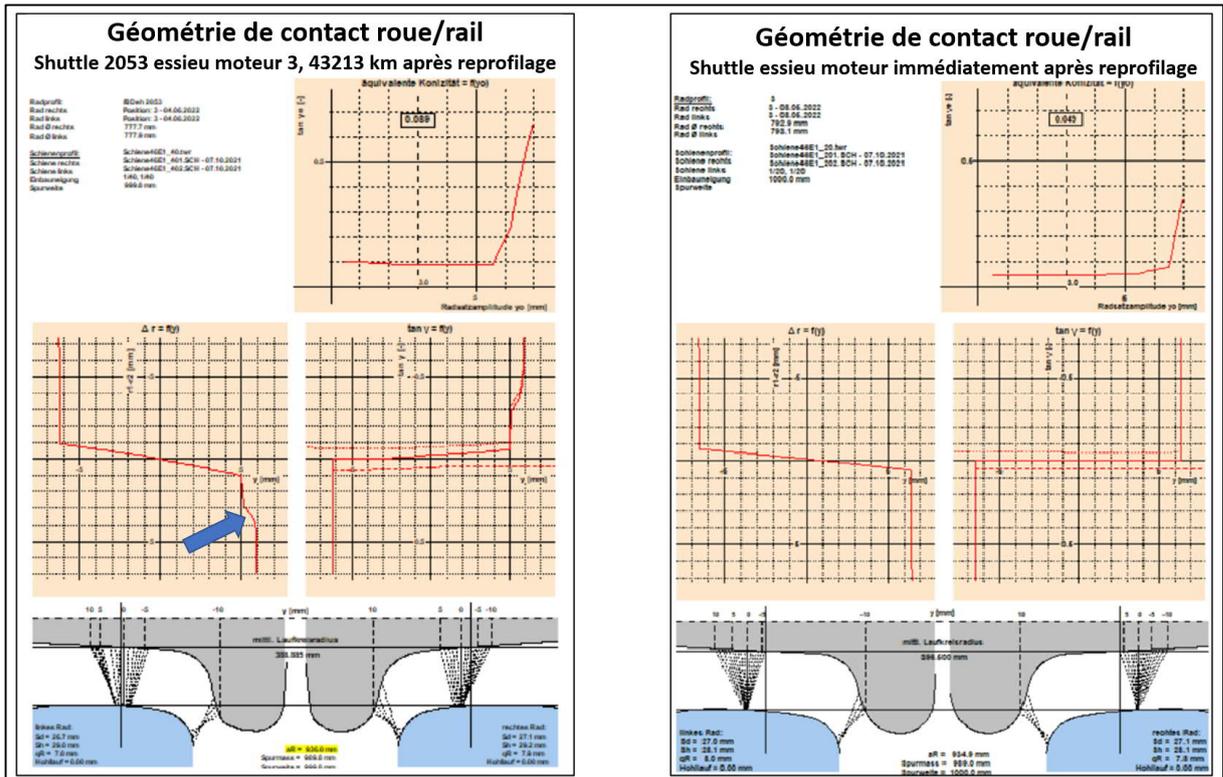


Figure 28: Comparaison de toutes les fonctions géométriques de contact pour les profils de roue utilisés en service avec le profil nominal W98

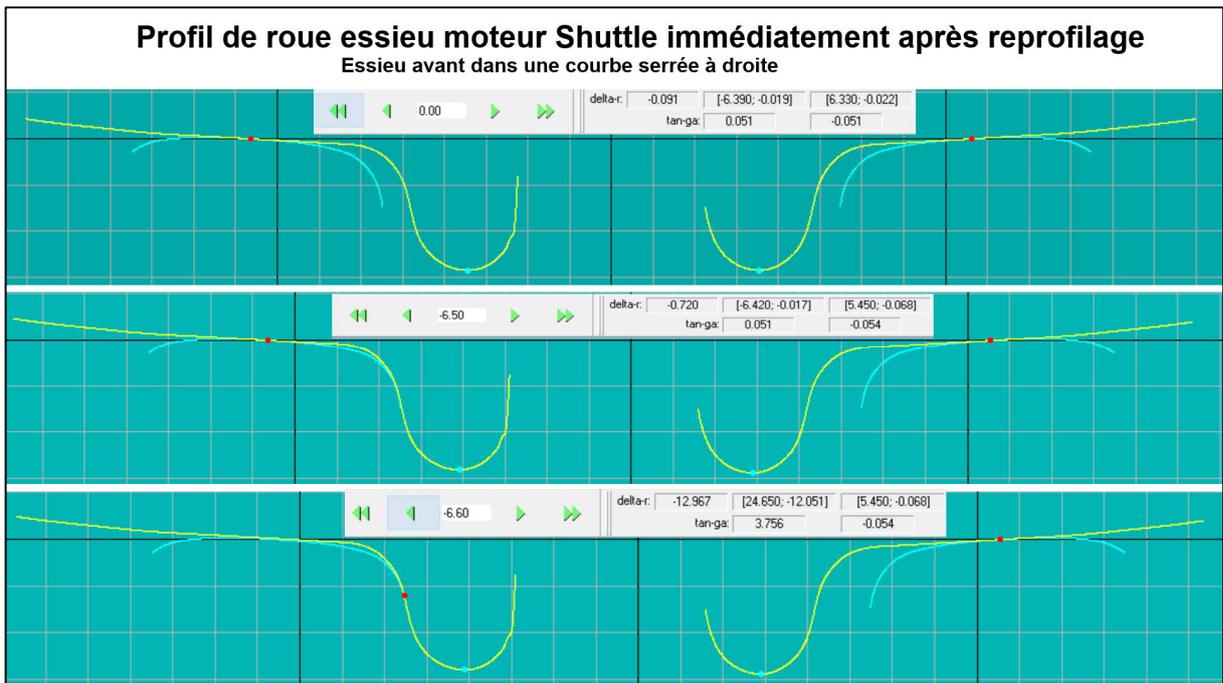


Figure 29: Profil nominal en courbe serrée à droite

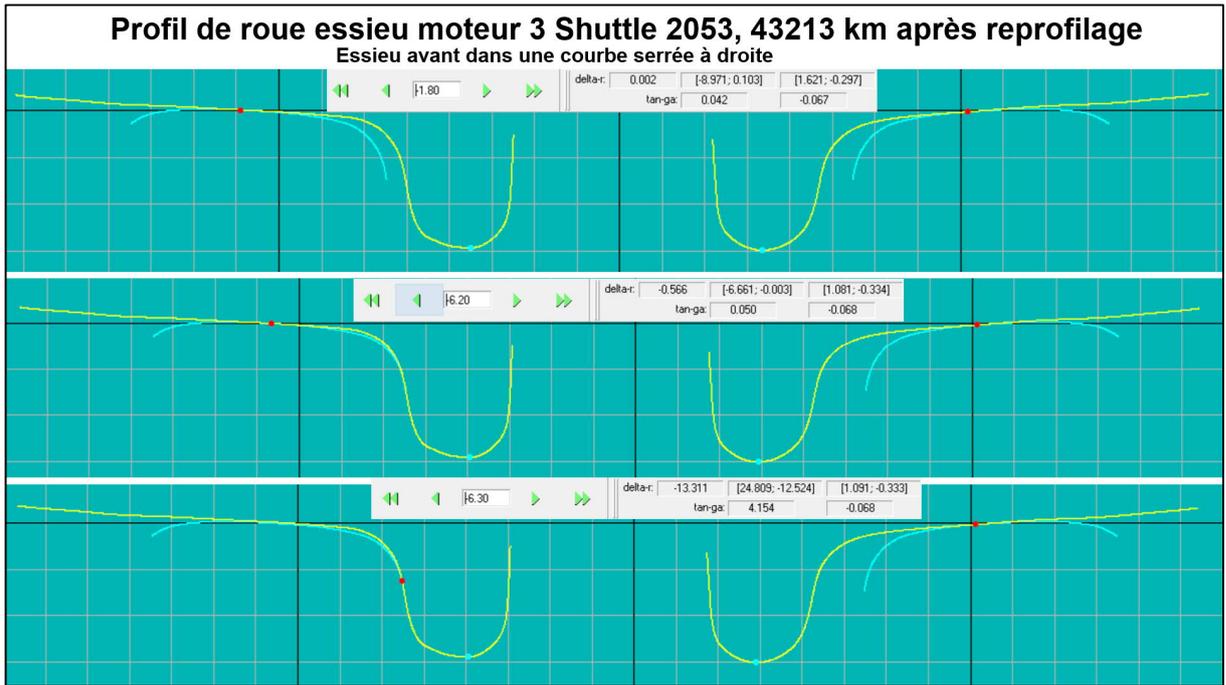


Figure 30: Profil après 43'213 km en service en courbe serrée à droite

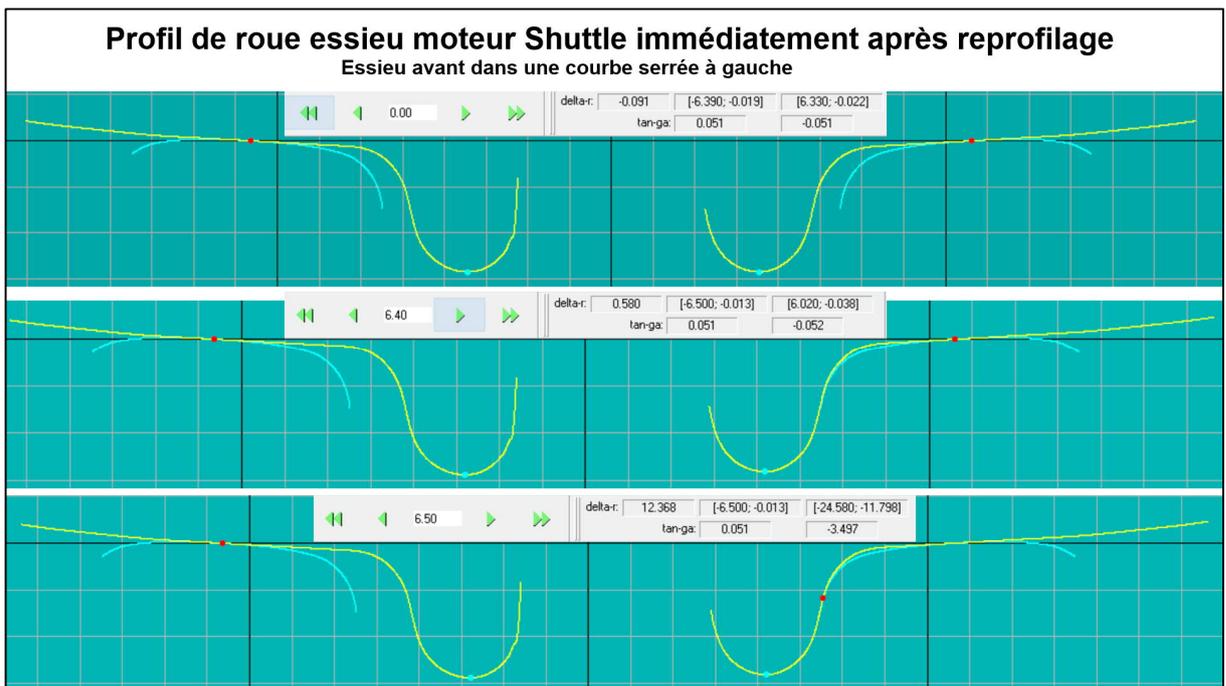


Figure 31: Profil nominal en courbe serrée à gauche

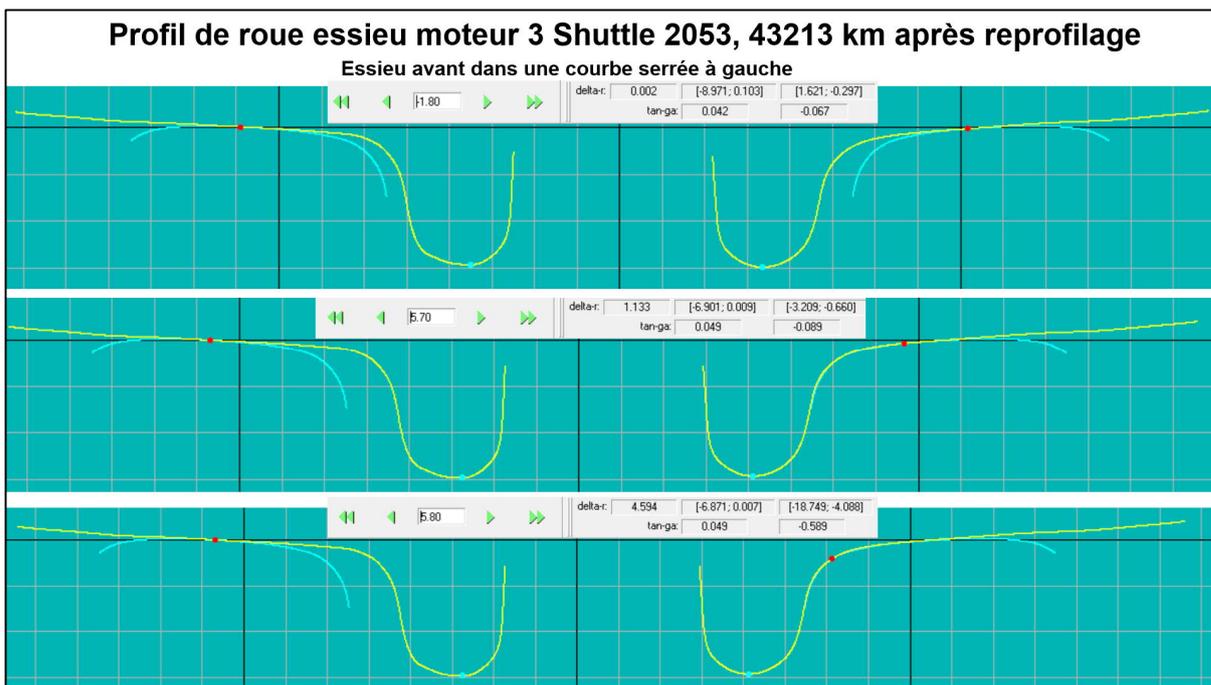


Figure 32: Profil après 43'213 km en service en courbe serrée à gauche

Dans la Figure 33 les deux profils de roue sont superposés dans le plan de mesure circulaire. Le profil nominal est représenté en rouge et le profil d'utilisation en jaune. La zone de profil déterminante pour le comportement en courbe est celle à partir du plan de mesure circulaire jusqu'à environ 10 mm au-dessus de la surface de roulement. Pour la roue droite, ces deux profils diffèrent également visiblement. Le profil de roue provenant de l'exploitation montre des conditions plus favorables pour le suivi de courbe. En revanche, pour la roue gauche, les deux profils de roue sont pratiquement identiques dans cette zone et présenteront par conséquent des conditions moins favorables pour le suivi de courbe.

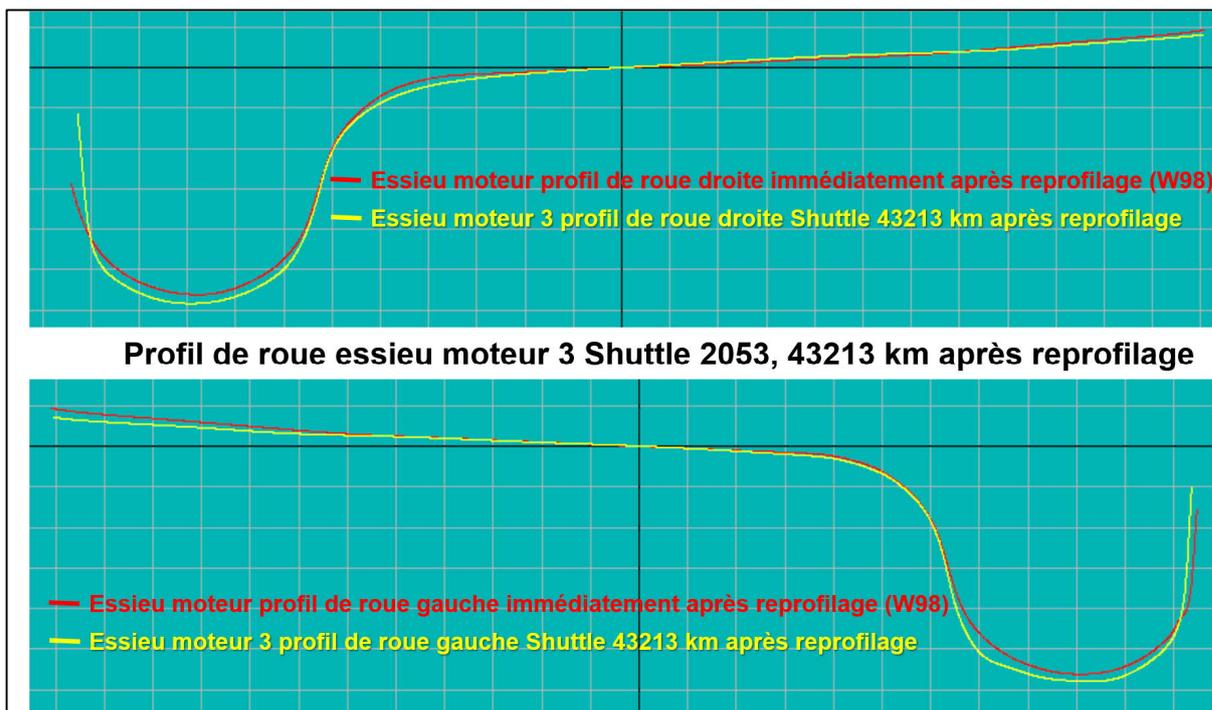


Figure 33: Comparaison des deux profils de roues à gauche et à droite de l'utilisation en service avec les deux profils nominaux

5.2.2. Géométrie de contact des rames Comète

La Figure 34 montre les fonctions Δr de tous les essieux montés de la rame Comète 2021 après un kilométrage de 106'471km après reprofilage. Toutes les évolutions sont représentées dans les zones extérieures de la figure. Au centre, l'évolution du profil nominal W98 est représentée. En principe, les constatations suivantes en découlent :

- Les profils de Δr dans la zone de la surface de roulement jusqu'au début de la gorge diffèrent entre les essieux montés porteurs et les essieux montés moteurs. Par rapport au profil nominal, dans les deux cas, l'allure est devenue en partie nettement plus raide lors de l'utilisation en service, ce qui indique une augmentation au niveau de la conicité équivalente.
- Les écartements des rails sont proches entre les essieux montés moteurs, ce qui indique une usure réduite du flanc de la roue pour toutes les roues de ce type d'essieu. Pour les essieux montés porteurs, les écartements des rails sont nettement plus élevés que pour les essieux montés moteurs, ce qui indique une usure plus importante des flancs de roue. Il convient cependant de prendre en compte que les roues des deux types d'essieux montés sont équipées de différentes qualités d'acier.
- Pour les essieux montés moteurs, la modification des fonctions Δr est nettement moins marquée que pour les essieux montés porteurs. Pour ces derniers, les différences de rayons de roulement sont nettement plus élevées que pour les essieux montés moteurs. Cela signifie également que les profils de roue des roues porteuses ont été beaucoup plus modifiés que ceux des essieux montés moteurs. Cela soulève la question de savoir si cela est dû aux différentes qualités d'acier entre les essieux montés moteurs et les essieux montés porteurs. Les roues motrices sur ce véhicule fonctionnent expérimentalement avec des bandages de roue en acier de qualité B7T, tandis que les roues porteuses sont équipées de roues pleines beaucoup plus souples en acier de qualité ER7.
- Le passage de la surface de roulement de la roue aux valeurs Δr plus élevées dans la zone de la gorge / du boudin est caractérisé pour toutes les roues motrices par un coude suivi immédiatement d'une forte augmentation de la fonction Δr . Le coude se situe cependant pour ces roues de la Comète à un Δr nettement plus élevé que pour

les roues des véhicules Navette. Pour la Comète également, ce comportement indique, comme pour les véhicules Navette, que le profil nominal est modifié lors de l'utilisation en service. Ces modifications sont nettement plus marquées sur la Comète que sur les véhicules Navette. Cela s'explique par le fait que la Comète produit désormais une usure des roues nettement plus importante dans son domaine d'utilisation que les véhicules Navette lorsqu'ils sont utilisés sur des rails conditionnés.

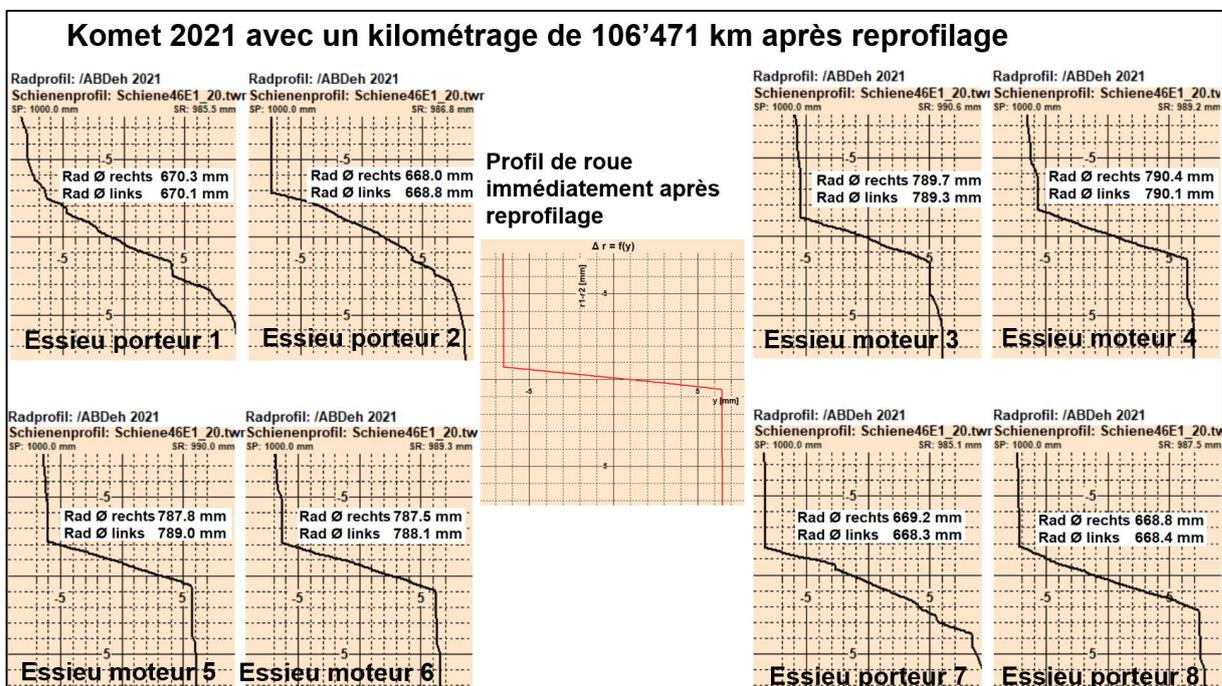


Figure 34: Différences de rayon de roulement pour la Comète 2021, 106'471km après reprofilage

La Figure 35 montre les fonctions $\tan \gamma_e$ de tous les essieux montés porteurs de la Comète 2021 après un kilométrage de 106'471km après reprofilage. Toutes les évolutions sont représentées sur la droite et la comparaison entre tous les essieux montés porteurs (rouge), les essieux montés moteurs (bleu) et le profil nominal W98 est représentée en haut à gauche. En principe, les constatations suivantes en découlent :

- Les conicités équivalentes ont tendance à être légèrement plus élevées pour les essieux montés porteurs que pour les essieux montés moteurs.
- L'essieu moteur 5 se situe dans le même ordre de grandeur que les essieux montés moteurs et présente une légère variation en fonction de l'amplitude de l'essieu. La raison en est la plus grande différence de diamètre entre les deux roues du même essieu.
- La conicité équivalente a doublé ou quadruplé par rapport au profil nominal. Cela indique que le profil nominal est modifié lors de l'utilisation en entreprise. Ce fait est ainsi confirmé par les deux tracés de fonction Δr et $\tan \gamma_e$.

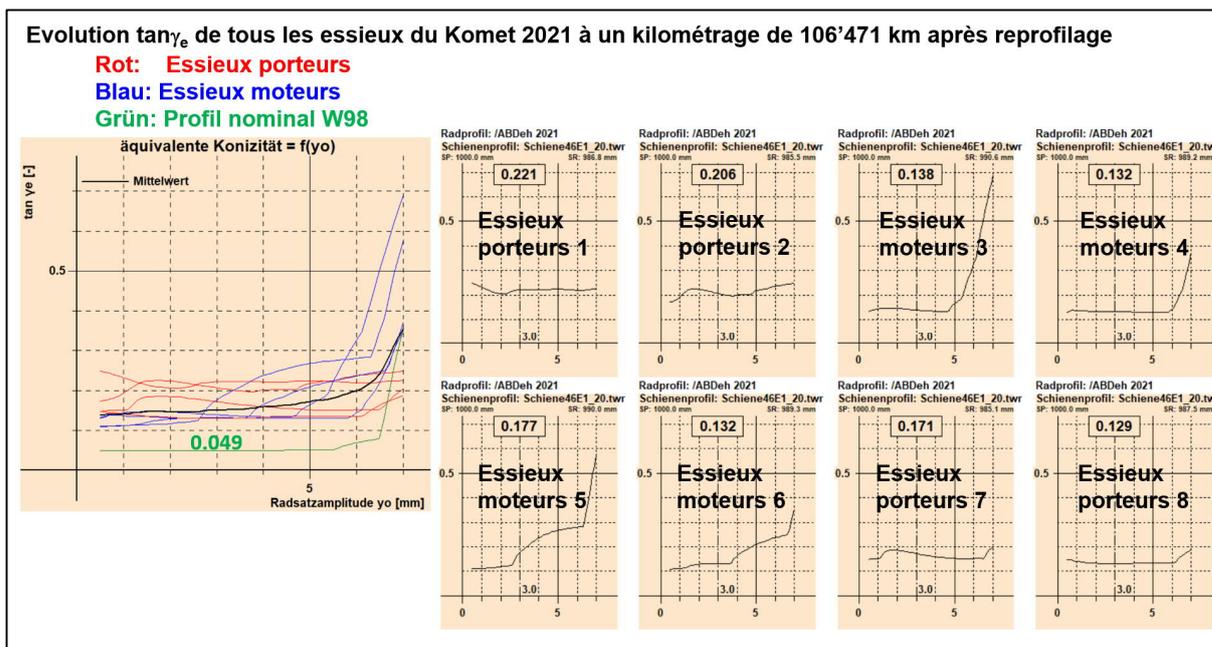


Figure 35: Conicité équivalente pour la Comète 2021, 106'471km après reprofilage

La Figure 36 montre les affectations des points de contact entre la roue et le rail de tous les essieux montés de la Comète 2021 après un kilométrage de 106'471 km après reprofilage et Figure 37 celle avec le profil nominal W98. Dans l'ensemble, cela vaut aussi bien pour les profils de roue issus de l'utilisation en service des essais d'exploitation que pour le profil nominal :

- Avec la Comète, contrairement au profil nominal, le contact sur les lignes droites a lieu dans une zone plus large des surfaces de roulement des roues et des rails et devrait entraîner une usure plus large de la roue et du rail en cas de conduite dans cette zone de tracé ainsi que dans cette zone de roue et de rail.
- Dans l'ensemble, des points de contact sont disponibles, surtout pour les essieux montés porteurs, mais aussi en partie pour les essieux montés moteurs, dans la plage de tracé des très petits jusqu'aux moyens rayons de courbure (600 m). Ainsi, dans cette plage de tracé, en présence de telles combinaisons de profils, une autoguidage des essieux montés est possible sous certaines conditions.
- La position centrale de l'essieu dans le canal de la voie est légèrement décalée vers le milieu de la voie pour les profils de roue de l'utilisation en service par rapport au profil nominal, ce qui explique d'une part le Δr plus élevé lors du coude de la fonction Δr et donc le $\tan \gamma_e$ plus élevé pour les essieux montés de l'utilisation en service par rapport au profil nominal.
- Les caractéristiques mentionnées ici, ainsi que d'autres, indiquent que le profil nominal est modifié lors de l'utilisation en service.

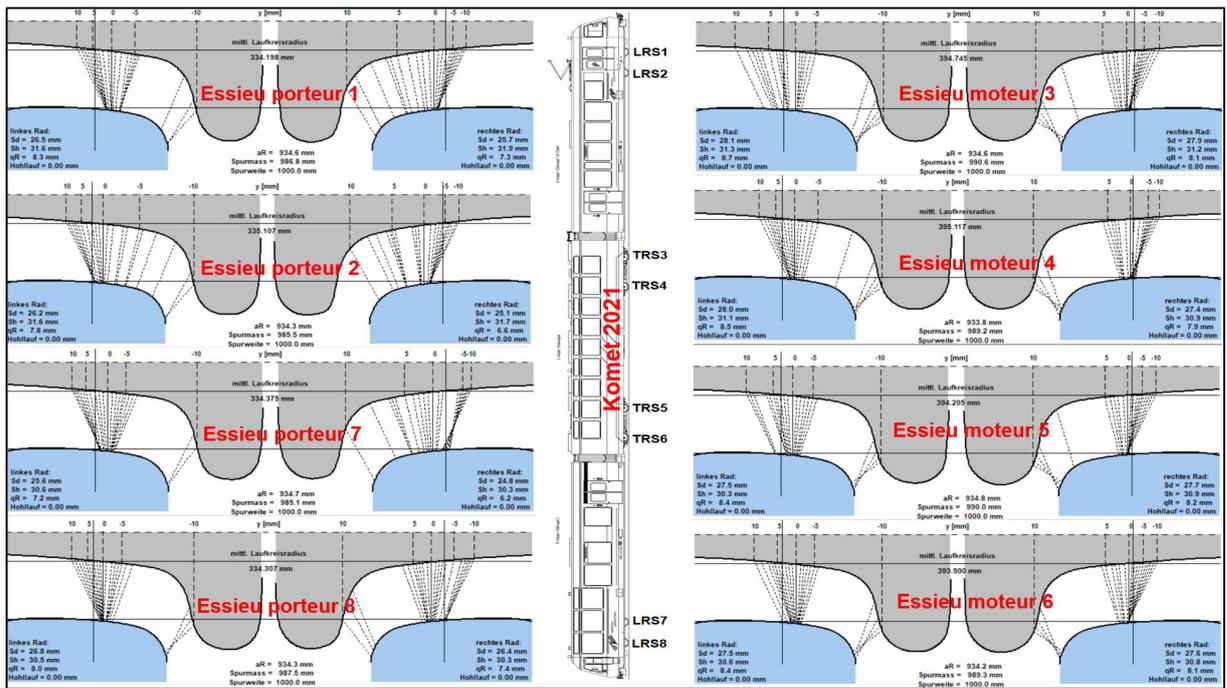


Figure 36: Attribution des points de contact pour la Comète 2021, 106'471km après reprofilage

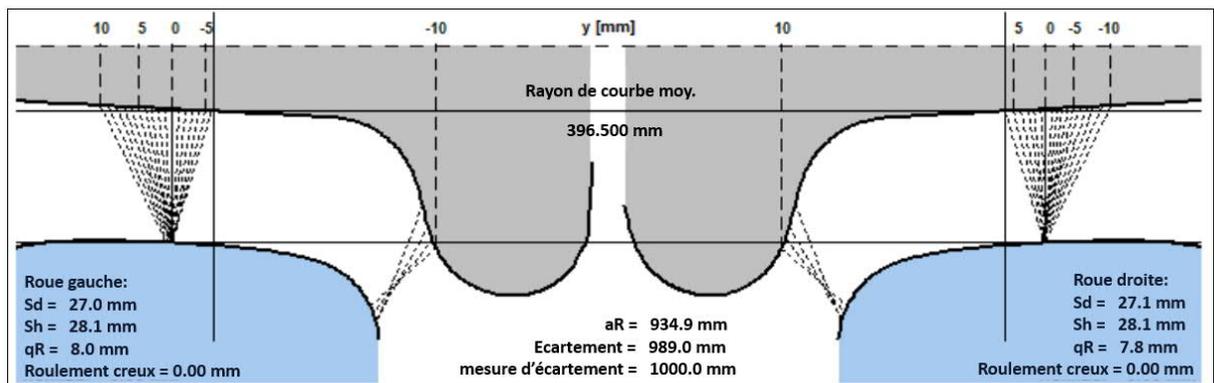


Figure 37: Affectation des points de contact pour le profil nominal W98

La Figure 38 montre les indices de position radiale de tous les essieux montés porteurs pour la Comète 2021 après un kilométrage après reprofilage de 106'471km. Par rapport au profil nominal, les changements sont considérables pour les essieux montés porteurs. L'indice de position radiale est en partie respecté jusqu'à des rayons de courbure de 100 m. Le comportement des essieux montés porteurs 1 et 2 est légèrement plus favorable que celui des essieux montés porteurs 7 et 8.

La Figure 39 montre les indices de position radiale de tous les essieux montés moteurs pour la Comète 2021 après un kilométrage de 106'471km après le reprofilage. Par rapport au profil nominal, les changements sont significatifs pour les essieux montés porteurs. Les dispersions des indices sont nettement plus importantes pour les essieux montés moteurs que pour les essieux montés porteurs. Les indices sont toutefois légèrement moins favorables pour les essieux montés moteurs que pour les essieux montés porteurs.

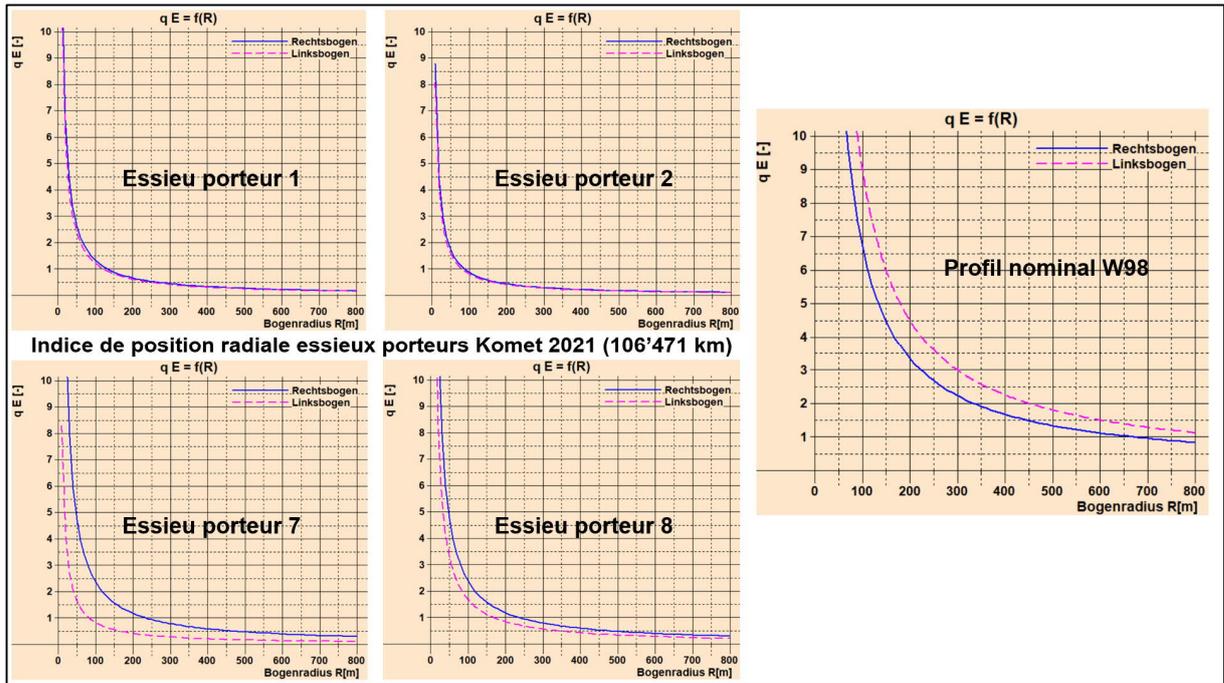


Figure 38: Indice de position radiale pour les essieux montés porteurs Comète 2021, 106'471km après reprofilage

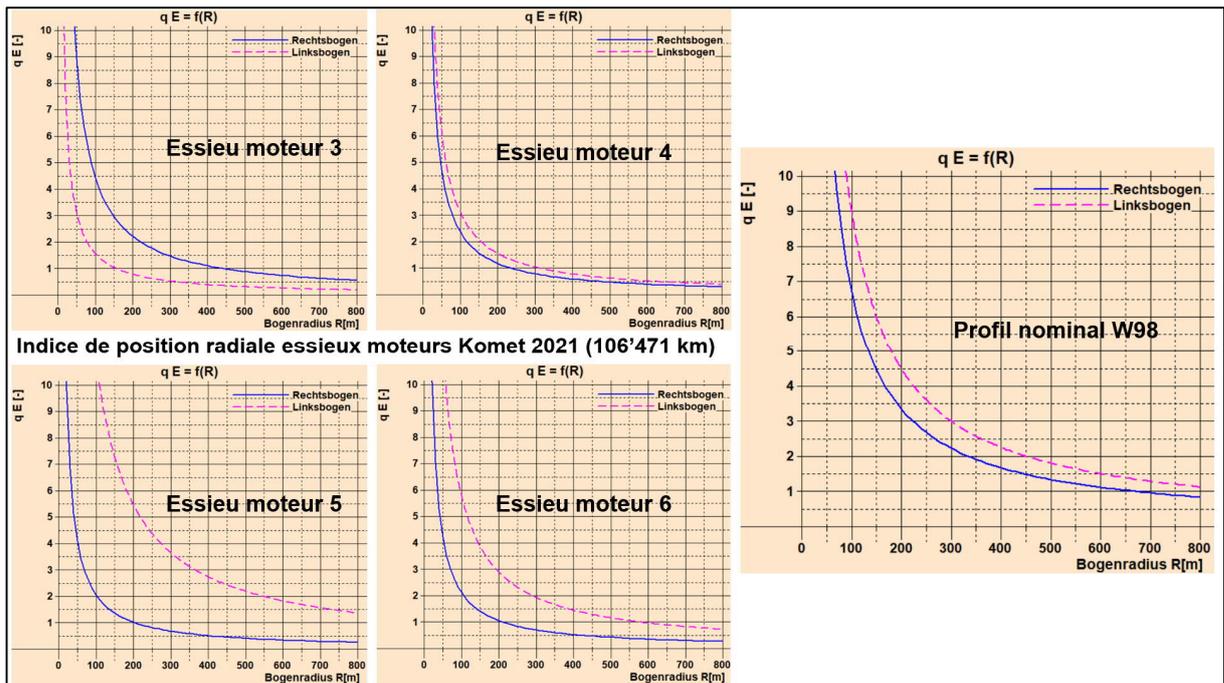


Figure 39: Indice de position radiale pour les essieux montés moteurs Comète 2021, 106'471km après reprofilage

5.3. Irrégularité des roues évaluée à l'aide d'une installation de mesure sur la voie [9]

L'installation de mesure d'irrégularités des roues (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies [9, 10]) fournit depuis début mars 2022 des valeurs de mesure concernant les polygones, les méplats et les éventuels autres dommages dans le sens de la circonférence sur les surfaces de roulement des roues. Le point de mesure de la voie est installé peu après Täsch, sur la ligne menant à Zermatt.



Figure 40: Installation du Wheel Monitoring System WMS à la Matterhorn Gotthard Bahn près de Täsch

Le point de mesure de la voie identifie les trains ou les véhicules qui arrivent au moyen d'un système d'identification des véhicules. Le système d'identification des véhicules utilisé par les Chemins de fer rhétiques a été mis en œuvre à cet effet. Deux antennes RFID ont été installées sur la voie. Elles lisent les tags RFID installées par la Matterhorn Gotthard Bahn et les Chemins de fer rhétiques et identifient ainsi les véhicules.

Le WMS enregistre les vibrations au moyen de capteurs intégrés dans la voie et calcule les dommages de la surface de roulement à partir des signaux. Les dommages sont décrits par deux indicateurs :

- Indicateur de polygone : il indique le degré de polygonation. La plage de longueurs d'onde de la polygonisation a été fixée à 4 cm - 40 cm.
- Indicateur d'aplatissement : il détecte les défauts singuliers, (ex : méplats).

Pour évaluer les dommages, une échelle de 0 à 100 est utilisée pour les indicateurs. Les valeurs inférieures à 20 ne sont généralement pas critiques, les valeurs entre 20 et 40 nécessitent une observation du véhicule, les valeurs supérieures à 40 indiquent un dommage significatif (Figure 41). Cette échelle s'applique aux polygones comme aux méplats.

Indikator	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Radzustand	Guter Radzustand			Geringer Raddefekt		Signifikanter Defekt					

Figure 41: Etat des roues et valeurs indicatives WMS associées (WMS = Wheel-Monitoring-System)

Le WMS peut être calibré par une mesure comparative avec l'appareil de mesure de roues m|wheel. Les valeurs indicatrices du WMS sont alors réglées plus précisément. Grâce à l'étalonnage, il est également possible de définir plus précisément les limites opérationnelles à la MGB, à partir desquelles un usinage des roues doit être effectué. Jusqu'à présent, cet étalonnage n'a pas été effectué. Néanmoins, le WMS fournit des résultats fiables même dans un état non calibré.

Les polygones sont éliminés par le reprofilage ou le remplacement des roues. L'installation de Täsch doit permettre de vérifier si

- le conditionnement des Navettes a entraîné la formation de points plats en raison de la réduction du coefficient de frottement roue/rail ;
- l'apparition et la croissance des polygones ont diminué.

Les figures suivantes montrent à titre d'exemple les indicateurs polygonaux et les indicateurs de méplats de la Navette 2051 pour des axes sélectionnés. Les points orange indiquent l'état des roues du côté droit du véhicule, les points bleus l'état des roues du côté gauche du véhicule. Le logiciel permet de visualiser individuellement les différents véhicules.

La roue droite de l'axe 4 montre un début de polygonation, reconnaissable à partir de la mi-juin environ et qui augmente jusqu'à une valeur de 20 à la fin septembre.

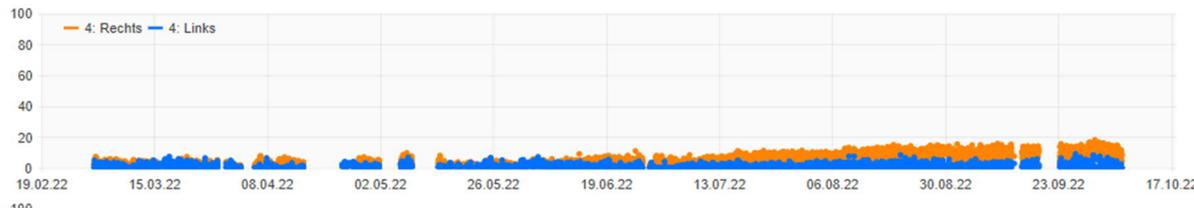


Figure 42: Indicateur polygonal de l'axe 4 de la Navette 2051 de mars à octobre 2022

Les roues des axes 5 et 6 présentent dès le début des mesures des méplats évidents, qui sont d'abord restés constants et ont commencé à se lisser à partir de juin. Jusqu'à la mi-juillet, les méplats se sont nettement réduits.

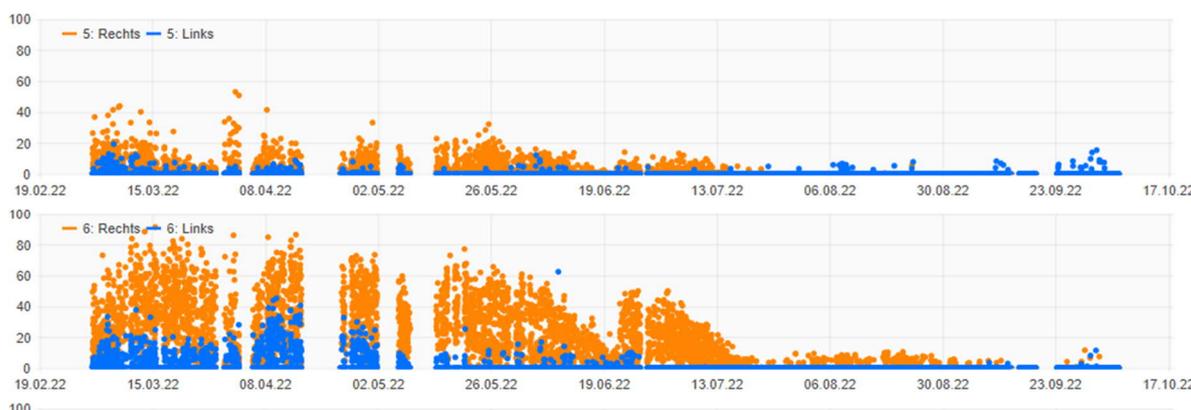


Figure 43: Indicateur de méplats des axes 5 et 6 de la Navette 2051 de mars à octobre 2022

Une révision des roues sur le véhicule 2051 n'a pas eu lieu pendant la période d'étude.

La plausibilité des valeurs saisies par l'installation a été vérifiée par Müller-BBM dans une première phase d'exploitation. Les données validées sont suivies par la MGB, des mesures de maintenance n'ont pas encore été mises en route à partir de ces données.

Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs (valeurs indicatrices > 40) sont apparus sur les véhicules suivants, pour lesquels une révision rapide des roues aurait été judicieuse dans l'optique de ménager la superstructure et les véhicules.

Véhicule	Défaut de roue
2012	Point plat
2014	Point plat
2025	Point plat
2026	Point plat
2028	Point plat
2051	Point plat
2054	Point plat
2131	Point plat
2133	Point plat

Tableau 7: Défauts de roues par véhicule détectés par WMS

Les résultats des véhicules Navette, Comète et GSW (voitures-pilotes articulées) sont présentés ci-dessous. Les véhicules Navette circulent exclusivement dans la zone comprise entre Täsch et Zermatt (où des installations de conditionnement sont installées), les véhicules Comète et les GSW circulent également dans la zone allant jusqu'à Brigue (pas d'installations de conditionnement).

Les résultats peuvent être résumés comme suit :

Véhicules Navette (2051 - 2054)

- Les roues des véhicules Navette présentent des polygones plutôt faibles pendant la période d'étude, avec des valeurs allant jusqu'à 20.
- Toutefois, les méplats sont relativement nombreux et significatifs. Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs sont apparus sur deux véhicules.

Véhicules Comète (2011 - 2014 et 2021 - 2028)

- Les roues des véhicules Comète présentent de légers polygones pendant la période d'étude, avec des valeurs allant jusqu'à 20. La formation de polygones est cependant plus prononcée que sur les véhicules Navette.
- Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs sont apparus sur cinq véhicules.

Voitures de commande articulées (non motorisé) (2131 - 2134)

- Les roues des GSW présentent des polygones avec des valeurs allant jusqu'à 30 pendant la période d'étude.
- Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs sont apparus sur deux GSW.

L'enquête permet en outre de tirer les conclusions suivantes :

- Dans l'ensemble, les roues porteuses sont plus touchées par la polygonisation et les méplats que les roues motrices.
- Pendant la saison chaude, de début juillet à fin août, les polygones ont tendance à croître plus fortement que pendant les autres mois. Des méplats significatifs ne se sont pas formés durant cette période. En revanche, des méplats significatifs se sont formés pendant le reste de la période d'étude (les jours de forte chaleur, le coefficient de frottement est plus élevé, le conditionnement peut également avoir eu un effet moindre).
- Les polygones de roue n'ont généralement pas pu être durablement éliminés par l'usinage des roues et se sont rapidement reformés après l'usinage. Il convient donc de vérifier si le tour sous plancher présente un effet de copie pour les polygones, ce qui empêcherait une élimination complète des polygones.

Les illustrations du chapitre 11.5 montrent les résultats de la surveillance des roues avec le Wheel Monitoring System WMS pour les types de véhicules Comète, Navette et GSW.

Les révisions des roues (si connues) sont représentées dans les diagrammes par des lignes verticales et étiquetées dans la légende.

Les opérations d'usinage des roues n'ont pas été effectuées en raison des irrégularités des roues. Cependant, si de telles opérations ont été effectuées, elles montrent l'impact sur les irrégularités des roues existantes.

6. Mesures / surveillance et résultats du rail

Afin d'évaluer l'effet du SKK sur le rail, les différentes valeurs relevées sont examinées en relation avec le SKK. Parmi les principales valeurs relevées, on trouve la rugosité du rail / l'évolution de l'ondulation de patinage (chapitre 6.1), les coefficients de frottement / mesures tribométriques (chapitre 6.2) ainsi que l'usure abrasive du rail. En outre, il est fait référence aux intervalles de meulage des rails (chapitre 0), les vibrations des rails et des traverses (chapitre 0) et l'écartement des rails (chapitre 0) sont abordés.

La Figure 44 indique les endroits où des mesures ont été effectuées sur les rails. Le choix a été fait d'une part parce que l'effet du conditionnement est le plus prononcé dans la zone des courbes avec de très petits rayons et d'autre part pour des raisons de sécurité des personnes et d'accessibilité (transport des appareils). Tous les points de mesure se trouvent dans des zones où le conditionnement n'est pas actif (pas de pulvérisation de produit). Ils se trouvent donc dans ce que l'on appelle des "zones contaminées". La station de mesure de Lüegelwang est plus proche de la zone activement pulvérisée que les deux autres stations de mesure. Cependant, sur la base des mesures tribométriques (voir chapitre 6.2), les coefficients de frottement sur les rails se situent dans une plage comparable à tous les points de mesure.

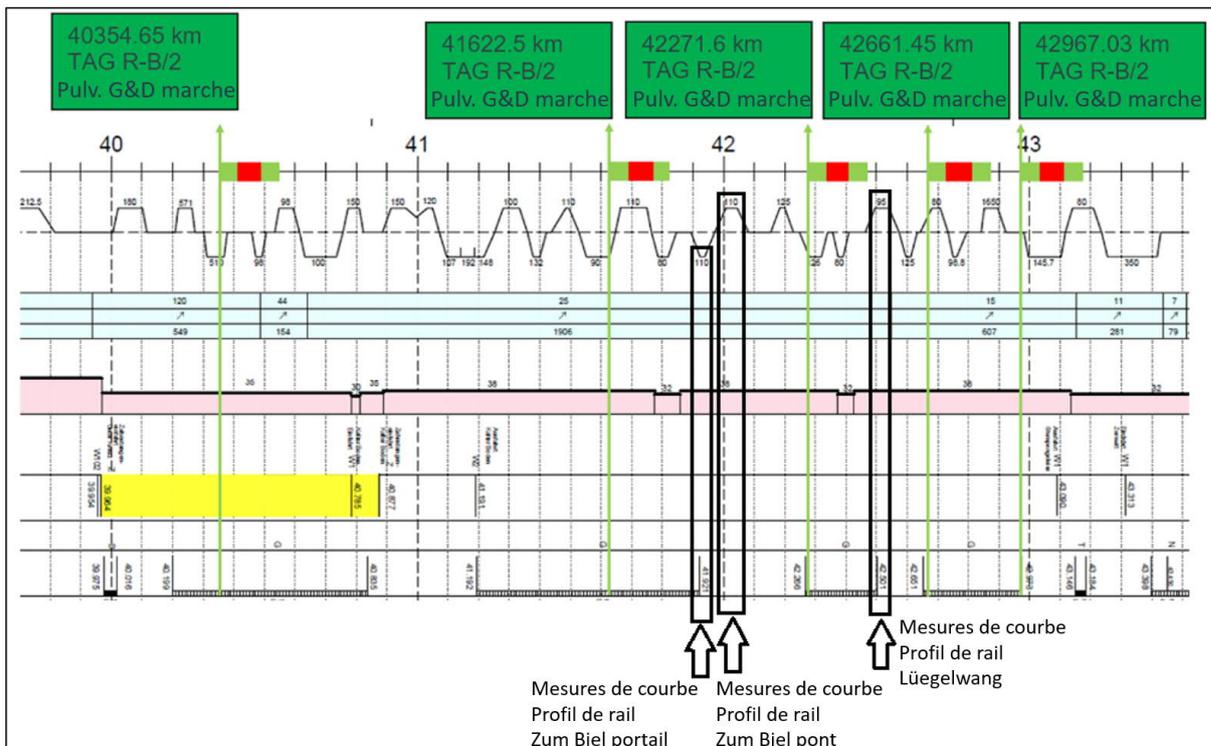


Figure 44: Lieux où les rugosités des profils des rails ont été mesurées

6.1. Mesure de la rugosité du rail [1]

Les trois courbes situés au-dessus de Kalter Boden, dans lesquels les mesures de rugosité ont été effectuées, ont des rayons de courbure très petits, de l'ordre de 100 m, et se situent, selon la Figure 44 dans le tronçon pas activement conditionné.

On distingue en principe les zones de parcours dans la zone activement conditionnée et celles dans la zone traînée. Le traînage a lieu aussi bien dans la descente que dans la montée. Tous les points de mesure se trouvent dans la zone traînée. À Zum Biel (Pont et Portail), les points de mesure sont nettement plus éloignés de la zone activement conditionnée qu'à Lüegelwang (voir Figure 44 et Tabelle 8). Malgré cet état de fait, les coefficients de frottement enregistrés par le tribomètre aux trois points de mesure ne diffèrent en général guère les uns des autres (voir chapitre 6.2).

Les mesures de rugosité des rails pour évaluer la formation de l'ondulation de patinage sont effectuées à l'aide d'un appareil de mesure approprié (description voir annexe 11.1.1) selon la norme SN EN 15610 [2]], [6].

L'appareil de mesure de rugosité des rails dispose de trois capteurs de déplacement, dans le cas présent réglés à une distance mutuelle de 5 mm, qui mesurent trois pistes parallèles sur le profil du champignon de rail. L'appareil de mesure est poussé manuellement à travers la courbe à une vitesse d'environ 1 m/s. Le rail intérieur et le rail extérieur sont mesurés deux fois chacun.

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

Lieu	SKK	Rayon	De [km]	Jusqu'à [km]
Zum Biel - Portail	Oui	110	41.951	41.941
Zum Biel - Pont	Oui	110	42.053	42.025
Lüegelwang	Oui	95	42.556	42.5197

Table 8: Courbes sélectionnés pour les mesures de rugosité des rails

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

Désignation dans la légende	Date	Description	Remarque
T1	28.09.2021	Mesure 0 avant meulage	
T2	21.10.2021	Juste après le meulage	
T3	14.01.2022	3 mois après le meulage	Rails verglacés, valeurs de mesure en partie non plausibles (sauf Täschsand)
T4	05.04.2022	6 mois après le meulage	
T5	01.06.2022	8 mois après le meulage	
T6	27.09.2022	12 mois après le meulage	

Table 9: Moments des mesures de rugosité des rails

Lieu	Rails	Traverses	Cale
Zum Biel - Portail	CFF I 350HT	Béton VÖV - E M4	doux
Zum Biel -ont	CFF I 350HT	Béton VÖV - E M4	doux
Lüegelwang	CFF I 350HT	Béton VÖV - E M4	doux

Table 10: Infos Superstructure des courbes mesurés

6.1.1. Rugosité du rail [5]

La rugosité des rails est représentée dans les diagrammes suivants sous forme de valeur dB avec une référence de 1 μm sous forme de spectres de bande de tiers d'octave en fonction de la longueur d'onde. La courbe limite EN ISO 3095, qui ne doit pas être dépassée lors des mesures d'émissions de bruit aérien en ligne droite pour l'homologation des véhicules, est également représentée à côté des rugosités de rail mesurées.

Explication de la désignation des légendes à l'aide d'un exemple :

T1,1-i-2 signifie au moment T1, mesure 1, rail intérieur (i), capteur 2 (capteur central dans le rétroviseur de conduite).

Ce chapitre présente une sélection de spectres de bande de tiers d'octave et le chapitre 10.1 tous les spectres de bande de tiers d'octave (mesure 1, capteur 2) des rails à l'intérieur et à l'extérieur de courbe à différents moments.

Des mesures de rugosité SKK ont déjà été effectuées dans les trois courbes observés pendant l'essai d'exploitation SKK à une date antérieure (2018-2019) sans SKK. Les résultats sont présentés par courbe et en pointillés dans les diagrammes (Figure 45 à Figure 50). En outre, les rugosités de rail mesurées aux temps T1, T2, T4, T5 et T6 sont représentées dans ces diagrammes à des fins de comparaison. Ci-dessous, on compare d'une part les spectres aux moments précédents avec ceux jusqu'au moment T5, car ils ont évolué sur la même période. D'autre part, l'état au moment T5 est comparé à celui au moment T6. Cette répartition est effectuée car les états au niveau des surfaces de roulement des rails à l'intérieur de courbe de T1 à T5 se distinguent nettement de ceux de la période entre T5 et T6.

Période jusqu'à T5 intérieur de courbe

En ce qui concerne l'effet du SKK, le spectre de rugosité T5, 246 jours après le meulage (exploitation avec SKK), peut être comparé au spectre en pointillés bleus de la mesure précédente 260 jours après le meulage (exploitation sans SKK). Au moment T5, on ne distingue pas de pic marquant dans le spectre des longueurs d'onde avec le SKK dans les courbes Zum Biel. Ceci, contrairement à avant, où dans la plage de la bande de tiers d'une longueur d'onde moyenne de 80 mm, les rugosités après le meulage des rails revenaient au même niveau qu'avant le meulage en l'espace de 260 jours. En revanche, pour la courbe de Lüegelwang, une légère bosse apparaît lors de la mesure au moment T5 dans la plage de longueurs d'onde avec des longueurs moyennes de 63 à 80mm. Cela indique une légère croissance de l'ondulation de patinage, qui est toutefois toujours fortement réduite par rapport à ce qu'elle était auparavant sans SKK pendant presque la même période d'observation. Il convient toutefois de noter qu'entre la mesure T4 et la mesure T5, des coefficients de frottement élevés ont été présents pendant une période non chiffrée avec précision (voir Mesures du coefficient de frottement avec un tribomètre). Les mesures T3 de janvier 2022 n'ont pas été prises en compte dans l'évaluation, car elles ont été effectuées sur un rail verglacé et ne sont donc pas conformes aux conditions.

Période jusqu'à T5 extérieur de courbe

Sur les surfaces de roulement extérieures des rails, on trouvait avant le meulage des rails des valeurs dans la zone des longueurs d'onde inférieures qui se situaient légèrement au-dessus de la courbe limite EN ISO 3095. Seule la courbe de Zum Biel - Pont présentait une valeur de pointe dans la plage des longueurs d'onde avec une longueur d'onde moyenne de 80 mm. Dans la période avec SKK, les amplitudes n'ont pas changé après le meulage des rails. Cela signifie que des ondulations de patinage à peine perceptibles se forment sur les surfaces de roulement des rails à l'extérieur de courbe.

Période entre T5 et T6 intérieur de courbe

Sur la base des spectres à l'instant T6, des ondulations de patinage se sont développées pendant cette période sur les surfaces de roulement des rails à l'intérieur des courbes des trois courbes observés. En particulier dans courbe de Lüegelwang, des amplitudes se sont installées à l'instant T6, qui se situent dans un ordre de grandeur comparable à celui d'avant le meulage des rails.

Il est intéressant de noter que la longueur d'onde des ondulations de patinage s'est déplacée de 80 mm à 63 mm dans les trois courbes en service conditionné.

Comme nous le verrons plus loin dans les mesures des coefficients de frottement, les coefficients de frottement sur les rails ont augmenté, parfois massivement, pendant la période T5 à T6. Cette période coïncide avec la période de chaleur exceptionnelle des mois d'été juillet / août 2022. De plus, les installations SKK sont désactivées aux heures creuses le soir / le matin chez la MGB, ce qui entraîne une modification défavorable des rugosités des rails en fonction de l'heure de la journée pendant les mois d'été. Cela devrait être la raison de la formation des ondulations de patinage pendant cette période.

Période entre T5 et T6 à l'extérieur de courbe

La rugosité des rails extérieurs à la courbe n'a pas changé entre T5 et T6. Ceci est à nouveau un indicateur que peu d'ondulations de patinage se forment sur les rails extérieurs des

courbes. On s'attend à ce que les travaux de recherche prévus permettent une meilleure compréhension des mécanismes sur les deux voies ferrées.

Zum Biel - Portail

Comparaison période 2018 - 2019 sans SKK et 2021 - 2022 avec SKK - rail intérieur

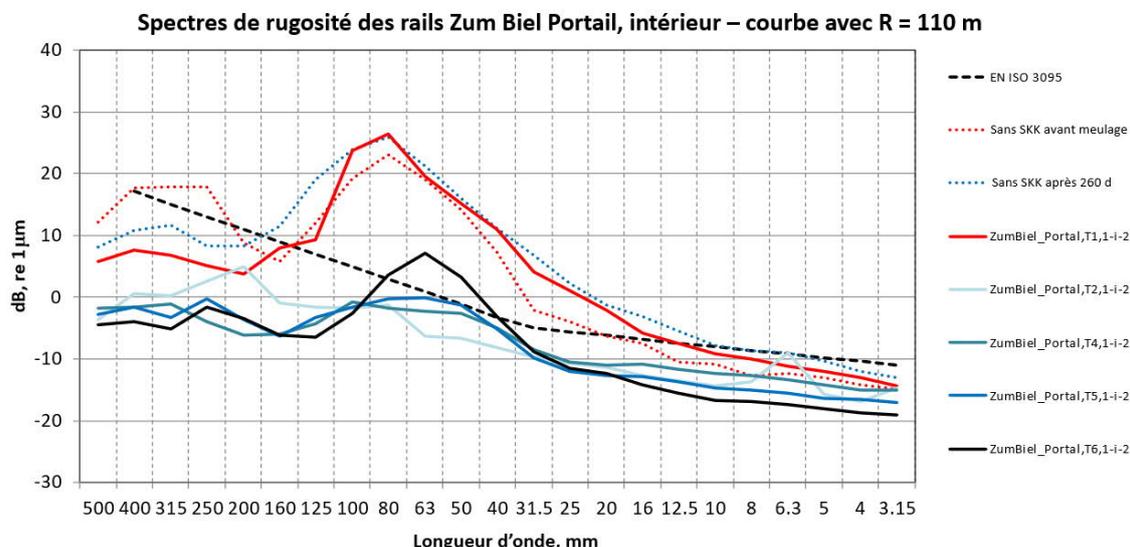


Figure 45: Spectres de rugosité du rail de Zum Biel - Portail, intérieur de la courbe

Remarque : T5 correspond à 246 jours après le meulage → croissance nettement plus lente de l'évolution d'ondulations de patinage avec SKK, T6 correspond à 364 jours après le meulage

Comparaison période 2021 - 2022 avec SKK - rail extérieur

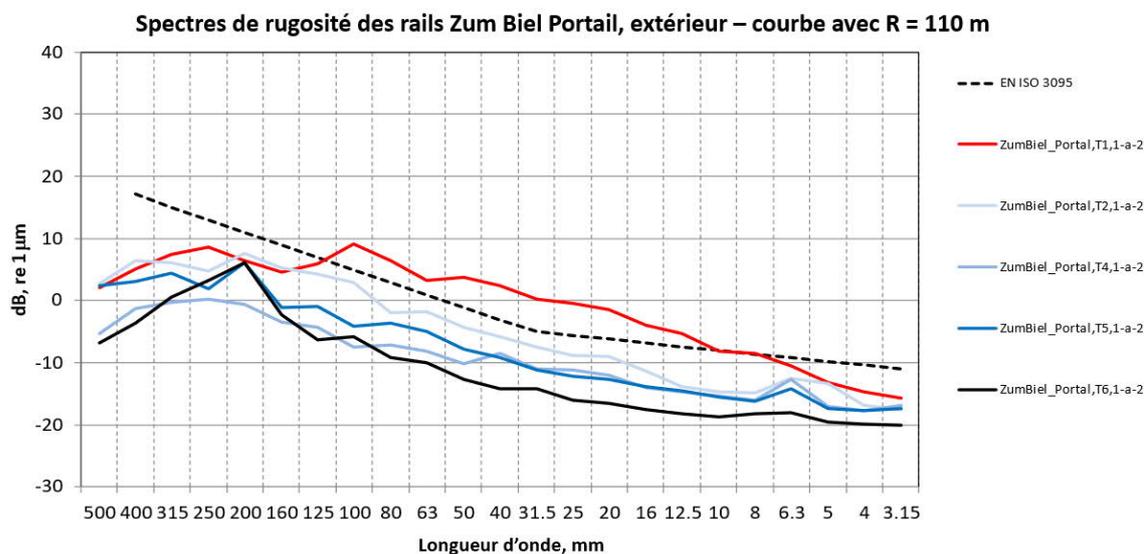


Figure 46: Spectres de rugosité des rails de Zum Biel - Portail, à l'extérieur de la courbe

Remarque : pas de croissance d'évolution d'ondulations de patinage avec SKK, le rail extérieur peut être qualifié de lisse

Zum Biel - Pont

Comparaison période 2018 - 2019 sans SKK et période 2021 - 2022 avec SKK

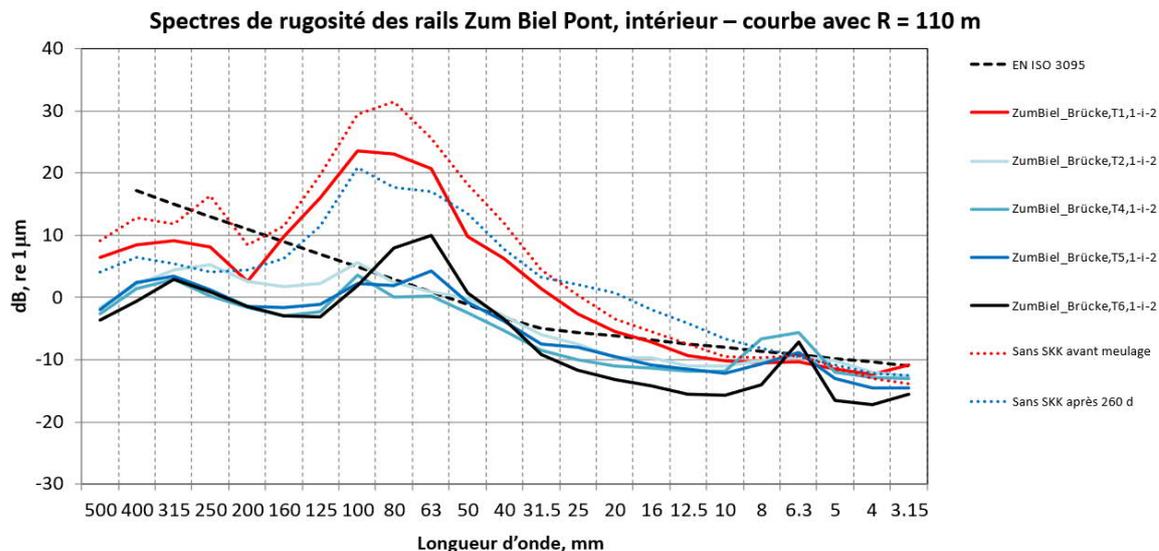


Figure 47: Spectres de rugosité des rails de Zum Biel - Pont, à l'intérieur de la courbe

Remarque : T5 correspond à 246 jours après le meulage → croissance nettement plus lente de l'évolution d'ondulations de patinage avec SKK, T6 correspond à 364 jours après le meulage

Comparaison période 2021 - 2022 avec SKK - rail extérieur

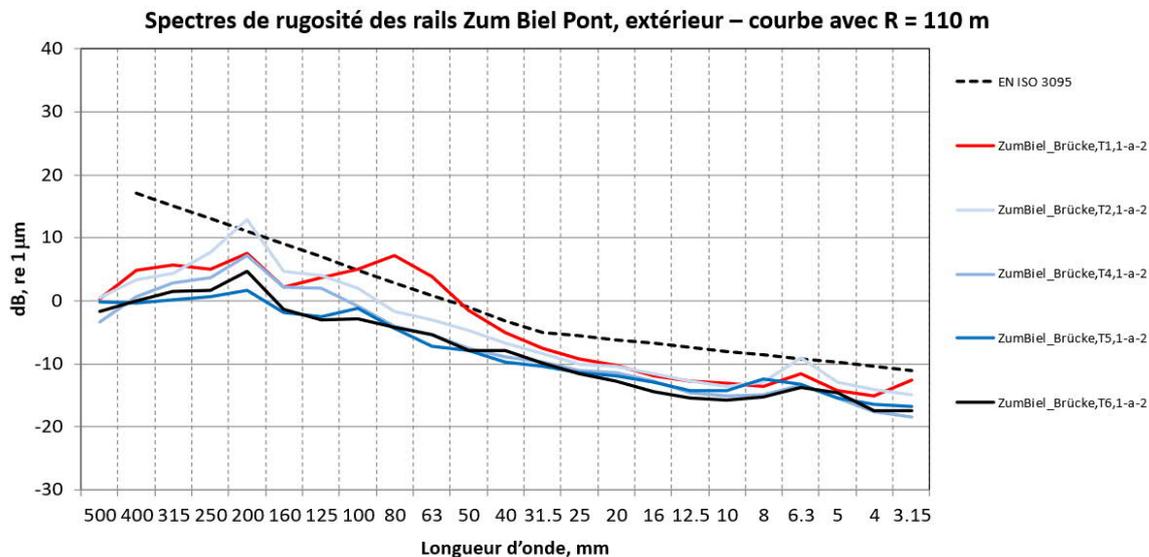


Figure 48: Spectres de rugosité des rails de Zum Biel - Pont, à l'extérieur de la courbe

Remarque : pas de croissance d'évolution d'ondulations de patinage avec SKK, le rail extérieur peut être qualifié de lisse

Lüegelwang

Comparaison période 2018 - 2019 sans SKK et période 2021 - 2022 avec SKK

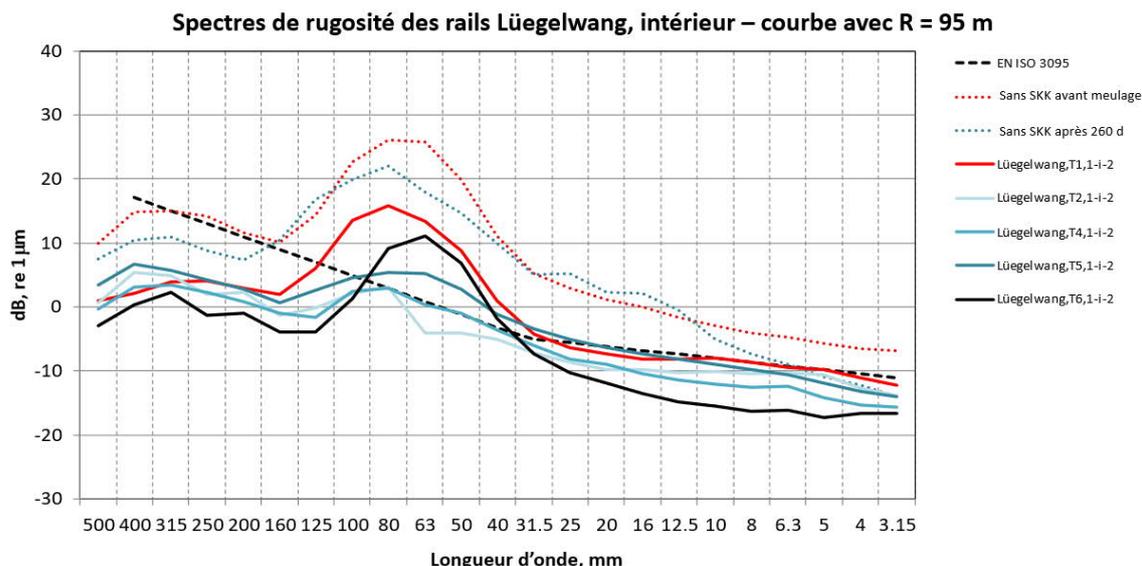


Figure 49: Spectres de rugosité des rails à Lüegelwang, à l'intérieur de la courbe

Remarque : T5 correspond à 246 jours après le meulage → croissance nettement plus lente de l'évolution d'ondulations de patinage avec SKK, T6 correspond à 364 jours après le meulage

Comparaison période 2021 - 2022 avec SKK - rail extérieur

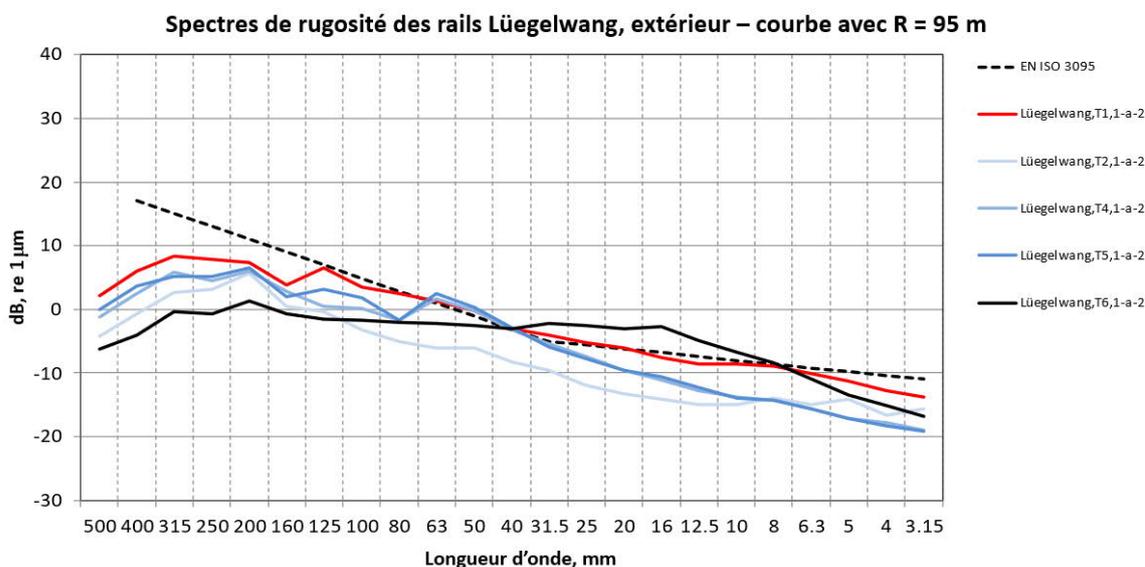


Figure 50: Spectres de rugosité des rails Lüegelwang, extérieur de la courbe

Remarque : pas de croissance d'évolution d'ondulations de patinage avec SKK

6.1.2. Constatations croissance des ondulations de patinage dans les courbes/ développement de la rugosité des rails

Les trois courbes conditionnés Zum Biel - Pont / Portail et Lüegelwang, qui présentaient des ondulations de patinage nettes à l'intérieur de courbe lors de la mesure zéro avant le meulage (15-25 dB pour une longueur d'onde de 80-100 mm), montrent jusqu'à présent, 11 mois après le meulage et le démarrage du SKK, un développement nettement retardé des ondulations de patinage (en comparaison avec les mesures de 2018-2019). Cette évolution ne s'est produite

qu'entre l'avant-dernière et la dernière mesure (T5 et T6), ce qui est probablement dû aux températures caniculaires des mois de juillet et août 2022.

Le meulage d'octobre 2021 a permis d'éliminer en grande partie les ondulations de patinage dans les courbes Zum Biel - Pont / Portail et Lüegelwang.

Les rails extérieurs Lüegelwang, Zum Biel - Portail et Zum Biel - Pont ne présentent pas d'évolution claire. Dans le cas présent, les rugosités du rail extérieur sont moins intéressantes que celles du rail intérieur, car les ondulations de patinage se forment à l'intérieur des courbes. Il convient de se demander s'il ne serait pas judicieux à l'avenir, lors de l'élimination des ondulations de patinage à l'intérieur des courbes, de meuler en même temps les rails à l'extérieur des courbes.

6.2. Mesures tribométriques

Pour les mesures du coefficient de frottement, le rail à l'intérieur de courbe et le rail à l'extérieur de courbe sont mesurés trois fois au même endroit et la valeur moyenne est reprise. Les mesures du coefficient de frottement du printemps 2021 ont montré que le tribomètre (tribomètre LB-Foster) réagit de manière sensible à la zone du champignon de rail dans laquelle la mesure est effectuée et à la vitesse à laquelle l'appareil est déplacé le long du rail. Pour effectuer des mesures les plus reproductibles possibles sur le profil réel du rail, le tribomètre doit être poussé à une vitesse de pas lente. En plus du coefficient de frottement, l'heure du jour et les conditions environnementales sont enregistrées (température et humidité de l'air, cf. annexe 11.2). Les côtés de la voie, c'est-à-dire le rail à gauche (marqué en rouge) et le rail à droite (marqué en jaune) ont été définis dans le sens de la marche de Brigue (cf. chapitre 6.2.1).

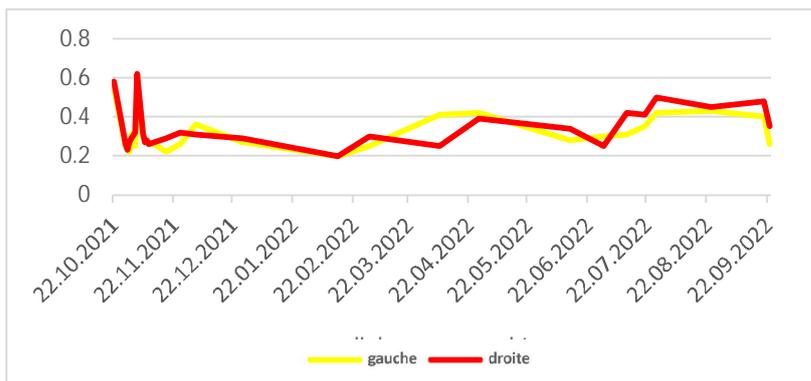
6.2.1. Points de mesure et résultats des mesures

Depuis le début des essais d'exploitation (octobre 2021), ces mesures ont été ou seront effectuées comme suit :

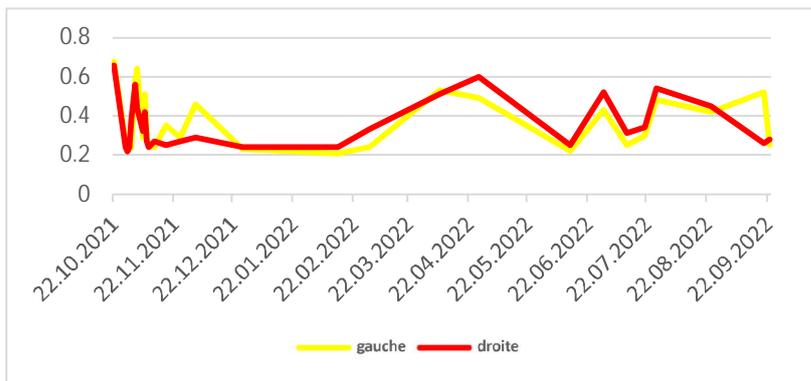
- La première semaine après le début SKK tous les jours
- Chaque semaine pendant les quatre semaines suivantes
- Ensuite mensuellement

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

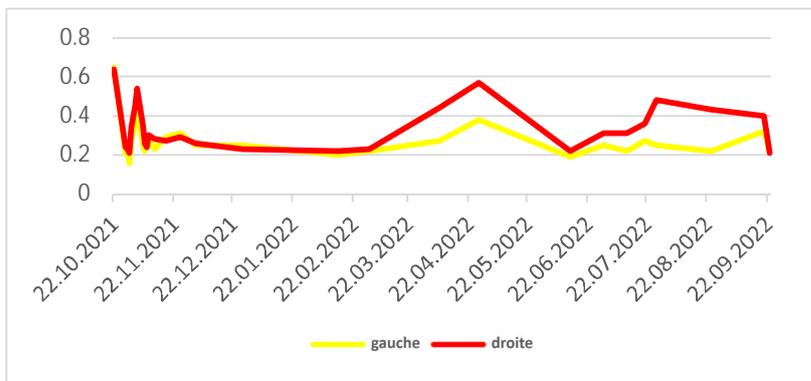
1. Kalter Boden Voie 2 (rayon 100 m) avant l'espace relais kilomètre 41.080



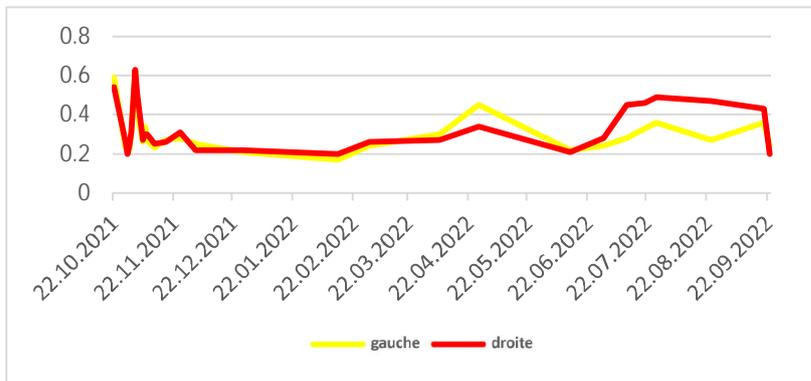
2. Courbe de Bienne (110m) kilomètre 42.050



3. Bienne ligne droite kilomètre 42.100



4. Luegelwang courbe serrée (95m) kilomètre 42.550



6.2.2. Constatations sur les résultats de mesure

Après les premières mesures, le coefficient de frottement est tombé à un niveau constant de 0,2 à 0,3. Lors des deux mesures du coefficient de frottement en avril, le coefficient de frottement a augmenté partout de manière significative. Cela s'explique par le fait que ces mesures ont coïncidé avec du mauvais temps ou avec une fenêtre de mauvais temps. L'humidité de l'air a donc été supérieure à 80% pendant une période prolongée, ce qui a entraîné un faible conditionnement et donc une augmentation du coefficient de frottement. Les mesures du 13.06.22 permettent de conclure que les coefficients de frottement sont redescendus au niveau précédent de 0,2 - 0,3 sans modification du SKK ou autre intervention.

A partir de fin juin 2022, les coefficients de frottement ont augmenté à tous les points de mesure et ont atteint des valeurs de l'ordre de 0,5. Comme les valeurs se sont maintenues à un niveau élevé et n'ont pas baissé comme aux moments précédents, on est parti des suppositions suivantes :

- En raison des températures très élevées et de l'ensoleillement prolongé des mois de juillet et d'août (jusqu'à 30°C dans la vallée de la Matter), combinés à une durée d'exploitation de l'installation SKK limitée (07h00 - 19h00) en raison de l'expérience acquise, surtout pendant la période la plus fraîche de l'année, la quantité de produits SKK n'était pas suffisante pendant toute la durée d'exploitation.
- La chaleur extrême a eu un effet défavorable sur l'action du conditionneur.
- De plus, l'air est relativement humide le matin (l'installation ne fonctionne que lorsque l'humidité de l'air est < 85%), ce qui fait que l'installation ne se remet pas en marche dès 7 heures. On estime donc que les rails ne sont suffisamment conditionnés qu'à 10h00 environ. Une mesure d'essai du 22.09.2022, composée d'une mesure le matin (env. 08h00) et d'une mesure l'après-midi (env. 14h00), étaye cette hypothèse. Comme le montrent les dernières mesures dans les tableaux du chapitre 11.2, des coefficients de frottement élevés ont été mesurés le matin, alors que l'après-midi, des coefficients de frottement compris entre 0,2 et 0,3 ont été mesurés. Cela explique également la chute des valeurs mesurées à la fin des séries de mesures dans les diagrammes des quatre sites de mesure mentionnés ci-dessus.

Lors des mesures du coefficient de frottement, il faudra donc à l'avenir tenir compte des périodes météorologiques. Si une période de pluie a précédé la mesure du coefficient de frottement, ce dernier peut augmenter plus fortement juste après.

6.3. Usure abrasive des rails

Le profil du rail est mesuré à certains points de mesure dans les courbes "Zum Biel - Portail", "Zum Biel - Pont" et "Lüegelwang". Pour cela, plusieurs points de mesure ont été marqués par courbe.

Les mesures ont été effectuées aux dates indiquées dans l'historique, toutes les mesures, à l'exception de celle du 27.09.2022, ayant été réalisées avec le Calipri et le logiciel d'évaluation du KPZ – Fahrbahn. La mesure du 27.09.2022 a été effectuée avec l'appareil de mesure de la zb, car celui-ci était équipé du matériel ainsi que du logiciel de saisie de données pour les mesures des rails, qui permettait ensuite une évaluation géométrique des profils par contact.

Lors des mesures du profil des rails avant et après le meulage en 2021 ainsi qu'en avril 2022, des incohérences ont été constatées dans la localisation des points de mesure. Ces résultats de mesure n'ont donc pas pu être pris en compte dans l'évaluation de l'usure des rails. Au cours de cette analyse, il a été reconnu que 1 à 5 points de mesure par courbe ne se trouvaient pas dans la courbe complète. Sur la base de ces constatations et de la volonté de saisir les effets du SKK en courbe complète dans la zone conditionnée, de nouveaux points de mesure ont été définis (voir Figure 52 à Figure 56). Les nouveaux points de mesure définis se composent de points de mesure déjà existants (numérotés sous forme de nombres entiers) et de points de mesure nouvellement définis (numérotés sous forme de nombres décimaux). Ces points de mesure doivent fournir une information pertinente sur l'usure des rails dans les courbes avec SKK à la fin de l'essai d'exploitation. En outre, il a été décidé de mettre à disposition les profils de rail nouvellement saisis pour des analyses géométriques de contact à l'aide d'une technique de mesure adaptée. L'emplacement des points de mesure ainsi que les valeurs mesurées sont présentés dans les chapitres suivants 0 à 6.3.3.

Historique des mesures Profil de rail :

- 28.09.2021, avant le meulage des rails : Ces données n'ont pas pu être utilisées, car la localisation des points de mesure avec les mesures de suivi n'était pas plausible.
- 21.10.2021, après le meulage des rails : Ces données n'ont pu être utilisées que pour le site de mesure de Lüegelwang, car la localisation des points de mesure n'était pas plausible pour les deux autres sites de mesure.
- 14.01.2022 : Les mesures étaient prévues selon le plan de mesure, mais n'ont pas pu être effectuées en raison de la neige sur la chaussée.
- 05.04.2022 : Ces données n'ont pu être utilisées que pour le site de mesure de Lüegelwang, car la localisation des points de mesure n'était pas plausible pour les deux autres sites de mesure.
- 01.06.2022 : Après le nouvel emplacement de tous les points de mesure, les valeurs mesurées ont pu être utilisées à tous les points de mesure.
- 12.07.2022 : Toutes les valeurs mesurées à tous les points de mesure ont pu être utilisées.
- 27.09.2022 : Les mesures ont été effectuées avec le Calipri Rail de la zb.
- 07.10.2022 : Mesure des profils de rail après le meulage des rails par le KPZ – Fahrbahn.

A partir des profils de rail mesurés, les valeurs W1 pour les rails à l'intérieur de la courbe et W1 ou W3 pour les rails à l'extérieur de la courbe ont été prises en compte pour l'évaluation de l'usure des rails (voir Figure 51). Dans cette Figure 51 pour courbe Zum Biel - Portail, il s'agit d'une courbe à droite. En conséquence, W3R et W1R sont les rails à l'extérieur de la courbe et W1L les rails à l'intérieur de la courbe. Les autres grandeurs d'usure au niveau des surfaces de roulement ne sont pas prises en compte pour l'évaluation du comportement à l'usure.

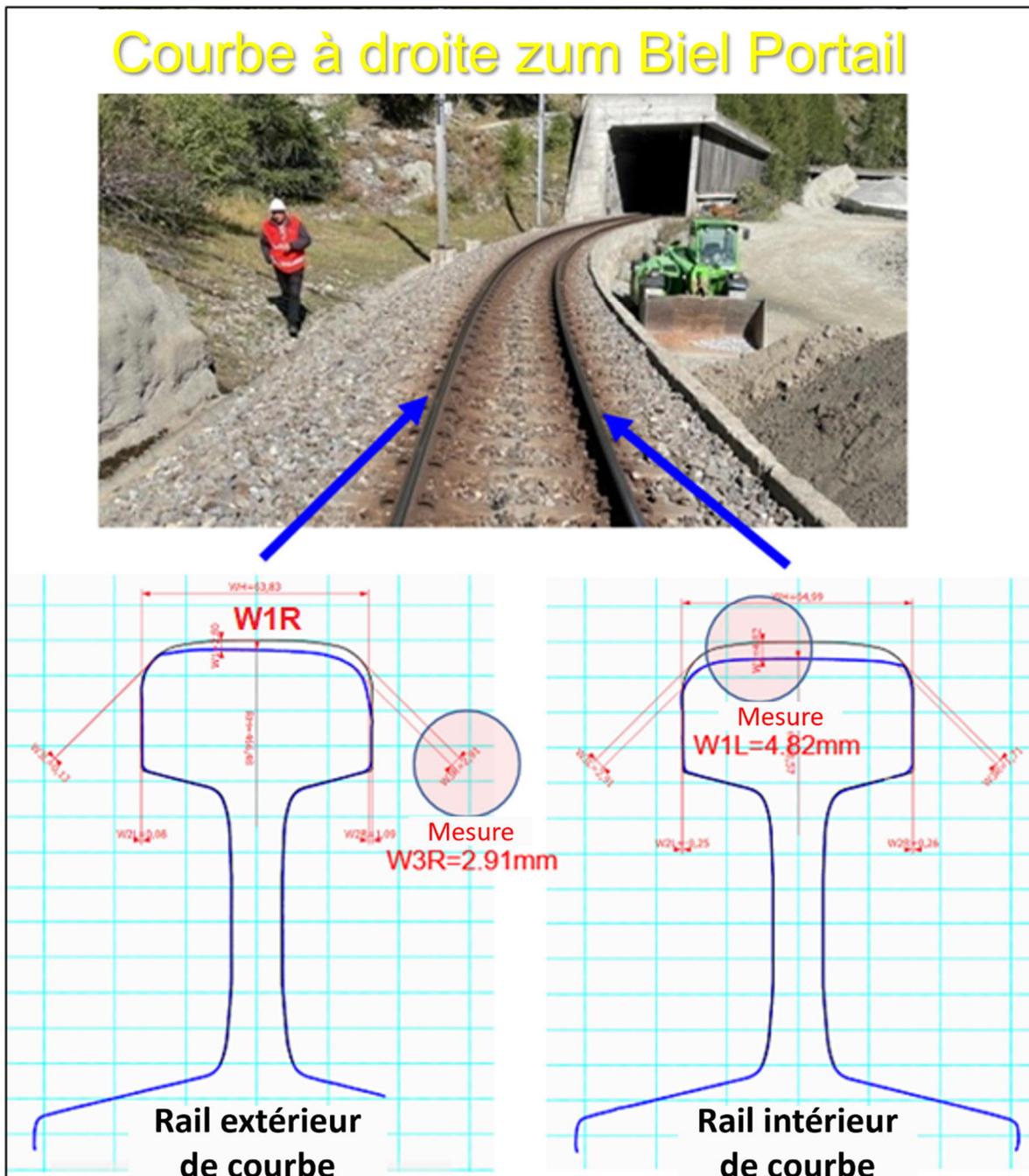
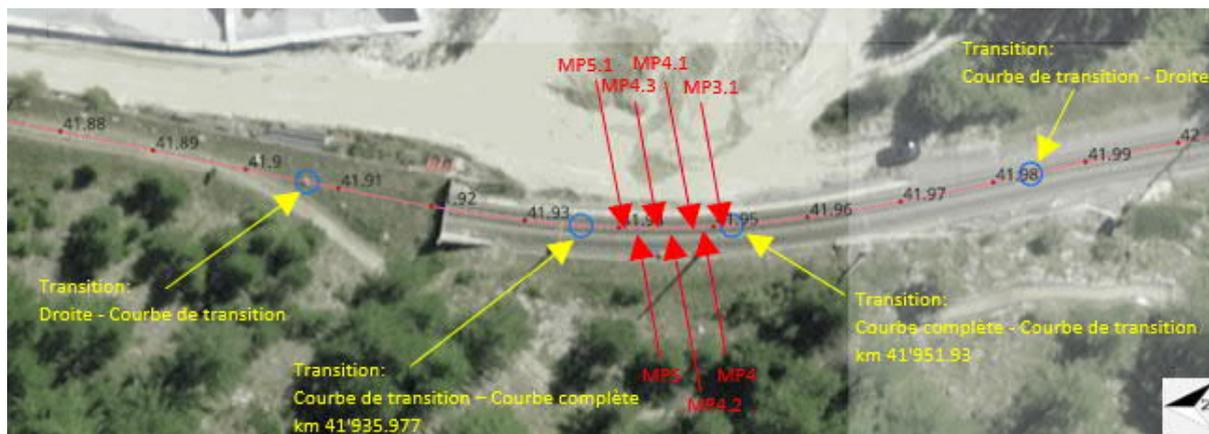


Figure 51: Valeurs de mesure du niveau d'usure des rails mentionnées dans le rapport

6.3.1. Zum Biel – Portail (courbe complète km : 41'935.977 - 41'951.93)

Les **points de mesure** près de la courbe "Zum Biel - Portail" sont définis comme suit :



Points de mesure: (MP's)	MP3.1	MP4	MP4.1	MP4.2	MP4.3	MP5	MP5.1
Kilomètre:	41'951.7	41'949.7	41'948.1	41'946.4	41'944.2	41'942.5	41'940.9

Figure 52: Points de mesure Zum Biel - Portail

La Figure 53 montre les résultats de mesure pour W1 sur le rail intérieur dans la courbe de Zum Biel - Portail. Pour les raisons mentionnées ci-dessus, seuls les résultats de mesure de juin à octobre 2022 sont indiqués. La mesure de la zb est indiquée en bleu. Il semble que la mesure ou l'évaluation de la zb s'écarte systématiquement de celles du KPZ, mais qu'elle suit ici la tendance du KPZ. Il conviendra d'examiner plus précisément d'où provient cet écart. Il faudra notamment déterminer si les causes sont liées à l'utilisation de l'appareil de mesure, à la saisie des valeurs de mesure de différents appareils ou à l'évaluation de l'usure des différents programmes d'évaluation. Dans l'ensemble, on constate de nettes différences d'état d'usure le long de la courbe, avec des écarts d'environ 2 mm. C'est pourquoi la moyenne de l'état d'usure sur toute la longueur du virage est sujette à de très grandes fluctuations.

Sur les rails extérieurs, l'état d'usure (W1, W3) des rails par rapport au profil nominal est nettement plus favorable que sur les rails intérieurs (voir chapitre 11.6.1).

La ligne verte montre d'une part l'écart par rapport au profil nominal et d'autre part l'usure due au meulage des rails après le meulage des rails. Dans l'ensemble, pendant la période d'observation (malgré des températures considérables pendant les mois d'été), l'usure des rails n'est guère mesurable. L'usure due au meulage des rails est légèrement inférieure à 0,2 mm. D'autres résultats d'usure concernant cet courbe sont présentés au chapitre 11.6.1.

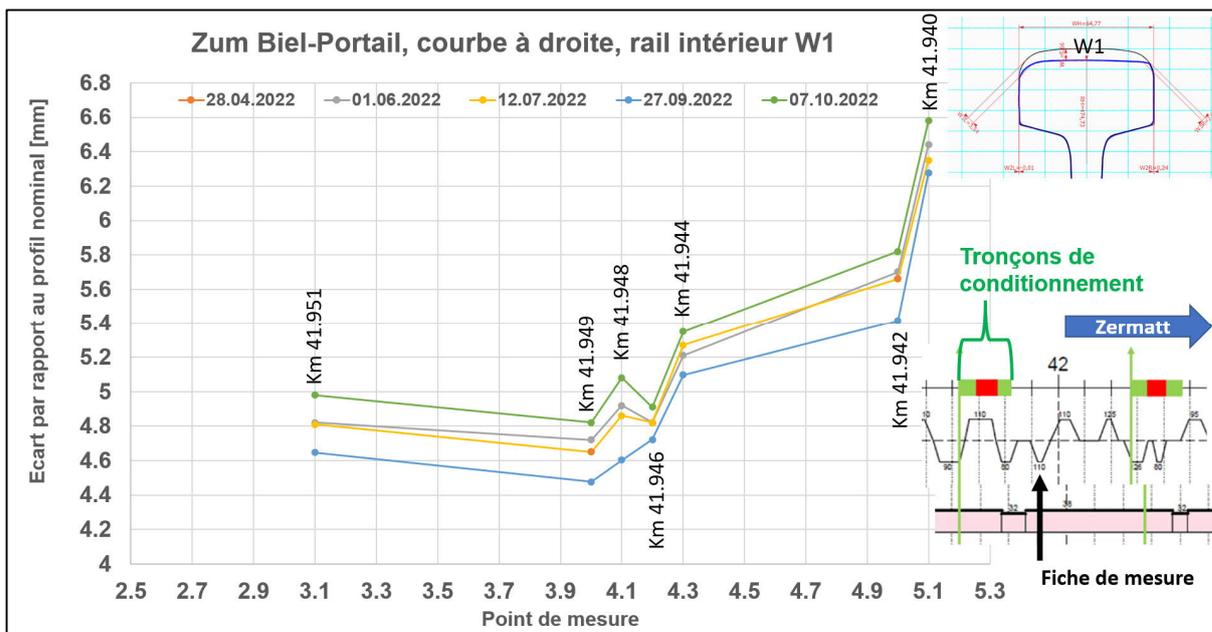
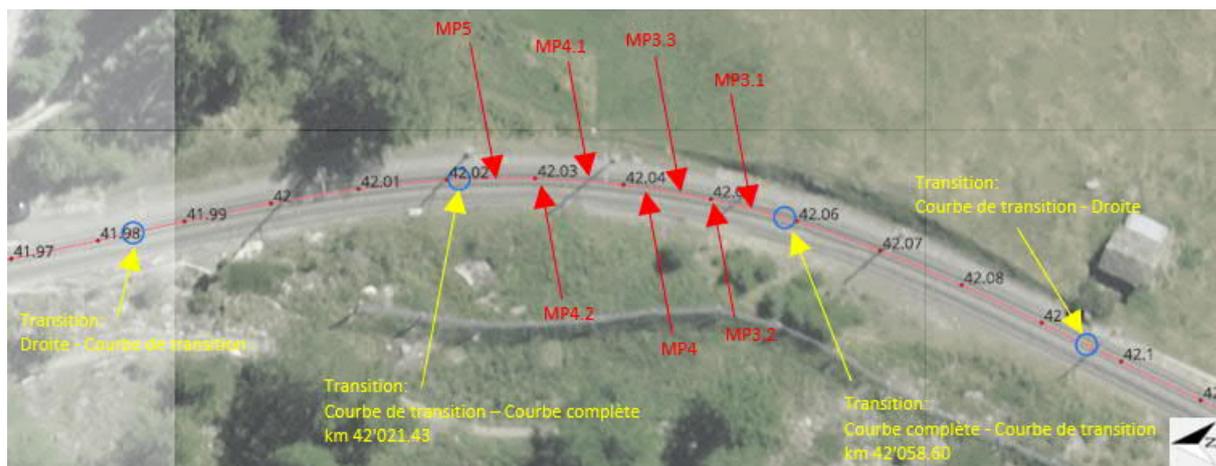


Figure 53: Usure du rail W1 Rail intérieur Zum Biel – Portail

6.3.2. Zum Biel – Pont (courbe complète km: 42'021.43 - 42'058.60)

Les points de mesure près de la courbe "Zum Biel - Pont" sont définis comme suit :



Points de mesure: (MP's)	MP3.1	MP3.2	MP3.3	MP4	MP4.1	MP4.2	MP5
Kilomètre:	42'053.3	42'050.3	42'046.1	42'042.1	42'036.5	42'030.5	42'024.7

Figure 54: Points de mesure de Zum Biel - Pont

La Figure 55 montre les résultats de mesure pour W1 sur le rail intérieur dans la courbe de Zum Biel - Pont. Pour les raisons mentionnées ci-dessus, seuls les résultats de mesure de juin à octobre 2022 sont indiqués. Les mesures de zb sont indiquées en bleu. Ici aussi, on constate que la mesure ou l'évaluation de la zb diffère systématiquement de celles du KPZ, mais que la tendance suit ici aussi celle du KPZ. Le comportement sur le rail intérieur est comparable à celui en haut de la courbe de Zum Biel - Portail. Ici aussi, l'état d'usure présente des zones différentes sur la longueur de courbe par rapport au profil nominal. L'augmentation de l'usure du rail pendant la période d'observation et l'usure due au meulage du rail sont ici aussi marginales.

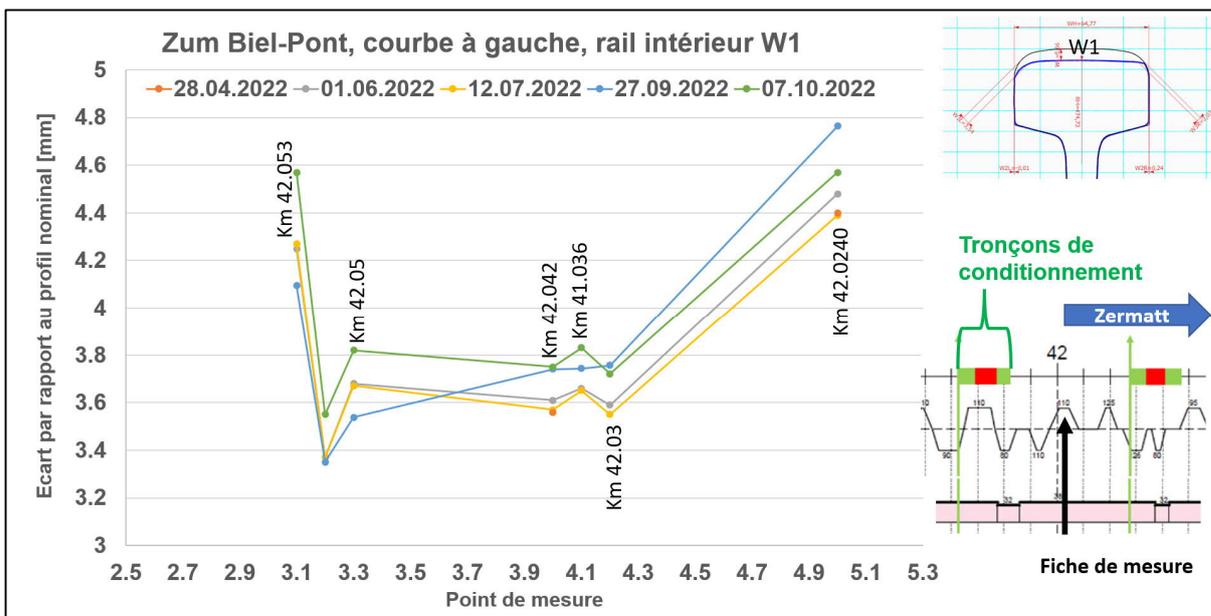
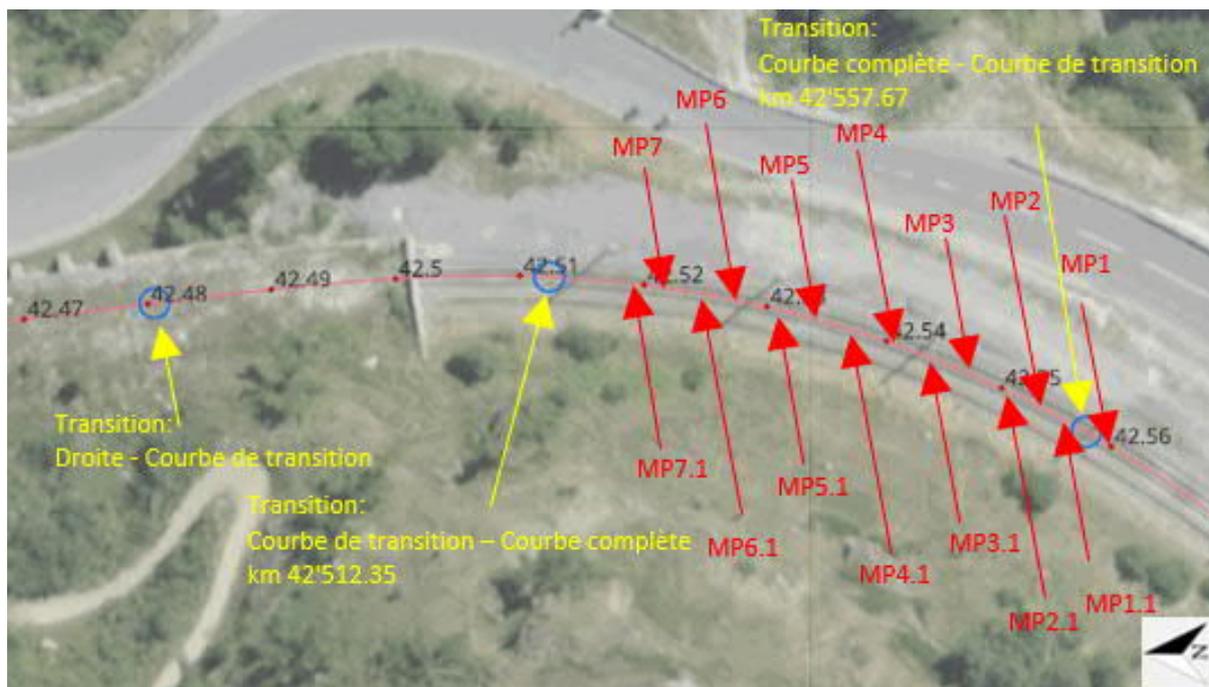


Figure 55: Usure du rail W1 Rail intérieur Zum Biel - Pont

6.3.3. Lüegelwang (Vollbogen km: 42'512.35 - 42'557.67)

Les points de mesure près de la courbe "Lüegelwang" sont définis de la manière suivante:



Points de mesure (MP's)	MP1	MP1.2	MP2	MP2.1	MP3	MP3.1	MP4
Kilomètre	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 56: Points de mesure Lüegelwang

La Figure 57 montre les résultats de mesure pour W1 sur le rail intérieur dans la courbe de Lüegelwang. On y trouve également, à certains endroits, les valeurs mesurées après le meulage du rail. La mesure de la zb est représentée en bleu. Ici aussi, on constate que la mesure ou l'évaluation des zb s'écarte en grande partie systématiquement de celles du KPZ, mais que la tendance suit ici aussi celle du KPZ. En deux points de mesure, les écarts de la zb par rapport au KPZ sont un peu plus marqués. Contrairement aux deux courbes supérieures, on constate ici une montée et une descente de l'état d'usure sur la longueur de courbe.

Très peu d'usure a été constatée aux différents points de mesure pendant la durée de l'observation. En raison des amplitudes légèrement plus importantes des ondulations de patinage, il a fallu enlever légèrement plus de matière lors du meulage des rails.

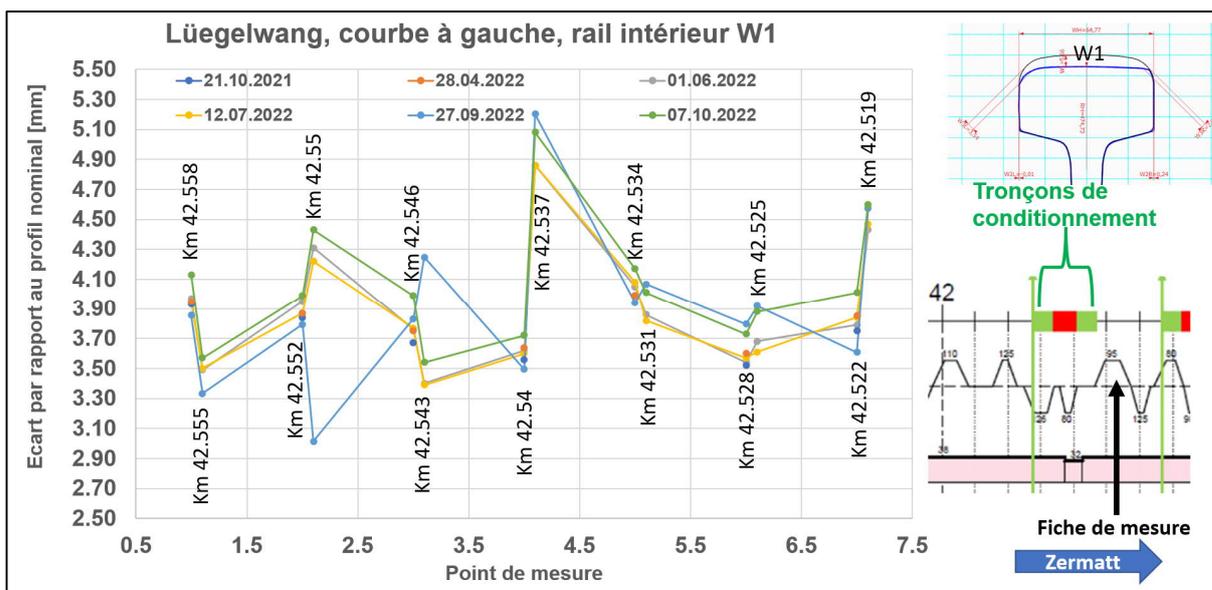


Figure 57: Usure du rail W1 Rail intérieur Lüegelwang

Comme pour les rails intérieurs, l'état d'usure des rails extérieurs présente également une évolution irrégulière par rapport aux autres courbes. L'usure par abrasion dans la zone W3 est un peu plus importante que sur les deux rails dans la zone W1 (jusqu'à 0,4 mm). Comme aucune ondulation de patinage n'a été constatée sur les rails extérieurs sur la base des mesures de rugosité, on peut se demander pourquoi les rails extérieurs ont également été meulés.

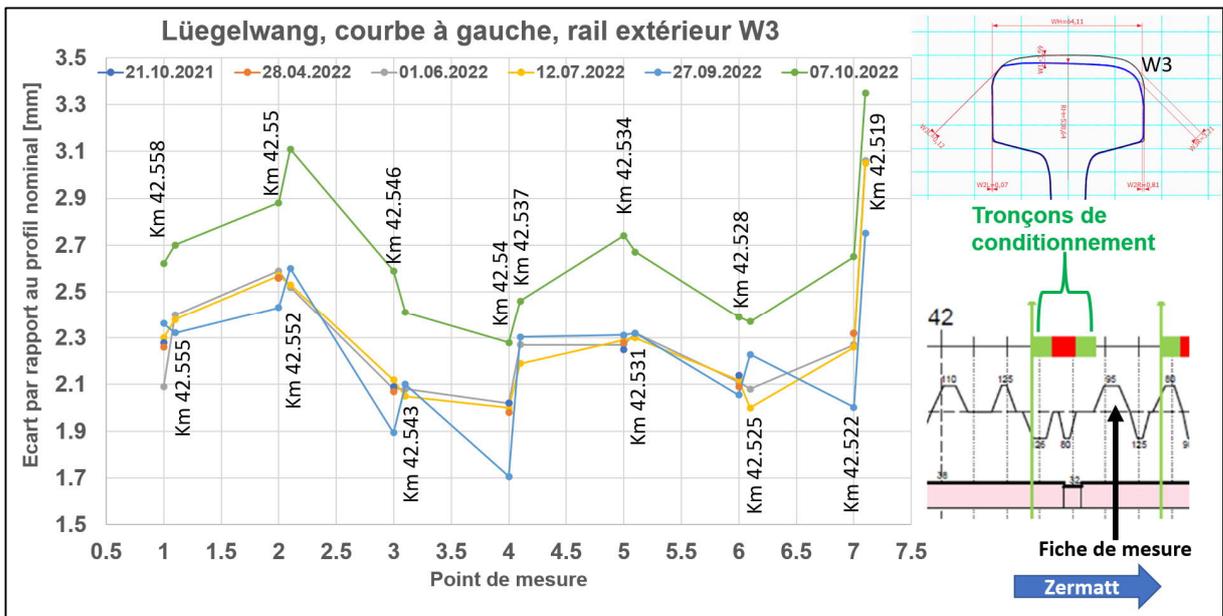


Figure 58: Usure du rail W3 Rail extérieur Lüegelwang

Observations visuelles

Lors de la visite du 30.03.22, des traces d'usure ont été constatées sur les surfaces de roulement des rails dans la zone des tronçons d'accélération (du km 41.9 au km 42.7). Il s'agit de signes typiques de dommages dus à un macro-patinage élevé. On peut supposer que cela se produit surtout en montée, lors de l'accélération de la HGe 4/4 II de 32 km/h à 38 km/h - avec une charge remorquée élevée jusqu'à maximale. Actuellement, on examine avec l'entreprise s'il est possible de faire circuler les trains de marchandises sur ce tronçon de ligne entre Kalter Boden et Zermatt à 32 km/h en continu lors de la montée et de ne pas accélérer à 38 km/h à chaque fois. Cela permettrait d'éviter une nouvelle dégradation de la surface de roulement des rails due au patinage.

6.3.4. Conclusions sur l'usure des rails

La Figure 59 montre l'usure moyenne le long de chaque courbe sur les rails intérieurs et extérieurs aux trois endroits de mesure. L'état de l'usure par rapport au profil nominal est représenté. Il faut tenir compte du fait que les rails étaient déjà en service depuis un certain temps avant l'essai SKK.

La Figure 60 montre l'usure W1 dans les trois courbes sur les rails à l'intérieur de la courbe. La Figure 59 ne contient que l'usure des rails intérieurs des courbes, car elle y est significativement plus importante que sur les rails extérieurs des courbes.

Sur la base des représentations ci-dessus (Figure 53, 55, 57 et 58), il faut tenir compte du fait que les valeurs mesurées le long des courbes sont en partie très dispersées. Malgré ce fait, la Figure 59 montre quelques tendances :

- L'usure des rails à l'intérieur et à l'extérieur des courbes n'a augmenté que de manière minimale (ordre de grandeur : 0,2 mm) au cours de l'année d'essai d'exploitation, suite à l'abrasion par les véhicules.
- L'usure sur la longueur de courbe varie parfois fortement. La raison en est à chercher dans le passé et devrait être plus équilibrée à l'avenir grâce à l'application du SKK.
- Le stock d'usure sur les rails extérieurs des courbes est significativement plus important que sur les rails intérieurs à courbe. On peut supposer que c'est une conséquence de l'usure nettement plus importante lors du meulage des rails en raison des amplitudes nettement plus grandes des ondulations de patinage sans SKK. On peut supposer que le SKK a un effet nettement plus favorable, en particulier sur le rail situé à l'intérieur de courbe.

- Grâce à la croissance réduite des ondulations de patinage, l'intervalle de meulage a pu être doublé (de semestriel à annuel). On peut s'attendre à ce que l'intervalle de meulage puisse encore être prolongé après d'autres optimisations du système, ce qui aura un effet favorable sur les LCC.

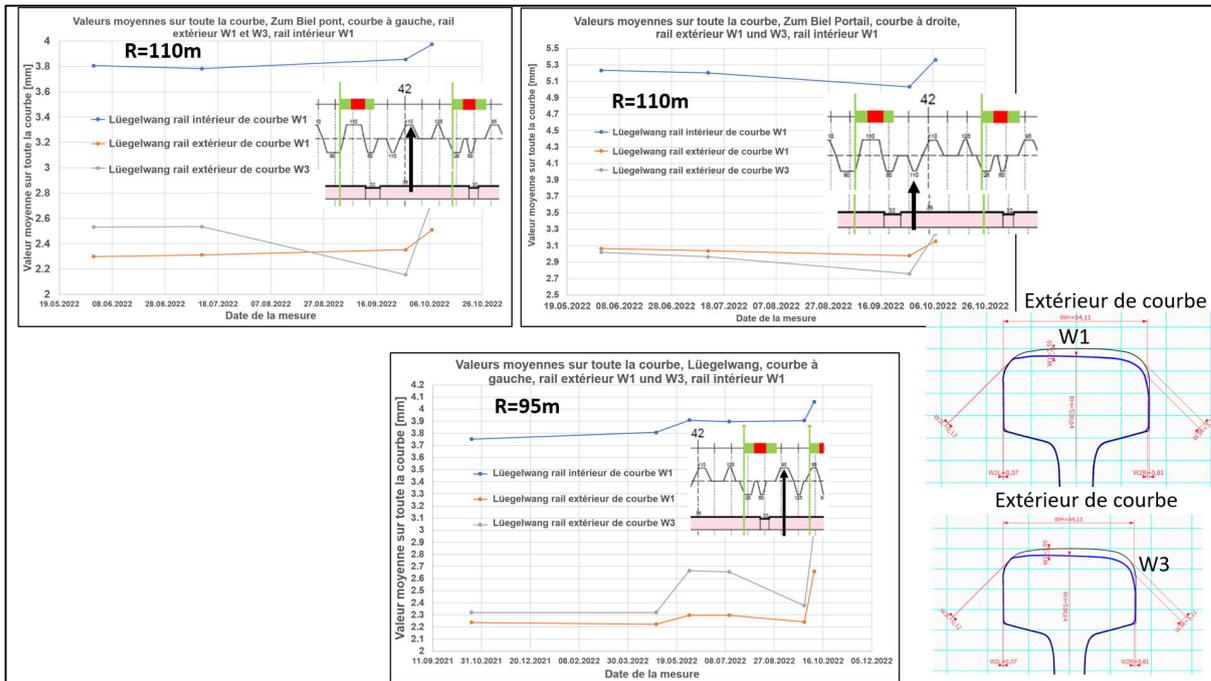


Figure 59: Valeurs moyennes de l'usure des rails intérieurs et extérieurs

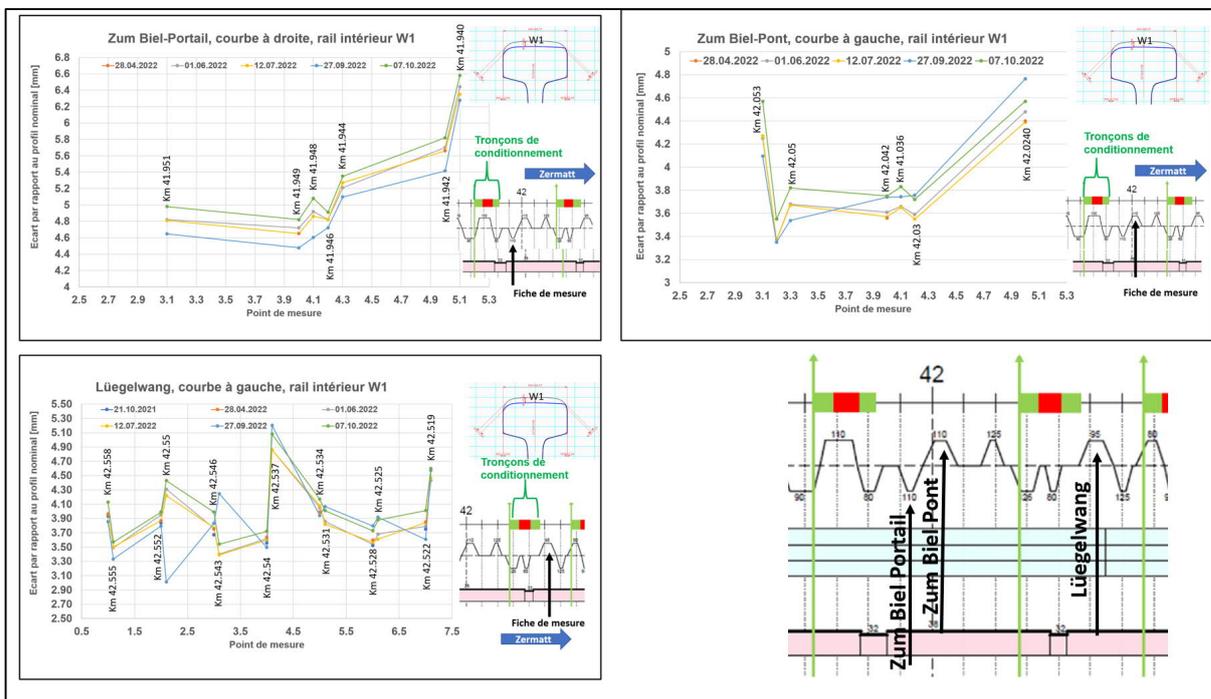


Figure 60: Comparaison du comportement à l'usure sur les rails intérieurs

6.4. Vibrations des rails et des traverses

Les vibrations sur les rails et les traverses ne sont ni directement ni systématiquement mesurées. Comme référence, les mesures d'accélération sur les véhicules de «Technode» (cf. chapitre 7.2.2) peuvent être utilisées, qui pourraient fournir des indications sur les vibrations ou les sollicitations sur les rails pendant le passage des véhicules. A cet effet, des mesures sur la voie ou sur le rail fourniront ultérieurement des indications sûres. Ces mesures sont prévues en collaboration avec le projet P3 et P4 et le ViF.

6.5. Largeur de voie

Comme on peut le voir dans le Tableau 11 et Tableau 12 (écartements mesurés), les écartements n'ont guère changé pendant les essais d'exploitation. On peut supposer qu'ils se soient agrandis depuis la pose des rails moins en raison de l'usure latérale du rail extérieur de la courbe que par le déplacement "côté champ" des deux rails dans les dispositifs de serrage et par l'usure des butées correspondantes. La Figure 62 ci-dessous montre, à l'exemple des profils de rails saisis en juillet 2022 dans la courbe "zum Biel - Pont", que l'usure latérale des rails extérieurs des courbes est très faible et n'a donc pas contribué de manière déterminante à l'élargissement de la voie. Cela s'explique par la bonne lubrification des boudins. Les rails intérieurs de courbe permettent en outre de constater qu'il n'y a pratiquement pas eu d'usure latérale. Cela indique que l'usure longitudinale des rails n'a pratiquement pas eu lieu dans ces courbes.

La Figure 61 montre schématiquement les forces qui agissent sur les roues des deux essieux montés du bogie lors d'un trajet en courbe. Il s'agit d'un véhicule dont les essieux montés sont guidés de manière rigide et qui, par conséquent, présente un angle d'attaque important entre la roue et le rail pour l'essieu avant. Il faut notamment tenir compte des forces dans le sens horizontal / transversal. Plus la courbe est étroite, plus ces forces sont importantes, en particulier sur l'essieu avant, à l'intérieur et à l'extérieur de la courbe. Les forces agissant sur les roues sont représentées ici. Les forces agissant sur les rails sont inversées. Comme on peut le voir sur l'essieu avant, les forces agissant sur les rails exercent un effet d'écartement. Cela explique pourquoi les deux rails se déplacent vers le côté du champ sous l'effet de ces forces. Les forces de tension ne parviennent pas à maintenir les rails dans leur position centrale initiale. Comme on peut le voir sur la Figure 63 et la Figure 64, même les butées fixes (nervures) des fixations des rails ne peuvent pas résister aux sollicitations. Par conséquent, l'élargissement de la voie décrit n'est pas dû à l'usure du rail, mais principalement à la sollicitation des éléments de serrage.

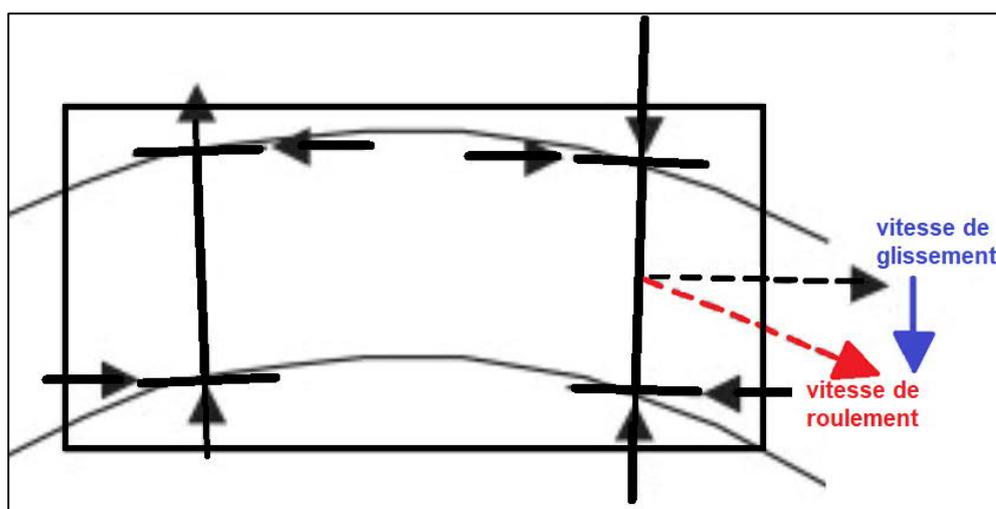


Figure 61: Représentation schématique des forces qui s'exercent sur les roues des deux essieux montés du bogie lors de la marche en courbe.

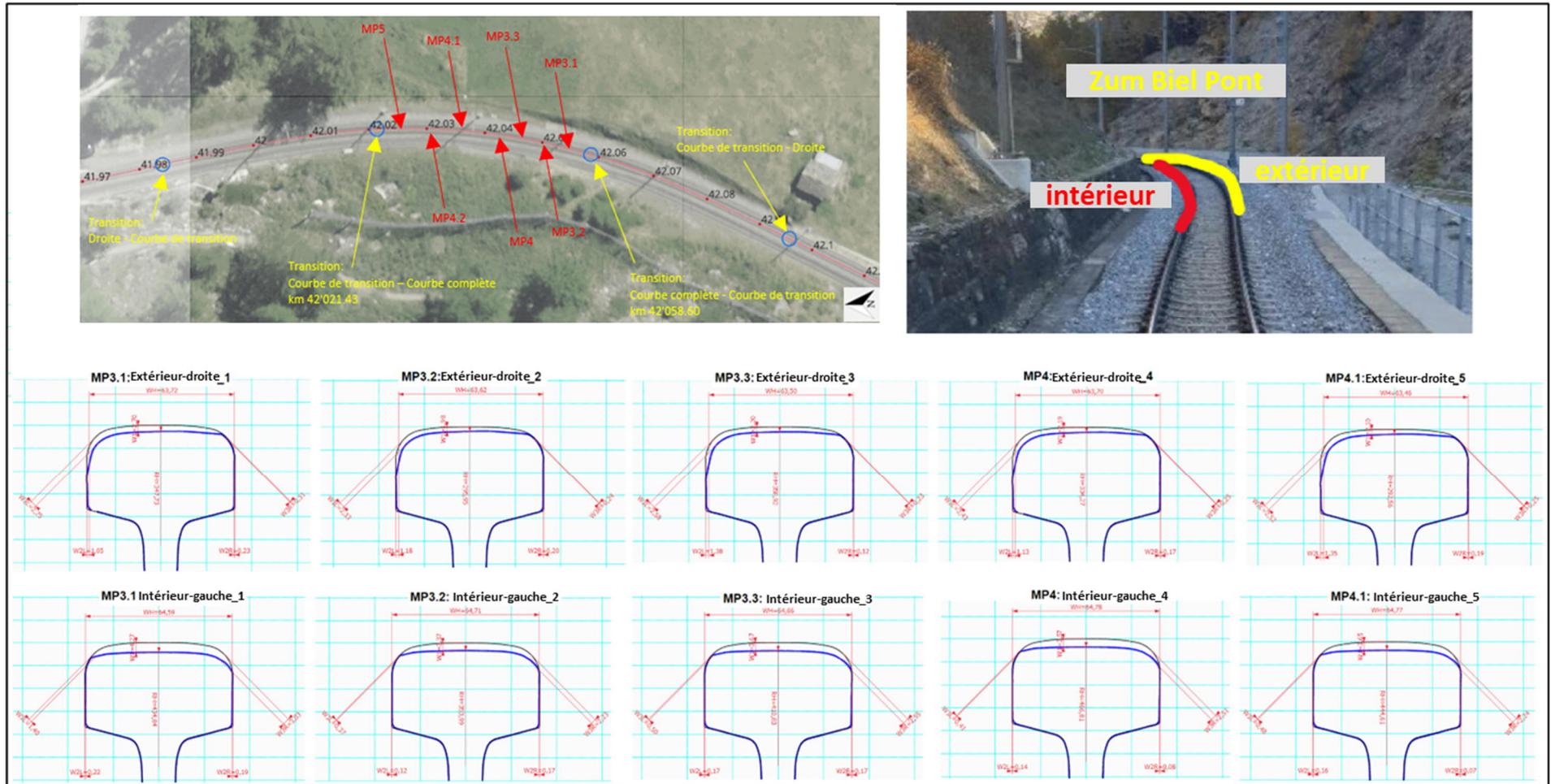


Figure 62: Tendance de l'état d'usure des flancs de rails situés vers le milieu de la voie dans la courbe de Biemme vers le pont.

On peut supposer que le patin du rail s'incruste dans les surfaces des nervures de la plaque de nervure du côté du patin du rail avec l'augmentation de l'usure, ce qui limite la liberté de mouvement du rail sur la cale. Ainsi, en particulier, les cales souples sont contournées et par conséquent les forces de support sont augmentées.

Le SKK permet de réduire les forces de guidage. Cela réduit également les forces d'écartement des essieux montés porteurs avant sur les deux rails à l'extérieur et à l'intérieur de la courbe (forces vers l'extérieur depuis l'axe de la voie) et les rails s'enfoncent moins dans les nervures.



Figure 63: Plaque de nervure à l'intérieur de courbe



Figure 64: Plaque de nervure à l'extérieur de courbe

	km	28.09.2021	21.10.2021	14.01.2022	05.04.2022
Täschsand	MP1 39419,9	1011	1009	-	1011
	MP2 39412,1	1008	1007	-	1007
	MP3 39404,3	1008	1008	-	1008
	MP4 39396,5	1008.5	1008	-	1008
	MP5 39388,7	1006	1008	-	1008
	MP6 39380,9	1007	1007	-	1007
	MP7 39373,1	1007	1006	-	1007
Zum Biel Portal	MP1 41971,3	1008	1008	-	1008
	MP2 41964,1	1007	1008	-	1008
	MP3 41956,9	1008	1009	-	1008
	MP4 41949,7	1008	1008	-	1008
	MP5 41942,5	1010	1010	-	1009
	MP6 41935,3	1008.5	1009	-	1008
	MP7 41928,1	1008	1007	-	1007

Tabelle 11: Mesures de l'écartement des rails Täschsand & Zum Biel-Portail

	km	28.09.2021	21.10.2021	14.01.2022	05.04.2022
Zum Biel Brücke	MP1 42094,3	1002	1002	-	1002
	MP2 42076,9	1007	1008	-	1007
	MP3 42059,5	1008	1008	-	1007
	MP4 42042,1	1009	1009	-	1009
	MP5 42024,7	1009	1009	-	1008
	MP6 42007,3	1008	1008	-	1007
	MP7 41989,9	1007.5	1008	-	1006
Lüegelwang	MP1 42588,6	-	1010	-	1010
	MP2 42582,6	-	1011	-	1010
	MP3 42576,6	-	1011	-	1010
	MP4 42570,6	-	1010	-	1009
	MP5 42564,6	-	1009	-	1008
	MP6 42558,6	-	1011	-	1010
	MP7 42552,6	-	1010	-	1010

Tabelle 12: Mesures de l'écartement des voies Zum Biel - Pont & Lüegelwang

7. Mesures / surveillance et résultats généraux

7.1. Crissements dans les courbes

Les observations du personnel des locomotives indiquent que les crissements dans les courbes ont diminué sur la ligne des essais d'exploitation. Cette impression a pu être confirmée lors d'une visite de la ligne. Lors de cette visite pendant les essais d'exploitation, le bruit ou le crissement dans les courbes était sensiblement moins fort que lors des visites effectuées avant les essais d'exploitation SKK.

7.2. Vibrations au niveau du palier de l'essieu et bruit causé par le crissement des roues

7.2.1. Description du système de mesure «Technode»

Le système de mesure de la société Technode GmbH a été spécialement conçu pour être utilisé sur les véhicules ferroviaires. Il comprend une unité centrale, une antenne combinée GNSS et LTE sur le toit, les capteurs d'accélération sur les paliers d'essieu, un capteur d'accélération sur le châssis du bogie et les microphones qui sont montés sur la caisse du véhicule à proximité de l'essieu à surveiller.

La MGB a équipé les deux véhicules suivants du système de mesure :

- Navette BDeh 2052
- Comète ABDeh 2026

Les illustrations suivantes (Figure 65 - Figure 68) donnent un aperçu de l'installation du système de mesure sur la Navette BDeh 2052.

Les données de mesure brutes sont saisies de manière autonome et transmises via la connexion LTE à un serveur, où elles sont stockées dans une base de données en vue d'être analysées. Le système de navigation par satellite permet de localiser les données sur le réseau de voies et d'attribuer ainsi une position à chaque point de mesure sur le réseau de voies.

Les données de mesure ainsi que les évaluations standard peuvent être consultées, affichées et analysées de manière interactive via une interface web. Un exemple de l'affichage web est représenté dans la Figure 69.

Les données de mesure des microphones ne sont pas transmises au serveur sous forme de "données brutes" en raison de la quantité de données, le taux d'échantillonnage des microphones étant de 24 kHz. Une transformation de Fourier est effectuée directement dans le capteur avec 1024 échantillons et la moyenne des amplitudes ainsi obtenues est calculée pour chaque fréquence pendant une seconde. On obtient ainsi un spectre qui reproduit les amplitudes moyennes pour une seconde. Comme les microphones ne sont pas étalonnés, il n'est pas possible de déterminer le volume effectif.



Figure 65: Unité centrale railnodeG montée sur la caisse du véhicule sous le soufflet au passage d'inter-circulation



Figure 66: Antenne combinée LTE et GNSS sur le toit de la Navette BDeh 2052



Figure 67: Capteur railnodeX avec microphone monté sur la caisse du véhicule de la Navette BDeh 2052



Figure 68: Capteur railnodeX avec accéléromètre monté sur la caisse du véhicule de la Navette BDeh 2052

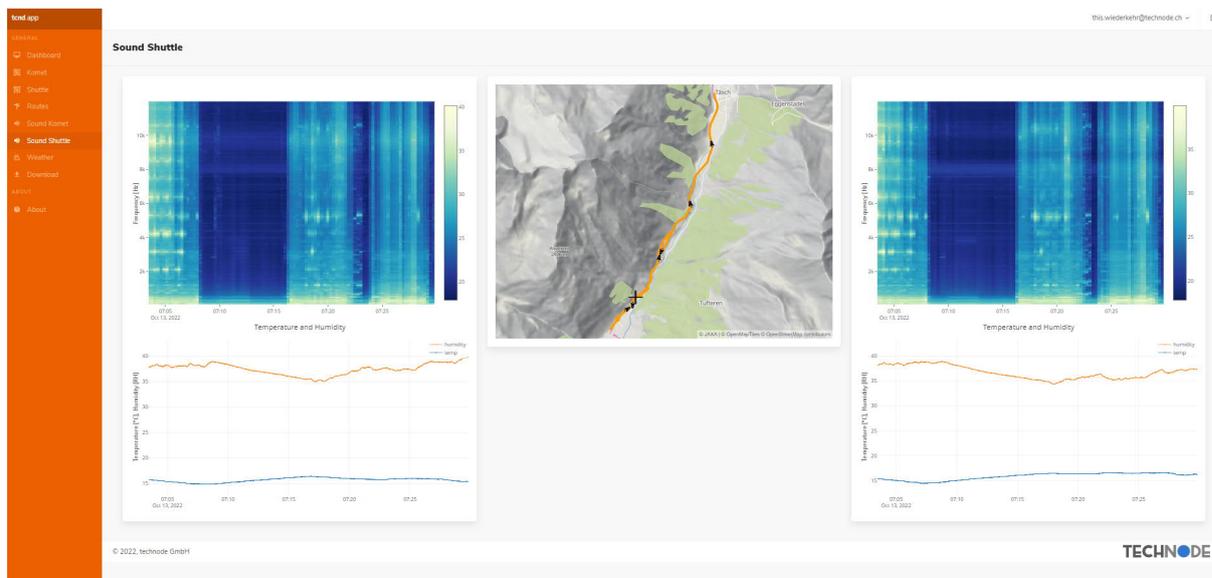


Figure 69: Représentation des données de mesure du microphone dans l'interface web

7.2.2. Vibrations du palier d'essieu détectées par le système de mesure « Technode »

Pour la détection des vibrations, des capteurs d'accélération ont été embarqués sur une Navette et une Comète, comme décrit dans le chapitre 7.2.1. Ceux-ci étaient déjà en service avant le début des essais d'exploitation du SKK, raison pour laquelle une comparaison entre les accélérations avant et après le début des essais d'exploitation est possible ici. La Figure 70 montre l'évolution des accélérations sur les mois de septembre 2021 à septembre 2022 entre "Täschsand" et Zermatt. Cette figure doit être interprétée comme suit : le trajet parcouru ou ses tronçons sont représentés dans la couleur correspondant à l'intensité moyenne des accélérations. L'échelle des couleurs va du vert foncé (faibles accélérations) au rouge foncé (fortes accélérations) en passant par le jaune (accélérations moyennes).

Avant le meulage des rails et donc avant le début des essais d'exploitation SKK (septembre 2021), une partie importante de la ligne Täschsand - Zermatt était rouge à rouge foncé (grandes accélérations). Ceci en particulier aussi dans les courbes où l'usure des rails est mesurée (courbes Zum Biel Portail, Zum Biel Pont et Lügelwang).

Après le meulage des rails et avant le début des essais d'exploitation SKK (octobre 2021), les zones rouges et rouges foncées ne sont plus reconnaissables. Cela indique que la technique de mesure utilisée ici permet au moins de détecter des amplitudes plus importantes d'ondulations de patinage. Des observations et des analyses plus poussées doivent permettre de déterminer jusqu'à quel point cela est le cas.

Depuis le début des essais d'exploitation SKK (novembre 2021), les vibrations ont diminué par rapport à septembre 2021, ce qui se voit au fait que les tronçons correspondants sont représentés d'avantage en vert. Cette évolution se poursuit jusqu'en juin 2022, où les accélérations mesurées se situent dans une zone vert foncé (faibles accélérations). En juillet et en août 2022, les accélérations ont augmenté par rapport aux mois précédents, comme le montrent les parties orange. Cela correspond aux autres résultats de mesure (coefficients de frottement plus élevés, plus grande rugosité des rails). Cette évolution s'explique ici aussi par les températures élevées de ces mois, combinées aux longues journées d'été, qui favorisent une érosion plus rapide de l'agent SKK. Dans l'ensemble, on peut constater qu'une tendance significative à des accélérations réduites est perceptible sur la nette majorité des mois enregistrés. Cela signifie qu'à l'exception de la période juillet-août 2022, aucune croissance remarquable des ondulations de patinage ne s'est produite.

Septembre
01.09.21 – 01.10.21



Octobre
01.10.21 – 01.11.21



Novembre
01.11.21 – 01.12.21



Décembre
01.12.21 – 01.01.22



Janvier
01.01.22 – 01.02.22



Février
01.02.22 – 01.03.22



Mars
01.03.22 – 01.04.22



Avril
01.04.22 – 01.05.22



Mai
01.05.22 – 01.06.22



Juin
01.06.22 – 01.07.22



Juillet
01.07.22 – 01.08.22



Août
01.08.22 – 01.09.22



Septembre

01.09.22 – 01.10.22



Figure 70: Historique des vibrations "Täschsand" - Zermatt, 21 septembre - 22 août

7.2.3. Émission sonore enregistrée avec le système de mesure «Technode»

Sur les deux véhicules, comme décrit au chapitre 7.2.1, ont également été installés des microphones qui doivent permettre de savoir si des crissements dans les courbes se produisent et dans quelles courbes. Les microphones sont placés de part et d'autre d'un essieu sur la caisse du véhicule, à proximité de la face extérieure des roues. Les données obtenues grâce à cette mesure permettront à l'avenir d'identifier les endroits de la ligne où se produisent des crissements dans les courbes et, le cas échéant, de fournir des indications sur leurs corrélations avec le comportement vibratoire au niveau des paliers d'essieu (mécanismes). Il est possible de savoir si les modes propres des roues responsables du crissement sont stimulés et sous quelle forme en observant la couleur à l'endroit correspondant sur le parcours de la représentation spectrale de la Figure 71. A l'aide de l'échelle de couleurs de la Figure 71 il sera possible à l'avenir d'identifier les modes propres stimulés associés à la voie et responsables du bruit et de surveiller ainsi l'efficacité des mesures prises par la gestion du frottement.

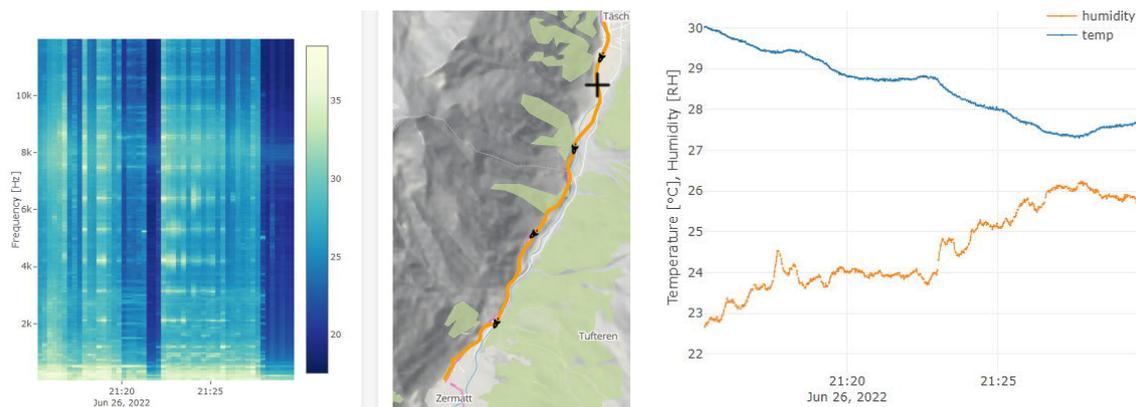


Figure 71: Données de mesure Technode: Täsch - Zermatt Gammes de fréquences & température / humidité de l'air

Hypothèse d'origine du bruit

Dans la littérature, on distingue principalement deux types de bruit lors de la circulation en courbe des véhicules ferroviaires. Il s'agit d'une part du crissement dans les courbes (squealing en anglais) et d'autre part du bruit des boudins (flangeing en anglais). Ces deux bruits se produisent principalement dans les courbes à petits rayons.

Le squealing est un bruit pénétrant et "tonal". Le flangeing, quant à lui, est plutôt un bruit "grattant" "ziing-ziing-ziing", décrit comme non "tonal" ou intermittent.

L'état actuel des connaissances n'est pas tel qu'il existe un enseignement uniforme sur l'origine de ces bruits. Nous formulons ci-après une hypothèse à ce sujet :

Ces deux effets sont dus au fait que la différence de rayon de roulement des essieux montés et/ou le comportement de réglage des essieux montés ne suffisent pas pour franchir des courbes étroites en autoguidage. Il en résulte des mouvements relatifs dans le contact roue-rail qui peuvent entraîner des vibrations à haute fréquence et du bruit.

- Le squealing est dû à l'effet stick-slip dans le contact roue-rail à l'intérieur du virage. Il s'agit principalement d'un mode propre du disque de roue qui est excité périodiquement en interaction avec le rail. D'où la "tonalité" de ce bruit. L'effet de stick-slip se produit sur le dessus de la surface de roulement du rail. C'est pourquoi cet effet peut être influencé par le SKK.
- Le flangeing est dû à l'impact périodique du boudin de roue sur le côté extérieur de la courbe. Lors de l'impact, toutes les fréquences sont excitées, comme un choc triac. D'où le bruit de "grattement" et non de "tonalité". Ce choc se produit sur le côté du rail et sur le boudin. Le SKK n'a donc qu'une faible influence sur le flangeing. En revanche, cet effet peut être influencé par la lubrification des boudins.

Pour vérifier cette hypothèse, les étapes suivantes ont été suivies :

1. Trajets de mesure accompagnés avec la Comète et la Navette du 23.11.2021
2. Simulation par éléments finis des disques de roue pour déterminer les modes uniques
3. Frapper les disques de roue au dépôt de Glis à l'aide d'un marteau
4. Mesures acoustiques stationnaires à Viège et St. Niklaus

Concernant le point 1 : Trajets de mesure accompagnés du 23.11.2021

Les trajets de mesure ont été effectués le 23 novembre 2021 sur le trajet Viège-Zermatt et Täsch-Zermatt. L'objectif de ces trajets de mesure accompagnés était d'enregistrer l'évaluation subjective du bruit et de la comparer ensuite avec les données de mesure. Une attention particulière a été portée à la différenciation des bruits en "flangeing" et "squealing". Pour ce faire, la durée exacte de ces effets a été notée à chaque fois.

Malheureusement, les conditions marginales de cette journée de trajets de mesure n'étaient pas adaptées et il n'y a eu que très peu de crissements en virage, ce qui rend la caractérisation difficile.

Après les trajets de mesure, les spectres mesurés des microphones ont été moyennés séparément pour ceux qui ont été classés subjectivement comme squealing et flangeing. Il s'est avéré que les bruits à large bande avaient tendance à être classés comme flangeing et les bruits à bande étroite comme squealing.

Pour les points 2 et 3 : Modes propres et fréquences du disque de roue

Afin de déterminer les modes propres et les fréquences du disque de roue, une simulation par éléments finis a été réalisée d'une part et le disque de roue a été frappé au marteau au dépôt de Glis d'autre part.

Les modes propres de la simulation FE ont été filtrés en fonction des modes présentant une masse oscillante axiale élevée. Les fréquences propres et les formes d'oscillation correspondantes sont représentées dans la ci-dessous.

Le relevé transitoire des spectres lors de la frappe des disques de roue est représenté dans la Figure 73 et Figure 74.

A partir des trajets de mesure, les spectres moyennés avec les effets de squealing et de flangeing ont été utilisés pour déterminer les pics de fréquence.

Les résultats des fréquences obtenues de cette manière sont présentés dans le *Tableau 13*. Une comparaison des fréquences ainsi obtenues montre une très bonne concordance.

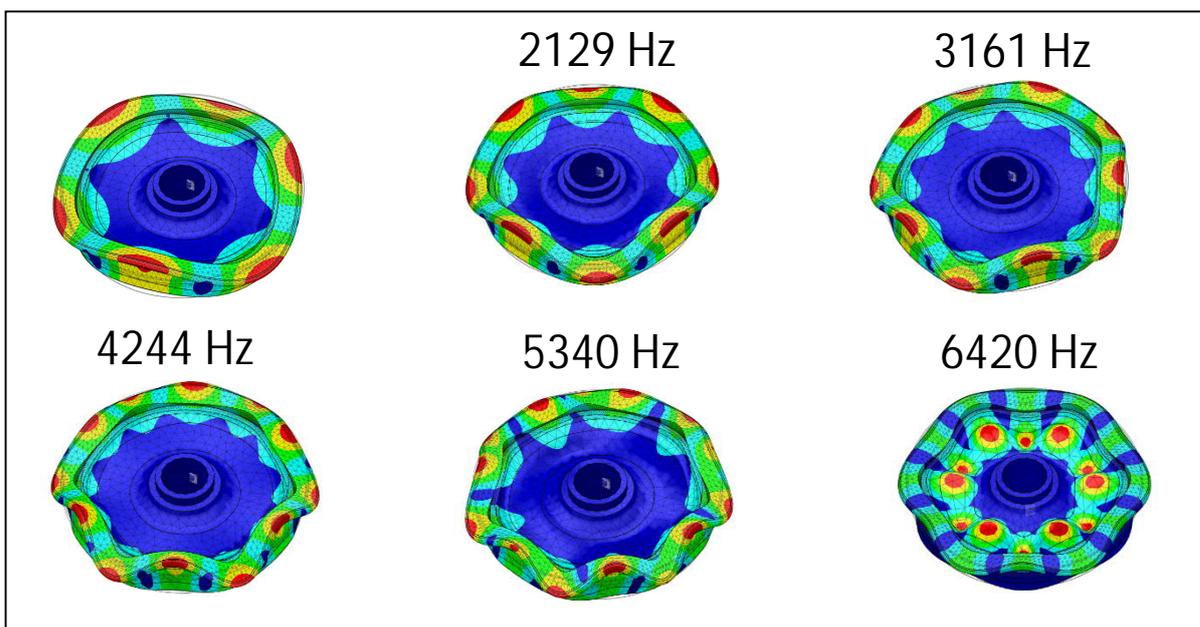


Figure 72: Modes propres avec une masse participant élevée dans la direction axiale à partir de la simulation FE

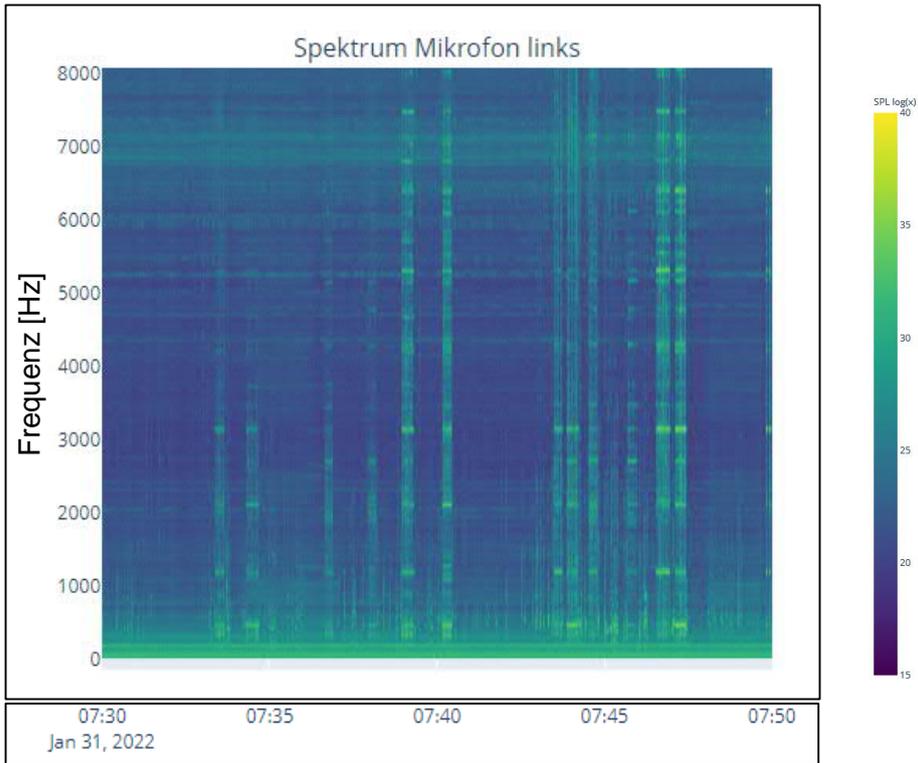


Figure 73: Spectres de fréquence obtenus le 31.01.2022 lors de l'impact de la roue, roue gauche

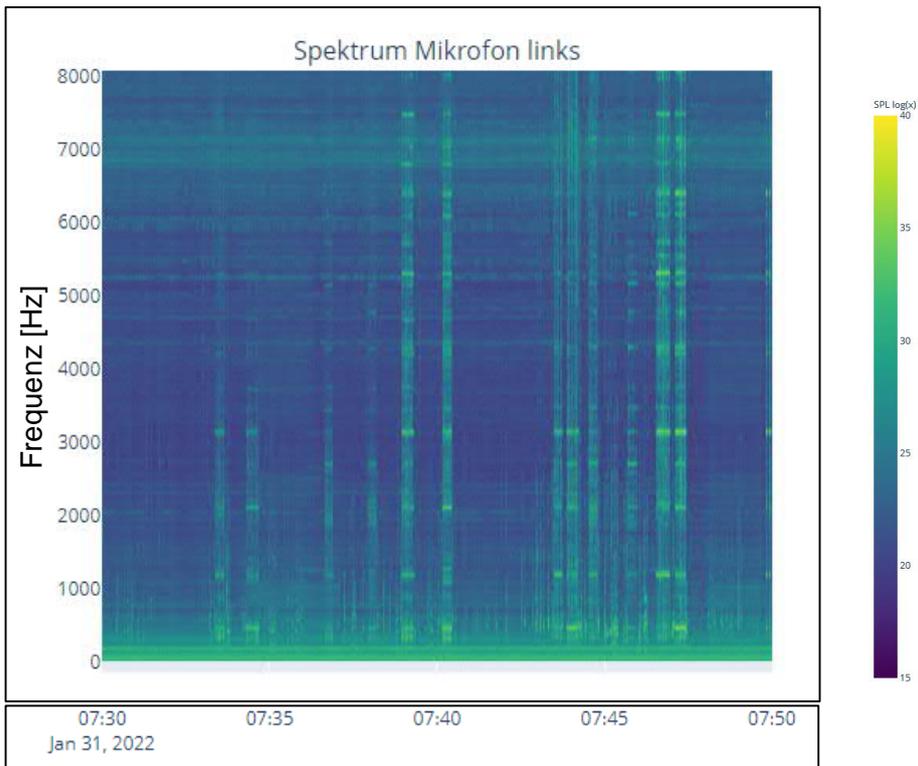


Figure 74: Spectres de fréquence obtenus le 31.01.2022 lors de la frappe de la roue, roue droite

	Fréquence Simulation Fe [Hz]	Pics de fréquence Navette en cas de butée de roue [Hz]	Pics de fréquence dus au trajet de me- sure [Hz].
Mode 1	1201 Hz	1195 Hz	1171 Hz
Mode 2	2129 Hz	2156 Hz	2085 Hz
Mode 3	3161 Hz	3140 Hz	3039 Hz
Mode 4	4244 Hz	4289 Hz	4148 Hz
Mode 5	5340 Hz	5320 Hz	5179 Hz
Mode 6	6420 Hz	6421 Hz	6187 Hz

Tableau 13: Fréquences des modes propres issues de la simulation FE, de l'impact du disque de roue et du trajet de mesure

Pour 4 : Mesure acoustique stationnaire à Viège et à Glis

Sur la base des données de mesure recueillies jusqu'à présent par le système de mesure de la Navette et de la Comète, il a été constaté que, dans certaines courbes, seule une fréquence spécifique de 5,3 kHz était excitée. On a donc émis l'hypothèse qu'il s'agissait du "crissement tonal des courbes". Afin de vérifier cette hypothèse, le « Kompetenzzentrum Fahrbahn » (KPZ) a effectué des mesures stationnaires de bruit dans deux courbes qui, sur la base de l'expérience, ont tendance à produire des crissements dans les courbes. Il s'agit des courbes de Viège (km 9.1 de la voie ferrée, rayon de 90 m) et de St. Niklaus (km 26.2 de la voie ferrée, rayon de 100 m). Les mesures de bruit du passage de la Comète ont ensuite été utilisées pour établir des spectres de fréquence. Ces spectres ainsi obtenus sont représentés dans la Figure 75. Comme on peut le constater, les pics d'amplitude apparaissent à environ 5,3 kHz.

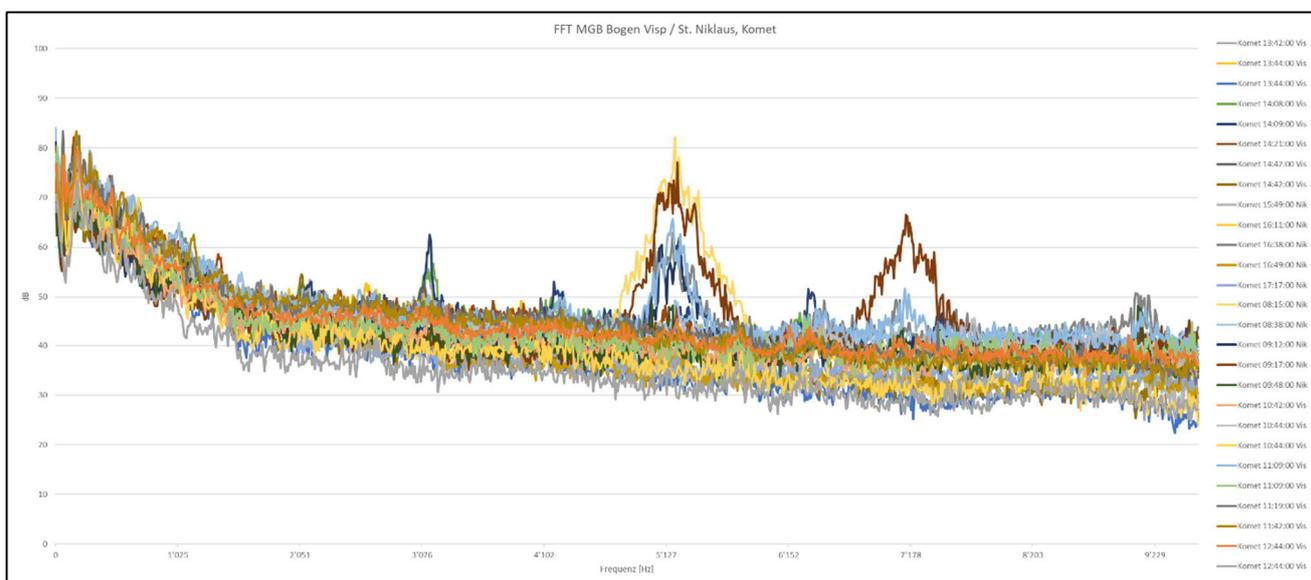


Figure 75: Spectres de bruit au passage de la Comète à Viège et St-Nicolas, mesurés le 05.04.2022 par le centre de compétence voie

Evaluation du crissement de courbe

Un filtre de fréquence a été créé afin de déterminer spécifiquement où le squealing se produit sur le réseau de voies (Figure 76), qui évalue fortement les fréquences à 5,3 kHz. Ce filtre n'est cependant valable que pour les véhicules Comète et Navette sur les essieux montés moteurs, car la fréquence d'oscillation dépend du type de construction de la roue.

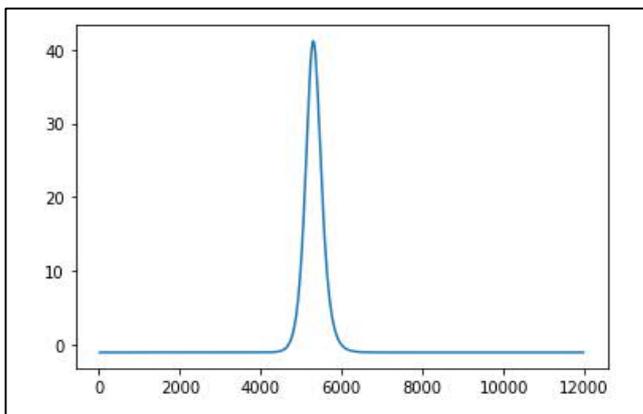


Figure 76: Filtre de fréquence pour les crissements de courbe pour les véhicules Comète et Navette sur essieux montés moteurs

Les spectres évalués avec ce filtre de fréquence peuvent maintenant être tracés pour chaque trajet sur la ligne. Il en résulte les figures de la Figure 77 et Figure 78.

Les quatre graphiques représentent, de haut en bas, ce qui suit :

1. Crissement de courbe microphone droit
2. Trajectoire de la voie avec courbure (tronçons SKK marqués en rouge)
3. Crissement de courbe microphone gauche
4. Quantile 90% pour la position spécifique sur le réseau pour le crissement de courbe

Chaque ligne horizontale des graphiques 1 et 3 correspond à un trajet de mesure, la couleur à l'intensité du crissement de courbe (violet - vert - jaune signifie faible - moyen - élevé).

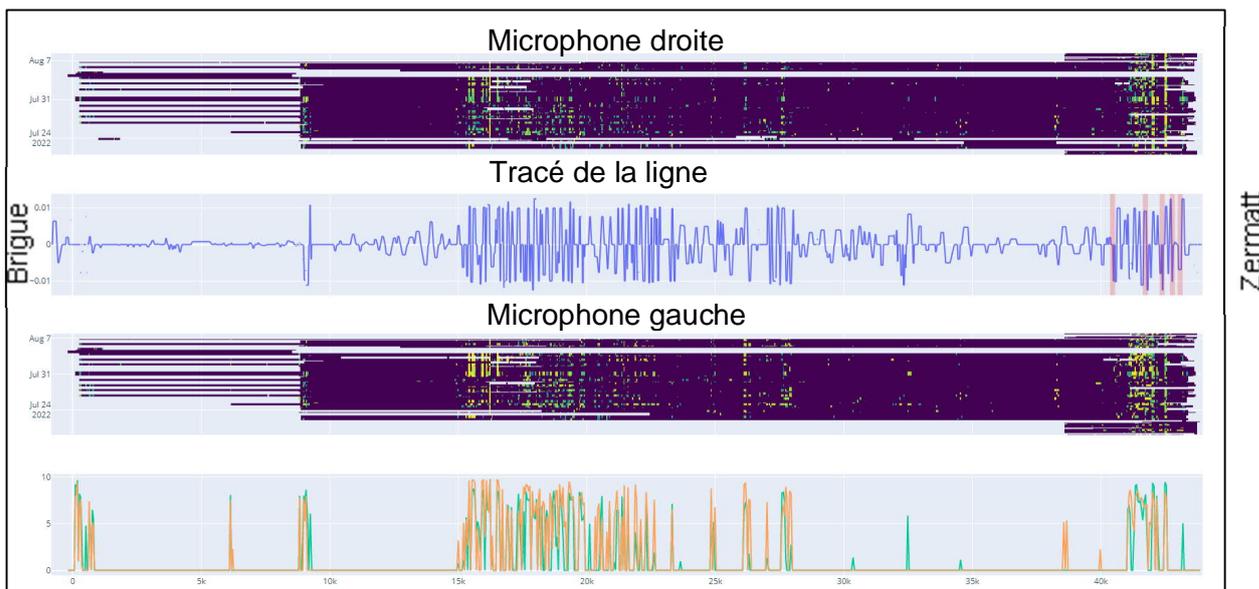


Figure 77: Crissement de courbe du trajet Brigue - Zermatt avec la Navette lors de la montée

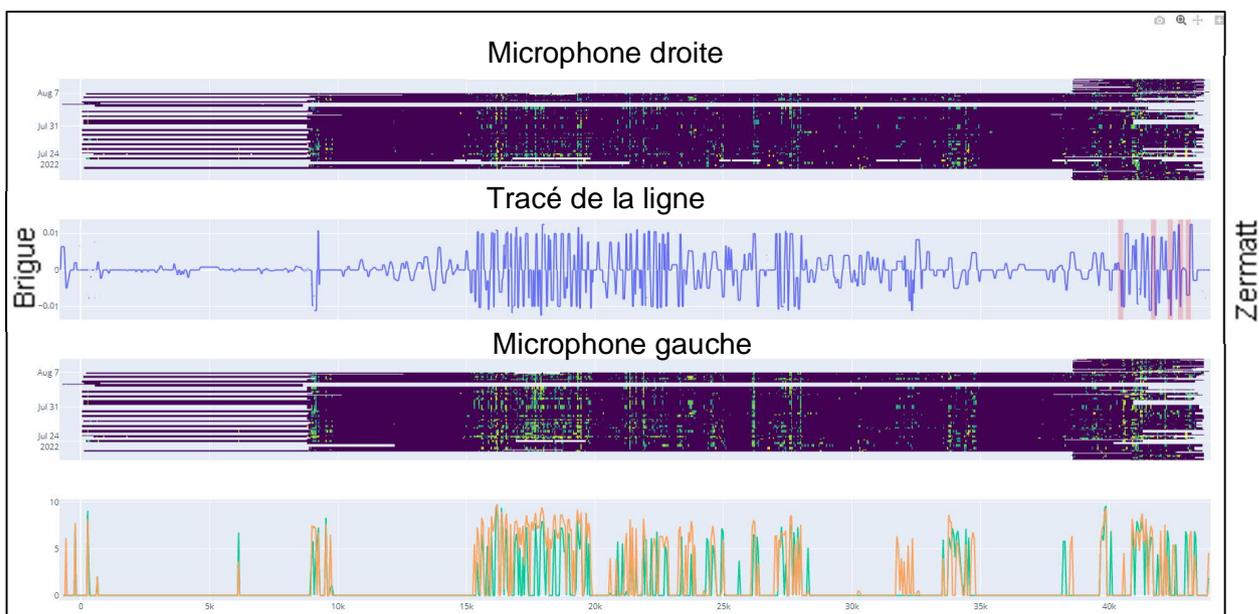


Figure 78: Crissement de courbe du trajet Brigue - Zermatt avec la Navette lors de la descente

Il y a quelques effets intéressants qui peuvent être déduits de ces représentations :

- Il existe des zones spécifiques entre les sections SKK qui ont tendance à crisser et qui sont très constantes pendant toute la durée de la mesure. Ces zones sont marquées en rouge dans la Figure 79.
- Les crissements dépendent du moment de la journée. Cela est probablement lié à l'humidité relative et à l'arrêt de l'installation de conditionnement pendant la nuit (de 19:00 à 07:00). Ce schéma temporel est visible dans la Figure 80.
- Le comportement de crissements diffère entre les montées et les descentes. Il est plus prononcé en montée qu'en descente. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les microphones sont installés à côté de l'essieu avant lors de la montée. Il est toutefois également possible que les conditions de traction exercent une influence sur les bruits.

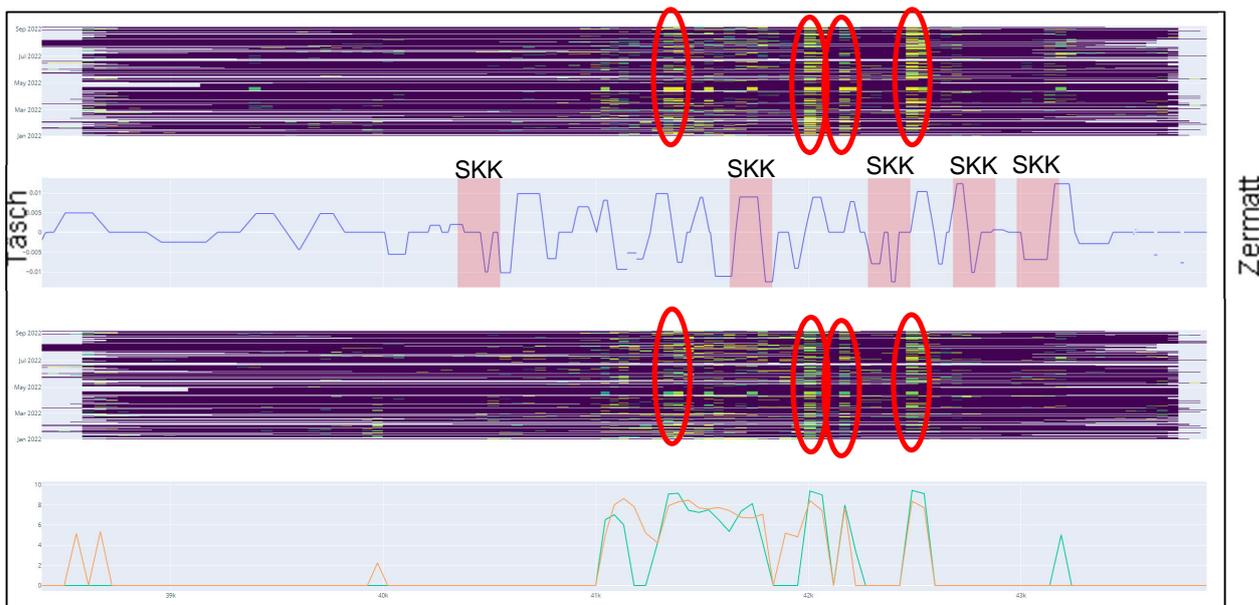


Figure 79: Crissement de courbe du trajet Täsch - Zermatt avec la Navette lors de la montée

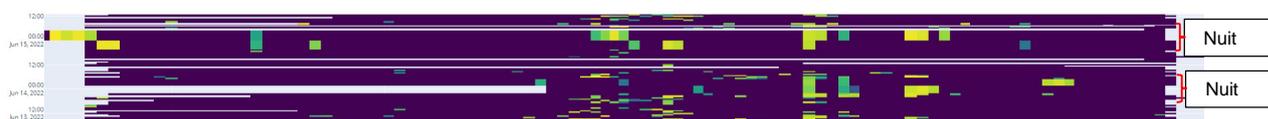


Figure 80: Crissement de courbe du trajet Täsch - Zermatt avec la Navette lors de la montée, extrait temporel du 14 juin, microphone de droite

Situation actuelle concernant le crissement de courbe et perspectives d'avenir

Un filtre de fréquence a été proposé, qui permet de caractériser les crissements de courbe. Ce filtre permet de repérer et de documenter les positions critiques dans le réseau de lignes.

Toutefois, des travaux supplémentaires sont nécessaires à cet égard :

- Jusqu'à présent, ce filtre n'a pas encore été testé en détail et comparé à la perception subjective.
- Pour le conditionnement axé sur les résultats, il convient d'étudier plus avant les conditions dans lesquelles les crissements de courbe se produisent. Le sens de la marche (en montée ou en descente) et les conditions météorologiques (humidité relative) jouent notamment un rôle décisif.
- Une comparaison avec les mesures d'accélération (effet stick-slip) pourrait tout au plus fournir des informations supplémentaires sur les mécanismes en jeu.

7.3. Informationen aus dem Betriebseinsatz

7.3.1. Retour d'exploitation (mécanicien / direction de l'exploitation)

Les annonces se font officiellement par deux canaux. D'une part, un formulaire d'annonce a été créé et peut être rempli dans les cabines de conduite des Navettes et sur Sharepoint. D'autre part, des annonces d'incident (S1 - S3) peuvent être saisies et annoncées comme pour d'autres pannes.

Le formulaire de notification a été rempli deux fois au cours des quatre premiers jours d'essai d'exploitation, ce qui a entraîné une adaptation des cycles de pulvérisation. Depuis lors, les cycles de pulvérisation correspondent à ceux décrits au chapitre 3.2 et le formulaire de notification n'a plus été utilisé.

Depuis le début des essais d'exploitation, environ cinq messages d'incident ont été reçus, concernant le "mauvais état" du rail et le rail "très lisse". Ces messages ont à chaque fois été émis dans le cadre de l'accélération des trains lors de la montée. La direction de l'exploitation se fie ici aux messages des conducteurs de locomotive.

Complément : ces annonces ont toujours coïncidé avec un début de pluie ou d'orage. On peut supposer que cette influence a contribué pour l'essentiel au dérapage des véhicules. Comme seule l'accélération (32 km/h à 38 km/h) était concernée, aucun train n'est resté bloqué.

Une exception à cette règle a été l'annonce d'un incident décrivant une diminution de l'effet de freinage, suite à laquelle l'installation SKK a été mise hors service pendant deux jours (15/16.03.22). La visite suivante de la ligne n'a rien révélé de particulier. Comme il y avait là aussi un début de pluie, l'installation SKK a été remise en service par la suite.

En résumé, aucun incident lié à la sécurité ne s'est produit.

7.3.2. Données d'exploitation

Afin d'augmenter la pertinence des données de mesure collectées, les données d'exploitation, concrètement la charge annuelle en tonnes brutes (TB) et les passagers annuels par axe, sont également utilisées ici.

Dans ce cas, la Figure 81 montre que la charge a considérablement diminué depuis le début de la pandémie de Covid-19 et qu'elle n'a retrouvé son niveau antérieur que dans le courant de l'année 2022 (cf. années 2020 - avec août 2022). Il convient d'ajouter que la valeur TB de 2022 est une valeur budgétaire et qu'elle s'alignera probablement sur les valeurs des années 2017 - 2019. Cela signifie que la charge de travail pendant la première phase de l'essai d'exploitation du SKK ne peut pas être entièrement comparée à la charge de travail avant le SKK.

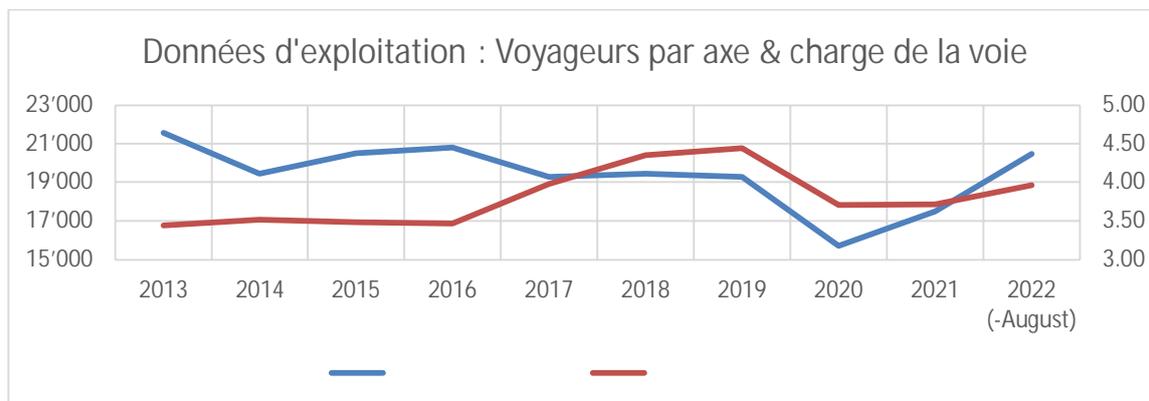


Figure 81: Données d'exploitation (charge TB & passagers par axe)

8. Rentabilité globale

Afin d'évaluer la rentabilité globale de l'installation SKK, le bureau IMDM a été chargé 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 de l'installation SKK sont rentables. Ceci d'une part pour la ligne Täsch - Zermatt et d'autre part dans la perspective d'une extension de l'installation SKK à l'ensemble du réseau de la MGB.

8.1. Description de la méthode

- L'évaluation économique est basée sur les hypothèses concernant les coûts unitaires et les durées de vie spécifiées ci-dessous (résumé ci-dessous et détaillé en annexe 11.3).
- L'évaluation repose sur le calcul de l'annuité équivalente (equivalent annuity - EA), ce qui permet de comparer des scénarios avec des horizons temporels différents.
- Dans le cas de l'annuité équivalente, la somme des dépenses pour un cas donné, actualisée à la valeur actuelle, est constituée par la période que l'on considère.
- Les actifs qui ont une valeur résiduelle à la fin de la période sont comptabilisés proportionnellement à cette valeur (biais négligeable).
- Le calcul a été effectué pour deux cas : un cas sans SKK et un cas avec SKK. Ensuite, les deux EA ont été comparées pour évaluer les économies potentielles liées à l'installation du système.
- Le calcul est probabiliste (Monte Carlo) ; toutes les hypothèses ont été modélisées avec +/- 10% de la moyenne, à l'exception du taux d'actualisation avec +/- 50% (c'est-à-dire que le taux varie entre 1 % et 3 %). Les distributions sont triangulaires.

8.2. Hypothèses retenues

Généralités

- Cette estimation économique se réfère à la phase de test, c'est-à-dire à l'équipement de quatre Navettes avec le système SKK et 5.000 m d'infrastructure.
- Cette première approche n'a pas pris en compte les impacts sociaux et économiques (notamment les impacts liés à la réduction du bruit et des vibrations).

L'équipement du SKK

- Les coûts d'investissement et d'exploitation par unité ont été mis à disposition par la MGB (voir annexes 11.3).
- Les coûts d'ingénierie et les coûts supplémentaires liés à l'installation initiale (pour le premier véhicule) ont été comptés comme une dépense unique.

Conséquences sur l'entretien des véhicules

- Seuls les effets du SKK sur l'entretien des roues ont été estimés (voir annexe 11.3). Il convient de noter que le remplacement des roues nécessite le démontage de l'ensemble du bogie (révision).
- Le SKK permet aux bogies ou aux véhicules de parcourir une plus longue distance entre les révisions.

Impact sur l'infrastructure

- L'impact du SKK a été évalué sur le besoin annuel moyen de bourrage et de meulage, ainsi que sur le remplacement moyen des rails dans les courbes à petits rayons.
- Dans un deuxième temps, les effets du SKK sur la durée de vie totale des voies ont également été estimés.

Le taux d'actualisation

- Les estimations tiennent compte d'un taux d'actualisation de 2 % +/- 1 %.

8.3. Résultats

Sur la ligne d'essai

- L'évaluation montre, sous réserve de la validité des hypothèses, que sur la ligne d'essai, l'installation du SKK **est rentable** quel que soit le scénario analysé.
- Si l'on ne considère que les véhicules, l'installation SKK est rentable avec une différence d'EA d'environ 150kCHF (entre -120kCHF/an et -170kCHF/an).
- Si l'on considère le matériel roulant et l'entretien de la voie, sans tenir compte de l'allongement de la durée de vie de la voie, on obtient une différence entre l'annuité équivalente du scénario "avec SKK" et celle du scénario "sans SKK" d'environ -235 kCHF/an (entre -200kCHF/an et -265kCHF/an).
- Si l'on tient compte non seulement du matériel roulant et de l'entretien des voies, mais aussi de l'allongement de la durée de vie des voies de la ligne d'essai, la différence d'EA s'élève à environ **-300kCHF/an** (-255kCHF/an à -340kCHF/an).
- Sous réserve de la validité des hypothèses, **aucune simulation ne montre que le SKK n'est pas rentable**.
- On peut donc affirmer que l'installation SKK de Täsch - Zermatt sera ou a été amortie en l'espace d'un an, même dans le cas le plus défavorable sur le plan économique (économies de 150 000 CHF avec des coûts d'investissement de 120 000 CHF).

Extrapolation à l'ensemble du réseau

- La rentabilité de la généralisation du SKK sur le réseau de la MGB dépend de la longueur des tronçons, qui souffrent des mêmes problèmes que la ligne d'essai Täsch - Zermatt, ainsi que du nombre de véhicules à équiper.
- Dans la première hypothèse, il existe une deuxième ligne problématique Täsch - Fiesch, qui devrait encore être quantifiée. Mais il s'est avéré jusqu'à présent que le SKK n'est également rentable qu'au niveau du matériel roulant.
- En ce qui concerne l'équipement du matériel roulant, il n'est pas nécessaire d'équiper tous les trains, soit parce qu'ils n'empruntent pas (ou rarement) les lignes problématiques, soit parce qu'ils ne présentent pas les mêmes difficultés. De plus, les trains commandés sont d'emblée équipés du SKK (coût unitaire d'installation du SKK inférieur à celui des essais d'exploitation).
- Il est donc raisonnable de supposer que l'introduction du SKK est rentable, en particulier si l'on pense de manière systémique (les résultats économiques présentés ci-dessus suggèrent que la moitié de la rentabilité du système est obtenue par la réduction des coûts d'infrastructure). En outre, les aspects socio-économiques (bruit) devraient contribuer à améliorer encore la rentabilité du SKK.

9. Conclusion et prochaines étapes

Les essais d'exploitation avec conditionnement embarqué du champignon de rail ont eu lieu d'octobre 2021 à octobre 2022 à la Matterhorn-Gotthard Bahn (MGB) sur la ligne Täsch-Zermatt. La période d'un an a été choisie afin de tenir compte des rapports de frottement roue/rail sur les quatre saisons. Avant le début des essais sur la ligne conditionnée, les quatre véhicules Navette 2051 à 2054 ont été équipés d'une installation embarquée pour le conditionnement des surfaces de roulement roue / rail, la ligne a été analysée en profondeur sous différentes perspectives et préparée par la suite pour la commande des installations spécifiques à la ligne (tags RFID), les rails ont été meulés et toutes les roues des véhicules Navette ont été reprofilées, et les profils initiaux de toutes les roues et des rails ont été mesurés par des techniques de mesure sur trois courbes représentatifs. La ligne est équipée de rails CFF I d'une dureté de 350 HB. Les véhicules sont équipés de roues pleines en acier de qualité ER 7 pour les essieux montés porteurs et de roues à bandage en acier de trois qualités : KVR 600, B6Z et B7T pour les essieux montés moteurs.

Le rapport contient des résultats concernant les sous-systèmes suivants du système roue-rail :

- a) l'usure et les dommages subis par les roues, une distinction étant faite entre l'usure des boudins et celle des surfaces de roulement des roues.
- b) Modifications des profils de roues en service par rapport au profil nominal W98 utilisé lors du reprofilage.
- c) l'état des surfaces de roulement des roues (dégradations et discontinuités résultant de l'interaction entre la roue et la plaquette de frein, ainsi que les éventuelles dégradations dues au contact avec le sol).
- d) l'usure et l'endommagement 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 courbe.
- e) Coefficient de frottement mesuré au niveau des surfaces de contact roue / rail sur les champignons de rail à l'intérieur et à l'extérieur de la courbe sur trois courbes significatives avec le tribomètre.
- f) Rugosité des surfaces de roulement des rails 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'ondulations de patinage.
- g) Constatations du personnel de conduite sur le comportement de traction et de freinage des véhicules dans les zones conditionnées ainsi que sur le bruit.
- h) Méthode et premiers résultats concernant un système embarqué en service pour la détection d'ondulations de patinage et de crissements de courbe.
- i) Méthode et premiers résultats de l'utilisation d'un système de mesure fixe pour détecter les dommages causés aux roues des véhicules.
- j) Rentabilité globale

Concernant a) Usure et dommages aux roues

- L'usure des boudins (épaisseur des boudins et dimension q_R) est secondaire sur tous les véhicules et sur toutes les roues et ne donnera guère lieu à un reprofilage des roues. Cela est probablement dû à une lubrification suffisante des boudins.
- Lors des visites de ligne, on a toutefois constaté une tendance à la surlubrification sur les flancs des rails, ce qui devrait avoir un effet défavorable sur le comportement de traction. Il est donc recommandé d'examiner ce comportement de manière plus approfondie dans le module 5 et de prendre en compte le rapport concernant l'influence réciproque du SKK et SKS (lubrification des boudins de roue).
- Les contrôles visuels des surfaces de roulement des roues n'ont révélé aucune tendance à la formation de polygones ou à la fatigue des contacts roulants, ce qui aurait pu influencer les résultats.
- Aucun dommage susceptible de croître et de donner lieu à un reprofilage n'a été constaté, ni sur les boudins ni sur les surfaces de roulement des roues.
- Les réductions de diamètre des roues dues à l'usure ont diminué de manière significative grâce à l'effet du conditionnement. Ceci indépendamment de la qualité de l'acier utilisé pour les roues, bien que la taille des échantillons soit trop faible pour étayer cette affirmation.
- Les essieux montés moteurs d'un seul véhicule ont dû être reprofilés. Cependant, cela était dû à un des quatre essieux montés dont le diamètre des roues était trop petit. Sur la Navette, l'entraînement électrique de l'ensemble du véhicule est assuré par un seul convertisseur. Cela implique que le diamètre des roues des quatre essieux montés moteurs doit être maintenu dans des limites étroites.

Concernant b) Modifications des profils de roues

- Les roues de la MGB ont le profil de roue W98. Sur tous les véhicules, les profils de roue ont changé, ce qui a également entraîné une modification du contact entre la roue et le rail.
- Le changement est plus lent pour les essieux montés moteurs que pour les essieux montés porteurs. On peut supposer que cela est dû aux qualités d'acier plus douces des essieux montés porteurs par rapport aux essieux montés moteurs.
- La modification des profils de roue devrait avoir un impact favorable sur le comportement en courbe, mais pourrait également entraîner des problèmes de comportement à grande vitesse.
- Le profil de roue W98 n'est pas adapté à l'usure pour le MGB et n'est pas du tout approprié pour améliorer le comportement en courbe.
- Les profils sont transmis au projet P3 (roue / rail) pour des études et des optimisations plus approfondies.

Concernant c) Discontinuités sur les surfaces de roulement des roues

- Sur certaines roues, des discontinuités sont apparues sur les surfaces de roulement des roues dans le profil transversal. Celles-ci s'étendent sur toute la circonférence de la roue et apparaissent, d'une part, sur le flanc du boudin de roue et, d'autre part, sur la gorge.
- La discontinuité sur le flanc du boudin de roue n'est pas autorisée selon le catalogue des défauts de l'OFT [13]. Ce type de défaut pourrait avoir un effet défavorable sur la sécurité de déraillement dans la zone de langue de rail.
- La discontinuité dans la zone de la gorge affecte défavorablement le comportement en courbe des véhicules.
- Les deux discontinuités sont dues à l'action des plaquettes de frein sur les surfaces de roulement des roues. Ceci a été confirmé par des contrôles visuels.

Concernant d) Usure et endommagement des rails dans les courbes

- L'usure des rails à l'intérieur et à l'extérieur des courbes n'a augmenté que de manière minimale (ordre de grandeur : 0,2 mm) au cours de l'année d'essai d'exploitation, suite à l'abrasion par les véhicules.
- L'usure sur la longueur de courbe varie parfois fortement. La raison en est à chercher dans le passé et devrait être plus équilibrée à l'avenir grâce à l'application du SKK.
- Le stock d'usure sur les rails extérieurs des courbes est significativement plus important que sur les rails intérieurs des courbes. On peut supposer que c'est une conséquence de l'usure nettement plus importante lors du meulage des rails en raison des amplitudes nettement plus grandes des ondulations de patinage sans SKK. On peut supposer que le SKK a un effet nettement plus favorable, en particulier sur le rail situé à l'intérieur de la courbe.
- Grâce à la croissance réduite des ondulations de patinage, l'intervalle de meulage a pu être doublé (de semestriel à annuel). On peut s'attendre à ce que l'intervalle de meulage puisse encore être prolongé après d'autres optimisations du système, ce qui aura un effet favorable sur les LCC.

e) Coefficient de frottement mesuré sur les surfaces de roulement des rails avec le tribomètre

- Avant le début du conditionnement, le coefficient de frottement par temps sec se situait entre 0,5 et 0,6.
- Après le début du conditionnement, le coefficient de frottement par temps sec a diminué pour atteindre des valeurs comprises entre 0,2 et 0,25.
- Après une longue période de pluie, un coefficient de frottement plus élevé a été constaté (environ 0,4). Il semble que l'agent de conditionnement soit lessivé par la pluie et qu'il faille ensuite un certain temps pour qu'il retrouve toute son efficacité.
- En juillet et août 2022, des valeurs de frottement élevées ont été constatées à tous les points de mesure, en particulier sur les rails extérieurs des courbes.

Concernant f) Rugosité des surfaces de roulement des rails dans le sens longitudinal (ondulations de patinage)

- Des mesures de rugosité ont été effectuées périodiquement dans les deux courbes Zum Biel et dans la courbe Lüegelwang, conformément au plan d'essai.
- Dans les deux courbes de Zum Biel, après 246 jours avec SKK, aucun pic marquant dans le spectre n'indiquait un développement d'ondulations de patinage. Ceci contrairement à la situation antérieure sans SKK, où les rugosités dans la zone de la longueur d'ondulation de patinage autour de 80 mm ont pratiquement atteint après 260 jours le niveau analogue à celui d'avant le ponçage.
- Dans la courbe de Lüegelwang, la mesure après 246 jours avec SKK montre dans le spectre une légère bosse de 80 mm, ce qui indique une certaine croissance des ondulations de patinage. Cette croissance est toutefois encore fortement réduite par rapport à la situation antérieure sans SKK, et ce pour une période d'observation presque identique.

Concernant g) Constatations du personnel de conduite sur le comportement de traction et de freinage ainsi que sur le bruit

- Les réactions du personnel d'exploitation et du personnel des locomotives se font par le biais du formulaire d'annonce (posé sur la cabine de conduite) ou par des annonces d'incident (S1-S3).
- Le formulaire de notification a été rempli deux fois au cours des quatre premiers jours d'essai en exploitation, à la suite de quoi les cycles de pulvérisation ont été adaptés. Cette adaptation a permis de débloquer la situation.
- Depuis le début des essais d'exploitation, environ cinq messages d'incident ont été reçus, concernant le "mauvais état" du rail et le rail "très lisse". Ces messages ont été émis dans le cadre de l'accélération et ont coïncidé avec le début de la pluie ou des orages. On peut supposer que cette influence a contribué pour l'essentiel au dérapage des véhicules.
- Les réactions du personnel des locomotives indiquent que le bruit a diminué sur la ligne des essais d'exploitation. Cette impression a pu être confirmée lors d'une visite des lieux. Lors de cette visite pendant les essais d'exploitation, le bruit ou les crissements dans les courbes étaient sensiblement moins forts que lors des visites effectuées avant les essais d'exploitation SKK.

Concernant h) Méthode et premiers résultats d'un système embarqué de détection des ondulations de patinage et des crissements de virage en service

- Pour enregistrer les vibrations, des capteurs d'accélération ont été embarqués sur une Navette (et une Comète) au niveau des paliers d'essieux montés de chaque essieu. Ceux-ci étaient déjà en service avant le début des essais d'exploitation SKK, ce qui permet de comparer les accélérations avant et après le début des essais d'exploitation.
- Des microphones ont également été installés sur les deux véhicules afin de déterminer si des "crissements de courbe" se produisent et dans quelles courbes. Les microphones sont placés de part et d'autre d'un essieu sur la caisse du véhicule, à proximité des essieux montés.

Résultats pour les accélérations

- Avant le meulage des rails et donc avant le début des essais d'exploitation SKK (septembre 2021), une partie importante de la ligne Täschsand - Zermatt était rouge à rouge foncé (grandes accélérations).
- Après le meulage des rails et avant le début des essais d'exploitation SKK (octobre 2021), les zones rouge et rouge foncé ne sont plus reconnaissables. Cela indique que la technique de mesure utilisée ici permet au moins de détecter des amplitudes plus importantes d'ondulations de patinage.
- Cette évolution est visible après la mise en marche des installations SKK jusqu'à aujourd'hui, où les accélérations mesurées se situent en grande partie dans une zone verte (faibles accélérations).
- Le monitoring embarqué utilisé ici se prête, sur la base des expériences précédentes, pour surveiller l'efficacité de la méthode du SKK en ce qui concerne les dommages aux rails sur la voie.

Résultats du monitoring du bruit

- Sur la base des données de mesure du système de mesure et des analyses de fréquence effectuées sur la Navette et la Comète, il a été constaté que, dans certaines courbes, seule une fréquence de 5,3 kHz est spécifiquement excitée.
- Afin de déterminer spécifiquement où le squealing se produit sur le réseau, un filtre de fréquence a été créé, qui évalue fortement les fréquences à 5,3 kHz.
- Il existe des zones spécifiques entre les sections SKK qui ont tendance à crisser et qui sont très constantes sur toute la durée de la mesure.
- Les crissements dépendent du moment de la journée. Cela est probablement lié à l'humidité relative et à l'arrêt de l'installation de conditionnement pendant la nuit (de 19:00 à 07:00).
- Le comportement de crissement diffère entre les montées et les descentes. Il est plus prononcé en montée qu'en descente. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les microphones sont installés à côté de l'essieu avant lors de la montée.
- Pour le conditionnement à la demande, il convient d'étudier plus avant les conditions dans lesquelles les crissements de courbe se produisent. Le sens de la marche (en montée ou en descente) et les conditions météorologiques (humidité relative) jouent notamment un rôle décisif.

Concernant i) Méthode et premiers résultats de l'utilisation d'un système de mesure fixe pour l'enregistrement des dommages causés à la surface de roulement des roues des véhicules.

Un système de mesure d'irrégularités des roues (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies [9, 10]) a été installé à Täsch. Depuis début mars 2022, il fournit des valeurs de mesure concernant les polygones, les méplats et d'autres dommages éventuels dans le sens de la circonférence sur les surfaces de roulement des roues. Les données saisies à cette occasion peuvent être attribuées aux véhicules concernés au moyen du RFID. Dans le cadre du SKK, l'historique des données saisies depuis mars a été analysé et les enseignements qui en ont été tirés peuvent être résumés comme suit :

Véhicules Navette (2051 - 2054)

- Les roues des Navettes présentent des polygones plutôt faibles avec des valeurs allant jusqu'à 20 pendant la période d'étude.
- Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs sont apparus sur deux véhicules.

Véhicules Comète (2011 - 2014 et 2021 - 2028)

- Les roues des véhicules Comète présentent, pendant la période d'étude, de légères polygones avec des valeurs allant jusqu'à 20 facettes. Cependant, la formation de polygones est plus prononcée que sur les véhicules Navette.
- Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs sont apparus sur cinq véhicules.

Chariot de commande articulé (non motorisé) (2131 - 2134)

- Pendant la période étudiée, les roues de GSW présentent des polygones avec des valeurs allant jusqu'à 30 facettes.
- Au cours de la période d'étude, des méplats significatifs sont apparus sur deux GSW.

L'enquête permet en outre de tirer les conclusions suivantes :

- Dans l'ensemble, les roues porteuses sont plus touchées par la polygonisation et les méplats que les roues motrices.
- Pendant la saison chaude, de début juillet à fin août, les polygones ont tendance à croître plus fortement que pendant les autres mois. Des méplats significatifs ne se sont pas formés durant cette période. En revanche, des méplats significatifs se sont formés pendant le reste de la période d'étude (les jours de forte chaleur, le coefficient de frottement est plus élevé, le conditionnement peut également avoir eu un effet moindre).
- Les polygones sur les roues n'ont généralement pas pu être éliminés de manière durable par le surfacage, et ils se sont reformés très rapidement après. Il convient donc de vérifier si le tour sous plancher est doté d'un effet de copie pour les polygones, ce qui empêche leur élimination complète.

Concernant j) Rentabilité générale

- L'évaluation montre, sous réserve de la validité des hypothèses, que sur la ligne d'essai, l'installation du SKK **est rentable** quel que soit le scénario analysé.
- Si l'on ne considère que les véhicules, l'installation SKK est rentable avec une différence d'EA d'environ 150kCHF (entre -120kCHF/an et -170kCHF/an).
- Si l'on considère le matériel roulant et l'entretien de la voie, sans tenir compte de l'allongement de la durée de vie de la voie, on obtient une différence entre l'annuité équivalente du scénario "avec SKK" et celle du scénario "sans SKK" d'environ -235 kCHF/an (entre -200kCHF/an et -265kCHF/an).
- Si l'on tient compte non seulement du matériel roulant et de l'entretien des voies, mais aussi de l'allongement de la durée de vie des voies de la ligne d'essai, la différence d'EA s'élève à environ **-300kCHF/an** (-255kCHF/an à -340kCHF/an).
- Sous réserve de la validité des hypothèses, **aucune simulation ne montre que le SKK n'est pas rentable.**
- On peut donc affirmer que l'installation SKK de Täsch - Zermatt sera ou a été amortie en l'espace d'un an, même dans le cas le plus défavorable sur le plan économique (économies de 150 000 CHF avec des coûts d'investissement de 120 000 CHF).

Les résultats obtenus lors des essais d'exploitation montrent qu'à court et moyen terme, l'application ciblée du conditionnement du champignon de rail permet de réduire significativement l'usure à court et long terme. En comparaison avec le reste du réseau, aucune altération de l'effet de freinage et de la traction n'a été constatée. Cela suppose toutefois que l'on procède avec beaucoup de soin lors de l'aménagement des tronçons de ligne conditionnés et que le système soit observé de manière approfondie à cet égard, du moins dans une première phase.

Les essais ont toutefois montré que des optimisations supplémentaires sont nécessaires pour élaborer des recommandations sur la mise en œuvre du SKK dans le secteur de la voie métrique. Cela concerne surtout le contact entre la roue et le rail, l'interaction entre le SKK et la SKS, la prise en compte des conditions de température ou des conditions météorologiques ainsi que le monitoring avec les possibilités de numérisation qui y sont liées en vue de la maîtrise de l'ensemble du système.

Il est recommandé d'observer le comportement du système SKK à la MGB pendant une année supplémentaire. Cela permettra d'étayer les tendances constatées ici. Il faut tenir compte du fait qu'aucun reprofilage n'a encore été effectué, en particulier pour les roues, et que seule la réduction de diamètre qui en résulte permet une estimation fiable de la prolongation de la durée de vie des roues suite au SKK. En outre, la période d'observation de l'usure des rails, fixée à un an, semble trop courte pour évaluer les intervalles de meulage à prévoir. Les résultats de l'essai d'exploitation doivent être consolidés, notamment par d'autres mesures d'usure durant les mois d'été. L'installation fixe de surveillance des écarts de circularité des roues et la surveillance du bruit et des dommages causés aux rails par les véhicules doivent être exploitées pendant 12 mois supplémentaires. (Option : poursuite de l'essai Täsch-Zermatt)

10. Répertoires

10.1. Liste des figures

Figure 1: Disposition des composants du système de conditionnement Navette.....	14
Figure 2: Caractéristiques du tracé du tronçon Täsch-Zermatt.....	15
Figure 3: Réglage du conditionnement à l'écran de commande embarquée, en fonction du type de véhicule Le nombre de conditionnements est défini à l'aide de ce module de commande.	16
Figure 4: Fixation de l'étiquette RFID aurail : schématiquement à gauche et en réalité à droite	17
Figure 5: La disposition des étiquettes RFID pendant l'essai d'exploitation Täsch-Zermatt (vert = conditionnement, rouge = intervalle). La flèche verte pointant vers le haut indique l'emplacement de la balise de déclenchement.	17
Figure 6: Dimensions des boudins lors de la dernière mesure en mai 2022 (Navettes 2051 & 2052)	21
Figure 7: Dimensions des boudins lors de la dernière mesure en mai 2022 (Navettes 2053 & 2054)	22
Figure 8: Indicateurs de l'usure spécifique du diamètre de la roue ΔD_{LCC} y compris la première période de mesure	25
Figure 9: Indicateurs de l'usure spécifique du diamètre de la roue ΔD_{LCC} sans première période de mesure.....	26
Figure 10: Evolution des diamètres des roues pour les essieux montés porteurs, y compris la première période de mesure après reprofilage en haut et sans la première période de mesure après reprofilage en bas.	28
Figure 11: Toutes les mesures d'essieux montés moteurs sans la première période de mesure après reprofilage	29
Figure 12: Mesures tribométriques quotidiennement au début des essais d'exploitation.....	30
Figure 13: Marquage des roues lors de l'expertise visuelle	31
Figure 14: Zones dans le profil transversal des roues et leur origine (sabot de frein CoFren C333).....	36
Figure 15: Formation de fissures dans la zone de transition entre le sabot de frein (CoFren C333) et la zone d'usure par glissement transversal.....	36
Figure 16: Les fissures dans la zone de transition se sont transformées en légers écailllements	37
Figure 17: Profil Δr de la Navette 43'844km après reprofilage sur la ligne conditionné Täsch-Zermatt	38
Figure 18: contact en deux points lors de la circulation en courbe, à l'exemple du 4e essieu (essieu moteur) de Figure 17	38
Figure 19: Forte discontinuité sur la roue gauche et légère discontinuité sur la roue droite de l'essieu 3 de la Navette 2054 (causées par l'interaction roue / sabot de frein).....	39
Figure 20: Situation du contact roue / rail lorsque l'essieu est en tête dans une courbe à droite	39
Figure 21: Légères discontinuités sur les deux roues de l'essieu 4 dans la zone de la gorge (causées par l'interaction roue / sabot de frein).....	40
Figure 22: Discontinuité au niveau du boudin de la roue droite de l'essieu 8 de la Navette 2053	41
Figure 23: Différences de rayons de roulement Δr pour la Navette 2053, 43213km après reprofilage.....	43

Figure 24: Conicité équivalente $\tan\gamma_e$ de la Navette 2053, 43'213km après reprofilage	43
Figure 25: Affectation des points de contact de la Navette 2053, 43'213km après reprofilage	44
Figure 26: Affectation des points de contact pour le profil nominal W98.....	45
Figure 27: Caractéristiques particulières pour la fonction Δr et effets sur l'indice d'alignement radial.....	45
Figure 28: Comparaison de toutes les fonctions géométriques de contact pour les profils de roue utilisés en service avec le profil nominal W98	47
Figure 29: Profil nominal en courbe serrée à droite.....	47
Figure 30: Profil après 43'213 km en service en courbe serrée à droite	48
Figure 31: Profil nominal en courbe serrée à gauche	48
Figure 32: Profil après 43'213 km en service en courbe serrée à gauche	49
Figure 33: Comparaison des deux profils de roues à gauche et à droite de l'utilisation en service avec les deux profils nominaux.....	50
Figure 34: Différences de rayon de roulement pour la Comète 2021, 106'471km après reprofilage.....	51
Figure 35: Conicité équivalente pour la Comète 2021, 106'471km après reprofilage	52
Figure 36: Attribution des points de contact pour la Comète 2021, 106'471km après reprofilage.....	53
Figure 37: Affectation des points de contact pour le profil nominal W98.....	53
Figure 38: Indice de position radiale pour les essieux montés porteurs Comète 2021, 106'471km après reprofilage.....	54
Figure 39: Indice de position radiale pour les essieux montés moteurs Comète 2021, 106'471km après reprofilage.....	54
Figure 40: Installation du Wheel Monitoring System WMS à la Matterhorn Gotthard Bahn près de Täsch.....	55
Figure 41: Etat des roues et valeurs indicatives WMS associées (WMS = Wheel-Monitoring-System)	55
Figure 42: Indicateur polygonal de l'axe 4 de la Navette 2051 de mars à octobre 2022	56
Figure 43: Indicateur de méplats des axes 5 et 6 de la Navette 2051 de mars à octobre 2022	56
Figure 44: Lieux où les rugosités des profils des rails ont été mesurées.....	58
Figure 45: Spectres de rugosité du rail de Zum Biel - Portail, intérieur de la courbe.....	61
Figure 46: Spectres de rugosité des rails de Zum Biel - Portail, à l'extérieur de la courbe....	61
Figure 47: Spectres de rugosité des rails de Zum Biel - Pont, à l'intérieur de la courbe	62
Figure 48: Spectres de rugosité des rails de Zum Biel - Pont, à l'extérieur de la courbe	62
Figure 49: Spectres de rugosité des rails à Lüegelwang, à l'intérieur de la courbe.....	63
Figure 50: Spectres de rugosité des rails Lüegelwang, extérieur de la courbe.....	63
Figure 51: Valeurs de mesure du niveau d'usure des rails mentionnées dans le rapport	68
Figure 52: Points de mesure Zum Biel - Portail	69
Figure 53: Usure du rail W1 Rail intérieur Zum Biel – Portail.....	70
Figure 54: Points de mesure de Zum Biel - Pont.....	70
Figure 55: Usure du rail W1 Rail intérieur Zum Biel - Pont	71
Figure 56: Points de mesure Lüegelwang	71
Figure 57: Usure du rail W1 Rail intérieur Lüegelwang	72
Figure 58: Usure du rail W3 Rail extérieur Lüegelwang	73
Figure 59: Valeurs moyennes de l'usure des rails intérieurs et extérieurs	74
Figure 60: Comparaison du comportement à l'usure sur les rails intérieurs.....	74
Figure 61: Représentation schématique des forces qui s'exercent sur les roues des deux essieux montés du bogie lors de la marche en courbe.....	75

Figure 62: Tendence de l'état d'usure des flancs de rails situés vers le milieu de la voie dans la courbe de Bienne vers le pont.....	76
Figure 63: Plaque de nervure à l'intérieur de courbe.....	77
Figure 64: Plaque de nervure à l'extérieur de courbe.....	77
Figure 65: Unité centrale railnodeG montée sur la caisse du véhicule sous le soufflet au passage d'intercirculation.....	79
Figure 66: Antenne combinée LTE et GNSS sur le toit de la Navette BDeh 2052.....	79
Figure 67: Capteur railnodeX avec microphone monté sur la caisse du véhicule de la Navette BDeh 2052.....	80
Figure 68: Capteur railnodeX avec accéléromètre monté sur la caisse du véhicule de la Navette BDeh 2052.....	80
Figure 69: Représentation des données de mesure du microphone dans l'interface web	81
Figure 70: Historique des vibrations "Täschsand" - Zermatt, 21 septembre - 22 août	83
Figure 71: Données de mesure Technode: Täsch - Zermatt Gammes de fréquences & température / humidité de l'air.....	83
Figure 72: Modes propres avec une masse participant élevée dans la direction axiale à partir de la simulation FE	85
Figure 73: Spectres de fréquence obtenus le 31.01.2022 lors de l'impact de la roue, roue gauche.....	86
Figure 74: Spectres de fréquence obtenus le 31.01.2022 lors de la frappe de la roue, roue droite	86
Figure 75: Spectres de bruit au passage de la Comète à Viège et St-Nicolas, mesurés le 05.04.2022 par le centre de compétence voie.....	87
Figure 76: Filtre de fréquence pour les crissements de courbe pour les véhicules Comète et Navette sur essieux montés moteurs.....	88
Figure 77: Crissement de courbe du trajet Brigue - Zermatt avec la Navette lors de la montée	89
Figure 78: Crissement de courbe du trajet Brigue - Zermatt avec la Navette lors de la descente	89
Figure 79: Crissement de courbe du trajet Täsch - Zermatt avec la Navette lors de la montée	90
Figure 80: Crissement de courbe du trajet Täsch - Zermatt avec la Navette lors de la montée, extrait temporel du 14 juin, microphone de droite.....	90
Figure 81: Données d'exploitation (charge TB & passagers par axe).....	91

10.2. Liste des tableaux

Tableau 1: aperçu des matériaux de roue des véhicules avant (sans SKK) et pendant les essais d'exploitation (avec SKK).....	19
Tableau 2: Informations sur les essieux montés des véhicules Navette en mai 2022.....	31
Tableau 3: Etat visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 43 844 km après le reprofilage	33
Tableau 4: Etat visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 44'228 km après le reprofilage	33
Tableau 5: Etat visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 43 213 km après le reprofilage	34
Tableau 6: Etat visuel des surfaces de roulement des roues après un kilométrage de 48 110 km après le reprofilage	34
Tableau 7: Défauts de roues par véhicule détectés par WMS.....	56
Tableau 8: Courbes sélectionnés pour les mesures de rugosité des rails	59

<i>Tabelle 9: Moments des mesures de rugosité des rails.....</i>	59
<i>Tabelle 10: Infos Superstructure des courbes mesurés</i>	59
<i>Tabelle 11: Mesures de l'écartement des rails Täschsand & Zum Biel-Portail.....</i>	77
<i>Tabelle 12: Mesures de l'écartement des voies Zum Biel - Pont & Lüegelwang.....</i>	77
<i>Tableau 13: Fréquences des modes propres issues de la simulation FE, de l'impact du disque de roue et du trajet de mesure</i>	87

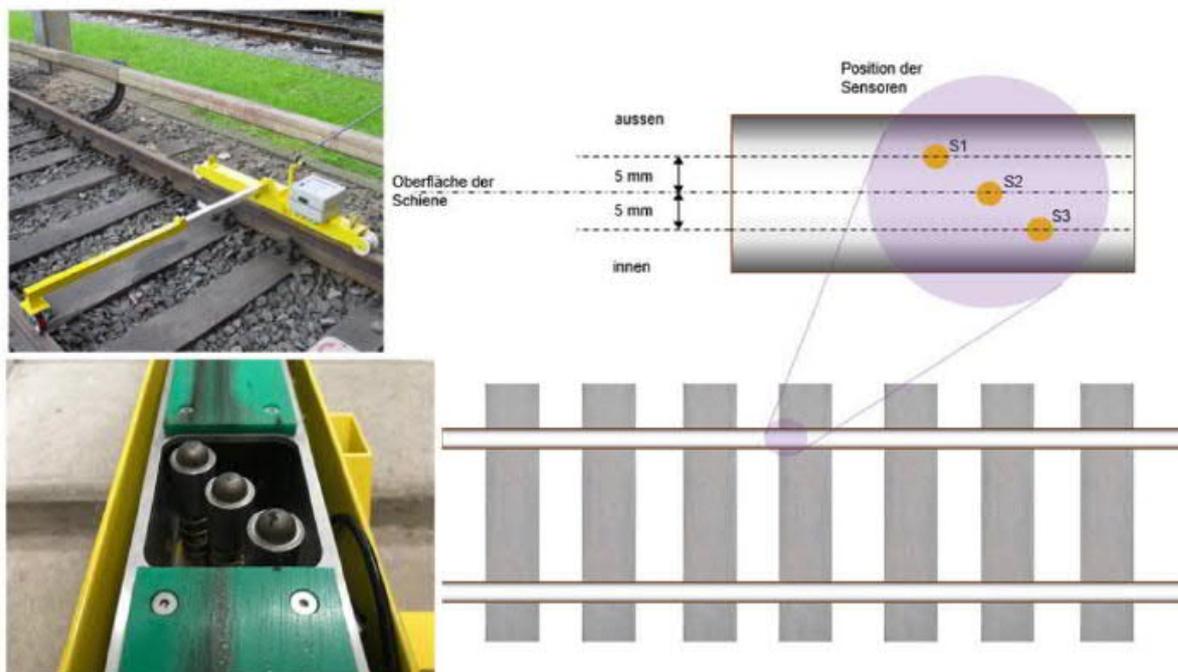
10.3. Références

- [1]: MGB-Dokument / 26.2563: Betriebserprobung – Überwachungskonzept SKK bei MGB, V1 17.9.2021
- [2]: MGB-Dokument / 26.2557: Beschreibung Schienenkopfkonditionierungssystem MGB installiert auf den Shuttle – Triebzügen, V2 27.09.2021
- [3]: MGB-Dokument / 26.2558: Beschreibung der konditionierten MGB-Strecke für eine Betriebserprobung mit SKK-Einrichtungen auf den Shuttle-Zügen der MGB; V3 14.03.2022
- [4]: DB Systemtechnik, Inspektionsgebiet Bremse: Dokument Bremstechnische Beurteilung der Einführung einer fahrzeugseitigen Schienenkopfkonditionierung bei der Matterhorn-Gotthard-Bahn (MGB) an Fahrzeugen der Bauart BDeh 4/8 («Shuttle»)
- [5]: KPZ Fahrbahn; Schienenrauheiten MGB Täsch-Zermatt, Zwischenbericht Schienenkopfkonditionierung, 1.1 ss.04.2022.
- [6]: SN EN 15610:2019-11: Bahnanwendungen – Akustik – Messung der Schienen– und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen.
- [7]: VöV Verband öffentlicher Verkehr, RTE 22040: Fahrbahnpraxis Normalspur, Bern, 2009.
- [8]: Bundesamt für Verkehr (BAV), AB-EBV, Bern, 2016.
- [9]: Müller BBM RAIL TECHNOLOGIES: OPTIMISING VEHICLE MAINTENANCE BY CONDITION BASED MAINTENANCE, WHEEL MONITORING SYSTEM WMS.
- [10]: S. Lutzenberger, S. Nikisch, P. Wloka: Strategische Wartung von Schienenfahrzeugen mit Monitoring Am Beispiel der Polygonisierung von Rädern bei der VAG Nürnberg, Alba Fachverlag GmbH + Co. KG, Düsseldorf 2013
- [11]: R. Müller; Schulung SKK Betriebserprobung Personal MGB, Schulung SKK Betriebserprobung Personal MGB .pptx, 2021
- [12]: D RTE 49100: Nachweisführung bei Änderungen an Eisenbahnfahrzeugen
- [13] BAV: Fehlerkatalog für die Kontrolle von Zügen, Güter-, Reisezug-, und Gefahrgutwagen

11. Annexe

11.1. Rugosité du rail

11.1.1. Appareil de mesure APT RSA – Rail Surface Analyser



Applications

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

Possibilités de mesure

- Mesure la variation verticale du champignon de rail par rapport à une référence glissante de longueur de 1 m en fonction de la distance
- Mesure 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 de rail)
- Bruit de fond capteur : $0.1 \mu\text{m}$
- Capteur pour la détermination de la position 128 impulsions par tour

Enregistrement des données

- Dispositif d'enregistrement : 4 canaux simultanés- 16 bit A/D Converter
- Rééchantillonnage post-traitement à 1000 échantillons par mètre
- Capacité de mémoire : 1 gigaoctet de mémoire
- 6 heures de mesure

- Téléchargement des données sur ordinateur de bureau : USB-1

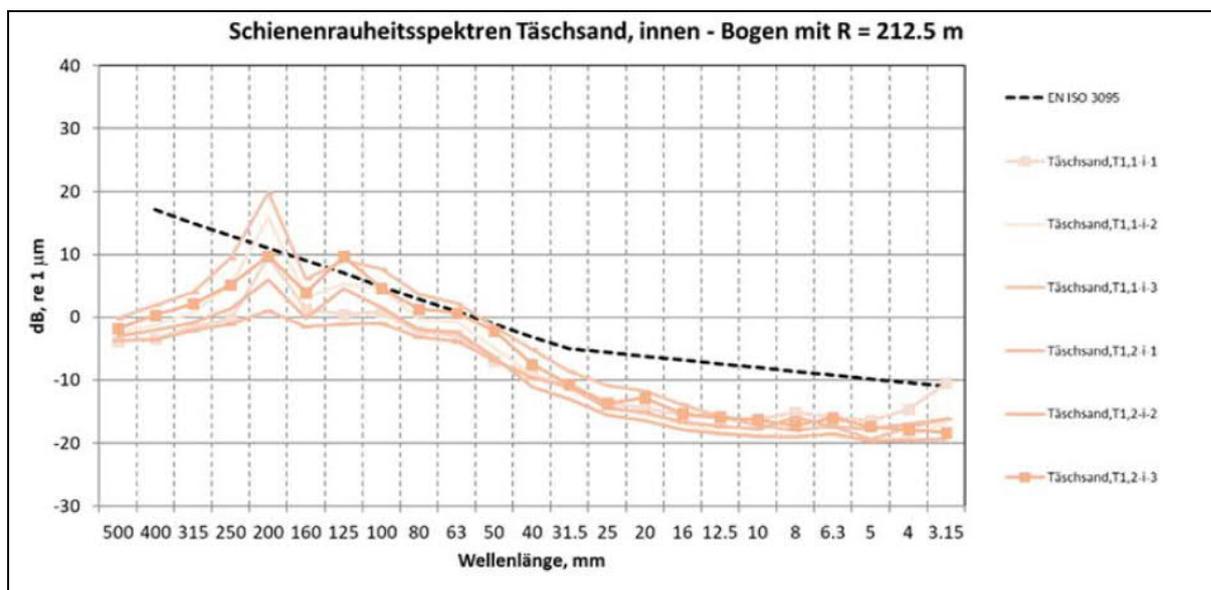
Traitement des données

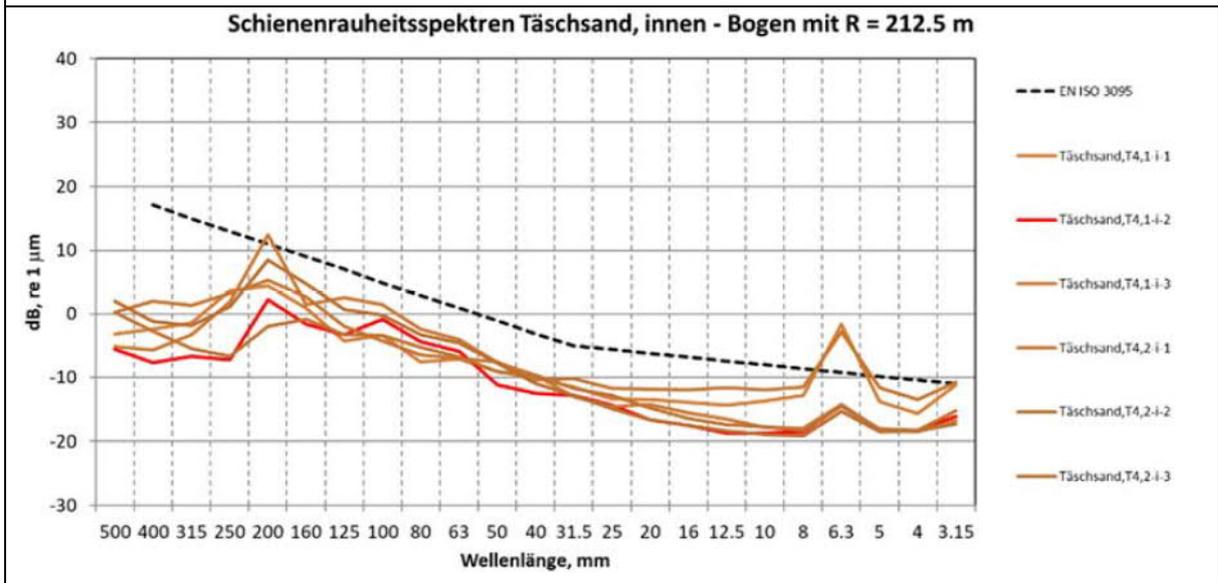
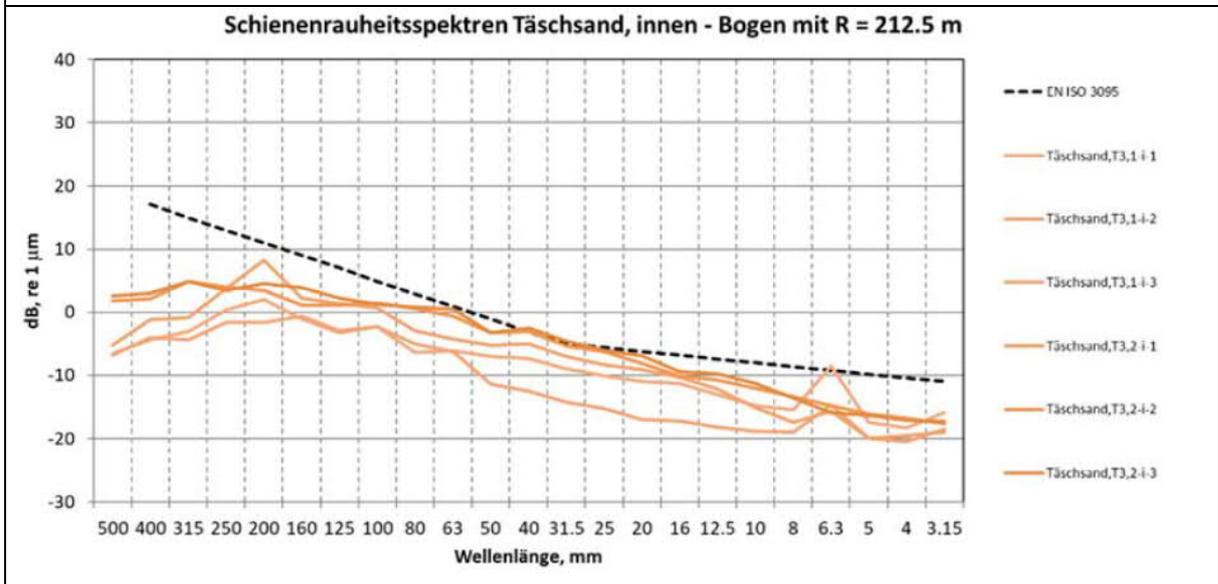
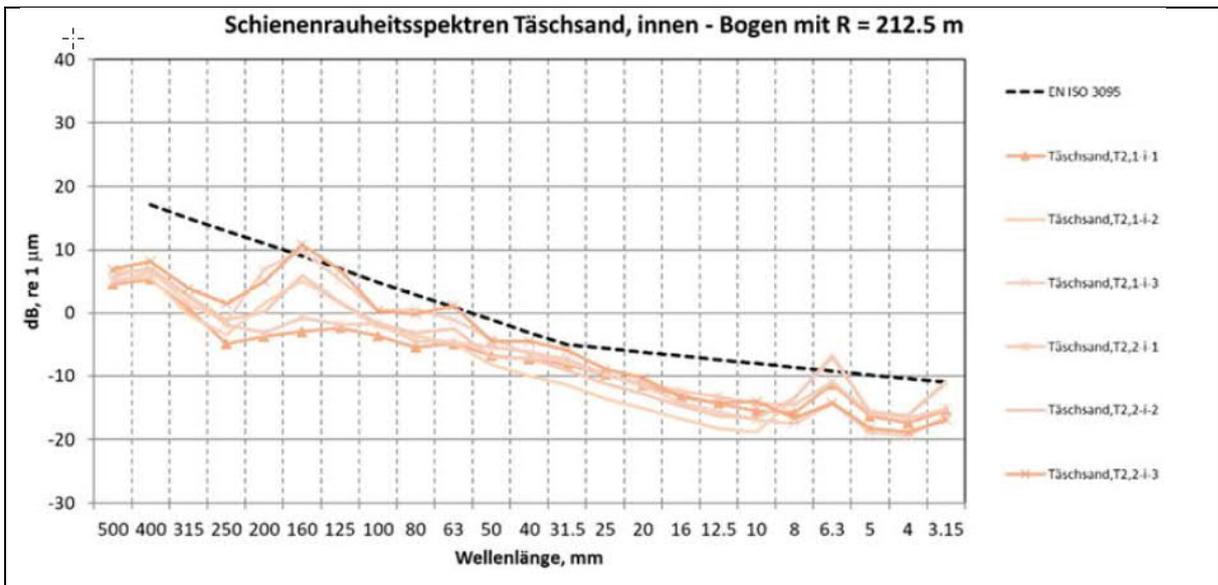
- Logiciel flexible pour la sortie de données sous différentes formes
- Spectres de rugosité en : 1/3 de bande d'octave, bande étroite, PSD
- Cartes de couleurs
- Niveau RMS versus distance

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

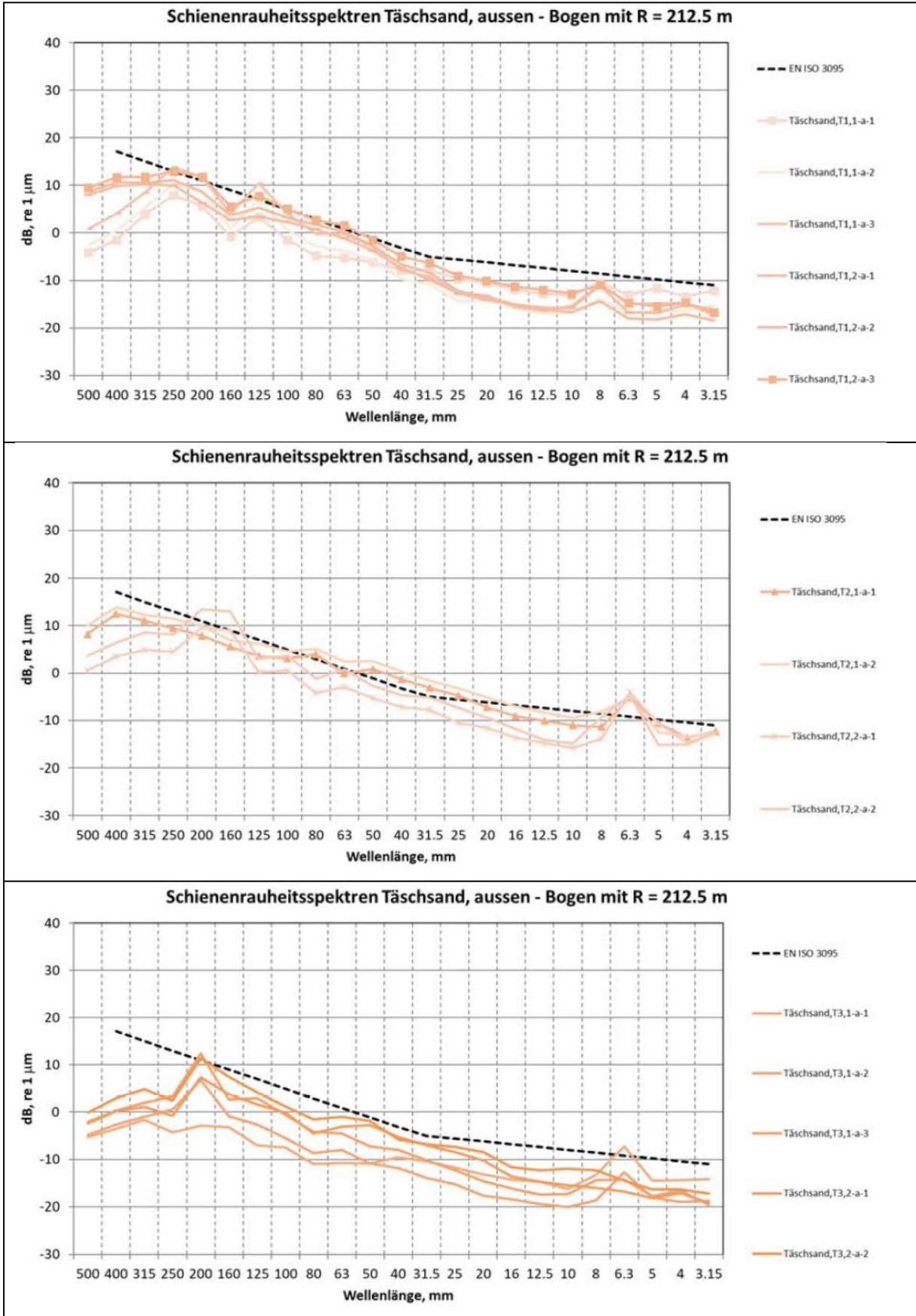
Date	Description	Remarque	
T1	28.09.2021	Mesure zéro avant meulage	
T2	21.10.2021	Juste après le meulage	
T3	14.01.2022	3 mois après le meulage	Rails verglacés, valeurs de mesure en partie non plausibles (sauf Täschsand)
T4	05.04.2022	6 mois après le meulage	
T5	01.06.2022	8 mois après le meulage	
T6	27.09.2022	12 mois après le meulage	Été caniculaire juillet/août 2022

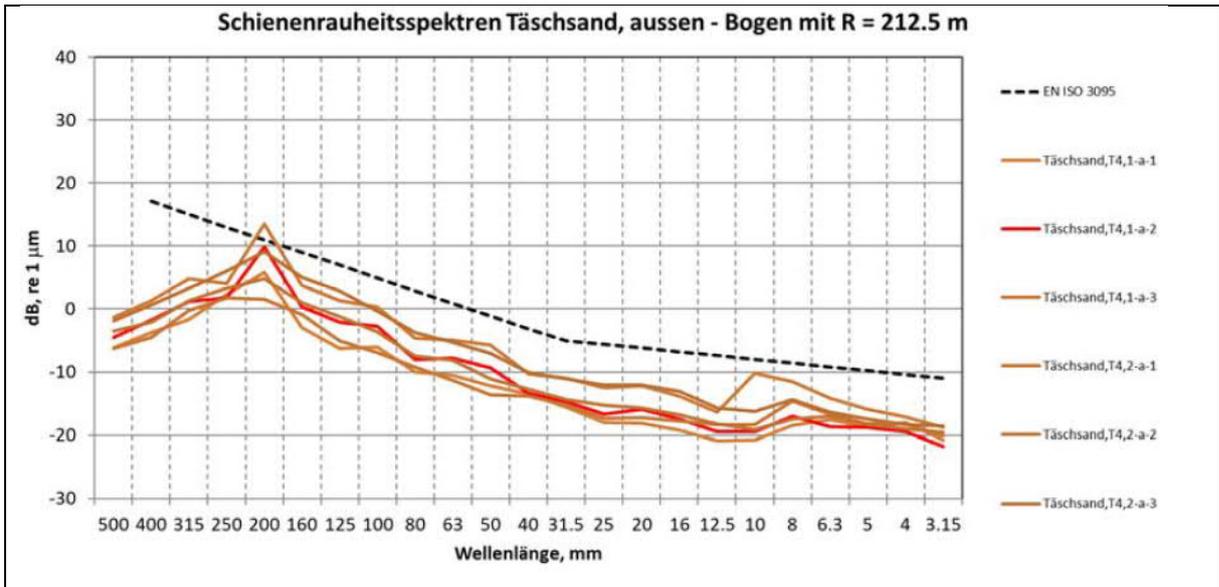
11.1.2. Täschsand intérieur



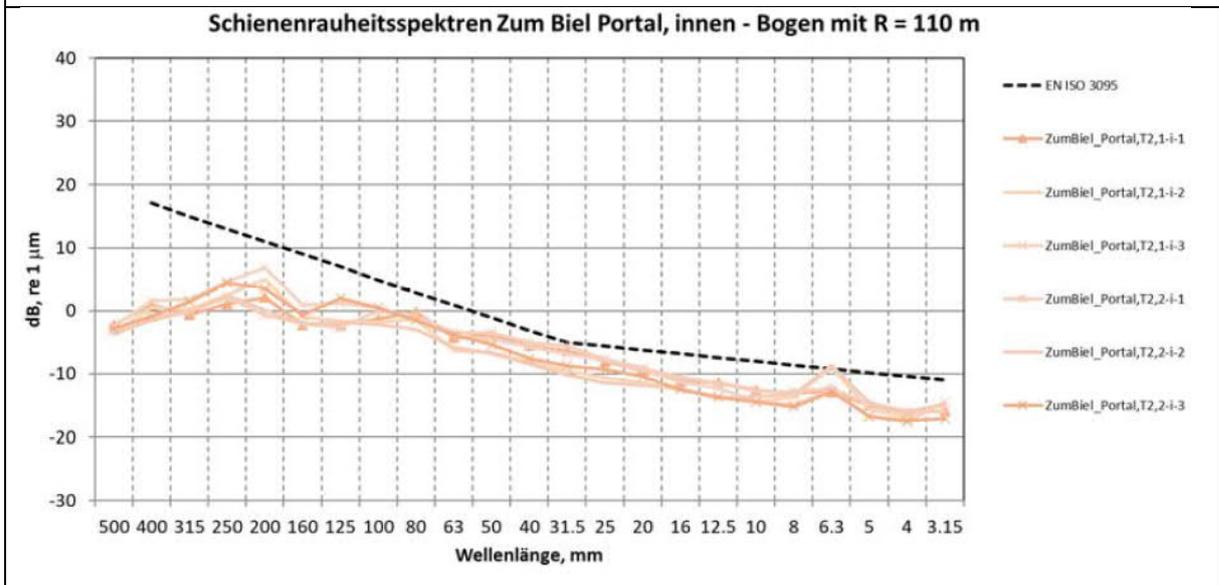
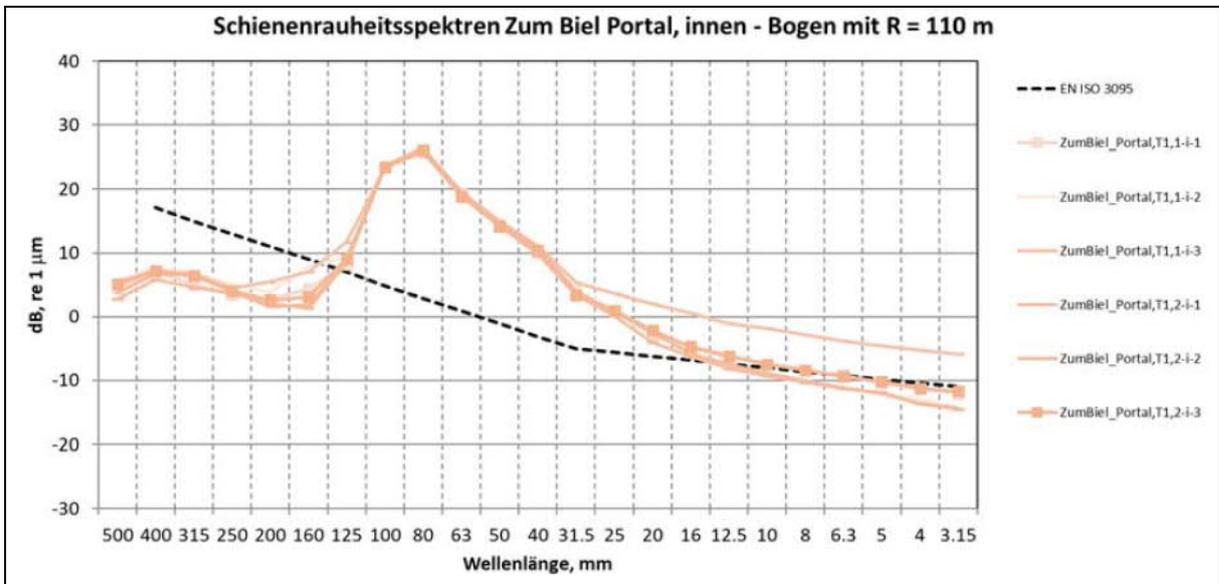


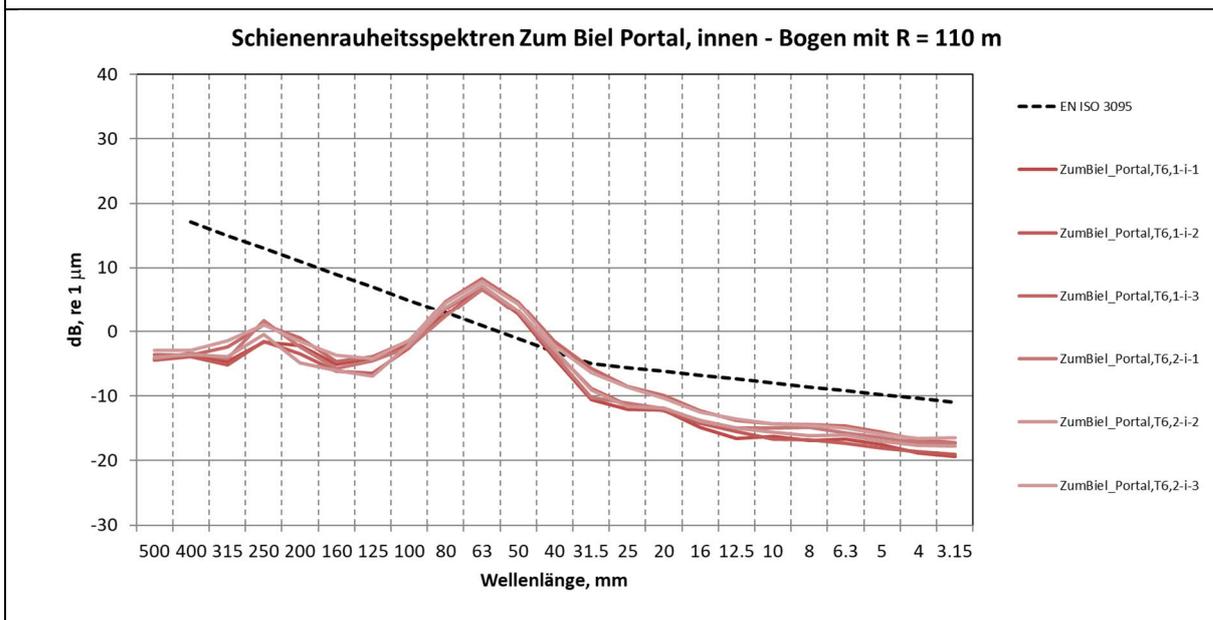
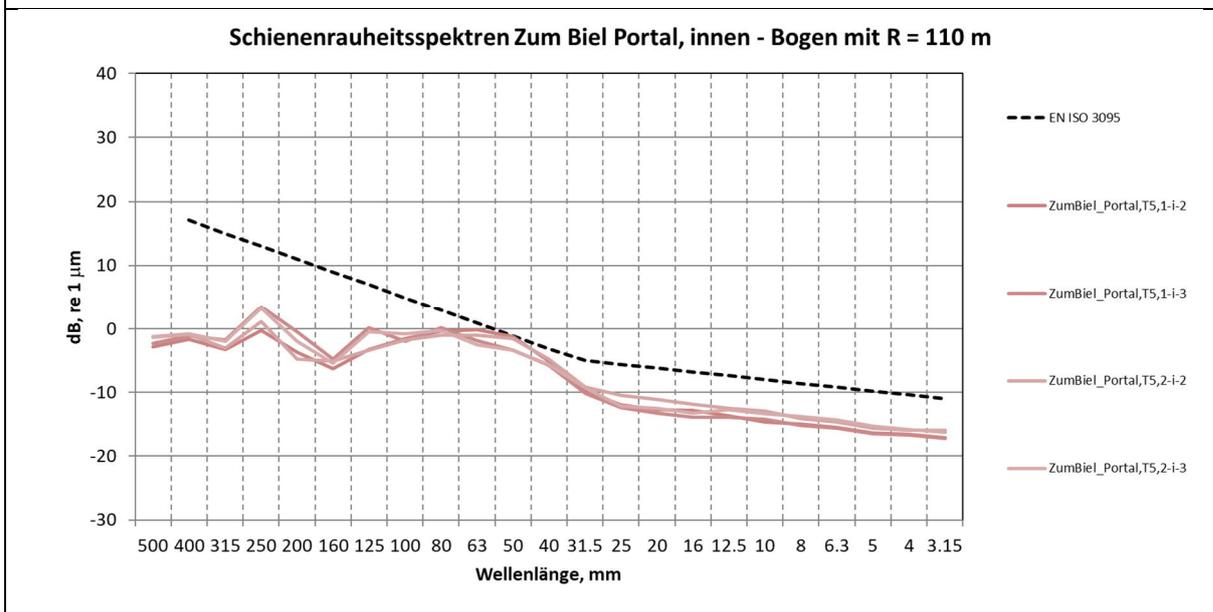
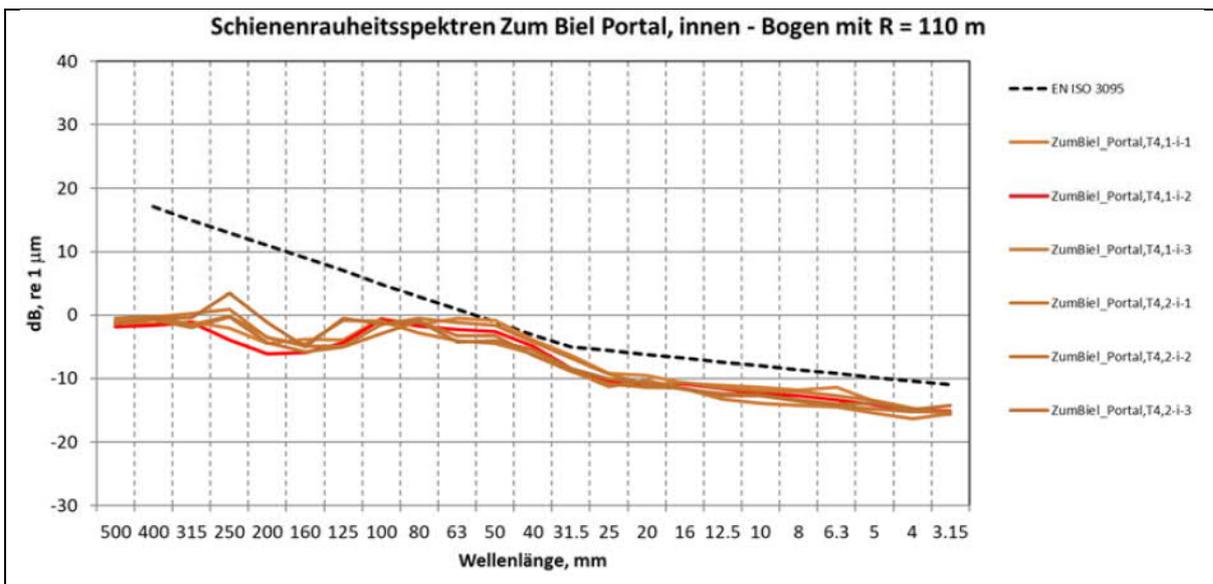
11.1.3. Täschsand extérieur



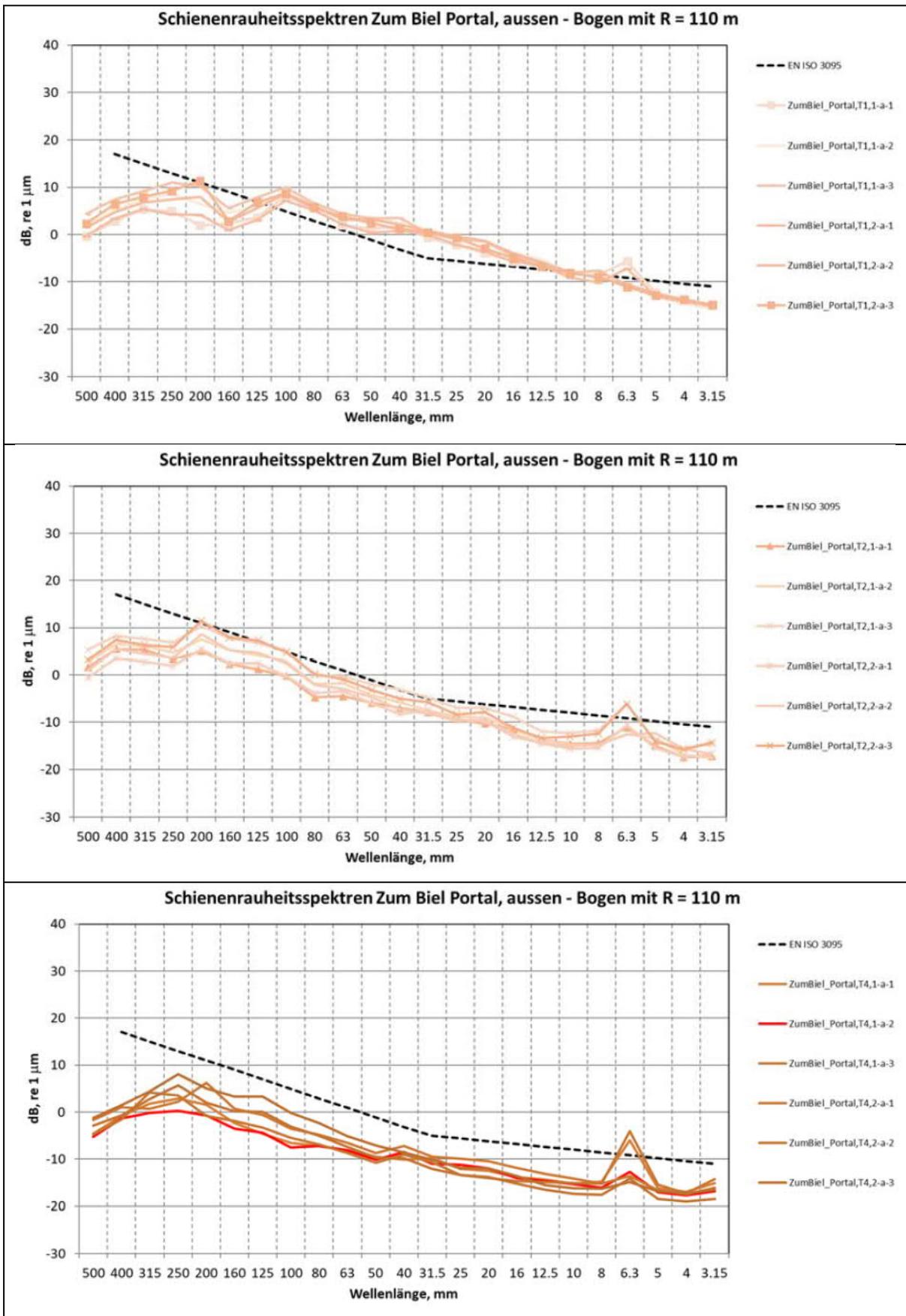


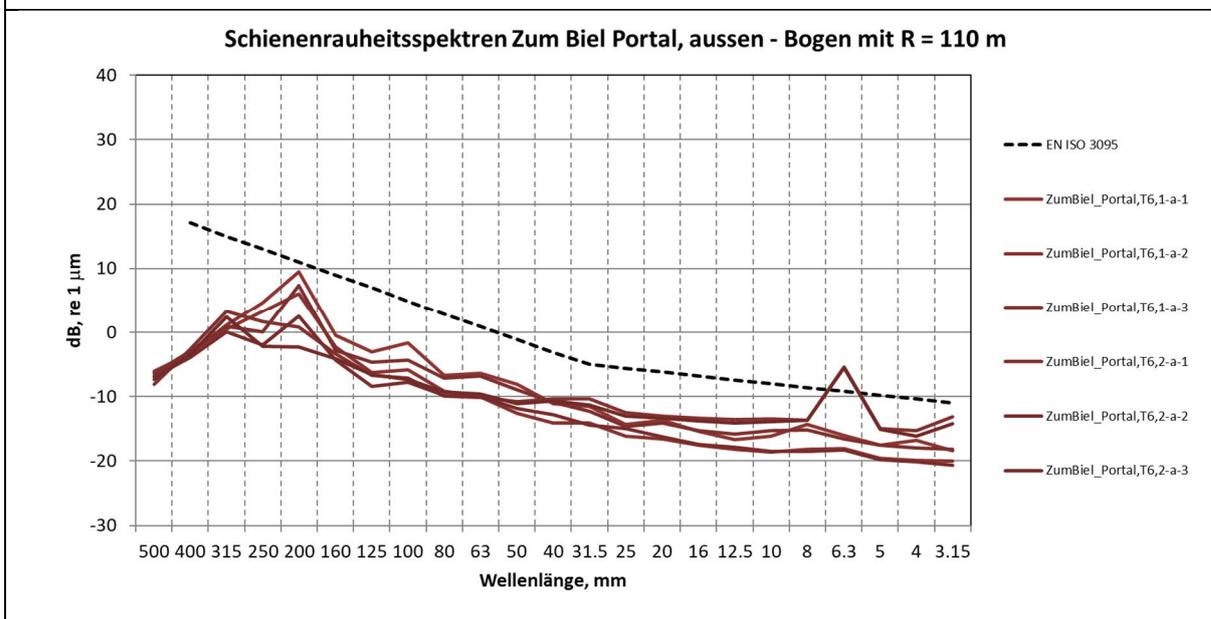
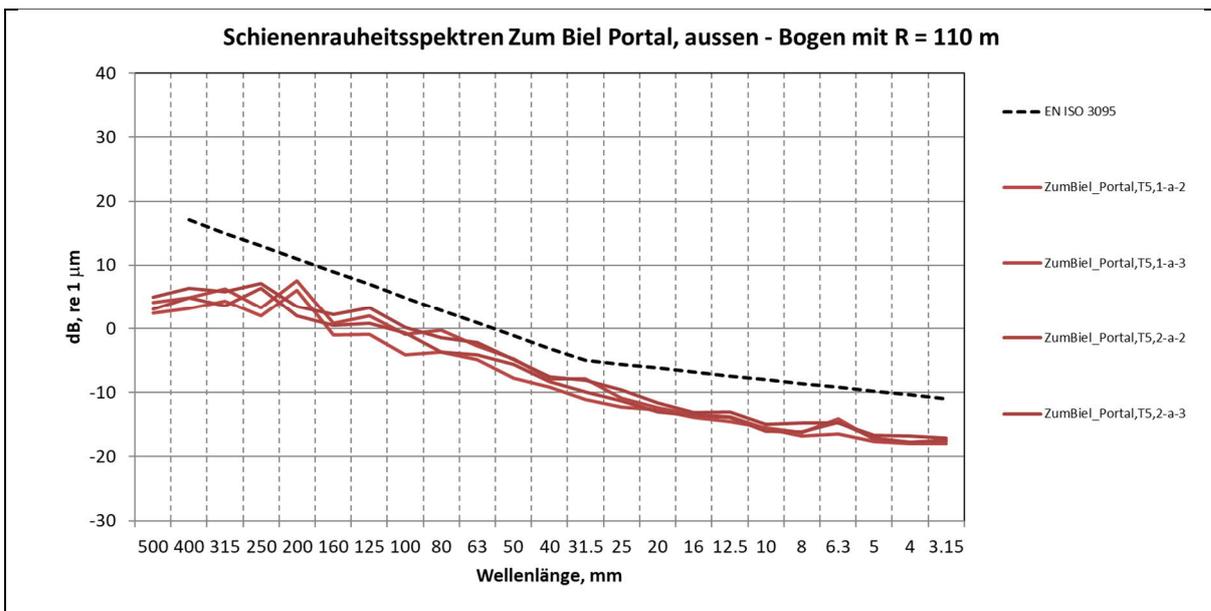
11.1.4. Zum Biel Portail intérieur



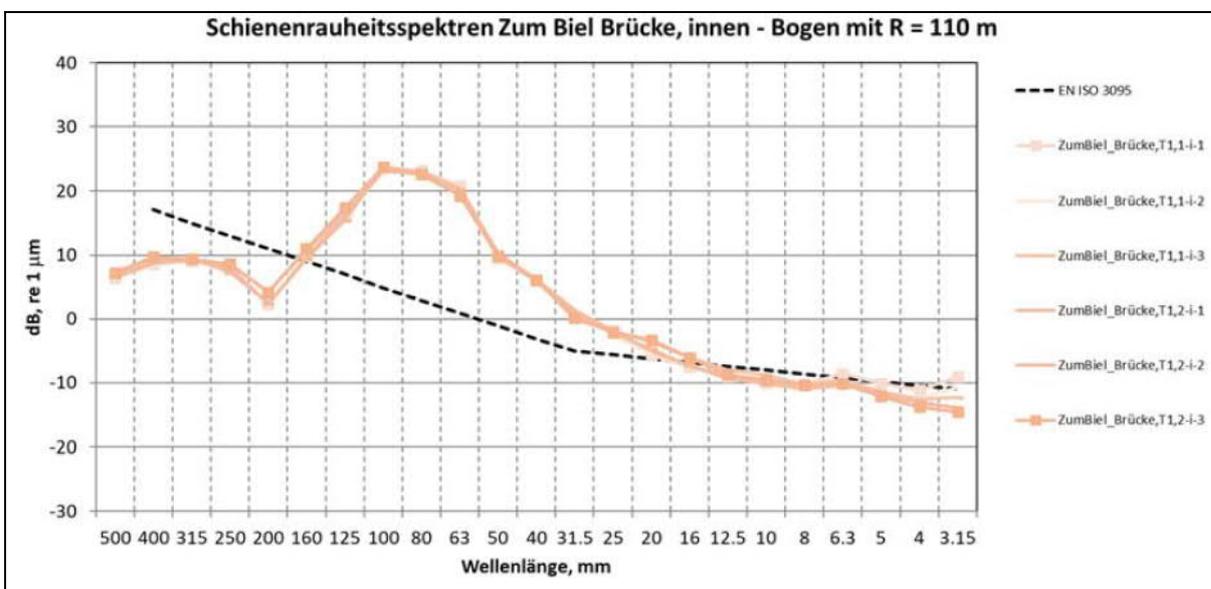


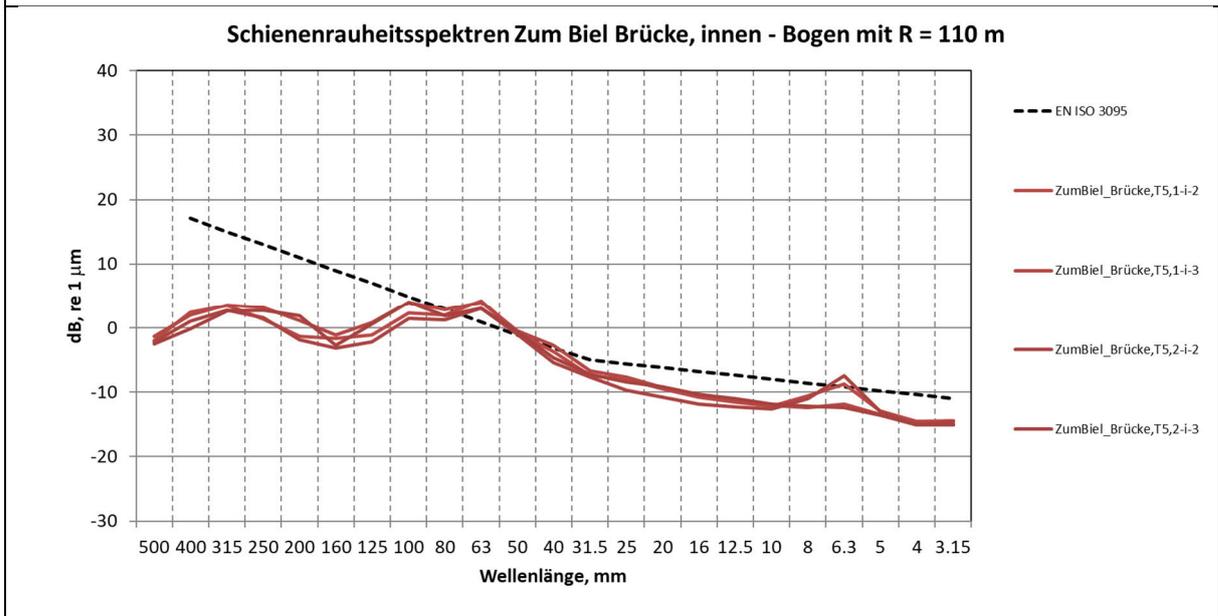
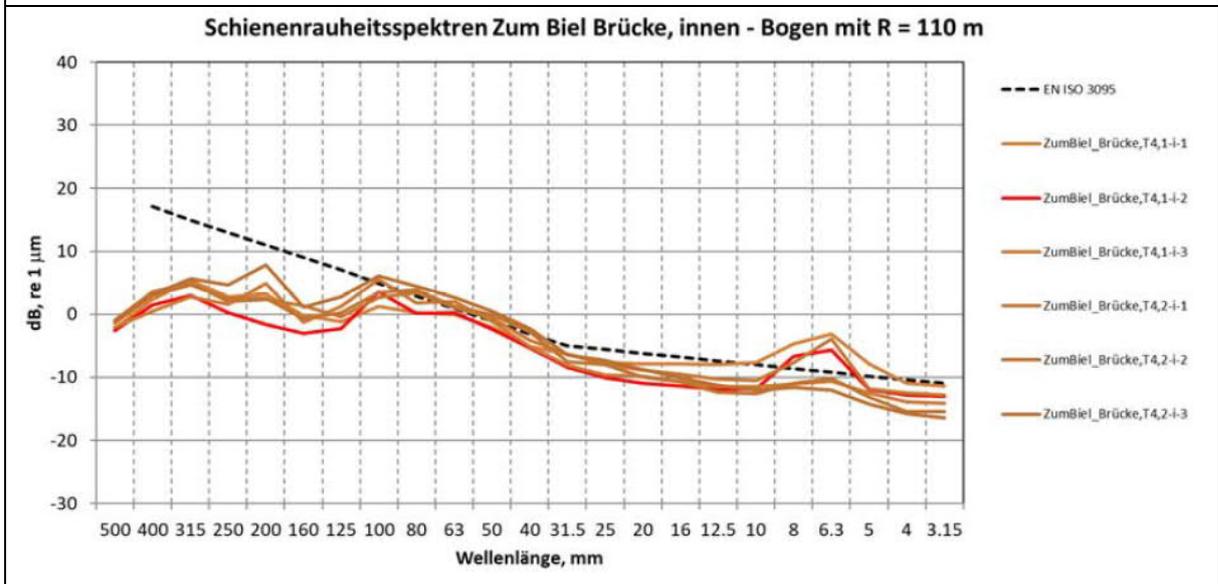
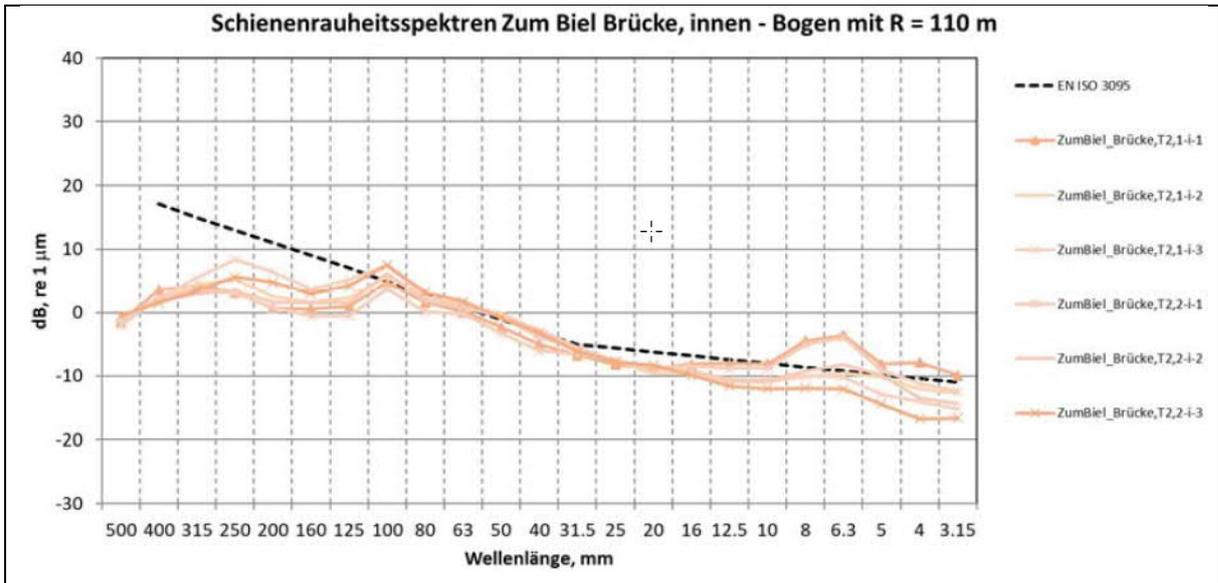
11.1.5. Zum Biel Portail extérieur

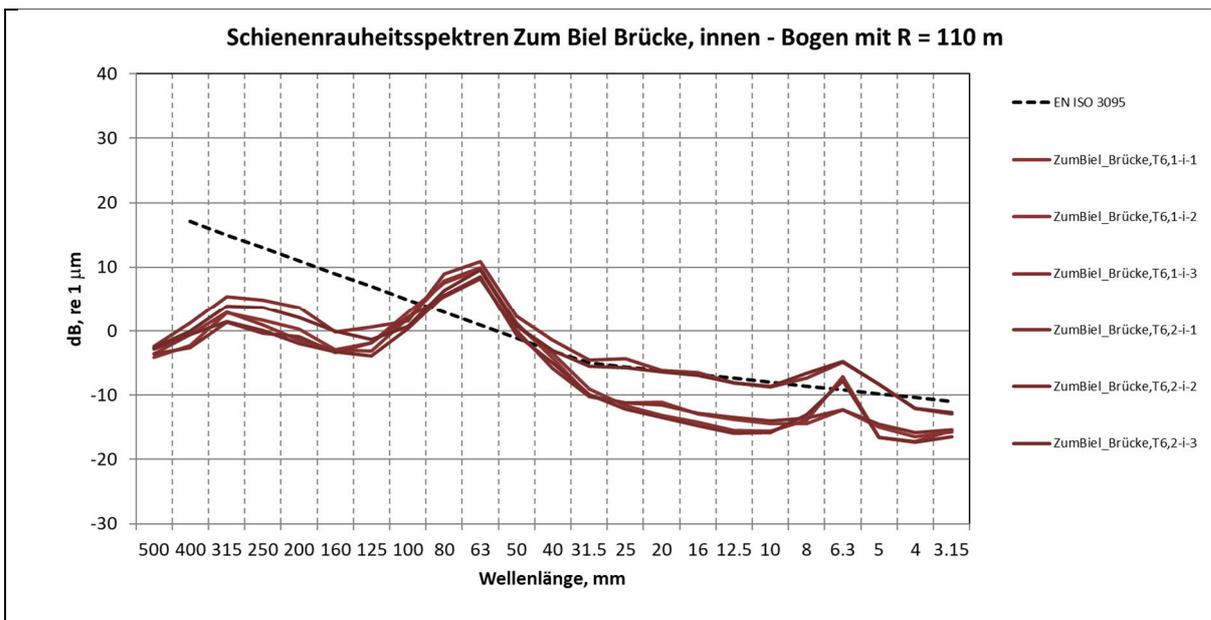




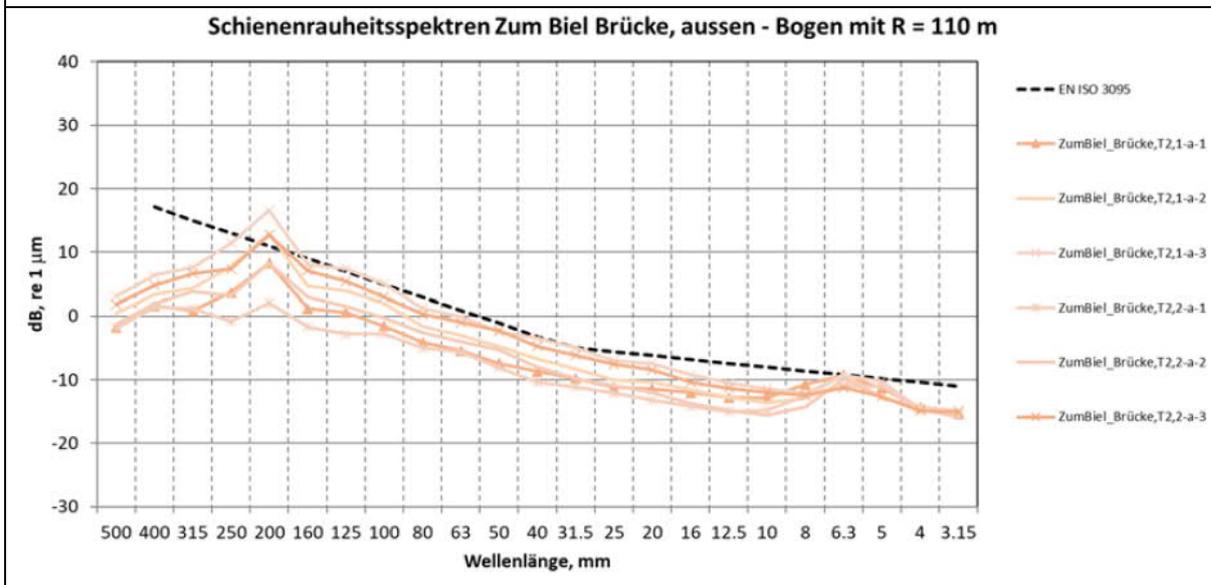
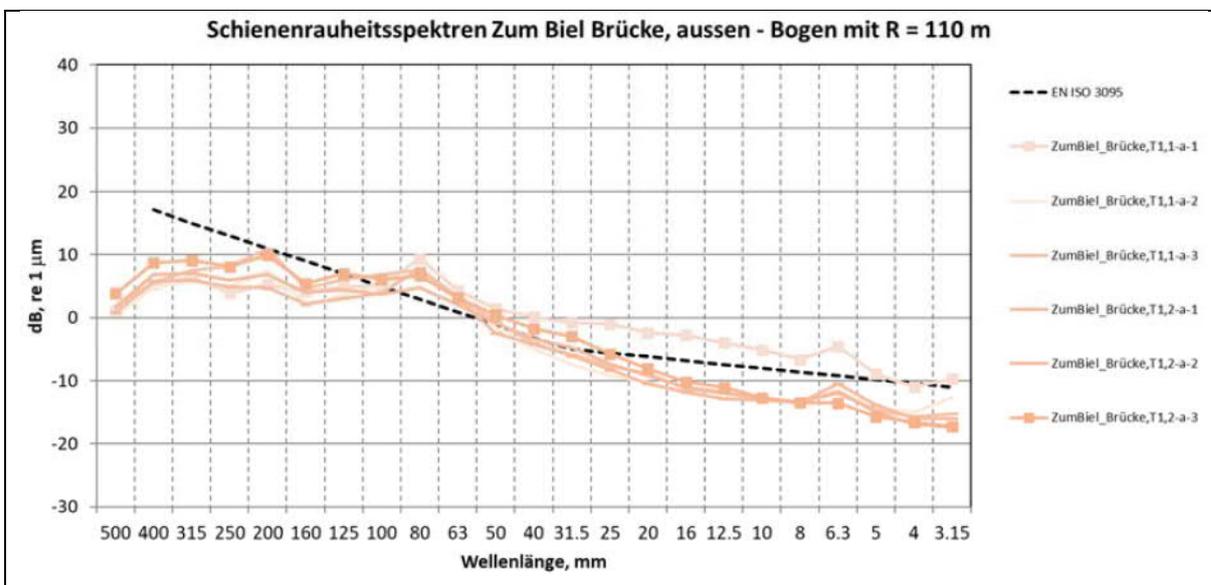
11.1.6. Zum Biel Pont intérieur

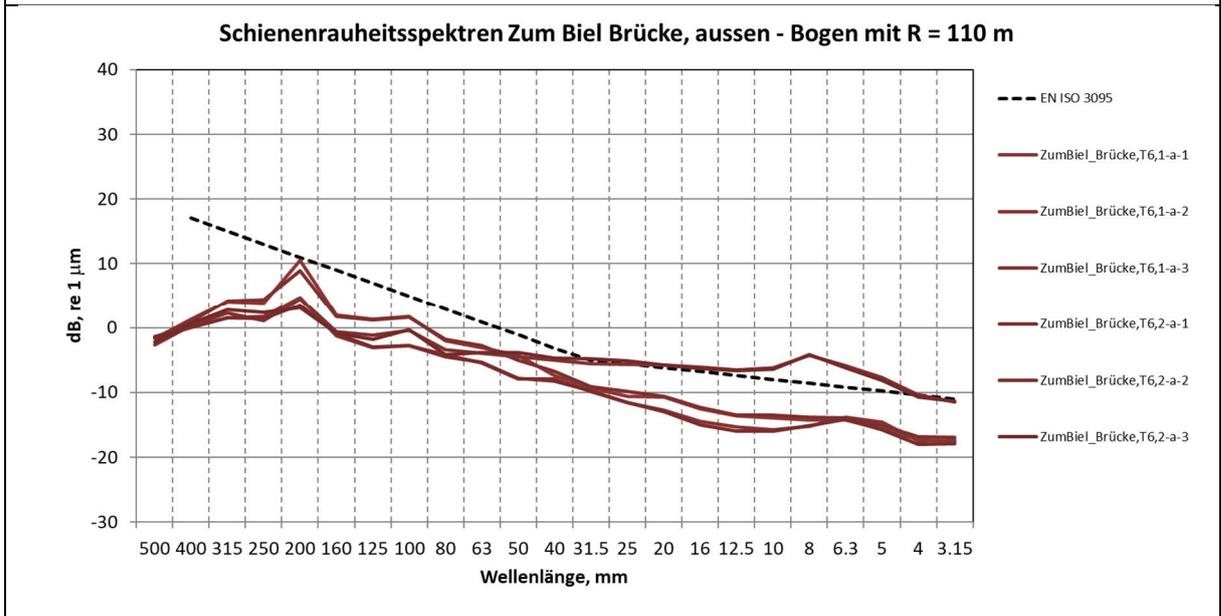
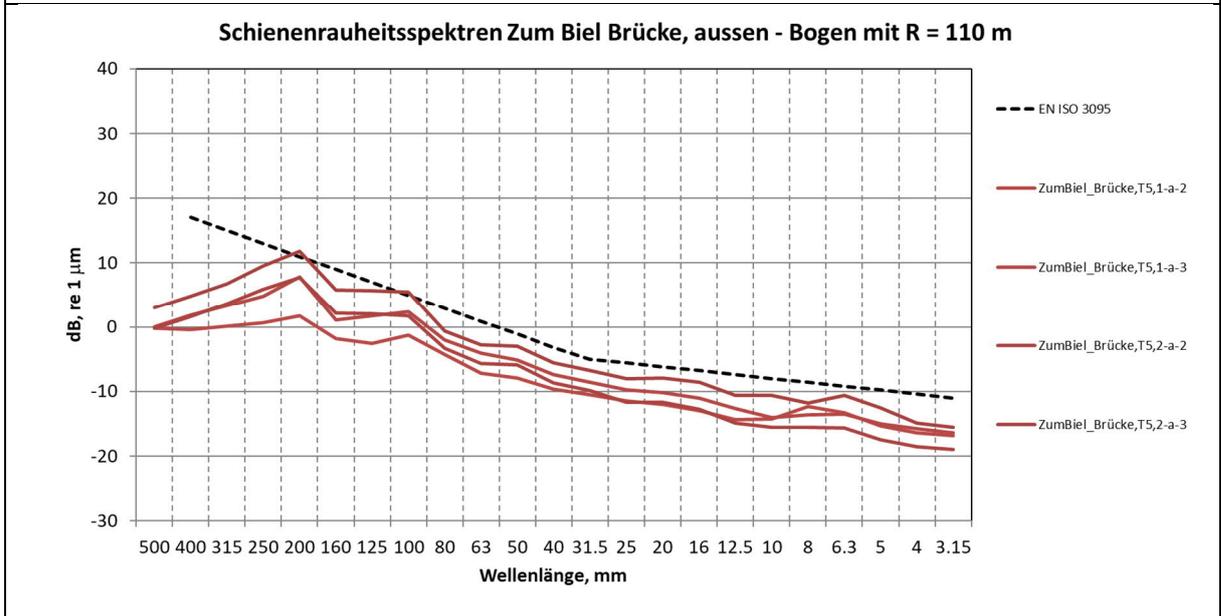
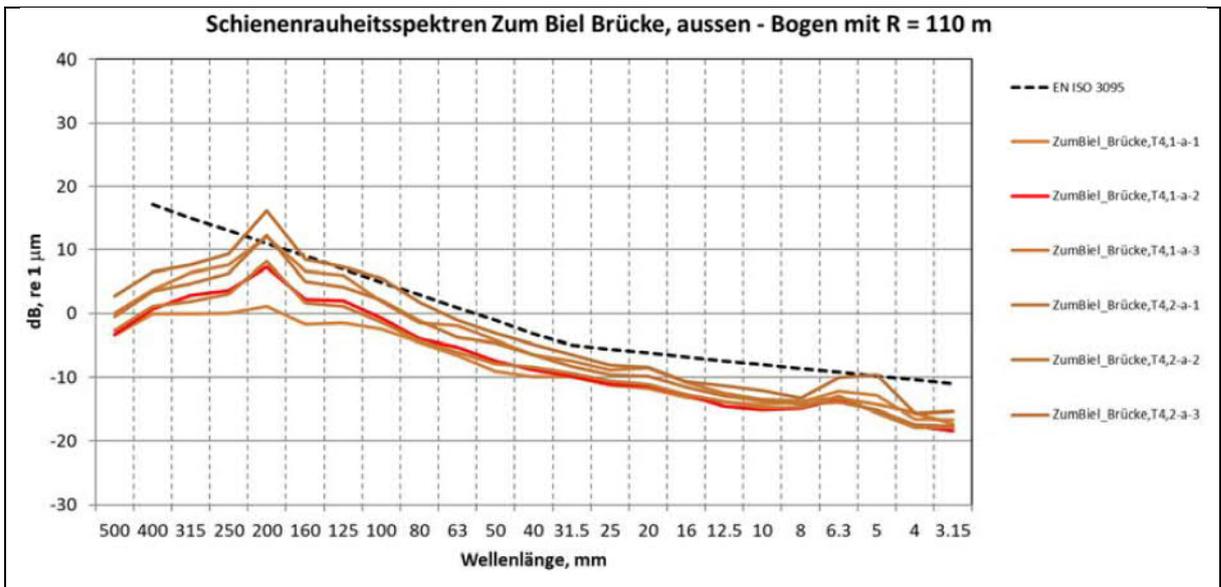




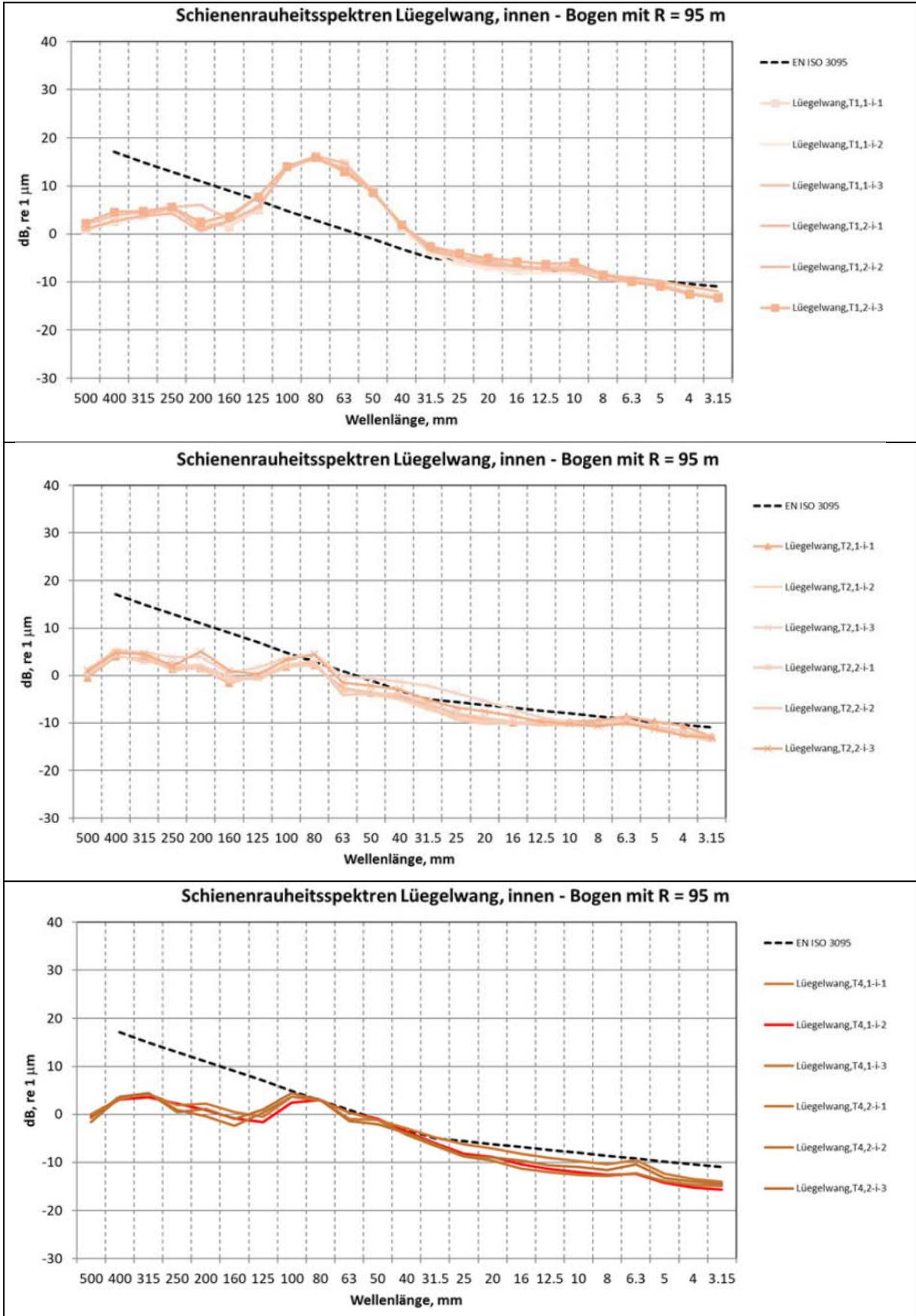


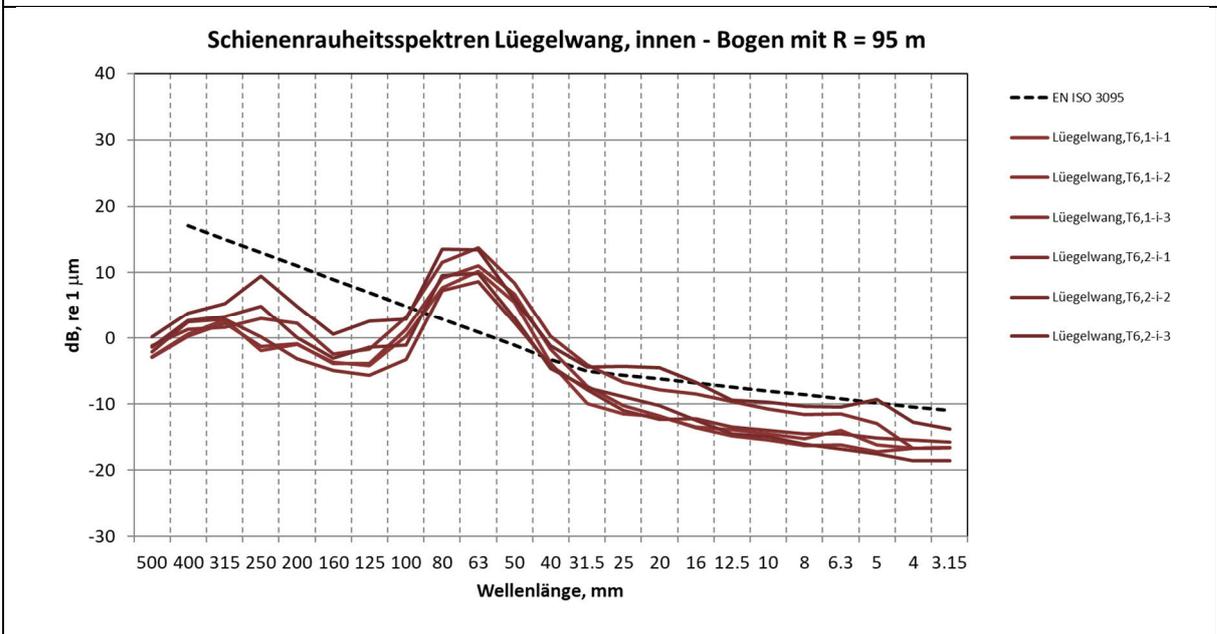
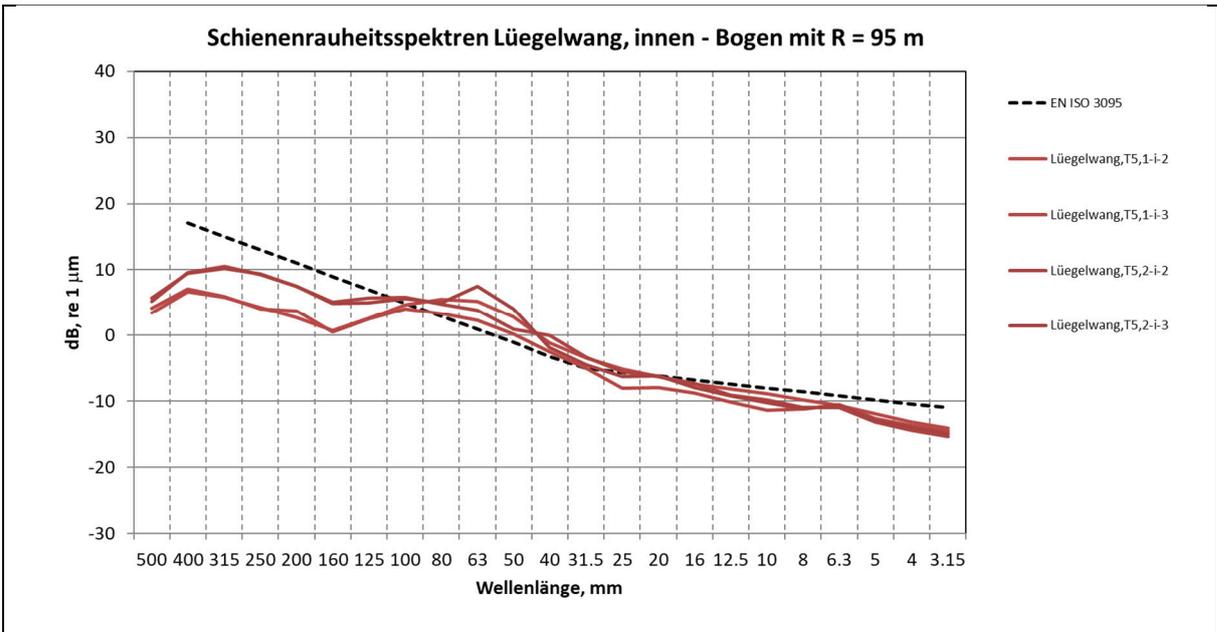
11.1.7. Zum Biel pont extérieur



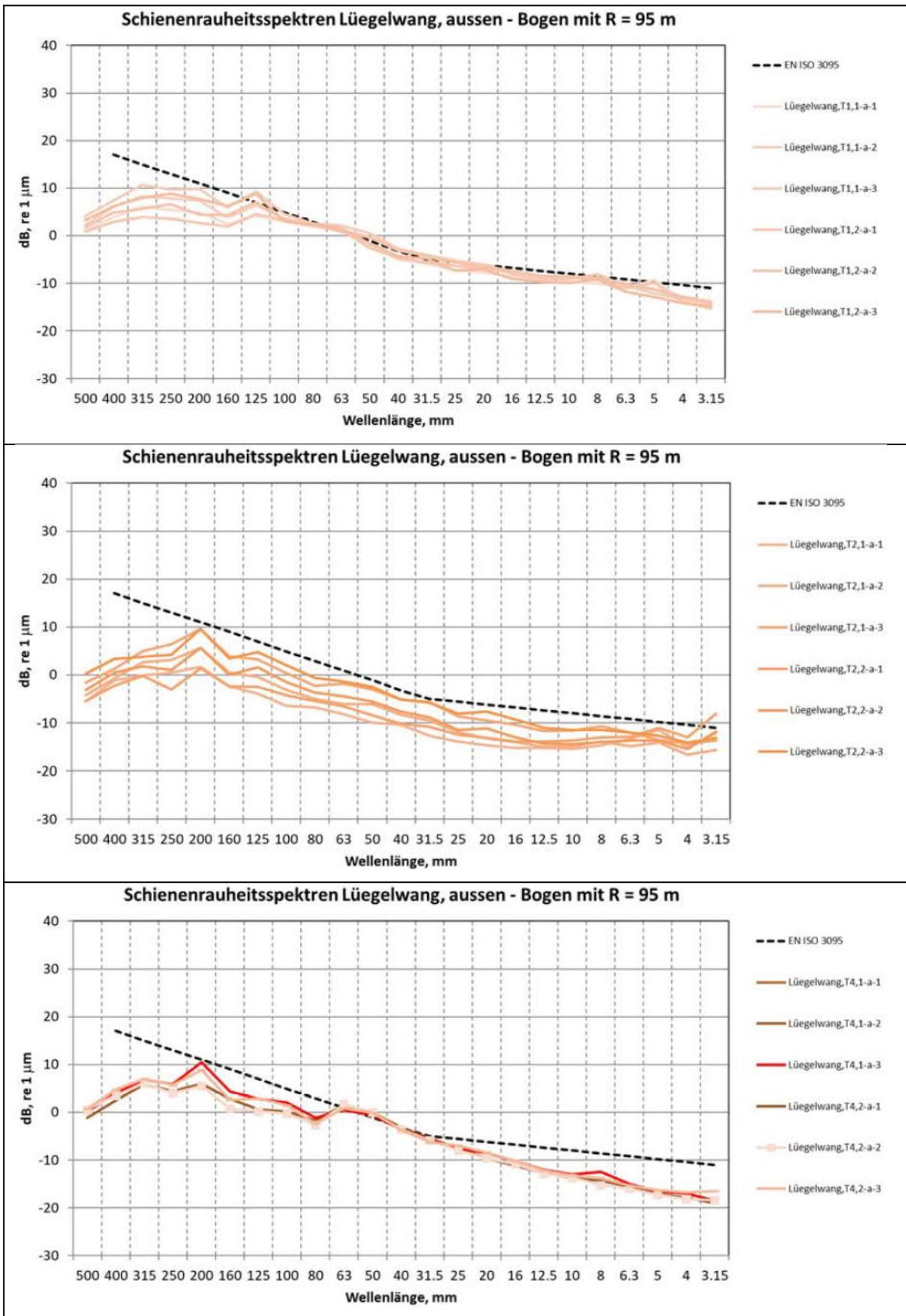


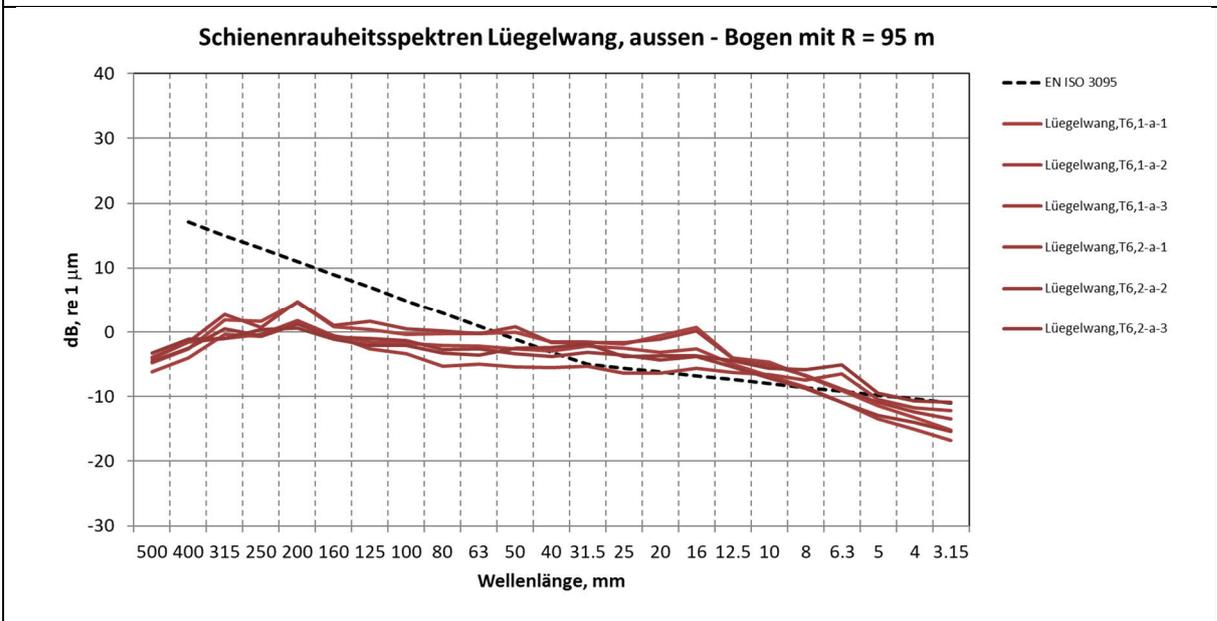
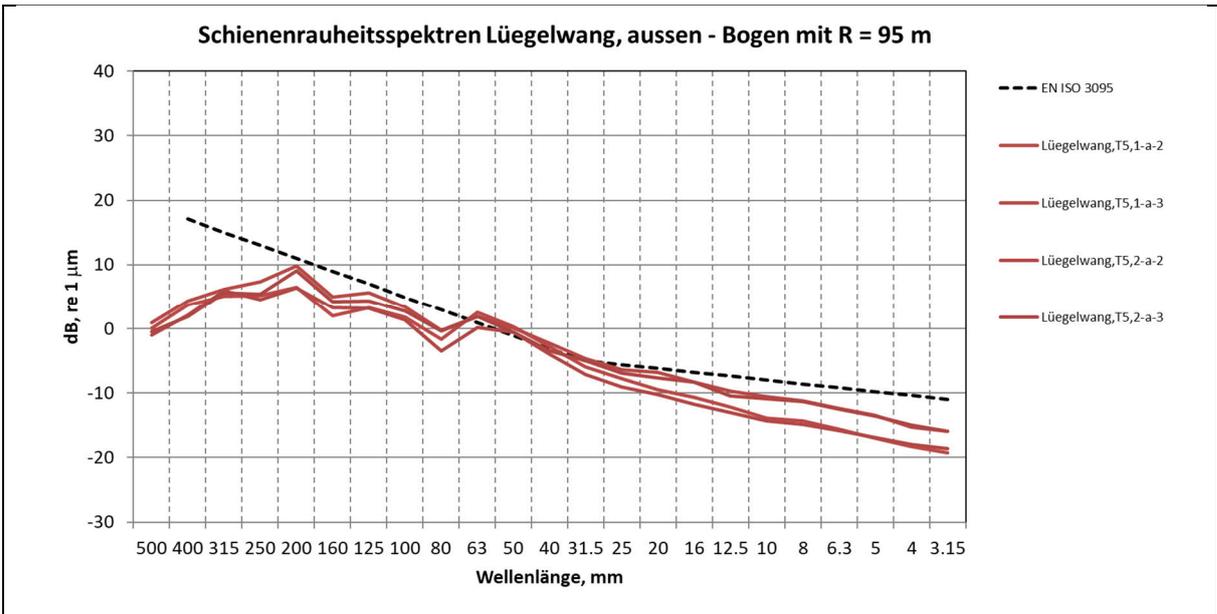
11.1.8. Lüegelwang intérieur





11.1.9. Lüegelwang extérieur





11.2. Mesures tribomètre

11.2.1. Kalter Boden voie 2 (Rayon 100 m) avant l'espace de relais Kilomètre de ligne 41.080

Date	Heure	Météo	Temp °C	Rail	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne
22.10.21	15:10	Ensoleillé/Vent	8	gauche	0.57	0.55	0.52	0.55
				droite	0.59	0.58	0.58	0.58
28.10.21	13.30	Ensoleillé	12	gauche	0.23	0.27	0.25	0.25
		Vent léger		droite	0.25	0.26	0.26	0.26
29.10.21	10.30	Ensoleillé	6	gauche	0.26	0.22	0.23	0.24
				droite	0.23	0.23	0.23	0.23
30.10.21	8.15	Nuageux	5	gauche	0.21	0.24	0.22	0.22
				droite	0.27	0.26	0.27	0.27
31.10.21	08.30	Nuageux	7	gauche	0.29	0.33	0.32	0.31
				droite	0.34	0.27	0.26	0.29
02.11.21	13.30	Ensoleillé	9	gauche	0.23	0.27	0.25	0.25
				droite	0.27	0.32	0.37	0.32
03.11.21	11.30	Nuageux	6	gauche	0.56	0.56	0.62	0.58
				droite	0.61	0.61	0.64	0.62
06.11.21	09.15	Ensoleillé	-1	gauche	0.28	0.33	0.31	0.30
				droite	0.35	0.30	0.32	0.32
07.11.21	08.30	Ensoleillé	-1	gauche	0.26	0.30	0.28	0.28
				droite	0.28	0.28	0.24	0.27

08.11.21	11.30	Ensoleillé	0	gauche	0.26	0.28	0.28	0.27
				droite	0.27	0.30	0.28	0.28
09.11.21	09.30	Ensoleillé	3	gauche	0.24	0.28	0.26	0.26
				droite	0.26	0.25	0.26	0.26
12.11.21	11.00	Ensoleillé	8	gauche	0.24	0.26	0.28	0.26
				droite	0.26	0.30	0.26	0.27
18.11.21	14.00	Ensoleillé	8	gauche	0.21	0.23	0.23	0.22
				droite	0.23	0.32	0.33	0.29
25.11.21	11.30	Nuageux	5	gauche	0.26	0.25	0.27	0.26
				droite	0.27	0.33	0.36	0.32
03.12.21	10.00	Beau	-11	gauche	0.26	0.36	0.45	0.36
				droite	0.31	0.30	0.32	0.31

27.12.21	10.00	Nuageux	-1	gauche	0.27	0.28	0.25	0.27
				droite	0.29	0.30	0.28	0.29
14.02.22	14.20	Nuageux	2	gauche	0.18	0.20	0.21	0.20
				droite	0.23	0.23	0.24	0.20
02.03.22	07.50	Ensoleillé	-2	gauche	0.22	0.26	0.27	0.25
				droite	0.30	0.30	0.29	0.30
07.04.22	08.55	Pluie	2	gauche	0.39	0.40	0.43	0.41
			2	droite	0.31	0.22	0.23	0.25
27.04.22	08.00	Schön	0	gauche	0.36	0.47	0.44	0.42
				droite	0.45	0.37	0.36	0.39
13.06.22	08.50	Nuageux	14	gauche	0.23	0.31	0.31	0.28
				droite	0.34	0.33	0.34	0.34
30.06.22	09.30	Beau	13	gauche	0.31	0.31	0.29	0.30
				droite	0.32	0.34	0.39	0.35
12.07.22	07.50	Beau	15	gauche	0.30	0.28	0.35	0.31
				droite	0.40	0.44	0.42	0.42
21.07.22	08.45	Beau	19	gauche	0.37	0.35	0.34	0.35
				droite	0.41	0.39	0.43	0.41

27.07.22	07.50	Beau	14	gauche	0.39	0.41	0.47	0.42
				droite	0.52	0.49	0.48	0.50
24.08.22	08.00	Beau	11	gauche	0.42	0.42	0.45	0.43
				droite	0.46	0.46	0.44	0.45
22.09.22	09.02	Beau	2	gauche	0.36	0.42	0.42	0.40
				droite	0.48	0.55	0.42	0.48
	14.30	Beau	18	gauche	0.25	0.25	0.28	0.26
				droite	0.37	0.35	0.33	0.35

11.2.2. Bienne courbe (110m) kilomètre de ligne 42.050

Date	Heure	Météo	Temp °C	Rail	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne
22.10.21	14.50	Ensoleillé/Vent	8	gauche	0.69	0.68	0.68	0.68
				droite	0.67	0.66	0.66	0.66
28.10.21	13.50	Ensoleillé	12	gauche	0.23	0.30	0.27	0.27
		Vent léger		droite	0.23	0.25	0.23	0.24
29.10.21	10.45	Ensoleillé	6	gauche	0.24	0.25	0.25	0.25
				droite	0.21	0.22	0.24	0.22
30.10.21	08.30	Nuageux	5	gauche	0.22	0.23	0.25	0.23
				droite	0.25	0.24	0.23	0.24
31.10.21	08.45	Nuageux	7	gauche	0.24	0.24	0.25	0.24
				droite	0.32	0.40	0.43	0.38
02.11.21	14.30	Ensoleillé	9	gauche	0.56	0.61	0.57	0.58
				droite	0.53	0.59	0.57	0.56
03.11.21	11.00	Nuageux	6	gauche	0.62	0.63	0.67	0.64
				droite	0.56	0.41	0.36	0.44
06.11.21	09.30	Ensoleillé	-1	gauche	0.30	0.28	0.30	0.29
				droite	0.27	0.36	0.33	0.32
07.11.21	08.45	Ensoleillé	-1	gauche	0.50	0.50	0.54	0.51
				droite	0.51	0.38	0.37	0.42

08.11.21	11.00	Ensoleillé	0	gauche	0.28	0.30	0.31	0.30
				droite	0.27	0.27	0.28	0.27
09.11.21	09.50	Ensoleillé	3	gauche	0.25	0.23	0.24	0.24
				droite	0.23	0.24	0.24	0.24
12.11.21	11.15	Ensoleillé	8	gauche	0.22	0.23	0.26	0.24
				droite	0.20	0.31	0.30	0.27
18.11.21	14.30	Ensoleillé	8	gauche	0.31	0.39	0.34	0.35
				droite	0.25	0.24	0.26	0.25
25.11.21	11.15	Nuageux	5	gauche	0.30	0.29	0.28	0.29
				droite	0.26	0.28	0.27	0.27
03.12.21	10.40	Beau	-11	gauche	0.44	0.46	0.48	0.46
				droite	0.31	0.33	0.22	0.29
27.12.21	10.50	Nuageux	-1	gauche	0.23	0.24	0.23	0.23
				droite	0.23	0.23	0.25	0.24
14.02.22	13.55	Nuageux	2	gauche	0.21	0.22	0.21	0.21
				droite	0.24	0.23	0.25	0.24
02.03.22	08.10	Ensoleillé	-2	gauche	0.24	0.24	0.23	0.24
				droite	0.31	0.33	0.36	0.33
07.04.22	08.40	Pluie	2	gauche	0.52	0.52	0.53	0.53
				droite	0.52	0.49	0.53	0.51
27.04.22	08.35	Beau	-1	gauche	0.47	0.47	0.52	0.49
				droite	0.60	0.59	0.60	0.60
13.06.22	09.35	Nuageux	14	gauche	0.23	0.23	0.21	0.22
				droite	0.21	0.26	0.28	0.25
30.06.22	08.30	Beau	13	gauche	0.40	0.44	0.46	0.43
				droite	0.50	0.52	0.53	0.52
12.07.22	08.10	Beau	15	gauche	0.25	0.26	0.24	0.25
				droite	0.27	0.32	0.33	0.31
21.07.22	08.20	Beau	19	gauche	0.28	0.31	0.30	0.30
				droite	0.32	0.34	0.36	0.34

27.07.22	08.30	Beau	14	gauche	0.50	0.51	0.44	0.48
				droite	0.50	0.58	0.55	0.54
24.08.22	08.20	Beau	11	gauche	0.40	0.42	0.43	0.42
				droite	0.45	0.44	0.45	0.45
22.09.22	08.00	Beau	2	gauche	0.48	0.53	0.54	0.52
				droite	0.26	0.24	0.28	0.26
	14.10	Beau	18	gauche	0.26	0.24	0.25	0.25
				droite	0.25	0.33	0.25	0.28

11.2.3. Bienne droite kilomètre de ligne 42.100

Date	Heure	Météo	Temp °C	Rail	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne
22.10.21	14.40	Ensoleillé/Vent	8	gauche	0.67	0.65	0.64	0.65
				droite	0.66	0.64	0.63	0.64
28.10.21	14.00	Ensoleillé	12	gauche	0.23	0.20	0.21	0.21
		Vent léger		droite	0.21	0.21	0.29	0.24
29.10.21	10.45	Ensoleillé	6	gauche	0.22	0.22	0.20	0.21
				droite	0.22	0.26	0.22	0.23
30.10.21	08.40	Nuageux	5	gauche	0.15	0.16	0.18	0.16
				droite	0.17	0.23	0.23	0.21
31.10.21	08.45	Nuageux	7	gauche	0.29	0.28	0.26	0.28
				droite	0.37	0.34	0.31	0.34
02.11.21	14.30	Ensoleillé	9	gauche	0.33	0.35	0.38	0.35
				droite	0.42	0.47	0.46	0.45
03.11.21	11.00	Nuageux	6	gauche	0.46	0.49	0.49	0.48
				droite	0.53	0.54	0.55	0.54
06.11.21	09.30	Ensoleillé	-1	gauche	0.23	0.27	0.26	0.25
				droite	0.35	0.36	0.34	0.35
07.11.21	08.45	Ensoleillé	-1	gauche	0.23	0.21	0.23	0.22
				droite	0.23	0.27	0.29	0.26
08.11.21	11.00	Ensoleillé	0	gauche	0.29	0.29	0.29	0.29
				droite	0.23	0.25	0.24	0.24
09.11.21	11.00	Ensoleillé	3	gauche	0.28	0.27	0.28	0.28
				droite	0.31	0.30	0.28	0.30
12.11.21	11.15	Ensoleillé	8	gauche	0.21	0.25	0.23	0.23
				droite	0.27	0.26	0.30	0.28
18.11.21	14.45	Ensoleillé	8	gauche	0.27	0.30	0.30	0.29
				droite	0.27	0.28	0.26	0.27
25.11.21	11.15	Nuageux	5	gauche	0.34	0.32	0.27	0.31
				droite	0.25	0.29	0.32	0.29
03.12.21	10.50	Beau	-11	gauche	0.24	0.24	0.28	0.25
				droite	0.23	0.26	0.29	0.26
27.12.21	10.30	Nuageux	-1	gauche	0.25	0.25	0.26	0.25
				droite	0.23	0.22	0.23	0.23

14.02.22	13.45	Nuageux	2	gauche	0.19	0.21	0.20	0.20
				droite	0.22	0.20	0.23	0.22
02.03.22	08.00	Ensoleillé	-2	gauche	0.21	0.22	0.24	0.22
				droite	0.22	0.23	0.25	0.23
07.04.22	08.25	Pluie	2	gauche	0.24	0.26	0.30	0.27
				droite	0.43	0.44	0.44	0.44
27.04.22	08.35	Beau	-1	gauche	0.36	0.39	0.39	0.38
				droite	0.56	0.60	0.55	0.57
13.06.22	09.55	Nuageux	14	gauche	0.19	0.18	0.19	0.19
				droite	0.19	0.24	0.23	0.22
30.06.22	09.00	Beau	13	gauche	0.25	0.24	0.25	0.25
				droite	0.32	0.30	0.30	0.31
12.07.22	08.20	Beau	15	gauche	0.21	0.23	0.22	0.22
				droite	0.31	0.31	0.32	0.31
21.07.22	08.10	Beau	19	gauche	0.26	0.23	0.28	0.27
				droite	0.34	0.39	0.36	0.36
27.07.22	08.15	Beau	14	gauche	0.23	0.24	0.29	0.25
				droite	0.50	0.51	0.44	0.48
24.08.22	08.45	Beau	11	gauche	0.22	0.22	0.21	0.22
				droite	0.42	0.46	0.40	0.43
22.09.22	07.52	Beau	3	gauche	0.30	0.34	0.33	0.32
				droite	0.40	0.37	0.42	0.40
	14.00	Beau	18	gauche	0.21	0.21	0.23	0.22
				droite	0.20	0.22	0.22	0.21

11.2.4. Luegelwang courbe serrée (95m) kilomètre de ligne 42.550

Date	Heure	Météo	Temp °C	Rail	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne
22.10.21	14.20	Ensoleillé/Vent	8	gauche	0.57	0.63	0.56	0.59
				droite	0.49	0.56	0.57	0.54
28.10.21	14.15	Ensoleillé	12	gauche	0.24	0.23	0.22	0.23
		Vent léger		droite	0.28	0.25	0.24	0.26
29.10.21	11.00	Ensoleillé	6	gauche	0.22	0.23	0.23	0.23
				droite	0.21	0.21	0.19	0.20
30.10.21	09.00	Nuageux	5	gauche	0.21	0.24	0.22	0.22
				droite	0.22	0.23	0.26	0.24
31.10.21	09.15	Nuageux	7	gauche	0.25	0.36	0.36	0.32
				droite	0.29	0.35	0.30	0.31
02.11.21	14.45	Ensoleillé	9	gauche	0.61	0.61	0.63	0.62
				droite	0.68	0.58	0.63	0.63
03.11.21	10.30	Nuageux	6	gauche	0.43	0.37	0.44	0.41
				droite	0.49	0.49	0.54	0.51
06.11.21	10.00	Ensoleillé	-1	gauche	0.26	0.26	0.27	0.26
				droite	0.27	0.27	0.28	0.27
07.11.21	09.15	Ensoleillé	-1	gauche	0.34	0.27	0.41	0.34
				droite	0.33	0.29	0.27	0.30
08.11.21	10.45	Ensoleillé	0	gauche	0.29	0.30	0.30	0.30
			0	droite	0.28	0.31	0.30	0.30

09.11.21	11.00	Ensoleillé	3	gauche	0.28	0.27	0.28	0.28
				droite	0.31	0.30	0.28	0.30
12.11.21	11.15	Ensoleillé	8	gauche	0.21	0.25	0.23	0.23
				droite	0.27	0.26	0.30	0.28
18.11.21	14.45	Ensoleillé	8	gauche	0.27	0.30	0.30	0.29
				droite	0.27	0.28	0.26	0.27
25.11.21	11.15	Nuageux	5	gauche	0.34	0.32	0.27	0.31
				droite	0.25	0.29	0.32	0.29
03.12.21	10.50	Beau	-11	gauche	0.24	0.24	0.28	0.25
				droite	0.23	0.26	0.29	0.26
27.12.21	10.30	Nuageux	-1	gauche	0.25	0.25	0.26	0.25
				droite	0.23	0.22	0.23	0.23
14.02.22	13.45	Nuageux	2	gauche	0.19	0.21	0.20	0.20
				droite	0.22	0.20	0.23	0.22
02.03.22	08.00	Ensoleillé	-2	gauche	0.21	0.22	0.24	0.22
				droite	0.22	0.23	0.25	0.23
07.04.22	08.25	Pluie	2	gauche	0.24	0.26	0.30	0.27
				droite	0.43	0.44	0.44	0.44
27.04.22	08.35	Beau	-1	gauche	0.36	0.39	0.39	0.38
				droite	0.56	0.60	0.55	0.57
13.06.22	09.55	Nuageux	14	gauche	0.19	0.18	0.19	0.19
				droite	0.19	0.24	0.23	0.22
30.06.22	08.00	Beau	13	gauche	0.19	0.24	0.29	0.24
				droite	0.27	0.28	0.29	0.28
12.07.22	08.40	Beau	15	gauche	0.28	0.27	0.28	0.28
				droite	0.50	0.46	0.38	0.45
21.07.22	08.00	Beau	19	gauche	0.34	0.33	0.31	0.33
				droite	0.47	0.45	0.46	0.46

27.07.22	08.40	Beau	14	gauche	0.30	0.38	0.39	0.36
				droite	0.47	0.51	0.48	0.49
24.08.22	09.15	Beau	11	gauche	0.27	0.26	0.28	0.27
				droite	0.49	0.47	0.44	0.47
22.09.22	08.25	Beau	2	gauche	0.36	0.35	0.37	0.36
				droite	0.44	0.41	0.44	0.43
	13.40	Beau	18	gauche	0.23	0.23	0.25	0.24
				droite	0.20	0.19	0.20	0.20

11.3. Rentabilité globale – Hypothèses

11.3.1. Investissement

Matériel roulant

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

Infrastructure

- Rails
 - Fr. 600.- par mètre de rail,
 - Durée de vie sans SKK : 9 ans, avec SKK : 16 ans
- Voie ferrée
 - Fr. 2000.- par mètre courant de voie, rail inclus
 - Durée de vie sans SKK : 45 ans, avec SKK : 63 ans

Frais d'entretien et d'exploitation

Matériel roulant

- Coûts de 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 an (P3) -> 8 * 90 = 720
 - env. 2'000 CHF de frais de personnel
- 5'500 CHF / an

Infrastructure

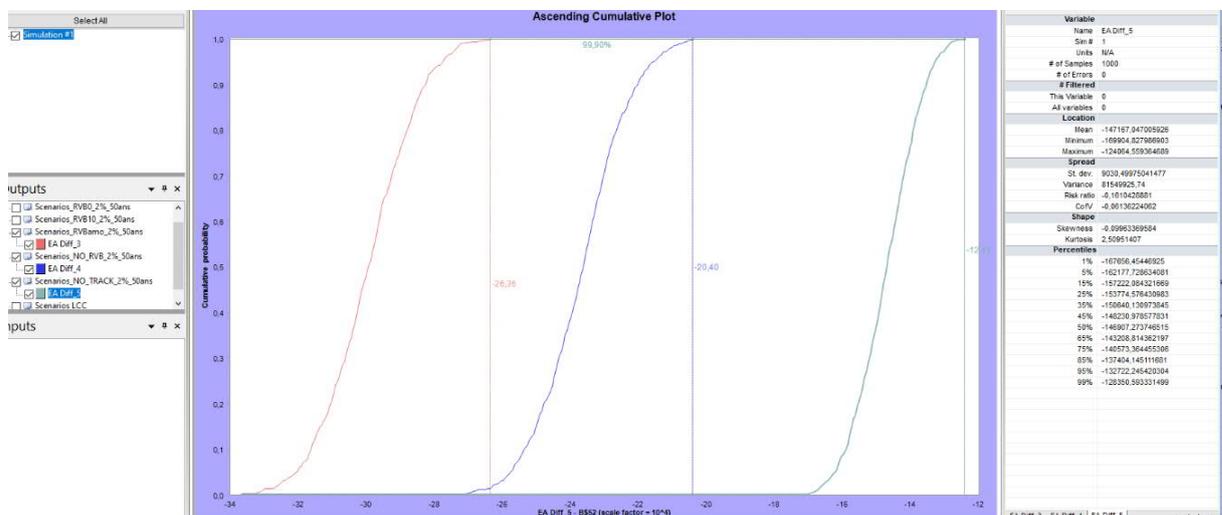
- Sans SKK
 - Meulage: 6 CHF/m, bourrage: 4 CHF/m
 - Remplacement du rail: 150'000 CHF / 5000m -> dans les Fr. 150'000.- sont inclus environ 250m de remplacement pur des rails, comme toute la ligne n'est pas à rayons étroits, seuls les rails dans les courbes seront remplacés. (5000m / 9 ans = 555m -> env. ½ en rayons étroits -> 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 (ballast). 16 ans
 - Remplacement du rail: 90'000 CHF / 5000m

Frais d'exploitation changement de bogie et de bandage de roue avant / après SKK

- Changement de bogie:
 - $20 \times 90 = 1'800$, nettoyage bogie: $15 \times 90 = 1'350$, Injection composants: $5 \times 90 = 450$, montage démontage moteurs d'essieu: $30 \times 90 = 2'700$, déplacement couronne d'orientation de 90° : $2 \times 90 = 180$ → Total heures = 6'480 CHF
 - Prestation externe: démonter essieu NB (externe) sans moteur: $2 \times 4900 = 9'800$, frais de transport = 1'500, → Total prestations externes = 11'300 CHF
 - Matériel: nettoyage TDG= 100, Injection composants = 100, Montage-démontage moteurs d'essieu = 3'500, bandages = 1'980, contrôle de fissures = $250 \times 2 = 500$, mesure de résistance = $130 \times 2 = 260$,
 - Révision des roulements = 1'400 → Matériel total = 7'840 CHF
 - Bogie / remplacement des bandages de roues Total: 25'620 par bogie
- Hypothèses:
 - Kilométrage avant SKK = 3'500km/mm
 - Kilométrage pendant le SKK = 16'000km/mm
 - Kilométrage nécessaire des véhicules par an = 80'000 km
 - Nombre de changement de bogie / pneus sur une année avant SKK = env. 8
 - Nombre de changement de bogie / pneus pendant les essais d'exploitation = env. 2
- Coûts changement de bogie par an (avant / après)
 - Coût annuel avant SKK: $8 \times 25620 = 204'960$
 - Coût annuel pendant essai d'exploitation SKK: $2 \times 25620 = 51'240$
 - Différence env.: $204'960 - 51'240 = 153'720$ CH

11.3.2. Extrait Simulation

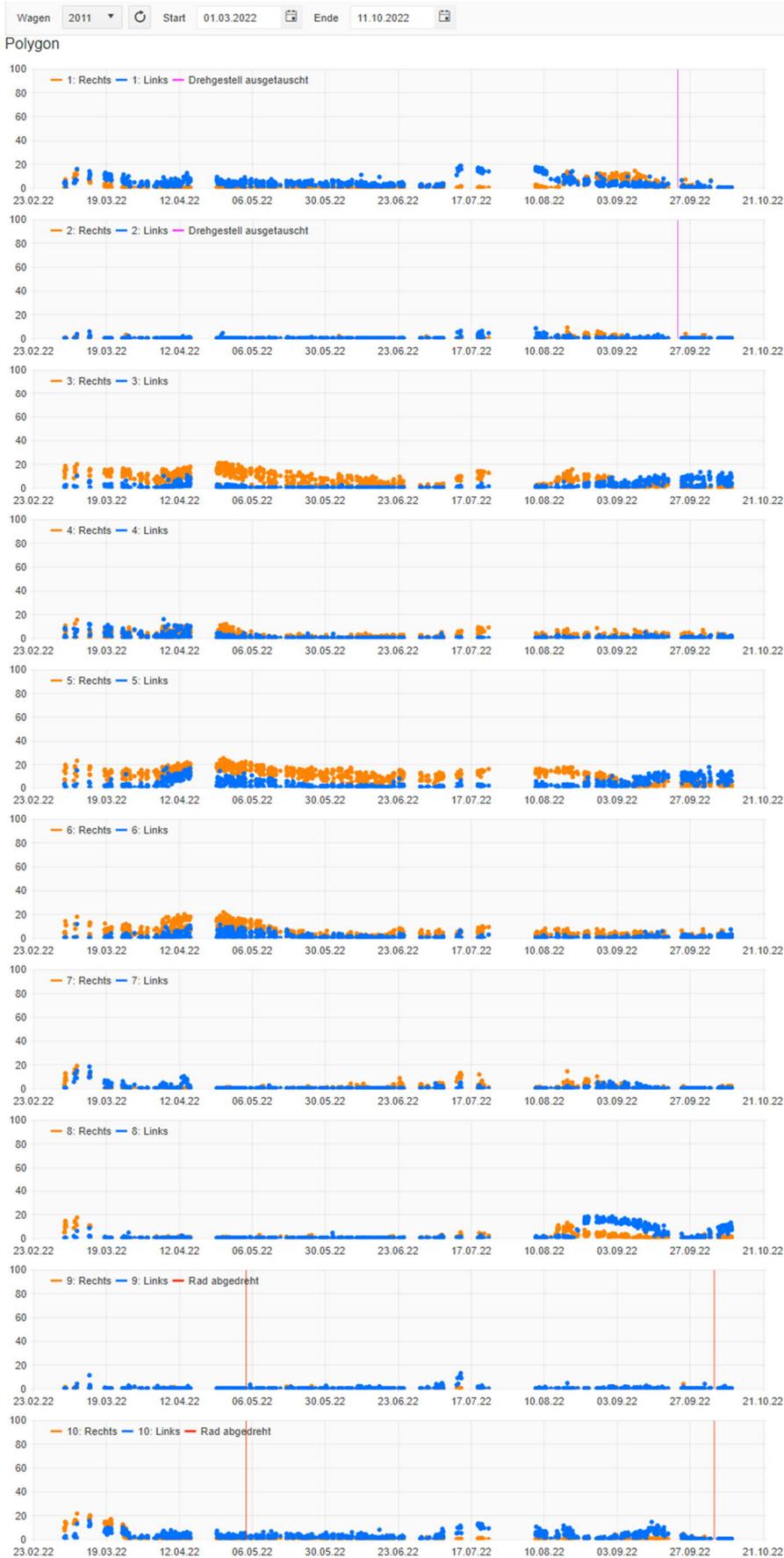


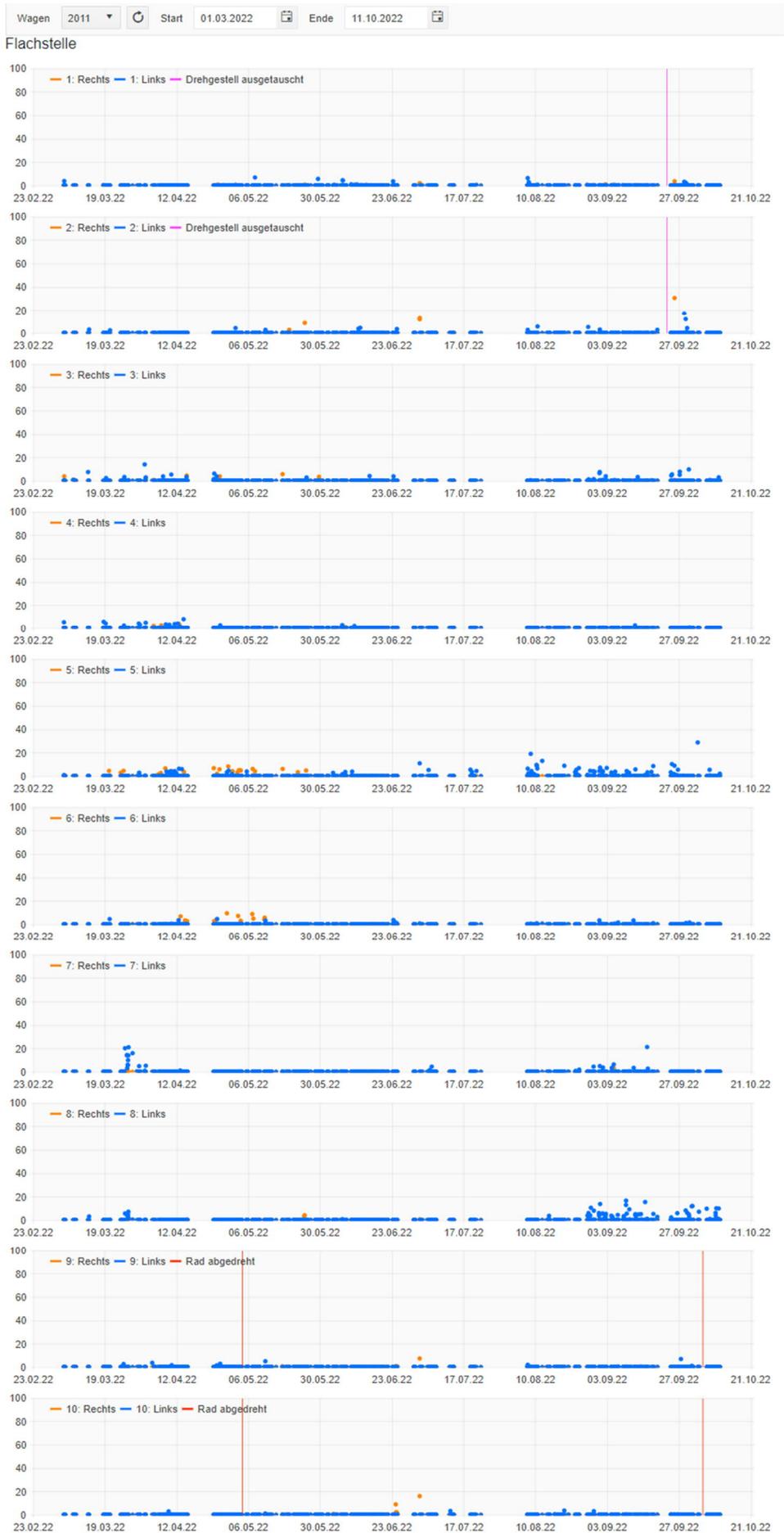
11.4. Faux-ronds des roues

Les tableaux ci-dessous présentent, pour chacun des véhicules de type Comète (3 parties, 4 parties), Navette et GSW, les écarts de circularité de type polygonal sur les premières pages et les écarts de circularité de type plat sur les deuxièmes pages. Les valeurs mesurées de toutes les roues par passage sur le site de mesure du 23.02.2022 à début octobre 2022 sont représentées.

	<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>Achsformel:</td> <td>4-teilig 2'Bo'zz Bo'zz 2'2'</td> <td>3-teilig 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 2'Bo'zz Bo'zz 2'2'	3-teilig 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 2'Bo'zz Bo'zz 2'2'	3-teilig 2'Bo'zz Bo'zz 2'														
	<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'															
	<table border="1"> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2131-2134</td> </tr> </table>	Nummerierung:	2131-2134													
Nummerierung:	2131-2134															

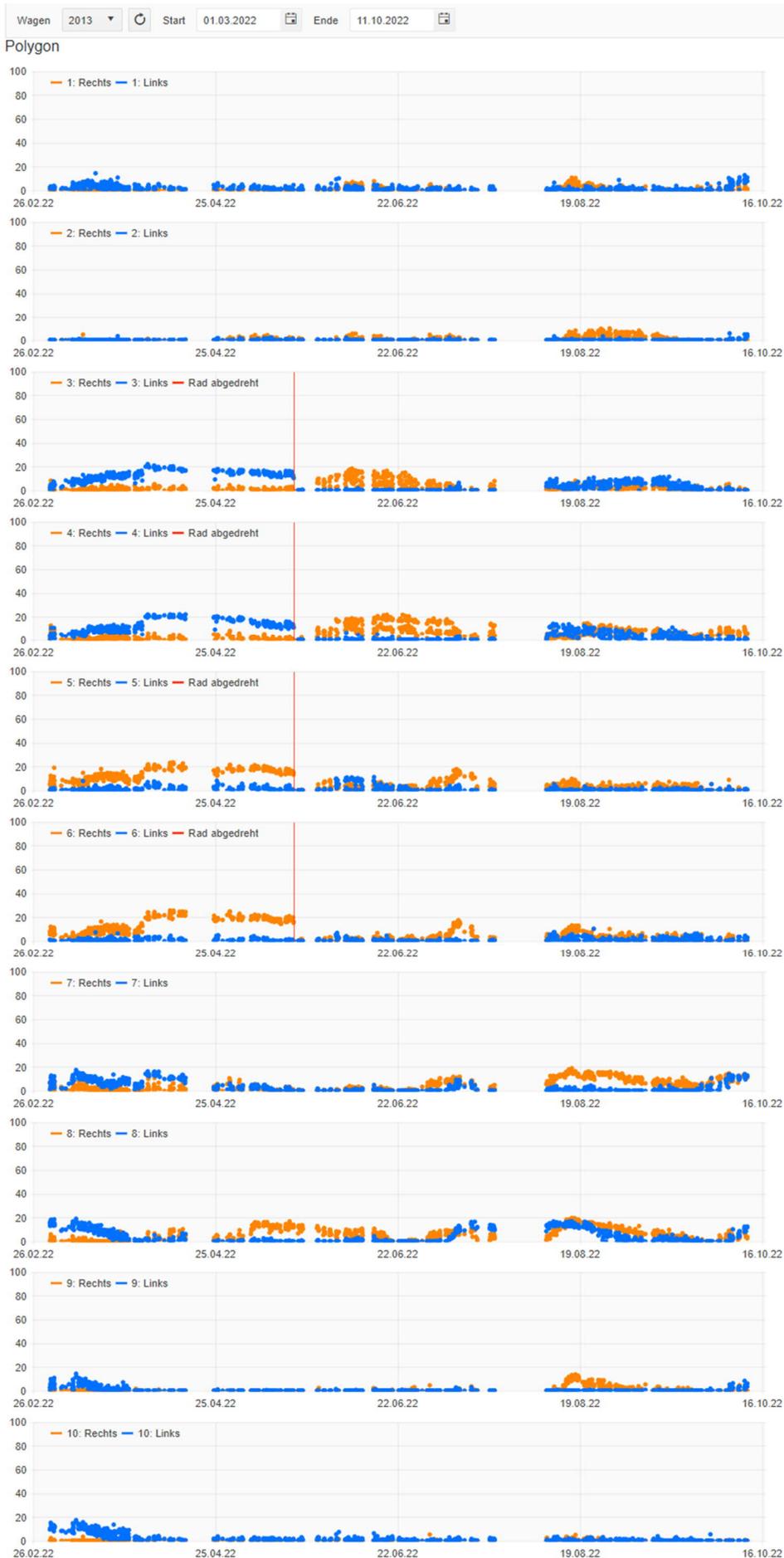
11.4.1. 2011 – 2014: Comète 3 modules

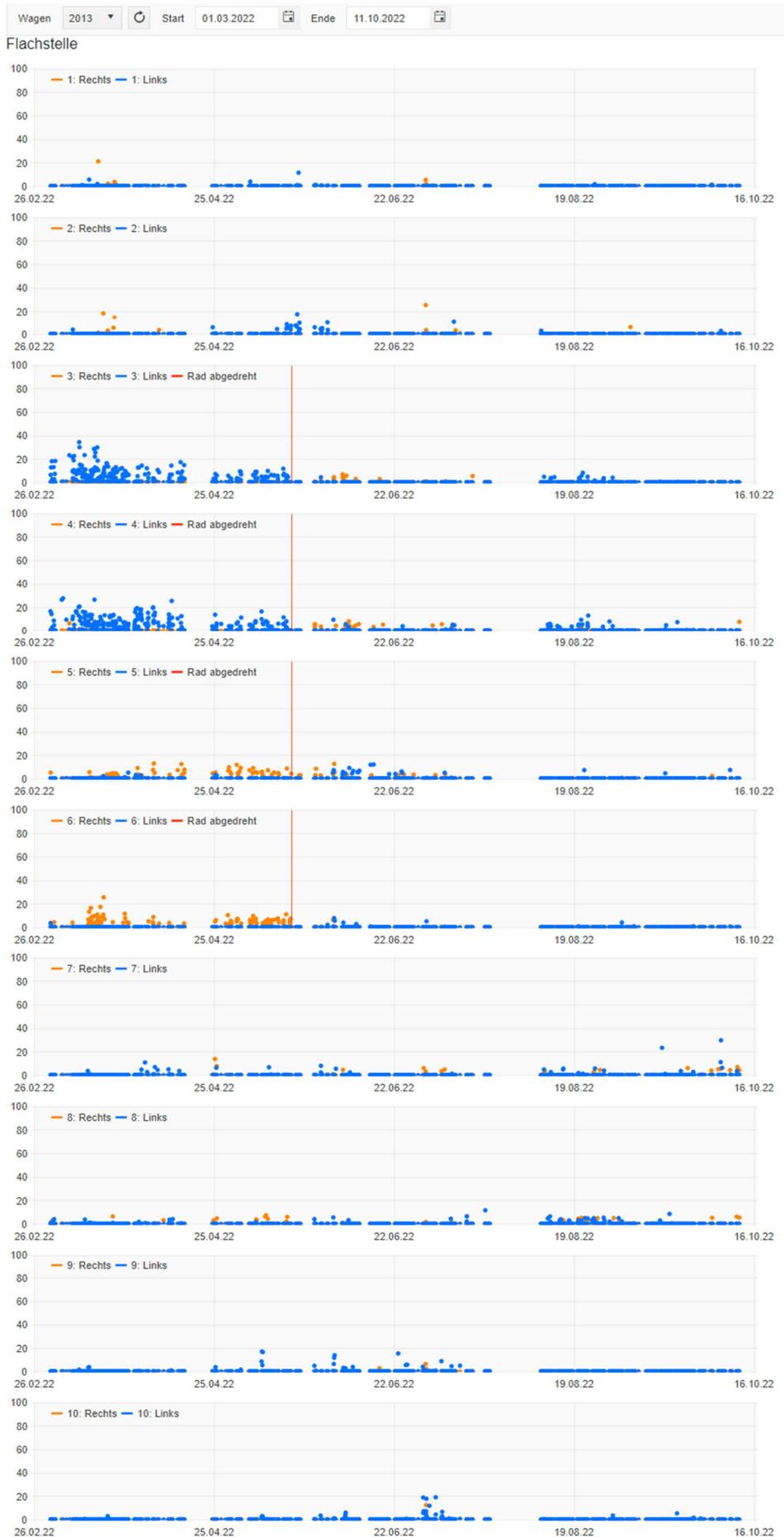




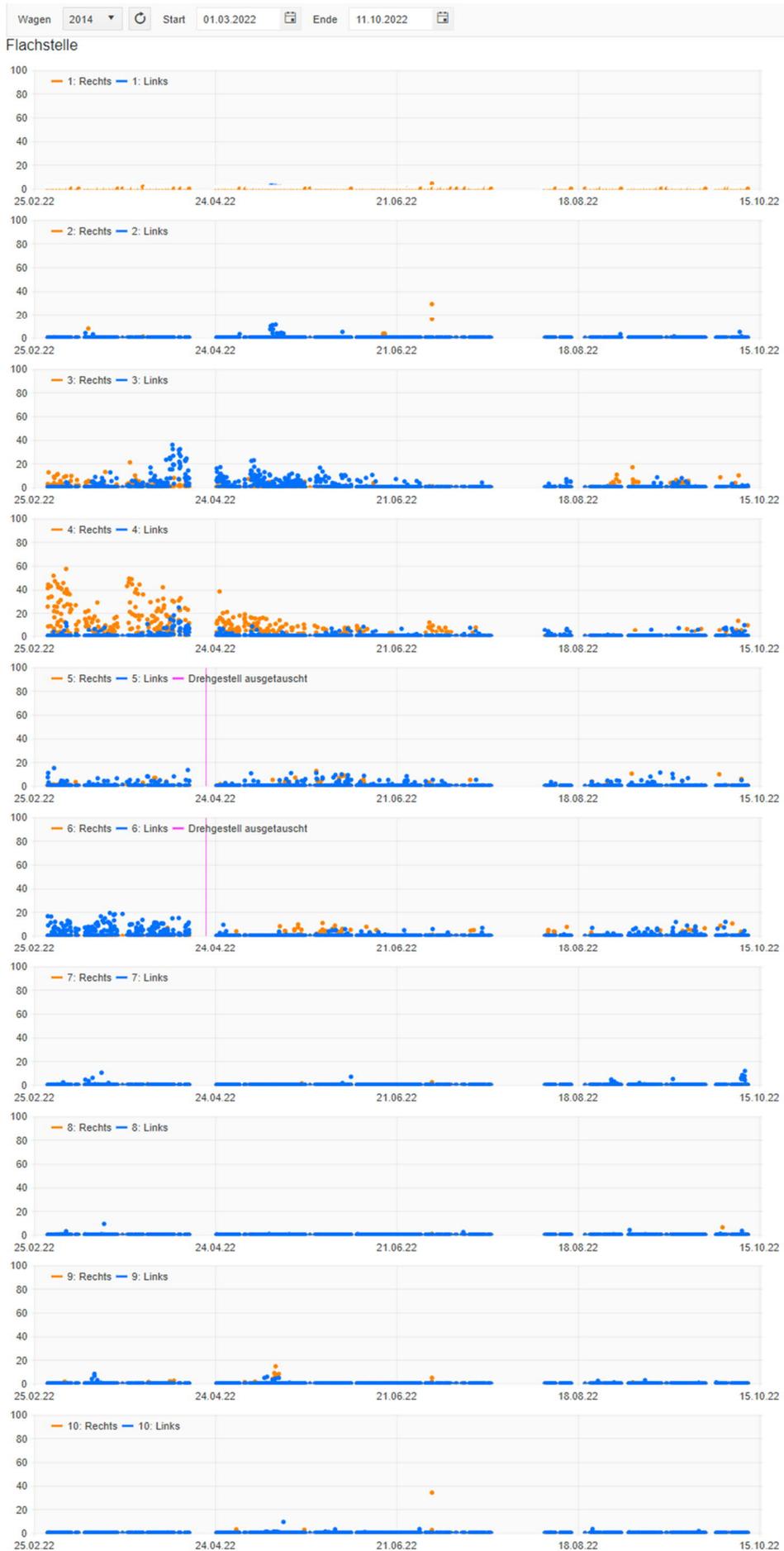








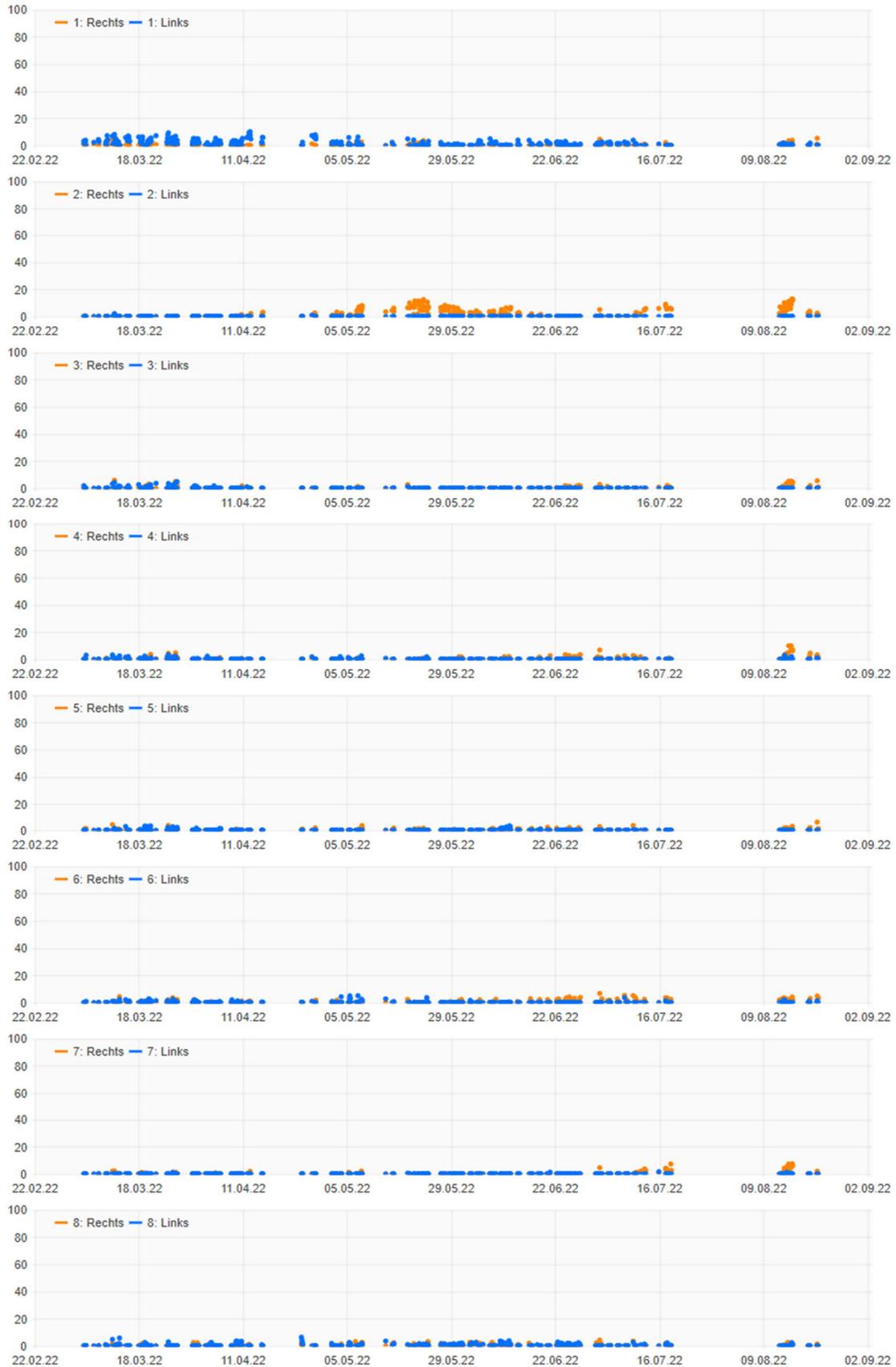




11.4.2. 2021 – 2028:Comète 3 modules

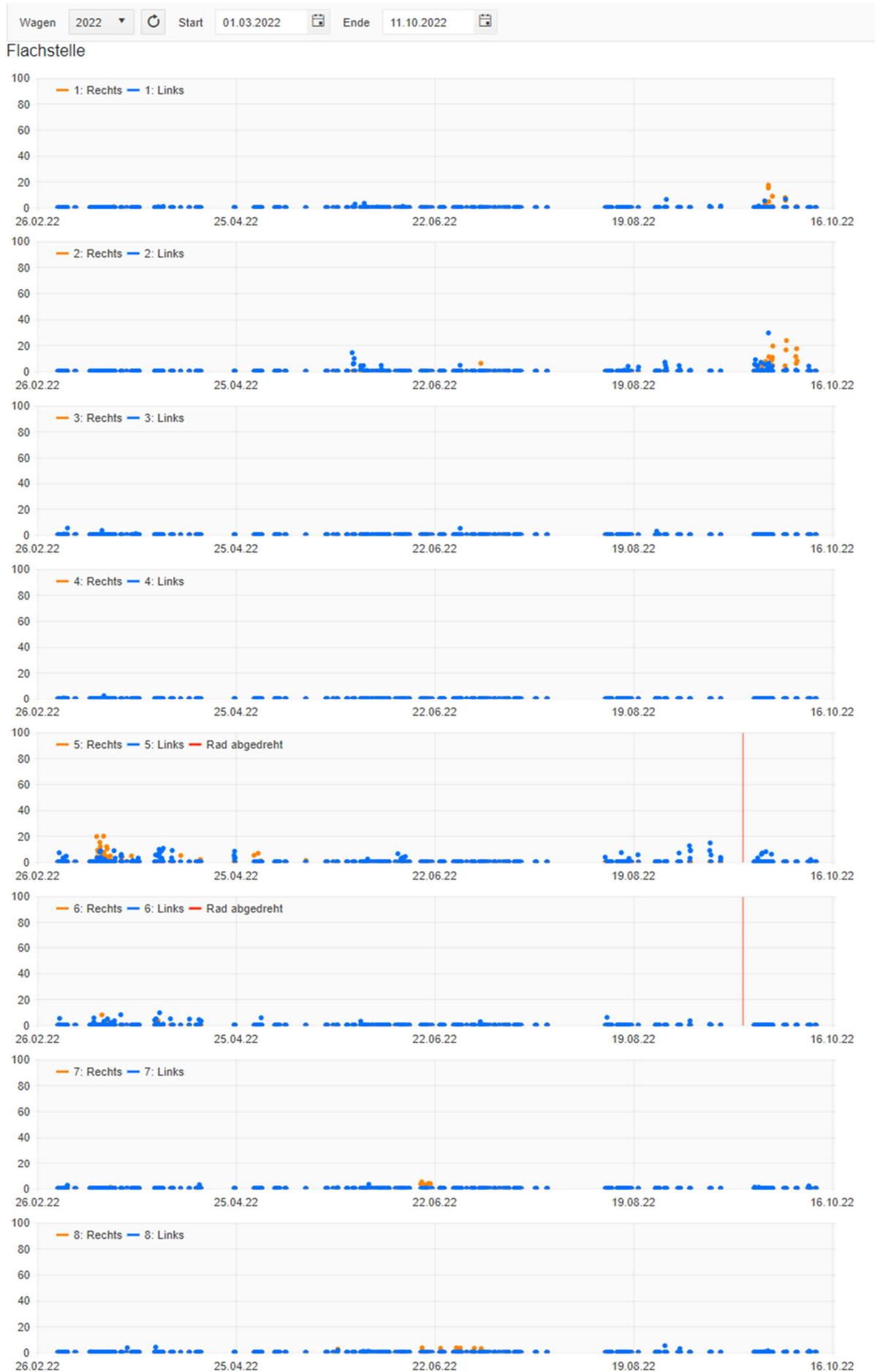
Wagen 2021 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

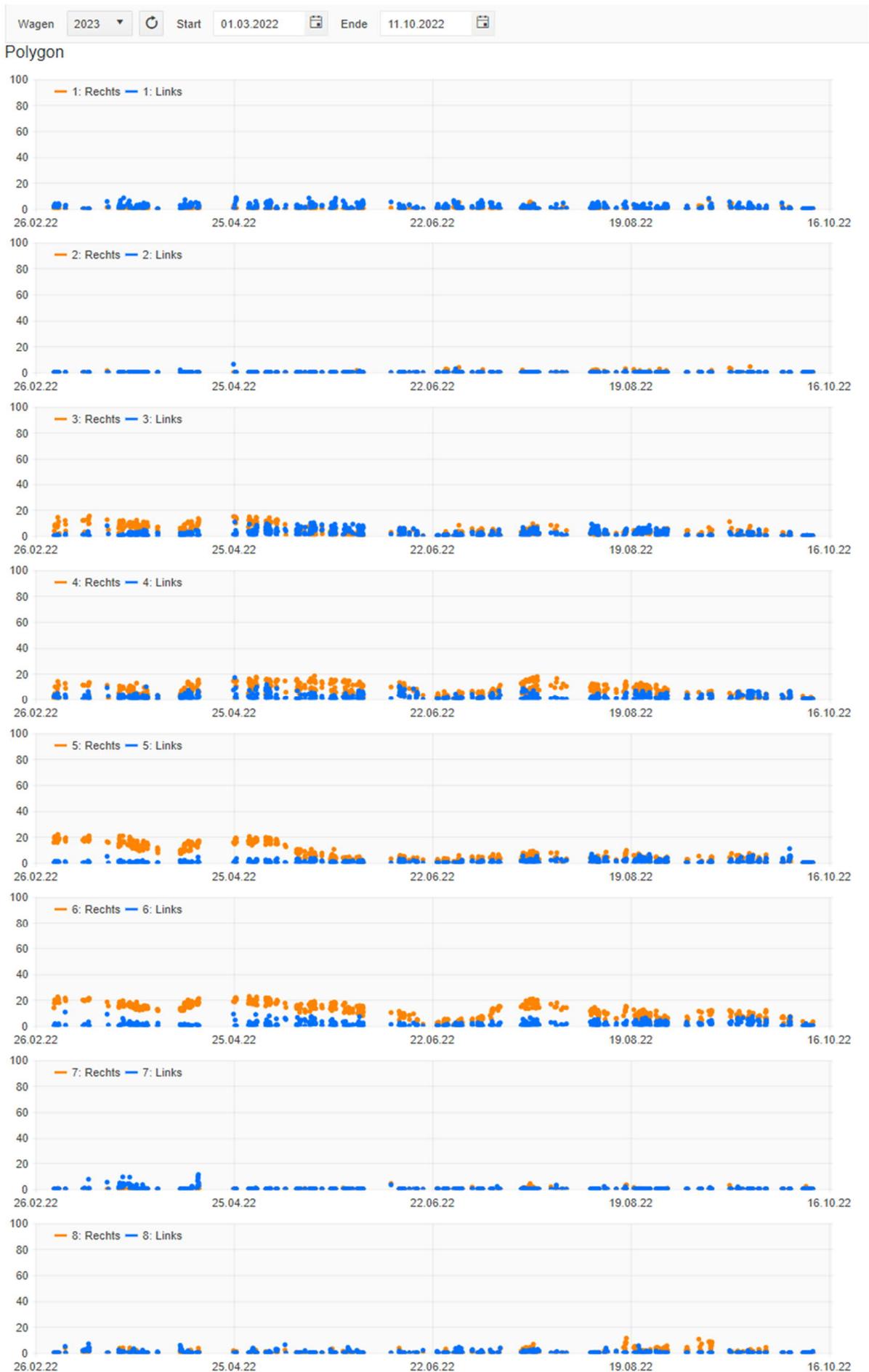
Polygon

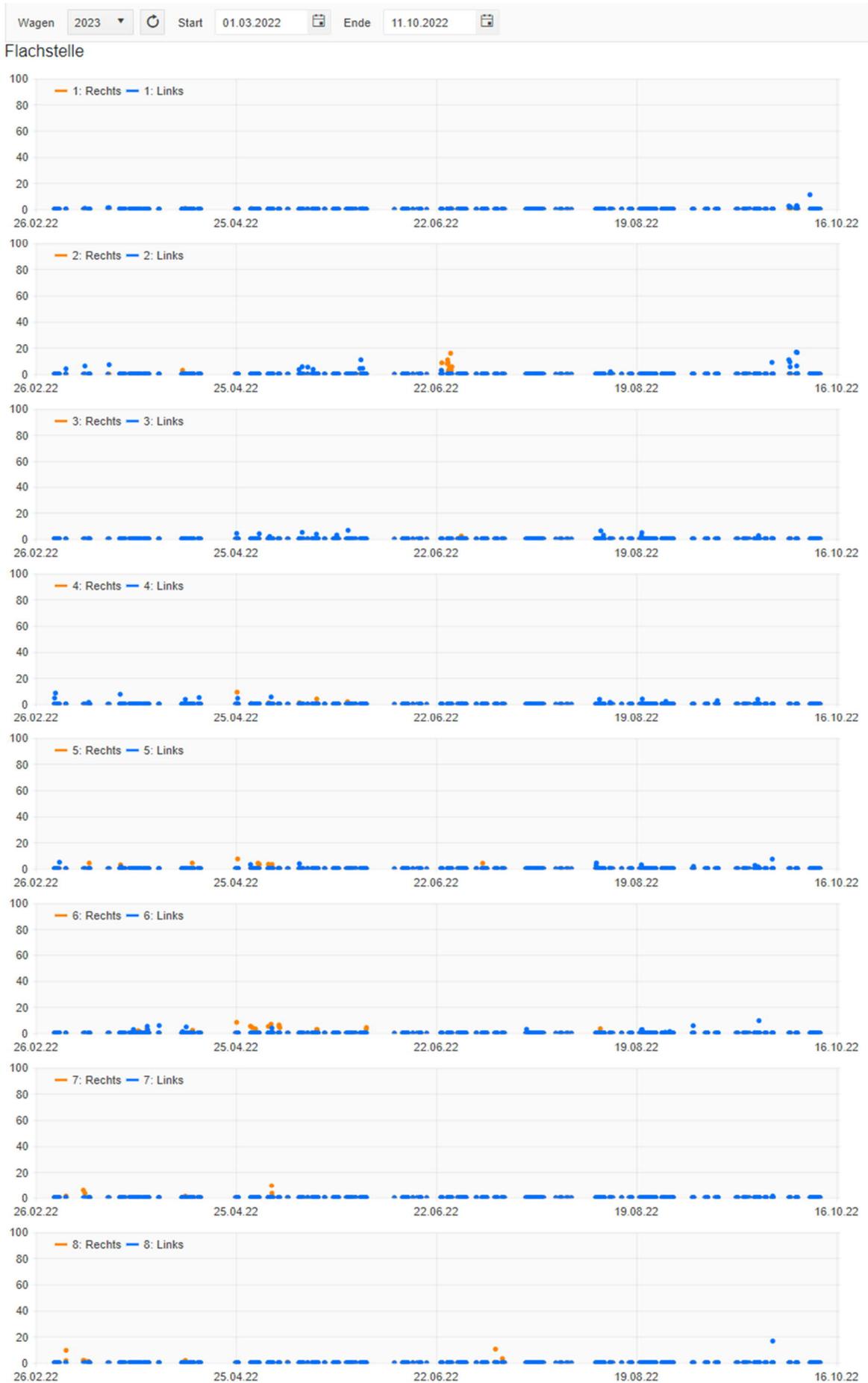


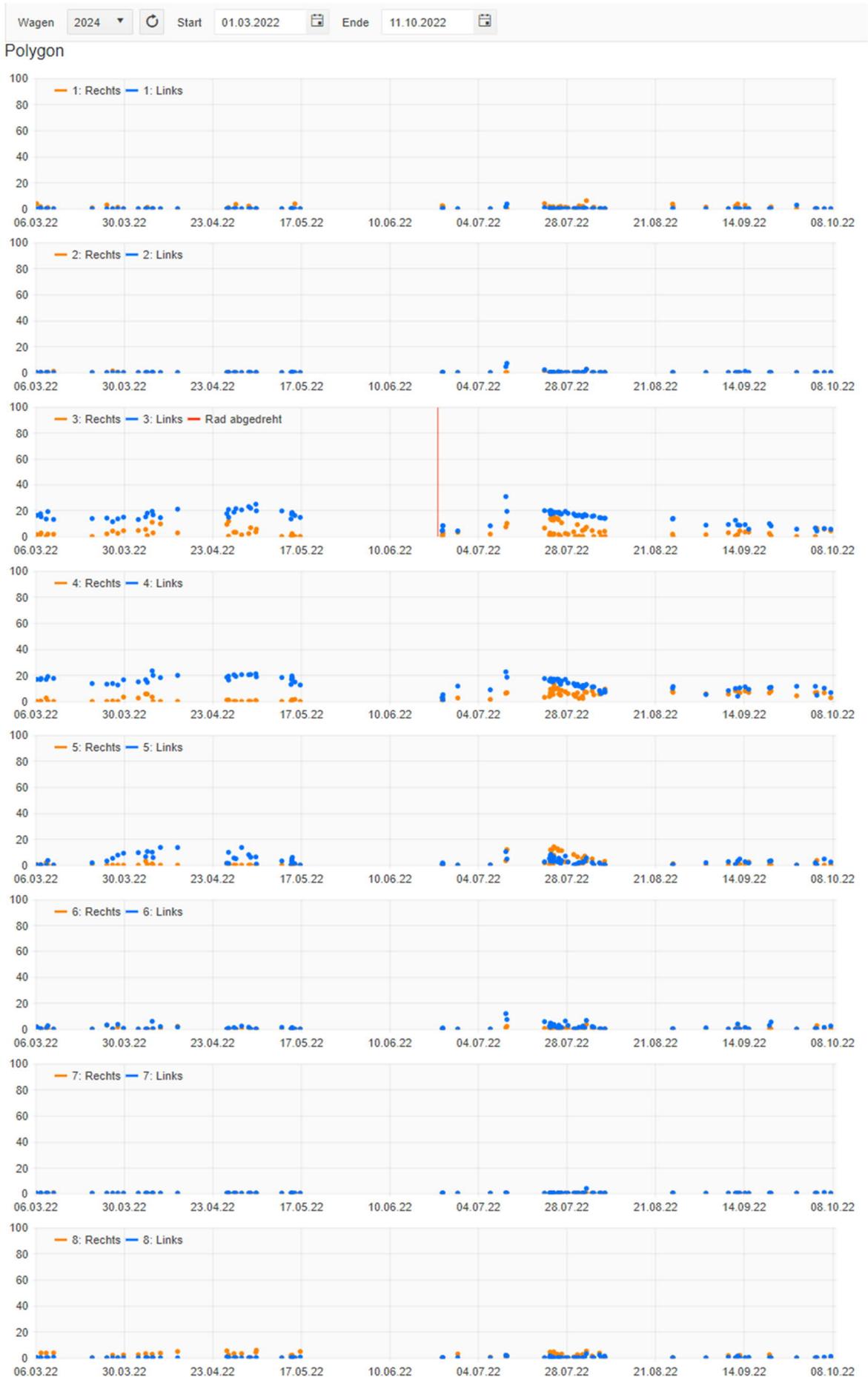






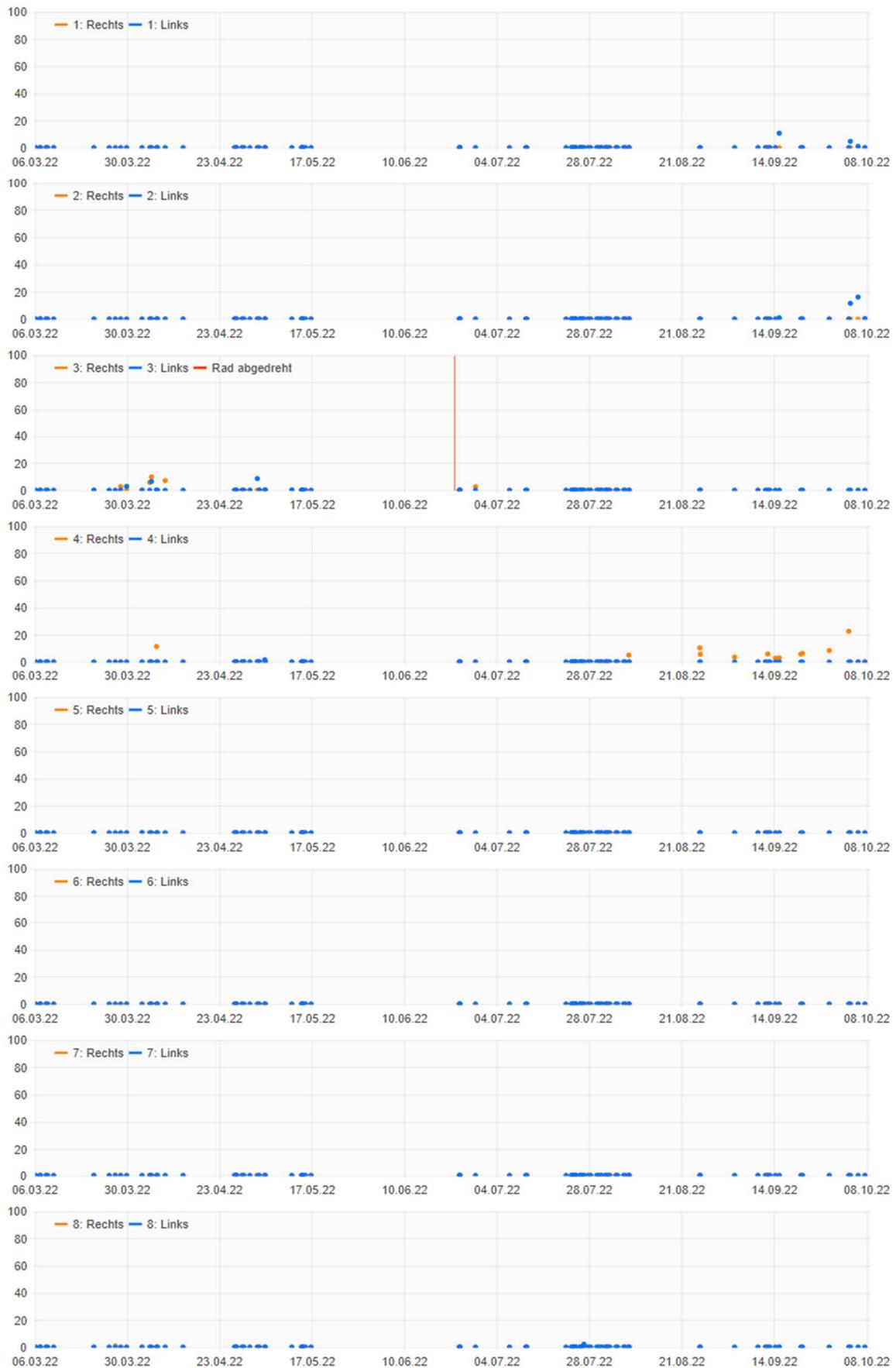




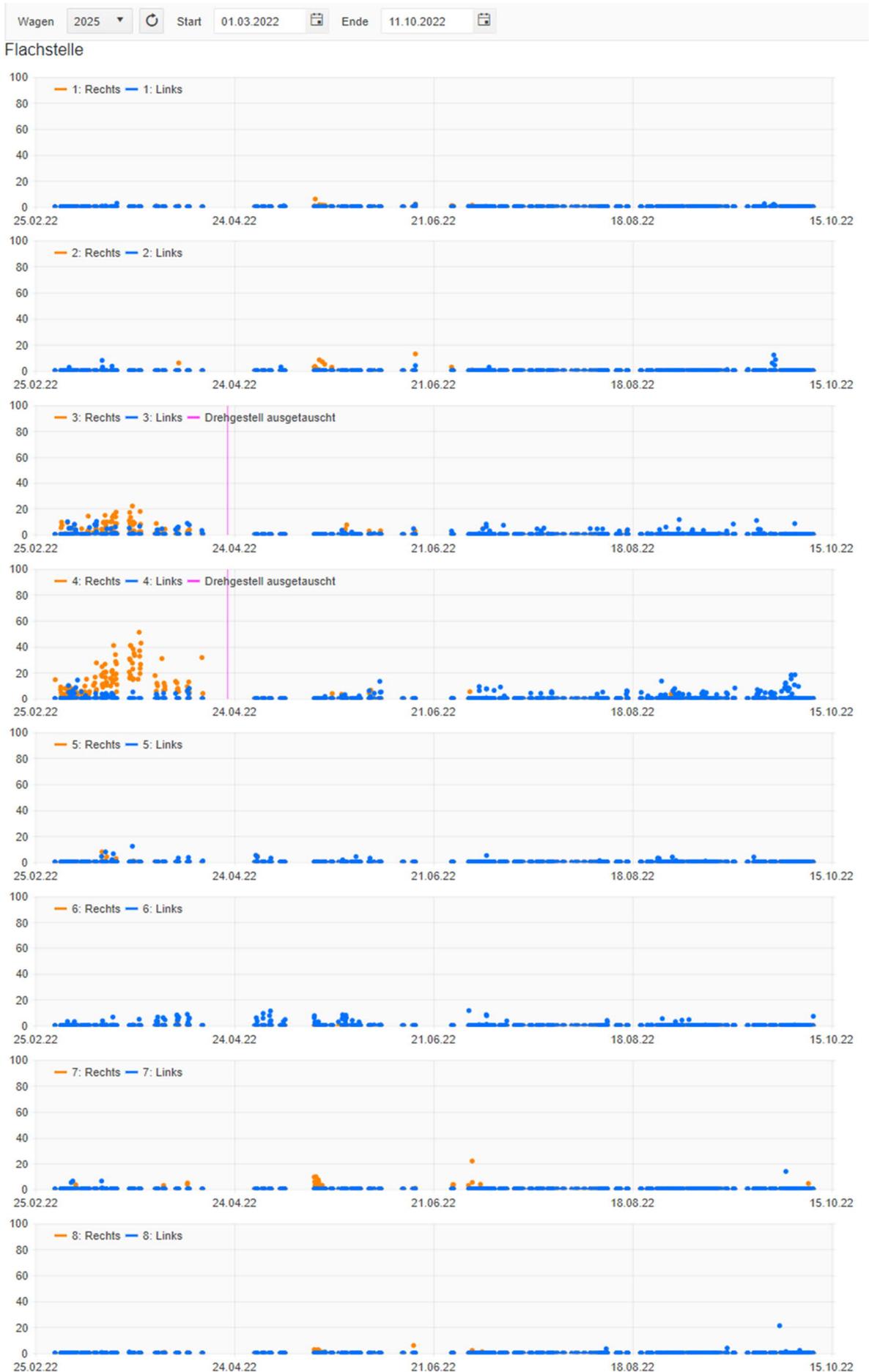


Wagen 2024 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

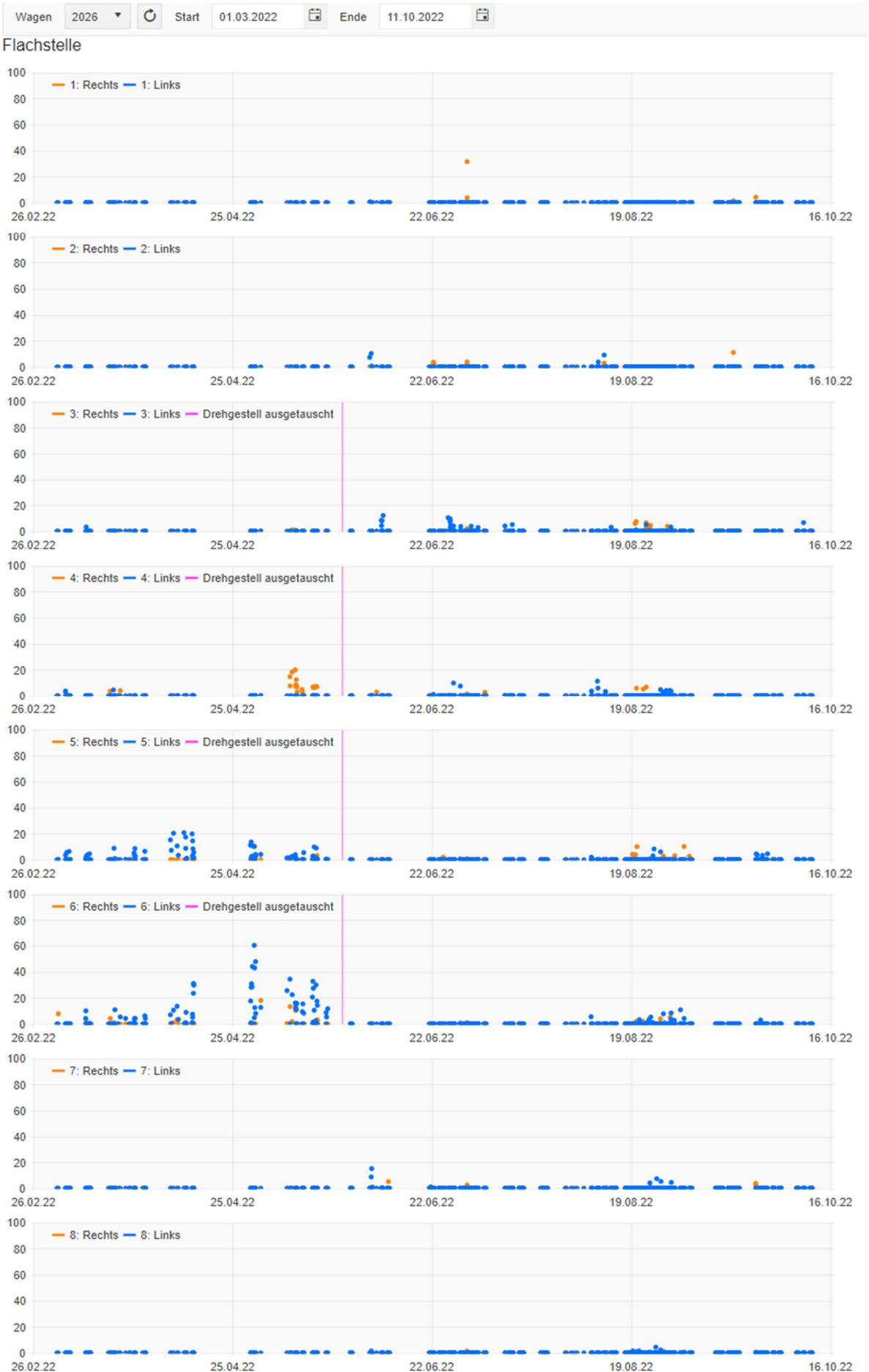
Flachstelle

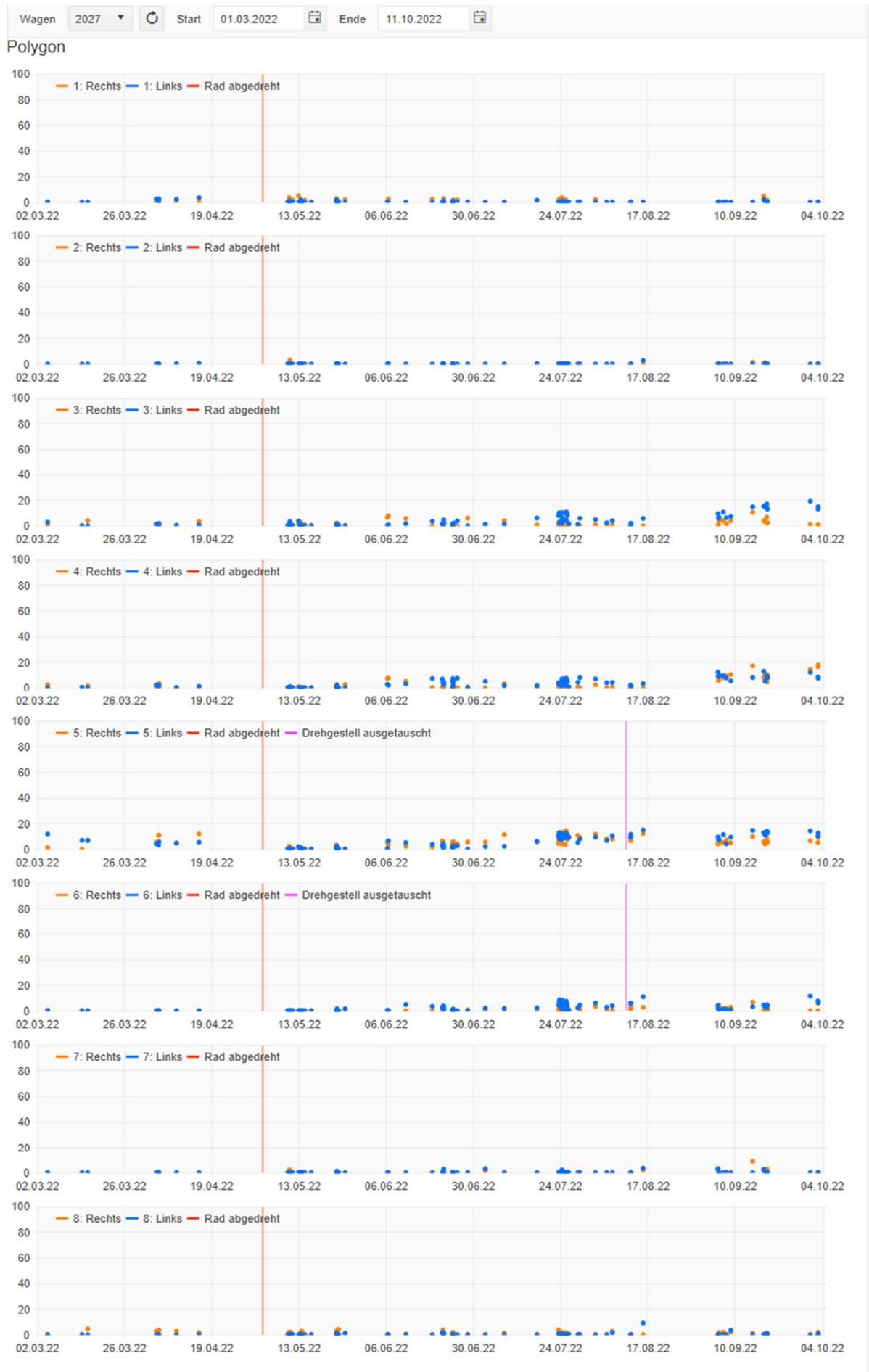








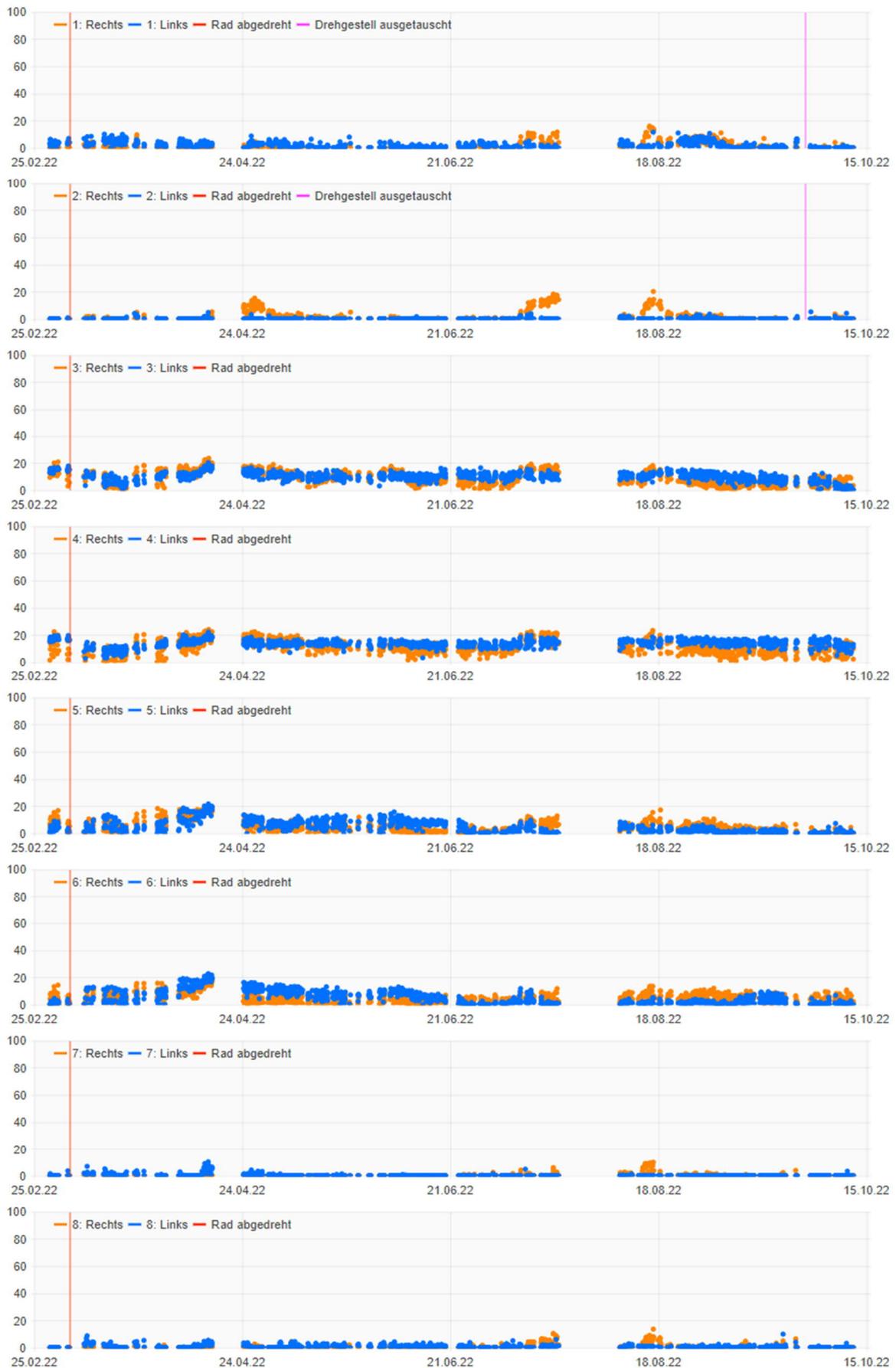






Wagen 2028 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Polygon



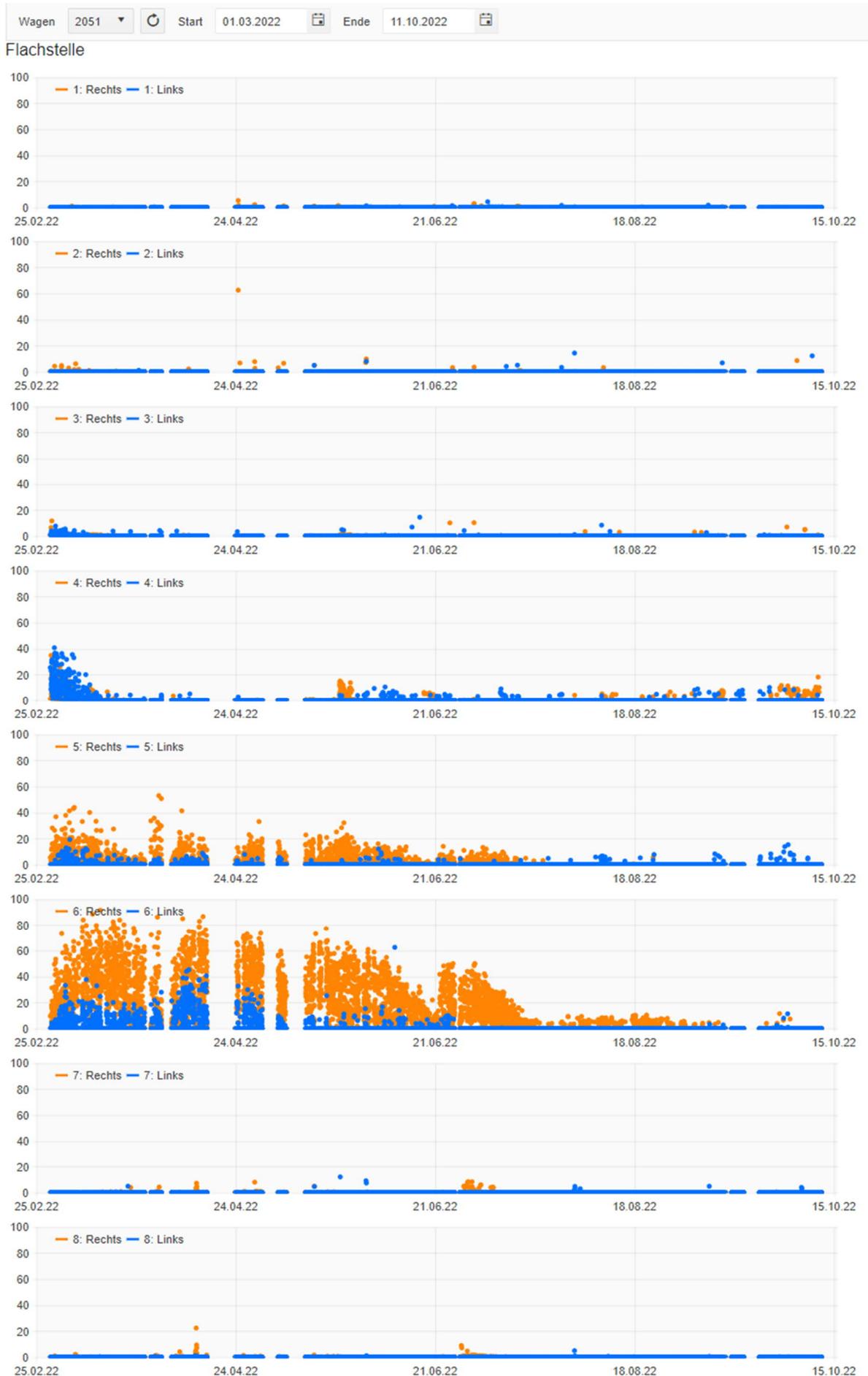


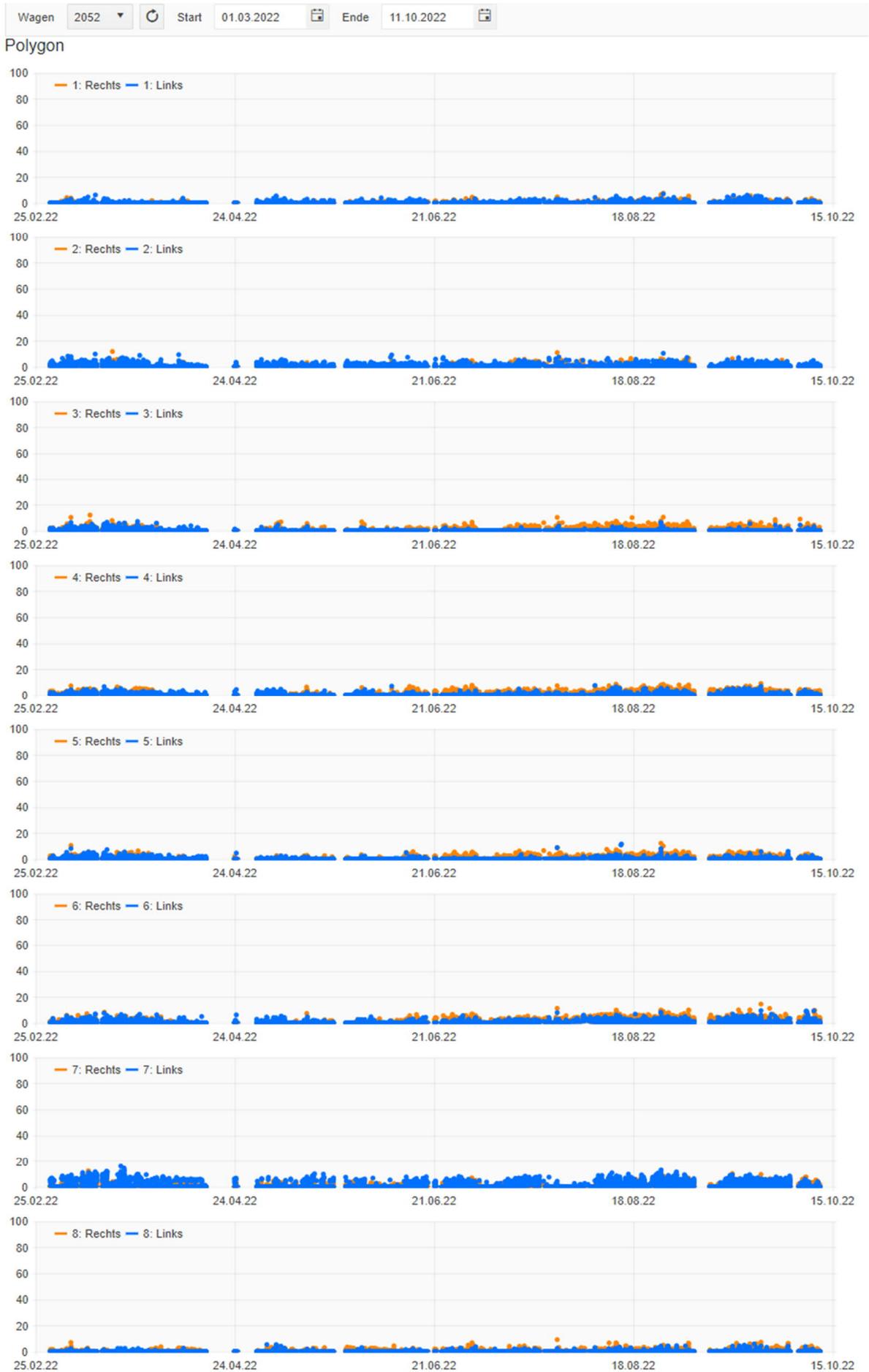
11.4.3. 2051 – 2054: Navette

Wagen 2051 ↕ ↻ Start 01.03.2022 📅 Ende 11.10.2022 📅

Polygon

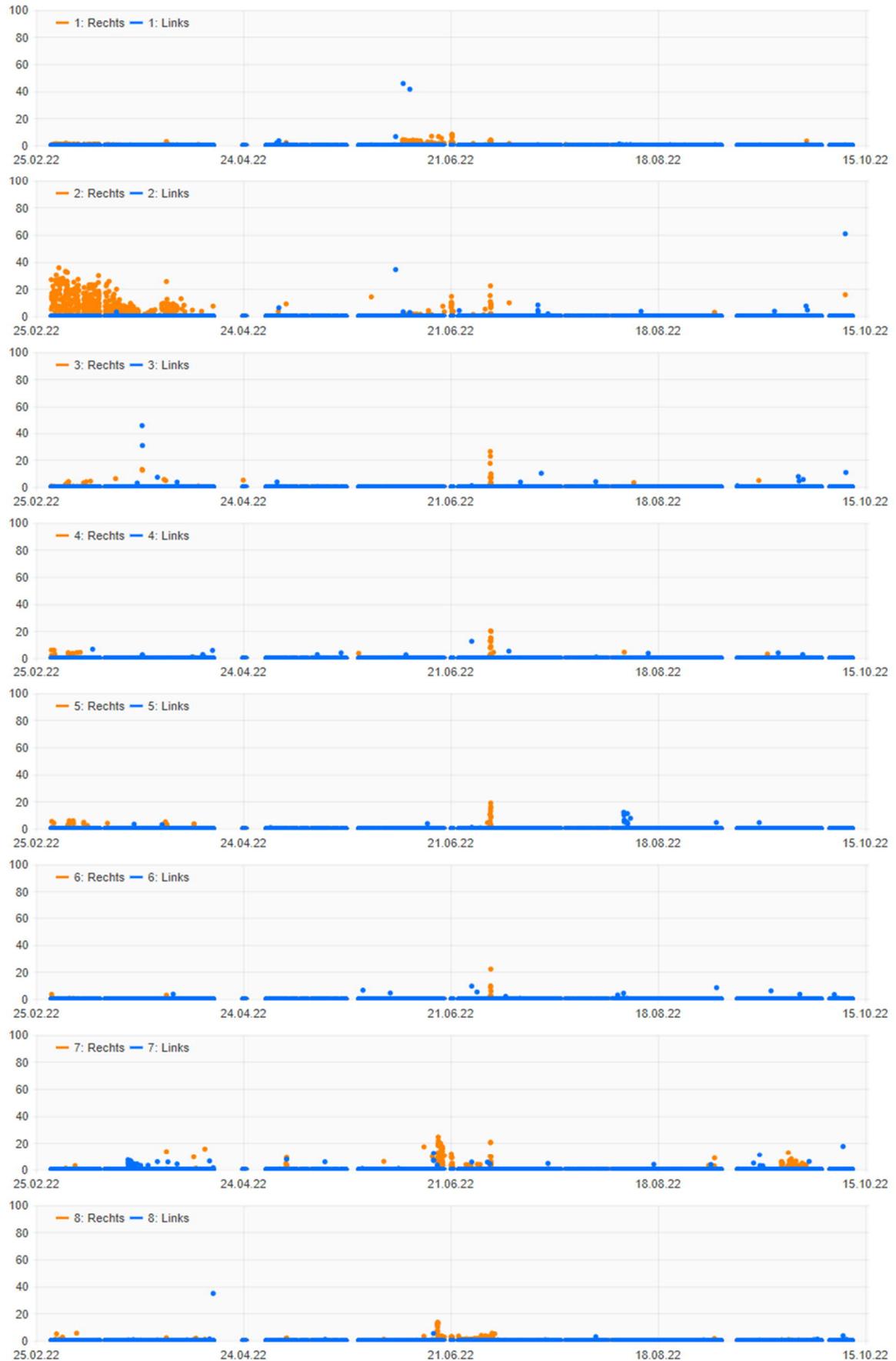


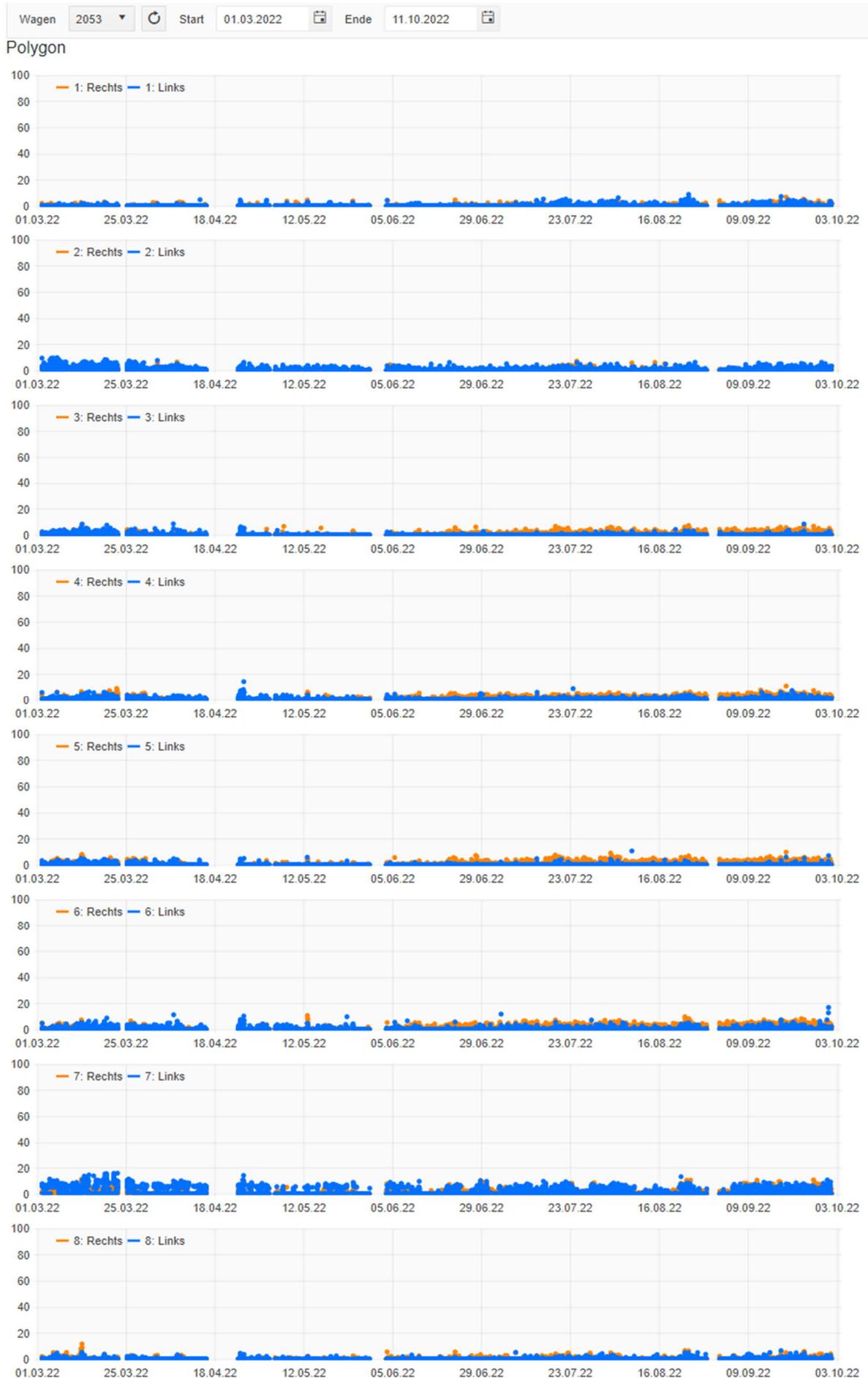


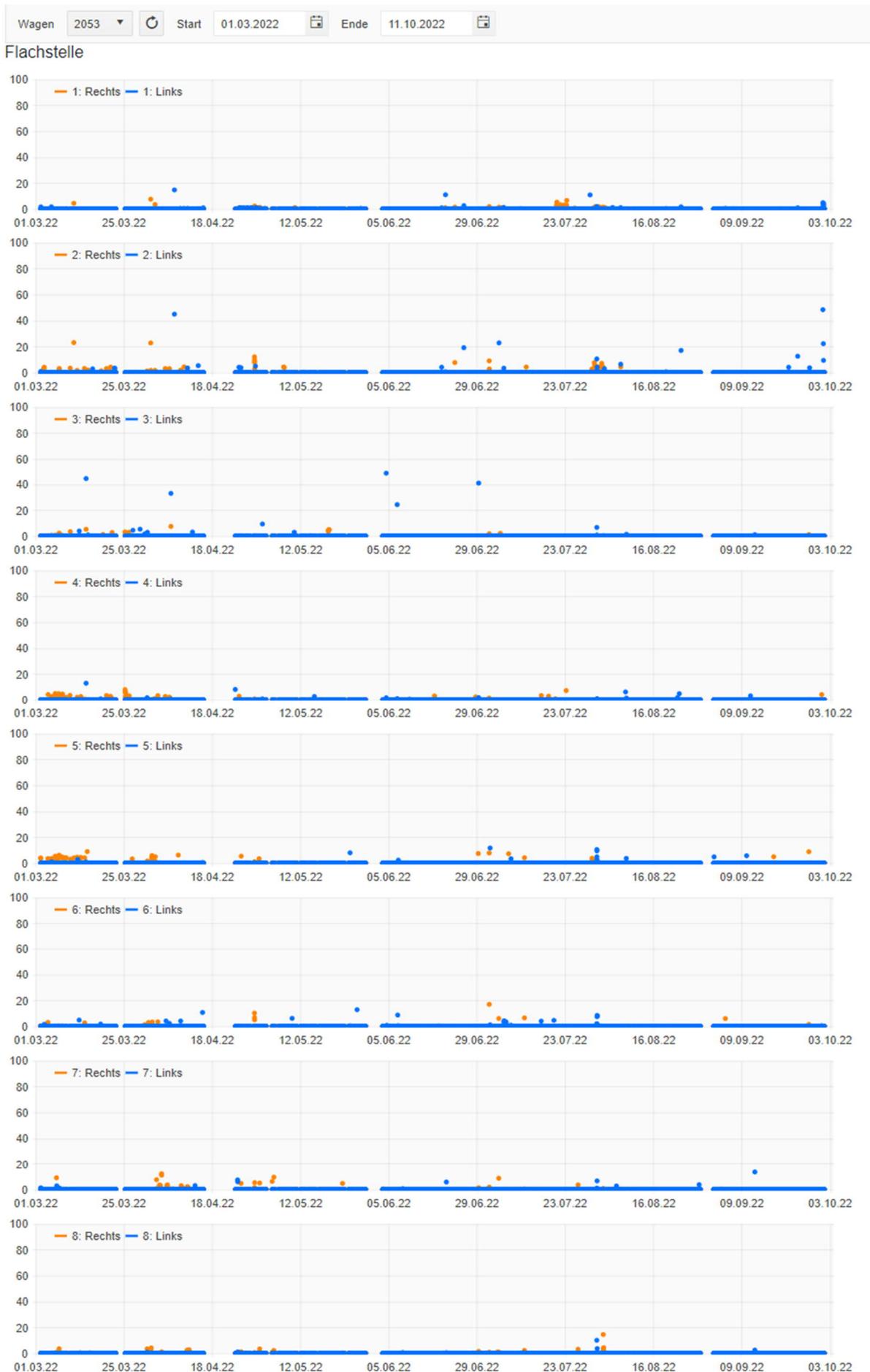


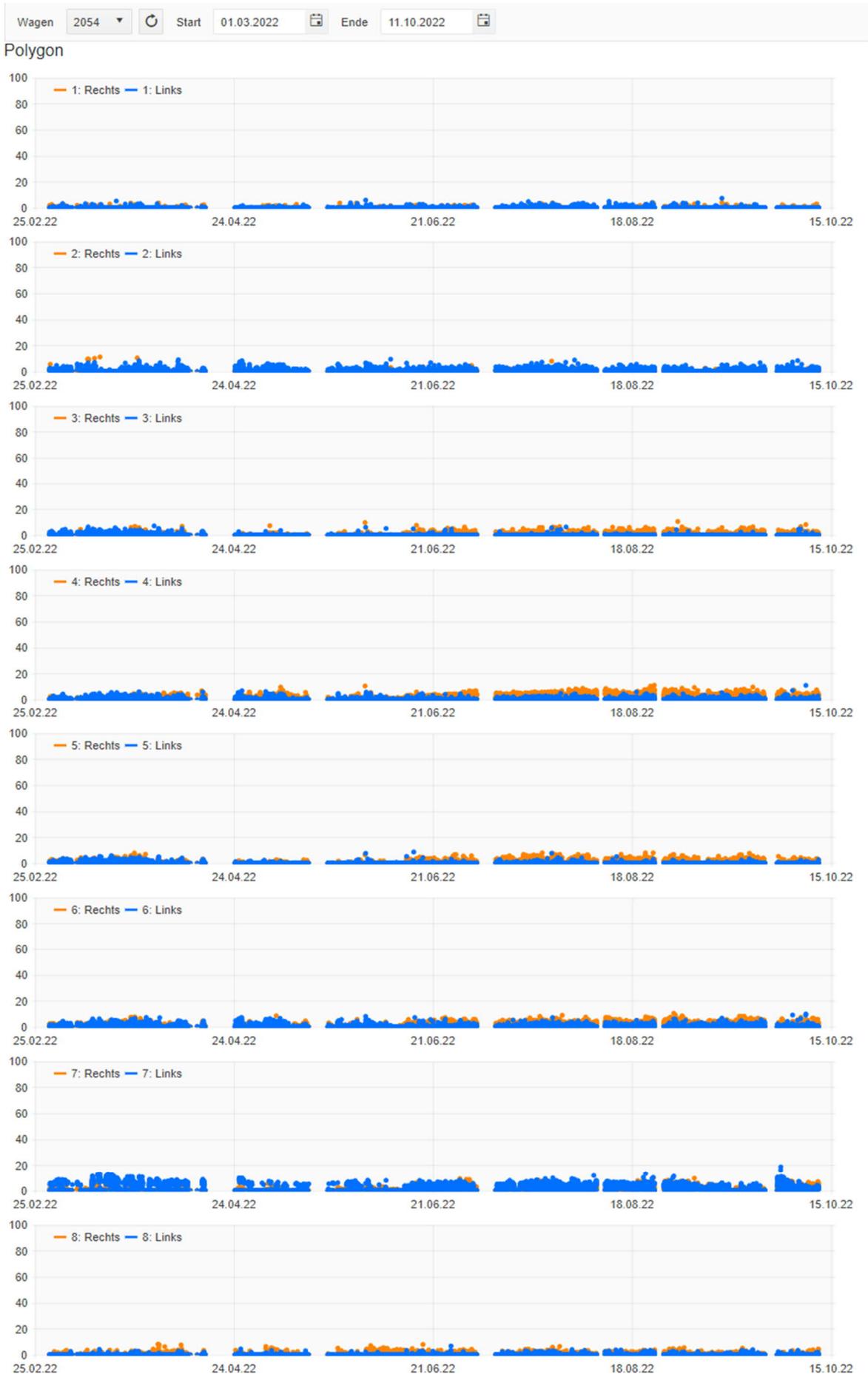
Wagen 2052 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

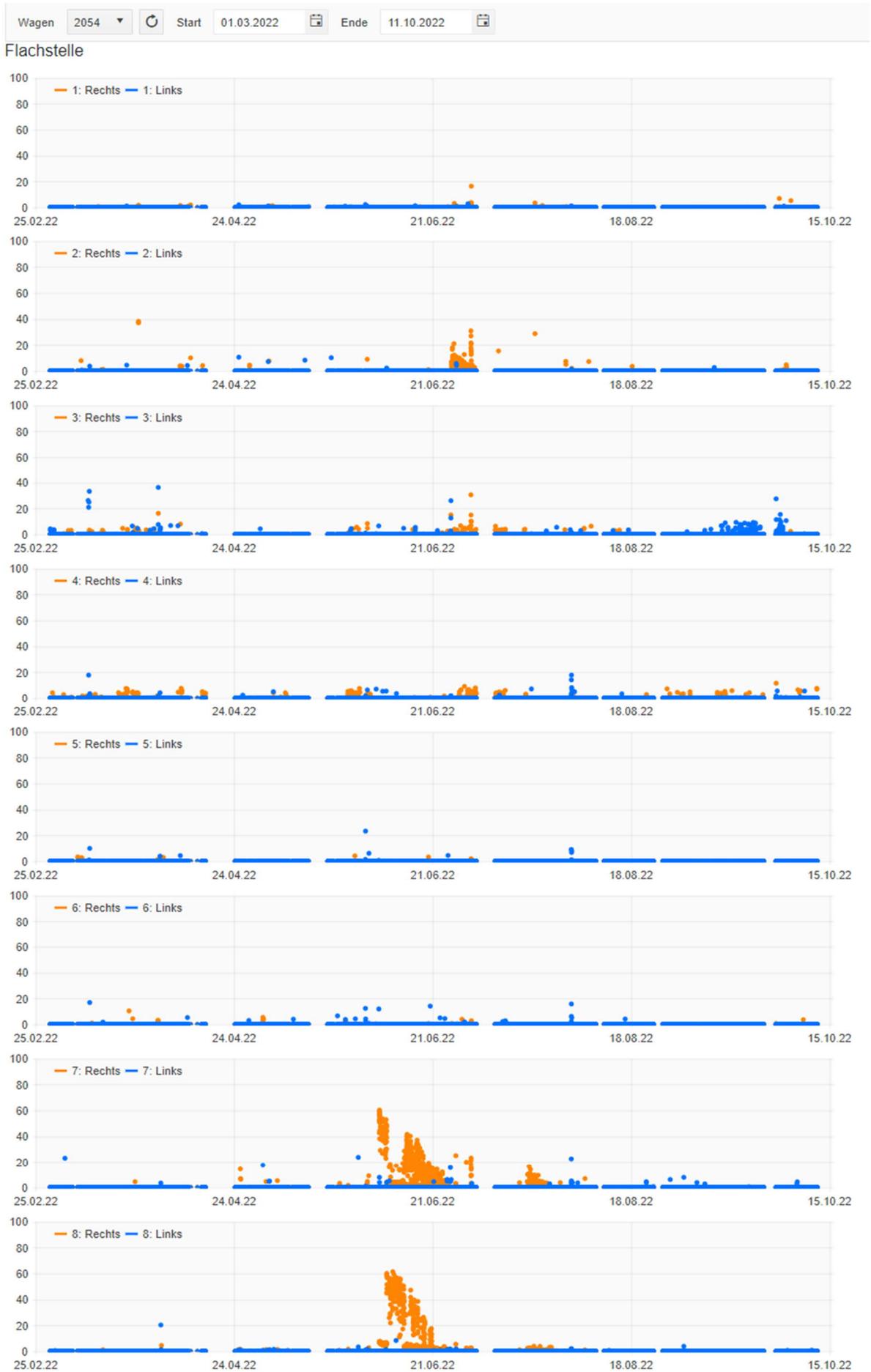
Flachstelle







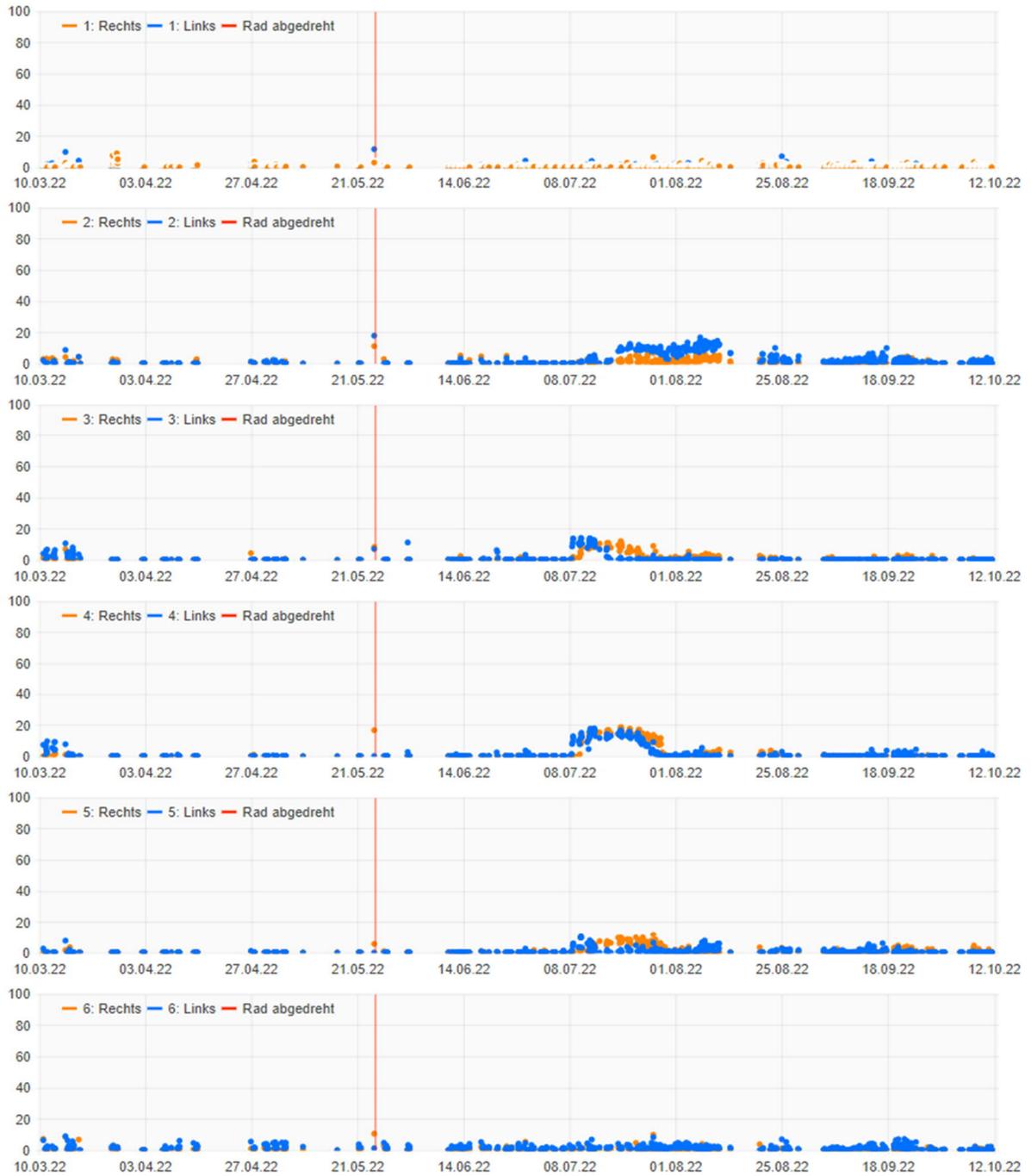




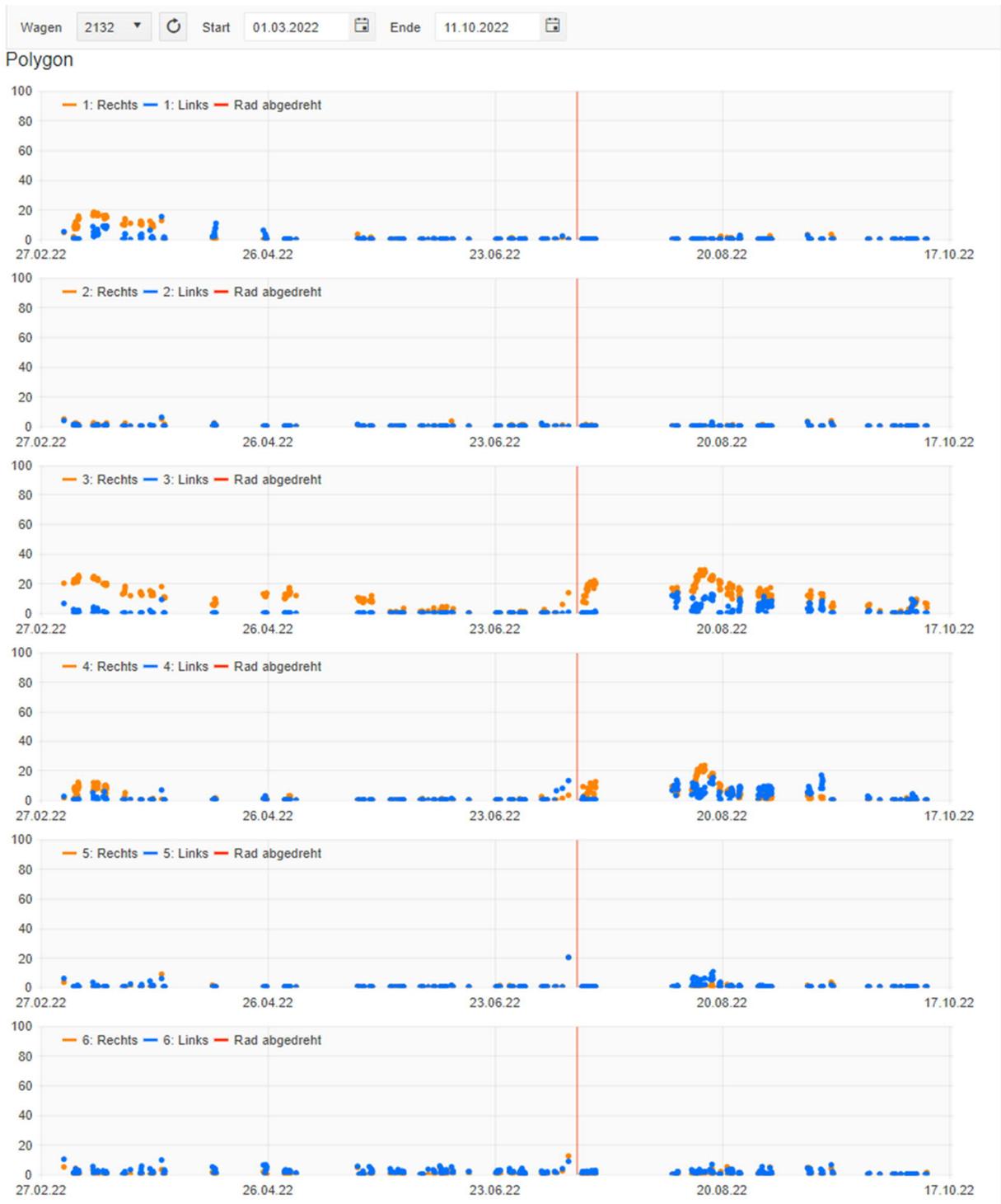
11.4.4. 2131 – 2134: GSW

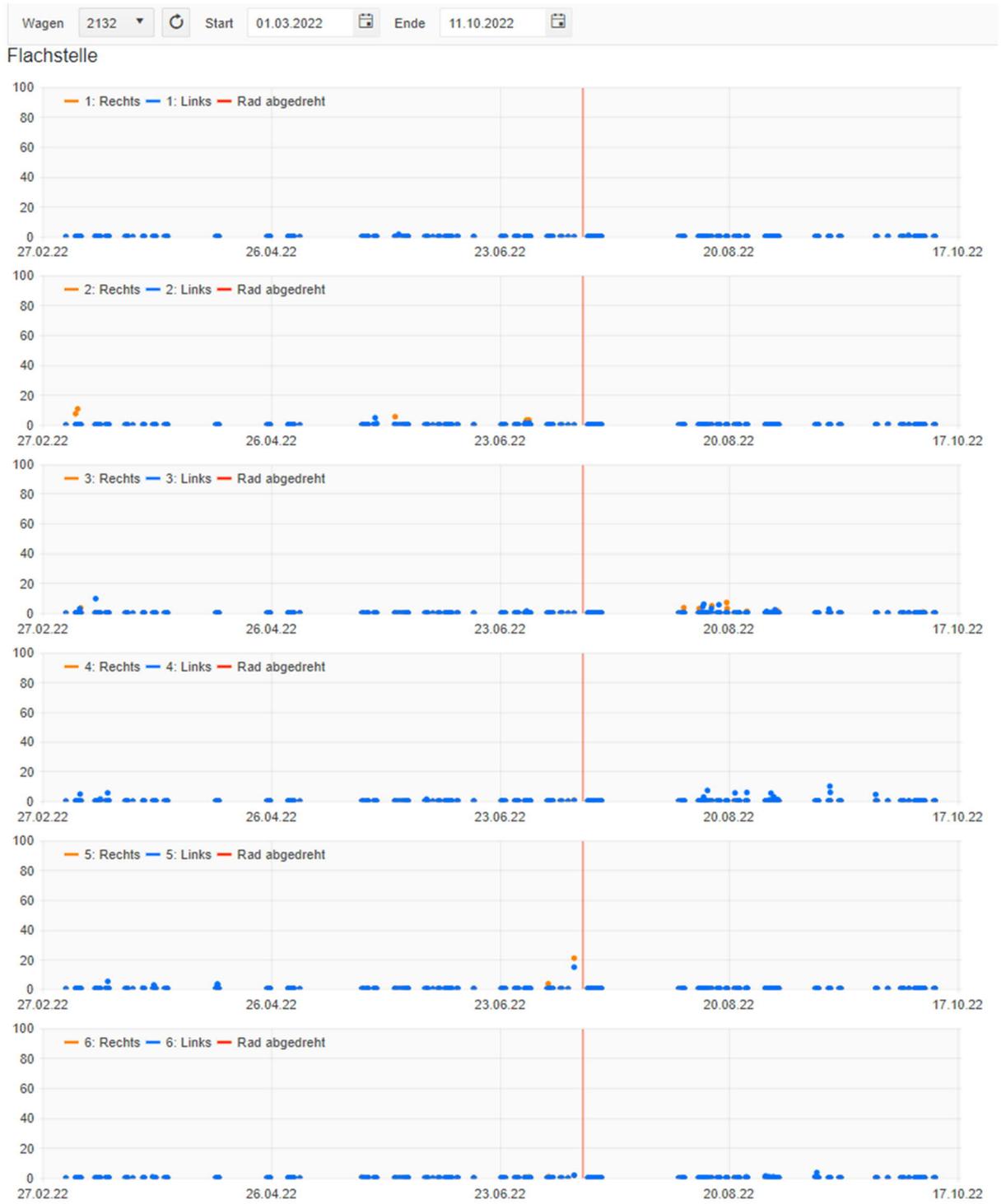
Wagen 2131 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

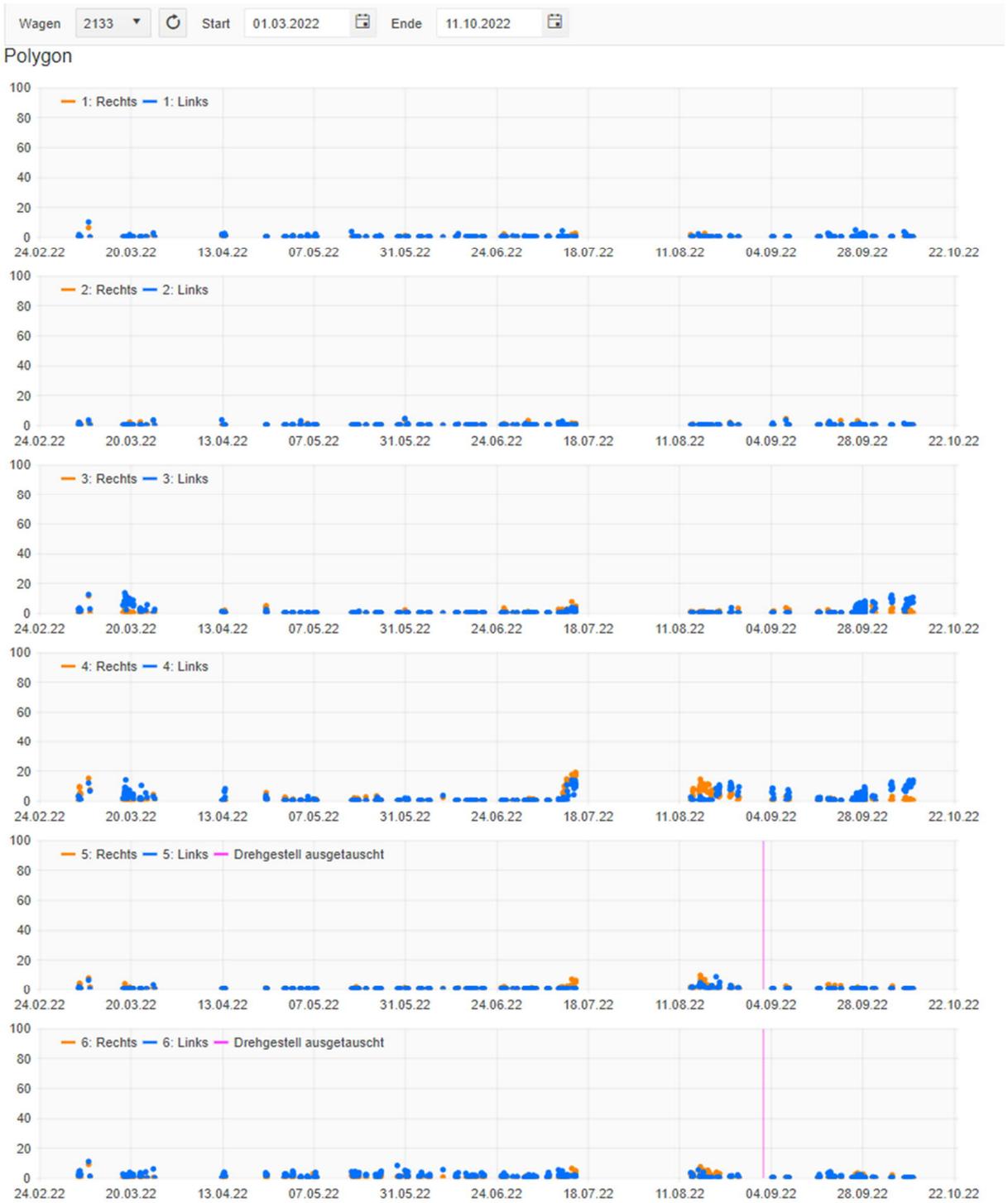
Polygon

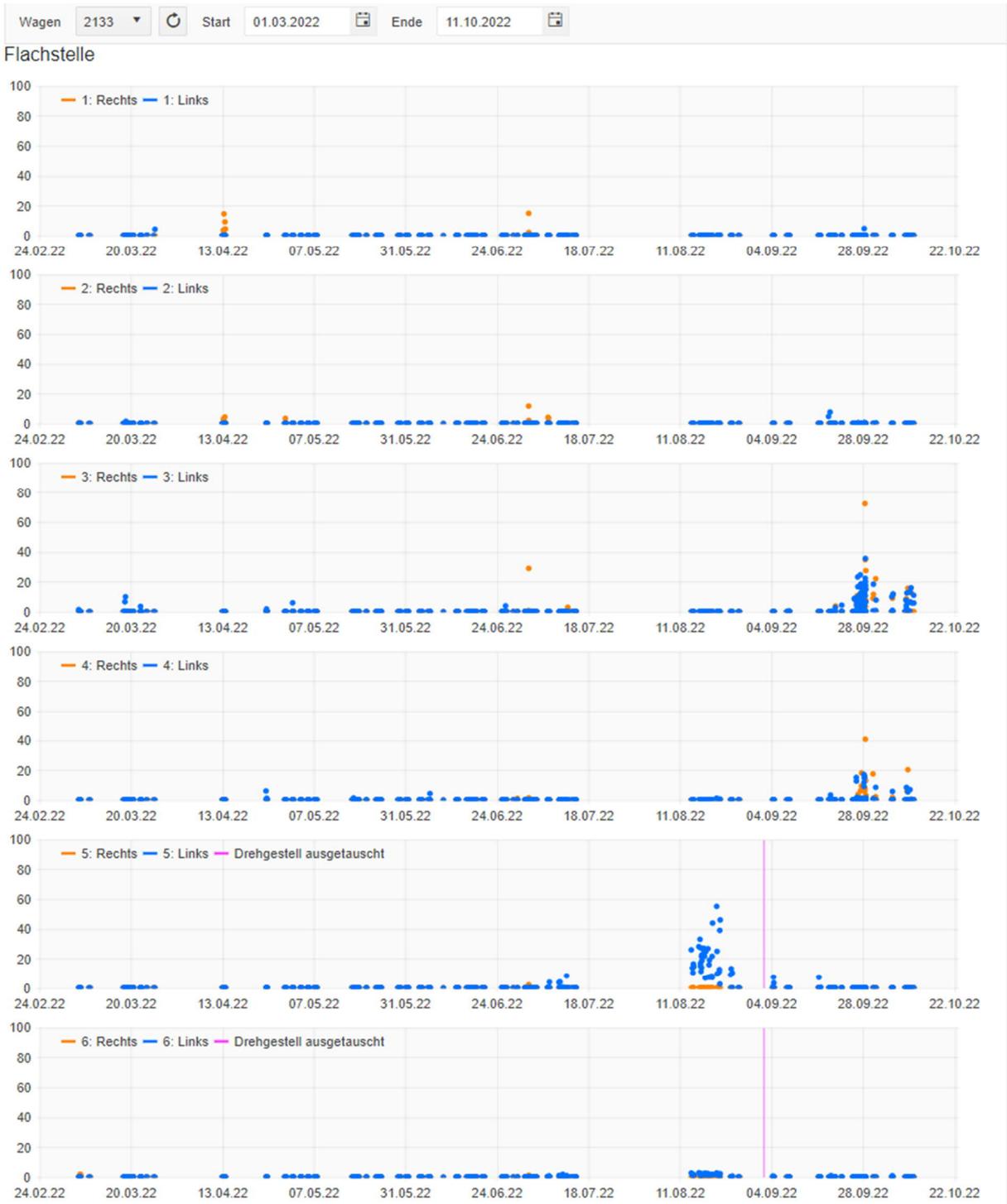






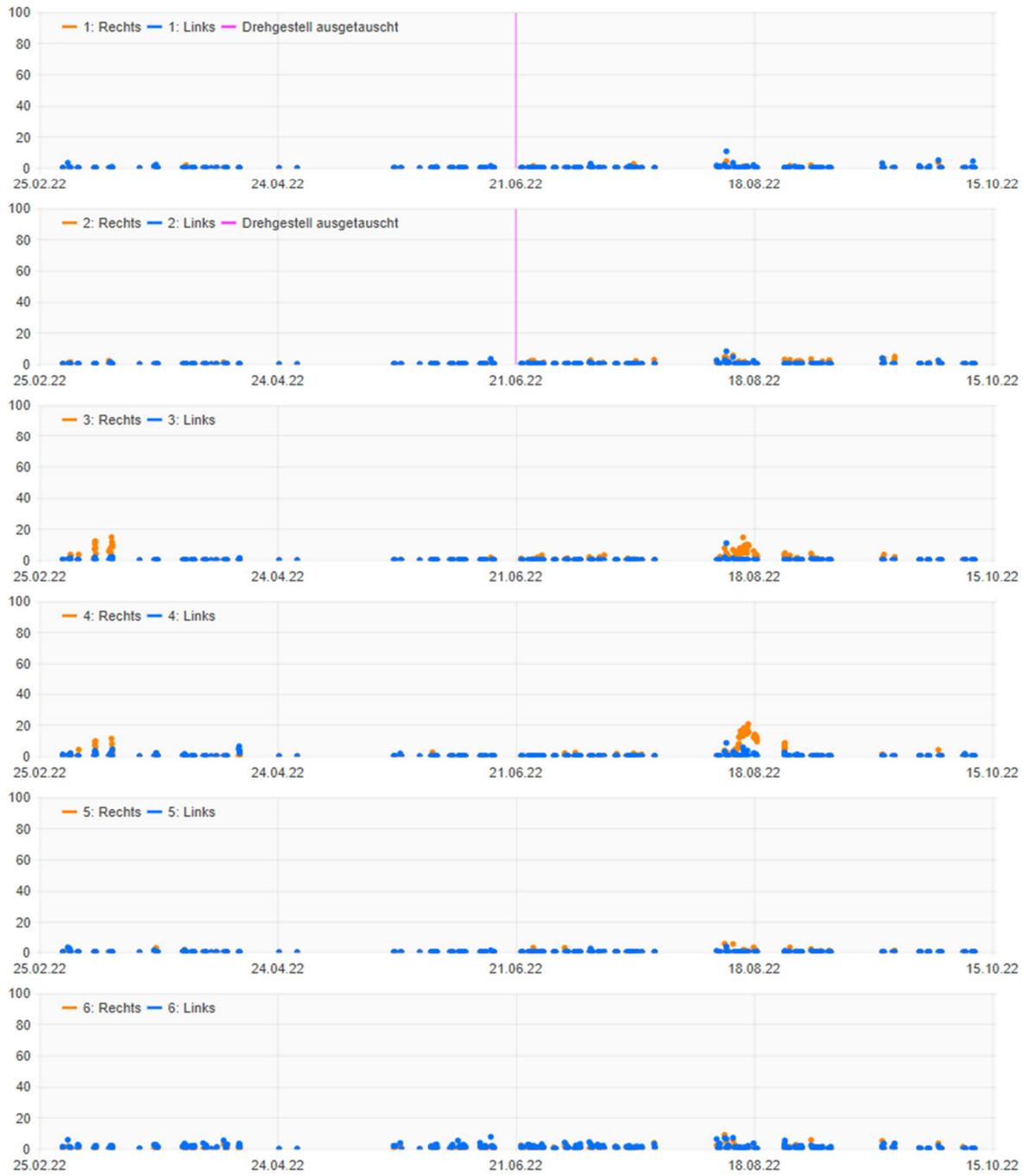






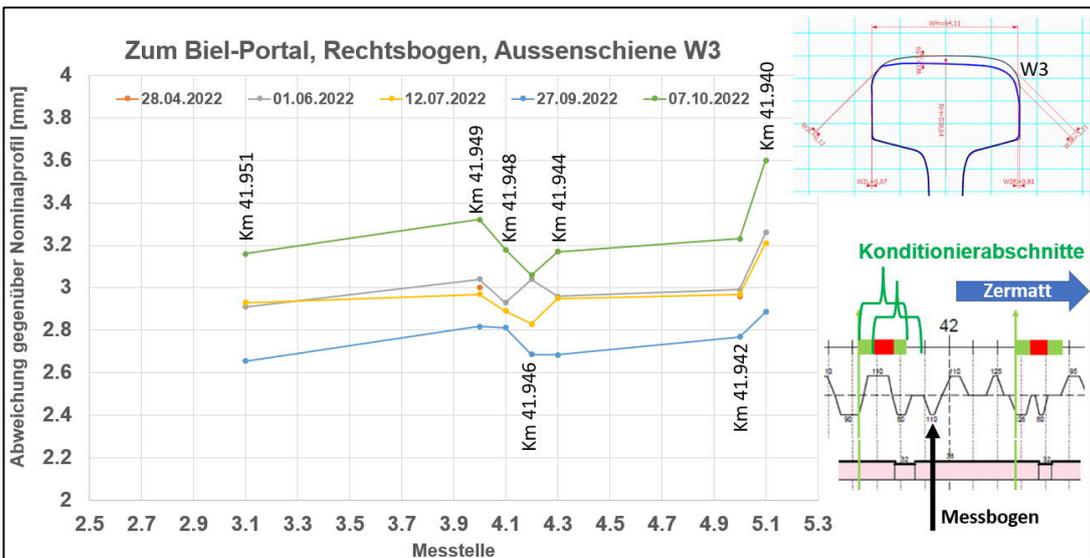
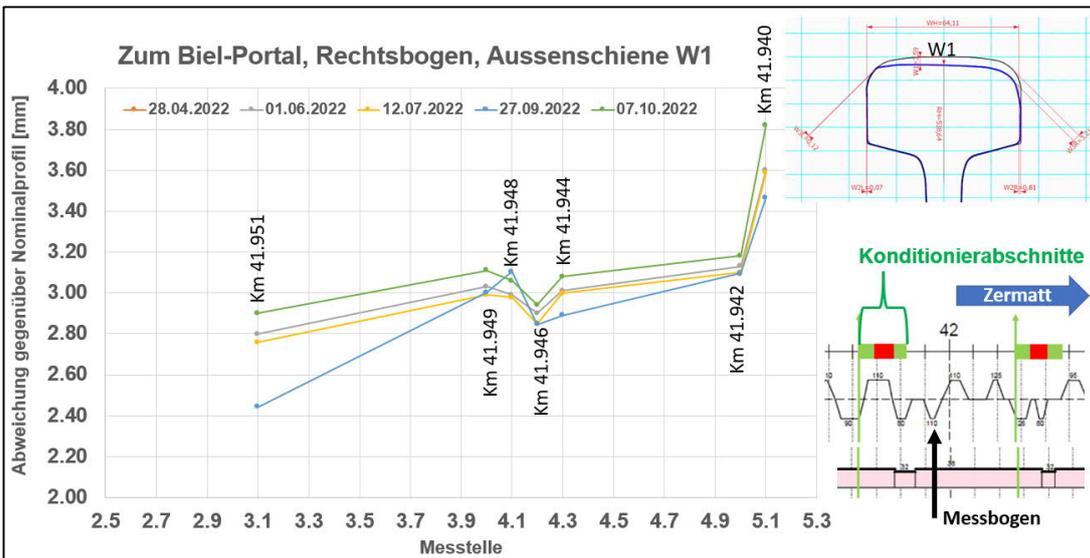
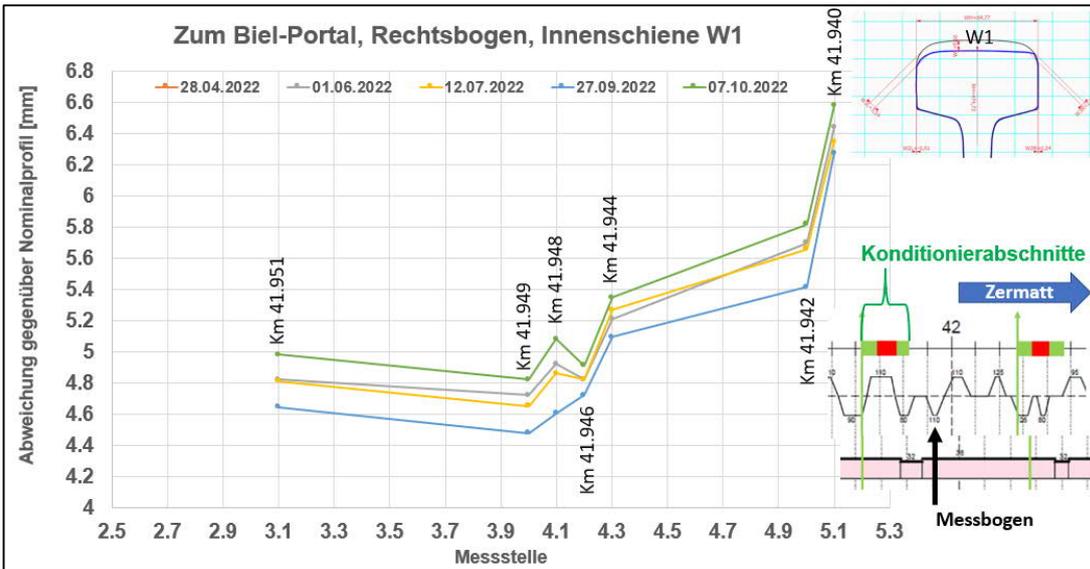
Wagen 2134 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Polygon

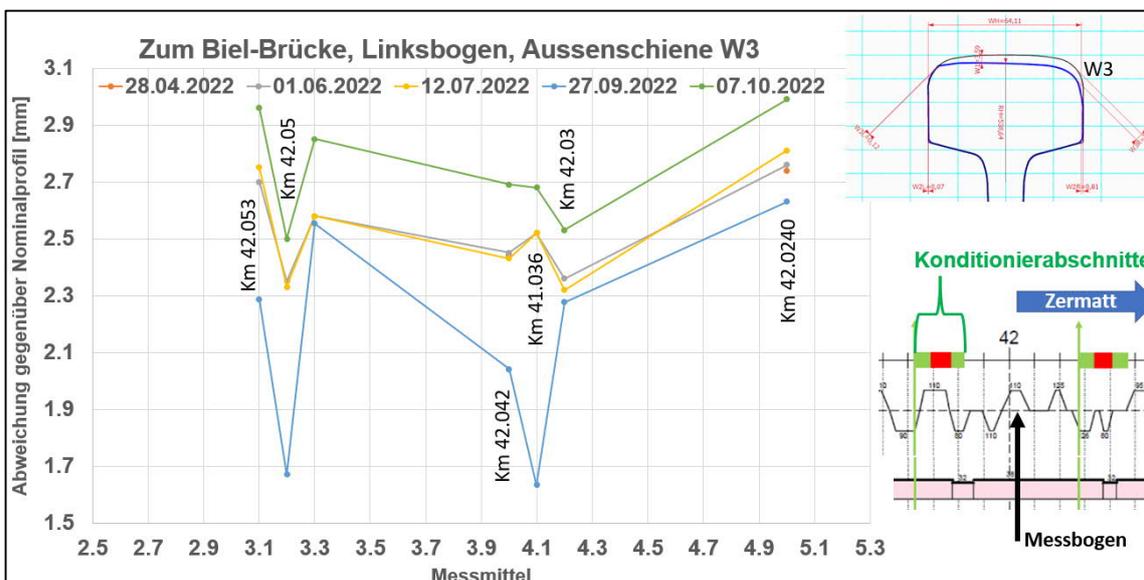
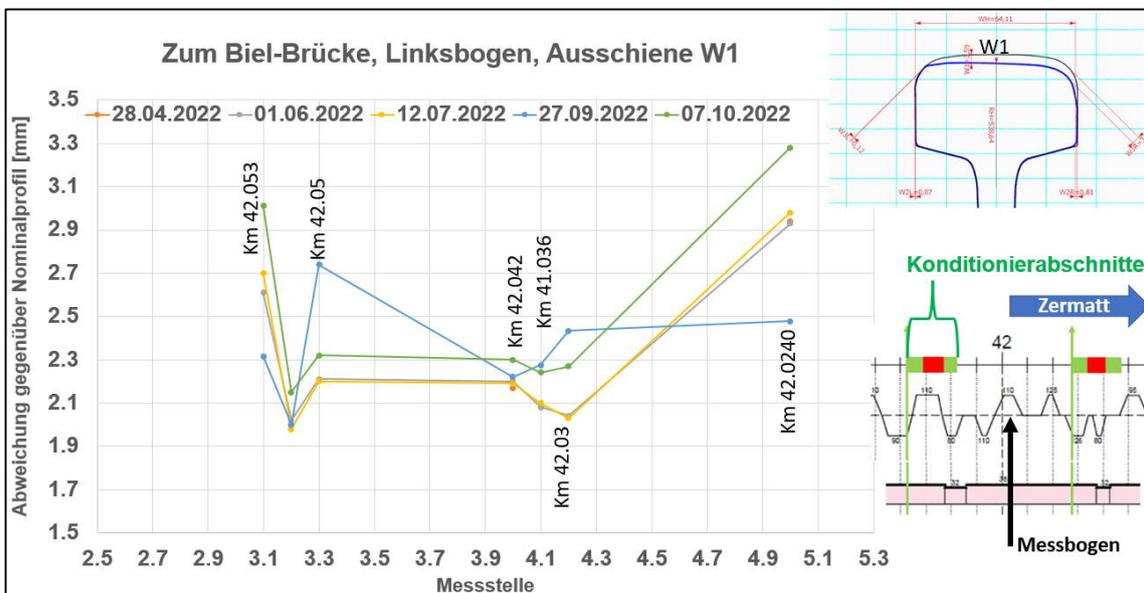
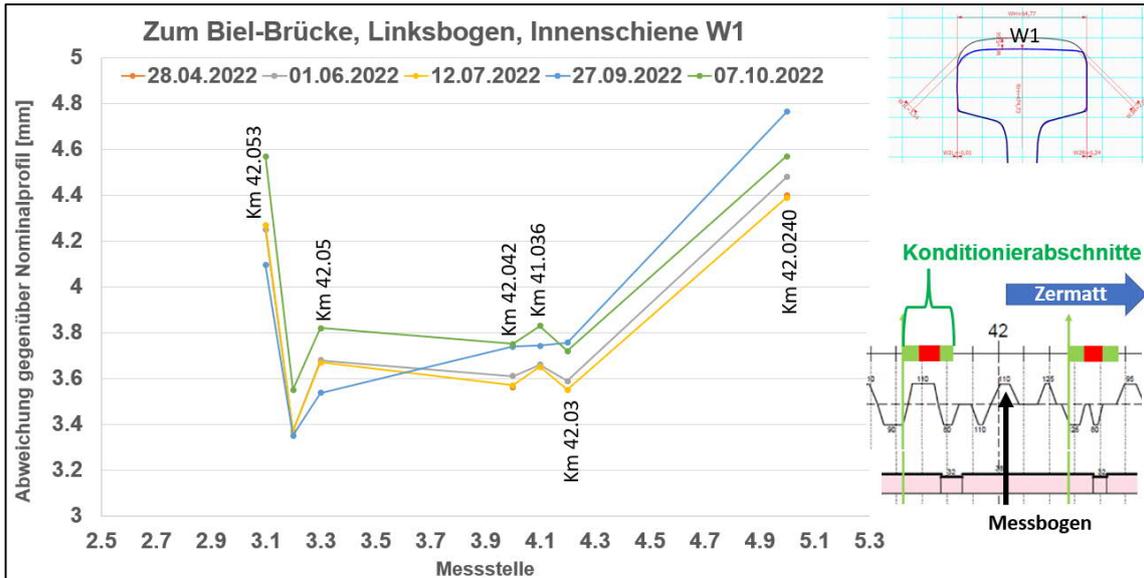


11.5. Usure des rails

11.5.1. Usure des rails Zum Biel Portal



11.5.2. Usure des rails zum Biel Pont



11.5.3. Usure des rails Lüegelwang

