

Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 2 SKS / SKK

Modul: 4 Verschleissreduktion durch SKK

Technischer Bericht



Datum / Status	20.10.2022 / Freigegeben	Seitenanzahl 174
Verfasser:	R. Müller / Gleislauftechnikmüller A. Seeberger / MGBahn	
Geprüft:	V. Walz / Zentralbahn	
Freigegeben:	N. Ritter / Zentralbahn	

Zitierweise: R. Müller / A. Seeberger, Railplus: Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch – Zermatt. Technischer Bericht, 20.10.2022

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	29.04.2022	A.Seeberger	Erster Entwurf
0.2	26.07.2022	R. Müller	Bereinigter Entwurf.
0.3	30.09.2022	A. Seeberger	Bericht redigiert und finalisiert.
1.0	20.10.2022	N.Ritter	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Management Summary

Ausgangslage

Im Zusammenwirken Fahrzeug / Fahrweg sind in den letzten Jahren bei diversen Meterspurbahnen massive Verschleisserscheinungen sowohl bei den Fahrzeugen als auch bei der Infrastruktur zu Tage getreten. Diese Verschleisserscheinungen sind teilweise so gravierend, dass die Verfügbarkeit der Fahrzeuge aber auch der Infrastruktur nicht mehr sichergestellt werden kann. So auch bei der Matterhorn-Gotthard-Bahn, welche in den letzten zwei Jahren bereits dreimal Züge durch Busse ersetzen mussten. Neben der Verfügbarkeit haben auch die Kosten für die Instandhaltung der Fahrzeuge und der Infrastruktur kontinuierlich zugenommen.

In der vom BAV beauftragten Systemaufgabe Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur wurden durch das Programm mehrere Kernprojekte zur Erforschung der Phänomene und Lösungsfindung beauftragt. Diese Projekte haben unterschiedliche Betrachtungshorizonte, da grundsätzliche Systemveränderungen am Rollmaterial und an der Infrastruktur Reaktionszeiten von 20 bis 40 Jahren aufweisen. Auf der einen Seite muss langfristige Grundlagenarbeit zur Erforschung der Einflussparameter und der damit verbundenen Lösungsansätze erfolgen und auf der anderen Seite müssen Lösungen für die nahe Zukunft bereitgestellt werden, um die Wirtschaftlichkeit und die Verfügbarkeit des Systems wieder deutlich zu steigern. Dies im Kontext der Gesamtsystembetrachtung (Wirtschaftlichkeit). Bis die Ursachen mit dem Projekt P3 Rad / Schiene des nationalen Forschungsprojektes Fahrzeug / Fahrweg erforscht sind und angepasste Fahrzeugkonstruktionen aus dem Projekt P5 Fahrzeug zur Verfügung stehen, sind kurz- und mittelfristig verschleissmindernde Massnahmen zwingend notwendig.

Erste Versuche bei Meterspurbahnen, aber insbesondere auch Trambahnen, haben in der nahen Vergangenheit gezeigt, dass neben der Spurkranzschmierung (SKS) insbesondere die Schienenkopfkonditionierung (SKK) gute Resultate zur Reduktion des Verschleisses an Rädern und Schiene positive Resultate ergeben hat. Da jedoch mit der Konditionierung der Schienenkopfoberfläche auch immer wieder das hochsicherheitsrelevante Thema Bremsen in den Fokus rückte, wurde die Konditionierung nur punktuell und bei den Trambahnen vor allem nur mittels stationären Anlagen angewandt.

In der Vergangenheit und Gegenwart war die Matterhorn-Gotthard-Bahn sehr stark von den Verschleisserscheinungen auf dem Streckenabschnitt Täsch-Zermatt betroffen. Diverse Versuche mit Schienenqualitäten, Radwerkstoffen und weiteren Veränderungen in der Parametrisierung Rad / Schiene brachten nur punktuelle Erfolge. Die Verkettung von mehreren Einflussfaktoren der Interaktion Fahrzeug – Fahrweg bzw. Rad - Schiene überlagern sich bei der MGBahn. Enge Kurvenradien, hohe Achslasten, starre Radsatzführungen bei den neuen, modernen Fahrzeugen und steife Fahrbahnen. Alles Parameter, welche bei den Fahrzeugen und bei der Fahrbahn nicht so einfach innert kurzer Zeit geändert werden können. Aus diesem Grund hat die Sytemführerschaft Interaktion Fahrzeug Fahrweg die MGBahn von Beginn an als optimales Forschungsobjekt betrachtet. Die bereits durch die MGBahn begonnen Arbeiten konnten weitergeführt und systematisch aufgesetzt werden. Insbesondere ideal kam entgegen, dass mit dem Abschnitt Täsch-Zermatt eine relativ homogene Flottenstruktur im Rollmaterial (Shuttle) auf einem klar definierten Streckenabschnitt zum Einsatz kommt.

Die Konditionierung des Schienenkopfs (SKK)

Der heute vorherrschende Verschleiss an Rädern (Laufflächen) und Schienen (Schlupfwellen) werden erzeugt durch das «Rutschen» der Radsätze auf den Schienenköpfen in den Kurven. Die Drehgestelle mit starr geführten Radsätzen in Verbindung mit den relativ hohen Achslasten begünstigen die durch Reibung im Kontakt von Rad und Schiene erzeugten Kräfte in der horizontalen Richtung und in der Folge den Verschleiss sowie auch die Lärmentwicklung. Die Konditionierung der Schienen dient der Einstellung eines definierten Reibwertes auf den Laufflächen der Schienenköpfe. Damit reduzieren sich die durch die Reibung bedingten Kräfte an den Rädern, wodurch sich sowohl der Verschleiss an Rad und Schiene als auch die Lärmentwicklung vermindert. Im Gegensatz zu stationären Konditionieranlagen, welche vor allem bei Trambahnen zum Einsatz kommen und wesentlich sehr punktuell Erfolge erzielen, kann mit der hier vorliegenden Konditionierung vom Fahrzeug aus auch entlang einer ganzen Strecke in allen neuralgischen Kurven eine kontinuierliche Reduktion des Reibwertes erzielt werden.

Der Betriebsversuch SKK Täsch-Zermatt

Die Betriebserprobungen mit on-board Schienenkopfkonditionierung fanden vom Oktober 2021 bis Oktober 2022 bei der Matterhorn-Gotthard Bahn (MGB) auf der Strecke Täsch – Zermatt statt. Die Periode von einem Jahr wurde gewählt, damit die Reibungsverhältnisse Rad / Schiene über die vier Jahreszeiten berücksichtigt sind. Vor Beginn der Erprobungen auf der konditionierten Strecke wurden die vier Shuttle – Fahrzeuge 2051 bis 2054 mit einer on-board-Anlage zur Konditionierung der Fahrflächen Rad/Schiene ausgerüstet. Die Strecke wurde aus verschiedenen Perspektiven gründlich analysiert und in der Folge für die Steuerung der Anlagen streckenspezifisch hergerichtet (RFID-Tags). Die Schienen wurden geschliffen und alle Räder der Shuttle - Fahrzeuge reprofiliert, sowie die Ausgangsprofile an allen Rädern und bei den Schienen in drei repräsentativen Bögen messtechnisch erfasst.

Die Sicherheitsnachweisführung zur Änderung an Eisenbahnfahrzeugen wurde nach D RTE 49100 [12] vorgenommen, hinsichtlich Sicherheitsrelevanz überprüft und nach den Vorgaben der RTE dokumentiert.

Alle vier Shuttle – Fahrzeuge wurden mit on-board Anlagen nach dem bereits bei der Zentralbahn im Einsatz stehenden Setting ausgerüstet.

Die in einer ersten Phase durchgeführten Produkttests von drei verschiedenen und bereits bei anderen Bahnen im Einsatz befindlichen Konditionierungsmitteln haben gezeigt, dass für den Einsatz bei der MGB vorerst nur ein Mittel (HeadLub 90) die Voraussetzungen zur Einhaltung der Bremsdistanzen im Betrieb und gleichzeitig der Verteilung des Mittels entlang der Strecke erfüllt. Auf Basis der Bremsversuche wurde entschieden, die Betriebserprobung mit dem Konditionierungsmittel HeadLub 90 der Firma IGRALUB AG durchzuführen. Mit Start der Betriebserprobung wurden auch die Triebfahrzeugführenden informiert und sensibilisiert, um allenfalls sicherheitsrelevante Vorfälle aber auch Beobachtungen zeitnah erfassen zu können.

Über die gesamte Zeit der Betriebserprobung wurden die Radsätze der Shuttle – Fahrzeuge aber die Schienenköpfe an zeitlich, gemäss Versuchsplan, festgelegten Intervallen vermessen, um die Veränderungen bei den Profilen (Verschleiss, Indikatoren für die Berührung von Rad und Schiene) an den Radlaufflächen und bei den Schienenfahrflächen zu erfassen. Zusätzlich wurden die Reibwerte am Schienenkopf mit einem Tribometer sowie die Rauigkeiten der an den Schienenfahrflächen in Längsrichtung zur Überprüfung der Schlupfwellenbildung erfasst. Hierzu mussten eigens Messsysteme (Tribometer, Zusatzgeräte für die Profilvermessung) und Prozesse (Monitoring der Fehler an Radlaufflächen und Schienenfahrflächen) beschafft und festgelegt werden.

Resultate aus dem Betriebsversuch Täsch - Zermatt

Sicherheit, Bahnbetrieb, On-board-Anlagen

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass während der gesamten Betriebserprobung keine sicherheitsrelevanten Vorfälle aufgetreten sind. Infolge ungünstigem Betriebseinsatz der Shuttle – Fahrzeuge (übermässiges Konditionieren infolge Nachtfahrplan an den Wochenenden) oder feuchten Wetterverhältnissen, wurden insbesondere mit schweren Güterzügen fünf traktionsseitige Vorfälle bekannt, in denen erschwerte Traktionsverhältnisse vorlagen. Trotzdem ist kein Zug aufgrund SKK – bedingten Traktionsproblemen stecken geblieben.

Die Ausrüstung eines Triebzuges hatte Investitionen von rund CHF 40'000.- zur Folge. Der Einbau und Betrieb der Anlagen konnte durch die eigenen Werkstätten vorgenommen werden und gestaltete sich einfach. Auch die Ausrüstung der Strecke mit RFID-Tags war einfach zu bewerkstelligen. Beide Systeme (fahrzeug- und streckenseitig) funktionierten einwandfrei.

Radverschleiss Fahrzeuge

Die Schienenkopfkonditionierung wirkte sich bei den ausgerüsteten Fahrzeugen umgehend positiv auf die Räder aus. Bei den visuellen Kontrollen der Radlaufflächen wurden keine Tendenzen zur Bildung von Polygonen oder wachstumsfähigen Rissen (Rollkontaktermüdung) mehr festgestellt.

Die Reduktionen der Raddurchmesser durch Verschleissabtrag sind durch die Wirkung der Konditionierung signifikant gesunken. Der Indikator für den Radverschleiss der Shuttle – Fahrzeuge (Anzahl fahrbare Kilometer pro Millimeter Reduktion des Raddurchmessers) konnte bei den Triebrädern von 5'000 bis 10'00' auf 18'000 bis 30'000 und bei den Laufrädern von 10'000 bis 20'000 auf 30'000 bis 50'000 gesteigert werden (rund 300%). Dies unabhängig von der verwendeten Stahlqualität bei den Rädern. Für eine statistisch signifikante Aussage ist die Stichprobe noch zu klein.

In der Folge kann festgehalten werden, dass bei den Shuttle - Fahrzeugen infolge Radverschleiss im Betrachtungszeitraum keine Radsätze reprofiliert werden mussten. Ohne SKK mussten insbesondere die Triebradsätze öfters zwei- bis dreimal pro Jahr reprofiliert werden.

Einmal mehr konnte jedoch festgestellt werden, dass Fahrzeuge mit nur einem Stromrichter unwirtschaftlicher sind, wenn alle Radsätze aufgrund von zu grossen Durchmesserunterschieden reprofiliert werden müssen. (nicht Inhalt des Betriebsversuches, aber bei der Betrachtung der LCC zu beachten).

Die Räder der MGBahn verfügen über das Radprofil W98. Bei allen Fahrzeugen haben sich die Radprofile im Laufe der Betriebserprobung deutlich verändert, was auch zu einer Veränderung der Berührung von Rad und Schiene geführt hat. Für die MGB ist das Radprofil W98 nicht verschleissangepasst und für eine Verbesserung des Bogenlaufs ungeeignet. Im Projekt P3 Rad / Schiene müssen die Phänomene vertieft untersucht werden, um hier optimalere Vorgaben zu Radprofil und Schienenkopprofil machen zu können.

An einigen Rädern sind an den Radlaufflächen im Querprofil Diskontinuitäten durch die Einwirkung von Bremsklötzen, aufgetreten. Diese verlaufen über den gesamten Radumfang und haben keinen Zusammenhang mit dem Betriebsversuch. Diese Diskontinuitäten beeinträchtigen an der Spurkranzflanke die Sicherheit (sind gemäss Fehlerkatalog des BAV [13] nicht zulässig) und an der Hohlkehle das Bogenlaufverhalten. Diese Aspekte werden im Rahmen der Arbeiten im Projekt P3 vertieft, gemeinsam mit der MGB einer Lösung zugeführt und in der Laufwerkspezifikation im Projekt P5 berücksichtigt.

Monitoring Radunrundheiten

Die Messanlage zwischen Täsch und Zermatt zur Radunrundheit (WMS [9, 10]) liefert seit Anfang März 2022 Messwerte zu Polygonen, Flachstellen und allfälligen anderen Schädigungen in der Umfangrichtung an den Radlauflächen der Räder. Die Historie dieser Messdaten wurde analysiert und lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Fahrzeuge (Shuttle), die nur im konditionierten Bereich fahren weisen geringere Polygonisierung auf als jene, die auf dem Gesamtnetz (Komet) verkehren.
- Die Laufräder sind stärker von Polygonisierung und Flachstellen betroffen als die Triebäder
- In der heissen Jahreszeit (Juli – August) traten Polygone stärker auf als vorher bzw. nachher, was auf höhere, wetterbedingte Reibwerte hinweist

Diese Daten konnten basierend auf einem Vergleich der Instandhaltungsdaten (Überdrehen des Rades, Drehgestelltausch) und der Auswirkung auf die Messdaten (tiefere Polygonwerte) erfolgreich plausibilisiert werden. Somit decken sich die Beobachtungen der Radunrundheiten mit den Erkenntnissen aus den weiteren erfassten Daten und erhärten diese.

Verschleiss Schiene

In den beiden Versuchsbögen des Gleises Zum Biel war nach Beginn der Schienenkopfkonditionierung keine Schlupfwellenbildung mehr im Innenstrang der Kurven feststellbar. Dies im Gegensatz zu früher (ohne SKK), wo die Rauheiten im Bereich der Schlupfwellenlänge (Länge um 80 mm) nach 260 Tagen praktisch wieder das Niveau analog zu demjenigen vor dem Schienenschleifen erreicht hat.

Ausschliesslich im Bogen Lüegelwang zeigt die Messung nach 246 Tagen mit SKK im Wellenlängenbereich der Schlupfwellen eine leichte Erhöhung auf, was jedoch im Vergleich zur Situation vor der Konditionierung auf ein wesentlich geringeres Schlupfwellenwachstum hindeutet.

Diese Beobachtungen konnten bis auf die Schienenrauheitsmessung im September 2022 bestätigt werden. Die im September beobachtete erhöhte Schlupfwellenbildung ist mutmasslich auf die heissen Sommermonate im Juli und August 2022 zurückzuführen. Als Ursache wird eine Kombination aus im Sommer längeren Tagen und dem ausgeschalteten SKK-System in den Abend- und Morgenstunden vermutet. Zudem wird angenommen, dass das Konditioniermittel bei erhöhten Schienentemperaturen die Wirkung verliert. Dieses Phänomen muss insbesondere auf langfristig heissere Sommer (Klimaerwärmung) wissenschaftlich und im Betriebseinsatz untersucht werden.

Im Allgemeinen ist zu beobachten, dass durch die Fahrzeuge während der einjährigen Betriebserprobung nur minimaler Verschleiss entstanden ist. Die Verschleissmesswerte variieren innerhalb des Bogens zum Teil stark. Jedoch ist aufgrund des übrigen Verschleissvorrates anzunehmen, dass auf der bogeninneren Schiene jeweils stärkere Schlupfwellenbildung entstanden ist und somit jeweils mehr abgeschliffen werden musste. Dank des SKK bedingten geringeren Schlupfwellenwachstums (v.a. bogeninnen) konnte das Schleifintervall von halbjährlich auf jährlich erhöht werden, was sich positiv auf die Lebenszykluskosten auswirkt.

Monitoring Schlupfwellenbildung und Kurvenkreischen

Zur Erfassung der Schwingungen und des Lärms wurden auf einem Shuttle (und einem Kommet) Beschleunigungssensoren bei je einem Radsatz an den beiden Radsatzlagern und neben den beiden Rädern eines Radsatzes Mikrophone installiert. Diese waren schon vor Beginn der SKK-Betriebserprobung im Einsatz, weshalb ein Vergleich zwischen den Beschleunigungen (Schlupfwellenbildung, stick-slip-Effekt) und der Schallemission vor und nach Beginn der Betriebserprobung möglich ist. Hiermit kann anhand der Historie der Vibrationsdaten die Entwicklung der Schlupfwellen verfolgt und die Wirksamkeit der Konditionierung im Betriebseinsatz überwacht werden.

Die bisherigen Ergebnisse dieses Monitorings können wie folgt zusammengefasst werden:

- Aufgrund der Schwingungsmessungen wurde im Zeitraum nach dem Schienenschleifen (Oktober 2021) bis Anfangs Juli 2022 kein Schlupfwellenwachstum registriert. In der darauffolgenden heissen Sommerzeit hat das System ein leichtes Schlupfwellenwachstum festgestellt. Dies deckt sich mit den Rauheitsmessungen an der Schiene.
- Aufgrund der akustischen Messungen gibt es spezifische Bereiche zwischen den Sprühabschnitten der SKK-Anlagen, welche zum Kreischen neigen und über die gesamte Messdauer sehr konstant sind. Zudem neigen die Fahrzeuge in Tagesrandzeiten zum Kreischen. Dies liegt daran, dass die Anlagen abends nach 19:00 Uhr und morgens vor 07:00 Uhr mittels Zeitrelais ausgeschaltet sind.

Zudem hat sich gemäss den Rückmeldungen des Lokpersonals der Lärm auf der Strecke der Betriebserprobung reduziert (Kurvenkreischen, Schlupfwellen). Dieser Eindruck konnte bei einer gemeinsamen Streckenbegehung ebenfalls bestätigt werden. Bei dieser Begehung während der Betriebserprobung war der Lärm bzw. das Kurvenkreischen merklich weniger stark als bei Begehungen vor der SKK-Betriebserprobung.

Wirtschaftlichkeit

Die Simulationen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der Betriebserprobung „SKK Täsch – Zermatt“ haben gezeigt, dass die SKK-Anlage unter den getroffenen Annahmen auf der Teststrecke in jedem simulierten Fall rentabel ist. Hierfür wurden zwei Fälle definiert, ein Fall mit SKK und ein Fall ohne SKK. Für diese beiden Fälle wurden wiederum drei verschiedene Simulationen mit jeweils unterschiedlichen Systemgrenzen durchgeführt.

- Als erstes wurden die Auswirkungen der SKK auf die Shuttle – Fahrzeuge alleine analysiert. Für diese Betrachtungsweise konnten jährliche Einsparnisse von rund 150'000 CHF ermittelt werden.
- In der zweiten Simulation wurden die Auswirkungen auf die Shuttle – Fahrzeuge kombiniert mit den Auswirkungen auf den Gleisunterhalt analysiert. Für diesen Fall konnten jährliche Einsparnisse von rund 235'000 CHF ermittelt werden.
- In der dritten Simulation wurden die Auswirkungen auf die Shuttle – Fahrzeuge, auf den Gleisunterhalt und auf die Investitionen in die Gleiserneuerung (Lebensdauer) analysiert. Für diesen Fall konnten jährliche Einsparnisse von rund 300'000 CHF ermittelt werden.

Somit lässt sich festhalten, dass die SKK Anlage Täsch – Zermatt auch im wirtschaftlich ungünstigsten Fall (Einsparnisse von 150'000 CHF mit Investitionskosten von 120'000 CHF) innerhalb eines Jahres amortisiert wird bzw. wurde.

Zudem wurde anhand einer Expertenmeinung eine Einschätzung zu einer möglichen Extrapolation bzw. zur Ausweitung der SKK auf das gesamte Netz der MGBahn gemacht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einführung von SKK auch auf dem gesamten Netz kosteneffizient sein wird, insbesondere wenn das Gesamtsystem (inkl. Infrastrukturkosten und sozioökonomischen Aspekten (Lärm)) berücksichtigt wird.

Fazit

Die Sicherheit ist bei richtigem Einsatz der Schienenkopfkonditionierung aufgrund von umfangreichen Bremsversuchen in Gefällen bis 40‰ gewährleistet und in der Betriebserprobung Täsch-Zermatt mit Gefällen bis 25‰ jederzeit sicher beherrscht worden.

Die bei der Betriebserprobung erzielten Ergebnisse zeigen, dass kurz- und mittelfristig mit gezielter Anwendung der Schienenkopfkonditionierung der Kurz- und Langzeitverschleiss auf Strecken mit Gefällen bis 25‰ signifikant gemindert werden kann.

Die Erprobungen haben jedoch auch aufgezeigt, dass für die Ausarbeitung von Empfehlungen zur Umsetzung der SKK in der Meterspurbranche weitere Optimierungen erforderlich sind. Dies betrifft vor allem den Kontakt zwischen Rad und Schiene, die Interaktion zwischen SKK und SKS sowie das Monitoring mit den damit verbundenen Möglichkeiten der Digitalisierung mit Hinblick auf die Beherrschung des Gesamtsystems (Stichwort bedarfsgerechtes Konditionieren).

Die Schienenkopfkonditionierung ist hoch wirtschaftlich. Der ROI (Return on Investment) liegt im Falle der MGBahn bei einem Jahr.

Die Schallemission (Kurvenkreischen, Überrollung von Schlupfwellen) wird durch SKK deutlich verringert und der Fahrkomfort verbessert.

Die Umweltaspekte der Konditionierung sind noch nicht vollumfänglich abschätzbar.

Weiteres Vorgehen - Empfehlungen

Es wird empfohlen, das Verhalten des SKK-Systems bei der MGB für ein weiteres Jahr zu beobachten. Dadurch wird es erst möglich sein, die hier festgestellten Tendenzen zu erhärten. Es muss berücksichtigt werden, dass insbesondere bei den Rädern noch keine Reprofilierung durchgeführt wurde und dass erst durch die dabei erfolgte Durchmesserreduktion eine abgesicherte Abschätzung zur Verlängerung der Lebensdauer der Räder als Folge von SKK möglich ist. Zudem scheint die Beobachtungszeit für den Verschleiss der Schienen mit einem Jahr zur Beurteilung der vorzusehenden Schleifintervalle zu kurz angesetzt worden zu sein. Die Resultate des Betriebsversuches sind insbesondere durch weitere Verschleissmessungen in den Sommermonaten zu konsolidieren. Die ortsfeste Anlage zum Monitoring der Rundheitsabweichungen der Räder und das fahrzeugseitige Monitoring zu Lärm und Schienenschädigungen sollen für weitere 12 Monate betrieben werden. (Option Weiterführung Versuch Täsch-Zermatt)

Die Umweltaspekte der Konditionierung sind im Betriebsversuch tpf zu untersuchen und wirtschaftlich zu konsolidieren.

Die Weiterentwicklung umweltverträglicher, abbaubarer Konditionierungsmittel ist durch die Industrie voranzutreiben.

In einem weiteren Entwicklungsschritt ist der Nachweis zu erbringen, dass die Schienenkopfkonditionierung auch auf Streckenneigungen bis 70‰ erfolgreich eingesetzt werden kann. (Option 70‰)

Dem Nachteil der kontinuierlichen Konditionierung bei jeder Zugsdurchfahrt in allen dafür spezifizierten Kurven ist mit einer bedarfsgerechten Konditionierung zu begegnen. Hierzu müssen die Fahrzeuge die Notwendigkeit der Konditionierung erkennen können und miteinander kommunizieren, um das Optimum im System herausholen zu können. (Option bedarfsgerechtes Konditionieren).

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage	12
2.	Ziele der Betriebserprobung	12
3.	Beschreibung Versuchsträger und Versuchstrecke	13
3.1.	Beschrieb Ausrüstung Fahrzeuge, on-board SKK-System [2]	13
3.2.	Beschrieb Strecke und Ausrüstung für SKK Betriebserprobung [3]	14
4.	Zeitlicher Ablauf der Betriebserprobung [1]	18
5.	Messungen / Überwachung und Resultate zum Radverschleiss	19
5.1.	Abrasiver Radverschleiss an den Fahrflächen von Trieb- und Laufrädern.....	19
5.1.1.	Abmessungen Spurkranz.....	20
5.1.2.	Spezifischen Reduktionen der Raddurchmesser ΔD_{LCC}	23
5.1.3.	Zustand der Fahrflächen an den Rädern über den Radumfang.....	31
5.1.4.	Zustand der Radlauflächen in der Querrichtung	35
5.1.4.1.	Tragbild im Querprofil der Räder	35
5.1.4.2.	Diskontinuitäten im Querprofil der Räder.....	39
5.2.	Berührungsgeometrie	41
5.2.1.	Berührungsgeometrie Shuttle.....	41
5.2.2.	Berührungsgeometrie Komet	50
5.3.	Radunrundheit beurteilt anhand Messanlage im Gleis [9]	55
6.	Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene	58
6.1.	Messung Rauheit der Schiene [1]	58
6.1.1.	Schienenrauheit [5].....	59
	Zum Biel Portal	61
	Zum Biel Brücke	62
	Lügelwang	63
6.1.2.	Feststellungen Schlupfwellenwachstum in Bögen/ Schienenrauheits-entwicklung ..	63
6.2.	Tribometer Messungen	64
6.2.1.	Messpunkte und Messresultate.....	64
6.2.2.	Feststellungen zu den Messergebnissen	66
6.3.	Abrasiver Schienenverschleiss	67
6.3.1.	Zum Biel – Portal (Vollbogen km: 41'935.977 - 41'951.93).....	69
6.3.2.	Zum Biel – Brücke (Vollbogen km: 42'021.43 - 42'058.60).....	70
6.3.3.	Lügelwang (Vollbogen km: 42'512.35 - 42'557.67).....	71
6.3.4.	Schlussfolgerungen zum Schienenverschleiss.....	73
6.4.	Schienen- und Schwellenschwingungen	75
6.5.	Spurweite.....	75
7.	Messungen / Überwachung und Resultate Allgemein	78
7.1.	Kurvenkreischen	78

7.2.	Schwingungen am Radsatzlager und Lärm durch kreischende Räder	78
7.2.1.	Beschreibung des Messsystems «Technode»	78
7.2.2.	Schwingungen am Radsatzlager erfasst mit Messsystem «Technode»	81
7.2.3.	Schallemission erfasst mit Messsystem «Technode»	83
7.3.	Informationen aus dem Betriebseinsatz	91
7.3.1.	Rückmeldungen Betrieb (Lokführer / Betriebsleitung)	91
7.3.2.	Betriebsdaten.....	91
8.	Gesamtwirtschaftlichkeit.....	92
8.1.	Beschreibung der Methode	92
8.2.	Getroffene Annahmen.....	92
8.3.	Resultate	93
9.	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	94
10.	Verzeichnisse	101
10.1.	Abbildungsverzeichnis	101
10.2.	Tabellenverzeichnis	103
10.3.	Referenzen	104
11.	Anhang.....	105
11.1.	Rauheit der Schiene	105
11.1.1.	Messgerät APT RSA – Rail Surface Analyser	105
11.1.2.	Täschsand innen.....	106
11.1.3.	Täschsand aussen.....	108
11.1.4.	Zum Biel Portal innen.....	109
11.1.5.	Zum Biel Portal aussen	111
11.1.6.	Zum Biel Brücke innen	112
11.1.7.	Zum Biel Brücke aussen	114
11.1.8.	Lüegelwang innen.....	116
11.1.9.	Lüegelwang aussen	118
11.2.	Tribometer Messungen	120
11.2.1.	Kalter Boden Gleis 2 (Radius 100 m) vor Relaisraum Streckenkilometer 41.080 ..	120
11.2.2.	Biel Kurve (110m) Streckenkilometer 42.050	122
11.2.3.	Biel Gerade Streckenkilometer 42.100.....	125
11.2.4.	Luegelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550	127
11.3.	Gesamtwirtschaftlichkeit – Annahmen	130
11.3.1.	Investition	130
11.3.2.	Auszug Simulation	131
11.4.	Radunrundheiten der Räder.....	132
11.4.1.	2011 – 2014: Komet 3-teilig	133
11.4.2.	2021 – 2028: Komet 3-teilig	141
11.4.3.	2051 – 2054: Shuttle	157

11.4.4.2131 – 2134: GSW	165
11.5. Schienenverschleiss	172
11.5.1.Schienenverschleiss Zum Biel Portal	172
11.5.2.Schienenverschleiss zum Biel Brücke.....	173
11.5.3.Schienenverschleiss Lüegelwang	174

1. Ausgangslage

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Fahrzeug / Fahrweg Meterspur erforscht die MGB zusammen mit der tpf und der zb für die Branche die Verschleissreduktion an den Radsätzen der Fahrzeuge und den Schienen durch den Einsatz der Schienenkopfkonditionierung (SKK) und der Spurkranzschmierung (SKS). Die Erforschung der Verschleissreduktion der Radsätze und der Schienen in den engen Bögen wird im Rahmen eines Projektes bei der MGB und bei der tpf erfolgen. Im vorliegenden Bericht werden die bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen bei der MGB seit Oktober 2021 beschrieben.

Mit Einführung neuerer Fahrzeuggenerationen hat sich die Abnutzung der Radsätze aber auch der Schienen dramatisch erhöht. Bis die Ursachen mit dem Teilprojekt Rad / Schiene des nationalen Forschungsprojektes Fahrzeug / Fahrweg erforscht sind und angepasste Fahrzeugkonstruktionen zur Verfügung stehen, sind kurz- und mittelfristig verschleissmindernde Massnahmen zwingend. Dies damit die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit wieder verbessert werden kann. Mit der im Folgenden behandelten Betriebserprobung bei der MBG sollen die Grundlagen für Empfehlungen zum Einsatz der Schienenkopfkonditionierung der weiteren Bahnen erarbeitet werden.

2. Ziele der Betriebserprobung

Die Betriebserprobung im Modul 4 von Projekt P2 (im Rahmen des nationalen Forschungsprojektes) hat das Ziel, die Wirkung auf den Verschleiss im Rad- Schienenkontakt mittels SKK zu untersuchen. Damit soll die Instandhaltung reduziert und die Verfügbarkeit von Fahrzeug und Fahrweg erhöht werden. Dabei wird erwartet, dass auch die Lärmemissionen (Kurvenkreischen) reduziert werden können. Zudem gibt es hinsichtlich SKK und Verschleiss bei Meter-spurbahnen bisher keine wissenschaftlichen Grundlagen. Mit dem Projekt soll dieses Know-how aufgebaut, Empfehlungen erarbeitet und der ganzen Branche zur Verfügung gestellt werden.

Das Dokument «MGB Verschleiss SKK Versuchskonzept» [1] beschreibt das Versuchskonzept des MGB-Projektes SKK auf der Strecke Täsch – Zermatt mit dem Ziel die Reduzierung des Radverschleisses durch SKK zu bestimmen und damit die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge zu verbessern. Gleichzeitig soll auch eine Reduktion des Schienenverschleisses in engen Bögen (Reduktion Schlupfwellenbildung) bewirkt werden, damit die Schleifintervalle und die Liegedauer der Schienen verlängert werden. Beim Verschleissabtrag an den Laufflächen von Rad und Schiene ist zu berücksichtigen, dass dieser beim Rad ein Vielfaches desjenigen bei der Schiene beträgt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Verschleiss beim Rad pro Radumdrehung und bei der Schiene pro überrolltem Rad erfolgt. Dabei wird zwischen dem Verschleiss an Spurkranz / Schienenflanke einerseits und demjenigen an den Fahrflächen der beiden Berührpartnern andererseits unterschieden. Ziel der SKK ist primär den Verschleiss und die Schädigungen an den Fahrflächen zu reduzieren. Durch die Reduktion der Kraftschlusskräfte an den Fahrflächen wird auch eine Minderung der auf den Spurkranz bzw. die Schienenflanke angreifenden Kräfte bewirkt und damit der auf diese Kräfte zurückzuführende Verschleiss reduziert.

3. Beschreibung Versuchsträger und Versuchstrecke

Bei der SKK – Anlage handelt es sich um ein on-board Schienenkopfkonditioniersystem, welches von der Firma REBS Zentralschmiertechnik GmbH stammt und mit dem Konditioniermittel HeadLub® 90 der Firma Igralub Holding GmbH ausgestattet ist. Für die Betriebserprobung auf der MGB – Strecke zwischen Täsch und Zermatt wurden vier Shuttle – Fahrzeuge BDeh 4/8 mit dem on-board-System ausgerüstet (vgl. Kapitel 3.1). Seit Beginn der Betriebserprobung im Oktober 2021 konditionieren diese Fahrzeuge auf definierten Abschnitten der Strecke zwischen Täschsand und Zermatt (vgl. Kapitel 3.2).

3.1. Beschrieb Ausrüstung Fahrzeuge, on-board SKK-System [2]

Die Änderung an den vier Fahrzeugen des Typs BDeh 4/8 betreffen den Einbau der Komponenten für die on-board-Konditionierung. Abbildung 1 zeigt die Anordnung der Systemkomponenten:

- Konditioniermittelbehälter 10 Liter mit zwei integrierten pneumatischen Förderpumpen unter dem Fahrzeug am Fahrzeuggkasten am U-Träger vom Rahmen links hinter dem ersten DG fixiert.
- Sprühdüsen eingestellt zum Besprühen der Schienenfahrflächen mittels Befestigungskonsolen an den Halterungen des Zugssicherungsempfängers angeschraubt.
- Antenne unter dem Fahrzeug unmittelbar unter dem Schrank PT1 am U-Träger vom Rahmen links hinter dem ersten DG fixiert.
- Ha-VIS RFID Reader RF-R400, EU für die Aktivierung der Schienenkopf-Konditionierung.
- Der Strecke entlang werden an vordefinierten Punkten RFID-Tags an den Schienen befestigt [3].
- Steuerung, Bediengerät und Readers sind im abgeschlossenen Schrank PTE 1 des Shuttles im Fahrgastraum unmittelbar oberhalb des Drehgestells mit den aussenliegenden Komponenten eingebaut (beim ersten Einstieg Richtung Disentis links, hinter der Türe). Dadurch werden die Verbindungsleitungen so kurz wie möglich gehalten.
- Temperatur- und Feuchtesensor mit aktivem Ausgang dient der Erfassung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit im Aussenbereich. Dieser Sensor ist auf dem Dach des Führerstandes in Richtung Disentis montiert.
- Verdrahtung der Steuerung inkl. Regensensor. Die Speisung 36V DC (04A13) und 0V DC (04A14) wie auch die Signale der Fahrrichtung (F1 = 140.1/2 und F2 = 140.2/2) sind aus dem Führerstand (415 / 50 / 601 / 611) abgezweigt und im Schrank PTE 1 auf einen FI bzw. die dazugehörige Klemmleiste angeschlossen.

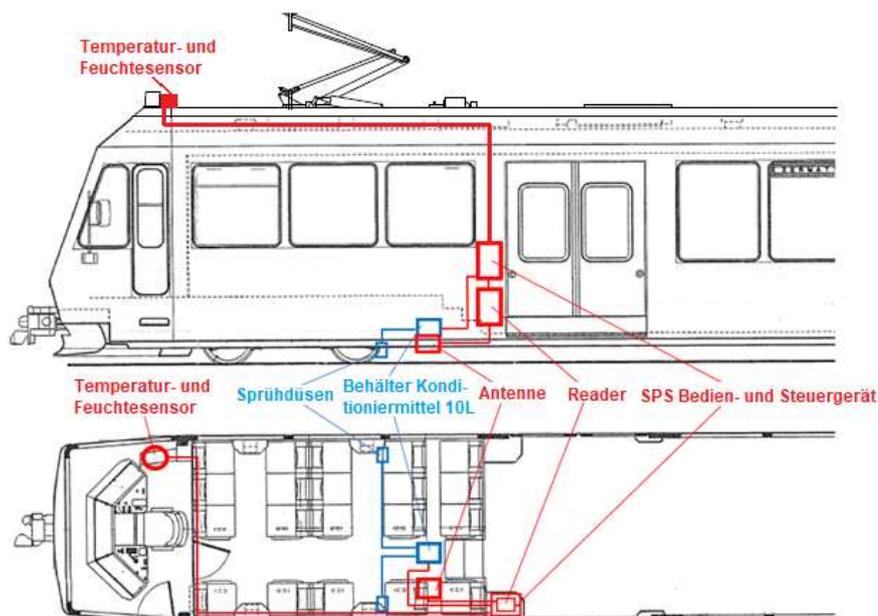


Abbildung 1: Anordnung der Systemkomponenten des Konditioniersystems Shuttle

3.2. Beschrieb Strecke und Ausrüstung für SKK Betriebserprobung [3]

Die Strecke Zermatt - Täsch kann aus den Gesichtspunkten der Spurführungstechnik in drei Bereiche unterteilt werden (siehe Abbildung 2):

- a) Abschnitt Täsch – Täschsand: In diesem Bereich liegen die Halbmesser der kleinsten Bögen zwischen 180m und 230 m.
- b) Abschnitt Täschsand – Kalter Boden: In diesem Bereich liegen drei sehr enge Bögen (Halbmesser 2x98m und 1x100m), zwei Bögen mit Halbmesser 150m, ein Bogen mit Halbmesser 180m und zwei Bögen mit sehr grossen Bogenhalbmessern (510m, 571m).
- c) Abschnitt Kalter Boden – Zermatt: In diesem Bereich liegen praktisch alle Bögen im Bereich der sehr kleinen Bögen mit Halbmessern zwischen 80m und 125m.

Die Gründe für den hohen Radverschleiss sind im Trassierungsbereich der sehr kleinen Bogenhalbmesser zu suchen und damit vor allem auf dem Streckenabschnitt Kalter Boden – Zermatt. In diesem Streckenabschnitt liegt eine massive Häufung von Bögen mit sehr kleinen Bogenhalbmessern vor.

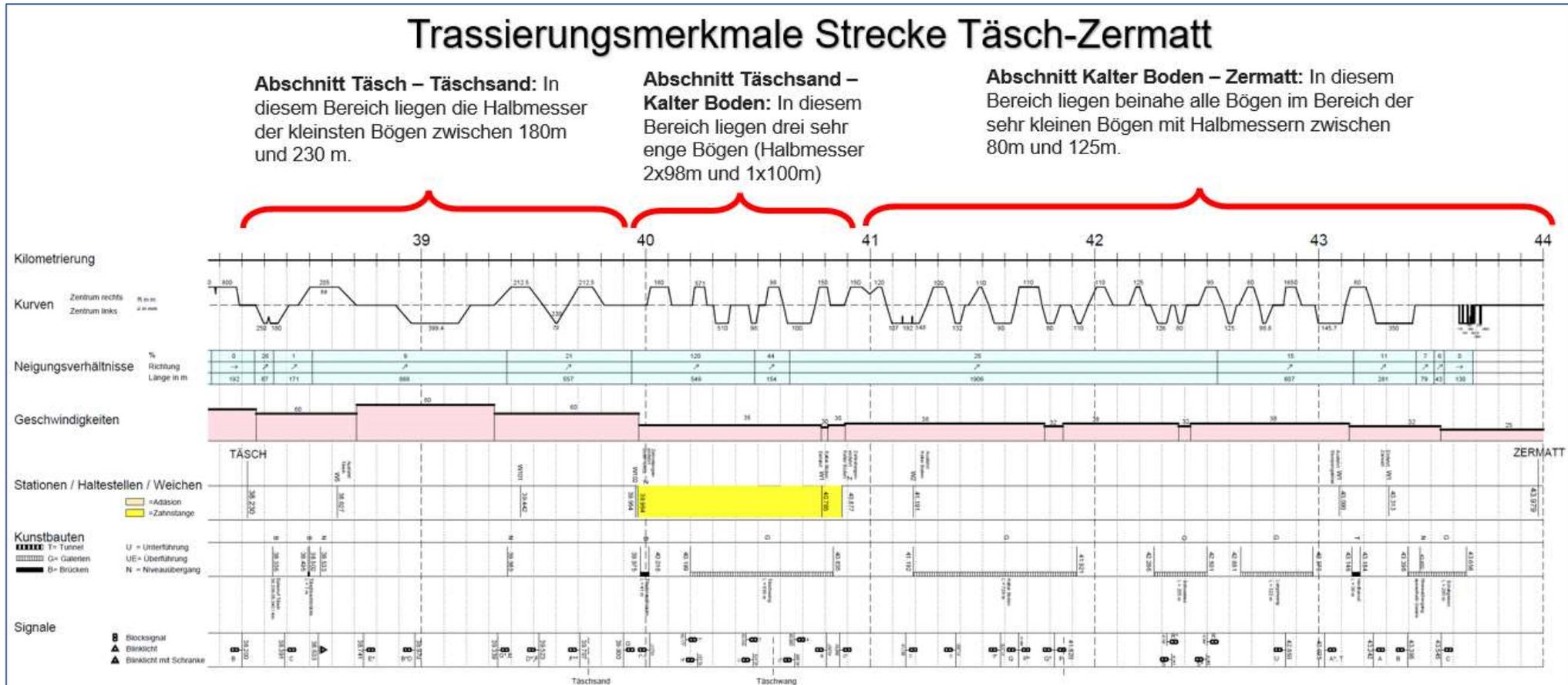


Abbildung 2, Trassierungsmerkmale Strecke Täsch-Zermatt

Die Steuerung für die Schienenkopfkonditionierung ist im fahrzeugabhängigen Modus eingestellt. Die Schienenkopfkonditionierung arbeitet entsprechend der am Bediengerät eingestellten Pausen- und Sprühzeit und der Anzahl der vorgegebenen Konditionierungen (Zyklenzahl siehe Abbildung 3).

Der Strecke entlang werden an vordefinierten Punkten RFID-Tags an den Schienen befestigt, welche der SKK-Anlage auf dem Fahrzeug jeweils den Befehl zum Start der Konditionierung vorgeben. Ein Stopp-Tag ist nicht erforderlich, da die Anlage nach der im System eingestellten Zahl von zwei Zyklen automatisch abstellt.

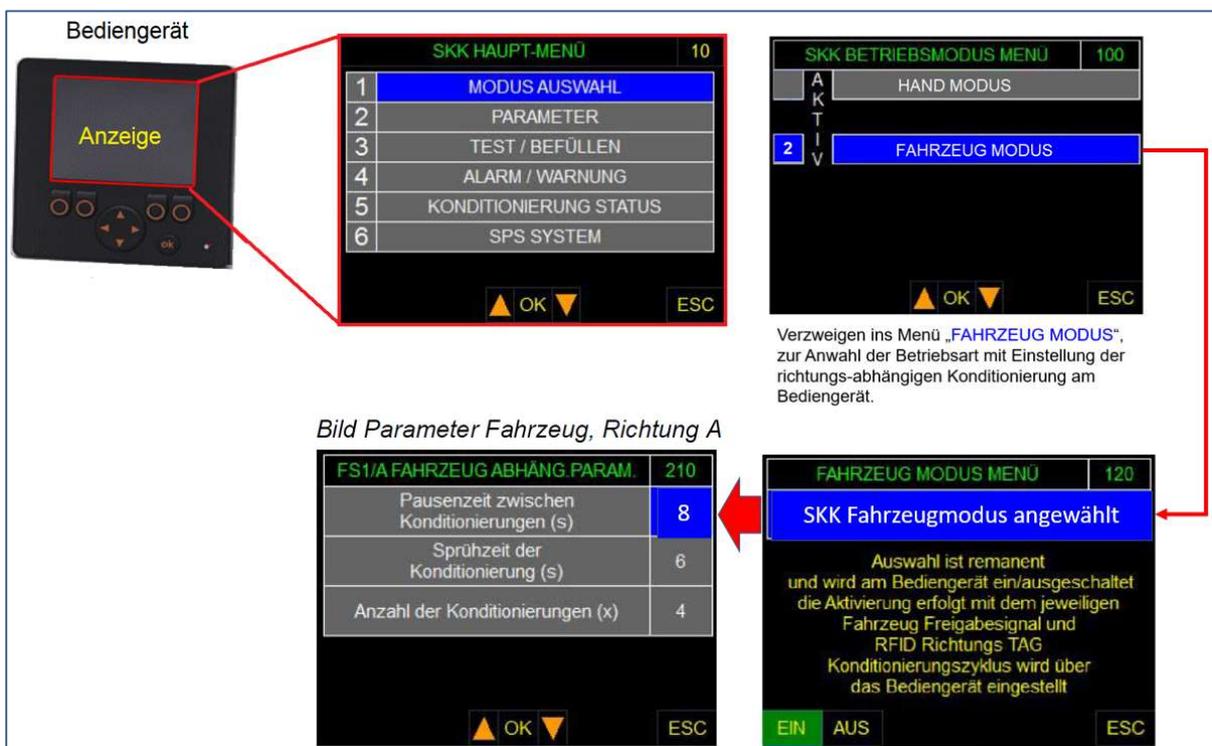


Abbildung 3: Einstellung des Bediengerät im fahrzeugabhängigen Modus der Schienenkopfkonditionierung. Die Anzahl der Konditionierungen werden im Bediengerät vorgegeben.

Die Abbildung 2 zeigt die zu konditionierenden Streckenabschnitte zwischen Täschsand und Zermatt. In den grösseren Bogenhalbmessern kurz vor Zermatt sowie den beiden Bögen unmittelbar oberhalb Täschsand wird auf die Konditionierung verzichtet. Zwischen Täschsand und Täsch befinden sich Gewässerschutzzonen, auf welchen bis zum Vorliegen der Untersuchungen der FH-Bern keine Konditionierungen angewendet werden dürfen. Vor und nach Kalter Boden wird ebenfalls auf die Konditionierung verzichtet, da in dieser Kreuzungsstation wartende Züge angetroffen werden (besetzte Einfahrt) und damit ein gesicherter Zielhalt erforderlich ist.

In Abbildung 5 ist die Anordnung der Start - RFID TAGS während der Betriebserprobung Täsch - Zermatt jeweils zu Beginn des entsprechenden Streckenabschnittes dargestellt. Es wird nur in der Fahrtrichtung von Täsch nach Zermatt konditioniert. Die Festlegung der Konditionierabschnitte erfolgte unter besonderer Berücksichtigung des Gutachtens zum Bremsverhalten (siehe Gutachten zum Bremsverhalten [4]).

In Abbildung 4 ist links schematisch die Befestigung der RFID TAG an der Schiene dargestellt. Die Befestigung ist an allen Schientypen (VST36, SBB I und SBB IV) der Meterspurbahnen möglich.

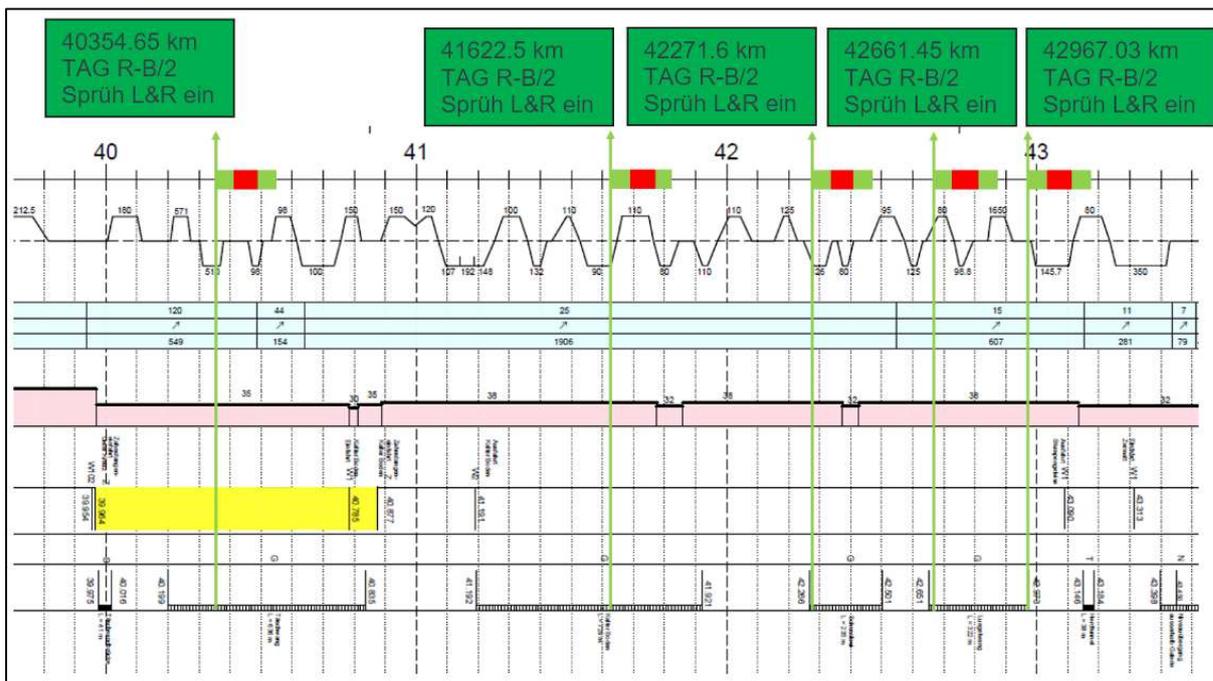


Abbildung 5: Anordnung der RFID TAGS während der Betriebserprobung Täsch-Zermatt (grün=Konditionierung, rot=Pause). Der jeweils grüne Pfeil nach oben bezeichnet den Standort des Start-Tags.

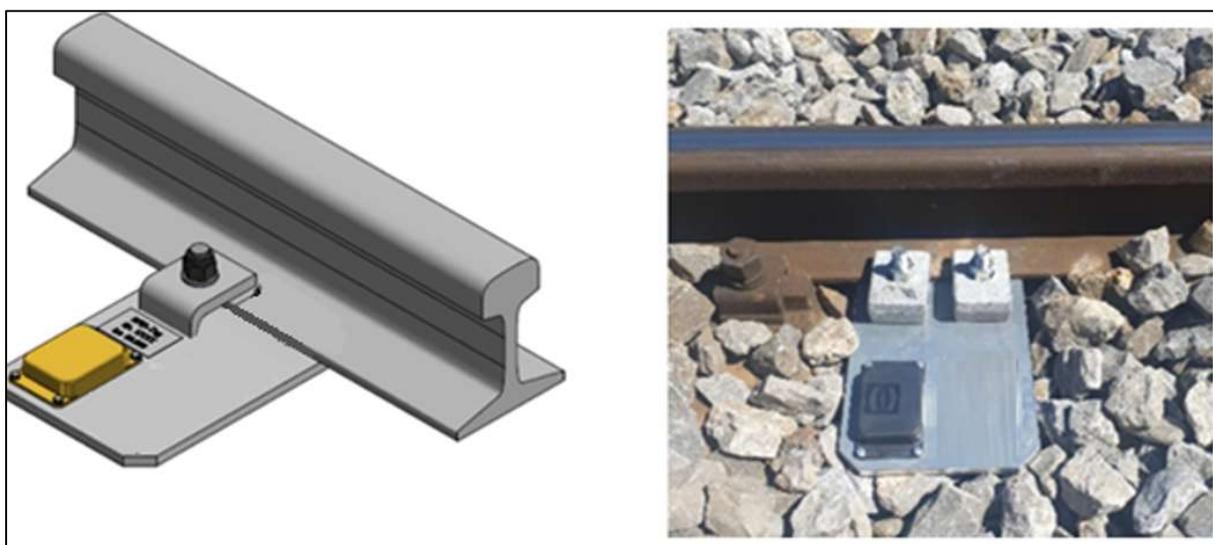


Abbildung 4: Befestigung der RFID-TAG an der Schiene links schematisch und rechts real

Mit dem Start unter den Bedingungen Einschaltsignal 5 km/h (Fahrgeschwindigkeit muss > 5 km/h), der aktuellen Aufrüstung des Fahrzeuges (Fahrt-Richtungssignal im Führerstand Richtung Zermatt) und der Unterschreitung des aktuellen Feuchtwertes (Luftfeuchtigkeit muss < 85% sein) erfolgt die Freigabe der Konditionierung [2].

Die in der Abbildung 5 eingezeichnete Verortung der Start- Positionen (grüner Pfeil) erfolgte nach Beginn der Betriebserprobung und nach Vorliegen der ersten Rückmeldungen des Betriebspersonals. Weitere Optimierungen können im Bedarfsfalle während der Betriebserprobung durchgeführt werden, sind nach anfänglichen Korrekturen und den Festlegungen gemäss Abbildung 5 bis zum aktuellen Zeitpunkt aber nicht mehr durchgeführt worden. Es muss auf jeden Fall sichergestellt sein, dass in den nicht zu konditionierenden Abschnitten kein Konditioniermittel ausgebracht bzw. verschleppt wird. Aus diesem Grund wurden mehrere Start –

Tags gesetzt und die Zyklenzahl auf zwei begrenzt. Die durch das Gutachten zur Bremsleistung [4] geforderten Massnahmen zur Verortung der Konditionierabschnitte sind mit den Festlegungen in Abbildung 5 abgedeckt.

4. Zeitlicher Ablauf der Betriebserprobung [1]

Kurz bevor die Betriebserprobung gestartet wurde, wurden die Schienen zwischen Täsch und Zermatt geschliffen. Zudem wurden die Räder aller Shuttle – Fahrzeuge reprofiliert. Damit war eine definierte Ausgangslage zur Verfolgung des Rad- und Schienenverschleisses gegeben. Die Betriebserprobung wurde anschliessend im Oktober 2021 gestartet und ist folglich zum Zeitpunkt des vorliegenden Abschlussberichts seit rund einem Jahr aktiv.

Um die Auswirkungen einschätzen zu können, wurden Messungen und entsprechende Auswertungen an Rad und Schiene durchgeführt, Feststellungen aus den visuellen Kontrollen an den Fahrzeugen und am Fahrweg dokumentiert, sowie Erfahrungen aus dem Betriebsverhalten festgehalten. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln 5, 6 und 0 aufgeführt. Dabei wurde schwergewichtig zwischen den unterschiedlichen Aspekten von Rad und Schiene unterschieden.

Die Betriebserprobung dauert bis Ende Oktober 2022 und umfasst damit die unterschiedlichen Bedingungen und Einflüsse aus den vier Jahreszeiten.

5. Messungen / Überwachung und Resultate zum Radverschleiss

Um die Auswirkung der SKK auf das Rad auswerten zu können, werden die verschiedenen erfassten Werte im Zusammenhang mit der SKK untersucht. Zu den erfassten Werten gehören der abrasive Radverschleiss an den Fahrflächen (Laufflächen und Spurkränze) von Trieb- und Laufrädern der Shuttle (Fahrzeuge BDeh 4/8, Kapitel 5.1), das Verhalten der Radprofile (Kapitel 5.2) und die Fahrflächenfehler an den Rädern über den Radumfang (Kapitel 0). Die Messergebnisse beziehen sich auf die Shuttle – Fahrzeuge (2051 bis 2054), da nur diese auf der Strecke Täsch – Zermatt und damit ausschliesslich in den konditionierten Abschnitten verkehren. Inwieweit sich die Konditionierung auf den Verschleiss der Räder an den übrigen Fahrzeugen auswirkt, ist nicht Gegenstand der Untersuchungen.

5.1. Abrasive Radverschleiss an den Fahrflächen von Trieb- und Laufrädern

Nachfolgend werden die Beobachtungen und Messungen an den Trieb- und Laufradsätzen der Shuttle beschrieben. Beim Verschleiss wird einerseits zwischen demjenigen an den Spurkränzen und andererseits demjenigen an den Fahrflächen unterschieden. Die Beurteilung an den Spurkränzen betrifft die Fahrsicherheit und berücksichtigt deren Höhen (S_h), Dicken (S_d) und Spurkranzflankenformen (q_R). Die Beurteilung an den Fahrflächen betrifft die Wirtschaftlichkeit und berücksichtigt die laufleistungsabhängigen Abnahmen der Raddurchmesser und die Entwicklung der Durchmesserdifferenzen.

Es ist davon auszugehen, dass bei der MGB unter der Voraussetzung von richtig funktionierender Spurkranzschmierung primär die Schädigungen an den Fahrflächen der Räder und die Entwicklungen bei den Raddurchmessern massgebende Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit sind. Die Bewertung der Versuchsergebnisse erfolgt deshalb anhand des Indikators Laufleistung in km pro 1mm Reduktion Raddurchmesser (vgl. Kapitel 5.1.2). Um die Signifikanz der durch SKK bewirkten Veränderung aufzuzeigen, werden für jedes Fahrzeug Messergebnisse aus der Zeit vor der Betriebserprobung mit denjenigen während der Betriebserprobung miteinander verglichen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuge vor und während der Betriebserprobung bei den Triebradsätzen (TRZ) mit unterschiedlichen Radwerkstoffen und in einem Fall mit unterschiedlichen nominellen Radprofilen im Einsatz waren (vgl. Tabelle 1). Die Laufradsätze verfügen über Vollräder und sind mit dem Radwerkstoff ER7 ausgerüstet. Auf den Einfluss der unterschiedlichen Radwerkstoffe wird unten eingegangen.

Fahrzeug	Radprofil ohne SKK	Radprofil mit SKK	Radwerkstoff TRZ ohne SKK	Radwerkstoff TRZ mit SKK
2051	W98	W98	B5	KVR 600
2052	W98	W98	Exzellent	B7T
2053	EV02	W98	B6	B6T
2054	Keine Daten	W98	Keine Daten	KVR 600

Tabelle 1: Übersicht Ausrüstung der Fahrzeuge vor (ohne SKK) und während Betriebserprobung (mit SKK)

5.1.1. Abmessungen Spurkranz

Die Abbildung 6 und die Abbildung 7 zeigen die Abmessungen an den Spurkränzen aller Räder von allen an der Betriebserprobung beteiligten Shuttle - Fahrzeugen. Es handelt sich dabei um den Zustand im Monat Mai 2022 und deren Entwicklung seit Beginn der Reprofilierung bei Beginn der Betriebserprobung mit SKK im Oktober 2021. Wie weiter unten gezeigt wird, fand die Reprofilierung der einzelnen Fahrzeuge zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Oktober 2021 statt. Bis zum Beginn der Betriebserprobung (28. Oktober 2021) verkehrten die Fahrzeuge ohne SKK.

Insgesamt lässt sich Folgendes feststellen:

- Die Spurkranzdicken S_d und das q_R -Mass haben sich gegenüber den nominellen Abmessungen nur sehr wenig verändert. In der Tendenz haben sich die Spurkranzdicken leicht vergrößert und bewegen sich zum Teil leicht über dem oberen Grenzmass. Die Entwicklung dieser Grösse sollte deshalb weiter beobachtet werden. Auch beim q_R -Mass ist eine leichte Vergrößerung feststellbar. Für dieses Mass wird jedoch in den Regelwerken kein oberes Grenzmass angegeben. Diese Feststellungen betreffen sowohl die Laufradsätze als auch die Triebradsätze.
- Bei den Spurkranzhöhen S_h ist die Tendenz leicht steigend, was durch den Verschleiss der Laufflächen bedingt ist. Sie bewegen sich jedoch weit entfernt vom oberen Grenzwert. Die Räder verfügen aus diesem Gesichtspunkt über einen sehr grossen Verschleissvorrat. Es ist daher davon auszugehen, dass die Entwicklung der Lebensdauer der Räder kaum vom Erreichen der maximalen Spurkranzhöhe S_h abhängig ist, sondern durch andere Einflussparameter bestimmt wird.
- Die seitlichen Auswalgungen S sind unabhängig vom verwendeten Radwerkstoff marginal und ebenfalls weit entfernt vom oberen Grenzwert.
- Die Durchmesserunterschiede der jeweils beiden Räder derselben Radsätze sind zum Teil erheblich. Dieser Sachverhalt bedarf jedoch einer weitergehenden Vertiefung aufgrund von laufftechnischen Untersuchungen im Projekt P3 (Rad – Schiene).

Shuttle 2051, 11-05-2022

Dimensionen sortiert nach Objekten														
Objekt	Radprofil	Berechne_DDiff_Bogie					Berechne_DDiff_Coach			Radprofil				
		DDiff1	DDA1	DDA2	DDD1	DDD2	DDW1	AR	BR	PH	qR	S	Sd	Sh
LDG-Radsatz_1	Radprofil-1L							125,16	0,00	7,72	0,14	26,99	26,07	
	Radprofil-1R							124,96	0,00	7,75	0,08	26,73	26,40	
	Durchmesser-1L													674,15
	Durchmesser-1R													673,82
	D-Diff-1		0,33											
LDG-Radsatz_2	Radinnenabstand_Achse_1						934,55							
	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	26,25		
	Durchmesser-2L												673,55	
	Durchmesser-2R												673,37	
LDG-Radsatz_3	D-Diff-2		0,19											
	DDiffLauf1+2			0,33										
	Radinnenabstand_Achse_2						934,64							
	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		
TDG-Radsatz_3	Durchmesser-3L												780,54	
	Durchmesser-3R												781,34	
	D-Diff-3		0,80											
	Radinnenabstand_Achse_3						933,64							
	Radprofil-4L						125,58	0,00	7,80	0,34	26,85	28,43		
TDG-Radsatz_4	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						934,08							
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												781,87	
	Durchmesser-5R												782,57	
	D-Diff-5		0,70											
TDG-Radsatz_6	Radinnenabstand_Achse_5						934,35							
	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	
LDG-Radsatz_9	D-Diff-6		0,72											
	DDiffTrieb			2,00	1,17	2,50								
	Radinnenabstand_Achse_6						934,36							
	Radprofil-8L						125,16	0,00	7,75	0,08	26,43	28,40		
	Radprofil-8R						124,91	0,00	7,39	0,00	25,76	28,27		
LDG-Radsatz_10	Durchmesser-8L												665,03	
	Durchmesser-8R												664,78	
	D-Diff-9		0,25											
	Radinnenabstand_Achse_9						934,59							
	Radprofil-10L						125,15	0,00	7,73	0,06	26,55	28,37		
LDG-Radsatz_10	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											
	DDiffLauf9+10			0,11										
Radinnenabstand_Achse_10						934,37								

Shuttle 2052, 24-05-2022

Dimensionen sortiert nach Objekten														
Objekt	Radprofil	Berechne_DDiff_Bogie					Berechne_DDiff_Coach			Radprofil				
		DDiff1	DDA1	DDA2	DDD1	DDD2	DDW1	AR	BR	PH	qR	S	Sd	Sh
LDG-Radsatz_1	Radprofil-1L							125,20	0,00	8,00	0,23	27,08	29,06	
	Radprofil-1R							124,90	0,00	8,06	0,00	27,03	29,11	
	Durchmesser-1L													680,76
	Durchmesser-1R													680,74
	D-Diff-1		0,02											
LDG-Radsatz_2	Radinnenabstand_Achse_1						934,27							
	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	
TDG-Radsatz_3	D-Diff-2		0,03											
	DDiffLauf1+2			0,02										
	Radinnenabstand_Achse_2						934,85							
	Radprofil-3L						124,98	0,00	8,12	0,18	26,76	29,48		
	Radprofil-3R						125,05	0,00	7,94	0,00	26,01	28,51		
TDG-Radsatz_4	Durchmesser-3L												790,62	
	Durchmesser-3R												792,48	
	D-Diff-3		1,87											
	Radinnenabstand_Achse_3						935,06							
	Radprofil-4L						125,08	0,00	8,13	0,11	26,91	29,30		
TDG-Radsatz_5	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_6	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											
TDG-Radsatz_6	Radinnenabstand_Achse_5						934,86							
	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	
LDG-Radsatz_9	D-Diff-6		0,94											
	DDiffTrieb			2,14	1,62	2,51								
	Radinnenabstand_Achse_6						934,59							
	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		
LDG-Radsatz_10	Durchmesser-9L												680,97	
	Durchmesser-9R												680,93	
	D-Diff-9		0,03											
	Radinnenabstand_Achse_9						934,57							
	Radprofil-10L						124,92	0,00	7,94	0,19	27,10	28,96		
LDG-Radsatz_10	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											
	DDiffLauf9+10			0,63										
Radinnenabstand_Achse_10						934,32								

Abkürzung	Bezeichnung Radsatz Typ A	Mass [mm]	Neuzustand unbelastet		Im Betrieb unter Last	
			Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]	Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]
S _m	Spurmass	989	0		1	-14
A _R	Radrückenabstand	935	0	-1	1	-2
b	Radbreite	125	1	-1	5	-3
S _d	Spurkranzdicke	27	0		0	-7
S _h	Spurkranzhöhe	28		0	10	0
q _R	q _R -Mass	7.23	-	-	-	4.5

Abbildung 6, Abmessungen der Spurkränze bei der letzten Messung im Mai 2022 (Shuttle 2051 & 2052)

Shuttle 2053, 30-05-2022												Shuttle 2054, 18-05-2022															
Dimensionen sortiert nach Objekten												Dimensionen sortiert nach Objekten															
		Berechne_DDiff_Bogle	Berechne_DDiff_Coach	Radinnenabst.	AR	BR	PH	qR	S	Sd	Sh	Lfk			Berechne_DDiff_Bogle	Berechne_DDiff_Coach	Radinnenabst.	AR	BR	PH	qR	S	Sd	Sh	Lfk		
LDG-Radsatz_1	Radprofil-1L					124,98	0,00	7,46	0,11	26,67	28,67																
	Radprofil-1R					125,21	0,00	7,72	0,15	26,92	29,07																
	Durchmesser-1L											671,43															
	Durchmesser-1R											670,35															
	D-Diff-1	1,08																									
	Radinnenabstand_Achse_1				934,37																						
LDG-Radsatz_2	Radprofil-2L					125,03	0,00	7,25	0,00	26,61	28,10																
	Radprofil-2R					125,05	0,00	7,57	0,06	26,66	28,43																
	Durchmesser-2L											670,00															
	Durchmesser-2R											669,41															
	D-Diff-2	0,60																									
	DDiffLauf1+2		1,08																								
	Radinnenabstand_Achse_2				934,44																						
TDG-Radsatz_3	Radprofil-3L					125,23	0,00	7,38	0,23	26,31	29,01																
	Radprofil-3R					125,02	0,00	7,86	0,13	26,21	29,18																
	Durchmesser-3L											777,89															
	Durchmesser-3R											777,65															
	D-Diff-3	0,24																									
	Radinnenabstand_Achse_3				935,94																						
TDG-Radsatz_4	Radprofil-4L					125,04	0,00	7,86	0,06	26,23	29,08																
	Radprofil-4R					124,99	0,00	7,22	0,19	25,92	30,06																
	Durchmesser-4L											773,22															
	Durchmesser-4R											771,61															
	D-Diff-4	1,61																									
	Radinnenabstand_Achse_4				935,63																						
TDG-Radsatz_5	Radprofil-5L					125,31	0,00	7,32	0,19	26,32	29,49																
	Radprofil-5R					125,36	0,00	7,76	0,00	25,95	28,65																
	Durchmesser-5L											774,51															
	Durchmesser-5R											775,63															
	D-Diff-5	1,12																									
	Radinnenabstand_Achse_5				936,15																						
TDG-Radsatz_6	Radprofil-6L					125,11	0,00	8,22	0,10	26,85	29,27																
	Radprofil-6R					125,12	0,00	7,98	0,34	26,85	29,58																
	Durchmesser-6L											775,29															
	Durchmesser-6R											774,77															
	D-Diff-6	0,53																									
	DDiffTrieb			8,28	1,12	8,28																					
	Radinnenabstand_Achse_6				934,84																						
LDG-Radsatz_9	Radprofil-9L					126,03	0,00	7,51	0,00	24,88	28,58																
	Radprofil-9R					125,40	0,00	7,09	0,00	24,54	28,81																
	Durchmesser-9L											644,68															
	Durchmesser-9R											644,55															
	D-Diff-9	0,13																									
	Radinnenabstand_Achse_9				934,56																						
LDG-Radsatz_10	Radprofil-10L					125,53	0,00	7,72	0,00	26,44	28,79																
	Radprofil-10R					125,96	0,00	6,85	0,00	26,15	28,72																
	Durchmesser-10L											644,84															
	Durchmesser-10R											644,94															
	D-Diff-10	0,10																									
	DDiffLauf9+10		0,10																								
	Radinnenabstand_Achse_10				934,94																						
LDG-Radsatz_10	Radprofil-10L					125,15	0,00	8,29	0,05	27,43	29,49																
	Radprofil-10R					125,18	0,00	6,98	0,00	27,12	29,23																
	Durchmesser-10L											650,29															
	Durchmesser-10R											650,80															
	D-Diff-10	0,51																									
	DDiffLauf9+10			0,51																							
	Radinnenabstand_Achse_10				933,96																						

Abkürzung	Bezeichnung Radsatz Typ A	Mass [mm]	Neuzustand unbelastet		Im Betrieb unter Last	
			Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]	Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]
S _m	Spurmass	989	0		1	-14
A _r	Radrückenabstand	935	0	-1	1	-2
b	Radbreite	125	1	-1	5	-3
S _s	Spurkranzdicke	27	0		0	-7
S _h	Spurkranzhöhe	28		0	10	0
q _k	q _k -Mass	7.23	-	-	-	4.5

Abbildung 7, Abmessungen der Spurkränze bei der letzten Messung im Mai 2022 (Shuttle 2053 & 2054)

5.1.2. Spezifischen Reduktionen der Raddurchmesser ΔD_{LCC}

Die Abbildung 8 und die Abbildung 9 zeigen die spezifischen Reduktionen der Raddurchmesser ΔD_{LCC} (erreichte Laufleistung [km] pro 1mm Durchmesserreduktion) bei allen Shuttle- Fahrzeugen unterschieden nach linken und rechten Rädern, 1mm

- ohne und mit Anwendung von SKK (beim Shuttle 2054 standen keine Messwerte vor Anwendung SKK zur Verfügung),
- Laufradsätzen und Triebradsätzen,
- unterschiedlichen Stahlqualitäten bei den Rädern.

In beiden Abbildungen sind die spezifischen Durchmesserreduktionen über die gesamte Betrachtungsperiode und nicht zwischen den einzelnen Messungen ermittelt worden. Für die Fahrzeuge der Betriebserprobung mit SKK wurden die auf der Unterflurdrehbank gemessenen Raddurchmesser und die Fahrzeuglaufleistung zu Beginn der Erprobungen (bei der Reprofilierung) und bei der letzten verfügbaren Messung der Erfassungstabelle der MGB entnommen. Aus diesen Messergebnissen wurde dann der Indikator Laufleistung pro 1mm Durchmesserabtrag berechnet. Für die Ermittlung der Indikatoren vor der Betriebserprobung mit SKK wurde ein analoges Vorgehen gewählt. Wie weiter unten gezeigt wird, muss bei derartigen Auswertungen sichergestellt werden, dass die dafür verwendeten Daten statistisch der gleichen Grundgesamtheit entsprechen. In der Abbildung 9 für die Laufradsätze und in der Abbildung 10 für die Triebradsätze sind in der Versuchsphase unmittelbar nach der Reprofilierung bis zur darauffolgenden Messung und in der anschliessenden Versuchsphase unterschiedliche Verläufe bei der Durchmesserreduktion festzustellen. Aufgrund dieses Sachverhaltes muss davon ausgegangen werden, dass es sich bei diesen beiden Versuchsphasen im statistischen Sinne um unterschiedliche Grundgesamtheiten handelt. Mit Ausnahme beim Fahrzeug 2053 haben die übrigen Fahrzeuge in der ersten Versuchsphase unmittelbar nach der Reprofilierung bis zum Versuchsbeginn einen signifikanten Teil der Laufleistung auf der noch nicht konditionierten Strecke zurückgelegt. Dies erklärt zum Teil den grösseren Radverschleiss bei grösseren Reibwerten Rad / Schiene in dieser Versuchsphase gegenüber dem geringeren Radverschleiss bei den durch Konditionierung deutlich reduzierten Reibwerten Rad / Schiene. Für die endgültige Bewertung des Radverschleisses als Folge der Konditionierung wurde daher die erste Versuchsphase nicht berücksichtigt.

Die Abbildung 8 zeigt ΔD_{LCC} einerseits vor der Reprofilierung ohne SKK sowie andererseits nach der Reprofilierung mit SKK bis zu den letzten vorliegenden Messungen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden in den einzelnen Diagrammen bei allen Fahrzeugen die gleichen Massskalen für die Ordinaten gewählt (Maximum 30'000km).

In der Periode vor der Betriebserprobung zeigen sich bei den Laufradsätzen höhere Laufleistungen als bei den Triebradsätzen, wobei dies bei Shuttle 2052 weniger ausgeprägt ist. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass beim Shuttle

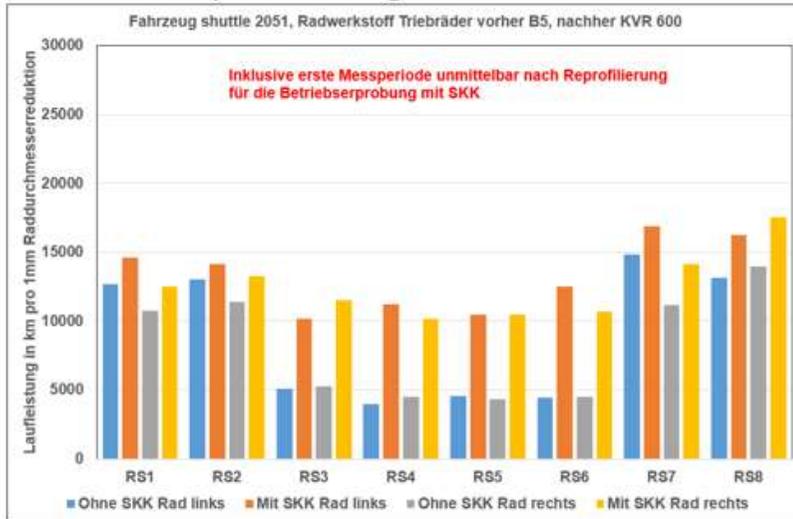
- der Radstand bei den Laufradsätzen deutlich kürzer ist als bei den Triebradsätzen (Laufradsätze 1800mm, Triebradsätze 2540mm) was bei den Triebradsätzen in den Bögen einen deutlich grösseren Anlaufwinkel Rad / Schiene zur Folge hat;
- Die Brutoradlast bei den Triebradsätzen im Vergleich zu den Laufradsätzen rund doppelt so gross ist.

Für den Shuttle 2054 liegen in dieser Periode keine Messwerte vor. Bei den Triebradsätzen scheint die Leistungsfähigkeit des Radwerkstoffes B6 günstiger zu sein als bei den beiden Radwerkstoffen Exzellent und B5. Beim Shuttle 2054 scheinen die Räder beim Laufradsatz 1 über ein ungünstigeres Verschleissverhalten aufzuweisen als die Räder bei den übrigen Laufradsätzen. Für statistisch belastbare Aussagen hinsichtlich der Auswirkung des Radwerkstoffes bei den Triebradsätzen ist jedoch die Grösse der Stichprobe zu klein. Insgesamt steigt der Indikator ΔD_{LCC} bei Verwendung der SKK gegenüber dem Zustand vor der Verwendung von SKK signifikant an.

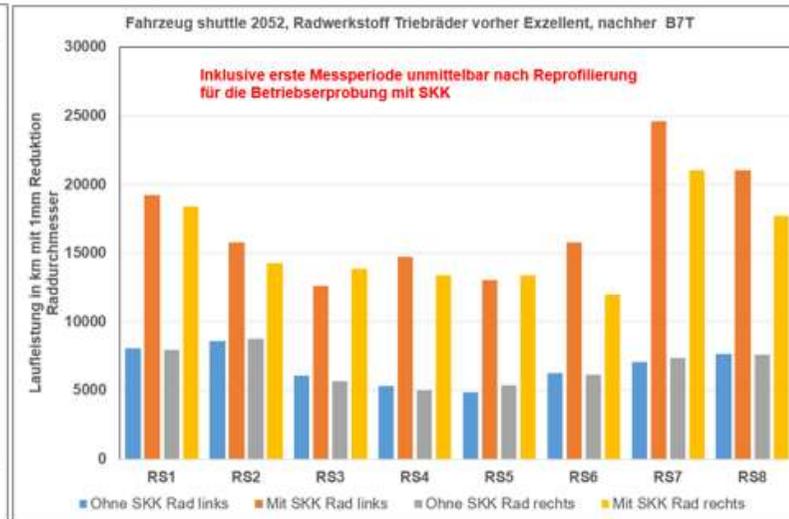
Die Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse von der ersten Messung nach Reprofilierung bis zu den letzten vorliegenden Messungen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden in den einzelnen Diagrammen bei allen Fahrzeugen die gleichen Massskalen für die Ordinaten gewählt (Maximum 60'000km).

Diese Darstellung wurde gewählt, weil sich nach der Reprofilierung und in der ersten Periode der Messwerterfassung ein anderer Verschleisstrend eingestellt hat als in den daran anschliessenden Perioden. Bei allen Radsätzen steigt der Indikator bei Verwendung von SKK gegenüber dem unkonditionierten Zustand signifikant an. Bei einzelnen Laufrädern liegen grösstenteils sehr hohe Leistungen vor. Auch bei den Triebradsätzen zeigt sich mit einzelnen Ausnahmen ein eindeutiger Trend hin zu deutlich höheren Leistungen. Mit Anwendung von SKK zeigt sich auch beim Shuttle 2054 ein mit den übrigen Fahrzeugen vergleichbares Verhalten. Wie schon oben beschrieben, weicht das Verhalten beim Laufradsatz 1 deutlich von demjenigen an den anderen Laufradsätzen ab.

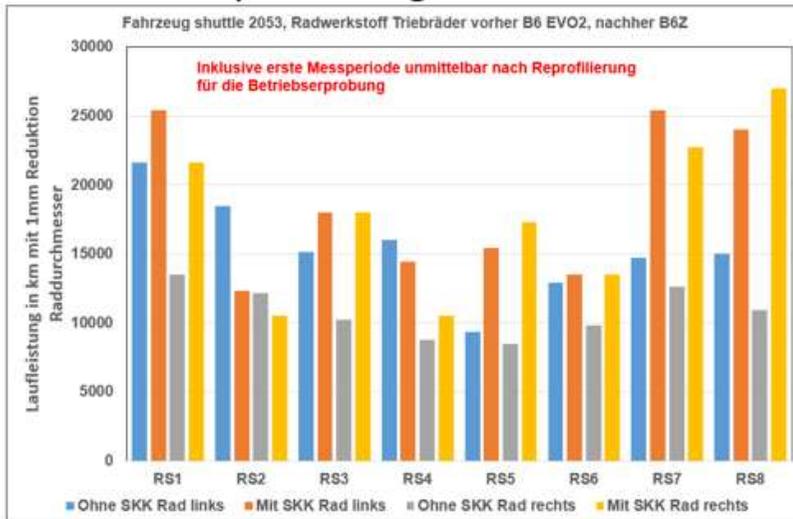
Reprofilierung am 07.10.2021



Reprofilierung am 11.10.2021



Reprofilierung am 22.10.2021



Reprofilierung 01.10.2021

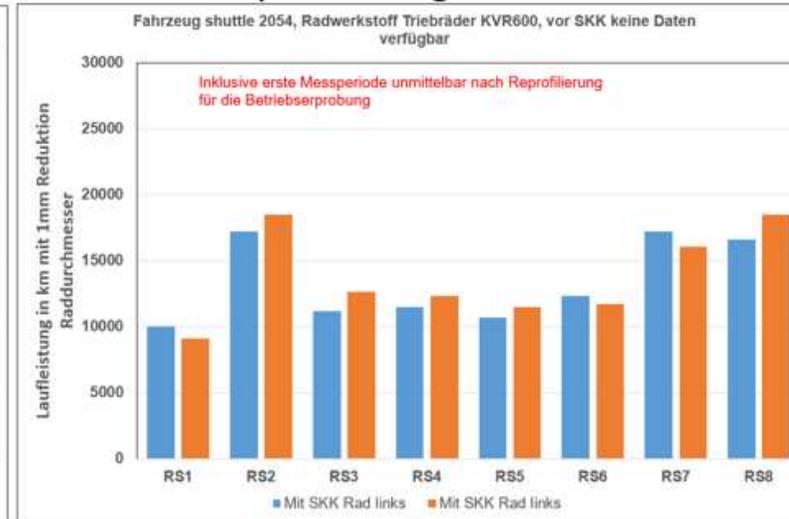
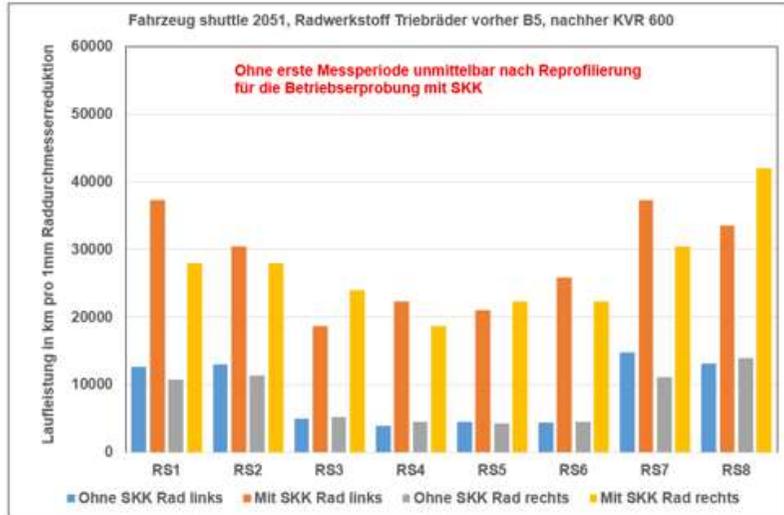
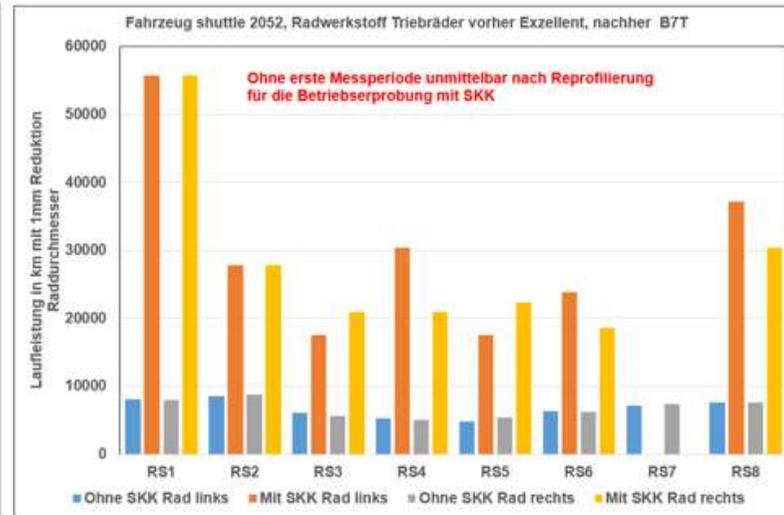


Abbildung 8: Indikatoren für den spezifischen Raddurchmesserabtrag ΔD_{LCC} inklusive erste Messperiode

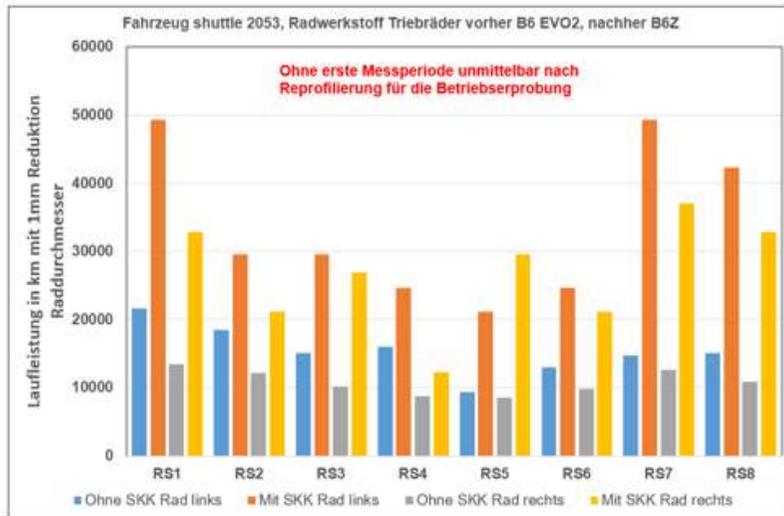
Reprofilierung am 07.10.2021



Reprofilierung am 11.10.2021



Reprofilierung am 22.10.2021



Reprofilierung 01.10.2021

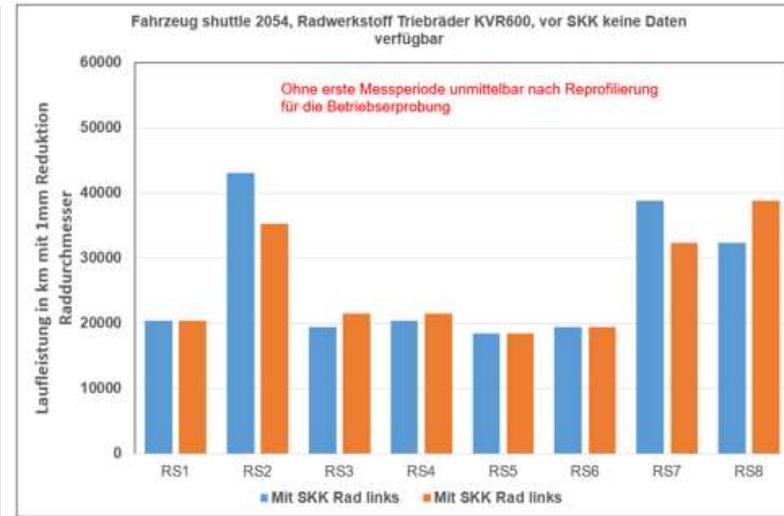


Abbildung 9: Indikatoren für den spezifischen Raddurchmesserabtrag ΔD_{LCC} ohne erste Messperiode

Die Ergebnisse in der Abbildung 8 (inkl. erster Messperiode) und Abbildung 9 (exkl. erste Messperiode) deuten auf einen ähnlichen Trend der Leistungsfähigkeit bei Anwendung von SKK hin. Bei den Indikatoren in Abbildung 9 stellen sich jedoch bei allen Fahrzeugen deutlich höhere Werte ΔD_{LCC} ein als bei denjenigen in Abbildung 8. Die Abbildung 10 (Laufräder) und die Abbildung 11 (Triebräder) zeigen die Ursachen für dieses unterschiedliche Verhalten. In beiden Abbildungen sind für alle Fahrzeuge alle Messwerte aller Räder über die gesamte Versuchsperiode aufgetragen.

Die Abbildung 10 enthält alle Messungen an den Laufradsätzen oben unter Berücksichtigung der ersten Messperiode und unten alle Messungen ohne diejenigen der ersten Messperiode. Bei allen Fahrzeugen stellt sich insbesondere in der ersten Messperiode (ohne SKK) eine steilere Trendlinie bei der Durchmesserreduktion im Vergleich zu denjenigen in den darauffolgenden Messperioden (mit SKK) ein. Unten in der Abbildung sind zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes die entsprechenden Diagramme ohne Berücksichtigung der ersten Messperiode dargestellt.

In Abbildung 11 sind die entsprechenden Ergebnisse für die Triebradsätze dargestellt. Es zeigt sich ein mit den Laufradsätzen vergleichbares Verhalten. Ein leicht anderer Trend ist beim Shuttle 2053 in der letzten Messperiode zu beobachten. Diese Messperiode fällt bei diesem Fahrzeug mit dem bei den Reibwertmessungen festzustellenden Anstieg des Reibwertes bei den Tribometer Messungen zusammen (siehe Abbildungen zu den Reibwertmessungen in Kapitel 6.2).

Die Vergleiche des Indikators Rad-Durchmesserreduktion zeigen, wie empfindlich dieser auf kleine Veränderungen im Verschleissabtrag reagiert. Die signifikante Veränderung in der ersten Versuchsphase hat einen sehr grossen Einfluss auf die Bewertung der Ergebnisse über die gesamte Versuchsperiode. Die Ursache dafür liegt, wie aus der Statistik bekannt, in der Vermischung von unterschiedlichen physikalischen Grundgesamtheiten. Aus der Abbildung 10 und Abbildung 11 kann der Zeitpunkt der Reprofilierung entnommen werden. Diese erfolgte bei den verschiedenen Fahrzeugen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Aus Abbildung 12 kann entnommen werden, dass die Betriebserprobung mit konditionierter Schiene in den letzten Tagen des Monats Oktober 2021 begonnen hat (siehe Tribometermessungen vom 28.10.2021). Mit Ausnahme des Shuttle 2053 erfolgte die Reprofilierung jedoch in der ersten Hälfte des Monats Oktober. Die Shuttle 2051, 2052 und 2054 verkehrten daher in der ersten Phase nach der Reprofilierung auf der nicht konditionierten Strecke. Wie den Diagrammen in Abbildung 10 und in Abbildung 11 entnommen werden kann, reduzierte sich bei diesen Fahrzeugen der Raddurchmesser in dieser Phase deutlich stärker als in den darauffolgenden Phasen. Besonders deutlich ist dieser Einfluss beim Vergleich des Verhaltens mit dem Fahrzeug 2053 zu sehen, welches erst am 22. Oktober reprofiliert wurde. Dieses Ergebnis zeigt aber auch, dass Unterbrüche oder Störungen bei der Konditionierung sich unmittelbar auf den Verschleiss auswirken. Es ist deshalb wichtig, die Zuverlässigkeit des Systems dauerhaft sicherzustellen.

Das hier beobachtete Verhalten ist grösstenteils auf den Anteil der Laufleistung auf nicht konditionierter Schiene zurückzuführen. Bei anderen Betriebserprobungen mit unterschiedlichen Radwerkstoffen (vgl. Komet 2021 / MGB) zeigte sich jedoch auch, dass in der ersten Periode nach der Reprofilierung ein grösseres ΔD_{LCC} an den Laufflächen der Räder aufgetreten ist als im nachfolgenden Verlauf. Worauf dieses Verhalten zurückzuführen ist, konnte bisher nicht erklärt werden. Es wird vermutet, dass dieser Effekt auf die Materialverfestigung der Radlauffläche durch die Betriebsbeanspruchung in der ersten Phase nach der Reprofilierung zurückzuführen ist.

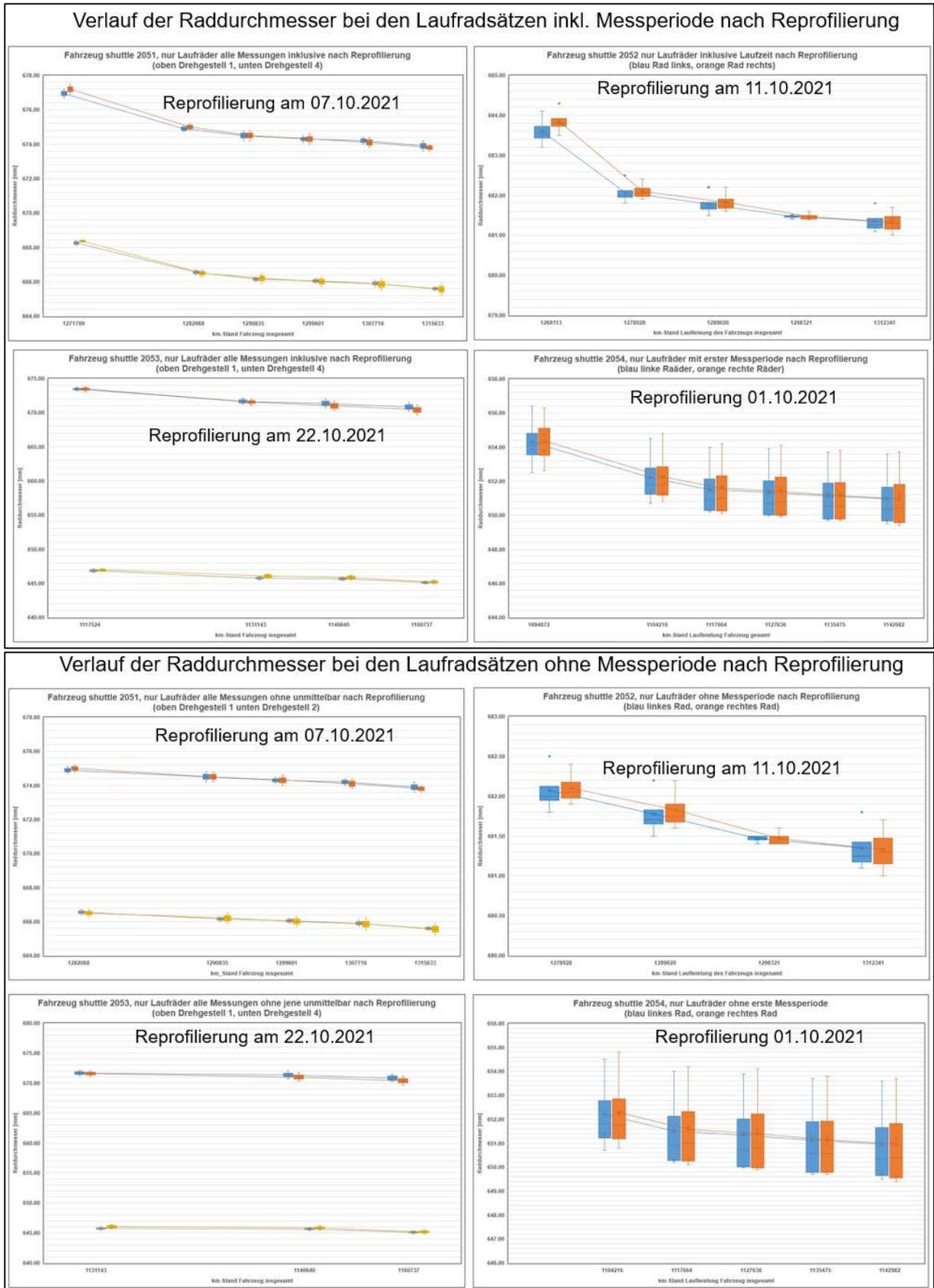


Abbildung 10: Verlauf der Raddurchmesser bei den Laufradsätzen inkl. erste Messperiode nach Reprofilierung oben und ohne erste Messperiode nach Reprofilierung unten

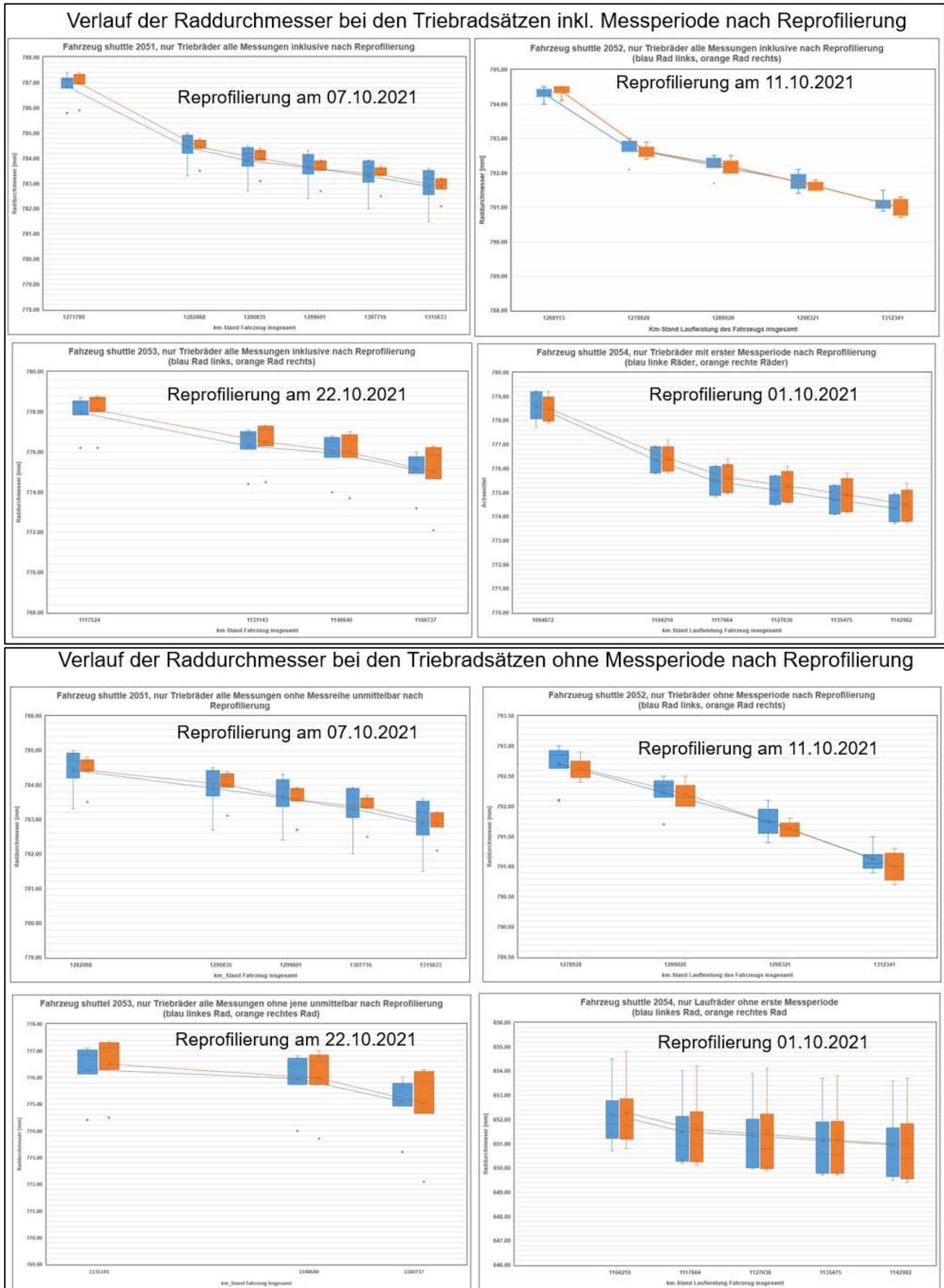


Abbildung 11: Alle Messungen Triebbradsätze ohne erste Messperiode nach Reprofilierung

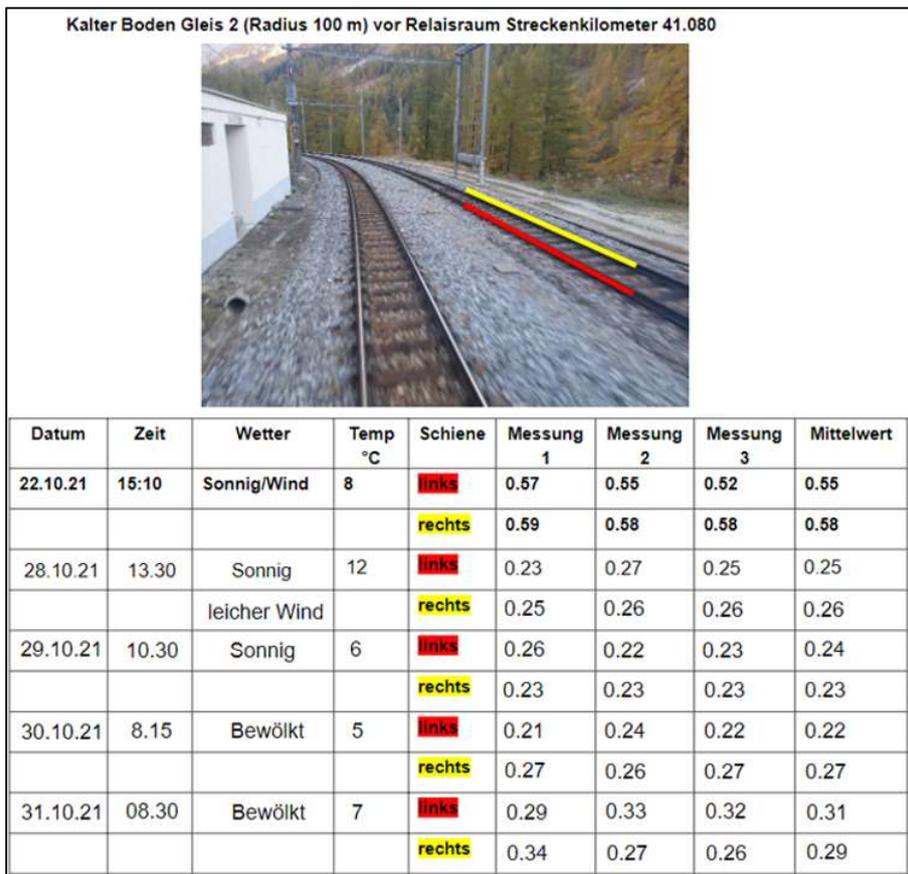


Abbildung 12: Tribometer Messungen bei Beginn der Betriebserprobung täglich

5.1.3. Zustand der Fahrflächen an den Rädern über den Radumfang

Die Mitarbeiter der MGB wurden im Vorfeld des Beginns der Betriebserprobung für die visuelle Kontrolle der Räder und insbesondere auf die Beurteilung des Laufflächenzustandes geschult. Zudem wurde festgelegt, wie die Beschriftung für die Kennzeichnung der Räder der einzelnen Fahrzeuge auf deren Fahrflächen markiert bzw. gestaltet werden muss. Abbildung 13 enthält dafür ein Beispiel. Falls umlaufende Beschädigungen auftreten sollten, ist anhand der Teilstriche (Messkreisebenen und links / rechts daneben liegende Teilstriche) möglich, diese zu verorten und Rückschlüsse auf die Ursachen zu ziehen.

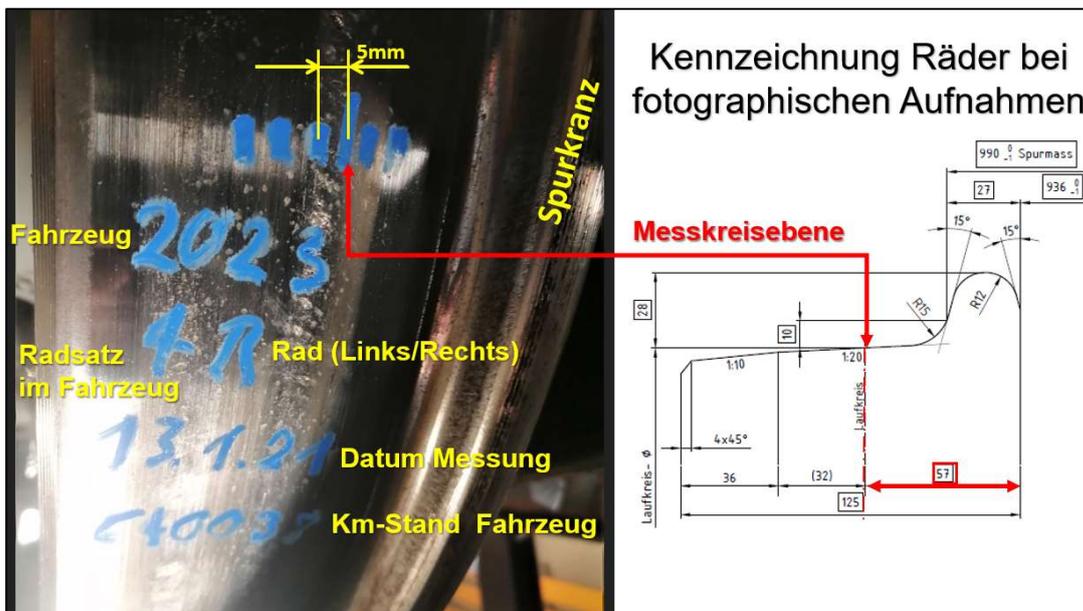


Abbildung 13: Beschriftung der Räder bei der visuellen Begutachtung

Die Tabelle 2 enthält zusätzliche Angaben zu den Rädern der vier Shuttle – Fahrzeuge. Darin sind die bei den Triebradsätzen eingesetzten Radwerkstoffe sowie die seit der letzten Reprofilierung und damit dem Beginn der Betriebserprobung zurückgelegten Laufleistungen aufgeführt.

Fahrzeug Shuttle N°	Radwerkstoff	Laufleistung seit Reprofilierung
2051: Triebradsätze	KVR 600	43844 km
2052: Triebradsätze	B7T	44228 km
2053: Triebradsätze	B6Z	43213 km
2054: Triebradsätze	KVR 600	48110 km

Tabelle 2: Informationen zu den Radsätzen der Shuttle-Fahrzeuge im Mai 2022

In Tabelle 3 bis Tabelle 6 sind die Abbildungen der Radlaufflächen aller Triebräder der einzelnen Shuttle – Fahrzeuge aufgeführt. Die hier abgebildeten Teilbereiche der Räder sind repräsentativ für den gesamten umlaufenden Zustand der Fahrflächen jedes Rades. Darin sind allfällige Einzelfehler über dem Radumfang nicht enthalten. Diese sollten durch die ortsfeste Messstelle im Gleis (Wheel Monitoring System WMS, MüllerBBM, siehe Kapitel 0) oberhalb Täsch erfasst oder aber durch die objektgebundenen Mitarbeiter der MGB gemeldet werden. Nach Aussagen der MGB sind jedoch keine derartigen Schädigungen festgestellt worden, welche auf die Konditionierung der Schienen zurückzuführen sind. Hinsichtlich der umlaufenden Schädigungen an den Rädern ergeben sich die folgenden Feststellungen:

- In Tabelle 3 sind die Zustände der Triebräder beim Shuttle 2051 abgebildet. An drei von insgesamt acht Rädern sind keine Schädigungen vom Typ RCF (Rollkontaktermüdung) an den Fahrflächen festzustellen. An den übrigen Rädern sind grösstenteils leichte bis sehr leichte und bei einem Rad mittlere Schädigungen festzustellen. Bei den leichten Schädigungen sind Oberflächenrisse in jenen Zonen festzustellen, bei denen in einem fortgeschrittenen Stadium die Gefahr zu Ausbildung von Ausbröckelungen besteht. An den Rädern mit Schädigungen sind vorerst keine Massnahmen zu ergreifen. Der Fortschritt der Schädigungen muss jedoch durch weitergehende Beobachtungen verfolgt werden.
- In Tabelle 4 sind die Zustände der Triebräder beim Shuttle 2052 abgebildet. An keinem der Räder sind Schädigungen an den Fahrflächen festzustellen.
- In Tabelle 5 sind die Zustände der Triebräder beim Shuttle 2053 abgebildet. An zwei von insgesamt acht Rädern sind Schädigungen des Typs RCF [11] festzustellen. Bei einem der schadhafte Räder sind leichte Schädigungen (Oberflächenrisse) und beim anderen mittlere Schädigungen festzustellen (leichte Ausbrüche). Auch bei diesen Rädern ist wie beim Shuttle 2051 keine Massnahme, jedoch eine weitere Beobachtung erforderlich.
- In Tabelle 6 sind die Zustände der Triebräder beim Shuttle 2054 abgebildet. An keinem der Räder sind Schädigungen an den Fahrflächen festzustellen.

Insgesamt befinden sich die Räder aller Fahrzeuge visuell in einem sehr guten Zustand. Diese Feststellung gilt unabhängig vom eingesetzten Radwerkstoff.

Zustand Radlauffläche Fahrzeug Shuttle 2051 mit Radwerkstoff KVR 600 am 11.05.2022			
Rad 3 Links Leichte RCF	Rad 3 Rechts Keine Schädigung	Rad 4 Links Mittlere RCF	Rad 4 Rechts Leichte RCF
			
Rad 5 Links Leichte RCF	Rad 5 Rechts Sehr leichte RCF	Rad 6 Links Keine Schädigung	Rad 6 Rechts Keine Schädigung
			

Tabelle 3: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 43'844 km nach der Reprofilierung

Zustand Radlauffläche Fahrzeug Shuttle 2052 mit Radwerkstoff B7T 600 am 24.05.2022			
Rad 3 Links Keine Schädigung	Rad 3 Rechts Keine Schädigung	Rad 4 Links Keine Schädigung	Rad 4 Rechts Keine Schädigung
			
Rad 5 Links Keine Schädigung	Rad 5 Rechts Keine Schädigung	Rad 6 Links Keine Schädigung	Rad 6 Rechts Keine Schädigung
			

Tabelle 4: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 44'228 km nach der Reprofilierung

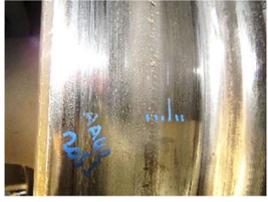
Zustand Radlauffläche Fahrzeug Shuttle 2053 mit Radwerkstoff B6Z am 30.05.2022			
Rad 3 Links Leichte RCF	Rad 3 Rechts Keine Schädigung	Rad 4 Links Keine Schädigung	Rad 4 Rechts Mittlere RCF
			
Rad 5 Links Keine Schädigung	Rad 5 Rechts Keine Schädigung	Rad 6 Links Keine Schädigung	Rad 6 Rechts Keine Schädigung
			

Tabelle 5: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 43'213 km nach der Reprofilierung

Zustand Radlauffläche Fahrzeug Shuttle 2054 mit Radwerkstoff KVR 600 am 19.05.2022			
Rad 3 Links Keine Schädigung	Rad 3 Rechts Keine Schädigung	Rad 4 Links Keine Schädigung	Rad 4 Rechts Keine Schädigung
			
Rad 5 Links Keine Schädigung	Rad 5 Rechts Keine Schädigung	Rad 6 Links Keine Schädigung	Rad 6 Rechts Keine Schädigung
			

Tabelle 6: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 48'110 km nach der Reprofilierung

5.1.4. Zustand der Radlaufflächen in der Querrichtung

5.1.4.1. Tragbild im Querprofil der Räder

Insgesamt wird bei den visuellen Kontrollen der Räder festgestellt, dass sich die Laufflächen in einem sehr guten Zustand befinden. Vereinzelt werden kleine, jedoch zum Teil unscharfe Risse in einem noch näher zu betrachtenden Übergangsbereich (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15)

- zwischen dem dominanten Abrieb durch die Bremssohle und
- demjenigen durch den dominanten Abrieb infolge des schlupfbedingten Kontaktes zwischen Rad und Schiene

festgestellt.

Diese Risse treten in der gleichen Zone über den gesamten Radumfang auf und sind auf Rollkontaktermüdung zurückzuführen. Zum Teil entwickeln sich diese Risse weiter und führen in der Folge zu kleinen Ausbrüchen (siehe Abbildung 16). Von diesem Phänomen sind vor allem die Shuttle 2051 und 2054 betroffen, welche mit den Radwerkstoff KVR 600 ausgerüstet sind. Diese Erscheinung der lokalen Rissbildung mit in der Folge leichten Ausbrüchen wurde auch schon bei der Betriebserprobung mit den B7T und B6Z bei den Kometen beobachtet. Dort scheint sich jedoch ein Gleichgewicht zwischen Schädigung und Verschleiss einzustellen. Bei einer diesbezüglichen «vorbeugenden Reprofilierung» am Kometen 2021 hat sich herausgestellt, dass diese Schädigung schon ab einer Spantiefe von 0.4mm beseitigt ist. Diese Schädigung wurde im Betriebseinsatz durch normalen Verschleiss beseitigt. Dieser Verschleiss fehlt nun offensichtlich als Folge der Konditionierung im Einsatzbereich der Shuttle – Fahrzeuge. Aus diesem Grunde sollten diese Räder weiter beobachtet werden und bei Feststellung von Auffälligkeiten sollte für die Begutachtung ein Sachverständiger beigezogen werden.

Insgesamt stellt sich hier die Frage, warum es zur Ausbildung von Rissen in der beobachteten Zone kommt. Aus vielen Versuchen und Betriebserprobungen mit Verbundstoffsohlen bei den Fahrzeugen des Güterverkehrs (Lärmsanierung durch Umstellung von Graugussbremssohlen auf Verbundstoffbremssohlen) hat sich gezeigt, dass sich die Graugussbremssohlen kaum am Verschleiss der Räder beteiligen und sich in der Folge wegen starkem Eigenverschleiss an die Radlaufflächen anpassen. Es zeigte sich jedoch auch, dass es bei den Verbundstoffbremssohlen unterschiedliche Qualitäten gibt. Diese Bremssohlen verhalten sich sehr verschleissresistent (günstig für deren Lebensdauer), greifen jedoch in der Folge die Radlaufflächen an und verschleissen diese je nach Qualität der Bremssohle mehr oder weniger. Das heisst aber auch, dass sich das Radprofil unter Umständen mehr an die Form der Bremssohle anstatt an die Schiene anpasst. Dieser Aspekt sollte genauer betrachtet werden, da hier Einflüsse auf die Entwicklung der Radprofile und auf die Schädigungen an Radlaufflächen vermutet werden.

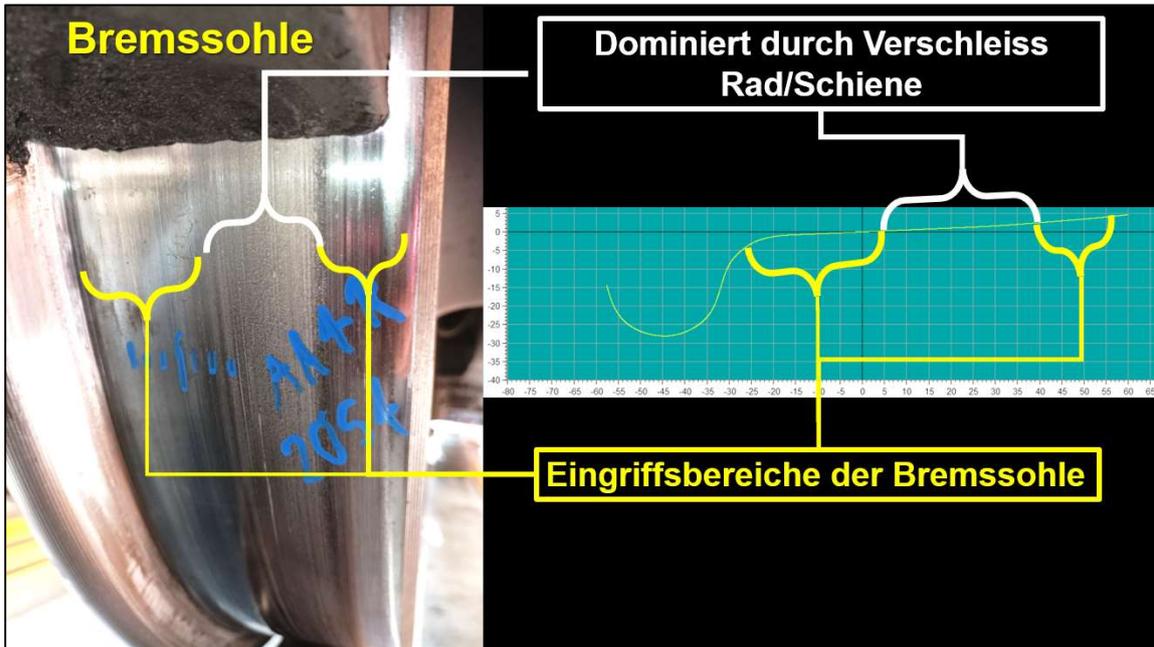


Abbildung 14: Zonen im Querprofil der Räder und deren Verursacher (Bremssohle CoFren C333)

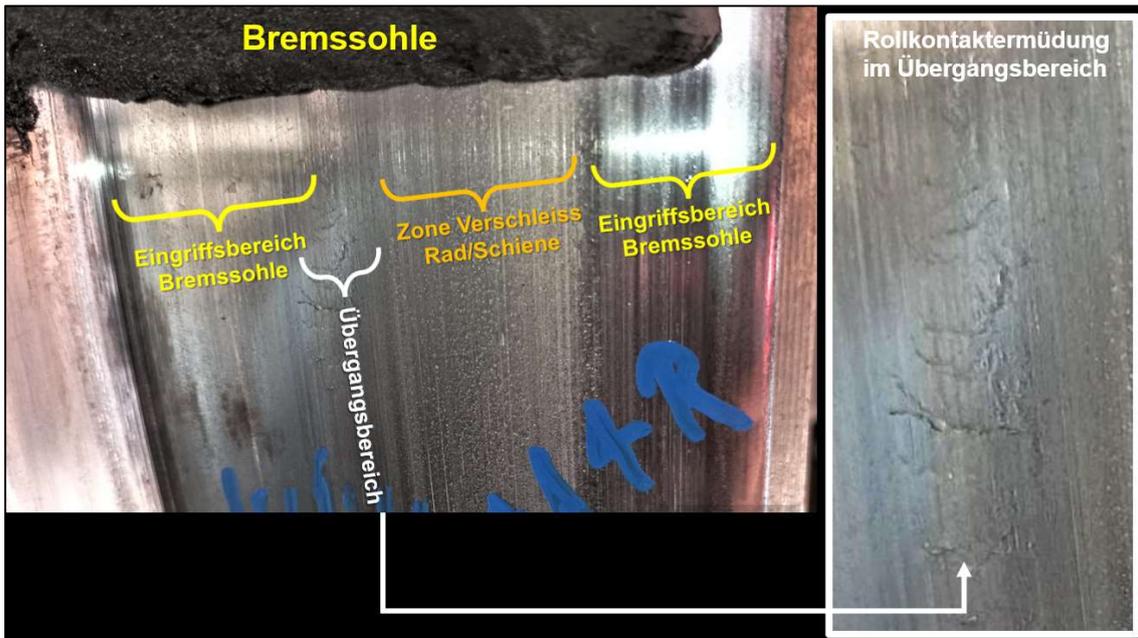


Abbildung 15: Rissbildung im Übergangsbereich zwischen Eingriff Bremssohle (CoFren C333) und Verschleisszone

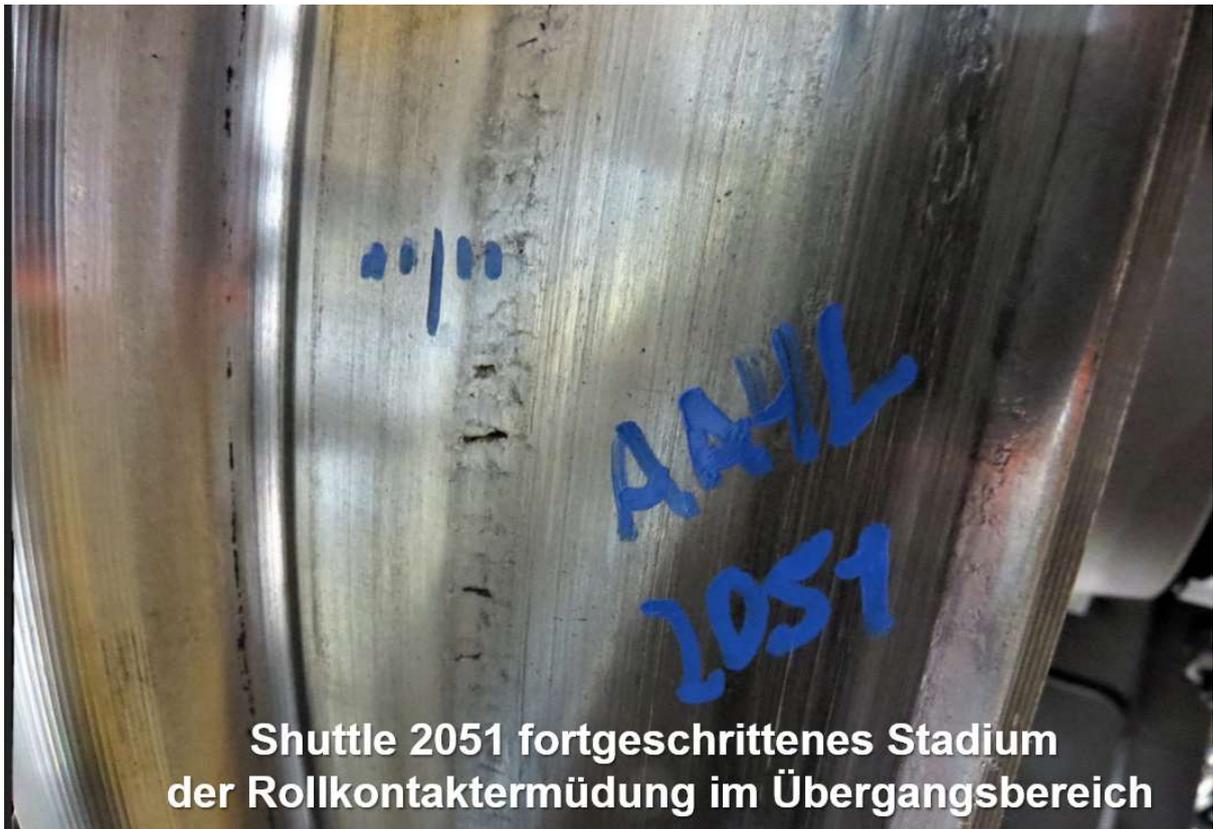


Abbildung 16: Die Risse in der Übergangszone haben sich zu leichten Ausbrüchen entwickelt

Die Abbildung 17 enthält auf der linken Seite die Δr -Verläufe aller Radsätze des Shuttle 2051 43'844km nach Reprofilierung. Auf der rechten Seite ist der Verlauf beim Nominalprofil für den Vergleich im Betriebseinsatz dargestellt. Aufgrund des Vergleiches ist im Betriebseinsatz kaum eine Veränderung gegenüber dem Nominalprofil festzustellen. Zudem ist bei allen Radsätzen ein deckungsgleiches Verhalten festzustellen. Es muss davon ausgegangen werden, dass durch den geringeren Reibwert Rad / Schiene in den engeren Bögen keine Anpassung der Radprofile an die Schienenprofile erfolgt. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass im Bereich gegen die Hohlkehle, welcher für den Verlauf der Δr -Funktion entscheidend ist, ein nicht unwesentlicher Verschleissanteil durch die Einwirkung der Bremssohlen vermutet wird. Zudem ist bei diesem Verlauf der Δr -Funktion in den Bögen bei den vorlaufenden bogenäusseren Rädern Zweipunktkontakt vorhanden (vgl. Abbildung 18).

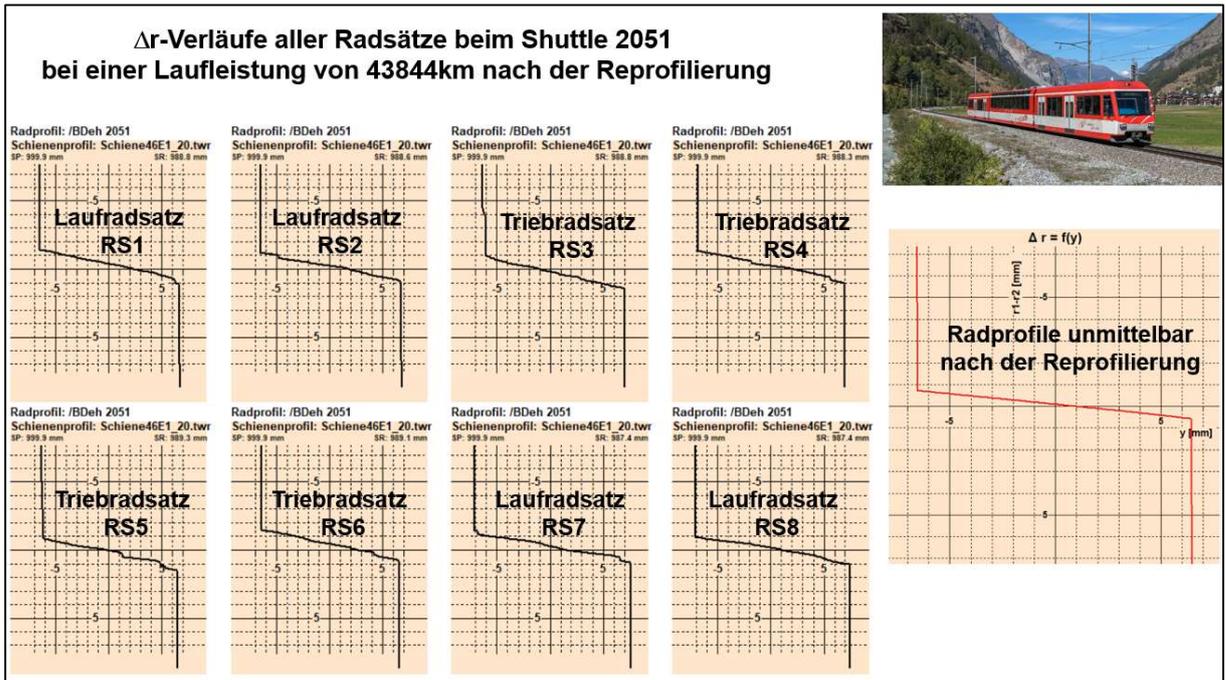


Abbildung 17: Δr -Verläufe des Shuttle 43'844km nach Reprofilierung auf konditionierter Strecke Täsch-Zermatt

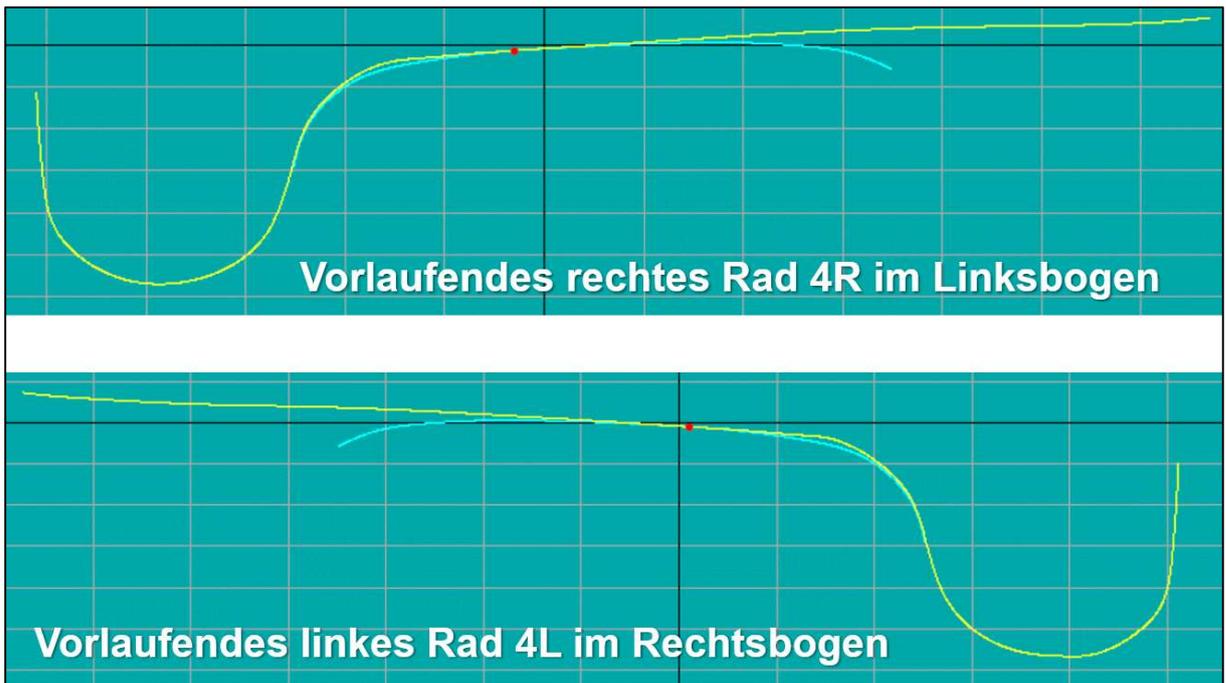


Abbildung 18: Zweipunktberührung bei der Bogenfahrt am Beispiel des 4. Radsatzes (Triebwheelsatz) von Abbildung 17

5.1.4.2. Diskontinuitäten im Querprofil der Räder

Neben den oben aufgeführten Diskontinuitäten in der Radlauffläche wurden bei mehreren Radsätzen wesentlich ausgeprägtere Diskontinuitäten im Bereich der Hohlkehlen festgestellt. Die Abbildung 19 zeigt eine starke Diskontinuität am linken Rad und eine leichtere am rechten Rad des 3. Radsatzes beim Shuttle 2054. In beiden Fällen sind diese Diskontinuitäten auf die Einwirkung der Bremssohlen zurückzuführen. Die Abbildung 20 zeigt die Auswirkung der Diskontinuität am linken Rad, wenn sich dieses mit der bogenäusseren Schiene in einem Rechtsbogen paaren muss. Die hier entstandene Lücke hat grossen Einfluss auf das Bogenlaufverhalten in allen Trassierungsbereichen und lässt sich durch den Verschleiss von Rad und Schiene nicht ausbessern. Hier wäre eine Reprofilierung erforderlich.

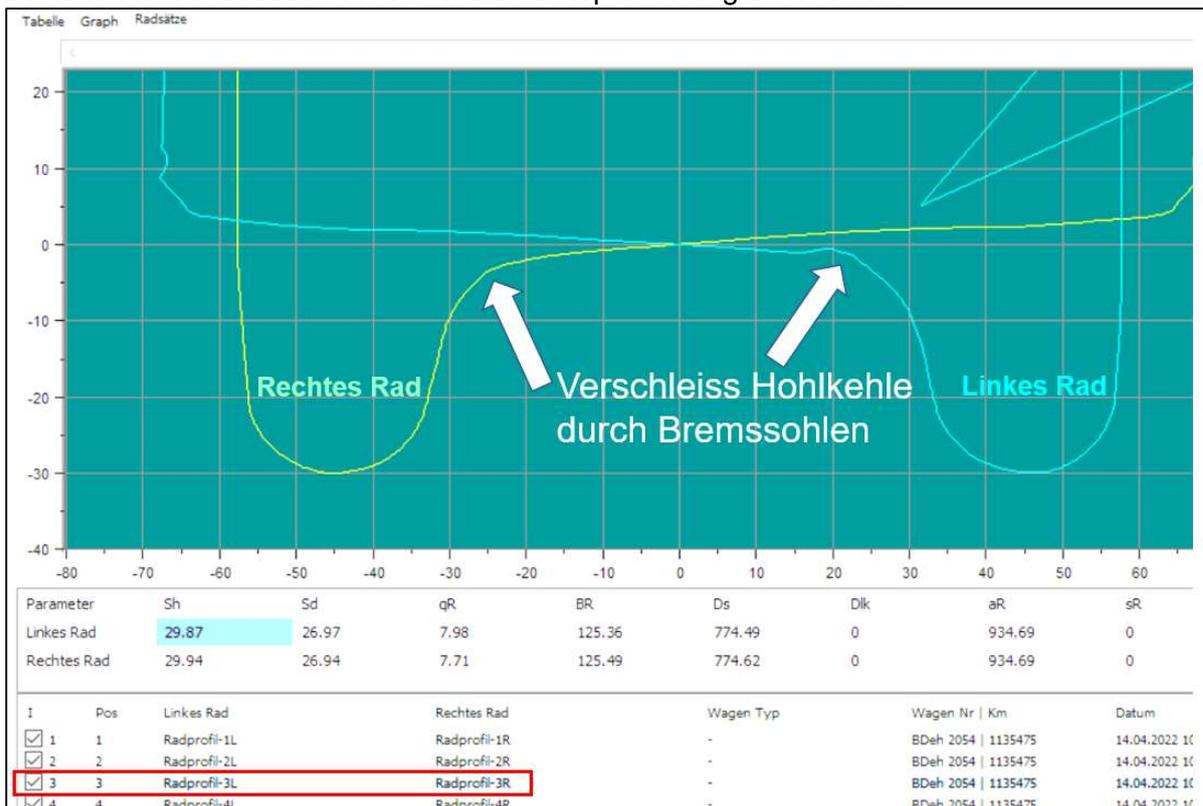


Abbildung 19: Starke Diskontinuität am linken Rad und leichte Diskontinuität am rechten Rad von Radsatz 3 beim Shuttle 2054 (verursacht durch die Interaktion Rad / Bremssohle)

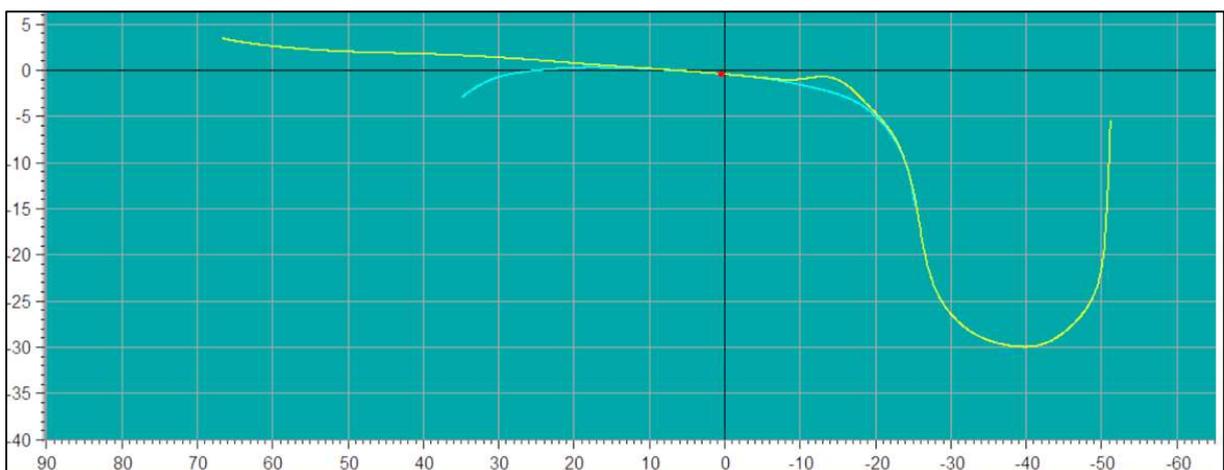


Abbildung 20: Situation der Berührung Rad / Schiene, wenn Radsatz vorlaufend ist in einem Rechtsbogen

Auch beim 4. Radsatz des Shuttle 2054 zeigen sich leichte Diskontinuitäten im Bereich der Hohlkehlen beider Räder (Abbildung 21). Auch diese wirken sich auf den Bogenlauf aus und sind auf die Interaktion Rad / Bremssohle zurückzuführen.

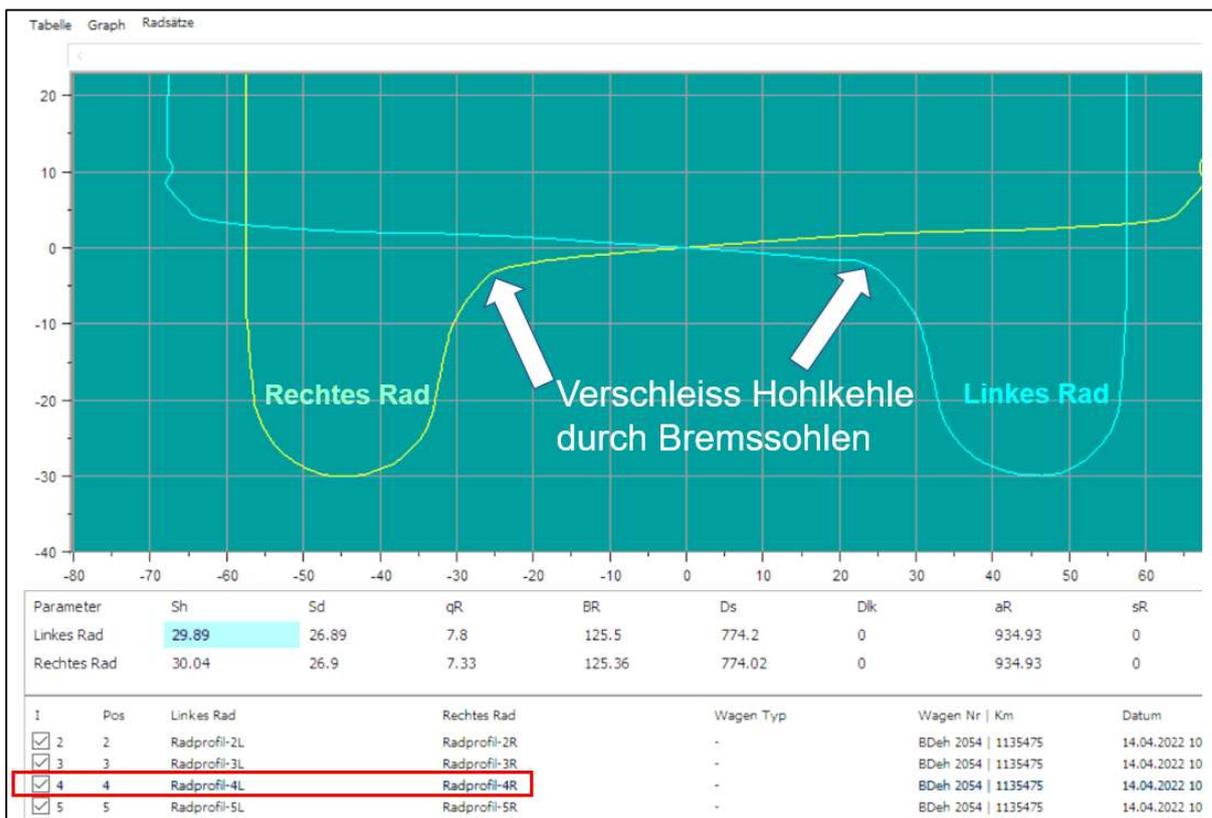


Abbildung 21: Leichte Diskontinuitäten bei beiden Rädern des Radsatzes 4 im Bereich der Hohlkehle (verursacht durch die Interaktion Rad / Bremssohle)

Abbildung 22 zeigt eine durch den Bremsklotz erzeugte Diskontinuität an der Spurkranzflanke des rechten Rades beim 8. Radsatz des Shuttle 2053. Das rechte Rad ist in der Abbildung in gelber Farbe dargestellt. Das linke Rad desselben Radsatzes ist in roter Farbe gespiegelt dargestellt. Beim linken Rad ist keine Diskontinuität erkennbar. Die Diskontinuität hat keinen Einfluss auf das Bogenlaufverhalten. Gemäss dem einschlägigen Regelwerk sind jedoch Diskontinuitäten in diesem Bereich der Spurkranzflanke nicht zulässig. Dieser Aspekt wird im Rahmen der Arbeiten des Projektes P3 vertieft betrachtet.

Die in diesem Abschnitt behandelten Diskontinuitäten sind weder bei der Erfassung der Radprofile noch bei deren visueller Kontrolle entdeckt worden. Da diese Diskontinuitäten auch bei der Calipri C42 – Messung erkennbar sind, müsste das Instandhaltungspersonal hinsichtlich solcher Erscheinungen sensibilisiert werden. Da sich zum Zeitpunkt des Erkennens der Diskontinuitäten die entsprechenden Fahrzeuge in Glis auf der Grube befanden, konnten diese aufgrund gezielter Hinweise und entsprechend übermittelten Bildern visuell beobachtet und deren Ursachen vor Ort abgeklärt werden. Dabei wurde unter dem Fahrzeug die durch die Bremssohlen beeinträchtigte Interaktion Rad / Bremssohle festgestellt.

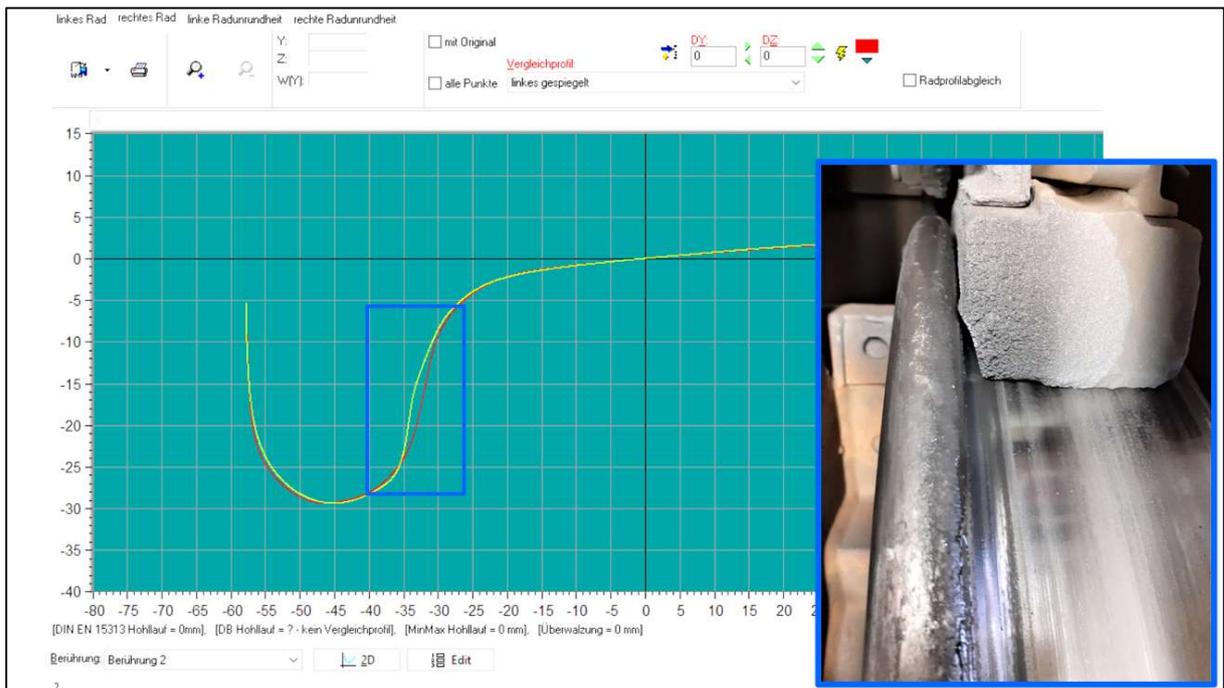


Abbildung 22: Diskontinuität am Spurkranz des rechten Rades von Radsatz 8 beim Shuttle 2053

5.2. Berührungsgeometrie

Die Berührungsgeometrie wird hier unter verschiedenen Aspekten betrachtet. Es sind dies einerseits die berührungsgeometrischen Funktionen Rollradiendifferenz und äquivalente Konizität sowie alle daraus ableitbaren Veränderungen in Abhängigkeit der Leistungsbezugsgrößen. Da sich alle Versuchsträger der Betriebserprobung (Shuttle – Fahrzeuge) bisher bezüglich der Berührung von Rad und Schiene ähneln, wurden hier bei der Darstellung der Ergebnisse zur Berührungsgeometrie jeweils einer der vier Shuttle betrachtet. Um den Vergleich konditioniert / unkonditioniert herstellen zu können wird der Komet 2021 beigezogen, welcher sich seit rund einem Jahr aus anderen Gründen bei der MGB in einer Betriebserprobung befindet, und regelmässig visuellen Prüfungen und Profilabzeichnungen unterzogen wird. Die Paarungen Rad / Schiene erfolgten bei den Radsätzen mit realen Radprofilen (Ausnahme Nominalprofil) und bei der Schiene in Ermangelung von realen Schienenprofilen mit dem theoretischen Schienenprofil SBB I mit Spurweite 1000m und Einbauneigung 1/20.

5.2.1. Berührungsgeometrie Shuttle

Die Abbildung 23 zeigt die Δr -Funktionen aller Radsätze bei Shuttle 2053 nach einer Laufleistung von 43'213km nach Reprofilierung. Auf der rechten Seite sind alle Verläufe dargestellt und links oben der Vergleich zwischen allen Laufradsätzen (rot) und Triebradsätzen (blau). Unten links ist der Verlauf beim Nominalprofil W98 dargestellt. Grundsätzlich ergeben sich daraus die folgenden Feststellungen:

- Die Δr -Verläufe im Bereich der Fahrfläche bis zum Beginn der Hohlkehle zeigen unabhängig vom Radsatztyp (Lauf-/Triebradsatz) einen ähnlichen Verlauf. Gegenüber dem Nominalprofil ist der Verlauf im Betriebseinsatz leicht steiler geworden, was auf einen Anstieg bei der äquivalenten Konizität hindeutet.
- Die Spurmasse liegen bei den Triebradsätzen eng beisammen, was auf geringen Spurkranzverschleiss bei allen Rädern hindeutet. Bei zwei von vier Laufradsätzen liegen die Spurmasse deutlich höher als bei den beiden übrigen. Bei den letzteren liegen sie im Bereich derjenigen bei den Triebradsätzen.
- Mit Ausnahme bei den Triebradsätzen 4 und 5 (unsymmetrisch) liegen die Δr -Verläufe symmetrisch zum Nullpunkt. Bei den symmetrischen Verläufen kann davon ausgegan-

gen werden, dass die Raddurchmesser der beiden Räder desselben Radsatzes nahezu identisch sind. Bei den unsymmetrischen Verläufen liegen grössere Durchmesserunterschiede an den beiden Rädern desselben Radsatzes vor. Die Asymmetrie ist beim Radsatz 4 deutlich grösser als beim Radsatz 5.

- Der Übergang von der Radlauffläche auf die höheren Δr -Werte im Bereich der Hohlkehle / Spurkranz ist bei allen Rädern durch einen Knick und einen unmittelbar anschliessend steilen Anstieg der Δr -Funktion gekennzeichnet. Der Knick liegt bei den realen Radprofilen bei einem leicht höheren Δr als beim Nominalprofil. Dies deutet darauf hin, dass das Nominalprofil im Betriebseinsatz verändert wird.
- Die Veränderung des Radprofils macht sich bei einigen Rädern auch in der leicht sich abzeichnenden Diskontinuität im «Steilast» der Δr -Funktion bemerkbar.

Abbildung 24 zeigt die $\tan\gamma_e$ -Funktionen aller Radsätze bei Shuttle 2053 nach einer Laufleistung von 43'213km nach Reprofilierung. Auf der rechten Seite sind alle Verläufe dargestellt und links oben der Vergleich zwischen allen Laufradsätzen (rot) und Triebradsätzen (blau). Unten links ist der Verlauf beim Nominalprofil W98 dargestellt. Obschon diesbezüglich aus wissenschaftlicher Sicht unterschiedliche Lehrmeinungen vertreten werden, wird bei der Interpretation der Wert der äquivalenten Konizität bei einer Radsatzamplitude von 3mm verwendet. Grundsätzlich ergeben sich daraus die folgenden Feststellungen:

- Bis zu einer Radsatzamplitude von 3mm verlaufen die Funktionen bei 7 von 8 Radsätzen gleich und ohne erwähnenswerte Streuungen.
- Der Triebradsatz 4 weicht von dieser Tendenz ab. Der Grund dafür liegt in der grösseren Abweichung der Durchmesser der beiden Räder desselben Radsatzes. In der Folge liegt die äquivalente Konizität bei diesem Radsatz etwas mehr als doppelt so hoch im Vergleich zu den übrigen Radsätzen.
- Bei den übrigen Radsätzen hat sich die äquivalente Konizität gegenüber dem Nominalprofil verdoppelt. Dies deutet darauf hin, dass das Nominalprofil im Betriebseinsatz verändert wird. Dieser Sachverhalt wird damit durch die beiden Funktionsverläufe Δr und $\tan\gamma_e$ bestätigt.

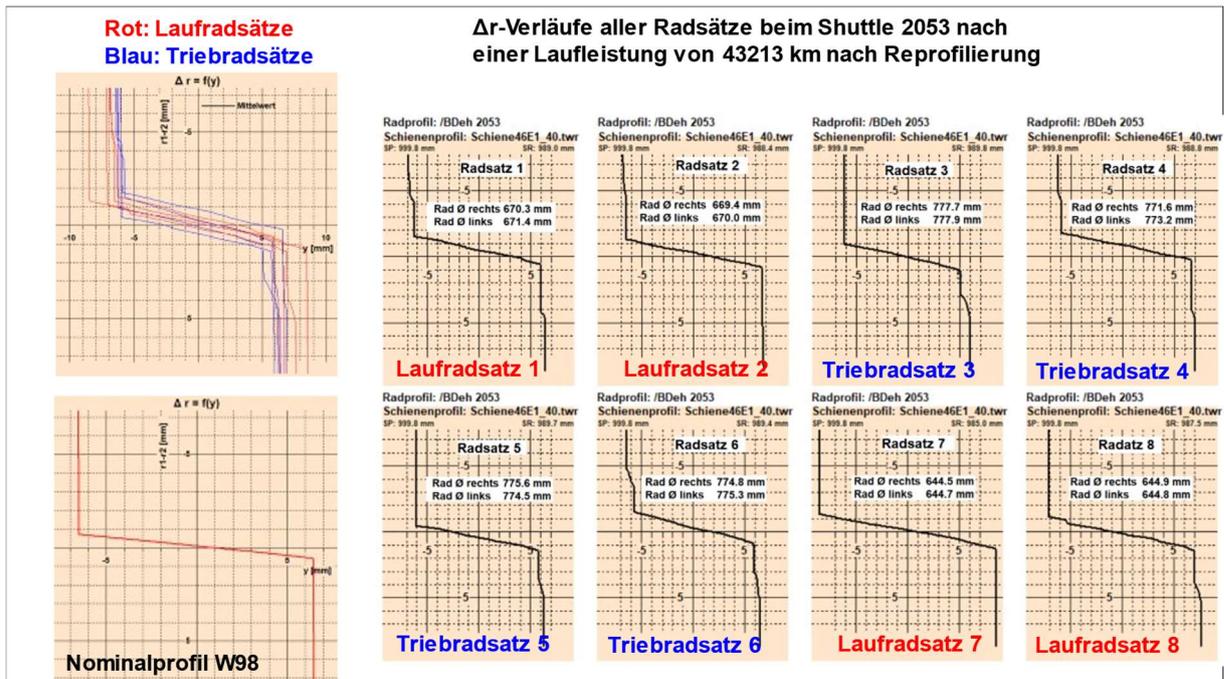


Abbildung 23: Rollradiendifferenzen Δr beim Shuttle 2053, 43213km nach Reprofilierung

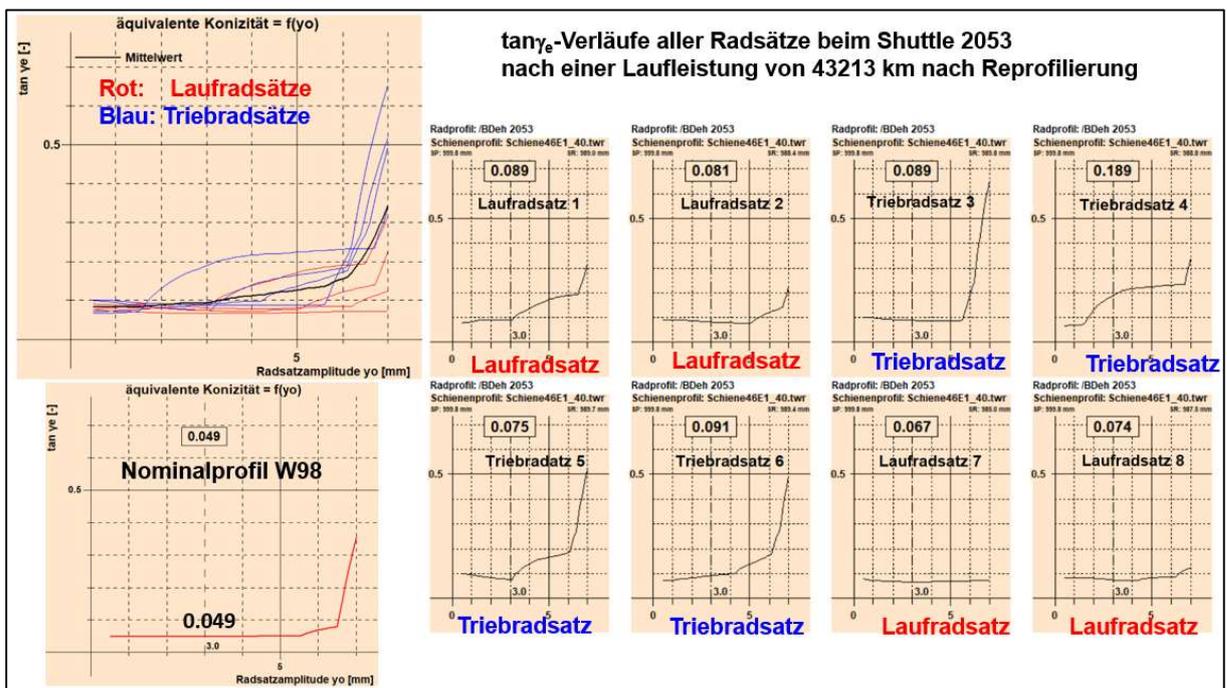


Abbildung 24: Äquivalente Konizität $\tan\gamma_e$ Shuttle 2053, 43'213km nach Reprofilierung

Abbildung 25 zeigt die Berührungspunktzuordnungen zwischen Rad und Schiene aller Radsätze bei Shuttle 2053 nach einer Laufleistung von 43'213km nach Reprofilierung und Abbildung 26 diejenige mit dem Nominalprofil W98. Insgesamt gilt sowohl für die Radprofile aus dem Betriebseinsatz der Betriebserprobung als auch für das Nominalprofil:

- Die Berührung auf den geraden Strecken findet in einem engen Bereich der Rad- und Schienenfahrflächen statt und dürfte bei Fahrt in diesem Trassierungsbereich in diesem Rad- und Schienenbereich zu einem punktuellen Verschleissabtrag an Rad und Schiene führen.
- Es besteht ein Mangel an Berührungspunkten im Trassierungsbereich der sehr kleinen bis hinauf zu den mittleren Bogenhalbmessern (600m). Damit ist in diesem Trassierungsbereich beim Vorliegen derartiger Profilpaarungen eine Selbststeuerung der Radsätze nicht möglich.
- Die mittige Lage des Radsatzes im Gleiskanal ist bei den Radprofilen des Betriebseinsatzes im Vergleich zum Nominalprofil leicht in Richtung der Gleismitte verschoben, was einerseits das höhere Δr beim Knick der Δr -Funktion und damit das höhere $\tan \gamma_e$ bei den Radsätzen des Betriebseinsatzes gegenüber dem Nominalprofil erklärt.
- Bei einzelnen Rädern des Betriebseinsatzes stellen sich erste Berührungspunkte im Bereich der Hohlkehle ein. Dies und weitere Merkmale deuten darauf hin, dass das Nominalprofil im Betriebseinsatz verändert wird.

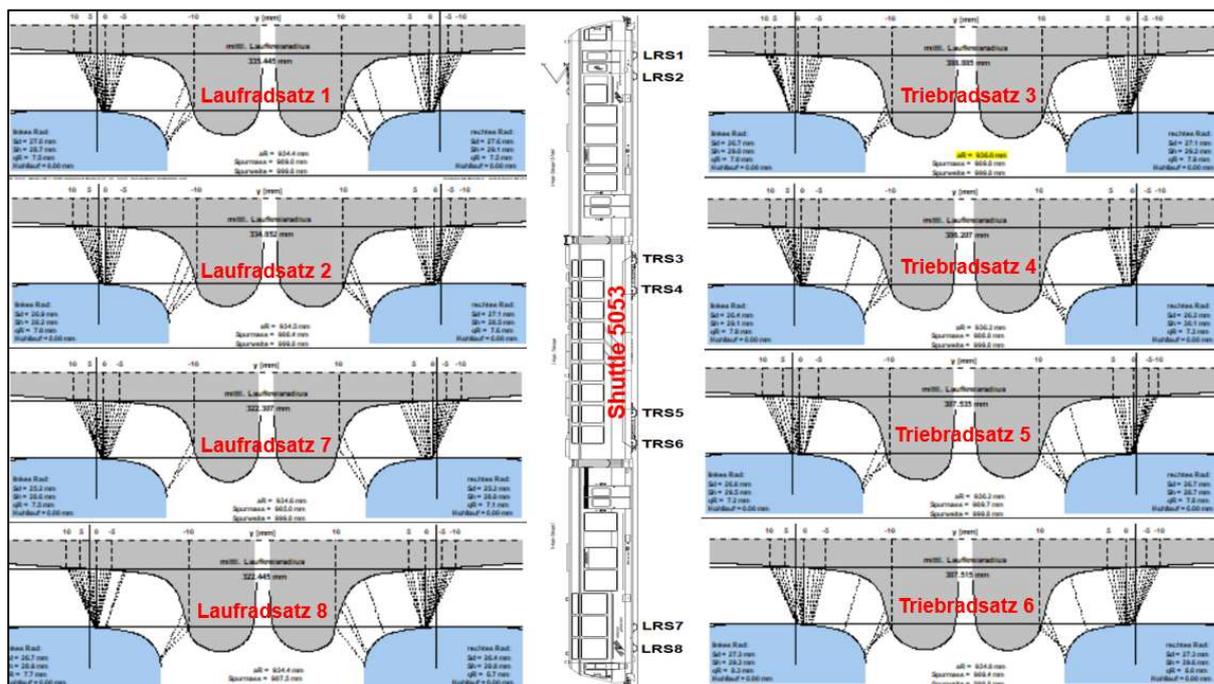


Abbildung 25: Berührungspunktzuordnung beim Shuttle 2053, 43213km nach Reprofilierung

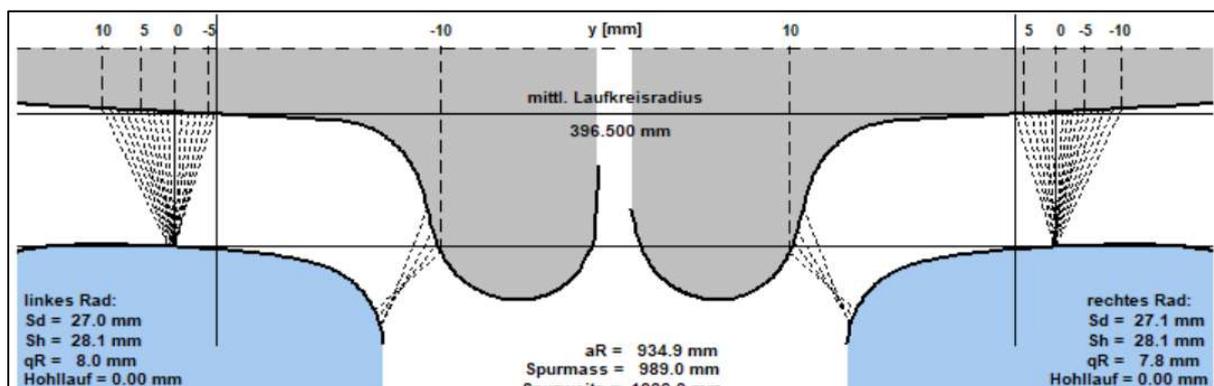


Abbildung 26: Berührungspunktzuordnung beim Nominalprofil W98

Abbildung 27 zeigt eine der Veränderungen in der Δr -Funktion im Betriebseinsatz und deren Auswirkung auf den Radialsteuerungsindex am Beispiel des Triebbradsatzes 3 des Shuttle 2053. Beim rechten Rad hat sich im Steilast der Δr - Funktion ein Sattel ausgebildet. Falls dieser stabil angefahren werden kann (durch Nachweisrechnungen aufzuzeigen) wäre ab einem Bogenhalbmesser von 250m eine Selbststeuerung des Radsatzes im Linksbogen möglich. Am linken Rad wäre dies ab einem Bogenhalbmesser von 550m möglich. Auch dieses Beispiel zeigt, dass sich die Radprofile im für den Bogenlauf günstigen Bereich zu verändern versuchen aber dieser Prozess noch in keiner Weise abgeschlossen ist. Es ist davon auszugehen, dass der geringe Reibwert den Prozess der Veränderung der Radprofile wesentlich beeinträchtigt. Allenfalls spielt hier auch die Interaktion Rad / Bremssohle als «Spielverderber» eine nicht unwesentliche Rolle.

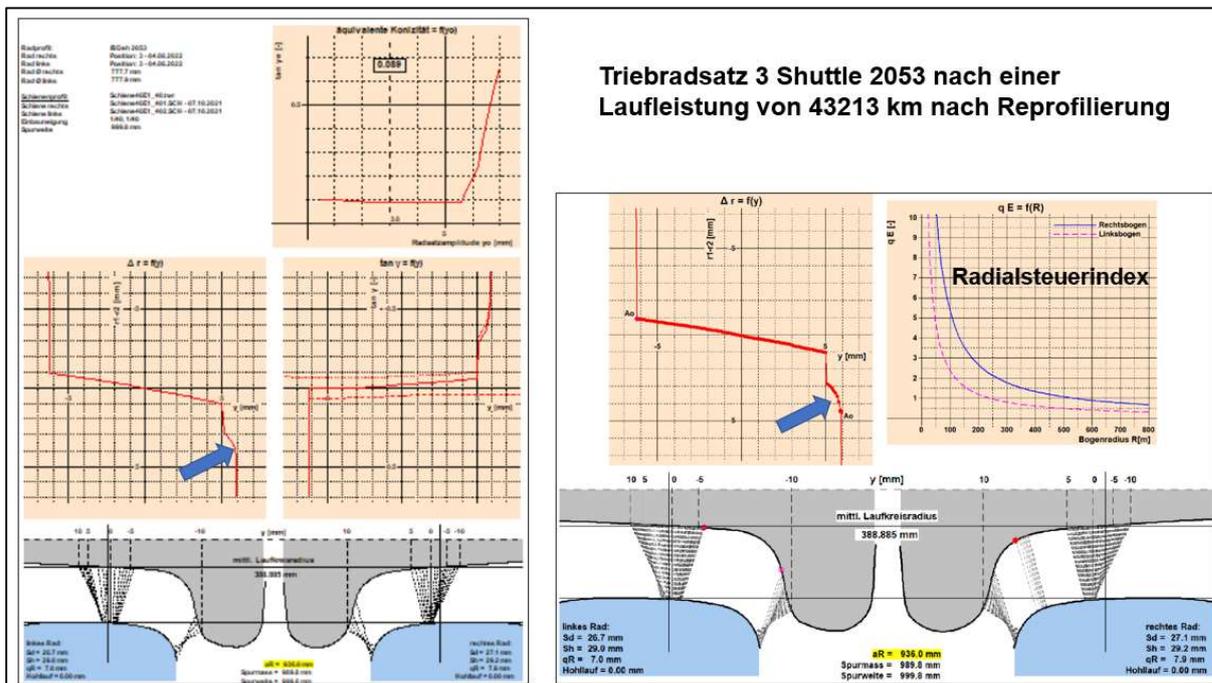


Abbildung 27: Besondere Merkmale bei der Δr -Funktion und Auswirkungen auf den Radialsteuerungsindex

In der Abbildung 28 sind nochmals die wesentlichen Unterschiede der Radprofile eines repräsentativen Radsatzes aus der Betriebserprobung Täsch-Zermatt (hier Triebradsatz 3 Shuttle 2053) und des Nominalprofils W98 auf dargestellt. Obschon die Unterschiede noch gering sind, zeigen sie trotzdem eine Tendenz in die Richtung einer Verschleissanpassung. Um dies jedoch zu erhärten sind weitere Untersuchungen, vor allem mit grösseren Stichproben und vor allem mit realen Schienenprofilen erforderlich. Sollen jedoch Veränderungen an den Radprofilen sichtbar gemacht werden, so sollte wenigstens einer der beiden Berührpartner nicht verändert werden.

Abbildung 28 bis Abbildung 31 verdeutlichen diesen Sachverhalt nochmals anhand der Stellungsbilder der in Abbildung 28 dargestellten Profilpaarungen. In den Abbildungen ist jeweils oben die Stellung des Radsatzes im Spurkanal bei mittigem Lauf dargestellt (Rollradiendifferenz Null). Im jeweils mittleren Bild ist der Radsatz derart gegen den Spurkranz verschoben, bis der letzte Berührungspunkt erreicht ist und bevor der Berührungspunkt über die Lücke springt (Lücke ist der nicht berührbare Bereich zwischen Rad und Schiene). Im jeweils untersten Bild wird der Radsatz weiter verschoben, bis er über die Lücke springt.

Im Rechtsbogen müssen in beiden Fällen (Abbildung 29 und Abbildung 30) die Radsätze eine sehr weite Lücke überspringen und landen im Steilast des Spurkranzes. Der Radsatz wird in dieser Zone auch bei sehr hohen Fliehkräften nicht beharren können und in der Folge den Bogen in zwei Berührungspunkten befahren.

Im Linksbogen wird sich das Nominalprofil genau so verhalten wie oben beschrieben (Abbildung 31). Hingegen findet das im Betrieb angepasste Radprofil (Abbildung 32) in dieser Bogenrichtung günstigere Bedingungen.

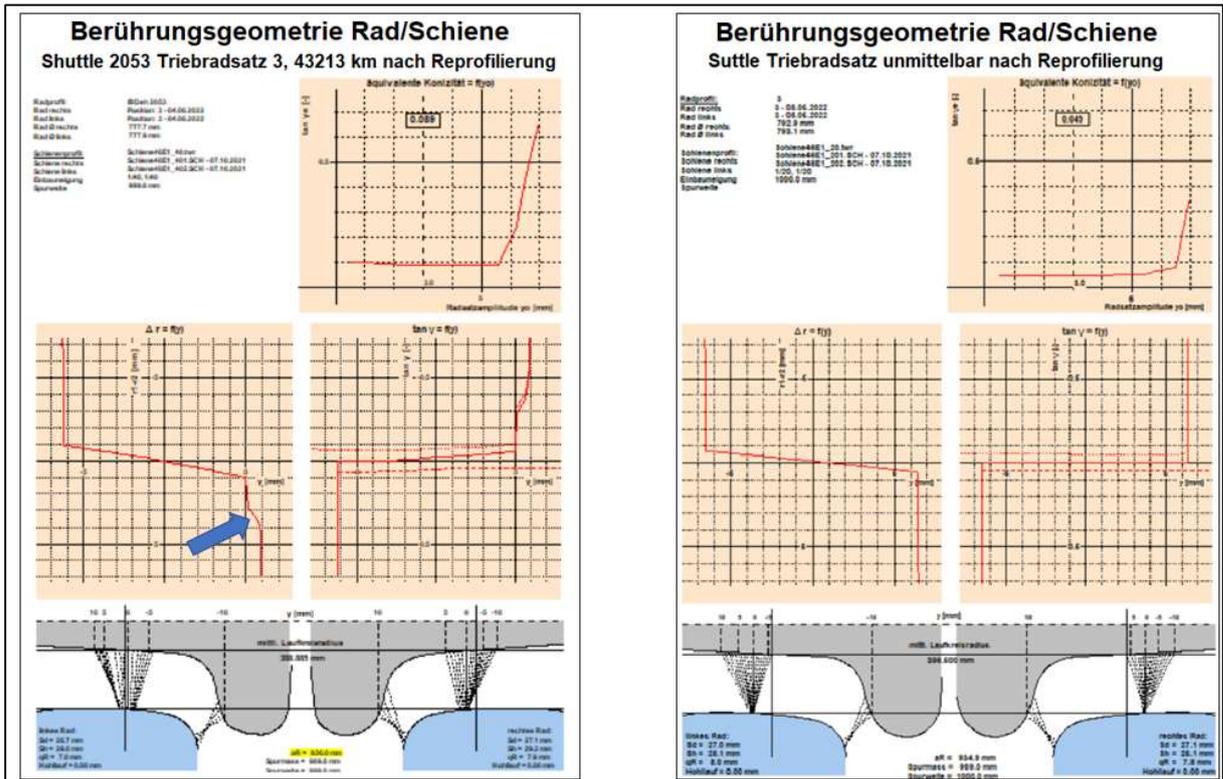


Abbildung 28: Vergleich aller berührungsgeometrischen Funktionen bei Radprofilen aus dem Betriebseinsatz mit dem Nominalprofil W98

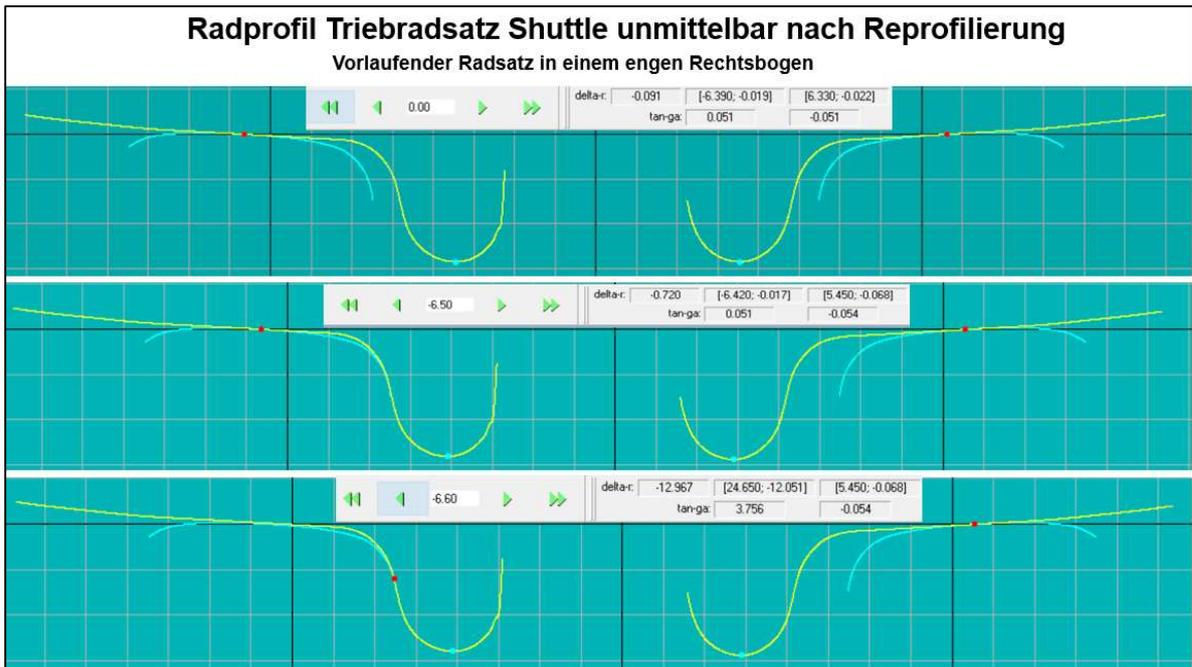


Abbildung 29: Nominalprofil im engen Rechtsbogen

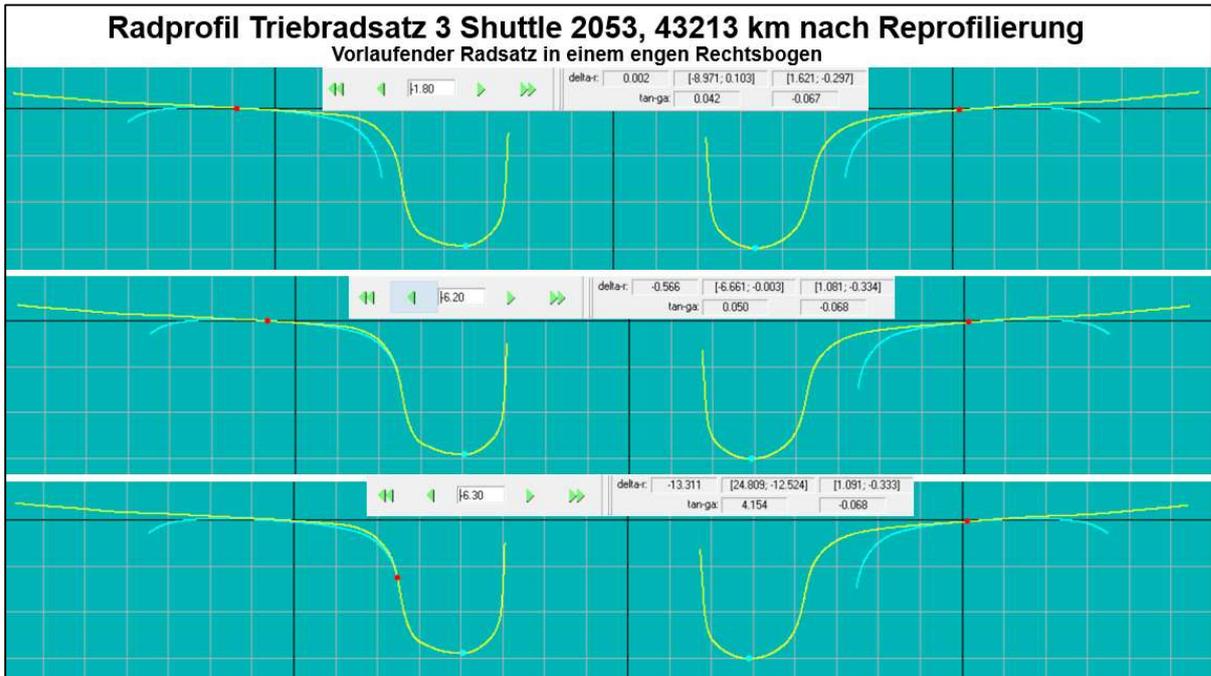


Abbildung 30: Profil nach 43'213 im Betriebseinsatz im engen Rechtsbogen

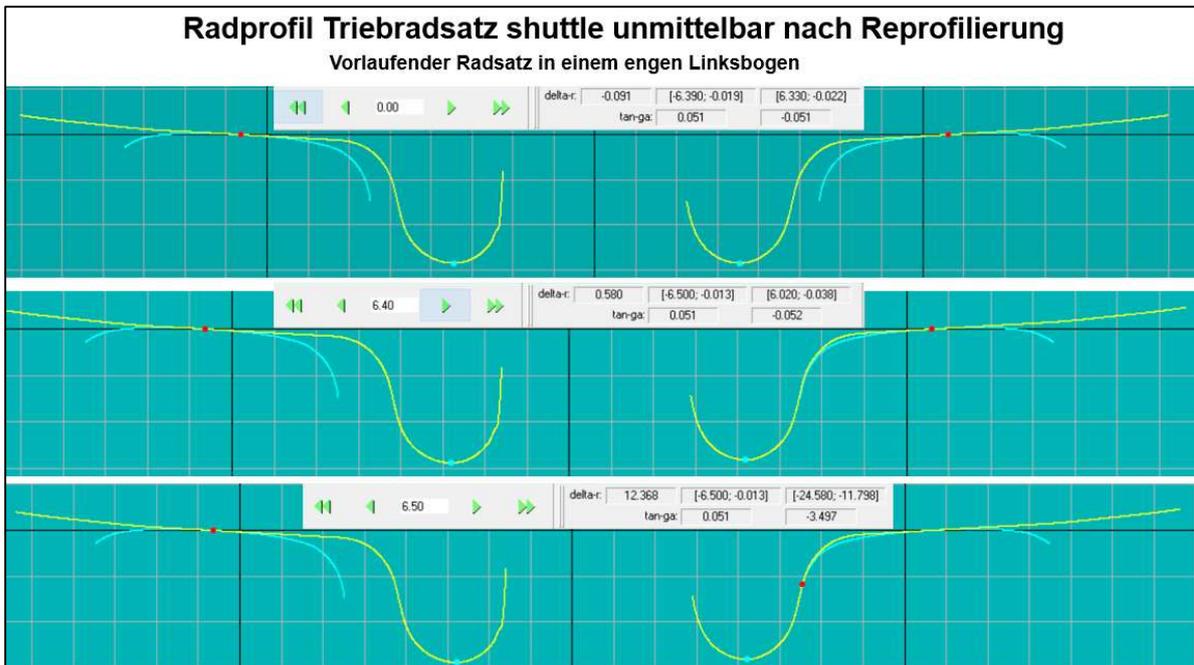


Abbildung 31: Nominalprofil im engen Linksbogen

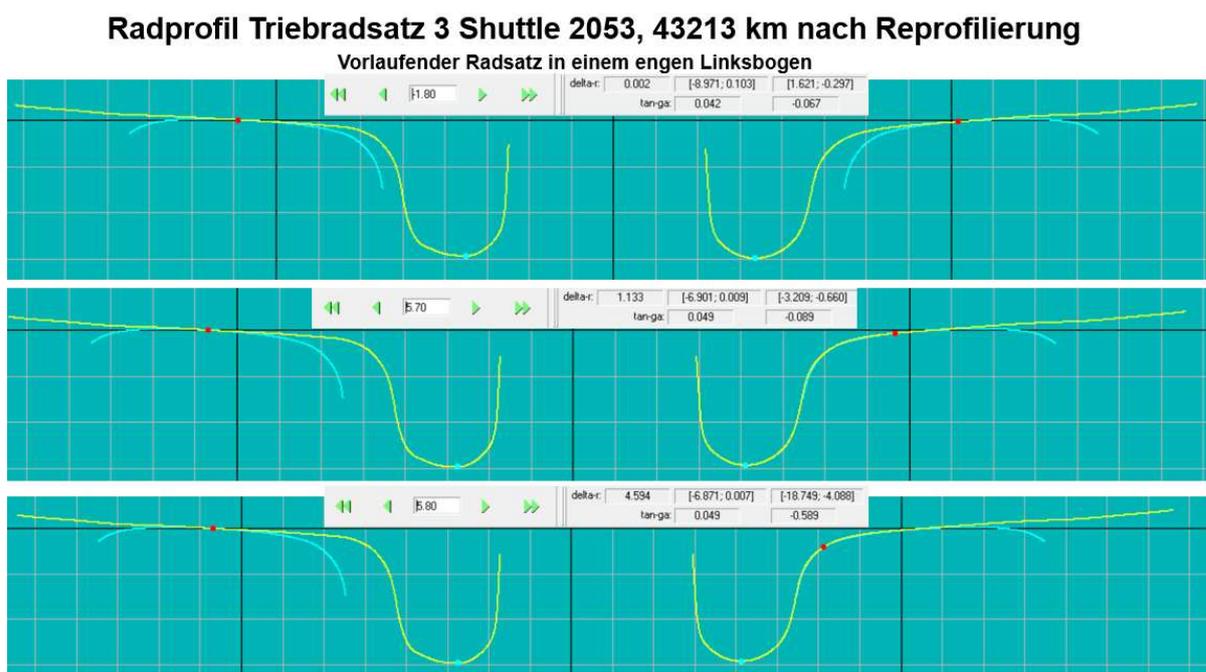


Abbildung 32: Profil nach 43213 im Betriebseinsatz im engen Linksbogen

In der Abbildung 33 sind die beiden Radprofile in der Messkreisebene übereinandergelegt. In roter Farbe ist das Nominalprofil und in gelber Farbe das Profil aus dem Betriebseinsatz dargestellt. Der für den Bogenlauf entscheidende Profilbereich ist derjenige ab der Messkreisebene bis etwa 10mm über Lauffläche. Beim rechten Rad unterscheiden sich diese beiden Profile auch augenscheinlich voneinander. Das aus dem Betriebseinsatz stammende Radprofil zeigt günstigere Bedingungen für den Bogenlauf. Beim linken Rad hingegen sind die beiden Radprofile in diesem Bereich praktisch deckungsgleich und werden in der Folge ungünstigere Bedingungen für den Bogenlauf aufweisen.

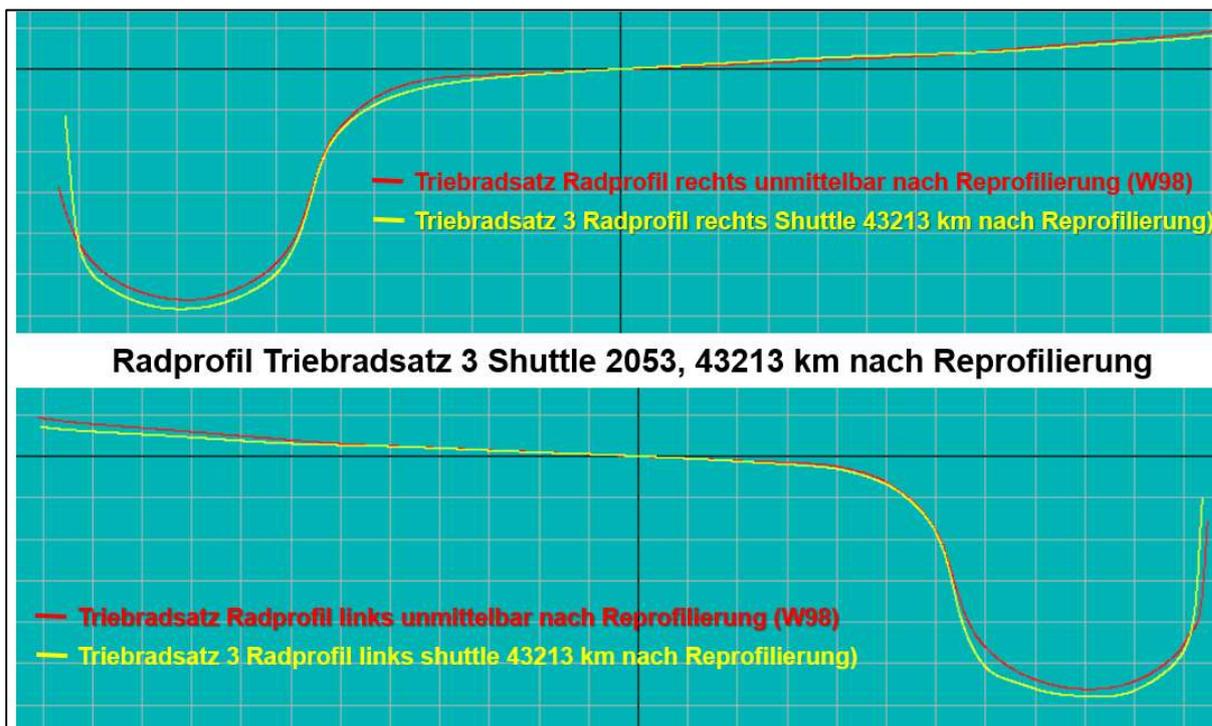


Abbildung 33: Vergleich der beiden Radprofile links und rechts des Betriebseinsatzes mit den beiden Nominalprofilen

5.2.2. Berührungsgometrie Komet

Die Abbildung 34 zeigt die Δr -Funktionen aller Radsätze bei Komet 2021 nach einer Laufleistung von 106'471km nach Reprofilierung. In den äusseren Bereichen der Abbildung sind alle Verläufe dargestellt. In der Mitte ist der Verlauf beim Nominalprofil W98 dargestellt. Grundsätzlich ergeben sich daraus die folgenden Feststellungen:

- Die Δr -Verläufe im Bereich der Fahrfläche bis zum Beginn der Hohlkehle unterscheiden sich bei den Laufradsätzen von denjenigen bei den Triebadsätzen. Gegenüber dem Nominalprofil ist in beiden Fällen der Verlauf im Betriebseinsatz zum Teil deutlich steiler geworden, was auf einen Anstieg bei der äquivalenten Konizität hindeutet.
- Die Spurmasse liegen bei den Triebadsätzen eng beisammen, was auf geringen Spurkranzverschleiss bei allen Rädern dieses Radsatztyps hindeutet. Bei den Laufradsätzen liegen die Spurmasse deutlich höher als bei den Triebadsätzen, was auf einen grösseren Verschleiss der Spurkränze hindeutet. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Räder der beiden Radsatztypen mit unterschiedlichen Stahlqualitäten ausgerüstet sind.
- Bei den Triebadsätzen ist die Veränderung bei den Δr -Funktionen wesentlich weniger ausgeprägt als bei den Laufradsätzen. Bei Letzteren werden deutlich höhere Rollradiendifferenzen erzeugt als bei den Triebadsätzen. Das heisst aber auch, dass sich die Radprofile bei den Laufrädern deutlich stärker verändert haben als bei den Triebadsätzen. Es stellt sich hier die Frage, ob dies auf die unterschiedlichen Stahlqualitäten bei den Triebadsätzen gegenüber den Laufradsätzen zurückzuführen ist. Die Triebräder laufen auf diesem Fahrzeug versuchsweise mit Radreifen der Stahlqualität B7T. Die Laufräder mit dem deutlich weicheren Vollrad mit der Stahlqualität ER7.
- Der Übergang von der Radlauffläche auf die höheren Δr -Werte im Bereich der Hohlkehle / Spurkranz ist bei allen Triebrädern durch einen Knick und einen unmittelbar anschliessend steilen Anstieg der Δr -Funktion gekennzeichnet. Der Knick liegt jedoch bei diesen Rädern des Kometen bei einem deutlich höheren Δr als bei den Rädern der Shuttle - Fahrzeuge. Auch beim Kometen deutet dieses Verhalten wie beim Shuttle darauf hin, dass das Nominalprofil im Betriebseinsatz verändert wird. Diese Veränderungen sind beim Kometen wesentlich ausgeprägter als beim Shuttle. Dies ist darauf

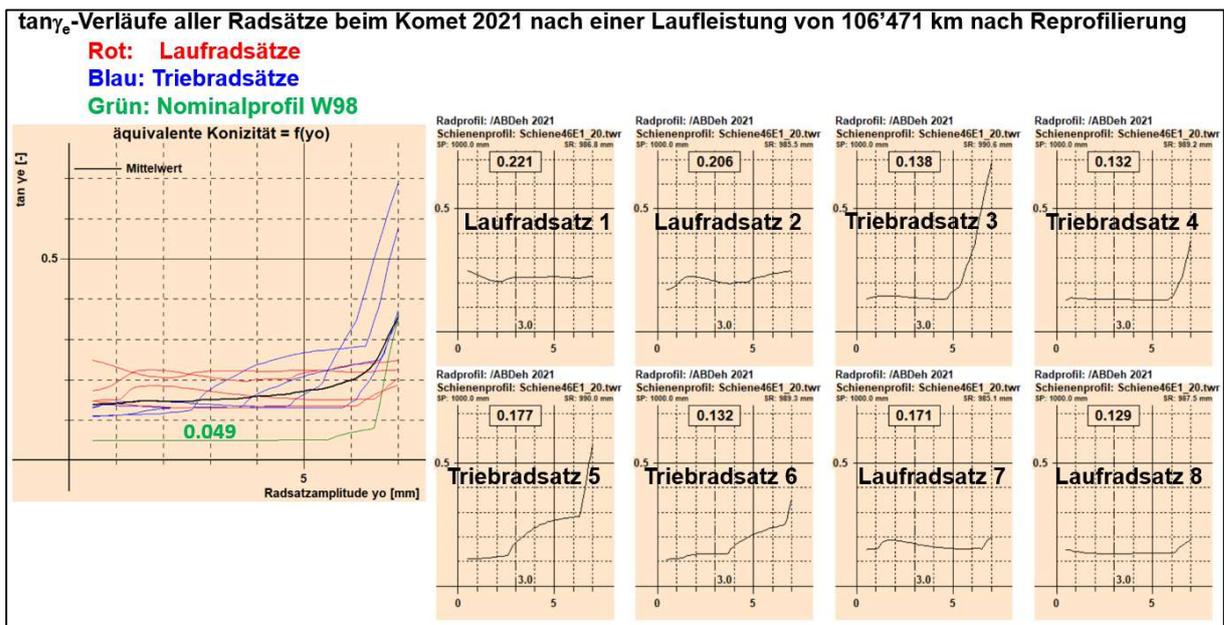


Abbildung 35: Äquivalente Konizität beim Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung

Abbildung 36 zeigt die Berührungspunktzuordnungen zwischen Rad und Schiene aller Radsätze bei Komet 2021 nach einer Laufleistung von 106'471km nach Reprofilierung und Abbildung 37 diejenige mit dem Nominalprofil W98. Insgesamt gilt sowohl für die Radprofile aus dem Betriebseinsatz der Betriebserprobung als auch für das Nominalprofil:

- Die Berührung auf den geraden Strecken findet beim Komet im Gegensatz zum Nominalprofil in einem breiteren Bereich der Rad- und Schienenfahrflächen statt und dürfte bei Fahrt in diesem Trassierungsbereich sowie in diesem Rad- und Schienenbereich zu einem breitflächigeren Verschleissabtrag an Rad und Schiene führen.
- Insgesamt stehen vor allem bei den Laufradsätzen, aber teilweise auch bei den Triebradsätzen, Berührungspunkte im Trassierungsbereich der sehr kleinen bis hinauf zu den mittleren Bogenhalbmessern (600m) zur Verfügung. Damit ist in diesem Trassierungsbereich, beim Vorliegen derartiger Profilpaarungen, unter gewissen Voraussetzungen eine Selbststeuerung der Radsätze möglich.
- Die mittige Lage des Radsatzes im Gleiskanal ist bei den Radprofilen des Betriebseinsatzes im Vergleich zum Nominalprofil leicht in Richtung der Gleismitte verschoben, was einerseits das höhere Δr beim Knick der Δr -Funktion und damit das höhere tan γ_e bei den Radsätzen des Betriebseinsatzes gegenüber dem Nominalprofil erklärt.
- Die hier aufgeführten und weitere Merkmale deuten darauf hin, dass das Nominalprofil im Betriebseinsatz verändert wird.

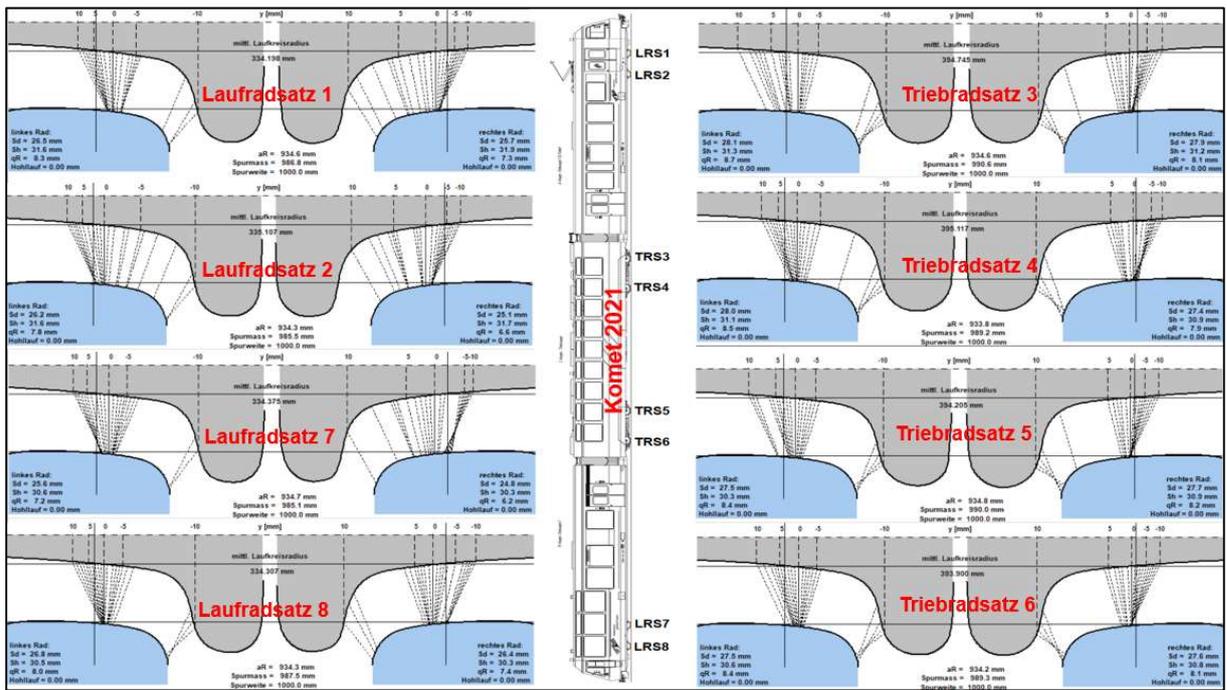


Abbildung 36: Berührungspunktzuordnung beim Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung

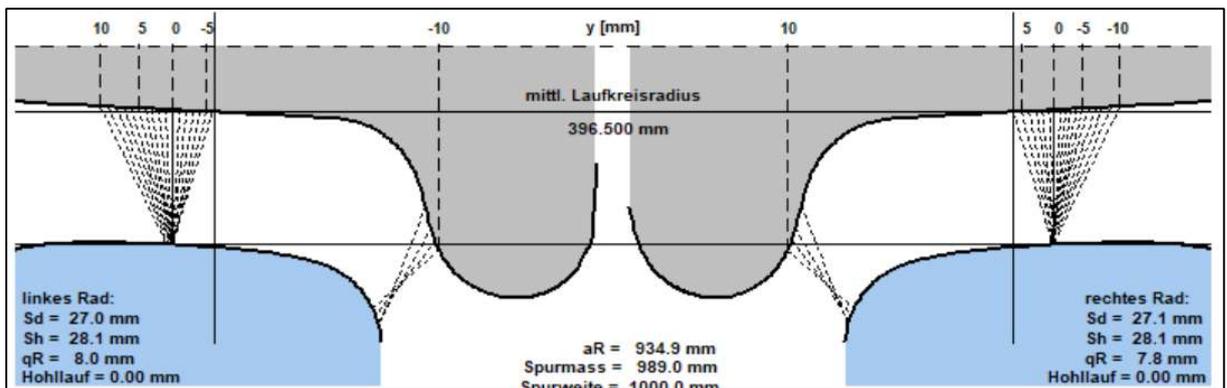


Abbildung 37: Berührungspunktzuordnung beim Nominalprofil W98

Abbildung 38 zeigt die Radialstellungsindizes aller Lauftragsätze beim Kometen 2021 nach einer Laufleistung nach der Reprofilierung von 106'471km. Im Vergleich zum Nominalprofil sind die Veränderungen bei den Lauftragsätzen erheblich. Zum Teil wird der Radialstellungsindex bis hinab auf Bogenhalbmesser von 100m erfüllt. Die Lauftragsätze 1 und 2 verhalten sich leicht günstiger als die Lauftragsätzen 7 und 8.

Abbildung 39 zeigt die Radialstellungsindizes aller Triebtragsätze beim Kometen 2021 nach einer Laufleistung nach der Reprofilierung von 106'471km. Im Vergleich zum Nominalprofil sind die Veränderungen bei den Lauftragsätzen signifikant. Die Streuungen der Indizes liegen bei den Triebtragsätzen deutlich über denjenigen bei den Lauftragsätzen. Die Indizes liegen jedoch bei den Triebtragsätzen etwas ungünstiger als bei den Lauftragsätzen.

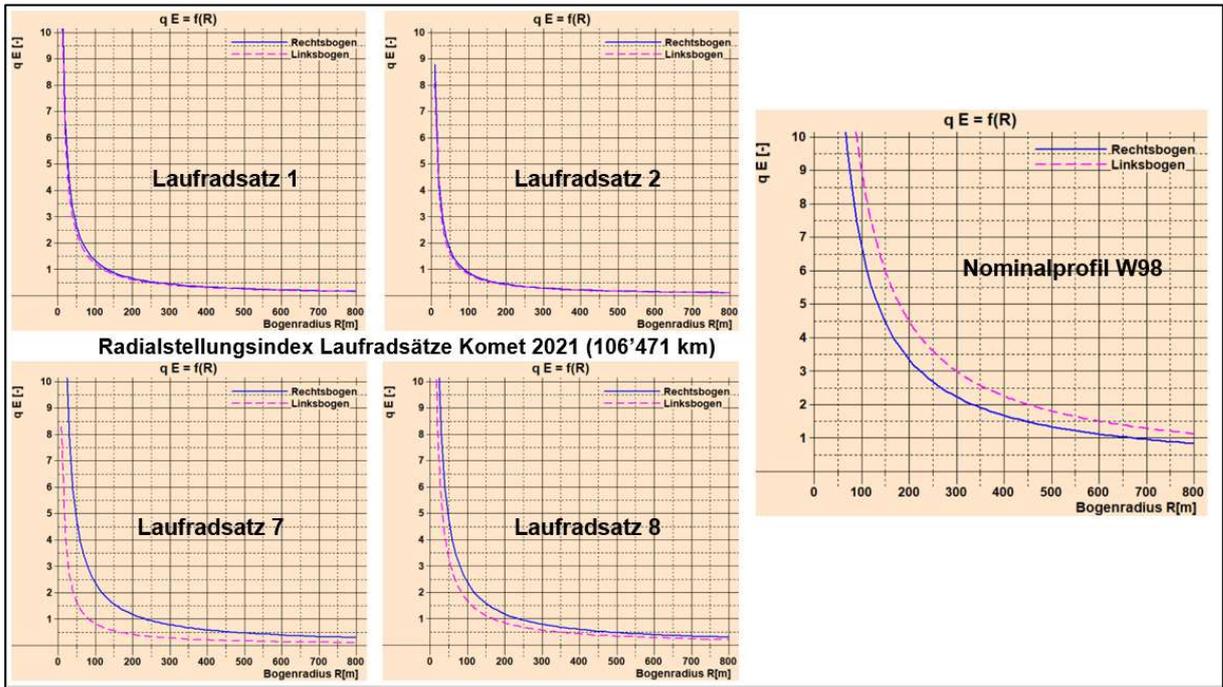


Abbildung 38: Radialstellungsindex bei den Laufradsätzen Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung

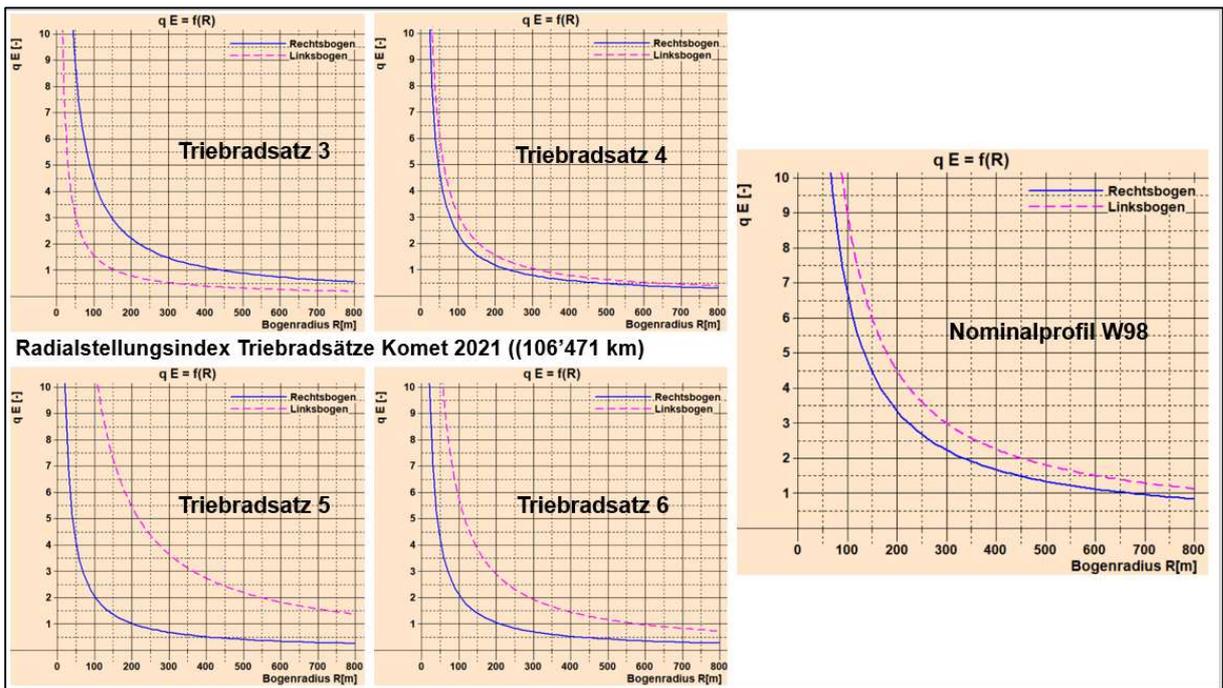


Abbildung 39: Radialstellungsindex bei den Triebradsätzen Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung

5.3. Radrundheit beurteilt anhand Messanlage im Gleis [9]

Die Messanlage zur Radrundheit (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies [9, 10]) liefert seit Anfang März 2022 Messwerte zu Polygonen, Flachstellen und all-fälligen anderen Schädigungen in der Umfangrichtung an den Radlaufflächen der Räder. Die Gleismessstelle ist kurz nach Täsch auf der Strecke nach Zermatt installiert.



Abbildung 40: Installation des Wheel Monitoring Systems WMS bei der Matterhorn Gotthard Bahn bei Täsch

Die Gleismessstelle identifiziert ankommende Züge bzw. Fahrzeuge mittels eines Fahrzeugidentifikationssystems. Hierzu wurde das bei der Rhätischen Bahn verwendete Fahrzeugidentifikationssystem implementiert. Im Gleis wurden zwei RFID – Antennen installiert, welche die bei der Matterhorn Gotthard Bahn und der Rhätischen Bahn installierten RFID-Tags lesen und damit die Fahrzeuge identifizieren.

Das WMS erfasst mittels im Gleis integrierte Sensoren die Schwingungen und berechnet aus den Signalen die Schädigungen der Lauffläche. Die Schädigung wird über zwei Indikatoren beschrieben:

- Polygonindikator: Dieser kennzeichnet den Grad der Polygonisierung. Der Wellenlängenbereich der Polygonisierung wurde auf 4 cm – 40 cm festgelegt.
- Flachstellenindikator: Dieser erfasst singuläre Defekte, wie z.B. Flachstellen.

Zur Beurteilung der Schädigung wird für die Indikatoren eine Skala von 0 bis 100 verwendet. Werte unter 20 sind im Allgemeinen unkritisch, Werte zwischen 20 und 40 bedürfen einer Beobachtung des Fahrzeugs, Werte über 40 deuten auf eine signifikante Schädigung hin (Abbildung 41). Diese Skalierung gilt sowohl für die Polygone als auch für die Flachstellen.

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

Abbildung 41: Radzustand und zugehörige WMS-Indikatorwerte (WMS = Wheel-Monitoring-System)

Das WMS kann durch eine Vergleichsmessung mit dem Radmessgerät m|wheel kalibriert werden. Dabei werden die Indikatorwerte des WMS genauer eingestellt. Mittels der Kalibrierung können auch Betriebsgrenzwerte bei der MGB, ab welchen ein Abdrehen der Räder erfolgen soll, genauer festgelegt werden. Diese Kalibrierung ist bislang nicht erfolgt. Nichtsdestotrotz liefert das WMS auch im nichtkalibrierten Zustand verlässliche Ergebnisse.

Polygone werden durch Reprofilierung oder Radtausch beseitigt. Mit Hilfe der Anlage in Täsch soll überprüft werden, ob sich

- durch die Konditionierung an den Shuttle - Fahrzeugen, als Folge des reduzierten Reibwertes Rad / Schiene, vermehrt Flachstellen gebildet haben;
- die Entstehung und das Wachstum der Polygone vermindert haben.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Polygonindikatoren und Flachstellenindikatoren des Shuttles 2051 für ausgewählte Achsen. Orange Punkte kennzeichnen den Zustand der Räder auf der rechten Fahrzeugseite, blaue Punkte den Zustand der Räder auf der linken Fahrzeugseite. Die Software erlaubt die individuelle Ansicht einzelner Fahrzeuge.

Das rechte Rad an Achse 4 zeigt eine beginnende Polygonisierung, welche ab ca. Mitte Juni erkennbar ist und bis zu einem Wert von 20 bis Ende September anwächst.

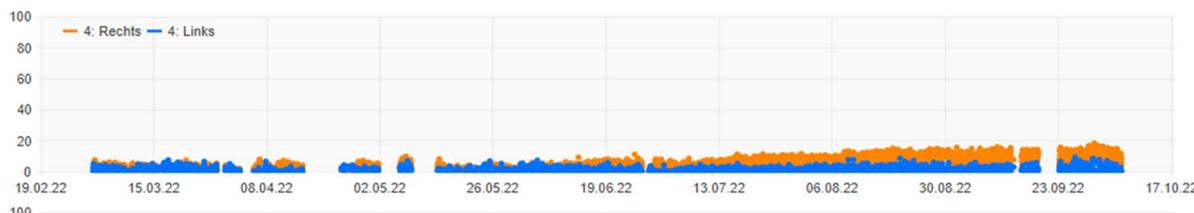


Abbildung 42: Polygonindikator Achse 4 des Shuttles 2051 von März bis Oktober 2022

Die Räder der Achsen 5 und 6 weisen bereits zu Beginn der Messung deutliche Flachstellen auf, welche zunächst konstant blieben und sich ab Juni zu glätten begannen. Bis Mitte Juli haben sich die Flachstellen deutlich reduziert.

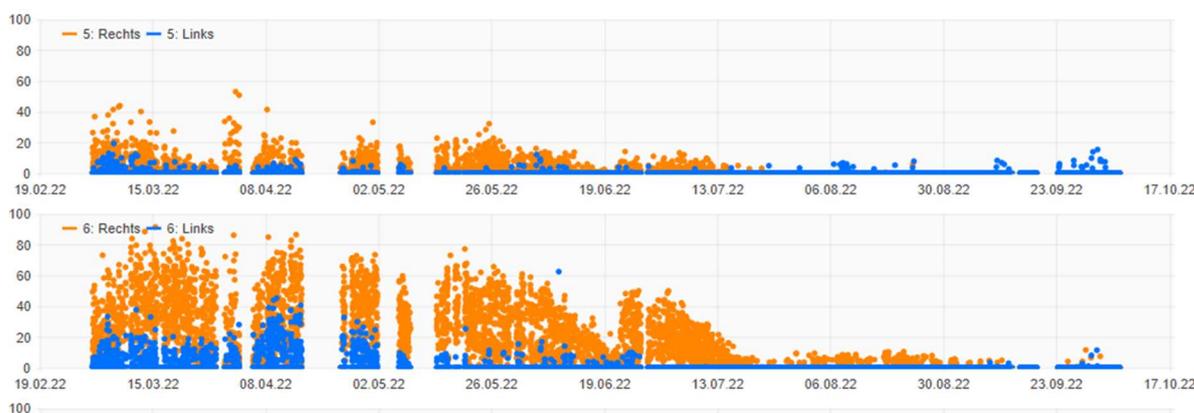


Abbildung 43: Flachstellenindikator Achse 5 und 6 des Shuttles 2051 von März bis Oktober 2022

Eine Radüberarbeitung am Fahrzeug 2051 fand im Untersuchungszeitraum nicht statt.

Die von der Anlage erfassten Werte wurden in einer ersten Betriebsphase von Müller-BBM auf ihre Plausibilität geprüft. Die validierten Daten werden durch die MGB verfolgt, Instandhaltungsmaßnahmen wurden daraus bislang noch nicht in die Wege geleitet.

Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen (Indikatorwerte > 40) an folgenden Fahrzeugen auf, bei denen eine zeitnahe Radüberarbeitung im Hinblick auf die Schonung des Oberbaus und der Fahrzeuge sinnvoll gewesen wäre.

Fahrzeug	Raddefekt
2012	Flachstelle
2014	Flachstelle
2025	Flachstelle
2026	Flachstelle
2028	Flachstelle
2051	Flachstelle
2054	Flachstelle
2131	Flachstelle
2133	Flachstelle

Tabelle 7: WMS erkannte Raddefekte nach Fahrzeugen

Im Folgenden wurden die Ergebnisse der Shuttle – Fahrzeuge, der Komet – Fahrzeuge und der GSW (Gelenksteuerwagen) dargestellt. Die Shuttle – Fahrzeuge befahren ausschliesslich den Bereich zwischen Täsch und Zermatt (hier sind Konditionieranlagen eingebaut), die Komet-Fahrzeuge und die GSW befahren auch den Bereich bis Brig (keine Konditionieranlagen).

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Shuttle Fahrzeuge (2051 - 2054)

- Die Räder der Shuttle-Fahrzeuge weisen im Untersuchungszeitraum eher geringe Polygone mit Werten von bis zu 20 auf.
- Es treten jedoch relativ viele und signifikante Flachstellen auf. Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen an zwei Fahrzeugen auf.

Komet-Fahrzeuge (2011 – 2014 und 2021 - 2028)

- Die Räder der Komet Fahrzeuge weisen im Untersuchungszeitraum leichte Polygone mit Werten von bis zu 20 auf. Die Polygonbildung ist jedoch stärker ausgeprägt als an den Shuttle-Fahrzeugen.
- Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen an fünf Fahrzeugen auf.

Gelenksteuerwagen (nicht angetrieben) (2131 - 2134)

- Die Räder der GSW weisen im Untersuchungszeitraum Polygone mit Werten von bis zu 30 auf.
- Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen an zwei GSW auf.

Die Untersuchung lässt weiterhin folgende Schlussfolgerungen zu:

- Insgesamt sind die Laufräder stärker von Polygonisierung und Flachstellen betroffen als die Triebräder.
- In der heissen Jahreszeit von Anfang Juli bis Ende August wachsen die Polygone eher stärker als in den anderen Monaten. Signifikante Flachstellen haben sich in diesem Zeitraum nicht gebildet. Im restlichen Untersuchungszeitraum haben sich hingegen signifikante Flachstellen gebildet (an heissen Tagen liegt ein höherer Reibbeiwert vor, auch die Konditionierung kann eine geringere Wirkung gehabt haben).
- Radpolygone konnten durch die Radbearbeitung meist nicht nachhaltig entfernt werden und bildeten sich nach dem Überdrehen sehr schnell wieder. Es sollte daher überprüft werden, ob die Unterflurdrehbank einen Kopiereffekt für Polygone aufweist, welcher ein vollständiges Entfernen der Polygone verhindert.

Die Abbildungen im Kapitel 11.5 zeigen die Ergebnisse der Radüberwachung mit dem Wheel Monitoring System WMS für die Fahrzeugtypen Komet, Shuttle und GSW.

Radüberarbeitungen (soweit bekannt) sind in den Diagrammen als vertikale Linien dargestellt und in der Legende beschriftet.

Radbearbeitungen wurden nicht aufgrund von Radunrundheiten durchgeführt. Wurden solche durchgeführt, zeigen sie jedoch die Auswirkung auf bestehende Radunrundheiten auf.

6. Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene

Um die Auswirkung der SKK auf die Schiene auswerten zu können, werden die verschiedenen erfassten Werte im Zusammenhang mit der SKK untersucht. Zu den wichtigsten erfassten Werten gehört die Schienenrauheit / die Schlupfwellenentwicklung (Kapitel 6.1), die Reibwerte / Tribometermessungen (Kapitel 6.2) sowie der abrasive Schienenverschleiss. Zusätzlich wird auf die Intervalle des Schienenschleifens (Kapitel 0), die Schienen- und Schwellenschwingungen (Kapitel 0) und die Spurweite (Kapitel 6.5) eingegangen.

In der Abbildung 44 sind die Orte festgehalten an welchen Messungen an den Schienen durchgeführt wurden. Die Auswahl erfolgte einerseits aus dem Sachverhalt, dass die Auswirkung der Konditionierung vor allem im Bereich der Bögen mit sehr kleinen Halbmessern am ausgeprägtesten ist und andererseits aus Gründen der Personensicherheit sowie der Zugänglichkeit (Transport der Gerätschaften). Alle Messstellen befinden sich in Bereichen, wo nicht aktiv konditioniert wird (kein Versprühen von Mittel). Sie befinden sich daher im sogenannten «verschleppten Bereichen». Die Messstelle im Lüegelwang befindet sich näher am aktiv besprühten Bereich als die beiden anderen Messstellen. Aufgrund der Tribometermessungen (siehe Kapitel 6.2) liegen jedoch die Reibwerte auf den Schienen an allen Messstellen in einem vergleichbaren Bereich.

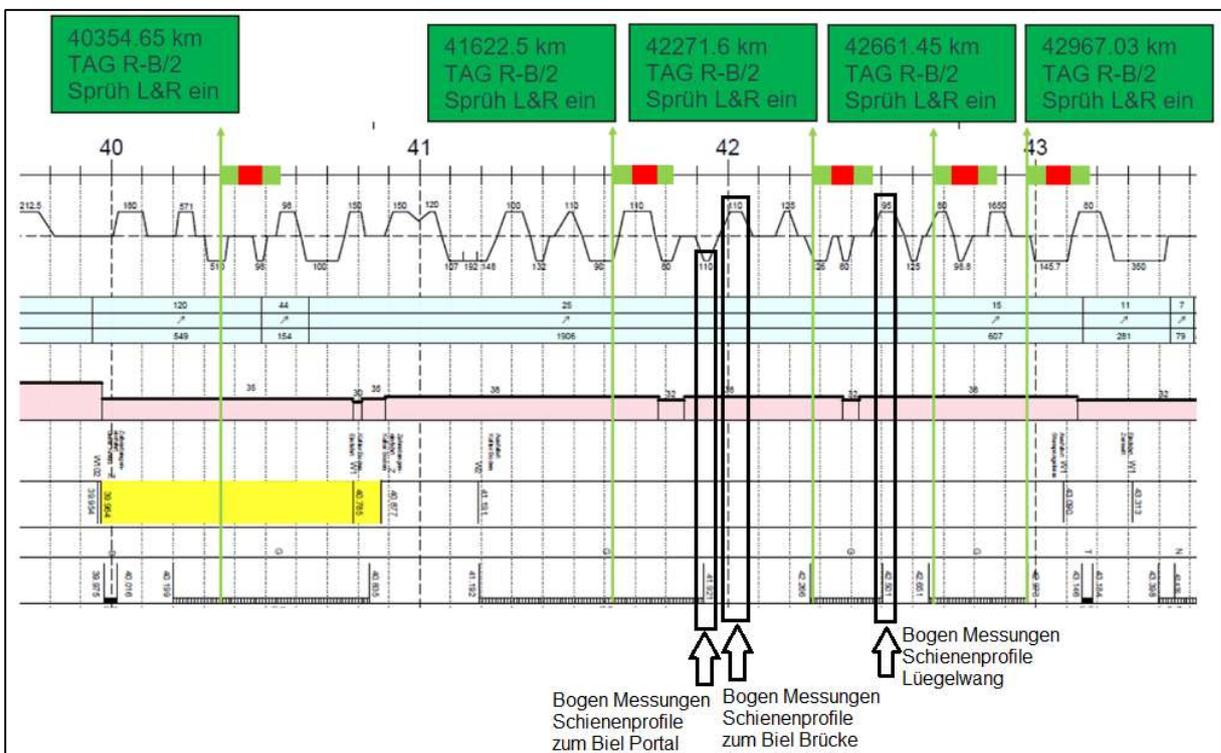


Abbildung 44: Orte an welchen Schienenprofile Rauigkeiten der Schienen gemessen wurden

6.1. Messung Rauheit der Schiene [1]]

Die drei Bögen oberhalb Kalter Boden, in welchen die Rauheitsmessungen durchgeführt wurden, verfügen über sehr kleine Bogenhalbmesser mit Radien im Bereich von 100m und liegen gemäss Abbildung 44 im nicht aktiv konditionierten Streckenabschnitt.

Es wird grundsätzlich zwischen Streckenbereichen im aktiv konditionierten Bereich und solchen im verschleppten Bereich unterschieden. Das Verschleppen findet sowohl bei der Talfahrt als auch bei der Bergfahrt statt. Alle Messstellen befinden sich im verschleppten Bereich. Bei Zum Biel (Brücke und Portal) liegen die Messstellen deutlich weiter vom aktiv konditionierten Bereich entfernt als in Lüegelwang (siehe Abbildung 44 und Tabelle 8). Trotz dieses Sachverhaltes unterscheiden sich an den drei Messstellen die mit dem Tribometer erfassten Reibwerte in der Regel kaum voneinander (siehe Kapitel 6.2).

Die Schienenrauheitsmessungen zur Beurteilung der Schlupfwellenbildung werden mit einem geeigneten Messgerät (Beschreibung siehe Anhang 11.1.1) gemäss Norm SN EN 15610 [2]], [6] durchgeführt.

Das Schienenrauheitsmessgerät verfügt über drei Wegsensoren, im vorliegenden Fall im gegenseitigen Abstand 5 mm eingestellt, welche drei parallele Spuren im Fahrspiegel auf dem Schienenkopf messen. Das Messgerät wird von Hand mit ca. 1 m/s durch den Bogen geschoben. Innen- und Aussenschiene werden je zweimal gemessen.

Die Schienenrauheitsmessungen erfolgen in den folgenden Bögen:

Ort	SKK	Radius	Von [km]	Bis [km]
Zum Biel Portal	Ja	110	41.951	41.941
Zum Biel Brücke	Ja	110	42.053	42.025
Lüegelwang	Ja	95	42.556	42.5197

Tabelle 8, Ausgewählte Bögen für Schienenrauheitsmessungen

Die Schienenrauheitsmessungen fanden zu folgenden Zeitpunkten statt:

Bezeichnung in Legende	Datum	Beschreibung	Bemerkung
T1	28.09.2021	Nullmessung vor Schleifen	
T2	21.10.2021	Kurz nach dem Schleifen	
T3	14.01.2022	3 Monate nach Schleifen	Vereiste Schienen, Messwerte z.T. unplausibel (ausser Täschsand)
T4	05.04.2022	6 Monate nach Schleifen	
T5	01.06.2022	8 Monate nach Schleifen	
T6	27.09.2022	12 Monate nach Schleifen	

Tabelle 9, Zeitpunkte der Schienenrauheitsmessungen

Ort	Schienen	Schwellen	Zwischenlage
Zum Biel Portal	SBB I 350HT	Beton VÖV – E M4	weich
Zum Biel Brücke	SBB I 350HT	Beton VÖV – E M4	weich
Lüegelwang	SBB I 350HT	Beton VÖV – E M4	weich

Tabelle 10, Infos Oberbau der gemessenen Bögen

6.1.1. Schienenrauheit [5]

Die Schienenrauheit ist in den folgenden Diagrammen als dB-Wert mit Referenz 1 µm als Terzbandspektren in Funktion der Wellenlänge dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist neben den gemessenen Schienenrauheiten die EN ISO 3095 Grenzkurve, welche bei Luftschallemissionsmessungen in der Geraden für die Zulassung von Fahrzeugen nicht überschritten werden darf.

Erklärung Legendenbezeichnung an einem Beispiel:

T1,1-i-2 bedeutet zum Zeitpunkt T1, Messung 1, Innenschiene (i), Sensor 2 (mittlerer Sensor im Fahrspiegel).

In diesem Kapitel sind ausgewählte und in Kapitel 10.1 alle Terzbandspektren (Messung 1, Sensor 2) der bogeninneren und bogenäusseren Schienen zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.

In den drei während der Betriebserprobung SKK beobachteten Bögen sind schon zu einem früheren Zeitpunkt (2018-2019) ohne SKK-Rauheitsmessungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind pro Bogen jeweils in den Diagrammen (Abbildung 45 bis Abbildung 50) gestrichelt dargestellt. Weiter sind in diesen Diagrammen zum Vergleich die gemessenen Schienenrauheiten zu den Zeitpunkten T1, T2, T4, T5 und T6 dargestellt. Nachstehend werden einerseits die Spektren in den früheren Zeitpunkten mit denjenigen bis zum Zeitpunkt T5 miteinander verglichen, da sich diese über den gleichen Zeitraum entwickelt haben. Andererseits wird der Zustand zum Zeitpunkt T5 mit demjenigen zum Zeitpunkt T6 verglichen. Diese Aufteilung erfolgt, da sich die Zustände an den Fahrflächen der bogeninneren Schienen von T1 bis T5 deutlich von denjenigen im Zeitraum zwischen T5 und T6 unterscheiden.

Zeitraum bis T5 bogeninnen

Hinsichtlich des Effektes von SKK kann das Rauheitsspektrum T5, 246 Tage nach dem Schleifen (Betrieb mit SKK), mit dem blau gepunkteten Spektrum aus der früheren Messung 260 Tage nach dem Schleifen (Betrieb ohne SKK) verglichen werden. Dabei ist mit SKK zum Zeitpunkt T5 in den Bögen Zum Biel kein prägnanter Peak im Wellenlängenspektrum auszumachen. Dies im Gegensatz zu früher, wo sich im Bereich des Terzbandes mit der mittleren Wellenlänge von 80mm die Rauheiten nach dem Schleifen der Schienen innerhalb von 260 Tagen wieder auf dem gleichen Niveau befanden wie vor dem Schleifen. Dagegen erscheint beim Bogen von Lüegelwang bei der Messung zum Zeitpunkt T5 ein leichter Buckel im Wellenlängenbereich mit den mittleren Längen von 63 bis 80mm. Dies deutet auf ein leichtes Schlupfwellenwachstum hin, welches allerdings im Vergleich zu früher ohne SKK im nahezu gleichen Beobachtungszeitraum immer noch stark reduziert ist. Dabei ist jedoch zu beachten, dass zwischen der Messung T4 und der Messung T5 für eine nicht genau bezifferte Zeit erhöhte Reibwerte vorlagen (siehe Reibwertmessungen mit Tribometer). Die Messungen T3 vom Januar 2022 wurden nicht in die Bewertung einbezogen, da diese auf vereister Schiene durchgeführt wurden und daher nicht bedingungsgemäss sind.

Zeitraum bis T5 bogenaussen

An den bogenäusseren Schienenfahrflächen lagen vor dem Schienenschleifen im Bereich der unteren Wellenlängen Werte vor, welche sich leicht oberhalb der EN ISO 3095 Grenzkurve befinden. Einzig im Bogen Biel Brücke lag ein Spitzenwert im Wellenlängenbereich mit der mittleren Wellenlänge von 80mm. Im Zeitraum mit SKK haben sich die Amplituden nach dem Schienenschleifen nicht verändert. Das bedeutet, dass sich auf den bogenäusseren Schienenfahrflächen kaum wahrnehmbare Schlupfwellen ausbilden.

Zeitraum zwischen T5 und T6 bogeninnen

Aufgrund der Spektren zum Zeitpunkt T6 haben sich in diesem Zeitraum an den bogeninneren Schienenfahrflächen aller drei beobachteten Bögen Schlupfwellen entwickelt. Insbesondere im Bogen von Lüegelwang stellten sich zum Zeitpunkt T6 Amplituden ein, welche sich in einer vergleichbaren Grössenordnung befinden wie vor dem Schienenschleifen.

Interessant ist der Sachverhalt, dass sich die Wellenlänge der Schlupfwellen in allen drei Bögen im konditionierten Betriebseinsatz von 80mm auf 63mm verschoben hat.

Wie weiter unten bei den Reibwertmessungen gezeigt wird, haben sich im Zeitraum T5 bis T6 die Reibwerte an den Schienen zum Teil massiv erhöht. Diese Periode fällt mit der ausserordentlichen Hitzeperiode in den Sommermonaten Juli / August 2022 zusammen. Zudem werden die SKK-Anlagen in den Randzeiten abends / morgens bei der MGB ausgeschaltet, was in den Sommermonaten zu einer ungünstigen Veränderung der tageszeitabhängigen Schienenrauigkeiten führt. Dies dürfte der Grund für die Ausbildung der Schlupfwellen in diesem Zeitraum sein.

Zeitraum zwischen T5 und T6 bogenaussen

An den bogenäusseren Schienen hat sich die Rauigkeit im Zeitraum zwischen T5 und T6 nichts verändert. Dies ist wiederum ein Hinweis dafür, dass sich an den bogenäusseren Schienen kaum Schlupfwellen ausbilden. Es wird erwartet, dass sich durch die vorgesehenen Forschungsarbeiten ein besseres Verständnis der Mechanismen an den beiden Schienensträngen ergibt.

Zum Biel Portal

Vergleich Zeitraum 2018 – 2019 ohne SKK und 2021 – 2022 mit SKK - Innenschiene

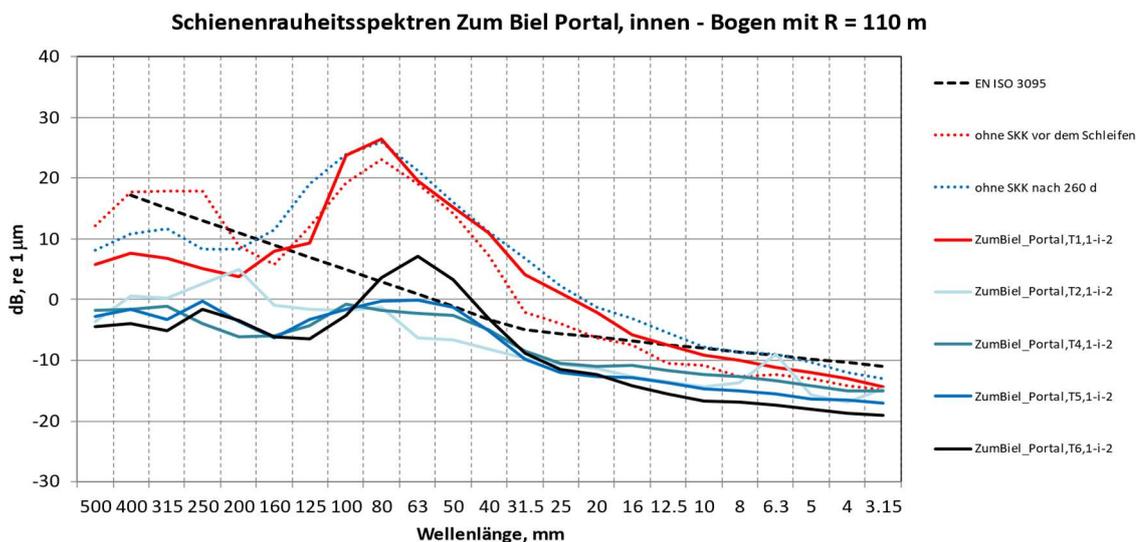


Abbildung 45: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Portal, bogeninnen

Bemerkung: T5 entspricht 246 Tage nach dem Schleifen → deutlich langsames Schlupfwellenwachstum mit SKK, T6 entspricht 364 Tage nach dem Schleifen

Vergleich Zeitraum 2021 – 2022 mit SKK - Aussenschiene

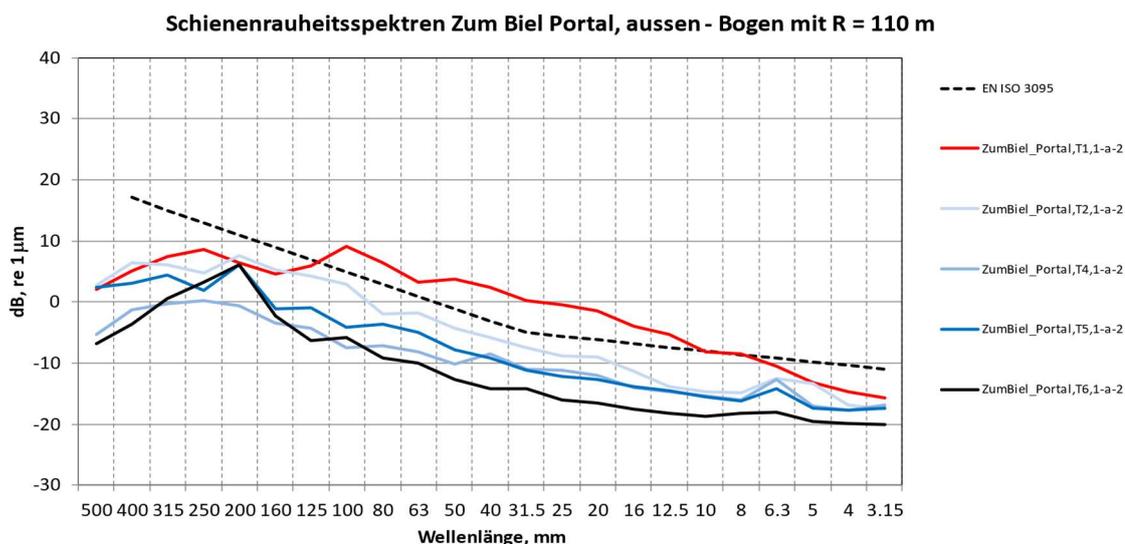


Abbildung 46: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Portal, bogenaussen

Bemerkung: kein Schlupfwellenwachstum mit SKK, Aussenschiene kann als glatt bezeichnet werden

Zum Biel Brücke

Vergleich Zeitraum 2018 – 2019 ohne SKK und 2021 – 2022 mit SKK

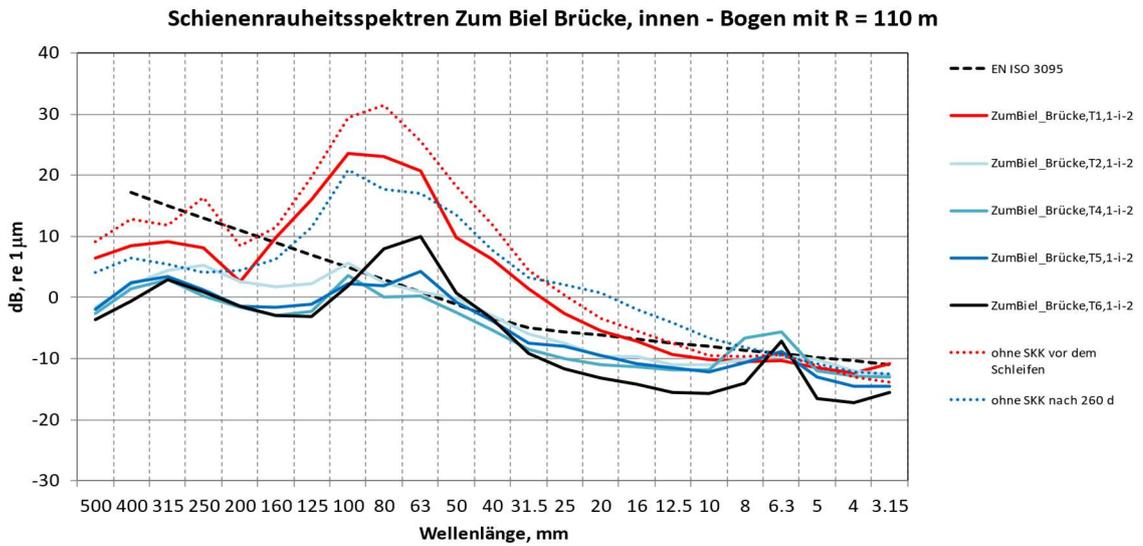


Abbildung 47: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Brücke, bogeninnen

Bemerkung: T5 entspricht 246 Tage nach dem Schleifen → deutlich langsames Schlupfwellenwachstum mit SKK, T6 entspricht 364 Tage nach dem Schleifen

Vergleich Zeitraum 2021 – 2022 mit SKK - Aussenschiene

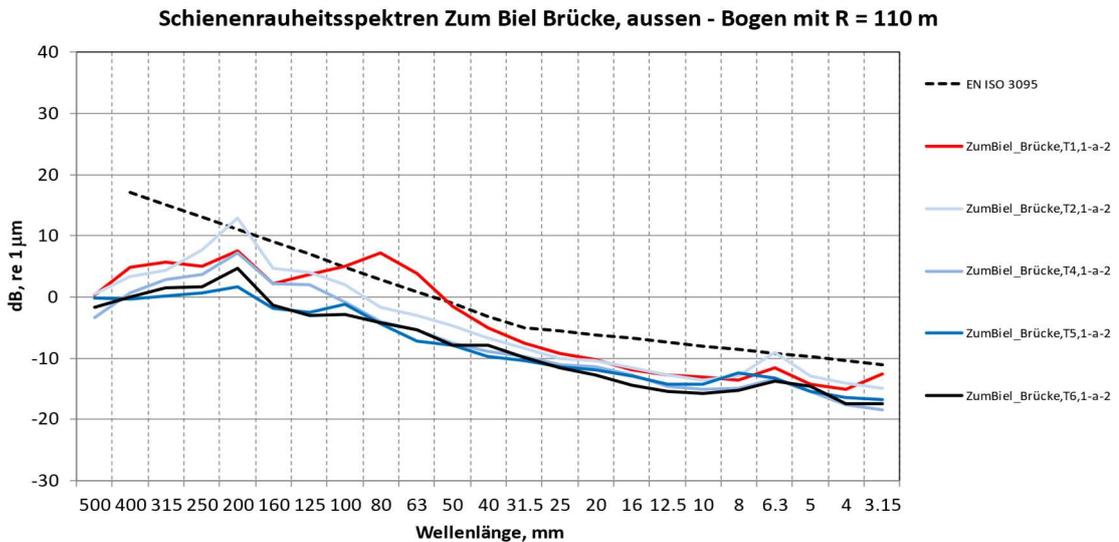


Abbildung 48: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Brücke, bogenaussen

Bemerkung: kein Schlupfwellenwachstum mit SKK, Aussenschiene kann als glatt bezeichnet werden

Lüegelwang

Vergleich Zeitraum 2018 – 2019 ohne SKK und 2021 – 2022 mit SKK

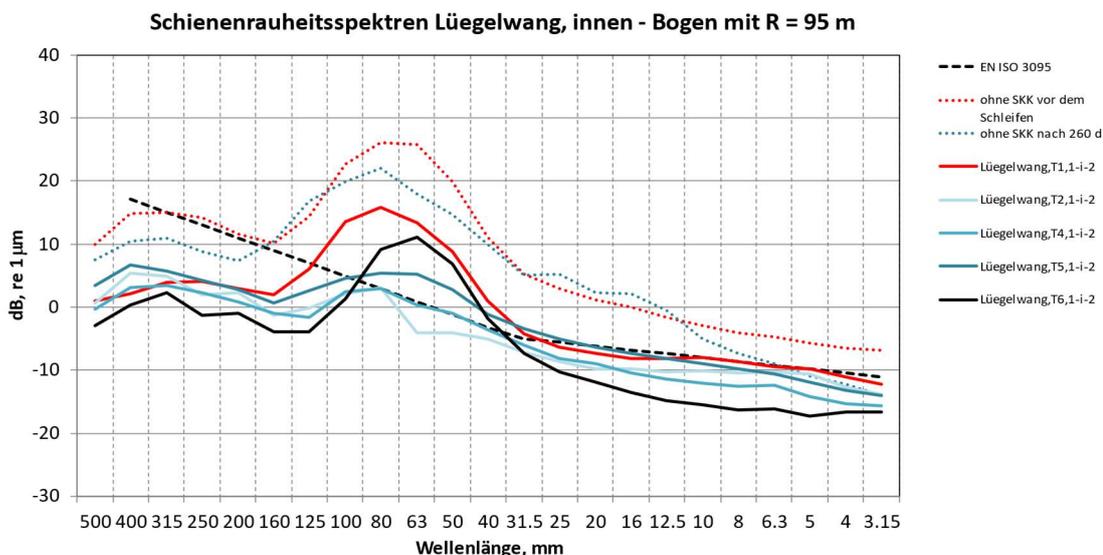


Abbildung 49: Schienenrauheitsspektren Lüegelwang, bogeninnen

Bemerkung: T5 entspricht 246 Tage nach dem Schleifen → deutlich langsames Schlupfwellenwachstum mit SKK, T6 entspricht 364 Tage nach dem Schleifen

Vergleich Zeitraum 2021 – 2022 mit SKK - Aussenschiene

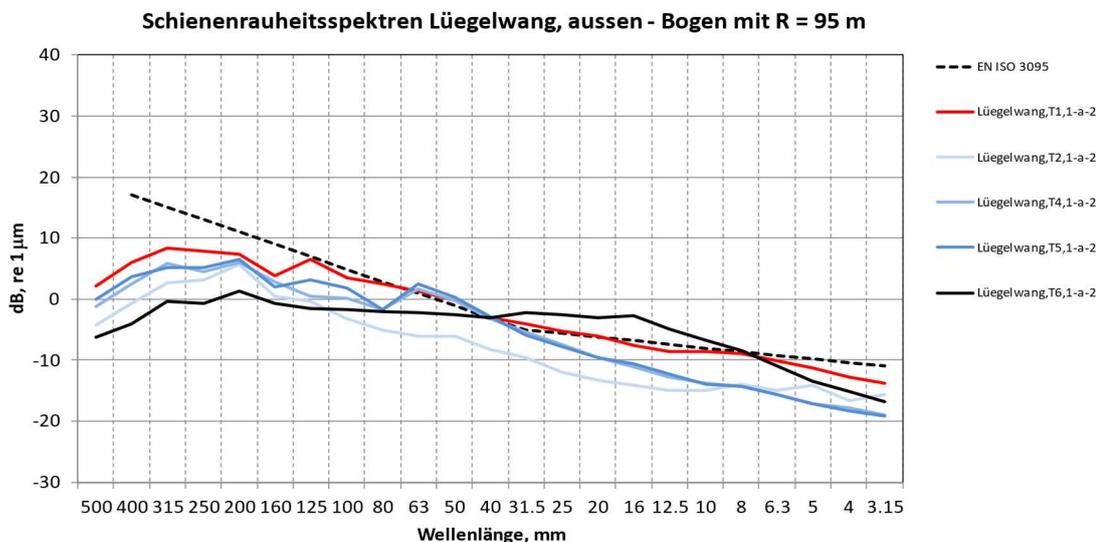


Abbildung 50: Schienenrauheitsspektren Lüegelwang, bogenaussen

Bemerkung: kein Schlupfwellenwachstum mit SKK

6.1.2. Feststellungen Schlupfwellenwachstum in Bögen/ Schienenrauheitsentwicklung

Die drei konditionierten Bögen Zum Biel Brücke / Portal und Lüegelwang, welche bei der Nullmessung vor dem Schleifen deutliche Schlupfwellen bogeninnen zeigten (15-25 dB bei 80-100 mm Wellenlänge), zeigen bis anhin 11 Monate nach dem Schleifen und Start SKK eine deutlich verzögerte Schlupfwellenentwicklung (im Vergleich zu den Messungen 2018-2019). Diese Ent-

wicklung hat sich erst zwischen der zweitletzten und der letzten Messung (T5 und T6) eingestellt, was mutmasslich auf die heissen Temperaturen in den Monaten Juli und August 2022 zurückzuführen ist.

Mit dem Schleifen im Oktober 2021 konnten die Schlupfwellen in den Bögen Zum Biel Brücke / Portal und Lüegelwang grösstenteils beseitigt werden.

Die Aussenschiene Lüegelwang, Zum Biel – Portal und Zum Biel – Brücke zeigen keine klare Entwicklung. Die Schienenrauheiten der Aussenschiene sind im vorliegenden Fall weniger von Interesse als diejenigen der Innenschiene, da sich die Schlupfwellen bogeninnen bilden. Es ist zu überlegen, ob es zukünftig sinnvoll ist, bei der Beseitigung der Schlupfwellen bogeninnen gleichzeitig auch die bogenäusseren Schienen zu schleifen.

6.2. Tribometer Messungen

Für die Reibwertmessungen wird jeweils die bogeninnere und die bogenäussere Schiene dreimal an derselben Stelle gemessen und der Mittelwert übernommen. Die Reibwertmessungen des Frühlings 2021 haben gezeigt, dass das Tribometer (Tribometer LB-Foster) sensitiv darauf reagiert in welchem Bereich des Schienenkopfs gemessen und mit welcher Geschwindigkeit das Gerät längs der Schiene bewegt wird. Um möglichst reproduzierbare Messungen auf dem effektiven Fahrspiegel zu machen, muss das Tribometer mit langsamer Schrittgeschwindigkeit geschoben werden. Neben dem Reibwert werden die Tageszeit und die Umweltbedingungen festgehalten (Temperatur und Luftfeuchtigkeit, vgl. Anhang 11.2). Die Gleisseiten, d.h. Schiene links (rot markiert) und Schiene rechts (gelb markiert) wurden in der Fahrrichtung Brig definiert (vgl. Kapitel 6.2.1).

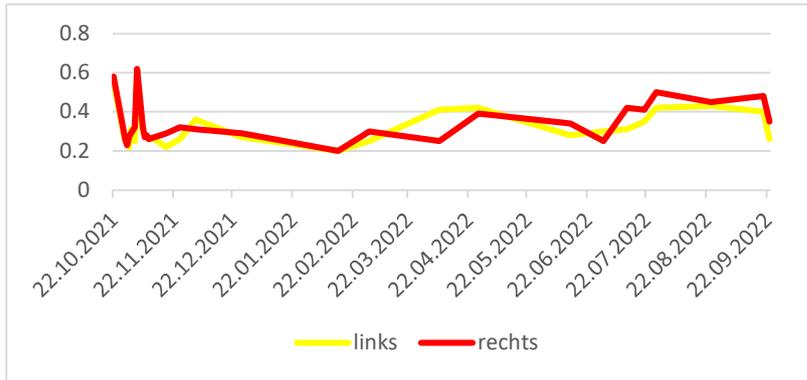
6.2.1. Messpunkte und Messresultate

Seit Beginn der Betriebserprobung (Oktober 2021), wurden bzw. werden diese Messungen wie folgt durchgeführt:

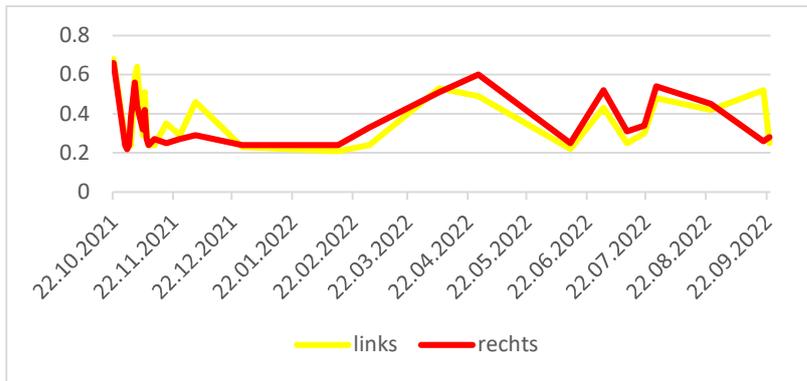
- in der ersten Woche nach Start SKK täglich
- in den folgenden vier Wochen wöchentlich
- anschliessend monatlich

Die tribologischen Messungen werden an den unten aufgeführten Stellen durchgeführt (siehe Kilometrierung. In den Diagrammen sind die Messergebnisse jeweils an den linken und rechten Schienen durchgeführt (linke und rechte Schiene jeweils bei Betrachtung in Richtung Brig).

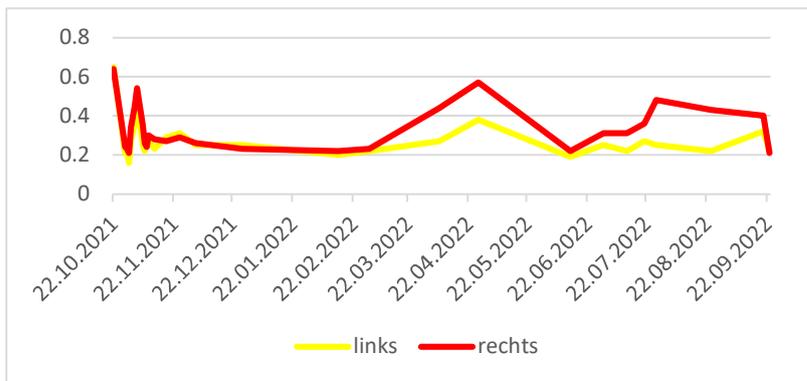
1. Kalter Boden Gleis 2 (Radius 100 m) vor Relaisraum Streckenkilometer 41.080



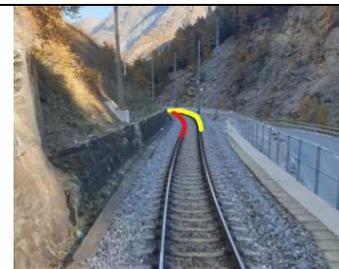
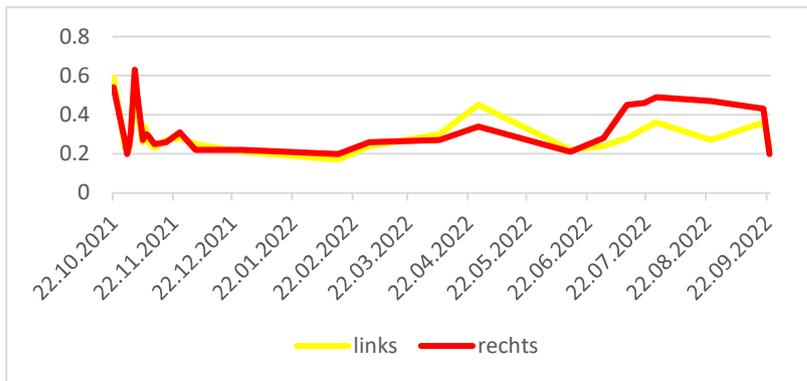
2. Biel Kurve (110m) Streckenkilometer 42.050



3. Biel Gerade Streckenkilometer 42.100



4. Luegelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550



6.2.2. Feststellungen zu den Messergebnissen

Nach den ersten Messungen ist der Reibwert auf konstante 0.2 – 0.3 gesunken. Bei den beiden Reibwertmessungen im April ist der Reibwert überall wesentlich angestiegen. Dies wird damit erklärt, dass diese Messungen mit schlechtem Wetter bzw. mit einem Schlechtwetterfenster zusammengefallen sind. Dadurch war die Luftfeuchtigkeit über längere Zeit über 80%, wodurch entsprechend wenig konditioniert wurde und somit der Reibwert anstieg. Die Messungen vom 13.06.22 lassen darauf schliessen, dass die Reibwerte ohne Änderung der SKK oder anderes Zutun wieder auf das vorherige Niveau von 0.2 – 0.3 gesunken sind.

Ab Ende Juni 2022 sind die Reibwerte an allen Messstellen angestiegen und haben Werte um 0.5 erreicht. Als sich die Werte weiterhin auf einem hohen Niveau befanden und nicht wie zu früheren Zeitpunkten wieder gesunken sind, ging man von den folgenden Vermutungen aus:

- Durch die sehr heissen Temperaturen und die längere Sonneneinstrahlungsdauer in den Monaten Juli und August (bis an die 30°C im Mättertal) in Kombination mit der aufgrund der Erfahrungen vor allem in der kühleren Jahreszeit eingeschränkten Betriebszeit der SKK-Anlage (07:00 – 19:00 Uhr) war die Menge an SKK – Mittel nicht über die gesamte Betriebszeit ausreichend.
- Die extreme Hitze hat die Wirkung des Konditioniermittels ungünstig beeinträchtigt.
- Hinzu kommt, dass die Luft am Morgen jeweils relativ feucht ist (Anlage läuft erst bei Luftfeuchtigkeit < 85%), wodurch die Anlage nicht von schon wieder um 07:00 Uhr eingeschaltet wird. Damit wird ein ausreichend konditionierter Schienenzustand schätzungsweise erst um ca. 10:00 Uhr entsteht. Eine Probemessung des 22.09.2022, bestehend aus einer Messung am Morgen (ca. 08:00 Uhr) und einer Messung am Nachmittag (ca. 14:00 Uhr) stützt diese Vermutung. Wie den letzten Messungen in den Tabellen im Kapitel 11.2 entnommen werden kann, wurden am Morgen hohen Reibwerte gemessen, wohingegen am Nachmittag Reibwerte zwischen 0.2 und 0.3 gemessen wurden. Dies erklärt auch das jeweilige Abfallen der Messwerte am Ende der Messreihen in den Diagrammen der oben aufgeführten vier Messstellen.

Bei den Reibwertmessungen sind deshalb in Zukunft auch die Wetterperioden zu berücksichtigen. Wenn vor der Reibwertmessung eine Regenperiode geherrscht hat, so kann unmittelbar daran anschliessend der Reibwert stärker ansteigen.

6.3. Abrasiver Schienenverschleiss

Das Profil der Schiene wird an bestimmten Messpunkten in den Bögen «Zum Biel – Portal», «Zum Biel – Brücke» und «Lüegelwang» gemessen. Hierfür wurden mehrere Messpunkte pro Bogen gekennzeichnet.

Die Messungen fanden an den in der Historie aufgeführten Daten statt, wobei alle Messungen mit Ausnahme derjenigen am 27.09.2022 mit dem Calipri und der Auswertesoftware des KPZ – Fahrbahn durchgeführt wurden. Die Messung am 27.09.2022 erfolgte mit dem Messgerät der zb, da dieses mit den Gerätschaften sowie mit der Erfassungsoftware für die Schienenmessungen ausgerüstet war, welche eine anschliessende berührungsgeometrische Auswertung der Profile ermöglichte.

Bei den Schienenprofilmessungen vor und nach dem Schleifen 2021 sowie im April 2022 wurden Ungereimtheiten bei der Verortung der Messstellen festgestellt. Diese Messergebnisse konnten deshalb bei der Bewertung des Schienenverschleisses nicht berücksichtigt werden. Im Zuge dieser Analyse wurde erkannt, dass sich 1-5 Messpunkte pro Bogen nicht im Vollbogen befanden. Aufgrund dieser Erkenntnisse und dem Bestreben die Auswirkungen der SKK im Vollbogen im konditionierten Bereich zu erfassen, wurden neue Messpunkte definiert (siehe Abbildung 52 bis Abbildung 56). Die neu definierten Messpunkte setzen sich aus bereits bestehenden Messpunkten (als ganze Zahlen nummeriert) und aus neu festgelegten Messpunkten (als Dezimalzahlen nummeriert) zusammen. Diese Messpunkte sollen am Ende der Betriebserprobung eine aussagekräftige Aussage zum Schienenverschleiss in den Bögen mit SKK liefern. Zudem wurde beschlossen mit einer angepassten Messtechnik die neu erfassten Schienenprofile auch für berührungsgeometrische Analysen verfügbar zu machen. Die Lage der Messpunkte sowie die Messwerte werden in den folgenden Kapiteln 0 bis 6.3.3 aufgeführt.

Historie Messungen Schienenprofil:

- 28.09.2021, vor dem Schienenschleifen: Diese Daten konnten nicht verwendet werden, da die Verortung der Messstellen mit den Folgemessungen nicht plausibel war.
- 21.10.2021, nach dem Schienenschleifen: Diese Daten konnten nur für den Messort Lüegelwang verwendet werden, da die Verortung der Messstellen bei den beiden übrigen Messorten nicht plausibel war.
- 14.01.2022: Die Messungen waren gemäss Messplan vorgesehen, konnten jedoch wegen Schnee auf der Fahrbahn nicht durchgeführt werden.
- 05.04.2022: Diese Daten konnten nur für den Messort Lüegelwang verwendet werden, da die Verortung der Messstellen bei den übrigen beiden Messorten nicht plausibel war.
- 01.06.2022: Nach neuer Verortung aller Messstellen konnten die Messwerte an allen Messstellen verwendet werden.
- 12.07.2022: Alle Messwerte an allen Messstellen konnten verwendet werden.
- 27.09.2022: Messungen wurden mit dem Calipri Rail der zb durchgeführt.
- 07.10.2022: Messung der Schienenprofile nach dem Schienenschleifen durch das KPZ-Fahrbahn.

Aus den gemessenen Schienenprofilen wurden für die Bewertung des Schienenverschleisses die Werte W1 für die bogeninneren Schienen und W1 bzw. W3 für die bogenäusseren Schienen berücksichtigt (siehe Abbildung 51). In dieser Abbildung 51 für den Bogen Zum Biel – Portal handelt es sich um einen Rechtsbogen. Entsprechend ist W3R und W1R die bogenäussere bzw. W1L die bogeninnere Schiene. Die anderen Verschleissgrössen im Bereich der Fahrflächen werden für die Beurteilung des Verschleissverhaltens nicht berücksichtigt.

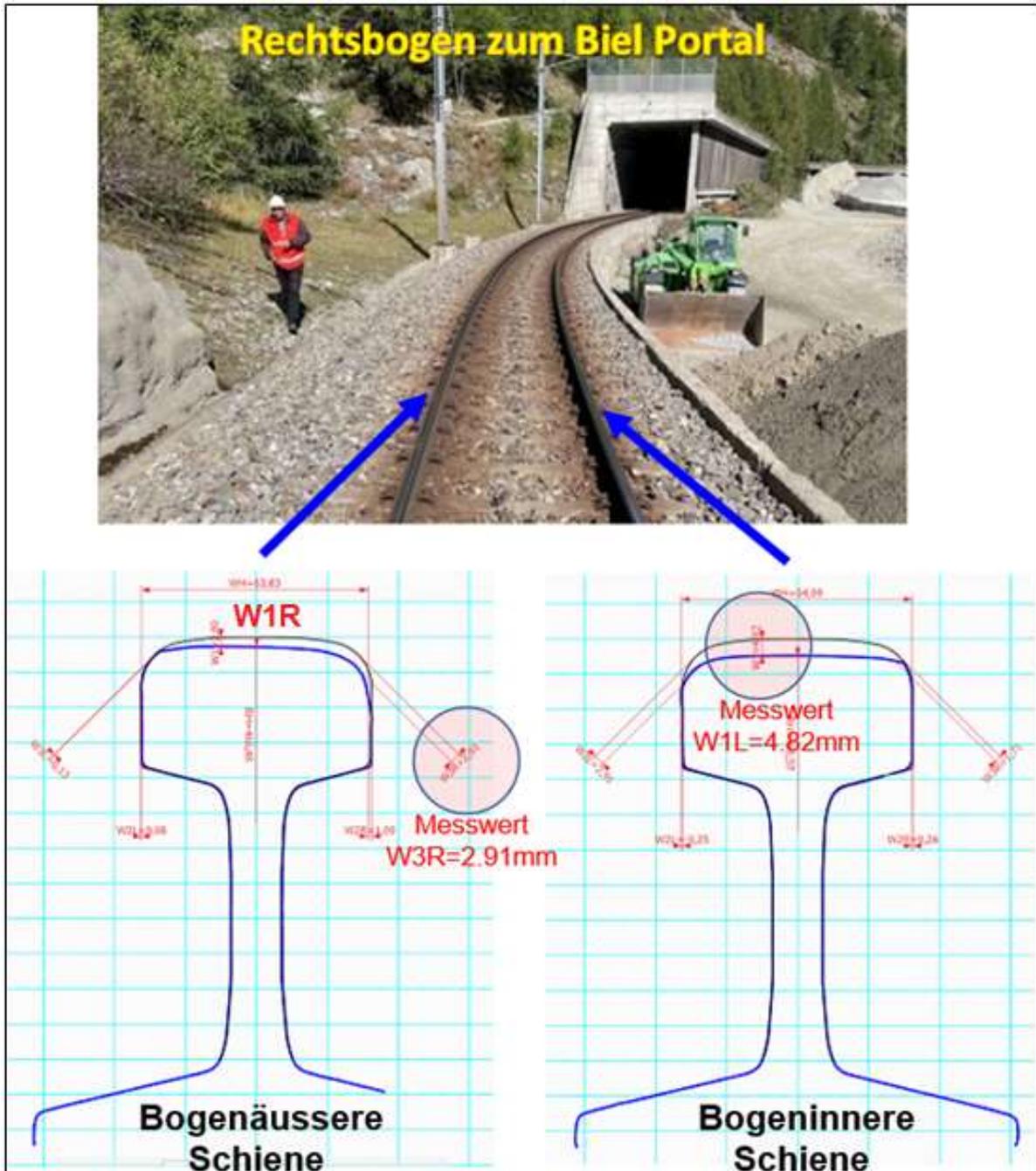
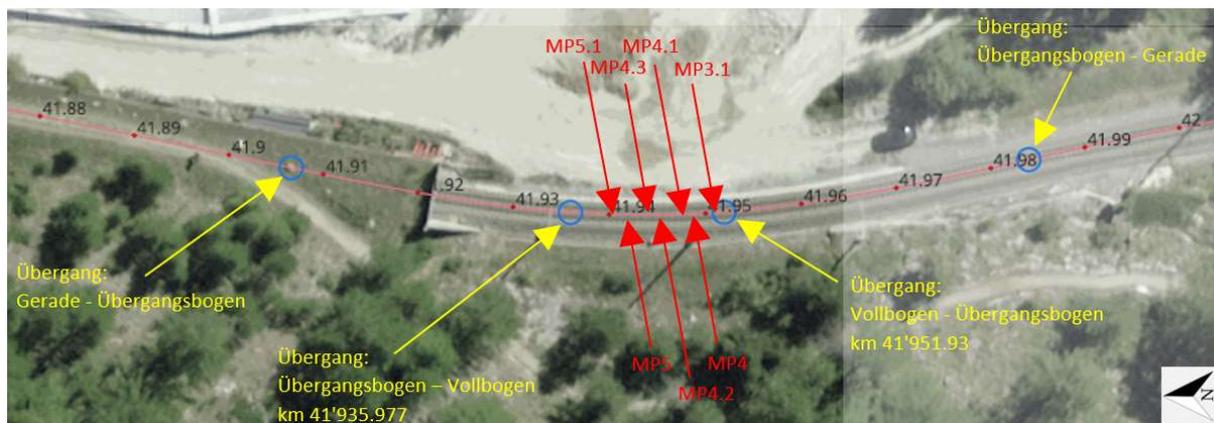


Abbildung 51: Im Bericht aufgeführte Messwerte für den Schienenverschleiss

6.3.1. Zum Biel – Portal (Vollbogen km: 41'935.977 - 41'951.93)

Die **Messpunkte** beim Bogen «Zum Biel – Portal» sind folgendermassen definiert:



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

Abbildung 52: Messpunkte Zum Biel – Portal

Die Abbildung 53 zeigt die Messergebnisse zu W1 an der Innenschiene im Bogen von Zum Biel – Portal. Aus oben erwähnten Gründen sind nur die Messergebnisse von Juni bis Oktober 2022 aufgeführt. In blauer Farbe ist die Messung der zb aufgeführt. Es scheint, dass die Messung oder Auswertung der zb systematisch von denjenigen des KPZ abweicht, jedoch hier im Trend denjenigen des KPZ folgt. Woher diese Abweichung resultiert, wird genauer zu untersuchen sein. Insbesondere ist abzuklären, ob die Ursachen an der Bedienung des Messgerätes, der Messwerterfassung unterschiedlicher Gerätschaften oder an der Verschleissauswertung der unterschiedlichen Auswerteprogramme liegen. Insgesamt ergeben sich entlang des Bogens doch deutliche Unterschiede der Verschleisszustände mit Abweichungen von rund 2mm. Aus diesem Grund ist die Mittelung des Verschleisszustandes über die ganze Bogenlänge mit sehr grossen Streuungen behaftet.

An den Aussenschienen ist der Verschleisszustand (W1, W3) der Schienen gegenüber dem Nominalprofil deutlich günstiger als an den Innenschienen (siehe Kapitel 11.6.1).

Die grüne Linie zeigt die Abweichung vom Nominalprofil einerseits und andererseits den Abtrag durch das Schleifen der Schienen nach dem Schienenschleifen. Insgesamt ist im Beobachtungszeitraum (trotz beachtlichen Temperaturen während der Sommermonate) der Abtrag bei der Schienenhöhe durch Verschleiss kaum messbar. Durch das Schienenschleifen liegt der Abtrag knapp unter 0.2mm. Weitere Verschleissergebnisse zu diesem Bogen sind im Kapitel 11.6.1 aufgeführt.

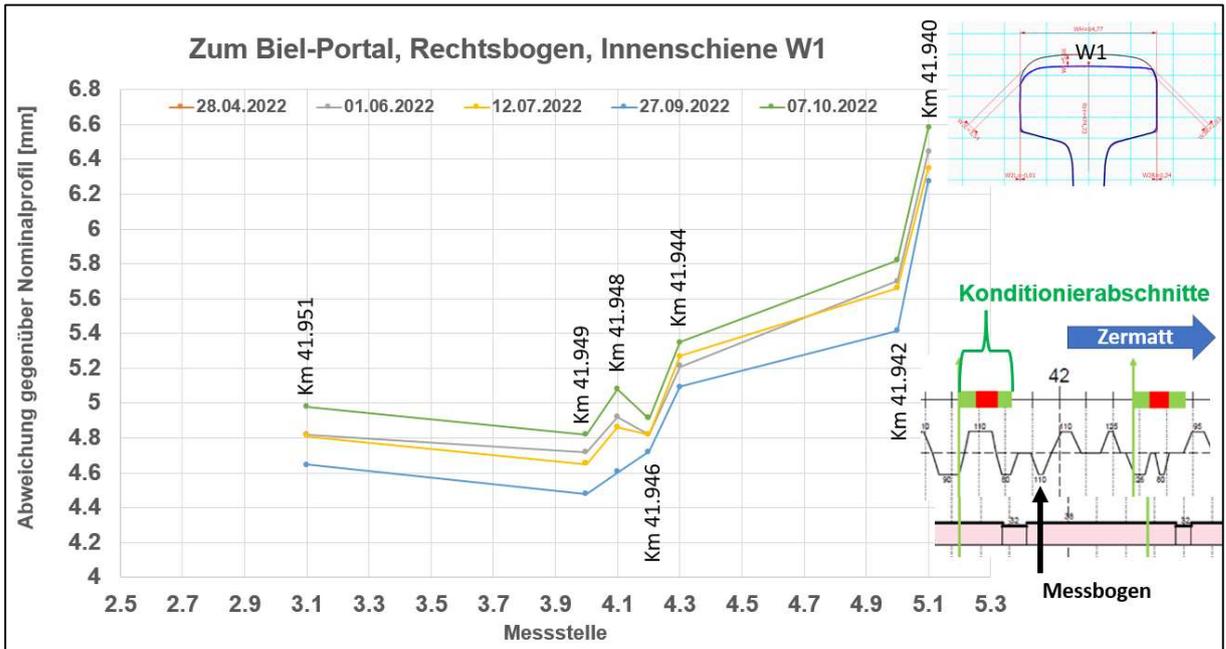
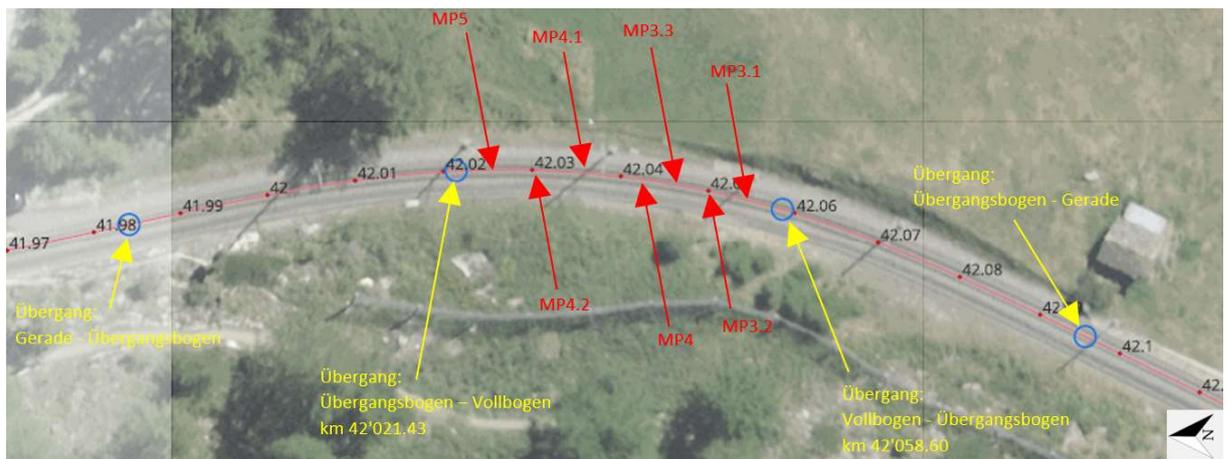


Abbildung 53: Schienenverschleiss W1 Innenschiene Zum Biel – Portal

6.3.2. Zum Biel – Brücke (Vollbogen km: 42'021.43 - 42'058.60)

Die **Messpunkte** beim Bogen «Zum Biel - Brücke» sind folgendermassen definiert:



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

Abbildung 54: Messpunkte Zum Biel Brücke

Die Abbildung 55 zeigt die Messergebnisse zu W1 an der Innenschiene im Bogen von Zum Biel – Brücke. Aus oben erwähnten Gründen sind nur die Messergebnisse von Juni bis Oktober 2022 aufgeführt. In blauer Farbe ist die Messung der zb aufgeführt. Auch hier zeigt sich, dass die Messung oder Auswertung der zb systematisch von denjenigen des KPZ abweicht, jedoch auch hier im Trend denjenigen des KPZ folgt. Das Verhalten an der Innenschiene ist vergleichbar mit demjenigen oben im Bogen von Zum Biel – Portal. Auch hier zeigen sich im Verschleisszustand gegenüber dem Nominalprofil unterschiedliche Bereiche über die Bogenlänge. Die Zunahme des Schienenverschleisses im Beobachtungszeitraum und der Abtrag durch das Schienenschleifen sind auch hier marginal.

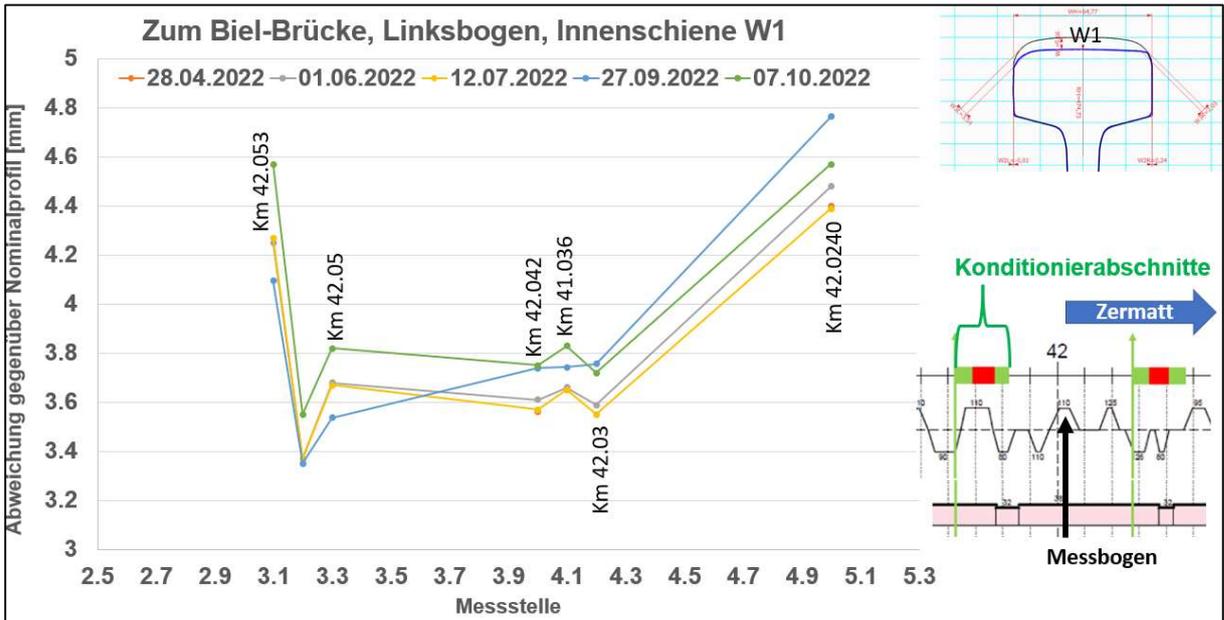
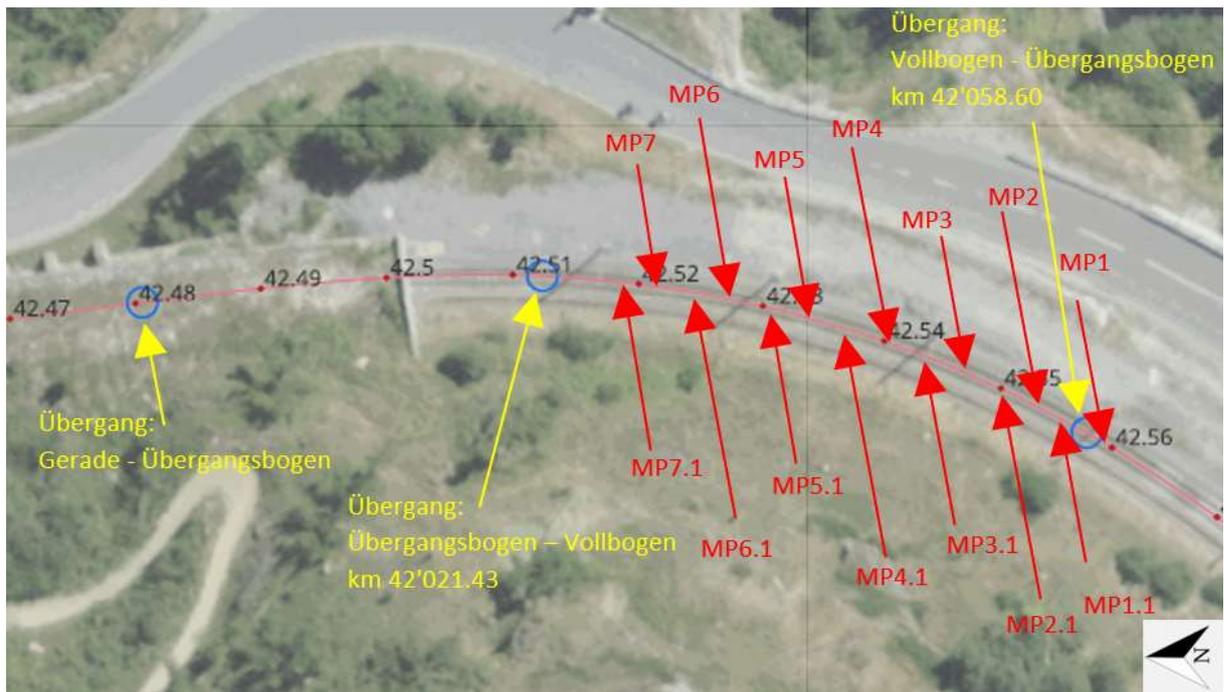


Abbildung 55: Schienenverschleiss W1 Innenschiene Zum Biel – Brücke

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

Die **Messpunkte** beim Bogen «Lüegelwang» sind folgendermassen definiert:



Messpunkte (MP's)	MP1	MP1.2	MP2	MP2.1	MP3	MP3.1	MP4
Kilometer	42'558.8	42'555.7	42'552.8	42'550.3	42'546.6	42'543.7	42'540.6
	MP4.1	MP5	MP5.1	MP6	MP6.1	MP7	MP7.1
	42'537.6	42'534.7	42'531.7	42'528.7	42'525.7	42'522.7	42'519.7

Abbildung 56: Messpunkte Lüegelwang

Die Abbildung 57 zeigt die Messergebnisse zu W1 an der Innenschiene im Bogen von Lüegelwang. Hier sind an einigen Orten auch die Messwerte nach dem Schienenschleifen aufgeführt. In blauer Farbe ist die Messung der zb dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Messung oder Auswertung der zb grösstenteils systematisch von denjenigen des KPZ abweicht, jedoch auch hier im Trend denjenigen des KPZ folgt. An zwei Messstellen sind die Abweichungen der zb gegenüber KPZ etwas ausgeprägter. Im Gegensatz zu den beiden oberen Bögen ist hier ein auf und ab des Verschleisszustandes über die Länge des Bogens festzustellen.

An den einzelnen Messstellen ist während der Beobachtungsdauer sehr wenig Verschleiss aufgetreten. Aufgrund der etwas grösseren Schlupfwellenamplituden musste beim Schienenschleifen leicht mehr abgetragen werden.

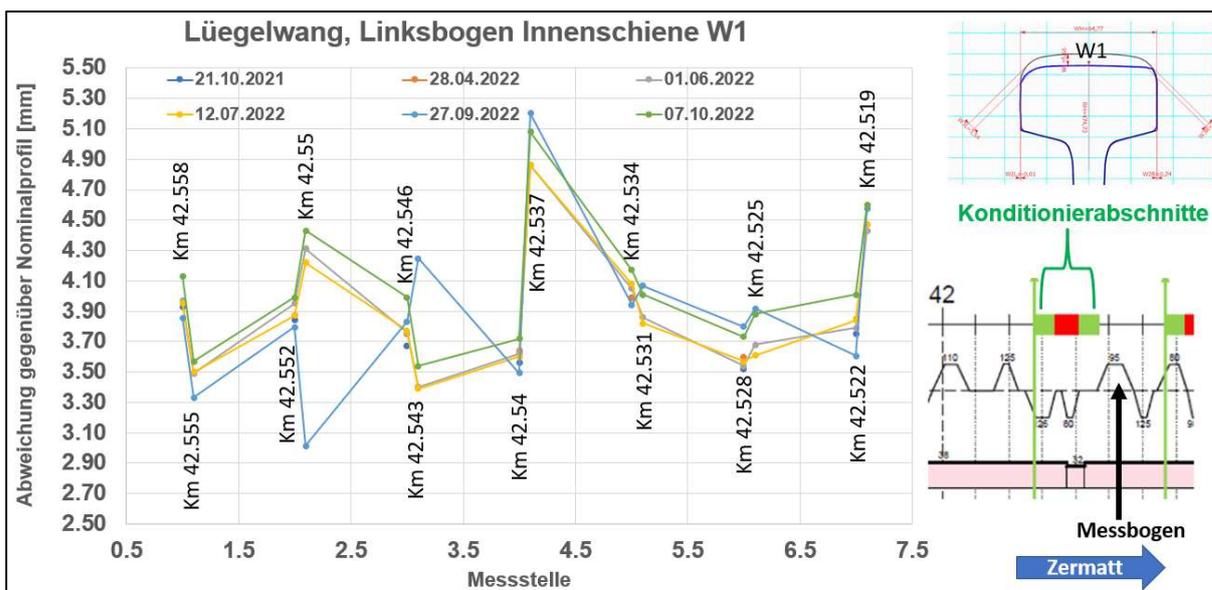


Abbildung 57: Schienenverschleiss W1 Innenschiene Lüegelwang

Bei den Aussenschienen zeigt wie bei den Innenschienen vergleichsweise zu den anderen Bögen ebenfalls ein unstetiger Verlauf des Verschleisszustandes. Der Schleifabtrag im Bereich W3 ist etwas grösser als bei beiden Schienen im Bereich W1(bis 0.4mm). Nachdem an den Aussenschienen aufgrund der Rauheitsmessungen keine Schlupfwellen festgestellt wurden, stellt sich die Frage, warum die Aussenschienen ebenfalls geschliffen wurden.

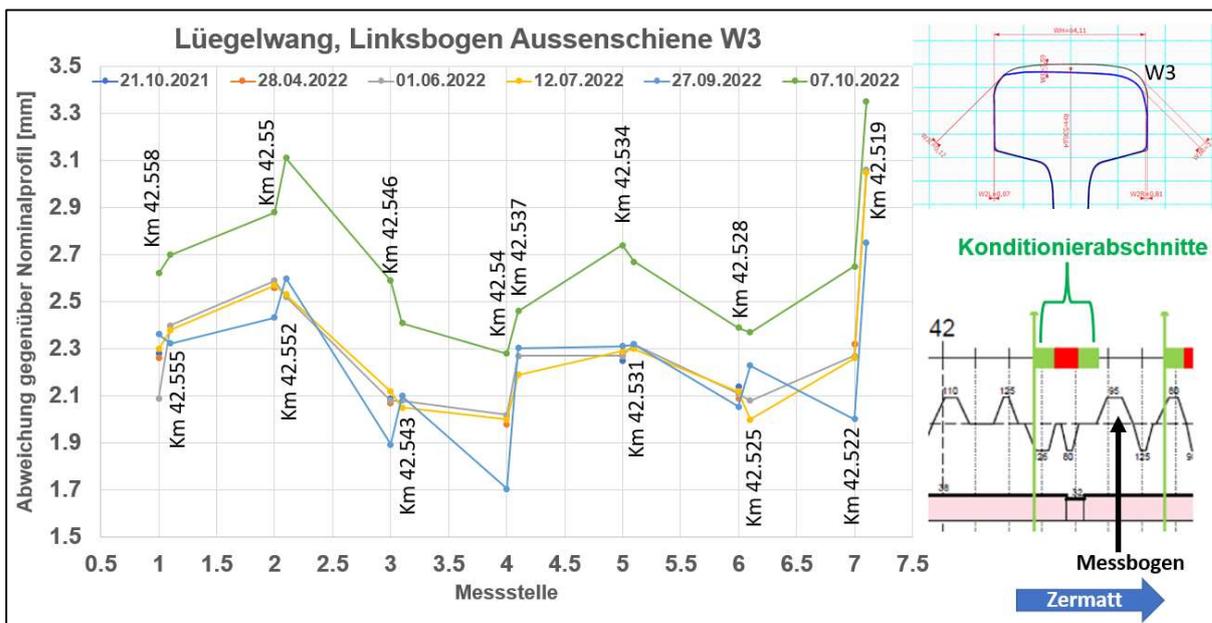


Abbildung 58: Schienenverschleiss W3 Aussenschiene Lügelwang

Visuelle Beobachtungen

Bei der Begehung vom 30.03.22 konnten an den Schienenfahrflächen im Bereich der Beschleunigungsabschnitte (von km 41.9 bis km 42.7) Verschleisspuren festgestellt werden. Dabei handelt es sich um typische Schadensbilder, welche auf hohen Makroschlupf zurückzuführen sind. Es ist davon auszugehen, dass dies vor allem bei der Bergfahrt beim Beschleunigen der HGe 4/4 II von jeweils 32 km/h auf 38 km/h - bei hoher bis maximaler Anhängelast - verursacht wird. Aktuell wird mit dem Betrieb abgeklärt, ob es möglich ist, die Güterzüge in diesem Streckenabschnitt zwischen Kalter Boden und Zermatt bei der Bergfahrt durchgehend mit 32 km/h verkehren zu lassen und nicht jeweils auf 38 km/h zu beschleunigen. Dadurch könnte eine weitere schlupfbedingte Schädigung der Schienenfahrfläche verhindert werden.

6.3.4. Schlussfolgerungen zum Schienenverschleiss

In Abbildung 59 sind die mittleren Verschleisse entlang des jeweiligen Bogens an den Innen- und Aussenschienen an den drei Messorten dargestellt. Dargestellt ist dabei jeweils der Zustand beim Abtrag gegenüber dem Nominalprofil. Es ist zu berücksichtigen, dass die Schienen schon vor dem SKK-Versuch seit einiger Zeit im Betriebseinsatz waren.

In Abbildung 60 ist die Verschleissabtrag W1 in den drei Bögen an den bogeninneren Schienen dargestellt. Die Abbildung 59 enthält nur den Verschleissabtrag der bogeninneren Schienen, da dieser dort signifikant grösser ist als an den bogenäusseren Schienen.

Aufgrund der obigen Darstellungen (Abbildung 53, 55, 57 und 58) ist zu berücksichtigen, dass die Messwerte entlang der Bögen zum Teil sehr stark streuen. Trotz dieses Sachverhaltes zeigen sich in der Abbildung 59 einige Tendenzen:

- Der Verschleiss an den bogeninneren und bogenäusseren Schienen hat während der einjährigen Betriebserprobung als Folge des Abtrags durch die Fahrzeuge nur minim zugenommen (Grössenordnung 0.2mm).
- Der Verschleissabtrag über die Bogenlänge variiert zum Teil stark. Der Grund dafür liegt in der Vergangenheit und dürfte durch Anwendung der SKK in Zukunft ausgeglichener sein.
- Der Verschleissvorrat an den bogenäusseren Schienen ist signifikant grösser als an den bogeninneren Schienen. Es ist davon auszugehen, dass dies eine Folge des deutlich grösseren Abtrags beim Schienenschleifen aufgrund der deutlich grösseren

Schlupfwellenamplituden ohne SKK ist. Es ist davon auszugehen, dass sich SKK insbesondere an der bogeninneren Schiene deutlich günstiger auswirkt.

- Dank des geringeren Wachstums der Schlupfwellen konnte das Schleifintervall verdoppelt werden (von halbjährlich auf jährlich). Es ist davon auszugehen, dass das Schleifintervall nach weiteren Optimierungen des Systems nochmals verlängert werden kann, was sich günstig auf die LCC auswirken wird.

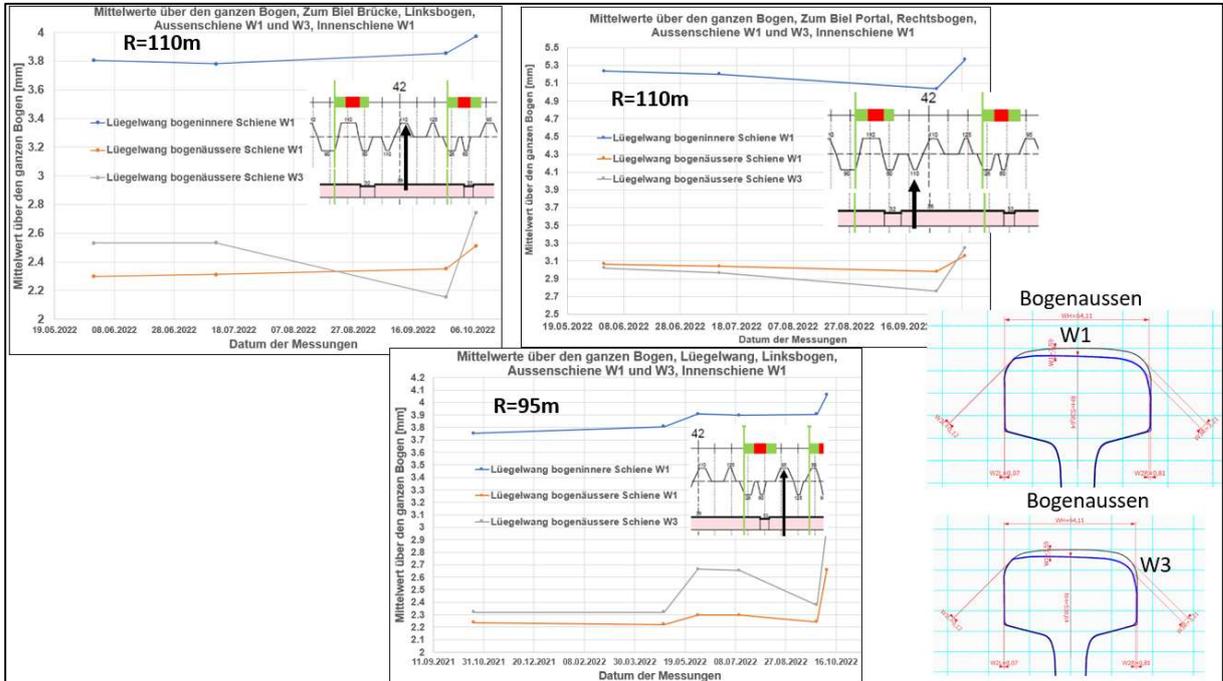


Abbildung 59: Mittelwerte des Verschleisses an Innen- und Aussenschienen

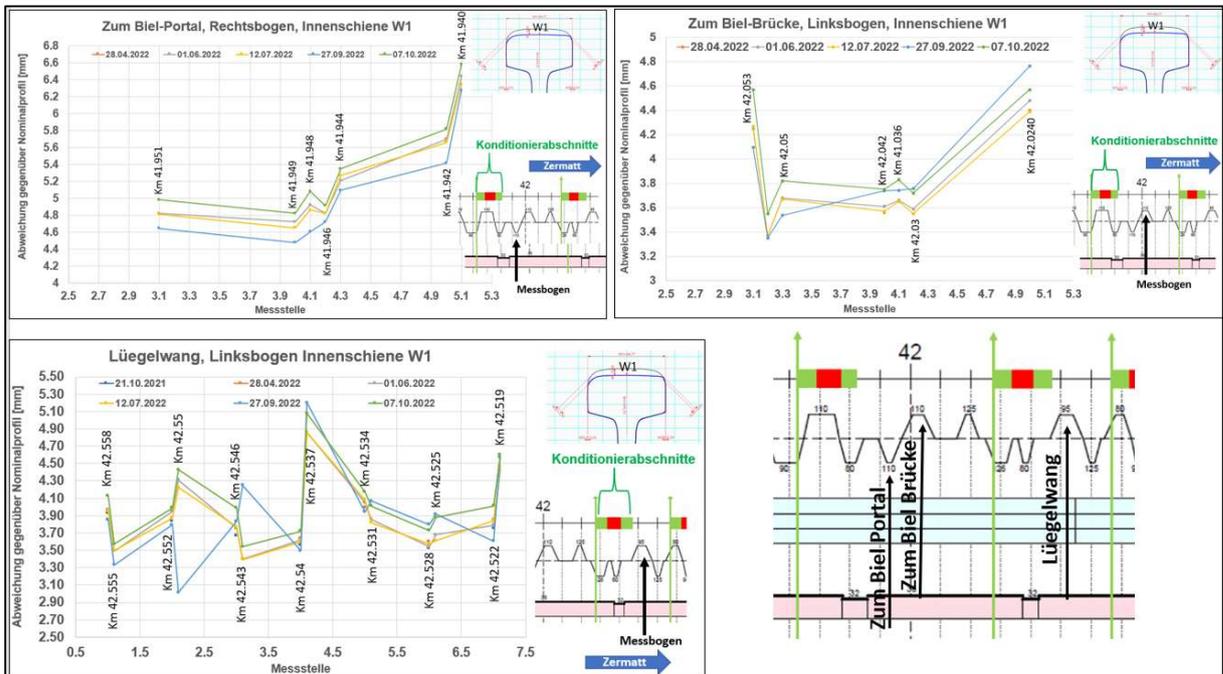


Abbildung 60: Vergleich des Verschleissverhaltens an den Innenschienen

6.4. Schienen- und Schwellenschwingungen

Die Schwingungen an den Schienen und Schwellen werden weder direkt noch systematisch gemessen. Als Referenz können hier am ehesten die Beschleunigungsmessungen auf den Fahrzeugen von «Technode» (vgl. Kapitel 7.2.2) herangezogen werden, die eventuell Aufschluss zu den Schwingungen bzw. Anregungen an den Schienen während der Durchfahrt von Fahrzeugen liefern können. Hierzu werden zu einem späteren Zeitpunkt Messungen am Gleis bzw. an der Schiene gesicherte Hinweise liefern. Diese Messungen sind in Zusammenarbeit der Projekt P3 und P4 mit dem ViF geplant.

6.5. Spurweite

Wie Tabelle 11 und Tabelle 12 (gemessene Spurweiten) entnommen werden kann, haben sich die Spurweiten während der Betriebserprobung kaum verändert. Es ist davon auszugehen, dass sich diese schon seit der Verlegung der Schienen weniger durch den Seitenverschleiss der bogenäusseren Schiene als vielmehr durch die «feldseitige» Verschiebung der beiden Schienen in den Spanneinrichtungen und durch den Verschleiss der entsprechenden Anschläge vergrössert haben. Die Abbildung 62 unten zeigt am Beispiel der im Juli 2022 erfassten Schienenprofile im Bogen «zum Biel Brücke», dass der Seitenverschleiss an den bogenäusseren Schienen sehr gering ist und daher nicht massgeblich zur Spurerweiterung beigetragen hat. Dies ist auf die gute Spurkranzschmierung zurückzuführen. Anhand der bogeninneren Schienen kann zudem eingesehen werden, dass dort praktisch kein Seitenverschleiss aufgetreten ist. Dies ist ein Hinweis dafür, dass in diesen Bögen kaum Spiessgang aufgetreten ist.

Abbildung 61 zeigt schematisch die Kräfte, welche bei der Bogenfahrt auf die Räder der beiden Radsätze des Drehgestells wirken. Es handelt sich um ein Fahrzeug mit starr geführten Radsätzen welches in der Folge beim vorlaufenden Radsatz einen grossen Anlaufwinkel zwischen Rad und Schiene aufweist. Zu beachten sind insbesondere die Kräfte in der Richtung waagrecht / quer. Je enger der Bogen ist, umso grösser werden diese Kräfte insbesondere am vorlaufenden Radsatz bogeninnen und bogenaussen. Hier sind die auf die Räder einwirkenden Kräfte dargestellt. Die auf die Schienen einwirkenden Kräfte verlaufen in der umgekehrten Richtung. Wie nun beim vorlaufenden Radsatz ersichtlich ist, üben die auf die Schienen einwirkenden Kräfte eine spreizende Wirkung aus. Dies erklärt nun auch weshalb sich die beiden Schienen unter dieser Krafteinwirkung zur Feldseite verschieben. Die Spannkräfte vermögen die Schienen nicht in der ursprünglich mittigen Lage zu halten. Wie Abbildung 63 und Abbildung 64 entnommen werden kann, vermögen auch die Festanschlüsse (Rippen) der Schienenbefestigungen den Beanspruchungen nicht Stand zu halten. In der Folge stellt sich die beschriebene Spurerweiterung nicht durch den Schienenverschleiss, sondern hauptsächlich durch die Beanspruchung der Einspannelemente ein.

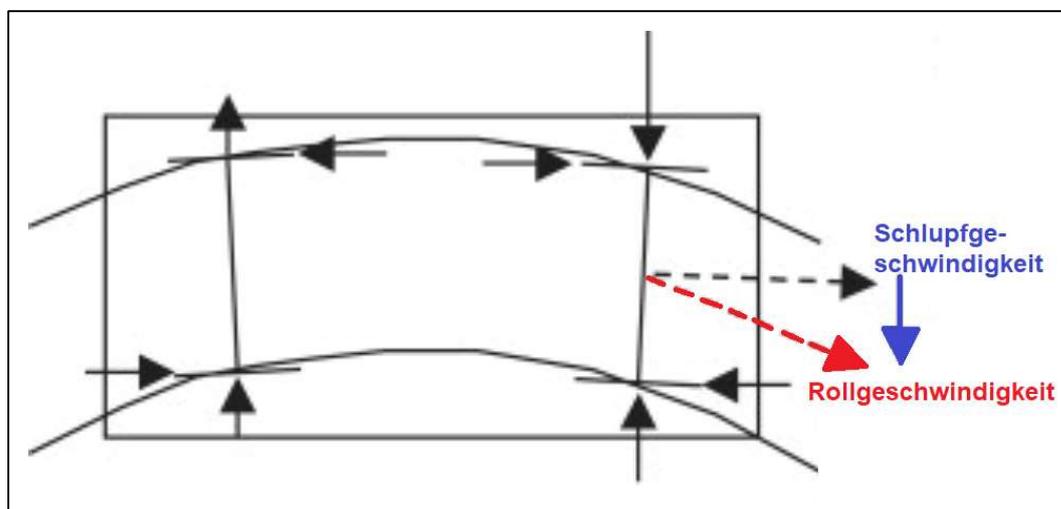


Abbildung 61, Schematische Darstellung der Kräfte, welche bei der Bogenfahrt auf die Räder der beiden Radsätze des Drehgestells wirken

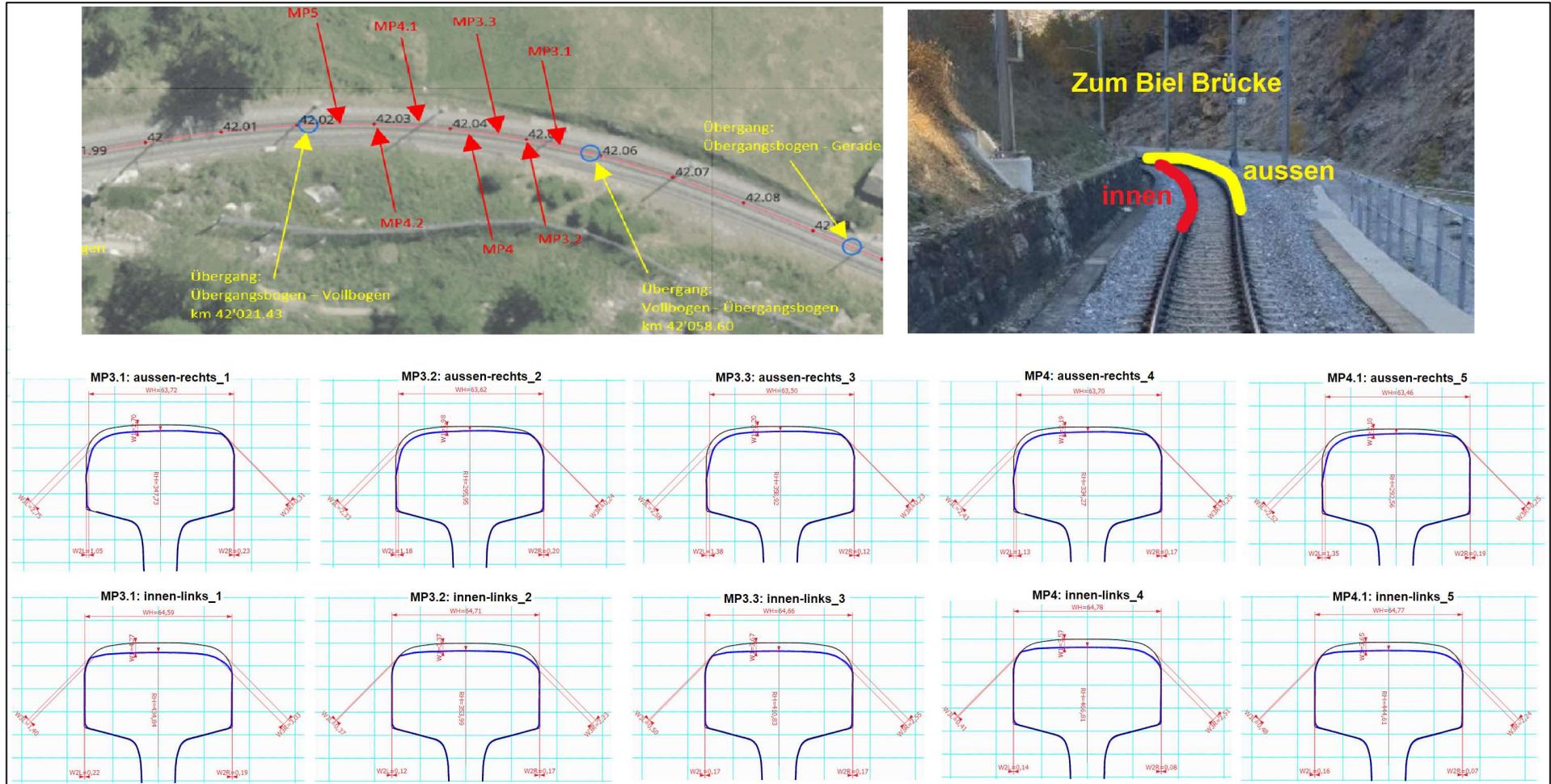


Abbildung 62, Trend beim Verschleisszustand der in Richtung Gleismitte befindlichen Schienenflanken im Bogen von Biel zur Brücke

Es ist davon auszugehen, dass sich der Schienenfuss mit zunehmendem Verschleiss der auf der Schienenfussseite gelegenen Flächen der Rippen der Rippenplatte in diese einarbeitet und damit die Bewegungsfreiheit der Schiene auf der Zwischenlage eingeschränkt wird. Damit werden insbesondere die weichen Zwischenlagen überbrückt und in der Folge die Stützpunktkräfte erhöht.

Durch die SKK werden die Spurführungskräfte reduziert. Dadurch vermindern sich auch die Spreizkräfte der vorlaufenden Radsätze auf die beiden Schienen bogenaussen und bogeninnen (Kräfte nach aussen von der Gleisachse aus) und die Schienen fressen sich weniger in die Rippen ein.



Abbildung 63: Rippenplatte bogeninnen



Abbildung 64: Rippenplatte bogenaussen

	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, Messungen Spurweite Täschsand & Zum Biel-Portal

	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
Lügelwang	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, Messungen Spurweite Zum Biel-Brücke & Lügelwang

7. Messungen / Überwachung und Resultate Allgemein

7.1. Kurvenkreischen

Die Beobachtungen des Lokpersonals deuten darauf hin, dass sich das Kurvenkreischen auf der Strecke der Betriebserprobung reduziert hat. Dieser Eindruck konnte bei einer Begehung der Strecke bestätigt werden. Bei dieser Begehung während der Betriebserprobung war der Lärm bzw. das Kurvenkreischen merklich weniger stark als bei Begehungen vor der SKK-Betriebserprobung.

7.2. Schwingungen am Radsatzlager und Lärm durch kreischende Räder

7.2.1. Beschreibung des Messsystems «Technode»

Das Messsystem der Firma Technode GmbH wurde speziell für die Anwendung auf Schienenfahrzeugen entwickelt. Es umfasst ein Zentralgerät, eine kombinierte GNSS und LTE-Antenne auf dem Dach, die Beschleunigungssensoren an den Radsatzlagern, einen Beschleunigungssensoren am Drehgestellrahmen und die Mikrofone, welche in der Nähe des zu überwachenden Radsatzes am Wagenkasten montiert sind.

Die MGB hat folgende zwei Fahrzeuge mit dem Messsystem ausgestattet:

- Shuttle BDeh 2052
- Komet ABDeh 2026

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 65 - Abbildung 68) zeigen einen Überblick über die Installation des Messsystems auf dem Shuttle BDeh 2052.

Die rohen Messdaten werden dabei autonom erfasst und über die LTE-Verbindung auf einen Server übertragen, wo sie für Auswertungen in einer Datenbank gespeichert werden. Mithilfe des Satellitennavigationssystems lassen sich die Daten auf dem Streckennetz verorten und so kann den einzelnen Messpunkten eine Position auf dem Streckennetz zugeordnet werden.

Die Messdaten sowie Standard – Auswertungen können über ein Web – Interface abgerufen, dargestellt und interaktiv untersucht werden. Ein Beispiel der Web – Ansicht ist in Abbildung 69 dargestellt.

Die Messdaten der Mikrofone werden aufgrund der Datenmenge, die Abtastrate der Mikrofone beträgt 24kHz, nicht als „rohe Daten“ auf den Server übertragen. Mit jeweils 1024 Samples wird direkt im Sensor eine Fourier – Transformation durchgeführt und die so ermittelten Amplituden je Frequenz für jeweils eine Sekunde gemittelt. So entsteht ein Spektrum, welches gemittelte Amplituden für jeweils eine Sekunde wiedergibt. Da die Mikrofone nicht geeicht sind, kann kein Rückschluss auf die effektive Lautstärke ermittelt werden.



Abbildung 65: Zentralgerät railnodeG montiert am Wagenkasten unter dem Faltebalg beim Wagenübergang



Abbildung 66: Kombinierte LTE und GNSS Antenne auf dem Dach des Shuttles BDeh 2052



Abbildung 67: Sensor railnodeX mit Mikrofon montiert am Wagenkasten des Shuttles BDeh 2052

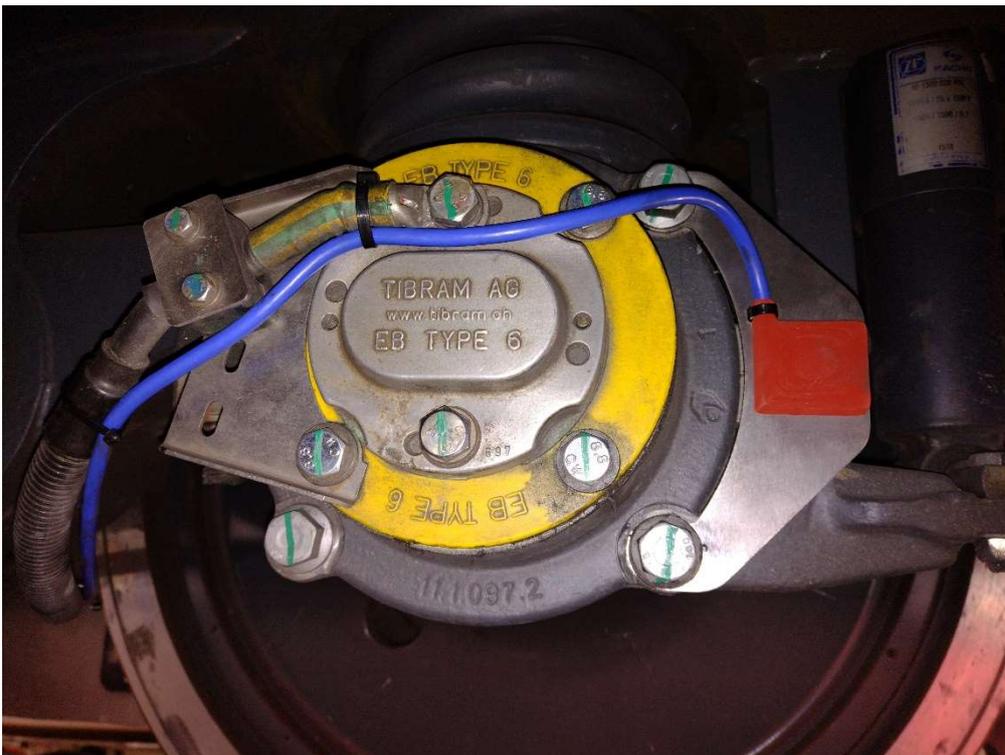


Abbildung 68: Sensor railnodeX mit Beschleunigungssensor montiert am Wagenkasten des Shuttles BDeh 2052

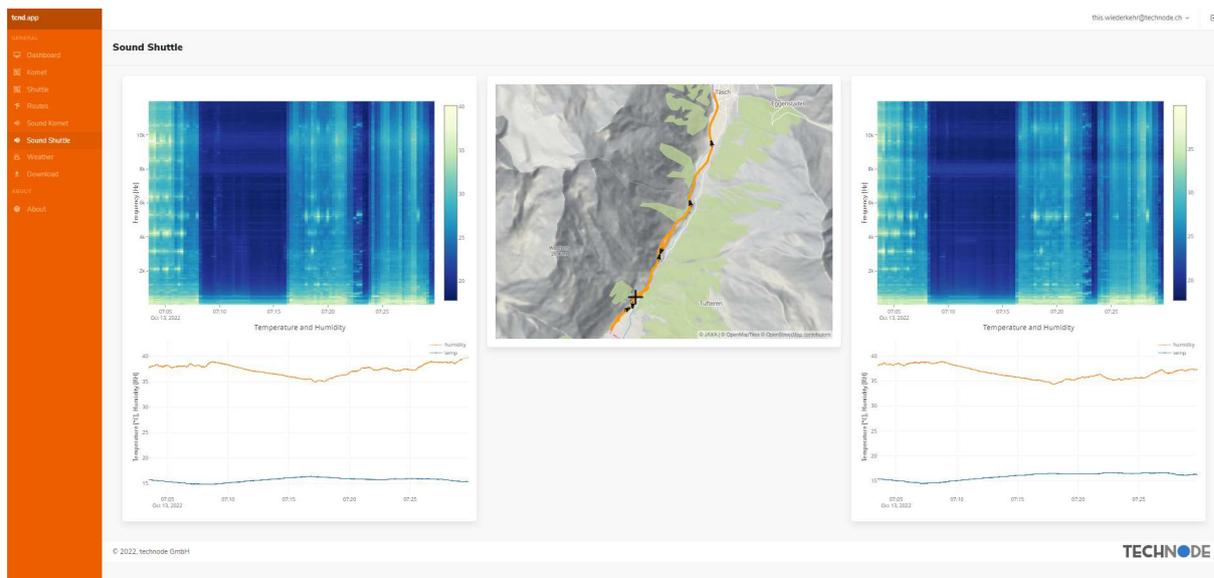


Abbildung 69: Darstellung der Mikrofonmessdaten im Web - Interface

7.2.2. Schwingungen am Radsatzlager erfasst mit Messsystem «Technode»

Zur Erfassung der Schwingungen wurden wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben auf einem Shuttle und einem Kommet Beschleunigungssensoren installiert. Diese waren schon vor Beginn der SKK-Betriebserprobung im Einsatz, weshalb hier ein Vergleich zwischen den Beschleunigungen vor und nach Beginn der Betriebserprobung möglich ist. In Abbildung 70 ist die Entwicklung der Beschleunigungen über die Monate September 2021 bis September 2022 zwischen «Täschsand» und Zermatt zu sehen. Diese Abbildung ist so zu interpretieren, dass die abgefahrene Strecke bzw. deren Abschnitte jeweils in der Farbe dargestellt werden, die der durchschnittlichen Stärke der Beschleunigungen entspricht. Die Skala der Farben geht hierbei von dunkelgrün (geringe Beschleunigungen) über gelb (mittlere Beschleunigungen) bis hin zu dunkelrot (grosse Beschleunigungen).

Vor dem Schienenschleifen und damit vor Beginn der SKK-Betriebserprobung (September 2021) war ein wesentlicher Teil der Strecke Täschsand – Zermatt rot bis dunkelrot (grosse Beschleunigungen). Dies insbesondere auch in jenen Bögen, in welchen der Schienenverschleiss gemessen wird (Bögen Zum Biel Portal, Zum Biel Brücke und Lügelwang).

Nach dem Schienenschleifen und vor Beginn der SKK-Betriebserprobung (Oktober 2021) sind die roten und dunkelroten Bereiche nicht mehr erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass mit der hier verwendeten Messtechnik zumindest grössere Amplituden von Schlupfwellen erkannt werden können. Bis zu welchem Ausmass dies der Fall ist muss durch weitergehende Beobachtungen und Analysen verfolgt werden.

Seit Beginn der SKK-Betriebserprobung (November 2021) sind die Schwingungen gegenüber September 2021 geringer geworden, was daran zu erkennen ist, dass die entsprechenden Streckenabschnitte «grüner» dargestellt sind. Diese Entwicklung setzt sich bis im Juni 2022 fort, wo sich die gemessenen Beschleunigungen in einem Bereich Dunkelgrün befinden (geringe Beschleunigungen). Im Juli und im August 2022 sind hier die Beschleunigungen gegenüber den vorhergegangenen Monaten angestiegen, was an den orangen Anteilen ersichtlich ist. Dies deckt sich mit den anderen Messergebnisse (höhere Reibwerte, höhere Schienenrauheit). Diese Entwicklung wird auch hier mit den heissen Temperaturen in diesen Monaten, kombiniert mit den langen Sommertagen erklärt, die ein schnelleres Abtragen des SKK-Mittels begünstigen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass über die deutliche Mehrheit der aufgezzeichneten Monate eine signifikante Tendenz zu verminderten Beschleunigungen erkennbar ist. Dies bedeutet, dass abgesehen von der Periode Juli – August 2022 kein bemerkenswertes Wachstum der Schlupfwellen aufgetreten ist.

September
01.09.21 – 01.10.21



Oktober
01.10.21 – 01.11.21



November
01.11.21 – 01.12.21



Dezember
01.12.21 – 01.01.22



Januar
01.01.22 – 01.02.22



Februar
01.02.22 – 01.03.22



März
01.03.22 – 01.04.22



April
01.04.22 – 01.05.22



Mai
01.05.22 – 01.06.22



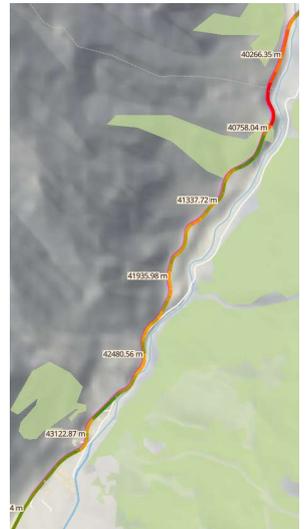
Juni
01.06.22 – 01.07.22



Juli
01.07.22 – 01.08.22



August
01.08.22 – 01.09.22



September
01.09.22 – 01.10.22



Abbildung 70: Historie Vibrationen «Täschsand» - Zermatt, September 21 - August 22

7.2.3. Schallemission erfasst mit Messsystem «Technode»

An den beiden Fahrzeugen wurden, wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben, auch Mikrofone installiert, welche Aufschluss darüber geben sollen, ob und in welchen Bögen «Kurvenkreischen» auftritt. Die Mikrofone sind beidseitig eines Radsatzes am Fahrzeugkasten in der Nähe der Aussenseite der Räder angeordnet. Anhand der durch diese Messung anfallenden Daten soll in Zukunft erkannt werden, an welchen Stellen der Strecke Kurvenkreischen auftritt und allenfalls Hinweise auf deren Korrelationen mit dem Schwingungsverhalten an den Radsatzlagern liefern (Mechanismen). Ob und in welcher Form die für das Kreischen verantwortliche Eigenmodi der Räder angeregt werden, kann anhand der Farbe an der entsprechenden Stelle auf der Strecke der Spektraldarstellung in Abbildung 71 entnommen werden. Anhand der Farbskala in Abbildung 71 wird es in Zukunft möglich sein, die der Strecke zugeordneten angeregten lärmrelevanten Eigenmodi zu identifizieren und damit die Wirksamkeit der durch das Reibungsmanagement getroffenen Massnahmen zu überwachen.

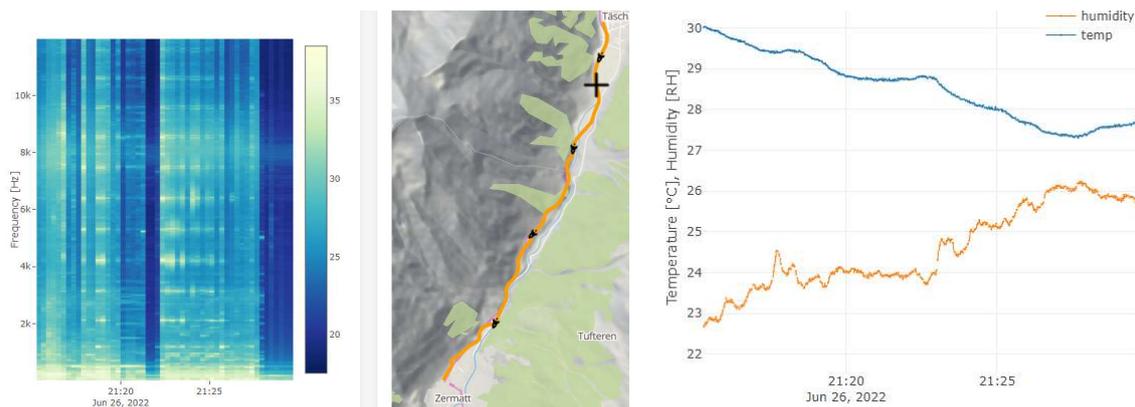


Abbildung 71: Technode-Messdaten: Täsch - Zermatt Frequenzbereiche & Temperatur / Luftfeuchtigkeit

Hypothese Herkunft des Lärms

In der Literatur werden hauptsächlich zwei Lärmuster bei der Bogenfahrt von Schienenfahrzeugen unterschieden. Dies ist einerseits das Kurvenkreischen (eng. Squealing) und andererseits der Spurkranzlärm (eng. Flangeing). Beide treten hauptsächlich in Bögen mit kleinen Halbmessern auf.

Das Squealing ist ein durchringender, „tonaler“ Lärm. Das Flangeing hingegen eher ein „kratzendes“ „ziing-ziing-ziing“ – Geräusch, welches als nicht „tonal“ bzw. intermittierend beschrieben wird.

Der Stand des Wissens ist aktuell nicht so weit, dass es eine einheitliche Lehre über die Herkunft dieser Geräusche gibt. Im Folgenden wird diesbezüglich eine Hypothese aufgestellt:

Beide Effekte entstehen, da die Rollradien-Differenz der Radsätze und / oder das Stellverhalten der Radsätze nicht ausreicht, um enge Bögen selbststeuernd zu befahren. Dies führt dazu, dass relativ – Bewegungen im Rad – Schiene Kontakt entstehen, welche zu hochfrequenten Schwingungen und Lärm führen können.

- Squealing entsteht aufgrund des Stick-Slip-Effekts im Rad – Schiene Kontakt auf der Kurveninnenseite. Es wird dabei hauptsächlich ein Eigenmode der Radscheibe im Zusammenspiel mit der Schiene periodisch angeregt. Daher die „Tonalität“ dieses Geräusches. Der Stick-Slip Effekt findet dabei oben auf der Schienenfahrfläche statt. Daher kann dieser Effekt durch das SKK beeinflusst werden.
- Flangeing entsteht aufgrund des periodischen Anschlagens des Spurkranzes auf der Kurvenaussenseite. Beim Anschlagen werden ähnlich einem Triac-Stoss sämtliche Frequenzen angeregt. Daher das „kratzen“ nicht „tonale“ Geräusch. Dieses Anschlagen entsteht an der Seite der Schiene und am Spurkranz. SKK hat daher nur einen geringen Einfluss auf das Flangeing. Hingegen kann dieser Effekt mittel Spurkranzschmierung beeinflussen werden.

Um diese Hypothese zu prüfen, wurden die folgenden Schritte unternommen:

1. Begleitete Messfahrten mit dem Komet und dem Shuttle vom 23.11.2021
2. FE-Simulation der Radscheiben zum Ermitteln der Eigenmoden
3. Anschlagen der Radscheiben im Depot Glis mit einem Hammer
4. Stationäre Schallmessungen in Visp und St. Niklaus

Zu 1.: Begleitete Messfahrten vom 23.11.2021

Die begleiteten Messfahrten wurden am 23.11.2021 auf der Strecke Visp-Zermatt und Täsch-Zermatt durchgeführt. Das Ziel dieser begleiteten Messfahrten war die subjektive Bewertung des Lärmes festzuhalten und anschliessend mit den Messdaten zu vergleichen. Dabei wurde speziell darauf geachtet, die Geräusche in „Flangeing“ und „Squealing“ zu differenzieren. Dazu wurde jeweils die genaue Zeit dieser Effekte aufgeschrieben.

Leider waren die Randbedingungen an diesem Tag der begleiteten Messfahrten ungeeignet und es trat nur sehr wenig Kurvenkreischen auf, was eine Charakterisierung schwierig macht.

In Nachgang der Messfahrten wurden die gemessenen Spektren der Mikrofone für jene, welche subjektiv als Squealing und Flangeing klassifiziert wurden separat gemittelt. Dabei zeigte sich, dass tendenziell breitbandiges Rauschen als Flangeing und schmalbandige Geräusche als Squealing klassifiziert wurden.

Zu 2. und 3.: Eigenmoden und Frequenzen der Radscheibe

Um die Eigenmoden und Frequenzen der Radscheibe zu ermitteln, wurde einerseits eine FE-Simulation durchgeführt und andererseits die Radscheibe im Depot Glis mit dem Hammer angeschlagen.

Die Eigenmoden der FE-Simulation wurden nach den Moden mit hoher axial-schwingender Masse gefiltert. Die Eigenfrequenzen und zugehörigen Schwing-Formen sind in Abbildung 72 dargestellt.

Der transiente Messschrieb der Spektren beim Anschlagen der Rad-Scheiben ist in Abbildung 73 und Abbildung 74 dargestellt.

Aus den begleiteten Messfahrten wurden die gemittelten Spektren mit den Effekten Squealing und Flangeing genutzt, um die Frequenz-Peaks zu ermitteln.

Die Resultate der so ermittelten Frequenzen sind in der Tabelle 13 zu finden. Ein Vergleich der so ermittelten Frequenzen zeigt erstaunlich gute Übereinstimmung.

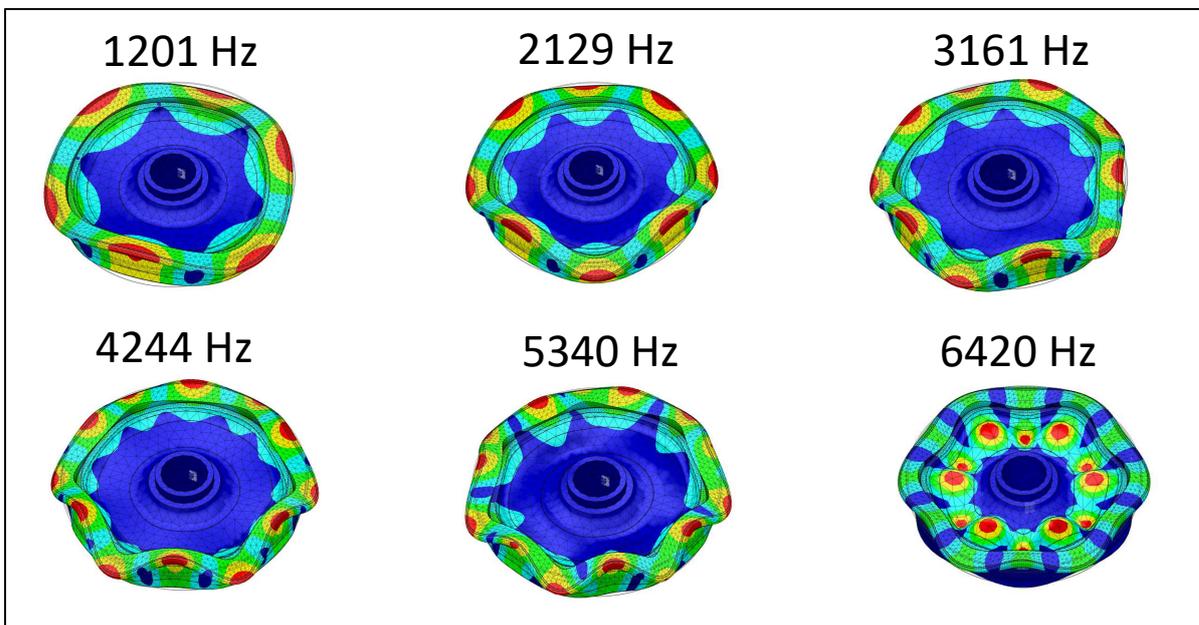


Abbildung 72: Eigenmoden mit hoher partizipierender Masse in axialer Richtung aus FE-Simulation

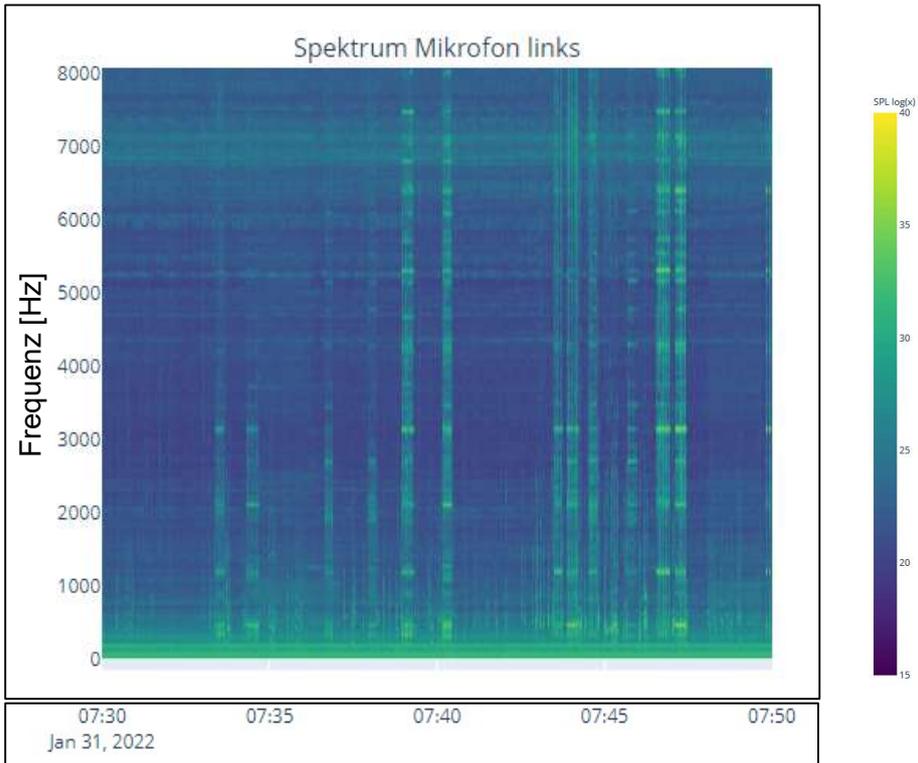


Abbildung 73: Am 31.01.2022 ermittelte Frequenzspektren beim Anschlagen des Rades, linkes Rad

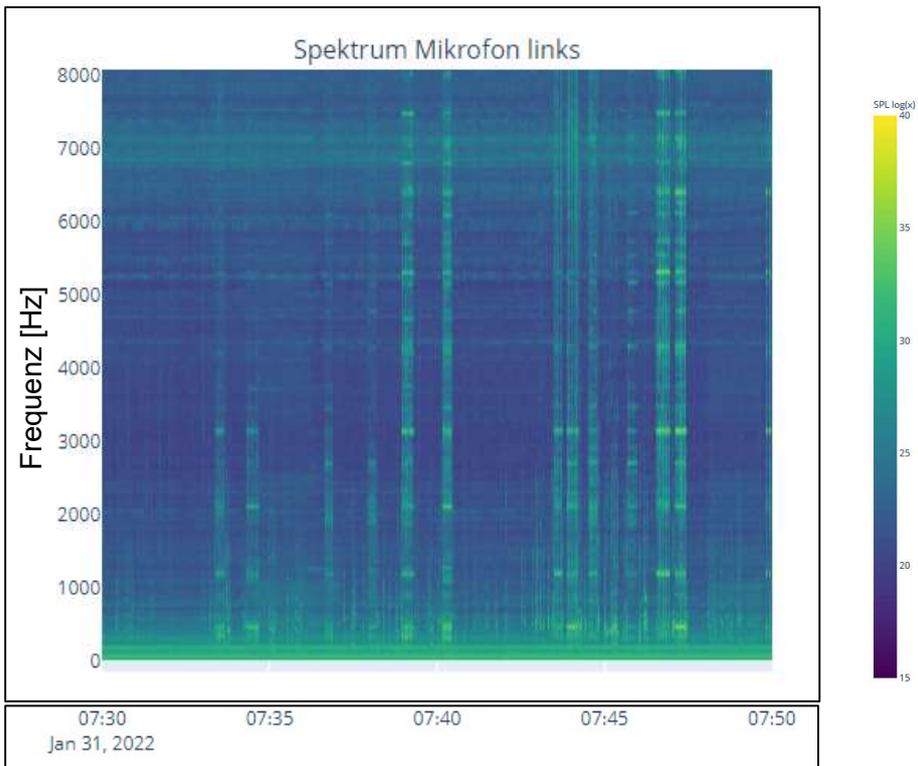


Abbildung 74: Am 31.01.2022 ermittelte Frequenzspektren beim Anschlagen des Rades, rechtes Rad

	Frequenz Fe-Simulation [Hz]	Frequenz-Peaks Shuttle bei Rad-An- schlagen [Hz]	Frequenz-Peaks aufgrund Messfahrt [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

Tabelle 13: Frequenzen der Eigenmoden aus FE - Simulation, Anschlagen der Radscheibe und aus Messfahrt

Zu 4.: Stationäre Schall-Messung in Visp und Glis

Aufgrund der bisher angelaufenen Messdaten des Messsystems auf dem Shuttle und dem Komet wurde erkannt, dass teilweise in Kurven nur spezifisch eine Frequenz bei 5.3 kHz angeregt wird. Es wurde daher die Vermutung angestellt, dass es sich dabei um das „tonale Kurvenkreischen“ handelt. Um dies weiter zu verifizieren hat das Kompetenzzentrum Fahrbahn (KPZ) stationäre Lärmmessungen in zwei Kurven durchgeführt, welche aufgrund von Erfahrungen zu Kurvenkreischen neigen. Dies sind die Kurven in Visp (Bahn km 9.1, 90m Radius) und in St. Niklaus (Bahn km 26.2, 100m Radius). Die Lärmmessungen der Vorbeifahrt des Komets wurden dann genutzt, um Frequenzspektren zu erstellen. Diese so ermittelten Spektren sind in Abbildung 75 dargestellt. Wie zu erkennen ist, treten Amplituden – Spitzen bei ca. 5.3 kHz auf.

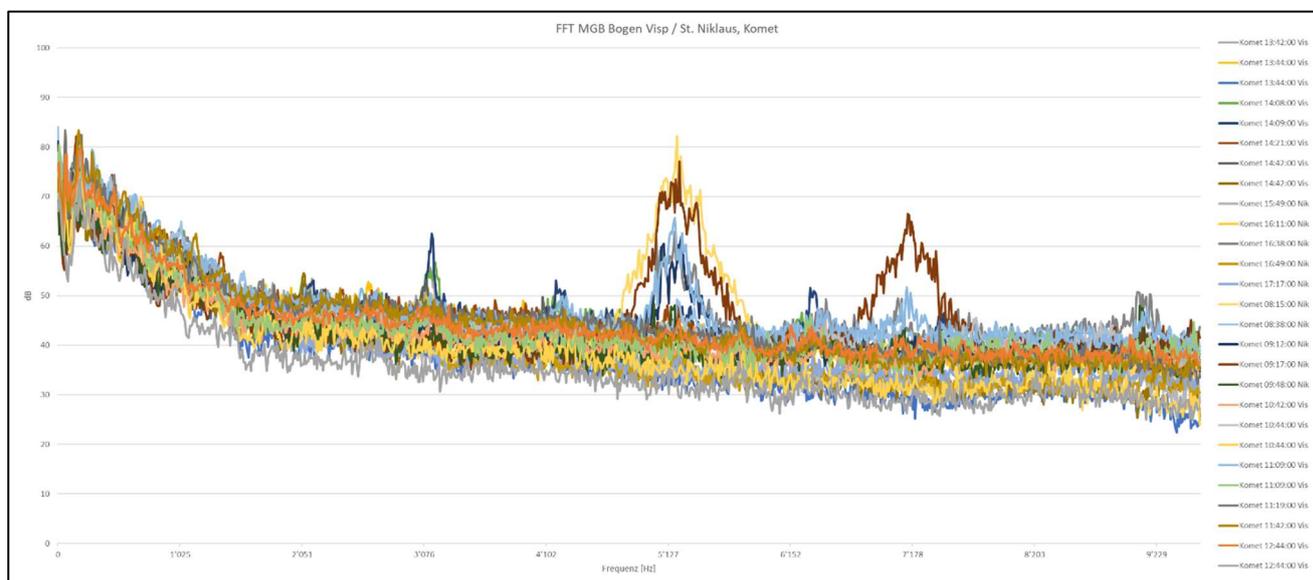


Abbildung 75: Lärmspektren Vorbeifahrt Komet in Visp und St. Niklaus gemessen am 05.04.2022 durch das Kompetenzzentrum Fahrbahn

Auswertung Kurvenkreischen

Um nun spezifisch festzustellen, wo auf dem Streckennetz das Kurvenkreischen (squealing) auftritt, wurde ein Frequenzfilter erstellt (Abbildung 76), welcher Frequenzen bei 5.3 kHz stark bewertet. Dieser Filter gilt aber nur für die Fahrzeuge Komet und Shuttle auf den angetriebenen Radsätzen, da die Schwingfrequenz von der Bauart des Rades abhängt.

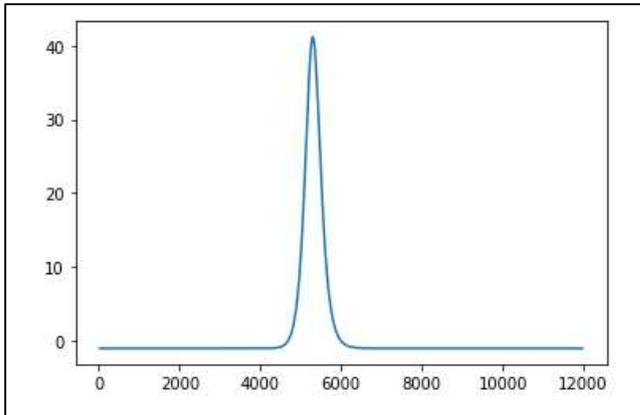


Abbildung 76: Frequenzfilter für Kurvenkreischen für die Fahrzeuge Komet und Shuttle auf angetriebenen Achsen

Die mit diesem Frequenzfilter bewerteten Spektren können nun für jede Fahrt auf der Strecke aufgetragen werden. Daraus ergeben sich die Abbildungen in Abbildung 77 und Abbildung 78.

Die vier Graphen stellen von oben nach unten folgendes dar:

1. Kurvenkreischen rechtes Mikrofon
2. Streckenverlauf mit Krümmung (SKK-Abschnitte rot markiert)
3. Kurvenkreischen linkes Mikrofon
4. 90% Quantil für die spezifische Position auf dem Streckennetz für das Kurvenkreischen

Jede horizontale Linie des Graphen 1 und 3 entspricht dabei einer Messfahrt, die Farbe der Intensität des Kurvenkreischens (violett – grün – gelb bedeuten niedrig – mittel – hoch).

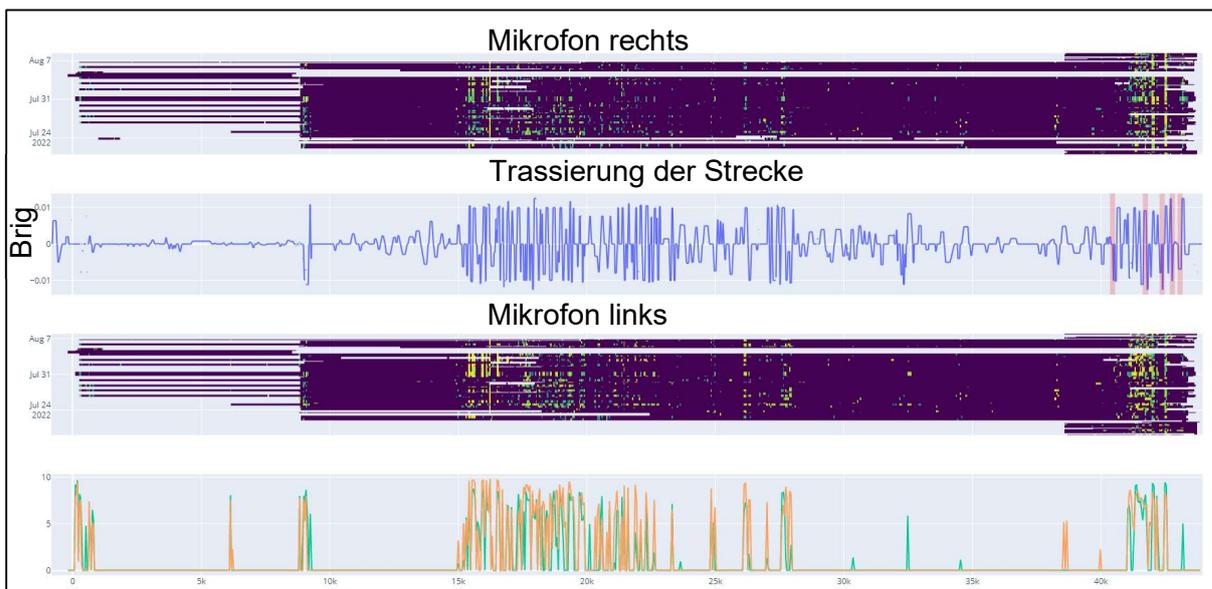


Abbildung 77: Kurvenkreischen Strecke Brig - Zermatt mit dem Shuttle bei Bergfahrt

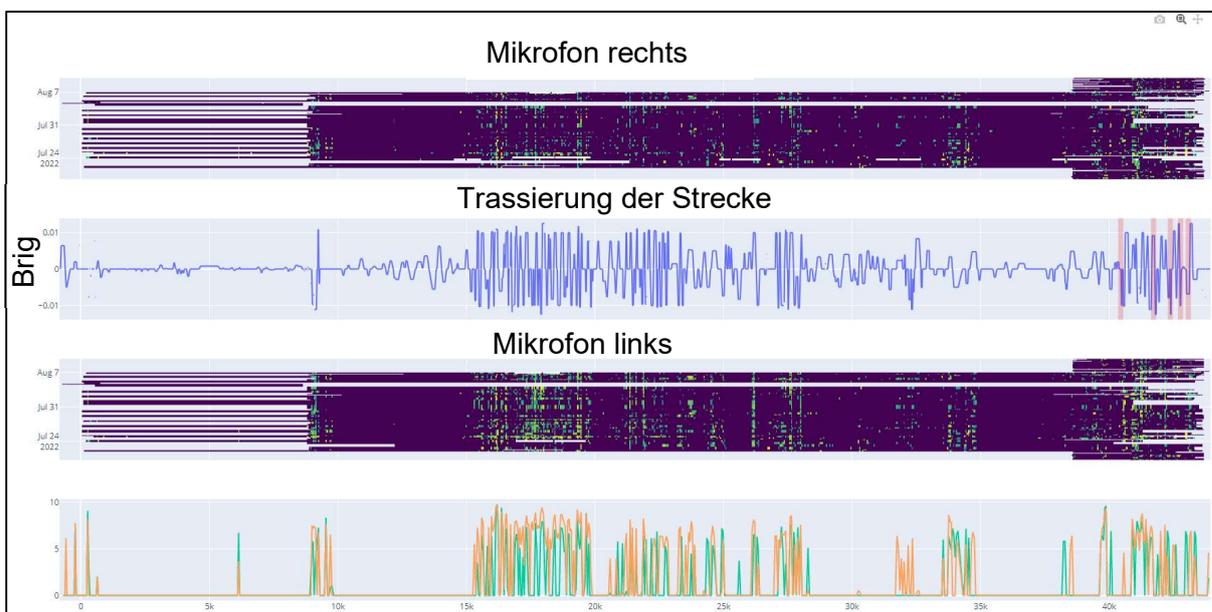


Abbildung 78: Kurvenkreischen Strecke Brig - Zermatt mit dem Shuttle bei Talfahrt

Es gibt einige interessante Effekte, welche aus diesen Darstellungen herausgelesen werden können:

- Es gibt spezifische Bereiche zwischen den SKK – Abschnitten, welche zum Kreischen neigen und über die gesamte Messdauer sehr konstant sind. Diese Bereiche sind in Abbildung 79 rot markiert.
- Das Kreischen ist abhängig von der Tageszeit. Dies hängt vermutlich mit der relativen Feuchtigkeit und dem Ausschalten der Konditionieranlage in der Nacht (von 19:00 – 07:00) zusammen. Dieses zeitliche Muster ist in Abbildung 80 ersichtlich.
- Das Kreisch – Verhalten unterscheidet sich zwischen Berg- und Talfahrten. Es ist bei Bergfahrten stärker ausgeprägt als bei Talfahrten. Dies könnte daran liegen, dass die Mikrofone bei der Bergfahrt neben vorlaufenden Radsatz eingebaut sind. Es ist jedoch auch möglich, dass die Traktionsverhältnisse auf die Geräusche einen Einfluss haben.

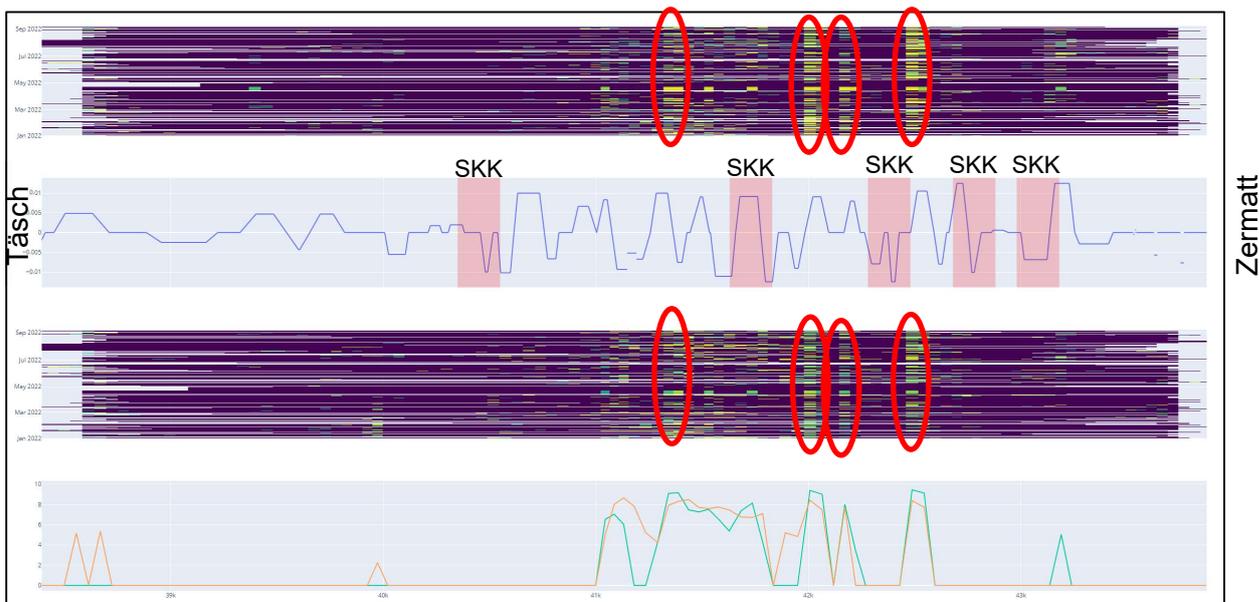


Abbildung 79: Kurvenkreischen Strecke Täsch - Zermatt mit dem Shuttle bei Bergfahrt

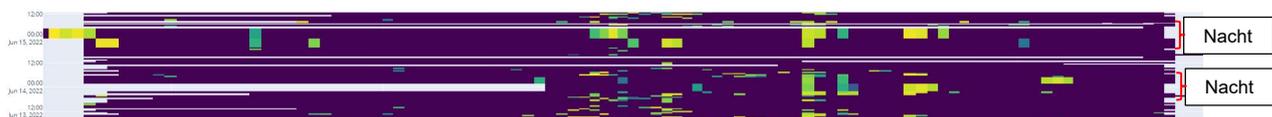


Abbildung 80: Kurvenkreischen Strecke Täsch - Zermatt mit dem Shuttle bei Bergfahrt, zeitlicher Ausschnitt 14. Juni, rechtes Mikrofon

Aktueller Stand bezüglich Kurvenkreischen und Ausblick

Es wurde ein Frequenzfilter vorgeschlagen, welcher es erlaubt, Kurvenkreischen zu charakterisieren. Dieser Filter erlaubt es, kritische Positionen im Streckennetz ausfindig zu machen und zu dokumentieren.

Es sind jedoch diesbezüglich noch weitere Arbeiten erforderlich:

- Bisher wurde dieser Filter noch nicht detailliert getestet und mit dem subjektiven Empfinden abgeglichen.
- Für das ergebnisorientierte Konditionieren muss weiter untersucht werden, unter welchen Bedingungen Kurvenkreischen auftritt. Hier spielen insbesondere die Fahrrichtung (Berg- oder Talfahrt) und die Wetterbedingungen (relative Feuchtigkeit) eine entscheidende Rolle.
- Ein Abgleich mit den Beschleunigungsmessungen (stick-slip-Effekt) könnte allenfalls weitere Aufschlüsse über die Mechanismen geben.

7.3. Informationen aus dem Betriebseinsatz

7.3.1. Rückmeldungen Betrieb (Lokführer / Betriebsleitung)

Die Rückmeldungen erfolgen offiziell über zwei Kanäle. Einerseits wurde ein Meldeformular erstellt, welches in den Führerständen der Shuttle und auf dem Sharepoint zum Ausfüllen zur Verfügung steht und andererseits können wie für andere Störungen Incident – Meldungen (S1 – S3) erfasst und gemeldet werden.

Das Meldeformular wurde in den ersten vier Tagen der Betriebserprobung zwei Mal ausgefüllt, worauf die Sprühzyklen angepasst wurden. Seither entsprechen die Sprühzyklen den in Kapitel 3.2 beschriebenen Einstellungen und das Meldeformular wurde nicht mehr genutzt.

Über die Incident – Meldungen sind seit Beginn der Betriebserprobung rund fünf Meldungen eingegangen, die sich um «schlechten Zustand» der Schiene und «sehr glatte» Schiene handelten. Diese Meldungen entstanden jeweils im Zusammenhang mit der Beschleunigung der Züge bei der Bergfahrt. Die Betriebsleitung verlässt sich hier auf die Meldungen der Lokführer.

Ergänzung: Diese Meldungen fielen jeweils mit beginnendem Regen oder Gewittern zusammen. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Einfluss den wesentlichen Anteil zum Schleudern der Fahrzeuge beigetragen hat. Da ausschliesslich das Beschleunigen (32 km/h auf 38 km/h) betroffen war, ist auch kein Zug stecken geblieben.

Eine Ausnahme bildet hier eine Incident – Meldung, welche eine verminderte Bremswirkung beschrieb, worauf die SKK Anlage für zwei Tage ausgeschaltet wurde (15./16.03.22). Die darauffolgende Begehung der Strecke zeigte keine Auffälligkeiten. Da auch hier beginnender Regen im Spiel war, wurde die SKK Anlage anschliessend wieder in Betrieb genommen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es zu keinem sicherheitsrelevanten Vorfall gekommen ist.

7.3.2. Betriebsdaten

Um die Aussagekraft der gesammelten Messdaten zu erhöhen, werden hier zusätzlich die Betriebsdaten, konkret die jährliche Belastung in Bruttotonnen (BRT) und die jährlichen Fahrgäste pro Achse, herangezogen.

Hierbei wird in Abbildung 81 ersichtlich, dass die Belastung seit Ausbruch der Covid-19 Pandemie wesentlich gesunken ist und erst im Verlauf des Jahres 2022 wieder das vorherige Niveau erreicht hat (vgl. Jahre 2020 – mit August 2022). Dabei ist zu ergänzen, dass der BRT Wert von 2022 ein budgetwert ist und sich mutmasslich an die Werte der Jahre 2017 – 2019 angleichen wird. Dies bedeutet, dass die Belastung während der ersten Phase der SKK-Betriebserprobung nicht vollständig mit der Belastung vor der SKK verglichen werden kann.

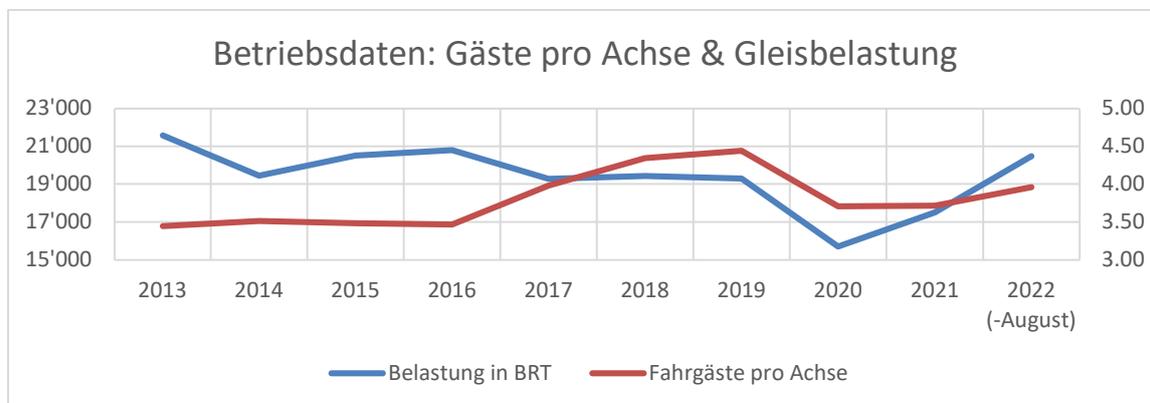


Abbildung 81: Betriebsdaten (Belastung BRT & Fahrgäste pro Achse)

8. Gesamtwirtschaftlichkeit

Für die Beurteilung der Gesamtwirtschaftlichkeit der SKK-Anlage wurde das Büro IMDM beauftrag, Simulationen unter Berücksichtigung der Kosten sowie Einsparnissen durchzuführen. Anhand dieser Simulationen soll aufgezeigt werden ob und wie wirtschaftlich die Installation sowie der Betrieb der SKK-Anlage ist. Dies einerseits für die Strecke der Betriebserprobung Täsch – Zermatt und andererseits mit Ausblick auf die Ausweitung der SKK-Anlage auf das gesamte Streckennetz der MGB.

8.1. Beschreibung der Methode

- Die wirtschaftliche Bewertung basiert auf den Annahmen zu den Stückkosten und den nachfolgend spezifizierten Lebensdauern (Zusammenfassung nachfolgend und detailliert im Anhang 11.3).
- Die Bewertung baut auf der Berechnung der äquivalenten Annuität (*equivalent annuity* - EA) auf, was einen Vergleich von Szenarien mit unterschiedlichen Zeithorizonten ermöglicht.
- Bei der äquivalenten Annuität wird die Summe der Ausgaben für einen Fall, die auf den Gegenwartswert abgezinst werden, durch den Zeitraum, den man betrachtet, gebildet.
- Anlagen, die am Ende des Zeitraums noch einen Restwert haben, werden anteilig zu diesem Wert gezählt (vernachlässigbarer Bias).
- Die Berechnung wurde für zwei Fälle durchgeführt: ein Fall ohne SKK und ein Fall mit SKK. Anschliessend wurden die beiden EAs einander gegenübergestellt, um die möglichen Einsparungen durch den Einbau des Systems zu bewerten.
- Die Berechnung ist probabilistisch (Monte Carlo); alle Annahmen wurden mit +/- 10 % des Mittelwerts modelliert, mit Ausnahme des Diskontsatzes mit +/- 50 % (d. h. der Satz variiert zwischen 1 % und 3 %). Die Verteilungen sind dreieckig.

8.2. Getroffene Annahmen

Allgemein

- Diese wirtschaftliche Schätzung bezieht sich auf die Testphase, d. h. die Ausstattung von vier Shuttle – Fahrzeugen mit dem SKK-System und 5.000 m Infrastruktur.
- In dieser ersten Betrachtung wurden die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen nicht berücksichtigt (insbesondere die Auswirkungen, die mit der Reduktion von Lärm und Vibrationen verbunden sind).

Die Ausrüstung der SKK

- Die Investitions- und Betriebskosten pro Einheit wurden von der MGB zur Verfügung gestellt (siehe Anhänge 11.3).
- Die Engineering- und die Mehrkosten für die Erstinstallation (beim ersten Fahrzeug) wurden als einmalige Ausgabe gezählt.

Auswirkungen auf die Fahrzeugwartung

- Es wurden nur die Auswirkungen von SKK auf die Instandhaltung der Räder geschätzt (siehe Anhang 11.3). Es ist zu beachten, dass der Tausch der Räder die Demontage des gesamten Drehgestells erfordert (Revision).
- Die SKK ermöglicht es, dass die Drehgestelle bzw. die Fahrzeuge zwischen den Revisionen eine längere Strecke zurücklegen.

Auswirkungen auf die Infrastruktur

- Die Auswirkungen von SKK wurden auf den durchschnittlichen jährlichen Bedarf an Stopf- und Schleifarbeiten sowie den durchschnittlichen Schienenaustausch in Bögen mit kleinen Radien bewertet.
- In einem zweiten Schritt wurden auch die Auswirkungen von SKK auf die Gesamtlebensdauer der Gleise geschätzt.

Der Abzinsungssatz

- Die Schätzungen berücksichtigen einen Diskontsatz von 2 % +/- 1 %.

8.3. Resultate

Auf der Teststrecke

- Die Evaluation zeigt, vorbehaltlich der Gültigkeit der Annahmen, dass auf der Teststrecke die Installation des SKK **unabhängig vom analysierten Szenario rentabel ist**.
- Werden nur die Fahrzeuge betrachtet, ist die SKK-Installation mit einer EA-Differenz von rund 150kCHF rentabel (zwischen -120kCHF/Jahr und -170kCHF/Jahr).
- Werden die Fahrzeuge und der Gleisunterhalt, ohne Berücksichtigung der Verlängerung der Lebensdauer des Gleises betrachtet, ergibt sich eine Differenz zwischen der äquivalenten Annuität des Szenarios "mit SKK" und des Szenarios "ohne SKK" von etwa -235 kCHF/Jahr (zwischen -200kCHF/Jahr und -265kCHF/Jahr).
- Wird neben den Fahrzeugen und dem Gleisunterhalt auch die verlängerte Lebensdauer der Gleise der Teststrecke miteinbezogen, ergibt sich eine EA-Differenz von etwa **-300kCHF/Jahr** (-255kCHF/Jahr bis -340kCHF/Jahr) belaufen.
- Vorbehaltlich der Gültigkeit der Annahmen gibt es **keine Simulation**, die zeigt, dass die SKK **unwirtschaftlich ist**.
- Somit lässt sich festhalten, dass die SKK Anlage Täsch – Zermatt auch im wirtschaftlich ungünstigsten Fall (Einsparnisse von 150'000 CHF mit Investitionskosten von 120'000 CHF) innerhalb eines Jahres amortisiert wird bzw. wurde.

Extrapolation auf das gesamte Netz

- Die Rentabilität der allgemeinen Einführung von SKK auf dem Netz der MGB hängt von der Länge der Streckenabschnitte ab, die unter denselben Problemen wie die Teststrecke Täsch – Zermatt leiden, sowie von der Anzahl der auszurüstenden Fahrzeuge.
- Bei der ersten Annahme gibt es eine zweite Problemstrecke Täsch – Fiesch, die noch quantifiziert werden müsste. Es hat sich aber bisher gezeigt, dass -die SKK auch nur auf der Ebene des Rollmaterials rentabel ist.
- Was die Ausrüstung des Rollmaterials betrifft, so müssen nicht alle Züge ausgerüstet werden, weil diese die problematischen Streckenabschnitte nicht (oder nur selten) befahren oder weil sie nicht die gleichen Schwierigkeiten verursachen. Ausserdem werden die bestellten Züge von vornherein mit SKK ausgestattet (Stückkosten für die Installation des SKK niedriger als bei der Betriebserprobung).
- Daher ist es vernünftig anzunehmen, dass die Einführung von SKK kosteneffizient ist, insbesondere wenn man systemisch denkt (die oben dargestellten wirtschaftlichen Ergebnisse legen nahe, dass die Hälfte der Rentabilität des Systems durch die Senkung der Infrastrukturkosten erreicht wird). Darüber hinaus sollten sozioökonomische Aspekte (Lärm) dazu beitragen, die Rentabilität von SKK noch weiter zu verbessern.

9. Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Die Betriebserprobungen mit on-board Schienenkopfkonditionierung fanden vom Oktober 2021 bis Oktober 2022 bei der Matterhorn-Gotthard Bahn (MGB) auf der Strecke Täsch-Zermatt statt. Die Periode von einem Jahr wurde gewählt, damit die Reibungsverhältnisse Rad / Schiene über die vier Jahreszeiten berücksichtigt sind. Vor Beginn der Erprobungen auf der konditionierten Strecke wurden die vier Shuttle – Fahrzeuge 2051 bis 2054 mit einer on-board-Anlage zur Konditionierung der Fahrflächen Rad / Schiene ausgerüstet, die Strecke aus verschiedenen Perspektiven gründlich analysiert und in der Folge für die Steuerung der Anlagen streckenspezifisch hergerichtet (RFID-Tags), die Schienen geschliffen und alle Räder der Shuttle – Fahrzeuge reprofiliert sowie die Ausgangsprofile an allen Rädern und bei den Schienen in drei repräsentativen Bögen messtechnisch erfasst. Die Strecke ist mit der Schiene SBB I und mit der Schienenhärte 350 HB ausgerüstet. Die Fahrzeuge besitzen bei den Laufradsätzen Vollräder mit der Stahlqualität ER 7 und bei den Triebradsätzen bereifte Räder mit den drei Stahlqualitäten KVR 600, B6Z und B7T.

Der Bericht enthält Ergebnisse zu den folgenden Teilsystemen des Rad-Schienen-Systems:

- a) Verschleiss und Schädigungen an den Rädern, wobei beim Verschleiss zwischen demjenigen an den Spurkränzen und demjenigen an den Radlauflächen unterschieden wird.
- b) Veränderungen an den Radprofilen im Betriebseinsatz gegenüber dem bei der Reprofilierung verwendeten Nominalprofil W98.
- c) Zustand der Radlauflächen (Schädigungen und Diskontinuitäten aus dem Zusammenwirken von Rad und Bremsklotz sowie allfällige Schädigungen aus dem Rollkontakt).
- d) Verschleiss und Schädigungen an den Schienen in den Bögen, unterschieden nach den verschiedenen Zonen der Berührung von Rad und Schiene sowie unterschieden nach bogeninneren und bogenäusseren Schienen.
- e) Reibwert gemessen an den Berührflächen Rad / Schiene auf den Schienenköpfen bogeninnen und bogenaussen an drei signifikanten Bögen mit dem Tribometer.
- f) Rauigkeit der Schienenfahrflächen in der Längsrichtung bogeninnen und bogenaussen gemäss Vorgaben der EN 15610 [6] zur Beurteilung der Schlupfwellenbildung.
- g) Feststellungen des Fahrpersonals zum Traktions- und Bremsverhalten der Fahrzeuge in den konditionierten Bereichen sowie zum Lärm.
- h) Methode und erste Ergebnisse zu einem im Einsatz befindlichen on-board-System zur Detektion von Schlupfwellen und Kurvenkreischen.
- i) Methode und erste Ergebnisse zum Einsatz eines ortsfesten Messsystem zur Erfassung von Fahrflächenschädigungen an den Rädern der Fahrzeuge.
- j) Gesamtwirtschaftlichkeit

Zu a) Verschleiss und Schädigungen an den Rädern

- Der Spurkranzverschleiss (Spurkranzdicke und q_R -Mass) ist bei allen Fahrzeugen und an allen Rädern untergeordnet und wird kaum Anlass für die Reprofilierung der Räder sein. Dies dürfte auf eine ausreichende Schmierung der Spurkränze zurückzuführen sein.
- Bei den Streckenbegehungen war jedoch an den Schienenflanken eine Tendenz zur Übersmierung festzustellen, was sich ungünstig auf das Traktionsverhalten auswirken dürfte. Es wird deshalb empfohlen, dieses Verhalten im Modul 5 vertiefter zu betrachten und den Zusammenhang hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung von SKK und SKS (Spurkranzschmierung) zu berücksichtigen.
- Bei den visuellen Kontrollen der Radlauflächen sind keine Tendenzen zur Bildung von Polygonen oder ergebnisbeeinflussender Rollkontaktermüdung erkennbar gewesen.
- Weder an den Spurkränzen noch an den Radlauflächen sind Schäden festgestellt worden, welche wachstumsfähig sind und in der Folge Anlass zu einer Reprofilierung geben.
- Die Reduktionen der Raddurchmesser durch Verschleissabtrag sind durch die Wirkung der Konditionierung signifikant gesunken. Dies unabhängig von der verwendeten Stahlqualität bei den Rädern, wobei die Grösse der Stichproben für eine Erhärtung dieser Aussage zu gering ist.
- Nur bei einem Fahrzeug mussten die Triebradsätze reprofiliert werden. Dies war jedoch auf einen der vier Radsätze mit einem zu geringen Raddurchmesser zurückzuführen. Beim Shuttle erfolgt der elektrische Antrieb für das gesamte Fahrzeug durch nur einen einzigen Stromrichter. Dies bedingt, dass die Raddurchmesser der vier angetriebenen Radsätze in engen Grenzen gehalten werden müssen.

Zu b) Veränderungen an Radprofilen

- Die Räder der MGB verfügen über das Radprofil W98. Bei allen Fahrzeugen haben sich die Radprofile verändert, was auch zu einer Veränderung der Berührung von Rad und Schiene geführt hat.
- Die Veränderung geht bei den Triebradsätzen langsamer vor sich als bei den Laufradsätzen. Es ist davon auszugehen, dass dies auf die weicheren Stahlqualitäten bei den Laufradsätzen gegenüber den Triebradsätzen zurückzuführen ist.
- Die Veränderung der Radprofile dürfte sich günstig auf das Bogenlaufverhalten auswirken, könnte aber zu einer Beeinträchtigung des Fahrverhaltens im oberen Geschwindigkeitsbereich Anlass geben.
- Für die MGB ist das Radprofil W98 nicht verschleissangepasst und für eine Verbesserung des Bogenlaufs völlig ungeeignet.
- Die Profile werden für weitergehende Untersuchungen und Optimierungen an das Projekt P3 (Rad / Schiene) übergeben.

Zu c) Diskontinuitäten an den Radlaufflächen

- An einigen Rädern sind an den Radlaufflächen im Querprofil Diskontinuitäten aufgetreten. Diese verlaufen über den gesamten Radumfang und treten einerseits an der Spurkrankflanke und andererseits an der Hohlkehle auf.
- Die Diskontinuität an der Spurkrankflanke ist gemäss Fehlerkatalog des BAV [13] nicht zulässig. Diese Fehlerart könnte die Entgleisungssicherheit im Zungenbereich von Bogenweichen ungünstig beeinträchtigen.
- Die Diskontinuität im Bereich der Hohlkehle beeinträchtigt das Bogenlaufverhalten der Fahrzeuge ungünstig.
- Die beiden Diskontinuitäten sind auf die Einwirkung der Bremsklötze auf die Radlaufflächen zurückzuführen. Dies wurde anhand von visuellen Kontrollen bestätigt.

Zu d) Verschleiss und Schädigungen an den Schienen in den Bögen

- Der Verschleiss an den bogeninneren und bogenäusseren Schienen hat während der einjährigen Betriebserprobung als Folge des Abtrags durch die Fahrzeuge nur minim zugenommen (Grössenordnung 0.2mm).
- Der Verschleissabtrag über die Bogenlänge variiert zum Teil stark. Der Grund dafür liegt in der Vergangenheit und dürfte durch Anwendung der SKK in Zukunft ausgeglichener sein.
- Der Verschleissvorrat an den bogenäusseren Schienen ist signifikant grösser als an den bogeninneren Schienen. Es ist davon auszugehen, dass dies eine Folge des deutlich grösseren Abtrags beim Schienenschleifen aufgrund der deutlich grösseren Schlupfwellenamplituden ohne SKK ist. Es ist davon auszugehen, dass sich SKK insbesondere an der bogeninneren Schiene deutlich günstiger auswirkt.
- Dank des geringeren Wachstums der Schlupfwellen konnte das Schleifintervall verdoppelt werden (von halbjährlich auf jährlich). Es ist davon auszugehen, dass das Schleifintervall nach weiteren Optimierungen des Systems nochmals verlängert werden kann, was sich günstig auf die LCC auswirken wird.

Zu e) Reibwert gemessen an den Schienenfahrflächen mit dem Tribometer

- Vor Beginn der Konditionierung lag der Reibwert bei trockenem Wetter im Bereich zwischen 0.5 und 0.6.
- Nach Beginn der Konditionierung sank der Reibwert bei trockenem Wetter auf Werte im Bereich von 0.2 bis 0.25.
- Nach einer längeren Regenperiode wurde ein erhöhter Reibwert festgestellt (ca. 0.4). Offenbar wird das Konditioniermittel bei Regen ausgewaschen und es braucht anschliessend eine gewisse Zeit, bis dieses wieder voll zu Tragen kommt.
- In den Monaten Juli und August 2022 waren an allen Messstellen erhöhte Reibwerte, vor allem an den bogenäusseren Schienen, festzustellen.

Zu f) Rauigkeit der Schienenfahrflächen in der Längsrichtung (Schlupfwellen)

- Rauigkeitsmessungen fanden gemäss Versuchsplan periodisch in den beiden Bögen Zum Biel und im Bogen Lüegelwang statt.
- In den beiden Bögen Zum Biel war nach 246 Tagen mit SKK kein prägnanter Peak im Spektrum auszumachen, der auf eine Schlupfwellenentwicklung hindeutet. Dies im Gegensatz zu früher ohne SKK, wo die Rauheiten im Bereich der Schlupfwellenlänge um 80 mm nach 260 Tagen praktisch wieder das Niveau analog zu demjenigen vor dem Schleifen erreichten
- Im Bogen Lüegelwang zeigt die Messung nach 246 Tagen mit SKK im Spektrum einen leichten Buckel um 80 mm auf, was auf ein gewisses Schlupfwellenwachstum hindeutet. Dieses ist allerdings im Vergleich zu früher ohne SKK im nahezu gleichen Beobachtungszeitraum immer noch stark reduziert ist.

Zu g) Feststellungen des Fahrpersonals zum Traktions- und Bremsverhalten sowie Lärm

- Die Rückmeldungen des Betriebs- und Lokpersonals erfolgen über Meldeformular (auf dem Führerstand aufgelegt) oder über Incident – Meldungen (S1-S3).
- Das Meldeformular wurde in den ersten vier Tagen der Betriebserprobung zwei Mal ausgefüllt, worauf die Sprühzyklen angepasst wurden. Diese Anpassung hat die Situation entschärft.
- Über die Incident – Meldungen sind seit Beginn der Betriebserprobung rund fünf Meldungen eingegangen, bei denen es sich um «schlechten Zustand» der Schiene und «sehr glatte» Schiene handelte. Diese Meldungen entstanden jeweils im Zusammenhang mit der Beschleunigung und fielen jeweils mit beginnendem Regen oder Gewittern zusammen. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Einfluss den wesentlichen Anteil zum Schleudern der Fahrzeuge beigetragen hat.
- Die Rückmeldungen des Lokpersonals deuten darauf hin, dass sich der Lärm auf der Strecke der Betriebserprobung reduziert hat. Dieser Eindruck konnte bei einer Begehung bestätigt werden. Bei dieser Begehung während der Betriebserprobung war der Lärm bzw. das Kurvenkreischen merklich weniger stark als bei Begehungen vor der SKK-Betriebserprobung.

Zu h) Methode und erste Ergebnisse zu einem im Einsatz befindlichen on-board-System zur Detektion von Schlupfwellen und Kurvenkreischen

- Zur Erfassung der Schwingungen wurden auf einem Shuttle (und einem Komet) Beschleunigungssensoren bei je einem Radsatz an den Radsatzlagern installiert. Diese waren schon vor Beginn der SKK-Betriebserprobung im Einsatz, weshalb ein Vergleich zwischen den Beschleunigungen vor und nach Beginn der Betriebserprobung möglich ist.
- An den beiden Fahrzeugen wurden zudem Mikrophone installiert, welche Aufschluss darüber geben sollen, ob und in welchen Bögen «Kurvenkreischen» auftritt. Die Mikrofone sind beidseitig eines Radsatzes am Fahrzeugkasten in der Nähe der Radsätze angeordnet.

Ergebnisse bei den Beschleunigungen

- Vor dem Schienenschleifen und damit vor Beginn der SKK-Betriebserprobung (September 2021) war ein wesentlicher Teil der Strecke Täschsand – Zermatt rot bis dunkelrot (grosse Beschleunigungen).
- Nach dem Schienenschleifen und vor Beginn der SKK-Betriebserprobung (Oktober 2021) sind die roten und dunkelroten Bereiche nicht mehr erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass mit der hier verwendeten Messtechnik zumindest grössere Amplituden von Schlupfwellen erkannt werden können.
- Diese Entwicklung ist nach dem Einschalten der SKK-Anlagen bis heute zu erkennen, wo sich die gemessenen Beschleunigungen grossenteils in einem grünen Bereich befinden (geringe Beschleunigungen).
- Das hier verwendete on-board-Monitoring eignet sich aufgrund der bisherigen Erfahrungen zur Überwachung- der Wirksamkeit der SKK bezüglich Schienenschäden am Gleis.

Ergebnisse beim Monitoring Lärm

- Aufgrund der bisher angelaufenen Messdaten des Messsystems und Frequenzanalysen auf dem Shuttle und dem Komet wurde erkannt, dass teilweise in Kurven nur spezifisch eine Frequenz bei 5.3 kHz angeregt wird.
- Um nun spezifisch festzustellen, wo auf dem Streckennetz das Kurvenkreischen (squealing) auftritt, wurde ein Frequenzfilter erstellt, welcher Frequenzen bei 5.3 kHz stark bewertet.
- Es gibt spezifische Bereiche zwischen den SKK-Abschnitten, welche zum Kreischen neigen und über die gesamte Messdauer sehr konstant sind.
- Das Kreischen ist abhängig von der Tageszeit. Dies hängt vermutlich mit der relativen Feuchtigkeit und dem Ausschalten der Konditionieranlage in der Nacht (von 19:00 – 07:00) zusammen.
- Das Kreisch-Verhalten unterscheidet sich zwischen Berg- und Talfahrten. Es ist bei Bergfahrten stärker ausgeprägt als bei Talfahrten. Dies könnte daran liegen, dass die Mikrofone bei der Bergfahrt neben vorlaufenden Radsatz eingebaut sind.
- Für das bedarfsabhängige Konditionieren muss weiter untersucht werden, unter welchen Bedingungen Kurvenkreischen auftritt. Hier spielen insbesondere die Fahrrichtung (Berg- oder Talfahrt) und die Wetterbedingungen (relative Feuchtigkeit) eine entscheidende Rolle.

Zu i) Methode und erste Ergebnisse zum Einsatz eines ortsfesten Messsystem zur Erfassung von Fahrflächenschädigungen an den Rädern der Fahrzeuge.

In Täsch wurde eine Messanlage zur Radunrundheit (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies [9, 10]) installiert, welche seit Anfang März 2022 Messwerte zu Polygonen, Flachstellen und allfälligen anderen Schädigungen in der Umfangrichtung an den Radlauflächen der Räder liefert. Die hierbei erfassten Daten können mittels RFID den jeweiligen Fahrzeugen zugeordnet werden. Im Zusammenhang mit SKK wurde die Historie der seit März erfassten Daten analysiert, wobei die daraus gewonnen Erkenntnisse folgendermassen zusammengefasst werden können:

Shuttle Fahrzeuge (2051 - 2054)

- Die Räder der Shuttle – Fahrzeuge weisen im Untersuchungszeitraum eher geringe Polygone mit Werten von bis zu 20 auf.
- Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen an zwei Fahrzeugen auf.

Komet-Fahrzeuge (2011 – 2014 und 2021 - 2028)

- Die Räder der Komet – Fahrzeuge weisen im Untersuchungszeitraum leichte Polygone mit Werten von bis zu 20 Fassetten auf. Die Polygonbildung ist jedoch stärker ausgeprägt als an den Shuttle-Fahrzeugen.
- Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen an fünf Fahrzeugen auf.

Gelenksteuerwagen (nicht angetrieben) (2131 - 2134)

- Die Räder der GSW weisen im Untersuchungszeitraum Polygone mit Werten von bis zu 30 Fassetten auf.
- Im Untersuchungszeitraum traten signifikante Flachstellen an zwei GSW auf.

Die Untersuchung lässt weiterhin folgende Schlussfolgerungen zu:

- Insgesamt sind die Laufräder stärker von Polygonisierung und Flachstellen betroffen als die Triebräder.
- In der heissen Jahreszeit von Anfang Juli bis Ende August wachsen die Polygone eher stärker als in den anderen Monaten. Signifikante Flachstellen haben sich in diesem Zeitraum nicht gebildet. Im restlichen Untersuchungszeitraum haben sich hingegen signifikante Flachstellen gebildet (an heissen Tagen liegt ein höherer Reibewert vor, auch die Konditionierung kann eine geringere Wirkung gehabt haben).
- Radpolygone konnten durch die Radbearbeitung meist nicht nachhaltig entfernt werden und bildeten sich nach dem Überdrehen sehr schnell wieder. Es sollte daher überprüft werden, ob die Unterflurdrehbank einen Kopiereffekt für Polygone aufweist, welcher ein vollständiges Entfernen der Polygone verhindert.

Zu j) Gesamtwirtschaftlichkeit

- Die Evaluation zeigt, vorbehaltlich der Gültigkeit der Annahmen, dass auf der Teststrecke die Installation des SKK unabhängig vom analysierten Szenario **rentabel ist**.
- Werden nur die Fahrzeuge betrachtet, ist die SKK-Installation mit einer EA-Differenz von rund 150kCHF rentabel (zwischen -120kCHF/Jahr und -170kCHF/Jahr).
- Werden die Fahrzeuge und der Gleisunterhalt, ohne Berücksichtigung der Verlängerung der Lebensdauer des Gleises betrachtet, ergibt sich eine Differenz zwischen der äquivalenten Annuität des Szenarios "mit SKK" und des Szenarios "ohne SKK" von etwa -235 kCHF/Jahr (zwischen -200kCHF/Jahr und -265kCHF/Jahr).
- Wird neben den Fahrzeugen und dem Gleisunterhalt auch die verlängerte Lebensdauer der Gleise der Teststrecke miteinbezogen, ergibt sich eine EA-Differenz von etwa **-300kCHF/Jahr** (-255kCHF/Jahr bis -340kCHF/Jahr) belaufen.
- Vorbehaltlich der Gültigkeit der Annahmen gibt es **keine Simulation**, die zeigt, dass die SKK **unwirtschaftlich ist**.
- Somit lässt sich festhalten, dass die SKK Anlage Täsch – Zermatt auch im wirtschaftlich ungünstigsten Fall (Einsparnisse von 150'000 CHF mit Investitionskosten von 120'000 CHF) innerhalb eines Jahres amortisiert wird bzw. wurde.

Die bei der Betriebserprobung erzielten Ergebnisse zeigen, dass kurz- und mittelfristig mit gezielter Anwendung der Schienenkopfkonditionierung der Kurz- und Langzeitverschleiss signifikant gemindert werden kann. Es wurden vergleichsweise zum übrigen Streckennetz keine Beeinträchtigungen bei der Bremswirkung und bei der Traktion festgestellt. Dies setzt jedoch voraus, dass bei der Herrichtung der konditionierten Streckenabschnitte mit grosser Sorgfalt vorgegangen wird und das System diesbezüglich, zumindest in einer ersten Phase, eingehend beobachtet wird.

Die Erprobungen haben jedoch aufgezeigt, dass für die Ausarbeitung von Empfehlungen zur Umsetzung der SKK in der Meterspurbranche weitere Optimierungen erforderlich sind. Dies betrifft vor allem den Kontakt zwischen Rad und Schiene, die Interaktion zwischen SKK und SKS, das Berücksichtigen von Temperatur- bzw. Wetterverhältnissen sowie das Monitoring mit den damit verbundenen Möglichkeiten der Digitalisierung mit Hinblick auf die Beherrschung des Gesamtsystems.

Es wird empfohlen, das Verhalten des SKK-Systems bei der MGB für ein weiteres Jahr zu beobachten. Dadurch wird es erst möglich sein, die hier festgestellten Tendenzen zu erhärten. Es muss berücksichtigt werden, dass insbesondere bei den Rädern noch keine Reprofilierung durchgeführt wurde und dass erst durch die dabei erfolgte Durchmesserreduktion eine abgesicherte Abschätzung zur Verlängerung der Lebensdauer der Räder als Folge von SKK möglich ist. Zudem scheint die Beobachtungszeit für den Verschleiss der Schienen mit einem Jahr zur Beurteilung der vorzusehenden Schleifintervalle zu kurz angesetzt worden zu sein. Die Resultate des Betriebsversuches sind insbesondere durch weitere Verschleissmessungen in den Sommermonaten zu konsolidieren. Die ortsfeste Anlage zum Monitoring der Rundheitsabweichungen der Räder und das fahrzeugseitige Monitoring zu Lärm und Schienenschädigungen sollen für weitere 12 Monate betrieben werden. (Option Weiterführung Versuch Täsch-Zermatt)

10. Verzeichnisse

10.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anordnung der Systemkomponenten des Konditioniersystems Shuttle	14
Abbildung 2, Trassierungsmerkmale Strecke Täsch-Zermatt	15
Abbildung 3: Einstellung des Bediengerät im fahrzeugabhängigen Modus der Schienenkopfkonditionierung. Die Anzahl der Konditionierungen werden im Bediengerät vorgegeben.....	16
Abbildung 4: Befestigung der RFID-TAG an der Schiene links schematisch und rechts real	17
Abbildung 5: Anordnung der RFID TAGS während der Betriebserprobung Täsch-Zermatt (grün=Konditionierung, rot=Pause). Der jeweils grüne Pfeil nach oben bezeichnet den Standort des Start-Tags.	17
Abbildung 6, Abmessungen der Spurkränze bei der letzten Messung im Mai 2022 (Shuttle 2051 & 2052).....	21
Abbildung 7, Abmessungen der Spurkränze bei der letzten Messung im Mai 2022 (Shuttle 2053 & 2054).....	22
Abbildung 8: Indikatoren für den spezifischen Raddurchmesserabtrag ΔD_{LCC} inklusive erste Messperiode	25
Abbildung 9: Indikatoren für den spezifischen Raddurchmesserabtrag ΔD_{LCC} ohne erste Messperiode	26
Abbildung 10: Verlauf der Raddurchmesser bei den Laufradsätzen inkl. erste Messperiode nach Reprofilierung oben und ohne erste Messperiode nach Reprofilierung unten.....	28
Abbildung 11: Alle Messungen Triebradsätze ohne erste Messperiode nach Reprofilierung	29
Abbildung 12: Tribometer Messungen bei Beginn der Betriebserprobung täglich.....	30
Abbildung 13: Beschriftung der Räder bei der visuellen Begutachtung	31
Abbildung 14: Zonen im Querprofil der Räder und deren Verursacher (Bremssohle CoFren C333).....	36
Abbildung 15: Rissbildung im Übergangsbereich zwischen Eingriff Bremssohle (CoFren C333) und Verschleisszone.....	36
Abbildung 16: Die Risse in der Übergangszone haben sich zu leichten Ausbrüchen entwickelt	37
Abbildung 17: Δr -Verläufe des Shuttle 43'844km nach Reprofilierung auf konditionierter Strecke Täsch-Zermatt	38
Abbildung 18: Zweipunktberührung bei der Bogenfahrt am Beispiel des 4. Radsatzes (Triebradsatz) von Abbildung 17	38
Abbildung 19: Starke Diskontinuität am linken Rad und leichte Diskontinuität am rechten Rad von Radsatz 3 beim Shuttle 2054 (verursacht durch die Interaktion Rad / Bremssohle).....	39
Abbildung 20: Situation der Berührung Rad / Schiene, wenn Radsatz vorlaufend ist in einem Rechtsbogen	39
Abbildung 21: Leichte Diskontinuitäten bei beiden Rädern des Radsatzes 4 im Bereich der Hohlkehle (verursacht durch die Interaktion Rad / Bremssohle).....	40
Abbildung 22: Diskontinuität am Spurkranz des rechten Rades von Radsatz 8 beim Shuttle 2053	41
Abbildung 23: Rollradiendifferenzen Δr beim Shuttle 2053, 43'213km nach Reprofilierung ..	43
Abbildung 24: Äquivalente Konizität $\tan \gamma_e$ Shuttle 2053, 43'213km nach Reprofilierung.....	43
Abbildung 25: Berührungspunktzuordnung beim Shuttle 2053, 43'213km nach Reprofilierung	44
Abbildung 26: Berührungspunktzuordnung beim Nominalprofil W98	44

Abbildung 27: Besondere Merkmale bei der Δr -Funktion und Auswirkungen auf den Radialsteuerungsindex	45
Abbildung 28: Vergleich aller berührungsgeometrischen Funktionen bei Radprofilen aus dem Betriebseinsatz mit dem Nominalprofil W98.....	47
Abbildung 29: Nominalprofil im engen Rechtsbogen.....	47
Abbildung 30: Profil nach 43'213 im Betriebseinsatz im engen Rechtsbogen	48
Abbildung 31: Nominalprofil im engen Linksbogen.....	48
Abbildung 32: Profil nach 43213 im Betriebseinsatz im engen Linksbogen	49
Abbildung 33: Vergleich der beiden Radprofile links und rechts des Betriebseinsatzes mit den beiden Nominalprofilen	50
Abbildung 34: Rollradiendifferenzen beim Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung	51
Abbildung 35: Äquivalente Konizität beim Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung	52
Abbildung 36: Berührungspunktzuordnung beim Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung ..	53
Abbildung 37: Berührungspunktzuordnung beim Nominalprofil W98.....	53
Abbildung 38: Radialstellungsindex bei den Laufradsätzen Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung	54
Abbildung 39: Radialstellungsindex bei den Triebradsätzen Komet 2021, 106'471km nach Reprofilierung	54
Abbildung 40: Installation des Wheel Monitoring Systems WMS bei der Matterhorn Gotthard Bahn bei Täsch.....	55
Abbildung 41: Radzustand und zugehörige WMS-Indikatorwerte (WMS = Wheel-Monitoring-System)	55
Abbildung 42: Polygonindikator Achse 4 des Shuttles 2051 von März bis Oktober 2022	56
Abbildung 43: Flachstellenindikator Achse 5 und 6 des Shuttles 2051 von März bis Oktober 2022	56
Abbildung 44: Orte an welchen Schienenprofile Rauigkeiten der Schienen gemessen wurden	58
Abbildung 45: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Portal, bogeninnen	61
Abbildung 46: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Portal, bogenaussen.....	61
Abbildung 47: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Brücke, bogeninnen.....	62
Abbildung 48: Schienenrauheitsspektren Zum Biel Brücke, bogenaussen	62
Abbildung 49: Schienenrauheitsspektren Lüegelwang, bogeninnen.....	63
Abbildung 50: Schienenrauheitsspektren Lüegelwang, bogenaussen.....	63
Abbildung 51: Im Bericht aufgeführte Messwerte für den Schienenverschleiss	68
Abbildung 52: Messpunkte Zum Biel – Portal.....	69
Abbildung 53: Schienenverschleiss W1 Innenschiene Zum Biel – Portal	70
Abbildung 54: Messpunkte Zum Biel Brücke.....	70
Abbildung 55: Schienenverschleiss W1 Innenschiene Zum Biel – Brücke.....	71
Abbildung 56: Messpunkte Lüegelwang.....	71
Abbildung 57: Schienenverschleiss W1 Innenschiene Lüegelwang	72
Abbildung 58: Schienenverschleiss W3 Aussenschiene Lüegelwang	73
Abbildung 59: Mittelwerte des Verschleisses an Innen- und Aussenschienen.....	74
Abbildung 60: Vergleich des Verschleissverhaltens an den Innenschienen	74
Abbildung 61, Schematische Darstellung der Kräfte, welche bei der Bogenfahrt auf die Räder der beiden Radsätze des Drehgestells wirken	75
Abbildung 62, Trend beim Verschleisszustand der in Richtung Gleismitte befindlichen Schienenflanken im Bogen von Biel zur Brücke	76
Abbildung 63: Rippenplatte bogeninnen	77
Abbildung 64: Rippenplatte bogenaussen.....	77
Abbildung 65: Zentralgerät railnodeG montiert am Wagenkasten unter dem Faltebalg beim Wagenübergang	79

Abbildung 66: Kombinierte LTE und GNSS Antenne auf dem Dach des Shuttles BDeh 2052	79
Abbildung 67: Sensor railnodeX mit Mikrofon montiert am Wagenkasten des Shuttles BDeh 2052	80
Abbildung 68: Sensor railnodeX mit Beschleunigungssensor montiert am Wagenkasten des Shuttles BDeh 2052	80
Abbildung 69: Darstellung der Mikrofonmessdaten im Web - Interface	81
Abbildung 70: Historie Vibrationen «Täschsand» - Zermatt, September 21 - August 22	83
Abbildung 71: Technode-Messdaten: Täsch - Zermatt Frequenzbereiche & Temperatur / Luftfeuchtigkeit.....	83
<i>Abbildung 72: Eigenmoden mit hoher partizipierender Masse in axialer Richtung aus FE-Simulation</i>	<i>85</i>
Abbildung 73: Am 31.01.2022 ermittelte Frequenzspektren beim Anschlagen des Rades, linkes Rad.....	86
Abbildung 74: Am 31.01.2022 ermittelte Frequenzspektren beim Anschlagen des Rades, rechtes Rad	86
Abbildung 75: Lärmspektren Vorbeifahrt Komet in Visp und St. Niklaus gemessen am 05.04.2022 durch das Kompetenzzentrum Fahrbahn.....	87
Abbildung 76: Frequenzfilter für Kurvenkreischen für die Fahrzeuge Komet und Shuttle auf angetriebenen Achsen	88
Abbildung 77: Kurvenkreischen Strecke Brig - Zermatt mit dem Shuttle bei Bergfahrt	89
Abbildung 78: Kurvenkreischen Strecke Brig - Zermatt mit dem Shuttle bei Talfahrt.....	89
Abbildung 79: Kurvenkreischen Strecke Täsch - Zermatt mit dem Shuttle bei Bergfahrt.....	90
Abbildung 80: Kurvenkreischen Strecke Täsch - Zermatt mit dem Shuttle bei Bergfahrt, zeitlicher Ausschnitt 14. Juni, rechtes Mikrofon.....	90
Abbildung 81: Betriebsdaten (Belastung BRT & Fahrgäste pro Achse).....	91

10.2. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Übersicht Ausrüstung der Fahrzeuge vor (ohne SKK) und während Betriebserprobung (mit SKK)</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 2: Informationen zu den Radsätzen der Shuttle-Fahrzeuge im Mai 2022.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 3: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 43'844 km nach der Reprofilierung</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 4: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 44'228 km nach der Reprofilierung</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 5: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 43'213 km nach der Reprofilierung</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 6: Visueller Zustand der Radlaufflächen nach einer Laufleistung von 48'110 km nach der Reprofilierung</i>	<i>34</i>
Tabelle 7: WMS erkannte Raddefekte nach Fahrzeugen	56
Tabelle 8, Ausgewählte Bögen für Schienenrauheitsmessungen.....	59
<i>Tabelle 9, Zeitpunkte der Schienenrauheitsmessungen.....</i>	<i>59</i>
Tabelle 10, Infos Oberbau der gemessenen Bögen	59
<i>Tabelle 11, Messungen Spurweite Täschsand & Zum Biel-Portal</i>	<i>77</i>
<i>Tabelle 12, Messungen Spurweite Zum Biel-Brücke & Lüegelwang.....</i>	<i>77</i>
Tabelle 13: Frequenzen der Eigenmoden aus FE - Simulation, Anschlagen der Radscheibe und aus Messfahrt	87

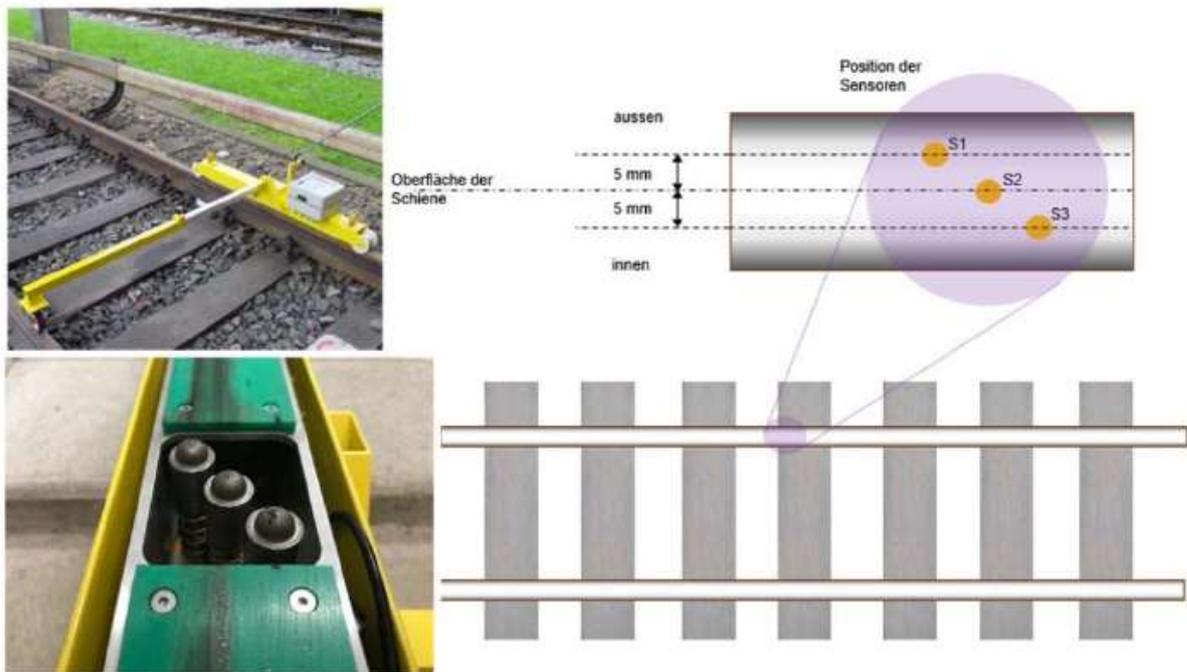
10.3. Referenzen

- [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. Anhang

11.1. Rauheit der Schiene

11.1.1. Messgerät APT RSA – Rail Surface Analyser



Anwendungen

- Quantifizierung der Schienenrauheit und Schlupfwellen
- Beurteilung der Schienenschleifqualität
- Als Grundlage für Lärmmessungen und -prognosen

Messmöglichkeiten

- Misst die vertikale Schienenkopfvariation relativ zu einer gleitenden Referenz mit einer Länge von 1 m als Funktion der Distanz
- Messung gemäss ISO 3095: 2005 (E)
- Unlimitierte Messlänge
- Leichte und handliche Führung auf dem Gleis

Messaufnehmer

- Dynamischer Messbereich : $\pm 5000 \mu\text{m}$
- Aufnehmertyp: Wegsensor (LVDT)
- Anzahl Aufnehmer: 3 (unabhängig positioniert auf dem Schienenkopf)
- Grundrauschen Sensor: $0.1 \mu\text{m}$
- Geber für Positionsbestimmung 128 Pulse pro Umdrehung

Datenaufnahme

- Aufnahmegerät: 4-kanalig simultan– 16 bit A/D Converter
- Resampling post-processing bei 1000 samples pro Meter
- Speicherkapazität: 1 Gigabyte memory

- 6 Stunden Messung
- Download Daten auf Laptop: USB-1

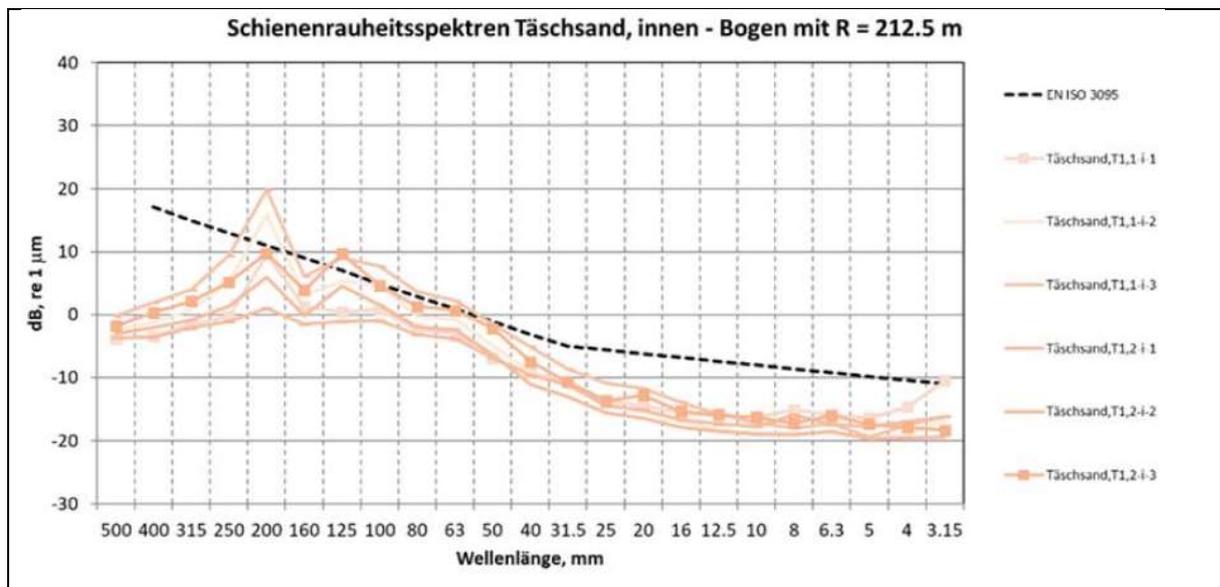
Data Processing

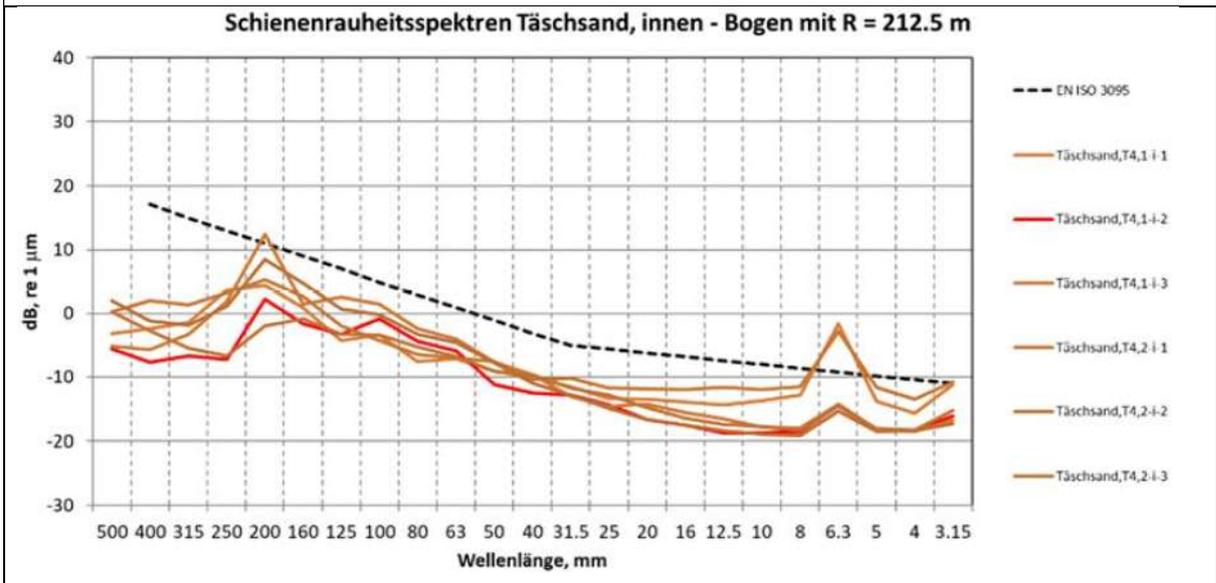
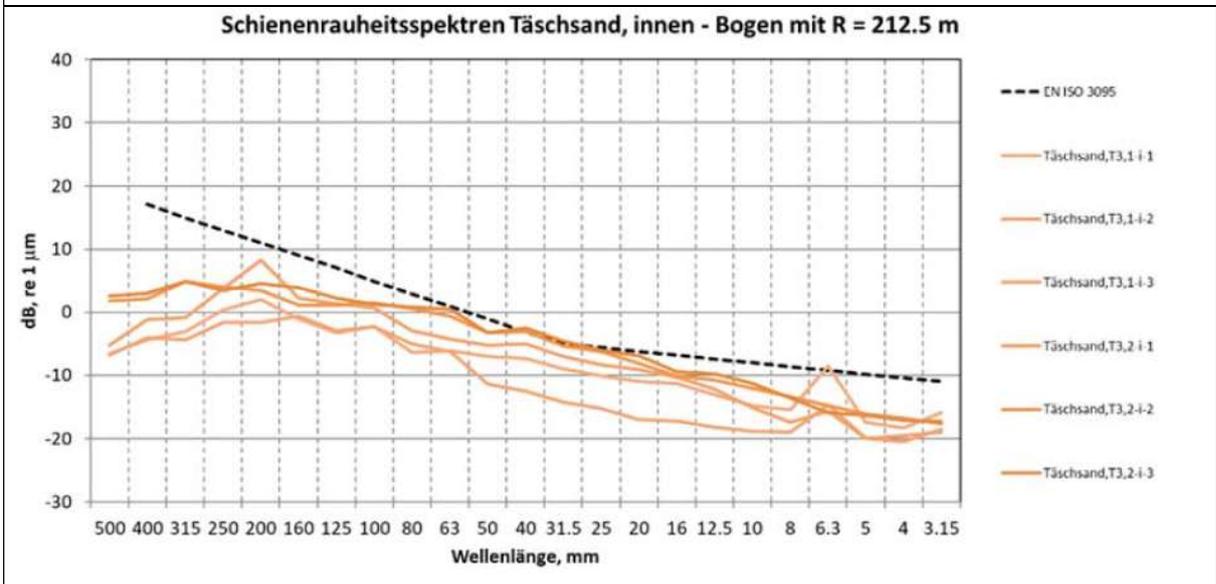
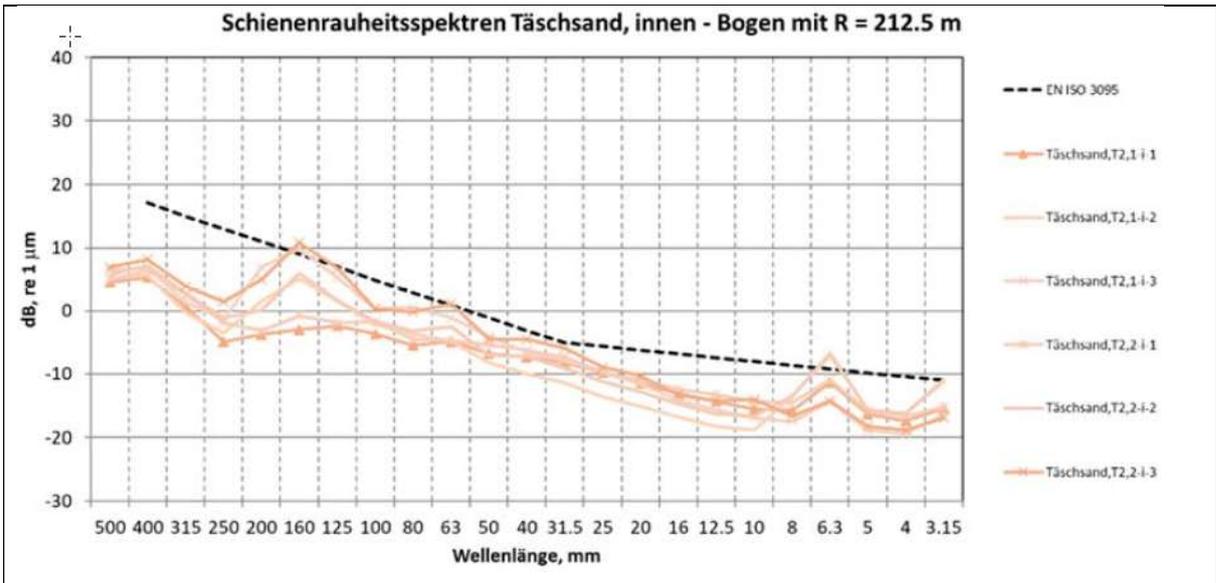
- Flexible Software für Daten Output in verschiedener Form
- Rauheitsspektren in: 1/3 Oktavband, Schmalband, PSD
- Farbkarten
- RMS level versus Distanz

Die Schienenrauheitsmessungen fanden zu folgenden Zeitpunkten statt:

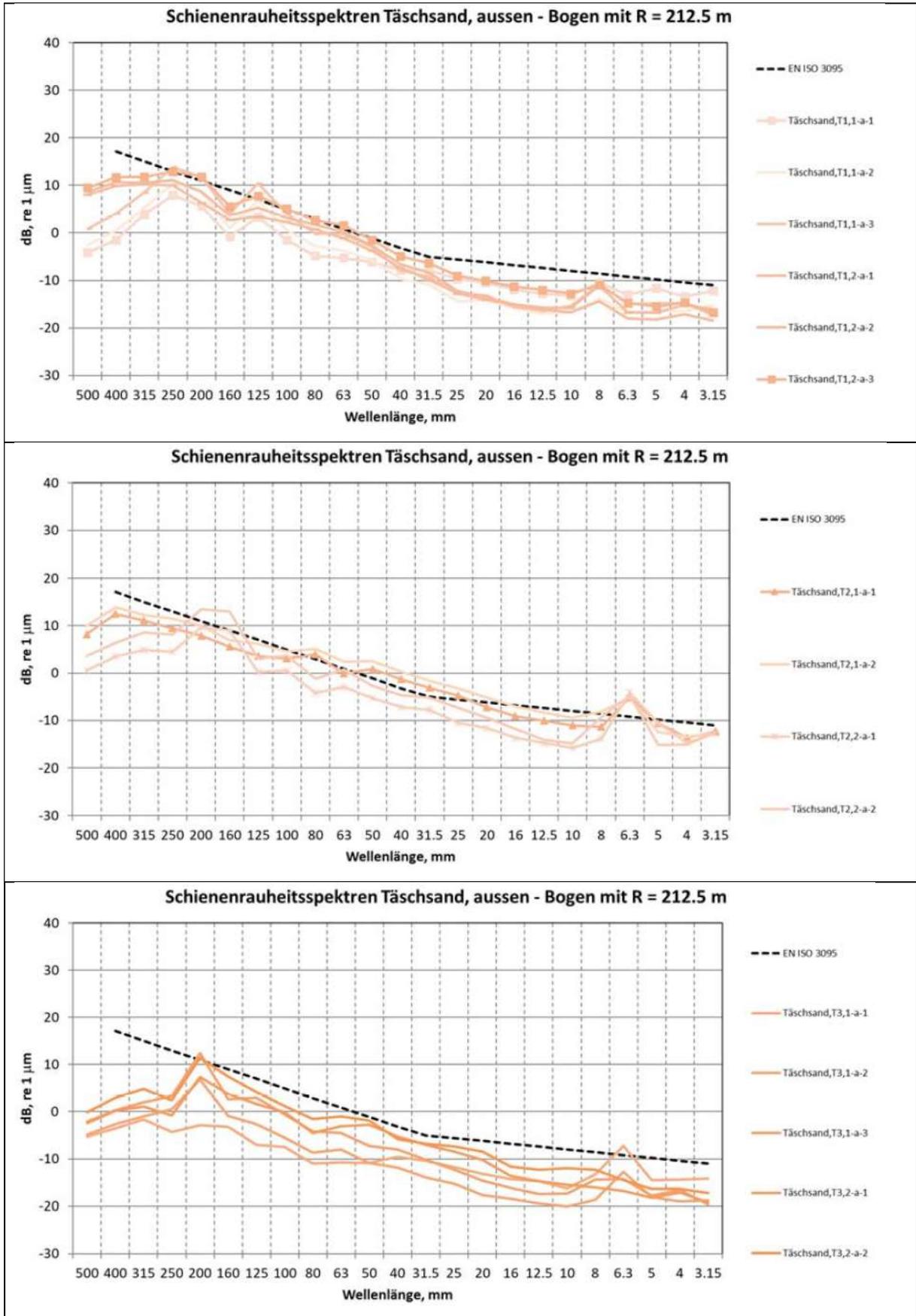
Datum	Beschreibung	Bemerkung	
T1	28.09.2021	Nullmessung vor Schleifen	
T2	21.10.2021	Kurz nach dem Schleifen	
T3	14.01.2022	3 Monate nach Schleifen	Vereiste Schienen, Messwerte z.T. unplausibel (ausser Täschsand)
T4	05.04.2022	6 Monate nach Schleifen	
T5	01.06.2022	8 Monate nach Schleifen	
T6	27.09.2022	12 Monate nach Schleifen	Hitzesommer Juli/August 2022

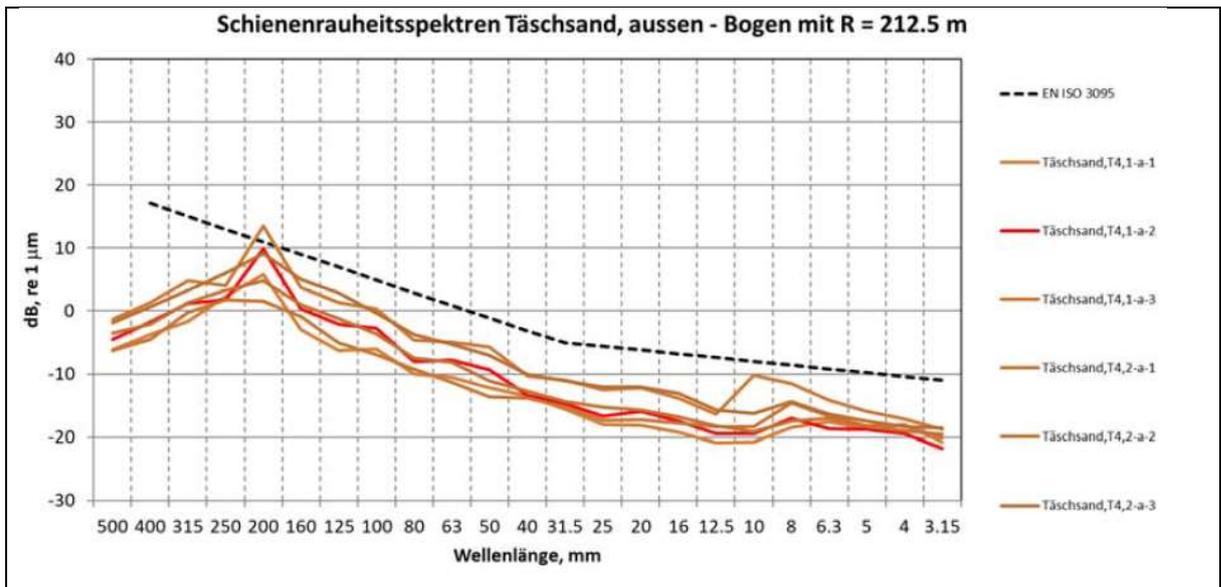
11.1.2. Täschsand innen



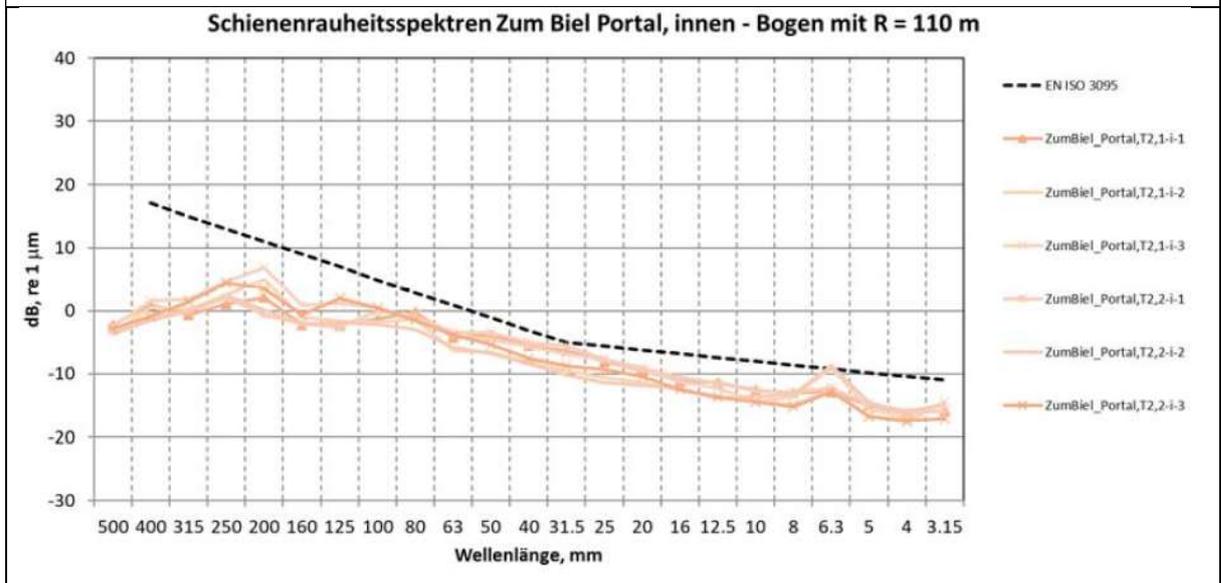
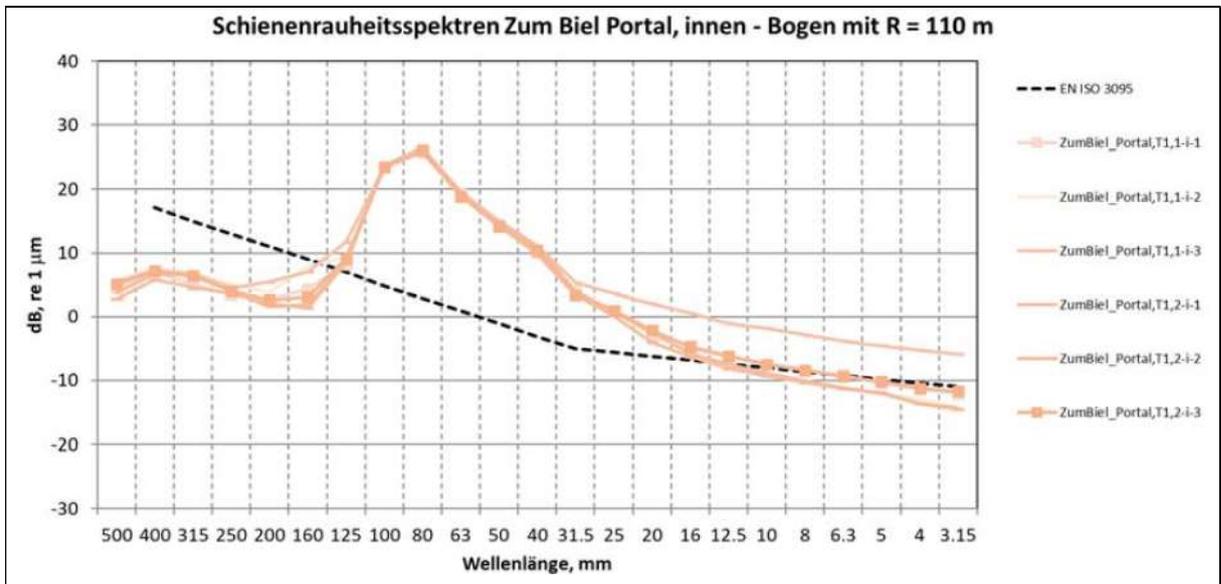


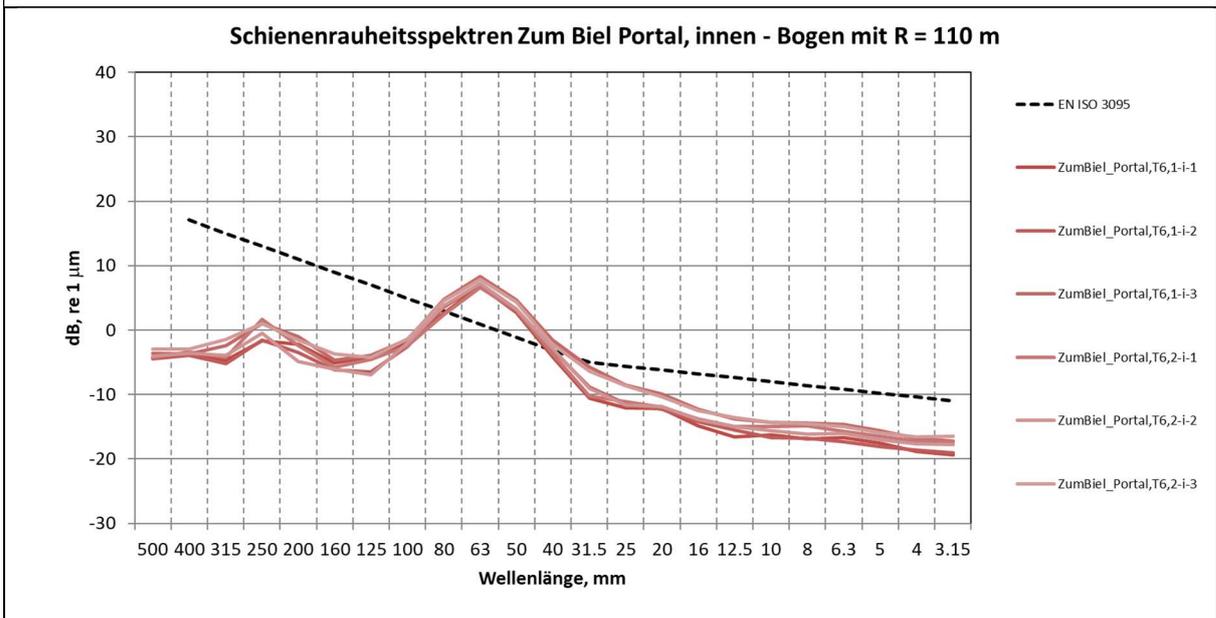
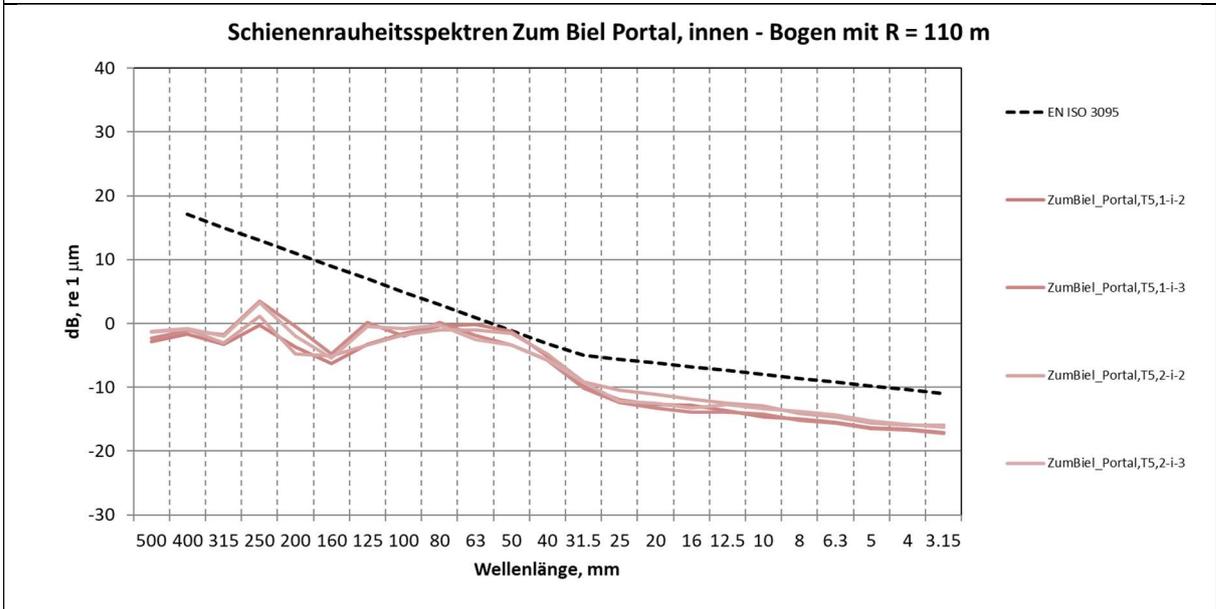
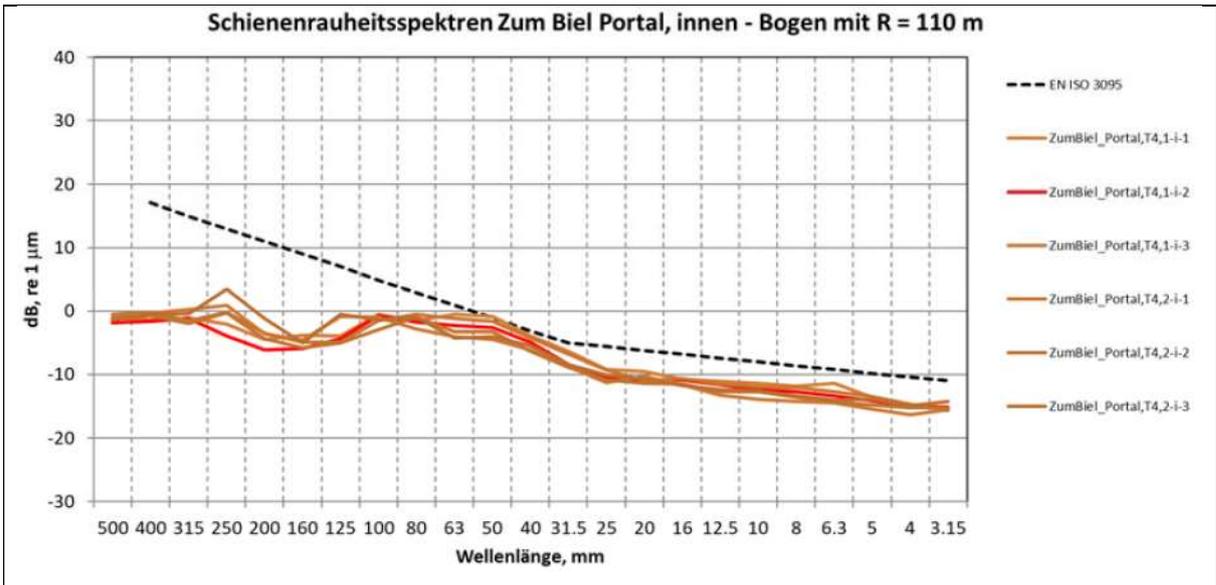
11.1.3. Täschsand aussen



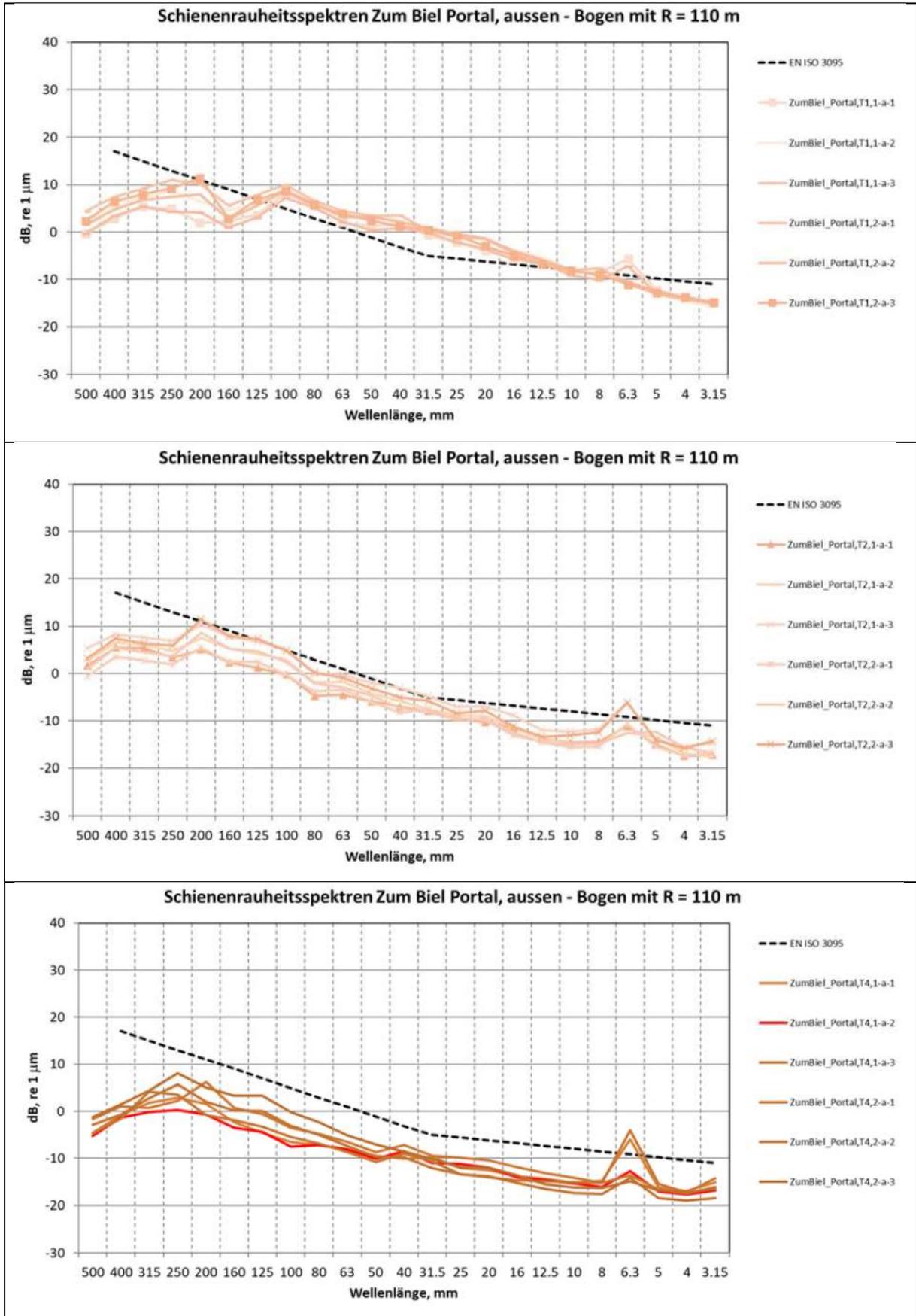


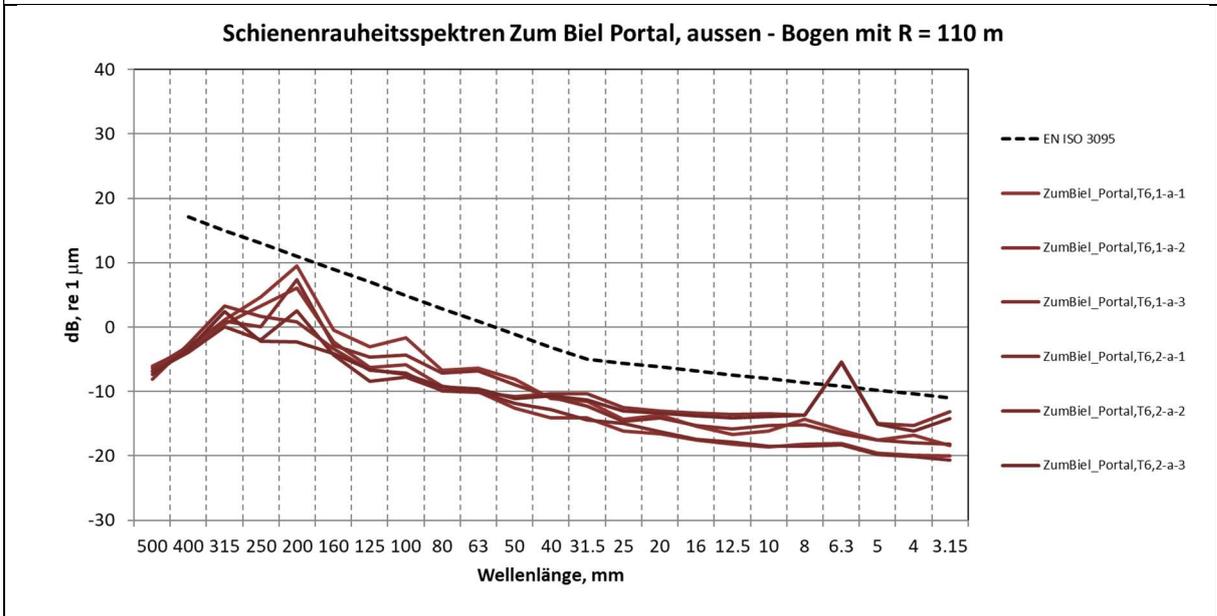
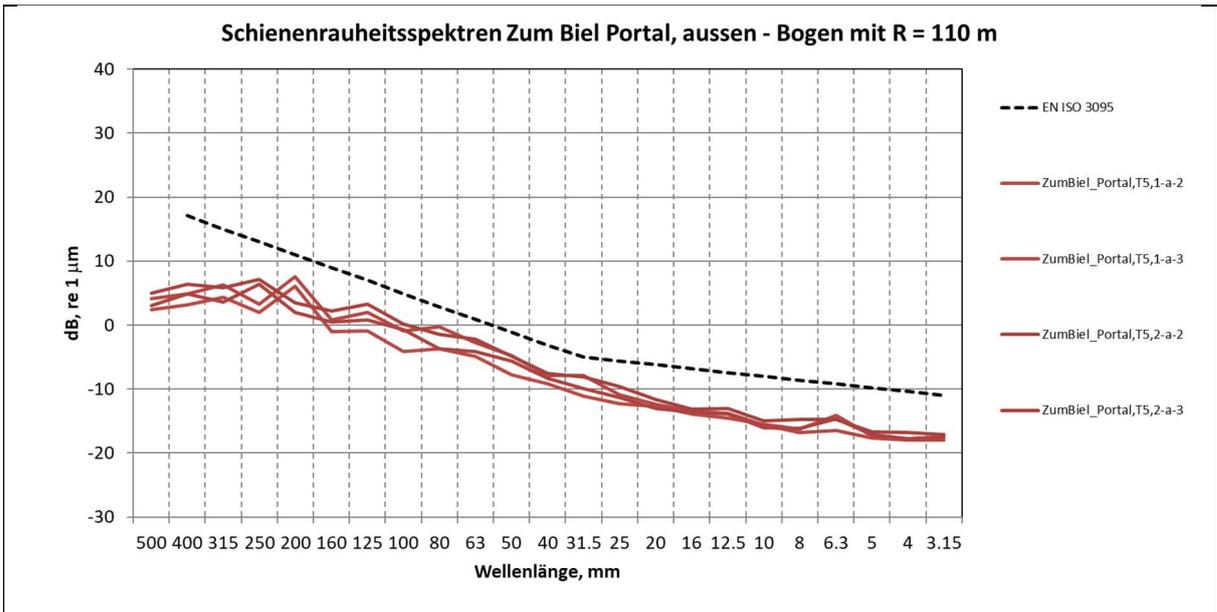
11.1.4. Zum Biel Portal innen



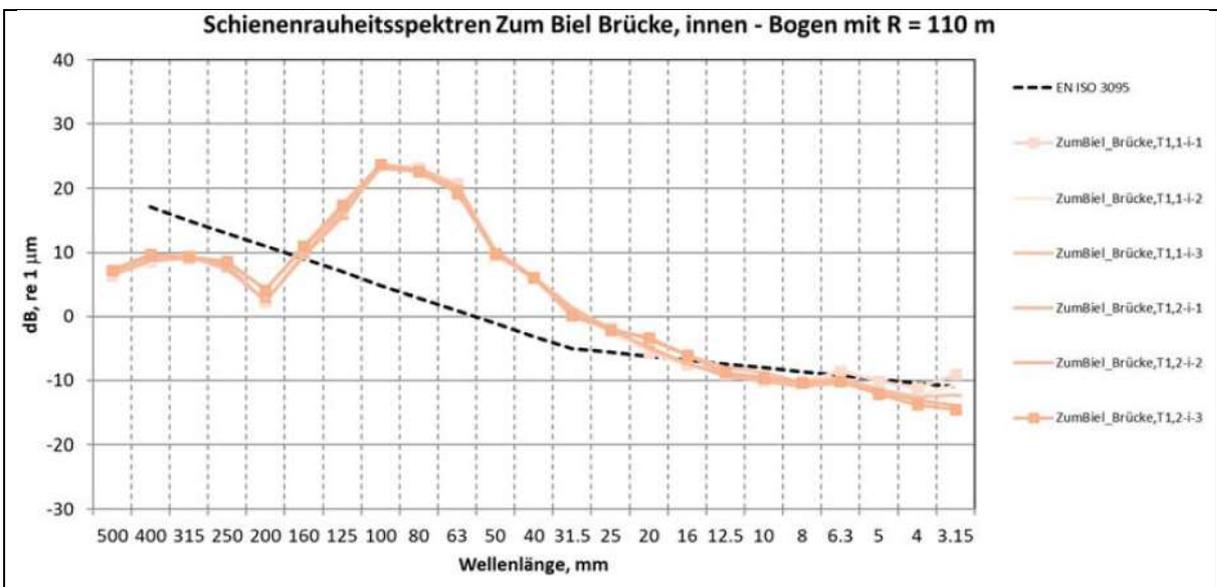


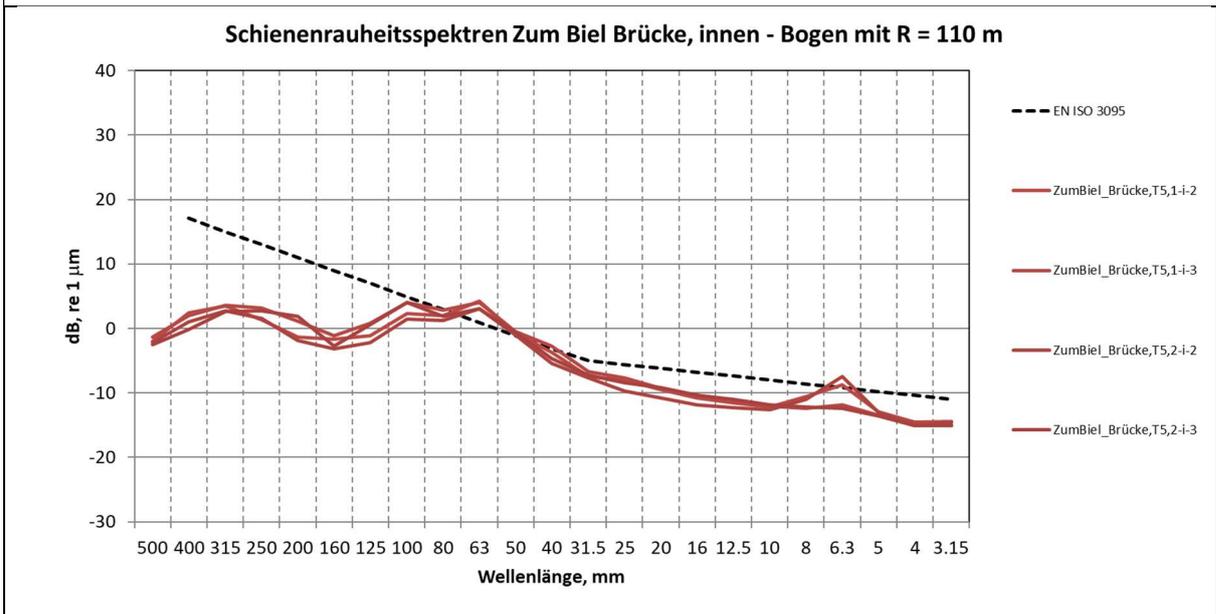
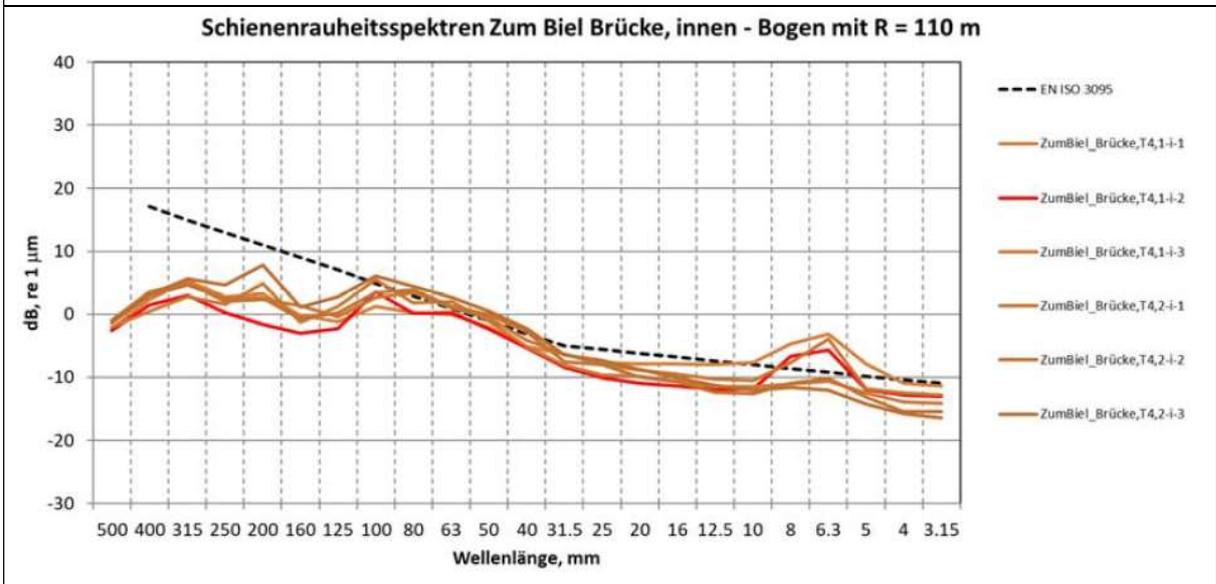
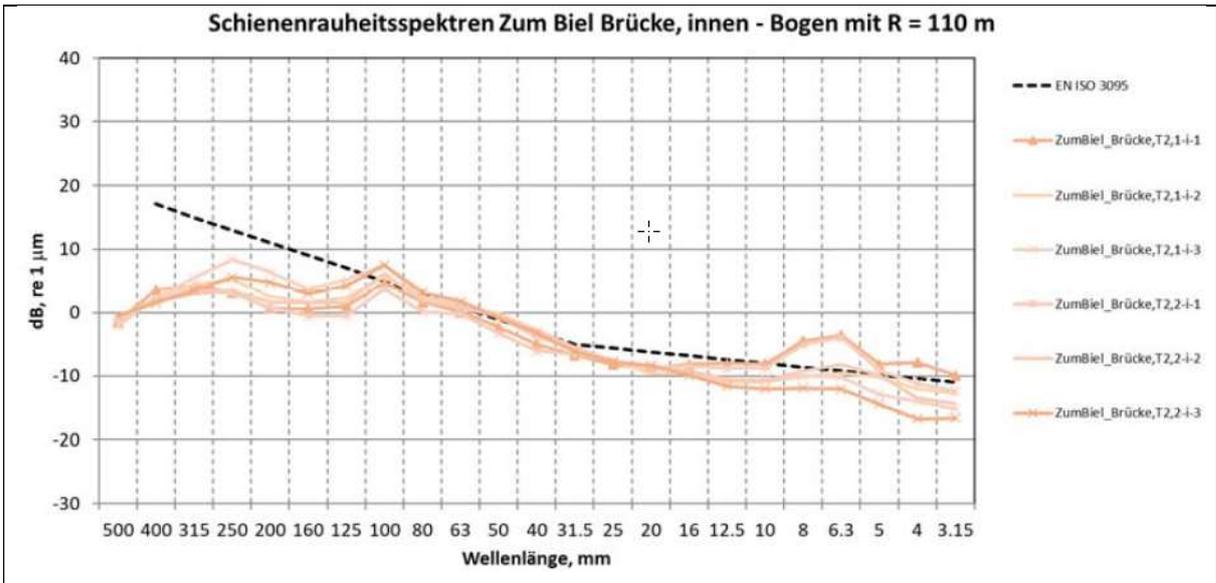
11.1.5. Zum Biel Portal aussen

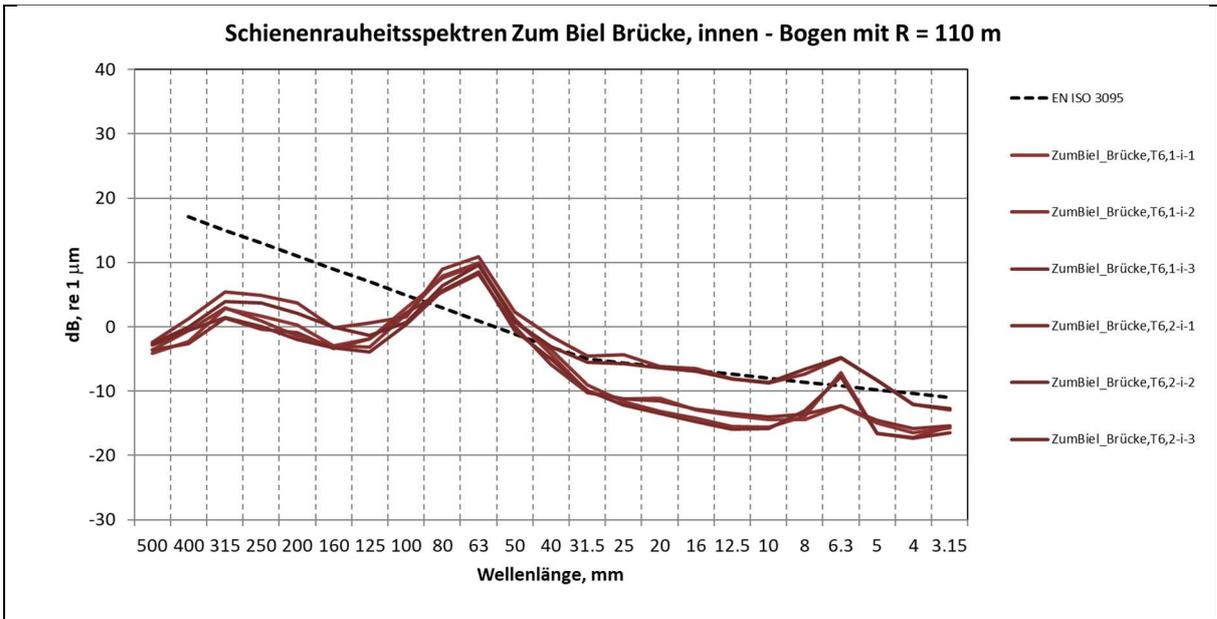




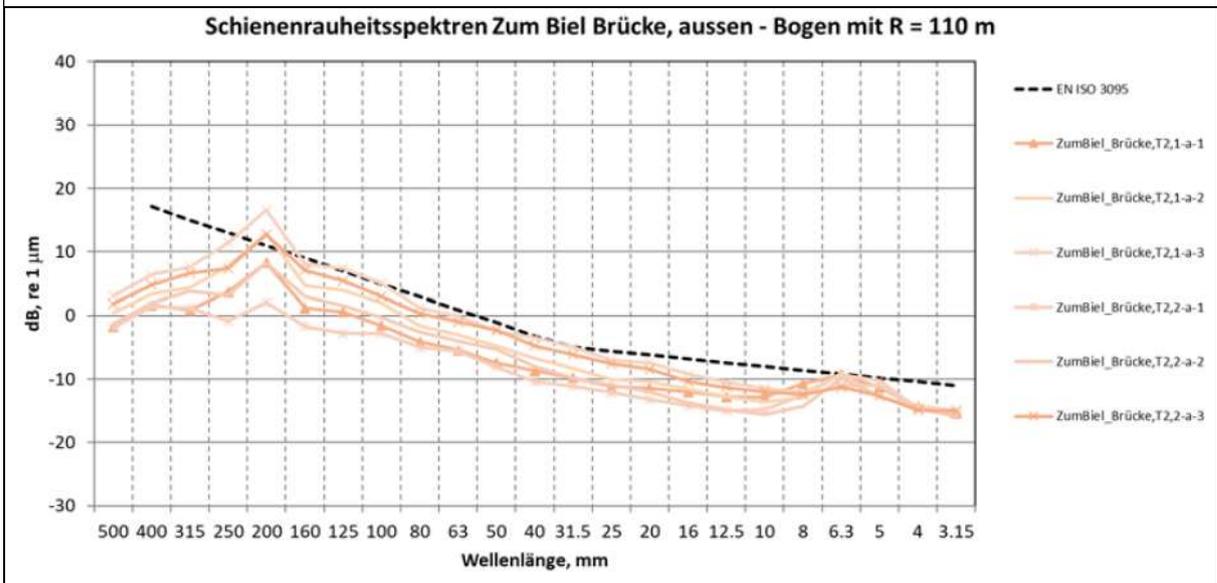
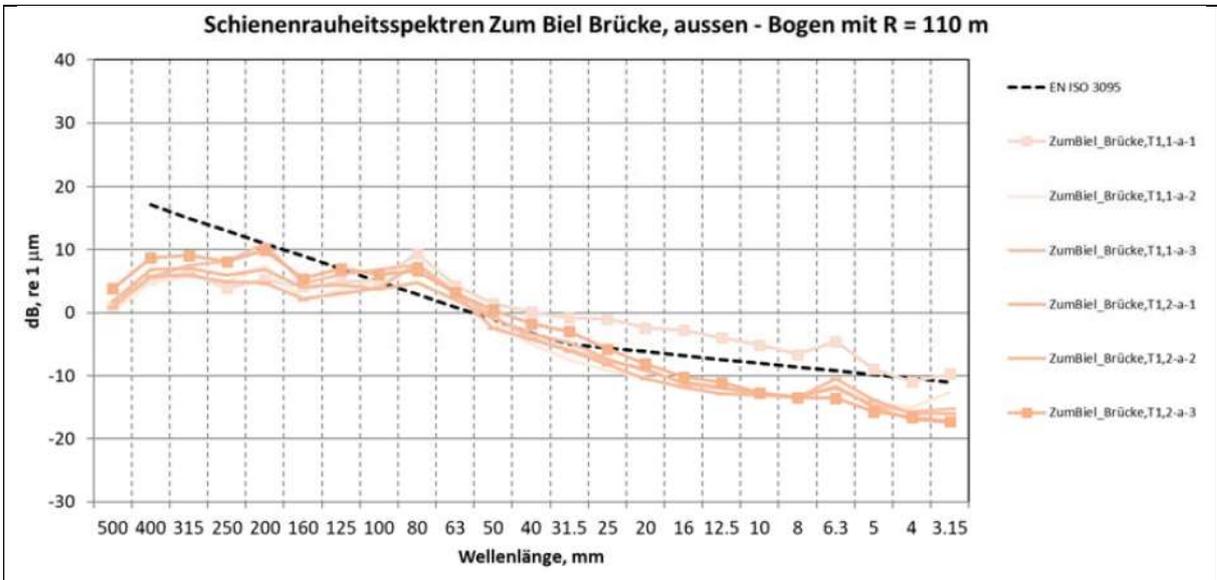
11.1.6. Zum Biel Brücke innen

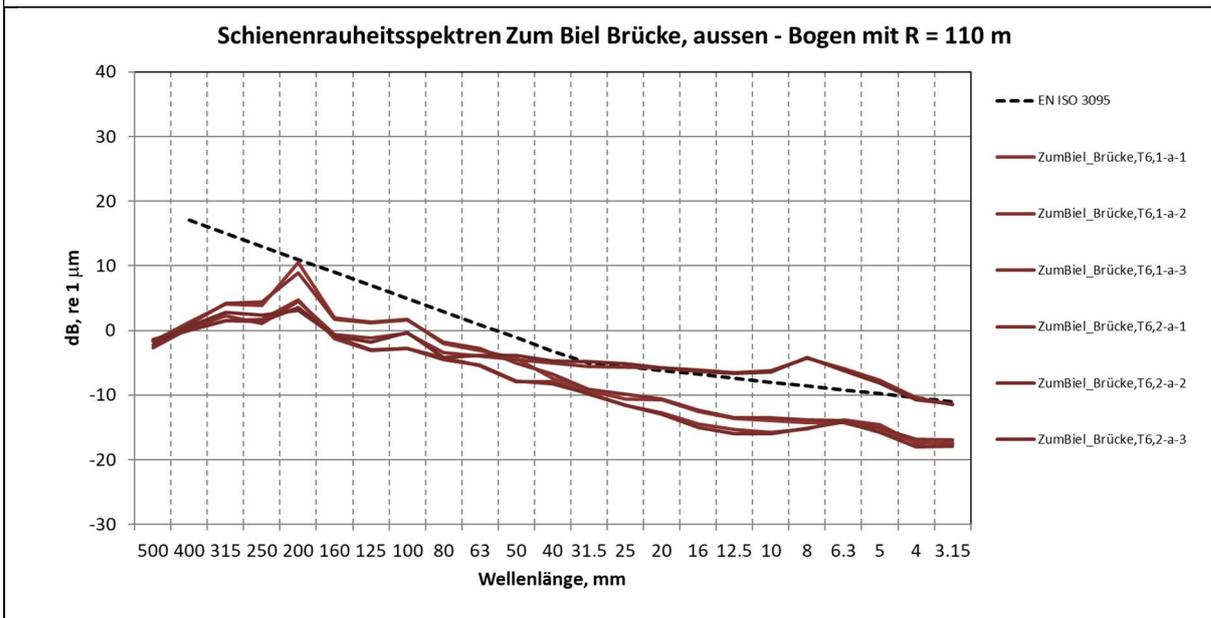
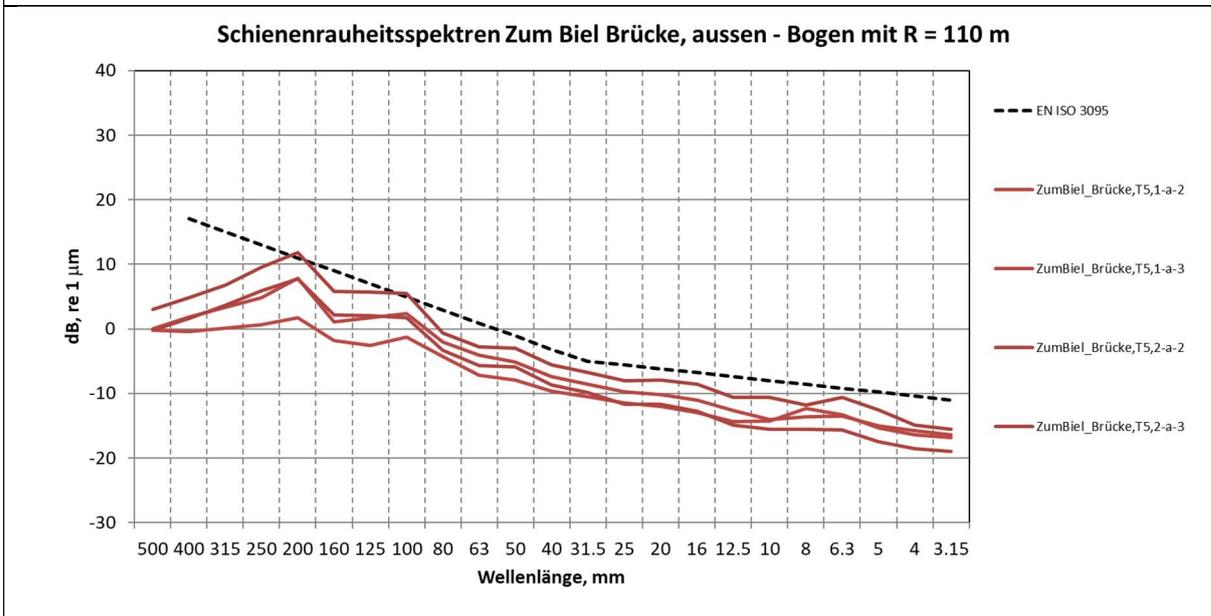
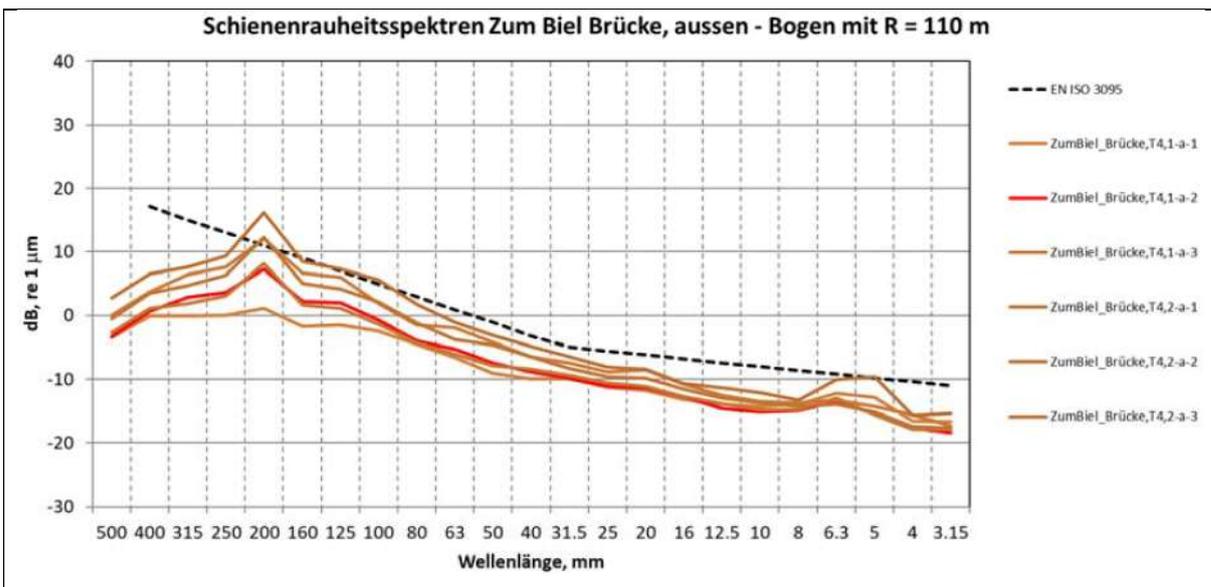




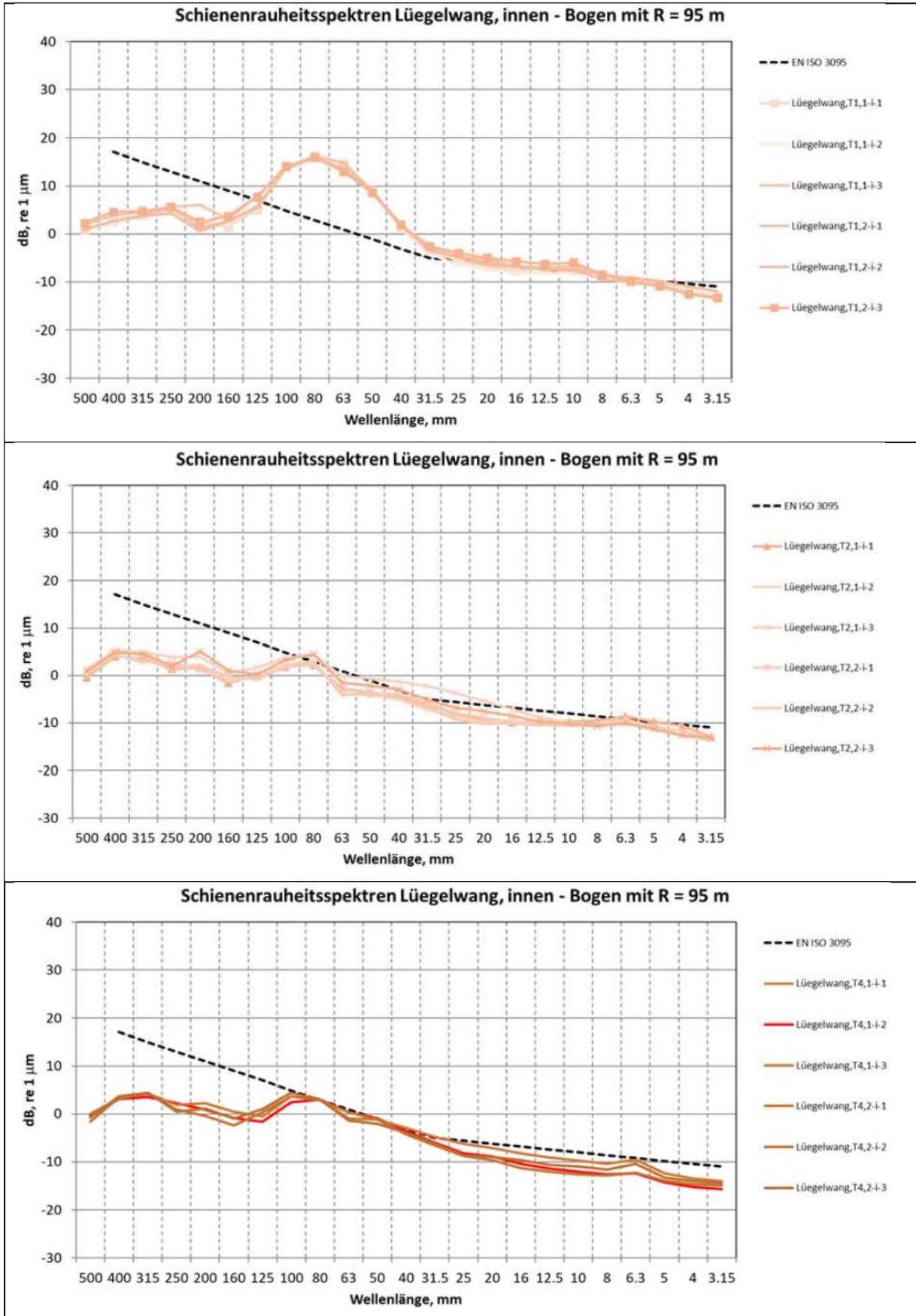


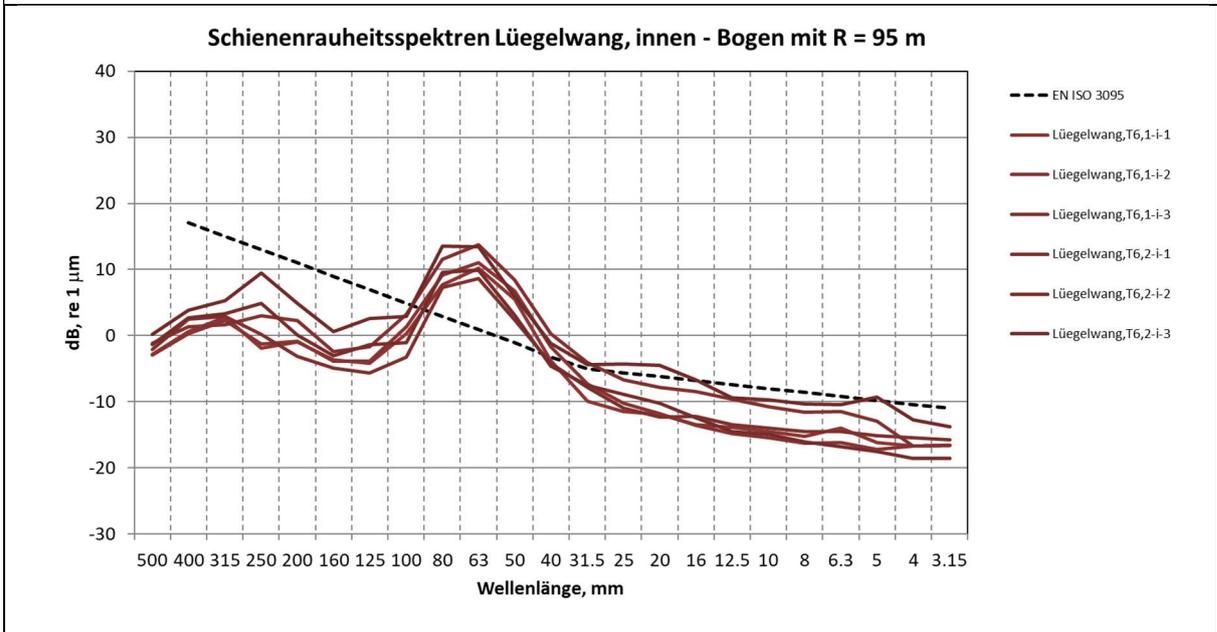
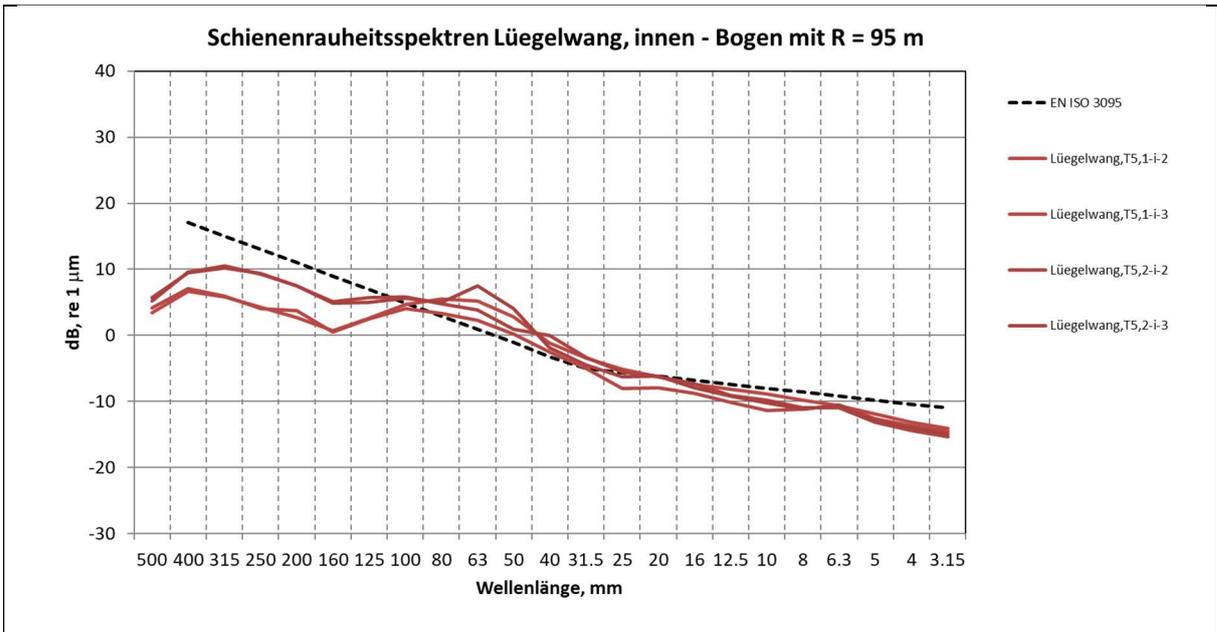
11.1.7. Zum Biel Brücke aussen



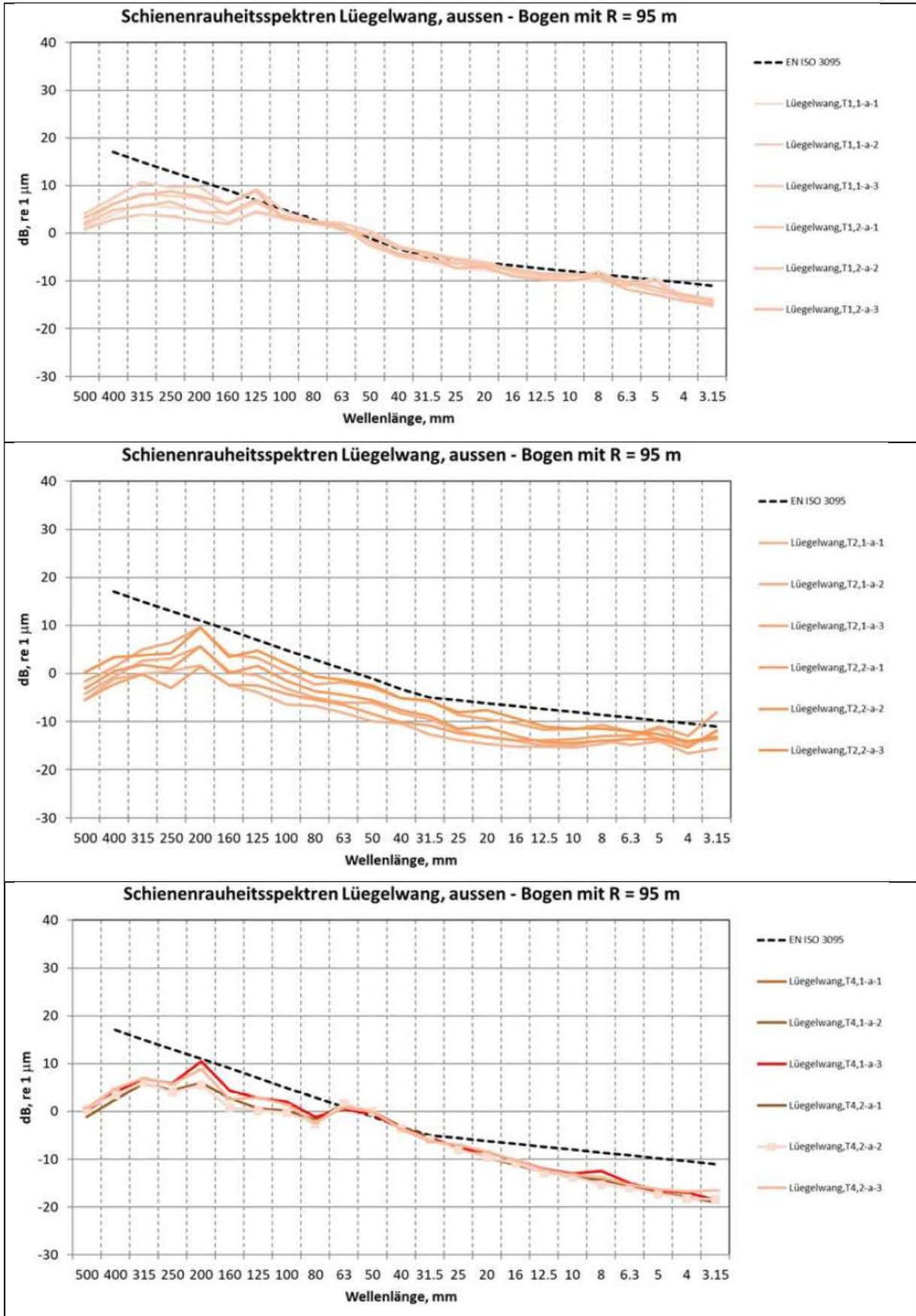


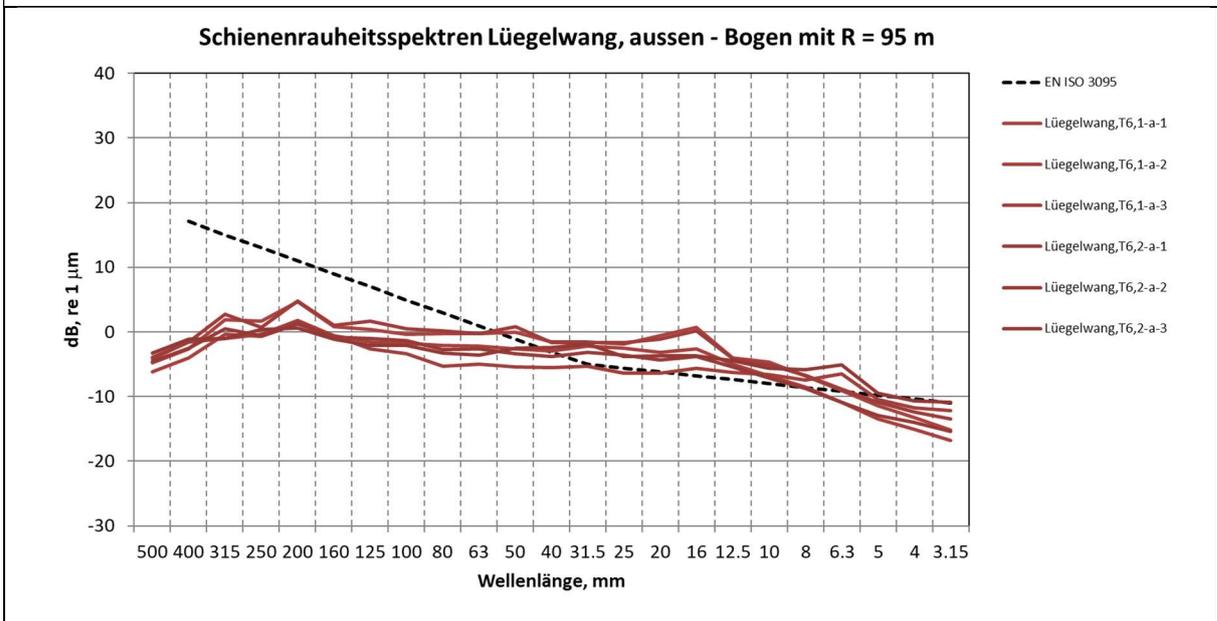
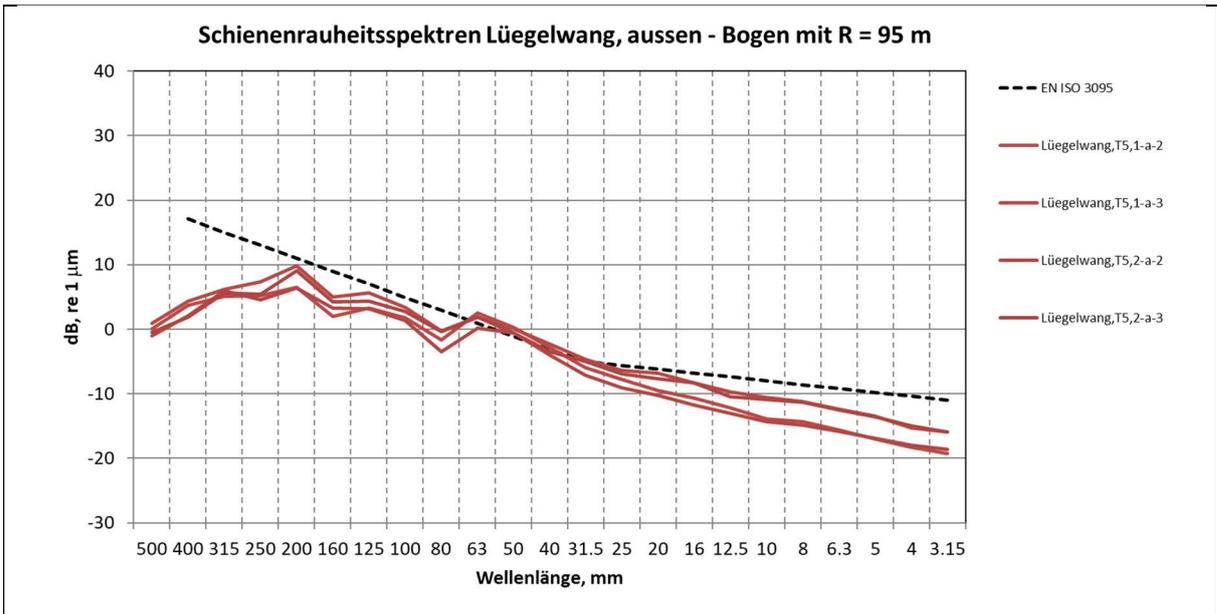
11.1.8. Lüegelwang innen





11.1.9. Lüegelwang aussen





11.2. Tribometer Messungen

11.2.1. Kalter Boden Gleis 2 (Radius 100 m) vor Relaisraum Streckenkilometer 41.080

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
22.10.21	15:10	Sonnig/Wind	8	links	0.57	0.55	0.52	0.55
				rechts	0.59	0.58	0.58	0.58
28.10.21	13.30	Sonnig	12	links	0.23	0.27	0.25	0.25
		leicher Wind		rechts	0.25	0.26	0.26	0.26
29.10.21	10.30	Sonnig	6	links	0.26	0.22	0.23	0.24
				rechts	0.23	0.23	0.23	0.23
30.10.21	8.15	Bewölkt	5	links	0.21	0.24	0.22	0.22
				rechts	0.27	0.26	0.27	0.27
31.10.21	08.30	Bewölkt	7	links	0.29	0.33	0.32	0.31
				rechts	0.34	0.27	0.26	0.29
02.11.21	13.30	Sonnig	9	links	0.23	0.27	0.25	0.25
				rechts	0.27	0.32	0.37	0.32
03.11.21	11.30	Bewölkt	6	links	0.56	0.56	0.62	0.58
				rechts	0.61	0.61	0.64	0.62
06.11.21	09.15	Sonnig	-1	links	0.28	0.33	0.31	0.30
				rechts	0.35	0.30	0.32	0.32
07.11.21	08.30	Sonnig	-1	links	0.26	0.30	0.28	0.28
				rechts	0.28	0.28	0.24	0.27

08.11.21	11.30	Sonnig	0	links	0.26	0.28	0.28	0.27
				rechts	0.27	0.30	0.28	0.28
09.11.21	09.30	Sonnig	3	links	0.24	0.28	0.26	0.26
				rechts	0.26	0.25	0.26	0.26
12.11.21	11.00	Sonnig	8	links	0.24	0.26	0.28	0.26
				rechts	0.26	0.30	0.26	0.27
18.11.21	14.00	Sonnig	8	links	0.21	0.23	0.23	0.22
				rechts	0.23	0.32	0.33	0.29
25.11.21	11.30	Bewölkt	5	links	0.26	0.25	0.27	0.26
				rechts	0.27	0.33	0.36	0.32
03.12.21	10.00	Schön	-11	links	0.26	0.36	0.45	0.36
				rechts	0.31	0.30	0.32	0.31
27.12.21	10.00	Bewölkt	-1	links	0.27	0.28	0.25	0.27
				rechts	0.29	0.30	0.28	0.29
14.02.22	14.20	Bewölkt	2	links	0.18	0.20	0.21	0.20
				rechts	0.23	0.23	0.24	0.20
02.03.22	07.50	Sonnig	-2	links	0.22	0.26	0.27	0.25
				rechts	0.30	0.30	0.29	0.30
07.04.22	08.55	Regen	2	links	0.39	0.40	0.43	0.41
			2	rechts	0.31	0.22	0.23	0.25
27.04.22	08.00	Schön	0	links	0.36	0.47	0.44	0.42
				rechts	0.45	0.37	0.36	0.39
13.06.22	08.50	Bewölkt	14	links	0.23	0.31	0.31	0.28
				rechts	0.34	0.33	0.34	0.34
30.06.22	09.30	Schön	13	links	0.31	0.31	0.29	0.30
				rechts	0.32	0.34	0.39	0.35
12.07.22	07.50	Schön	15	links	0.30	0.28	0.35	0.31
				rechts	0.40	0.44	0.42	0.42
21.07.22	08.45	Schön	19	links	0.37	0.35	0.34	0.35
				rechts	0.41	0.39	0.43	0.41

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

11.2.2. Biel Kurve (110m) Streckenkilometer 42.050

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
22.10.21	14.50	Sonnig/Wind	8	links	0.69	0.68	0.68	0.68
				rechts	0.67	0.66	0.66	0.66
28.10.21	13.50	Sonnig	12	links	0.23	0.30	0.27	0.27
		leichter Wind		rechts	0.23	0.25	0.23	0.24
29.10.21	10.45	Sonnig	6	links	0.24	0.25	0.25	0.25
				rechts	0.21	0.22	0.24	0.22
30.10.21	08.30	Bewölkt	5	links	0.22	0.23	0.25	0.23
				rechts	0.25	0.24	0.23	0.24
31.10.21	08.45	Bewölkt	7	links	0.24	0.24	0.25	0.24
				rechts	0.32	0.40	0.43	0.38
02.11.21	14.30	Sonnig	9	links	0.56	0.61	0.57	0.58
				rechts	0.53	0.59	0.57	0.56
03.11.21	11.00	Bewölkt	6	links	0.62	0.63	0.67	0.64
				rechts	0.56	0.41	0.36	0.44
06.11.21	09.30	Sonnig	-1	links	0.30	0.28	0.30	0.29
				rechts	0.27	0.36	0.33	0.32
07.11.21	08.45	Sonnig	-1	links	0.50	0.50	0.54	0.51
				rechts	0.51	0.38	0.37	0.42

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

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

11.2.3. Biel Gerade Streckenkilometer 42.100

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
22.10.21	14.40	Sonnig/Wind	8	links	0.67	0.65	0.64	0.65
				rechts	0.66	0.64	0.63	0.64
28.10.21	14.00	Sonnig	12	links	0.23	0.20	0.21	0.21
		leichter Wind		rechts	0.21	0.21	0.29	0.24
29.10.21	10.45	Sonnig	6	links	0.22	0.22	0.20	0.21
				rechts	0.22	0.26	0.22	0.23
30.10.21	08.40	Bewölkt	5	links	0.15	0.16	0.18	0.16
				rechts	0.17	0.23	0.23	0.21
31.10.21	08.45	Bewölkt	7	links	0.29	0.28	0.26	0.28
				rechts	0.37	0.34	0.31	0.34
02.11.21	14.30	Sonnig	9	links	0.33	0.35	0.38	0.35
				rechts	0.42	0.47	0.46	0.45
03.11.21	11.00	Bewölkt	6	links	0.46	0.49	0.49	0.48
				rechts	0.53	0.54	0.55	0.54
06.11.21	09.30	Sonnig	-1	links	0.23	0.27	0.26	0.25
				rechts	0.35	0.36	0.34	0.35
07.11.21	08.45	Sonnig	-1	links	0.23	0.21	0.23	0.22
				rechts	0.23	0.27	0.29	0.26
08.11.21	11.00	Sonnig	0	links	0.29	0.29	0.29	0.29
				rechts	0.23	0.25	0.24	0.24
09.11.21	11.00	Sonnig	3	links	0.28	0.27	0.28	0.28
				rechts	0.31	0.30	0.28	0.30
12.11.21	11.15	Sonnig	8	links	0.21	0.25	0.23	0.23
				rechts	0.27	0.26	0.30	0.28
18.11.21	14.45	Sonnig	8	links	0.27	0.30	0.30	0.29
				rechts	0.27	0.28	0.26	0.27
25.11.21	11.15	Bewölkt	5	links	0.34	0.32	0.27	0.31
				rechts	0.25	0.29	0.32	0.29
03.12.21	10.50	Schön	-11	links	0.24	0.24	0.28	0.25
				rechts	0.23	0.26	0.29	0.26
27.12.21	10.30	Bewölkt	-1	links	0.25	0.25	0.26	0.25
				rechts	0.23	0.22	0.23	0.23

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

11.2.4. Luegelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
22.10.21	14.20	Sonnig/Wind	8	links	0.57	0.63	0.56	0.59
				rechts	0.49	0.56	0.57	0.54
28.10.21	14.15	Sonnig	12	links	0.24	0.23	0.22	0.23
		leichter Wind		rechts	0.28	0.25	0.24	0.26
29.10.21	11.00	Sonnig	6	links	0.22	0.23	0.23	0.23
				rechts	0.21	0.21	0.19	0.20
30.10.21	09.00	Bewölkt	5	links	0.21	0.24	0.22	0.22
				rechts	0.22	0.23	0.26	0.24
31.10.21	09.15	Bewölkt	7	links	0.25	0.36	0.36	0.32
				rechts	0.29	0.35	0.30	0.31
02.11.21	14.45	Sonnig	9	links	0.61	0.61	0.63	0.62
				rechts	0.68	0.58	0.63	0.63
03.11.21	10.30	Bewölkt	6	links	0.43	0.37	0.44	0.41
				rechts	0.49	0.49	0.54	0.51
06.11.21	10.00	Sonnig	-1	links	0.26	0.26	0.27	0.26
				rechts	0.27	0.27	0.28	0.27
07.11.21	09.15	Sonnig	-1	links	0.34	0.27	0.41	0.34
				rechts	0.33	0.29	0.27	0.30
08.11.21	10.45	Sonnig	0	links	0.29	0.30	0.30	0.30
			0	rechts	0.28	0.31	0.30	0.30

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

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

11.3. Gesamtwirtschaftlichkeit – Annahmen

11.3.1. Investition

Rollmaterial

- Lebensdauer: 40 Jahren- mit 50% Reinvestition nach 20 Jahren
- Material, inkl. Halterungen, Montageplatten etc.
 - Bestellungen: 17'300 CHF pro Fahrzeug (Anlage, Halterungen, RFID Tags, Platte (Boden) + ca. 2'000 CHF Eigenmaterial (Halterungen, Klemmleisten, Schrauben) → 20'000 CHF / Fahrzeug
- Installation, erstes Fahrzeug:
 - 41 Std. * 4 Pers. * 90 CHF = 14'760 CHF Personenaufwand
- Installation, weitere Fahrzeuge:
 - 4 Pers. * 24.6 Std. * 90 CHF = 8'856 CHF Personalaufwand / Fahrzeug
- Engineering (Schätzung 4 Tage für Bestellungen, Schemaanpassungen usw.):
 - 32.8 Std. * 130 CHF = 4'264 CHF (*One shot*)

Infrastruktur

- Schienen
 - Fr. 600.- pro Laufmeter Schiene,
 - Lebensdauer ohne SKK: 9 Jahre, mit SKK: 16 Jahre
- Gleis
 - Fr. 2000.- pro Laufmeter Gleis inkl. Schiene
 - Lebensdauer ohne SKK: 45 Jahre, mit SKK: 63 Jahre

Wartungs- und Betriebskosten

Rollmaterial

- Materialkosten
 - (SKK-Mittel) = ca. 3'500 CHF / Jahr
- Personalkosten
 - ca. 1 Std. pro Monat (P1), -> 12 * 90 = 1'080 CHF
 - 2 * 4 Std. pro Jahr (P3) -> 8 * 90 = 720
 - ca. 2'000 CHF Personalkosten
- 5'500 CHF / Jahr

Infrastruktur

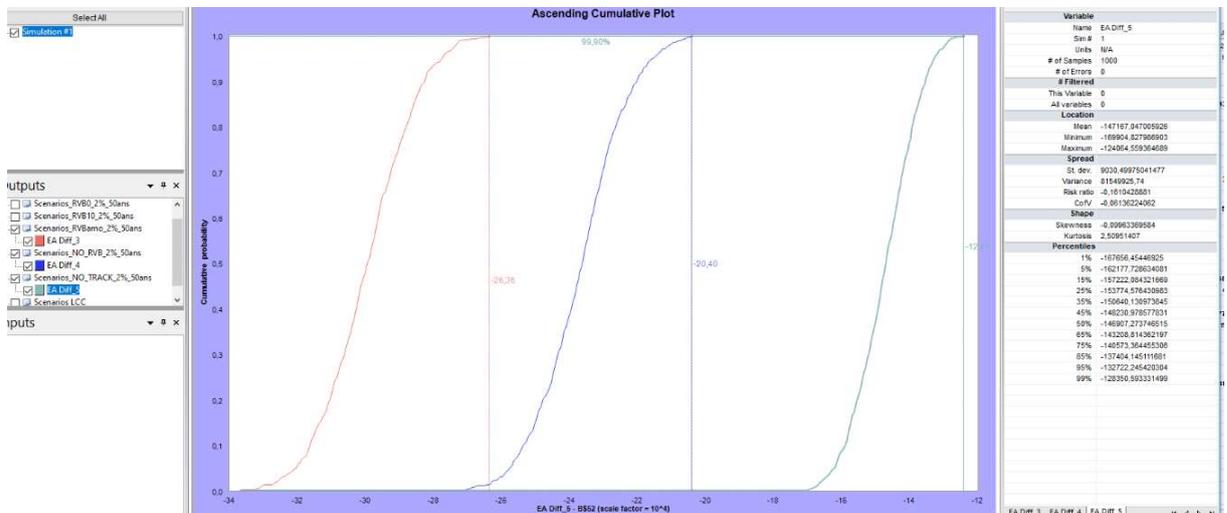
- Ohne SKK
 - Schleifen: 6 CHF/m, Stopfen: 4 CHF/m
 - Schienenersatz: 150'000 CHF / 5000m -> in den Fr. 150'000.- sind rund 250m reiner Schienenersatz eingerechnet, da nicht die ganze Strecke enge Radien sind, werden nur die Schienen in den Kurven ausgetauscht. (5000m / 9 Jahre = 555m -> ca. 1/2 in engen Radien -> ca. 250m * Fr. 600.- = Fr. 150'000.-

- Mit SKK :
 - Schleifen: 4 CHF/m, Stopfen: 4 CHF/m
 - Lebensdauer der Schiene (alle 9 Jahre), Lebensdauer des Gleises (Schotter). 16 Jahre
 - Schienenersatz: 90'000 CHF / 5000m

Betriebskosten Drehgestellwechsel / Radreifenwechsel vor / nach SKK

- DG-Wechsel:
 - $20 \cdot 90 = 1'800$, Reinigung DG: $15 \cdot 90 = 1'350$, Komponenten spritzen: $5 \cdot 90 = 450$, Ein- Ausbau Achsantriebe: $30 \cdot 90 = 2'700$, Drehkranz versetzen um 90° : $2 \cdot 90 = 180$ → Gesamt Stunden = 6'480 CHF
 - Externe Leistung: NB Radsatz (extern) ohne Antrieb zerlegen: $2 \cdot 4900 = 9'800$, Transportkosten = 1'500, → Gesamt externe Leistungen = 11'300 CHF
 - Material: Reinigung TDG= 100, Komponenten spritzen= 100, Ein- Ausbau Achsantriebe = 3'500, Bandagen = 1'980, Rissprüfung = $250 \cdot 2 = 500$, Widerstandsmessung = $130 \cdot 2 = 260$,
 - Tarollager revidieren = 1'400 → Gesamt Material = 7'840 CHF
 - DG / Radreifenwechsel Gesamt: 25'620 pro Drehgestell
- Annahmen:
 - Laufleistungen vor SKK = 3'500km/mm
 - Laufleistungen während SKK = 16'000km/mm
 - Benötigte Laufleistung Fz pro Jahr = 80'000 km
 - Anzahl DG / Radreifenwechsel über ein Jahr vor SKK = ca. 8
 - Anzahl DG / Radreifenwechsel während Betriebserprobung SKK = ca. 2
- Kosten DG Wechsel pro Jahr (vor / na
 - Jährliche Kosten vor SKK: $8 \cdot 25620 = 204'960$
 - Jährliche Kosten während Betriebserprobung SKK: $2 \cdot 25620 = 51'240$
 - Differenz ca.: $204'960 - 51'240 = 153'720$ CH

11.3.2. Auszug Simulation

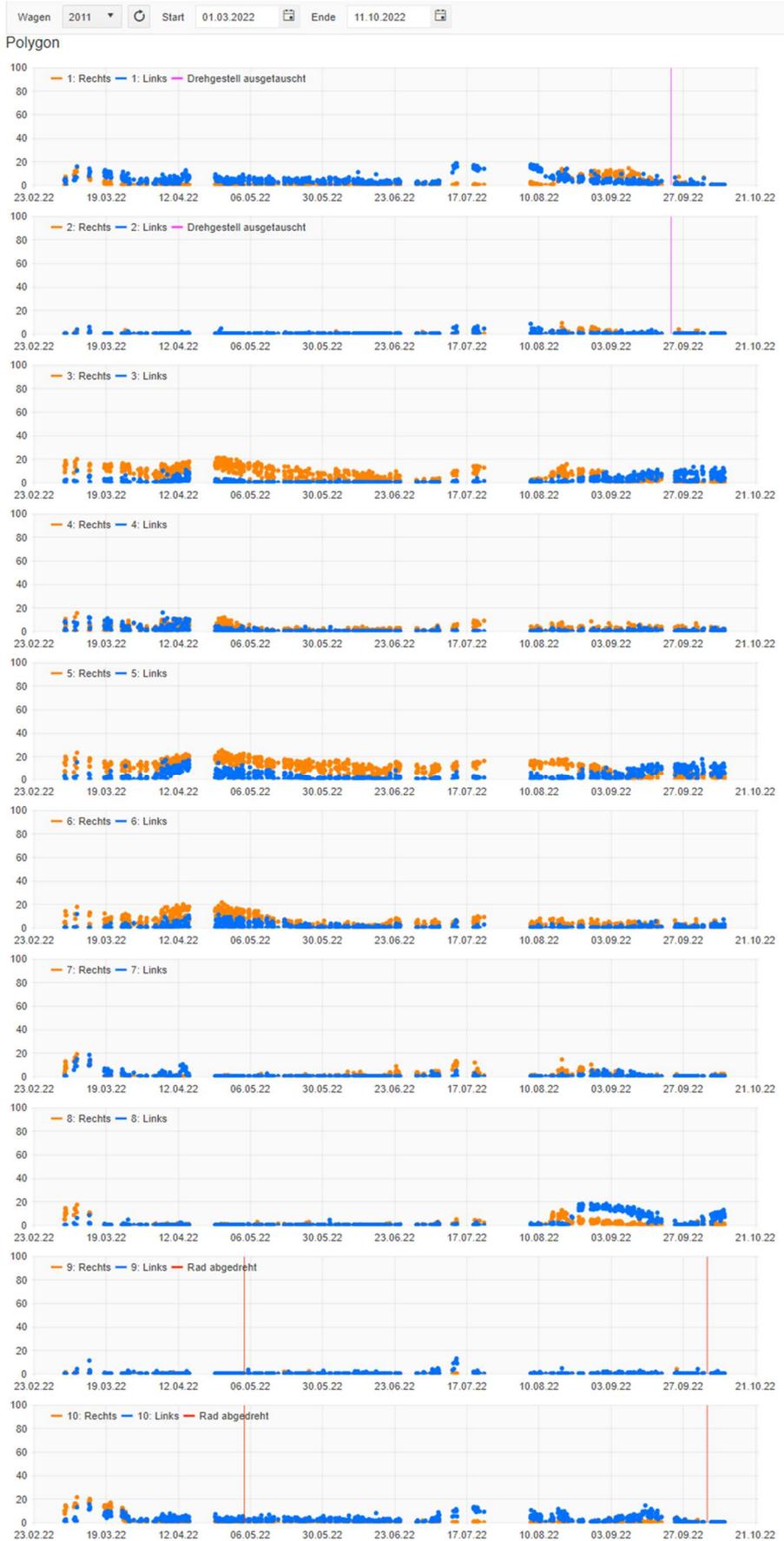


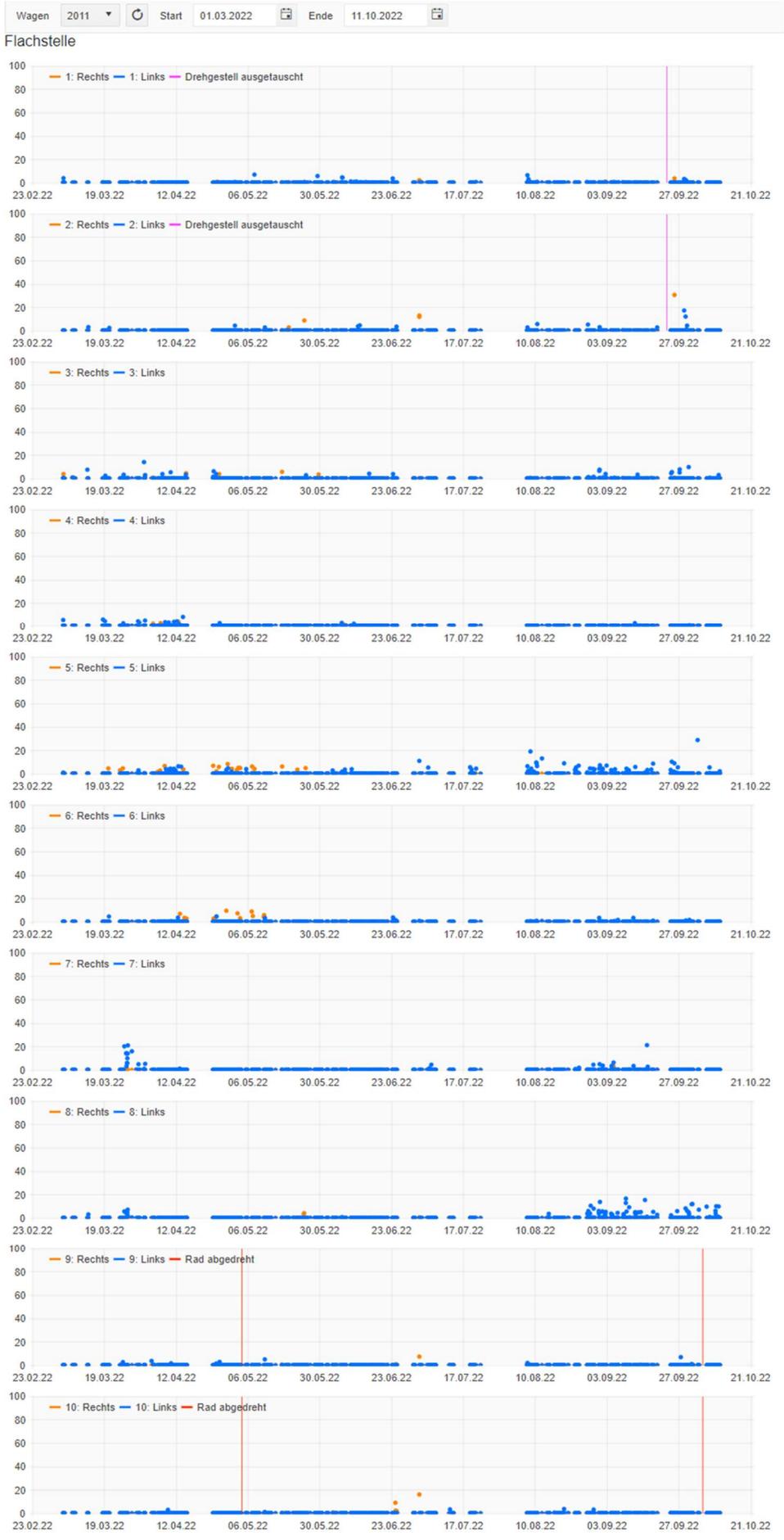
11.4. Radunrundheiten der Räder

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

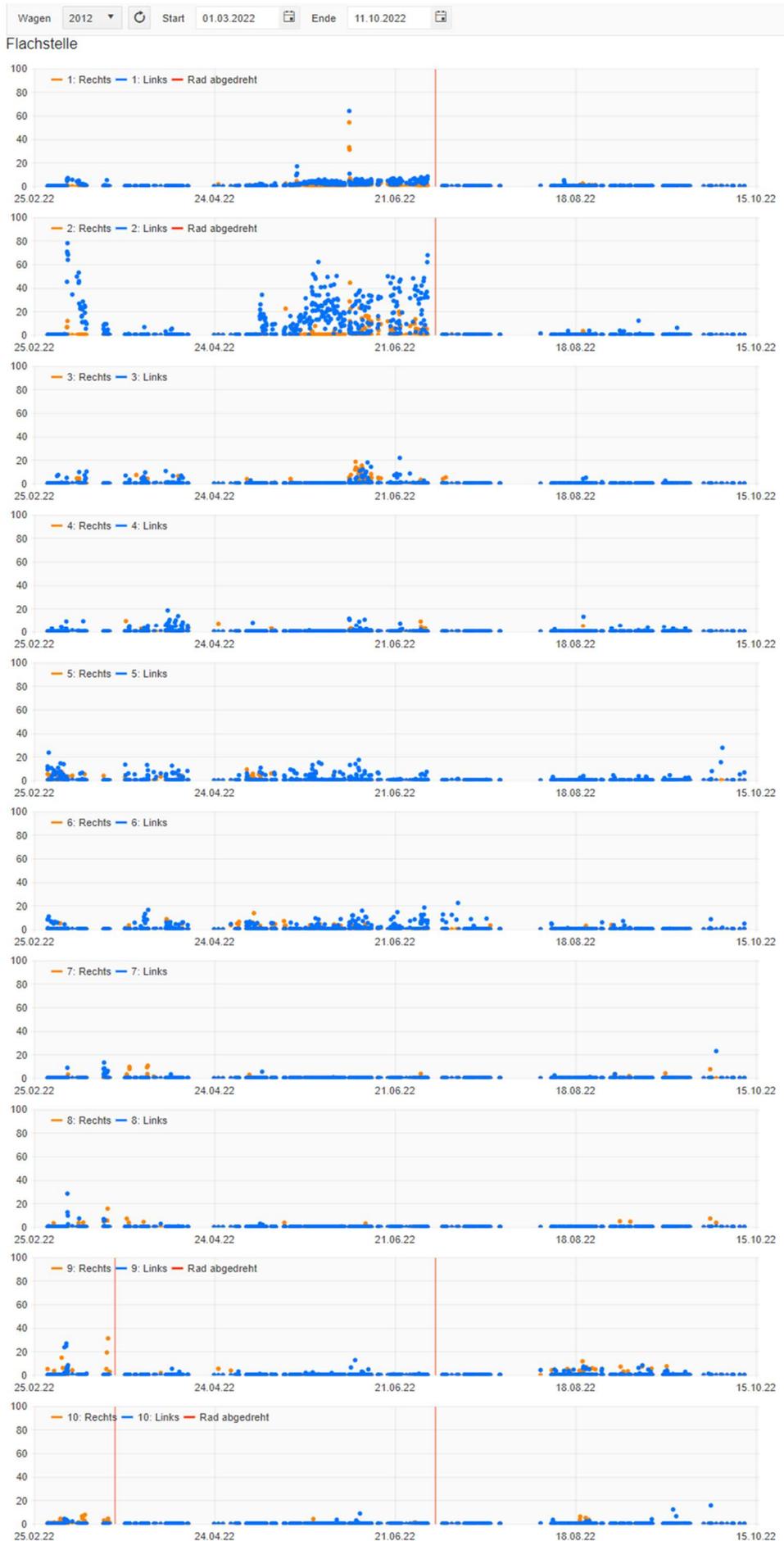
 <p>Komet</p>	<table border="1"> <tr> <td>Bauartbezeichnung:</td> <td>ABDeh 4/10</td> <td>ABDeh 4/8</td> </tr> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2011–2014</td> <td>2021–2028</td> </tr> <tr> <td>Anzahl:</td> <td>4</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Baujahre:</td> <td colspan="2">2007–2008, 2014</td> </tr> <tr>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

11.4.1. 2011 – 2014: Komet 3-teilig

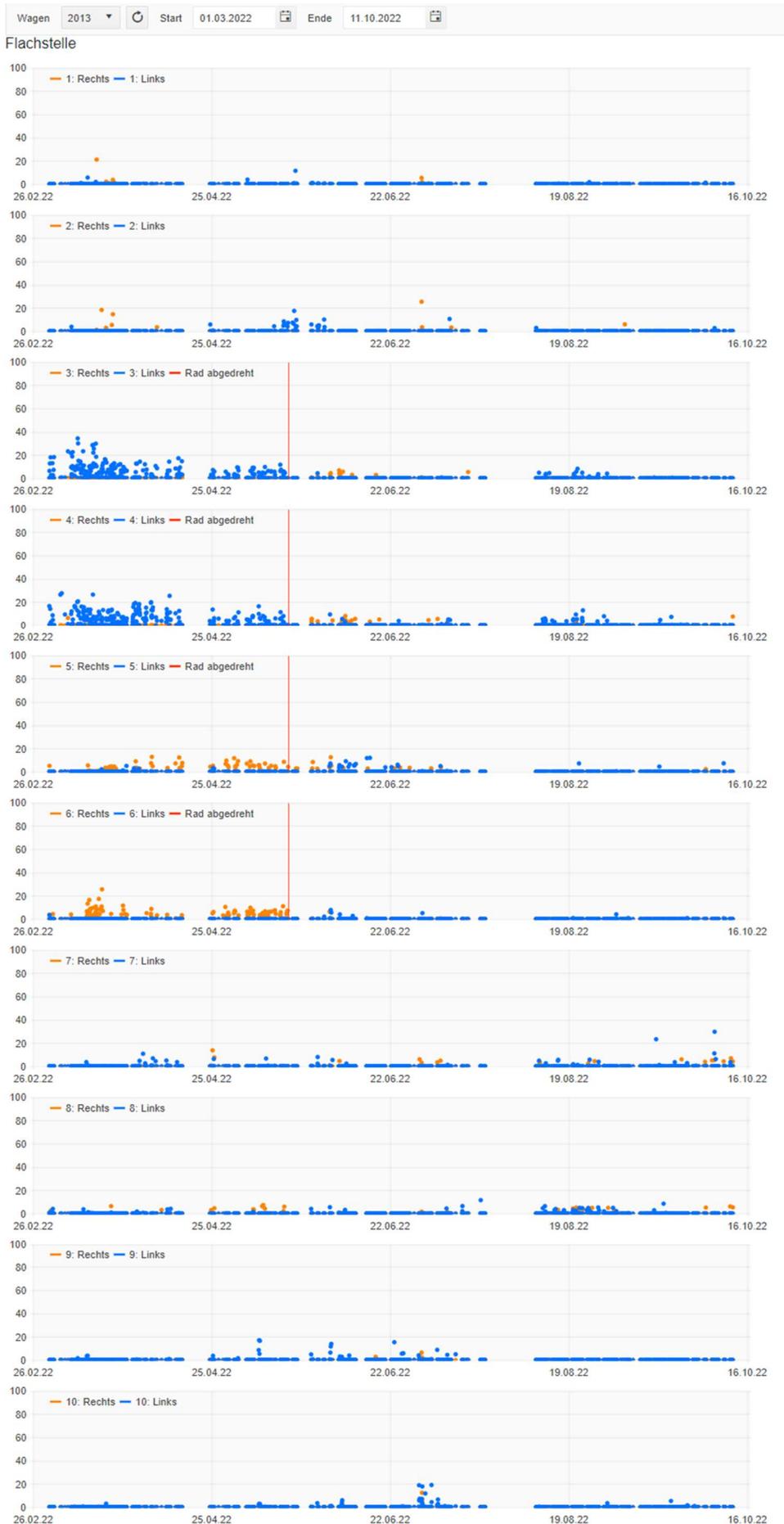




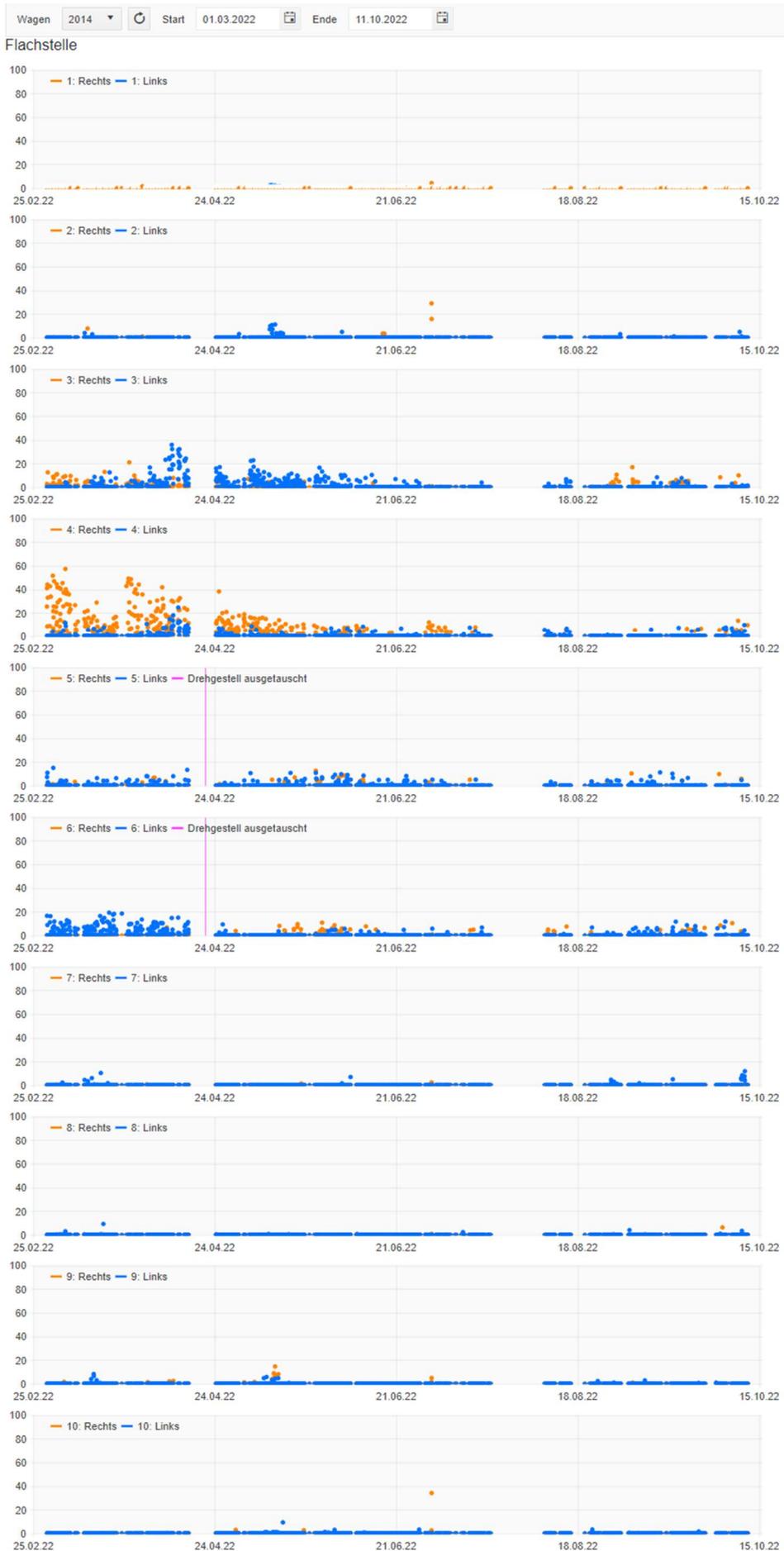








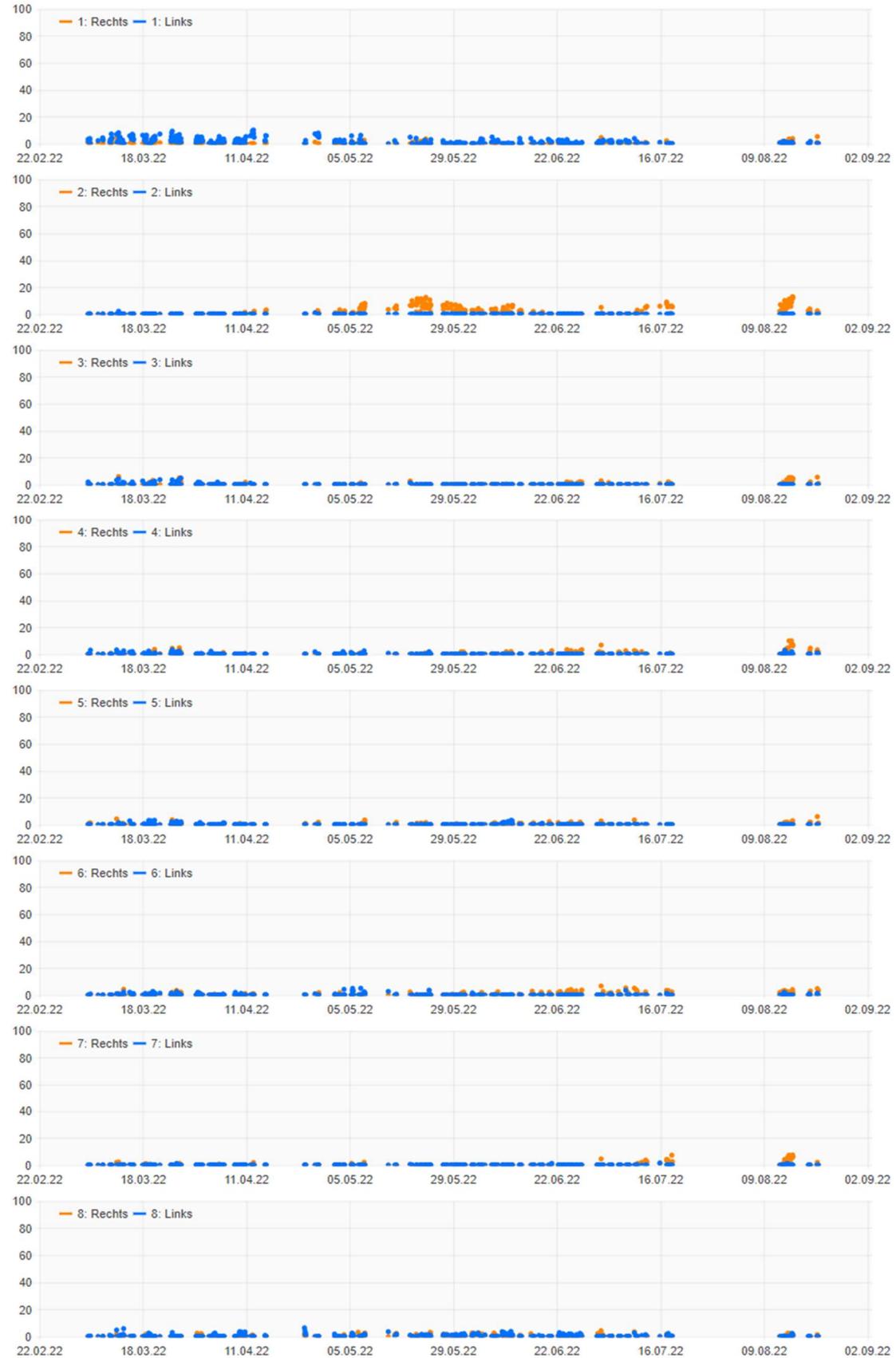


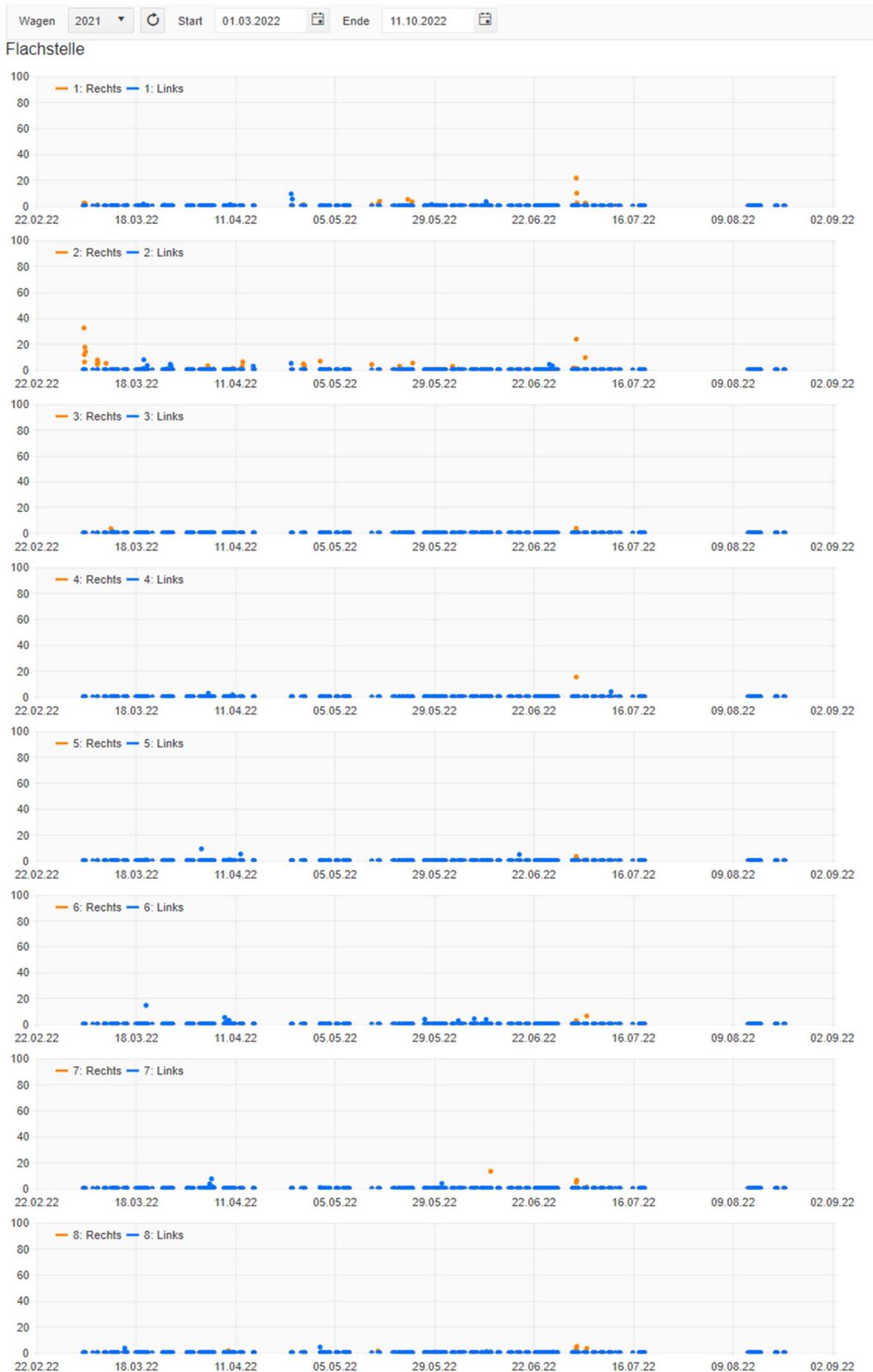


11.4.2. 2021 – 2028:Komet 3-teilig

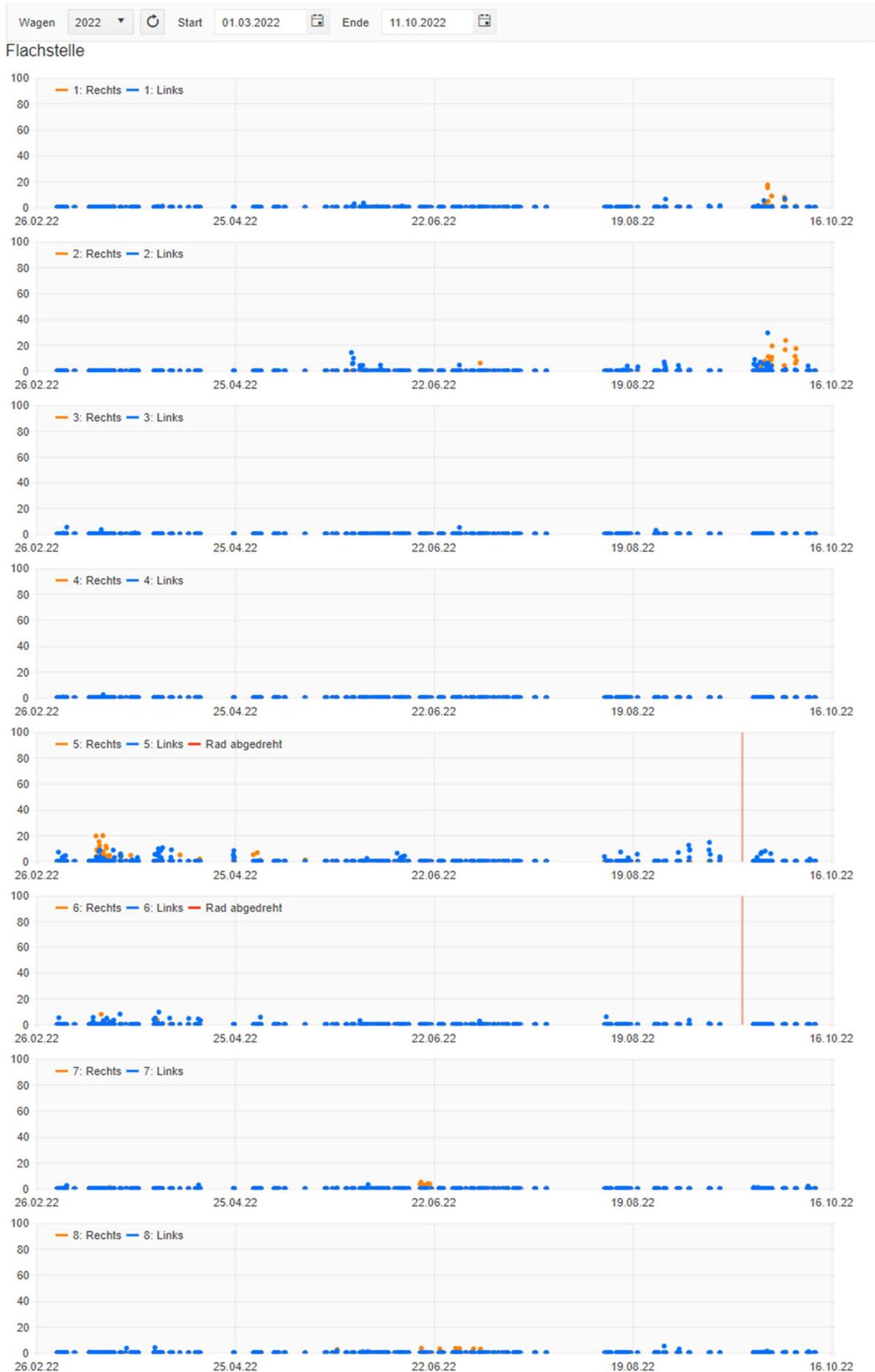
Wagen 2021 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

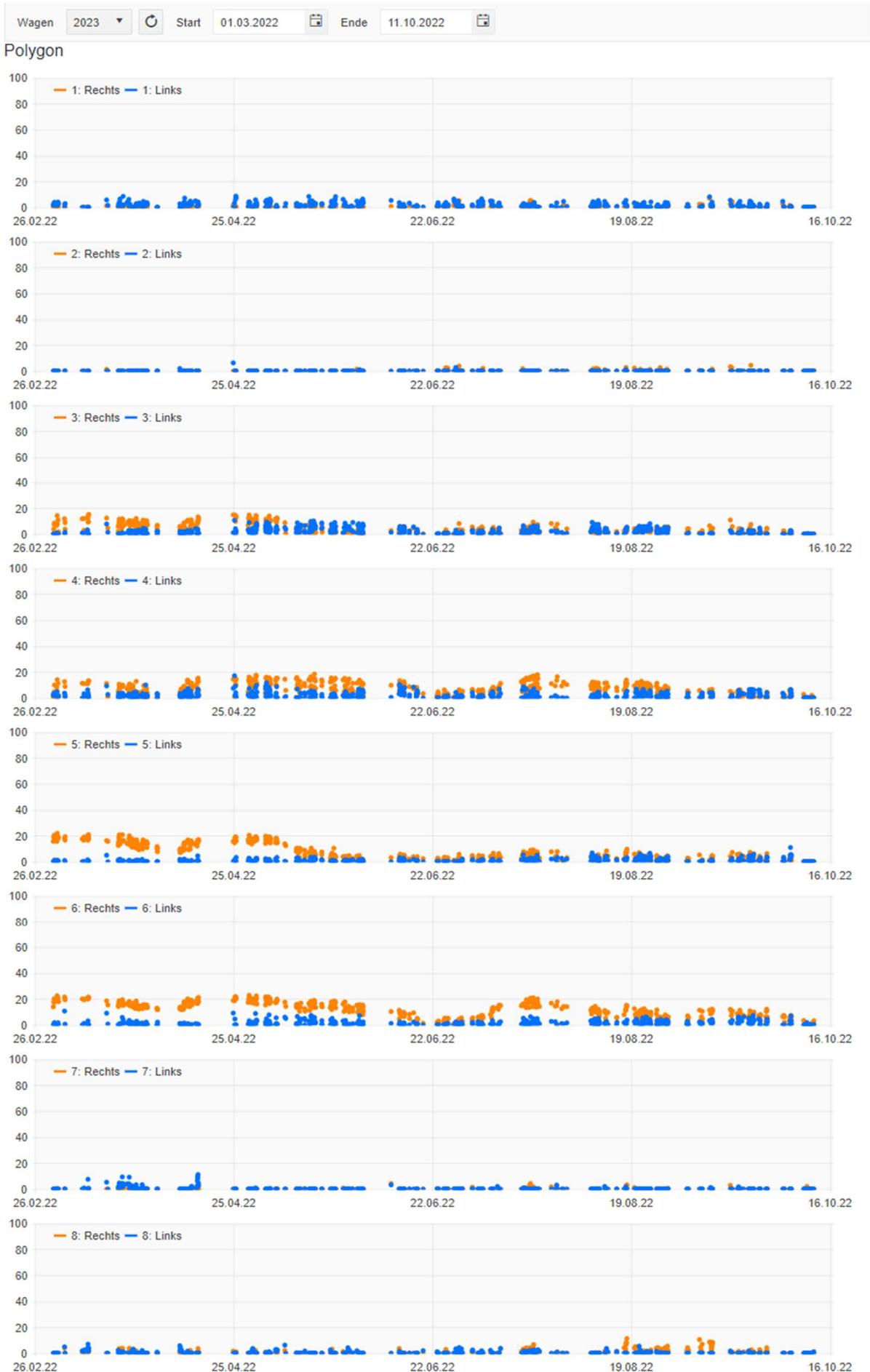
Polygon

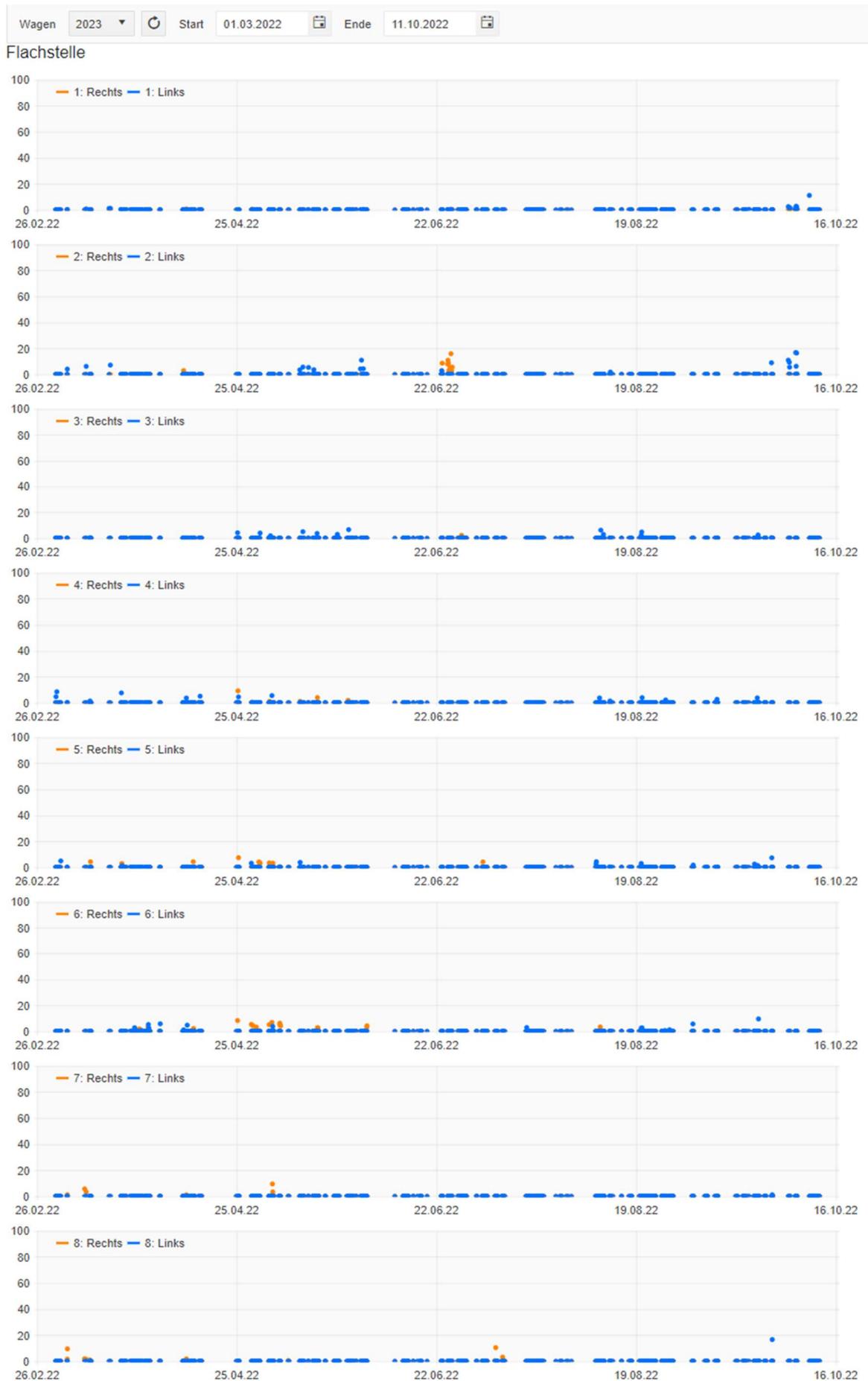












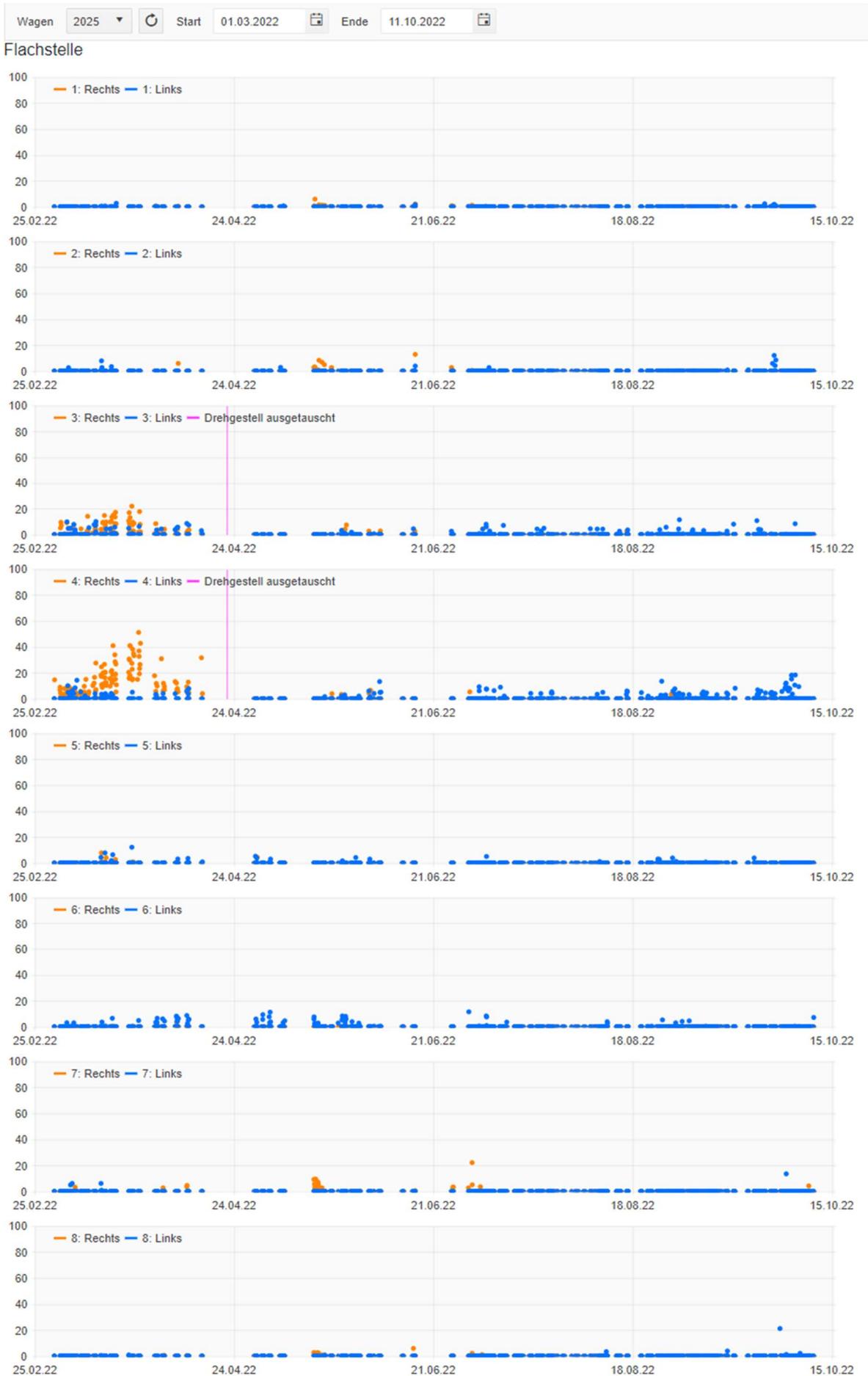


Wagen 2024 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Flachstelle





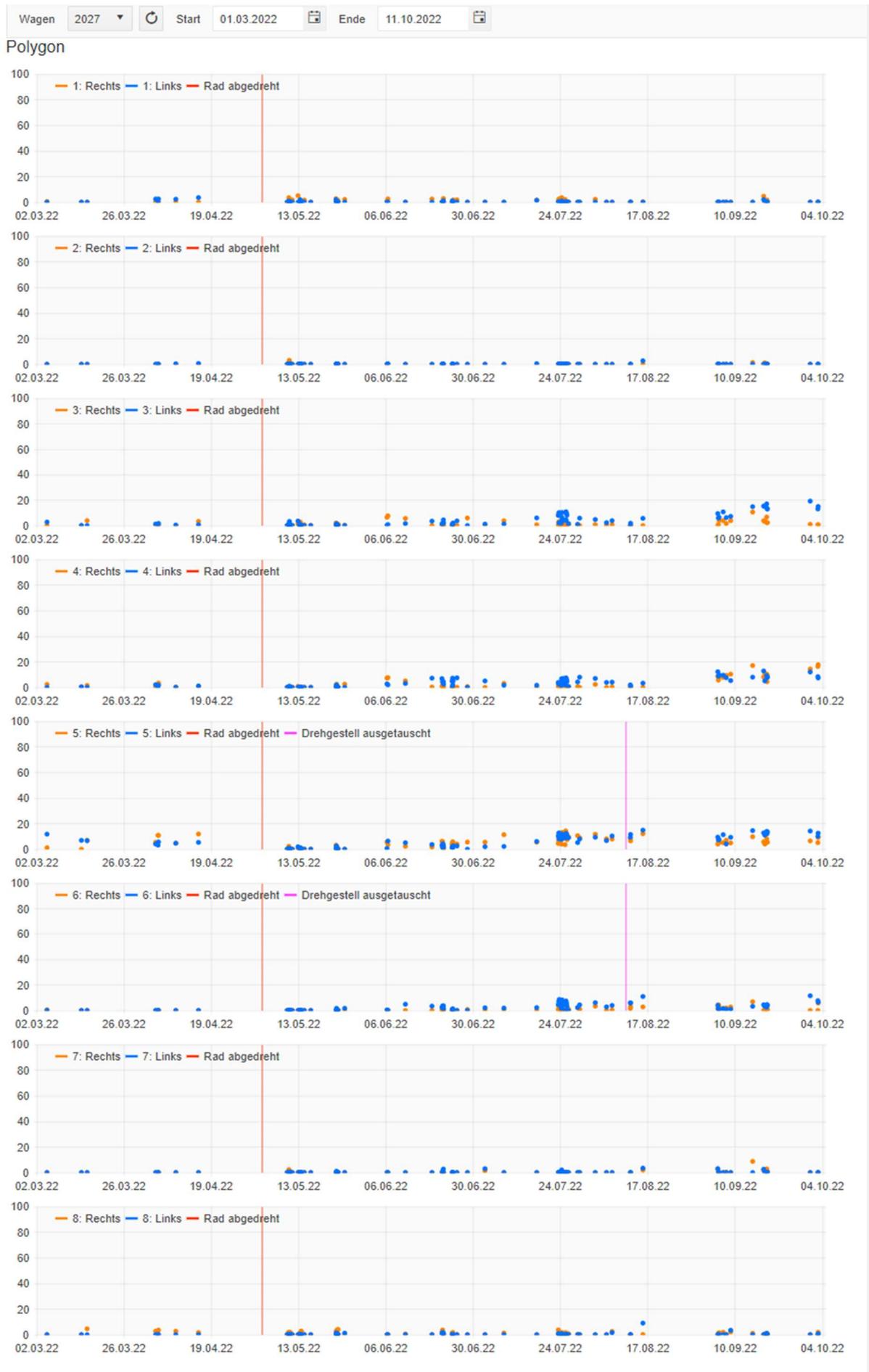




Wagen 2026 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Flachstelle

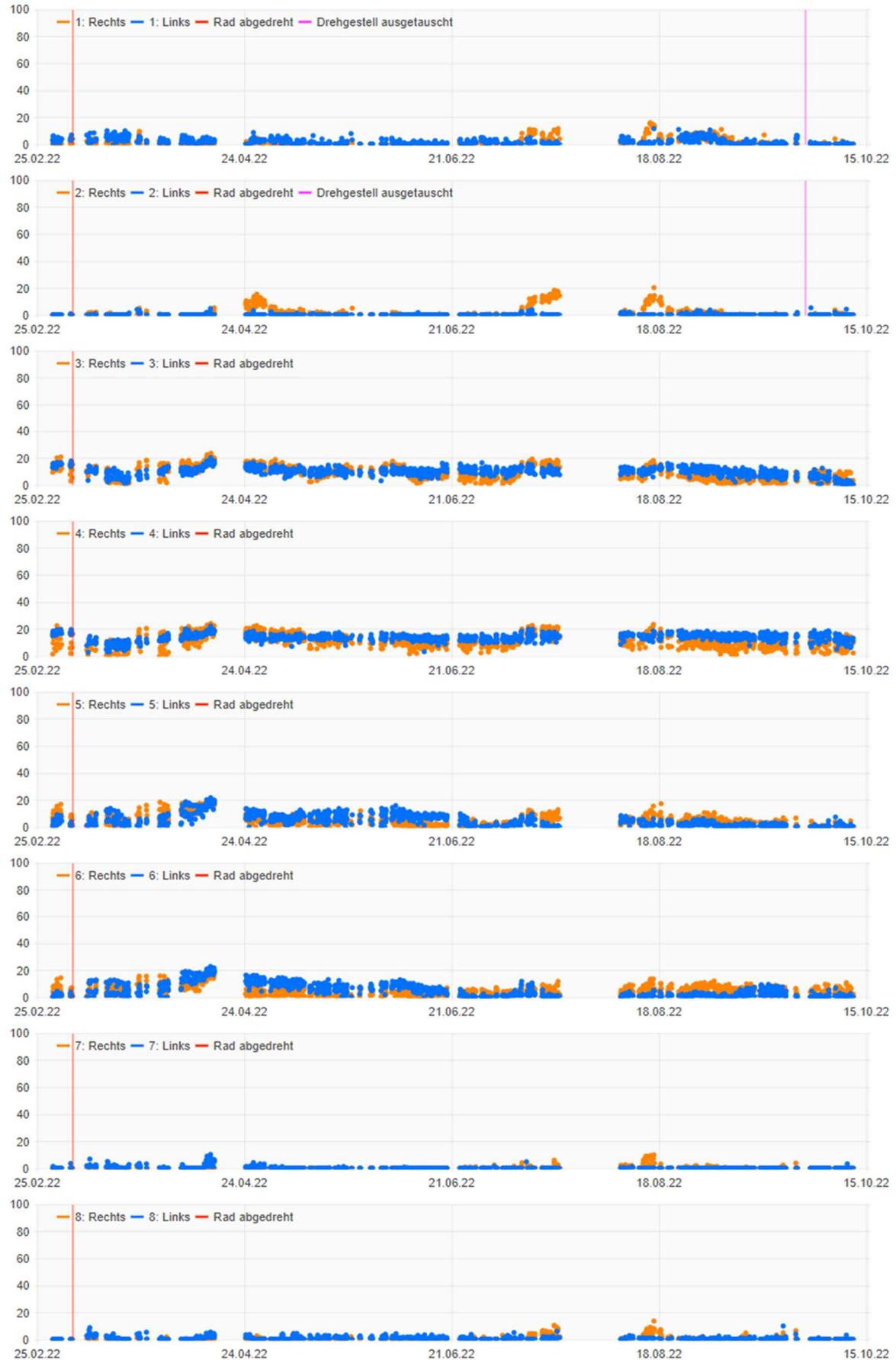






Wagen 2028 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Polygon



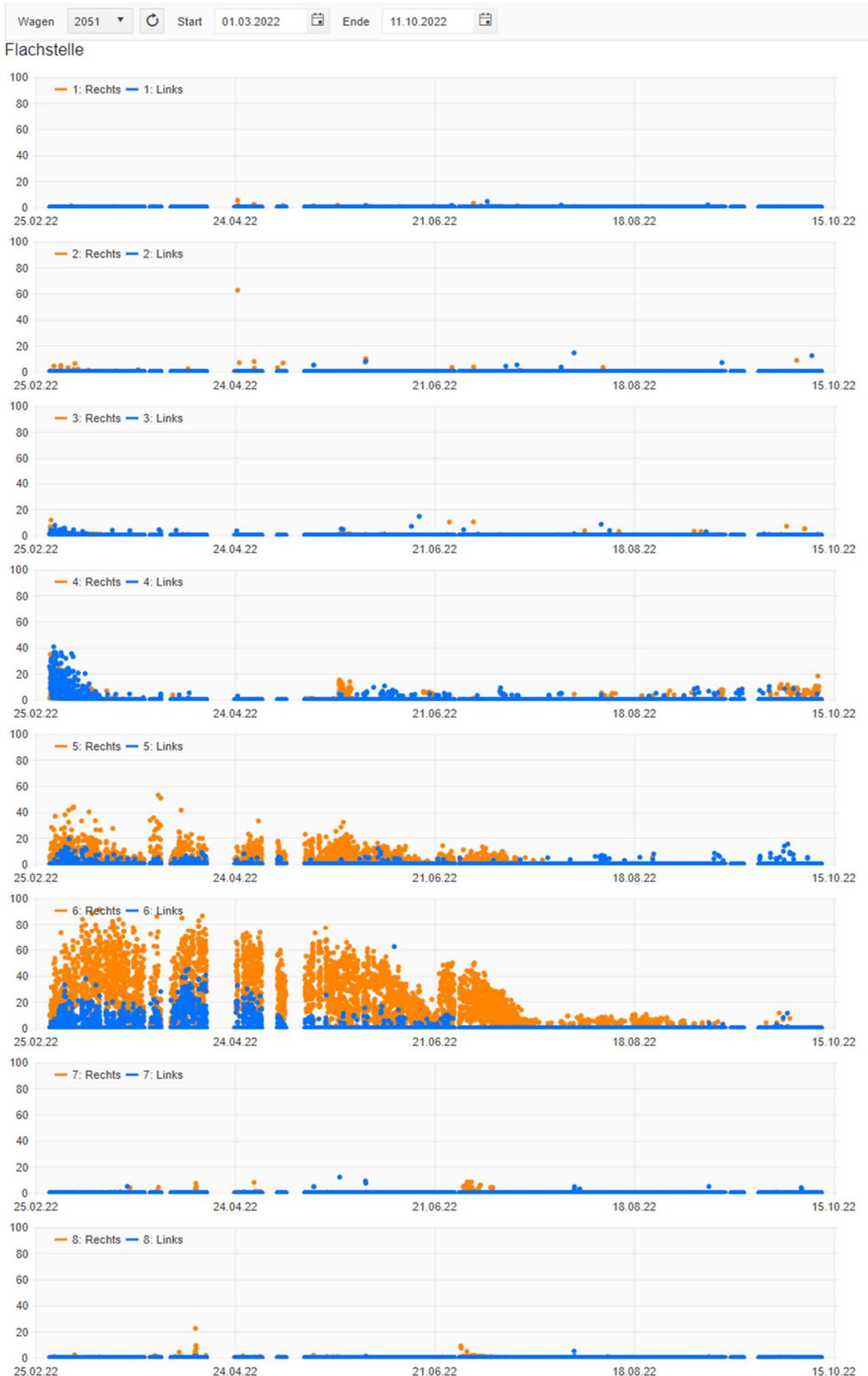


11.4.3. 2051 – 2054: Shuttle

Wagen 2051 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Polygon

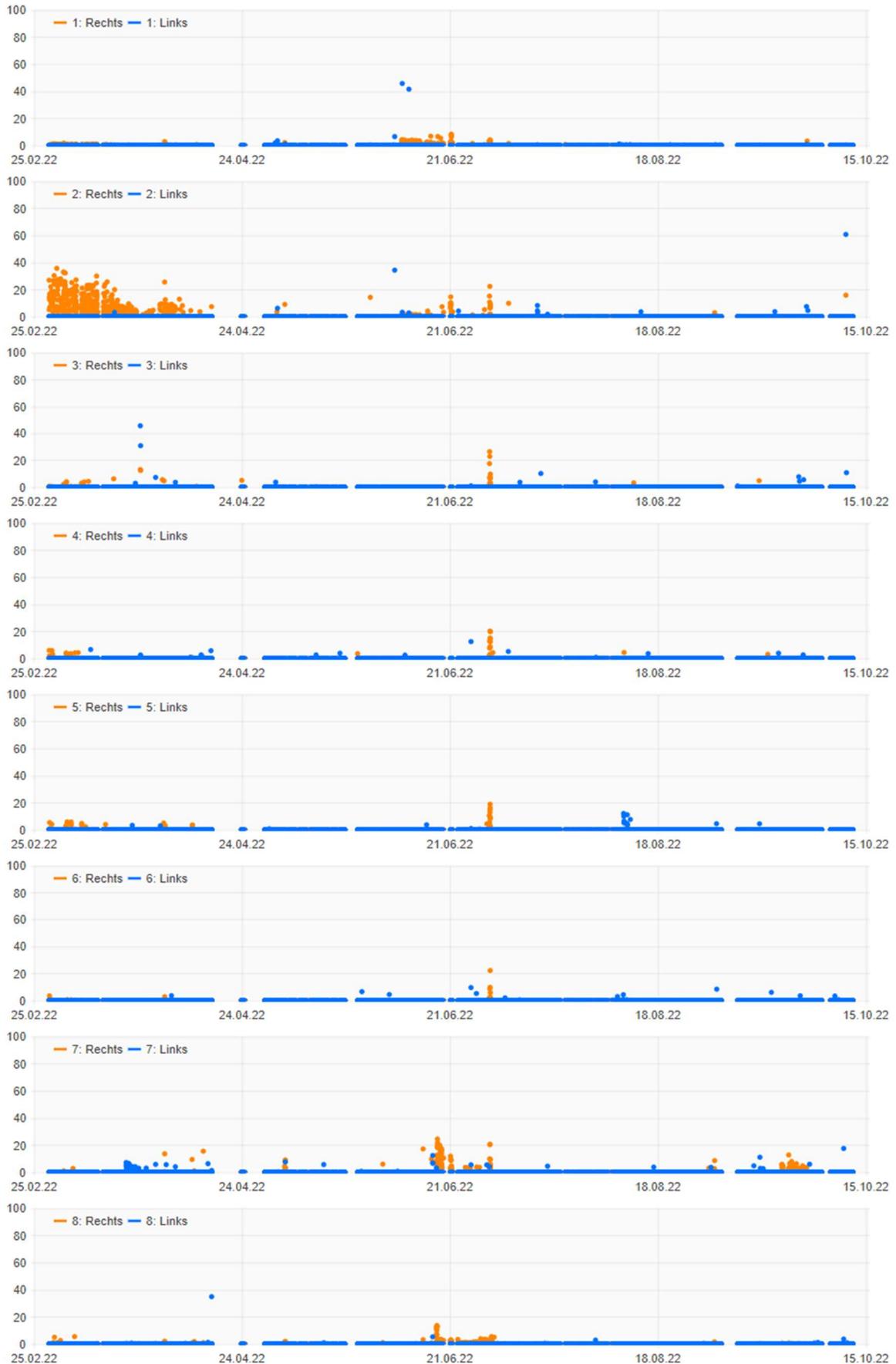


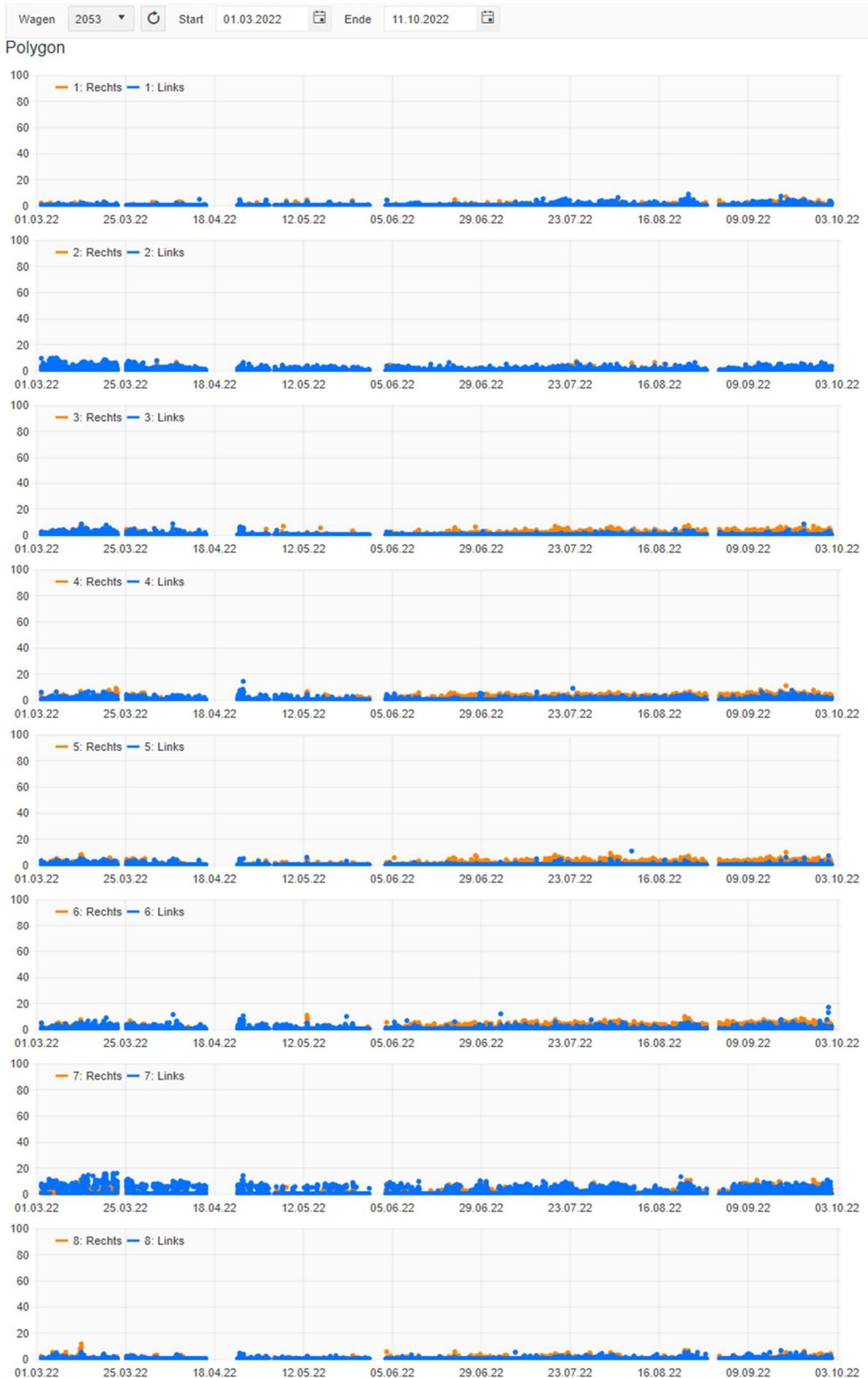


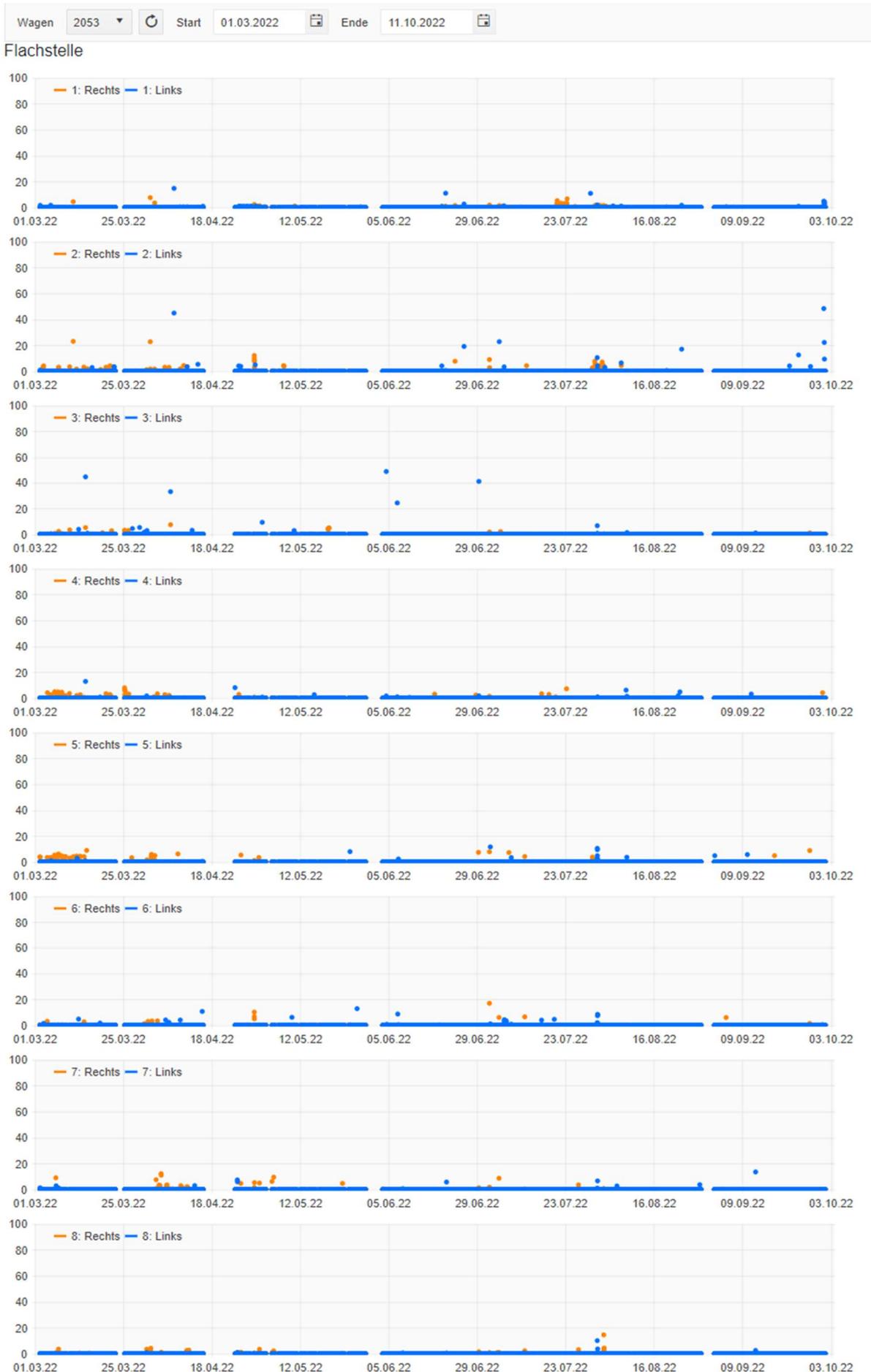


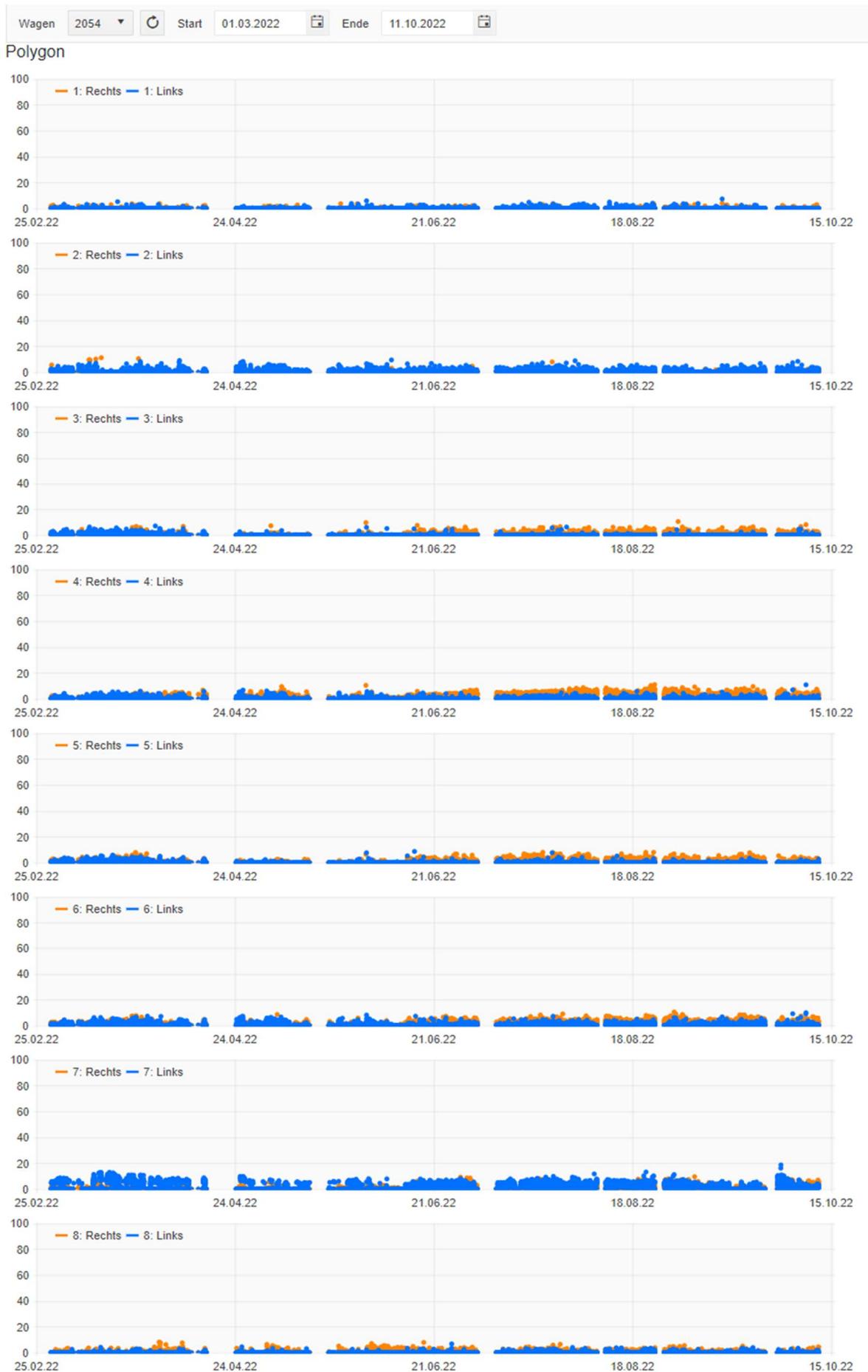
Wagen 2052 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

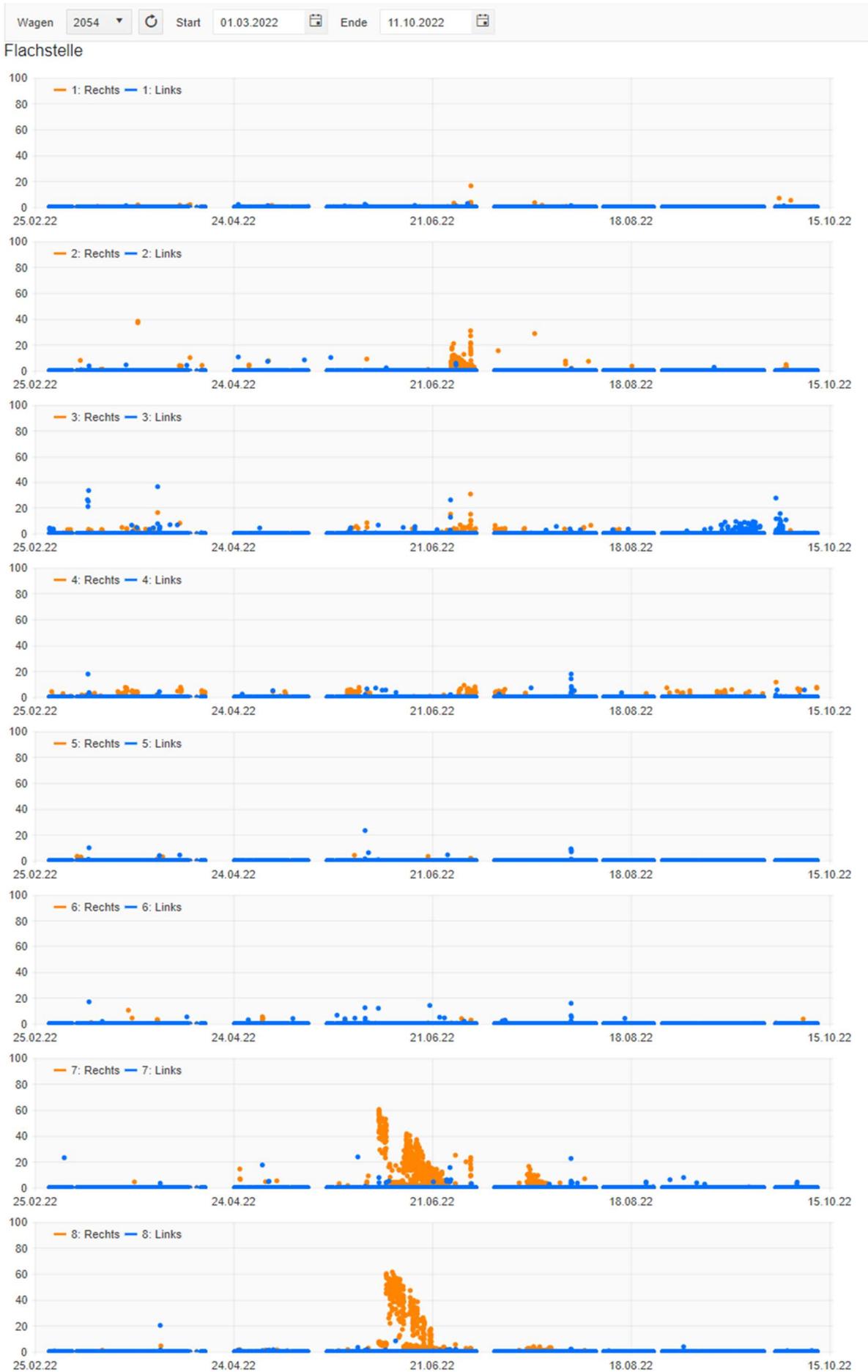
Flachstelle







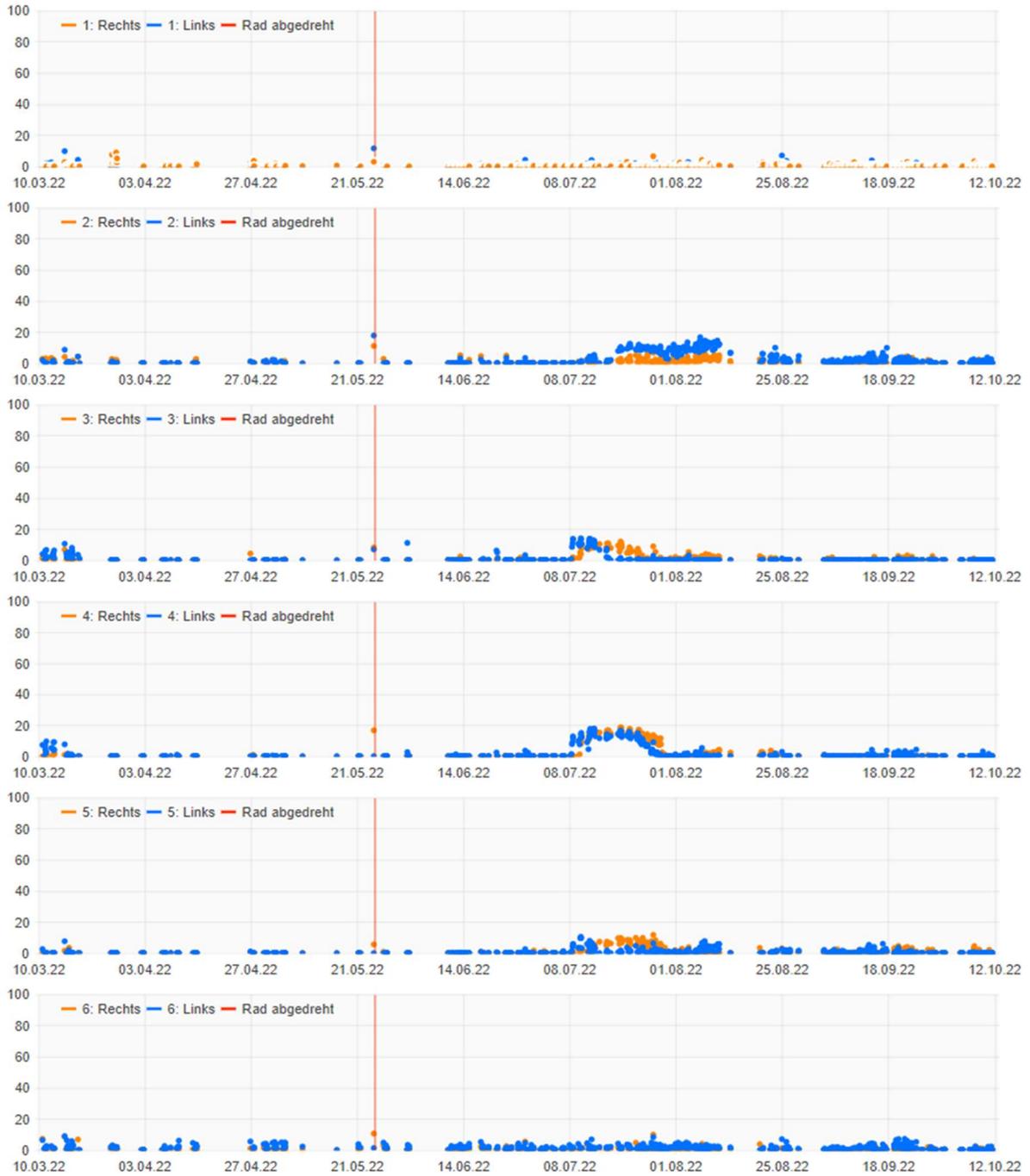




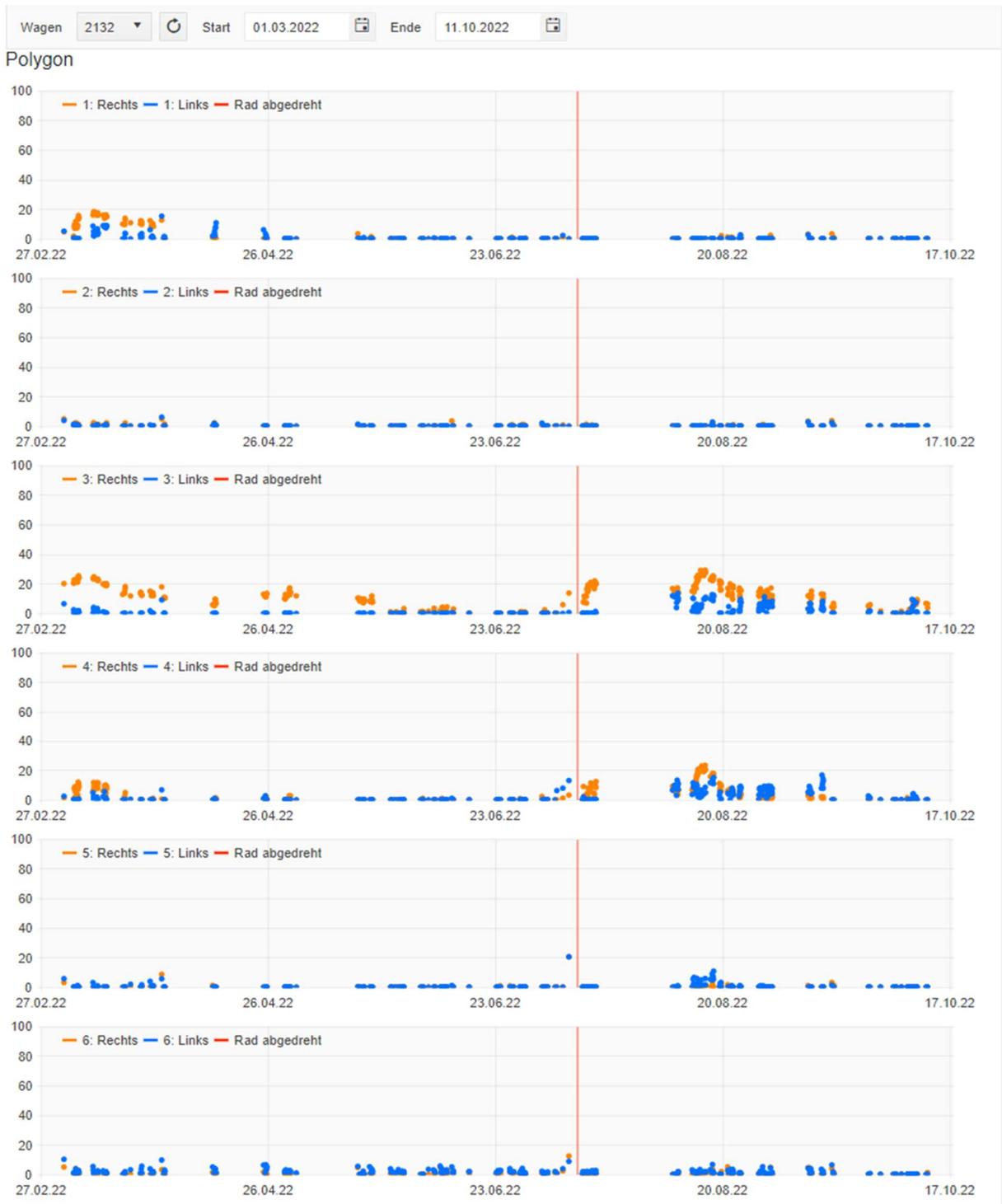
11.4.4. 2131 – 2134: GSW

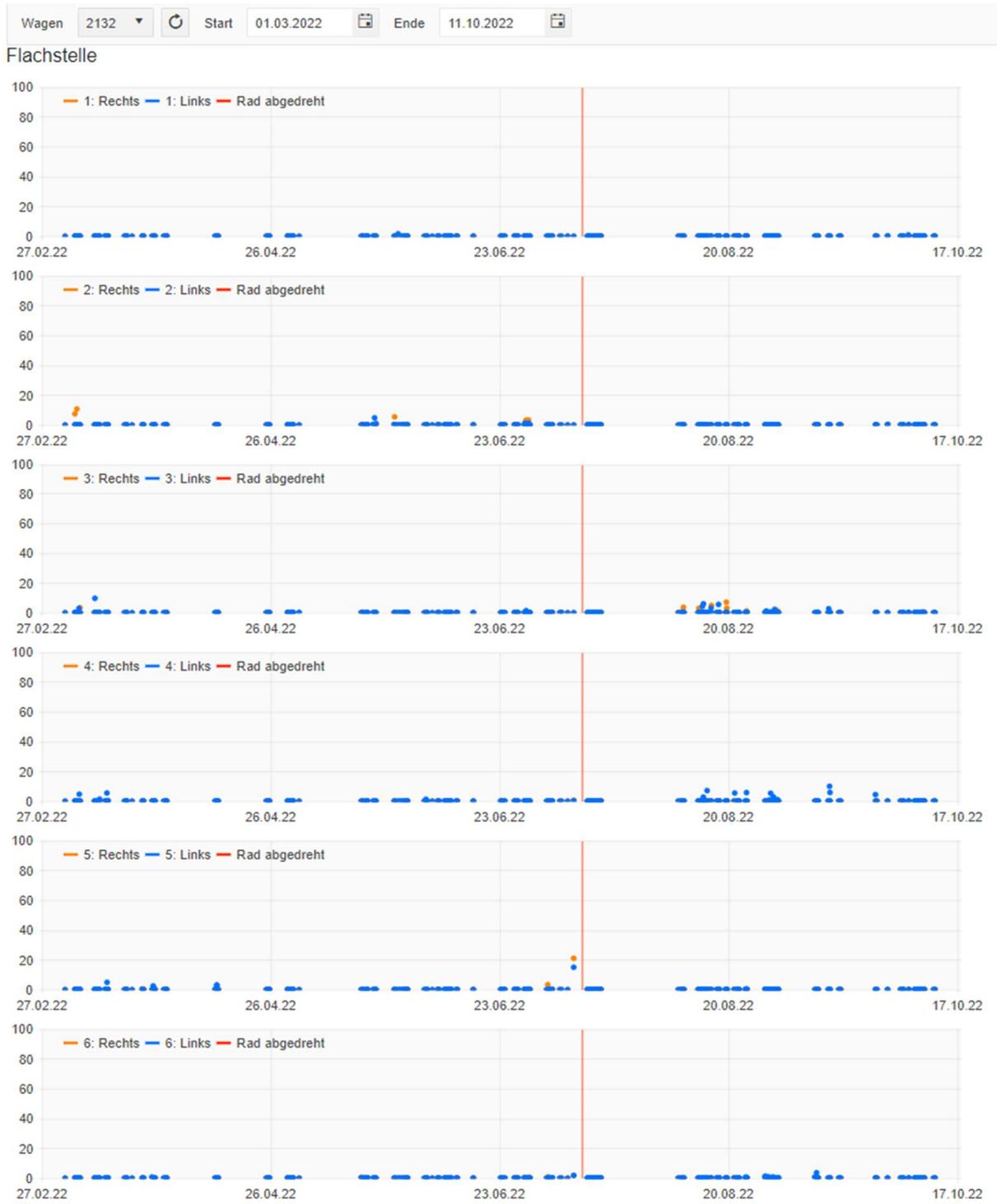
Wagen 2131 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

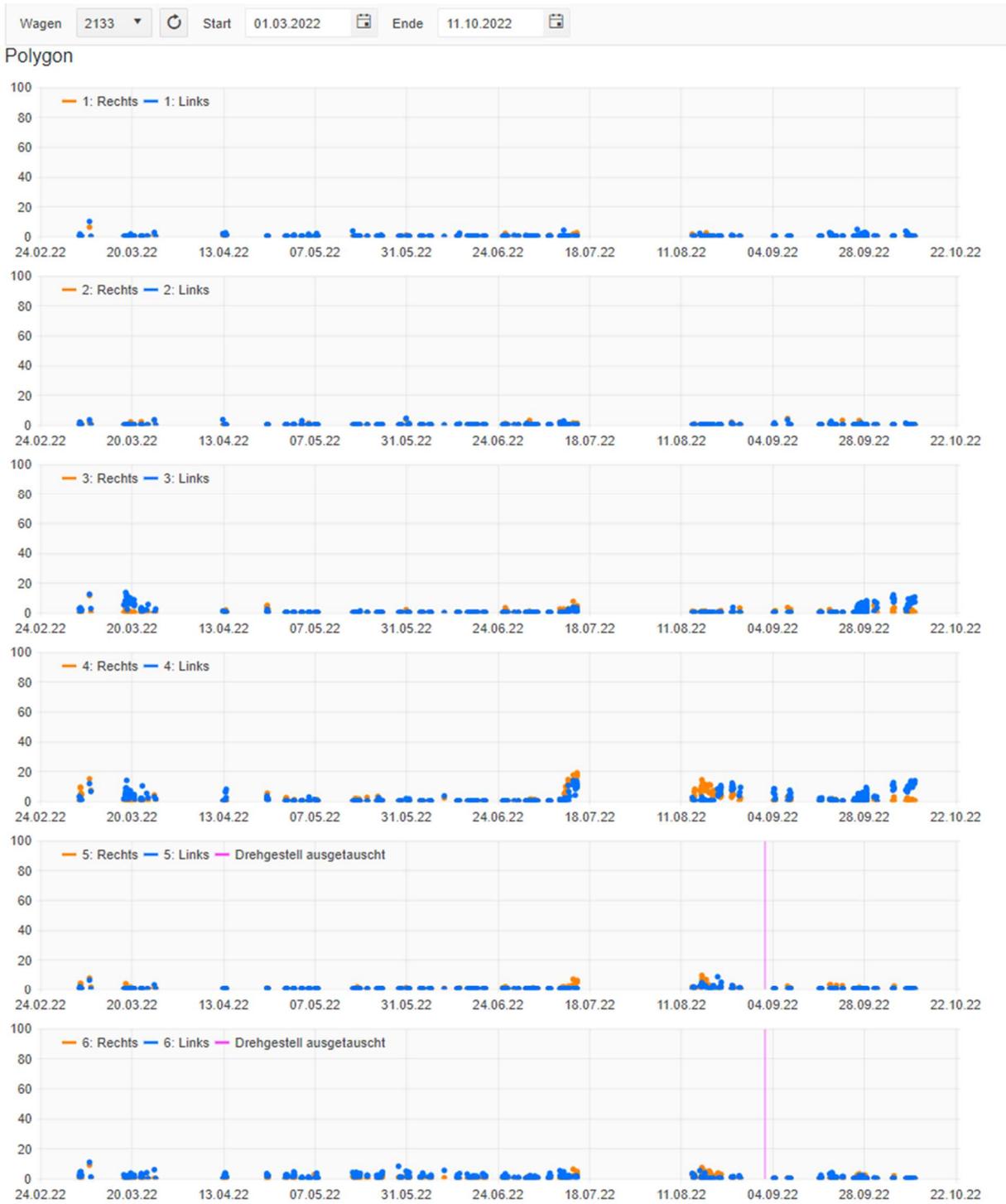
Polygon

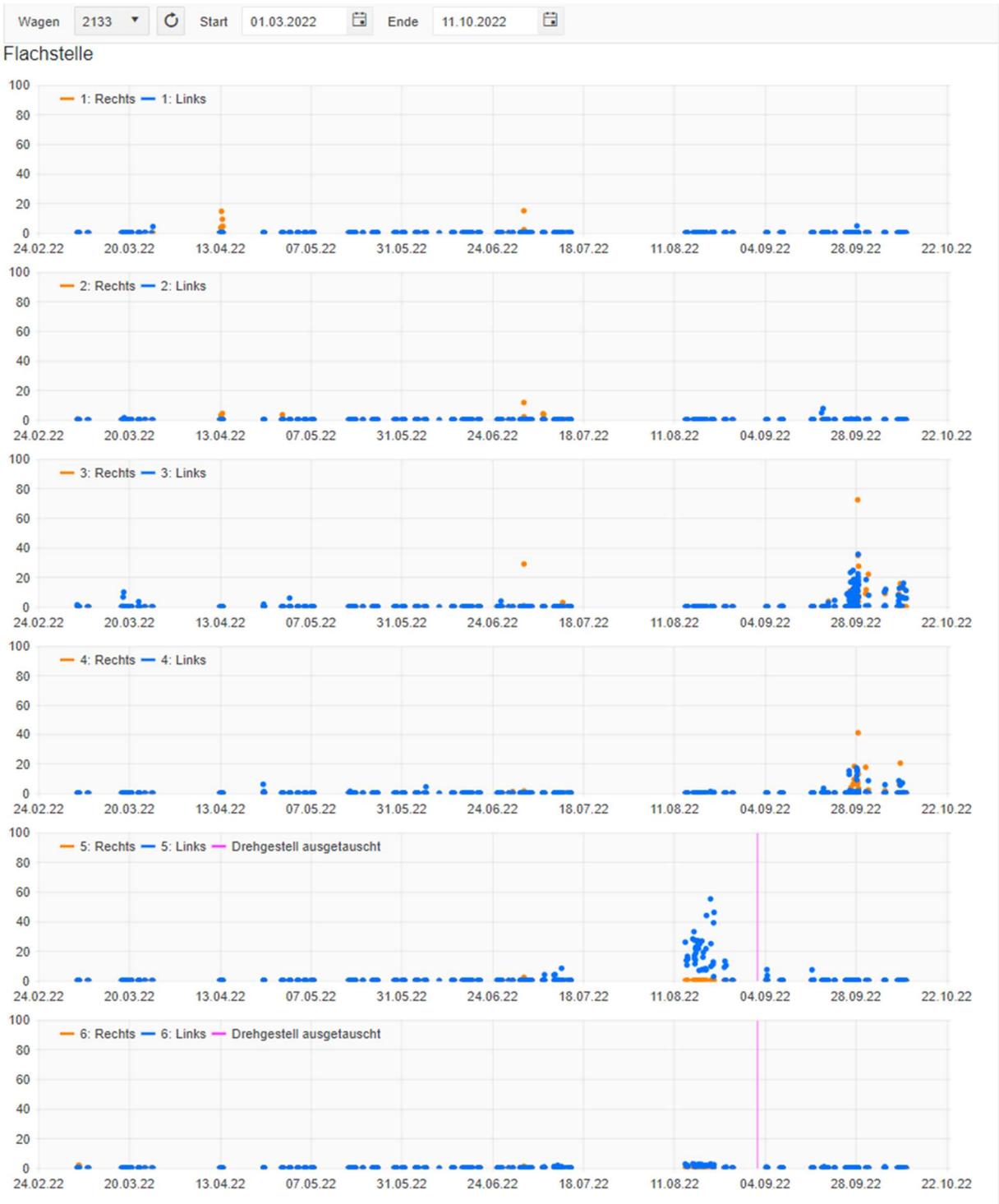












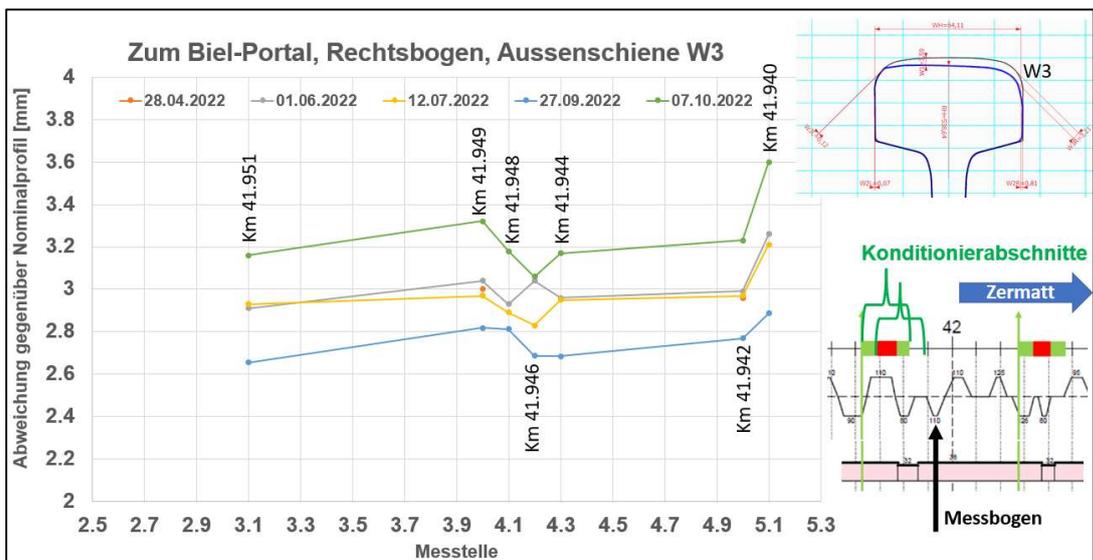
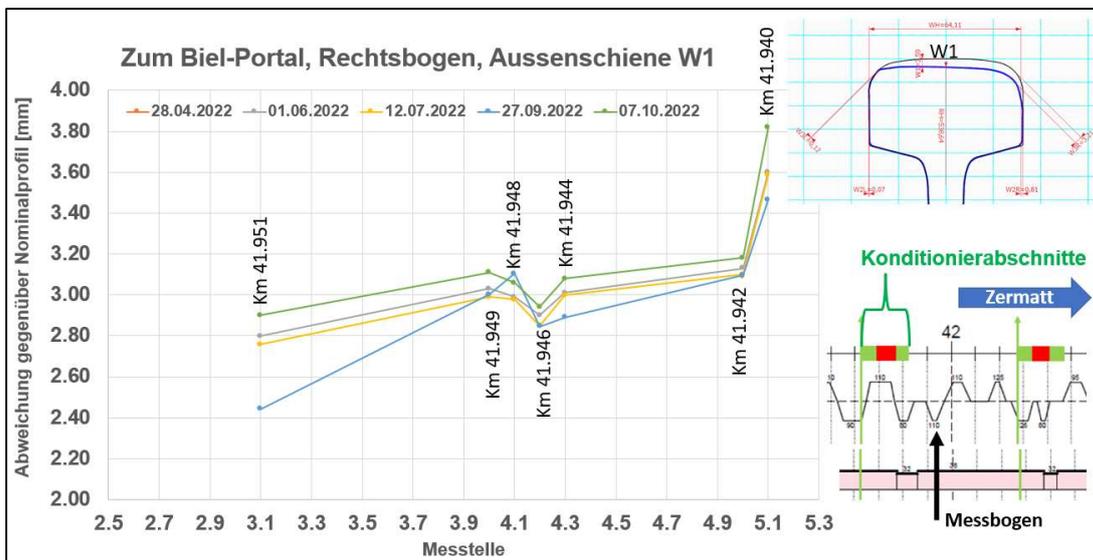
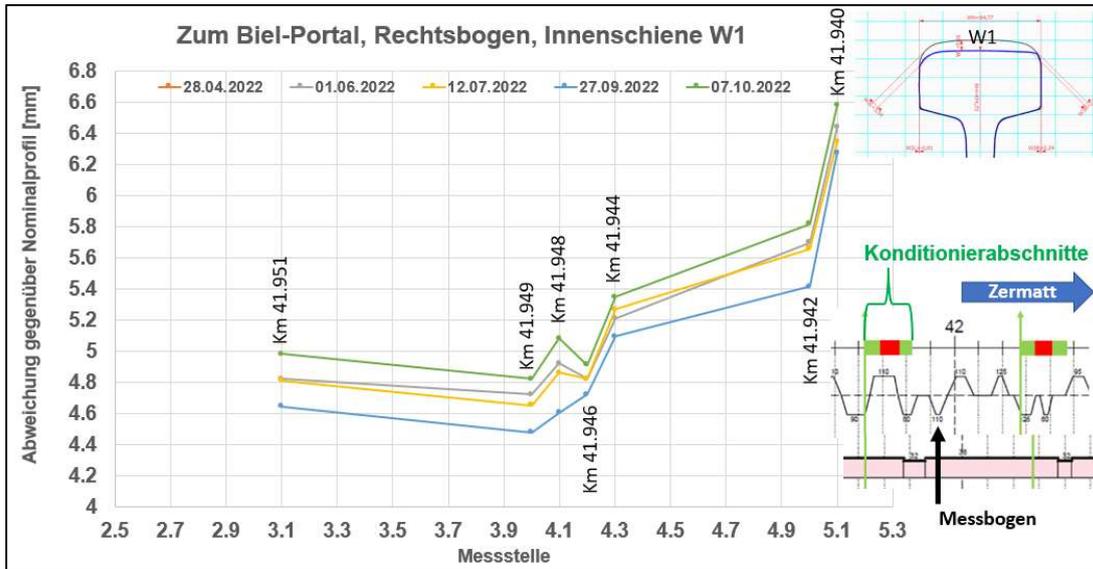
Wagen 2134 Start 01.03.2022 Ende 11.10.2022

Polygon

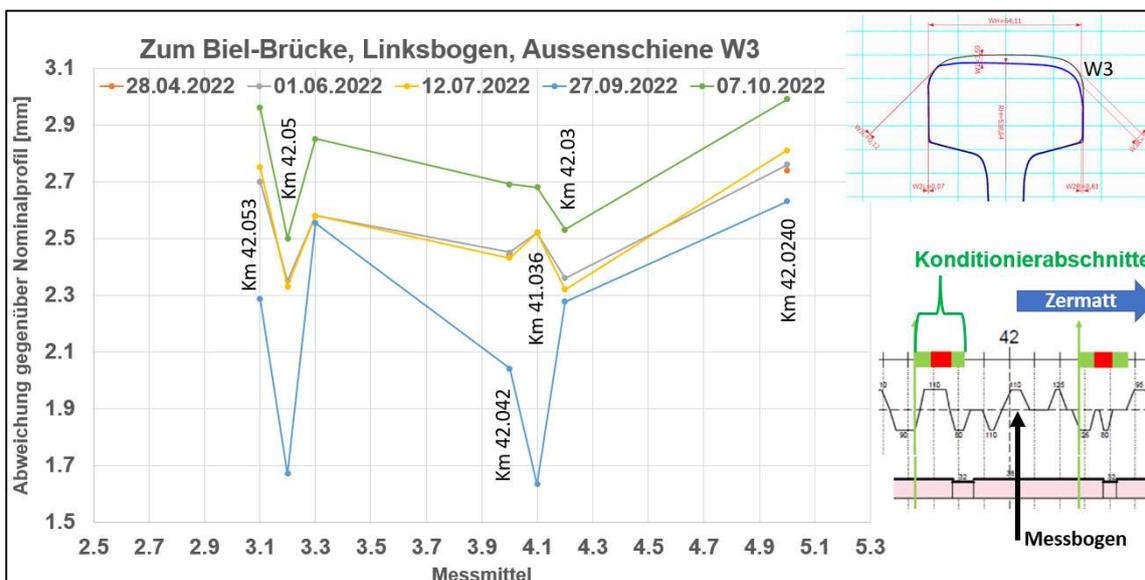
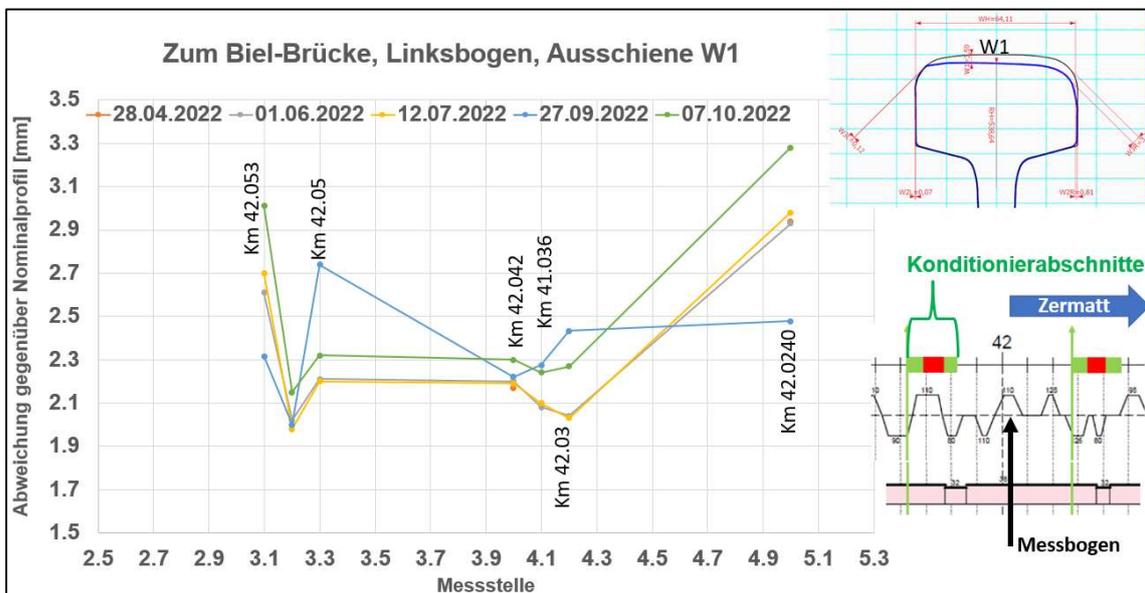
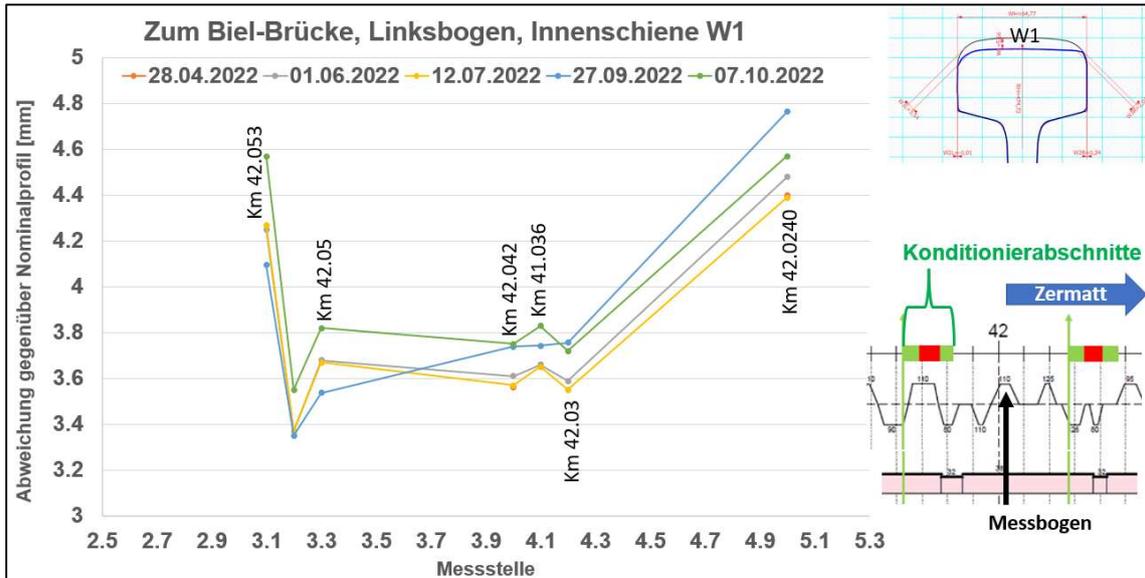


11.5. Schienenverschleiss

11.5.1. Schienenverschleiss Zum Biel Portal



11.5.2. Schienenverschleiss zum Biel Brücke



11.5.3. Schienenverschleiss Lüegelwang

