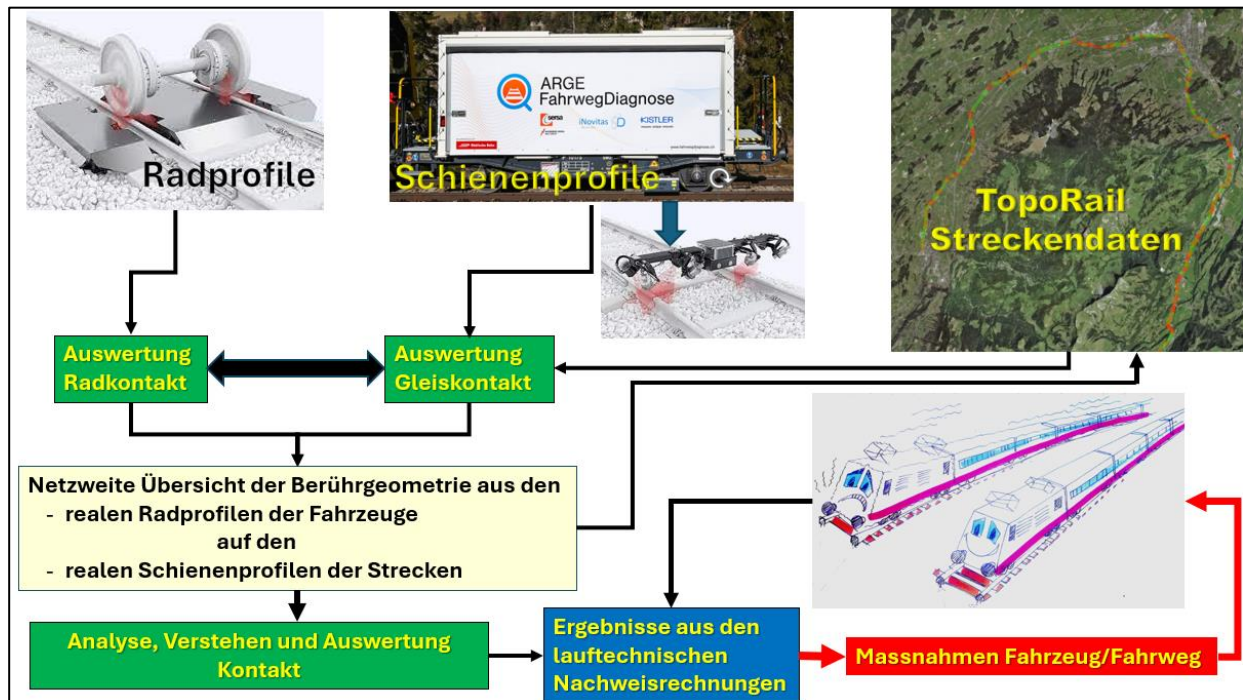


## LO 2.3.1

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur  
 Projekt: 3 Grundlagen Rad / Schiene  
 Modul: 2 Berührgeometrische Interaktion | BAV-Ziel-2024-P3-05/06/07

# Automatisierte Auswertung grosser Datenmengen an Rad- und Schienenprofilen für Beurteilung/Optimierung inkl. Gleiskonizitätskarte & Datenbank Radkonizitäten



|                     |                                                    |                      |
|---------------------|----------------------------------------------------|----------------------|
| ID:                 | RAILplusSF-00050                                   | LO in BAV Detailziel |
| Datum / Status:     | 20.12.2024 / Freigegeben                           | Seitenanzahl 71      |
| Öffentlichkeitsgrad | Öffentlich                                         |                      |
| Verfasser:          | Roland Müller/ Gleislauftechnik Müller             |                      |
| Geprüft:            | Michael Stalder / CE cideon engineering Schweiz AG |                      |
| Freigegeben:        | Friedrich-Christian Walther / Zentralbahn          |                      |

Zitierweise: Müller Roland, RAILplus / Gleislauftechnik Müller: *Automatisierte Auswertung grosser Datenmengen an Rad- und Schienenprofilen für Beurteilung/Optimierung inkl. Gleiskonizitätskarte & Datenbank Radkonizitäten*. Technischer Bericht, RAILplusSF-00050, 20.12.2024

## Änderungsverzeichnis

| Version | Datum      | Verantwortlich              | Beschreibung                              |
|---------|------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| 0.1     | 20.11.2024 | Roland Müller               | Erster Entwurf                            |
| 0.2     | 21.11.2024 | Friedrich-Christian Walther | Bereinigter Entwurf                       |
| 0.3     | 22.11.2024 | Michael Stalder             | Geprüft                                   |
| 0.9     | 25.11.2024 | Friedrich-Christian Walther | Bereinigung und Vorlage im TB             |
| 1.0     | 20.12.2024 | Friedrich-Christian Walther | Korrektur Management Summary und Freigabe |
|         |            |                             |                                           |

## Freigabe durch die Systemführerschaft

| Version | Datum      | Verantwortlich  |
|---------|------------|-----------------|
| 1.0     | 05.12.2024 | Technical Board |

## Management Summary

### Ausgangslage

Die Überwachung der Rad- und Schienenprofile sowie ihrer geometrischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg im Betriebseinsatz ist derzeit Bestandteil der präventiven Instandhaltung bei den Meterspurbahnen. Dabei werden aus Sicht der Interaktion vor allem geometrische Grössen betrachtet. Diese sind zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die sichere und vor allem auch wirtschaftliche Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg aus dem Kontakt von Rad und Schiene.

Auch die Normalspur, obschon europäisch interoperabel, stand hinsichtlich der Interaktion seit Beginn der 1970-iger Jahre auf dem gleichen Stand wie die Meterspur vor wenigen Jahren. Erhöhte Fahrgeschwindigkeiten in Verbindung mit hohem Verschleiss an Rad und Schiene waren für diese Bahnen damals die Herausforderungen zur Erforschung der Interaktion Rad-Schiene. In Europa waren zudem vor allem Deutschland, aber auch Frankreich, England und Italien im Hinblick auf den sich anbahnenden Hochgeschwindigkeitsverkehr gefordert, sich intensiv, zum Teil mit Hilfe von staatlichen Fördermitteln, mit der Erforschung des Rad-/Schienenkontakts zu befassen.

Die Systemführerschaft Interaktion hat aufgrund von erheblichen Verschleissproblemen bei Rad-Schiene den Nachholbedarf zu Verbesserungen im Kontakt Rad-Schiene bei der Meterspur erkannt. Um in der Verschleissproblematik und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit bei bestehendem Fahrzeugpark Verbesserungen zu erzielen, sind daher kurz- und vermutlich auch mittelfristig vor allem Massnahmen im Kontakt Rad-Schiene erfolversprechend. Als Stellschrauben stehen dazu der Reibwert Rad-Schiene, die Stahlqualitäten der Kontaktpartner, die Fahrbahnsteifigkeit und die Berührverhältnisse im Kontakt Rad-Schiene zur Verfügung.

Schon die ersten Auswertungen der Kontaktgeometrie mit einem der drei dafür geeigneten Auswerteprogrammen haben gezeigt, dass sich bei den meisten der derzeit verwendeten Nominal-Radprofilen vor allem in den Bögen sehr ungünstige Kontaktverhältnisse zwischen Rad und Schiene, ohne damalige genauere Kenntnisse bei den Schienen, einstellen müssen. Auswertungen von derartigen Radprofilen aus dem Betriebseinsatz zeigen in der Folge auch, dass sich diese mit zunehmender Laufleistung verändern. Diese Veränderungen entwickeln sich zu einem günstigeren Verhalten in den engen Bögen. Sie müssen jedoch mit Hinblick auf deren Verhalten im oberen Geschwindigkeitsbereich beobachtet werden und erfordern je nach Ergebnis gezielte Anpassungen an den Schienenprofilen in betroffenen Teilen des Streckennetzes.

Die Meterspurbahnen standen daher bezüglich des Wissens in dieser Thematik zu Beginn der Systemführerschaft dort, wo sich die oben erwähnten Normalspurbahnen in den 1970-iger Jahren befanden. Einen Rückstand von mehr als 50 Jahren beim professionellen Umgang mit den Profildaten von Rad und Schiene innerhalb von 3 Jahren einzuholen, stellte eine grosse Herausforderung dar.

Die Nominaldaten von Rad- und Schienenprofilen sowie deren geometrischen Wechselwirkungen und deren Grenzzustände aus den Gesichtspunkten der Sicherheit waren allgemein bekannt und schon seit längerer Zeit geregelt. Bei den suboptimalen Auswirkungen aus den berührungsgeometrischen und kontaktmechanischen Wechselwirkungen in den verschiedenen Trassierungsbereichen (Bögen oder gerade Strecken) bestanden hingegen grosse Wissenslücken und die zur Beurteilung notwendigen Werkzeuge waren nicht vorhanden und standen deshalb noch nicht zur Verfügung. Dies betraf sowohl die nominellen Daten als auch die Daten aus dem Betriebseinsatz. Die für die Instandhaltung erfassten Radprofildaten waren dafür zwar ausreichend, jedoch liess deren Erfassungsqualität ihre Verwendung im Bereich der Wechselwirkung nicht zu.

Bei der Fahrbahn standen vor dem Einsatz des Diagnosefahrzeugs nur vereinzelt auswertbare Daten für die Beurteilung der Wechselwirkung zur Verfügung. Derzeit werden bei den Meterspurbahnen Anstrengungen zur automatischen Erfassung und Auswertung der Rad- und Schienendaten mittels Messfahrzeugen und Überfahrmessanlagen unternommen. Die automatische und qualitativ ausreichende Erfassung der Rad-Profildaten und deren radscharfe und leistungsbezogene Zuordnung zu den Fahrzeugen ist derzeit im Aufbau begriffen. Für die Fahrbahn ist dies, zumindest auf einem bei allen Meterspurbahnen einsetzbaren Diagnosefahrzeug, umgesetzt. Dieses wertet die Daten für die Bedürfnisse der Fahrbahninstandhaltung automatisch aus.

Der automatischen Auswertung sind jedoch Grenzen gesetzt, da bei der Bewertung der Messdaten aufgrund des systemischen Verhaltens des Eisenbahnsystems oft auf den Fachmann und damit die

menschliche Intelligenz zurückgegriffen werden muss. Zudem ist bei der automatisierten Datenerfassung die Qualität weiter zu verbessern, um die Wirtschaftlichkeit weiter steigern zu können. Die Datenerfassungsqualität genügt heute, um die Sicherheit zu gewährleisten und die notwendigen Instandhaltungen durchzuführen, jedoch nicht um die Muster zu weiteren Optimierungen in der Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg zu erkennen.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können, sofern diese abgesichert sind, in die Automatismen zurückfliessen. Daher sind zusätzliche Auswertetools auf KI-Basis erforderlich, mit deren Hilfe die Beherrschung der Wechselwirkung Rad-Schiene unterstützt wird.

## Hauptergebnisse und Fazit

Die in diesem Bericht vorgestellten Werkzeuge unterstützen die Fachspezialisten bei ihrer Tätigkeit an der Schnittstelle Rad-Schiene. Für diese sind Gleiskonizitäten oder Radkonizitäten bzw. Radialstellungsindizes und die diese beeinflussenden Parameter keine Fremdwörter. Mit den auf die Meterspur angepassten und für diese weiter entwickelten Programmen *Gleis-Kontakt*, *Rad-Kontakt* und *Kontakt Meterspur CH* stehen ihnen für die vielfältigen Aufgabenstellungen an dieser Schnittstelle leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung. Diese bilden auch die Voraussetzungen, um mit fortschreitendem Erfahrungsrückfluss die Automatisierung bei der Datenauswertung und Interpretation voranzutreiben. So können zum Beispiel anhand der fortschreitenden Veränderungen anhand von Konizitätskarten und der Karten für den Radialstellungsindex und der daraus resultierenden Einflussgrössen am gesamten Streckennetz frühzeitig gezielte Massnahmen am Fahrweg geplant werden. Damit werden von Seiten des Fahrwegs

- die Fahrzeugstabilität sichergestellt und die Fahrsicherheit gewährleistet,
- die Voraussetzungen für den trassierungsabhängig möglichen Radialstellungsindex geschaffen.

Das gleiche gilt für die Fahrzeuge, wo anhand der Entwicklung der Radkonizitäten und deren Auswirkungen durch Paarung einer Auswahl derselben die Konizitätsentwicklung auf dem gesamten Streckennetz auf einen Blick eingesehen werden kann. An der Interaktionsschnittstelle Rad-Schiene können daraus Massnahmen entweder am Fahrweg oder an den Fahrzeugen vereinbart werden. Oft stellen sich auch Fragen nach den Ursachen für Veränderungen im Kontakt Rad-Schiene wie zum Beispiel bei erhöhtem Schienenverschleiss an der Fahrkante/Schienenflanke (Feststellung durch Diagnosefahrzeug und lokalisierte Darstellung auf der Landkarte) oder ein ungünstiges Fahrverhalten durch zu grosse Durchmesserunterschiede an den beiden Rädern desselben Radsatzes (Feststellung durch Überfahrmeßanlagen). Hier sind nur einige Beispiele, die durch viele weitere ergänzt werden könnten.

Für eine dem Streckennetz zugeordnete Systemübersicht einiger wichtiger Indikatoren der Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg wurde die Möglichkeit geschaffen, diese lokalisierbar auf der Landkarte in Erscheinung treten zu lassen. Für die Aspekte des Fahrwegs handelt es um sogenannte Gleiskonizitätskarten und Radialstellungsindexkarten basierend auf verschleissangepassten und bei der entsprechenden Bahn verwendeten nominellen Radprofilen. Für die Aspekte des Rollmaterials können die gleichen Karten jedoch mit auf dem Streckennetz abgebildeten wählbaren Radprofilen generiert werden. Basierend auf diesen Karten und den darauf festgestellten Besonderheiten lassen sich in den verschiedenen Programmsystem weitere vertiefte Analysen durchführen. Die genannten Karten in Verbindung mit deren Einflussgrössen erlauben zum Beispiel

- eine netzweite Übersicht zum Verhalten der verschiedenen für die Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg massgebenden Indikatoren und damit den Verantwortlichen für das Rad-Schienen-System die Beherrschung und Weiterentwicklung des Systems Rad-Schiene,
- die Identifikation von Streckenbereichen in denen die Indikatoren in Verbindung mit den bedingungsgemässen Radprofilen ein ungünstiges bzw. verschlechtertes Verhalten aufweisen,
- die Ursachen für dieses Verhalten zu ermitteln und daraus die erforderlichen Korrekturmassnahmen festzulegen oder
- die nicht auf das Gleis zurückzuführenden Korrekturmassnahmen an auffälligen Fahrzeugen einzugrenzen (zum Beispiel bei Instabilitäten).

## Empfehlungen

Um die Wirtschaftlichkeit und die Interaktion des Rad-Schienen-System bei den Meterspurbahnen zu verbessern, muss die Automatisierung bei der Datenerfassung sowie bei der Datenauswertung an den Rad- und Schienenprofilen so weit wie möglich und sinnvoll vorangetrieben werden. Dazu stehen heute geeignete Anlagen an Fahrzeugen (Diagnosefahrzeug und allenfalls Regelverkehr) und den Gleisen (Überfahrmessanlagen) sowie Auswertetools zur Verfügung, die durch Fachspezialisten betreut und mit zunehmendem Erfahrungsrückfluss zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Schnittstelle Rad-Schiene beitragen werden. Daraus ergeben sich die folgenden Empfehlungen für das weitere Vorgehen:

- **Kontaktprogramme:** Die drei Kontaktprogramme müssen durch das Kompetenzzentrum Rad-Schiene bedient werden können. Dies umfasst auch die Schnittstellen zu den Erfassungsprogrammen für die Rad- und Schienenprofile sowie zu den Streckendateien.
- Die Qualität, der mit den Überfahrmessanlagen bei grösseren Bahnen gemessenen Radprofile, muss sowohl den Anforderungen aus der Radsatzinstandhaltung als auch denjenigen aus der Wechselwirkung Rad-Schiene bzw. Radsatz/Gleis genügen.
- Ein einheitliches Radsatzdatenmanagement bei den Meterspurbahnen mit einem für alle Bahnen anwendbaren Tool optimiert die Prozesse bei der sicherheitsrelevanten Überwachung der Interaktion und bei der Planung der Instandhaltung. Die aus den Kontaktprogrammen resultierenden Erkenntnisse müssen in dieses Tool einfließen.
- Eine wichtige Grundlage für ein einheitliches Fahrwegdatenmanagement stellt das Diagnosefahrzeug der ARGE FahrwegDiagnose mit dem Messwagen Meterspur (Rhombert SERSA) zur Verfügung. Das Fahrzeug misst unter anderem die Gleisgeometrie und die Schienenprofilabnutzung und nutzt Messdatenbank IRISYS zur Speicherung, Visualisierung und Analyse von Daten und bietet Unterstützung für die Planung von Instandhaltung und Erneuerung. Die aus den Kontaktprogrammen resultierenden Erkenntnisse müssen in dieses Tool einfließen.

## Inhalt

|          |                                                                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung .....</b>                                                                                                            | <b>8</b>  |
| 1.1      | Berücksichtigung der Rad-/Schienenprofile für Instandhaltung und Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg .....                             | 8         |
| 1.2      | Streckencharakteristiken der RAILplus Meterspurbahnen .....                                                                        | 9         |
| 1.3      | Situation zu den Rad- und Schienenprofilen bei der Meterspur .....                                                                 | 10        |
| 1.3.1    | <i>Nominelle Radprofile in Anwendung bei verschiedenen Meterspurbahnen .....</i>                                                   | <i>10</i> |
| 1.3.2    | <i>Verhalten von Radprofilen auf realen Schienenprofilen einer realen Strecke.....</i>                                             | <i>11</i> |
| 1.3.3    | <i>Instrumentarien für die Beurteilung der Berührungsgeometrie Rad-Schiene bei der Meterspur .....</i>                             | <i>14</i> |
| <b>2</b> | <b>Streckendaten und Bogenverteilungen.....</b>                                                                                    | <b>16</b> |
| <b>3</b> | <b>Zielsetzungen bei der Verwendung der Kontaktprogramme.....</b>                                                                  | <b>18</b> |
| <b>4</b> | <b>Messdaten der Räder/Radsätze und Schienen/Gleise .....</b>                                                                      | <b>19</b> |
| 4.1      | Messdaten der Räder/Radsätze .....                                                                                                 | 19        |
| 4.2      | Messdaten Schienen/Gleise .....                                                                                                    | 19        |
| <b>5</b> | <b>Unterschiedliche Herangehensweisen bei berührgeometrischen Problemstellungen .....</b>                                          | <b>21</b> |
| <b>6</b> | <b>Kontaktprogramme .....</b>                                                                                                      | <b>25</b> |
| 6.1      | Rad-Kontakt Meterspur CH .....                                                                                                     | 25        |
| 6.1.1    | <i>Hauptfenster im Rad-Kontakt .....</i>                                                                                           | <i>25</i> |
| 6.1.2    | <i>Darstellung der Ergebnisse im Hauptfenster .....</i>                                                                            | <i>27</i> |
| 6.1.3    | <i>Erstellung von Protokollen.....</i>                                                                                             | <i>30</i> |
| 6.2      | Gleis-Kontakt Meterspur CH.....                                                                                                    | 33        |
| 6.2.1    | <i>Hauptfenster im Gleis-Kontakt.....</i>                                                                                          | <i>33</i> |
| 6.2.2    | <i>Darstellung der Gleis- und Schienenmerkmale über ganze Strecken .....</i>                                                       | <i>40</i> |
| 6.2.3    | <i>Darstellung der Gleis- und Schienenmerkmale über Streckenabschnitte, Bogenradienklassen oder gerade Streckenabschnitte.....</i> | <i>46</i> |
| 6.2.4    | <i>Erstellung von Protokollen.....</i>                                                                                             | <i>46</i> |
| 6.2.5    | <i>Darstellung der Parameter auf Landkarte .....</i>                                                                               | <i>48</i> |
| 6.3      | Kontakt Meterspur CH.....                                                                                                          | 53        |
| 6.3.1    | <i>Hauptfenster im Kontakt.....</i>                                                                                                | <i>58</i> |
| 6.3.2    | <i>Darstellung und Verfolgung von Betriebserprobungen .....</i>                                                                    | <i>60</i> |
| 6.3.3    | <i>Darstellung Schienenverschleiss.....</i>                                                                                        | <i>62</i> |
| 6.3.4    | <i>Darstellung kontaktmechanischer Aspekte .....</i>                                                                               | <i>63</i> |
| 6.3.5    | <i>Erstellung von Protokollen.....</i>                                                                                             | <i>65</i> |
| <b>7</b> | <b>Schlussfolgerungen.....</b>                                                                                                     | <b>66</b> |
| <b>8</b> | <b>Ausblick .....</b>                                                                                                              | <b>68</b> |
| <b>9</b> | <b>Verzeichnisse .....</b>                                                                                                         | <b>69</b> |
| 9.1      | Referenzen .....                                                                                                                   | 69        |
| 9.2      | Abbildungen .....                                                                                                                  | 69        |

## Abkürzungsverzeichnis

|                |                                                                                                                    |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AB-EBV         | Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung                                                                    |
| BAV            | Bundesamt für Verkehr                                                                                              |
| CL             | Schienenüberhöhung                                                                                                 |
| IRISSYS        | International Railway Inspection and Services System (Schienendatenbank)                                           |
| KML            | Keyhole Markup Language (Dateiformat)                                                                              |
| LK             | Landkarte                                                                                                          |
| LO             | Lieferobjekt                                                                                                       |
| MGB            | Matterhorn Gotthard Bahn                                                                                           |
| ORE            | Organisation de recherches et essais                                                                               |
| q <sub>A</sub> | Bogensteuerungsvermögen                                                                                            |
| q <sub>E</sub> | Radialstellungsindex                                                                                               |
| R              | Bogenradius                                                                                                        |
| RADN           | Im RADN sind die anzuwendenden Bremsreihen und die zugehörigen Höchstgeschwindigkeiten für jede Strecke aufgeführt |
| RhB            | Rhätische Bahn                                                                                                     |
| RTE            | Regelwerk Technik Eisenbahn                                                                                        |
| S <sub>d</sub> | Spurkranzdicke                                                                                                     |
| S <sub>h</sub> | Spurkranzhöhe                                                                                                      |
| SKK            | Schienenkopfkonditionierung                                                                                        |
| SKS            | Spurkranzschmierung                                                                                                |
| TPF            | Transports publics fribourgeois (Freiburgische Verkehrsbetriebe Holding AG)                                        |
| T <sub>x</sub> | Kraftschlusskraft in der Schienenlängsrichtung                                                                     |
| W1 / W2 / W3   | Schienenverschleiss (vertikal / an der Flanke / an der Fahrkante)                                                  |
| XML            | Extensible Markup Language (Dateiformat)                                                                           |
| ZB             | Zentralbahn                                                                                                        |

## Glossar

|         |                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| CALIPRI | Rad-/Schienen-Messgerät von NEXTSENSE/HEXAGON (Optische Erfassung)   |
| FINK    | Dreiteiliger Triebzug der Zentralbahn                                |
| KOMET   | Drei- und vierteiliger Triebzug der Matterhorn Gotthard Bahn         |
| SERSA   | Soudage électrique des rails S.A. (Schweizer Bahntechnikunternehmen) |

# 1 Einleitung

### 1.1 Berücksichtigung der Rad-/Schienenprofile für Instandhaltung und Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg

Die Rad- und Schienenprofile sowie die Querabmessungen der Radsätze und des Gleises sind Gegenstand der geometrischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg und erfüllen damit sicherheitsrelevante Anforderungen an die Spurführung im Gleiskanal. Die geometrische Interaktion ist zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die sichere und wirtschaftliche Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg. Deshalb werden die Anforderungen an die Instandhaltung (*Abbildung 1* links) durch diejenigen aus der berührungsgeometrischen Interaktion (*Abbildung 1* rechts) ergänzt. Mit letzteren werden aus den Gesichtspunkten der Interaktion die Voraussetzungen im Kontakt Rad-Schiene für die lauftechnischen Aspekte zur Verfügung gestellt. Zudem ergeben sich daraus zusätzliche Anforderungen, die bei der Instandhaltung der Fahrzeuge und des Fahrwegs beachtet werden müssen.

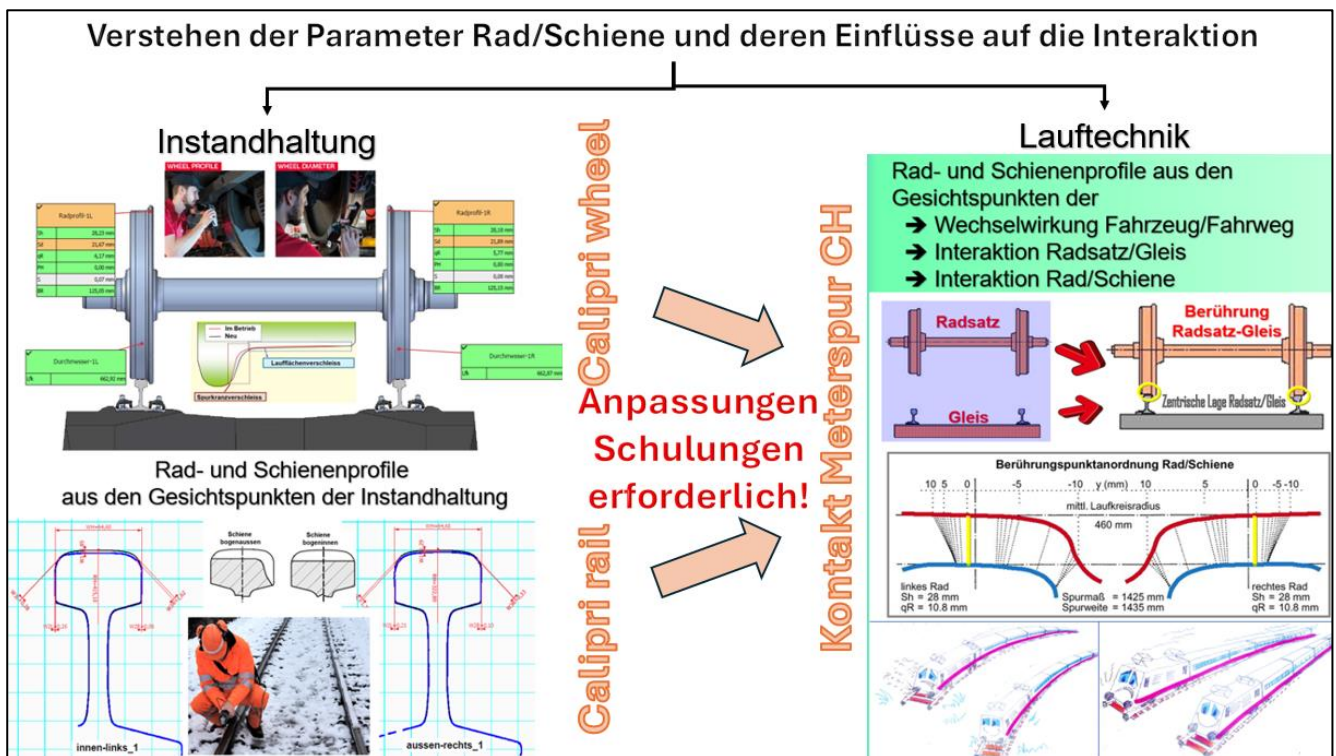


Abbildung 1: Rad- und Schienenprofile aus den Gesichtspunkten der Instandhaltung und Lauftechnik

Die Überwachung der Rad- und Schienenprofile im Betriebseinsatz ist derzeit Bestandteil der präventiven Instandhaltung und könnte in Zukunft bei weiterer Automatisierung der Datenerfassung und Auswertung teilweise durch eine zustandsbezogene Instandhaltung ergänzt werden. Derzeit erfolgt die Instandhaltung aufgrund von planmässigen Messungen und visuellen Kontrollen. Sowohl hinsichtlich der Überwachung der Sicherheit als auch der visuellen Kontrolle der Fahrflächen der Räder und Schienen auf Schädigungen, kann auf Messmittel und Schadenskataloge zurückgegriffen werden. Die dabei anfallende Datenmenge aufgrund von Handmessungen (an Rad und Schiene), von Messwagen (an den Schienen) und ortsfesten Überfahrmessanlagen im Gleis (an den Radsätzen) kann je nach Grösse der Fahrzeugflotte und der Grösse des Eisenbahnnetzes beträchtlich sein. Im Regelfall können die dabei für alle Beurteilungsgrössen anfallenden geometrischen Messdaten aus verschiedenen Gesichtspunkten bewertet werden. Die geometrischen Abmessungen an den Rädern und Radsätzen im Neuzustand (unbelastet) und im Betrieb (belastet) sind in der *R RTE 29500*<sup>1</sup> festgehalten. Bei der Fahrbahn sind die maximal zulässigen Schienenabnutzungen in allen Trassierungsbereichen in der *R RTE 22570*<sup>2</sup>, die Querabmessungen sowie Festlegungen an den Zungenspitzen in den Weichen in der *R RTE 29500*

<sup>1</sup> R RTE 29500: Standardisierung Radsätze und Weichen, Meterspur

<sup>2</sup> R RTE 22570: Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen, Meterspur

bzw. *D RTE 22556*<sup>3</sup> sowie die Nominalspurweite mit den Abweichungen nach unten/oben in der *AB EBV*<sup>4</sup> aufgeführt.

Wie der *Abbildung 1* entnommen werden kann, sind für die berührungsgeometrischen Betrachtungen und damit zur Ermittlung der für die Lauftechnik anwendbaren Indikatoren gegenüber den für die Instandhaltung erforderlichen Grössen weitere erforderlich, die bisher – zumindest bei den Meterspurbahnen – aus den Gesichtspunkten der Instandhaltung keine Beachtung gefunden haben. Obschon viele aus Einzelmessungen ermittelte Profile an Rad und Schiene mit Handmessgeräten ermittelt wurden, die durchaus dem Stand der Technik entsprachen, waren diese für berührungsgeometrische Betrachtungen in mehrfacher Hinsicht nicht nutzbar. Zu viele Messfehler beim Erfassen der Profile und nicht erfasste, jedoch zusätzlich notwendige Messgrössen sowie fehlende Informationen für die eindeutige Zuordnung derselben an Strecken bzw. Fahrzeugkategorien und Zugkonfigurationen waren unüberwindbare Hindernisse für eine effiziente Auswertung grösserer Datenmengen. Die für die berührungsgeometrischen Auswertungen erforderlichen Verbesserungen waren sehr umfangreich. Die Ergebnisse aus den Arbeiten zu den Verbesserungen wurden im Dokument *RAILplusSF-00004*<sup>5</sup> festgehalten. Dieses für die Zukunft wertvolle Dokument bildet auch die Grundlage für ein einheitliches Datenmanagement bei der Erfassung der Profile bei den Meterspurbahnen sowie für die Schulung der mit den CALIPRI-Messungen beauftragten Mitarbeiter. Damit wird sichergestellt, dass die erfassten Profile über eine für berührungsgeometrische Auswertungen ausreichende Qualität verfügen.

## 1.2 Streckencharakteristiken der RAILplus Meterspurbahnen

Zu Beginn der Systemführerschaft wurde eine Umfrage bei den 21 RAILplus-Partnerbahnen (*Abbildung 2*) durchgeführt. Diese beinhaltete eine grössere Anzahl von Fragen zur Fahrbahn, zum Reibungsmanagement (Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung), zum Thema Rad-Schiene und zu den Fahrzeugen. Zu den Fragen bezüglich Verschleiss und Schädigungen an den Fahrflächen von Rädern und Schienen waren die Antworten unterschiedlich und variierten zwischen kaum, wenig, viel und sehr viel. Für die Bewertung der diesbezüglichen durch die verschiedenen Bahnen beantworteten Fragen fehlten den diese analysierenden Experten klare Vorstellungen zu den Trassierungsbegebenheiten und von diesen insbesondere zu den Bogenverteilungen und den daraus resultierenden Anforderungen an die Laufwerkstechnik.



Abbildung 2: 21 Partnerbahnen von RAILplus aus der ganzen Schweiz

<sup>3</sup> D RTE 22556: Kontrolle der Weichen, Meterspur

<sup>4</sup> AB EBV: Verordnung des BAV über die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung

5 RAILplusSF-00004: Spezifikation für die Erfassung, Auswertung und Bewertung von Rad- und Schienenprofile, Technischer Bericht P3 IQ 5.2.1

Für die Verbesserung des Verständnisses der Strecken und der daraus resultierenden Anforderungen an das Bogenlaufverhalten sowie mit Hinblick auf die Bewertung der realen berührungsgeometrischen Zustände ganzer Eisenbahnnetze war es erforderlich, die dafür notwendigen Voraussetzungen zu schaffen. Mittlerweile haben von 19 der insgesamt 21 RAILplus-Meterspurbahnen ihre TopoRail-Daten zur Verfügung gestellt. Nach deren Prüfung und Vorbereitung für die Linien-Darstellungen wurde durch eine darauf spezialisierte Firma eine Datenbank<sup>6</sup> erstellt.

### 1.3 Situation zu den Rad- und Schienenprofilen bei der Meterspur

#### 1.3.1 Nominelle Radprofile in Anwendung bei verschiedenen Meterspurbahnen

Der Vergleich der von den Meterspurbahnen verwendeten nominellen Radprofile erfolgt durch Paarung mit den beiden in Anwendung befindlichen nominellen Schienenprofile 46E1 und 36E3. Dabei wird die Paarung je einmal mit der Schienenneigung 1:20 bzw. mit der Schienenneigung 1:40 durchgeführt. Durch die Paarung aller Radprofile mit der jeweils gleichen Schiene können die Unterschiede zwischen den einzelnen Radprofilen für den Bogenlauf anhand der  $\Delta r$ -Funktion und des Radialstellungsindex sowie für höhere Geschwindigkeiten auf geraden Strecken anhand der äquivalenten Konizität leicht verständlich in Diagrammen dargestellt werden. In *Abbildung 3* sind die entsprechenden berührungsgeometrischen Verläufe für das Schienenprofil 46E1 und in *Abbildung 4* für das Schienenprofil 36E3 aufgeführt.

Während bei den europäischen Normalspurbahnen nur eine geringe Anzahl von unterschiedlichen Radprofilen zur Anwendung kommt und deren Unterschiede vor allem durch die dort eingesetzten beiden Schienenneigungen 1:20 und 1:40 bedingt sind, ist die Streuung bei den Radprofilen der Meterspurbahnen beträchtlich. Dies dürfte vor allem daran liegen, dass die Meterspurbahnen untereinander nicht interoperabel sein müssen und sich daraus kein Handlungsbedarf aufdrängte. Aufgrund der Erfahrungen bei den Normalspurbahnen macht es Sinn, diese Streuungen – wenn möglich – durch ein einheitliches Radprofil zu verringern. Interessant ist, dass sich bei den Meterspurbahnen das Interaktionsverhalten der Radprofile nach deren Anpassungen im Betriebseinsatz auf den Schienenneigungen 1:20 und 1:40 kaum voneinander unterscheidet. Dies im Gegensatz zur Normalspur, wo sich die Berühreigenschaften der Räder auf den Schienen, je nachdem ob sich diese auf der Schieneneinbauneigung 1:20 oder 1:40 durch Verschleiss angepasst haben, deutlich voneinander unterscheiden. Hier liegt ein deutlicher Unterschied zwischen der Normalspur und der Meterspur vor. Hat sich bei der Meterspur auf einer Schieneneinbauneigung ein Radprofil durch Verschleiss angepasst, so zeigt dieses aufgrund der bisherigen Erfahrungen auf der anderen Schieneneinbauneigung ein ähnliches Verhalten. Dieser Sachverhalt muss jedoch noch an einer grösseren Stichprobe von realen Radprofilen erhärtet werden.

---

<sup>6</sup> Datenbank Bogenverteilung: Chris Zimmermann, Innovative Times AG

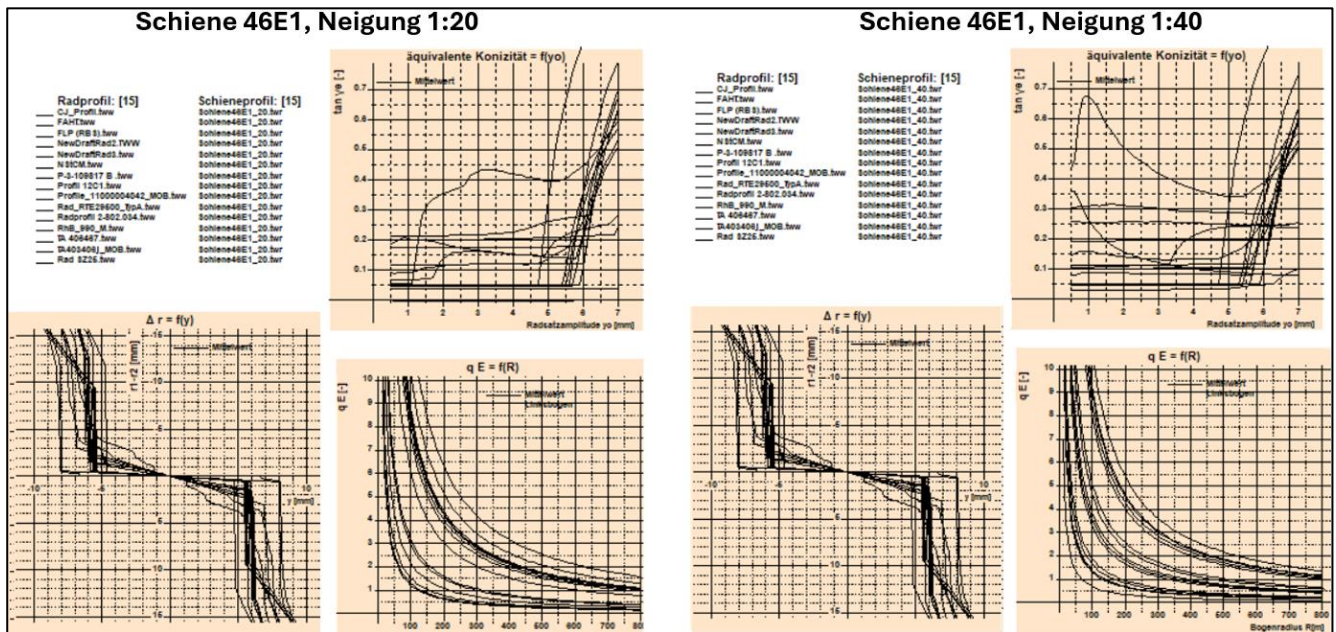


Abbildung 3: Alle nominellen Radprofile der Meterspurbahnen gepaart mit der Schiene 46E1 und Neigungen 1:20 bzw. 1:40

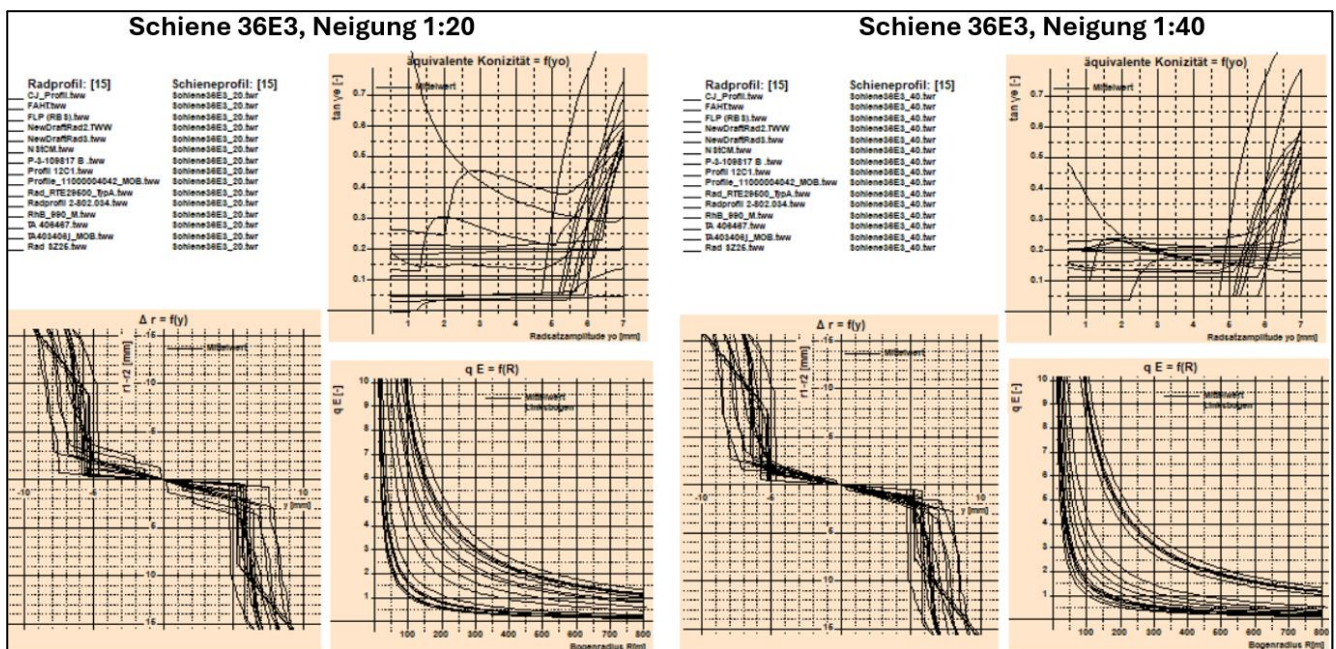


Abbildung 4: Alle nominellen Radprofile der Meterspurbahnen gepaart mit der Schiene 36E3 und Neigungen 1:20 bzw. 1:40

### 1.3.2 Verhalten von Radprofilen auf realen Schienenprofilen einer realen Strecke

Um Veränderungen von Schienenprofilen im Betriebseinsatz sichtbar zu machen, werden einzelne Radprofile mit diesen gepaart. Wie in *Abbildung 4* beim Verhalten von unterschiedlichen Radprofilen auf einer konstant gehaltenen Schiene gezeigt wurde, wird beim Verhalten der realen Schienenprofile das Radprofil konstant gehalten. Bei der Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Radprofile wurden oben zwei Schientypen mit zwei Einbauneigungen variiert. Bei der Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Schienenprofile werden hier zwei Radprofile verwendet. Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im Folgenden für das Radprofil RTE 29500 Typ A (mit  $S_h=28$  mm /  $S_d=27$  mm) die abgekürzte Form RTE A verwendet.

Das eine ist das nicht verschleissangepasste Radprofil RTE A und das andere das verschleissangepasste Radprofil RAILplus\_v1A/28.5/25. Das derzeit bei den meisten Meterspurbahnen verwendete nominelle Radprofil ist vergleichbar mit dem Radprofil RTE A. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieses Profil daher bei den meisten Meterspurbahnen in Richtung eines verbesserten

Radialstellungsindex entwickelt. Aus diesem Grund wird hier das Verhalten des Radprofils RTE A mit dem verschleissangepassten und spurkranzgeschwächten Radprofil *RAILplus\_v1A/28.5/25* verglichen.

In *Abbildung 5* sind die Summenhäufigkeiten und die Häufigkeitsverteilungen der äquivalenten Konizitäten für die beiden Radprofile *RTE A* und *RAILplus\_v1A/28.5/25* aus den Paarungen mit den realen Schienenprofilen der Strecke Landquart – Sagliains nebeneinander dargestellt. Das Radprofil *RTE A* reagiert aufgrund seiner in der Schienenkopfmittle in stark eingegengtem Bereich angeordneten Berührungspunktverteilung bei Querverschiebungen des Radsatzes gegenüber dem unempfindlich auf Abweichungen am Schienenkopf. Als Folge tritt auch eine geringe Streuung der äquivalenten Konizität auf. Diese ist grösstenteils unterhalb von 0.1 angesiedelt und hat daher eine sehr grosse Wellenlänge des Radsatzes bei seinem Wellenlauf zur Folge. Dies kann den Fahrzeugkasten bei Vorliegen einer Frequenznachbarschaft zu unzulässigen Schwingungen anregen («low frequency body motions»).

Deutlich empfindlicher reagiert das Radprofil *RAILplus\_v1A/28.5/25* auf Querverschiebungen des Radsatzes im Gleis. Auf der nominellen Schiene liegt die äquivalente Konizität bei einer Spurweite von 1000 mm bei 0.17. Bei rund 35% der geraden Streckenabschnitte liegen höhere Werte vor. Wo die Grenzwerte der äquivalenten Konizität nach oben und nach unten liegen, hängt von den Laufeigenschaften der Fahrzeuge ab, die aus den Ergebnissen der lauffechnischen Nachweisrechnungen der Fahrzeuge ermittelt werden können.

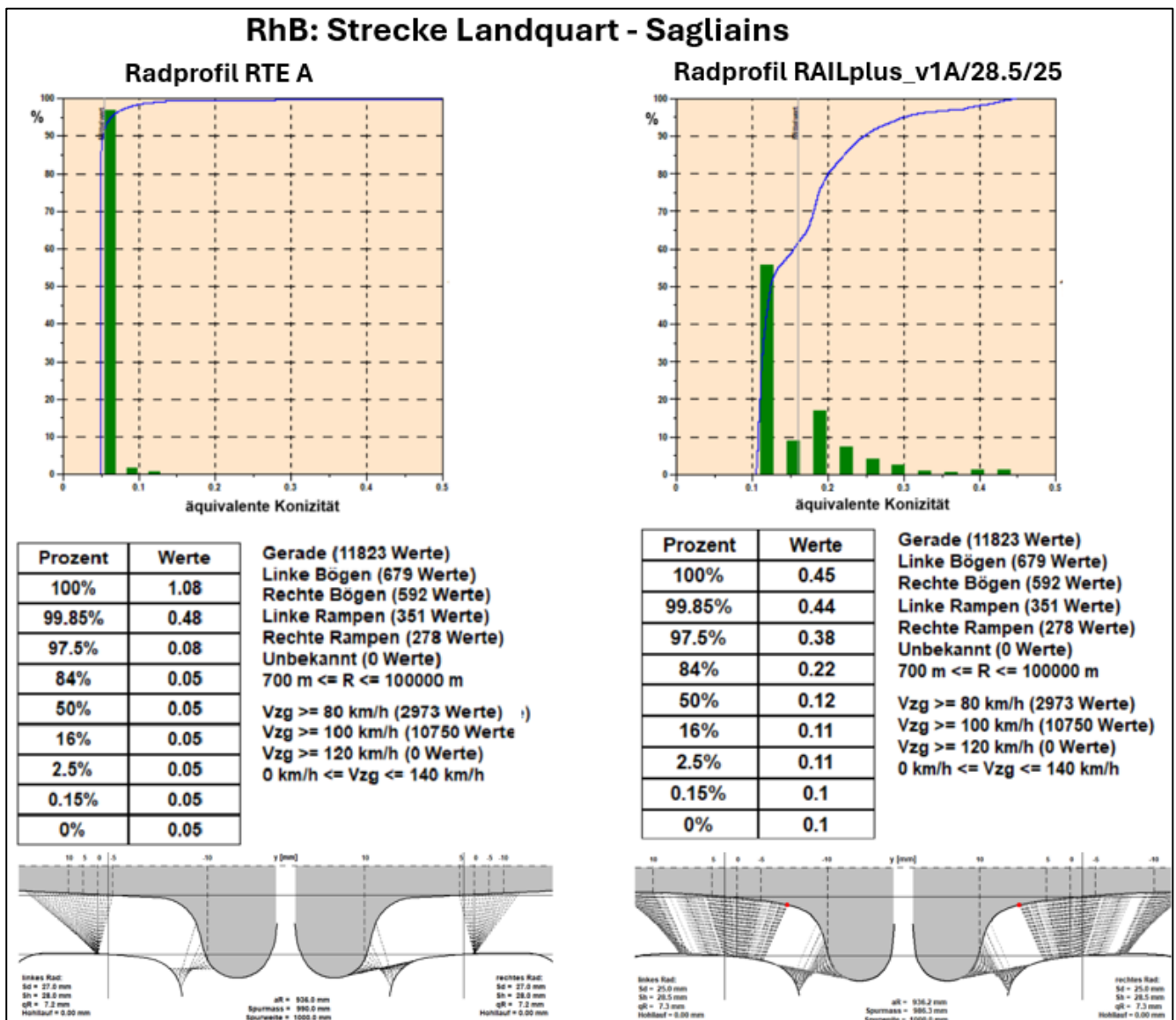


Abbildung 5: Summenhäufigkeit und Häufigkeitsverteilung der äquivalenten Konizitäten der Radprofile RTE A und *RAILplus\_v1A/28.5/25* auf der Strecke Landquart - Sagliains

Das oben aufgeführte Verhalten von Rad und Schiene hinsichtlich des Indikators der äquivalenten Konizität ist vor allem bei höherer Geschwindigkeit und vor allem in sehr grossen Bögen oder geraden Strecken von Bedeutung. Der Indikator Radialstellungsindex ist im Gegensatz dazu abhängig vom Bogenradius und vor allem in den mittleren bis hinunter zu den sehr kleinen Bogenradien von Bedeutung. Aus diesem Grund wird hier auf die Darstellung der Summenhäufigkeit und der Häufigkeitsverteilung verzichtet und das Verhalten dieses Parameters in Abhängigkeit des Bogenhalbmessers dargestellt. Wie unten gezeigt wird, zeigt dieser Parameter bei den realen Schienen mit abnehmendem Bogenhalbmesser eine zunehmende Streuung. Um die aus realen Messwerten an den Schienen ermittelten Radialstellungsindizes einzuordnen, werden diese mit den aus theoretischer Sicht möglichen verglichen. Wie bereits oben bei der Darstellung der äquivalenten Konizitäten verfahren wurde, werden auch hier bei der Darstellung der Radialstellungsindizes die Paarungen mit den zwei sich grundsätzlich unterscheidenden Radprofilen *RTE A* und *RAILplus\_v1A/28.5/25* durchgeführt. Bei den theoretischen Paarungen werden die Spurweiten 1000 mm und 1010 mm zugrunde gelegt. Dies beruht aus Erfahrungen aus Auswertungen bei verschiedenen Meterspurbahnen, wonach sich die Spurweiten in den engeren Bögen erweitern (siehe Bericht *RAILplusSF-00046*<sup>7</sup>).

Die *Abbildung 6* zeigt auf der linken Seite die Radialstellungsindizes des Radprofils *RTE A* in Verbindung mit den realen Schienen in den Bögen der Strecke Landquart – Sagliains. Insgesamt zeigen sich bei den Schienen mit diesem Radprofil sehr grosse Streuungen, die erst oberhalb von Radien mit circa 600 m abnehmen. Werden diese Werte mit dem Verlauf bei den Werten der theoretischen Rad-Schiene-Paarung verglichen, so zeigt sich bei den unteren Werten des Streubandes der Paarungen mit den realen Schienen ein ähnlicher Verlauf wie bei der Paarung der nominellen Rad- und Schienenprofile (rechtes Diagramm) bei einer Spurweite von 1010 mm. Damit erklärt sich ein Teil der Streuungen aus den unterschiedlichen Spurweiten. Es ist aber davon auszugehen, dass aus diesen Vergleichen von Theorie und Praxis ein grösserer Anteil der Streuungen aus Veränderungen an den Schienenprofilen oder an weiteren Einflussparametern resultiert.

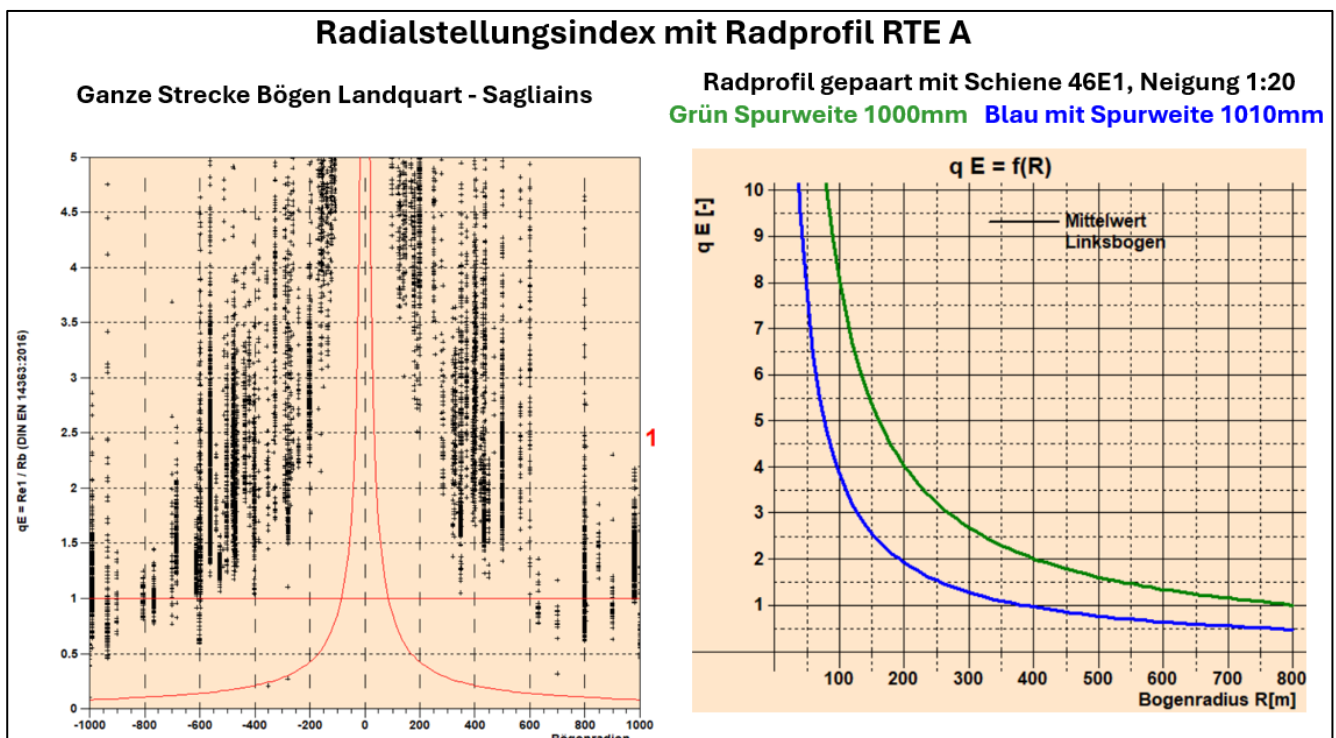


Abbildung 6: Radprofil RTE A, Radialstellungsindex auf der gesamten Strecke links, Radialstellungsindex auf nomineller Schiene mit Spurweiten 1000 mm und 1010 mm rechts

<sup>7</sup> RAILplusSF-00046: Entwicklung eines verschleissoptimierten Radprofils für Meterspurradsätze, Technischer Bericht P3 LO 4.1.1b

Wie aus dem Vergleich (siehe *Abbildung 7*) der Streuungen bei den Paarungen mit den realen Schienen (linke Seite) in) und den theoretischen Paarungen in Abhängigkeit der beiden Spurweiten (rechte Seite) entnommen werden kann, sind die Streuungen bei Verwendung des verschleissangepassten Radprofils *RAILplus\_v1A/28.5/25* deutlich weniger abhängig von der Spurweite und in der Folge von der Spurerweiterung. Mit Abnahme der Bogenhalbmesser macht sich aber auch hier eine zunehmende Streuung bemerkbar. Aufgrund der Ergebnisse mit den theoretischen Paarungen ist die Überschreitung des Radialstellungsindex  $q_E=1$  bis hinunter auf  $R=125$  m auf die Veränderungen an der Form des Schienenprofils im Kontaktbereich von Rad und Schiene zurückzuführen. Bei Spurerweiterung von 10 mm sollte der Wert von  $q_E=1$  bis hinunter auf  $R=100$  m erfüllbar sein (rechtes Diagramm in *Abbildung 7*).

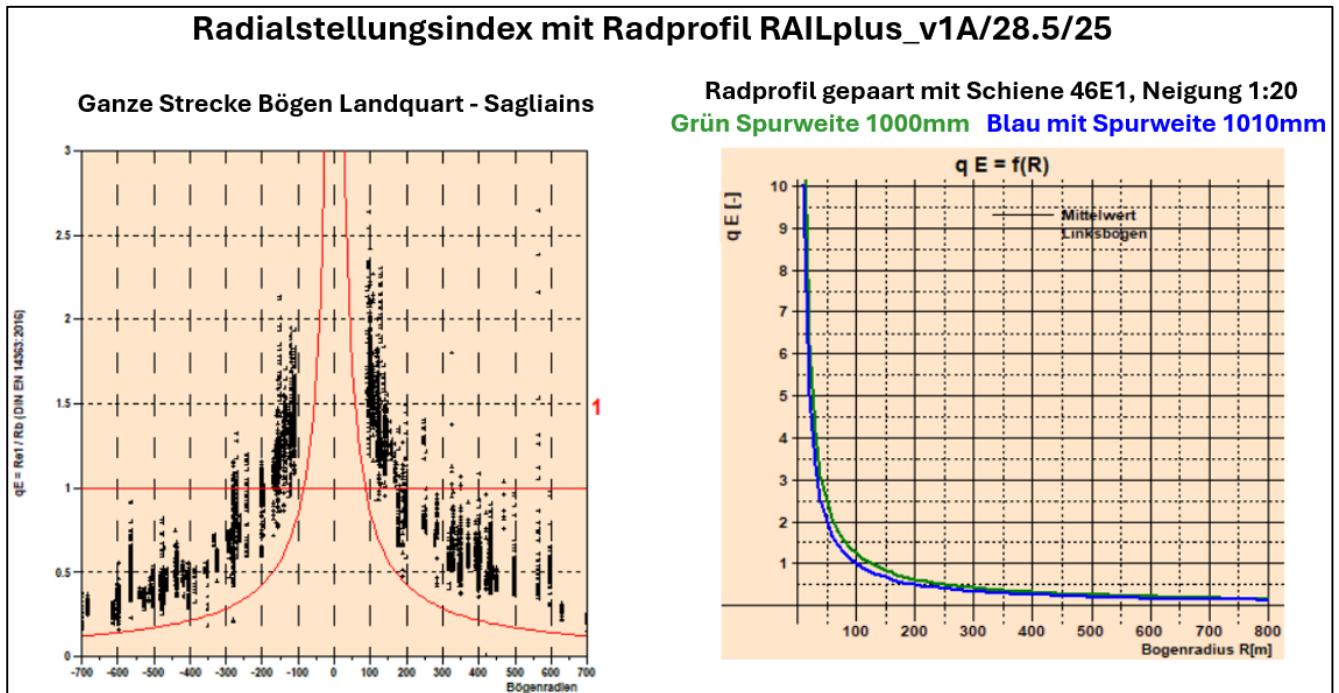


Abbildung 7: Radprofil *RAILplus\_v1A/28.5/25*, Radialstellungsindex auf der gesamten Strecke links, Radialstellungsindex auf nomineller Schiene mit Spurweiten 1000mm und 1010mm rechts

### 1.3.3 Instrumentarien für die Beurteilung der Berührungsgeometrie Rad-Schiene bei der Messspur

Bei den Schienen dank dem Diagnosefahrzeug und bei den Fahrzeugen zukünftig dank den Überfahrmessanlagen entstehen sehr grosse Datenmengen zu den Profilen von Rad und Schiene und den diese verbindenden Elementen. Dies wird es den Bahnen erlauben, in Zukunft auf Ereignisse zeitnah zu reagieren bevor sie eintreten. Anhand der Analyse dieser Daten werden dazu die notwendigen Erkenntnisse gewonnen. Dazu müssen die Daten derart bearbeitet werden, damit es möglich ist aus ihnen Muster, Beziehungen, Trends, Korrelationen und Anomalien zu entdecken und zu analysieren beziehungsweise Theorien oder Hypothesen zu validieren (siehe auch Umgang mit grossen Datenmengen bei der Berührungsgeometrie Rad-Schiene in *Abbildung 8*). Früher wurden Daten analysiert, um zukünftige Entscheidungen zu treffen – heute können Daten so analysiert werden, um Entscheidungen nahezu in Echtzeit zu treffen. Ebenfalls ist es möglich, neue Trends zu erkennen und Einblicke zu gewinnen, die mit herkömmlichen Datenprozessen nicht möglich gewesen wären.

Es ist ausserdem möglich, quantitative Datenanalysen durchzuführen. Diese sind darauf ausgerichtet, möglichst viele Ergebnisse zu sammeln, um diese statistisch auszuwerten. Dazu gehören die univariaten und multivariaten Datenanalysen. Während bei der univariaten Datenanalyse jeweils nur eine Variante (Merkmal) analysiert wird, werden bei der multivariaten Datenanalyse zwei oder mehr Variablen gleichzeitig betrachtet. Diese Anwendung ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den Variablen oder Zusammenhänge zwischen den Merkmalsträgern bestehen.

Mit den in diesem Bericht vorgestellten Instrumentarien in Verbindung mit weiteren Datenprozessen und Datenerfassungssystemen (Einzelmessungen, Reprofilierungsprotokolle, usw.), sind für die

Meterspurbahnen die Voraussetzungen zur zeitnahen Analyse von Daten geschaffen, die als eine der wichtigen Grundlagen für Entscheidungen an den Fahrzeugen und am Fahrweg dienen werden.

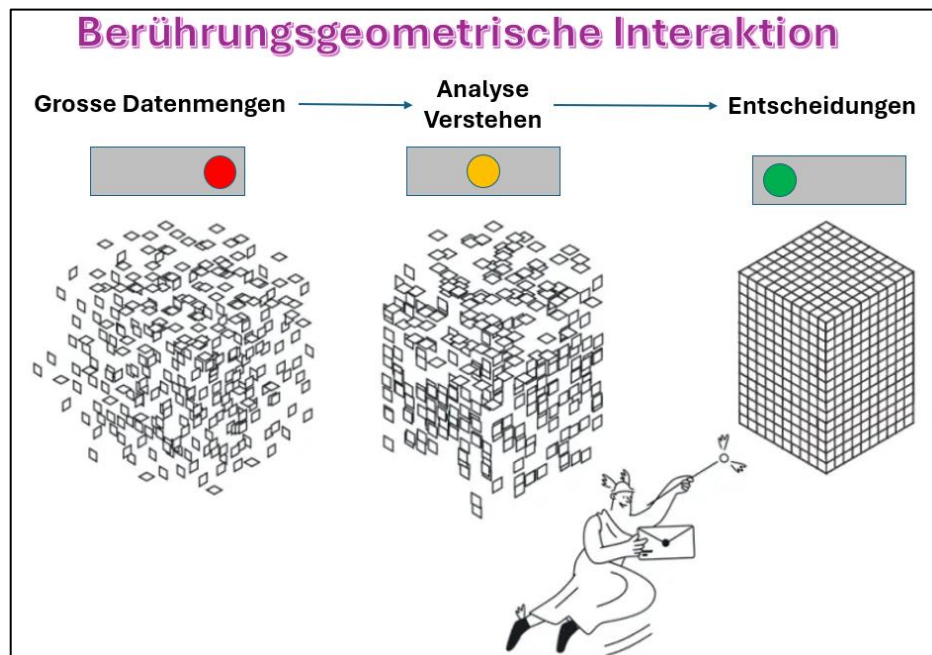


Abbildung 8: Umgang mit grossen Datenmengen bei der Berührungsgeometrie Rad-Schiene

## 2 Streckendaten und Bogenverteilungen

Um die Strecken und die ganzen Eisenbahnnetze von Bahnen aus den Gesichtspunkten der Wechselwirkung von Fahrzeug/Fahrweg zu verstehen, ist es erforderlich diese mit ihren besonderen Merkmalen zu beschreiben. Dazu gehören für Anwendungen in der Interaktion die Lagen, die Überhöhungen, die Höhen über Meer und die Streckengeschwindigkeiten. Diese aus unterschiedlichen Quellen stammenden Daten wurden in den sogenannten Streckendateien zusammengefasst und dienen im vorstehenden Zusammenhang einerseits der Erstellung von Bogenverteilungen und andererseits den Auswertungen der Schienendaten mit dem Programm *Gleis-Kontakt Meterspur CH*. Mit den Lagen werden die Trassierungselemente Geraden, Übergangsbögen und Vollbögen verortet. Die Überhöhungen werden den Anfängen und Enden der Übergangsbögen sowie der Vollbögen zugeordnet. Daraus lassen sich in Verbindung mit den Streckengeschwindigkeiten die Überhöhungsfehlbeträge in den Bögen ermitteln. Aus den Zuordnungen der Höhen zu den Strecken ergeben sich die Steigungen/Gefälle. Diese Daten sind Grundlagen für die Ermittlung der stationären Traktions- und Bremskräfte sowie als Grundlage für deren Einfluss auf den Verschleiss Rad-Schiene.

Mit diesen Streckendateien lassen sich die gemessenen Schienendaten mit dem Programm *Gleis-Kontakt* synchronisieren. Dadurch wird es zudem möglich, die im *Gleis-Kontakt* ausgewerteten Daten oder die Streckendaten in einer Plattform (z.B. [geo.admin.ch](http://geo.admin.ch)) für geolokalisierte Informationen und Darstellungen zu nutzen. In *Abbildung 9* sind als Beispiel die in einer KML-Datei (Keyhole Markup Language) erfassten Streckendaten der TPF unter Nutzung der Schweizer Landeskoordinaten im Satellitenbild dargestellt. Die drei Trassierungselemente Gerade, Übergangsbogen und Vollbogen sind in unterschiedlichen Farben hervorgehoben.

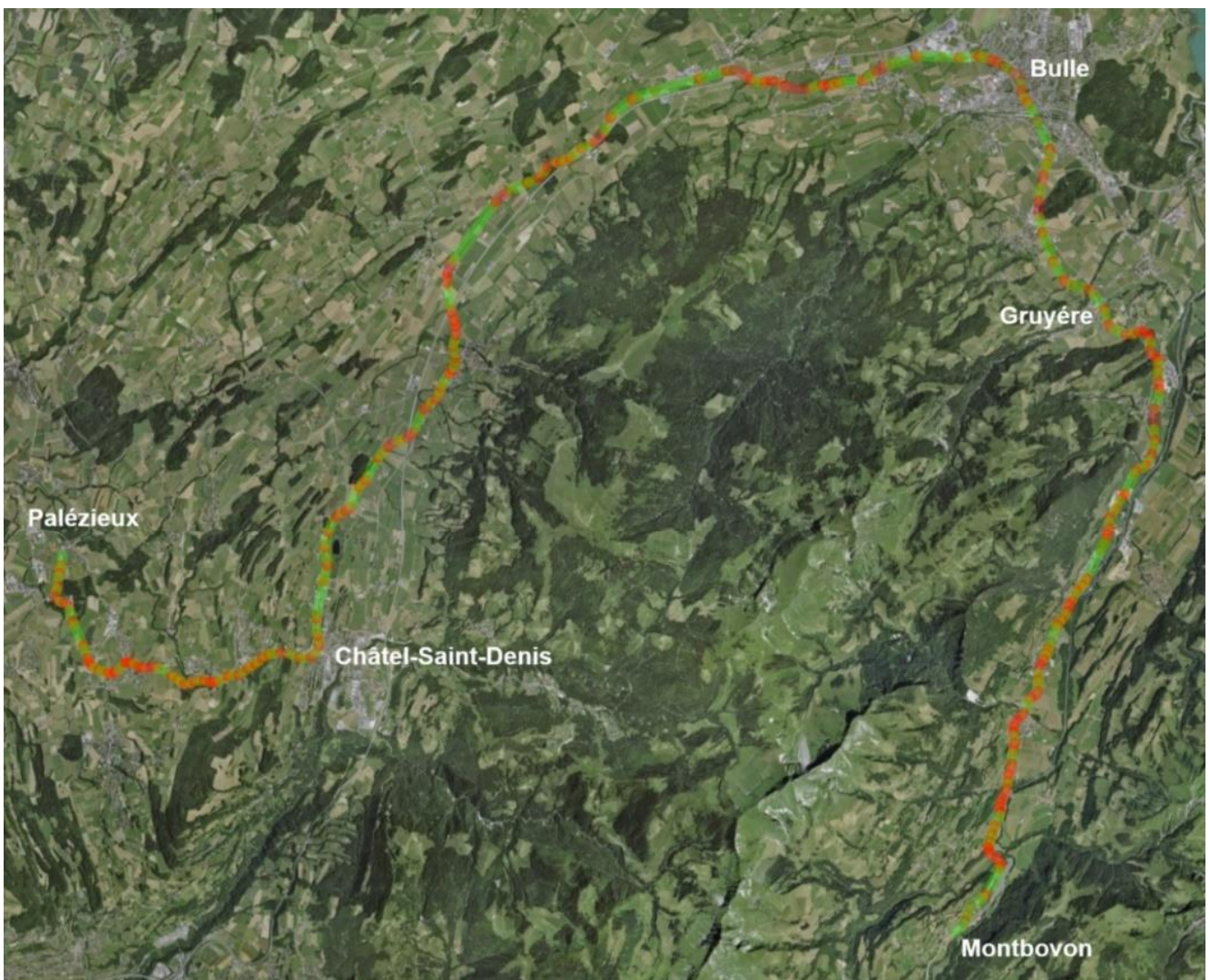


Abbildung 9: Verortung der Trassierungselemente Geraden (grün), Übergangsbögen (orange) und Vollbögen (rot) bei TPF

In *Abbildung 10* sind die Bogenverteilungen des gesamten Netzes (blaue Balken) und der Teilstrecken (rote Balken) der Matterhorn-Gotthard-Bahn dargestellt. Auf den Abszissen sind die Bogenradienklassen und auf den Ordinaten die Gesamtlängen je Bogenklassen dargestellt. In den Bogenradienklassen sind auch die jeweiligen Längen der Übergansbögen enthalten. Auf Basis der Bogenverteilungen lassen sich verschiedene Aspekte und Eigenheiten der Eisenbahnstrecken bzw. Eisenbahnnetze erklären und insbesondere in Verbindung mit den jeweils darauf verkehrenden Fahrzeugbauarten charakterisieren sowie Vergleiche zwischen den verschiedenen Meterspurbahnen ermitteln und darstellen (Beispiele wie Verschleissverhalten Rad-Schiene, Eignung unterschiedlicher Fahrwerksprinzipien, Einordnung der Standardelemente, usw.). Die Streckendaten waren eine Voraussetzung für die weiter unten beschriebene Anwendung des Programms *Gleis-Kontakt Meterspur CH*.

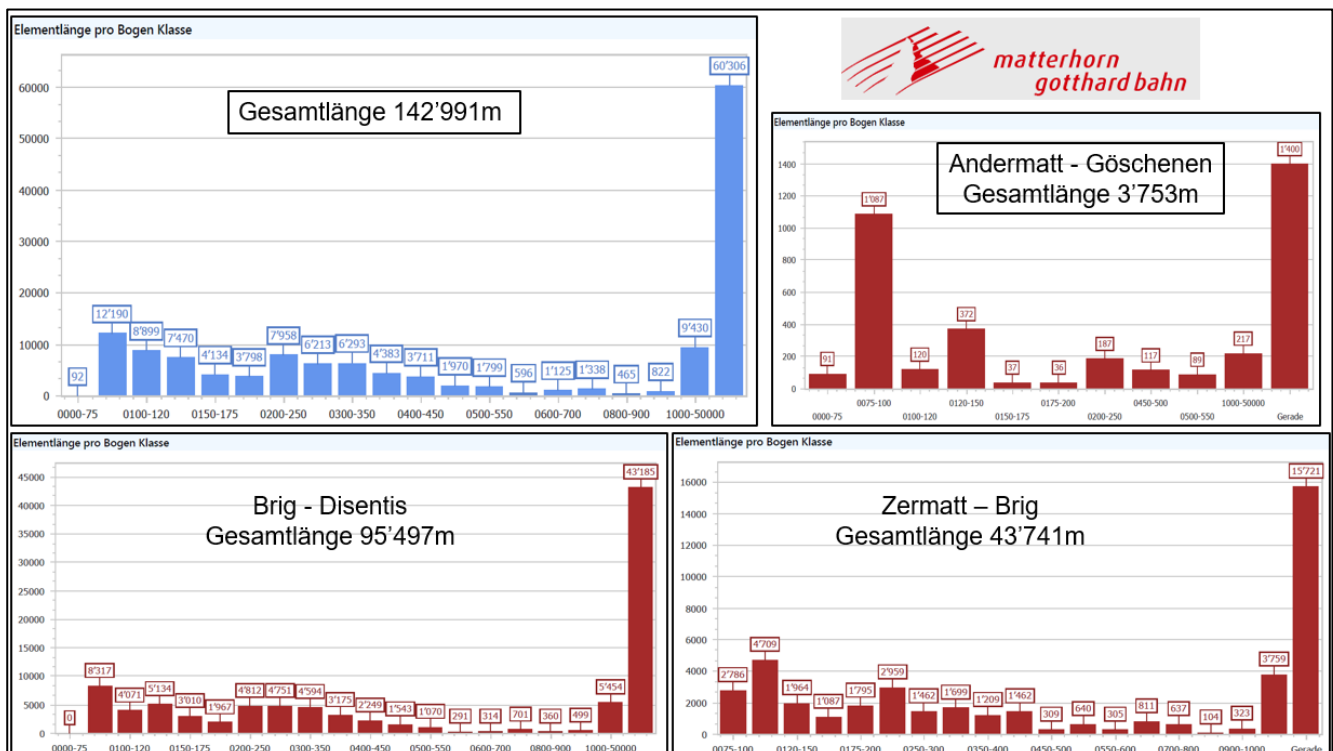


Abbildung 10: Bogenverteilungen MGB gesamtes Streckennetz (blau) und Teilstrecken (rot)

### 3 Zielsetzungen bei der Verwendung der Kontaktprogramme

Ziel dieses Berichtes ist es Instrumente vorzustellen, die es erlauben, das berührungsgeometrische und in der Folge das Interaktionsverhalten von Rad- und Schienenprofilen im Betriebseinsatz darzustellen, zu verfolgen und aus weitergehenden Gesichtspunkten für die Beherrschung des Systems Rad-Schiene und wenn notwendig für die weitere Systementwicklung Rad-Schiene nutzbar zu machen. Es werden unter anderem die Normen, Herstellungsvorgaben wie Toleranzen, Instandhaltungs- und Betriebsgrenzmasse berücksichtigt. Weiterhin spielt das Verschleissverhalten eine wichtige Rolle, wobei die Verschleisszustände und -entwicklungen über die Leistungsbezugsgrössen beziehungsweise die Laufleistungen bis zum Ersatz der Räder und die Liegedauern der Schienen von Interesse sind. Um die aktuellen Zustände aufzeigen zu können, werden grosse Stichproben an Messungen der Schienenprofile auf ganzen Meterspur-Streckennetzen sowie eine Vielzahl an Radprofilen herangezogen, damit eine Sondierung der Gegebenheiten des Rad-Schiene-Kontaktes vorgenommen werden kann.

Unter Berücksichtigung von jeweils aktuellen Messungen soll eine andauernde Bewertung der berührungsgeometrischen Bedingungen (äquivalente Konizität, Radialstellungsindex und weitere Parameter) unter den sich verändernden Verschleisszuständen durchgeführt werden können. Dabei spielen die Werkstoffpaarungen eine genauso wichtige Rolle wie deren Wechselwirkungen mit berührungsgeometrischen und kontaktmechanischen Gegebenheiten. Diese Wechselwirkungen werden erfasst, analysiert und bewertet. Als Ergebnis werden eine aus mehreren Interaktionsaspekten konforme Paarung von Rad und Schiene erwartet sowie Regeln für die Pflege des Rad-Schiene-Kontaktes zur Erzielung grösserer Lebensdauern bei den beiden Berührpartnern. Dabei werden für den Kontaktbereich Rad-Schiene reale Zustände zur Verfügung gestellt, die zukünftig für die Auslegung und den rechnerischen sowie versuchstechnischen Nachweis des lauftechnischen Verhaltens der Schienenfahrzeuge genutzt werden müssen. Zusätzlich entstehen daraus lauftechnische Grenzwerte, die zusätzlich zu den oben aufgeführten geometrischen Interaktionsgrössen für die Instandhaltung der Fahrzeuge und verortet für die Gleise bzw. Schienen anzuwenden sind.

## 4 Messdaten der Räder/Radsätze und Schienen/Gleise

Wichtige Voraussetzungen für eine effiziente und vor allem automatische bzw. teilautomatische Datenauswertung sind zielgerichtete und fehlerfreie Datenerhebungen. Dies betrifft sowohl die Daten der Schienen als auch jene der Fahrzeuge. Bei den Fahrzeugen muss sowohl zwischen Einzelfahrzeugen und ganzen Triebzügen unterschieden werden.

### 4.1 Messdaten der Räder/Radsätze

Die Unterscheidung zwischen Rädern und Radsätzen wird deshalb vorgenommen, weil bei den Rädern deren Profile und Raddurchmesser von Bedeutung sind und bei den Radsätzen zusätzlich die gegenseitige Lage der beiden Räder desselben Radsatzes zu berücksichtigen sind.

Bei den Triebzügen ist es zwingend erforderlich, jeweils die Fahrzeugbauart sowie die Nummer der Fahrzeugeinheit sowie die Folge und entsprechenden Nummerierungen von deren Radsätzen unter besonderer Berücksichtigung der Fahrtrichtung im Einsatzgebiet konsequent bei jeder Messung zu erfassen. Diese Angaben müssen im Datenfile für die Messwerterfassung aufgeführt werden. Zur Bereitstellung und Vereinheitlichung der Messdaten für die Einzelmessungen an den Rädern/Radsätzen sowohl mit Hinblick auf die Instandhaltung als auch auf die Interaktionen wurde im Rahmen der Systemführerschaft das Dokument (RAILplusSF-00004 / P3 LO 5.2.1 siehe Fussnote<sup>5</sup> Seite 9) erstellt. In diesem Dokument ist unter anderem dargestellt

- wie die Messdaten für die Auswertung exportiert werden müssen,
- welche Daten für die Räder und Radsätze erfasst werden müssen sowie deren Bezeichnungen und die nominellen Angaben zu den verwendeten Radsatztypen (A, B und Sonderprofile),
- wie bei der Anpassung der bahnspezifischen Messplan-Vorlagen vorgegangen werden muss,
- was bei der Erfassung der Radsatzdaten beachtet werden muss, um Messfehler zu vermeiden.

Die im oben genannten Bericht aufgeführte Spezifikation wurde für Einzelmessungen erstellt. Dieses Dokument kann sinngemäss auch für die Erfassung von Messdaten auf Überfahrmessanlagen verwendet werden. Dazu müssen jedoch die Fahrzeuge und deren Radsätze «radscharf» identifiziert werden können. Da jedoch derzeit keine zuverlässigen Messdaten von derartigen Anlagen für die Meterspur verfügbar sind, liegen für diese sowohl für die Qualität der Messwerterfassung als auch für Auswertungen der Messdaten keine Erfahrungswerte vor.

Ein weiteres Problem stellt die Ermittlung der Indikatorwerte über die Lebensdauer der Radsätze dar, da derzeit noch keine zuverlässige Verknüpfung zwischen den Daten aus dem Betriebseinsatz als Folge des Verschleisses durch den Rad-Schiene-Kontakt als auch der spanabhebenden Radsatzbearbeitung gegeben sind. Diese Daten wären jedoch für die Erstellung der sogenannten «Durability-Diagramme» erforderlich. Ein Durability-Diagramm stellt den Verlauf der Raddurchmesser über der Laufleistung und damit auch der Lebensdauer der Räder desselben Radsatzes dar und zeigt damit die Phasen des adhäsiven Verschleisses (Durchmesserreduktion durch den Betriebseinsatz) und jene des sogenannten Reprofilierungsverschleisses (Durchmesserreduktion bei der Reprofilierung) auf.

Ein weiteres Problem stellt die zuverlässige Messung der Raddurchmesser dar. Stellen sich aus Messungenauigkeiten Durchmesserdifferenzen der beiden Räder desselben Radsatzes heraus, so hat dies asymmetrische berührungsgeometrische Funktionen zur Folge, die das Verhalten der Radsätze für den Bogenlauf und für die Fahrt auf geraden Strecken ungünstig beeinträchtigen. Treten zudem grössere Unterschiede bei aufeinanderfolgenden Durchmessermessungen auf, so beeinträchtigen diese die sogenannten Verschleissindikatoren.

### 4.2 Messdaten Schienen/Gleise

Die Unterscheidung zwischen Schienen und Gleisen wird deshalb vorgenommen, weil bei den Schienen deren Profile (gesamte Profile, Fahrflächen und Einbauneigungen) von Bedeutung sind und bei den Gleisen die gegenseitige Lage der beiden Schienen im gleichen Gleisquerschnitt zu berücksichtigen sind. Bei den Schienen ist zudem wichtig zu wissen, ob sie in Bögen, Übergangsbögen oder Geraden eingebaut sind. Zudem muss je nach Bogenrichtung zwischen bogenäusserer und bogeninnerer Schiene unterschieden werden können. Im Weiteren kann für gewisse Fragestellungen in den Bögen

die Gleisüberhöhung und in allen Trassierungsbereichen die Fahrgeschwindigkeit von Bedeutung sein. Die Überhöhungen werden bei den Einzelmessungen erfasst. Bei der Erfassung durch Gleismessfahrzeuge stehen alle Informationen anhand der Messdaten und teilweise ergänzt anhand der Streckendateien zur Verfügung.

Nachdem ab ungefähr dem Jahr 2020 ein Diagnosefahrzeug zur Erfassung der Fahrwegdaten und für die Aspekte der Interaktion auch die Gleisdaten und insbesondere die Schienendaten bei immer mehr Meterspurbahnen periodisch vermessen werden, kann auf diese Daten zugegriffen werden. Aus diesem Grund werden Einzelmessungen aus Kostengründen und wegen der Zugänglichkeit zu den Gleisanlagen nur noch vereinzelt und fallweise bei besonderen Problemstellungen durchgeführt. Für die Einzelmessungen sind die Anforderungen an die Messdatenerfassung wie oben bei den Rädern auch bei den Schienen im oben erwähnten Dokument *RAILplusSF-00004 / P3 LO 5.2.1* festgehalten.

Wie schon in Kapitel 2 aufgeführt, erfolgt die Synchronisation der Messdaten aus den Messungen mit dem Messwagen mit der Strecke anhand Streckendateien durch die Koordinaten Lage, Überhöhung und Höhe. Die Genauigkeit der dabei erfassten Daten hinsichtlich des Schienenverschleisses sind für die Aspekte der Instandhaltung völlig ausreichend. Mögliche Auswirkungen auf die Berührungsgeometrie durch die Messung der Schienen durch den Messwagen unter Teillast, zumindest in einer der beiden Fahrtrichtungen, werden derzeit untersucht.

## 5 Unterschiedliche Herangehensweisen bei berührungsgeometrischen Problemstellungen

Bei den Fahrzeugen und bei der Infrastruktur wird unter den Radprofilen einerseits und den Schienenprofilen andererseits Unterschiedliches verstanden. Das Radprofil ist die Kontur zwischen den äusseren und den inneren Stirnseiten der Räder mit den unterschiedlichen Kontaktbereichen zwischen Rad und Schiene (innere Stirnseite, Spurkranzrücken, Spurkranzkuppe, Spurkranzflanke, Hohlkehle, Lauffläche, Phase und äussere Stirnseite). Das Schienenprofil umfasst jedoch den gesamten Schienenquerschnitt mit Schienenfuss, Schienensteg und Schienenkopf. Für die Berührungsgeometrie Rad-Schienen sind jedoch nur diejenigen Bereiche der beiden Profile relevant, die sich in den verschiedenen Trassierungsbereichen sowie in den Zwangspunkten (Weichen, Gleisdurchschneidungen) berühren können bzw. dürfen.

Je nach Fragestellungen zu berührungsgeometrischen Problemstellungen ergeben sich unterschiedliche Paarungsmöglichkeiten von Rad- und Schienenprofilen. In *Abbildung 11* sind dazu vier Gruppen unterschiedlicher Paarungen von Rad- und Schienenprofilen dargestellt:

- Theoretisches Radprofil mit theoretischem Schienenprofil**
- Theoretisches Radprofil mit realem Schienenprofil**
- Reales Radprofil mit theoretischem Schienenprofil**
- Reales Radprofil mit realem Schienenprofil**

Nachstehend werden anhand einiger Beispiele die Anwendungen verschiedener Kombinationen unterschiedlicher Rad- und Schienenprofile erläutert.



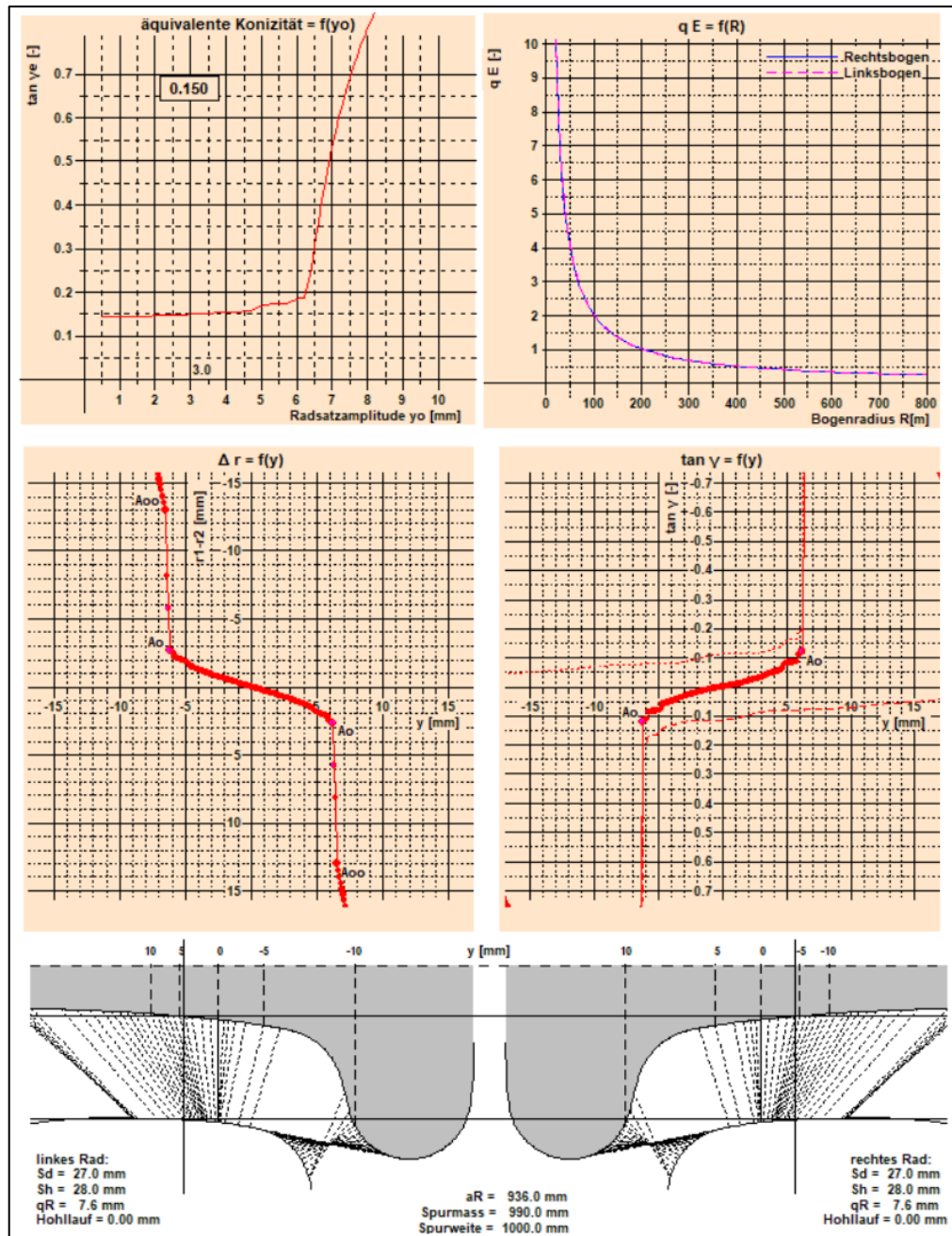
Abbildung 11: Unterschiedliche Paarungsmöglichkeiten von Rad- und Schienenprofilen und die 3 dazu verwendbaren Kontaktprogramme

### a) Theoretisches Radprofil gepaart mit theoretischem Schienenprofil

Je nach Anwendung und Bahn kommen oft unterschiedliche nominelle Schienenprofile mit in der Regel drei verschiedenen Einbauneigungen sowie unterschiedliche nominelle Radprofile zum Einsatz. Um nun die daraus resultierenden Profilpaarungen miteinander vergleichen zu können dienen vor allem die in *Abbildung 12* dargestellten berührungsgeometrischen Funktionen. Mit Ausnahme bei den Zuordnungen der Berührungspunkte (unten in *Abbildung 12*) ist es nun in diesen Diagrammen möglich, einerseits gleichzeitig unterschiedliche Radprofile auf nominellen Schienen mit unterschiedlichen Schienenein-

bauneigungen und unterschiedlichen Spurweiten darzustellen. Auf der anderen Seite besteht die Möglichkeit, ein einzelnes Radprofil auf unterschiedlichen nominellen Schienenprofilen darzustellen.

Als Beispiel sind in *Abbildung 11* ganz unten links die Radialstellungsindizes einiger nomineller Radprofile von Meterspurbahnen gepaart mit der Schiene 46E1 (Neigung 1:20) dargestellt. Darüber im Bild ist die Bogenverteilung einer Bahnstrecke aufgeführt. Die erwähnten verschiedenen Radialstellungsindizes sind in Abhängigkeit ihrer befahrbaren Mindestradien in der Bogenverteilung eingepflegt.



## b) Theoretisches Radprofil mit realem Schienenprofil

Wenn beispielsweise ganze Fahrzeugserien auf einem bestimmten geraden Streckenabschnitt systematisch ein ungünstiges Fahrverhalten in Form von selbsterregten Schwingungen zeigen und sich dieses Verhalten auf den übrigen Strecken nicht zeigt, so liegt die Ursache mit grosser Wahrscheinlichkeit am Gleis. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Fahrzeuge mit sogenannten verschleissangepassten Radprofilen ausgerüstet sind. In diesem Fall wird dieses Radprofil mit einer Stichprobe von Schienenprofilen (gemessen mit CALIPRI-Rail) dieses Streckenabschnittes oder mit den Messwagendaten des gesamten Streckenabschnittes gepaart. In der Regel können die Ursachen für dieses Verhalten

aufgrund der berührungsgeometrischen Grössen und deren Einflussparameter ermittelt und basierend darauf Abhilfemassnahmen getroffen werden. Auch für die Bögen können durch solche Paarungen Veränderungen an den Schienenprofilen aufgezeigt werden. Diese Veränderungen können eine Folge des Verschleisses oder einer fehlerhaften Schienenbearbeitung sein.

### c) Reales Radprofil mit theoretischem Schienenprofil

Analog zum Beispiel in **b)** zeigen nicht mehrere, sondern nur ein einzelnes Fahrzeug auf einem bestimmten geraden Streckenabschnitt ein ungünstiges Fahrverhalten in Form von selbsterregten Schwingungen. Dieses Verhalten kann nun durch unterschiedliche Gründe verursacht sein. Wenn am Fahrzeug selbst keine offensichtlichen Mängel erkennbar sind, die dieses Verhalten rechtfertigen, kann die Ursache in einer ungünstigen berührungsgeometrischen Veränderung an den Radprofilen liegen. Wenn die Veränderung an den Radprofilen erwartet wird, erfolgt die Paarung der realen Radprofile mit dem theoretischen Schienenprofil (zum Beispiel 46E1, Neigung 1:20, Spurweite 1000 mm). In der Regel kann die Ursache für dieses Verhalten aufgrund der berührungsgeometrischen Grössen und deren Veränderungen gegenüber denjenigen beim Nominalprofil festgestellt und durch Reprofilierung beseitigt werden. Diese Veränderungen können eine Folge verschiedener Verschleissformen oder weiterer Einflussfaktoren verursacht sein.

### d) Reales Radprofil mit realem Schienenprofil oder reale Radprofile mit realen Schienenprofilen

Die Unterscheidung zwischen der Einzahl und der Vielzahl von Profilen hängt nun davon ab, ob nur vereinzelte Profile vorliegen oder ob eine grosse bzw. sehr grosse Anzahl von Profilen verfügbar sind. Bei den Schienen stehen mittlerweile dank einem bei den Meterspurbahnen einsetzbaren Diagnosefahrzeugs reale Schienenprofile für ganze Streckennetze zur Verfügung. Es ist davon auszugehen, dass bei den Meterspurbahnen dank dem Einsatz von Überfahrmessanlagen in Zukunft auch repräsentative Stichproben von realen Radprofilen verfügbar sind. Damit lassen sich lauffleistungsabhängige Trends der geometrischen und berührungsgeometrischen Grössen der Fahrzeuge ermitteln und diese zielgerichtet mit den aktuellen Zuständen der Schienenprofile auf den gesamten Strecken paaren. Dafür sind jedoch im Gegensatz zu **a)** bis **c)** Auswerteprogramme erforderlich, welche das interaktive Arbeiten mit sehr grossen Datenmengen erlauben. In *Abbildung 11* rechts ist die äquivalente Konizität für ein neu entwickeltes Radprofil auf seiner Einsatzstrecke, gepaart mit den dort befindlichen realen Schienen, dargestellt.

Wie weiter unten gezeigt wird, sind mittlerweile für praktisch alle Meterspurbahnen Schweiz die aus lauftechnischer Sicht relevanten Streckendaten (Lage, Überhöhung und Höhe) sowie die diesen zugeordneten Fahrgeschwindigkeiten und die daraus ableitbaren fahrdynamischen Zielgrössen verfügbar. Damit lassen sich die realen berührungsgeometrischen Grössen mit diesen Daten verorten und aus diesen Verbindungen aus unterschiedlichen Gesichtspunkten bewerten. Weitere statistische Analysen der Daten und Korrelationen verschiedener Einflussgrössen zueinander unterstützen die Bahnen bei der Systembeherrschung und in der Folge bei der Erarbeitung der allenfalls notwendigen Massnahmen an Rollmaterial und Fahrweg.

In *Abbildung 11* (unten in der Mitte) sind die Auswerteprogramme aufgeführt, die für die unterschiedlichen Kombinationen von Rad- und Schienenprofilen zum Einsatz gelangen. Die *Abbildung 13* zeigt das Zusammenwirken der Auswerteprogramme in Verbindung mit grossen Datenmengen aus automatisierten Erfassungssystemen. Durch Überfahrmessanlagen stehen Fahrzeug- und Rad-scharf aktuelle leistungsabhängige Daten der Radprofile zur Verfügung. Die Diagnosefahrzeuge liefern zeit- oder lastabhängige Schienenprofile sowie die dazugehörigen Spurweiten. Da sich die Verschleissgrössen an den Rädern deutlich schneller entwickeln (Anzahl Radumdrehungen) als bei den Schienen (Anzahl Überrollungen) kann davon ausgegangen werden, dass unter Berücksichtigung des Verschleissfortschrittes die unterschiedlichen bei Rad und Schiene angewendeten Messintervalle vertretbar sind. Die genaue Zuordnung der Streckendaten zu den Schienenprofilen ist aus verschiedenen Gesichtspunkten erforderlich:

- der Radialstellungsindex  $q_E$  ist abhängig vom Bogenradius und ist abhängig von weiteren trasierungsabhängigen Einflussgrössen,

- die äquivalente Konizität ist massgebend für höhere Fahrgeschwindigkeiten auf geraden Streckenabschnitten und ist durch die Spurweiten sowie durch die Schienenabnutzung beeinträchtigt,
- der Schienenverschleiss (quasistatisch und dynamisch) ist trassierungsabhängig und sollte mit abnehmendem Bogenhalbmesser zunehmen (evtl. abhängig von der Kraftschlusssättigung),
- zunehmende Steigungen der Strecken erfordern höhere Traktionskräfte und bewirken dadurch höheren Fahrflächenverschleiss,
- usw.

Es wird davon ausgegangen, dass sich aus den Auswertungen der grossen Datenmengen statistisch abgesicherte und damit belastbare Trends zu den geometrischen und berührungsgeometrischen Grössen an Rad und Schiene ableiten lassen. Aus diesen lassen sich verschleissangepasste Profile ermitteln deren Eigenschaften sich mit Hilfe des Programms *Kontakt Meterspur CH* hinsichtlich weitergehender Einflussgrössen zu den kontaktmechanischen und lauftechnischen Auswirkungen abklären lassen. Zudem ergeben sich daraus notwendige Massnahmen an Fahrzeug und Fahrweg sowie Anforderungen in den lauftechnischen Teilen der Lastenhefte für die Fahrzeugbeschaffung.

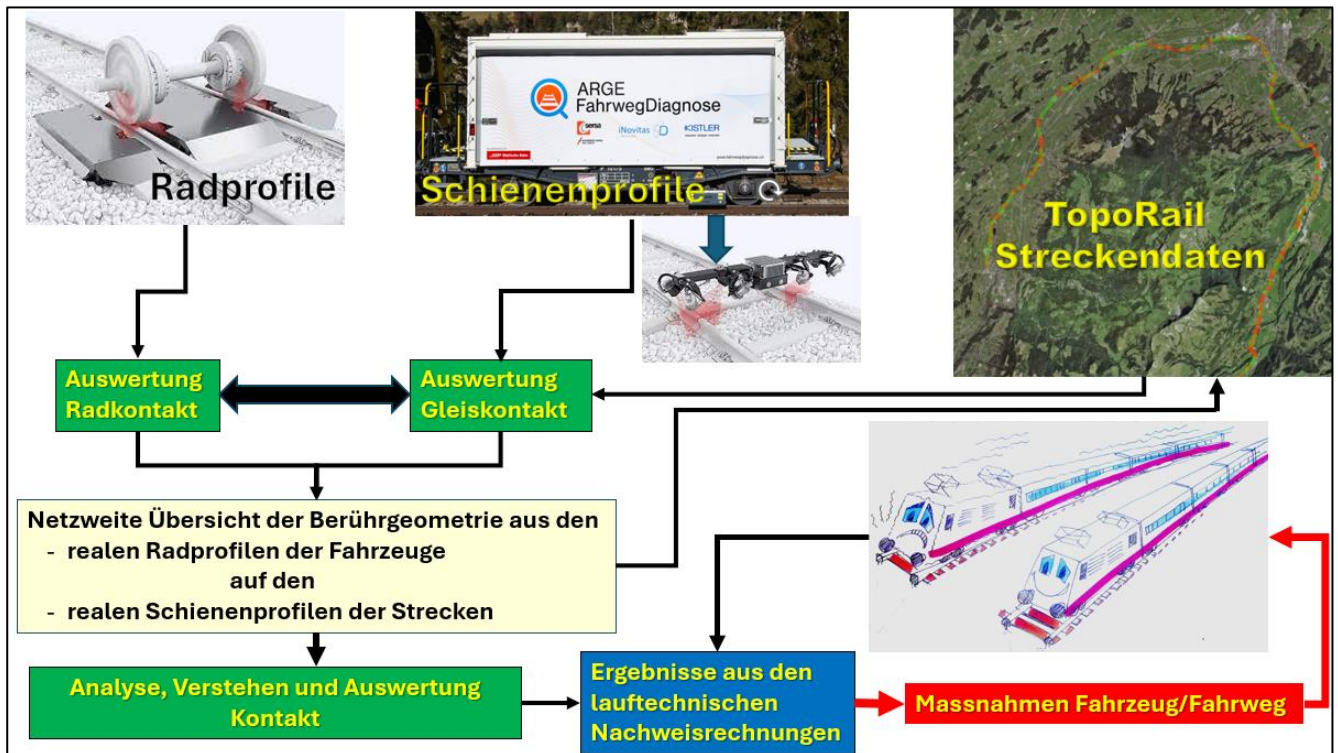


Abbildung 13: Zusammenwirken der berührungsgeometrischen Programme mit den Streckendaten und den lauftechnischen Charakteristiken der Fahrzeuge

## 6 Kontaktprogramme

Die drei in *Abbildung 13* aufgeführten Kontaktprogramme sind während nahezu dreissig Jahren entstanden und wurden aufgrund von im Laufe der Zeit bei Anwendungen anfallenden Erkenntnissen, durchgeführten Grundlagenuntersuchungen sowie Erfahrungen mit neuen Messsystemen laufend weiterentwickelt. Voraussetzungen dafür waren das Vorliegen von grossen Datenmengen wie sie durch intensives Messen von Einzelwerten auf digitaler Basis möglich sind, Lösungen von praktischen Problemstellungen wie zum Beispiel Einfluss von lärmarmen Bremssohlen auf den Radverschleiss, Erfassung und Bearbeitung von Schienenprofilen aus Messfahrzeugen über grössere Streckenlängen und von Radprofilen aus Überfahrmessanlagen, usw... Parallel dazu waren entscheidende Fortschritte bei der Einarbeitung des Umganges mit berührungsgeometrischen Grundlagen in die europäischen Normen (*EN 14363*<sup>8</sup> und *EN 15302*<sup>9</sup>) eine wichtige Voraussetzung.

### 6.1 Rad-Kontakt Meterspur CH

Das Programm *Rad-Kontakt* erlaubt die Auswertung sehr grosser Datenmengen, die sich für die Instandhaltung der Räder und Radsätze und für die Interaktion Rad-Schiene verwenden lassen. Im sogenannten Hauptfenster können verschiedene Daten ( $S_h$ ,  $S_d$ ,  $q_R$ , Radradien, Spurmasse, Indikatoren Radverschleiss) oder Profilformen von einzelnen Radsätzen ganzer Fahrzeuge über die Laufleistung, durch schnelles Durchklicken mit geschultem Blick in ihrem Trendverhalten beurteilt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, innerhalb kürzester Zeit Auswertungen für einen bestimmten Triebzug oder für ganze Triebzugserien die laufleistungsabhängigen Trends der verschiedenen Profil- und Verschleissparameter sowie der lauftechnischen Indikatoren vorzunehmen und in Berichtsform darzustellen.

Aus diesen Trends können in Verbindung mit den Schienenprofilen ganzer Strecken und in Absprache mit der Infrastruktur Grenzwerte einerseits für die Instandhaltung des Gleises bzw. der Schienen und andererseits für die Instandhaltung der Räder bzw. Radsätze der Fahrzeuge festgelegt werden.

Für die zukünftigen Arbeiten im Bereich der Radsatzdatenbanken muss beachtet werden, dass sämtliche möglichen Synergien zwischen diesen und dem Programm *Rad-Kontakt* genutzt und damit Doppelspurigkeiten vermieden werden.

#### 6.1.1 Hauptfenster im Rad-Kontakt

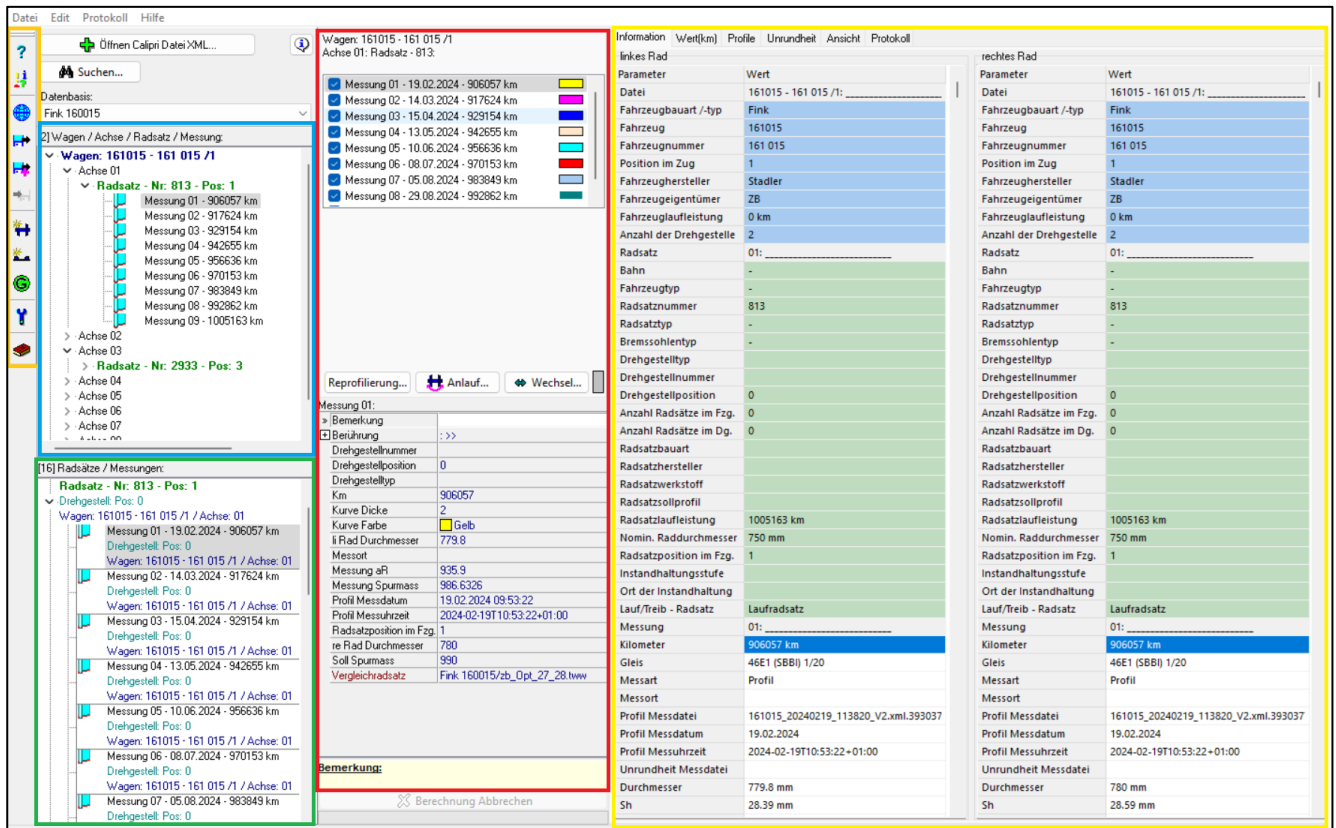
Die *Abbildung 14* zeigt das Hauptfenster von *Rad-Kontakt*:

- Die Schaltflächen des Hauptprogrammfensters sind orange umrahmt.
- Das Aufklappfenster der Fahrzeuge mit der Struktur «Wagen / Achse / Radsatz / Messung» ist blau umrahmt.
- Das Aufklappfenster der Radsätze mit der Struktur «Radsätze / Messungen» ist grün umrahmt.
- Der rot umrahmte Bereich dient zur Beschreibung und Erweiterung der ausgewählten Element-Eigenschaften (Wagen, Radsatz, Messung).
- Der gelb umrahmte Bereich enthält die folgenden Seiten:
  - «Informationen» - enthält Informationen über die ausgewählten Element
  - «Wert (km)» – Laufleistungsabhängige Entwicklungen der einzelnen Teile der Räder und des Radsatzes (Radradius, Spurmass, Abmessungen am Spurkranz, Anzahl km /  $\Delta D$  1mm)
  - «Profile» - es werden die Profile des ausgewählten Elements angezeigt
  - «Unrundheit» - diese Karte wird zurzeit in Ermangelung von entsprechenden Messdaten nicht verwendet (sie ist für die zukünftige Anwendung des Radrauheitsmessgeräts m|wheel der Firma Müller-BBM vorbereitet)
  - «Ansicht» - zeigt die geometrischen und Kontakt-Merkmale der ausgewählten Einheit an

<sup>8</sup> EN 14363: Bahnanwendungen - Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche

<sup>9</sup> EN 15302: Bahnanwendungen - Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie - Definitionen und Berechnungsmethoden

- «Protokoll» - es enthält Seiten mit grafischen Objekten für die Analyse und Darstellung der verschiedenen Eigenschaften von Radsätzen.



The screenshot shows the 'Protokoll' window in the RAILplus software. The interface is divided into several panes:

- Left Pane:** A tree view showing the hierarchy of data: 'Wagen / Achse / Radsatz / Messung'. It lists various measurements for different wheelsets and axes.
- Top Center Pane:** A list of measurements for a specific wheelset (Radsatz Nr. 813 - Pos. 1). It includes columns for measurement number, date, and distance.
- Bottom Center Pane:** A detailed view of the wheelset properties, including 'Reprofilierung...', 'Anlauf...', and 'Wechsel...'. It also shows a 'Bemerkung' (Remark) field.
- Right Pane:** A comparison of the left and right wheels (linkes Rad vs. rechtes Rad). It lists parameters such as 'Parameter', 'Wert', 'Fahrzeugbauart', 'Fahrzeug', 'Fahrzeugnummer', 'Position im Zug', 'Fahrzeughersteller', 'Fahrzeugeigentümer', 'Fahrzeugaufleistung', 'Anzahl der Drehgestelle', 'Radsatz', 'Bahn', 'Fahrzeugtyp', 'Radsatznummer', 'Radsatztyp', 'Bremssohlentyp', 'Drehgestelltyp', 'Drehgestellnummer', 'Drehgestellposition', 'Anzahl Radsätze im Fzg.', 'Anzahl Radsätze im Dg.', 'Radsatzbauart', 'Radsatzhersteller', 'Radsatzwerkstoff', 'Radsatzsollprofil', 'Radsatzlaufleistung', 'Nomin. Raddurchmesser', 'Radsatzposition im Fzg.', 'Instandhaltungsstufe', 'Ort der Instandhaltung', 'Lauf/Teib - Radsatz', 'Messung', 'Kilometer', 'Gleis', 'Messart', 'Messort', 'Profil', 'Profil Messdatei', 'Profil Messdatum', 'Profil Messuhrzeit', 'Unrundheit Messdatei', 'Durchmesser', and 'Sh'.

Abbildung 14: Teile des Hauptprogrammfensters im Rad-Kontakt

In Abbildung 15 sind einige Aspekte des Hauptprogrammfensters mittels Nummern hervorgehoben. Im Feld N°1 sind zwei Wagen oder im vorliegenden Fall zwei Triebzüge aufgeführt (deshalb mit [2] vermerkt, je ein FINK und ein KOMET).

Im Feld N°2 ist der Triebzug FINK 161 015 der Zentralbahn (ZB) aufgeführt (in der momentanen Version des Programms noch als Wagen bezeichnet). In diesem Feld könnten nun beispielsweise die Profilmessungen aller Finken der ZB eingelesen werden. In diesem Beispiel wurden nur 9 aufeinander folgenden Messungen aufgeführt. Ein FINK (hier die Nummer 161 015) enthält 8 Radsätze.

Im Feld mit N°4 könnten nun die weiteren Besonderheiten jedes Radsatzes dieses Zuges (z.B. Zahnrad, Triebad, Laufrad, ...) vermerkt werden. In den Feldern mit N°2 sind die einzelnen Messungen (hier aufgeklappt für Radsatz Pos.1) mit der Kilometerlaufleistung des Triebzuges 161 015 zur Zeit der jeweiligen Messung aufgeführt. Die einzelnen Radsätze (hier noch als Achsen bezeichnet) in N°3 können analog zum Radsatz 1 angeklickt werden und erscheinen dort ebenfalls mit den Laufleistungen des Fahrzeugs anlässlich der verschiedenen Messungen.

Im roten Feld mit N°2 sind die 9 Messungen von Radsatz 1 aufgeführt. Für die Darstellungen der Profile im Raster «Profile» im gelben Feld oben können die einzelnen Messungen im roten Feld N°4 «Kurve Farbe» mit unterschiedlichen Farben dargestellt werden. Im roten Feld mit N°5 «Reprofilierung» kann für das Profil jeder Messung ermittelt werden, wieviel der Radradius bei Reprofilierung auf das Nominalprofil (hier als Vergleichsradsatz aufgeführt) reduziert werden müsste. Beim Klicken auf N°6 «Anlaufwinkel» kann die Profilepaarung Rad-Schiene mit unterschiedlichen Anlaufwinkeln dargestellt werden.

In N°7 (linkes Rad) und N°8 (rechtes Rad) sind in den blau und grün hinterlegten Feldern, die für das linke und rechte Rad jeweils gleichen wählbaren Angaben hinterlegt. Die nicht ausgefüllten Felder können je nach Bedarf ausgefüllt oder leer gelassen werden (zum Beispiel bei Klotzbremse die Sohlenqualität). Darunter in den weissen Feldern werden Messwerte, wie zum Beispiel der Raddurchmesser, für das linke und rechte Rad aufgeführt.

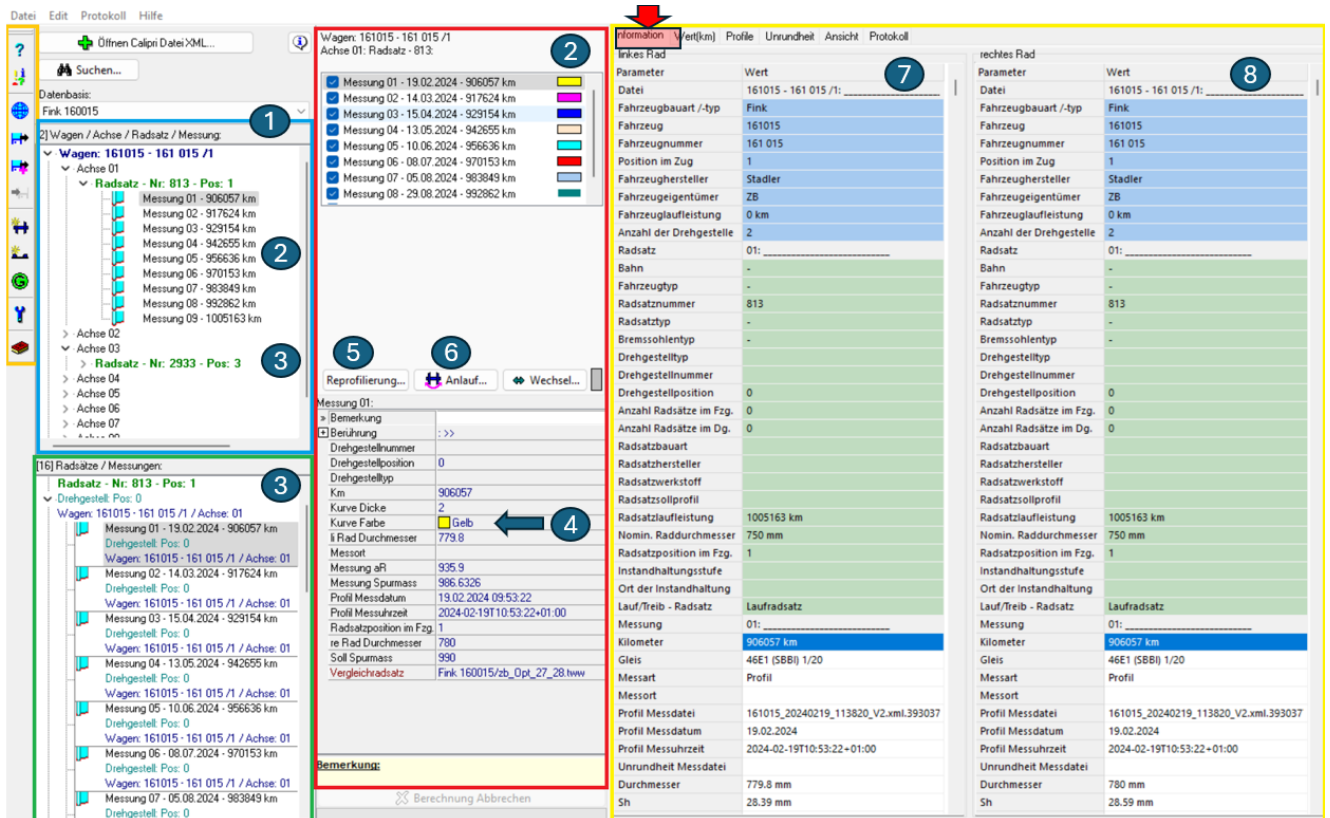


Abbildung 15: Weitere Besonderheiten in den Teilen des Hauptfensters

### 6.1.2 Darstellung der Ergebnisse im Hauptfenster

In Abbildung 16 ist ein Beispiel für das interaktive Darstellen von laufleistungsabhängigen Grössen der Radprofile, Radsatzdaten, Radradien und Verschleissindikatoren aufgeführt. Dieses Bild enthält die Entwicklung der Spurkranzhöhe für beide Räder in Diagrammform jeweils oben und in Tabellenform jeweils unten. Mit dem roten Pfeil kann das Fenster für die Auswahl der zu betrachtenden Grössen ausgewählt werden. Dieses Fenster ist für weitere interessierende Grössen erweiterbar. Diese Darstellungen erlauben einen laufenden Überblick zu den Trends bei den verschiedenen Einflussgrössen zur geometrischen und berührungsgeometrischen Interaktion der Radsätze.

Darunter in Abbildung 17 sind die gleichen Diagramme für die Spurkranzdicken und den Radradius dargestellt. Bei den Spurkranzdicken ist ein leichtes Ansteigen von  $S_d$  mit zunehmender Laufleistung festzustellen. Daraus können Rückschlüsse auf Verbesserungsmassnahmen getroffen werden. Zudem dient dieser Indikator für die Planung einer zustandsabhängigen Instandhaltungsmassnahme.

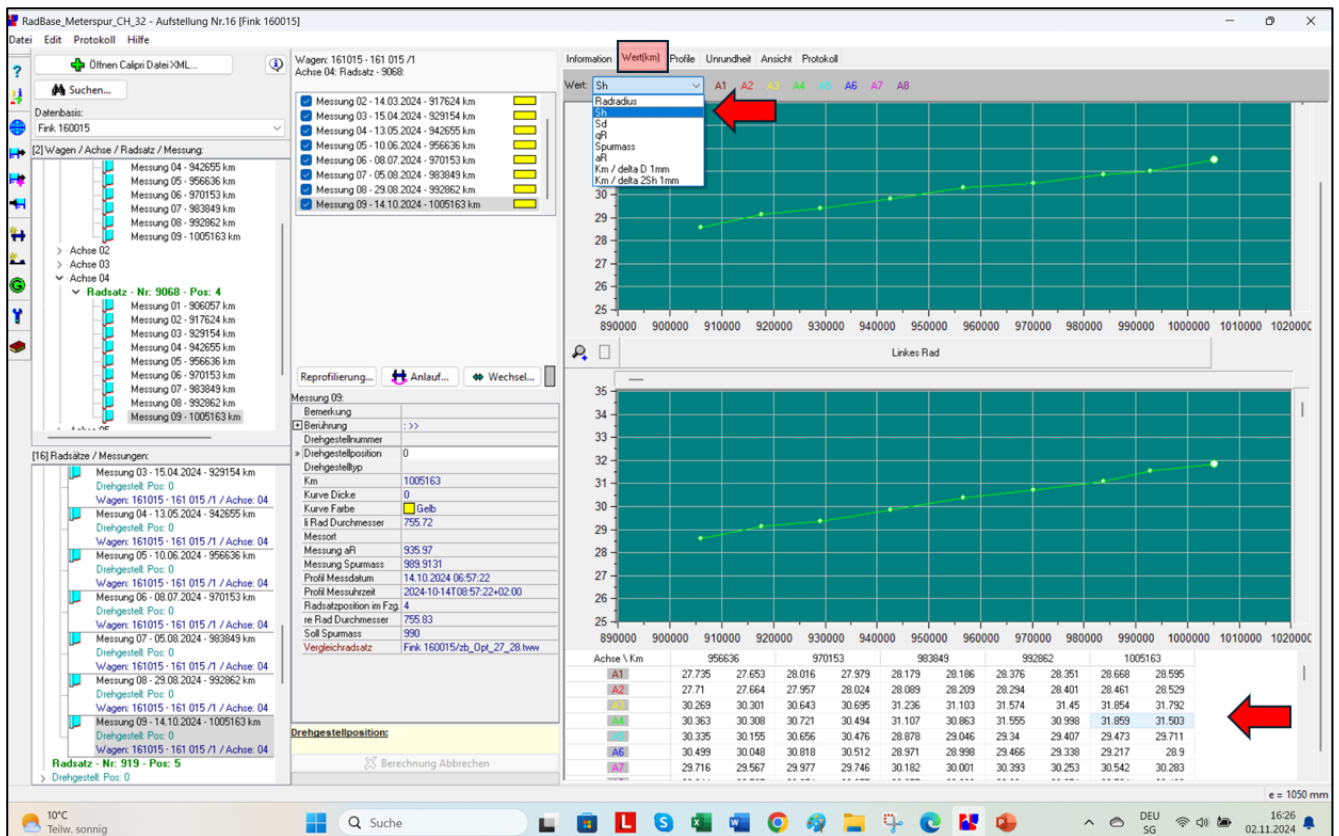


Abbildung 16: Entwicklung der Werte in Abhängigkeit der Laufleistung hier dargestellt für die Spurkranzhöhe  $S_h$  für einen Radsatz

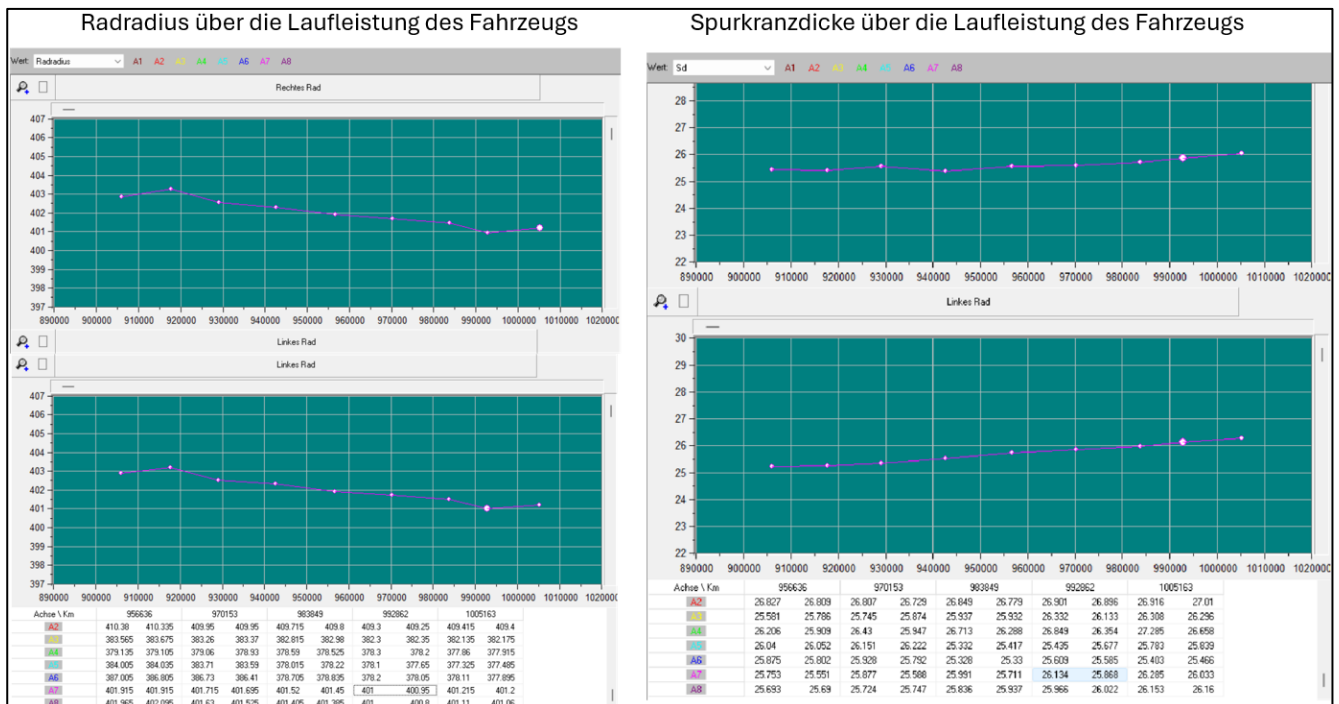


Abbildung 17: Entwicklung des Raddurchmessers und der Spurkranzdicke in Abhängigkeit der Laufleistung

In Abbildung 18 ist die Entwicklung der Radprofile und von deren Formen in Stufen beginnend beim Nominalprofil bis, im vorliegenden Falle, zu einer Laufleistung von rund 100'000 km dargestellt. In diesem Bild ist ersichtlich, dass praktisch kein Spurkranzverschleiss auftritt und der Verschleiss gleichmässig über den gesamten Laufflächenbereich von der Hohlkehle bis zur äusseren Radstirnseite erfolgt, die Form der Profilkontur erhalten bleibt und kein Hohllauf zu beobachten ist. Durch den fehlenden

Spurkranzverschleiss ist bei der Reprofilierung auf das Nominalprofil praktisch keine Reduktion des Raddurchmessers erforderlich (siehe *Abbildung 19*).

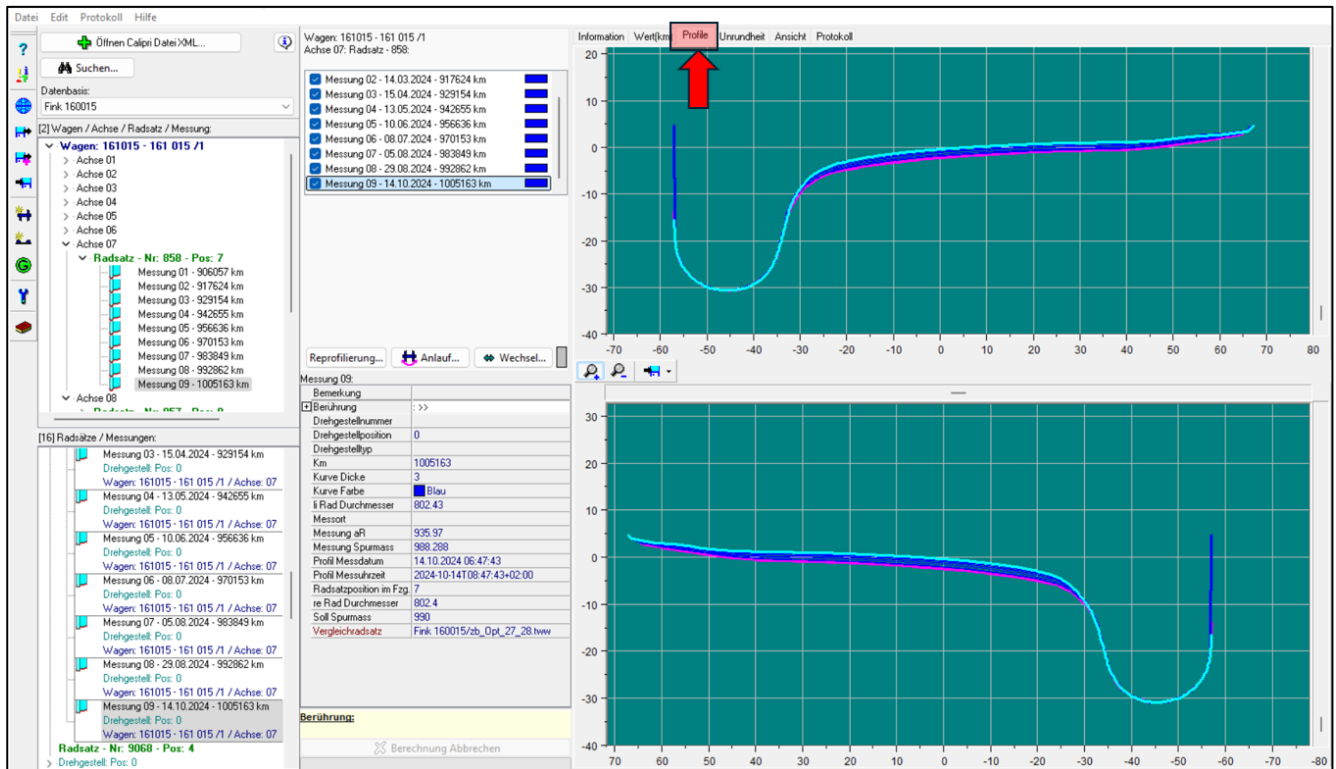


Abbildung 18: Entwicklung der Radprofile und deren Formen über der Laufleistung

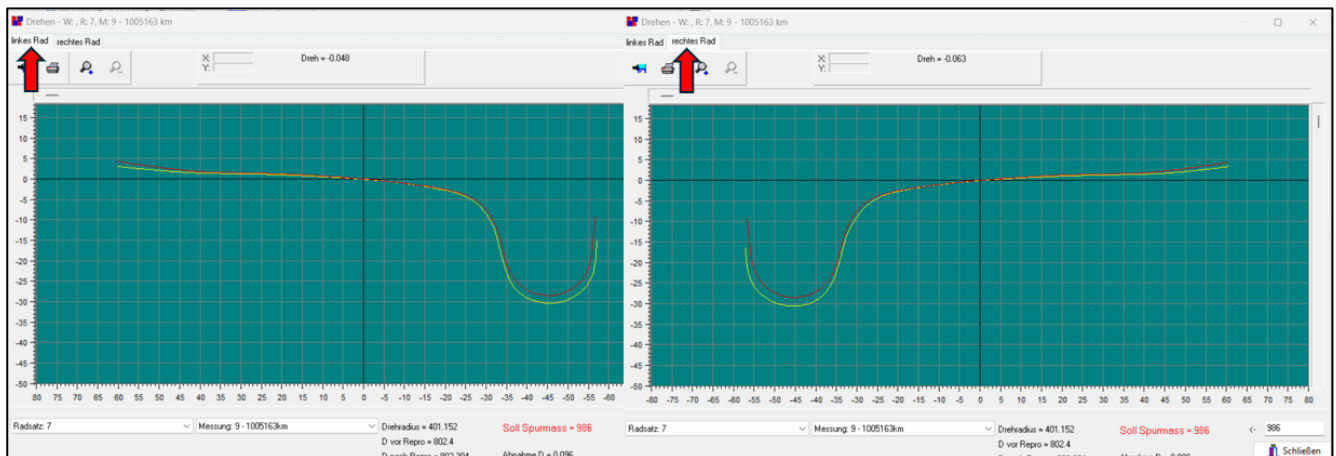


Abbildung 19: Zum Herstellen des Nominalprofils auf der Unterflurdrehbank notwendige Durchmesserreduktion

Im Register «Ansicht» sind verschiedene Möglichkeiten gegeben. In *Abbildung 20* sind für eine Profilpaarung die berührungsgeometrischen Funktionen dargestellt. Anstelle der äquivalenten Konizität wird in der Ansicht « $qE = f(R)$ » der Radialstellungsindex dargestellt. Auch hier kann die Ansicht wiederum interaktiv zwischen den verschiedenen Radsätzen und Messintervallen in schneller Folge variiert werden, um ein Gefühl für Trends zu erhalten oder um besondere Erscheinungsformen festzustellen, welche im Falle von statistischen Betrachtungen ausgesondert oder im Falle von Bedeutung vertieft zu analysieren wären.

Im Register «Verschleiss» (*Abbildung 21*) wird dessen Verlauf über der Lauffläche quantitativ dargestellt. Auch zeigt sich, wie schon oben bei *Abbildung 18*, der gleichmässige Verschleissabtrag von der Hohlkehle bis zur äusseren Radstirnseite und insbesondere das Fehlen eines Hohllaufs. Hier ist der Verschleiss zahlenmässig auf beiden Rädern desselben Radsatzes mit maximal 2 mm belegt und zudem gleichmässig verteilt.

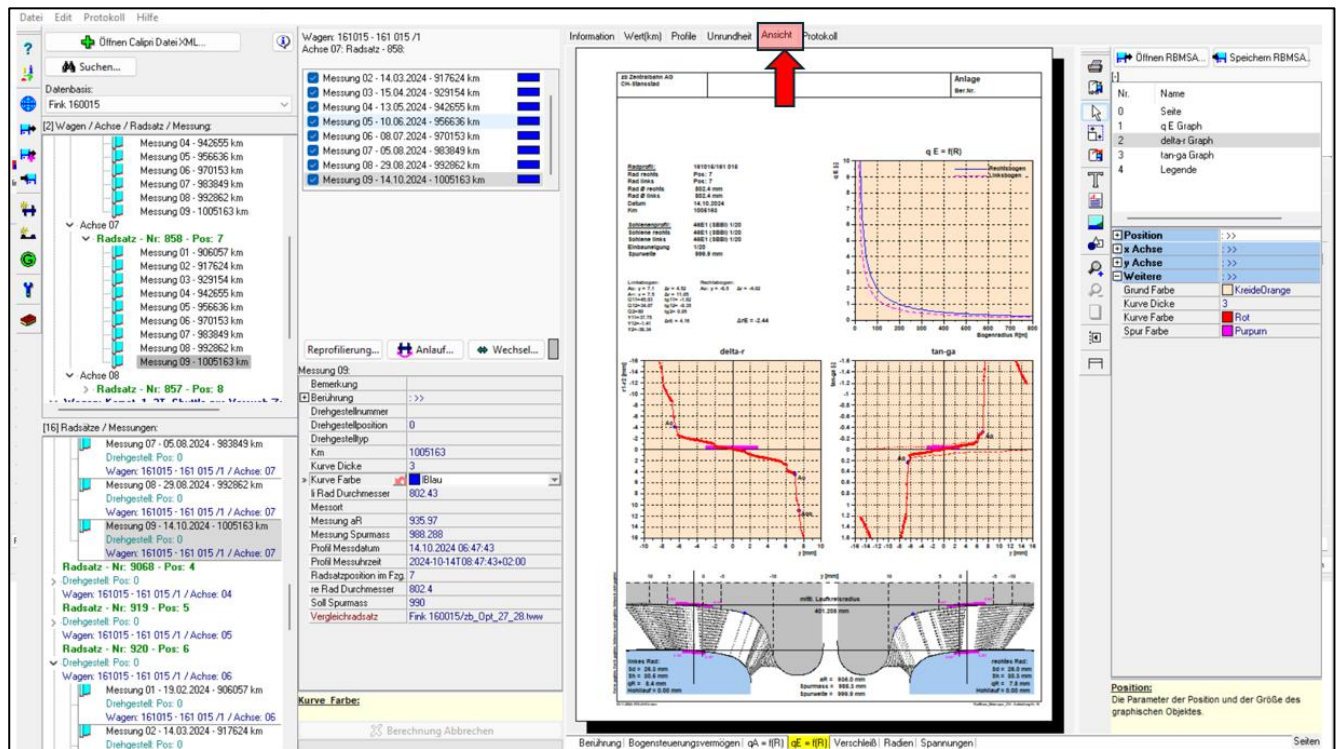


Abbildung 20: Möglichkeiten im Bereich des Reiters «Ansicht», hier der Register « $qE=f(R)$ » gelb hinterlegt

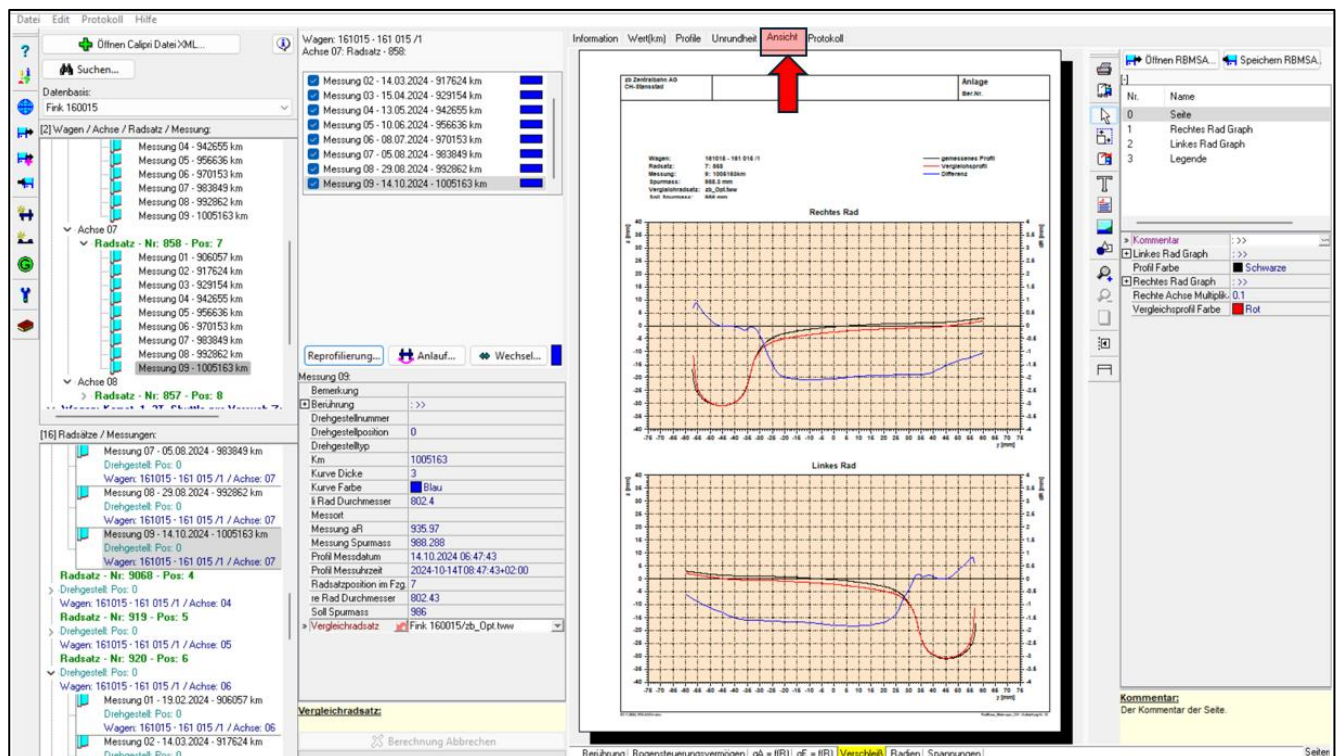


Abbildung 21: Darstellung Radverschleiss im Bereich des Reiters «Ansicht», hier der Register «Verschleiss» gelb hinterlegt

### 6.1.3 Erstellung von Protokollen

Anhand der oben dargestellten Hauptfenster ist es möglich sich interaktiv sehr schnell einen Überblick über das Verhalten der Fahrzeugflotte zu verschaffen. Im Hauptfenster steht nun bei der Wahl des Fensters «Protokoll» die Möglichkeit, die Gesamtheit der Daten im zeit- bzw. im laufleistungsabhängigen Bereich zu analysieren. Im Aufklappfenster der *Abbildung 22* links können lauftechnische Themenkreise und darunter in den Objekten verschiedene mögliche graphische Darstellungsformen ausgewählt werden. In *Abbildung 22* sind unter «Standard» die laufleistungsabhängigen Graphen der

Spurkränze sowie des Spurmasses eines Fahrzeugs aus der Betriebserprobung mit einem verschleiss-angepassten Radprofil dargestellt. Wenn Daten von mehreren Fahrzeugen einer Fahrzeugbauart oder von mehreren Fahrbauarten verfügbar sind, so können diese in der gleichen Art dargestellt werden.

Die darin auftretenden Diskontinuitäten sind auf Drehgestellwechsel oder Reprofilierungen zurückzuführen. Die unterschiedlichen Trendlinien bei der Spurkranzhöhe sind auf unterschiedliche Laufwerkstypen innerhalb dieses Triebzugs zurückzuführen. Die gute Spurkranzschmierung macht sich durch ein leichtes Anwachsen der Spurkranzdicke und des  $q_R$ -Masses bemerkbar. Als Folge davon vergrössert sich auch kontinuierlich das Spurmass. Die roten horizontalen Linien kennzeichnen die oberen und unteren Grenzmasse der betrachteten Rad- bzw. Radsatzparameter gemäss der *R RTE 29500*. Dieses Fahrzeug hat während der Datenerhebung rund 100'000 km zurückgelegt. Dabei fällt auf, dass die Spurkranzhöhe auch im schlechtesten Fall bei weitem nicht ihr Grenzmass erreicht und damit diesbezüglich ein sehr grosser Verschleissvorrat besteht.

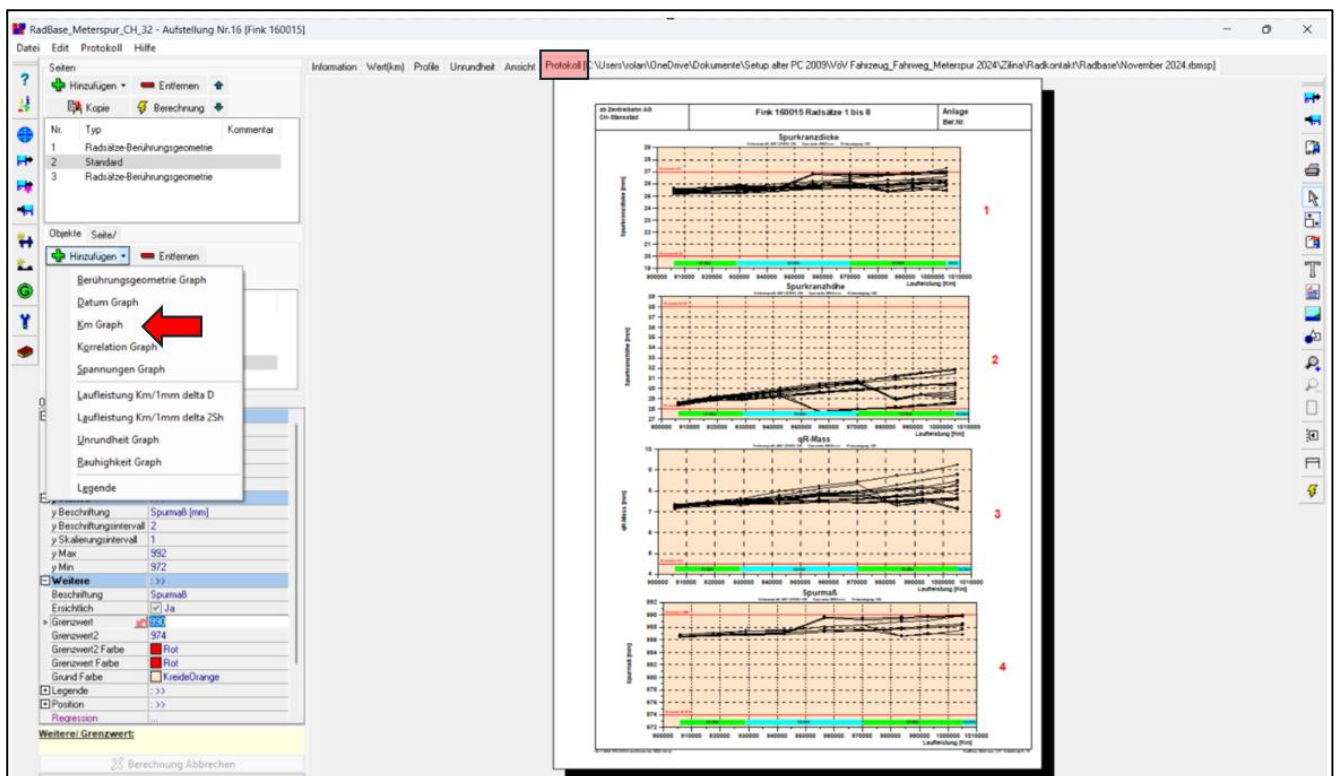


Abbildung 22: Darstellung von Parametern über die Zeit und über die Laufleistung

In *Abbildung 23* sind die berührungsgeometrischen Grössen aus insgesamt 9 aufeinanderfolgenden Messungen dargestellt. Auf der linken Seite sind die Paarungen mit der Schiene 46E1 mit 1:20 und auf der rechten mit der Schiene 36E3 mit 1:20 aufgeführt. Sowohl bei den Rollradiendifferenzen als auch bei den Radialstellungsindizes sind die Streuungen und die Verläufe für den Bogenlauf bei der Schiene 36E3 deutlich günstiger als bei der Schiene 46E1. Im Gegensatz dazu machen sich bei den äquivalenten Konizitäten für die 36E3 im Vergleich zur 46E1 deutlich grössere Streuungen und insgesamt höhere Werte bemerkbar. Die 36E3 stellt damit für die gleichen Radprofile gegenüber der 46E1 günstigere Werte für den Bogenlauf jedoch ungünstigere Werte für die höheren Fahrgeschwindigkeiten zur Verfügung. Diese Verhaltensweisen werden im Rahmen der Systemführerschaft mit Hinblick auf die Entwicklung der trassierungsabhängigen Schienenprofile weiterverfolgt. Dabei werden auch die kontaktmechanischen Aspekte mitberücksichtigt.

In *Abbildung 24* sind die statistischen Verteilungen der äquivalenten Konizitäten für die Radprofile auf den beiden Schienen anhand der Häufigkeitsverteilungen und der Summenhäufigkeiten nochmals quantitativ dargestellt. Deutlich macht sich in dieser Darstellungsform die Verschiebung der äquivalenten Konizitäten nach oben beim Profil 36E3 gegenüber dem Profil 46E1 bemerkbar. Es gilt daher für die Zukunft, die Tendenzen zu geringen Streuungen im Radialstellungsindex mit der 36E3 für den Bogenlauf und die niedrigeren Werte bei den Konizitäten mit der 46E1 für die höheren Geschwindigkeiten

in den entsprechenden Trassierungsbereichen nutzbar zu machen. Um diese Hypothesen zu erhärten sind jedoch insbesondere bei den Radsätzen grössere Stichproben erforderlich.

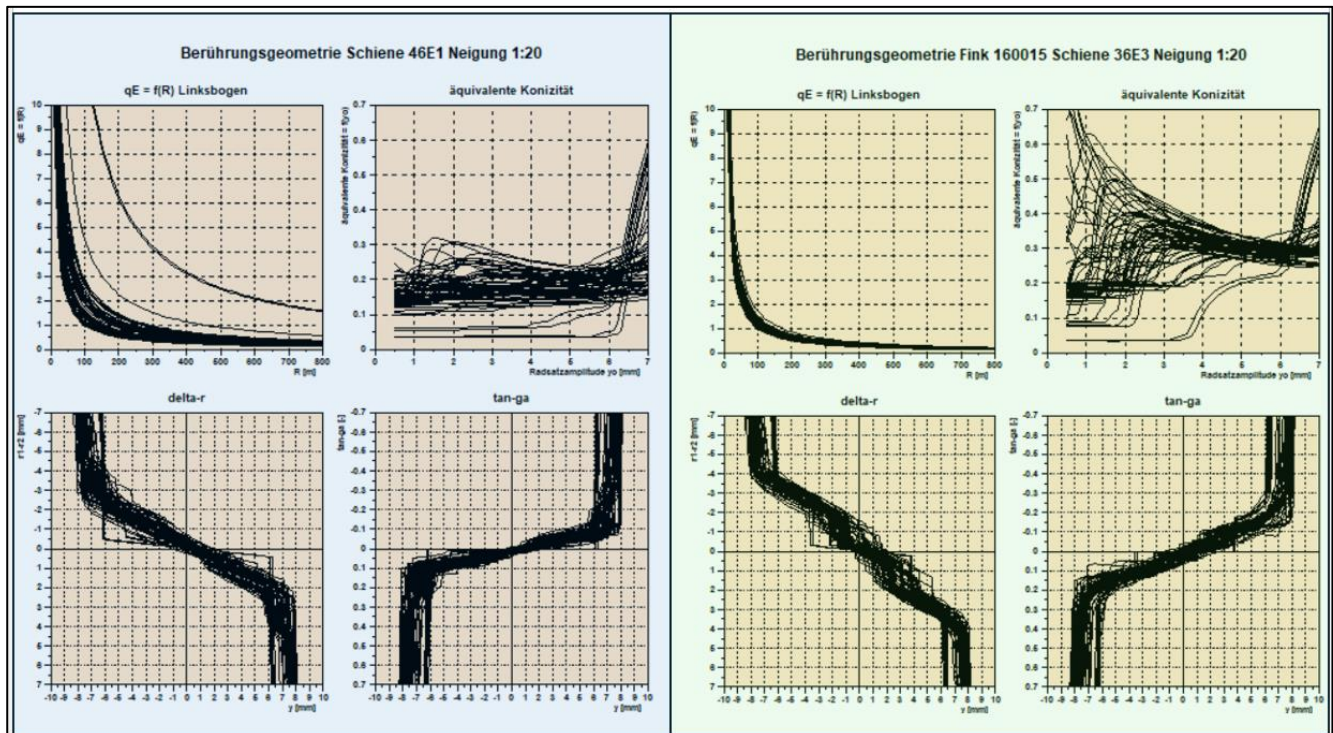


Abbildung 23: Verhalten der berührungsgeometrischen Grössen während der Betriebserprobung bei Paarung mit zwei unterschiedlichen Schienenprofilen (links 46E1 und rechts 36E3 beide mit Neigung 1:20)

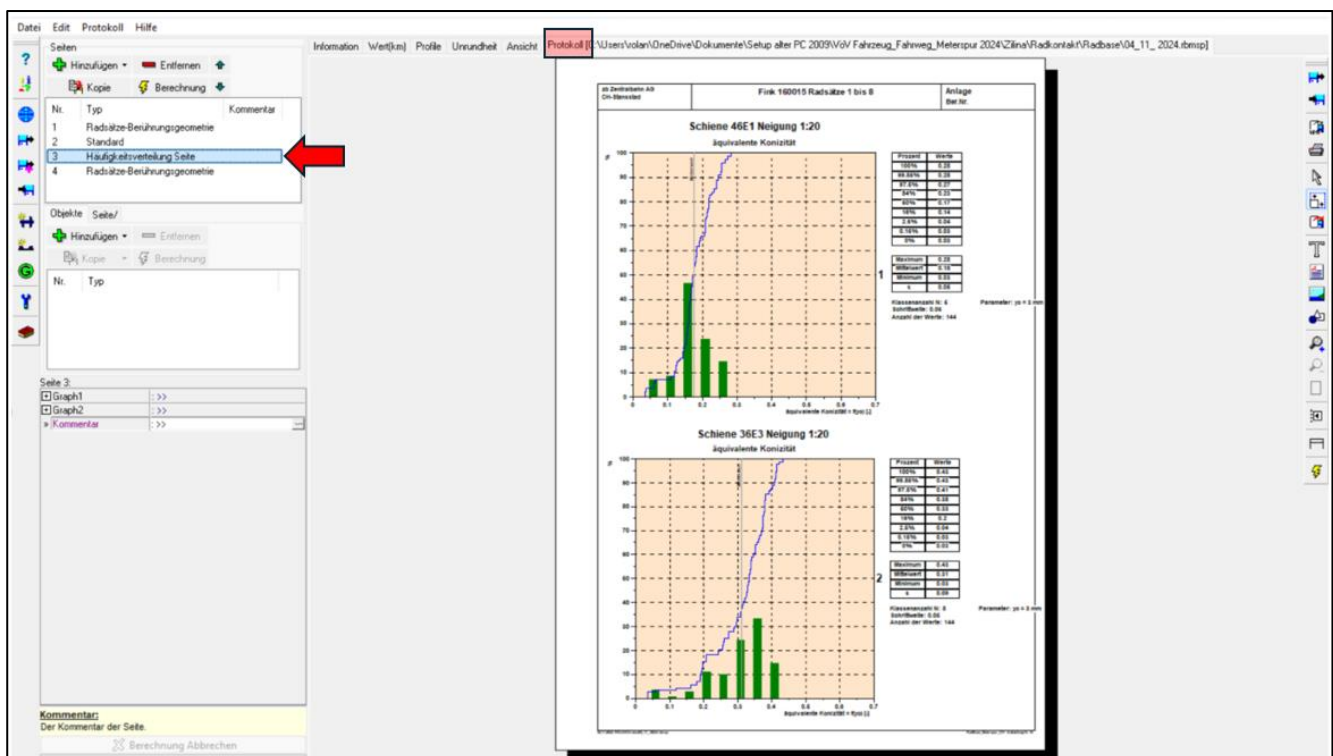


Abbildung 24: Darstellung der Häufigkeitsverteilung und der Summenhäufigkeiten der äquivalenten Konizitäten bei den beiden Schienenprofilen 46E1 und 36E3

Von Bedeutung ist auch das Verhalten der berührungsgeometrischen Grössen über die Laufleistung bzw. über die Zeit. Von der Normalspur ist bekannt, dass sich deren systematischen Veränderungen insbesondere bei den äquivalenten Konizitäten bemerkbar machen können. Je nach Fahrzeugbauart

und Einsatzspiegel kann dieser Parameter in Richtung höherer Werte anwachsen oder sich konstant verhalten. Im Trend scheint sich dieser Parameter beim hier betrachteten Fahrzeug unabhängig vom Schienenprofil konstant zu verhalten. Die Streuungen sind eher auf Eingriffe bei der Instandhaltung zurückzuführen. Im vorliegenden Falle sind diese durch Drehgestellwechsel und Reprofilierungen und die dabei aufgebrachten flachen Radprofile (*RTE A*) zurückzuführen. Der starke Anstieg der Konizität beim Radprofil *RTE A* ist auf die Verschleissanpassung des Radprofils im Betriebseinsatz zurückzuführen.

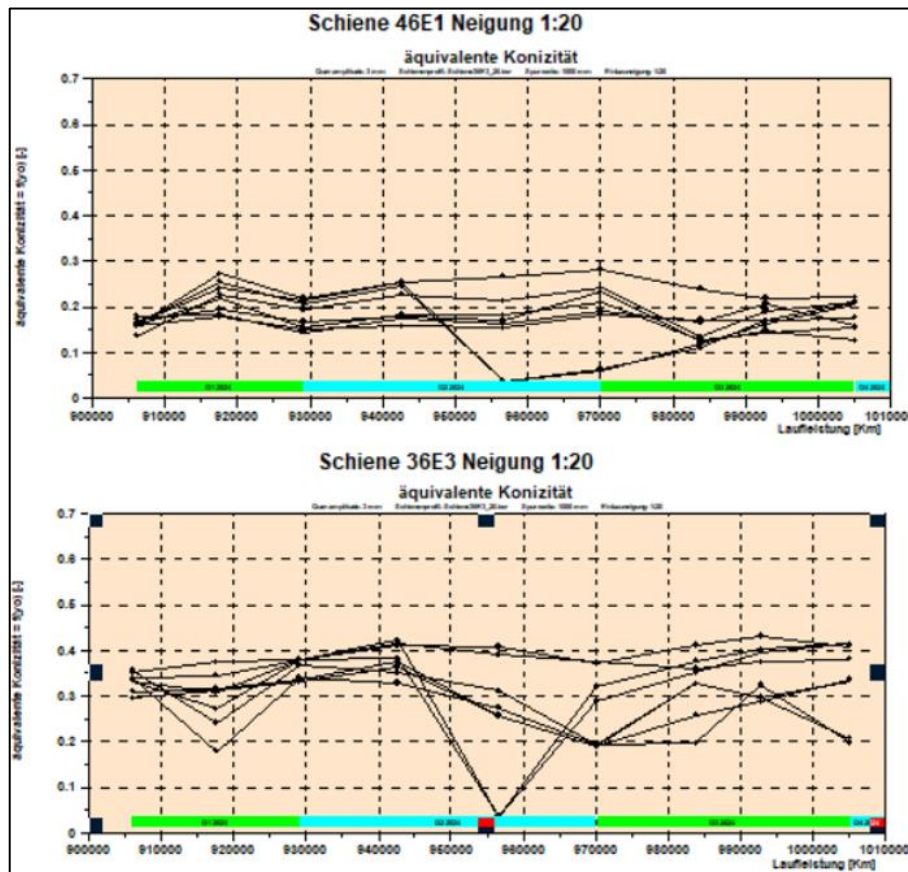


Abbildung 25: Verlauf der äquivalenten Konizität über die Laufleistung bzw. über die Zeit

## 6.2 Gleis-Kontakt Meterspur CH

Das Programm *Gleis-Kontakt* erlaubt die Auswertung sehr grosser Datenmengen, die für die Instandhaltung der Schienen und Gleise und für die Interaktion Rad-Schiene verwendet werden können. Im sogenannten Hauptfenster können verschiedene Daten (aus einer Auswahl von rund 129 verschiedenen Einflussgrössen) oder Profilformen von einzelnen Schienen ganzer Strecken, durch schnelles Durchklicken und auf einen Blick, in ihrem Trendverhalten beurteilt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, innerhalb kürzester Zeit Auswertungen und Statistiken für einen bestimmte Strecke zu den Gleisparametern (Schienenneigungen, Spurweiten, Schienenverschleiss, usw.) sowie in Verbindung mit Radprofilen Indikatoren für die Wechselwirkung vorzunehmen und in Berichtsform darzustellen.

Aus diesen Trends können in Verbindung mit den Schienenprofilen ganzer Strecken und in Absprache mit der Infrastruktur Grenzwerte einerseits für die Instandhaltung des Gleises bzw. der Schienen und andererseits für die Instandhaltung der Räder bzw. Radsätze der Fahrzeuge festgelegt werden.

### 6.2.1 Hauptfenster im Gleis-Kontakt

In *Abbildung 26* ist das Hauptfenster des Programms *Gleis-Kontakt* dargestellt. Bevor mit dem Programm gearbeitet werden kann, müssen zunächst die dafür notwendigen Gleis- bzw. Schienendaten sowie die Streckendaten eingelesen werden. Im vorliegenden Beispiel sind die Schienenprofile und Streckendaten der Strecke Landquart – Sagliains verwendet worden. In einem nächsten Schritt werden die für die Betrachtungen auf diesen Strecken interessierenden Radprofile eingelesen und deren Berührungen mit den Gleis- bzw. Schienendaten durchgeführt. Bevor die Berechnungen durch Öffnen des

Fensters «Berechnung» im grünen Bereich N°1 der Menüleiste gestartet werden können, müssen in diesem Fenster insbesondere die Radsatzdaten (Radsatzlast, maximale Querverschiebungen der Radsätze im Gleis, usw.) festgelegt werden.

Nach dem Start der Berechnungen werden alle ausgewählten Radprofile im roten Fenster N°2 mit allen Schienenprofilen der ausgewählten Strecke berechnet. Es wurde gemeinsam mit dem Lieferanten der Schienenprofile festgelegt, dass jeweils auf jedem Meter der Strecke ein Schienenquerschnitt für die Untersuchungen berücksichtigt wird. Diese Profile sind mit aufsteigender Kilometrierung unter Berücksichtigung zusätzlicher für die Auswertung notwendiger Daten wie Spurweite und Schienenneigungen im goldfarbenen Bereich N°7 aufgeführt. Auf der 54 km langen Strecke sind durch den Messwagen insgesamt 52'018 Schienen erfasst worden wovon 94.4 % auswertbar waren (mit blauen Punkten jeweils im linken Bereich angedeutet). Bei den nicht auswertbaren Schienenprofilen handelt es sich vor allem um solche, die in den Bereichen von Weichen und eingebetteten Gleisen liegen. Für jeden Schienenquerschnitt werden in N°7 die Schienenneigungen der linken und rechten Schienen sowie die Spurweiten aufgeführt. Im vorstehenden Fall wurden vier verschiedenen Radprofile auf die Strecke Landquart – Sagliains gelegt und mit den erfassten Schienenprofilen gepaart (siehe rotes Fenster N°2).

Nach beendeten Berechnungen können im dunkelblauen Fenster N°3 verschiedene berührungsgeometrische und kontaktmechanische Darstellungen ausgewählt werden. Im vorstehenden Falle (*Abbildung 26*) ist in N°3 die Standarddarstellung aus der Auswahl im purpurfarbigen Fenster N°8 ausgewählt worden. In dieser Darstellung «Standard» sind die berührungsgeometrischen Funktionen und die Berührungspunktzuordnungen aufgeführt. Darin können weitere Darstellungsformen wie Bogensteuerungsvermögen, Radialstellungsindex, Schienenverschleiss und Radverschleiss dargestellt werden.

In *Abbildung 27* ist für das Radprofil W03 der RhB bei km 29.598 der Strecke die Standarddarstellung links und der Radialstellungsindex  $q_E$  rechts dargestellt. Werden in den Seiten im Fenster N°9 mit in Diagrammform über die gesamte Strecke besondere Verhaltensweisen festgestellt, so können diese durch gezielte Auswahl von Darstellungsmöglichkeiten aus dem Fenster N°8 analysiert werden.

In der senkrechten hellblauen Leiste N°4 besteht die Möglichkeit, für jede Berührpaarung das Verhalten und den Aufenthaltsort der Berührungspunkte durch Querverschiebung des Radsatzes auf dem Gleisquerschnitt zu verfolgen und zu analysieren sowie in Abhängigkeit der Radsatzlast die Kontaktflächen und deren Grössen sowie die Flächenpressungen und Tangentialspannungen in den Kontaktzonen darzustellen. Im Weiteren lassen sich die Flächenpressungen und deren Verteilungen über die Kontaktflächen, die geometrischen Kräfte und die Tangentialkräfte berechnen und anschaulich darstellen.

Durch Betätigen des violetten Fensters N°9 erscheinen in wählbarer Auflösung auf mehreren Seiten analoge Darstellungen (Diagramme mit ausgewerteten Parametern auf der Ordinate und der Streckenkilometrierung auf der Abszisse) über die gesamte Streckenlänge. Dabei können Verläufe aus bis zu 129 verschiedenen Parametern ausgewählt werden. Darunter fallen zum Beispiel Spurweiten, Spurspiele, äquivalente Konizitäten, Radialstellungsindizes, Schienenneigungen, Fahrflächenneigungen, Schienenverschleissgrössen (W1, W2, W3, Fläche) usw. Im braunen Fenster N°5 können beliebige nominelle oder aus dem *Rad-Kontakt* stammende verschlissene Radprofile eingelesen werden.

Diese können in unterschiedlichen Arten für deren Verständnis und Weiterverarbeitung dargestellt werden. Das gelbe Fenster N°6 enthält verschiedene wichtige Funktionen für

- die Entwicklung von verschleissangepassten trassierungsabhängigen Schienenprofilen und deren Vergleich mit Nominalprofilen,
- streckenweise geolokalisierte Informationen über verschiedene Einflussparameter wie äquivalente Konizitäten und deren Zuordnungen zu den Trassierungsgegebenheiten und Fahrgeschwindigkeiten, Radialstellungsindizes, Schienenverschleiss (an Fahrkanten, Schienenflanken, Fahrflächen), usw.
- Übertragung von Grössen verschiedener Daten aus der gesamten Strecke für deren gezielte Weiterverarbeitung in andere Auswerteprogrammen (zum Beispiel Excel),
- usw.

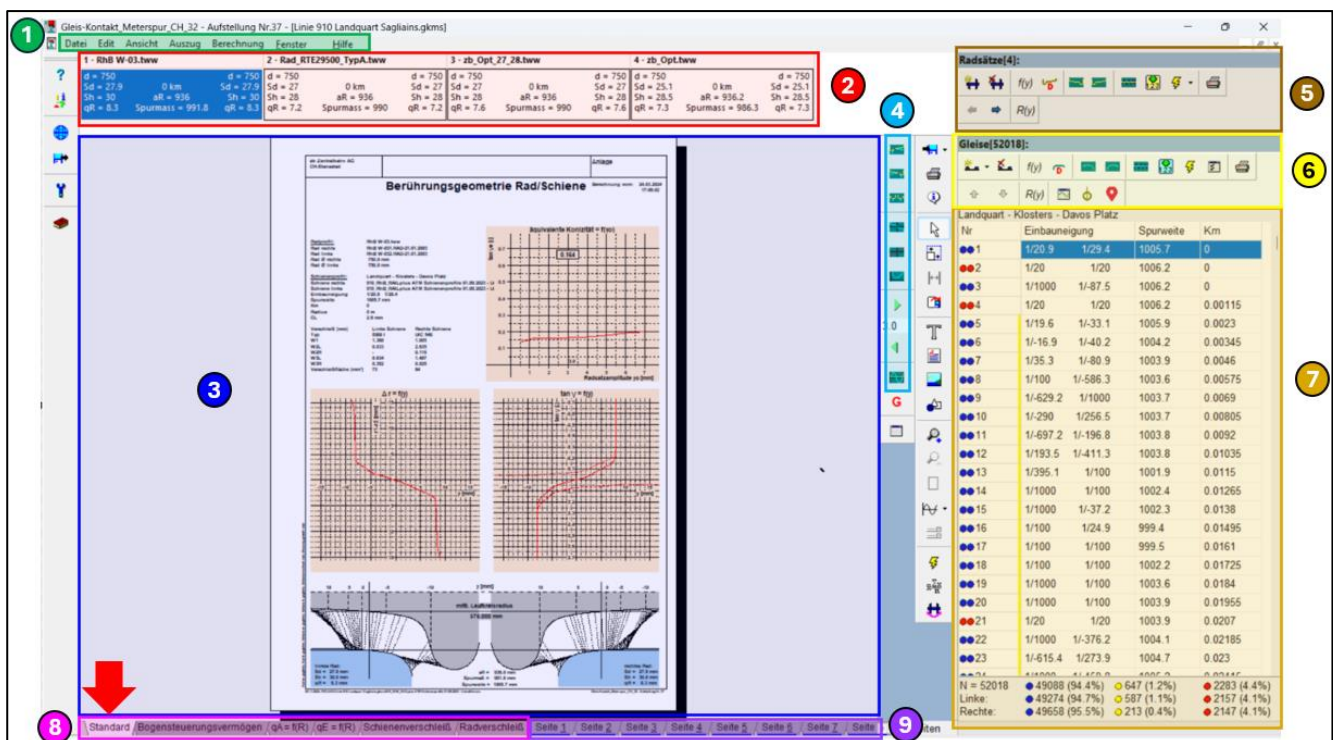


Abbildung 26: Teile des Hauptprogrammfensters im Gleis-Kontakt

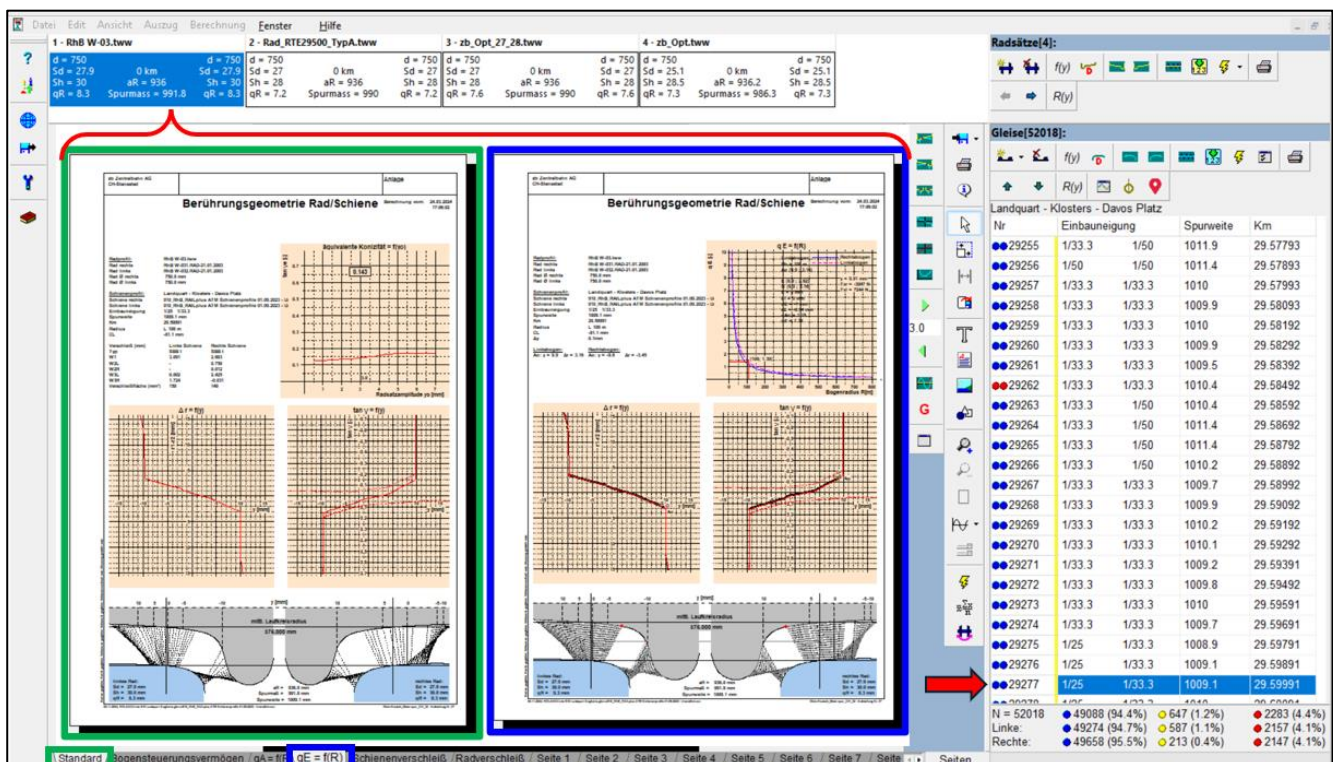


Abbildung 27: Darstellung der berührungsgeometrischen Funktionen für einen bestimmten Schienenquerschnitt

In den ausgewählten Darstellungen in Abbildung 27 unten sind die Berührungspunktverteilungen an den bei Paarung des nominellen Radprofil der RhB W03 mit den realen Schienen bei Kilometer 29.59991 der RhB-Strecke Landquart – Sagliains dargestellt. Es handelt sich um einen Linksbogen mit Bogenradius  $R=108$  m. Für das Radprofil W03 wird der Radialstellungsindex  $q_E=1$  knapp nicht erreicht.

In *Abbildung 28* sind dazu an den bogeninneren N°3 und bogenäusseren N°2 Rädern die Paarungen mit den Berührungspunkten bei der für diesen Bogen noch möglichen Querverschiebung des Radsatzes im Bogen dargestellt (in N°1 die roten Punkte).

Ganz oben sind für die beiden Paarungen die Durchdringungslinien, die Kontaktflächen und die Flächenpressungen dargestellt. Die Flächenpressungen bzw. maximalen Normalspannungen werden mit der Hertz-Methode berechnet. Hier sind sie für die maximale Querschiebung des Radsatzes auf dem Gleis ermittelt. Die maximalen Flächenpressungen können jedoch für einzelne Paarungen für den gesamten Bereich der möglichen Radsatzquerverschiebungen berechnet und zusammen mit den entsprechenden Grössen der Kontaktflächen in Diagrammen anschaulich dargestellt werden (siehe zum Beispiel *Abbildung 61*).

In *Abbildung 28* sind die mittleren und maximalen Flächenpressungen, Abmessungen der ellipsenförmigen Kontaktflächen mit ihren Abmessungen und Flächeninhalten aufgeführt. Die hier aufgeführten Ergebnisse beruhen auf einem Anlaufwinkel von 0°. In den Kontaktprogrammen können jedoch auch Darstellungen mit beliebig wählbaren Anlaufwinkeln berücksichtigt werden.

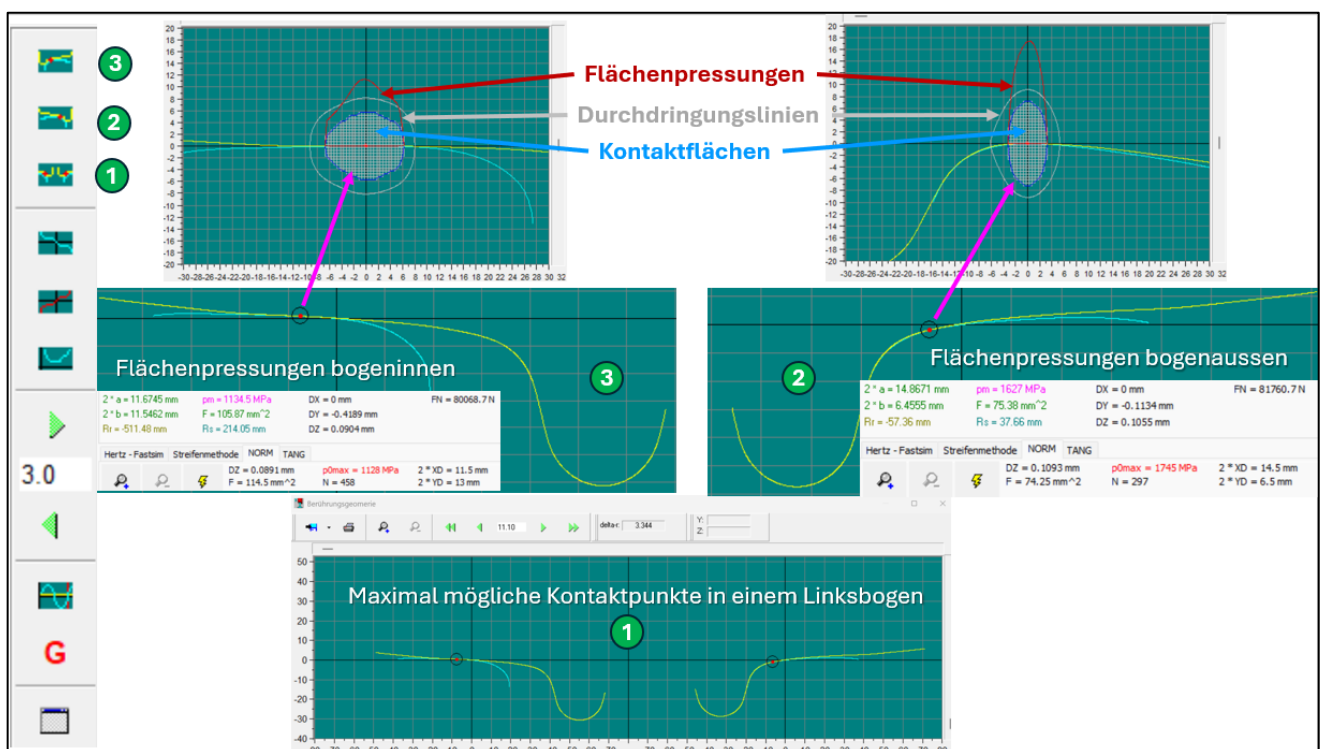


Abbildung 28: Berührungspunkte Radprofil W03 der RhB mit Schiene 46E1 in einem Linksbogen, Kontaktflächen und Flächenpressungen bei der einer Radsatzlast von 16 Tonnen

In *Abbildung 29* sind die Verläufe von  $q_E$  in Abhängigkeit vom Bogenradius für die beiden Radprofile W03 und RTE A gepaart mit der realen Schiene beim Streckenkilometer km 29.599 dargestellt. Für beide Fälle wird die Anforderung des Radialstellungsindex für diesen Bogen nicht erfüllt. Im Linksbogen mit  $R=108 \text{ m}$  stellt sich beim Radprofil W03 ein  $q_E$  von 1.39 und für das Radprofil ein solchen von 6.21 ein. Dies, obschon diese Betrachtungen ohne Anlaufwinkel durchgeführt werden und sich der Radsatz in radialer Einstellung zum Gleis befindet. Die Grösse der Nichterfüllung äussert sich in den unterschiedlichen Grössen der  $T_x$ -Kräfte (Kraftschlusskräfte in der Schienenlängsrichtung). Die  $T_x$ -Kräfte werden mit der «Fastsim»-Methode<sup>10</sup> berechnet. Diese nehmen mit zunehmendem  $q_E$  zu, wie dies in *Abbildung 29* für die beiden unterschiedlichen Radprofile ersichtlich ist. Das heisst, dass sich auch bei

<sup>10</sup> Lack T., Gerlici J.: The FASTSIM Method Modification to Speed up the Calculation of Tangential Contact Stresses between Wheel and Rail, Manufacturing Technology, volume 13, issue 4, pages 486-492, 2013

absoluter Radialeinstellung der Radsätze in Abhängigkeit der Überschreitung des Radialstellungsindex  $q_E=1$  hohe Kraftschlusskräfte in der Längsrichtung einstellen können. Diese bewirken in diesem Fall jedoch ein Moment auf den Radsatz welcher bei diesem seine Anlaufwinkel zu erhöhen versucht. Bei gewissen Laufwerken deren Wirkprinzipien auf der «Selbststeuerung» beruhen, hat dies deshalb eine Erhöhung des Anlaufwinkels zur Folge. Mit einem leicht verbesserten Radprofil gegenüber dem W03 der RhB und einer Anpassung der bogeninneren Schiene dürfte für diesen Bogen der Radialstellungsindex die Erfordernisse für eine Selbststeuerung erfüllt werden können.

Diese Hypothese wird durch die Berührungspunktlagen in *Abbildung 30* erhärtet. Bei beiden Paarungen bewegen sich die Berührungspunkte bogeninnen kaum in die Richtung der äusseren Radstirnseite und tragen damit nicht zum Abbau der jeweiligen Raddurchmesser und damit zur Erhöhung der Raddurchmesserunterschieden bei. Zudem kann eingesehen werden, dass die das Gegenmoment produzierenden Tangentialkräfte  $T_x$  beim Radprofil RTE A gegenüber dem Radprofil W03 beim linken Rad um den Faktor 2.4 und beim rechten Rad um den Faktor 5.9 höher liegen. Bei Verwendung des Radprofils RAILplus\_v1A/28.5/25 liegen diese Faktoren bei 5.3 bzw. 14.5. In allen Fällen entsteht bei Paarung mit diesem Schienenprofil (über die gesamte Bogenlänge) ein rückwärts gerichtetes Moment was zu einer Erhöhung des Anlaufwinkels führen würde und damit die Selbststeuerung verhindert.

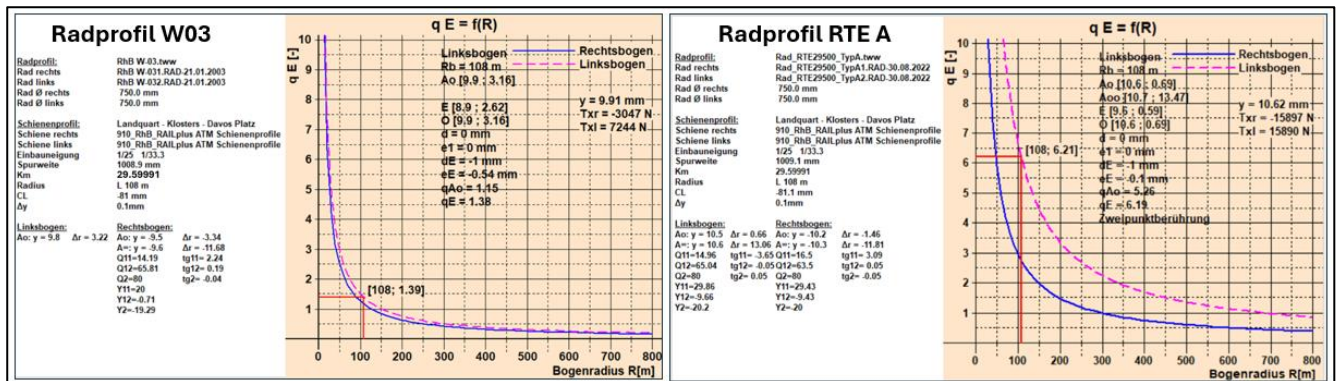


Abbildung 29: Radialstellungsindizes für die beiden Radprofile W03 und RTE A und daraus für die Raddurchmesser 750 mm und die Schienenprofile bei km 29.599 für eine Radsatzlast von 16 Tonnen ermittelten Kraftschlusskräfte

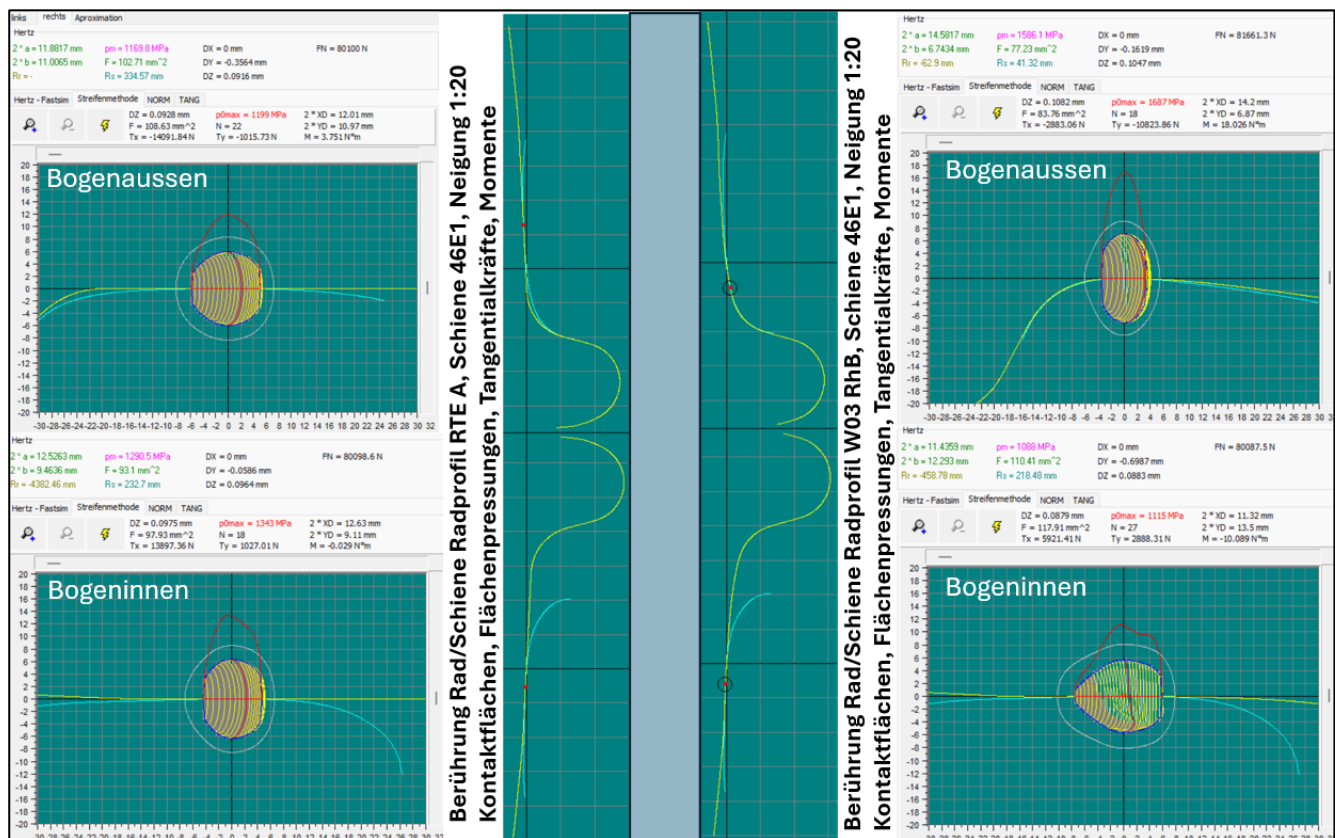


Abbildung 30: Berührungspunkte (Bildmitte) und Berührflächen mit den Flächenpressungen sowie den Tangentialkräften jeweils links und rechts daneben für die beiden Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen bei km 29.599

Im Bereich N°8 der Abbildung 26 lassen sich im Fenster «Schienenverschleiss» die Verschleisszustände der jeweils rechten (hier bogen aussen) und linken (hier bogen innen) Schienen nebeneinander einblenden und betrachten sowie die Verschleissgrössen W1, W2 und W3 herauslesen (siehe Abbildung 31). Letztere sind jeweils auch im Fenster «Standard» als Zahlenwerte aufgeführt (siehe zum Beispiel die Standarddarstellung in N°3 der Abbildung 26). In roter Farbe ist das Nominalprofil hinterlegt. Dieses wird durch das Kontaktprogramm selbst erkannt und dessen Einbauneigung wird ermittelt sowie in der Tabelle daneben aufgeführt. Die Spurweiten werden aus den gelieferten Schienendaten übernommen. In blauer Farbe ist der auf der rechten Ordinate skalierte Verlauf des Verschleisses über den Schienenkopfquerschnitt aufgetragen.

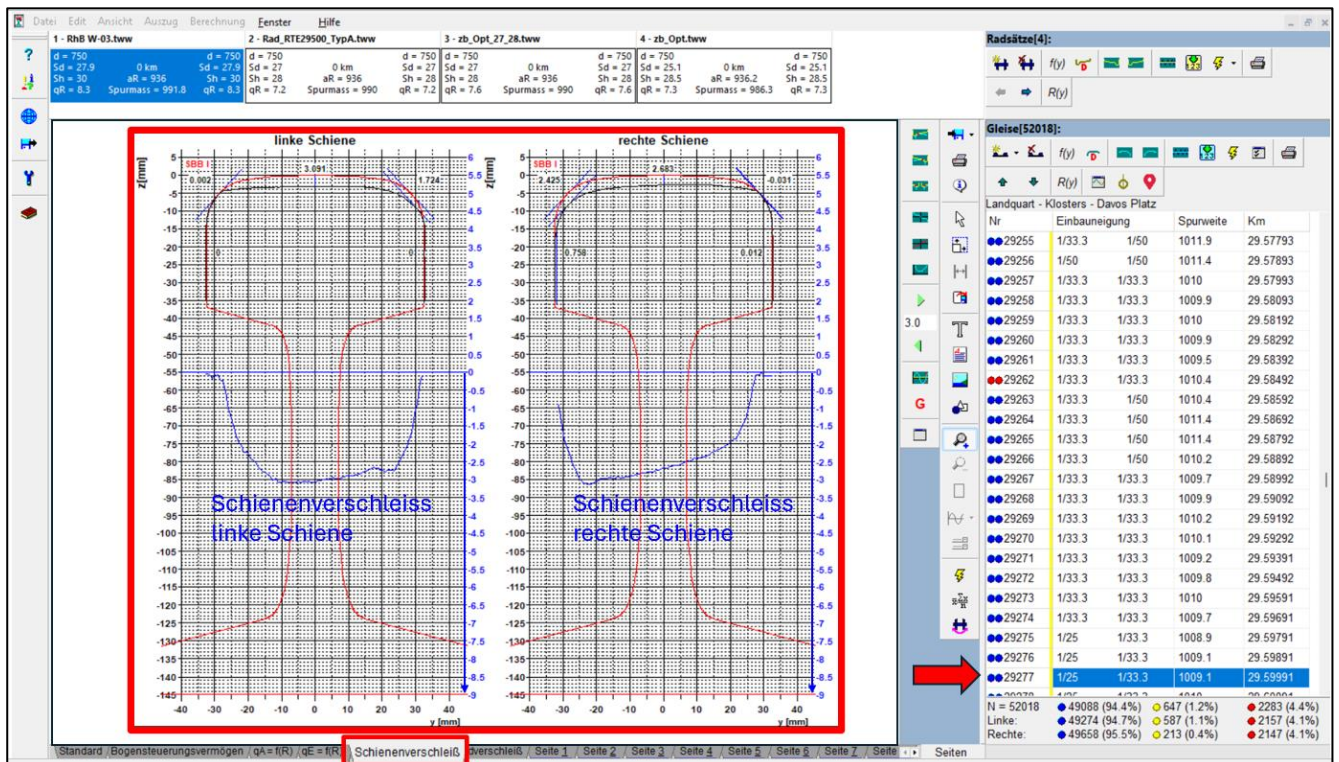


Abbildung 31: Darstellung der beiden Schienen links/rechts im gleichen Gleisquerschnitt sowie des Schienenverschleisses

Für eine verfeinerte Analyse der Schienenprofile werden diese durch Anklicken des entsprechenden Symbols in N°6 des Hauptfensters in *Abbildung 26* einzeln in einer vergrösserten Darstellung angezeigt. Die dazugehörige Darstellungsmöglichkeit ist in *Abbildung 32* am Beispiel der bogenäusseren Schiene beim Streckenkilometer 29.57893 abgebildet. Das Schienenprofil im Neuzustand, jedoch mit seiner realen Einbauneigung (hier 1:50), wird mit dem nominellen Schienenprofil (in roter Farbe die 46E1 mit Neigung 1:20) verglichen. Die Schiene hat sich demnach im Betriebseinsatz aufgestellt. Damit kann die Veränderung der Schienenneigung im Betriebseinsatz sichtbar gemacht werden und aus dem quantitativ in blauer Farbe angedeuteten Fahrflächenverschleiss die zusätzliche Neigung der Schienenfahrfläche begründet werden.

Die reale Fahrflächenneigung ergibt sich damit aus der Zusammensetzung der realen Schienenneigung in Verbindung mit der aus der Verteilung der Abnutzung über der Fahrfläche in der Querrichtung veränderten Fahrfläche. Im *Gleis-Kontakt* existieren Auswertemethoden zur Ermittlung der dadurch fehlenden Berührungspunkte aus dem Verschleiss. Diese werden auch angewendet zur Überprüfung der Schienenprofile nach dem Schienenschleifen (sogenanntes Unterschleifen in den Bereichen der Fahrkante und der Schienenschulter).

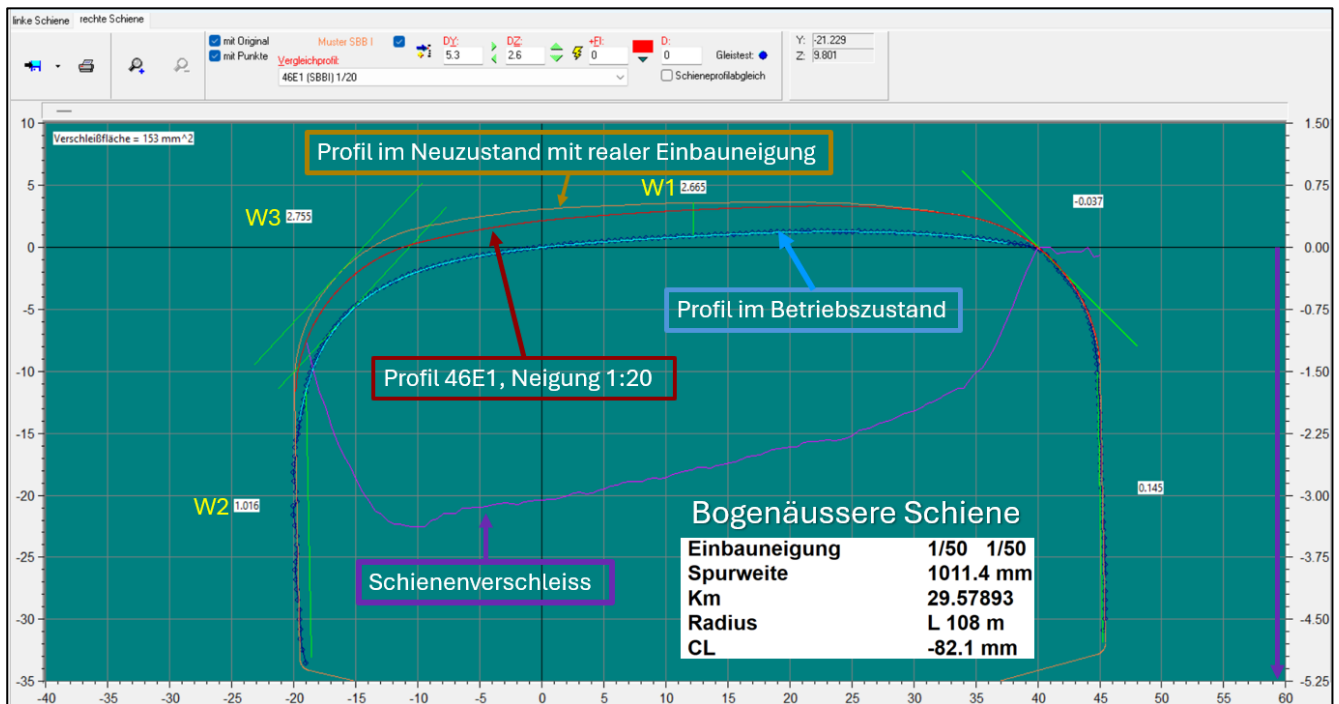


Abbildung 32: Vergrösserte Darstellung des Schienenverschleisses und Vergleich mit der nominellen Schienen mit ihrer Einbauneigung beim Streckenkilometer 29.57893

## 6.2.2 Darstellung der Gleis- und Schienenmerkmale über ganze Strecken

Im Fenster N°4 der *Abbildung 33* sind auf mehreren Seiten über die gesamte Streckenlänge die auswählbaren Merkmale und Verhaltensweisen der Gleise und der Schienen darstellbar. Auch hier sind, wie schon oben, die vier Radprofile im Fenster N°1 mit den Schienenprofilen der gesamten Strecke Landquart – Sagliains gepaart. Im Fenster N°4 ist als Beispiel die «Seite 6» zwischen Kilometer 20 und 24 aufgeschlagen. Je nach Bedürfnis kann diese Einteilung verändert werden. Um ein Gesamtbild über die ganze Strecke zu erhalten, kann diese auf einer einzelnen Seite zusammenrückt dargestellt werden. Dadurch reduziert sich allerdings die Auflösung. Um Einzelheiten besser zu erkennen, werden meist etwa vier Kilometer Streckenlänge pro Seite dargestellt. So könnte zum Beispiel von Interesse sein, was der Grund für den sehr hohen Wert des Radialstellungsindex im Bogen in den Umgebung des Pfeiles N°5 in *Abbildung 33* ist. Durch Anklicken dieses Bereiches mit dem Pfeil N°5 links von der Tabelle mit den Schienendaten erscheint im Graphen eine rote senkrechte Linie und in der Tabelle rechts das entsprechende Profil mit der Angabe der Kilometrierung. Die Seitendarstellung im Bereich N°2 enthält 8 verschiedene Weggraphen. Durch Öffnen des Fensters N°3 können nun unter 129 verschiedenen Möglichkeiten jeweils 8 davon gleichzeitig dargestellt werden. Die Graphen sind nach Wunsch beliebig skalierbar. Die sieben in *Abbildung 33* ausgewählten Graphen und der für jede Auswahl erscheinende achte Graph mit den Trassierungsdaten enthalten von oben nach unten die folgenden Merkmale.

- Erster Graph: Enthält die Spurweite von 995 mm bis 1020 mm mit einem Skalierungsintervall von 2.5 mm und einem Beschriftungsintervall von 5 mm. Die minimale Spurweite von 997 mm ist mit einer roten Linie gekennzeichnet.
- Zweiter Graph: Enthält den Bogenradius bis plus/minus 400 m (plus sind Rechtsbögen, minus sind Linksbögen). Die Unterscheidung zwischen den Bogenrichtungen ist wichtig, da bei der Analyse jeweils die bogenäusseren und die bogeninneren Schienen detailliert betrachtet werden müssen.
- Dritter Graph: Enthält den Radialstellungsindex von 0 bis 5 mm mit einem Skalierungsintervall von 0.5 mm und einem Beschriftungsintervall von 1 mm. Der Wert  $q_E=1$  ist mit einer roten Linie hervorgehoben.
- Vierter Graph: Enthält die äquivalente Konizität bei einer Radsatzqueramplitude von 3 mm. Für diese Grösse ist bei der Meterspur derzeit noch kein oberer und unterer Grenzwert festgelegt.

- Fünfter Graph: Enthält die Schienenneigung der linken Schiene bis zu einem Werte von 1:80 wobei wahlweise hier zwischen linker und rechter Schiene gewechselt werden kann.
- Sechster Graph: Enthält den Fahrkantenradius der linken Schiene von 0 bis 20 mm.
- Siebter Graph: Enthält den Fahrkantenradius der rechten Schiene von 0 bis 20 mm.
- Achter Graph: Enthält die Trassierungsgegebenheit (Bögen, Übergangsbögen, Geraden und bei den Bögen die Bogenradien), die realen Spurweiten und maximalen Streckenfahrge-  
schwindigkeiten nach RADN. Hier sind die Trassierungsdaten der Streckendateien aus den TopoRail-Daten und diejenigen des Messwagens aufgeführt. Diese beiden Trassierungsdateien dienen zudem der Synchronisation der gemessenen Daten und der im Programm hinterlegten Streckendateien. Sie sind auch wichtig bei der wahlweisen Darstellung von Ergebnissen in gewissen Bogenradienklassen oder zum Beispiel ausnahmslos auf geraden Streckenabschnitten.

Wie schon erwähnt, erfolgt die Auswahl der Graphen mit den verschiedenen Schienen- und Gleismerkmalen durch den Bediener des Programms in Abhängigkeit der Problemstellung. So kann es zum Beispiel bei erhöhter äquivalenter Konizität sinnvoll sein, sich neben dieser Grösse in erster Priorität die Spurweiten, die Flankenradien, die Trassierungsdaten, die Schienenneigungen und die Schienkopfradien vorzunehmen. Diese Daten können auch aus dem Programm ausgelesen werden und in andere spezialisierte Auswerteprogramme übertragen werden. So war es zum Beispiel sinnvoll, diese Daten für die Untersuchung der Ursachen der nicht durch den Schienenflankenverschleiss verursachten Spurerweiterungen in den verschiedenen Bogenradienklassen zu nutzen. In Abhängigkeit der Bogenhalbmesser wurden die Einflüsse der Schienenneigungen, der Verschleissdaten an den Schienenflanken und aus der Differenz dieser Einflussgrössen zur Spurweite die übrigen Einflussgrössen auffindig gemacht und quantifiziert.

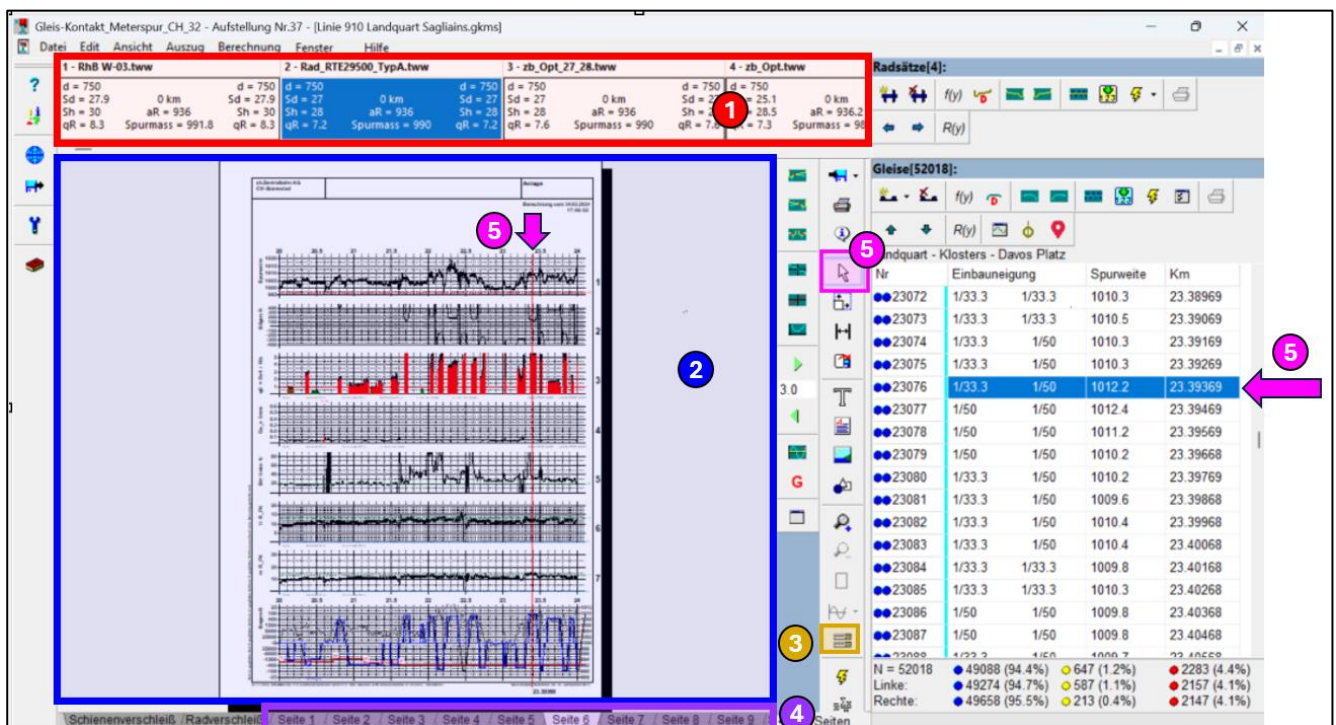


Abbildung 33: Seitenansichten mit den über der Strecke dargestellten Merkmalen der Gleise und der Schienen

Durch Anklicken von N°3 in Abbildung 34 öffnet sich das Fenster für die Auswahl der 7 Graphen in N°2 von Abbildung 33. Wie in Abbildung 34 dargestellt wird nun für jeden erforderlichen Graphen die entsprechende Grösse ausgewählt und in der gewünschten Art formatiert. Für den ersten Graphen wurde in dieser Darstellung die Spurweite und für den «Graph Nr.4» die äquivalente Konizität bei einer Rad-satzamplitude von 3 mm ausgewählt. Aus den Verläufen der Graphen 3 (Radialstellungsindex) und 4 (äquivalente Konizität) kann eingesehen werden, dass das dieser Auswertung zugrunde liegende Radprofil weder für den Bogenlauf (kaum Werte  $q_e \leq 1$ ) noch für die Fahrt auf geraden Strecken geeignet ist (Gefahr von «low frequency body motions»). Es handelt sich um das Radprofil RTE A.

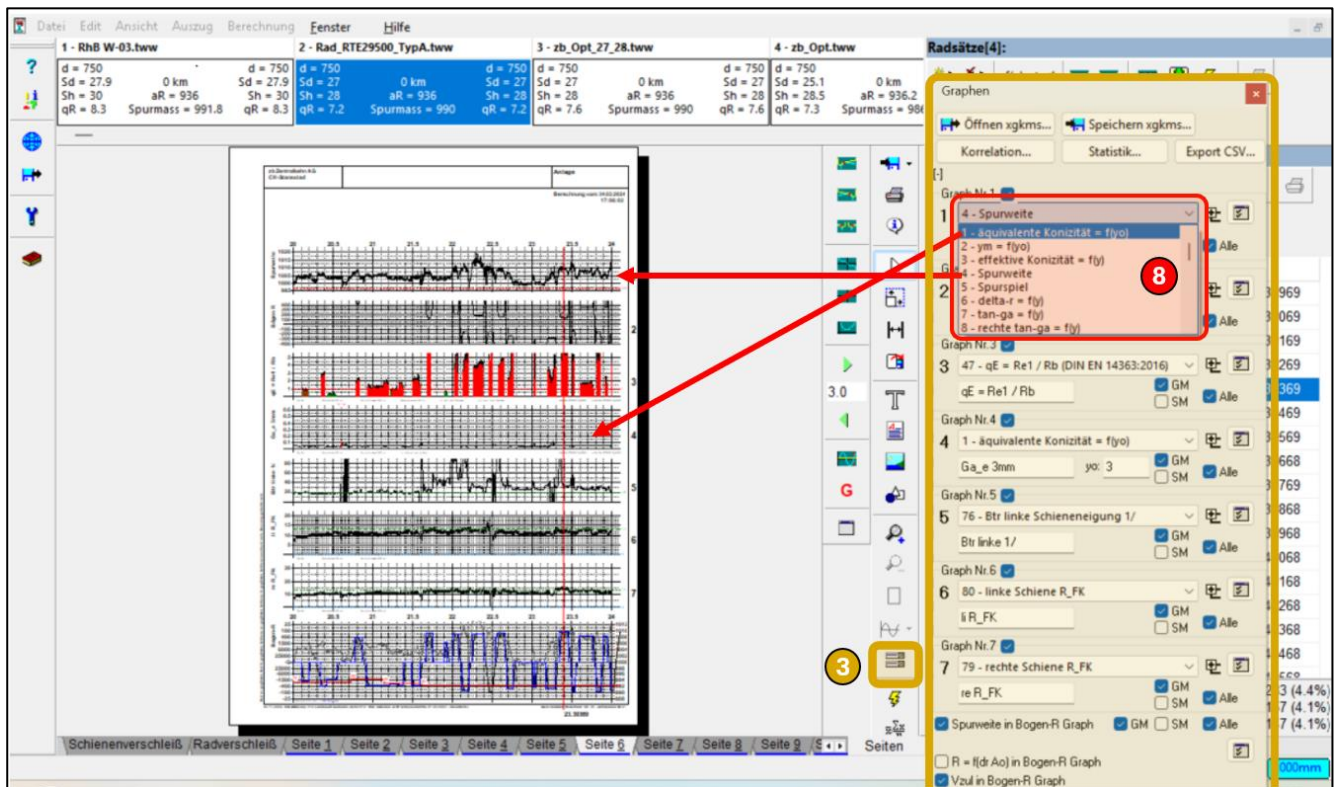


Abbildung 34: Auswahl der Graphen für die Darstellung der Beurteilungsgrößen über den Streckenverlauf (berührungsgeometrische Größen für die Paarung mit dem Radprofil RTE A dargestellt)

In Abbildung 35 ist dagegen ein Auszug über die ersten fünf Graphen aus einer solchen Übersicht für das Radprofil RAILplus\_v1A/28.5/25 dargestellt. Auf dem gleichen Streckenbereich wie oben beim Radprofil RTE A eignet sich dieses Radprofil bestens für die beiden Trassierungsbereiche Bögen (Radialstellungsindex mit kleinen Ausnahmen  $\leq 1$ ) und Geraden (grösstenteils im Bereich von 0.1 bis 0.2).

Im untersten Graphen ist noch der Verlauf der Schienenneigung bei der linken Schiene dargestellt. Auf geraden Streckenabschnitten ist diese grösstenteils 1:20 und in den Bögen streut diese stark. Wie weiter unten gezeigt wird, können diese und weitere Parameter statistisch für die gesamte Strecke sowie unterteilt auf Geraden und verschiedene Bogenradienklassen dargestellt werden. Zudem bietet sich die Möglichkeit an, Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern durchzuführen und damit gewisse Abhängigkeiten und Schwerpunktthemen für die Konzeption und Instandhaltung aufzuzeigen.

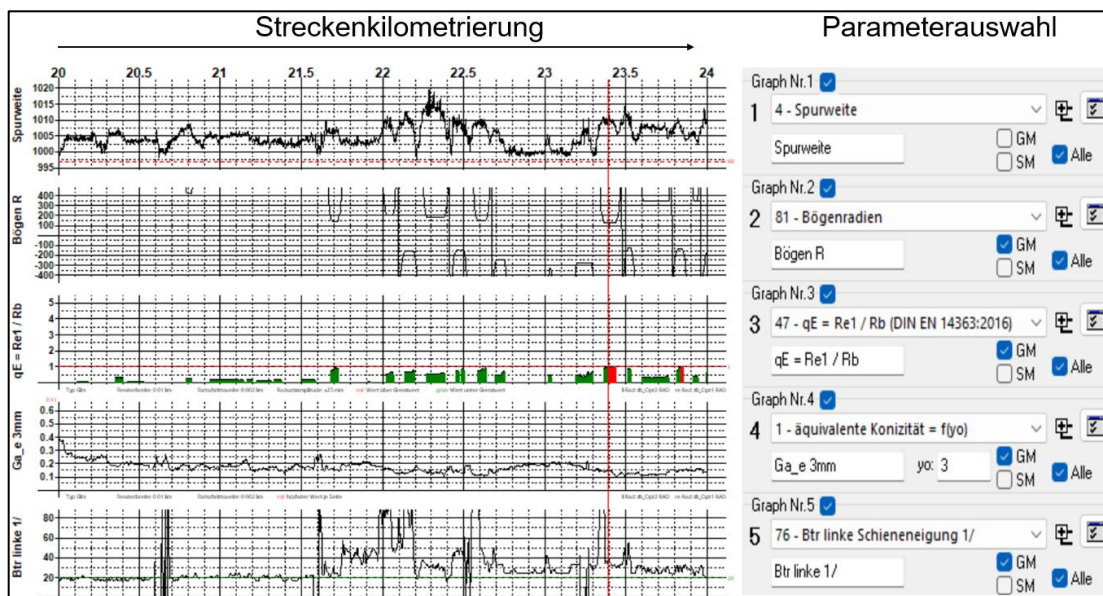


Abbildung 35: Auszug zur besseren Auflösung einer Auswahl von verschiedenen Größen (Berührungsgeometrie für das Radprofil RAILplus\_v1A/28.5/25)

Durch Mausklick auf einen der Parameter öffnet sich ein Feld, in welchem verschiedene Formatierungen vorgenommen werden. Eine davon ist die Aufteilung der Strecken auf verschiedenen Anzahl Seiten (siehe zum Beispiel 4 km Streckenlänge pro Seite in *Abbildung 33*).

In *Abbildung 36* ist ein Auszug aus der «Seite 6» von 14 der gesamten Strecke Landquart – Sagliains für vier verschiedene Radprofile dargestellt. In *Abbildung 37* ist die gesamte Strecke auf einer Seite ebenfalls für vier verschiedene Radprofile dargestellt.

Je nach Aufgabenstellung wird es notwendig sein, mit unterschiedlichen Auflösungen der Strecke zu arbeiten. In *Abbildung 36* sind für den Streckenabschnitt km 20 bis km 24 die beiden berührungsgeometrischen Grössen Radialstellungsindex und äquivalente Konizität für die vier Radprofile W03, RTE A und die beiden RAILplus-Profile mit und ohne Spurkranzschwächung aufgeführt. Zusätzlich wurden noch Spurweite und Bogenradius aufgeführt, um die beiden lauftechnischen Parameter den Trassierungsverhältnissen zuordnen zu können. Diese Zuordnung kann auch mit Hilfe des Radialstellungsindex erfolgen. Ist dieser Null, so müsste nach der dazugehörigen Definition der Bogenradius unendlich sein. Dies ist nur in der Geraden möglich. Liegen sehr kleine Werte vor, so ist das entsprechend der Definition des Radialstellungsindex in der Regel ein Merkmal für das Vorliegen von mittleren bis grossen bzw. sehr grossen Bogenradien. Aufgrund der Spurweite und insbesondere der Spurerweiterung kann zudem auf das Vorhandensein von Bögen geschlossen werden. In der Folge sollte in diesen Trassierungsbereichen je nach Radprofil auch ein mehr oder weniger grosser Radialstellungsindex vorhanden sein.

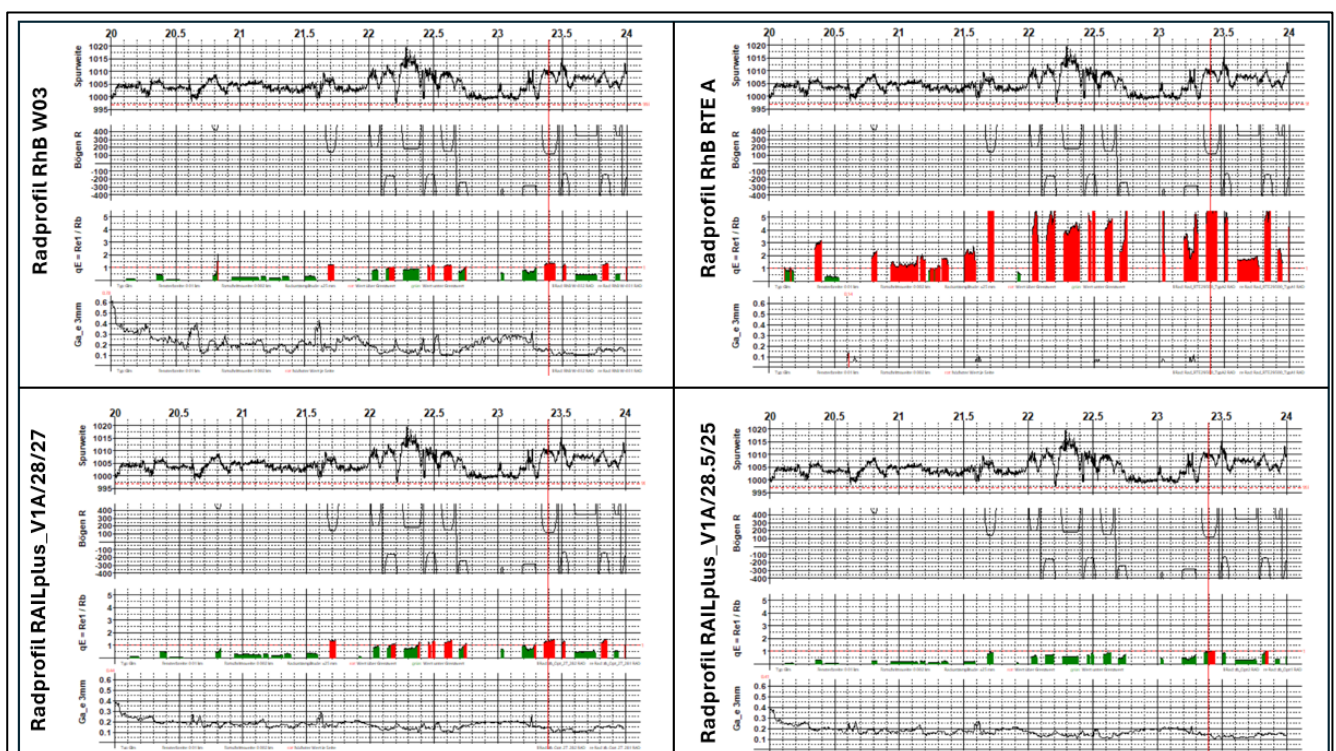


Abbildung 36: Auszug aus vier Parametern des Streckenabschnittes km 20 bis km 24 der Strecke Landquart – Sagliains für die vier Radprofile W03, RTE A und die beiden RAILplus-Profile mit und ohne Spurkranzschwächung

Die gesamte Strecke kann anhand der *Abbildung 37* und der *Abbildung 38* grundsätzlich in drei Bereiche unterteilt werden:

- Zwischen Landquart (km 0) und Fideris (ca. km 18) dominieren die mittleren bis grossen Bogenradien.
  - Hier wird der Radstellungsindex  $q_E$  durch das Radprofil W03 sowie die beiden RAILplus-Profile nahezu auf dem gesamten Streckenabschnitt erfüllt. Mit dem Radprofil RTE A ist dieser praktisch auf der gesamten Streckenabschnitt nicht erfüllt.
  - Die äquivalente Konizität liegt beim Radprofil W03 im Vergleich zu den beiden RAILplus-Profilen deutlich höher. Dieser lauftechnische Indikator ist vor allem im oberen Geschwindigkeitsbereich zu beachten. Diese liegen gemäss *Abbildung 39* unten in diesem

Streckenabschnitt zwischen 90 und 100 km/h. Damit dürfte sich das Radprofil *W03* hinsichtlich der Drehgestellstabilität hier kritischer verhalten als die beiden *RAILplus*-Profile. Beim Radprofil *RTE A* liegen die äquivalenten Konizitäten in diesem Streckenabschnitt deutlich unter 0.1. Dadurch dürfte dieser Streckenabschnitt mit diesem Radprofil hinsichtlich der Instabilität des Fahrzeugkastens kritischer sein («low frequency body motions»). Für die drei anderen Radprofile bestehen aufgrund von deren erhöhten äquivalenten Konizitäten diesbezüglich keine Gefährdungen.

- Zwischen Fideris bis kurz oberhalb Klosters (rund km 32.6) dominieren vor allem die kleinen Bogenradien mit Halbmesser zwischen 100 und 200 m.
  - Bei den beiden Radprofilen *W03* und *RAILplus\_v1A/28.5/27* stellen sich beim Radialstellungsindex vergleichbare Werte ein. Diese liegen zum Teil im Bereich  $q_E \leq 1$  und im Übrigen leicht oberhalb  $q_E = 1$ . Günstiger liegen die meisten Werte mit dem Radprofil *RAILplus\_v1A/28.5/25*. Werte mit  $q_E > 1$  liegen für dieses Radprofil nur in einigen Bögen vor. Am ungünstigsten verhält sich auf diesem Streckenabschnitt das Radprofil *RTE A*. In keinem der Bögen wird ein  $q_E \leq 1$  erreicht.
  - Die äquivalenten Konizitäten spielen in diesem Streckenabschnitt eine untergeordnete Rolle, da die maximalen Fahrgeschwindigkeiten gemäss Abbildung 39 einen Wert von 70 km/h nicht übersteigen und davon ausgegangen wird, dass die auf diesem Streckenabschnitt verkehrenden Fahrzeuge diese stabil beherrschen.
- Kurz vor Klosters und Sagliains dominieren entweder grosse Bogenhalbmesser oder gerade Strecken (Vereina-Tunnel).
  - Mit Ausnahme beim Radprofil *RTE A* bis zum Tunnel wird der Radialstellungsindex  $q_E \leq 1$  bei den drei anderen Radprofilen auf dem ganzen Streckenabschnitt eingehalten.
  - Die äquivalente Konizität liegt hinsichtlich der Drehgestellstabilität bei den beiden *RAILplus*-Profilen für die maximalen Fahrgeschwindigkeiten bis 100 km/h in einem unproblematischen Bereich. Dies gilt mit zwei Ausnahmen (etwa in Tunnelmitte) auch für das Radprofil *W03*. Die Ausnahmen betreffen die beiden Streckenabschnitte zwischen km 44.3 und km 44.1 sowie zwischen km 45.5 und km 45.7. Mit dem Radprofil *RTE A* bestehen hinsichtlich der Drehgestellinstabilität keine kritischen Bereiche. Jedoch liegt auch hier wegen der sehr geringen äquivalenten Konizitäten die Gefahr von «low frequency body motion».

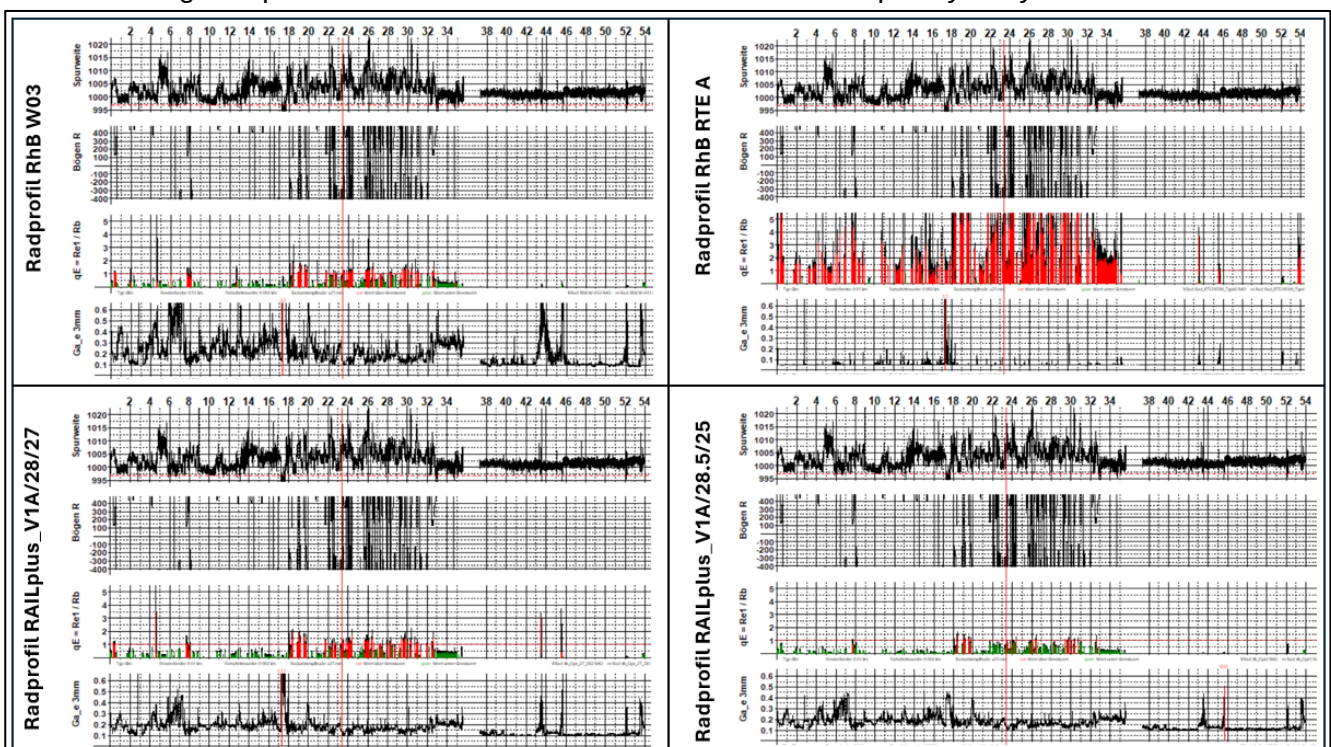


Abbildung 37: Auszug aus vier Parametern der gesamten Strecke Landquart – Sagliains für die vier Radprofile *W03*, *RTE A* und die beiden *RAILplus*-Profile mit und ohne Spurkranzschwächung

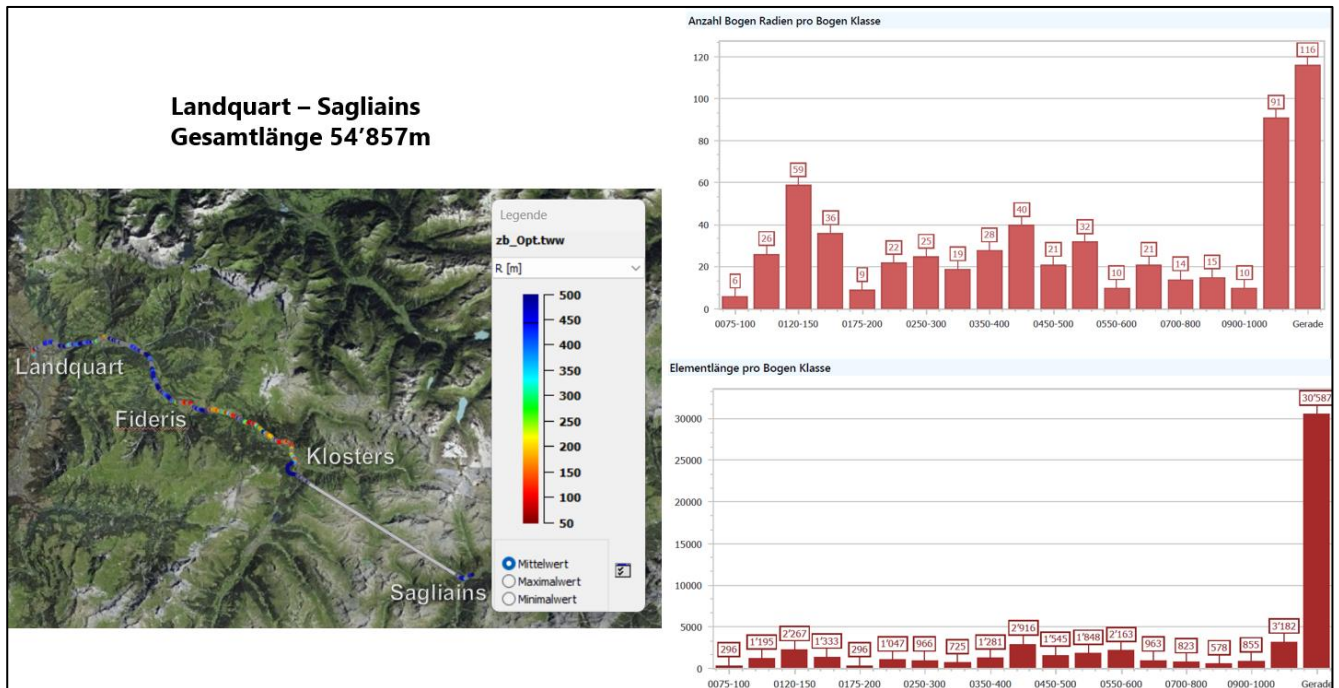


Abbildung 38: Bogenverteilung der Strecke Landquart – Sagliains, links geographische Zuordnung der Bogenradien, rechts die Bogenradienklassen oben anhand der Anzahl Bögen je Klasse und unten anhand der Bogenlänge je Klasse

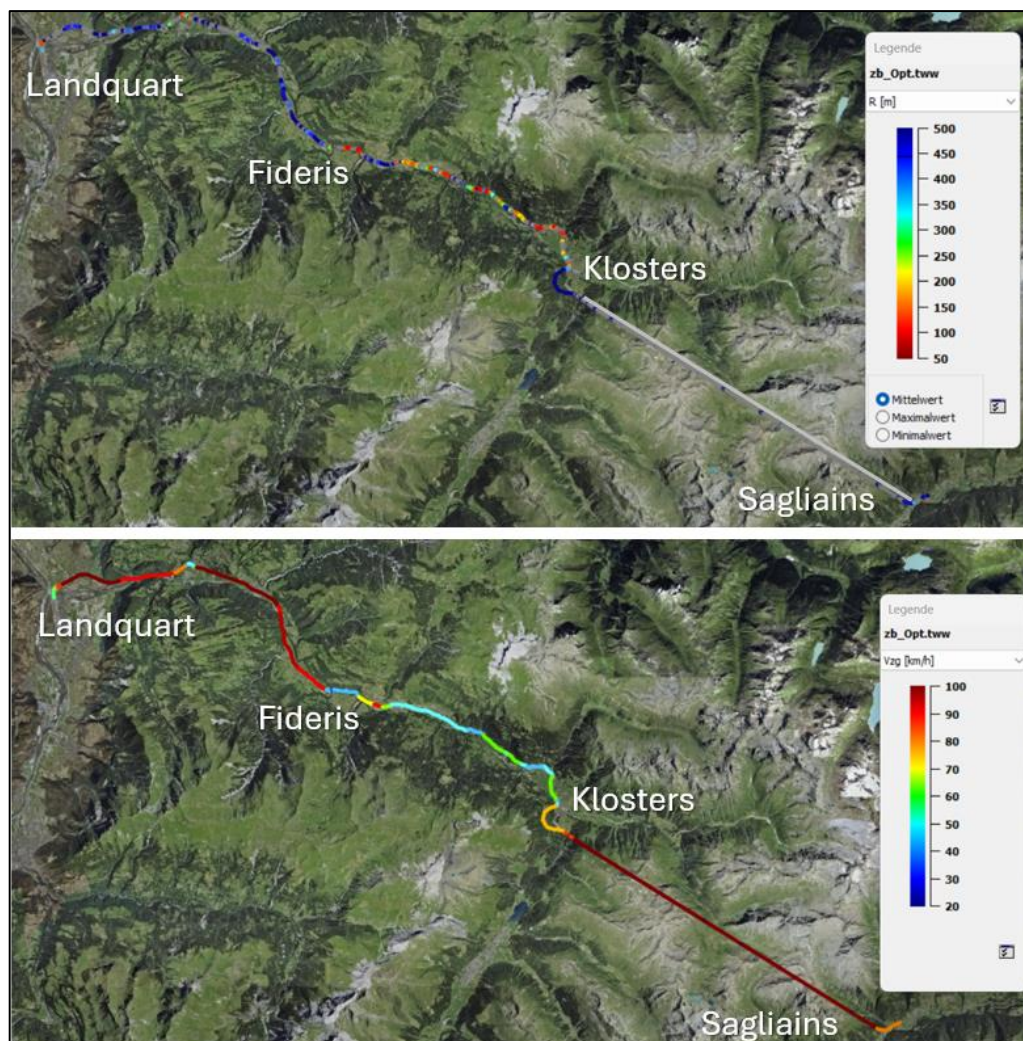


Abbildung 39: Bogenradien oben und maximale Streckengeschwindigkeiten unten

### 6.2.3 Darstellung der Gleis- und Schienenmerkmale über Streckenabschnitte, Bogenradienklassen oder gerade Streckenabschnitte

Bis zu diesem Kapitel wurden immer ganze Strecken betrachtet. Es kann aber auch von Interesse sein, die Untersuchungen auf einzelne Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten, nur Links- oder nur Rechtsbögen, nur gerade Strecken mit allen oder unterteilt in unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten, Bögen in unterschiedlichen Radienklassen usw. zu begrenzen.

Durch Aktivierung von N°10 in *Abbildung 40* wird das Fenster N°11 aufgeklappt. Hier bestehen nun, wie schon oben angedeutet, verschiedene Auswahlmöglichkeiten. In *Abbildung 40* wurden für die gesamte Strecke Landquart – Sagliains alle Bögen mit Bogenhalbmessern von 0 bis 200 m ausgewählt. Anschliessend wurde diese Auswahl hinzugefügt («Auswahl hinzufügen»). Nach dem Hinzufügen dieser Auswahl werden auf allen Seiten die entsprechenden Bereiche mit grauer Farbe markiert. Wenn nur die Rechts- oder die Linksbögen oder nur die geraden Streckenabschnitte interessieren, so können diese auf die gleiche Weise hinzugefügt werden. Bevor jedoch eine neue Auswahl gewählt wird, muss die schon im Fenster aufgeführte Auswahl entfernt werden («Auswahl entfernen»).

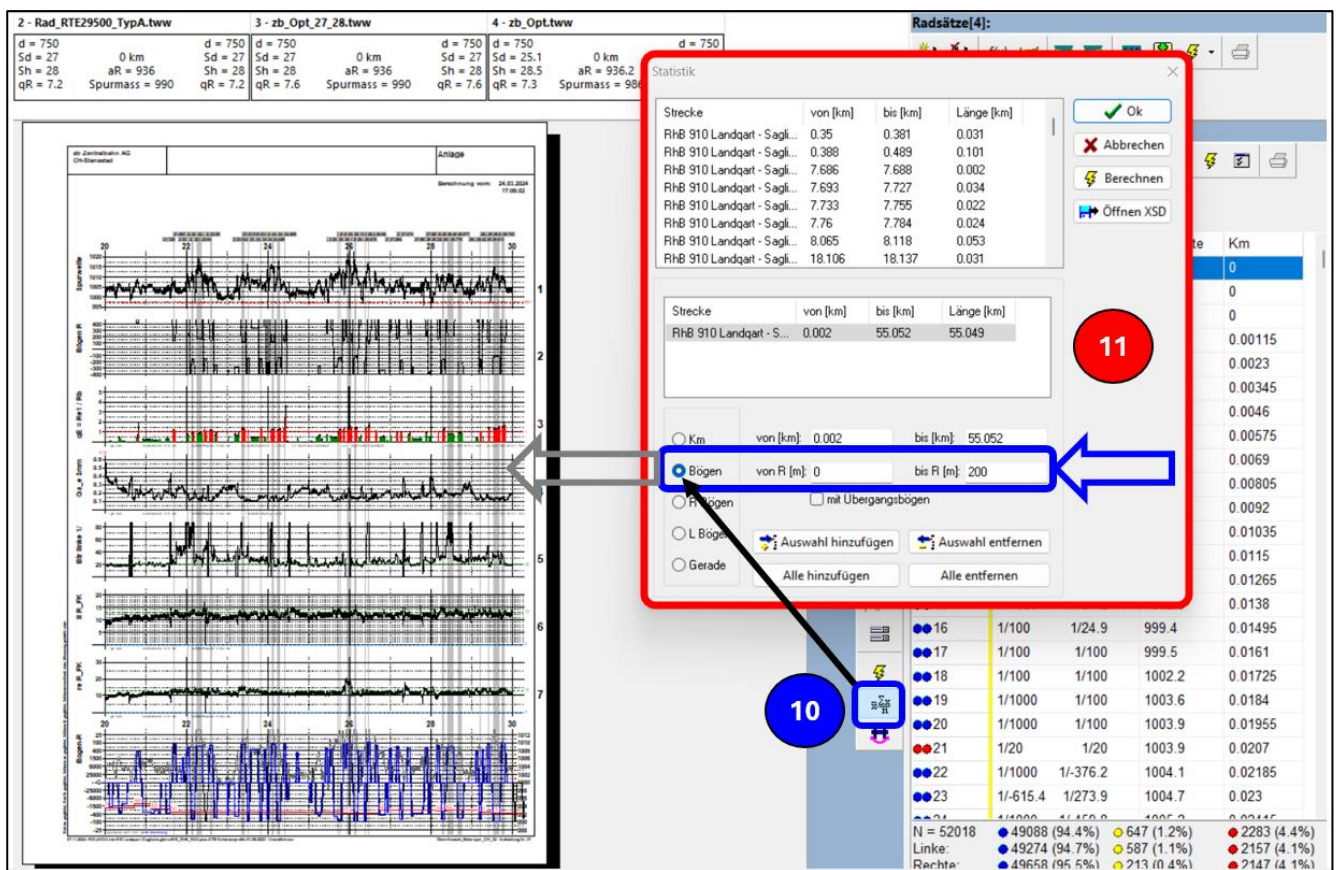


Abbildung 40: Auswahl von Streckenabschnitten und Trassierungselementen sowie Bogenradienbereiche

### 6.2.4 Erstellung von Protokollen

Weitere Möglichkeiten bietet das Programm *Gleis-Kontakt* für die Erstellung von Protokollen die für Berichte, Präsentationen oder vertiefte Studien benutzt werden können. Durch Aktivierung von N°12 in *Abbildung 41* öffnet sich ein Fenster entweder in N°13, worin Auswertungen für eine Vielzahl von Schienenprofilen oder Berührpaarungen durchgeführt werden können oder Darstellungen für weitergehende vertiefte Betrachtungen möglich werden. In N°14 können zudem statistische Darstellungen verschiedener Schienen- und Gleisdaten sowie Korrelationen zwischen unterschiedlichen Parametern erstellt werden. Dazu muss durch die Wahl von «Standard» in N°13 die Möglichkeit zur Auswahl von Objekten oder Seiten in N°14 geschaffen werden. Durch die Wahl von «Statistik Graph» in N°14 von *Abbildung 41* besteht zum Beispiel wie in *Abbildung 42* aufgeführt die Möglichkeit der Auswahl derjenigen Grössen, welche entweder für die gesamte Strecke oder für jene der in *Abbildung 40* getroffenen Auswahl

dargestellt werden sollen. Im Weiteren bestehen unter N°15 in *Abbildung 42* weitere Auswahlmöglichkeiten für die Generierung der statistischen Darstellungen.

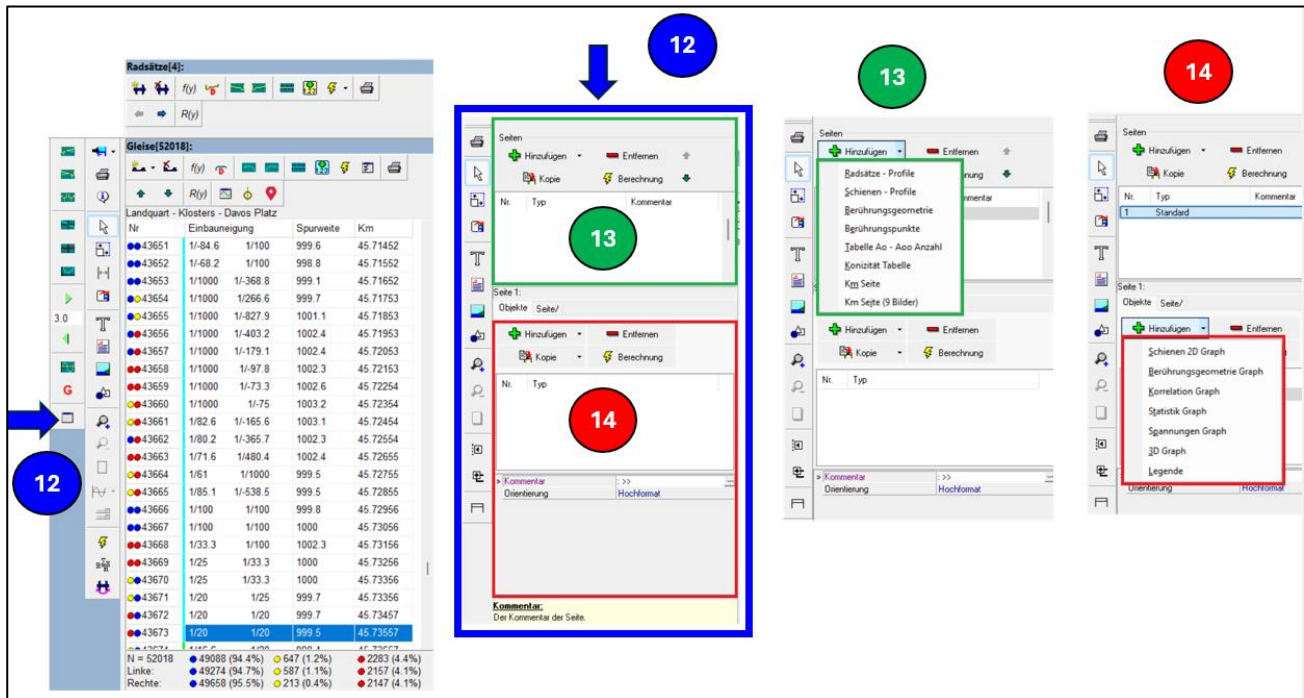


Abbildung 41: Erstellung von Protokollen

In *Abbildung 42* sind auf der linken Seite zwei Protokolle aufgeführt. Im linken Protokoll sind oben die Spurweiten aller geraden Streckenabschnitte der Strecke Landquart – Sarglians dargestellt. Hier sind die Summenhäufigkeit (blaue Linie) und die Häufigkeitsverteilungen (grüne Balken) aufgeführt. Darunter ist die gleiche Darstellung für alle Links- und Rechtsbögen (ohne Übergangsbögen) aufgeführt. Im Protokoll rechts davon befinden die Schienenneigungen für alle Linksbögen der gesamten Strecke. Im oberen Diagramm befinden sich die Schienenneigungen der jeweils rechten Schienen (bogen aussen) und darunter jene der linken Schienen (bogen innen).

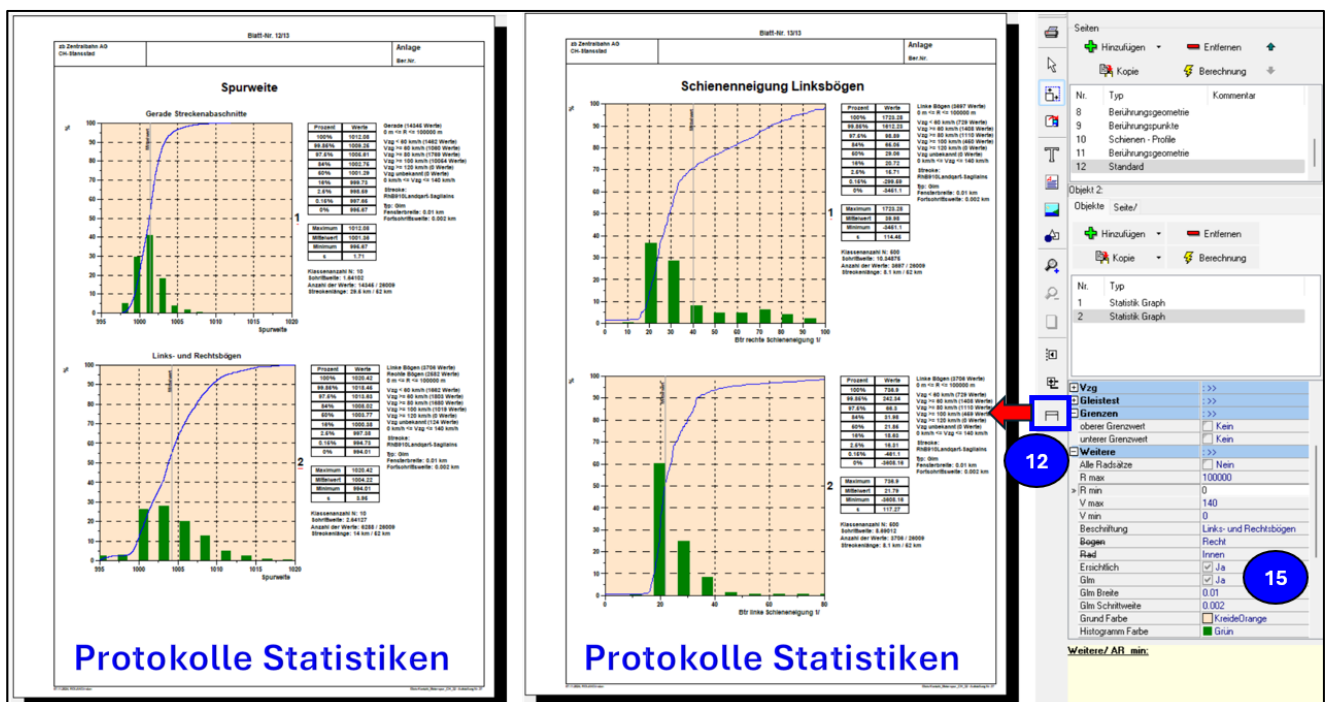


Abbildung 42: Erstellung von Statistiken

Eine Korrelation misst die Stärke einer statistischen Beziehung von zwei Variablen zueinander. In *Abbildung 43* ist dazu eine der vielen möglichen Beziehungen zwischen zwei Variablen der Wechselwirkung Fahrzeug-Fahrweg aufgeführt. Auf der Abszisse befinden sich die Bogenhalbmesser für Linksbögen (negativ) und für die Rechtsbögen (positiv) im Bereich von  $R=0$  m bis  $R=\pm 800$  m und auf der Ordinate die Radialstellungsindizes. Im Diagramm oben ist der Radialstellungsindex aus der Paarung aller Schienenprofile der Strecke Landquart – Sagliains mit dem Radprofil RTE A und darunter mit dem Radprofil RAILplus-v1A/28.5/25 dargestellt.

Bei beiden Radprofilen ist bei der Schar der Paarungsergebnisse mit abnehmendem Bogenradius eine Zunahme des Radialstellungsindex festzustellen. Die beiden Radprofile unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Ergebnisse als auch hinsichtlich der Streuungen. Das Bestimmtheitsmass zwischen dem Radialstellungsindex und dem Bogenhalbmesser ist beim RAILplus-Profil signifikant grösser als beim RTE A. Das bedeutet, dass Radialstellungsindex und Bogenhalbmesser beim RAILplus-Profil in einer starken statistischen Beziehung zueinanderstehen und dieses Profil für den Bogenlauf geeignet ist. In den Bögen unterhalb  $R=200$  m nimmt jedoch die Streuung gegenüber den darüber liegenden Halbmessern stärker zu. Dass in der Spanne zwischen  $R=100$  m und  $R=200$  m eine grössere Teilmenge den Radialstellungsindex  $q_E \leq 1$  erfüllt sowie die restliche Teilmenge das nicht tut, deutet darauf hin, dass die Ursachen dafür beim Fahrweg liegen.

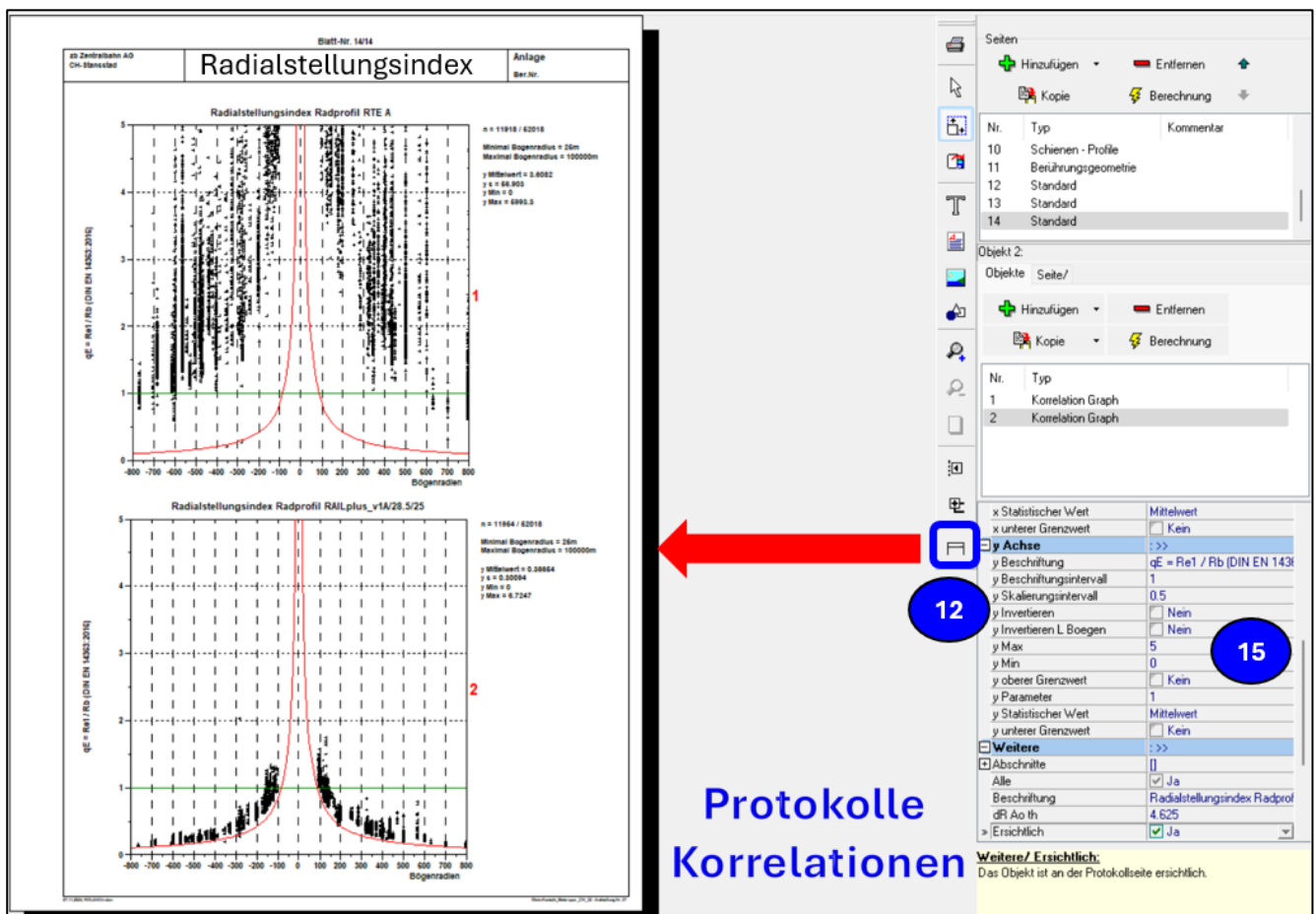


Abbildung 43: Erstellung von Korrelationen

## 6.2.5 Darstellung der Parameter auf Landkarte

Im *Gleis-Kontakt* ist es möglich, die Parameter der Interaktion wie auch bestimmte Verschleissgrössen der Schienen bzw. der Gleise der Strecke zuzuordnen und auf der Landkarte unter verschiedenen Gesichtspunkten abzubilden. Als Interaktionsgrössen bieten sich zum Beispiel die äquivalenten Konizitäten oder die Radialstellungsindizes an. Diese Interaktionsgrössen können sich je nach den mit den Strecken gepaarten Radprofilen in einem unterschiedlichen Verhalten äussern oder aber durch weitere Parametereinflüsse wie zum Beispiel den Verschleisszustand der Schienen, deren realen

Schienenneigungen oder der Spurweiten beeinträchtigt sein. Die einen Grössen bzw. Parameter sind eher für die geraden Strecken und wiederum andere für die verschiedenen Bogenradien von Interesse. Wenn sich Fahrzeuge auf gewissen Streckenabschnitten auffällig verhalten, können deren charakteristischen Radprofile mit den darauf liegenden Schienen gepaart werden und daraus die Ursachen für deren Verhaltensweisen eingegrenzt werden.

Die *Abbildung 44* zeigt die ersten Schritte für den Zugang zu den der Strecke zugeordneten Grössen auf der Landkarte (LK) siehe N°3. Nach der Auswahl der Liniendarstellung N°1 erscheint das Fenster mit der graphischen Darstellung der Streckendaten. In N°2 sind diese durch Bögen verschiedener Halbmesser (skaliert) inklusive der Übergangsbögen sowie durch die geraden Streckenabschnitte charakterisiert. Zudem sind hier in dunkelroter Farbe die Verläufe der Spurweiten aufgeführt.

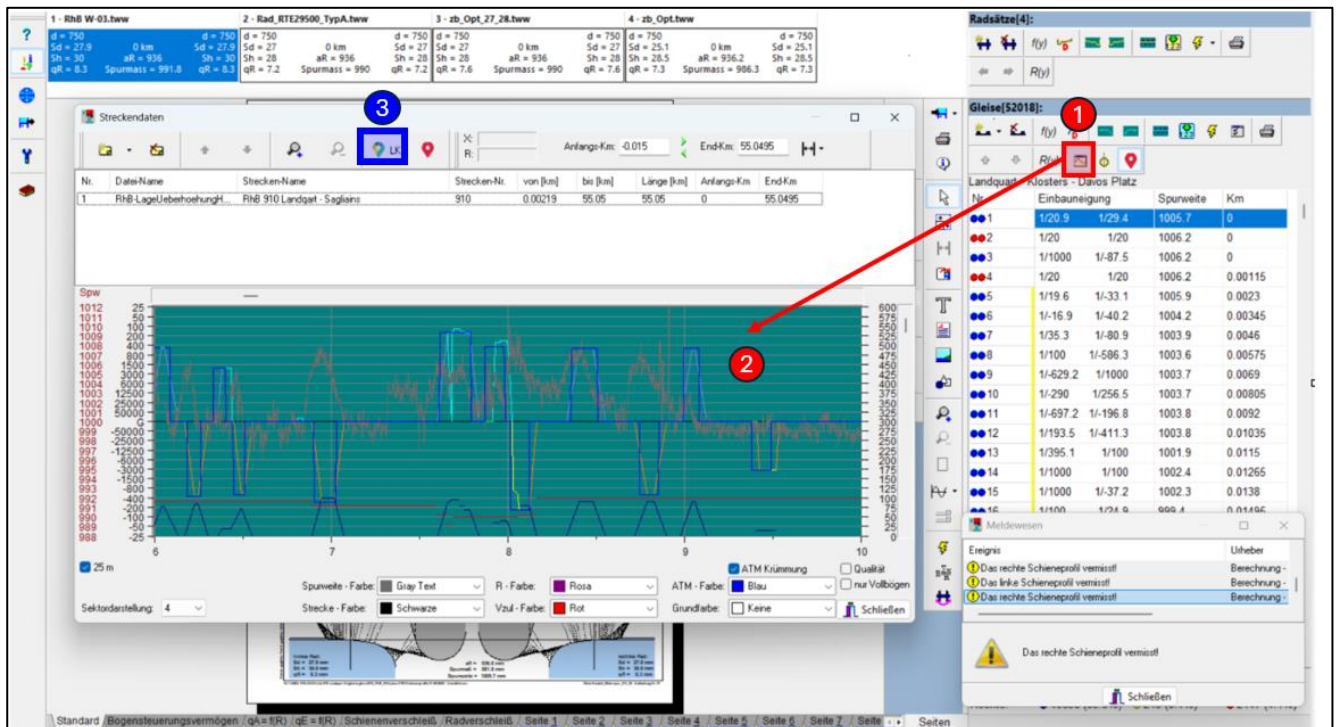


Abbildung 44: Auswahl der Landkarte für die Darstellung der Parameter auf der Strecke

Wird in N°3 der *Abbildung 44* die Landkarte angefordert, so erscheint die Kartendarstellung entsprechend *Abbildung 45*. Mit unterschiedlich eingefärbten Pfeilen sind in dieser Abbildung die Möglichkeiten zur Aktivierung der Einstellungen dargestellt. Durch die Aktivierung des Kästchens «Farbskala» (roter Pfeil N°1) erscheint die Legende (ebenfalls mit rotem Pfeil N°1 angedeutet), in der die ausgewählten Darstellungsgrössen (hier ausgewählt äquivalente Konizität unterhalb schwarzem Pfeil N°3) für den entsprechenden Radsatz (hier ausgewählt Radprofil W03 der RhB angedeutet mit blauem Pfeil N°2) abgebildet ist.

Die Legende kann noch je nach gewünschter Auflösung skaliert werden. Durch Betätigen der Taste unterhalb von Pfeil N°4 ist es zudem möglich, die in *Abbildung 45* in der Karte dargestellten Daten in eine KML-Datei umzuwandeln. KML (früher bekannt als Keyhole Markup Language) ist ein XML-Dateiformat, mit dem Informationen in einem geographischen Kontext angezeigt werden können. Die KML-Informationen werden anschliessend auf [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch) angezeigt und können so von einem streckenkundigen Bahnmitarbeiter den Gegebenheiten bzw. charakteristischen Merkmalen der Bahnstrecke zugeordnet werden. In dieser Darstellung werden durch Anklicken des entsprechenden Ereignisses die Streckendaten (zum Beispiel Bögen mit dazugehörigen Bogenhalbmessern, Geraden, Kilometrierung) angezeigt. Diese Information dient der Verortung des Streckenabschnittes, der dann anschliessend für eine detaillierte Analyse in anderen Auswahlfenstern der Programme *Gleis-Kontakt* oder *Kontakt* betrachtet werden kann.

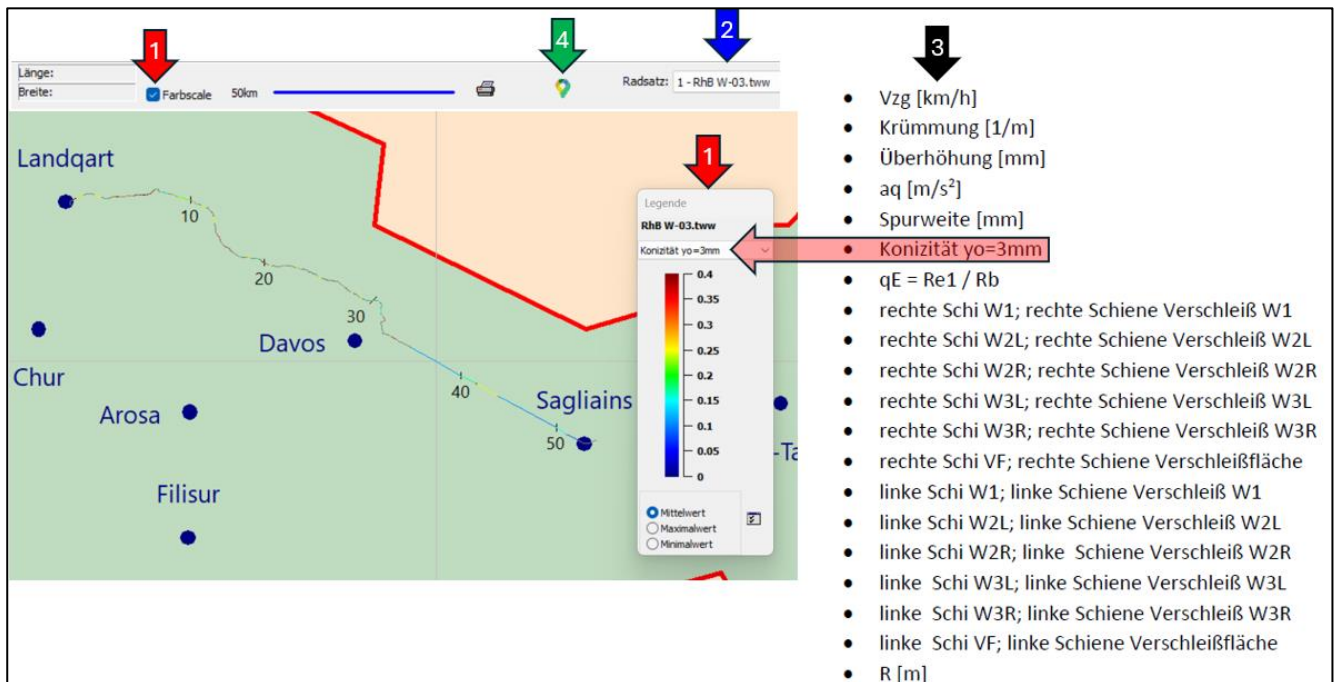
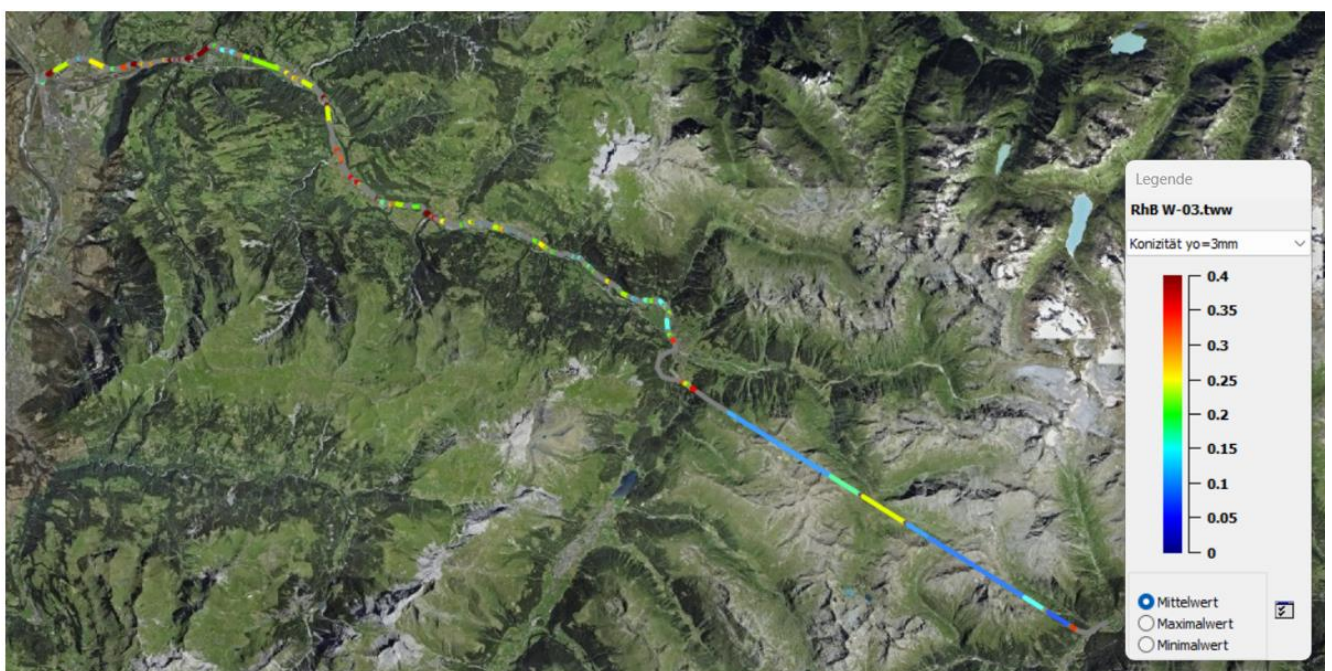


Abbildung 45: Landkarte mit den möglichen Einstellungen

In *Abbildung 46* ist dazu ein Beispiel für die Darstellung der Daten in Form einer KML-Datei in [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch) aufgeführt. Dargestellt ist die äquivalente Konizität für das Radprofil W03 auf der Strecke Landquart – Sagliains. Es handelt sich dabei nun um die Paarung eines nominellen Radprofils mit den realen Schienenprofilen der gesamten Strecke. Entsprechend der ausgewählten Skalierung (von 0 bis 0.4 und in Schritten von 0.05) sind die Grössen der Konizitäten anhand der unterschiedlichen Farben zu erkennen. In den Bögen sind keine äquivalenten Konizitäten berechnet. Die Bögen sind deshalb in dieser Abbildung in grauer Farbe hinterlegt. Es empfiehlt sich die äquivalenten Konizitäten gemeinsam mit den in diesen Abschnitten zugeordneten und tatsächlich im Betriebseinsatz gefahrenen Maximalgeschwindigkeiten zu betrachten. Wie schon andernorts erwähnt, muss diese Grösse sowohl im unteren als auch im oberen Konizitätsbereich in Verbindung mit den lauftechnischen Eigenschaften der auf dieser Strecke verkehrenden Fahrzeuge beurteilt werden.

Abbildung 46: Beispiel für die Darstellung der Daten einer KML-Datei in [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch). Dargestellt sind die äquivalenten Konizitäten für das Radprofil W03 auf der Strecke Landquart – Sagliains

Entsprechend dem oben Gesagten, sind in *Abbildung 47* für das Radprofil *RAILplus\_v1A/28.5/25* auf der Strecke Brig – Zermatt der Matterhorn Gotthard Bahn (MGB) die beiden Parameter Radialstellungsindex und äquivalente Konizität so dargestellt, dass sie in Verbindung mit den Trassierungsgegebenheiten und den Maximalgeschwindigkeiten betrachtet werden können.

Beim Vergleich dieser Darstellungen mit den Paarungen dieses Radprofils mit nominalen Schienen 46E1 und Neigung 1:20 zeigt sich, dass die Ergebnisse mit den Schienenprofilen der Strecke im Trend mit jenen der nominellen Schienen übereinstimmen. Trotzdem zeigen sich bei genauerer Betrachtung, dass sich sowohl auf den geraden Strecken als auch insbesondere in den engen Bögen zum Teil deutliche Abweichungen gegenüber den nominellen Schienen einstellen. Diese Abweichungen und deren Ursachen werden in einer nächsten Projektphase genauer unter die Lupe genommen.

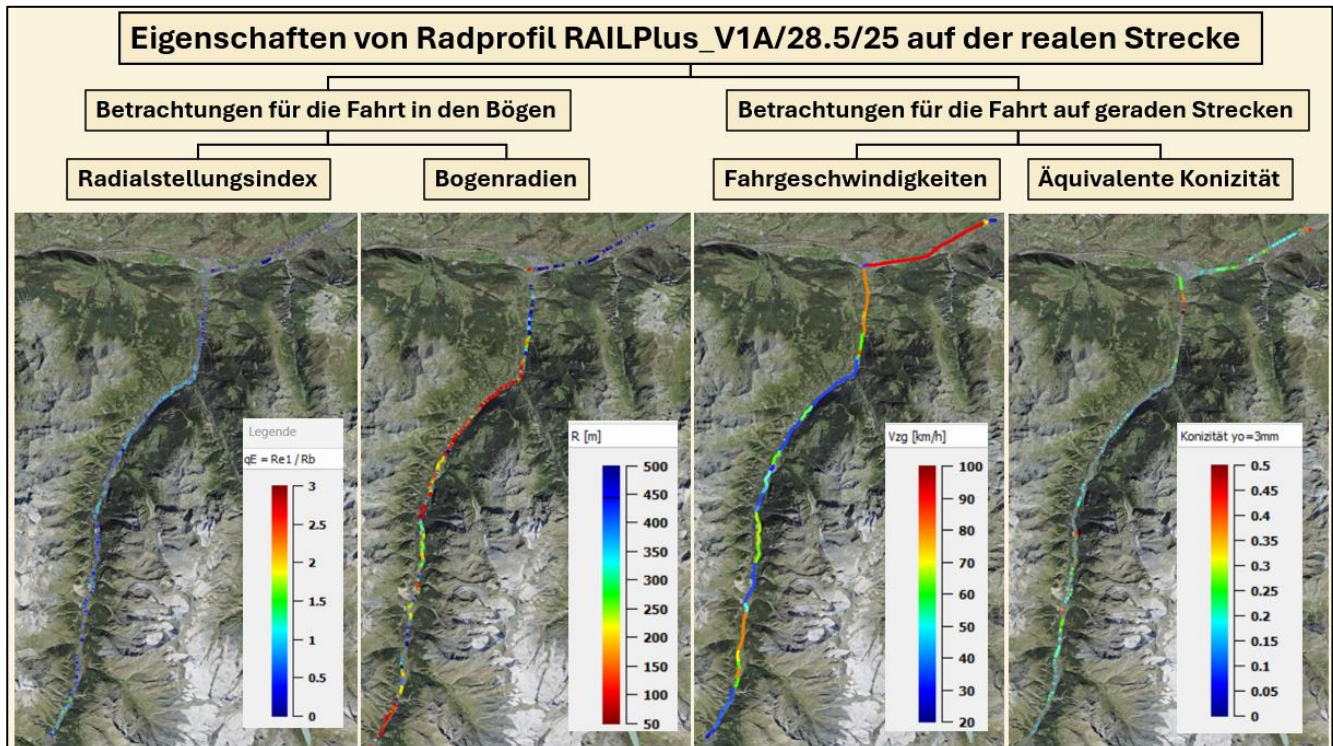


Abbildung 47: Darstellung der Berührungsgeometrischen Grössen des Radprofil *RAILplus\_v1A/28.5/25* mit Radialstellungsindizes und Bogenradien links sowie den äquivalenten Konizitäten und maximalen Streckengeschwindigkeiten rechts

In *Abbildung 46* wurde das Verhalten eines verschleissoptimierten Radprofils auf einer realen Strecke betrachtet. Dabei ging es vor allem darum zu untersuchen, ob und wo sich Grenzen bei den für die Interaktion massgebenden Indikatoren dieses Profils auf einer realen Strecke in Abhängigkeit der maximalen Fahrgeschwindigkeiten erahnen lassen. Dies ist auch eine der Grundlagen für die Erforschung von deren Ursachen und den daraus sich ergebenden Erkenntnissen mit Hinblick auf Verbesserungsmassnahmen an der Schnittstelle von Rad und Schiene aus den Gesichtspunkten des Fahrwegs.

Einen anderen Aspekt stellt die Frage nach der Übertragbarkeit der bei einer Bahn oder auf einem Streckennetz gewonnen Erkenntnisse auf andere Bahnen und ihre Verhältnisse dar. Da die Meterspurbahnen nicht interoperabel sein müssen, war diese Fragestellung bisher von untergeordneter Bedeutung. Zudem zeigen sich schon bei der Analyse der bei verschiedenen Bahnen eingesetzten nominellen Radprofile erhebliche Abweichungen.

Beispiele dafür sind das Radprofil *RTE A* oder damit vergleichbare Radprofile sowie zum Teil modifizierte Radprofile, welche bei mehreren Meterspurbahnen zum Einsatz gelangen. Werden diese Radprofile mit den bei diesen Bahnen verwendeten nominellen Schienenprofilen gepaart, so zeigen sich zum grössten Teil nicht konforme bzw. ungünstige Kontaktverhältnisse von Rad-Schiene. Dass dies nicht nur auf theoretischen Überlegungen beruht, soll anhand des Vergleiches von zwei verschiedenen Radprofilen auf derselben Strecke aufgezeigt werden.

In *Abbildung 48* sind die Indikatoren Radialstellungsindex und äquivalente Konizität für die beiden Radprofile *RTE A* und *RAILplus\_v1A/28.5/25* auf der Strecke Landquart – Sagliains dargestellt.

Für die geraden Strecken zeigen die beiden Radprofile ein vollständig unterschiedliches Verhalten (linke Seite oben und unten in *Abbildung 48*):

- Beim Radprofil *RTE A* liegen die Konizitäten auf der gesamten Strecke unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit im tiefblauen Bereich. Dies bedeutet Konizitäten unterhalb von 0.05. Damit berühren sich auf den geraden Strecken Rad und Schiene in einem schmalen Berührband was einerseits keinen auf breiter Fläche verteilt stattfindenden Verschleissabtrag an den Fahrfläche (Gefahr von Hohllauf) und eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von «low frequency body motions» zu Folge hat.
- Beim Radprofil RAILplus findet eine breitflächige Berührung von Rad und Schiene statt und es besteht keine Gefahr des Auftretens von «low frequency body motions». Im Vereina-Tunnel liegen die Konizitäten im Bereich zwischen 0.1 und 0.15, im grössten Teil der übrigen Streckenabschnitte zwischen 0.15 und 0.25. In einigen kurzen Streckenabschnitten liegen sie zum Teil deutlich darüber jedoch im Vergleich zum Radprofil *W03* in *Abbildung 46* deutlich tiefer. Da in diesen Bereichen jedoch Geschwindigkeiten von 90 bis 100 km/h gefahren werden, sollten diese Stellen genauer betrachtet werden und basierend darauf gezielte Massnahmen zur nachhaltigen Reduktion der Konizität in die Wege geleitet werden.

Auch in den Bögen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen diesen beiden Radprofilen (rechte Seite oben und unten in *Abbildung 48*):

- Mit dem Radprofil *RTE A* wird in keinem der Bögen ein Radialstellungsindex  $q_E \leq 1$  erreicht. In einigen Bögen liegen die Werte im grünen Bereich ( $q_E \approx 1.5$ ). Bei genauer Analyse werden sich auch diese etwas günstigeren Werte erklären lassen (grosse Bogenhalbmesser, grössere Spurerweiterungen). Die meisten Werte liegen deutlich über 3, was sich schon bei parallel zu diesen Auswertungen durchgeführten Korrelationsanalysen herausgestellt hat.
- Beim RAILplus-Radprofil liegen mit wenigen Ausnahmen alle Bögen bei  $q_E \leq 1$ .

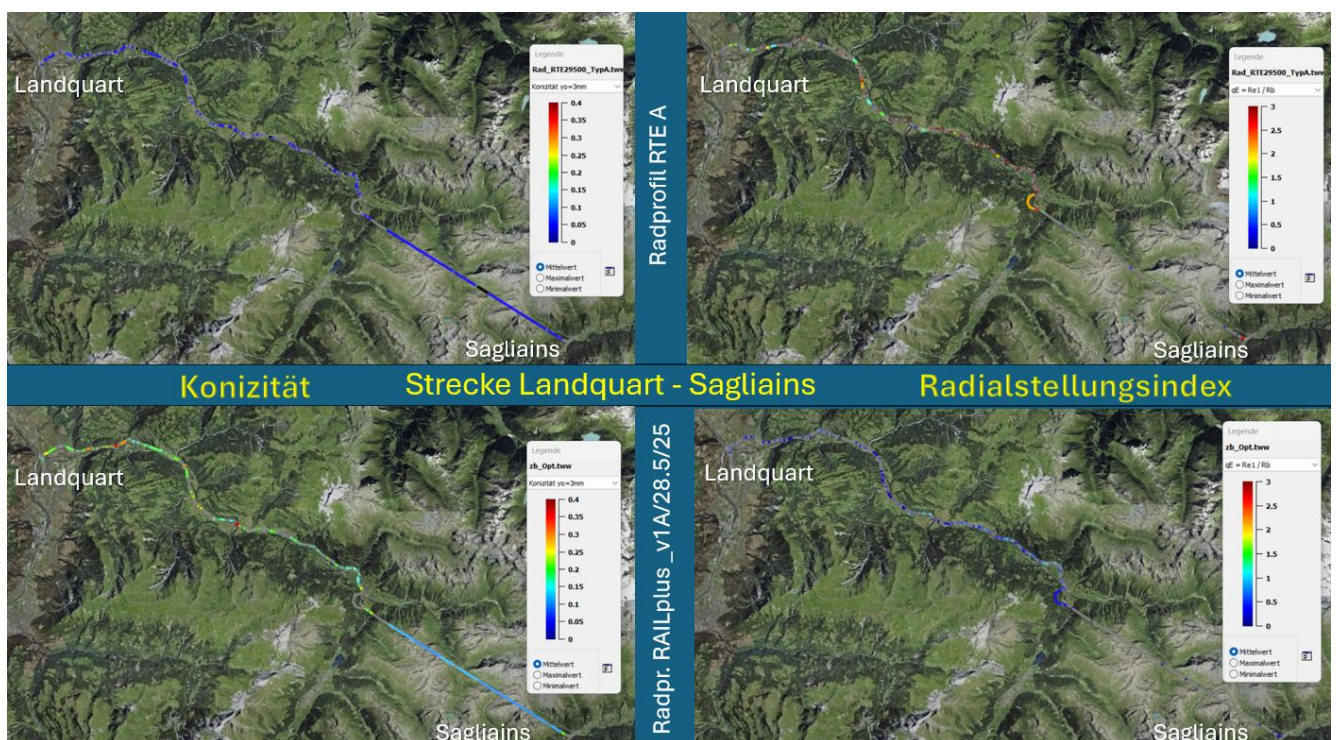


Abbildung 48: Vergleich der beiden Radprofile *RTE A* und *RAILplus\_v1A/28.5/25* hinsichtlich ihres Verhaltens auf der gleichen Strecke

### 6.3 Kontakt Meterspur CH

Das Programm *Kontakt* erschien als erstes der drei in diesem Bericht betrachteten berührungsgeometrischen Auswertprogramme Rad-Schiene. Dieses entstand zu einer Zeit, wo erst vereinzelt Auswertungen aus den Gesichtspunkten des Zusammenwirkens Rad-Schiene durchgeführt wurden. Die Daten für die Instandhaltung von Rad und Schiene aus den Gesichtspunkten des Verschleisses und der geometrischen Interaktion wurden damals noch weitgehend mit mechanischen Lehren erfasst und bewertet. Vereinzelt wurden damals, insbesondere ab den 1970-iger Jahren<sup>11</sup>, bei den grösseren Bahnen auch berührungsgeometrische Auswertungen vorgenommen. Dies insbesondere zur Dokumentation der Rad-Schiene-Paarungen bei fahrtechnischen Prüfungen und Zulassungen von Fahrzeugen, aber auch zum Verständnis des Zusammenwirkens Fahrzeug/Fahrweg bei hohen Fahrgeschwindigkeiten.

Die Abzeichnungen der Profile erfolgten damals noch auf Papier und wurden anschliessend gescannt und danach für die Berechnungen der Berührungsgeometrie weiterverarbeitet. Einige der massgebenden berührungsgeometrischen Parameter (siehe *Abbildung 49*) waren damals unter den Fachleuten zwar bekannt, gewisse wurden jedoch bei den europäischen Bahnen zum Teil nach unterschiedlichen Gesichtspunkten berechnet. Normative Vorgaben dazu waren zu jener Zeit noch nicht verfügbar und so erstaunte auch nicht, dass unterschiedliche Vorstellungen insbesondere bei der Ermittlung der Konizität vorherrschten. Im deutschen Sprachbereich beschränkten sich die Darstellungen auf die in *Abbildung 49* aufgeführten Funktionsverläufe sowie die entsprechenden Verortungen der Berührungspunkte von Rad und Schiene.

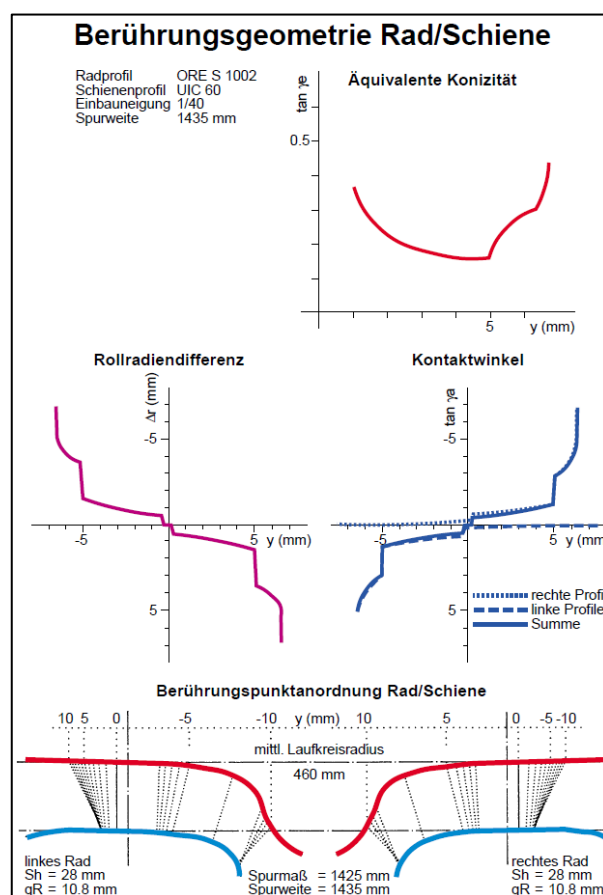


Abbildung 49: Berührungsgeometrische Funktionen und ihre Darstellungsformen

<sup>11</sup> Anton Nefzger: *Geometrie der Berührung zwischen Radsatz und Gleis*. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau*. Heft 3, 1974, S. 113–122.

Erst mit der Einführung der digitalen Messtechnik wurden die alten Messgeräte für die Rad- und Schienenprofile durch digitale Geräte ersetzt. Zu Beginn waren die Aufnehmer dieser Messgeräte noch voll mit den Profilen im Kontakt und damit nicht durch Umwelteinflüsse beeinträchtigt. Später entstanden auf der Laserlichtschnitt-Technologie basierende Messgeräte die berührungslos arbeiten. Diese Technologie war eine Voraussetzung zur Umsetzung bei den heute in den Gleismessfahrzeugen installierten Gerätschaften für die Messung der Schienenprofile sowie bei den Überfahrmessanlagen für die Messung der Radprofile.

Mit dem Programm *Kontakt* war es damit möglich, die mit den digitalen Geräten ermittelten und in der ersten Phase noch als Einzelmessungen verfügbaren Profile von Rad und Schiene ohne weitere Zwischenschritte zu lesen und auf unterschiedliche Art und Weise weiter zu analysieren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen lieferten wichtige Grundlagen für den Aufbau und die dauernde Weiterentwicklung von *Gleis-Kontakt* und *Rad-Kontakt*. Das Programm *Kontakt* war denn auch das erste Auswerteprogramm, welches durch RAILplus für die Meterspur beschafft wurde. Dieses Programm war in der Folge eine der wichtigen Grundlagen für den Aufbau der für die Meterspur Schweiz einheitlichen Erfassung der Rad- und Schienenprofile (Datenfiles) sowie der dafür notwendigen Qualitätsanforderungen.

Zudem konnten dank der Möglichkeiten erweiterter Analysewerkzeuge in diesem Programm Erkenntnisse gewonnen werden, die für die Meterspurbranche und deren Problemstellungen von entscheidender Bedeutung sind. Sehr schnell wurde dank der differenzierten Auswertungen mit *Kontakt* klar, dass aufgrund der bei der Meterspurbranche verwendeten Radprofile eine grössere Vielzahl von unterschiedlichen Varianten verwendet werden (siehe *Abbildung 50*). Die entsprechenden Radialstellungsindizes der verschiedenen Radprofile sind in der Abbildung der Bogenverteilung der Strecke Brig – Zermatt zugeordnet. Aufgrund dieser grossen Streuung bei den Nominalprofilen war man der Annahme, dass es kaum möglich sein wird, ein Standardprofil für die Meterspurbahnen Schweiz abzuleiten. Zum Zeitpunkt, als diese Abbildung erstellt wurde, lagen erst vereinzelt auswertbare Radprofile aus dem Betriebseinsatz vor. Dank den bei drei Bahnen durchgeführten Betriebserprobungen und den dabei erfassten und mit *Kontakt* ausgewerteten Radprofilen scheint sich aufgrund der bisherigen Ergebnisse ein Trend in die Richtung eines einheitlichen Radprofils abzuzeichnen. Das hier verwendete Bewertungskriterium der Radprofile für den Bogenlauf (Radialstellungsindex) entstand erst in der zweiten Hälfte der 1990-iger Jahre.

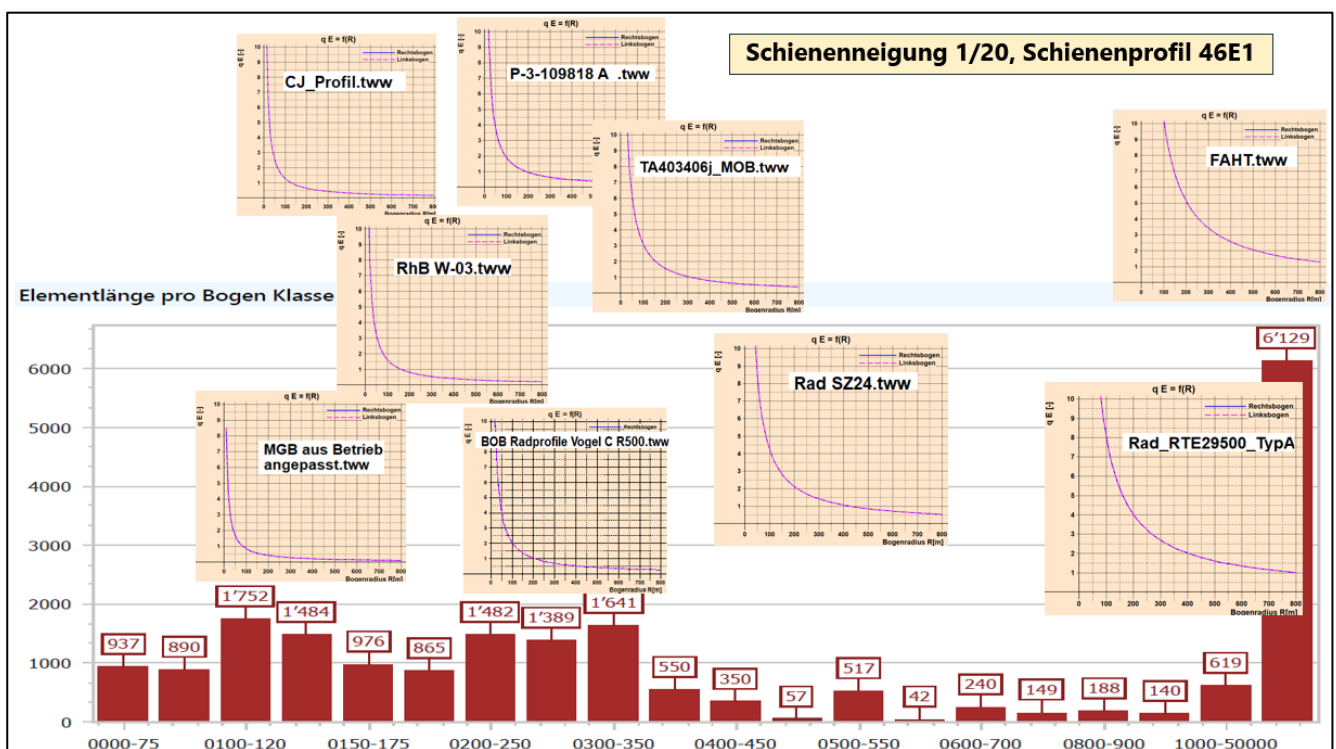


Abbildung 50: Nominelle Schienenprofile bei den verschiedenen Bahngesellschaften der Meterspur Schweiz

Eine der Bahnen die glaubte über ein sogenanntes verschleissangepasstes Radprofil zu verfügen, wollte dessen Eignung für die Fahrt in engen Bögen auf anschauliche Art und Weise nachgewiesen haben. Wie der *Abbildung 51* entnommen werden kann, gibt es deutlich Unterschiede zwischen den beiden nominellen Schienenprofilen. In beiden Fällen zeigt sich jedoch für den Einsatzspiegel dieser Bahn ein unzureichender Radialstellungsindex. Dieses Beispiel zeigt, dass beim Vorliegen der entsprechenden Daten dank dieses Werkzeugs innerhalb von ein paar Minuten klare Aussagen gewonnen werden können. Es zeigt sich eben, dass diese Unterschiede durch reines Übereinanderlegen der Profile nicht erkannt werden. Dafür sind die Paarungen mit den jeweils verwendeten Schienen eine Voraussetzung.

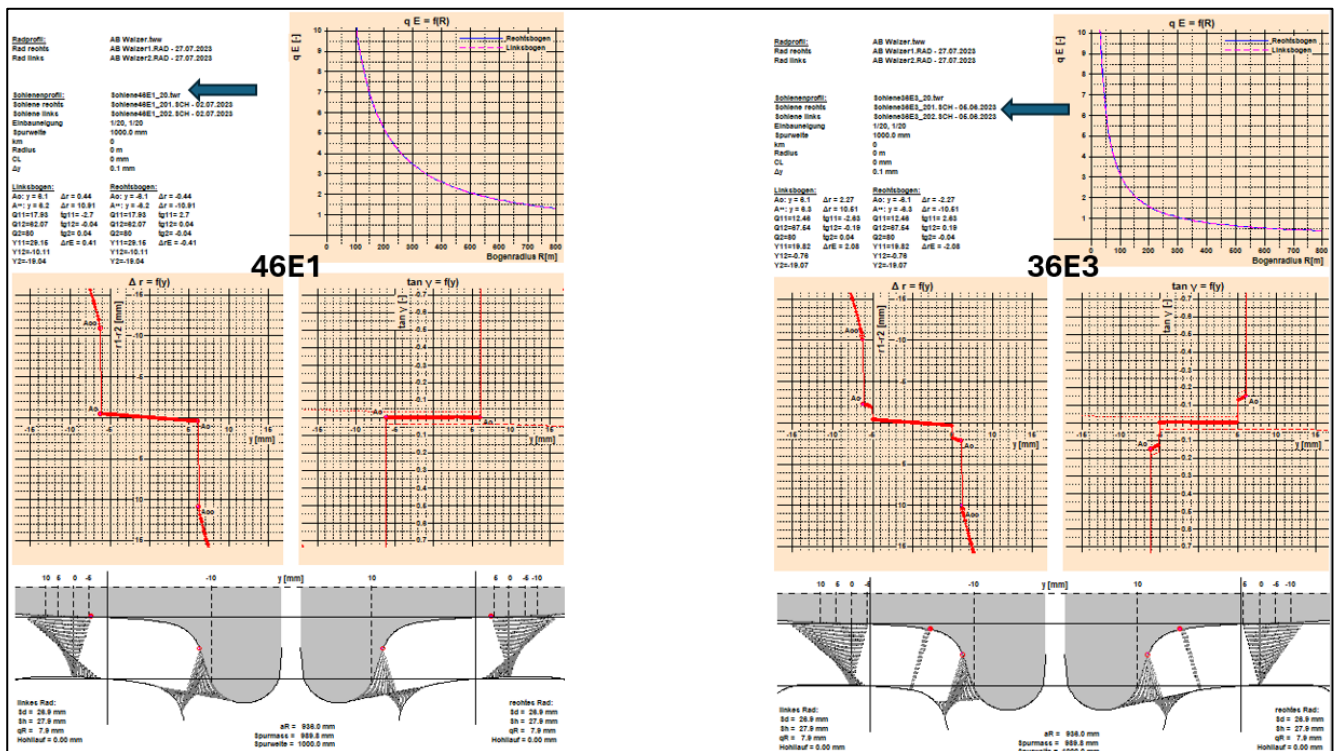


Abbildung 51: Eignung des Radprofils für den Bogenlauf auf Strecken mit Schienenneigung 1:20 und gemischten Schienen 46E1 sowie 36E3

Aus der Ansammlung von grösseren Mengen von Radprofilen über den Laufleistungen (aus Einzelmessungen oder aus Überfahrmessanlagen) zeigten sich bei der äquivalenten Konizität unterschiedliche Trends zwischen zwei verschiedenen Fahrzeugbauarten. Wie die *Abbildung 52* zeigt, wurden aus diesen Daten Stichproben entnommen und für detaillierte Analysen ins Programm *Kontakt* eingelesen. *Kontakt* ist nicht für den Umgang mit grossen Datenmengen gedacht, sondern für gezielte, detaillierte Analysen. Ziel ist es, die Ursachen für diese unterschiedlichen Verhaltensweisen zu erfassen und daraus Hilfestellungen für Verbesserungsmassnahmen zu erbringen.

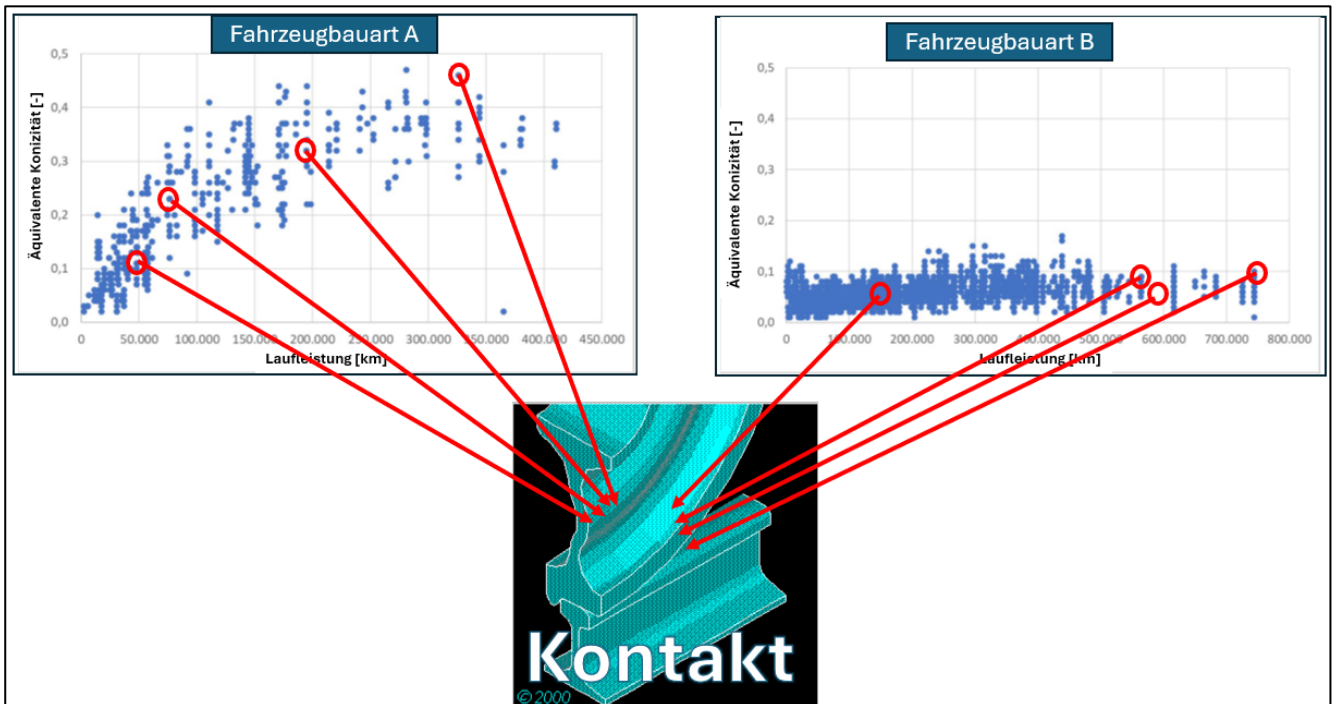


Abbildung 52: Aus Rad-Kontakt vorliegende Auswertung von grossen Datenmengen und detaillierte Analyse mit Kontakt

Vor dem definitiven Einlesen der Radprofile in *Kontakt* erscheinen die Radprofile auf dem Display des Bildschirms (siehe oben links in den beiden folgenden Abbildungen). Die Auflösungen dieser Bilder ist sehr gut, sodass Auffälligkeiten an den Profilen oder deren Fehlstellungen aufgrund von Messfehlern durch ein geschultes Auge unmittelbar erkannt werden. Wenn die Daten eines ganzen Fahrzeugs verfügbar sind, dauert diese Kontrolle bei zum Beispiel 20 Radsätzen 1 bis 2 Minuten.

In *Abbildung 53* und in *Abbildung 54* sind derartige Auffälligkeiten einerseits am Spurkranz und andererseits an der Hohlkehle festzustellen. Bei der Nachkontrolle an diesem Fahrzeug hat sich gezeigt, dass

- in *Abbildung 53* die Bremssohle die Spurkranzflanke berührt und im Betriebseinsatz am rechten Rad eine Diskontinuität in diesem Bereich erzeugt.
- sich die Bremssohlen in *Abbildung 54* an einem anderen Radsatz am linken Rad in die Hohlkehle «einfrißt».

Diese Erscheinungen deuten auf ungünstige Stellungsbilder der Bremssohlen gegenüber den Radlauf Flächen oder aber auf ungünstige Kontaktverhältnisse zwischen Bremssohlen und Rad hin. Im Falle von *Abbildung 54* hat dies für das beeinträchtigte Rad negative Konsequenzen für die Fahrt im Bogen zur Folge.

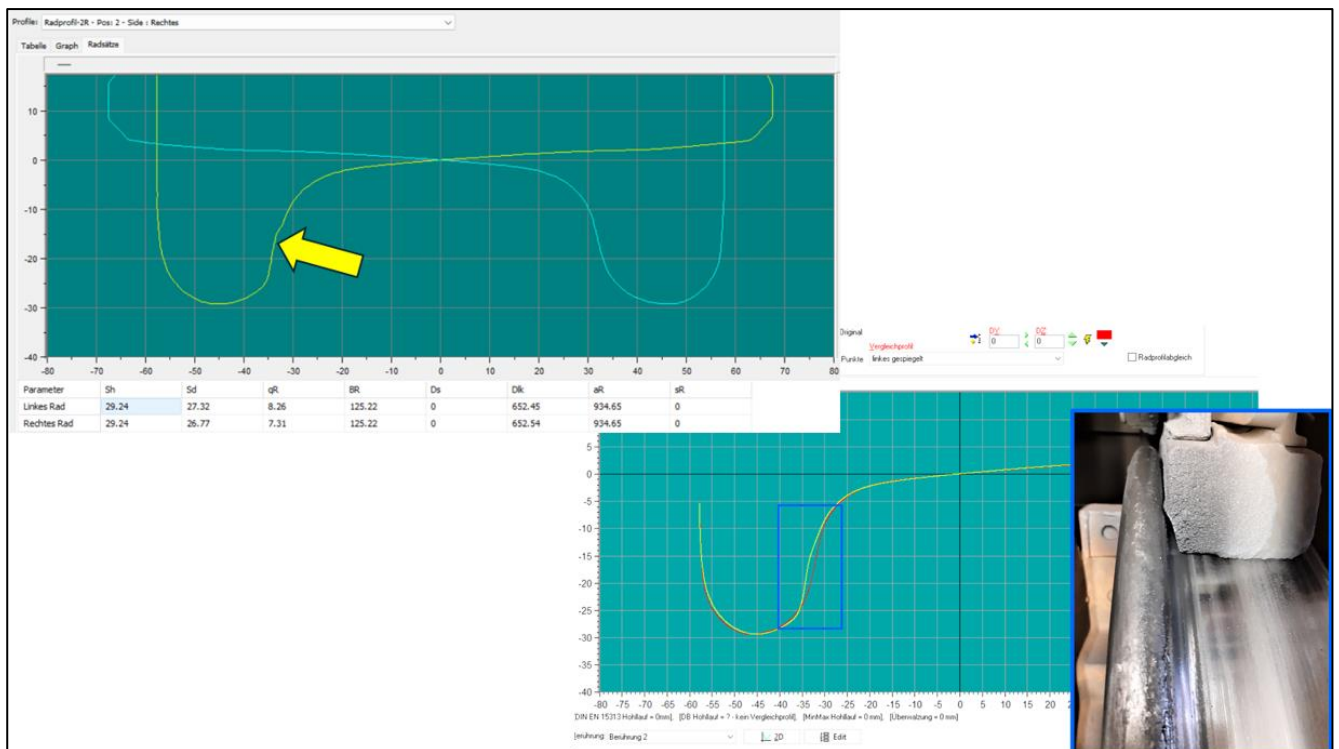


Abbildung 53: Unzulässige Unstetigkeiten durch den Eingriff der Bremssohle in der Spurkranzflanke

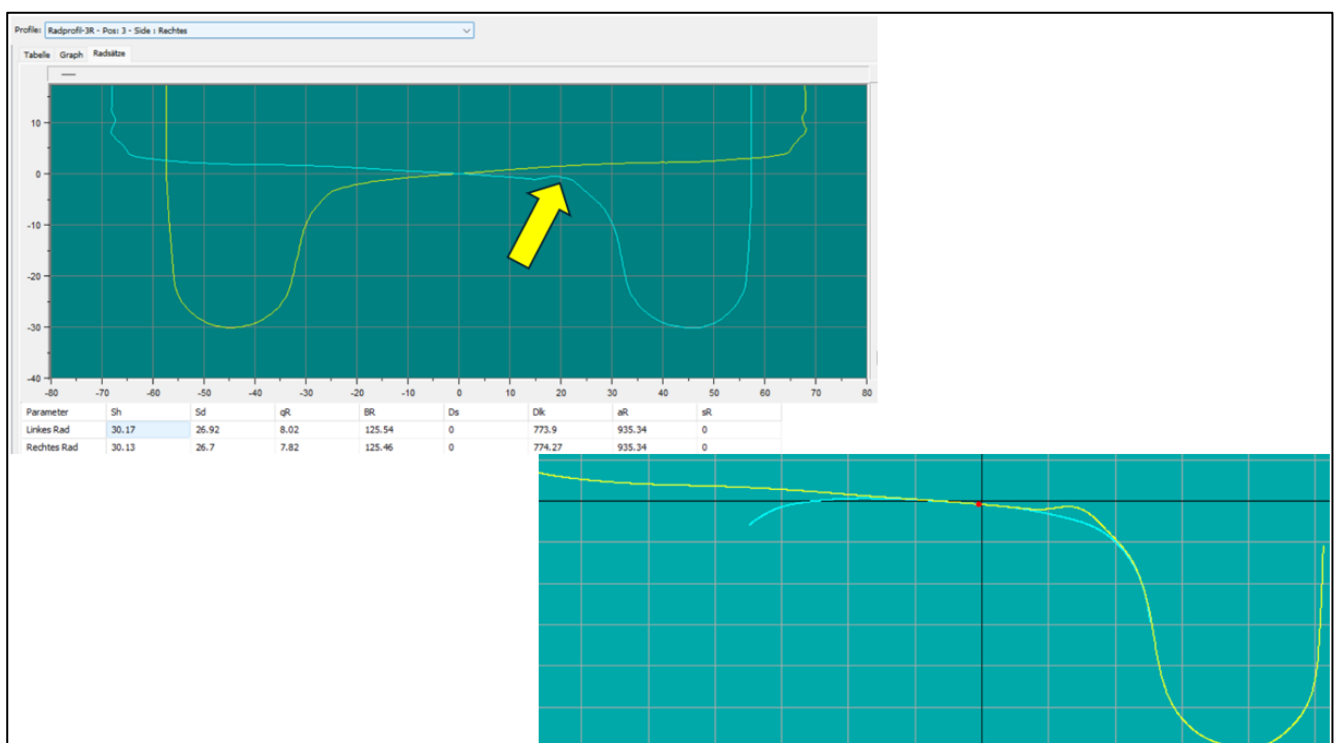


Abbildung 54: Eingriff der Bremssohle im Bereich der Hohlkehle und dessen Auswirkungen auf den Bogenlauf

### 6.3.1 Hauptfenster im Kontakt

Die *Abbildung 55* zeigt das Hauptfenster von *Kontakt*:

- In der grünen Menüleiste N°1 können Diagramme und Gleisparameter editiert, Ansichten abgerufen, Auszüge dargestellt und Berechnungen gestartet werden.
- Im rotumrahmten Bereich N°2 sind alle eingelesenen Radprofile aufgeführt. Diese können der Reihe nach angeklickt werden und deren Berührungsfunktionen werden fortlaufend in N°3, unter Berücksichtigung des ausgewählten Schienenprofils aus dem hellbraunen Bereich N°7, dargestellt.
- Im hellblauen Bereich N°4 können die Berührpaarungen und die Veränderungen von deren Berührungspunkten in Abhängigkeit der Radsatzquerverschiebung im Gleis für den Radsatz oder für das einzelne Rad verfolgt werden. Bei der Darstellung des Einzelrades können zudem die Kontaktflächen im Bild dargestellt, die darin auftretenden Flächenpressungen berechnet sowie die aus den berechneten Tangentialspannungen ermittelten Tangentialkräfte aufgezeigt werden.
- Im dunkelbraunen Feld N°5 können zusätzliche Radsätze eingelesen oder nicht zu berücksichtigende entfernt werden. Zudem können die Radprofile betrachtet sowie mit ihren Nominalprofilen verglichen und damit deren Veränderungen eingesehen werden. Zudem lassen sich in diesem Feld aus den verschlissenen Radprofilen Teile daraus für Neuentwicklungen von Profilen übernehmen.
- Im gelben Feld N°6 bieten sich für die Schienen dieselben Möglichkeiten wie im Feld N°5 für die Räder.
- Im hellbraunen Feld N°7 sind alle ausgewählten Schienenprofile (nominell oder real) abgelegt. Diese können mit jedem der Radprofile im roten Feld N°2 gepaart betrachtet werden.
- Zudem bietet sich bei Betätigung der Schaltfläche neben dem blauen Pfeil N°3 die Möglichkeit, entweder alle berührungsgeometrischen Funktionen eines Radprofils aus N°2 mit allen oder nur ausgewählten Schienenprofilen aus N°7 bzw. diejenigen eines Schienenprofils mit allen oder mit ausgewählten Radprofilen aus N°2 darzustellen.
- In der horizontalen blauen Leiste N°8 lassen sich durch Wahl der entsprechenden Schaltflächen unterschiedliche Verhaltensweisen im Feld N°3 aufzeigen. In *Abbildung 55* ist im Feld N°3 die Darstellung «Standard» zu sehen. Es können aber auch das «Bogensteuerungsvermögen», « $q_A = f(R)$ », der Radialstellungsindex « $q_E = f(R)$ », die «Kontaktflächen» mit den Flächenpressungen in Abhängigkeit des Stellungsbildes des Radsatzes auf der Schiene, der «Schienenverschleiss» oder der «Radverschleiss» dargestellt werden.

In *Abbildung 56* sind die Aufklappmenüs der Menüleiste N°1 aus *Abbildung 55* dargestellt:

- «Edit»: In diesem Fenster können alle Darstellungen der berührungsgeometrischen Funktionen nach Wunsch skaliert werden. Zudem können vor allem bei den nominalen Schienenprofilen die Spurweiten und die Schienenneigungen verändert werden.
- «Ansicht»: In diesem Fenster lassen sich
  - für jeden Radsatz alle Verläufe der äquivalenten Konizitäten gepaart mit allen Schienenprofilen auf den dafür notwendigen Seiten aneinandergereiht darstellen,
  - für jedes Schienenprofil alle Verläufe der äquivalenten Konizitäten gepaart mit allen Radprofilen auf den dafür notwendigen Seiten aneinandergereiht darstellen,
  - für alle Radprofile und alle Schienenprofile gemischt alle Verläufe der äquivalenten Konizitäten auf den dafür notwendigen Seiten aneinandergereiht darstellen.
- «Auszug»: In diesem Fenster lassen sich für alle dort aufgeführten Darstellungsarten die x/y-Koordinaten herunterladen, abspeichern und für weitergehende Untersuchungen oder Abklärungen zur Verfügung stellen.
- «Berechnung»: In diesem Fenster lassen sich

- die Eingabedaten für den Radsatz verändern, wie zum Beispiel maximale Radsatzamplitude, Radlast, Reibwerte Rad-Schiene,
- unterschiedliche Anlaufwinkels Rad-Schiene einstellen,
- die Berechnungen für die neu gewählten Parameter starten.

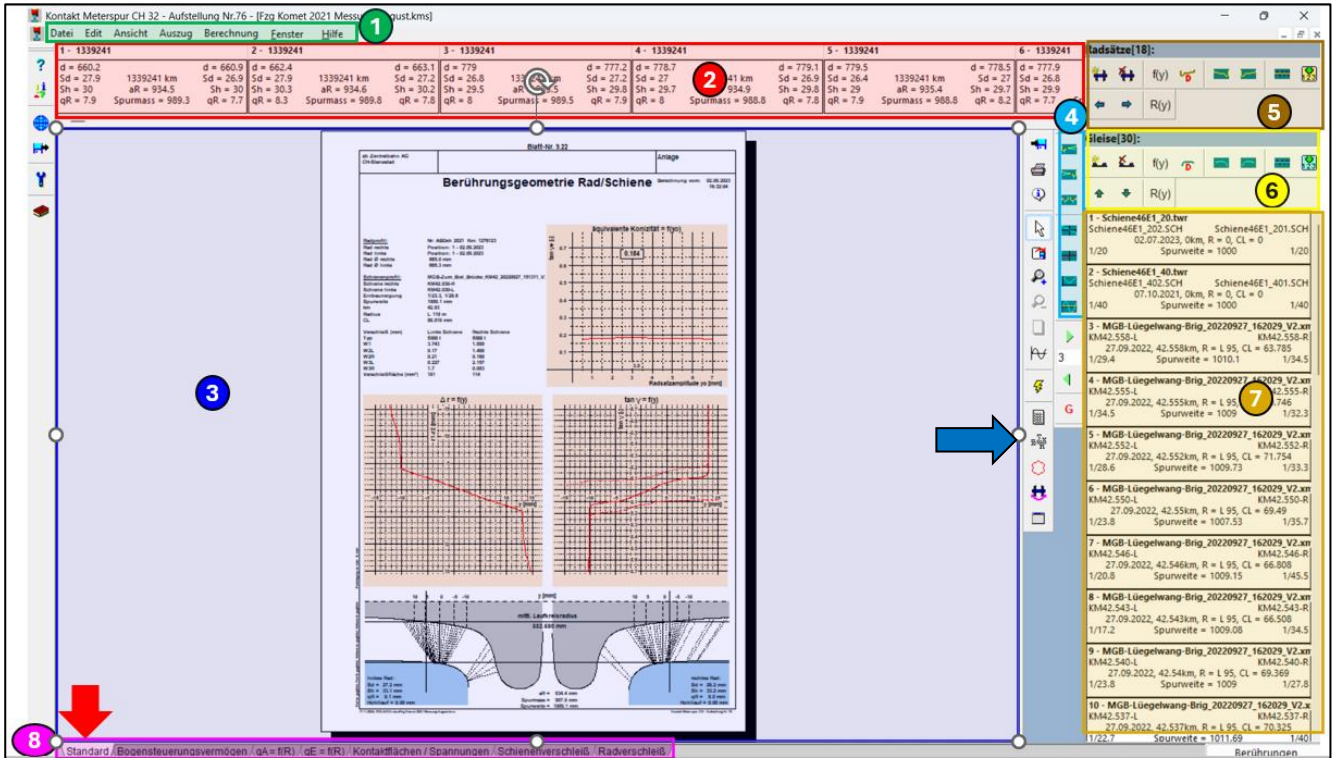


Abbildung 55: Teile des Hauptprogrammfensters im Kontakt

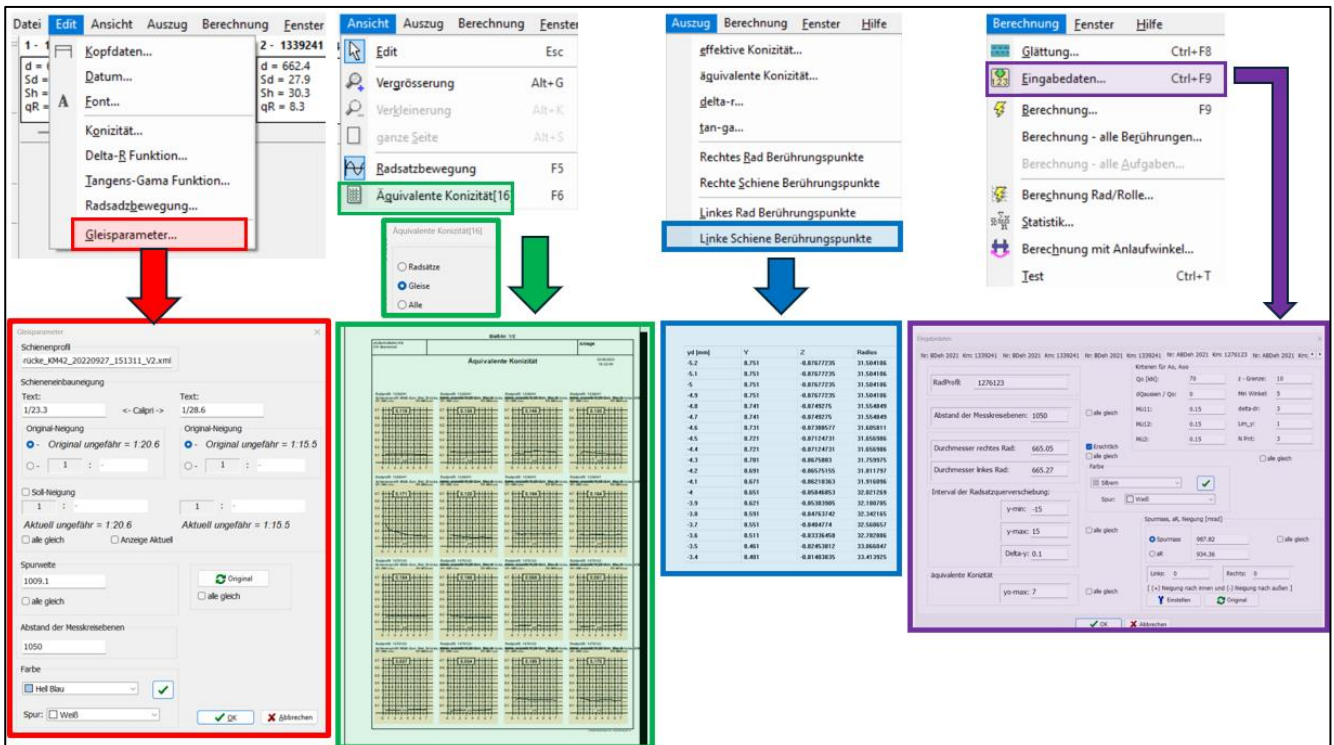


Abbildung 56: Aufklappmenüs aus dem Hauptprogrammfenster

### 6.3.2 Darstellung und Verfolgung von Betriebserprobungen

Bei Betriebserprobungen mit kleineren Datenmengen, wo die leistungsbezogenen Daten von Rädern und die Schienen erhoben und ausgewertet werden sollen, kommt oft das Programm *Kontakt* zur Anwendung. Bei der Beurteilung des Einflusses von Schienenkopfkonditionierung (SKK) anlässlich der Erprobungen bei der MGB und TPF erfolgte die Auswertung der Rad- und Schienenprofile mit Hilfe des Programms *Kontakt*. Die in diesem Zusammenhang erfolgten Auswertungen und Ergebnisse dazu können in den Berichten (<sup>12</sup>, <sup>13</sup>, <sup>14</sup>) nachgeschlagen werden. Dazu gehören auch Betriebserprobungen von neuen Radwerkstoffen, Radprofilen an den Fahrzeugen und Schienenprofilen auf den Strecken.

Ein Beispiel für die Anwendung des Programms *Kontakt* sind Betriebserprobungen mit Radwerkstoffen. Bei der MGB wurden an den Triebbradsätzen vom KOMET verschiedene Stahlqualitäten an bereiften Rädern mit Hinblick auf Verbesserungen beim Verschleiss und bei den Fahrflächenschädigungen durchgeführt. Dabei wurden die Radprofile periodisch vermessen und die Zustände der Radlaufflächen photographisch festgehalten. Zum Vergleich wurden auch die mit Vollrädern ausgerüsteten Laufradsätze verfolgt. Diese sind mit dem Radwerkstoff *ER7* bestückt.

Die *Abbildung 57* enthält die Radsätze aus dem Betriebseinsatz mit einem KOMET bei der MGB. Oben sind die Laufradsätze und unten die Triebbradsätze aufgeführt. Diese wurden mit einem repräsentativen Schienenprofil aus einem engen Bogen im Einsatzgebiet gepaart. Die Laufradsätze sind mit dem Radwerkstoff *ER7* (weich) und die Triebbradsätze mit dem *B6Z* bzw. *B7T* (hart) ausgerüstet. Der weichere Radwerkstoff hat sich schon nach kürzerer Laufzeit nach dem Reprofilieren an die Schienen des Einsatzgebietes angepasst (Verschleissprofil). Beim härteren Radwerkstoff hat die Verschleissanpassung deutlich länger gedauert. In grüner Farbe ist jeweils das bei dieser Bahn verwendete Nominalprofil *RTE A* dargestellt. Vergleichsweise zur Nominalschiene (*46E1*) zeigt sich bei der realen Schiene im Bogen auch mit diesem Radprofil ein günstigeres Verhalten. Aufgrund von anderweitigen Untersuchungen dürfte dies auf die grössere Spurweite des Gleises, aus dem die realen Schienen stammen, begründet sein. In roter und schwarzer Farbe sind die Ergebnisse zu unterschiedlichen Laufleistungen hervorgehoben. Beim Laufdrehgestell liegen die Ergebnisse dieser beiden Stichproben praktisch übereinander, während diese beim Triebdrehgestell noch deutlich auseinander liegen und streuen. Aufgrund des Vergleiches des Nominalprofils mit den Profilen aus dem Betriebseinsatz sind jedoch signifikante Unterschiede feststellbar. Das rührt daher, dass sich die Radprofile an die Schienen angepasst haben.

In *Abbildung 58* sind alle Schienenprofile eines längeren engen Bogens oben mit dem Radprofil *RTE A* und unten mit einem repräsentativen verschleissangepassten Radprofil des Lauffahrwerks des oben aufgeführten Fahrzeugs dargestellt. Da es sich hier um einen Bogen handelt, macht in dieser Abbildung die Darstellung der äquivalenten Konizität keinen Sinn. Deutlich sind wiederum die Unterschiede zwischen den beiden Radprofilen zu erkennen. Die Streuung beim Radprofil *RTE A* ist jedoch deutlich grösser als diejenige beim verschleissangepassten Profil. Dies dürfte auf die grössere Empfindlichkeit des *RTE A* Profils auf die vorliegenden Veränderungen der Spurweiten in diesem Bogen zurückzuführen sein.

---

<sup>12</sup> Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch-Zermatt, Modul 4 Verschleissreduktion durch SKK, Oktober 2022.

<sup>13</sup> Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch-Zermatt, Modul 4a Verschleissreduktion durch SKK, Juni 2024

<sup>14</sup> Etude de l'efficacité du conditionnement du champignon du rail quant à la réduction des nuisances acoustiques (et de l'usure) sur le réseau à voie métrique TPF, Module 3 Réduction du bruit à l'aide du SKK, mars 2024

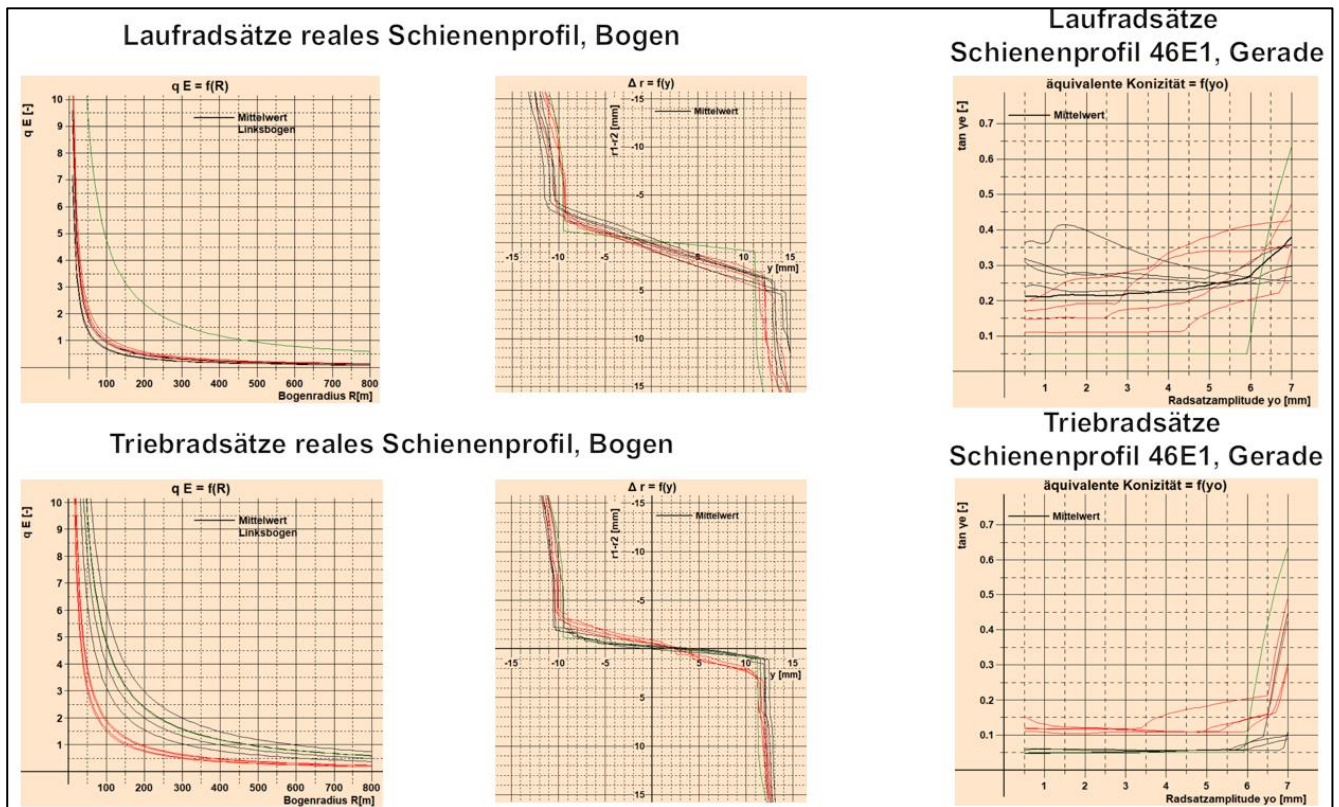


Abbildung 57: Beispiel für die Entwicklung der berührungsgeometrischen Grössen beim KOMET der MGB

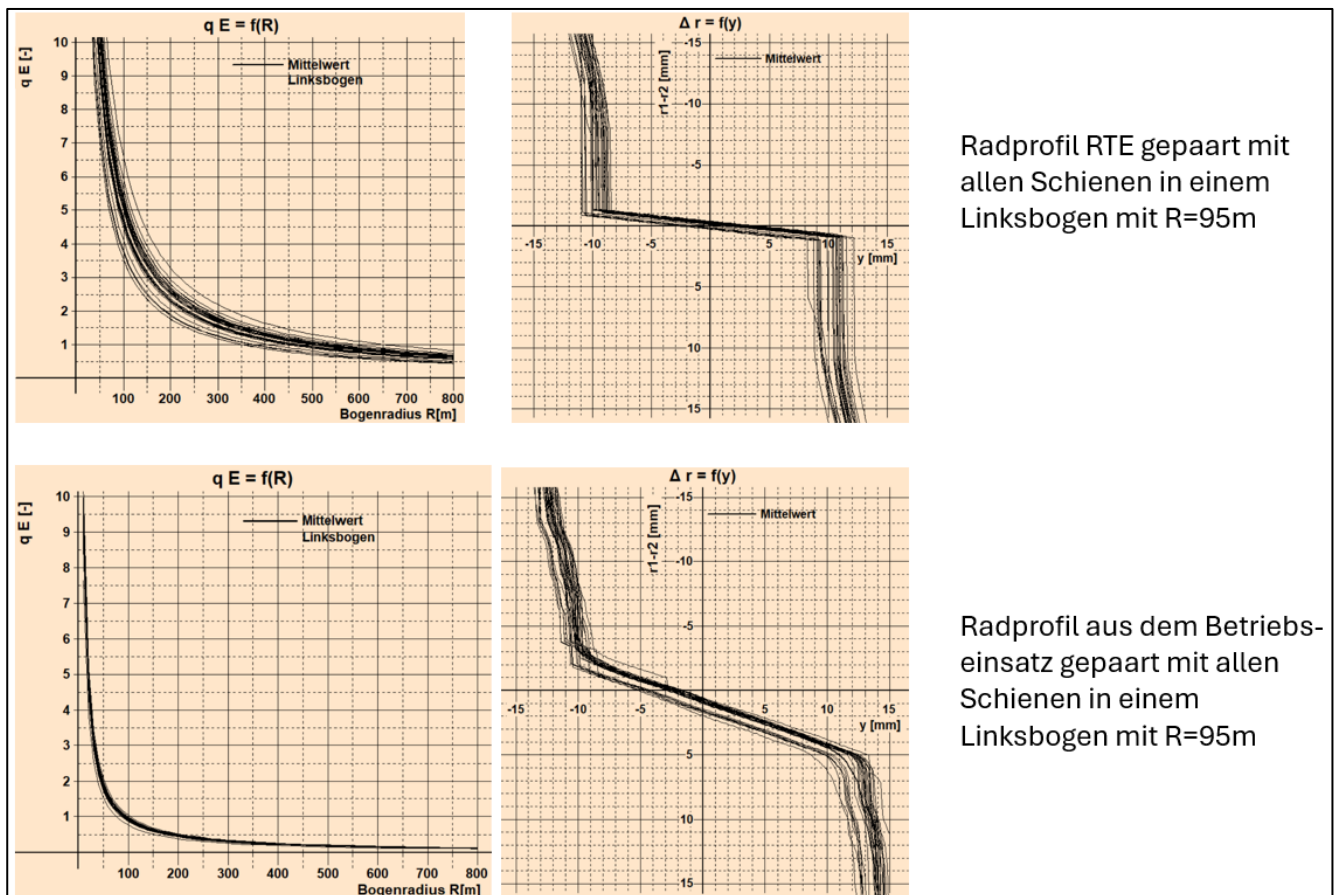


Abbildung 58: Nominelles (oben) und im Betriebseinsatz (unten) entstandenes Radprofil gepaart mit mehreren Radprofilen eines engen Bogens im Einsatzgebiet

### 6.3.3 Darstellung Schienenverschleiss

Der Verschleiss der Schienen wird einerseits durch konkrete Zahlen in der Schienenkopfmittle (W1), Schienenflanken (W2) und an den gleismittigen Fahrkanten (W3) beurteilt. W1 ist ein Mass für den Schienenkopfverschleiss, aus dem das Verhalten auf geraden Strecken bzw. an den beiden Schienen in den Bögen miteinander verglichen werden können. W2 und W3 sind vor allem Grössen, die für die Beurteilung des Schienenverschleisses an den jeweils bogenäusseren Schienen betrachtet werden. Durch die streckenweite Analyse dieser beiden Grössen ist es möglich die Effizienz der Spurkranzschmierung zu überwachen. Auf der anderen Seite ist es möglich, den Flächenabtrag in  $\text{mm}^2$  sowie den Verlauf des Verschleisses über den Schienenquerschnitt darzustellen. Je nach Verlauf des Verschleisses über den Querschnitt sind Anzeichen zu geometrischen Veränderungen an den Kontaktflächen bzw. der Kontaktflächenneigungen erkennbar. Diese müssen jedoch in Verbindung mit Veränderungen in der Schienenneigung betrachtet werden.

Die *Abbildung 59* zeigt rechts die beiden Schienenprofile (rot nominal und schwarz real) in einem Gleisquerschnitt der MGB bei km 42.555. Es handelt sich um einen Linksbogen mit einem Halbmesser von  $R=95\text{ m}$  ( $L\ 95\text{ m}$ ). Die Spurweite beträgt  $1009\text{ mm}$  und die gemessene Schienenüberhöhung (CL) beträgt  $70.746\text{ mm}$ . An der bogeninneren und bogenäusseren Schiene sind die Verschleisswerte in  $\text{mm}^2$  eingetragen. Der für die Spurerweiterung massgebende Wert aus dem Schienenflankenverschleiss W2L an der bogenäusseren Schiene beträgt  $1.337\text{ mm}$ . Die Spurweite von  $1009\text{ mm}$  lässt sich aus diesem Verschleisswert nicht erklären, sodass die Spurerweiterung durch andere Einflussparameter zu begründen wäre. Unten links und vergrössert in *Abbildung 60* ist der Verschleisszustand der bogeninneren Schiene dargestellt. In dunkelblauer Farbe ist die gemessene Punktwolke des Schienenprofils und in hellblauer Farbe das interpolierte und geglättete Schienenprofil dargestellt. Darüber in hellbrauner Farbe ist das mit derselben Einbaulage wie das verschlissene Schienenprofil versehene Nominalprofil 46E1 im Gleis dargestellt. Aus der Differenz dieser beiden Profile (hellbraun und hellblau) ergibt sich der Verschleiss. Dieser und insbesondere sein Verlauf ist in violetter Farbe unterhalb des Profils dargestellt und im Diagramm auf der rechten Ordinate skaliert. In roter Farbe ist das Nominalprofil 46E1 mit der Schienenneigung 1:20, ausgerichtet am mit der tatsächlichen Einbaulage dargestellten Nominalprofil (hellbraune Farbe), abgebildet. Daran ist erkennbar, dass sich die eingebaute Schiene (gemäss Tabelle oben links in *Abbildung 58* Neigung 1:34.5) entweder durch den Einfluss der Spurführungskräfte aufgerichtet hat oder ursprünglich schon in dieser Lage eingebaut wurde.

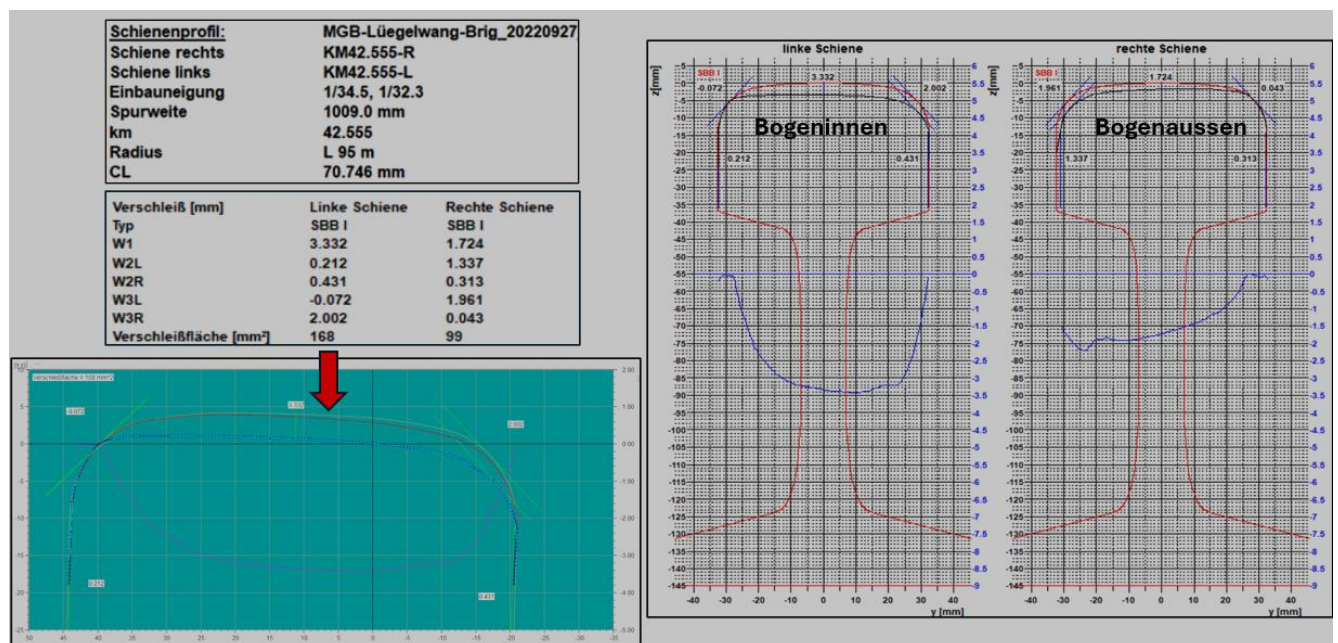


Abbildung 59: Beispiel Darstellung Schienen mit zugehörigen Daten zum Gleis und zum Schienenverschleiss

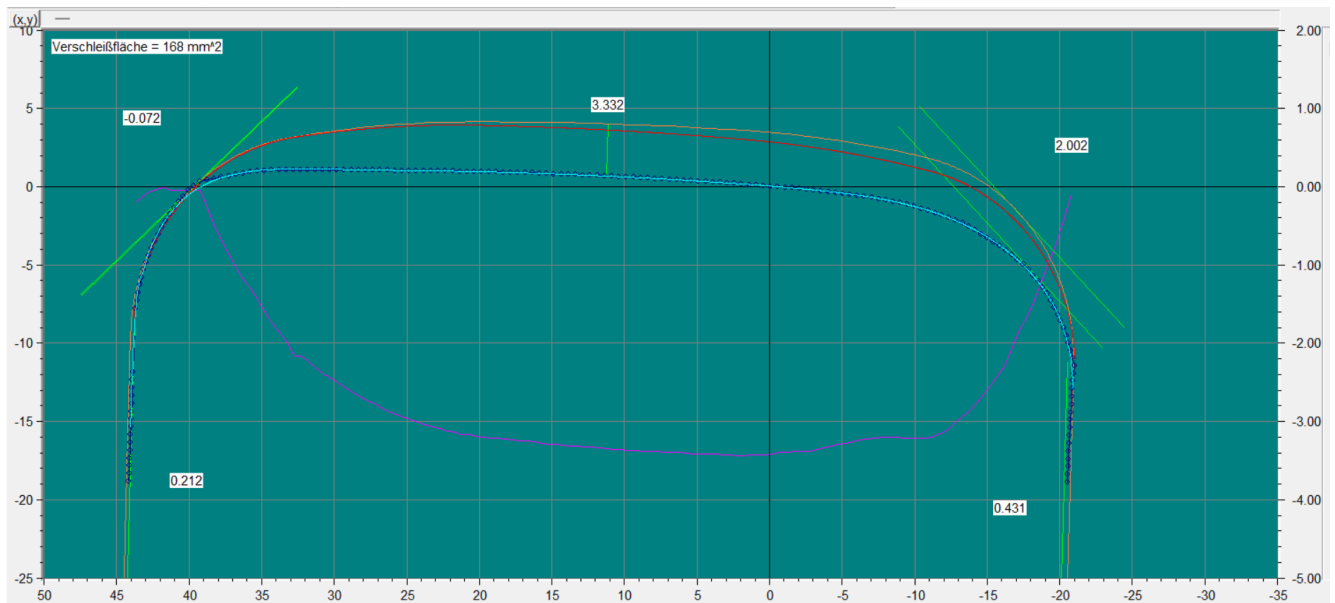


Abbildung 60: Schienenverschleiss an der bogeninneren Schiene aus Abbildung 59

### 6.3.4 Darstellung kontaktmechanischer Aspekte

Aus kontaktmechanischer Sicht können aus der Berührpaarung Rad-Schiene bei gegebener Radsatzlast für jede Paarung für den einzelnen Radsatz (ohne Berücksichtigung des Fahrzeugs) die Kontaktverhältnisse aus den Normalkräften sowie die Tangentialkräfte in Längsrichtung angegeben werden. Da hierbei eine Betrachtung mit einem einzelnen Radsatz ohne Anlaufwinkel angestellt wird, gelten die vorgestellten Ergebnisse unabhängig von den Fahrzeugen mit ihren Fahrwerksprinzipien. Es handelt sich bei diesen Grössen um weitere Beurteilungsmerkmale, die sich aus dem Kontakt Rad-Schiene ergeben. In *Abbildung 61* sind ganz unten die Kontaktpunkte und darüber die Kontaktflächen einer realen Berührpaarung Rad-Schiene bei einer Radsatzlast von 14 Tonnen dargestellt. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass der Linksbogen mit ausgeglichener Geschwindigkeit befahren wird. Bei den Schienen handelt es sich wiederum wie oben um diejenigen des Gleisquerschnittes bei km 42.555. Im Diagramm links sind die Kontaktflächen und rechts die maximalen Flächenpressungen über den gesamten Berührbereich des Radsatzes im Spurkanal dargestellt. Mit den Pfeilen (blau für das bogeninnere Rad, rot für das bogenäussere Rad) sind jene Grössen dargestellt, die sich für die bei maximal möglichem Radialstellungsindex in diesem Bogen einstellen. Beim Radialstellungsindex  $q_E=1$  stellen sich  $T_x$ -Kräfte von rund 1 kN und beim Profil RTE A von rund 15 kN ein (siehe *Abbildung 62*). Da es sich dabei um Kraftschlusskräfte handelt, haben diese direkt Einfluss auf den Verschleiss an Rad und Schiene. Werden diese Profilpaarungen bei den lauftechnischen Berechnungen für den Bogenlauf der Fahrzeuge verwendet, so kommen die Kraftschlusskräfte aus dem daraus resultierenden Bogenlaufverhalten hinzu. Das heisst also, dass auch bei Fahrwerken mit vollständiger Radialeinstellung der Radsätze eine günstige Berührpaarung von Rad und Schiene vorausgesetzt werden muss.

Verschleissangepasste Radprofile schaffen für den Bogenlauf der Fahrzeuge gegenüber noch nicht verschleissangepassten Radprofilen deutlich günstigere Voraussetzungen. Werden diese jedoch aus den Gesichtspunkten der Kontaktmechanik betrachtet, so stellen sich damit geringere Kontaktflächen und höhere Flächenpressungen ein. Diese Grössen hängen von der Geometrie der sich gegenseitig berührenden Flächen ab. Bei verschleissangepassten Radprofilen stellen sich, vergleichsweise zu einem flacheren Radprofil wie zum Beispiel beim RTE A, im Kontaktbereich bei sonst gleichen Raddurchmessern aus dem Querprofil kleinere Berührradien und damit auch kleinere Kontaktflächen ein.

In *Abbildung 63* sind die maximalen Flächenpressungen der beiden Radprofile in Verbindung mit den Schienenprofilen 46E1 und 36E3 in der gleismittigen Lage der Radsätze dargestellt. Grosse Unterschiede stellen sich zwischen den beiden Radprofilen insbesondere beim Übergang von der Schiene 46E1 auf die Schiene 36E3 ein. Werden die Radsätze in Analogie zum Bogenlauf in Richtung der bogenäusseren Schiene verschoben (siehe zum Beispiel *Abbildung 61*), so nehmen insbesondere bei den verschleissangepassten Radprofilen die Grössen der Kontaktflächen ab und die Flächenpressungen entsprechend zu. Dies ist bei Verwendung der Schiene 36E3 noch ausgeprägter als bei der

Schiene 46E1. Aus diesem Grund empfiehlt sich die Verwendung der Schiene 46E1 und die Angleichung der 36E3 (sofern vorhanden) durch Schienenschleifen an Letztere.

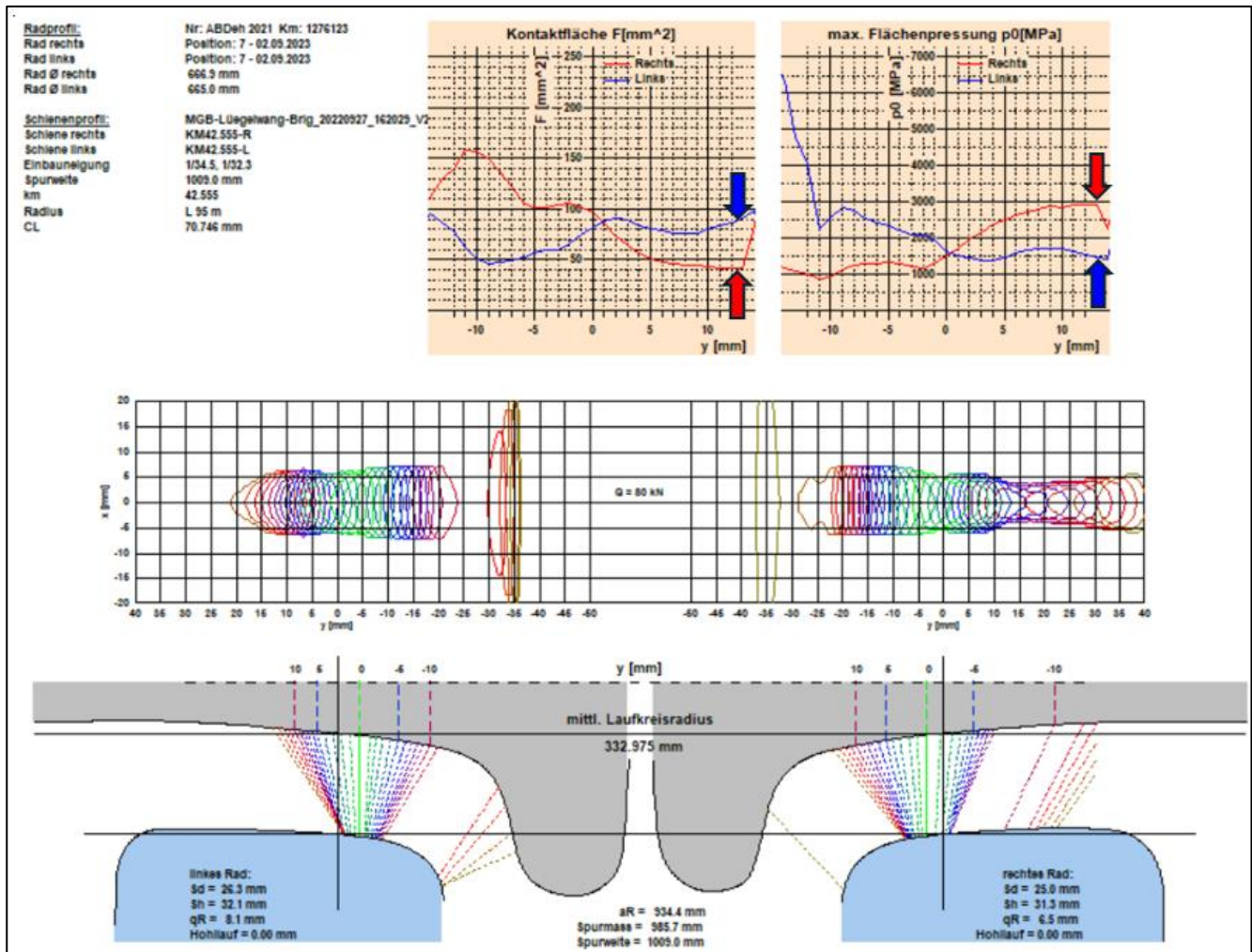


Abbildung 61: Flächenpressungen und Grössen der Kontaktflächen in Abhängigkeit des Stellungsbildes des Radsatzes im Spurkanal bei einer Paarung einer realen Schiene in einem Linksbogen ( $R=95 \text{ m}$ ) mit einem realen Radprofil

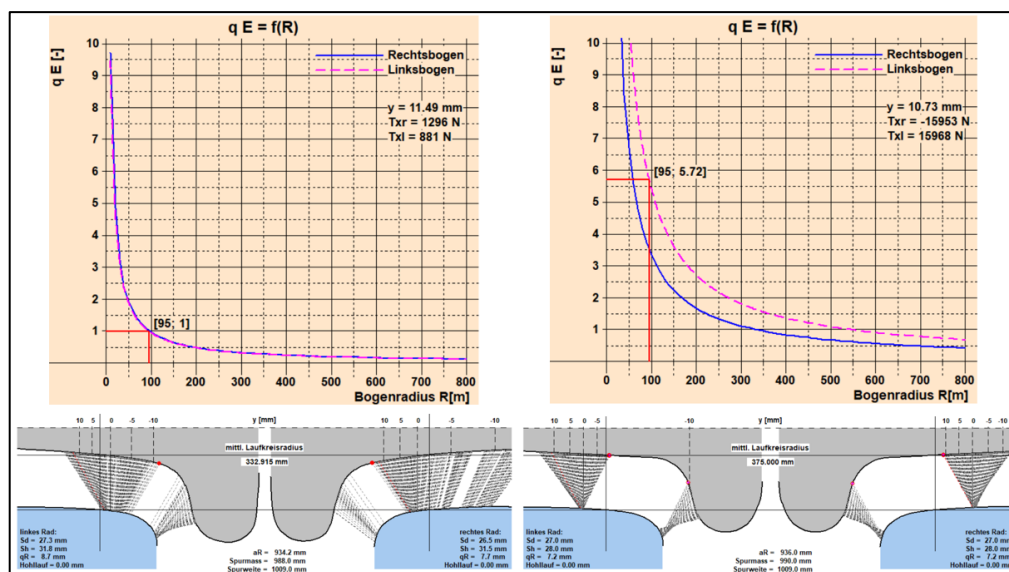


Abbildung 62: Radialstellungsindex und  $T_x$ -Kräfte bei einem verschleissangepassten Radprofil links und beim Radprofil RTE A im Linksbogen mit  $R=95 \text{ m}$  bei km 42.555

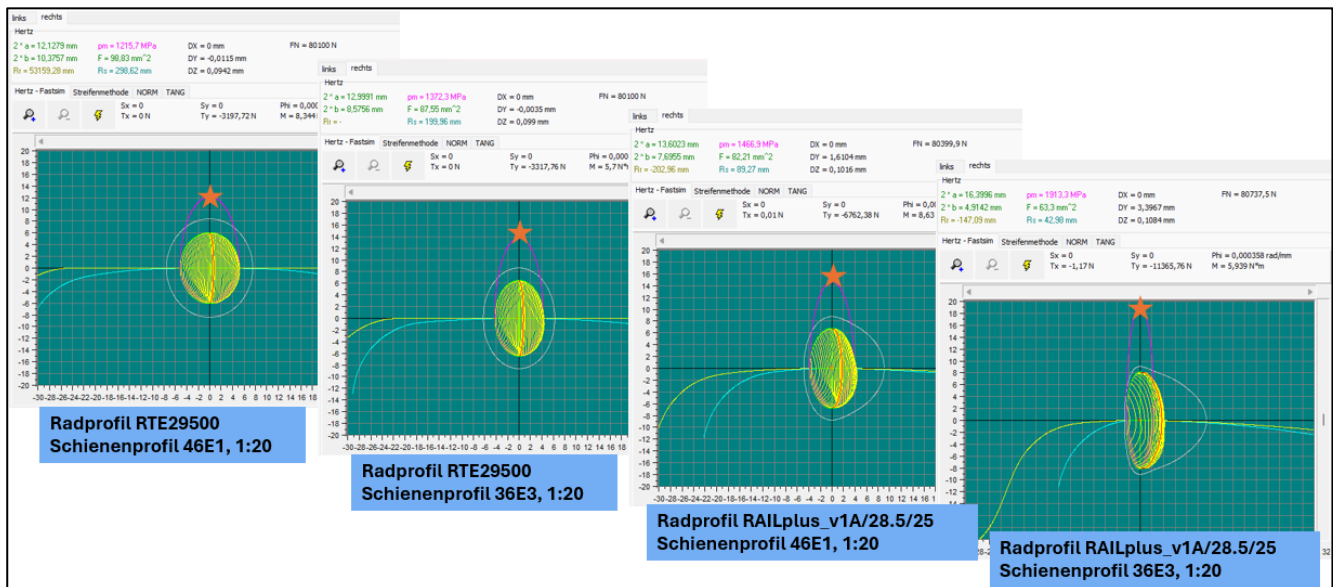


Abbildung 63: Flächenpressungen in Abhängigkeit der Profilaarungen

### 6.3.5 Erstellung von Protokollen

Analog zu den Programmen *Rad-Kontakt* und *Gleis-Kontakt* stellt das Programm *Kontakt* Möglichkeiten zur Erstellung von Protokollen zur Verfügung. Diese Darstellungsart wird oft bei der Erstellung von Berichten oder von anschaulichen Präsentationen verwendet. Wie in *Abbildung 64* dargestellt, wird durch Betätigen der Taste «Protokoll» (blau eingrahmt links im Hauptprogrammfenster) das Auswahlfeld aufgeklappt, in welchem

- im oberen Teil «Seiten» Darstellungen von mehreren berührgeometrischen Grössen unter Berücksichtigung einer beliebigen Anzahl von Radsätzen oder Gleisquerschnitten erstellt sowie unterschiedliche Grössen über der Laufleistung abgebildet werden können;
- beim Anklicken des Begriffes «Standard» sich das untere Auswahlfeld öffnet und weitere Einflussgrössen, wie im Beispiel unten rechts in der Abbildung, der bei den Meterspurbahnen oft zur Darstellung der Leistungsfähigkeit verwendete Indikator 1 mm/Anzahl km verwendet werden kann.

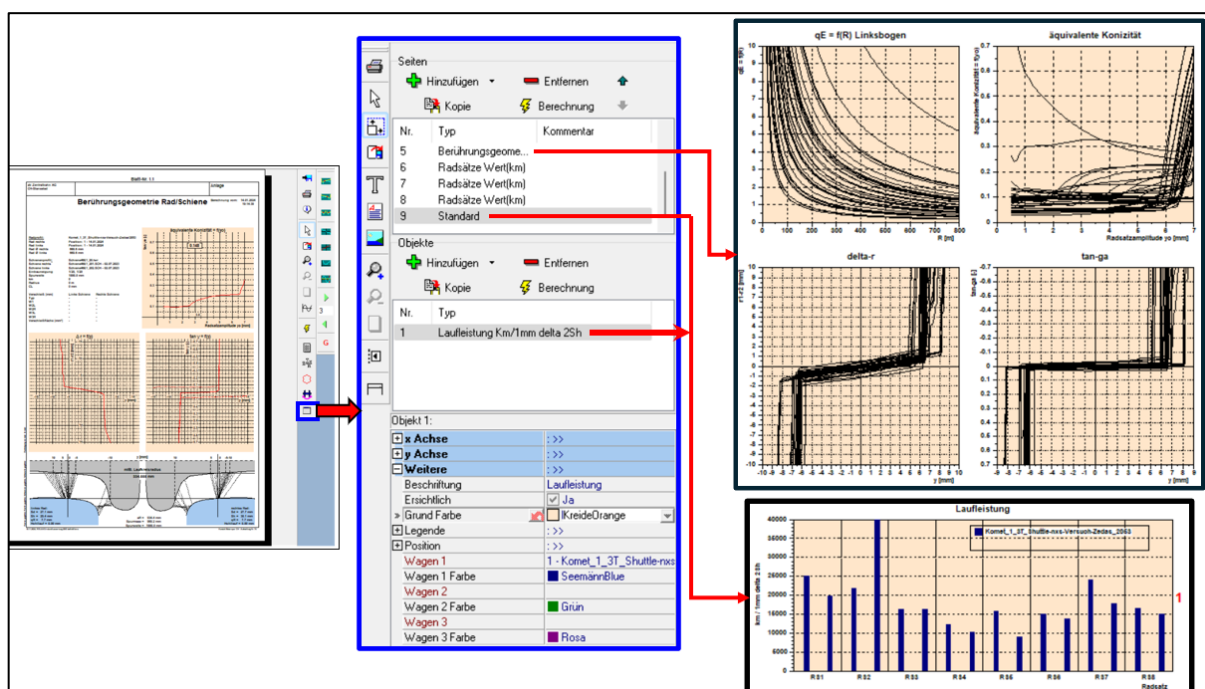


Abbildung 64: Vorgehen bei der Erstellung von Protokollen im Kontakt

## 7 Schlussfolgerungen

Die drei Kontaktprogramme *Kontakt*, *Rad-Kontakt* und *Gleis-Kontakt* sind während nahezu dreissig Jahren entstanden und wurden aufgrund von im Laufe der Zeit bei Anwendungen anfallenden Erkenntnissen, durchgeführten Grundlagenuntersuchungen sowie Erfahrungen mit neuen Messsystemen laufend weiterentwickelt. Voraussetzungen dafür waren

- das Vorliegen von grossen Datenmengen, wie sie durch intensives Messen von Einzelwerten auf digitaler Basis,
- Lösungen von praktischen Problemstellungen, wie zum Beispiel Einfluss von lärmarmen Bremssohlen auf den Radverschleiss und die Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg,
- Erfassung und Bearbeitung von Schienenprofilen aus Messfahrzeugen über grössere Streckenlängen und von Radprofilen aus Überfahrmessanlagen.

Parallel dazu waren entscheidende Fortschritte bei der Einarbeitung des Umganges mit berührungsgeometrischen Grundlagen in die europäischen Normen (*EN 14363*, *EN 15302*) eine wichtige Voraussetzung. Diese drei Programme, basierend auf Erfahrungen bei den Normalspurbahnen, wurden für die Meterspur und ihre speziellen Problemstellungen im Rahmen der Forschungsarbeiten der Systemführerschaft RAILplus weiterentwickelt. Insgesamt ermöglichen diese drei sich gegenseitig ergänzenden Programme Beurteilungen der geometrischen, berührungsgeometrischen und kontaktmechanischen Wechselwirkung Fahrzeug/Fahrweg. Zudem erlauben sie den Bahnen bei den Fahrzeugbeschaffungen in den Lastenheften für die lauftechnischen Nachweise nicht nur die theoretischen, sondern auch die realen Zustände an der Schnittstelle Rad-Schiene vorzugeben.

Das Programm *Rad-Kontakt* erlaubt die Auswertung sehr grosser Datenmengen spezifischer Einflussgrössen auf Sicherheit, Fahrverhalten und Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Fahrzeuge und Fahrzeugbauarten. Diese lassen sich für die Instandhaltung der Räder und Radsätze sowie für die Interaktion Rad-Schiene verwenden. In einem Hauptfenster des Programms lassen sich neben den Radprofilen die Abmessungen an den Radprofilen bzw. Radsätzen sowie weitere Indikatoren laufleistungsabhängig verfolgen und damit deren Trends mit Hinblick auf eine zustandsabhängige Instandhaltungsplanung verwenden. Wählbare Ansichten erlauben durch schnelles Durchklicken die verschiedenen berührungsgeometrischen Eigenschaften der Radprofile und die Verteilungen sowie Grössenordnungen des Radverschleisses lokalisiert über das Querprofil zu analysieren. Dies wahlweise über die aufeinanderfolgenden Messungen der Radprofile an den Radsätzen von Fahrzeugen, Triebzügen und Fahrzeugflotten. Zudem bestehen Möglichkeiten zur Erstellung von Protokollen zu den laufleistungsabhängigen Entwicklungen der geometrischen und berührungsgeometrischen Grössen einer beliebigen Anzahl von Radsätzen verschiedener Fahrzeuge. Daraus lassen sich die massgebenden laufleistungsabhängigen Indikatoren ermitteln, die Treiber für der Wirtschaftlichkeit der Radsätze sind. Dazu gehören zum Beispiel die auf den Fahrzeugen eingesetzten Stahlqualitäten der Räder. Aus den Trends der berührungsgeometrischen Grössen lassen sich durch Paarung ausgewählten Radprofile mit den Schienen der Streckengleise in *Gleis-Kontakt* deren Grenzen für die Sicherstellung des konformen dynamischen Fahrzeugverhaltens ermitteln.

Das Programm *Gleis-Kontakt* erlaubt die Auswertung sehr grosser Datenmengen, die für die Instandhaltung der Schienen und Gleise und für die Interaktion Rad-Schiene verwendet werden können. Im sogenannten Hauptfenster können verschiedene Gleis- und Schienendaten (aus einer Auswahl von rund 129 verschiedenen Einflussgrössen) oder Profilformen von einzelnen Schienen ganzer Strecken, durch schnelles Durchklicken und auf einen Blick, in ihrem Trendverhalten beurteilt werden. Die durch den Fahrweg zu verantwortenden berührungsgeometrischen Indikatoren (zum Beispiel äquivalente Konizität und Radialstellungsindex) können entlang der Strecken in Verbindung mit weiteren diese beeinflussenden Grössen des Gleises und der Schienen dargestellt und bei Feststellung von Auffälligkeiten gezielt analysiert werden. So kann zum Beispiel die Konizität durch die Spurweite, die reale Neigung der Schiene oder der Fahrfläche, den Verschleisszustand der Schienenfahrfläche und weitere Parameter beeinträchtigt sein. Daraus lassen sich Massnahmen für die Gleisinstandsetzung ableiten. Ähnliche Einflüsse können beim Radialstellungsindex verursacht durch das Gleis identifiziert werden. Unterschiedliche Radprofile können auf ihr Verhalten auf dem Gleis hinsichtlich ihrer Verhaltensweisen in den Bögen oder in anderen Trassierungsbereichen beurteilt werden. Dazu werden diese Radprofile mit den Schienenprofilen ganzer Strecken gepaart. Anhand von Korrelationsanalysen und statistischen Darstellungen kann auf einen Blick eingesehen werden, ob sich das Radprofil grundsätzlich für den

Einsatz auf den entsprechenden Netzen eignet und wo sowie in welchem Ausmass, die Grenzen der Eignung überschritten werden. Zudem kann untersucht werden, ob bei einer geringen Anzahl von Überschreitungen Möglichkeiten zu Anpassungen am Fahrweg möglich und wirtschaftlich vertretbar sind.

Das Programm *Kontakt* ist auf der einen Seite für die vertiefte Analyse von ausgewählten Profilen aus dem *Rad-Kontakt* und aus dem *Gleis-Kontakt* vorgesehen. Zudem wird es bei der Entwicklung von neuen Rad- und Schienenprofilen verwendet. Auf der anderen Seite eignet es sich für die fortlaufende Analyse von Daten aus Betriebserprobungen sowie von schnellen Beurteilungen der Brauchbarkeit von neu entwickelten Profilen oder von solchen, die sich im Betriebseinsatz nicht bewährt haben. Es wurde im Rahmen der Systemführerschaft RAILplus für die Beurteilung der Rad- und Schienenprofile und deren Verhalten bei den Betriebserprobungen mit SKK bei der TPF und bei der MGB verwendet. Derzeit wird es benutzt, um die Betriebserprobungen mit den neuen Radprofilen bei der ZB und bei der MGB zu verfolgen.

## 8 Ausblick

Die drei verfügbaren Programme *Gleis-Kontakt*, *Rad-Kontakt* und *Kontakt* erlauben es auf der Basis von grossen repräsentativen Stichproben für jede Meterspurbahn basierend auf deren realen Rad- und Schienenprofilen ihr Verhalten zu analysieren. Damit sind die Werkzeuge für die Erfassung und Auswertung bzw. Bewertung bei den weitergehenden Untersuchungen innerhalb des Projektes P3 verfügbar. Ziel dieser Untersuchungen wird es sein, Antworten auf die folgenden Fragestellungen zu finden:

- Ob sich bei den Schienen in den verschiedenen Trassierungsbereichen Klassen von gemeinsamen Merkmalen ausbilden und abzuklären ob und in welcher Hinsicht sich diese von den Nominalprofilen bzw. weiteren Parametern unterscheiden. Dabei wird bei Abweichungen zu untersuchen sein, ob diese durch den Verschleiss an den Fahrflächen und/oder Änderungen in der Einbaulage verursacht sind. Je nachdem welche dieser Einflussgrössen dominieren und wie sich diese auswirken, werden Massnahmen erarbeitet, um das aus den Gesichtspunkten der Fahrbahn zu korrigieren.
- Ob sich bei den Profilen der Räder gemeinsame Merkmale ausbilden und abzuklären ob und in welcher Hinsicht sich diese von den Nominalprofilen unterscheiden. Bei den Schienen liegen für die vorgesehenen Untersuchungen aufgrund der netzweiten Erfassungen der Schienenprofile durch einen Messwagen genügend grosse Stichproben vor. Bei den Fahrzeugen sind bei den verschiedenen Bahnen noch zu wenige Radprofile erfasst worden. Deshalb wird es für die Räder schwierig sein, eine repräsentative Aussage zur Entwicklung der Radprofile zu prognostizieren. Wenn eine Aussage zu einem gemeinsamen Radprofil für die Meterspurbahnen erwartet wird, so muss dazu eine grössere Stichprobe zugrunde gelegt werden.
- Die nominelle Schieneneinbauneigung scheint aufgrund der bisherigen Ergebnisse wenig Einfluss auf die Entwicklung des verschleissangepassten Radprofils zu haben. Dieser Sachverhalt muss jedoch noch erhärtet werden. Auch scheint sich das Radprofil von Radsatz Typ A in Betriebseinsatz ähnlich zu entwickeln wie der Radsatz Typ B. Auch dieser Sachverhalt muss durch eine grössere Stichprobe belegt werden.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Referenzen

- [1] R RTE 29500: Standardisierung Radsätze und Weichen, Meterspur
- [2] R RTE 22570: Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen, Meterspur
- [3] D RTE 22556: Kontrolle der Weichen, Meterspur
- [4] AB EBV: Verordnung des BAV über die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
- [5] RAILplusSF-00004: Spezifikation für die Erfassung, Auswertung und Bewertung von Rad- und Schienenprofile, Technischer Bericht P3 LO 5.2.1
- [6] Datenbank Bogenverteilung: Chris Zimmermann, Innovative Times AG
- [7] RAILplusSF-00046: Entwicklung eines verschleissoptimierten Radprofils für Meterspurradsätze, Technischer Bericht P3 LO 4.1.1b
- [8] EN 14363: Bahnanwendungen - Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche
- [9] EN 15302: Bahnanwendungen - Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie - Definitionen und Berechnungsmethoden
- [10] Lack T., Gerlici J.: The FASTSIM Method Modification to Speed up the Calculation of Tangential Contact Stresses between Wheel and Rail, Manufacturing Technology, volume 13, issue 4, pages 486-492, 2013
- [11] Anton Nefzger: *Geometrie der Berührung zwischen Radsatz und Gleis*. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau*. Heft 3, 1974, S. 113–122.
- [12] Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch-Zermatt, Modul 4 Verschleissreduktion durch SKK, Oktober 2022.
- [13] Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch-Zermatt, Modul 4a Verschleissreduktion durch SKK, Juni 2024
- [14] Etude de l'efficacité du conditionnement du champignon du rail quant à la réduction des nuisances acoustiques (et de l'usure) sur le réseau à voie métrique TPF, Module 3 Réduction du bruit à l'aide du SKK, mars 2024

### 9.2 Abbildungen

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Abbildung 1: Rad- und Schienenprofile aus den Gesichtspunkten der Instandhaltung und Lauftechnik</i>                                                                                      | 8  |
| <i>Abbildung 2: 21 Partnerbahnen von RAILplus aus der ganzen Schweiz</i>                                                                                                                     | 9  |
| <i>Abbildung 3: Alle nominellen Radprofile der Meterspurbahnen gepaart mit der Schiene 46E1 und Neigungen 1:20 bzw. 1:40</i>                                                                 | 11 |
| <i>Abbildung 4: Alle nominellen Radprofile der Meterspurbahnen gepaart mit der Schiene 36E3 und Neigungen 1:20 bzw. 1:40</i>                                                                 | 11 |
| <i>Abbildung 5: Summenhäufigkeit und Häufigkeitsverteilung der äquivalenten Konizitäten der Radprofile RTE A und RAILplus_v1A/28.5/25 auf der Strecke Landquart - Sargans</i>                | 12 |
| <i>Abbildung 6: Radprofil RTE A, Radialstellungsindex auf der gesamten Strecke links, Radialstellungsindex auf nomineller Schiene mit Spurweiten 1000 mm und 1010 mm rechts</i>              | 13 |
| <i>Abbildung 7: Radprofil RAILplus_v1A/28.5/25, Radialstellungsindex auf der gesamten Strecke links, Radialstellungsindex auf nomineller Schiene mit Spurweiten 1000mm und 1010mm rechts</i> | 14 |
| <i>Abbildung 8: Umgang mit grossen Datenmengen bei der Berührungsgeometrie Rad-Schiene</i>                                                                                                   | 15 |
| <i>Abbildung 9: Verortung der Trassierungselemente Geraden (grün), Übergangsbögen (orange) und Vollbögen (rot) bei TPF</i>                                                                   | 16 |
| <i>Abbildung 10: Bogenverteilungen MGB gesamtes Streckennetz (blau) und Teilstrecken (rot)</i>                                                                                               | 17 |
| <i>Abbildung 11: Unterschiedliche Paarungsmöglichkeiten von Rad- und Schienenprofilen und die 3 dazu verwendbaren Kontaktprogramme</i>                                                       | 21 |
| <i>Abbildung 12: Berührungsgeometrische Funktionen von nominellen Rad- und Schienenprofilen</i>                                                                                              | 22 |
| <i>Abbildung 13: Zusammenwirken der berührungsgeometrischen Programme mit den Streckendaten und den lauftechnischen Charakteristiken der Fahrzeuge</i>                                       | 24 |
| <i>Abbildung 14: Teile des Hauptprogrammfensters im Rad-Kontakt</i>                                                                                                                          | 26 |
| <i>Abbildung 15: Weitere Besonderheiten in den Teilen des Hauptfensters</i>                                                                                                                  | 27 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 16: Entwicklung der Werte in Abhängigkeit der Laufleistung hier dargestellt für die Spurkranzhöhe $S_h$ für einen Radsatz .....                                                                                            | 28 |
| Abbildung 17: Entwicklung des Raddurchmessers und der Spurkranzdicke in Abhängigkeit der Laufleistung .....                                                                                                                          | 28 |
| Abbildung 18: Entwicklung der Radprofile und deren Formen über der Laufleistung .....                                                                                                                                                | 29 |
| Abbildung 19: Zum Herstellen des Nominalprofils auf der Unterflurdrehbank notwendige Durchmesserreduktion .....                                                                                                                      | 29 |
| Abbildung 20: Möglichkeiten im Bereich des Reiters «Ansicht», hier der Register « $qE=f(R)$ » gelb hinterlegt .....                                                                                                                  | 30 |
| Abbildung 21: Darstellung Radverschleiss im Bereich des Reiters «Ansicht», hier der Register «Verschleiss» gelb hinterlegt .....                                                                                                     | 30 |
| Abbildung 22: Darstellung von Parametern über die Zeit und über die Laufleistung .....                                                                                                                                               | 31 |
| Abbildung 23: Verhalten der berührungsgeometrischen Grössen während der Betriebserprobung bei Paarung mit zwei unterschiedlichen Schienenprofilen (links 46E1 und rechts 36E3 beide mit Neigung 1:20) .....                          | 32 |
| Abbildung 24: Darstellung der Häufigkeitsverteilung und der Summenhäufigkeiten der äquivalenten Konizitäten bei den beiden Schienenprofilen 46E1 und 36E3 .....                                                                      | 32 |
| Abbildung 25: Verlauf der äquivalenten Konizität über die Laufleistung bzw. über die Zeit .....                                                                                                                                      | 33 |
| Abbildung 26: Teile des Hauptprogrammfensters im Gleis-Kontakt .....                                                                                                                                                                 | 35 |
| Abbildung 27: Darstellung der berührungsgeometrischen Funktionen für einen bestimmten Schienenquerschnitt .....                                                                                                                      | 35 |
| Abbildung 28: Berührungspunkte Radprofil W03 der RhB mit Schiene 46E1 in einem Linksbogen, Kontaktflächen und Flächenpressungen bei der einer Radsatzlast von 16 Tonnen .....                                                        | 36 |
| Abbildung 29: Radialstellungindizes für die beiden Radprofile W03 und RTE A und daraus für die Raddurchmesser 750 mm und die Schienenprofile bei km 29.599 für eine Radsatzlast von 16 Tonnen ermittelten Kraftschlusskräfte .....   | 37 |
| Abbildung 30: Berührungspunkte (Bildmitte) und Berührflächen mit den Flächenpressungen sowie den Tangentialkräften jeweils links und rechts daneben für die beiden Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen bei km 29.599 .....   | 38 |
| Abbildung 31: Darstellung der beiden Schienen links/rechts im gleichen Gleisquerschnitt sowie des Schienenverschleisses .....                                                                                                        | 39 |
| Abbildung 32: Vergrösserte Darstellung des Schienenverschleisses und Vergleich mit der nominellen Schienen mit ihrer Einbauneigung beim Streckenkilometer 29.57893 .....                                                             | 40 |
| Abbildung 33: Seitenansichten mit den über der Strecke dargestellten Merkmalen der Gleise und der Schienen .....                                                                                                                     | 41 |
| Abbildung 34: Auswahl der Graphen für die Darstellung der Beurteilungsgrössen über den Streckenverlauf (berührungsgeometrische Grössen für die Paarung mit dem Radprofil RTE A dargestellt) .....                                    | 42 |
| Abbildung 35: Auszug zur besseren Auflösung einer Auswahl von verschiedenen Grössen (Berührungsgeometrie für das Radprofil RAILplus_v1A/28.5/25) .....                                                                               | 42 |
| Abbildung 36: Auszug aus vier Parametern des Streckenabschnittes km 20 bis km 24 der Strecke Landquart – Sagliains für die vier Radprofile W03, RTE A und die beiden RAILplus-Profile mit und ohne Spurkranzschwächung .....         | 43 |
| Abbildung 37: Auszug aus vier Parametern der gesamten Strecke Landquart – Sagliains für die vier Radprofile W03, RTE A und die beiden RAILplus-Profile mit und ohne Spurkranzschwächung ..                                           | 44 |
| Abbildung 38: Bogenverteilung der Strecke Landquart – Sagliains, links geographische Zuordnung der Bogenradien, rechts die Bogenradienklassen oben anhand der Anzahl Bögen je Klasse und unten anhand der Bogenlänge je Klasse ..... | 45 |
| Abbildung 39: Bogenradien oben und maximale Streckengeschwindigkeiten unten .....                                                                                                                                                    | 45 |
| Abbildung 40: Auswahl von Streckenabschnitten und Trassierungselementen sowie Bogenradienbereiche .....                                                                                                                              | 46 |
| Abbildung 41: Erstellung von Protokollen .....                                                                                                                                                                                       | 47 |
| Abbildung 42: Erstellung von Statistiken .....                                                                                                                                                                                       | 47 |
| Abbildung 43: Erstellung von Korrelationen .....                                                                                                                                                                                     | 48 |
| Abbildung 44: Auswahl der Landkarte für die Darstellung der Parameter auf der Strecke .....                                                                                                                                          | 49 |
| Abbildung 45: Landkarte mit den möglichen Einstellungen .....                                                                                                                                                                        | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 46: Beispiel für die Darstellung der Daten einer KML-Datei in map.geo.admin.ch.<br>Dargestellt sind die äquivalenten Konizitäten für das Radprofil W03 auf der Strecke Landquart –<br>Sagliains .....                                     | 50 |
| Abbildung 47: Darstellung der Berührungsgeometrischen Grössen des Radprofil<br>RAILplus_v1A/28.5/25 mit Radialstellungsindizes und Bogenradien links sowie den äquivalenten<br>Konizitäten und maximalen Streckengeschwindigkeiten rechts.....      | 51 |
| Abbildung 48: Vergleich der beiden Radprofile RTE A und RAILplus_v1A/28.5/25 hinsichtlich ihres<br>Verhaltens auf der gleichen Strecke .....                                                                                                        | 52 |
| Abbildung 49: Berührungsgeometrische Funktionen und ihre Darstellungsformen.....                                                                                                                                                                    | 53 |
| Abbildung 50: Nominelle Schienenprofile bei den verschiedenen Bahngesellschaften der Meterspur<br>Schweiz .....                                                                                                                                     | 54 |
| Abbildung 51: Eignung des Radprofils für den Bogenlauf auf Strecken mit Schienenneigung 1:20 und<br>gemischten Schienen 46E1 sowie 36E3 .....                                                                                                       | 55 |
| Abbildung 52: Aus Rad-Kontakt vorliegende Auswertung von grossen Datenmengen und detaillierte<br>Analyse mit Kontakt .....                                                                                                                          | 56 |
| Abbildung 53: Unzulässige Unstetigkeiten durch den Eingriff der Bremssohle in der Spurkranzflanke<br>.....                                                                                                                                          | 57 |
| Abbildung 54: Eingriff der Bremssohle im Bereich der Hohlkehle und dessen Auswirkungen auf den<br>Bogenlauf .....                                                                                                                                   | 57 |
| Abbildung 55: Teile des Hauptprogrammfensters im Kontakt.....                                                                                                                                                                                       | 59 |
| Abbildung 56: Aufklappmenüs aus dem Hauptprogrammfenster.....                                                                                                                                                                                       | 59 |
| Abbildung 57: Beispiel für die Entwicklung der berührungsgeometrischen Grössen beim KOMET der<br>MGB .....                                                                                                                                          | 61 |
| Abbildung 58: Nominelles (oben) und im Betriebseinsatz (unten) entstandenes Radprofil gepaart mit<br>mehreren Radprofilen eines engen Bogens im Einsatzgebiet .....                                                                                 | 61 |
| Abbildung 59: Beispiel Darstellung Schienen mit zugehörigen Daten zum Gleis und zum<br>Schienenverschleiss .....                                                                                                                                    | 62 |
| Abbildung 60: Schienenverschleiss an der bogeninneren Schiene aus Abbildung 59 .....                                                                                                                                                                | 63 |
| Abbildung 61: Flächenpressungen und Grössen der Kontaktflächen in Abhängigkeit des<br>Stellungsbildes des Radsatzes im Spurkanal bei einer Paarung einer realen Schiene in einem<br>Linksbogen ( $R=95\text{ m}$ ) mit einem realen Radprofil ..... | 64 |
| Abbildung 62: Radialstellungsindex und $T_x$ -Kräfte bei einem verschleissangepassten Radprofil links<br>und beim Radprofil RTE A im Linksbogen mit $R=95\text{ m}$ bei km 42.555 .....                                                             | 64 |
| Abbildung 63: Flächenpressungen in Abhängigkeit der Profilpaarungen.....                                                                                                                                                                            | 65 |
| Abbildung 64: Vorgehen bei der Erstellung von Protokollen im Kontakt .....                                                                                                                                                                          | 65 |