

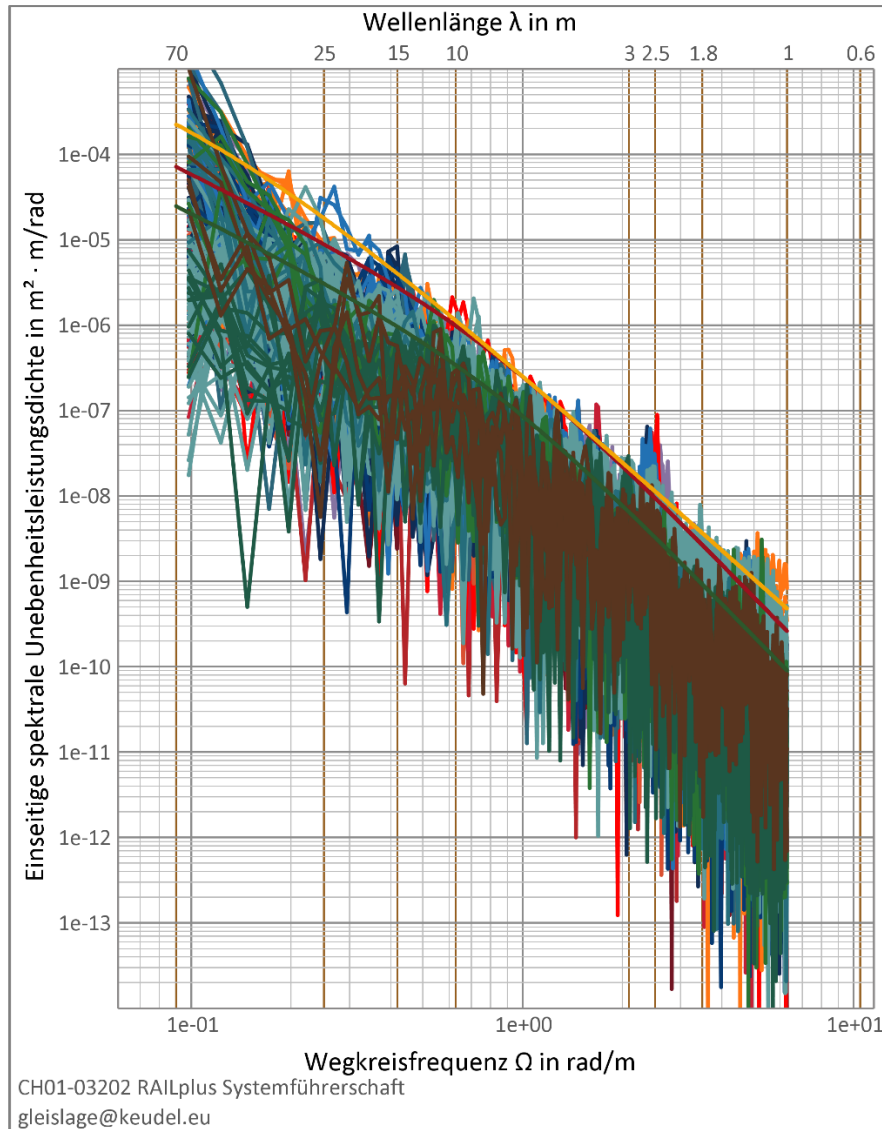
Identifikation repräsentativer Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen der Meterspur

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 3 Grundlagen Rad / Schiene

Modul: 6 (Grundlagen für die Erstellung des lauftechnischen Lastenheftes)

Technischer Bericht



ID: RAILplusSF-00019 öffentlich

Datum / Status: 15.07.2025 / Freigegeben

Seitenanzahl 148

Verfasser: Johannes Keudel / PROSE

Geprüft: Roland Müller / Gleislauftechnik

Freigegeben: Friedrich Christian Walther / zb

Zitierweise: Johannes Keudel, RAILplus / PROSE: Identifikation repräsentativer Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen der Meterspur. Technischer Bericht, 15.07.2025

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	31.01.2024	Johannes Keudel	Erster Entwurf
1.0	31.01.2024	Roland Müller	Prüfung
1.0	06.02.2024	Friedrich-Christian Walther	Freigabe PL P3
1.1	22.07.2024	Johannes Keudel	Ergänzung um Auswertung von Bogenabschnitten
1.2	15.08.2024	Johannes Keudel	Ergänzung um Hinweis auf langwellige Richtungsfehler
1.3	21.03.2025	Johannes Keudel	Tabelle 4, Korrektur Unebenheit a im Richtungsfehler «low» sowie Welligkeit b im Spurweitenfehler
1.4	30.03.2025	Johannes Keudel	Korrektur der Einheit der spektralen Leistungsdichte um «.../rad» in Abbildungen 43 bis 102 sowie in der Beschreibung zu Gleichung 1
1.5	15.07.2025	Johannes Keudel	Redaktionelle Unterteilung in a) einen Extrakt als mögliches Nebendokument von Fahrzeugausschreibungen und b) den verbleibenden Berichtteil als erklärendes Hintergrunddokument
1.6	16.07.2025	Friedrich-Christian Walther	Freigabe PL P3
1.7	14.08.2025	KT TB	Review KT TB

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
2.0	Technical Board	02.09.2025
2.0	Management Board	12.09.2025

Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

Management Summary

Örtliche Abweichungen von der planerischen Gleislage (Gleislagefehler) können einen wesentlichen Einfluss auf die Rad/Schiene-Interaktion sowie die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg haben. Es ist Stand der Technik, bei der Bemessung neuer Fahrzeuge (oder wesentlichen Umbauten) laufftechnische Simulationsrechnungen mit repräsentativ anspruchsvollen Gleislagefehlern durchzuführen bzw. diese Berechnungen vom zuständigen Fahrzeuglieferanten einzufordern. Dabei wird das Fahrzeugmodell gezielt in seinen laufftechnischen Eigenschaften provoziert, so dass anschliessend Gewissheit über die Fahrsicherheit auch unter extremen Gleislagebedingungen besteht.

Derzeit ist kein charakteristischer Datensatz der Schweizer Meterspurbahnen verfügbar, um solche Simulationen durchzuführen. Für die Zwecke der Gleisstandhaltung sind bei RHOMBERG / SERSA Gleismessdaten mehrerer RAILplus-Bahnen verfügbar. Diese vorhandene Datenbasis wird in der vorliegenden Untersuchung genutzt, um daraus anspruchsvolle Gleislagefehler der Meterspur für künftige laufftechnische Nachweisrechnungen abzuleiten. Dazu sind durch das Projektteam P3 für die vorliegende Untersuchung einerseits 18 Abschnitte mit einer Gesamtlänge von gut 23 km ausgewählt worden, die geradem Gleis oder grossen Bogenradien zuzuordnen sind und mit bis zu 100 km/h befahren werden. Andererseits sind 21 Abschnitte mit einer Gesamtlänge von knapp 8 km ausgewählt worden, die der Bogenfahrt mit mindestens 60 km/h zuzuordnen sind. Dabei wurden solche Abschnitte in die Auswahl einbezogen, bei denen die Fahrzeuge bekanntermassen in ihren laufftechnischen Eigenschaften provoziert werden.

Die verfügbaren Gleislagendaten werden über gleitende Auswertefenster von je 256 m bzw. 128 m in spektrale Leistungsdichten (PSD) überführt. Auf diese Weise lassen sich die Gleisabschnitte untereinander sowie auch mit anderen bekannten Gleislagen z.B. «ORE high» [10] vergleichen. Weiterhin können im PSD auch Gleisabschnitte mit ausgeprägten Leistungsdichten einzelner Wellenlängen (Periodizitäten) ausgemacht werden.

In Kapitel 0 werden Gleislagefehler für künftige laufftechnische Nachweise nach drei verschiedenen Gesichtspunkten identifiziert:

Einerseits werden **regellose Gleislagefehler** in Form von spektralen Leistungsdichten (RAILplus-Spektren) erarbeitet. Die RAILplus-Spektren liegen abschnittsweise nahe «ORE high» [10], wie es für Vollbahnanwendungen ein etabliertes PSD ist. Die RAILplus-Spektren weisen jedoch zum Teil größere Werte als «ORE high» auf und berücksichtigen den für die RAILplus-Anwendungen relevanten Wellenlängenbereich.

Weiterhin werden **periodische Gleislagefehler** identifiziert, die insbesondere die Längshöhe betreffen. Gleisabschnitte verschiedener Bahnen zeigen dabei ein einheitliches Muster auf, bei dem Einzelereignissen im Abstand von 50 bis 60 m eine mehr oder weniger harmonische Schwingung mit Wellenlängen von 5.5 bis 9 m überlagert ist.

Zusätzlich werden **Einzelereignisse** der Gleislage ausgemacht, die sich anders als kurzweilige Einzelfehler über Gleislängen von ca. 50 bis 100 m ausprägen. Die identifizierten Einzelereignisse konnten mehrheitlich Zwangspunkten wie dem Wechsel der Oberbauform, Bahnübergängen oder Tunnelportalen zugeordnet werden.

Zu allen drei vorstehenden Typen von Gleislageabweichungen werden in Kapitel 5 Simulationsszenarien für künftige Nachweisrechnungen vorgeschlagen. Die Gleislagefehler sind dazu jeweils als Datei zur Verwendung in laufftechnischen Simulationsrechnungen verfügbar gemacht.

Vor einer Verwendung dieser Gleislagefehler in einem Nachweis bzw. in einem Lastenheft ist zunächst eine Erprobung in einer laufftechnischen Simulation zu empfehlen. Dieser und weitere Aspekte, die sich während der Bearbeitung ergeben haben, sind in einer Pendenzenliste in Abschnitt 6.2 aufgeführt.

Organisatorisches

Das Ergebnis dieses Dokuments besteht in repräsentativen geometrischen Gleislagefehlern der gegenständlichen Meterspurbahnen. Die identifizierten Gleislagefehler sind essentielle Eingangsdaten für lauftechnische Berechnungen, die eine wesentliche Grundlage zur Bemessung von Fahrzeugen darstellen.

Um die identifizierten Gleislagefehler in geeigneter Form verfügbar zu machen, gliedert sich der Inhalt des vorliegenden Dokuments in folgende zwei Anteile:

- 1) Vorlage für ein mögliches **Nebendokument [1]** z.B. für Fahrzeugausschreibungen

Dazu enthält der vorliegende Bericht ab Seite 5 einen Extrakt, der separat z.B. als Nebendokument für Ausschreibungen von Fahrzeugen dienen kann, ohne den gesamten Bericht beilegen zu müssen.

(Darüber hinaus müssen weitere simulationstechnische Randbedingungen wie beispielsweise die Trassierung etc. spezifiziert werden, wie sie z.B. im Kapitel 5 des vorliegenden Dokuments aufgeführt sind.)

- 2) Bericht zur Dokumentation der Grundlagen und Auswertungen («**Erklärdokument**»)

Der Hauptteil des vorliegenden Dokuments ab Kapitel 1 (ab Seite 9) besteht in der Dokumentation der zugrunde liegenden Daten sowie der durchgeführten Auswertungen. Dieser Berichtteil kann als sogenanntes «Erklärdokument» z.B. seitens der Bahnen zu Rate gezogen werden.

Geometrische Gleislageabweichungen für laufftechnische Berechnungen

Der Auslegung und dem simulationstechnischen Nachweis des Fahrzeugs sind insbesondere in Bezug auf das Störverhalten nachfolgende Gleislagefehler zugrunde zu legen.

a) Regellose Gleislagefehler hoher Anregung

Regellose Gleislagefehler mit hoher Anregung können anhand der spektralen Leistungsdichte entsprechend Gleichung 1 generiert werden. Alternativ dazu können zwei bereitgestellte elektronische Datensätze (Dateien) genutzt werden.

Tabelle 1 enthält die in Gleichung 1 jeweils anzusetzenden Werte für die gleisbezogenen Fehlerkanäle. Dabei ist ein Wellenlängenbereich von 1 m bis 70 m zu berücksichtigen [je nach max. Fahrgeschwindigkeit ggf. obere Grenze reduzieren, s. Abschnitt 2.5].

gleisachsenbezogener Fehlerkanal	Unebenheit a	Welligkeit b	Faktor c	Grad n
Richtungsfehler „low“	0.0022	0.01	1.0	3.50
Richtungsfehler „high“	0.003	0.01	1.0	3.55
Längshöhenfehler	0.028	0.11	0.8	6.25
Spurweitenfehler	0.0085	0.15	1.0	4.00
Querhöhenfehler	0.0006	0.006	0.095	4.00

Tabelle 1: Zu Gleichung 1 zu verwendende Werte je gleisbezogenem Fehlerkanal

$$S(\Omega) = \frac{a^n}{\left(b + c \frac{\Omega}{2\pi}\right)^n} \quad (1)$$

mit

- S : spektrale Leistungsdichte in $\text{m}^2/(\text{rad}/\text{m})$ bzw. für den Querhöhenfehler in $\text{rad}^2/(\text{rad}/\text{m})$
- Ω : Wegkreisfrequenz in rad/m

Alternativ zum Leistungsdichtespektrum können folgende zwei elektronisch bereitgestellte Datensätze in der schienenbezogenen Darstellung genutzt werden:

- 1) für Fahrgeschwindigkeiten grösser 80 km/h
mit dem Richtungsfehler «low» aus Tabelle 1 in der Datei
30_RAILplus_Gleislagefehler_regellos_5km_in_0.2m_L1_70m_231106a.tre
(MD5-Prüfsumme 5f338f3a194b99dc049f923aef19fbf1)
- 2) für Fahrgeschwindigkeiten bis und mit 80 km/h
mit dem Richtungsfehler «high» aus Tabelle 1 in der Datei
62_RAILplus_Gleislagefehler_regellos_Richtungsfehler_high_5km_in_0.2m_L1_70m_240722
a.tre (MD5-Prüfsumme 20ead42d3d5c00422ed4cbaa5d7cbf43)

Beide vorgenannten Datensätze beinhalten regellose Gleislagefehler gemäss Gleichung 1 und Tabelle 1 über eine Streckenlänge von jeweils 5 km bei einer Ausgaberate von 0.2 m. Den Datensätzen liegt ein Wellenlängenbereich von 1 bis 70 m zugrunde.

Nebendokument für Ausschreibungen [1]

b) Periodisch auftretende Gleislagefehler

Mit der Datei:

38_RAILplus_Gleislagefehler_periodische_Laengshoehe_231106a.tre

(MD5-Prüfsumme cf506364947d544f782af9fd336b1a08)

wird ein wegabhängiger Datensatz in der schienenbezogenen Schreibweise bereitgestellt. Der Datensatz enthält zwei Streckenabschnitte, bei denen insbesondere der Längshöhenfehler aber der Richtungs- und Spurweitenfehler repräsentative periodische Merkmale aufweist.

c) Einzelereignisse in der Gleislage

Mit der Datei

37_RAILplus_Gleislagefehler_Einzelereignisse_231106a.tre

(MD5-Prüfsumme c1c3625dce7c0191e9c7212419503e35)

wird ein wegabhängiger Datensatz in der schienenbezogenen Schreibweise bereitgestellt. Dieser Datensatz enthält nacheinander drei Abschnitte, bei denen die Gleislage jeweils in mehreren Raumrichtungen gleichzeitig über etwa 50 bis 100 m ausgeprägte Abweichungen aufweist.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	9
1.1	Problemstellung	9
1.2	Untersuchungsziel und Forschungsfragen	9
1.3	Abgrenzung.....	10
2	Grundlagen	11
2.1	Erläuterung ausgewählter Begriffe	11
2.2	Ansatz von Gleislagefehlern in Lauftechnik-Simulationen.....	12
2.3	Beschreibung örtlicher Gleislageabweichungen	14
2.4	Zum Vergleich herangezogene (publizierte) regellose Gleislagefehler	15
2.5	Relevanter Frequenz- und Wellenlängenbereich.....	16
3	Verfügbare Gleislagedaten	18
3.1	Streckenabschnitte mit hoher Fahrgeschwindigkeit.....	19
3.2	Streckenabschnitte der Bogenfahrt	20
3.3	Elektronische Gleislagedaten	21
4	Identifikation von Gleislagefehlern für lauftechnische Nachweisrechnungen	22
4.1	Regellose Gleislagefehler hoher Anregung	22
4.2	Periodische Längshöhenfehler	25
4.3	Periodische Richtungs- und Spurweitenfehler	27
4.4	Einzelereignisse in Gleislagefehlern.....	27
5	Simulationsszenarien zur Umsetzung in einem Lastenheft	30
5.1	Lauftechnische Szenarien zu regellosen Gleislagefehlern.....	30
5.2	Lauftechnische Szenarien zu periodischen Längshöhenfehlern (anteilig mit Richtungs- und Spurweitenfehler)	31
5.3	Lauftechnische Szenarien zu Einzelereignissen in Gleislagefehlern.....	31
6	Fazit	32
6.1	Zusammenfassung wichtigster Ergebnisse	32
6.2	Weiteres Vorgehen.....	33
7	Verzeichnisse	36
7.1	Revisionen	36
7.2	Referenzen	36
7.3	Definitionen und Abkürzungen	38
7.4	Abbildungen	38
7.5	Tabellen	44
8	Anhang	45
8.1	Deklaration gleis- und schienenbezogene Beschreibung von Gleislagefehlern	45
8.2	Wegabhängige Darstellungen verfügbarer Messdaten	46
8.2.1	<i>Wegabhängige Darstellungen zu Gleisabschnitten aus Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit)</i>	46
8.2.2	<i>Wegabhängige Darstellungen zu Gleisabschnitten aus Tabelle 4 (Bogenfahrt)</i>	64
8.3	Grafische Darstellung der Vergleichsspektren nach ORE B176 [10] und Frederich [12].....	85

8.4	Grafische Darstellungen zu Leistungsdichtespektren (PSD) zu Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit, gerades Gleis und grosse Bogenradien)	86
8.4.1	<i>Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Richtungsfehler zu Tabelle 3</i>	<i>86</i>
8.4.2	<i>Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Längshöhenfehler zu Tabelle 3.....</i>	<i>92</i>
8.4.3	<i>Leistungsdichtespektren zum Spurweitenfehler zu Tabelle 3</i>	<i>98</i>
8.4.4	<i>Leistungsdichtespektren zum Querhöhenfehler zu Tabelle 3</i>	<i>104</i>
8.5	Grafische Darstellungen zu Leistungsdichtespektren (PSD) zu Tabelle 4 (Bogenfahrt mit mindestens 60 km/h)	110
8.5.1	<i>Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Richtungsfehler zu Tabelle 4</i>	<i>110</i>
8.5.2	<i>Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Längshöhenfehler zu Tabelle 4.....</i>	<i>116</i>
8.5.3	<i>Leistungsdichtespektren zum Spurweitenfehler zu Tabelle 4</i>	<i>122</i>
8.5.4	<i>Leistungsdichtespektren zum Querhöhenfehler zu Tabelle 4</i>	<i>128</i>
8.6	Grafische Darstellungen zu periodischen Längshöhenfehlern	134
8.7	Grafische Darstellungen zu periodischen Richtungs- und Spurweitenfehlern	140
8.8	Grafische Darstellungen zu Einzelereignissen der Gleislage	142
8.9	Wegabhängige Darstellungen zu RAILplus-Gleislagefehlern für Lauftechniksimulationen..	145

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Problemstellung

Das reale Gleis kann infolge von Herstelltoleranzen sowie auch etwaigen Einflüssen während seiner Lebensdauer (Krafteinwirkungen aus dem Betrieb, Witterung, Bodenbewegungen etc.) eine mehr oder minder ausgeprägte Abweichung von seiner ursprünglich trassierten Nennlage aufweisen. Diese geometrische Gleislageabweichung kann einer der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Rad/Schiene-Interaktion sowie die Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung sein und sollte daher bereits zur Bemessung neuer Fahrzeuge oder bei wesentlichen Umbauten berücksichtigt werden.

Zwar sind Gleislagefehler durch Vorgaben z.B. der AB-EBV [1] sowie der R RTE 22570 [9] in Form von Einzahlwerten limitiert, wie sie z.B. bei der Abnahme oder Instandhaltung von Gleisanlagen zur Anwendung kommen (z.B. maximal zulässige Verwindung oder maximal zulässige Pfeilhöhe etc.). Für die dynamische Überfahrt des Fahrzeugs ist jedoch anstelle von Einzahlwerten die Kenntnis (quasi)kontinuierlicher Gleislageabweichungen entlang der Trassierung relevant.

Für Ausschreibungen bzw. Entwicklungen von Vollbahnfahrzeugen¹ sind dazu einerseits regellose Gleislagefehler der Störpegel «ORE high» bzw. «ORE low» [10] etabliert. Diese Fehlerdatensätze sind keiner speziellen Trassierungssituation zugeordnet, sondern entsprechen einem charakteristischen „Grundrauschen“.

Andererseits ist es auch üblich, dass der Auftraggeber neuer Fahrzeuge einen repräsentativen Gleislagefehler-Datensatz beistellt, der über ein regelloses Grundrauschen hinaus z.B. auch Einzeleffekte oder periodische Merkmale enthalten kann. So ist beispielsweise von Ausschreibungen der Deutschen Bahn ein Datensatz «DB Altnetz» bekannt sowie für UK-Anwendungen ein Datensatz «gelaschtes Gleis».

Solch ein charakteristischer Datensatz ist derzeit für die Meterspuranwendungen der Schweiz nicht verfügbar. Aufgrund der spezifischen Gegebenheiten (Unterbau, Oberbau, Brücken, Tunnel, Bogenradien etc.) sowie der geringeren Spur- bzw. Stützweite der Meterspur ist es fraglich, ob die Datensätze der Vollbahn auch für die Belange von Schweizer Meterspuranwendungen herangezogen werden können.

1.2 Untersuchungsziel und Forschungsfragen

Bei RHOMBERG / SERSA liegen aus verschiedenen Messkampagnen Gleislagemessungen einiger RAILplus-Bahnen vor. Diese Messungen dienen der turnusmässigen Zustandsüberwachung bzw. der Instandhaltungsplanung von Gleisanlagen. Von diesen Messungen steht eine gezielte Auswahl von Abschnitten für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung (siehe Kapitel 3).

Ausgehend von der Problembeschreibung in Abschnitt 1.1 und den verfügbaren Messdaten besteht das Ziel des hier gegenständlichen Vorhabens darin, in Bezug auf die Belange der Fahrzeugdynamik einen oder nötigenfalls mehrere repräsentative Datensätze von geometrischen Gleislageabweichungen der RAILplus-Meterspuranwendungen zu erarbeiten. Dabei sind lauftechnisch anspruchsvolle Gleislageverhältnisse relevant, die das Störverhalten des Fahrzeugs provozieren, unter denen jedoch noch genügend Fahrsicherheit nachweisbar sein muss. Demgegenüber sind Streckenabschnitte mit sehr ruhigem Lauf nicht ausschlaggebend für die Fahrzeugbemessung. Die zu erarbeitenden RAILplus-Gleislagedatensätze müssen geeignet festgeschrieben werden, so dass sie insbesondere künftigen Fahrzeugausschreibungen für die zu fordernden Nachweisrechnungen beigelegt werden können.

Die Anforderung der Berücksichtigung regelloser Gleislagefehler führt dabei nicht zu einer Verteuerung der Fahrzeugbeschaffung, sondern sorgt für die Verwendung eines zutreffenden Gleislagefehlerdatensatzes anstelle falscher Randbedingungen bei der unbegründeten Verwendung eines Datensatzes aus dem Vollbahnbereich. Die Berücksichtigung weiterer spezifischer RAILplus-Gleislagefehler ist im Entwicklungsstadium eines Fahrzeugs deutlich günstiger, als am fertigen

¹ Wortwahl «Vollbahn» nach EN 17343 [7] zur Unterscheidung von der hier gegenständlichen Meterspuranwendung

Fahrzeug nachträglich Lösungsansätze zu erarbeiten und Änderungen vorzunehmen zu müssen. Von daher ist die Berücksichtigung spezifischer Gleislagefehler als Teil einer effizienten Systembeherrschung zu verstehen.

1.3 Abgrenzung

Die vorliegende Untersuchung bezieht sich entsprechend der zugrundeliegenden Messabschnitte aus Tabelle 3 auf das Streckengleis mit Vignolschienen unter Befahrung mit Fahrgeschwindigkeiten von mindestens 60 km/h (siehe Tabelle 4). Im Umkehrschluss bezieht sich die Untersuchung nicht auf Rillenschienengleise, bei denen neben den hier betrachteten Fehlergrößen zusätzlich die Rillenweiten (bzw. Leitweiten oder Leitkantenabstände) zu betrachten sind. Weiterhin sind in der vorliegenden Auswertung abstimmungsgemäss keine Messabschnitte aus Weichen- und Kreuzungsanlagen enthalten.

Anwendungsbereich der hier festzulegenden Gleislagefehler sind insbesondere Mehrkörpersystem (MKS)-Simulationen zum Fahrverhalten (Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung, Schwingungsverhalten) im Sinne der EN 14363 [5] unter anspruchsvollen Randbedingungen (Störverhalten des Fahrzeugs). Im Umkehrschluss sind diese Gleislagefehler nicht zwingend auch für andere Fragestellungen wie z.B. zum Aufstellen von Lastannahmen von Drehgestell-Komponenten (z.B. VDV 152) oder möglichen Resonanzen mit Oberbaufrequenzen geeignet. Ebenso kann es sinnvoll sein, für Simulationsrechnungen zur Bewertung des Fahrkomforts (z.B. EN 12299 [6]) (nicht sicherheitsrelevant) eine gemässigte Gleislageabweichung zu vereinbaren, siehe Punkt 4) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2.

Es ist ausdrücklich nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, den bestehenden Gleiszustand im Sinne der Instandhaltung und der Frage der Einhaltung etwaiger Grenzwerte zu beurteilen. Die vorliegende Untersuchung bietet aber eine Datengrundlage, um z.B. in weiterführenden Mehrkörpersystem (MKS)-Simulationen Kriterien für den Gleisunterhalt beispielsweise zu maximal ertragbaren periodischen Längshöhenfehlern etc. zu entwickeln, siehe Punkt 6) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2.

2 Grundlagen

2.1 Erläuterung ausgewählter Begriffe

1) Gleislage

Die Gleislage ist die örtliche Position der Gleisachse (gleisbezogene Darstellung siehe Abbildung 2) oder der beiden Schienen eines Gleises (schienenbezogene Darstellung siehe Abbildung 3) im Raum.

Die Soll-Gleislage bzw. Nenn-Gleislage beschreibt dabei die planerische Position des Gleises. Die Ist-Gleislage ist die reale örtliche Position (formtreu) des Gleises zu einer bestimmten Zeit.

2) (Geometrische) Gleislagefehler

Gleislagefehler oder Gleislageabweichungen sind die örtlichen geometrischen Abweichungen der jeweiligen Ist-Gleislage von der zugehörigen Soll-Gleislage. Zur vollständigen Beschreibung der Gleislageabweichung sind jeweils 4 Fehlerkanäle üblich, wie sie in Abschnitt 2.3 sowie Abbildung 2 und Abbildung 3 dargelegt sind.

3) Vollbahn

Der Begriff «Vollbahn» wird in der vorliegenden Untersuchung unter Verweis auf EN 17343 [7] für (interoperable) Eisenbahnanwendungen in Normalspurweite von 1'435 mm zur Unterscheidung von der hier gegenständlichen Meterspuranwendung verwendet.

4) Wegkreisfrequenz Ω

Analog zur bekannteren Zeitkreisfrequenz $\omega = 2\pi f$, die den zurückgelegten Winkel pro Zeit angibt, gibt die Wegkreisfrequenz $\Omega = 2\pi / L$ den zurückgelegten Winkel je Wegstrecke L an. Leistungsdichtespektren von Gleislagefehlern werden typischerweise über der Wegkreisfrequenz Ω ermittelt bzw. dargestellt, z.B. in [10][12][17]. Die Zeitkreisfrequenz ω unterscheidet sich von der Wegkreisfrequenz Ω um den Faktor der Fahrgeschwindigkeit v: $\omega = \Omega \cdot v$.

5) Stützweite

Die Stützweite ist der (nominelle) Querabstand der beiden Schienenköpfe eines Gleises, wie er beispielsweise für die Bemessung der Überhöhung respektive der freien Seitenbeschleunigung herangezogen wird («Hypotenuse» in Bild 7 der EN 13848-1 [4]). Die Stützweite der normalspurigen Vollbahn beträgt gemäss Abschnitt 6.3.1. der EN 13848-1 [4] 1'500 mm. Die Stützweite der Schweizer Meterspuranwendungen ergibt sich nach Abschnitt 3.6.1.1 der AB-EBV [1] zu 1'050 mm.

(Die Stützweite ist in der vorliegenden Arbeit für die Umrechnung der Gleislagefehler zwischen der gleisachsenbezogenen Beschreibung und der schienenbezogenen Beschreibung entsprechend Abschnitt 2.3 erforderlich.)

2.2 Ansatz von Gleislagefehlern in Lauftechnik-Simulationen

Es ist Stand der Technik, unter anderem das zu erwartende dynamische Laufverhalten von Schienenfahrzeugen in sogenannten Mehrkörpersystem (MKS)-Simulationen zu untersuchen. Insbesondere folgende Anwendungsfelder sind dabei im Zusammenhang mit dem Einfluss repräsentativer Gleislagefehler zu nennen²:

- a) Einerseits erfolgen derartige Simulationsrechnungen durch die fahrzeugliefernde Industrie zur (internen) Auslegung und technischen Absicherung z.B. auch zur Prüfung von Ausfallzuständen (Schnittstelle zur Risikobewertung) oder zur Generierung von Lastannahmen etc.
- b) Teilweise werden die Ergebnisse solcher Simulationen im Zuge der Fahrzeugbeschaffung bereits in der Angebotsphase gefordert, um die Machbarkeit des angebotenen Fahrzeugkonzepts in Bezug auf die lauftechnischen Belange darzulegen.
- c) Andererseits dienen diese Simulationsrechnungen im Zuge der Fahrzeugzulassung z.B. als Grundlage für die Erlangung einer Unbedenklichkeitserklärung, um anschliessend z.B. lauftechnische Fahrversuche auf der realen Strecke unternehmen zu dürfen.
- d) Weiterhin können Simulationsergebnisse z.B. mit entsprechend validierten MKS-Modellen (z.B. nach Anhang T der EN 14363 [5]) unmittelbar als Nachweis im Rahmen des Zulassungsverfahrens neuer oder umgebauter Schienenfahrzeuge dienen.

Für derartige MKS-Simulationen sind verschiedene Software-Produkte wie z.B. Simpack, Vampire, VI Rail (vormals Adams Rail), Gensys etc. in der Branche international etabliert.

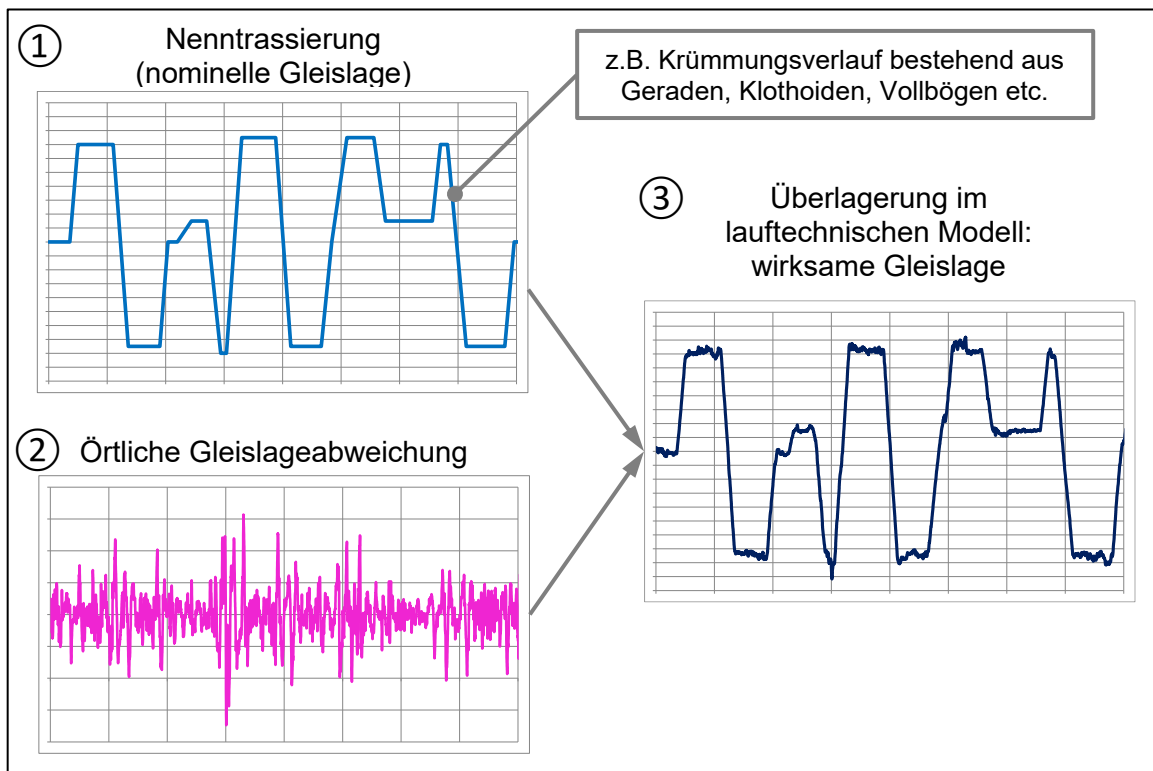


Abbildung 1: Schematische Darstellung: getrennte Vorgabe von Nenntrassierung und örtlicher Gleislageabweichung im lauftechnischen Simulationsmodell

² Über die hier genannten Punkte hinaus werden MKS-Simulationen regelmässig auch für weitere Fragestellungen wie z.B. die Fahrstabilität, Modalanalysen im Frequenzbereich oder der Klärung von Entgleisungsursachen etc. genutzt, bei denen aber die hier gegenständlichen repräsentativen Gleislagefehler in der Regel nicht gefragt sind.

Die örtliche Gleislage wird in der Lauftechniksimulation üblicherweise durch eine getrennte Eingabe der Nennlage und ihrer Abweichung realisiert, wie es auch im Abschnitt 15.4.3 in CEN/TR 17039 [8] manifestiert ist. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt und berücksichtigt die beiden vorgenannten Eingangsdaten:

- 1) Definition der Nennlage des Gleises entsprechend der planerischen Trassierung oder einer generisch angesetzten Trassierung (z.B. kürzest zulässige Übergangsbögen etc.) (① in Abbildung 1)
in der Überlagerung mit
- 2) Eingabe einer örtlichen Abweichung von der Nennlage (geometrische Gleislagefehler), wie sie für Vollbahnanwendungen beispielsweise durch die regellosen Gleislageabweichungen «ORE high» und «ORE low» [10] unabhängig von einer speziellen Trassierung gebildet werden. (② in Abbildung 1)

Das in Abschnitt 1.2 deklarierte Ziel der Bereitstellung von geometrischen Gleislageabweichungen bezieht sich demnach auf den Aspekt ② «Örtliche Gleislageabweichung» in Abbildung 1.

Für jeden Gleislagefehlerkanal bestehen in der Mehrkörpersystem (MKS)-Software in der Regel alternativ folgende Möglichkeiten, um den Gleislagefehler zu modellieren^{3 4}:

- a) Leistungsdichtespektrums (PSD)
Definition eines Leistungsdichtespektrums separat je Fehlerkanal unter Vorgabe eines Wellenlängenbereichs sowie der Anzahl zu diskretisierender Einzelschwingungen in diesem Wellenlängenbereich
- b) Ortsabhängiger Datensatz (Wegschrieb)
Definition eines schrittweise definierten ortsabhängigen Datensatzes je Fehlerkanal, in der Regel mit konstanter Schrittweite entlang der Gleisachse, wobei die Simulationssoftware zwischen den gegebenen Datenstützpunkten interpoliert.

³ Örtlich unterschiedliche Schienenprofile inklusive z.B. örtlichen Änderungen in der Schieneneinbauneigung oder die Berücksichtigung von Verschleisskonturen etc. können in gängigen MKS-Softwaresystemen unabhängig von der Trassierung und örtlichen Gleislagefehlern separat definiert werden. Schienenprofile und etwaige Abweichungen der Einbauneigung sind nicht Gegenstand des vorliegenden Dokuments.

⁴ Nachgiebigkeiten des Oberbaus, wie sie sich spezifisch aus der jeweiligen Oberbauart ergeben können oder infolge z.B. von hohl liegenden Schwellen („Pumpstelle“) unter Belastung resultieren, lassen sich in gängigen MKS-Softwaresystemen unabhängig von der Trassierung und geometrischen Gleislagefehlern separat definieren. Die elastischen Eigenschaften der Gleisbettung sind nicht Gegenstand des vorliegenden Dokuments.

2.3 Beschreibung örtlicher Gleislageabweichungen

Zur vollständigen Charakterisierung der geometrischen Gleislageabweichung von Vignolschienenngleisen sind die zwei nachfolgend dargelegten Beschreibungen üblich. Beide Beschreibungen beinhalten jeweils vier Fehlerkanäle, wie sie grundlegend z.B. in EN 13848-1 [4] beschrieben sind. Beide Beschreibungen können geometrisch in die jeweils andere Darstellungsform überführt werden, siehe z.B. Frederich [12], und sind von daher gleichwertig.

1) Gleisachsenbezogene Definition:

Die Definition der geometrischen Gleislageabweichung erfolgt wie in Abbildung 2 dargestellt in Relation zur nominellen Gleisachse (Soll-Lage) durch folgende Datenkanäle (z.B. Frederich [12]):

- a) Längshöhenfehler des Gleises
- b) Richtungsfehler des Gleises
- c) Querhöhenfehler des Gleises (Winkel)
- d) Spurweitenfehler des Gleises

2) Schienenbezogene Definition:

Die Definition der geometrischen Gleislageabweichung erfolgt wie in Abbildung 3 dargelegt durch folgende Datenkanäle in Relation zur Nennlage der jeweiligen Schiene (z.B. Frederich [12], EN 13848-1 [4]):

- a) Längshöhenfehler der rechten Schiene
- b) Längshöhenfehler der linken Schiene
- c) Richtungsfehler der rechten Schiene
- d) Richtungsfehler der linken Schiene

Abgesehen vom Querhöhenfehler des Gleises (Punkt 1c) beinhalten die vorgenannten Kanäle Längenangaben (in m bzw. mm). Der Querhöhenfehler des Gleises (Punkt 1c) wird in der vorliegenden Untersuchung ausdrücklich als Winkel (in rad bzw. mrad) gehandhabt (siehe Abbildung 2), so dass diese Grösse direkt mit Daten von Normalspur Anwendungen vergleichbar ist⁵.

Die vorstehend genannten Namen der Datenkanäle sind etabliert, beinhalten aber eine Verwechslungsgefahr, weil die Wörter «Längshöhenfehler» und «Richtungsfehler» in beiden Beschreibungsformen gleichermassen vorkommen. In der vorliegenden Arbeit erfolgt daher jeweils eine Unterscheidung durch einen Namenszusatz wie «des Gleises», «gleisachsenbezogen» bzw. «der Schiene», «schienenbezogen».

Das Koordinatensystem der Gleislagefehler wird in der vorliegenden Arbeit für beide vorgenannten Darstellungsformen einheitlich sowie synchron zur EN 13848-1 [4] und den von RHOMBERG / SERSA bereitgestellten Messdaten [11] gehalten: die X-Achse verläuft jeweils tangential entlang der Gleisachse, die Z-Achse zeigt wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt jeweils normal zur nominellen Schienenoberkante (SOK) nach unten, so dass der Y-Achse im rechtshändigen Koordinatensystem die Ausrichtung nach rechts verbleibt.

⁵ Es ist auch gängig, den Querhöhenfehler anstelle eines Winkels analog zur Überhöhung als Höhenangabe (in m oder mm) über der Stützweite (gegenseitige Höhenlage) anzugeben. Dann aber bedeutet die gleiche Wertangabe eines Querhöhenfehlers je nach Stützweite einen anderen Querhöhenwinkel, so dass die Angaben zweier unterschiedlicher Spurweitesysteme dahingehend nicht vergleichbar sind.

Gängige Mehrkörpersystem (MKS)-Softwareprodukte erlauben wahlweise das Einlesen beider obenstehenden Darstellungsformen der Gleislagefehler. Die von Frederich [12] publizierten Leistungsdichtespektren wie auch «ORE high» und «ORE low» [10], die in der vorliegenden Untersuchung zum Vergleich der Verhältnisse der RAILplus-Gleislagefehler herangezogen werden, erfolgen in der gleisachsenbezogenen Darstellung. Die von RHOMBERG / SERSA bereitgestellten Messdaten liegen in der schienenbezogenen Beschreibung vor. Entsprechend wird im vorliegenden Dokument fallweise die eine oder andere Darstellungsform genutzt.

2.4 Zum Vergleich herangezogene (publizierte) regellose Gleislagefehler

Für die Bahnen der RAILplus sind keine repräsentativen regellosen Gleislagefehler aus vorherigen Untersuchungen bekannt. Entsprechend bedeutet die vorliegende Untersuchung ein stückweit «Neuland». Um die hier erstmalig ermittelten regellosen Gleislagefehler von RAILplus-Bahnen einschätzen zu können, werden nachfolgende publizierte Gleislagefehler des Vollbahnbereichs zum informellen Vergleich herangezogen.

1) ORE B176 [10]

ORE B176 [10] definiert die beiden Störpegel «ORE high» und «ORE low», die seinerzeit dem zentraleuropäischen Vollbahnbereich zuzuschreiben sind. Diese Gleislagefehler sind im gleisachsenbezogenen System (siehe Abschnitt 2.3) definiert und beinhalten jeweils die drei Fehlerkanäle Richtungsfehler, Längshöhenfehler und Querhöhenfehler. Ein Spurweitenfehler ist nicht definiert. Für jeden Fehlerkanal ist ein Leistungsdichtespektrum durch eine Hyperbelfunktion beschrieben. In der ORE B176 [10] findet sich kein Hinweis auf den Wellenlängenbereich, für den die Hyperbelfunktionen gültig und anwendbar sind.

In Abschnitt 8.3 finden sich grafische Darstellungen der Leistungsdichtespektren nach ORE B176 [10].

2) Frederich [12]

Die vorstehend genannten Gleislagefehler nach ORE B176 [10] werden zwar im Vollbahnbereich häufig angewandt, beinhalten aber keinen Spurweitenfehler. Dem Projektteam des hier gegenständlichen Vorhabens ist kein Grund ersichtlich, für lauftechnische Simulationsrechnungen von RAILplus-Anwendungen den Spurweitenfehler ebenfalls wegzulassen.

Um den in der vorliegenden Untersuchung erzielten regellosen Spurweitenfehler informativ vergleichen zu können, werden zwei Leistungsdichtespektren von Frederich [12] herangezogen: Frederich [12] gibt neben verschiedenen spezifischen Spektren die beiden Datensätze «beste Spurweite» und «schlechteste Spurweite» an. Diese sind im Abschnitt 8.3 dargestellt und werden in der vorliegenden Arbeit zum informativen Vergleich herangezogen.

2.5 Relevanter Frequenz- und Wellenlängenbereich

Die in der lauftechnischen Simulation anzusetzenden Gleislagefehler sind unter anderem durch den Wellenlängenbereich gekennzeichnet, für den der jeweilige Datensatz Informationen enthält.

EN 13848-1 [4] definiert für den Vollbahnbereich die drei Wellenlängenbereiche D1 (3 bis 25 m), D2 (25 bis 70 m) und D3 (70 bis 150 m bzw. 250 m je nach Fehlerart). Diese Wellenlängenbereiche sind jedoch in Bezug auf die relevanten Fahrgeschwindigkeiten nicht direkt für die hier gegenständlichen RAILplus-Bahnen anwendbar.

Aus dem Zusammenwirken der Fahrgeschwindigkeit und der jeweiligen Wellenlänge resultiert die Frequenz, die bei der Überfahrt des Fahrzeugs wirksam wird.

In Bezug auf die hier gegenständlichen Aspekte des Fahrverhaltens und des Fahrkomforts finden sich beispielsweise folgende Angaben zum relevanten Frequenzbereich:

- Frederich [12] gibt unter Verweis auf den Fahrkomfort 0.5 Hz bis 20 Hz an. Der Fahrkomfort berücksichtigt dabei das menschliche Empfinden von Schwingungen, so dass der vorgenannte Frequenzbereich unabhängig von der Spurweite des jeweiligen Bahnsystems ist.
- Knothe [17] benennt in Abschnitt 5.2.1 für die Vertikaldynamik einen Frequenzbereich von 0.2 bis 25 Hz, wobei er die untere Frequenzgrenze unabhängig von einer Spurweite auf das menschliche Empfinden bezieht, während die obere Grenze vermutlich auf der Erfahrung von Normalspuranwendungen beruht.
- Abschnitt 5.4 der EN 12299 [6] beschreibt bezüglich des Fahrkomforts einen Frequenzbereich bis 15 Hz lateral und 40 Hz vertikal. Diese Angabe berücksichtigt das menschliche Empfinden und erfolgt damit unabhängig von der Spurweite des Bahnsystems.
- Hanneforth/Fischer [18] benennen eine typische Taucheigenfrequenz von Reisezugwagen (vermutlich im Vollbahnsystem) mit 1 Hz.
- Von verschiedenen Anwendungen sowohl des Normalspur- als auch des Meterspurbereichs sind Wankeigenfrequenzen von 0.5 bis 1 Hz bekannt (siehe z.B. auch 0.85 Hz in Abbildung 97).
- Wesentliche Beurteilungsgrößen der Fahrsicherheit in Tabelle 5 der EN 14363 [5] sind mit einem Tiefpassfilter mit 20 Hz belegt, so dass sich das zu bewertende Verhalten unterhalb dieser Frequenz abspielt. Dabei gilt EN 14363 [5] vordringlich für Vollbahnanwendungen, jedoch sieht die BAV-Richtlinie [3] für Meterspur- und Speziaispuranwendungen hinsichtlich der Fahrstabilität eben diese Auswertung und Filterung vor.

Zusammenfassend liegt der für die Fahrsicherheit interessierende Frequenzbereich etwa bei 0.5 bis 20 Hz und für den Fahrkomfort etwa bei 0.5 bis 40 Hz. Für diesen Frequenzbereich sind Mehrkörpersystem (MKS)-Modelle von Schienenfahrzeugen bei geeigneter Modellierung üblicherweise auch aussagefähig [17]. Da die oben genannten Referenzen zum Teil auf Normalspuranwendungen beruhen, schlägt das gegenständliche Projektteam P3 eine Überprüfung des vorgenannten Frequenzbereichs beispielsweise anhand relevanter Eigenfrequenzen von Bestandsfahrzeugen vor; siehe Pendenz 2) in Abschnitt 6.2.

Abschnitt 5.3.1.1 der R RTE 22570 [9] gruppiert die Meterspuranwendungen in drei Geschwindigkeitsklassen, von denen die Erste bis 40 km/h, die Zweite bis 80 km/h und die Dritte bis 120 km/h reicht.

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der interessierenden Frequenzen, massgeblichen Fahrgeschwindigkeiten und daraus resultierenden Wellenlängen, die ein Gleislagedatensatz für die hier gegenständlichen Zwecke abdecken sollte.

Zeile	Bezeichnung	Kürzel	Werte	Referenz	Quelle
1	Frequenz	f	von 0.5 Hz	direkte Eingabe	auf Basis gängiger Wank- und Taucheigenfrequenzen
2			bis 10.0 Hz		hier im Zusammenspiel mit kleinster massgeblicher Fahrgeschwindigkeit
3	Fahrgeschwindigkeit	V	von 40.0 km/h	direkte Eingabe	auf Basis Abschnitt 5.3.1.1 der RTE 22570
4			bis 120.0 km/h		
5	Wellenlänge	L	von 1.11 m	= 40 km/h / 10 Hz	= V_{\min} / f_{\max}
6			bis 66.67 m	= 120 km/h / 0.5 Hz	= V_{\max} / f_{\min}
7	Wegkreisfrequenz	Ω	von 0.09 rad/m	= $2\pi / 66.67 \text{ m}$	= $(2\pi) / L_{\max}$
8			bis 5.65 rad/m	= $2\pi / 1.11 \text{ m}$	= $(2\pi) / L_{\min}$

Tabelle 2: Interessierender Frequenzbereich, massgeblicher Geschwindigkeitsbereich und resultierende Wellenlängen respektive Wegkreisfrequenzen

Die kleinste relevante Wellenlänge von $L_{\min} = 1.11 \text{ m}$ in Zeile 5 der Tabelle 2 ergibt sich dabei rechnerisch aus der kleinsten massgeblichen Fahrgeschwindigkeit (Zeile 3) und der grössten relevanten Frequenz (Zeile 2): für die kleinste Geschwindigkeitsklasse von 40 km/h ist naturgemäss eine kleinere Systemdynamik als bei grösseren Fahrgeschwindigkeiten zu erwarten, so dass in Zeile 2 der Tabelle 2 bewusst 10 Hz als grösste zu berücksichtigende Frequenz angesetzt sind (während die oben genannten Quellen zur Fahrsicherheit 20 Hz bzw. zum Fahrkomfort 40 Hz ergeben).

Die grösste zu berücksichtigende Wellenlänge von $L_{\max} = 67 \text{ m}$ in Zeile 6 der Tabelle 2 resultiert aus der grössten Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h (Zeile 4) in Verbindung mit der kleinsten relevanten Frequenz von 0.5 Hz (Zeile 1).

Vorbehaltlich einer Verifikation des relevanten Frequenzbereichs (siehe Pendenz 2) in Abschnitt 6.2) ergibt sich aus den vorstehenden Ausführungen für das Fahrverhalten und den Fahrkomfort von RAILplus-Anwendungen ein **relevanter Wellenlängenbereich von 1 bis ca. 70 m**. In Anlehnung an die oben genannten Wellenlängenbereiche der EN 13848-1 [4] bedeutet dies einen Bereich von 1 bis 3 m +D1 +D2 (= 1 bis 70 m).

3 Verfügbare Gleislagedaten

RHOMBERG / SERSA betreibt seit dem Jahr 2020 einen Messwagen für Meterspur (MWMS) [11]. Dieser Messwagen ist mit verschiedenen Messsystemen ausgestattet, von denen eine Anwendung die Erfassung der Gleisgeometrie ist. Der Messwagen sowie die mitgeführten Messsysteme sind in [11] beschrieben. Der Messwagen ist ein meterspuriger Zweiachser mit einem Radsatzstand von $2a = 4\text{ m}$, der die Gleislage unter seiner Eigenlast (Gleis im belasteten Zustand) durch ein «Autonomous track monitoring (ATM)»-System von JSC RPC INFOTRANS insbesondere nach den Kriterien der EN 13848 [4] erfasst [11].

RHOMBERG / SERSA hat mit dem Messwagen unter anderem auf Strecken von RAILplus-Bahnen die Gleislage messtechnisch erfasst. Von diesen Gleislagedaten wurden durch RHOMBERG / SERSA und dem Projektteam P3 in zwei Kampagnen Messabschnitte für die vorliegende Untersuchung ausgewählt:

In der Erstfassung des vorliegenden Berichts wurden zunächst die in Tabelle 3 gelisteten Abschnitte gebildet, die mit einer vergleichsweise hohen Fahrgeschwindigkeit befahren werden. Mit der zweiten Version des Berichts erfolgt eine Erweiterung um die in Tabelle 4 gelisteten Abschnitte, denen Bogenfahrten inklusive Bogenein- und -ausfahrten zugrunde liegen.

Die Auswahl der Abschnitte erfolgte nach folgenden Kriterien:

- a) Vorliegen einer Zustimmung zur Datenherausgabe durch die jeweilige Bahn (bei RHOMBERG / SERSA bzw. Projektteam P3)
- b) Auswahl von Streckenabschnitten, die das Fahrzeug bzw. das Fahrzeugmodell im rechnerischen Nachweis potenziell einer anspruchsvollen Situation aussetzen. Auswahlkriterien dazu sind einerseits die Erfahrungen der Bahnen (örtlich unruhiger Lauf, nennenswerte Fahrzeugreaktionen etc.) sowie andererseits der örtliche Gleislageindex «TUG» (Methode der TU Graz) in der Auswertung durch RHOMBERG / SERSA.
- c) Ausschluss von Weichen- und Kreuzungsanlagen, soweit diese bedingt durch das Messprinzip eventuell lokale Messfehler ergeben können
- d) zu Abschnitt 3.1 bzw. Tabelle 3:
Fokus auf Streckenabschnitten, die mit möglichst hoher Fahrgeschwindigkeit befahren werden. Entsprechend der hohen Fahrgeschwindigkeit liegen diesen Abschnitten gerades Gleis oder große Bogenradien zugrunde.
- e) zu Abschnitt 3.2 bzw. Tabelle 4:
Fokus auf Streckenabschnitten in Bögen, wobei die Fahrgeschwindigkeit mindestens 60 km/h beträgt.

3.1 Streckenabschnitte mit hoher Fahrgeschwindigkeit

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der ausgewählten Streckenabschnitte, die mit Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h befahren werden. Tabelle 3 enthält 18 Auswerteabschnitte von 6 verschiedenen RAILplus-Bahnen, die in die vorliegende Untersuchung eingehen. Die Abschnitte umfassen eine Gesamtlänge von gut 23 km, wobei die kleinste Abschnittslänge ca. 500 m und die grösste Abschnittslänge knapp 5 km beträgt. Abschnitt 8.2 enthält für jeden Messabschnitt aus Tabelle 3 eine grafische Darstellung der Gleislagefehler im Wegbereich.

Die rechteste Spalte in Tabelle 3 weist das Datum der Messung auf, wobei der Abschnitt Nr. 28 «Meiringen-Brienzwiler» den Gleiszustand vor einem unterdessen durchgeführten Umbau (Dezember 2022) beinhaltet.

Farbe in Grafik	Nr	Bahn	Strecke	Ortsangaben	km von [m]	km bis [m]	Länge [m]	Geschwindigkeit trassiert	min. Radius [m]	Messdatum	
violett	2	AB	Gossau - Wasserauen	Gonten - Gontenbad	21'416 m	22'589 m	1'173 m	80 km/h	350 m	08.05.2022	
Rot-töne	7	MGB	Brig - Disentis	Furkatunnel, vor Geeren	45'752 m	46'322 m	569 m	90 km/h	0 m	09.10.2022	
	8	MGB	Brig - Disentis	Furkatunnel, nach Geeren	48'081 m	48'818 m	736 m	90 km/h	0 m	09.10.2022	
	9	MGB	Brig - Disentis	Furkatunnel, nach Rotondo	53'678 m	54'134 m	455 m	90 km/h	2'498 m	09.10.2022	
	10	MGB	Brig - Zermatt	Glisergrund - Visp	7'499 m	8'503 m	1'012 m	90 km/h	1'000 m	10.10.2022	
	11	MGB	Brig - Zermatt	Visp - Sefinot	10'153 m	12'125 m	1'971 m	80 km/h	352 m	10.10.2022	
orange	13	MGB	Brig - Zermatt	Randa - Täsch	36'794 m	37'521 m	731 m	80 km/h	0 m	11.10.2022	
	14	MOB	Montreux - Zweisimmen	Rougemont - Saanen	39'616 m	40'745 m	1'098 m	80 km/h	483 m	08.06.2022	
Blau-töne	15	MOB	Montreux - Zweisimmen	Saanen	42'697 m	43'195 m	497 m	80 km/h	535 m	08.06.2022	
	21	RhB	Landquart - Klosters - Davos Platz	Malans - Grüşch	3'597 m	5'935 m	2'340 m	100 km/h	350 m	04.10.2022	
	23	RhB	Landquart - Klosters - Davos Platz	Schiers - Fuchswinkel	12'851 m	14'313 m	1'353 m	90 km/h	399 m	04.10.2022	
	26	RhB	Samedan - Pontresina	Samedan - Punt Muragl	98'774 m	100'351 m	1'580 m	90 km/h	435 m	04.10.2022	
Grün-töne	27	RhB	Samedan - Pontresina	Punt Muragl - Pontresina	101'288 m	102'693 m	1'409 m	90 km/h	0 m	04.10.2022	
	28	zb	Interlaken - Meiringen	Meiringen - Brienzwiler	48'000 m	52'882 m	4'900 m	100 km/h	1'700 m	29.09.2021	
	29	zb	Luzern - Meiringen	Alpnach Dorf - Kerns	15'868 m	16'899 m	1'031 m	95 km/h	400 m	28.09.2021	
	30	zb	Stansstad - Engelberg	Stans - Dallenwil	7'805 m	8'505 m	704 m	85 km/h	381 m	28.09.2021	
braun	31	zb	Stansstad - Engelberg	Dallenwil - Wolfenschiessen	10'623 m	11'798 m	1'175 m	100 km/h	0 m	28.09.2021	
	32	tpf	Chatel - Bulle - Montbovon	La Verrerie - Vaulruz	9'350 m	9'940 m	590 m	80 km/h	688 m	04.05.2023	
Gesamtlänge							23'324 m				

Tabelle 3: Übersicht verfügbarer Messabschnitte von Gleislagedaten der RHOMBERG / SERSA [11], ausgewählt nach den Kriterien «ruppiger» Gleislage und **höherer Fahrgeschwindigkeit**, nachfolgend referenziert über die blau angedruckte Nummer in der Spalte «Nr.», (fehlende Nr. beziehen sich auf ausgeschlossene Abschnitte einer Vorauswahl)

3.2 Streckenabschnitte der Bogenfahrt

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der ausgewählten Streckenabschnitte, die Gleisbögen inklusive der zugehörigen Bogenein- und -ausfahrten enthalten.

Die Streckenabschnitte sind durch die in Spalte 2 der Tabelle 4 angetragene Nummer identifizierbar, wobei diesen Abschnitten zur Unterscheidung von Tabelle 3 jeweils ein «B» entsprechend der gegenständlichen Bogenfahrt vorangestellt ist. Fehlende Nummern in Spalte 2 der Tabelle 4 beziehen sich auf Messabschnitte, die in einer Vorauswahl verworfen wurden.

Tabelle 4 umfasst 21 Streckenabschnitte von 8 verschiedenen Bahnen, siehe Spalte 3. Die Gesamtlänge der Streckenabschnitte aus Tabelle 4 beträgt 7.7 km, wobei die kleinste Abschnittslänge (ID B13) 210 m und die grösste Abschnittslänge gut 1 km (ID B24) beträgt. Die Streckenabschnitte in Tabelle 4 decken die in Spalte 9 ausgewiesenen Bogenradien im Bereich von ca. $R_B = 150$ m bis 500 m ab.

Blau hinterlegte Zellen der Tabelle 4 stammen von RHOMBERG / SERSA. In der Titelzeile grau hinterlegte Spalten sind für den vorliegenden Bericht hinzugefügt. Spalte 11 der Tabelle 4 weist das Datum der zugrundeliegenden Messung aus. Die Spalten 9 und 10 benennen den charakteristischen Bogenradius sowie die trassierte Fahrgeschwindigkeit.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Farbe in Grafik	ID	Bahn	Linie	Strecke	von [m]	bis [m]	Länge	Bogenradius	trassierte Fahrgeschwindigkeit	Messdatum	Kategorie (schlecht $\varnothing TUG TQI > 0.6$, mittel $\varnothing TUG TQI > 0.5$, gut $\varnothing TUG TQI < 0.5$)
	B02	RBS	292	Solothurn - Bern	19'332	19'521	189 m	300 m	75...79 km/h	01.11.2023	Schlecht
	B05	RhB	920	Reichenau - Tamins - Disentis	40'425	40'750	325 m	186 m	65 km/h	24.09.2023	Schlecht
	B09	RhB	920	Reichenau - Tamins - Disentis	35'851	36'497	646 m	155...223 m	60...65 km/h	24.09.2023	Schlecht
	B11	MOB	120	Monteux - Zweisimmen	40'250	40'570	320 m	501 m	80...100 km/h	30.04.2023	Schlecht
	B13	MGB	610	Brig - Disentis	625	835	210 m	156 m	60 km/h	10.10.2023	Schlecht
	B19	ZB	469	Interlaken - Meiringen	55'505	55'944	439 m	393 m	90...100 km/h	29.09.2021	Schlecht
	B23	CJ	235	Le Noirmont - La Chaux-de-Fonds	29'670	29'952	282 m	207 m	65 km/h	21.09.2021	Schlecht
	B24	CJ	236	Le Noirmont - Combe-Tabeillon	21'950	22'997	1'047 m	198...250 m	65...70 km/h	21.09.2021	Schlecht
	B25	CJ	236	Le Noirmont - Combe-Tabeillon	6'672	7'066	394 m	300 m	80 km/h	21.09.2021	Schlecht
	B28	CJ	235	Le Noirmont - La Chaux-de-Fonds	23'281	23'534	253 m	170 m	60 km/h	21.09.2021	Schlecht
	B29	RhB	910	Landquart - Klosters - Davos Platz	15'095	15'418	323 m	401 m	95 km/h	20.09.2023	Schlecht
	B30	RhB	940	Chur - Thuis - St.Moritz	48'137	48'418	281 m	180 m	65 km/h	23.09.2023	Schlecht
	B31	RhB	920	Landquart - Chur	2'212	2'496	284 m	200 m	65 km/h	03.11.2021	Schlecht
	B33	RhB	940	Chur - Thuis - St.Moritz	41'058	41'283	225 m	400 m	65 km/h	16.05.2022	Schlecht
	B35	Tpf	118	Chatel-St-Denis - Montbovon	1'909	2'189	280 m	178 m	60...65 km/h	05.05.2023	Schlecht
	B36	Tpf	118	Chatel-St-Denis - Montbovon	2'769	3'091	322 m	194 m	60 km/h	05.05.2023	Schlecht
	B37	Tpf	118	Chatel-St-Denis - Montbovon	9'923	10'287	364 m	239 m	70...80 km/h	05.05.2023	Schlecht
	B38	Tpf	118	Chatel-St-Denis - Montbovon	5'305	5'589	284 m	196 m	65 km/h	05.05.2023	Schlecht
	B43	TRAVYS	212	Yverdon-les-Bains - Ste-Croix	10'973	11'289	316 m	250 m	70 km/h	12.09.2023	Schlecht
	B44	TRAVYS	212	Yverdon-les-Bains - Ste-Croix	3'304	3'956	652 m	150...185 m	60 km/h	12.09.2023	Schlecht
	B46	ZB	480	Stansstad - Engelberg	7'572	7'816	244 m	211 m	65...85 km/h	28.09.2021	Schlecht
					Gesamtlänge		7'680 m				

Tabelle 4: Übersicht verfügbarer Messabschnitte von Gleislagedaten der RHOMBERG / SERSA [11], ausgewählt nach den Kriterien «ruppiger» Gleislage in Bögen mit Fahrgeschwindigkeit ≥ 60 km/h, nachfolgend referenziert über die ID in Spalte 2, (fehlende IDs beziehen sich auf ausgeschlossene Abschnitte einer Vorauswahl)

Abschnitt 8.2.2 enthält für jeden Messabschnitt aus Tabelle 4 eine grafische Darstellung der Gleislagefehler im Wegbereich sowie der zugehörigen Verläufe der Gleisquerkrümmung (Kehrwert des Bogenradius) und der Überhöhung. Anfang und Ende der horizontalen Trassierungselemente (Bögen, Übergangsbögen etc.) sind dabei jeweils durch orange Vertikalstriche kenntlich gemacht.

Im Richtungsfehler einiger Bogenabschnitte wie z.B. in Abbildung 23, Abbildung 26 oder Abbildung 29 sind in der Bogenein- und -ausfahrt Schwingungen mit grosser Amplitude auffällig. Die Ursache dieser Schwingungen ist dem hier gegenständlichen Projektteam inkl. RHOMBERG / SERSA nicht bekannt. Neben einer tatsächlichen Abweichung von der Sollgleislage (z.B. durch Bogenatmung [20] zum Zeitpunkt der Messung) kommen potenziell auch bogengeometrische Einflüsse auf den Auswertalgorithmus in Betracht. Die Wellenlängen der fraglichen Schwingungen sind in der Grössenordnung $\lambda = 100$ m auszumachen und liegen damit ausserhalb des relevanten Wellenlängenbereichs der vorliegenden Untersuchung (siehe Abschnitt 2.5). So entspricht eine

Anregung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 100$ m bei einer Fahrgeschwindigkeit von 70 km/h einer Frequenz von $f = 0.2$ Hz, was lauftechnisch wenig provokativ ist. Auch wenn diese langwelligen Schwingungen im Richtungsfehler damit keinen Einfluss auf die hier gegenständliche Fragestellung haben, verbleibt die Frage nach der tatsächlichen Ursache, siehe Punkt 3) in Abschnitt 6.2.

3.3 Elektronische Gleislagedaten

Für die Messabschnitte aus Tabelle 3 und Tabelle 4 hat RHOMBERG / SERSA die Gleislagedaten nebst Zusatzinformationen (Streckenkilometrierung, GPS-Position etc.) in elektronischer Form übermittelt [11]. Die Gleislagedaten liegen dabei in der schienenbezogenen Darstellung (siehe Abschnitt 2.3 und Abbildung 3) vor. Die gegenständlichen Gleislagedaten sind im Wellenlängenbereich von 1 bis 70 m aussagekräftig [11], was genau dem gewünschten Wellenlängenbereich gemäss Abschnitt 2.5 entspricht. Die Ausgabeschrittweite entlang der Gleisachse beträgt 0.25 m, so dass auch die kleinste Wellenlänge von 1 m noch hinreichend berücksichtigt wird.

Damit liegen für die vorliegende Untersuchung geeignete Messdaten vor, die einheitlich mit dem selben Messsystem und vom selben Fahrzeug aus erhoben wurden. Daher sind die Ergebnisse der Messabschnitte direkt miteinander vergleichbar, obwohl sie von unterschiedlichen Infrastrukturen stammen und deren etwaige Besonderheiten beinhalten.

4 Identifikation von Gleislagefehlern für lauftechnische Nachweisrechnungen

Die verfügbaren Messdaten werden mit verschiedenen Zielsetzungen ausgewertet: So werden in Abschnitt 4.1 analog zu den bekannten Datensätzen «ORE high» und «ORE low» [10] entsprechende RAILplus-Störpegel für **regellose Gleislagefehler** aufgestellt. In den Abschnitten 4.2 und 4.3 finden sich Auswertungen zu **periodisch auftretenden Gleislagefehlern**. Abschnitt 4.4 hat **Einzelereignisse** im Verlauf der Gleislagefehler zum Gegenstand.

Diese Auswertungen sind durch das Projektteam P3 in verschiedenen Sitzungen vorangetrieben und zunächst in fortgeschriebenen Foliensätzen [14][15] dokumentiert worden.

4.1 Regellose Gleislagefehler hoher Anregung

Regellose Gleislagefehler beinhalten ein mehr oder weniger gleichmässiges «Rauschen», das keine wiederkehrenden lokalen Ereignisse (Periodizitäten) oder Einzelfehler enthält. Regellose Gleislagefehler lassen sich in Leistungsdichtespektren (PSD) beschreiben, untereinander vergleichen und in gängige Mehrkörpersystem (MKS)-Software einlesen (siehe Abschnitt 2.2). So sind beispielsweise die im Vollbahnbereich üblichen Gleislagefehler «ORE high» und «ORE low» der ORE B176 [10] wie auch die Gleislagefehler in Frederich [12] in Form von Leistungsdichtespektren angegeben (siehe Abschnitt 2.4).

Die Abschnitte 8.4 und 8.5 enthalten grafische Darstellungen der Leistungsdichtespektren für die hier gegenständlichen Messabschnitte aus Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit) und Tabelle 4 (Bogenfahrt bei mindestens 60 km/h). Die Darstellung erfolgt analog zu den Vergleichsspektren der ORE B176 [10] sowie Frederich [12] in der gleisachsenbezogenen Beschreibung (siehe Abschnitt 2.3 bzw. Abbildung 2). Die Abschnitte 8.4.1 und 8.5.1 beinhalten dabei Leistungsdichtespektren zum Richtungsfehler, Abschnitte 8.4.2 und 8.5.2 zum Längshöhenfehler, Abschnitte 8.4.3 und 8.5.3 zum Spurweitenfehler sowie Abschnitte 8.4.4 und 8.5.4 zum Querhöhenfehler.

Die Leistungsdichtespektren in Abschnitten 8.4 und 8.5 sind einheitlich in doppelt-logarithmischer Darstellung gehalten. Dabei sind jeweils zwei Abszissen angedruckt: die Abszisse am unteren Bildrand zeigt die Wegkreisfrequenz Ω (siehe Punkt 4) in Abschnitt 2.1), wie es für derartige Darstellungen z.B. in [10], [12], [17] gebräuchlich ist und hier die führende Grösse ausmacht. Auf der zweiten Abszisse am oberen Bildrand sind zur Information weiterhin ausgewählte Wellenlängen λ angetragen, da die Wellenlänge eine menschlich eher «greifbare» Grösse als die Wegkreisfrequenz ist. So stellen die dargestellten Wellenlängen 1 und 70 m die Grenzen des hier relevanten Wellenlängenbereichs gemäss Abschnitt 2.5 dar. Weiterhin bilden die Wellenlängen 3, 25 und 70 m die Grenzen der Wellenlängenbereiche D1 und D2 nach EN 13848 [4]. Die weiterhin angetragenen Wellenlängen 1,8 m und 2,5 m entsprechen typischen Radsatzständen im Drehgestell.

Auf der Ordinate der Abbildungen in den Abschnitten 8.4 und 8.5 ist die spektrale Unebenheitsleistungsdichte (PSD) des jeweiligen Gleislagefehlers angetragen.

Die Abbildungen in den Abschnitten 8.4 und 8.5 enthalten jeweils eine Vielzahl von farbig dargestellten Spektren. Die Spektren sind dabei in gleitenden Auswertefenstern entlang des Messabschnitts ermittelt. Jede dargestellte Kurve zeigt das Leistungsdichtespektrum eines Auswertefensters. Jedes Auswertefenster zu Tabelle 3 beinhaltet 1024 Messwerte, was bei der gegebenen Abtastrate einer Streckenlänge von 256 m entspricht. Die Streckenabschnitte in Tabelle 4 fallen bedingt durch die gegenständliche Bogenfahrt und die geringere Fahrgeschwindigkeit tendenziell kürzer als Tabelle 3 aus. Daher erfolgt die Auswertung zu den Bogenfahrten aus Tabelle 4 über eine kleinere Fensterbreite von 512 Datenpunkten entsprechend einer Gleislänge von 128 m.

Um den Einfluss der Unstetigkeiten am Anfang und Ende (Grenzen) der Auswerteabschnitte zu reduzieren, werden die Messwerte jedes Auswerteabschnitts mit einer Fensterfunktion des Typs «Barlett» [13] gewichtet. Die Fortschrittslänge der gleitenden Auswertung ist zu ca. 83 m zu Tabelle 3 sowie 37,5 m zu Tabelle 4 angesetzt. Zur Vermeidung von Datenverlust und Aliasingeffekt sind die vorgenannten Fortschrittslängen so gewählt, dass sich einerseits die benachbarten Auswertefenster

nennenswert überlappen. Andererseits stellt die Fensterbreite kein ganzzahliges Vielfaches der Fortschrittslänge dar.

Jeweils die erste Abbildung in den Unterabschnitten von Abschnitten 8.4 und 8.5 beinhaltet dabei die Auswertung aller Streckenabschnitte aus Tabelle 3 bzw. Tabelle 4, wie es in der Legende der jeweiligen Abbildung kenntlich gemacht ist. Die nachfolgenden Abbildungen in den Abschnitten 8.4 und 8.5 dienen der Übersichtlichkeit und enthalten jeweils nur einen Teil der Streckenabschnitte, so dass sich entsprechend weniger Kurven in der Grafik überlagern.

In den Abbildungen in Abschnitt 8.4 ist zum informativen Vergleich jeweils in rot das Spektrum «ORE high» sowie in grün das Spektrum «ORE low» der ORE B176 [10] dargestellt. Für den Spurweitenfehler in Abschnitt 8.4.3 sind entsprechend der Erläuterung aus Abschnitt 2.4 zwei Vergleichsspektren aus Frederich [12] dargestellt.

Die verschiedenen Spektren der Abschnitte 8.4 und 8.5 sind anhand der fortgeschriebenen Foliensätze [14][15] in 15 Sitzungen des gegenständlichen Projektteams projektbegleitend erörtert worden. So treten je nach Fehlerart einige Wellenlängen mit grösserer Leistungsdichte respektive Amplitude hervor, deren Behandlung Gegenstand periodischer Fehler in den Abschnitten 4.2 und 4.3 ist.

Die Mittelwerte der Leistungsdichtespektren aus Abschnitt 8.4 und 8.5 liegen durchgängig deutlich unterhalb des Störpegels «ORE low» [10] und sind entsprechend für lauftechnische Zwecke auch nicht herausfordernd. Vielmehr muss das Fahrzeug auch die Gleisabschnitte der anspruchsvollsten Gleislage mit genügender Fahrsicherheit passieren, so dass hier nach Meinung des gegenständlichen Projektteams P3 die Maximalwerte der Spektren relevant sind. In den Grösstwerten der Spektren in Abbildung 44, Abbildung 50, Abbildung 56, Abbildung 62 sowie Abbildung 68, Abbildung 74, Abbildung 80 und Abbildung 86 treten nahezu alle verwendeten Legendenfarben respektive viele verschiedene Messabschnitte auf. Entsprechend wird die gesuchte RAILplus-Gleislage nicht durch einen einzelnen Gleisabschnitt oder eine bestimmte Bahn dominiert, sondern ergibt sich aus der Kombination vieler Auswerteabschnitte verschiedener Bahnen.

Für die Streckenabschnitte bei hoher Fahrgeschwindigkeit aus Tabelle 3 verlaufen die grössten Leistungsdichten der **Richtungsfehler** in Abbildung 44 in weiten Teilen ähnlich zum Spektrum «ORE high» der ORE B176 [10]. Bei Wellenlängen $\lambda \geq 8.5$ m übertreffen die Spitzenwerte der Streckenabschnitte aus Tabelle 3 den Pegel «ORE high». Diesem Unterschied begegnet das hier gegenständliche Projektteam P3 mit dem in Abbildung 44 gelb dargestellten eigenen Spektrum «RAILplus» (auch «RAILplus low» genannt). Für die Streckenabschnitte bei Bogenfahrt mit mindestens 60 km/h aus Tabelle 4 ergeben sich wie in Abbildung 68 dargestellt über dem gesamten Wellenlängenbereich grössere Spitzenwerte als in Abbildung 44. Dazu sieht das hier gegenständliche Projektteam P3 das in Abbildung 68 dargestellte Spektrum «RAILplus high» vor [15]. In Bezug auf den regellosen Richtungsfehler wird daher für Fahrgeschwindigkeiten $V > 80$ km/h der Störpegel «RAILplus low» sowie bei $V \leq 80$ km/h der Störpegel «RAILplus high» vorgeschlagen.

Die grössten Leistungsdichten der **Querhöhenfehler** in Abbildung 62 und Abbildung 86 sind in weiten Teilen dem Spektrum «ORE high» der ORE B176 [10] ähnlich. Hier ist kein nennenswerter Unterschied in den Spitzenwerten der Streckenabschnitte aus Tabelle 3 und Tabelle 4 festzustellen. Der Querhöhenfehler ist in der ORE B176 [10] wie auch in der vorliegenden Untersuchung bewusst als Winkelangabe gehandhabt, siehe auch Abschnitt 2.3 inklusive Fussnote 5. Damit sind die Querhöhenfehler unabhängig von der unterschiedlichen Spur- bzw. Stützweite direkt miteinander vergleichbar. Die festgestellte Ähnlichkeit im Spektrum der Querhöhenfehler bedeutet, dass bei der meterspurigen RAILplus-Anwendung ähnliche Amplituden von Querhöhenwinkeln wie bei der Normalspur nach «ORE high» auftreten. Die Rückrechnung der Querhöhenfehler auf eine Höhenangabe über der jeweiligen Stützweite (gegenseitige Höhenlage) ergibt bei identischem Querhöhenwinkel wegen der unterschiedlichen Stützweiten (siehe Abschnitt 2.1) bei der Meterspur nur

1.05m/1.5m = 70 % der gegenseitigen Höhenlage der Normalspur⁶. Die vergleichbaren Leistungsdichten von Querhöhenwinkeln im Leistungsdichtespektrum von «ORE high» und RAILplus bedeuten also entsprechend geringere gegenseitige Höhenlagen bei den RAILplus-Streckenabschnitten.

Sowohl der **Längshöhenfehler** in Abbildung 50 (hohe Fahrgeschwindigkeit) als auch der Längshöhenfehler in Abbildung 74 (Bogenfahrt mit mindestens 60 km/h) weisen gegenüber dem Störpegel «ORE high» im Wellenlängenbereich zwischen 4 und 15 m einen deutlich höheren Verlauf auf, der im Rahmen der Projektsitzungen anhand von örtlichen Gegebenheiten (Wechsel der Oberbauform, Tunnelein/ausfahrt etc.) stichprobenartig verifiziert werden konnte [14].

Für die Umhüllende des Spektrums der **Spurweitenfehler** in Abbildung 56 sowie in Abbildung 80 besteht eine gewisse Ähnlichkeit zum grün dargestellten «besten Spurweitenfehler» nach Frederich [12].

Ausgehend von den vorstehenden Ausführungen hat das gegenständliche Projektteam P3 die in Abschnitt 8.4 jeweils gelb dargestellten RAILplus-Spektren erarbeitet [14][15]. Weil die Kontur der RAILplus-Spektren bzw. ihre Steigung in der doppelt-logarithmischen Darstellung von den Spektren der ORE B176 [10] und Frederich [12] abweichen, können die dort jeweils definierten Hyperbelfunktionen leider nicht übernommen und mit anderen Parameterwerten weitergenutzt werden. Daher wird für die regellosen RAILplus-Spektren eine eigene Funktion eingeführt, wie sie in Gleichung 1 (auf Seite 5) angedruckt ist. Zur Erläuterung der Wegkreisfrequenz Ω in Gleichung 1 siehe Punkt 4) in Abschnitt 2.1.

Gleichung 1 in Kombination mit den Wertangaben aus Tabelle 1 (auf Seite 5) definiert die gesuchten regellosen RAILplus-Gleislagespektren, wie sie in den Leistungsdichtespektren in den Abschnitten 8.4 und 8.5 jeweils in gelb dargestellt sind.

Die Spalten in Tabelle 1 beinhalten folgende Variablen aus Gleichung 1:

- a : in ähnlicher Form bei Frederich [12] «Unebenheit» genannt
- b : in ähnlicher Form bei Frederich [12] «Welligkeit» genannt
- c : dimensionsloser Faktor
- n : Grad der Hyperbel (macht in doppelt-logarithmischer Darstellung die Steigung aus)

Abbildung 103 und Abbildung 104 zeigen die zu Gleichung 1 und Tabelle 1 gehörigen Verläufe im Wegbereich über eine Länge von 5 km.

Je nach Funktionsumfang einer Mehrkörpersystem (MKS)-Software oder eigener Pre-Prozesse z.B. der Fahrzeuglieferanten können die vorgenannten Leistungsdichtespektren direkt verarbeitet werden. Dabei ist insbesondere auf den relevanten Wellenlängenbereich aus Abschnitt 2.5 und eine genügend feine Diskretisierung in Teilunebenheiten zu achten. Weiterhin ist der im Wegbereich resultierende Spurweitenfehler auf eine mögliche Unterschreitung der Mindestspurweite (997 mm nach 2.1.1 zu AB 16 in AB-EBV [1]) zu kontrollieren und ggf. durch einen Offset zu bereinigen.

Abschnitt a) auf Seite 5 verweist alternativ auf zwei elektronische Datensätze. Diese enthalten die schienenbezogene Beschreibung der Fehlerkanäle entsprechend Abschnitt 2.3 bzw. Abbildung 3. Beide Datensätze berücksichtigen den relevanten Wellenlängenbereich von 1 bis 70 m entsprechend Abschnitt 2.5, der hier jeweils durch 2'000 Teilunebenheiten fein diskretisiert ist. Je Teilunebenheit kommt eine Zufallsphase zum Ansatz, um die jeweilige Amplitude und Wegkreisfrequenz zu einer

⁶ Um einem möglichen Missverständnis vorzubeugen sei festgehalten, dass der Querhöhenfehler (als Angabe eines Winkels oder als gegenseitige Höhenlage, siehe Abschnitt 2.3) nicht mit der Gleisverwindung zu verwechseln ist. Der Querhöhenfehler ist die örtliche Abweichung der Ist-Gleislage von der Soll-Gleislage in einem Gleisquerschnitt. Demgegenüber ergibt sich die Gleisverwindung aus einer Änderung zwischen Gleisquerschnitten in einem Längsabstand zueinander: entweder aus der Änderung der Überhöhung über einem Längsabstand und/oder aus der Raumkurve (Helix-Verwindung), wie sie aus der Kombination von Bogenradius und Längsneigung resultiert, und/oder aus kombinierten Flach/Tief-Rillenanlagen.

harmonischen Teilunebenheit (Sinusfunktion) zu komplettieren. Die Ausgaberate beträgt 0.2 m. Die in Abbildung 103 und Abbildung 104 dargestellten Verläufe des regellosen RAILplus-Gleislagefehlers zeigen, dass der Spurweitenfehler respektive die Richtungsfehler von rechter und linker Schiene durch einen Offset so gewählt sind, dass die zulässigen Grenzwerte der Spurweite sicher eingehalten werden: der kleinste Spurweitenfehler beträgt hier 0 mm, der grösste Spurweitenfehler 11 mm.

Es wird empfohlen, den hier vorgeschlagenen regellosen RAILplus-Gleislagefehler zunächst in lauftechnischen Versuchsrechnungen zu erproben, siehe Punkt 1) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2 und ihn anschliessend entsprechend dem Vorschlag in Kapitel 5 zu verwenden.

4.2 Periodische Längshöhenfehler

Periodisch auftretende Längshöhenfehler, deren Wellenlängen z.B. mit Drehgestellmittenabständen oder Radsatzständen im Drehgestell (oder deren Vielfachen/Teilern) korrespondieren oder in Kombination mit streckentypischer Fahrgeschwindigkeit eine grundlegende Eigenfrequenz des Fahrzeugs treffen, können heftige Fahrzeugreaktionen auslösen bzw. sich mit jeder Überfahrt weiter ausprägen. Dieses Phänomen ist aus dem Vollbahnbereich bekannt und wird dort «Cyclic Top» genannt, siehe z.B. CEN/TR 17039 [8]. Cyclic Top kann verstärkt auftreten, wenn die gegenständliche Strecke recht einheitlich mit wenig unterschiedlichen Fahrzeugtypen bedient wird, wie es bei den RAILplus-Bahnen typischerweise der Fall ist.

Abbildung 50 zeigt das über je 256 m lange Abschnitte gebildete Leistungsdichtespektrum der Längshöhenfehler aller Messabschnitte aus Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit). Der grundlegende Aufbau der Darstellung ist in Abschnitt 4.1 beschrieben. Aus Abbildung 50 sowie den Folgeabbildungen bis Abbildung 55 ist ersichtlich, dass insbesondere Wellenlängen zwischen 5 und 9 m zum Teil scharfkantig hervortretende Amplituden aufweisen. Die Wellenlängen bringt das Projektteam P3 nicht mit grundlegenden geometrischen Abmessungen relevanter Fahrzeuge in Verbindung. Die genannten Wellenlängen entsprechen bei einer Befahrung mit 80 bis 90 km/h Anregefrequenzen von 2.5 bis 5 Hz, siehe auch Pendenz 2) in Abschnitt 6.2. Abbildung 74 zeigt die vergleichbaren Spektren der Gleisabschnitte aus Tabelle 4 betreffend Bogenfahrten mit mindestens 60 km/h. In Abbildung 74 sind keine derart scharf hervortretenden Amplituden auszumachen, so dass die Auswertung der Streckenabschnitte aus Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit) hier massgeblich ist.

Die vorstehend genannten ausgeprägten Amplituden in Abbildung 50 weisen darauf hin, dass in den gegenständlichen Messabschnitten mindestens abschnittsweise periodische Längshöhenfehler auftreten. Daher wurden im Projektverlauf diejenigen Streckenabschnitte untersucht, die einen Anteil an den Peaks im Leistungsdichtespektrum ausmachen [14]. Nachfolgend werden eindruckliche Abschnitte beschrieben bzw. dargestellt.

Abbildung 92 zeigt einen ca. 500 m langen Ausschnitt des Messabschnitts 11 aus Tabelle 3. Im Leistungsdichtespektrum im oberen Grafikbereich der Abbildung 92 sind die Spektren dieses Ausschnitts in gelb hervorgehoben. Die gelb gekennzeichneten Spektren zeigen, dass unter anderem dieser Gleisabschnitt relevant für die hervortretenden Amplituden mit 5.5 und 9 m Wellenlänge ist. Die Darstellung im Wegbereich im unteren Bereich der Abbildung 92 zeigt übereinstimmend zum Spektrum eine ausgeprägte Schwingung mit einer Wellenlänge von ca. 9 m. In Kombination mit der in Tabelle 3 genannten Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h ergibt sich daraus eine wirksame Frequenz von 2.5 Hz. Es sind weiterhin verschiedene Einzelereignisse erkennbar, die einem grundlegenden Abstandsmuster von ca. 60 m zu folgen scheinen.

Analog zeigt Abbildung 93 einen ca. 500 m langen Ausschnitt des Messabschnitts 14 aus Tabelle 3, der bei ähnlichen Wellenlängen von 7 bzw. 8.5 m für dominante Amplituden ausschlaggebend ist. Analog zur vorstehenden Beschreibung zeigt sich auch in Abbildung 93 eine nahezu harmonische Oberschwingung mit den vorgenannten Wellenlängen sowie ein Grundmuster von Ereignissen in einem Abstand von hier ca. 50 m.

Abbildung 94 zeigt einen Ausschnitt von knapp 1 km des Messabschnitts 26 aus Tabelle 3. Dieser Ausschnitt zeigt ebenso eine Oberschwingung mit ca. 8.5 m Wellenlänge und ein Grundmuster von ca. 50 m. Für diesen Streckenabschnitt stehen aus einer Mitfahrt als regulärer Fahrgast Quer- und

Vertikalbeschleunigungen sowie Wank- und Nickraten zur Verfügung, die am 13.05.2023 als Rohdaten eines Smartphones aufgezeichnet wurden (via Applikation PhyPhox der RWTH Aachen). Diese Daten genügen keinen Prüfstellenanforderungen, werden hier aber informativ zur Plausibilisierung herangezogen. So zeigt Abbildung 96 in der oberen Hälfte den Zeitverlauf sowie in der unteren Hälfte die Amplitudenspektren der Fahrt von Samedan nach Pontresina, wobei die Daten auf dem Fußboden des Wagenkastens in der vorderen Hälfte des Wagens Nr. 2433 erfasst wurden. Die Vertikalbeschleunigungen in Abbildung 96 zeigen ausgeprägte Amplituden um 2 Hz, während in den anderen erfassten Raumrichtungen zwischen 0.5 und 5 Hz keine ausgeprägten Schwingungen festzustellen sind. Dies deutet auf eine reine Vertikalschwingung des Wagenkastens hin, wobei 2 Hz in Kombination mit der dominierenden Wellenlänge von 8.5 m aus Abbildung 94 einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 65 km/h entspricht (die tatsächlich gefahrene Fahrgeschwindigkeit zu Abbildung 96 ist nicht bekannt).

Abbildung 97 zeigt analog zu Abbildung 96 die Signale der Rückfahrt von Pontresina nach Samedan mit Halt in Punt Muragl. Der betreffende Streckenabschnitt ist eingleisig, so dass die befahrene Gleislage in Abbildung 96 und Abbildung 97 identisch ist. Neben der Fahrtrichtung besteht der Unterschied zu Abbildung 96 darin, dass Abbildung 97 ein anderes Fahrzeug zugrunde liegt (aus den Notizen: Triebzug, über Laufdrehgestell). Bei identischen Skalierungen der Ordinaten zeigt das Amplitudenspektrum der Vertikalbeschleunigungen in Abbildung 97 im Unterschied zu Abbildung 96 keine scharfkantig ausgeprägte Einzelfrequenz sondern ausgeprägte Amplituden im Bereich zwischen etwas 0.8 und 2.5 Hz. Im Spektrum der Wankgeschwindigkeit lässt sich eine dominierende Amplitude bei 0.85 Hz ausmachen, was einer typischen Wankeigenfrequenz von Fahrzeugen entspricht und sich analog im Spektrum der Querschleunigungen findet. Im Spektrum der Querschleunigungen in Abbildung 97 ist weiterhin eine ausgeprägte Amplitude bei 1.35 Hz ersichtlich. Nicht ganz so ausgeprägt aber mit dem grundlegend identischen Muster zeigt Abbildung 95 einen ca. 500 m langen Ausschnitt des Messabschnitts 31 aus Tabelle 3.

Die vorstehend dargelegten Beispiele von Abbildung 92 bis Abbildung 95 stammen von jeweils unterschiedlichen Bahnen, geben aber ein identisches Grundbild von harmonischer Oberschwingung und stossartigem Grundmuster ab.

Der Abstand des Grundmusters von 50 bis 60 m stellt einerseits einen üblichen Abstand von Fahrleistungsmasten dar und passt andererseits zum typischen Abstand von Schweißstößen von Schienen, die gemäss Projektteam P3 oftmals örtlich synchron an rechter und linker Schiene eines Gleises erfolgen. Von daher kann hier ein Zusammenhang zu den oben festgestellten Mustern bestehen. Exemplarische Recherchen der Infrastrukturverantwortlichen haben am Beispiel der Streckenabschnitte Visp-Sefinot (Abbildung 93), Randa-Täsch, Rougemont-Saanen (Abbildung 94) und Samedan-Punt Muragl (Abbildung 95) ergeben, dass viele der stossartigen Ereignisse entweder Zwangspunkten wie Querungen, Bahnübergängen, Isolationsstößen und dem Wechsel des Oberbautyps oder anderenteils Lehmaufstößen oder Schotterverschmutzung zugeordnet werden können.

Das bearbeitende Projektteam P3 vermutet auch aus der Erfahrung ähnlicher Vorgänge folgenden Zusammenhang (These): Der Fahrweg ist in diesen Bereichen z.B. auch durch ausbleibenden Unterbau vermutlich tendenziell weich. Durch die vorgenannten Effekte ergeben sich lokal Steifigkeitsänderungen. Beim Passieren dieser Stellen reagiert das Fahrzeug auf die sprunghafte Steifigkeitsänderung mit einer ausgeprägten Nick- und/oder Tauchbewegung in seiner Eigenfrequenz (siehe insbesondere Abbildung 96). Dieses Fahrzeugschwingung prägt sich über die Rad/Schiene-Belastung mit jeder Überfahrt weiter in den Fahrweg ein und regt nachfolgende Fahrzeuge erst recht zu solchen Schwingungen an. Dies entspräche grundlegend dem oben genannten Phänomen «Cyclic Top» [8]. Für eine weiterführende Klärung wird die Frage der Eigenfrequenzen relevanter Bestandsfahrzeuge in der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2 gelistet.

Unabhängig von ihrer Ursache tritt das vorbeschriebene Phänomen bei verschiedenen RAILplus-Bahnen auf, ist also kein Einzelfall und sollte entsprechend bei der laufdynamischen Bemessung von Fahrzeugen berücksichtigt werden.

Dazu verweist Abschnitt b) auf Seite 6 auf einen wegabhängigen Datensatz. Dieser enthält exemplarisch die beiden Abschnitte gemäss Abbildung 92 und Abbildung 93. Abbildung 105 zeigt eine grafische Darstellung dieses Datensatzes.

Abschnitt 5.2 enthält einen Vorschlag zu einem entsprechenden Szenario für lauftechnische Simulationen.

4.3 Periodische Richtungs- und Spurweitenfehler

Periodisch auftretende Richtungs- und/oder Spurweitenfehler können Fahrzeuge zu ausgeprägten Querschwingungen anregen. Ebenso können ausgeprägte Querschwingungen des Fahrzeugs die Ursache für periodische Richtungs- und Spurweitenfehler sein, indem sie sich in ihrer Wirkung geometrisch auf das Gleis aufprägen und dann nachfolgende Fahrzeuge zu eben solcher Querschwingung anregen. Dabei stehen Grenzykelbewegungen der Fahrzeuge im Vordergrund, wie sie oftmals auch «Instabilität», «Drehgestellschlingern», «Wagenkastenschlingern» oder «Low Body Motion» genannt werden, siehe auch Abschnitt 7.6.3.3 in [19] sowie [17].

Im Leistungsdichtespektrum der Richtungsfehler in Abbildung 44 sowie im Spektrum der Spurweitenfehler in Abbildung 56 stechen jeweils insbesondere Wellenlängen von 1.8 m sowie von etwa 2.1 bis 2.7 m hervor. Diese Spektren beziehen sich auf die Streckenabschnitte hoher Fahrgeschwindigkeit aus Tabelle 3. In den Spektren in Abbildung 68 und Abbildung 80 zu Tabelle 4 betreffend Bogenfahrten sind keine solch ausgeprägten oder darüber hinausgehenden Amplituden auszumachen. Von daher sind die Spektren zu Tabelle 3 hier massgeblich.

Der vorgenannte Wellenlängenbereich entspricht typischen Radsatzständen im Drehgestell und hat keinen geometrischen Zusammenhang zum Messwagen (siehe Kapitel 3, zweiachsiges Fahrzeug mit 4 m Radsatzstand). Eine Wellenlänge von 2.5 m entspricht bei einer Befahrungen mit 80 bis 120 km/h Frequenzen zwischen 9 und 13 Hz, was ungefähr dem Zweifachen typischer Drehgestellinstabilitätsfrequenzen entspricht. Abbildung 98 zeigt exemplarisch Darstellungen zum Richtungsfehler eines Ausschnitts von Messabschnitt 11 aus Tabelle 3, der eine ausgeprägte Amplitude bei 2.5 m aufweist. Diese Oberschwingung ist auch im Wegschrieb in der unteren Darstellung von Abbildung 98 visuell erkennbar. Analog dazu ist in Abbildung 99 die Auswertung des Spurweitenfehlers für den selben Ausschnitt dargestellt. Auch hier tritt eine ausgeprägte Amplitude bei der Wellenlänge 2.5 m hervor. Der Ausschnitt in Abbildung 98 und Abbildung 99 stimmt dabei mit dem in Abbildung 92 anlässlich des Längshöhenfehlers bereits erörterten Abschnitts überein (siehe Erläuterung in Abschnitt 4.2).

In Bezug auf niederfrequente Wagenkastenschwingungen (EN 14363 [5], «low body motion») werden Frequenzen im Bereich von 0.5 bis 1.5 Hz als relevant angesehen. Dies entspricht bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 bis 120 km/h Wellenlängen von 15 bis 70 m. In diesem Wellenlängenbereich sind im Richtungs- und Spurweitenspektrum aller hier gegenständlichen Messabschnitte in Abbildung 44 und Abbildung 56 keine nennenswert ausgeprägten Amplituden festzustellen, wie sie z.B. beim Radsatzstand auszumachen sind.

Auf Basis der vorstehenden Ausführung wird vorgeschlagen, für lauftechnische Nachweisrechnungen die Gleislagefehler entsprechend dem Abschnitt km 11.0 bis km 11.5 des Messabschnitts 11 aus Tabelle 3 exemplarisch zu berücksichtigen. Dieser Vorschlag ist bereits in den Ausführungen am Ende von Abschnitt 4.2 sowie in Abschnitt 5.2 enthalten.

4.4 Einzelereignisse in Gleislagefehlern

Lokale Gleislageänderungen, wie sie sich z.B. infolge des Übergangs von einer Oberbauform zur einer anderen, Anfang und Ende von Tunneln und Brücken etc. ergeben können, vermögen zum Teil heftige Fahrzeugreaktionen hervorrufen.

Im Projektverlauf wurden einige solcher Einzelereignisse identifiziert [14], die sich jeweils auf die Streckenabschnitte aus Tabelle 3 bei hoher Fahrgeschwindigkeit beziehen. In den Streckenabschnitten aus Tabelle 4 zur Bogenfahrt bei mindestens 60 km/h sind keine solch markanten Einzelereignisse auszumachen [15]. Nachfolgend werden drei repräsentative Beispiele von Einzelereignissen

dokumentiert werden. Diese Einzelereignisse von Gleislagefehlern erstrecken sich jeweils über Längen von etwa 50 bis 100 m und dauern bei einer Überfahrt mit 80 bis 100 km/h entsprechend zwischen ca. 2 und 5 s an.

So zeigt Abbildung 100 einen ca. 300 m langen Ausschnitt des Messabschnitts 15 aus Tabelle 3, in dem bei km 42.9 ein Einzelereignis im Längshöhenfehler auszumachen ist. Die gipfelartig verlaufende Längshöhe weist hier positive Werte auf, was entsprechend dem Koordinatensystem in Abbildung 2 eine lokale Absenkung der Schienen bedeutet. Dieser Abschnitt fällt im darüber dargestellten Leistungsdichtespektrum durch abschnittsweise sehr hohe Werte auf. Neben dem Längshöhenfehler zeigt auch der Querhöhenfehler am selben Ort eine Änderung auf, so dass das Fahrzeug hier neben der vertikalen Anregung auch eine Verwindung erfährt.

Abbildung 101 zeigt ein Einzelereignis im Verlauf des Längshöhenfehlers aus Messabschnitt 21 der Tabelle 3. Dieses Ereignis ist ebenfalls eine lokale Einsenkung und kann örtlich einem Tunnelportal zugeordnet werden, bei dem gleichzeitig die Schwellenart wechselt. Auch dieser Ausschnitt weist im darüberliegenden Leistungsdichtespektrum abschnittsweise sehr hohe Werte auf. Neben der Längshöhe ändern auch die anderen drei Fehlerkanäle im Bereich des Tunnelportals ihre Werte, so dass hier eine nennenswerte Fahrzeugdynamik zu erwarten ist.

Abbildung 102 stellt ca. 400 m langen Ausschnitt des Messabschnitts 23 der Tabelle 3 dar. Das bei km 13.97 erkennbar Einzelereignis ist ebenfalls eine Absenkung und kann dem Übergang der Oberbauform von Fester Fahrbahn auf Holzschwellen zugeordnet werden. Auch dieser Abschnitt zeigt im darüber dargestellten Leistungsdichtespektrum abschnittsweise sehr hohe Werte. Neben der Längshöhe ändert sich auch hier gleichzeitig die Querhöhe, woraus eine entsprechende Verwindung resultiert.

Auf Basis der vorstehenden Ausführung wird vorgeschlagen, für lauftechnische Nachweisrechnungen die drei vorgenannten exemplarischen Einzelereignisse mit allen 4 Fehlerkanälen zunächst zu erproben (Punkt 1) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2) und bei bestätigter Eignung anschliessend turnusmässig in folgenden Szenarien zu verwenden:

- a) Prüfbereich 1
(gerades Gleis und sehr grosse Bögen, Prüfungsgeschwindigkeit oberhalb der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit, keine nennenswerte freie Seitenbeschleunigung, EN 14363 [5])
- b) Prüfbereich 2
(«große» Bögen, gleichzeitiges Aufbringen von Übergeschwindigkeit und Überbeschleunigung, EN 14363 [5])

Dazu verweist Abschnitt c) auf Seite 6 auf einen wegabhängigen Datensatz, dessen Verlauf in Abbildung 106 grafisch dargestellt ist.

5 Simulationsszenarien zur Umsetzung in einem Lastenheft

In Kapitel 0 werden verschiedene Gleislagefehler in Hinblick auf künftige lauftechnische Nachweisrechnungen identifiziert. Es wird empfohlen diese Gleislagefehler zunächst in Versuchsrechnungen zu erproben, siehe Punkt 1) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2.

Eine erfolgreiche Erprobung vorausgesetzt, werden nachfolgende Simulationsszenarien insbesondere für künftige Lastenhefte vorgeschlagen. Dazu ist angedacht, diese lauftechnischen Szenarien in geeigneter Form in das Lieferobjekt LO 4.5.1 «Grundlagen zu Anforderungen an Fahrsicherheit / Fahrverhalten und deren Nachweismethoden - Meterspur» des Projekts P3 aufzunehmen, siehe Punkt 5) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2. Dort sind zu den nachfolgenden Szenarien die weiteren Randbedingungen wie z.B. zu testende Beladezustände, Rad/Schiene-Reibungszahlen, Gleisbettungseigenschaften etc. zu spezifizieren.

5.1 Lauftechnische Szenarien zu regellosen Gleislagefehlern

In Abschnitt 4.1 sind regellose Gleislagefehler (RAILplus-Spektren) definiert, die wahlweise als Hyperbelfunktion der Leistungsdichtespektren oder als elektronischer Datensatz im Wegbereich zur Verfügung stehen.

Es wird vorgeschlagen, diese regellosen RAILplus-Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen insbesondere in nachfolgenden Szenarien zu verwenden. Bei Fahrgeschwindigkeiten grösser als 80 km/h sind dabei Richtungsfehler des Störpegels «RAILplus low» anzusetzen, bei Fahrgeschwindigkeiten bis 80 km/h Richtungsfehler des Störpegels «RAILplus high» (siehe Tabelle 1).

- 1) Prüfbereich 1 nach den Prinzipien der Tabelle 2 der EN 14363 [5]
«Prüfung im Bereich der zulässigen Geschwindigkeit des Fahrzeugs»
 - a. Umgebungsbedingungen in der Simulation
auf Basis der Tabelle 2 der EN 14363 [5]:
gerades Gleis,
Prüfgeschwindigkeit +10 km/h respektive +10 % oberhalb der maximalen
Fahrzeuggeschwindigkeit,
keine nennenswerte freie Seitenbeschleunigung
 - b. Beurteilungsgrößen und Grenzwerte entsprechend dem normalen Messverfahren
(Rad/Schiene-Kräfte) nach Tabelle 4 der EN 14363 [5]
unter Beachtung der AB-EBV [1] (insbesondere Grenzwert ΣY)
- 2) Prüfbereich 2 nach den Prinzipien der Tabelle 2 der EN 14363 [5]
«Prüfung der Kombinationen von zulässigen Geschwindigkeiten und Überhöhungs-
fehlbeträgen des Fahrzeugs»
 - a. Umgebungsbedingungen in der Simulation
auf Basis der Tabelle 2 der EN 14363 [5]:
Prüfgeschwindigkeit +10% oberhalb der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit,
Überhöhungsfehlbetrag +15% oberhalb des zulässigen Überhöhungsfehlbetrags,
«grosse Bogenradien», wobei sich der Bogenradius bei gegebener Überhöhung aus
der vorstehenden Prüfgeschwindigkeit und dem vorstehenden Überhöhungsfehlbetrag
ergibt (z.B. Bogenradius $R = V^2 / (a_q + 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot u_h / 1.05 \text{ m}) = 646 \text{ m}$ bei Prüfgeschwindig-
keit $V = 132 \text{ km/h}$, freier Seitenbeschleunigung von $a_q = 1.1 \text{ m/s}^2$ und Überhöhung von
 $u_h = 105 \text{ mm}$),
Übergangsbögen sind in die Auswertung einzubeziehen.
 - b. Beurteilungsgrößen und Grenzwerte entsprechend dem normalen Messverfahren
(Rad/Schiene-Kräfte) nach Tabelle 4 der EN 14363 [5]
unter Beachtung der AB-EBV [1] (insbesondere Grenzwert ΣY)
- 3) Prüfbereiche 3 und grösser nach den Prinzipien der Tabelle 2 der EN 14363 [5]

- a. Umgebungsbedingungen in der Simulation
auf Basis der Tabelle 2 der EN 14363 [5]:
Überhöhungsfehlbetrag +15% oberhalb des zulässigen Überhöhungsfehlbetrags
- b. Beurteilungsgrößen und Grenzwerte entsprechend dem normalen Messverfahren
(Rad/Schiene-Kräfte) nach Tabelle 4 der EN 14363 [5]
unter Beachtung der AB-EBV [1] (insbesondere Grenzwert ΣY)

5.2 Lauftechnische Szenarien zu periodischen Längshöhenfehlern (anteilig mit Richtungs- und Spurweitenfehler)

In Abschnitt 4.2 sind Gleisabschnitte mit periodischen Längshöhenfehlern identifiziert, zu denen wie in Abschnitt 4.2 beschrieben exemplarisch wegabhängige Gleislageabweichungen als elektronischer Datensatz zur Verfügung stehen. Dies inkludiert anteilig auch die in Abschnitt 4.3 beschriebenen periodischen Richtungs- und Spurweitenfehler.

Es wird vorgeschlagen, diese periodischen Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen insbesondere in folgenden Szenarien einzusetzen:

- a) Verwendung in den für RAILplus-Anwendungen adaptierten Prüfbereichen 1 und 2 wie in Abschnitt 5.1 beschrieben
- b) Beurteilungsgrößen und Grenzwerte sind in der vorgesehenen Erprobung (siehe Punkt 1) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2) festzulegen.

Vorläufig werden die Beurteilungsgrößen und Grenzwerte der Fahrsicherheit entsprechend dem normalen Messverfahren (Rad/Schiene-Kräfte) nach Tabelle 4 der EN 14363 [5] unter Beachtung der AB-EBV [1] (insbesondere Grenzwert ΣY) vorgeschlagen.

Für die Bewertung des Vertikalverhaltens auf den periodischen Gleislagefehlern werden weiterhin das Kriterium Q_{\max} nach Tabelle 4 der EN 14363 [5] sowie ein eigenes Kriterium der mindestens verbleibenden Radlast von vorläufig 20% der statischen Radlast vorgeschlagen.

Diese Bewertung fokussiert dabei auf die Fahrsicherheit des gegenständlichen Fahrzeugs unter anspruchsvollen Störeinflüssen. Es ist eine weiterführende Fragestellung, bei welcher Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung die bestehenden Gleislagefehler nennenswert weiter ausprägt werden (Cyclic-Top-Effekt, CEN/TR 17039 [8]), siehe Punkt 6) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2.

5.3 Lauftechnische Szenarien zu Einzelereignissen in Gleislagefehlern

In Abschnitt 4.4 sind Gleislageabschnitte mit Einzelereignissen identifiziert, zu denen wie in Abschnitt 4.4 beschrieben exemplarisch wegabhängige Gleislageabweichungen als elektronischer Datensatz zur Verfügung stehen.

Es wird vorgeschlagen, diese Einzelereignisse der Gleislage für lauftechnische Nachweisrechnungen insbesondere in folgenden Szenarien einzusetzen:

- a) Verwendung in den für RAILplus-Anwendungen adaptierten Prüfbereichen 1 und 2 wie in Abschnitt 5.1 beschrieben
- b) Beurteilungsgrößen und Grenzwerte sind in der vorgesehenen Erprobung (siehe Punkt 1) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2) festzulegen.

Vorläufig werden die Beurteilungsgrößen und Grenzwerte der Fahrsicherheit entsprechend dem normalen Messverfahren (Rad/Schiene-Kräfte) nach Tabelle 4 der EN 14363 [5] unter Beachtung der AB-EBV [1] (insbesondere Grenzwert ΣY) vorgeschlagen.

6 Fazit

6.1 Zusammenfassung wichtigster Ergebnisse

Ausgehend von der in Kapitel 1 beschriebenen Fragestellung nach repräsentativ anspruchsvollen Gleislagefehlern der RAILplus-Bahnen für künftige lauftechnische Nachweisrechnungen kommt die vorliegende Untersuchung auf Basis der Auswertung verfügbarer Gleismessdaten zu folgenden Schlüssen:

Analog zu den bekannten [19] **regellosen Gleislagestörpegeln** «ORE high» und «ORE low» [10] werden in Abschnitt 4.1 spezifische RAILplus-Spektren vorgeschlagen. Diese RAILplus-Spektren liegen abschnittsweise nahe bei «ORE high», weisen aber tendenziell höhere Werte bzw. eine anspruchsvollere Gleislage auf. Für den Richtungsfehler werden dabei zwei verschiedene Störpegel «RAILplus low» für Fahrgeschwindigkeiten größer als 80 km/h und «RAILplus high» für Fahrgeschwindigkeiten bis und mit 80 km/h vorgeschlagen. Für die weiteren Gleislagesignale des Querhöhenfehlers, Längshöhenfehlers und Spurweitenfehlers ergeben sich keine geschwindigkeitsabhängigen Unterschiede.

In einigen Gleismessabschnitten sind **periodische Längshöhenfehler** auszumachen, die einem einheitlichen Muster folgen, obwohl die Messdaten von verschiedenen Bahnen und Strecken stammen: Es ist eine harmonische Oberschwingung mit einer Wellenlänge von ca. 9 m auszumachen, der eine wiederkehrende vertikale Anregung im Abstand von ca. 50 bis 60 m überlagert ist. Zur möglichen Ursache besteht eine vorläufige These (siehe Abschnitt 4.2 sowie Punkt 2) der Pendenzenliste in Abschnitt 6.2).

Die verfügbaren Gleislagefehler zeigen keine Anhaltspunkte, dass sich niederfrequente Wagenkastenschwingungen («low body motion») in die Gleislage einprägen und damit nachfolgende Fahrzeuge entsprechend anregen würden.

In einigen Abschnitten der gegenständlichen Gleislagefehler sind **Einzelereignisse** auszumachen, die über etwa 50 bis 100 m andauern und jeweils Zwangspunkten wie dem Wechsel der Oberbauart oder einem Tunnelportal zuzuschreiben sind. Drei exemplarisch dokumentierte Einzelereignisse folgen dem selben Muster einer vertikalen Einsenkung in Verbindung mit einer gleichzeitigen Änderung der Querhöhe.

Sowohl für die regellosen Gleislagefehler, die periodischen Längshöhenfehler als auch die exemplarischen Einzelereignisse stehen jeweils elektronische Datensätze (Dateien) für künftige lauftechnische Nachweisrechnungen zur Verfügung.

6.2 Weiteres Vorgehen

Folgende weiterführende Fragestellungen haben sich während der Bearbeitung der vorliegenden Untersuchung ergeben:

1) Erprobung der identifizierten Gleislagefehler in lauftechnischen Simulationen

Die in der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten RAILplus-Gleislagefehler basieren auf der Auswertung von Messdaten. Als Ergebnis stehen die vier in Abschnitt 0 beschriebenen Gleislagedatensätze (regellos $V \leq 80$ km/h, regellos $V > 80$ km/h, periodisch und Einzelereignisse) zur Verwendung in lauftechnischen Simulationen zur Verfügung. Vor der ersten Verwendung dieser Gleislagefehler z.B. in Fahrzeugausschreibungen ist zu empfehlen, entsprechende lauftechnische Simulationen unter Verwendung dieser Gleislagefehler durchzuführen, um deren Eignung bzw. die Fahrzeugreaktionen zu überprüfen. Diese Frage stellt sich vor dem Hintergrund, dass die RAILplus-Gleislagefehler fahrtechnisch anspruchsvolle Randbedingungen (Störverhalten des Fahrzeugs) ergeben dürften, die technische Machbarkeit von Fahrzeugen aber realisierbar sein muss.

Diese Frage richtet sich nach Meinung des hier gegenständlichen Projektteams P3 an das Projektteam P5 «Fahrzeug» in Verbindung mit einem dort ohnehin in Vorbereitung befindlichen generischen Fahrzeugmodell.

2) Relevante Eigenfrequenzen von Meterspurfahrzeugen auch vs. periodische Längshöhenfehler

In Abschnitt 2.5 ist der lauftechnisch relevante Frequenzbereich dargelegt. Dabei ist die untere Frequenzgrenze durch das menschliche Empfinden bestimmt und gilt damit unabhängig von der Spurweite eines Bahnsystems. Die in Abschnitt 2.5 angegebene obere Frequenzgrenze von lauftechnisch relevanten Vorgängen basiert mit 20 Hz auf Vorgaben der Normalspur der EN 14363 [5], wie sie anteilig mindestens auch durch die BAV-Richtlinie [3] angezogen ist. Es ist zu vermuten aber bleibt zu überprüfen, ob der in Abschnitt 2.5 genannte Frequenzbereich für RAILplus-Anwendungen zutrifft.

Weiterhin vermutet das gegenständliche Projektteam P3 den in Abschnitt 4.2 formulierten Zusammenhang zwischen der in den Gleislagedaten vorstechenden Wellenlänge, der örtlichen Fahrgeschwindigkeit und einer ausgeprägten Eigenschwingform (Nicken, Tauchen) der passierenden Fahrzeuge. Um diese These zu belegen oder zu widerlegen, sollten die grundlegenden Eigenfrequenzen relevanter Fahrzeugtypen in Erfahrung gebracht und mit den örtlichen Fahrgeschwindigkeiten sowie den Wellenlängen aus Abschnitt 4.2 verglichen werden.

Diese Fragen richten sich nach Meinung des hier gegenständlichen Projektteams P3 an das Projektteam P5 «Fahrzeug» in Verbindung mit entsprechender Rückfrage bei den Fahrzeuglieferanten relevanter Bestandsfahrzeuge.

Für künftige Fahrzeuge sollte die Benennung relevanter Eigenfrequenzen als Anforderung im Lastenheft vorgesehen werden (LO 4.5.1 zu P3).

3) Klärung langwelliger Schwingungen im Richtungsfehler bei der Bogenein- und -ausfahrt

In einigen Auswerteabschnitten zur Bogenfahrt sind im Signal des Richtungsfehlers die in Abschnitt 3.2 beschriebenen erheblichen Schwingungen mit Wellenlängen von ca. $\lambda = 100$ m während der Bogenein- und -ausfahrt auszumachen. Diese Wellenlänge liegt ausserhalb der hier gegenständlichen Auswertung (siehe Abschnitt 2.5), so dass die festgestellten Schwingungen keinen Einfluss auf die vorliegende Untersuchung haben. Die Ursache dieser auffälligen Schwingungen ist gegenwärtig unklar. Sie kann neben einer tatsächlichen Abweichung von der Sollgleislage (z.B. durch Bogenatmung [20] zum Zeitpunkt der Gleismessung) potenziell auch im Auswertealgorithmus (z.B. durch bogengeometrische Einflüsse der kleinen Bogenradien ggü. Vollbahnanwendungen nach EN 13848 [4]) zu suchen sein.

Es ist zu empfehlen, die tatsächliche Ursache der festgestellten langwelligigen Schwingungen im Richtungsfehler zu klären. Ein Teilansatz dazu könnte z.B. in einem stichprobenartigen Vergleich der Richtungslage mit einem zeitgleich durchgeführten örtlichen Aufmass oder z.B. einem systematischen Hinterfragen des bogengeometrischen Einflusses enger Bögen auf den Auswertealgorithmus liegen.

Diese Frage ergeht nach Meinung des hier gegenständlichen Projektteams P3 an das Projektteam P4 «Fahrbahnsteifigkeit».

4) Anforderungen an den Fahrkomfort in Relation zur Gleislagequalität

Die vorliegende Untersuchung hat zielgemäss Gleislagefehler zum Gegenstand, die das Laufverhalten von Fahrzeugen in Bezug auf die Fahrsicherheit [5] und die Fahrwegbeanspruchung [5] provozieren (Störverhalten). Unter diesen lauftechnisch anspruchsvollen Randbedingungen kann es technisch wie ökonomisch schwierig sein, gleichzeitig einen sehr hohen Fahrkomfort zu erreichen bzw. in einem Lastenheft zu fordern. Von daher ist folgende weiterführende Untersuchung zu empfehlen: Durchführen von Mehrkörpersystem (MKS)-Simulationen auf der hier gegenständlichen Gleislage der Streckenabschnitte gemäß Abschnitt 4.2. Auswertung, welche Komfortstufe (z.B. nach EN 12299 [6]) auf der hier gegenständlichen Gleislage erreichbar ist oder um welches Mass der regellose RAILplus-Pegel aus Abschnitt 4.1 ggf. herabskaliert werden muss, um auf diesem reduzierten Störpegel dann begründet einen sehr guten Fahrkomfort z.B. nach EN 12299 [6] zu fordern.

Diese Frage richtet sich nach Meinung des hier gegenständlichen Projektteams P3 an das Projektteam P5 «Fahrzeug» in Verbindung mit einem dort ohnehin in Vorbereitung befindlichen generischen Fahrzeugmodell.

5) Übernahme der vorgeschlagenen Gleislagefehler und Szenarien in P3 LO 4.5.1

Die in Kapitel 5 vorgeschlagenen Szenarien für die lauftechnischen Nachweisrechnungen unter Verwendung der spezifischen RAILplus-Gleislagefehler sollten im Lieferobjekt LO 4.5.1 «Grundlagen zu Anforderungen an die Fahrsicherheit/Fahrverhalten und der deren Nachweismethoden – Meterspur» des Projekts P3 in geeigneter Form eingearbeitet werden.

Diese Frage ergeht an das hier gegenständliche Projektteam P3.

6) Erweiterung der Kriterien des Gleisunterhalts in Hinblick auf periodische Gleislagefehler

Die in den Abschnitten 4.2 und 4.3 identifizierten periodischen Gleislagefehler sind derzeit nicht Gegenstand von Instandhaltungskriterien des Gleisunterhalts z.B. nach RTE 22570 [9]. Periodische Gleislagefehler können heftige Fahrzeugreaktionen hervorrufen und müssen daher in laufftechnisch sicher ertragbaren Grenzen verbleiben. Weiterhin ist bekannt, dass die Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung anfänglich bestehende Gleislagefehler nennenswert weiter ausprägen und fortsetzen kann (z.B. Cyclic-Top-Effekt, CEN/TR 17039 [8]). Daher ist folgende Kombination an weiterführenden Untersuchungen und abzuleitenden Massnahmen zu empfehlen:

- a) Untersuchung, bis zu welcher Ausprägung von periodischen Gleislagefehlern oder Einzelfehlern die Fahrzeugreaktion z.B. der Bestandsfahrzeuge noch keine nennenswerte Verstärkung des zuvor bestehenden Gleislagefehlers erwarten lässt.
- b) Untersuchung, bis zu welcher Ausprägung von periodischen Gleislagefehlern oder Einzelfehlern die Fahrsicherheit z.B. der Bestandsfahrzeuge noch gegeben ist (siehe auch Abschnitt 5.2 und Pendezenz 1)).

Als Ergebnis der beiden vorstehenden Untersuchungen können Kriterien zum Gleisunterhalt abgeleitet werden, die ein rasantes Wachstum des Gleislagefehlers vermeiden sowie genügend Fahrsicherheit sicherstellen. Nötigenfalls sind als Ergebnis dieser Untersuchung die in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 dargelegten Gleislagefehler für laufftechnische Nachweisrechnungen entsprechend anzupassen.

Diese Frage richtet sich nach Meinung des hier gegenständlichen Projektteams P3 an das Projektteam P5 «Fahrzeug», wobei das Ergebnis für eine Umsetzung zum Gleisunterhalt wiederum an das Projektteam P4 zu adressieren ist.

7) Stossartige Einzelfehler und grösste Ausprägung von Einzelereignissen

Der vorliegenden Untersuchung liegen die in Kapitel 3 erläuterten Messdaten der geometrischen Gleislage von überwiegend geradem Gleis bzw. grossen Bogenradien zugrunde, die Aussagen im Wellenlängenbereich von $L = 1$ bis 70 m ermöglichen. Anhand dieser Messdaten sind in Abschnitt 4.4 lokale Ereignisse identifiziert, die sich über Längen von 50 bis 100 m erstrecken und überwiegend Zwangspunkten zugeordnet werden konnten. Zur Unterscheidung von kurzen **Einzelfehlern** werden diese lang erstreckten Beobachtungen im vorliegenden Bericht **Einzelereignisse** genannt.

- a) Es ist nicht gesichert, ob die in Abschnitt 4.4 identifizierten Einzelereignisse bereits die grösste bei RAILplus-Bahnen bestehende Ausprägung von Einzelereignissen beinhalten. Von daher besteht ein mögliches weiteres Vorgehen darin, gezielt die grössten Einzelereignisse in der Gleislage von RAILplus-Bahnen zu identifizieren.
- b) Im Unterschied zu den in Abschnitt 4.4 identifizierten Einzelereignissen mit der oben genannten Längenausbreitung bewirken kurze Einzelfehler stossartige Anregungen, wie sie beispielsweise durch eingefallene Schweissstösse etc. erfolgen können. Einzelfehler können die Eigenfrequenzen des Oberbaus anregen. Der relevante Frequenzbereich liegt dabei mit beispielsweise 100 bis 1'500 Hz (Knothe, Gleisdynamik) deutlich oberhalb des laufftechnisch relevanten Bereichs gemäss Abschnitt 2.5, der im vorliegenden Bericht gegenständlich ist. Entsprechend sind die hier zugrundeliegenden Messdaten nicht geeignet, um die Ausprägung von Einzelfehlern zu untersuchen. Von daher besteht ein mögliches weiteres Vorgehen darin, eine geeignete Messmethode zu ermitteln und damit relevante Einzelfehler von RAILplus-Bahnen zu identifizieren.

Diese Fragestellung richtet sich nach Meinung des hier gegenständlichen Projektteams P3 an das Projektteam P4 «Fahrbahnsteifigkeit».

7 Verzeichnisse

7.1 Revisionen

Rev.	Datum	Bearbeiter	Beschrieb der Anpassung
V2.0	14.08.2025	J. Keudel	Ergänzung der Auswerteabschnitte zur Bogenfahrt in Tabelle 4, entsprechende Ergänzungen im gesamten Dokument (grafische Darstellungen sowie Auswertungen), Korrekturen wie im Änderungsverzeichnis dargelegt

7.2 Referenzen

- [1] Johannes Keudel, RAILplus / PROSE; RAILplusSF-00099_Nebendokument für Ausschreibungen: Geometrische; Gleislageabweichungen für laufftechnische Berechnungen, Technischer Bericht
- [2] «Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV)», Stand am 01.11.2020 (gültig per Abruf 13.09.2023), 742.141.11
- [3] Richtlinie «Nachweis sicheres Fahrverhalten Meterspur-, Spezialspur- und Zahnradbahnen (RL FV-MSZ)» Bundesamt für Verkehr BAV, Version 1.3 vom 01.01.2021
- [4] EN 13848-1 «Bahnanwendungen – Oberbau – Gleislagequalität – Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie», EN 13848-1:2019, März 2019, ICS 93.100
- [5] EN 14363 «Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche», EN 14363:2016+A2:2022, August 2022, ICS 45.060.01
- [6] EN 12299 „Bahnanwendungen – Fahrkomfort für Fahrgäste – Messung und Auswertung“ EN 12299:2009, April 2009, ICS 45.060.20
- [7] EN 17343 «Bahnanwendungen – Allgemeine Begriffe» EN 17343:2021, Dezember 2020, ICS 01.040.45; 45.060.01
- [8] CEN/TR 17039:2017
„Railway applications – Technical Report about the revision of EN 14363“
Februar 2017, ICS 45.060.01
- [9] R RTE 22570 «Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen - Meterspur»
VöV, Ausgabe 31.07.2012
- [10] ORE B 176 «Drehgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen»
Frage B 176, Bericht Nr. 1, Band 2
- [11] Angern, Fabian, RHOMBERG SERSA:
«Dokumentation Messwagen Meterspur - Aufbau MWMS und seine Messparameter MWMS»
Bericht, 12.05.2023
- [12] Frederich, Fritz: «Die Gleislage – aus fahrzeugtechnischer Sicht»
ZEV-Glas. Ann. 108 (1984) Nr. 12 Dezember
- [13] Press, W.H., Teukolsky, S.A., et. al.
«Numerical Recipes», 3. Auflage, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-88407-5
- [14] Keudel, Johannes, PROSE
«Systemführerschaft Meterspur, Projekt P3, Frage repräsentativer Gleislagefehler»,
Foliensatz, Dokument Nr. PO 000 003 539 Version 5.0 per 17.07.2023
entsprechend 7. Sitzung vom 13.07.2023 (betreffend Streckenabschnitte hoher Fahrgeschwindigkeiten)
- [15] Keudel, Johannes, PROSE
«Systemführerschaft Meterspur, Projekt P3, Frage repräsentativer Gleislagefehler –
Auswertung Bogenabschnitte im Vergleich zu geradem Gleis»,
Foliensatz, Dokument Nr. PO 000 005 097 Version 2.0 per 21.06.2024
entsprechend 14. Sitzung vom 31.05.2024

- [16] RAILplus, Trassierungsdaten aus Datei «AlleBahnen-LageUeberhoehungHoehe.xlsx» mit Stand 15.12.2023 durch C. Zimmermann
- [17] Knothe, K. und S. Stichel
„Schienenfahrzeugdynamik“,
Springer-Verlag, 2003, ISBN 3-540-43429-1
- [18] Hanneforth, W. und W. Fischer
„Laufwerke“, transpress Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1986, ISBN 3-344-00037-3
- [19] RAILplus Wissensmanagement «Lehrbuch Grundlagenwissen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur», Abschnitt 7.6 «Fahrzeugsimulation» Oldrich Polach Stand per 08.02.2023
- [20] Braess, Hermann Patrick «Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmenden Bögen»,
Dissertationschrift Nr. 25112 ETH Zürich, Schriftenreihe 182, 2018

7.3 Definitionen und Abkürzungen

Symbol	Erläuterung
PSD	Power Spectral Density (Spektrale Leistungsdichte)
MKS	Mehrkörpersystem

7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung: getrennte Vorgabe von Nenntrassierung und örtlicher Gleislageabweichung im lauftechnischen Simulationsmodell 12

Abbildung 2: Gleisachsenbezogene Beschreibung von Gleislagefehlern 45

Abbildung 3: Schienenbezogene Beschreibung von Gleislagefehlern 45

Abbildung 4: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 2 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 46

Abbildung 5: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 7 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 47

Abbildung 6: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 8 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 48

Abbildung 7: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 9 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 49

Abbildung 8: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 10 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 50

Abbildung 9: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 51

Abbildung 10: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 13 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 52

Abbildung 11: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 14 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 53

Abbildung 12: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 15 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 54

Abbildung 13: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 21 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 55

Abbildung 14: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 23 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 56

Abbildung 15: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 57

Abbildung 16: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 27 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten 58

Abbildung 17: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 28 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten.....	59
Abbildung 18: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 29 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten.....	60
Abbildung 19: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 30 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten.....	61
Abbildung 20: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 31 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten.....	62
Abbildung 21: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 32 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten.....	63
Abbildung 22: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B02 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	64
Abbildung 23: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B05 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	65
Abbildung 24: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B09 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	66
Abbildung 25: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B11 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	67
Abbildung 26: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B13 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	68
Abbildung 27: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B19 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	69
Abbildung 28: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B23 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	70
Abbildung 29: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B24 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	71
Abbildung 30: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B25 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	72
Abbildung 31: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B28 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16].....	73

Abbildung 32: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B29 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	74
Abbildung 33: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B30 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	75
Abbildung 34: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B31 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	76
Abbildung 35: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B33 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	77
Abbildung 36: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B35 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	78
Abbildung 37: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B36 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	79
Abbildung 38: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B37 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	80
Abbildung 39: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B38 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	81
Abbildung 40: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B43 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	82
Abbildung 41: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B44 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	83
Abbildung 42: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B46 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]	84
Abbildung 43: Darstellung der «ORE high» und «ORE low» [10] sowie Spurweite nach Frederich [12] und (in gelb) RAILplus-Störpegel entsprechend Abschnitten 4.1 und 8.4	85
Abbildung 44: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3	86
Abbildung 45: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3	87
Abbildung 46: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3	88
Abbildung 47: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3	89

Abbildung 48: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3.....	90
Abbildung 49: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3.....	91
Abbildung 50: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3.....	92
Abbildung 51: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3.....	93
Abbildung 52: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3.....	94
Abbildung 53: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3.....	95
Abbildung 54: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3.....	96
Abbildung 55: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3.....	97
Abbildung 56: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3.....	98
Abbildung 57: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3.....	99
Abbildung 58: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3.....	100
Abbildung 59: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3.....	101
Abbildung 60: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3.....	102
Abbildung 61: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3.....	103
Abbildung 62: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3.....	104
Abbildung 63: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3.....	105
Abbildung 64: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3.....	106
Abbildung 65: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3.....	107
Abbildung 66: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3.....	108
Abbildung 67: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3.....	109
Abbildung 68: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4.....	110
Abbildung 69: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4.....	111
Abbildung 70: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4.....	112
Abbildung 71: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4.....	113
Abbildung 72: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4.....	114
Abbildung 73: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4.....	115
Abbildung 74: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4.....	116

Abbildung 75: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4	117
Abbildung 76: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4.....	118
Abbildung 77: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4.....	119
Abbildung 78: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4.....	120
Abbildung 79: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4	121
Abbildung 80: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4	122
Abbildung 81: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4	123
Abbildung 82: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4	124
Abbildung 83: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4	125
Abbildung 84: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4	126
Abbildung 85: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4	127
Abbildung 86: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4	128
Abbildung 87: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4	129
Abbildung 88: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4	130
Abbildung 89: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4	131
Abbildung 90: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4	132
Abbildung 91: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4	133
Abbildung 92: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, betreffend km 11,0 bis km 11,5	134
Abbildung 93: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 14 aus Tabelle 3, betreffend km 39,6 bis km 40,1	135
Abbildung 94: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3, betreffend km 98,8 bis km 99,7	136
Abbildung 95: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 31 aus Tabelle 3, betreffend km 11,3 bis km 11,8	137
Abbildung 96: Quer- und Vertikalbeschleunigung sowie Nickrate von Samedan bis Pontresina erfasst via Smartphone im Wagen Nr. 2433 als Fahrgast im Regelbetrieb am 13.05.2023 (zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3 sowie Abbildung 94)	138
Abbildung 97: Quer- und Vertikalbeschleunigung sowie Nickrate von Pontresina bis Samedan erfasst via Smartphone in einem Triebzug (vsl. Allegra) als Fahrgast im Regelbetrieb am 13.05.2023 (zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3 sowie Abbildung 94)	139
Abbildung 98: Ausschnitt des Richtungsfehlers zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, betreffend km 10,9 bis km 11,2 (synchron zum Längshöhenfehler in Abbildung 92).....	140
Abbildung 99: Ausschnitt des Spurweitenfehlers zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, betreffend km 10,9 bis km 11,2 (synchron zu Ausschnitten in Abbildung 92 und Abbildung 98).....	141
Abbildung 100: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 15 aus Tabelle 3, betreffend km 42,8 bis km 43,1	142

Abbildung 101: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 21 aus Tabelle 3, betreffend km 5,7 bis km 5,9	143
Abbildung 102: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 23 aus Tabelle 3, betreffend km 13,8 bis km 14,2	144
Abbildung 103: Wegabhängige Darstellung regelloser Gleislagefehler mit Störpegel «RAILplus» für $V > 80 \text{ km/h}$ entsprechend Spektren aus Abbildung 44, Abbildung 50, Abbildung 56, Abbildung 62 obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)	145
Abbildung 104: Wegabhängige Darstellung regelloser Gleislagefehler mit Störpegel «RAILplus» für $V \leq 80 \text{ km/h}$ entsprechend Spektren aus Abbildung 68, Abbildung 74, Abbildung 80, Abbildung 86 obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)	146
Abbildung 105: Wegabhängige Darstellung RAILplus-Gleislagefehler mit periodischen Längshöhenfehlern, zusammengesetzt aus den Messabschnitten gemäss Abbildung 92 und Abbildung 93, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)	147
Abbildung 106: Wegabhängige Darstellung RAILplus-Gleislagefehler mit Einzelereignissen, zusammengesetzt aus den Messabschnitten gemäss Abbildung 100, Abbildung 101 und Abbildung 102, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)	148

7.5 Tabellen

Tabelle 1: Zu Gleichung 1 zu verwendende Werte je gleisbezogenem Fehlerkanal	5
Tabelle 2: Interessierender Frequenzbereich, massgeblicher Geschwindigkeitsbereich und resultierende Wellenlängen respektive Wegkreisfrequenzen	17
Tabelle 3: Übersicht verfügbarer Messabschnitte von Gleislagedaten der RHOMBERG / SERSA [11], ausgewählt nach den Kriterien «ruppiger» Gleislage und höherer Fahrgeschwindigkeit , nachfolgend referenziert über die blau angedruckte Nummer in der Spalte «Nr.», (fehlende Nr. beziehen sich auf ausgeschlossene Abschnitte einer Vorauswahl)	19
Tabelle 4: Übersicht verfügbarer Messabschnitte von Gleislagedaten der RHOMBERG / SERSA [11], ausgewählt nach den Kriterien «ruppiger» Gleislage in Bögen mit Fahrgeschwindigkeit ≥ 60 km/h , nachfolgend referenziert über die ID in Spalte 2, (fehlende IDs beziehen sich auf ausgeschlossene Abschnitte einer Vorauswahl).....	20

8 Anhang

8.1 Deklaration gleis- und schienenbezogene Beschreibung von Gleislagefehlern

Die folgenden Abbildungen verstehen sich im Zusammenhang mit den Erläuterungen in Abschnitt 2.3.

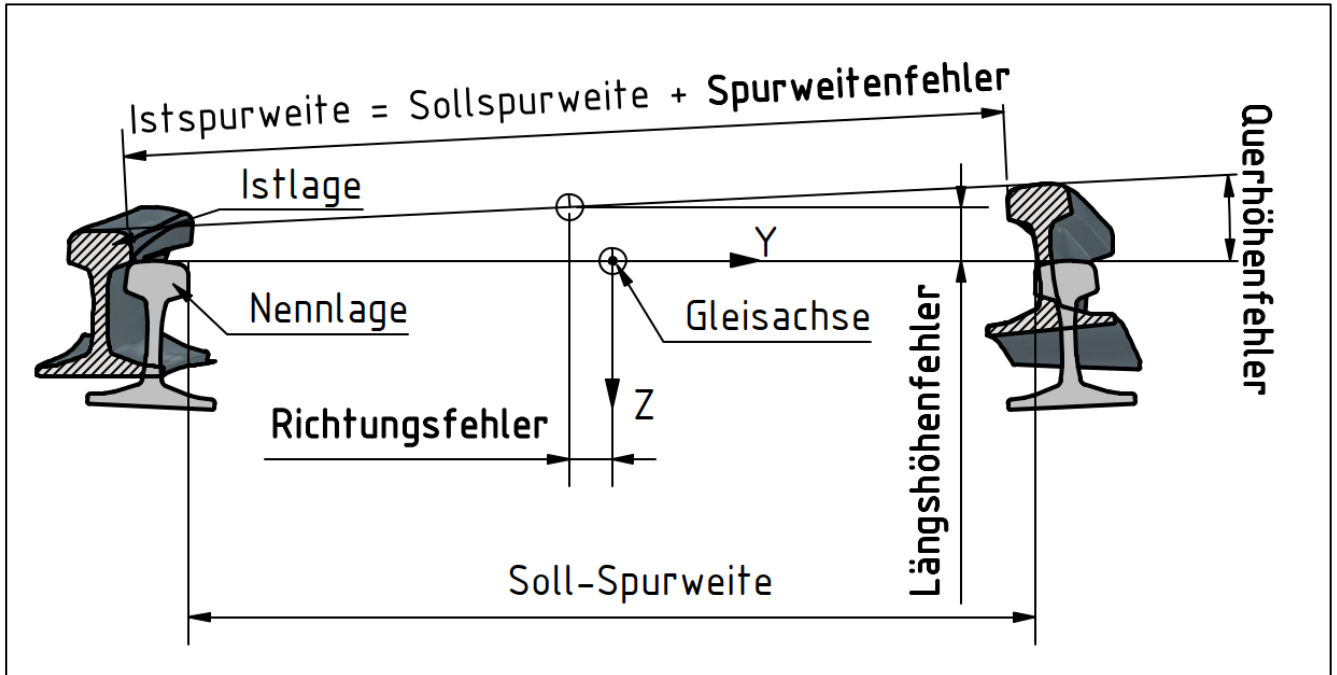


Abbildung 2: Gleisachsenbezogene Beschreibung von Gleislagefehlern

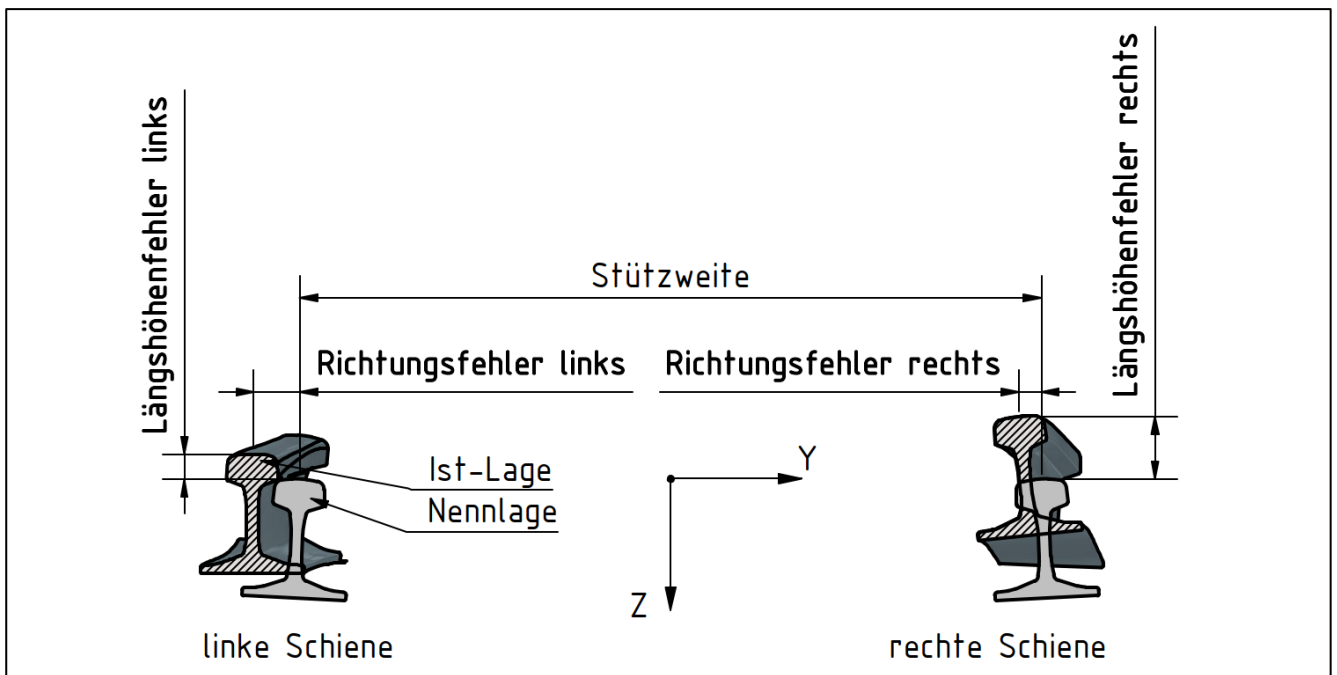


Abbildung 3: Schienenbezogene Beschreibung von Gleislagefehlern

8.2 Wegabhängige Darstellungen verfügbarer Messdaten

8.2.1 Wegabhängige Darstellungen zu Gleisabschnitten aus Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit)

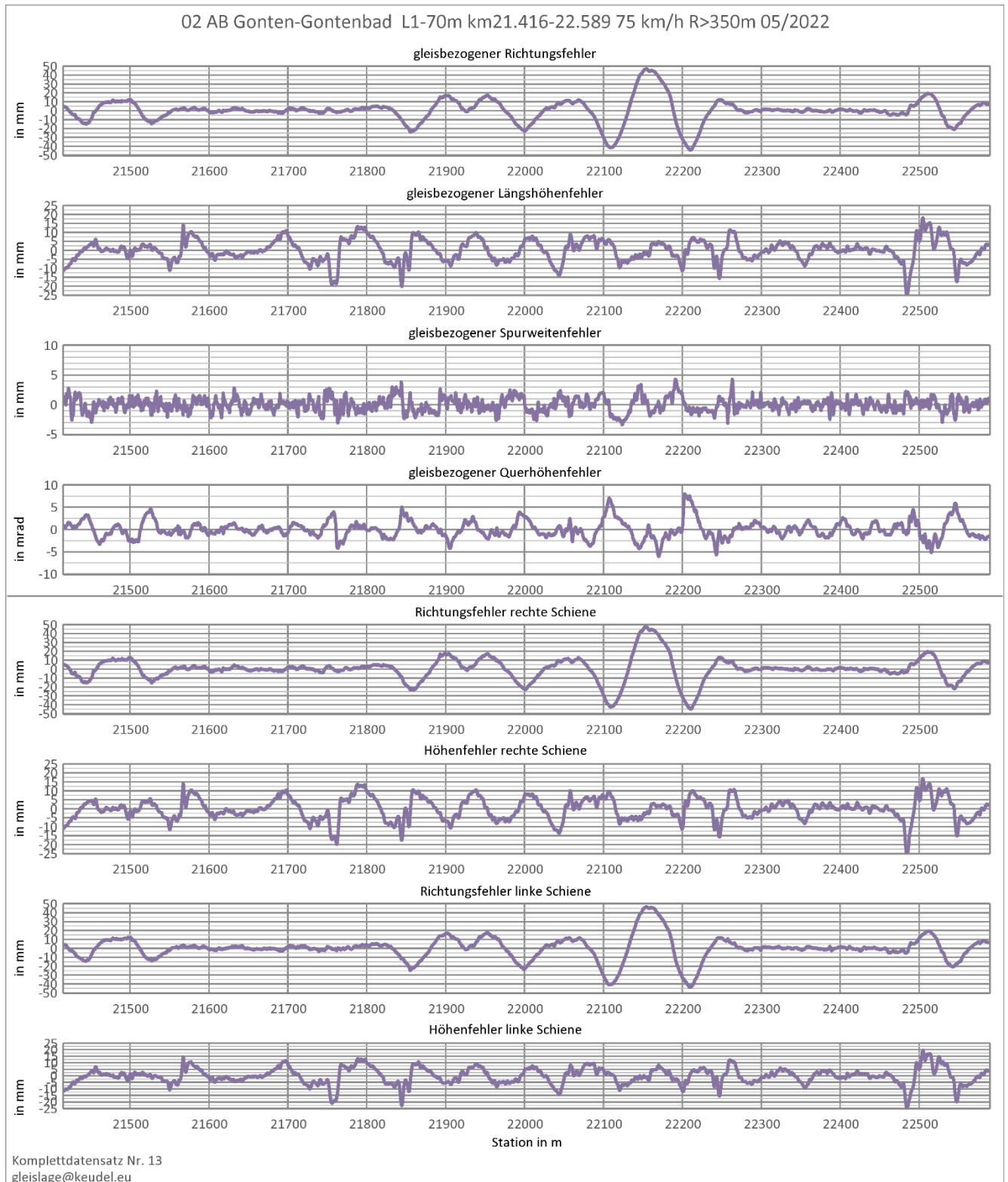


Abbildung 4: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 2 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

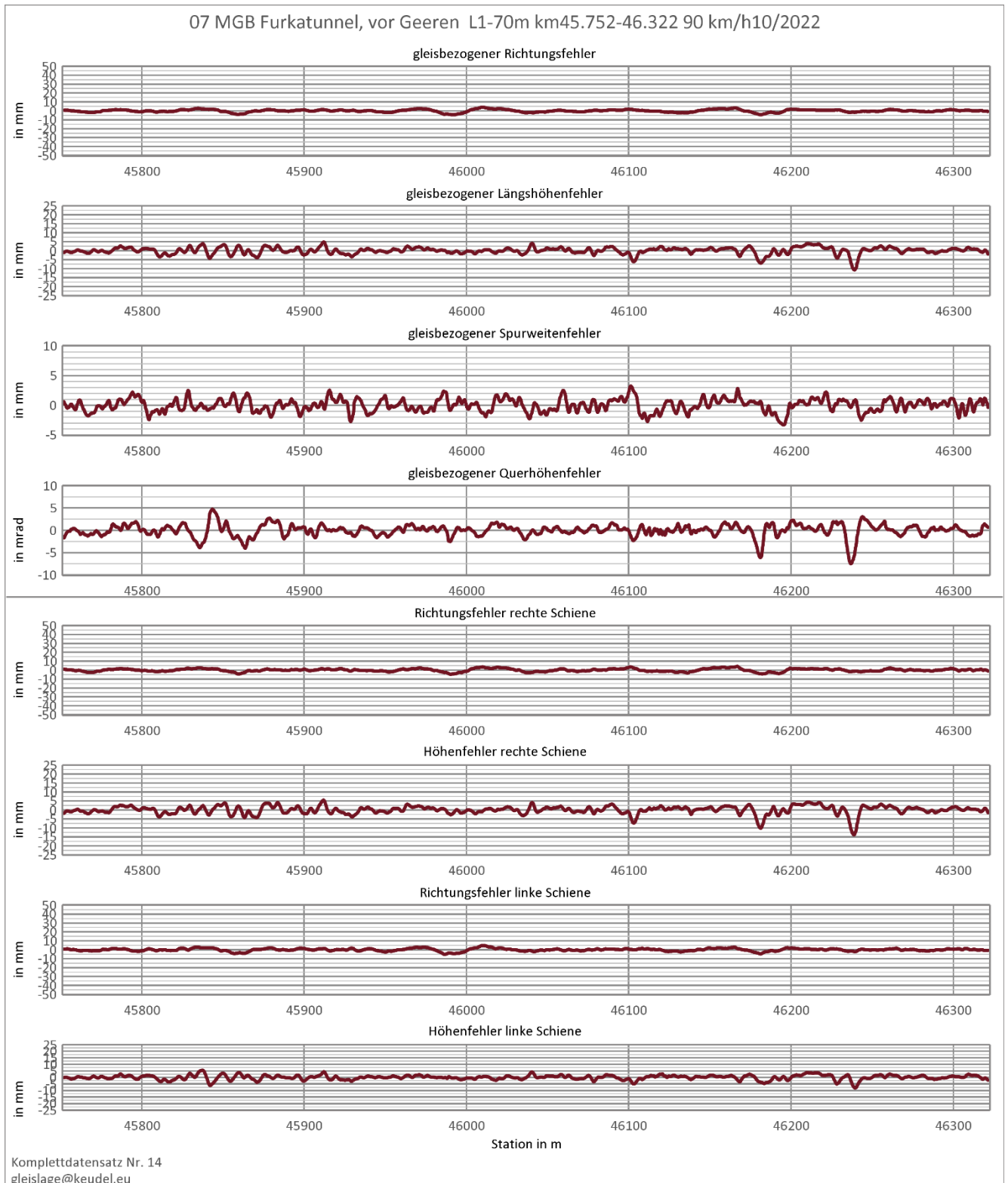


Abbildung 5: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 7 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

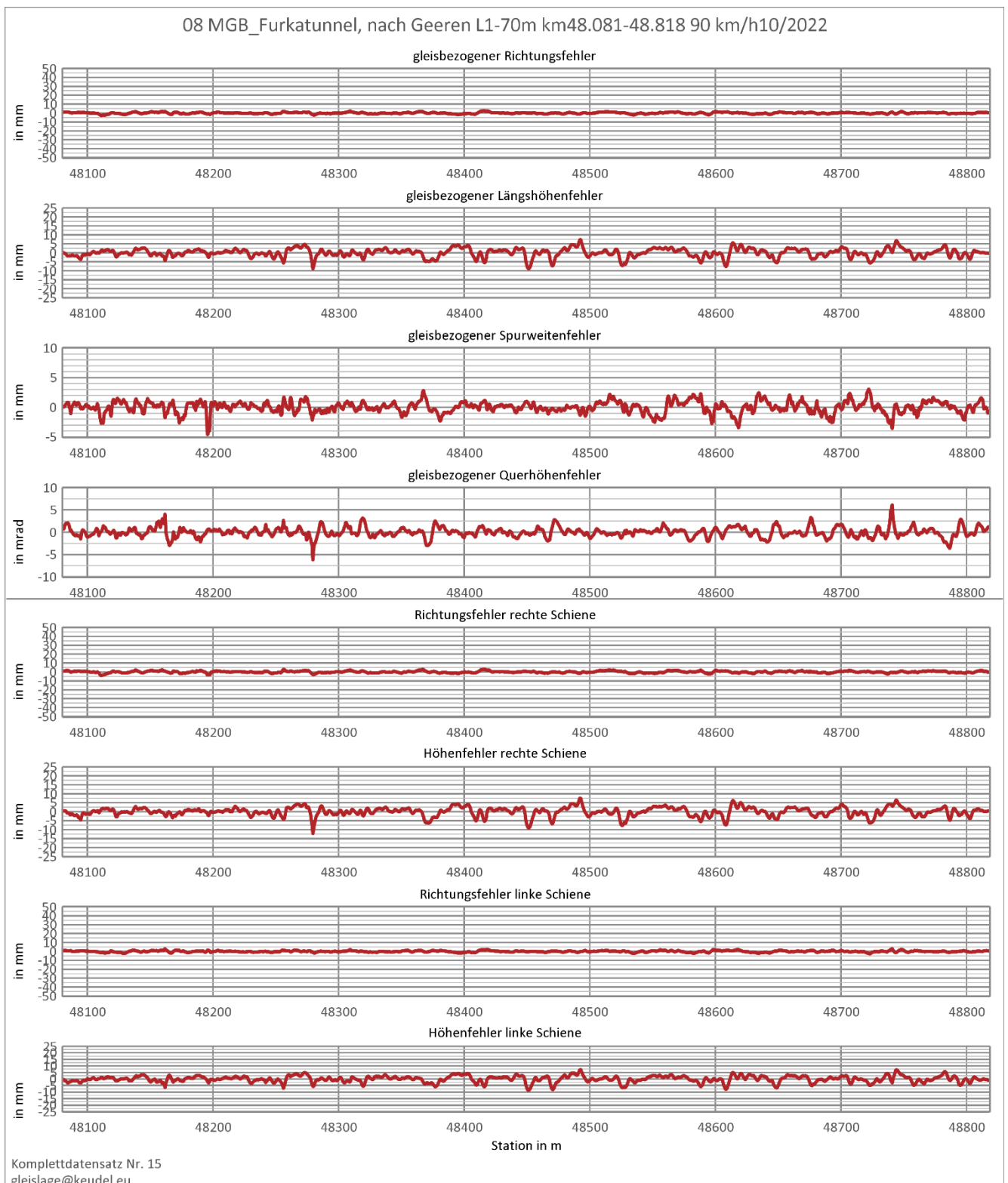


Abbildung 6: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 8 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

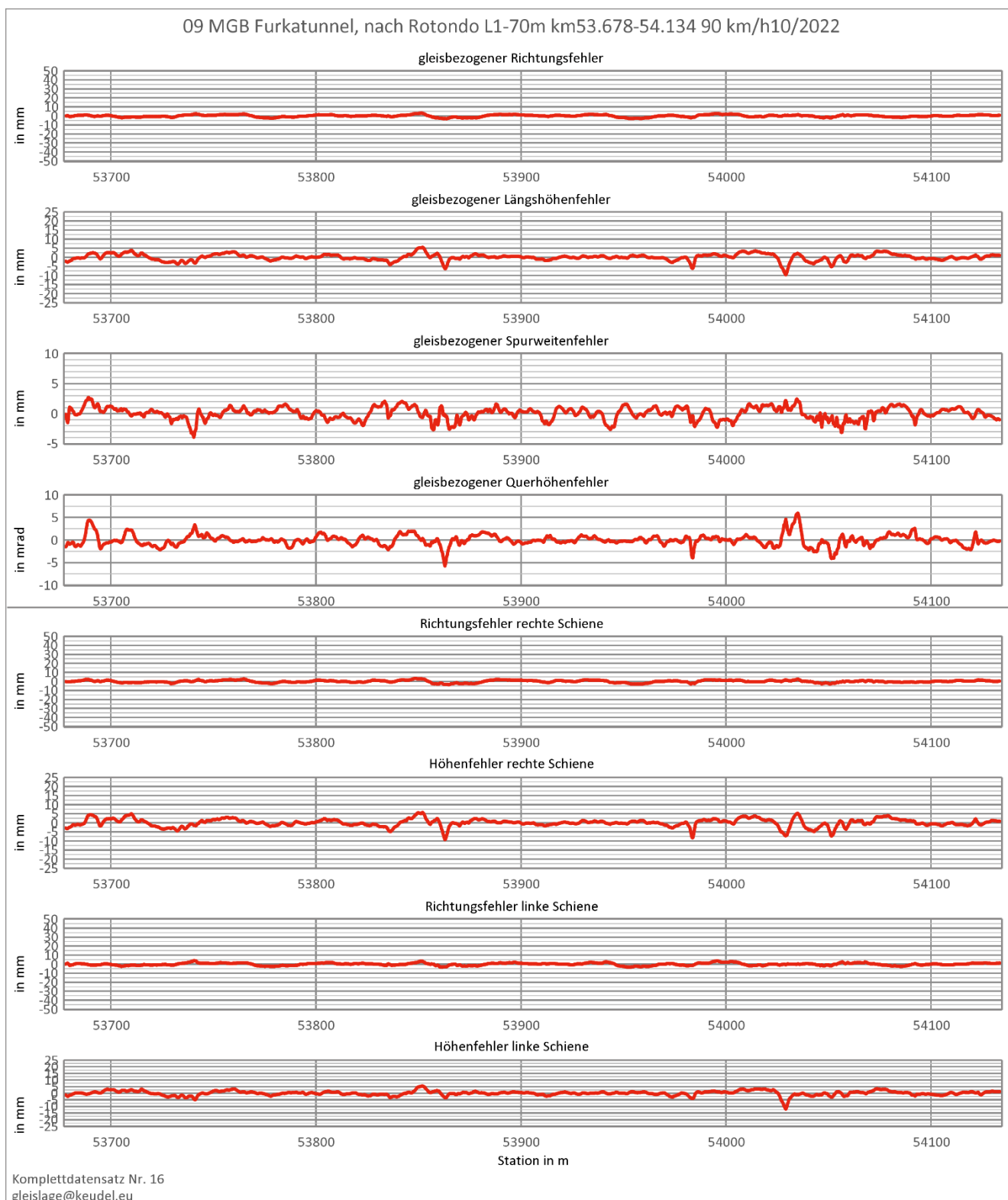


Abbildung 7: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 9 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

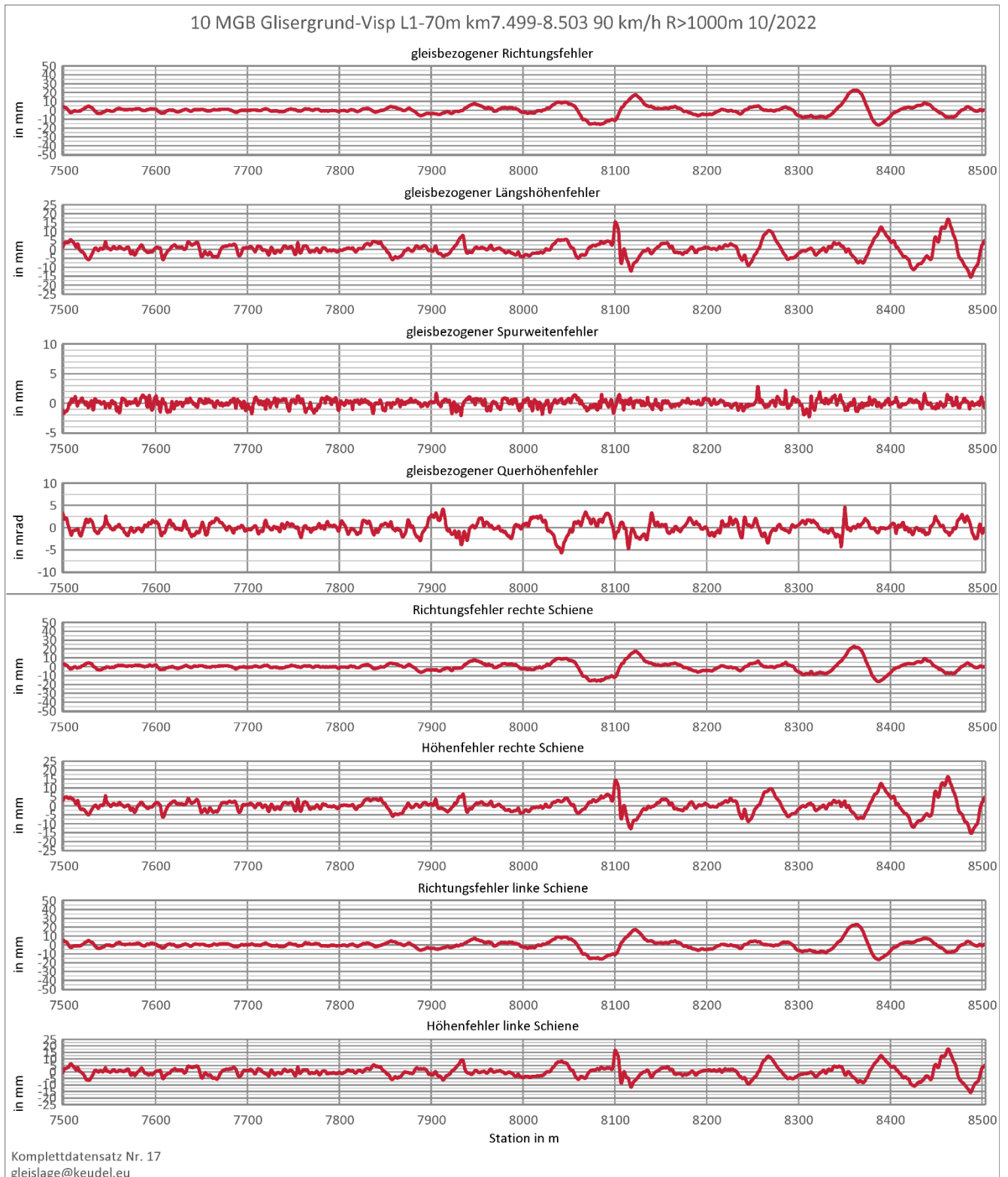


Abbildung 8: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 10 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

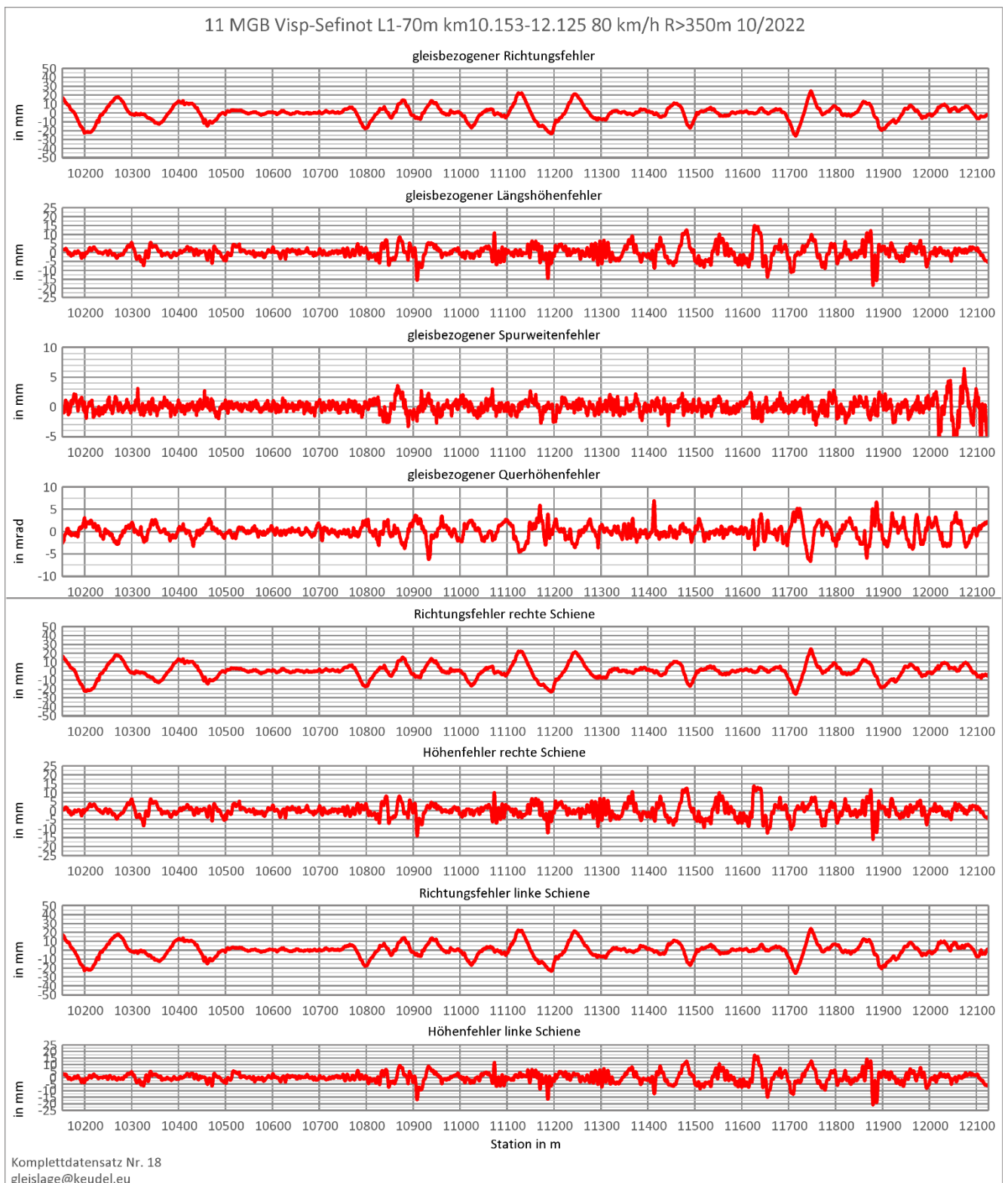


Abbildung 9: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

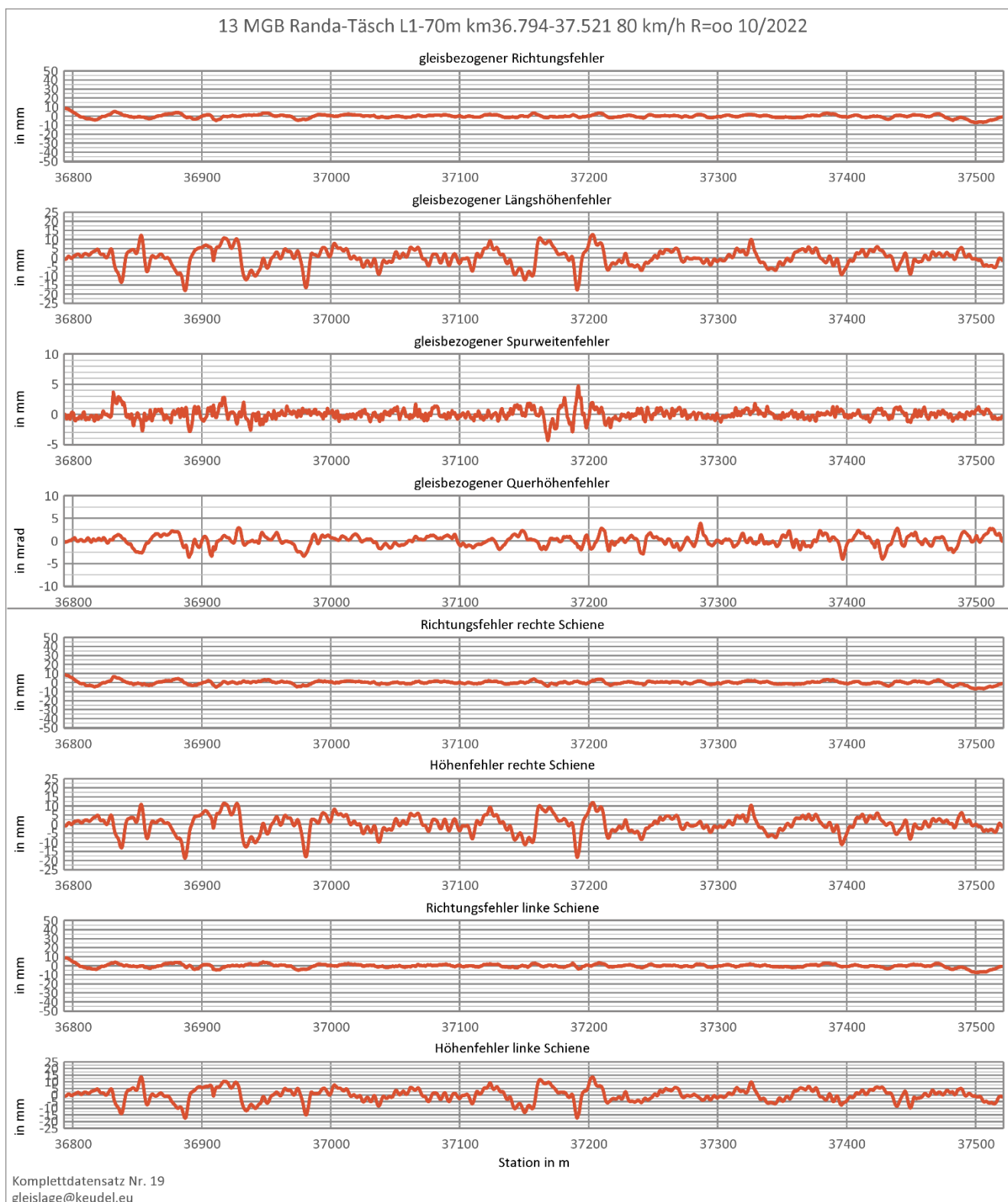


Abbildung 10: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 13 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

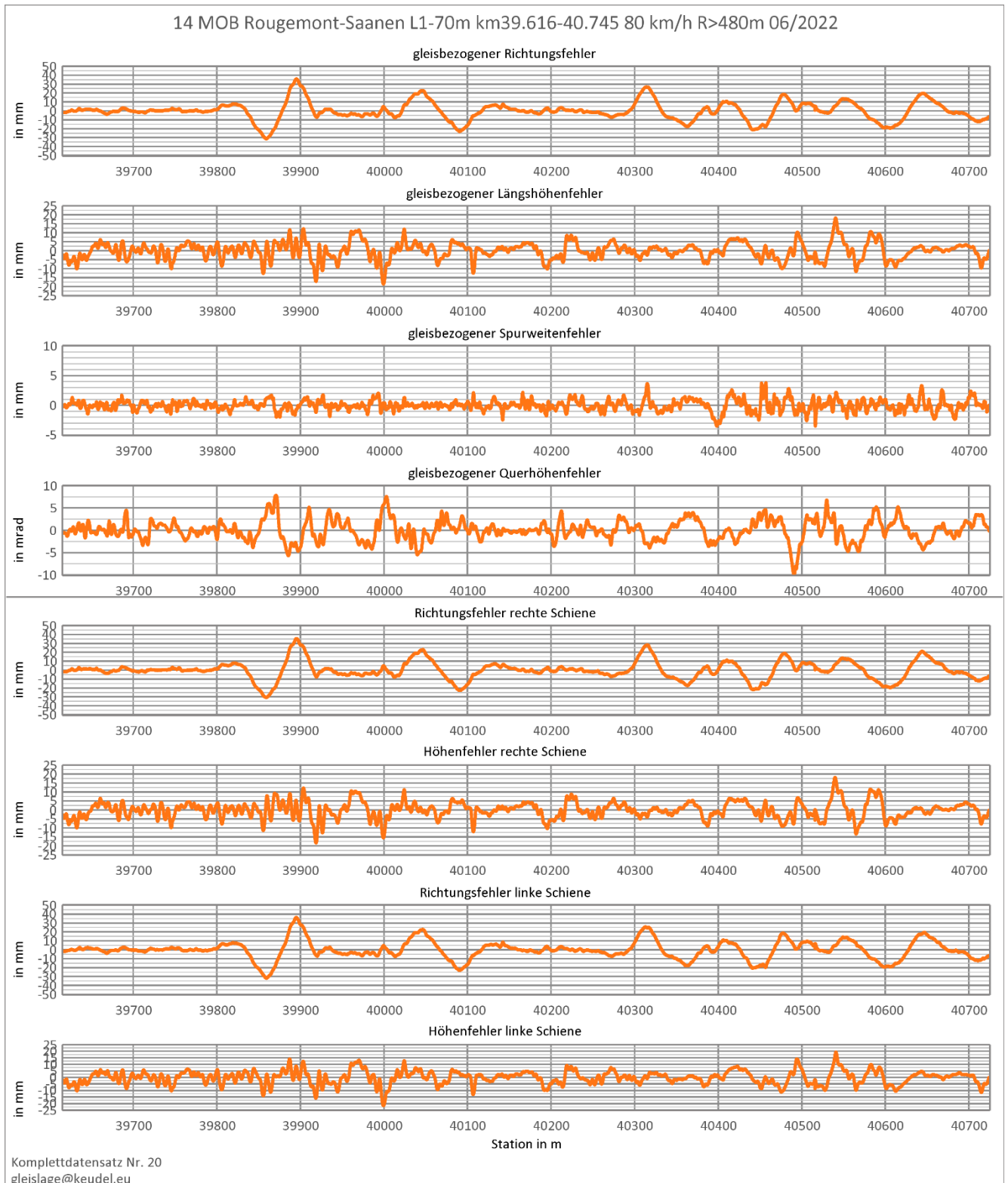


Abbildung 11: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 14 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

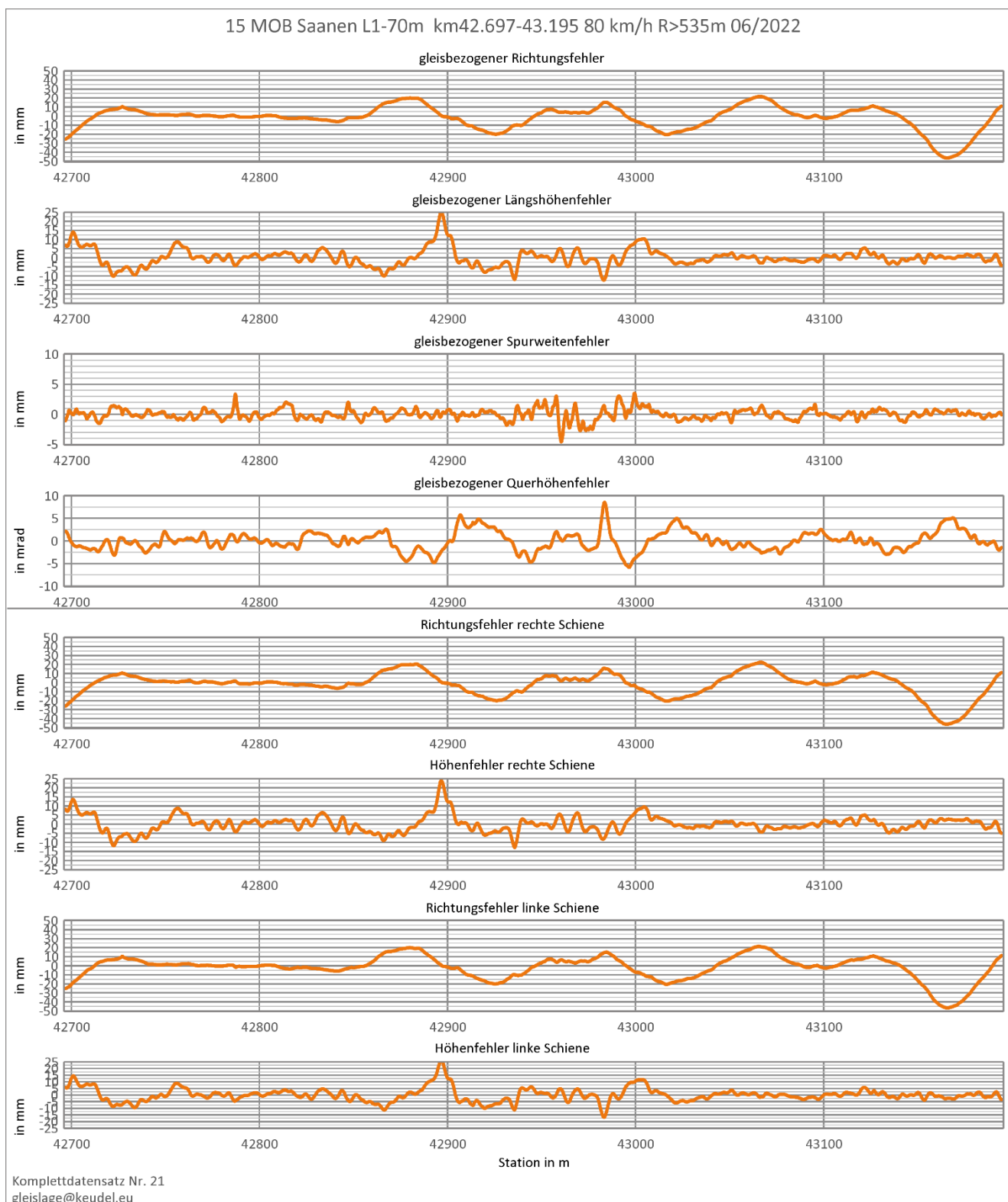


Abbildung 12: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 15 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

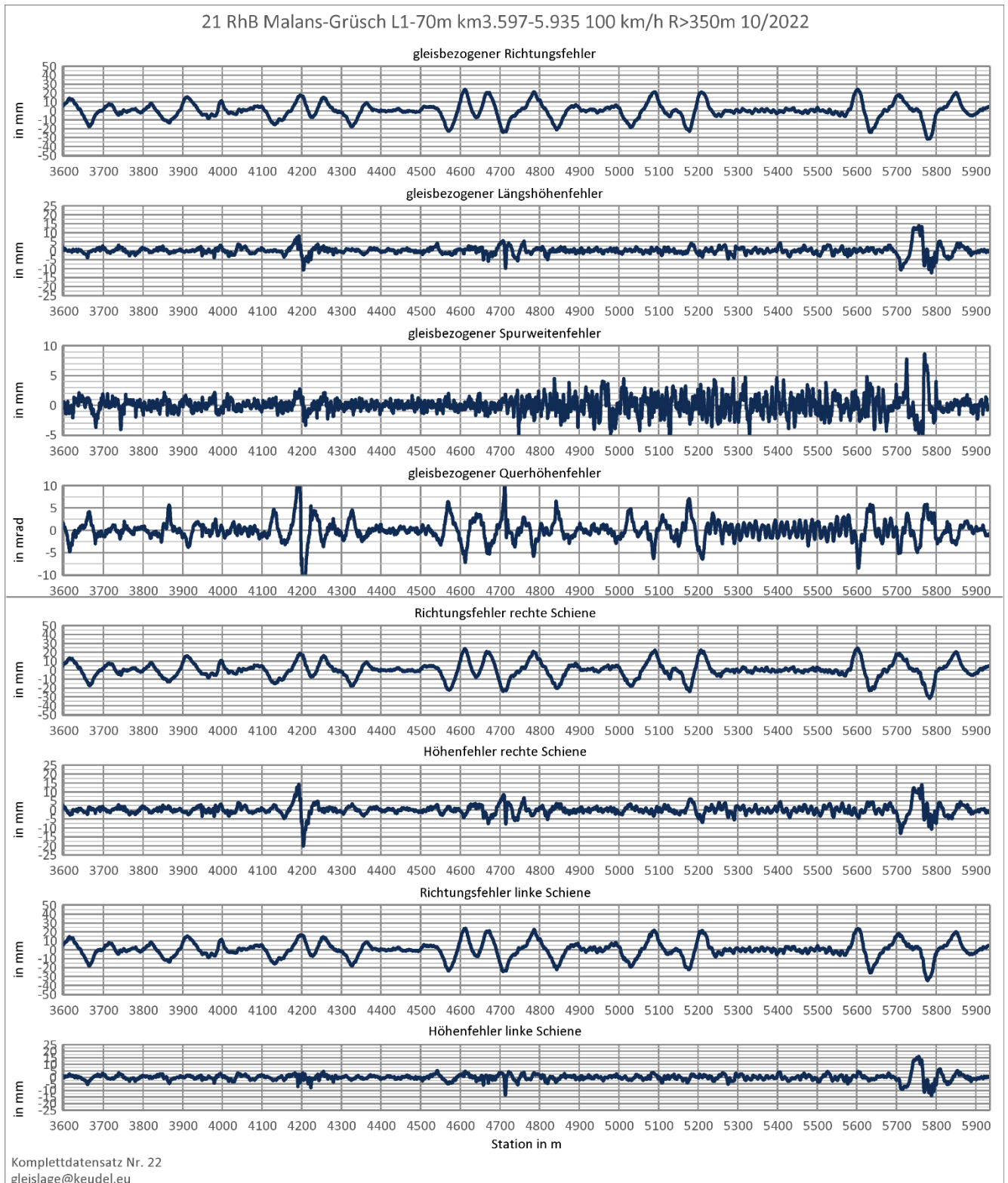


Abbildung 13: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 21 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

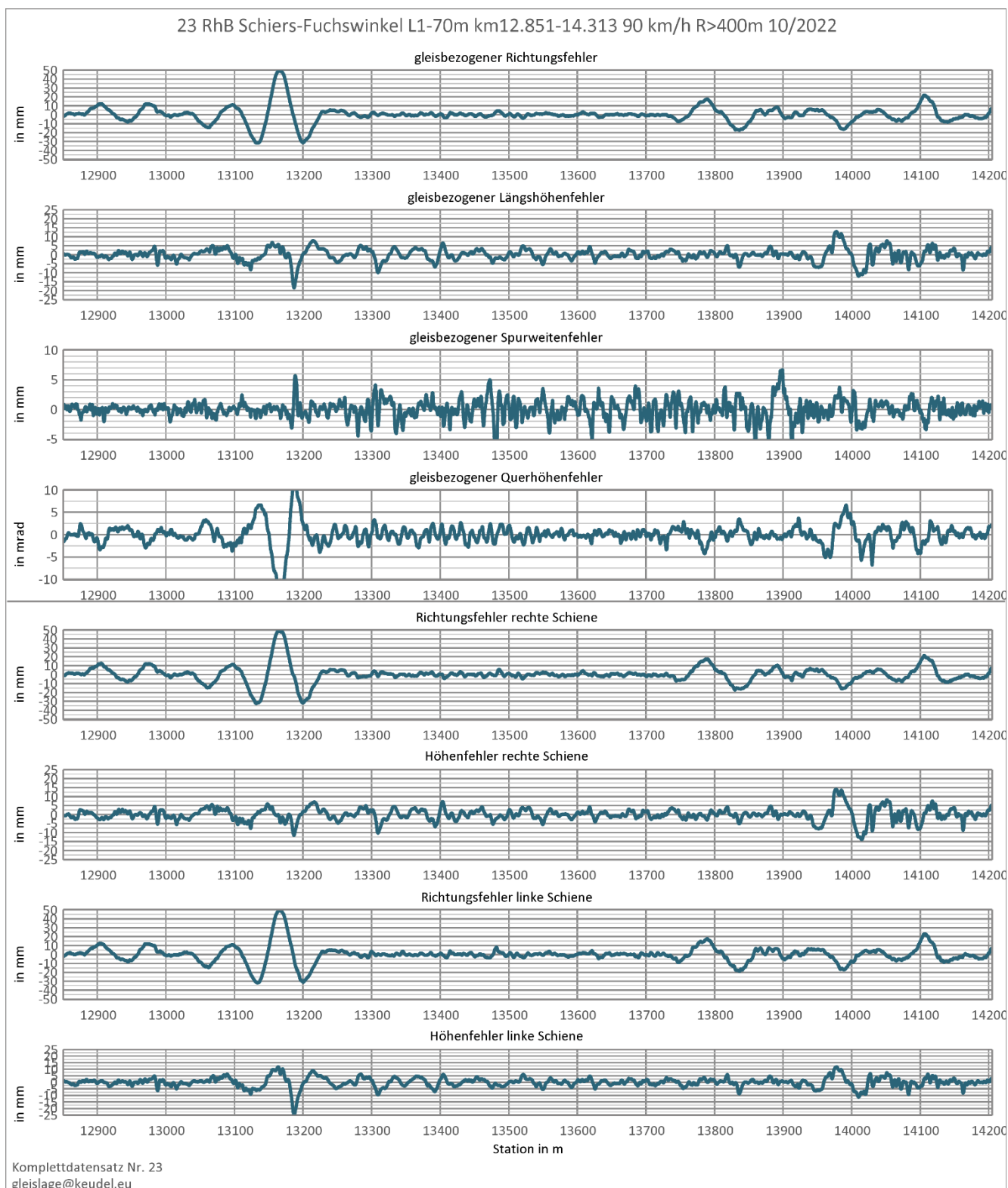


Abbildung 14: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 23 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

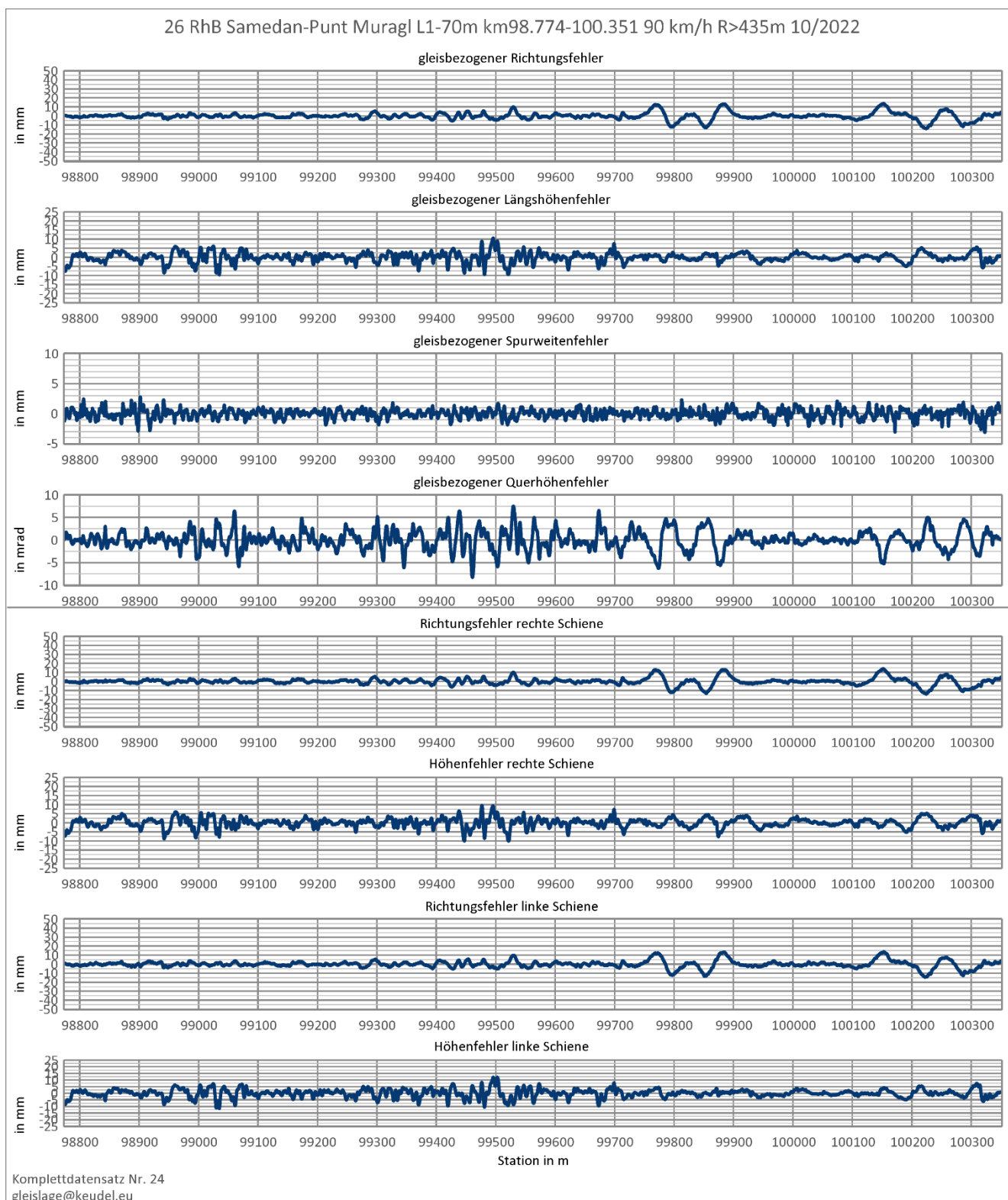


Abbildung 15: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

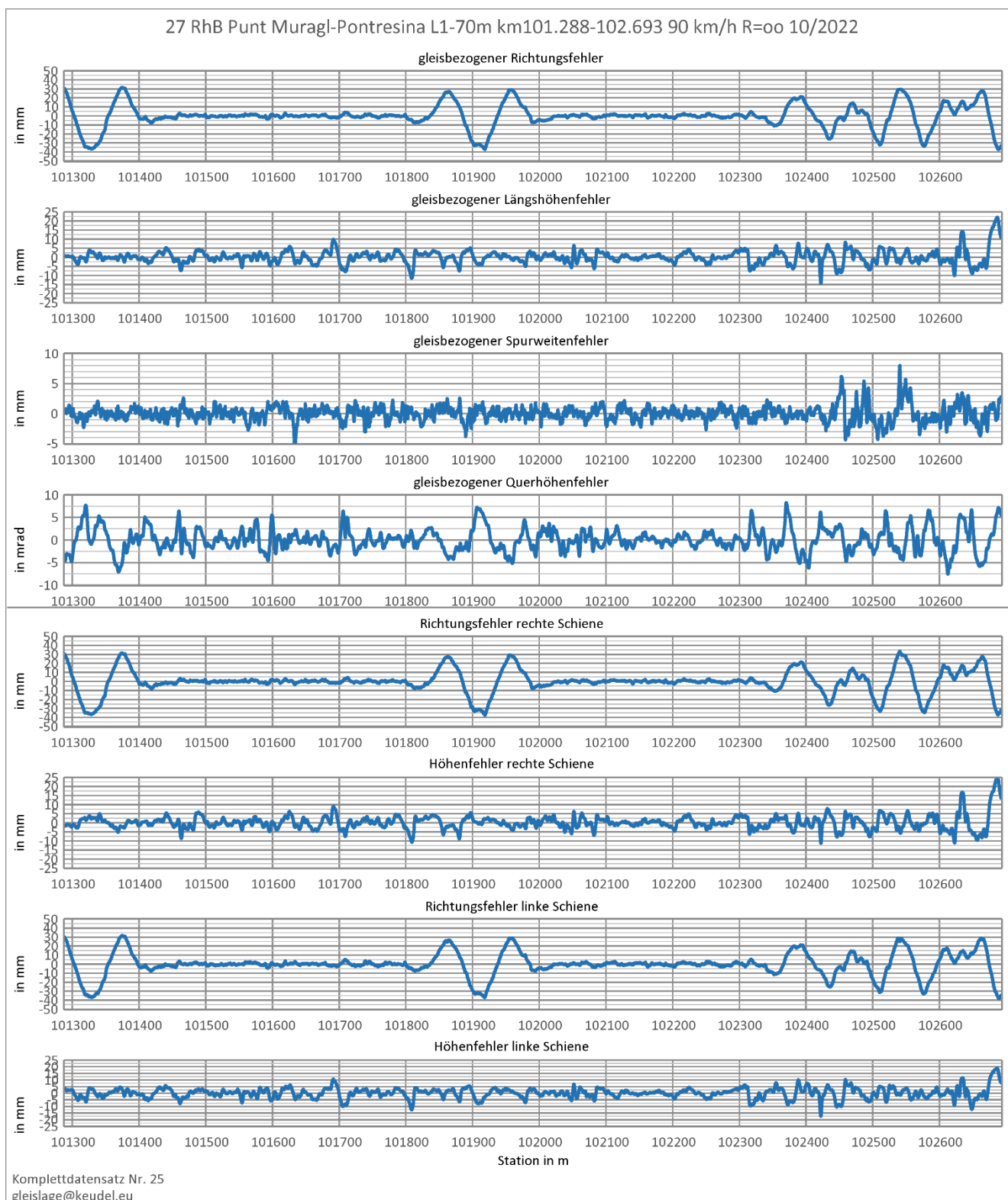


Abbildung 16: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 27 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

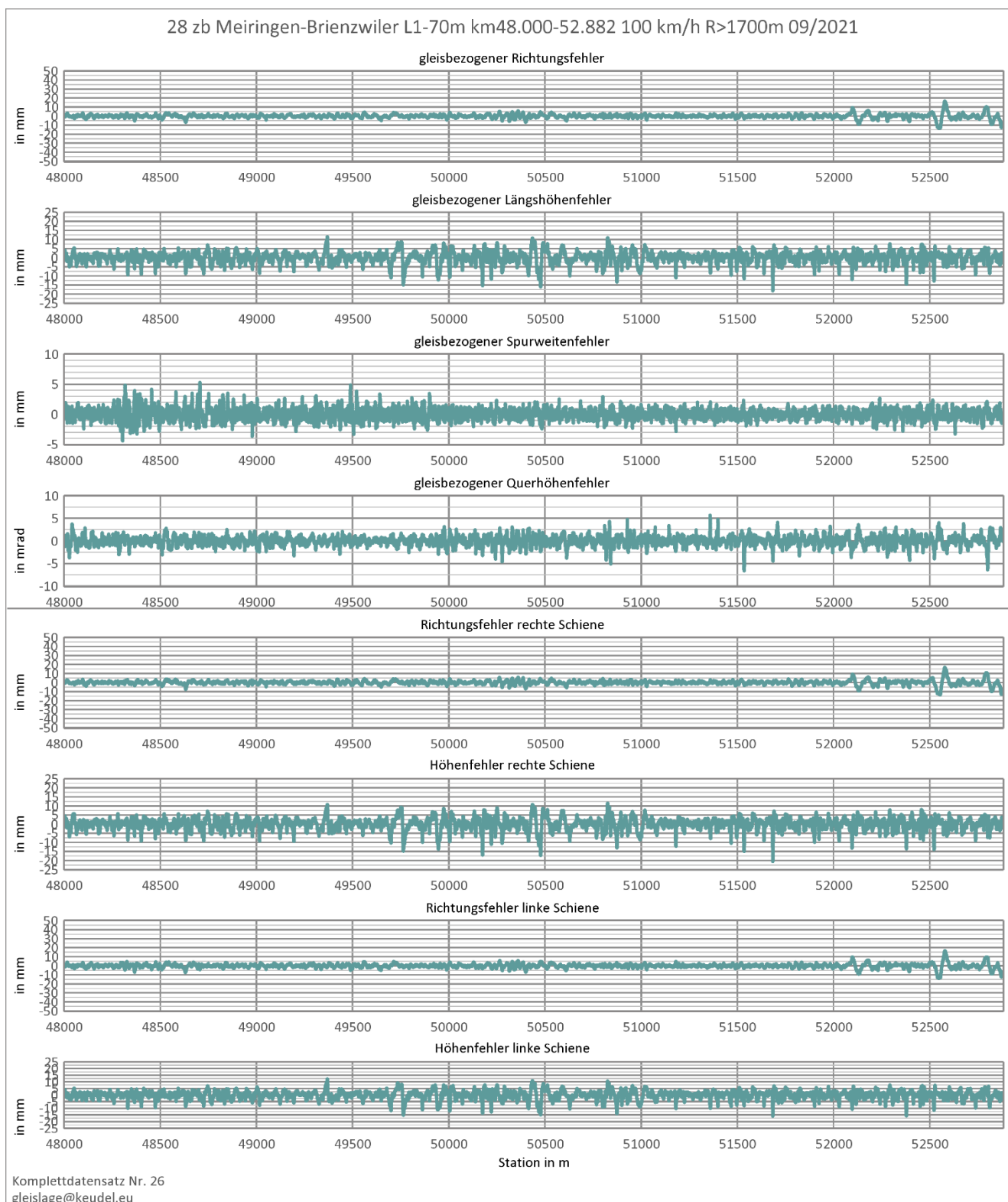


Abbildung 17: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 28 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

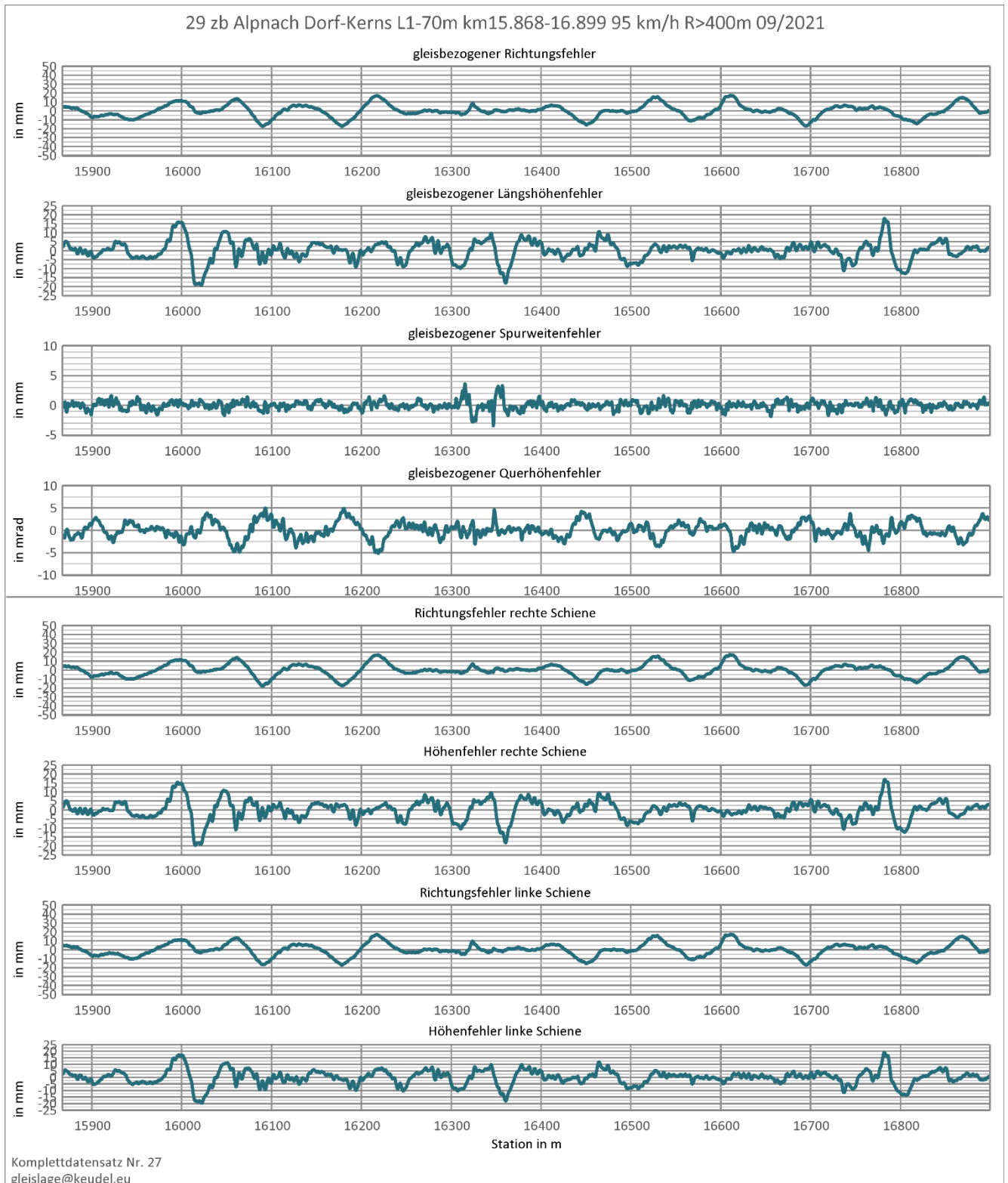


Abbildung 18: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 29 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

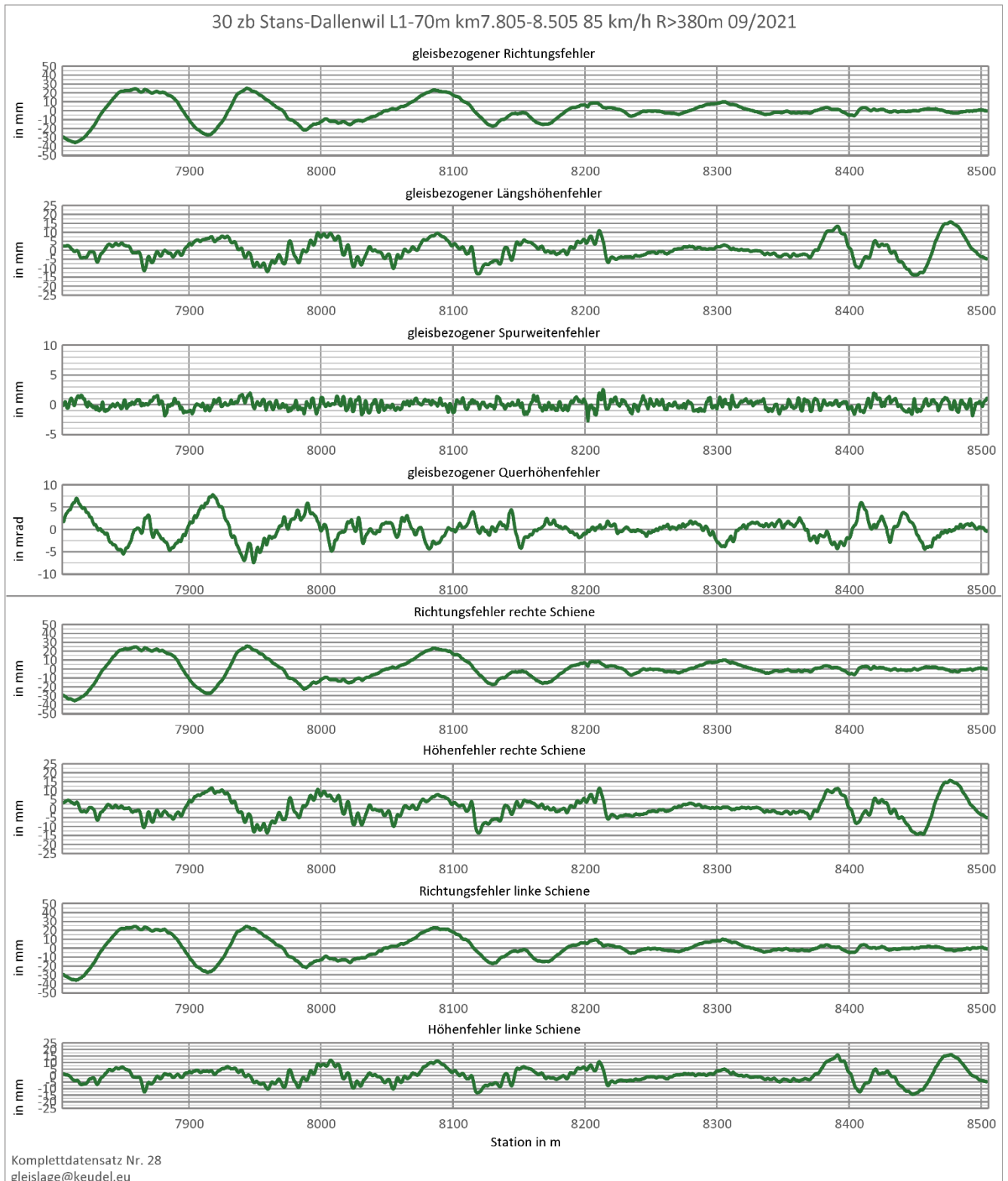


Abbildung 19: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 30 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

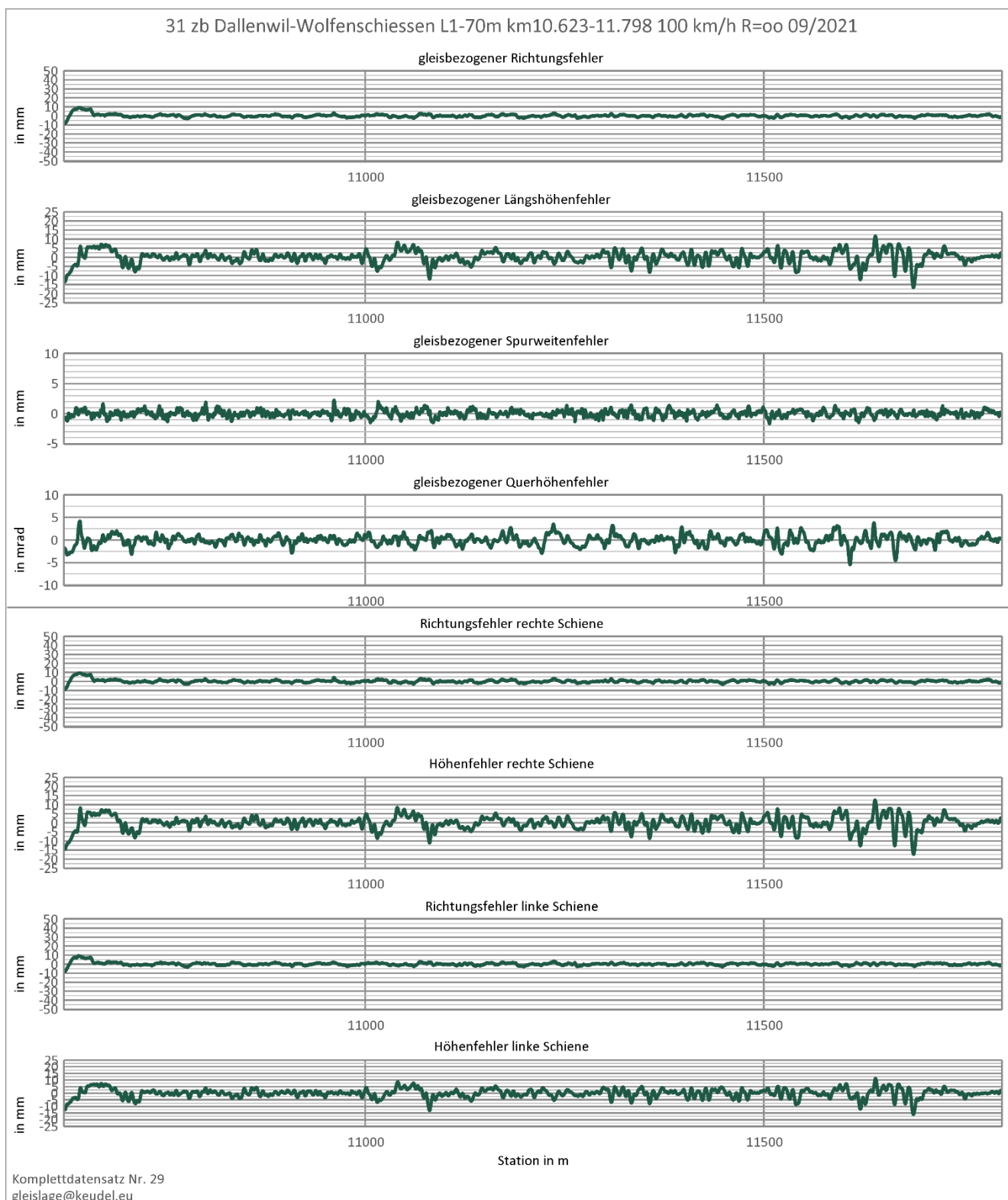


Abbildung 20: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 31 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

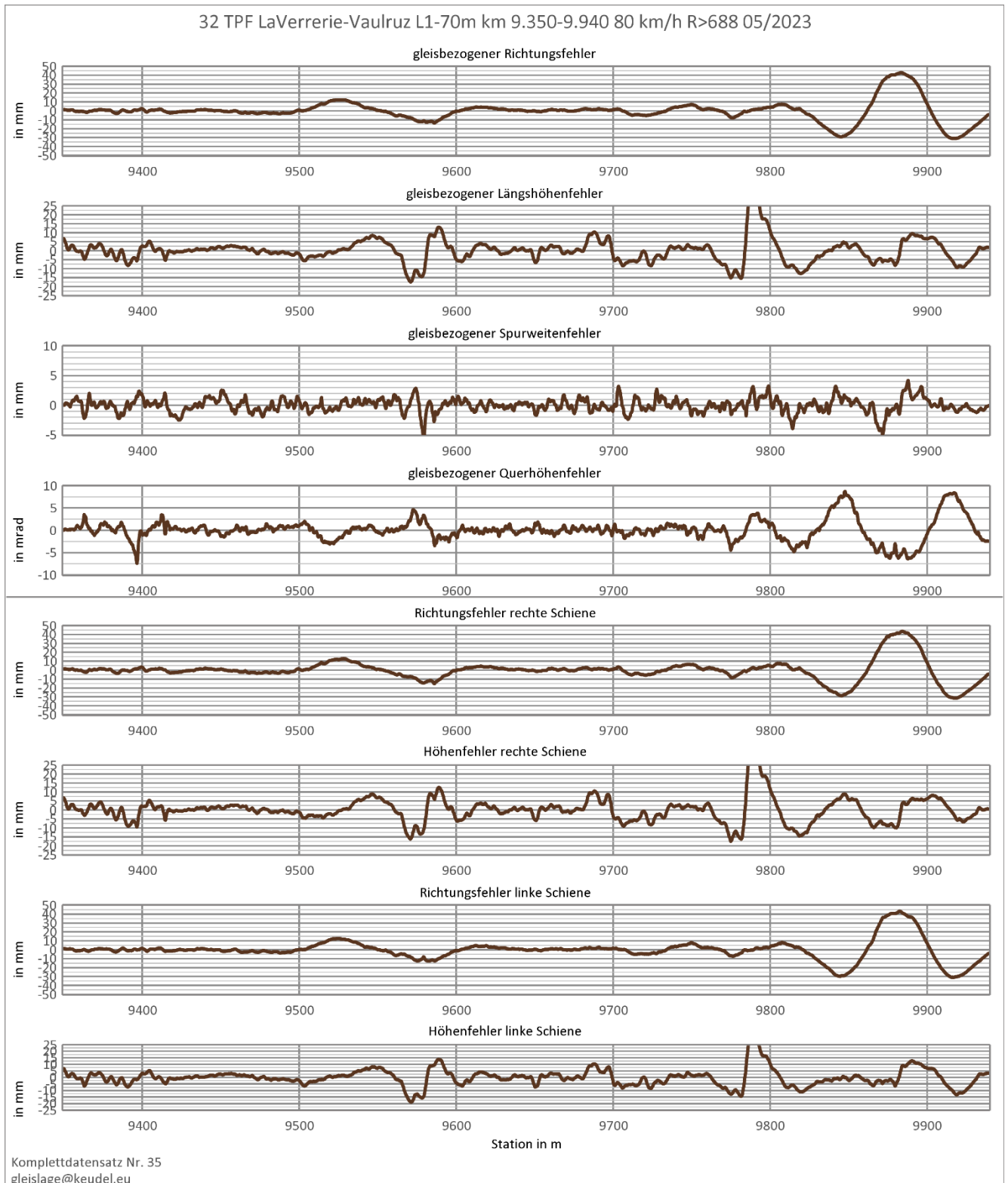


Abbildung 21: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt 32 aus Tabelle 3, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten

8.2.2 Wegabhängige Darstellungen zu Gleisabschnitten aus Tabelle 4 (Bogenfahrt)

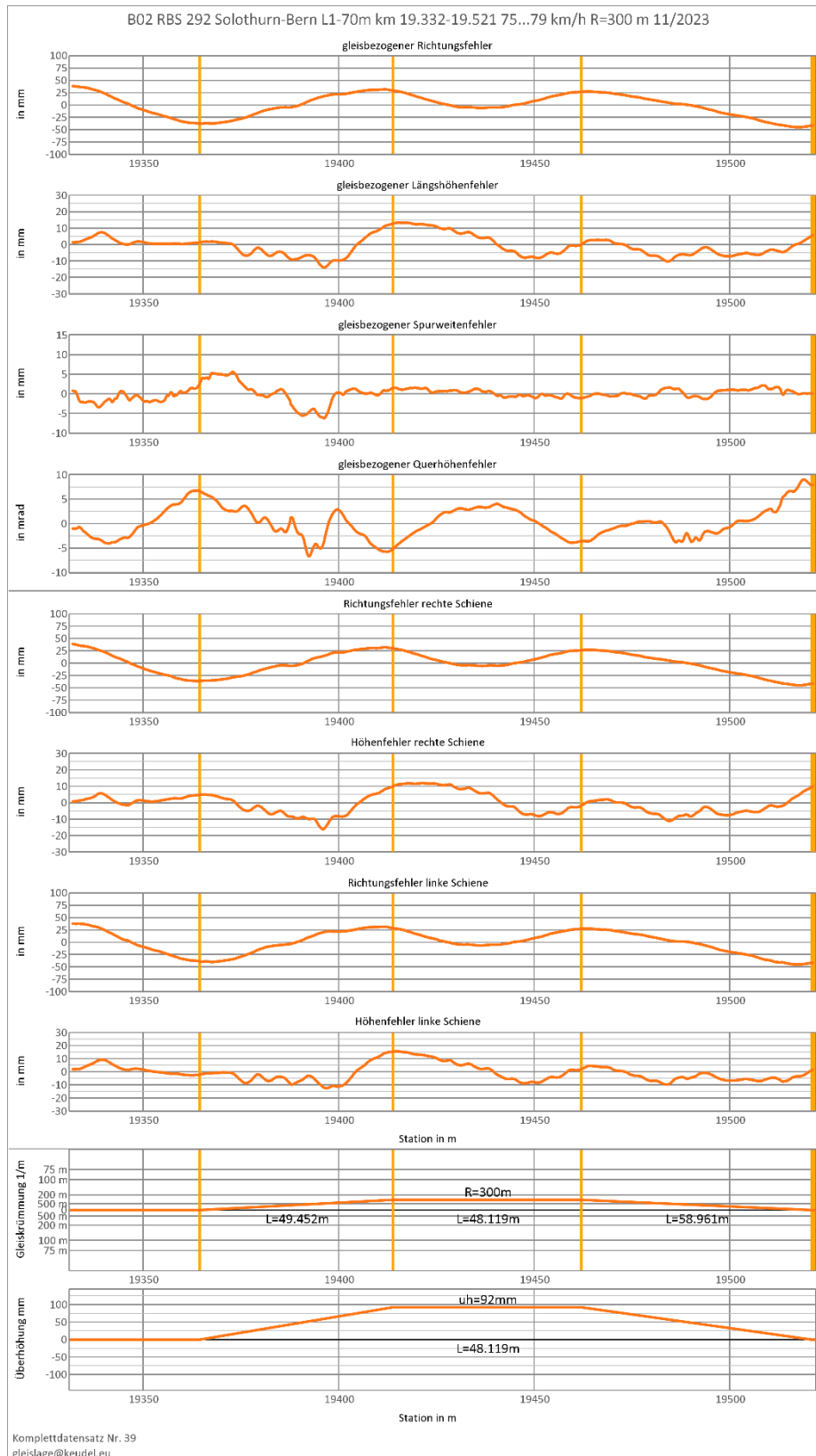


Abbildung 22: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B02 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

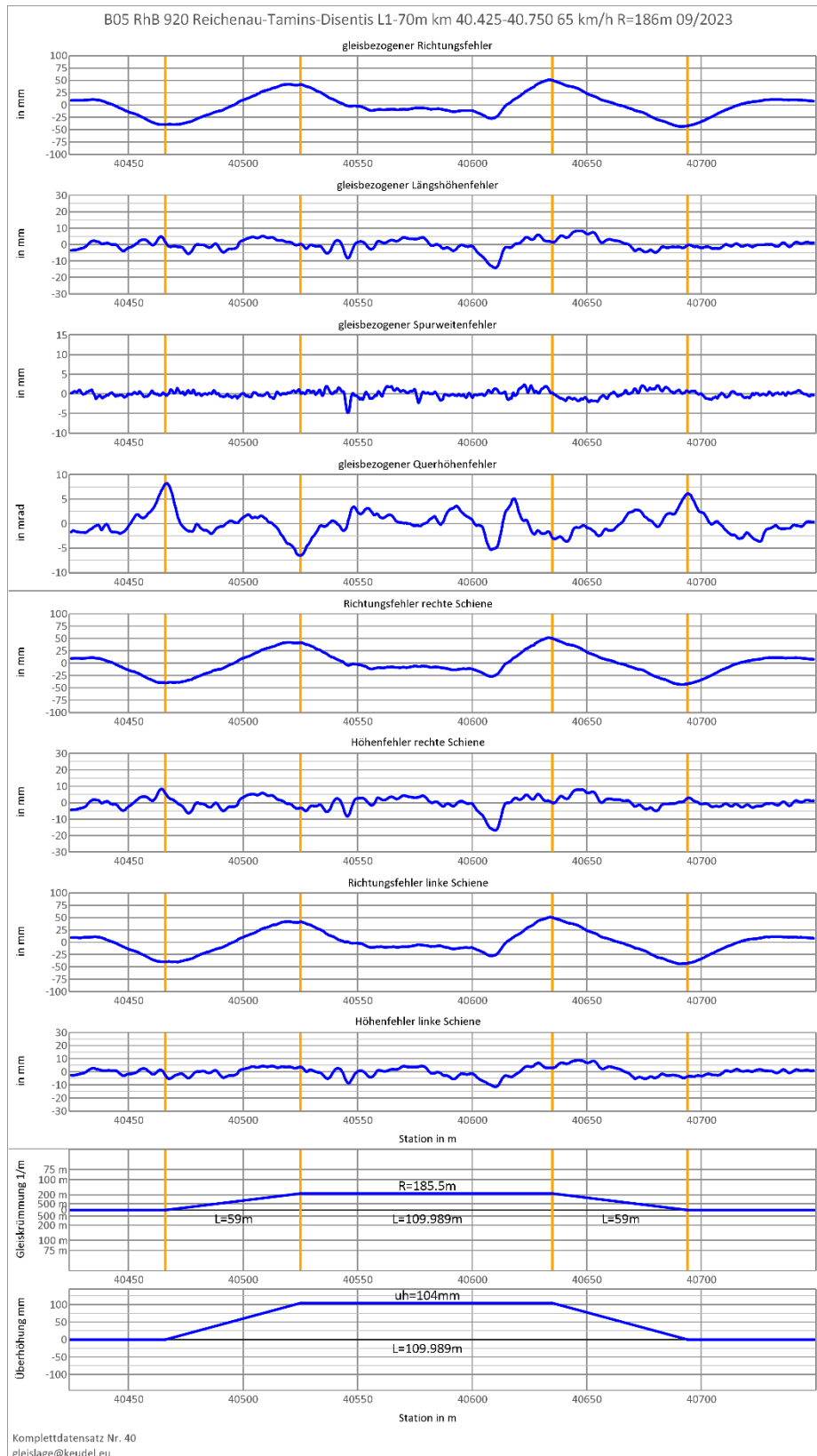


Abbildung 23: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B05 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

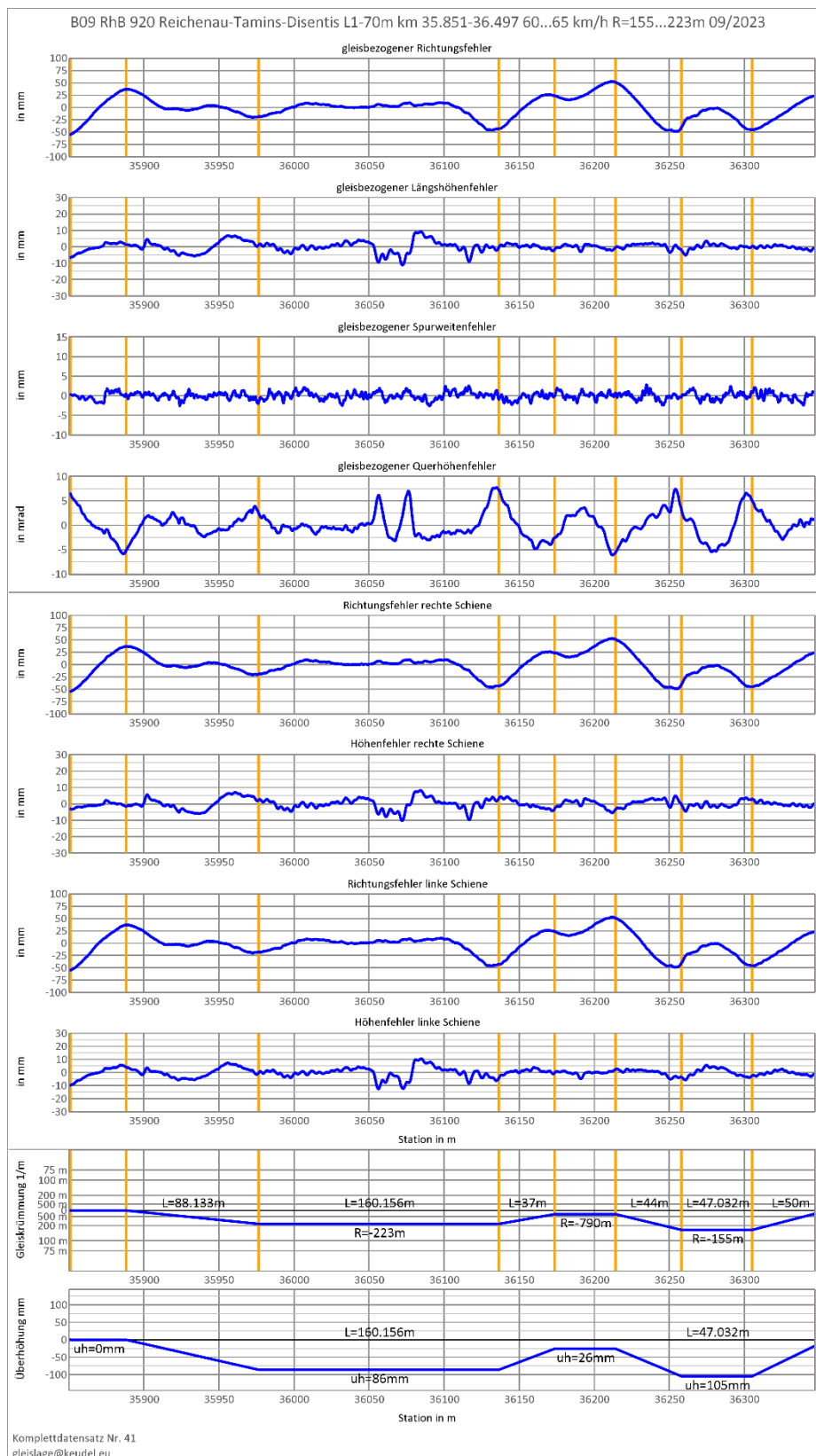


Abbildung 24: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B09 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

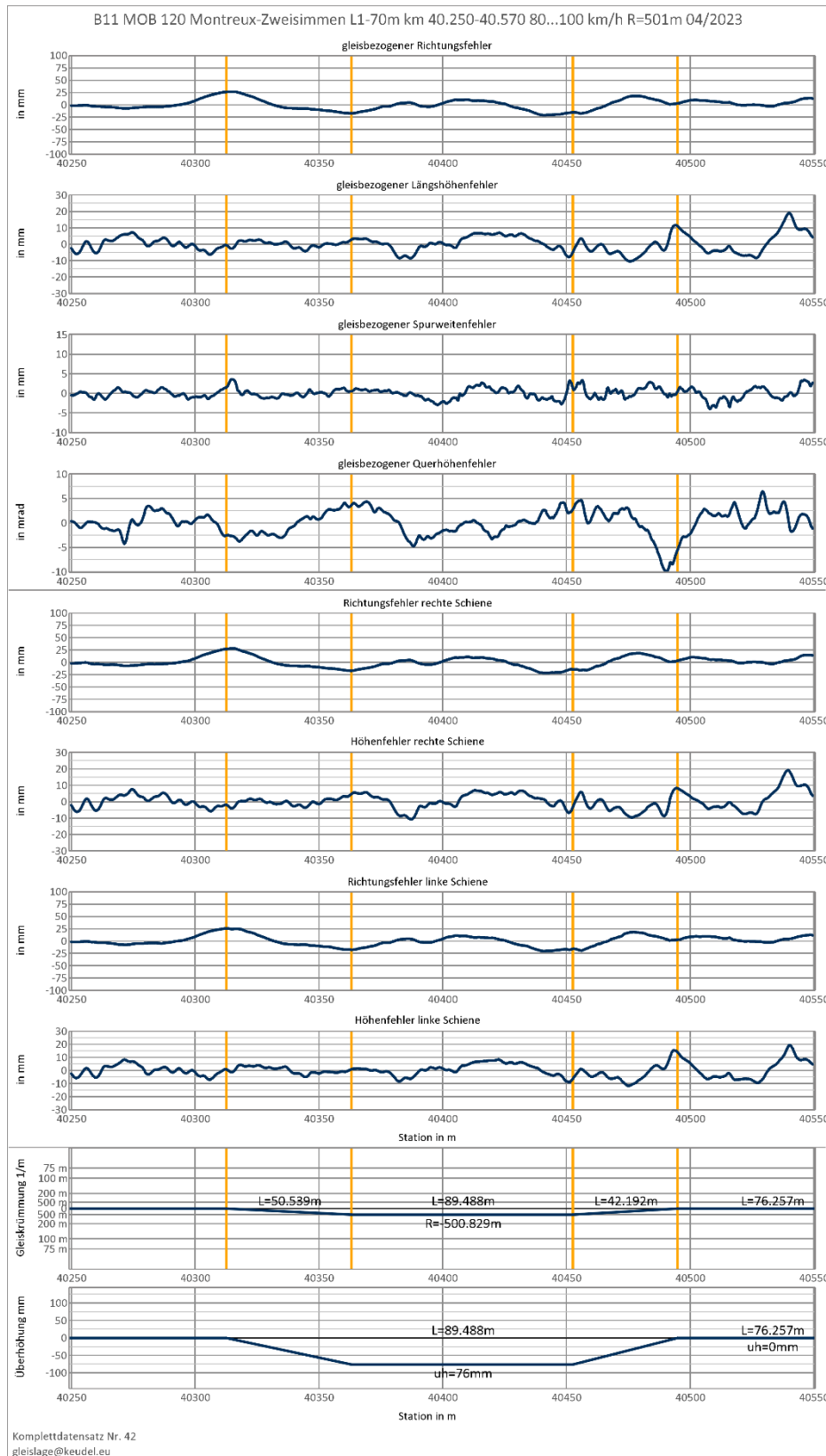


Abbildung 25: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B11 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

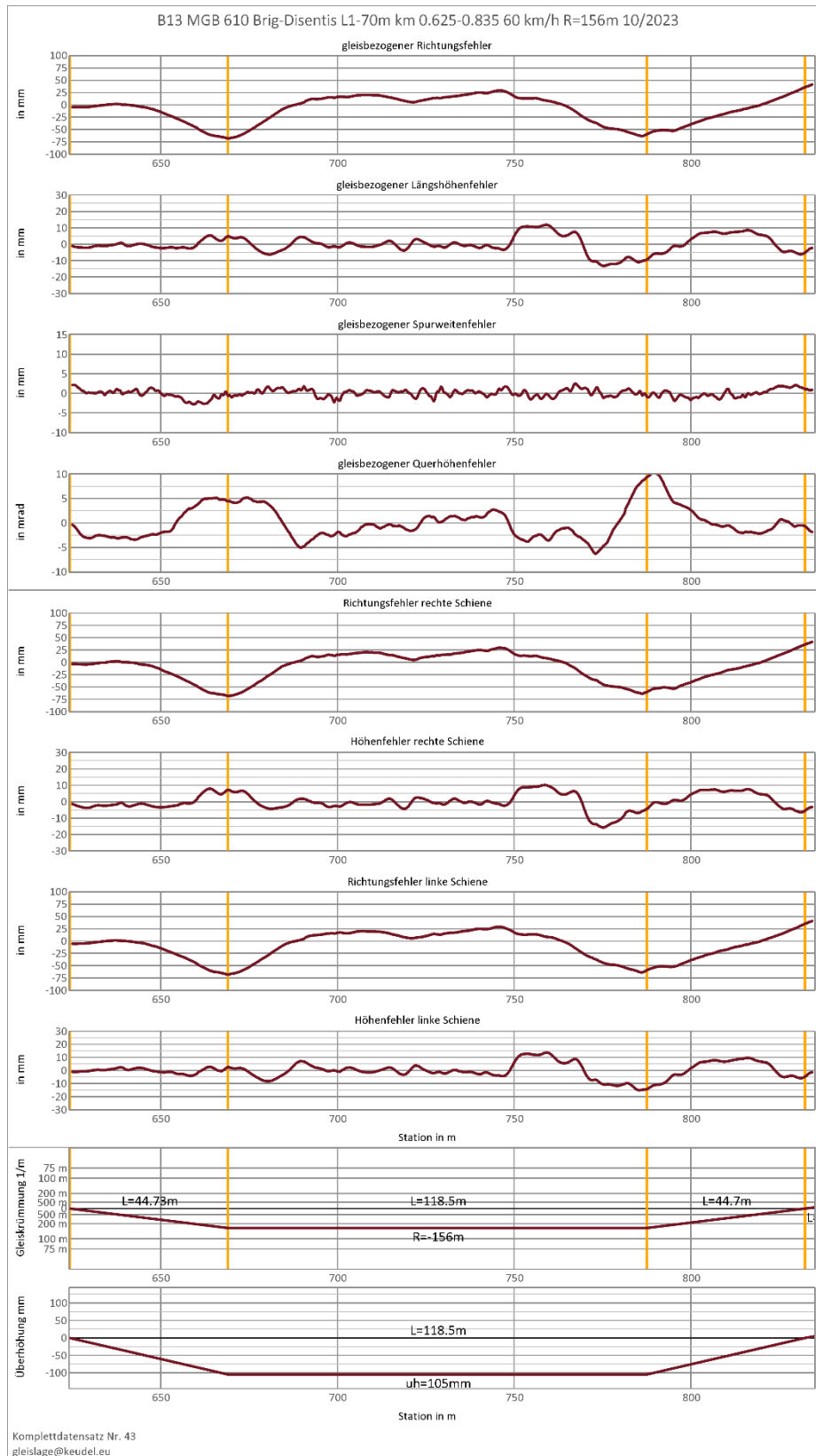


Abbildung 26: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B13 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

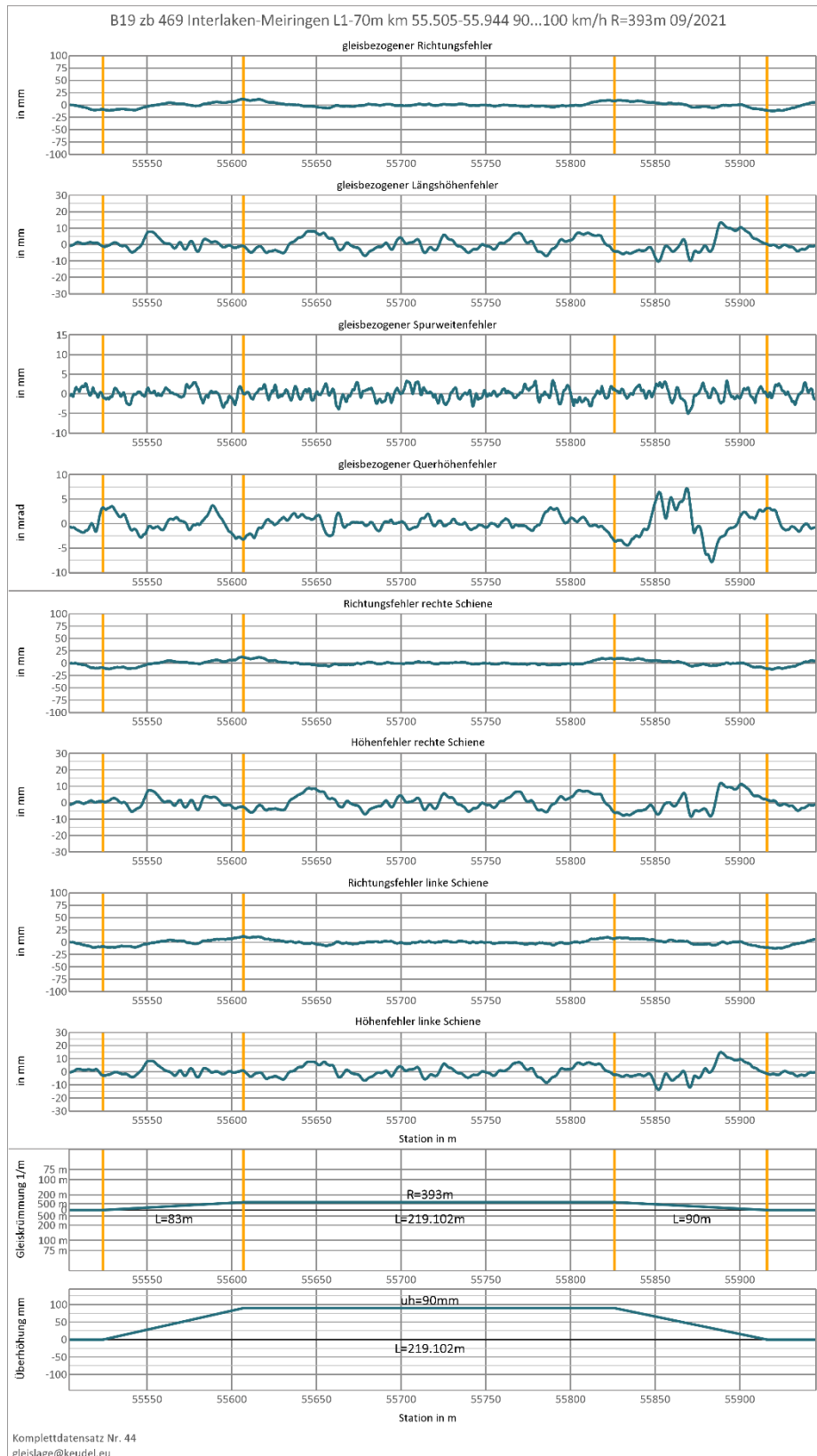


Abbildung 27: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B19 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

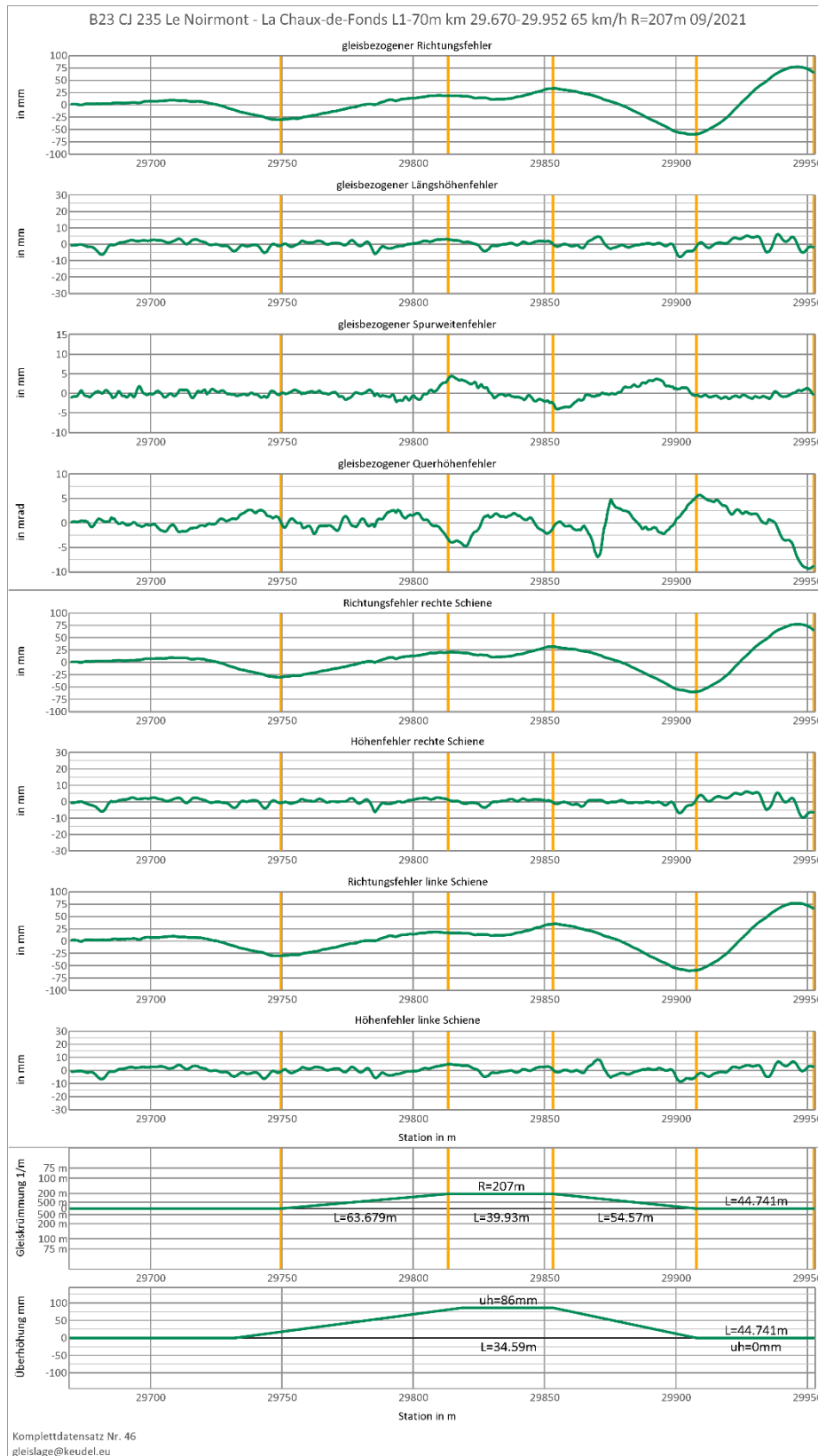


Abbildung 28: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B23 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

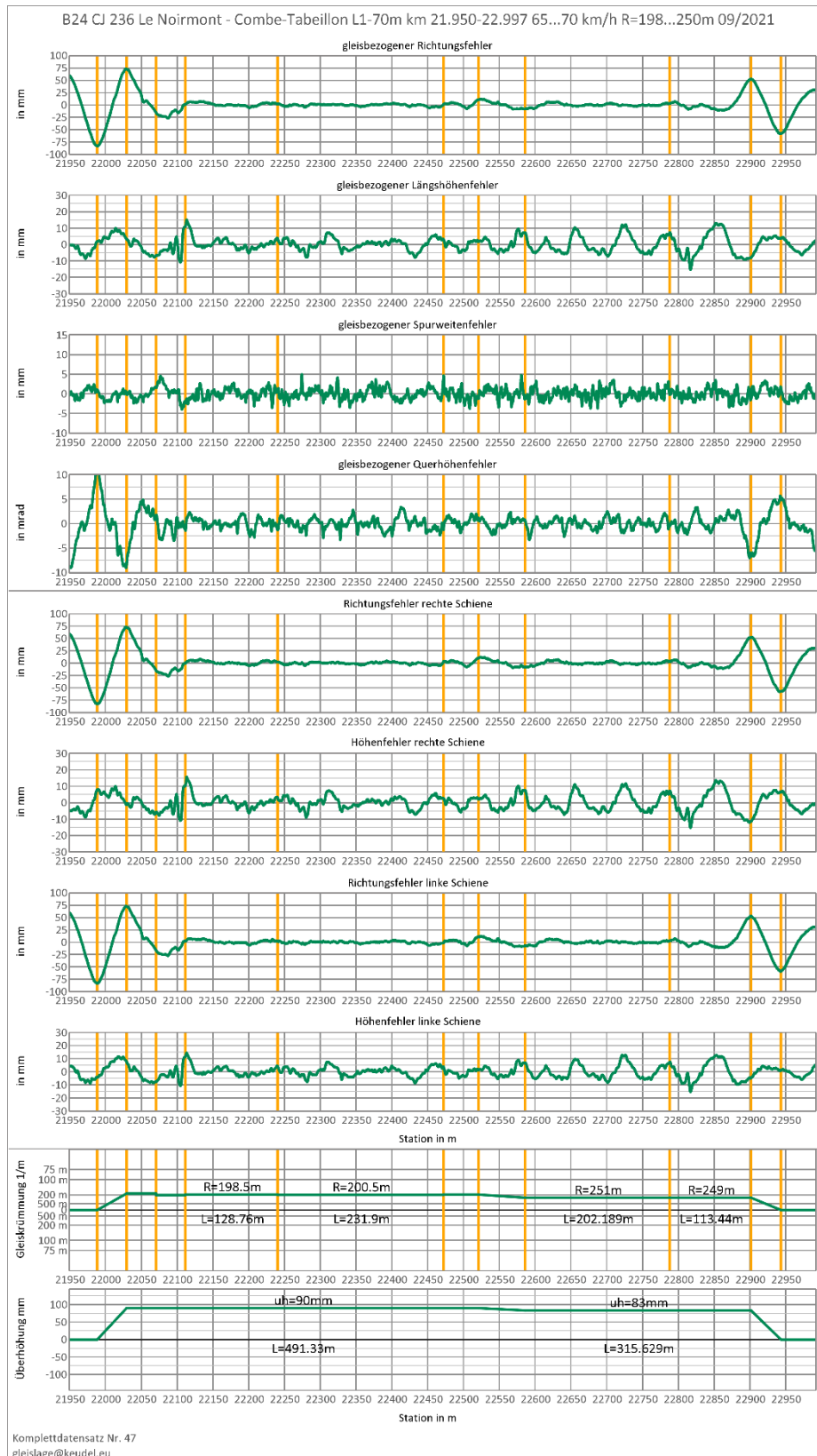


Abbildung 29: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B24 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

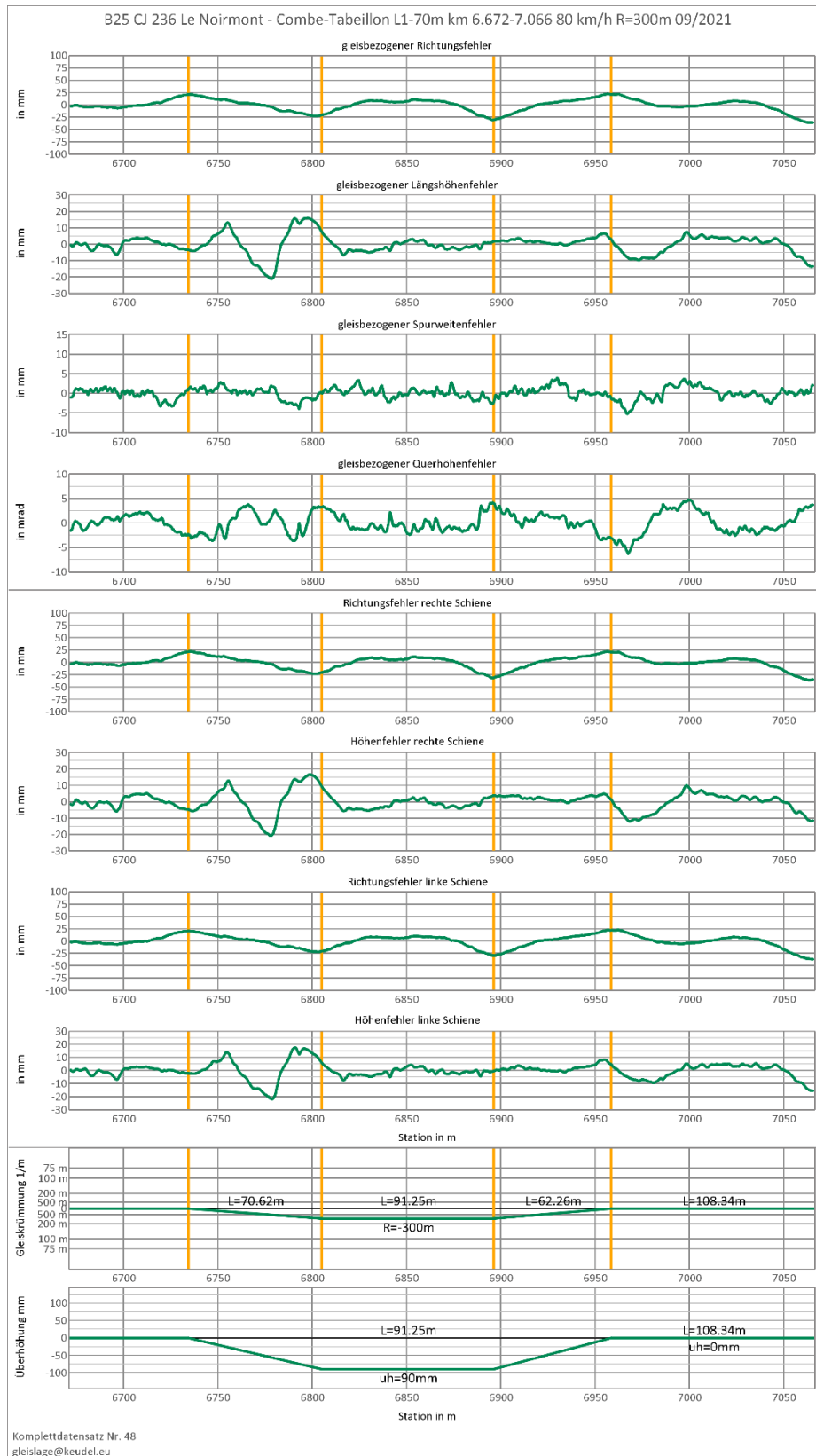


Abbildung 30: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B25 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

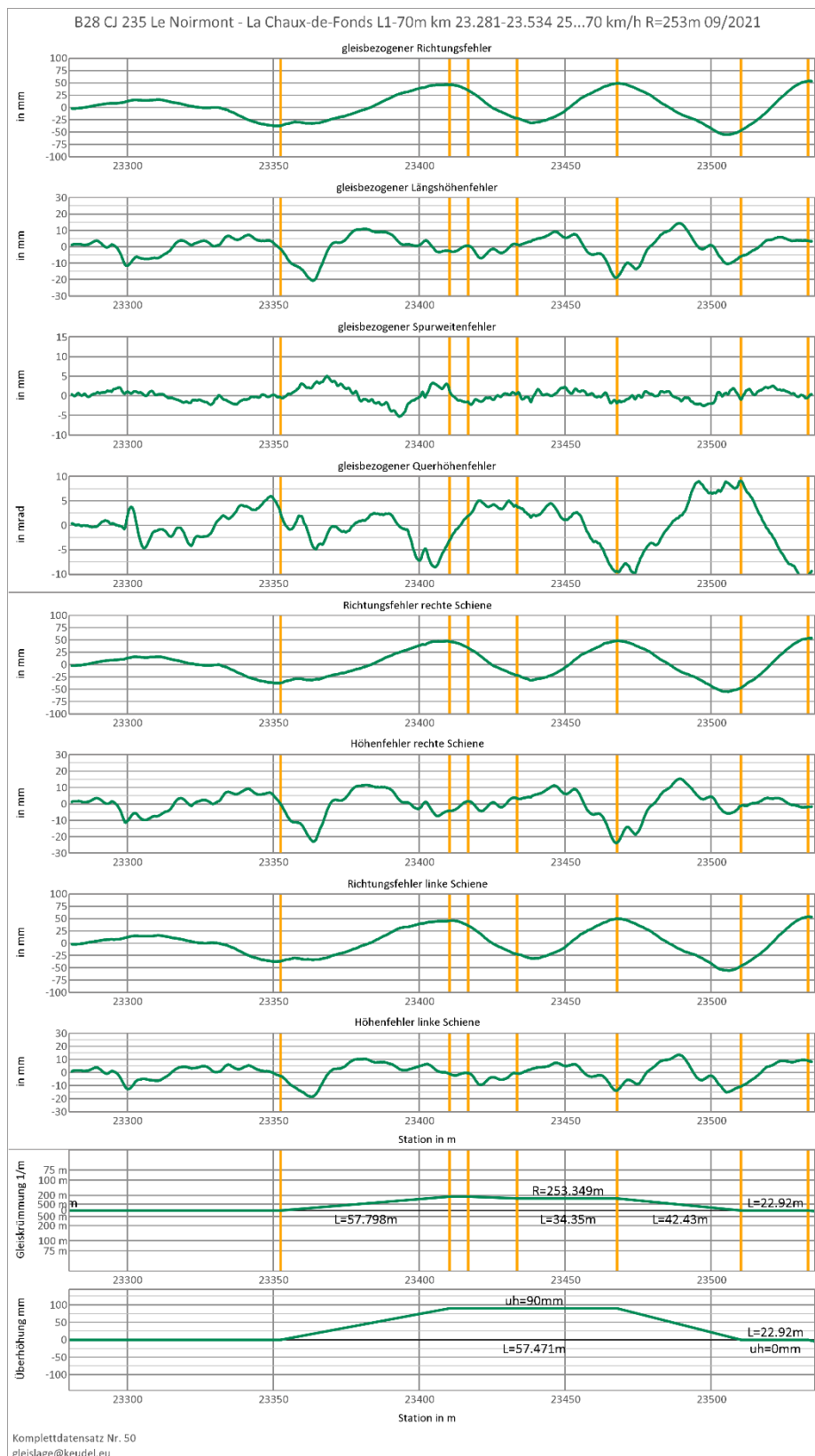


Abbildung 31: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B28 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

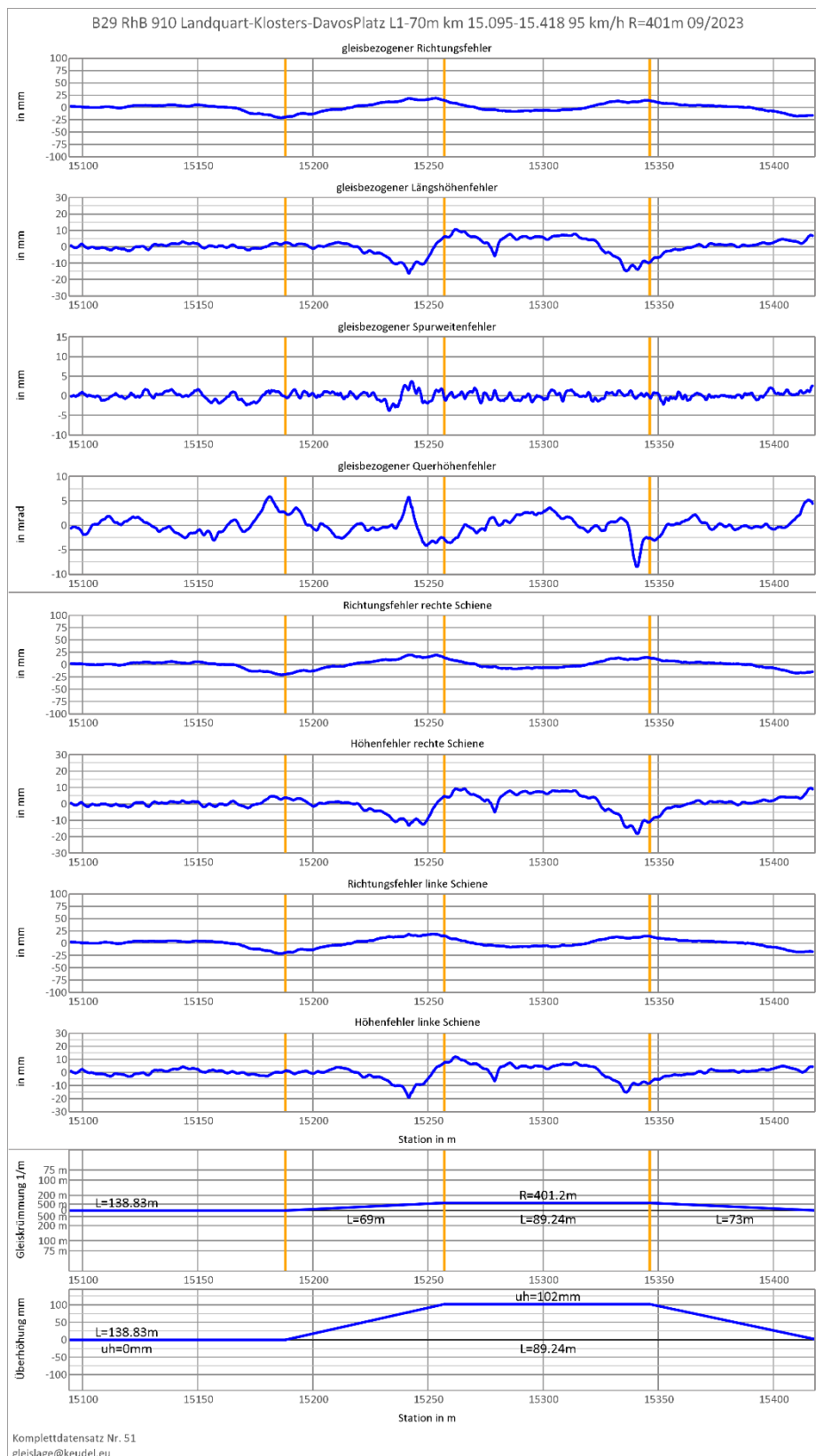


Abbildung 32: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B29 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

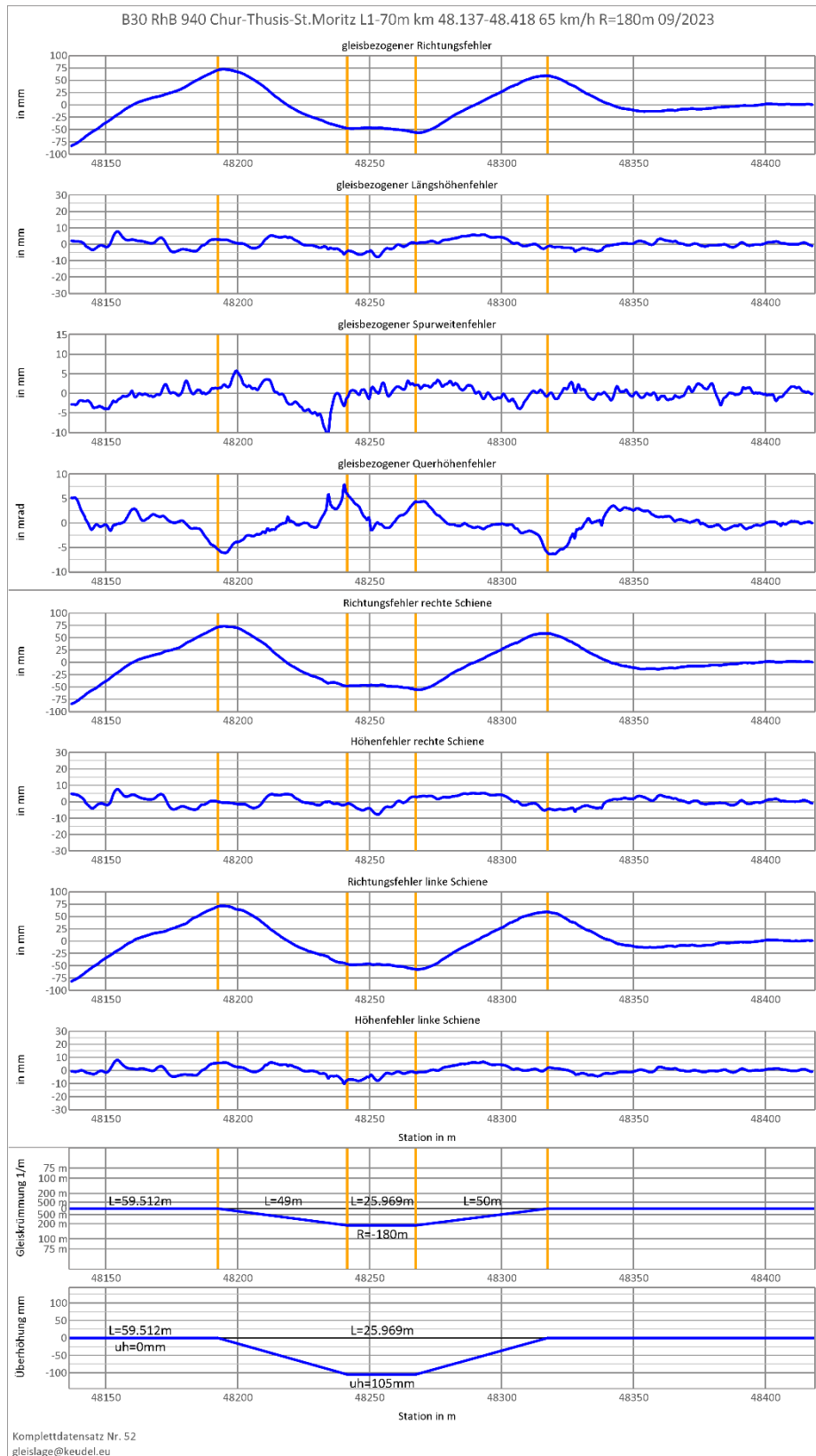


Abbildung 33: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B30 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

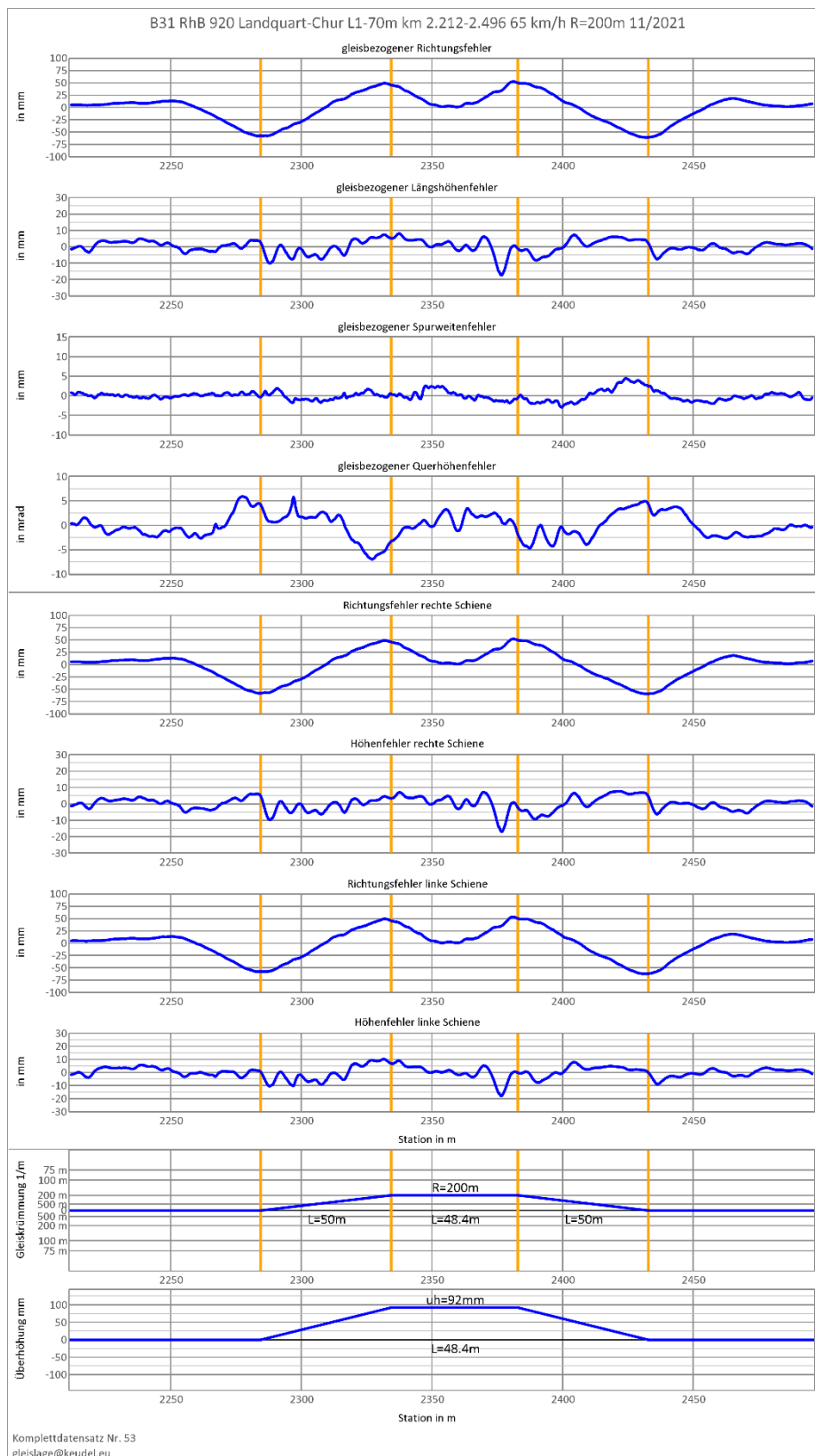


Abbildung 34: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B31 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

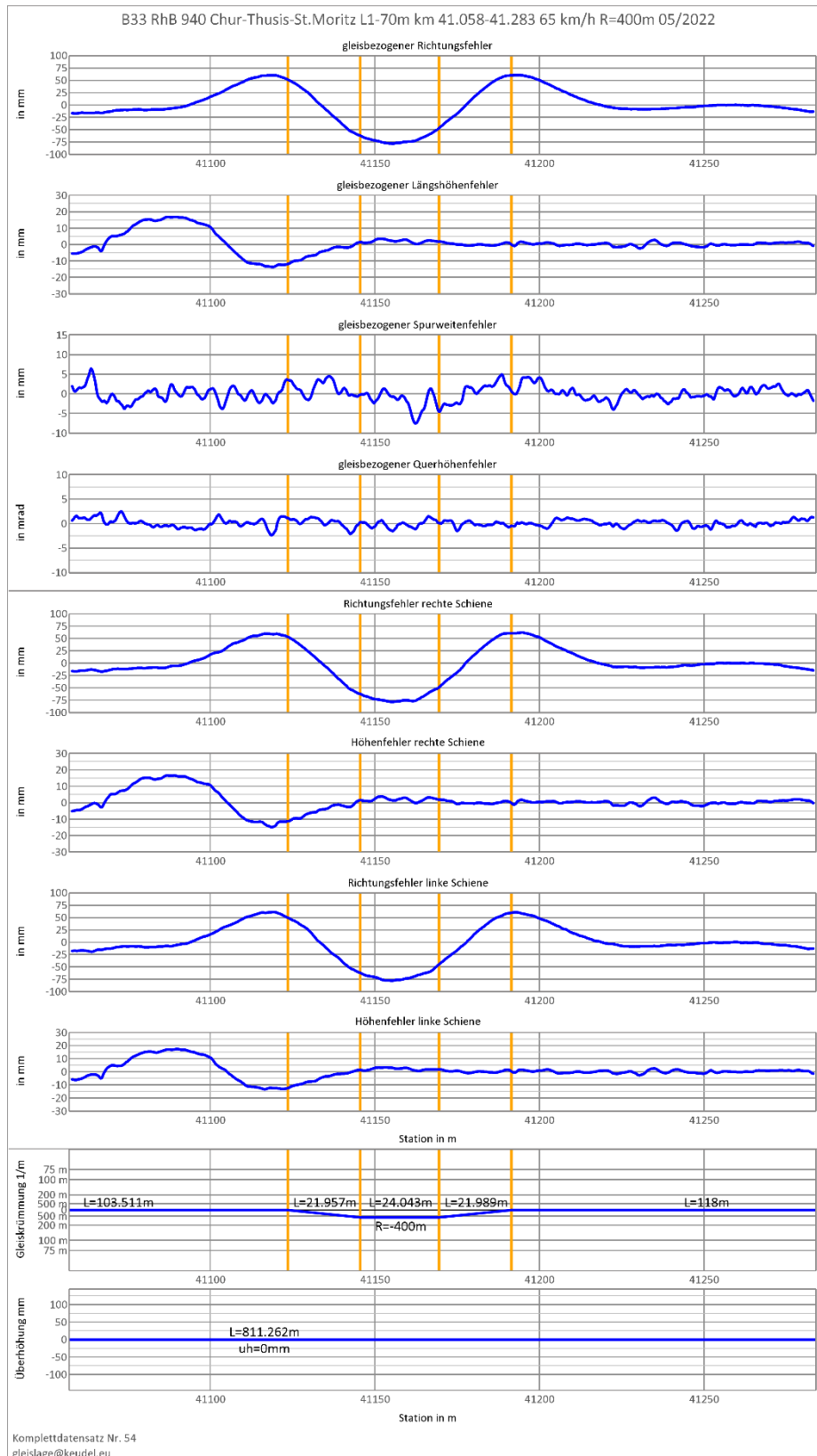


Abbildung 35: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B33 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

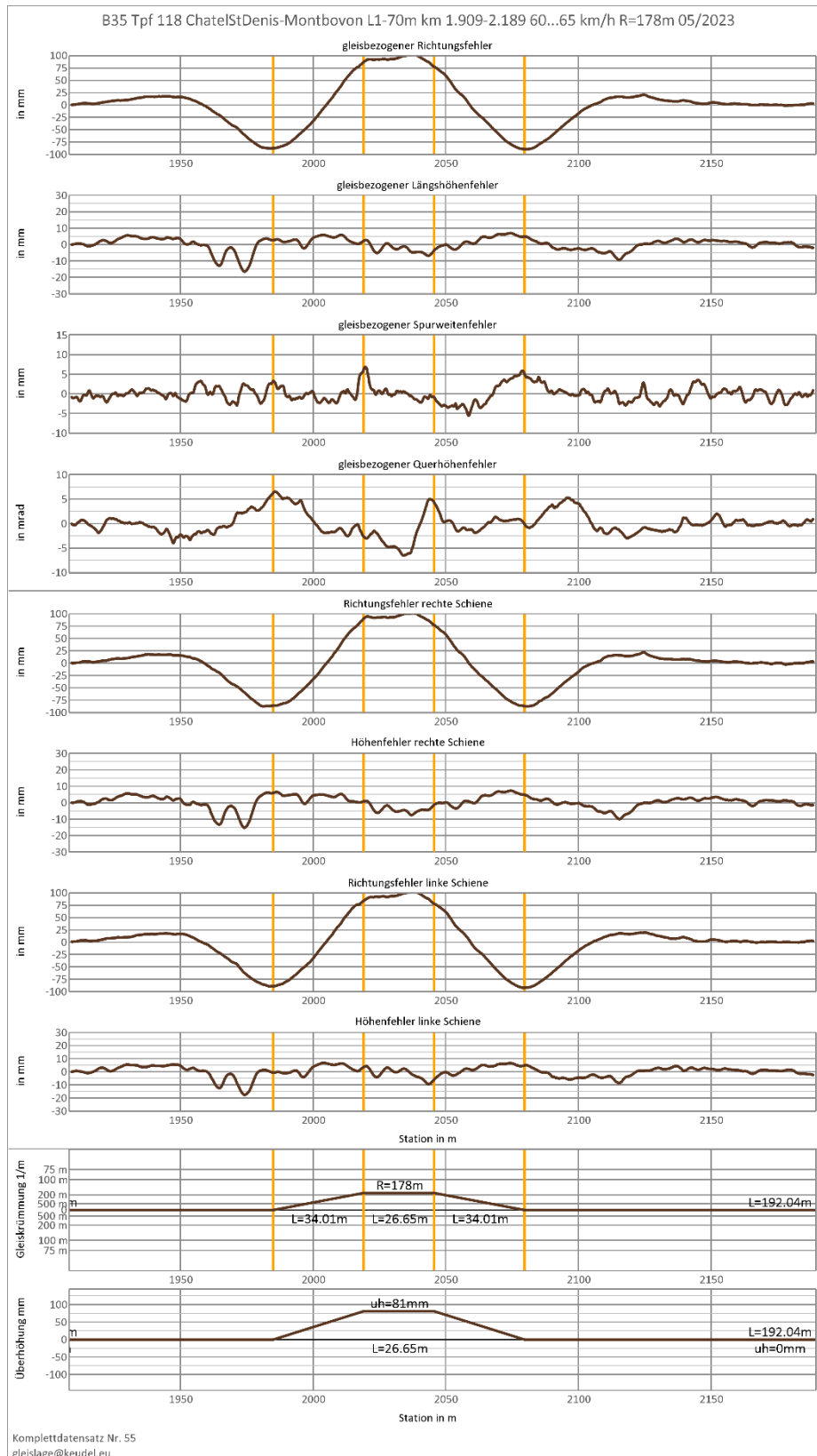


Abbildung 36: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B35 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

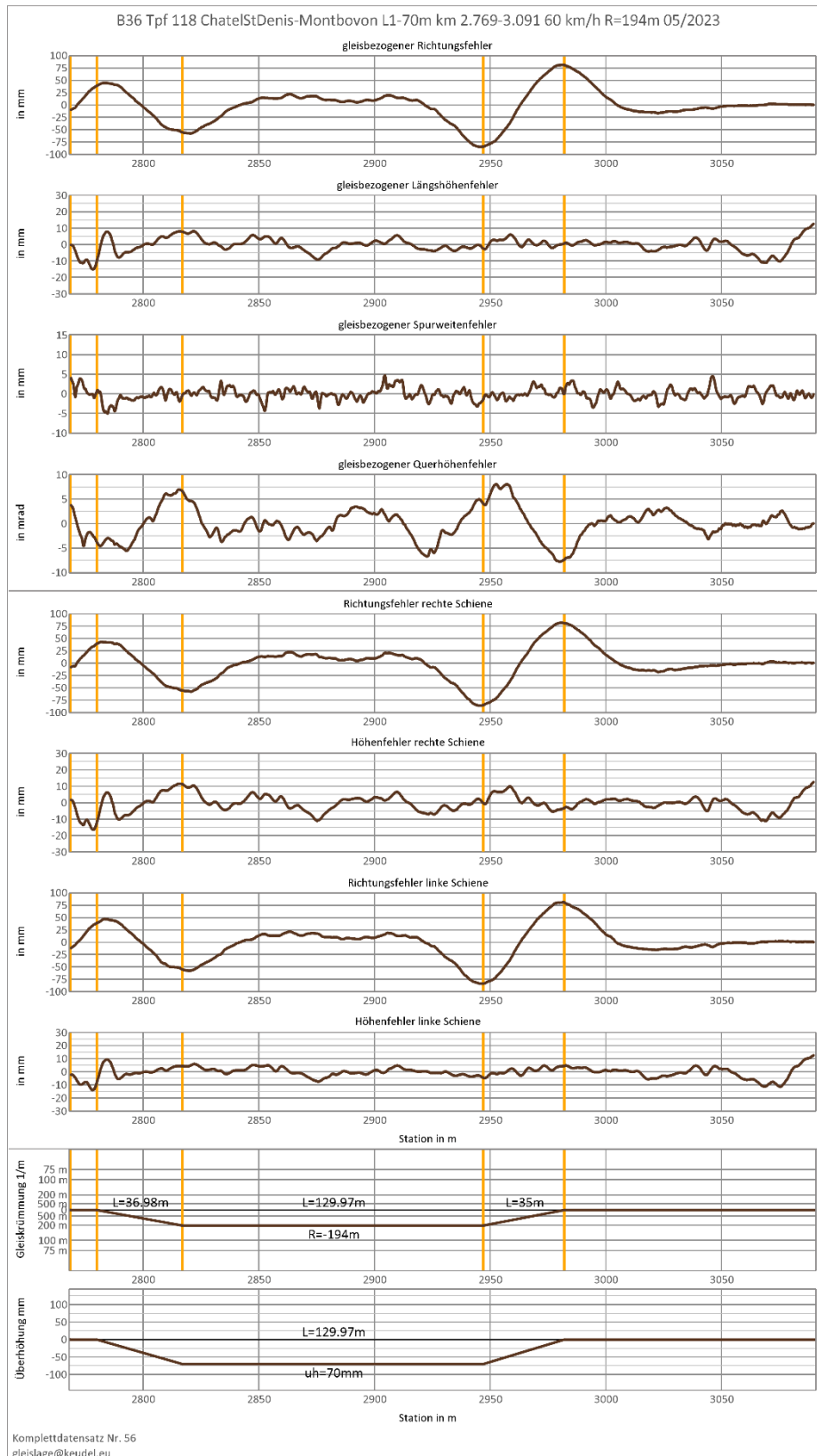


Abbildung 37: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B36 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

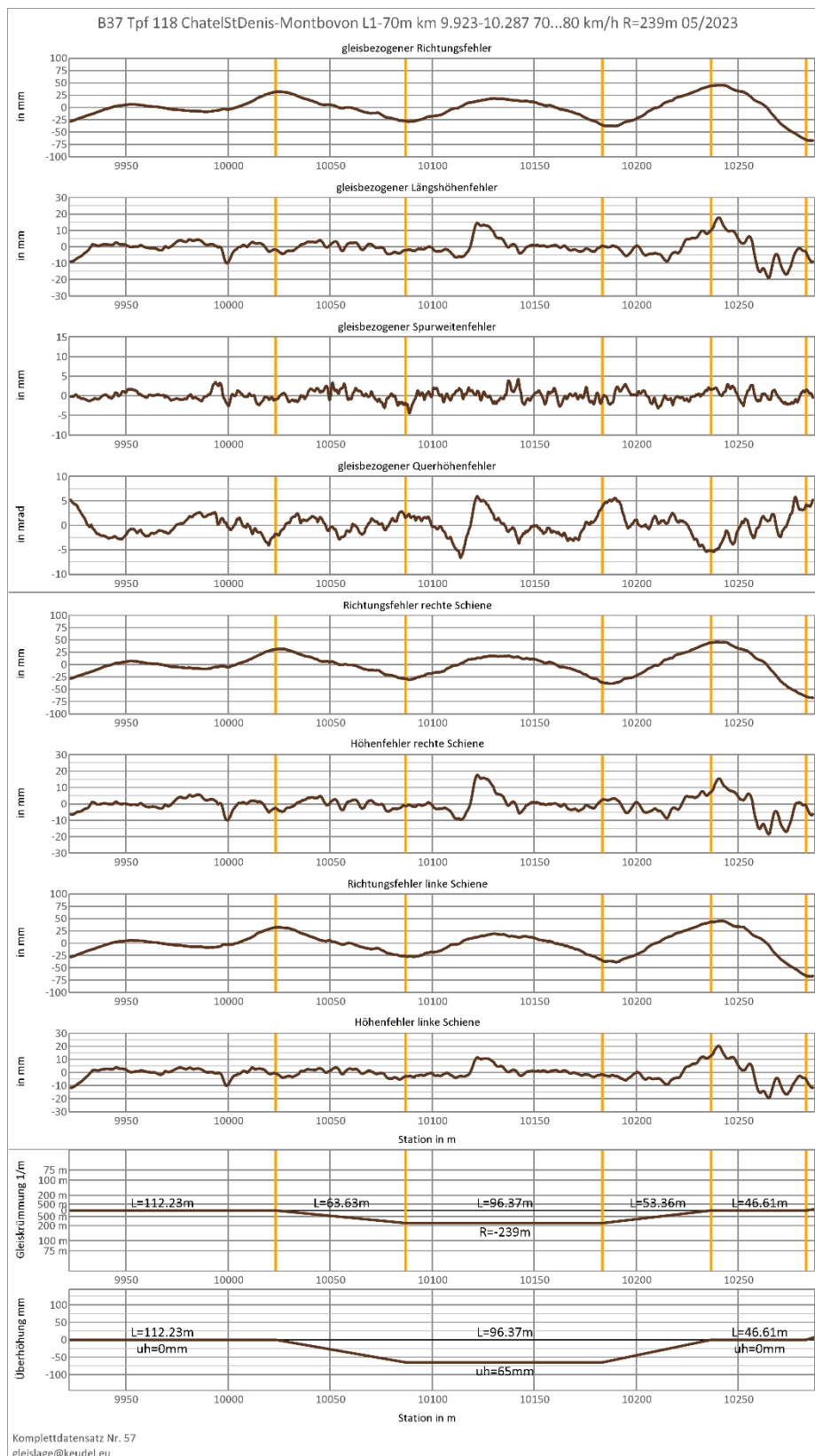


Abbildung 38: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B37 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

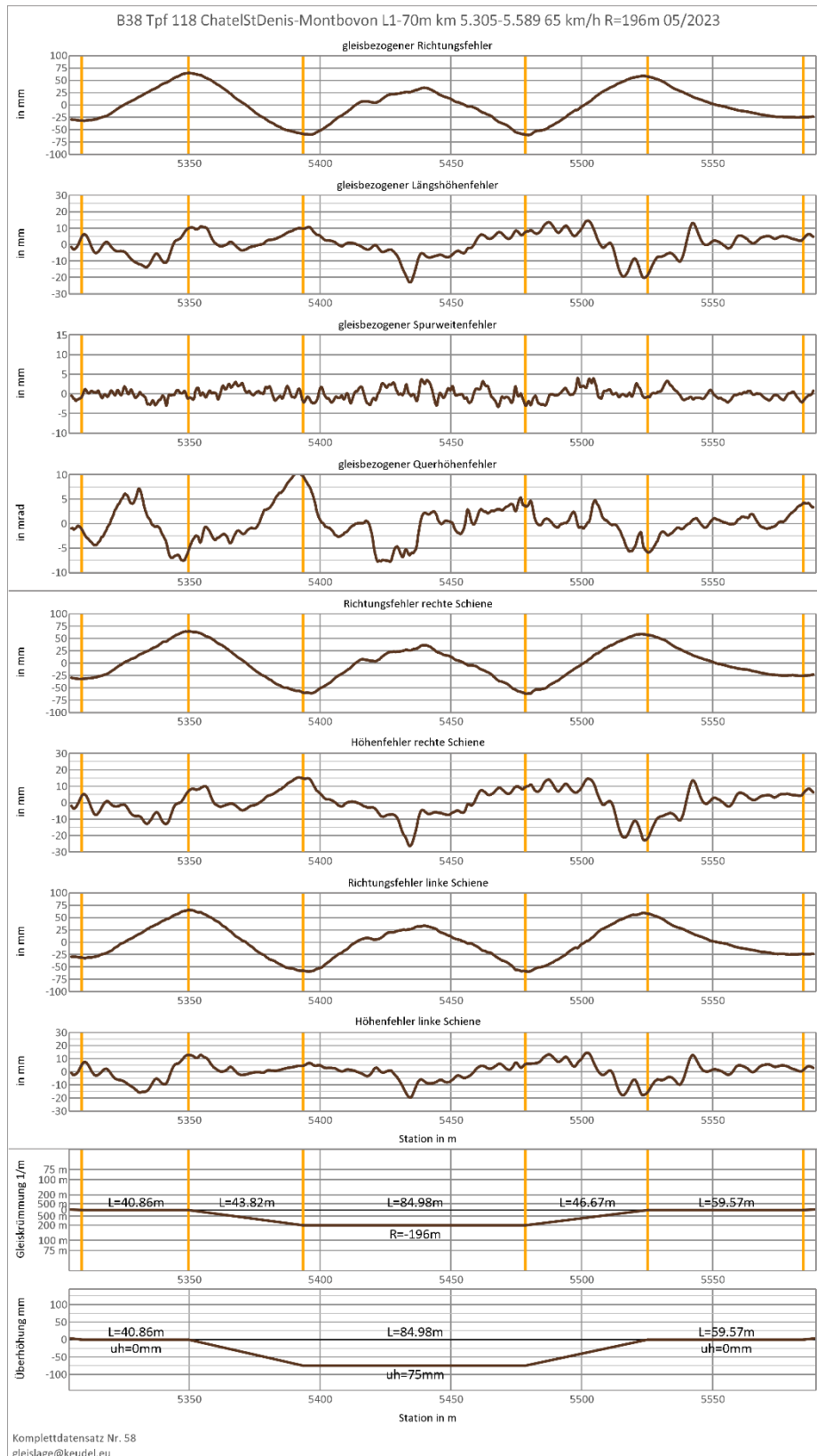


Abbildung 39: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B38 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

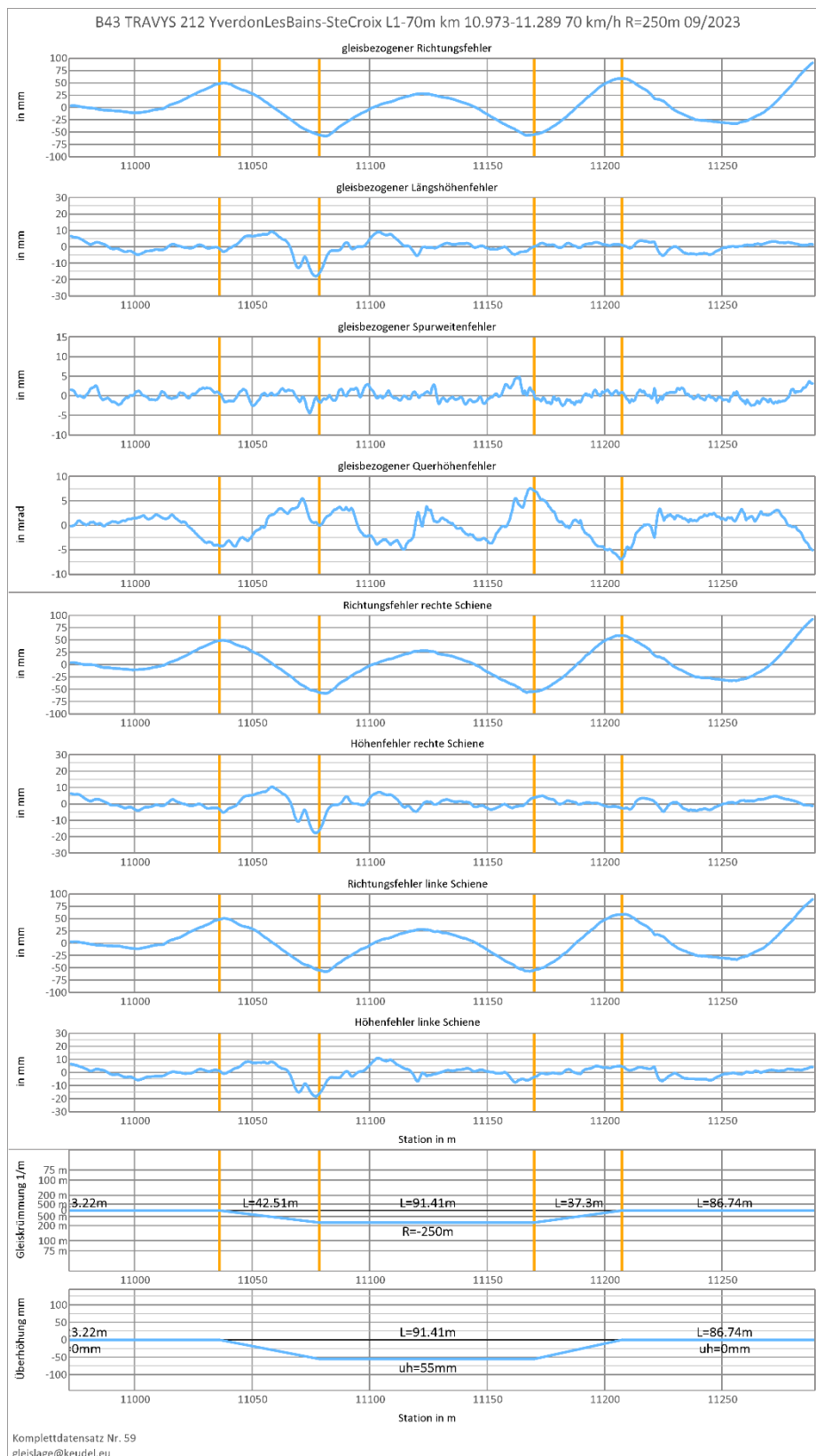


Abbildung 40: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B43 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

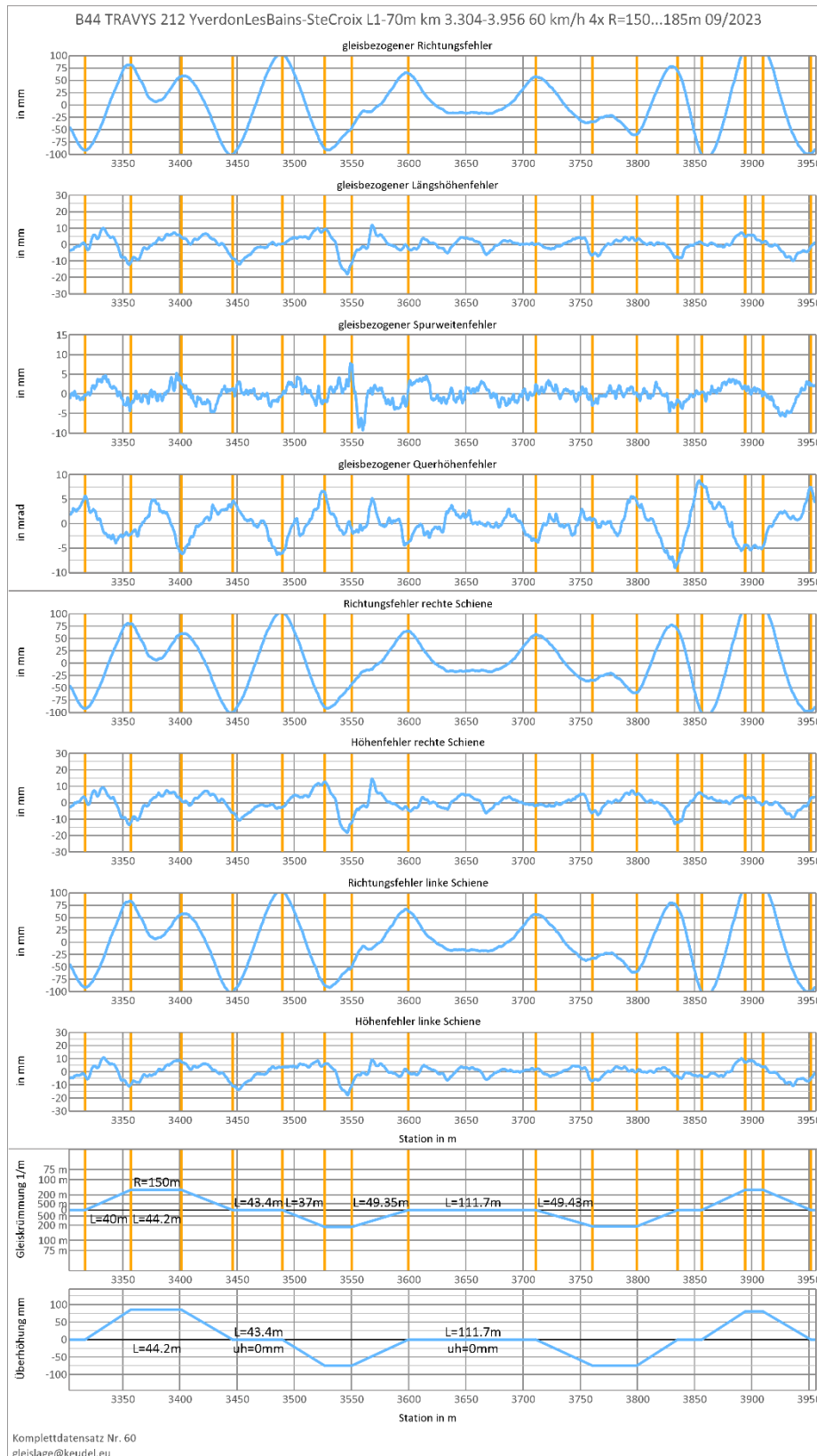


Abbildung 41: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B44 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

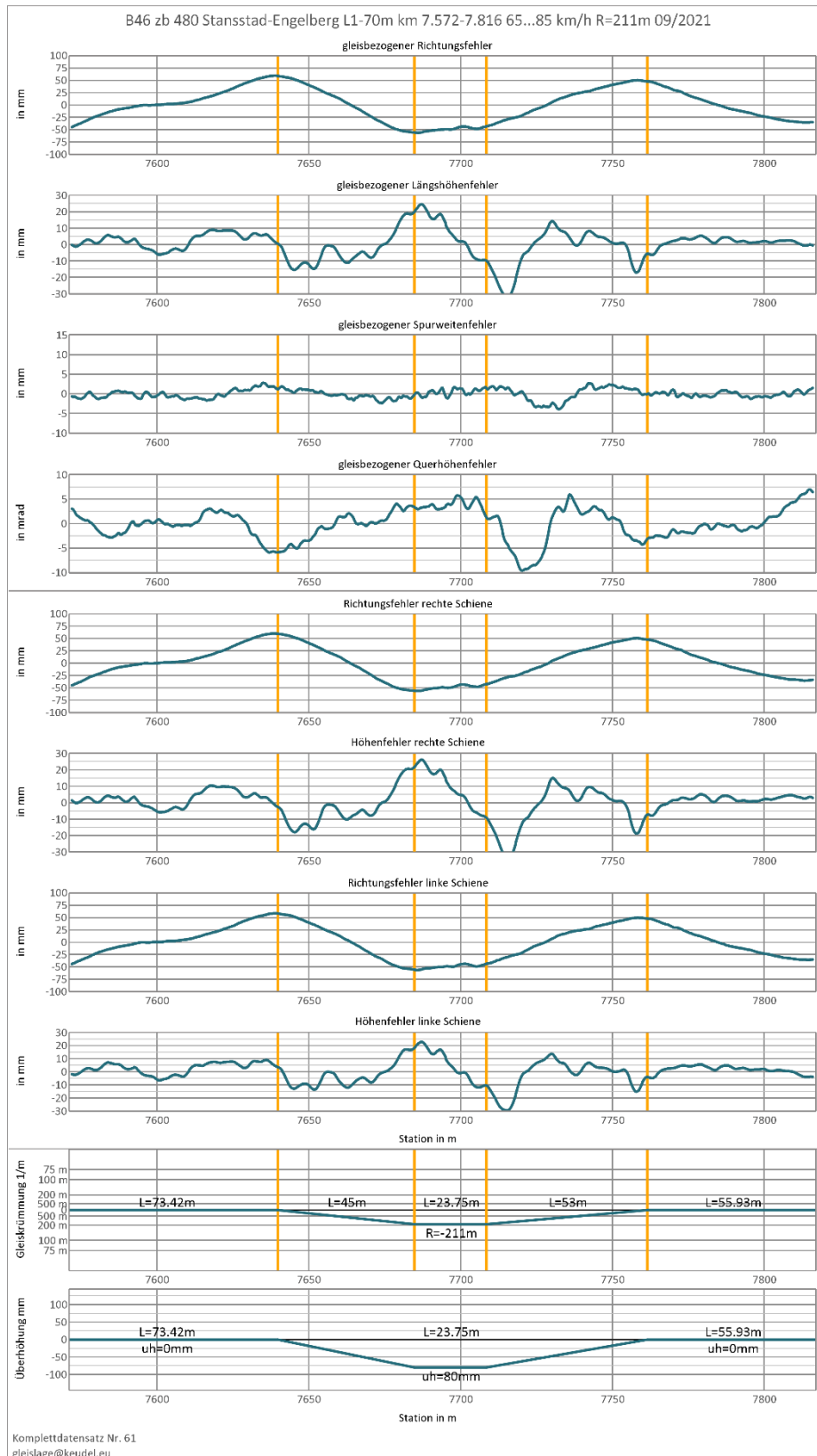


Abbildung 42: Wegabhängige Darstellung der Messdaten zu Abschnitt B46 aus Tabelle 4, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), weitere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3) wie von SERSA erhalten untere beiden Grafikzeilen zeigen Bogenradius und Überhöhungsverlauf aus [16]

8.3 Grafische Darstellung der Vergleichsspektren nach ORE B176 [10] und Frederich [12]

Eine Erläuterung zu den hier dargestellten Leistungsdichtespektren findet sich in den Abschnitten 2.4 und 4.1.

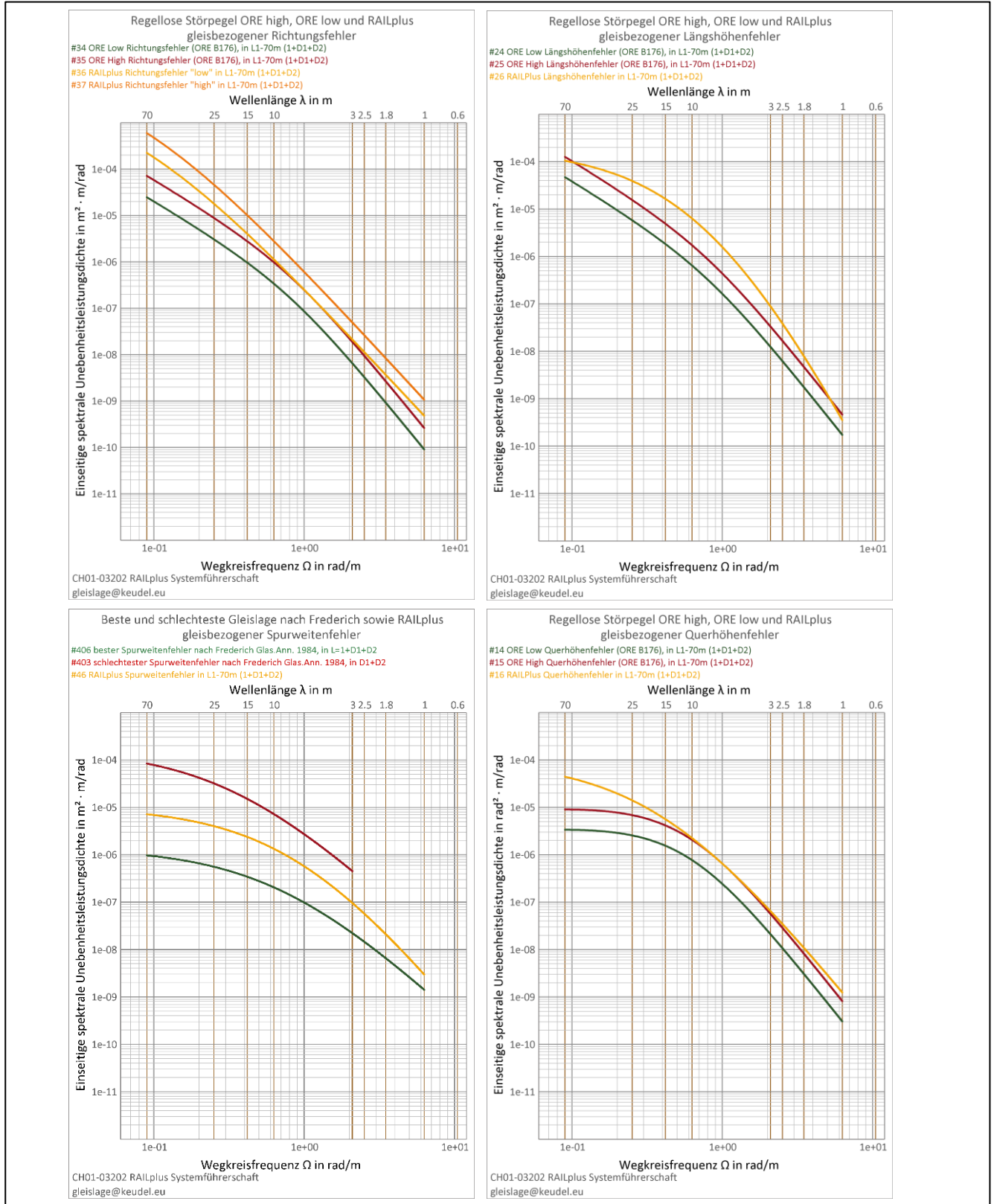


Abbildung 43: Darstellung der «ORE high» und «ORE low» [10] sowie Spurweite nach Frederich [12] und (in gelb) RAILplus-Störpegel entsprechend Abschnitten 4.1 und 8.4

8.4 Grafische Darstellungen zu Leistungsdichtespektren (PSD) zu Tabelle 3 (hohe Fahrgeschwindigkeit, gerades Gleis und grosse Bogenradien)

8.4.1 Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Richtungsfehler zu Tabelle 3

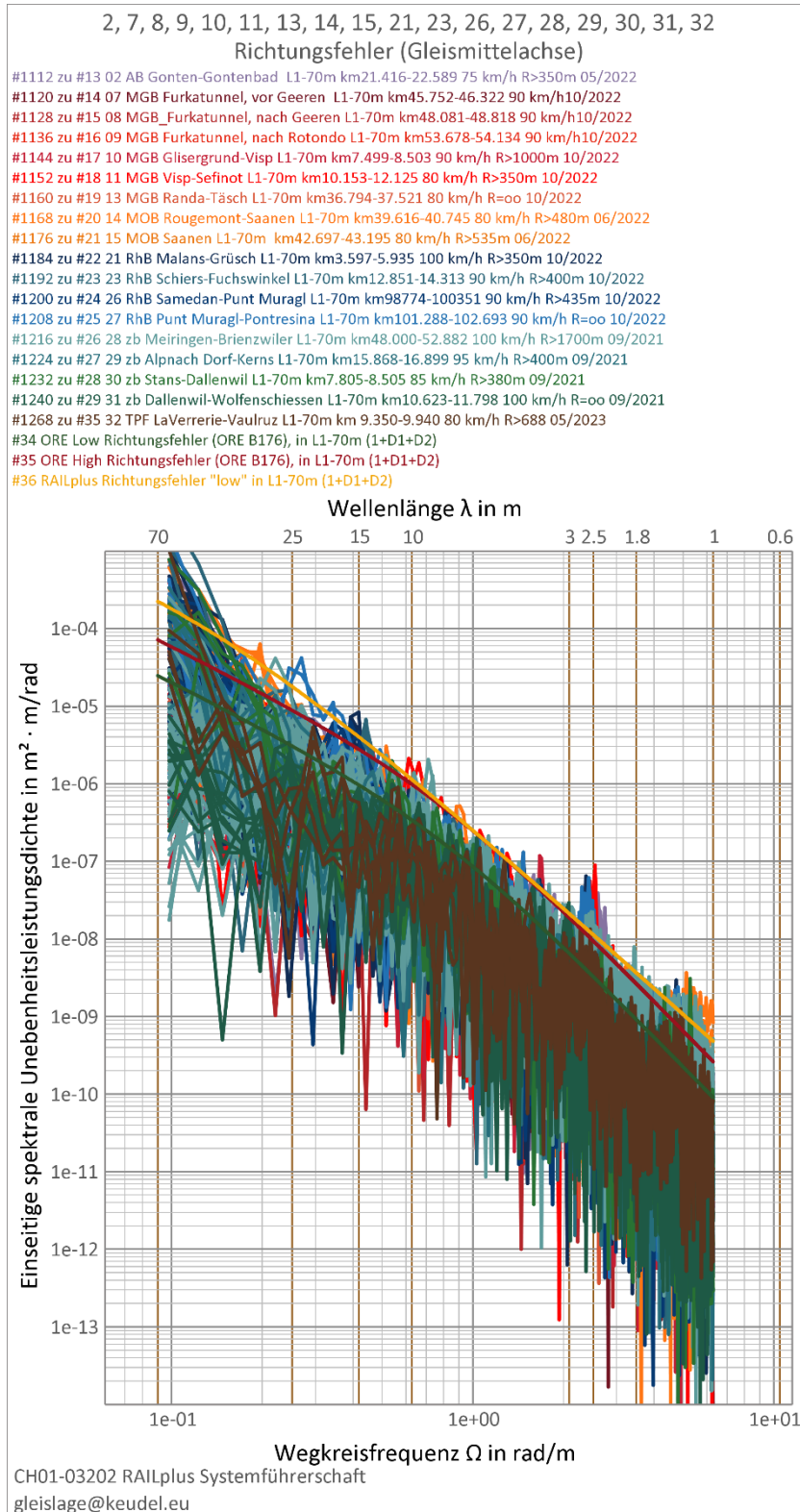


Abbildung 44: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3

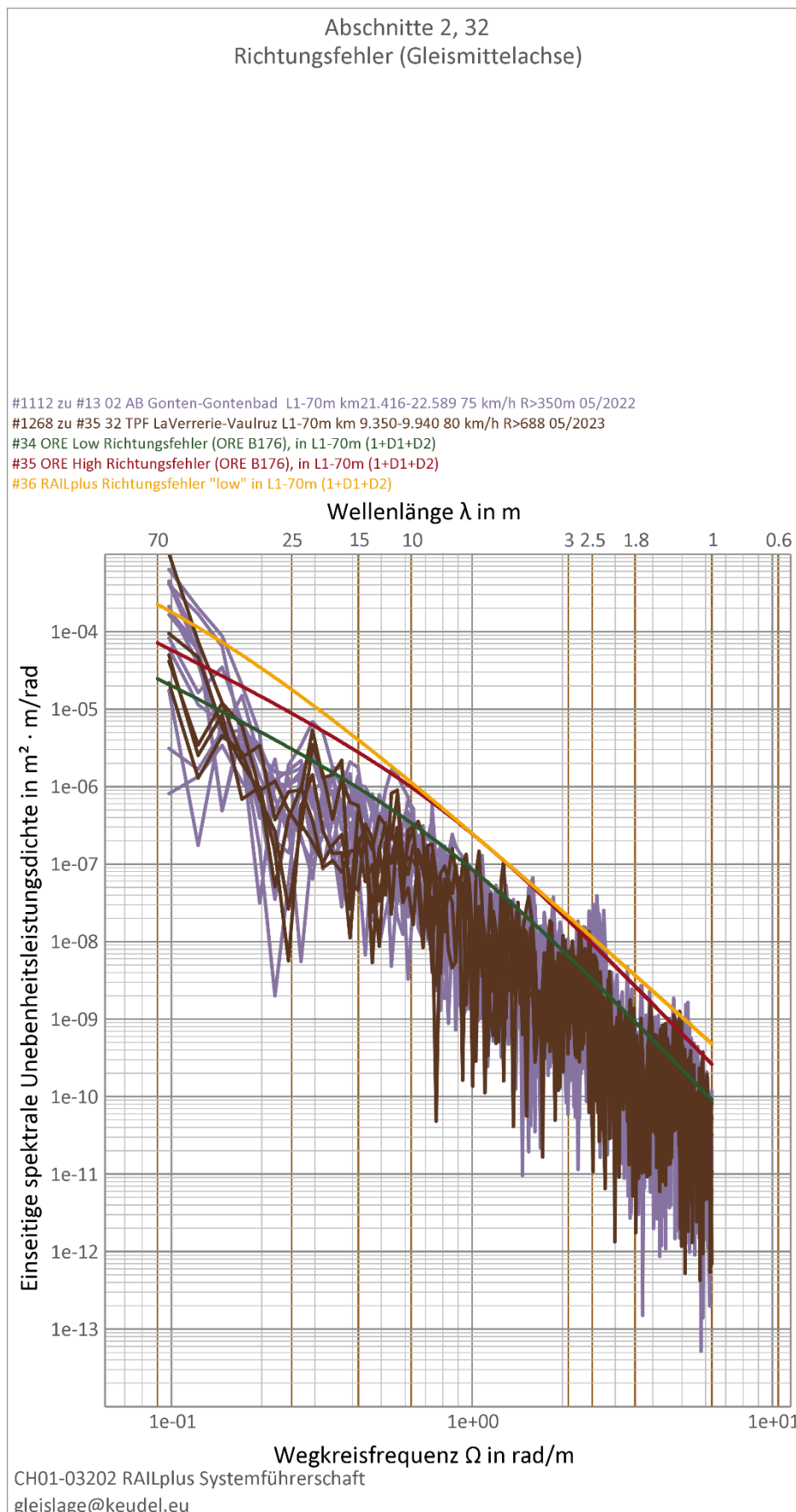


Abbildung 45: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3

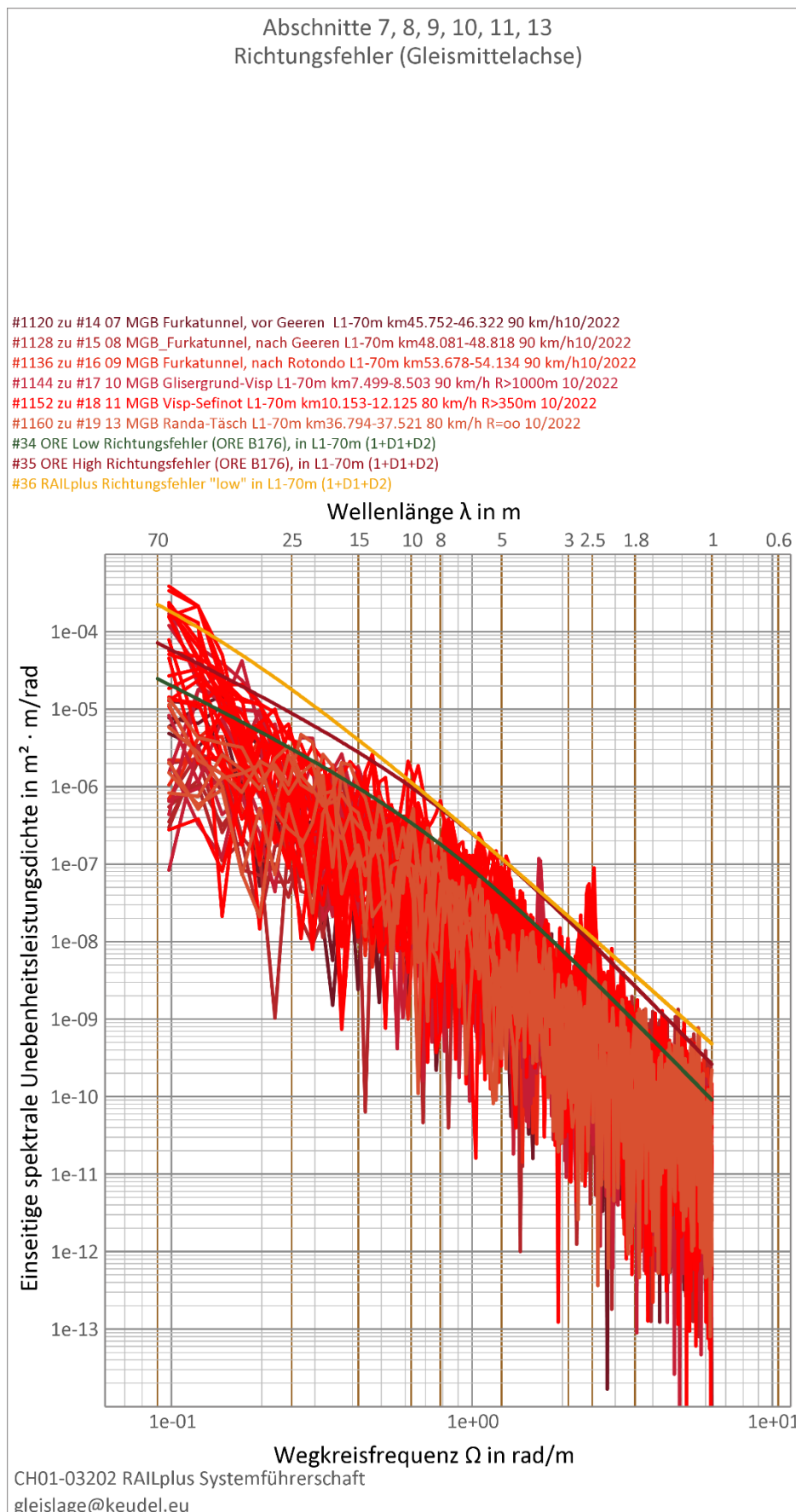


Abbildung 46: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3

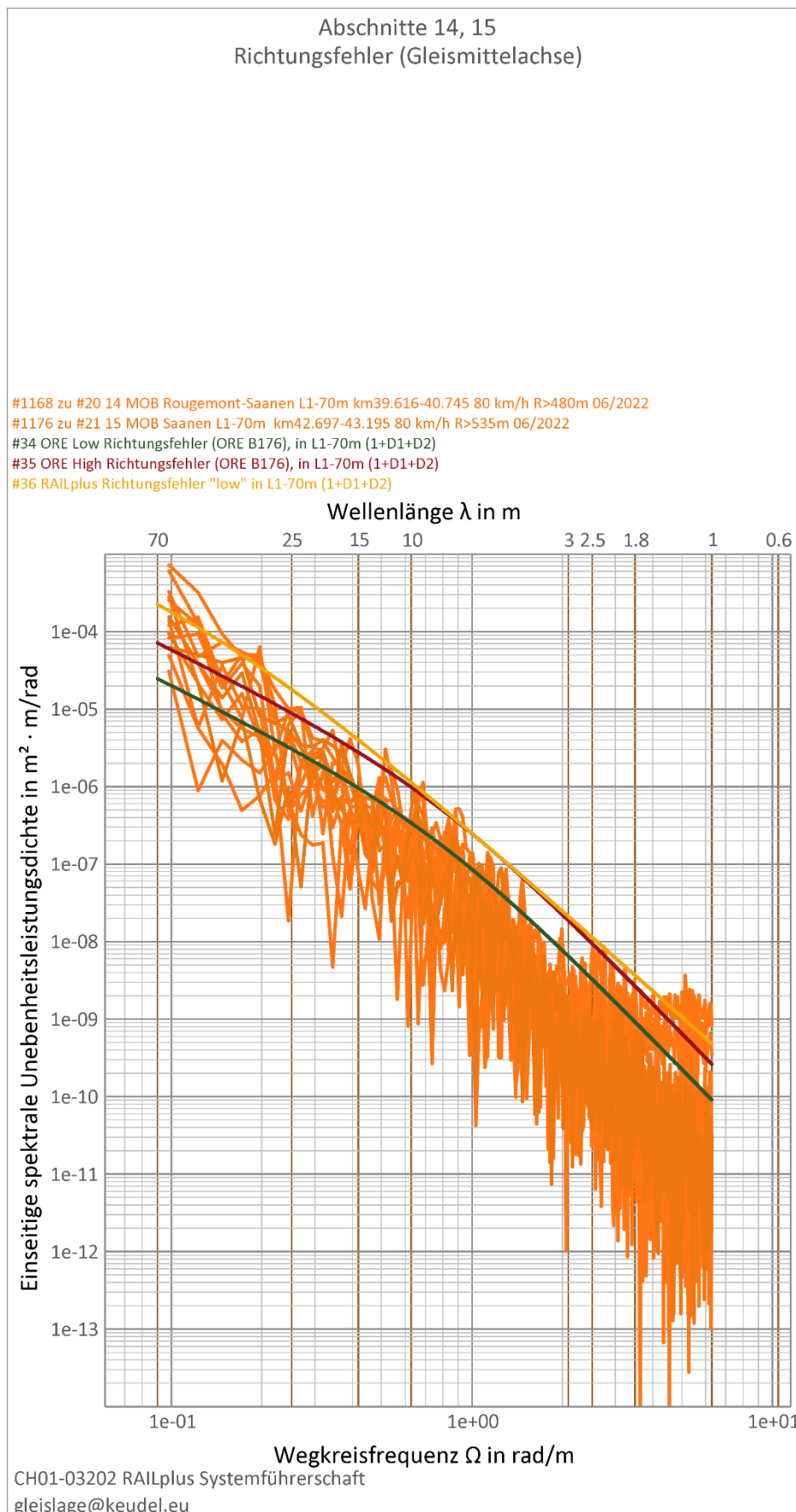


Abbildung 47: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3

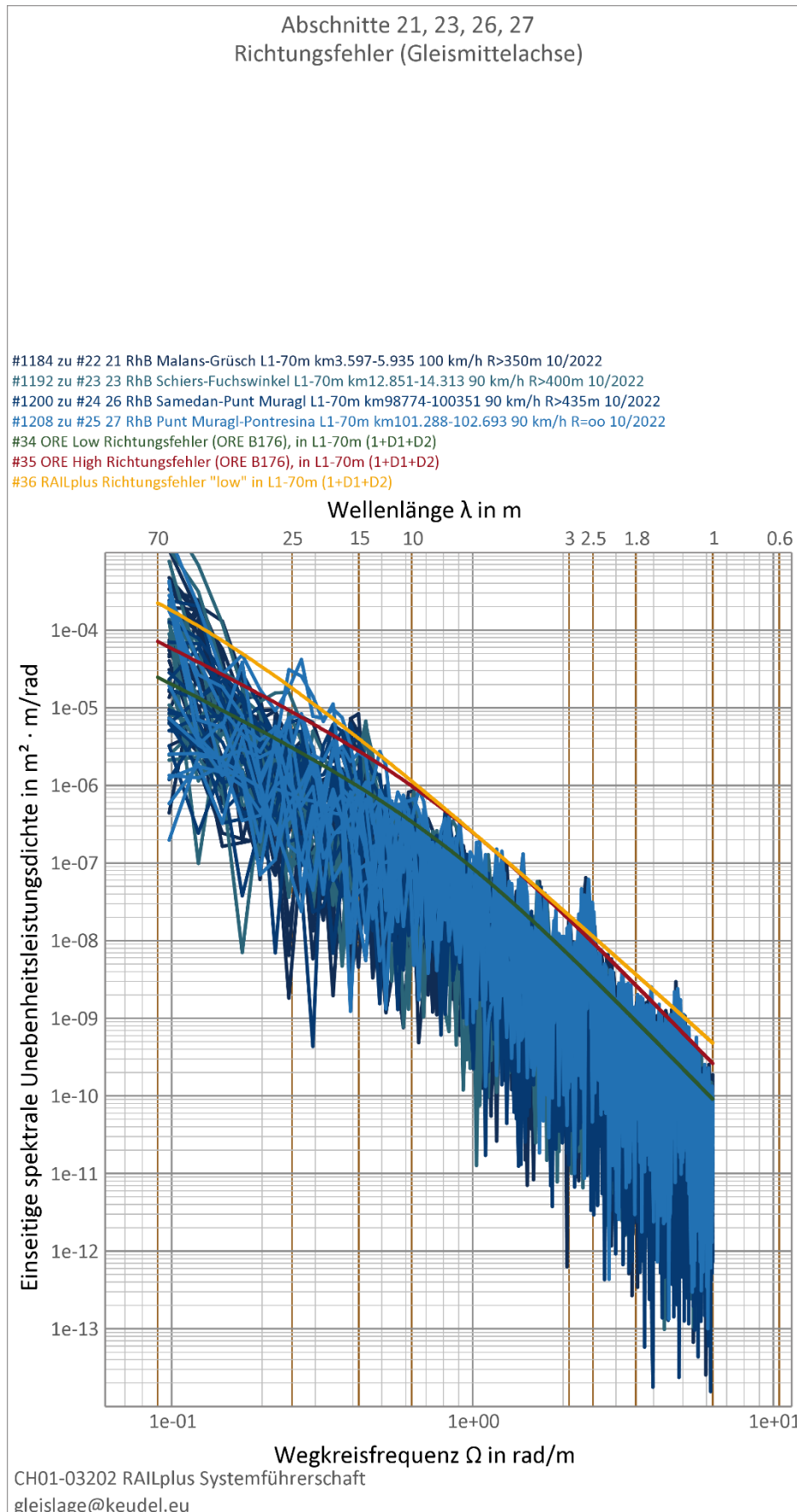


Abbildung 48: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3

8.4.2 Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Längshöhenfehler zu Tabelle 3

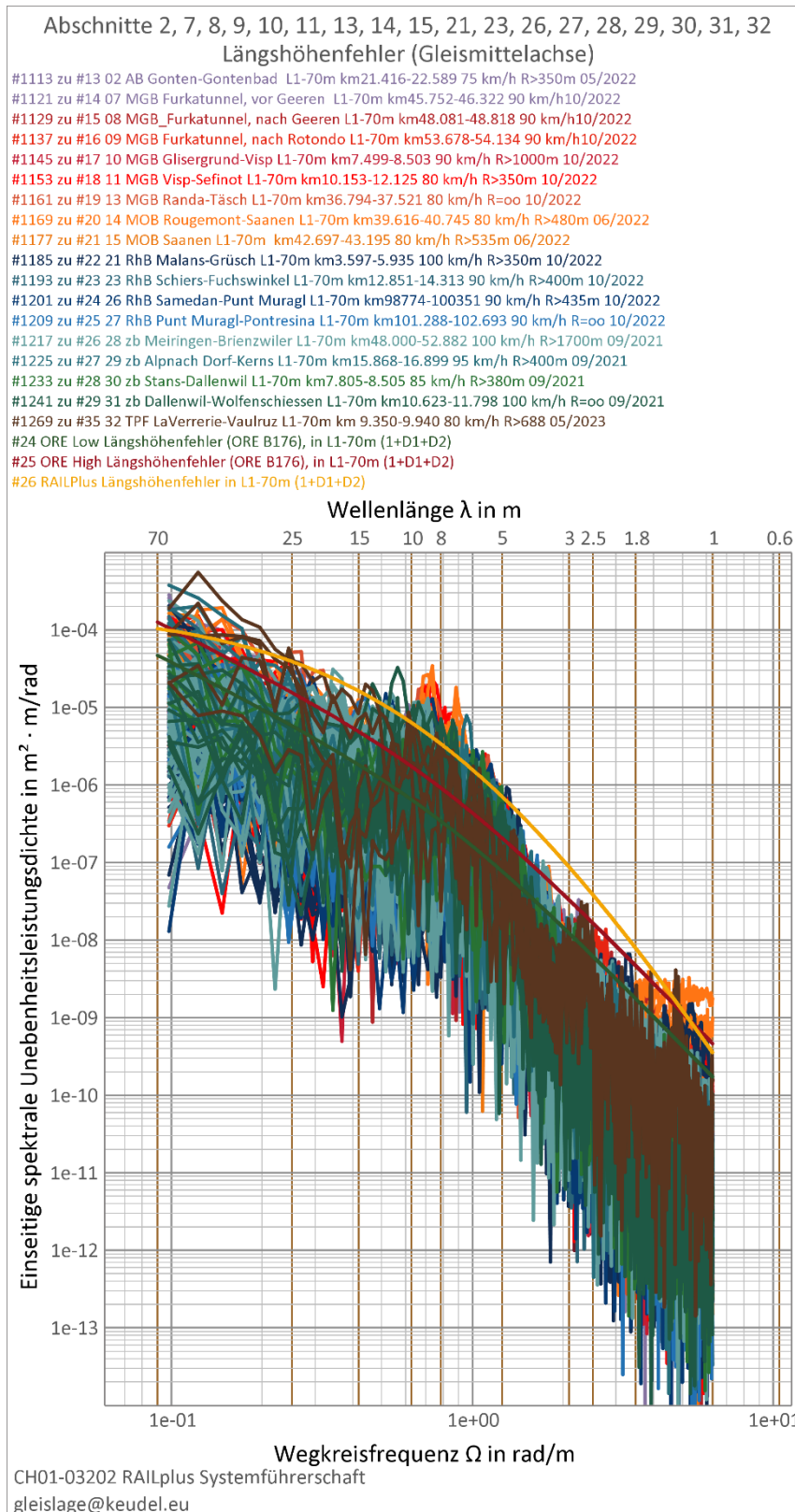


Abbildung 50: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3

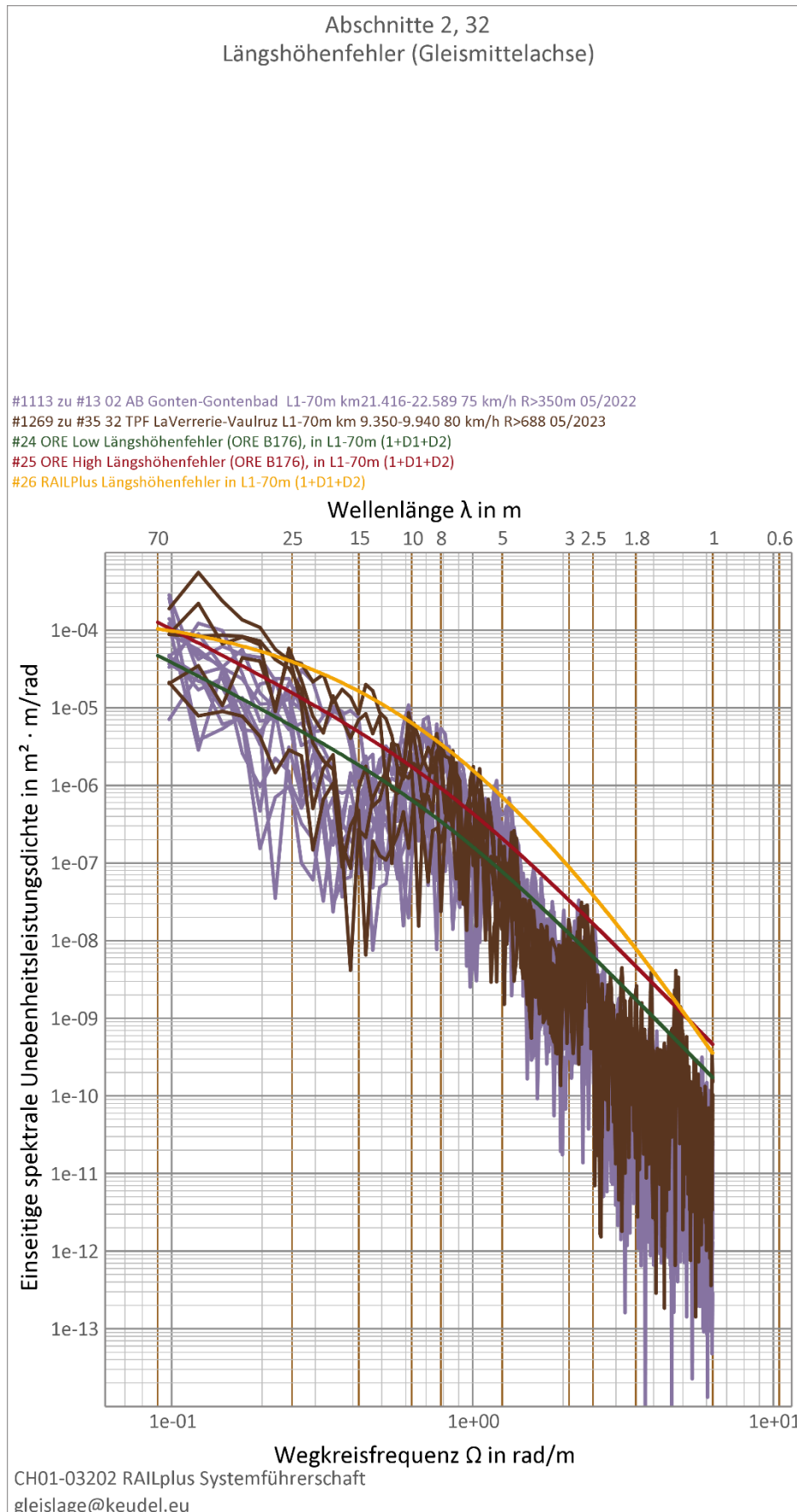


Abbildung 51: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3

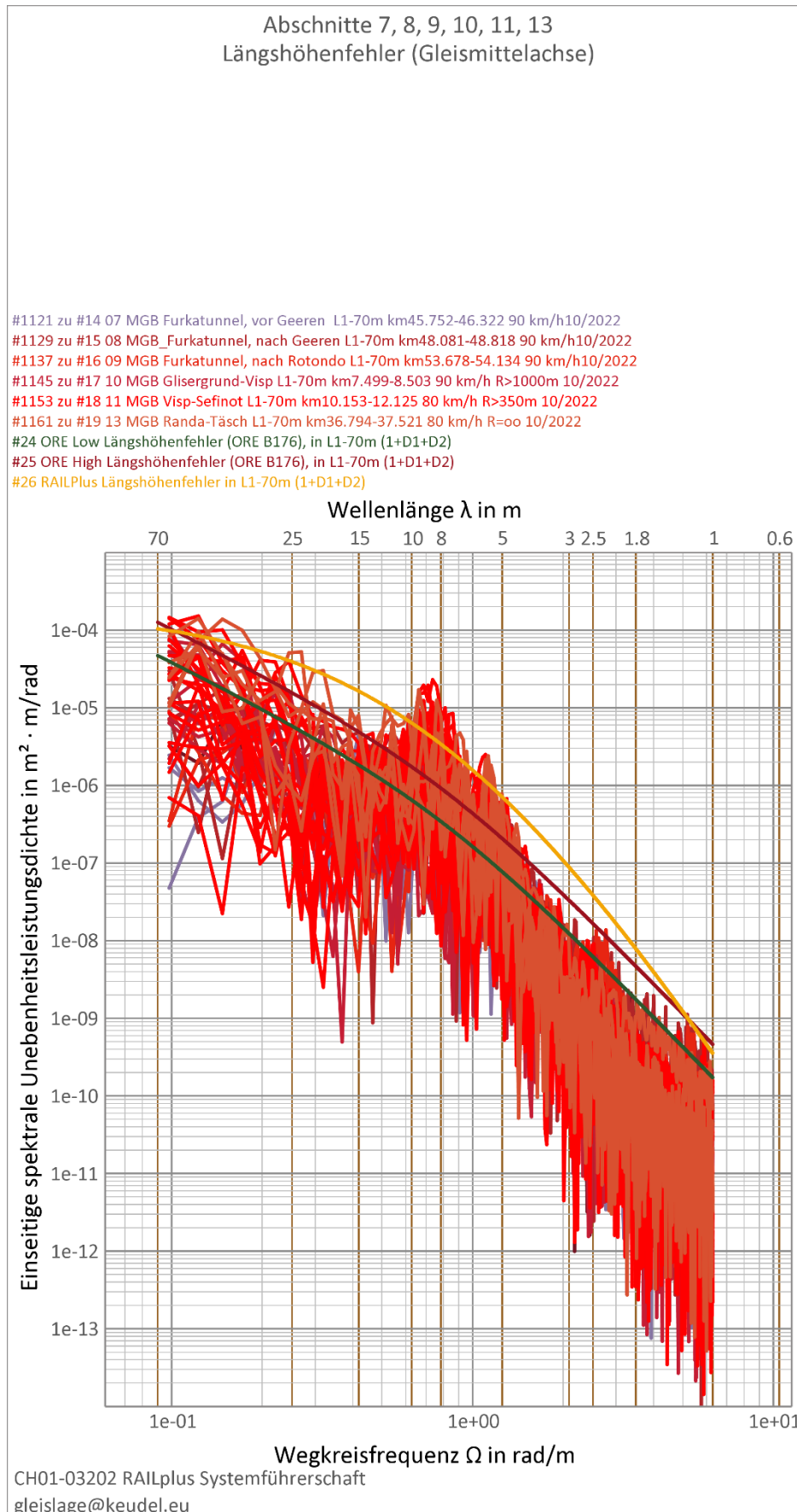


Abbildung 52: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3

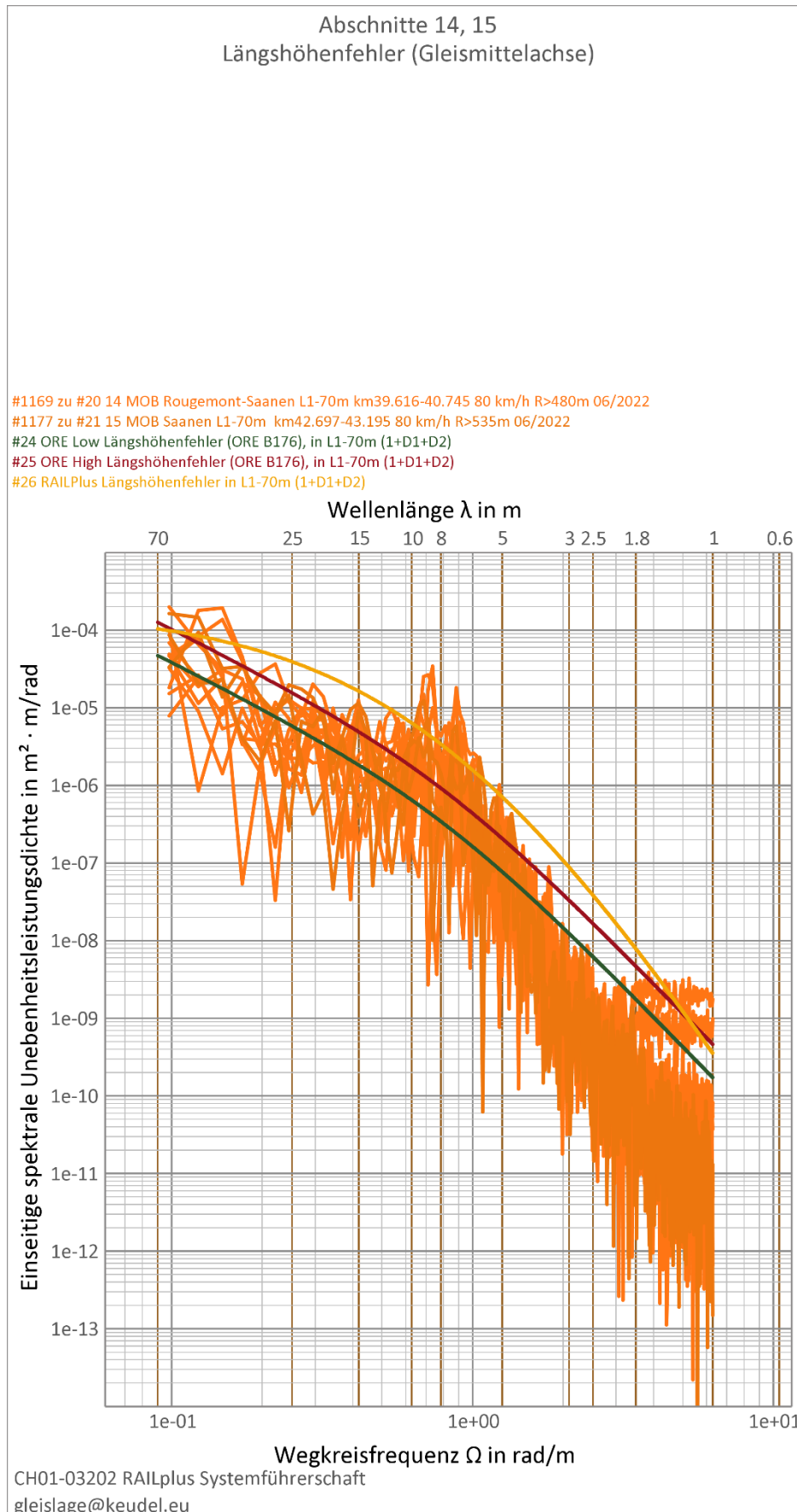


Abbildung 53: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3

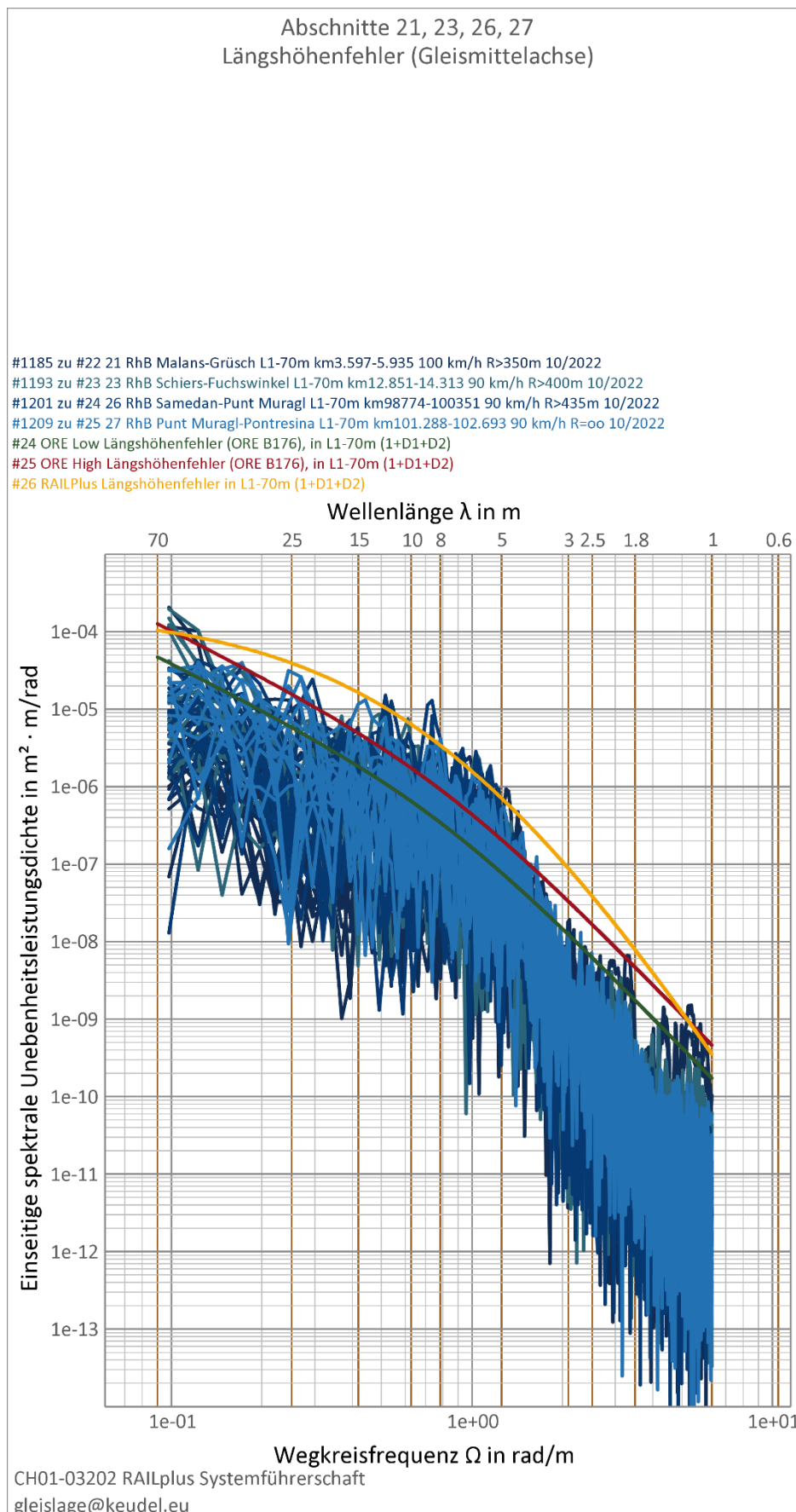


Abbildung 54: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3

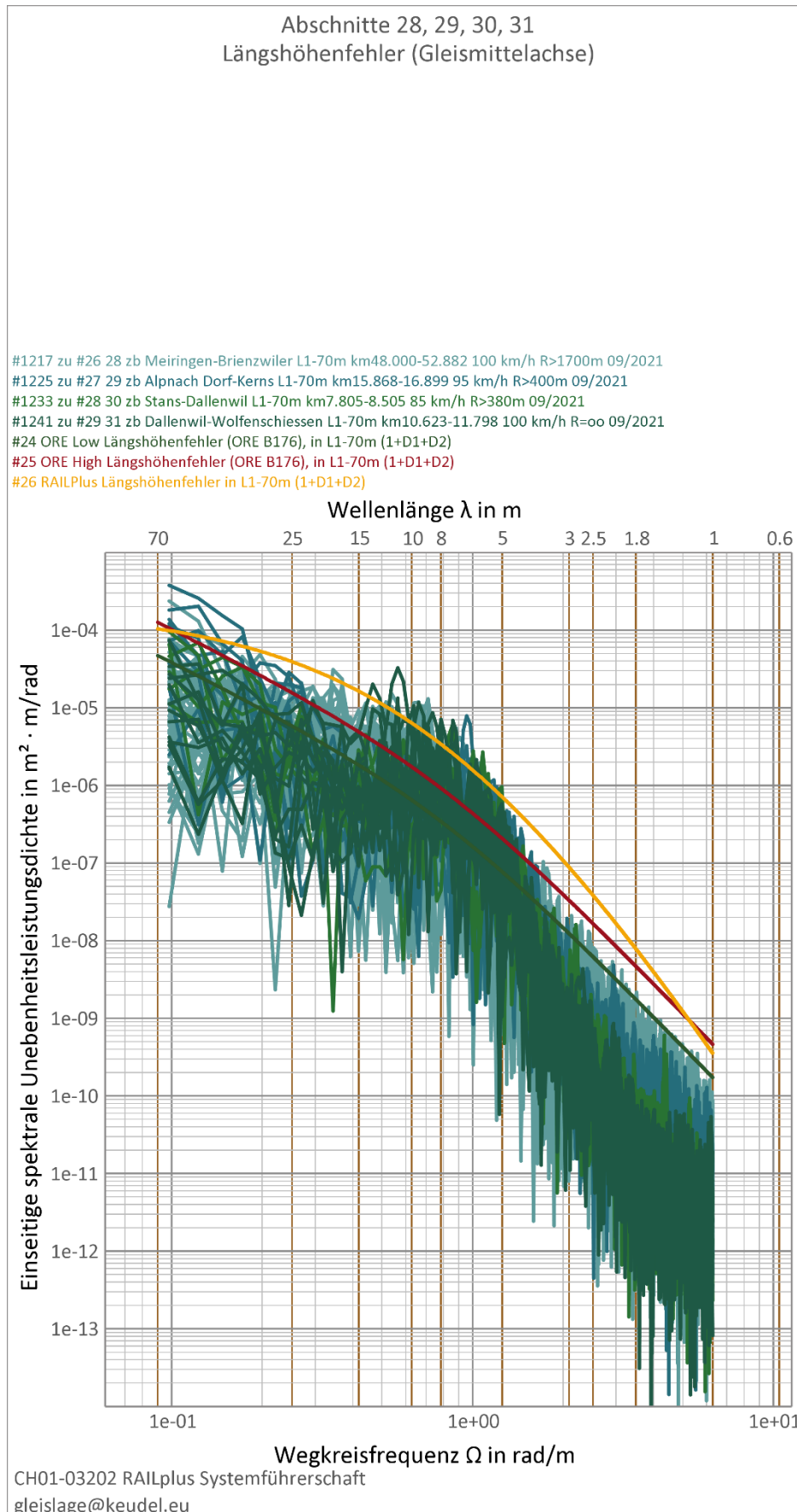


Abbildung 55: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3

8.4.3 Leistungsdichtespektren zum Spurweitenfehler zu Tabelle 3

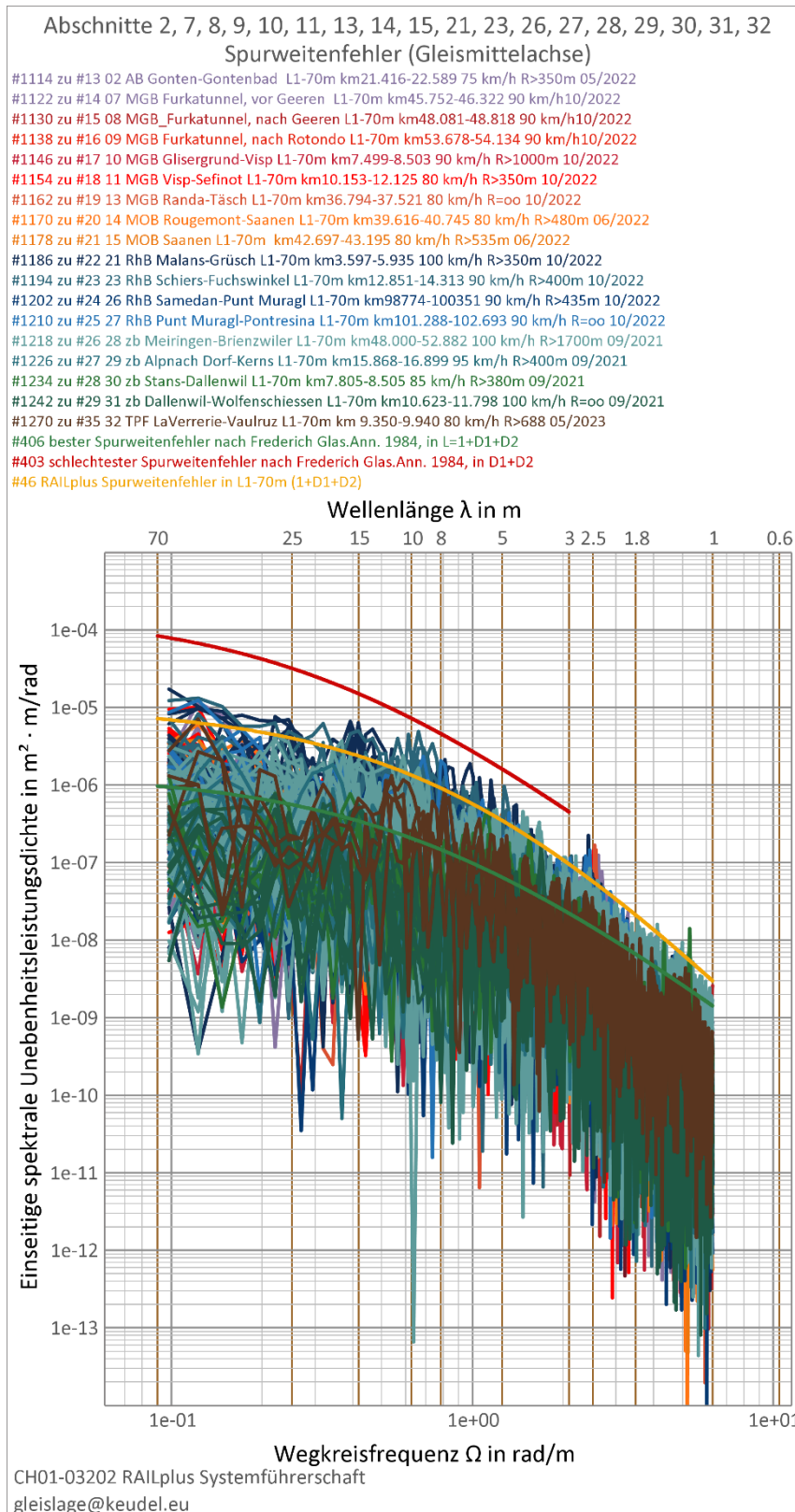


Abbildung 56: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3

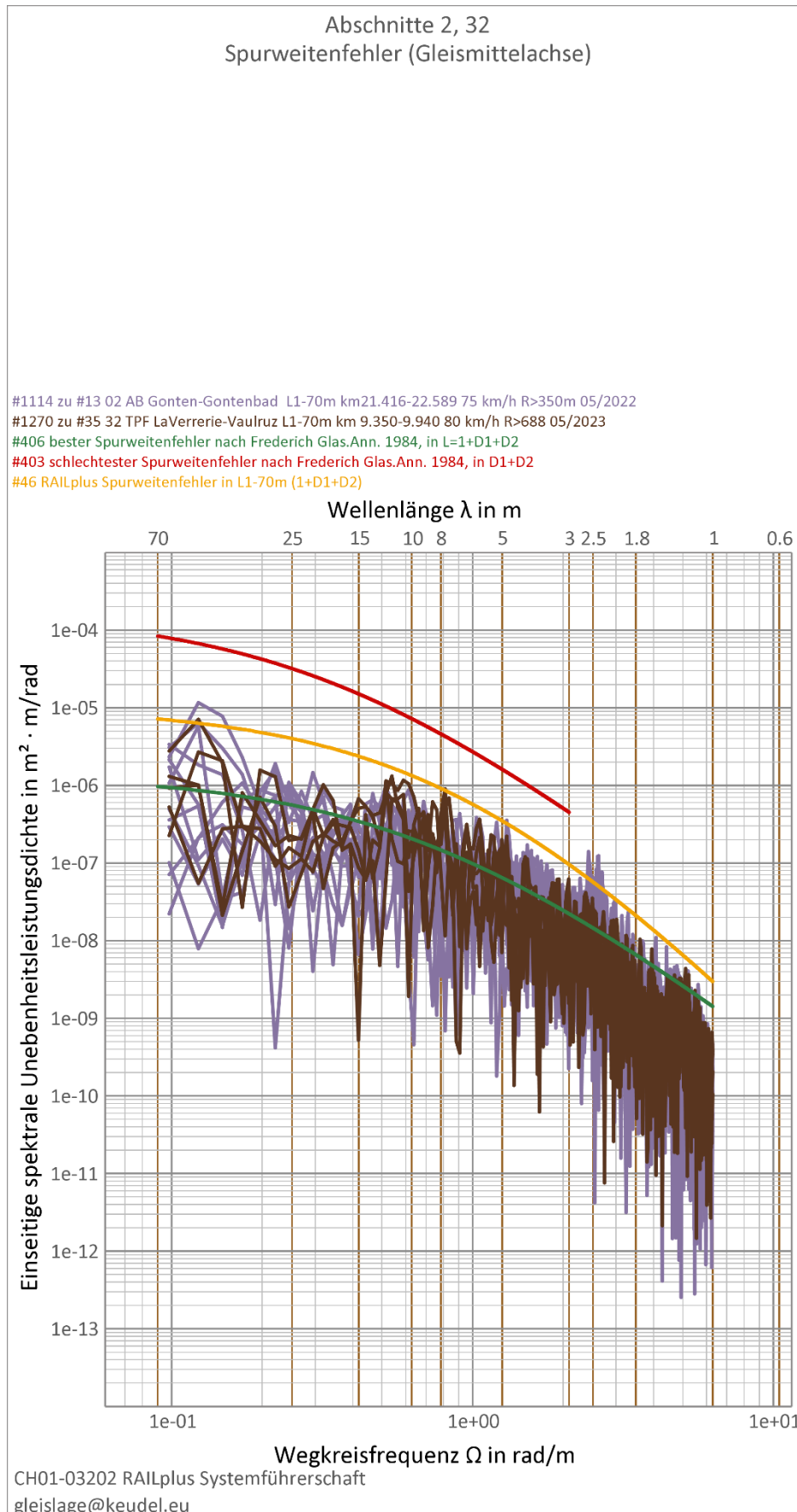


Abbildung 57: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3

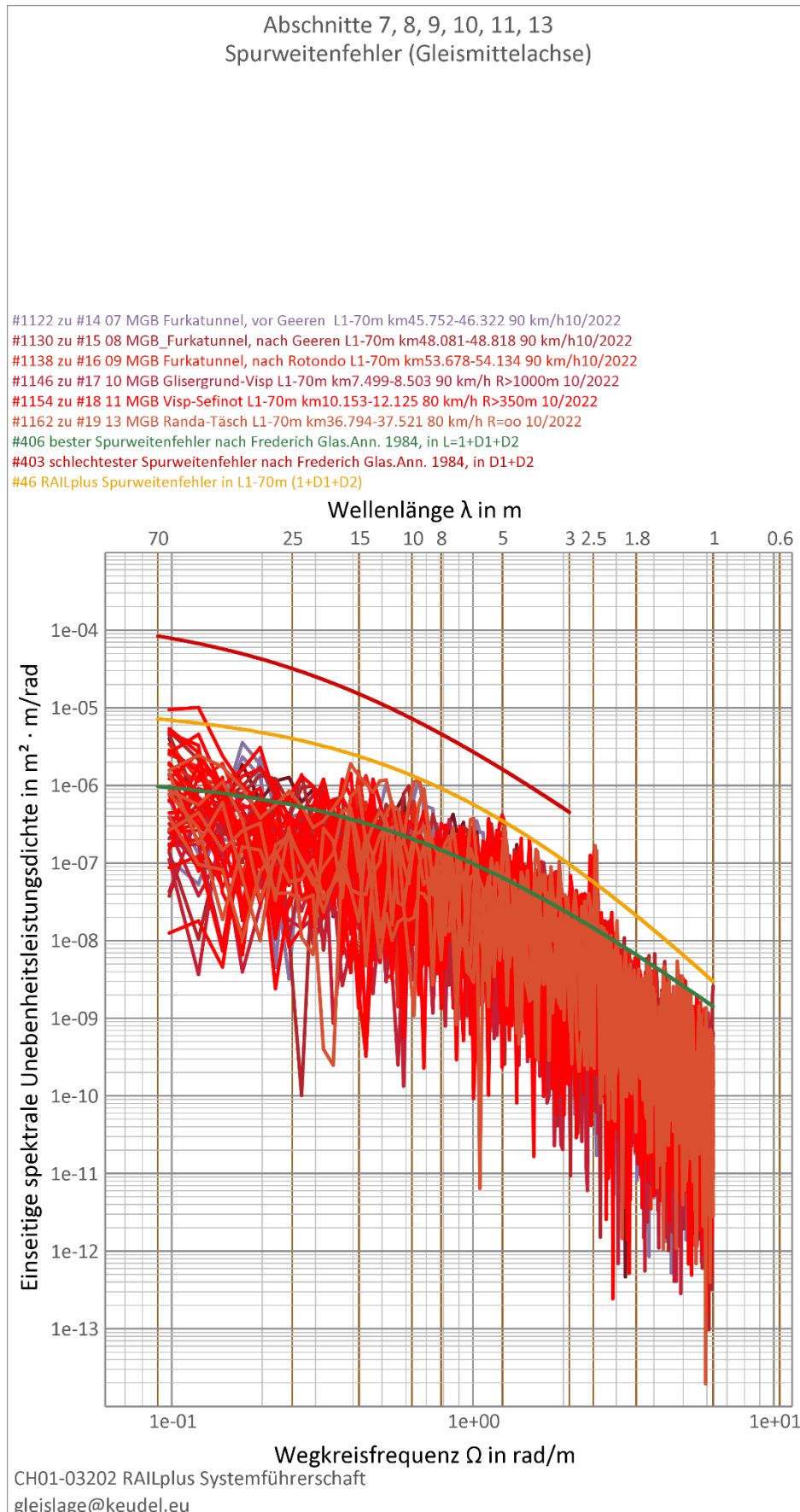


Abbildung 58: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3

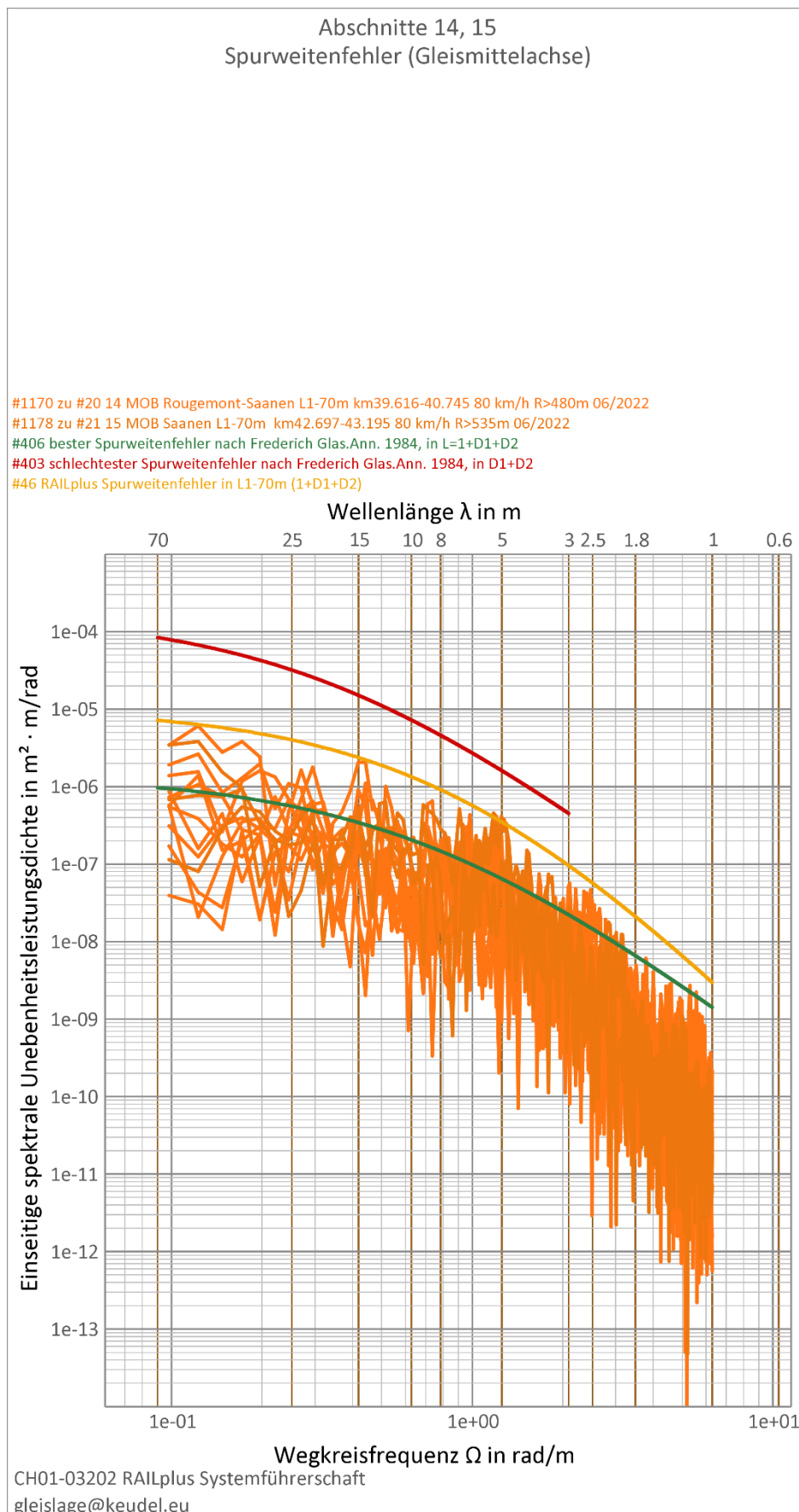


Abbildung 59: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3

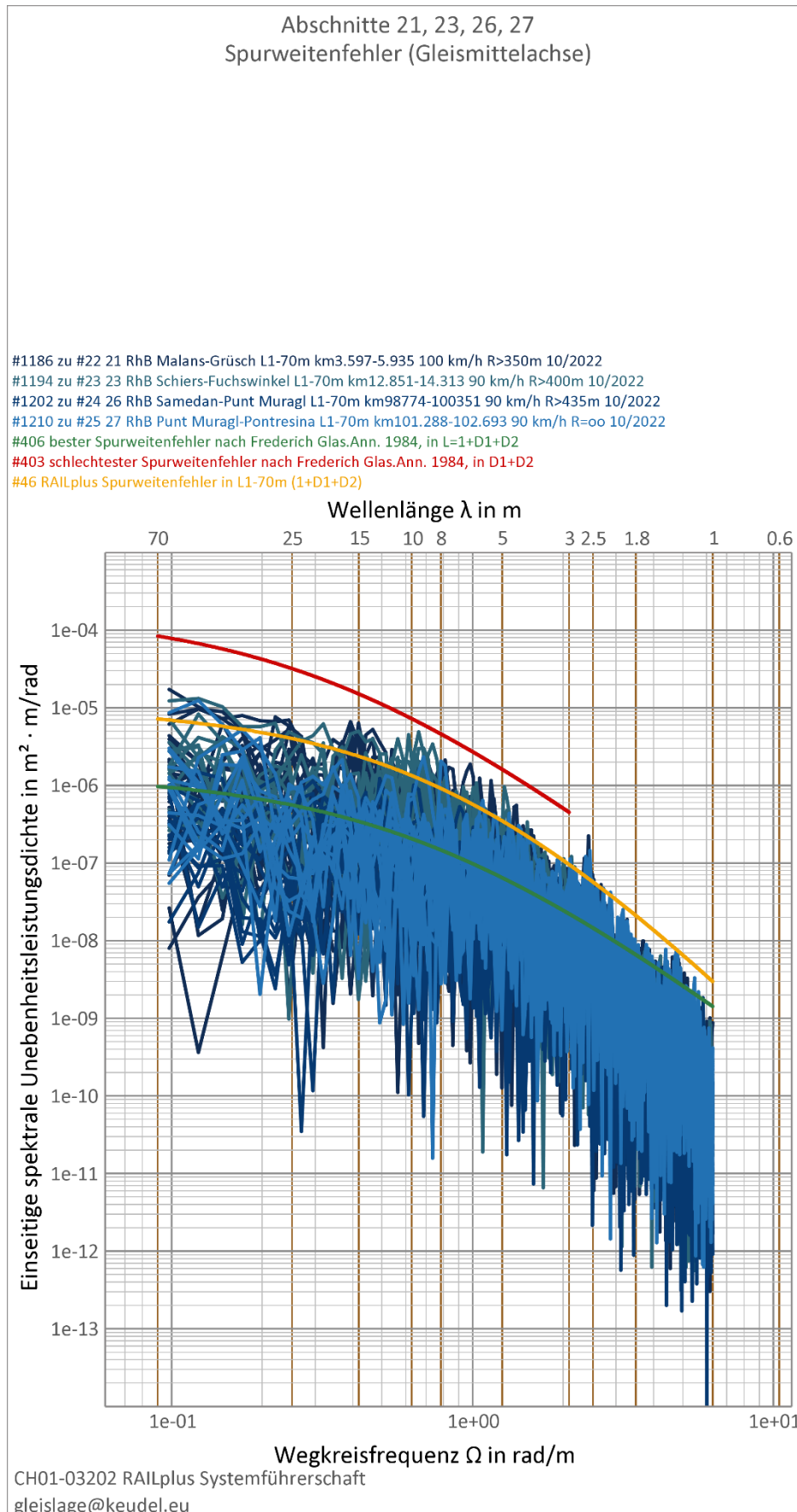


Abbildung 60: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3

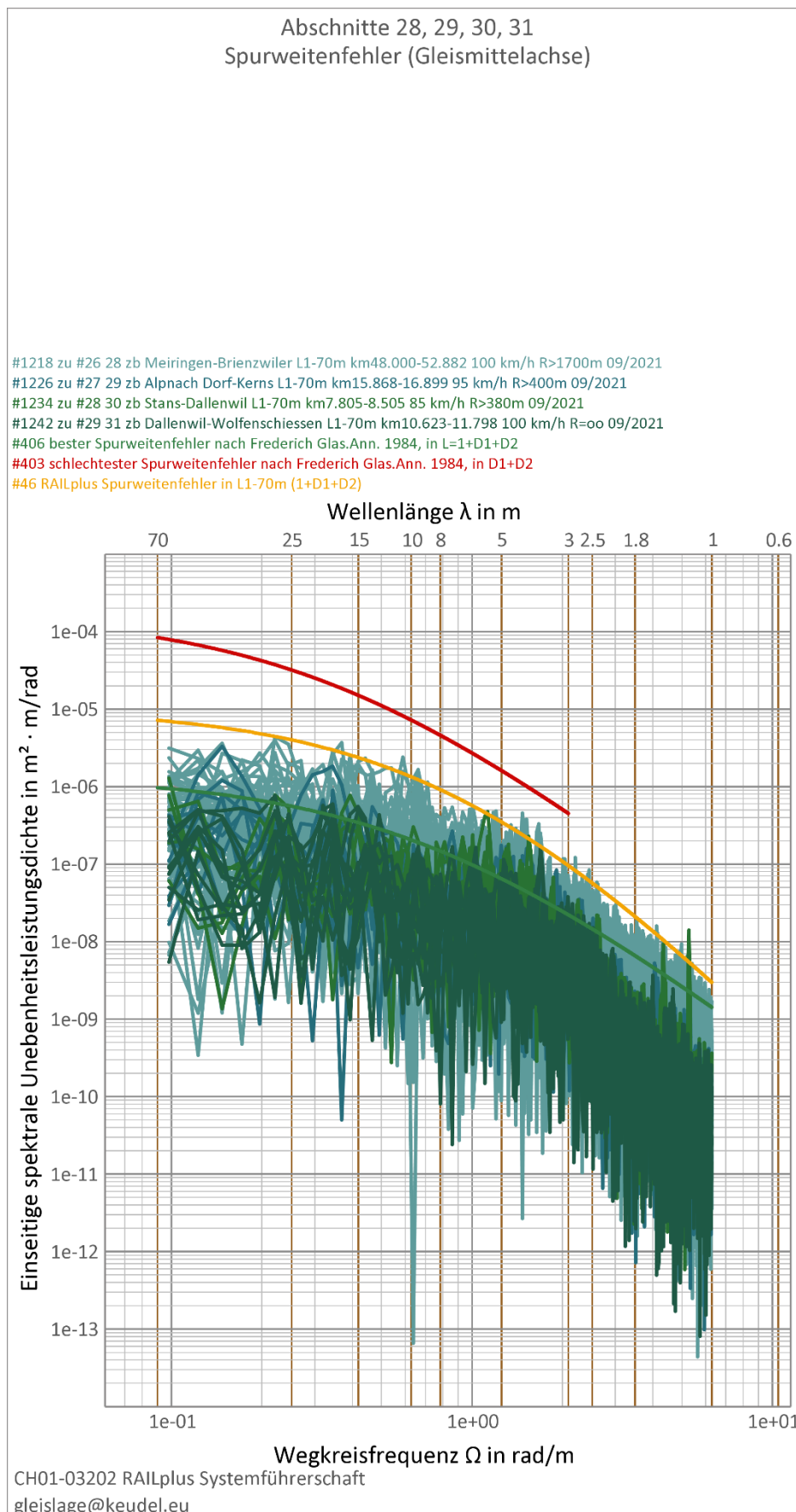


Abbildung 61: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3

8.4.4 Leistungsdichtespektren zum Querhöhenfehler zu Tabelle 3

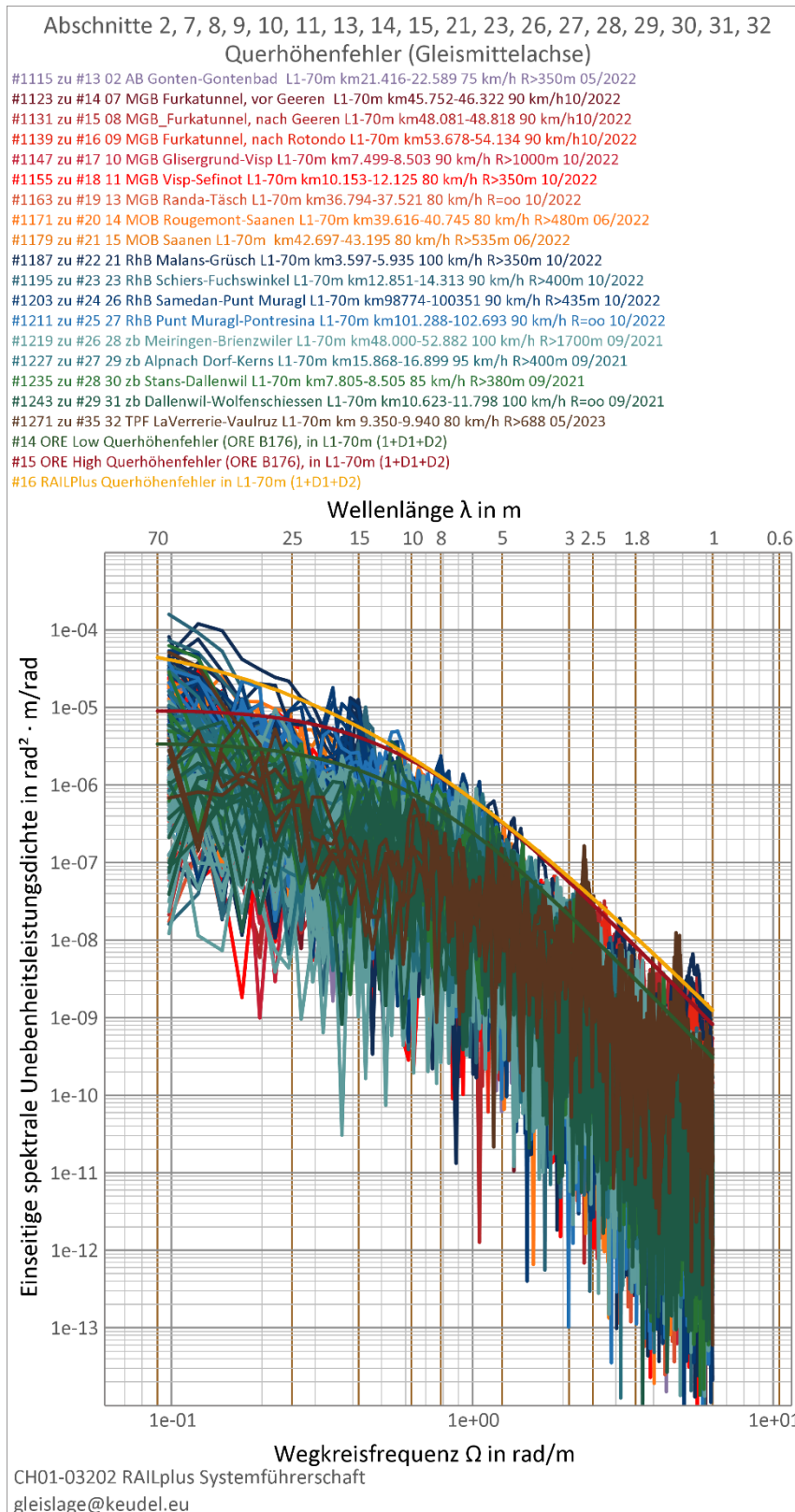


Abbildung 62: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 3

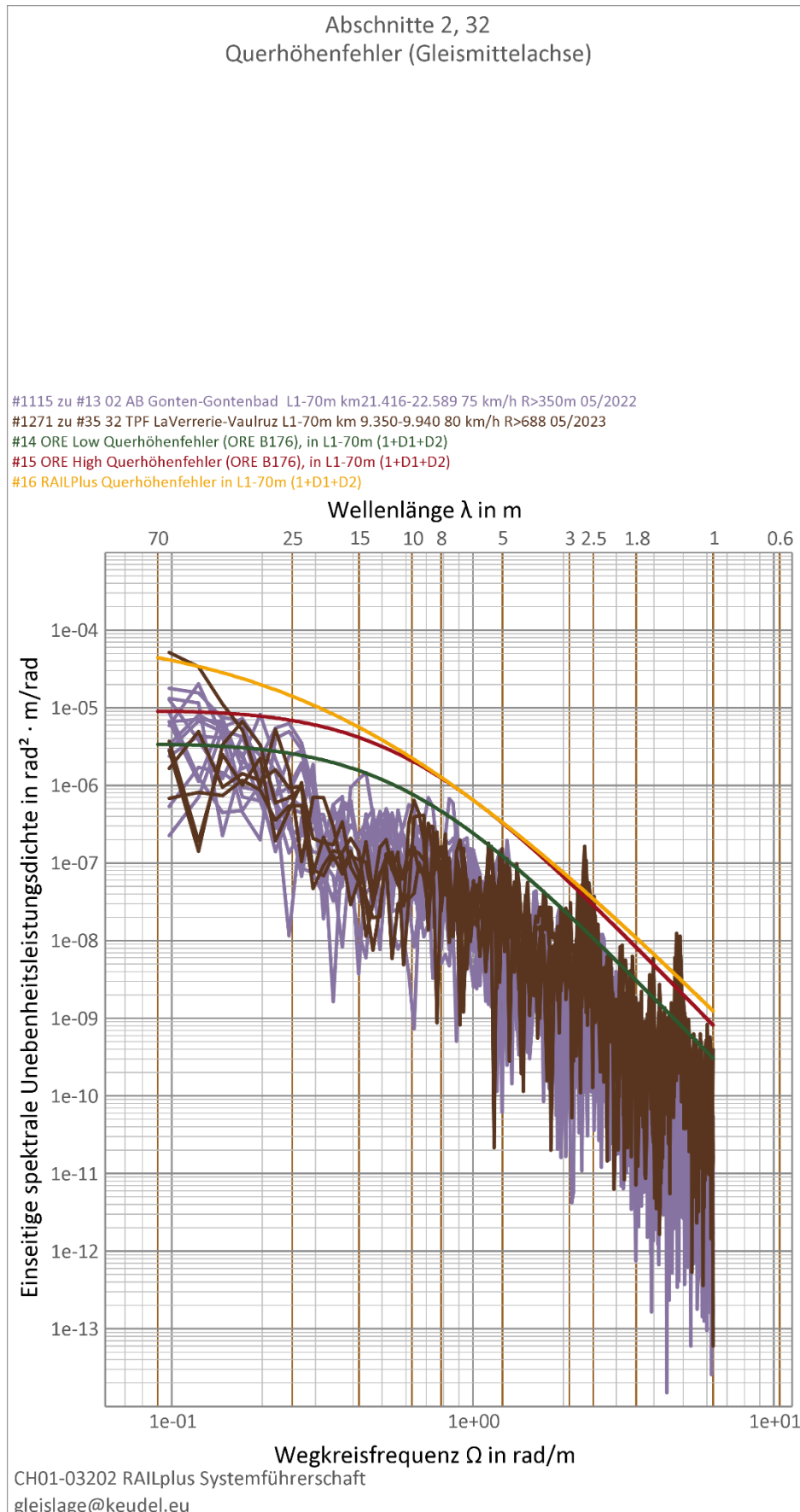


Abbildung 63: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 2 und 32 aus Tabelle 3

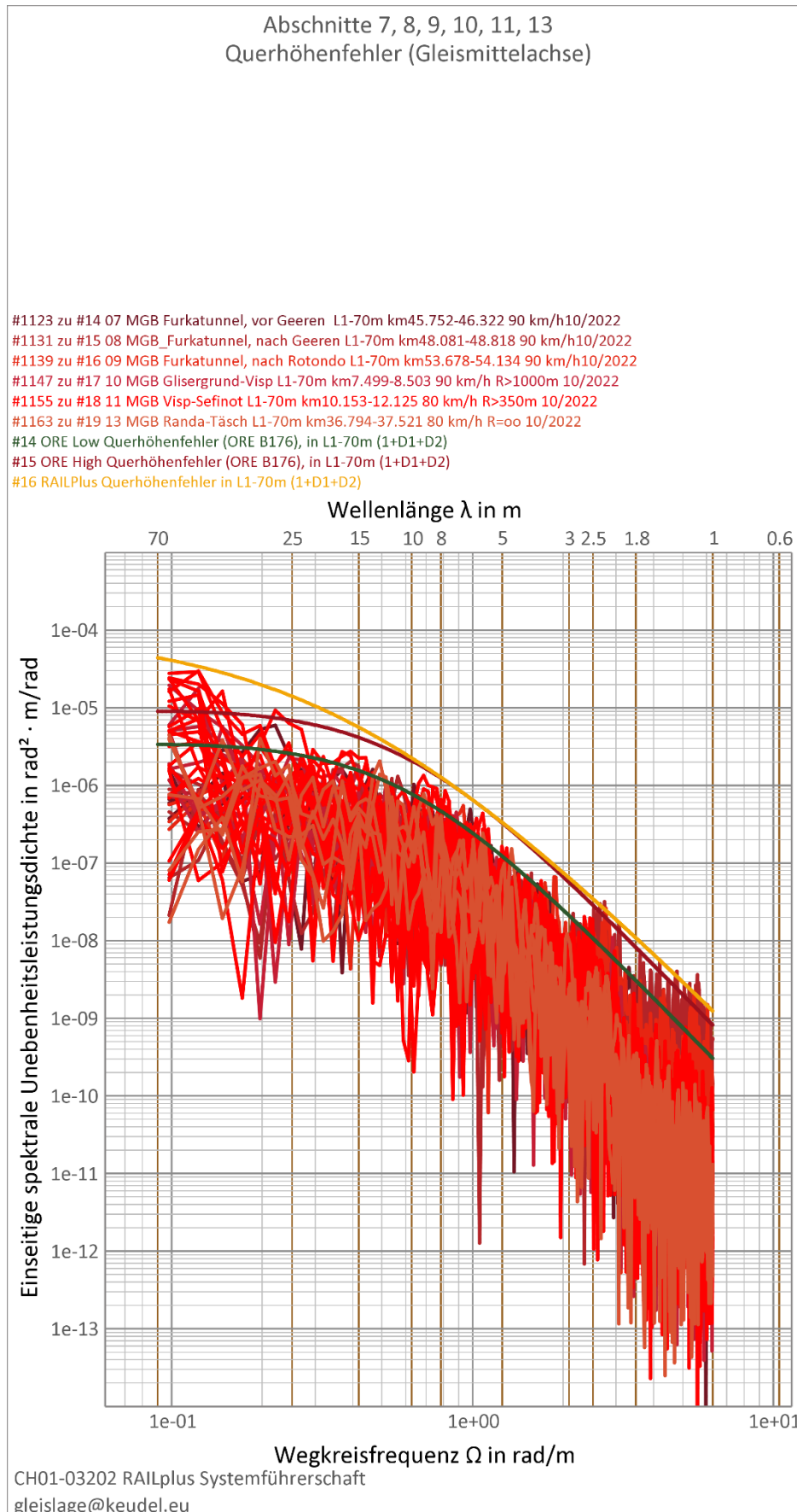


Abbildung 64: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 7 bis 13 aus Tabelle 3

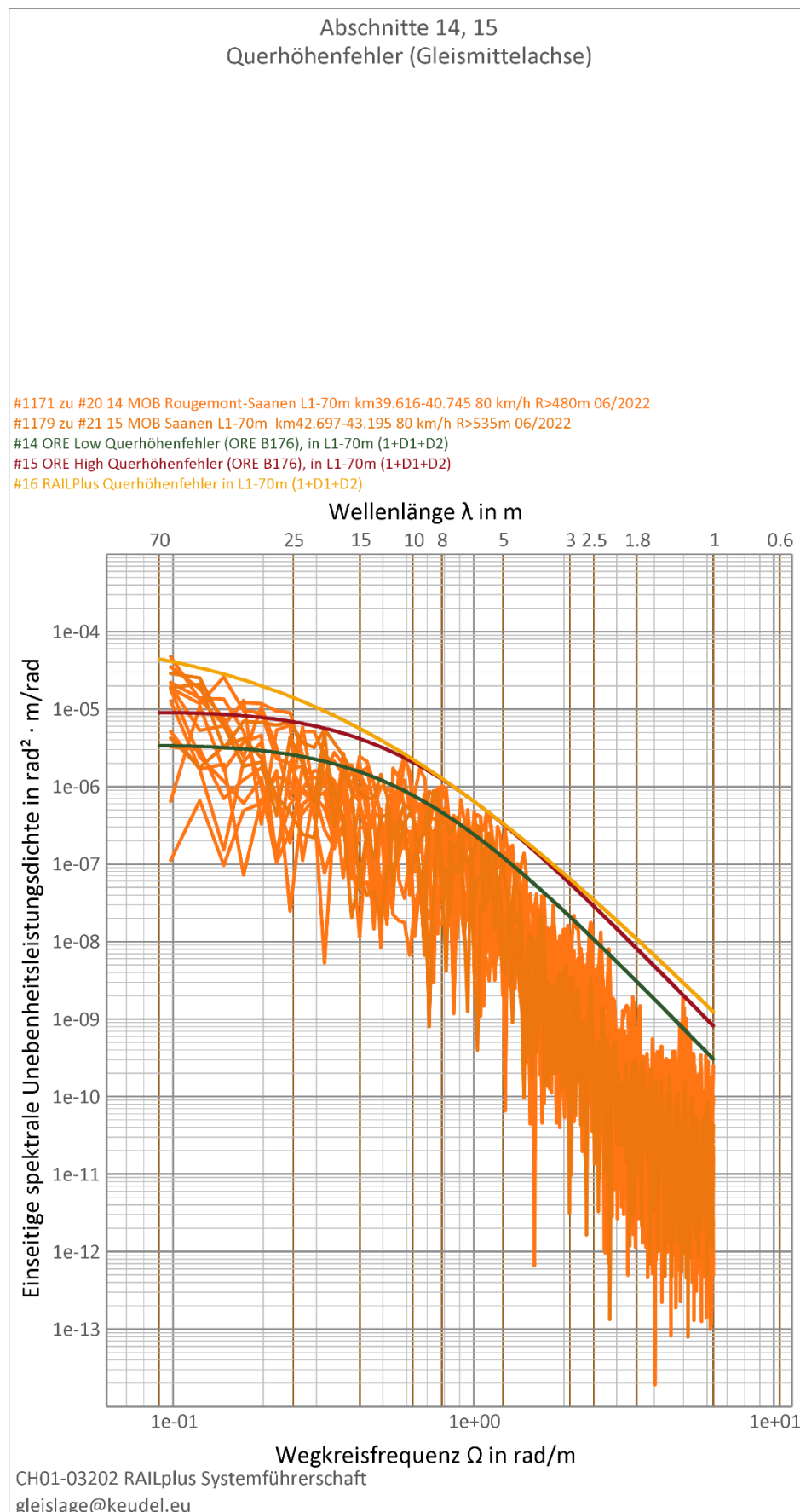


Abbildung 65: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 14 und 15 aus Tabelle 3

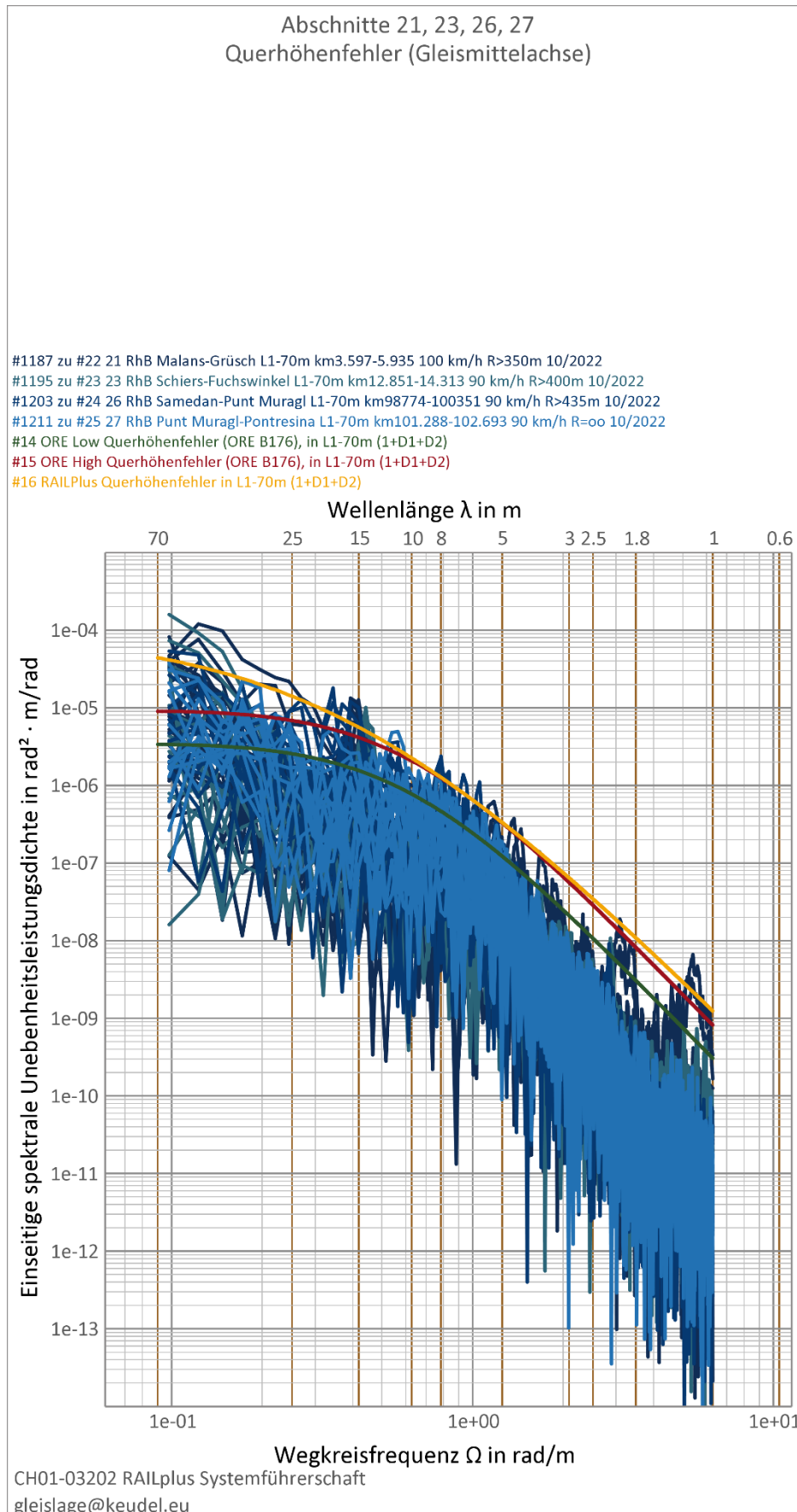


Abbildung 66: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 21 bis 27 aus Tabelle 3

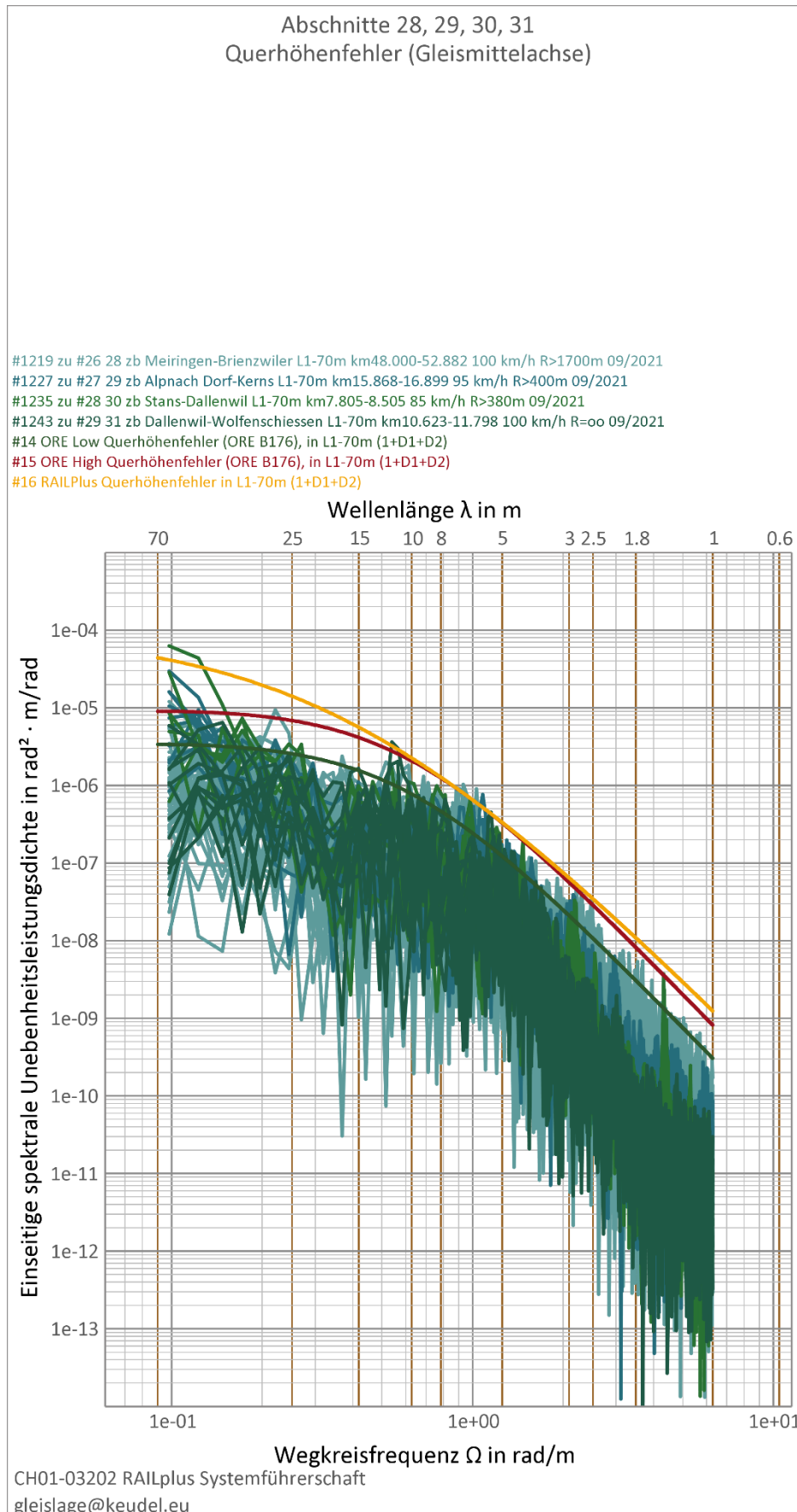


Abbildung 67: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten 28 bis 31 aus Tabelle 3

8.5 Grafische Darstellungen zu Leistungsdichtespektren (PSD) zu Tabelle 4 (Bogenfahrt mit mindestens 60 km/h)

8.5.1 Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Richtungsfehler zu Tabelle 4

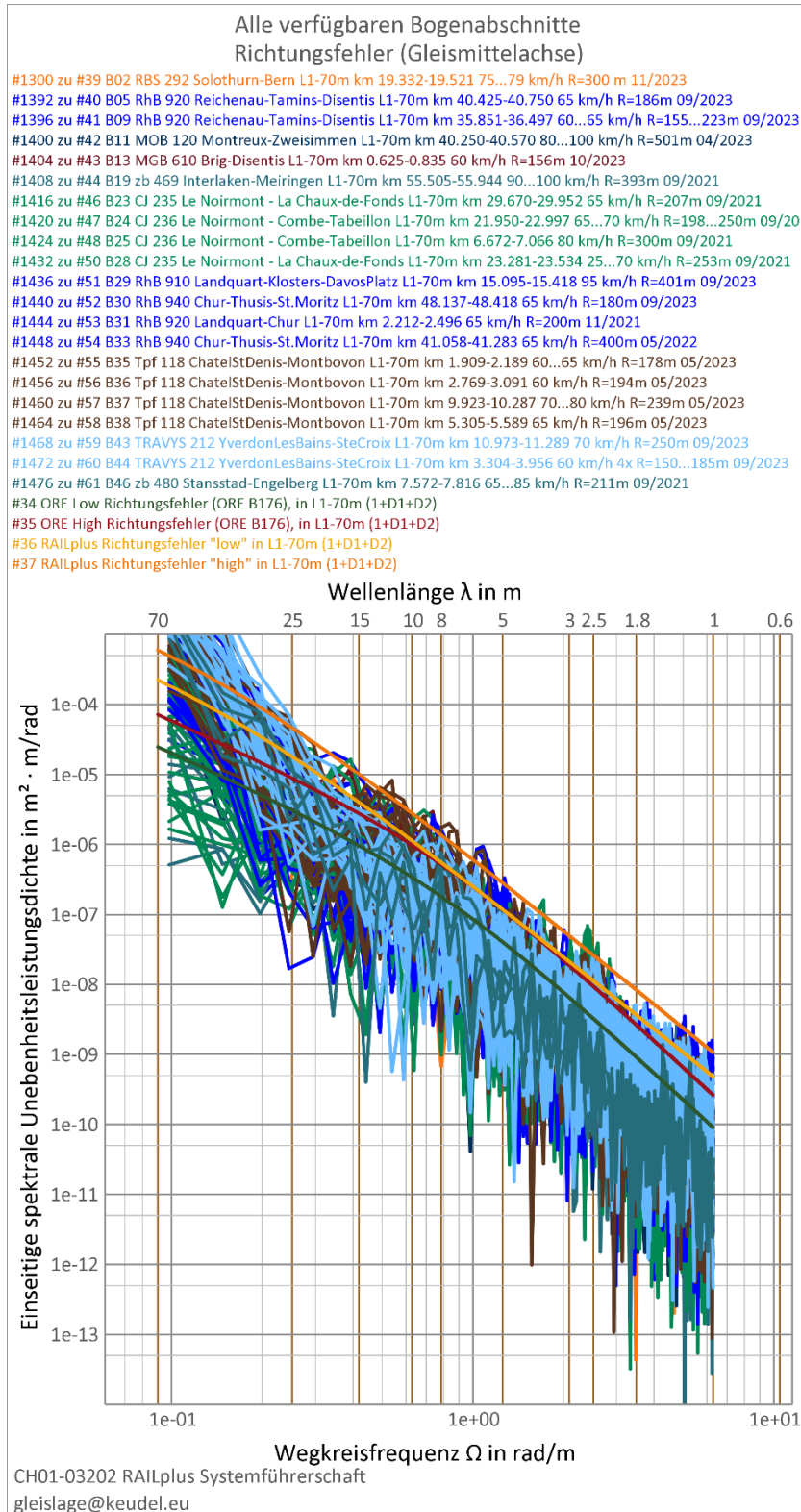


Abbildung 68: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4

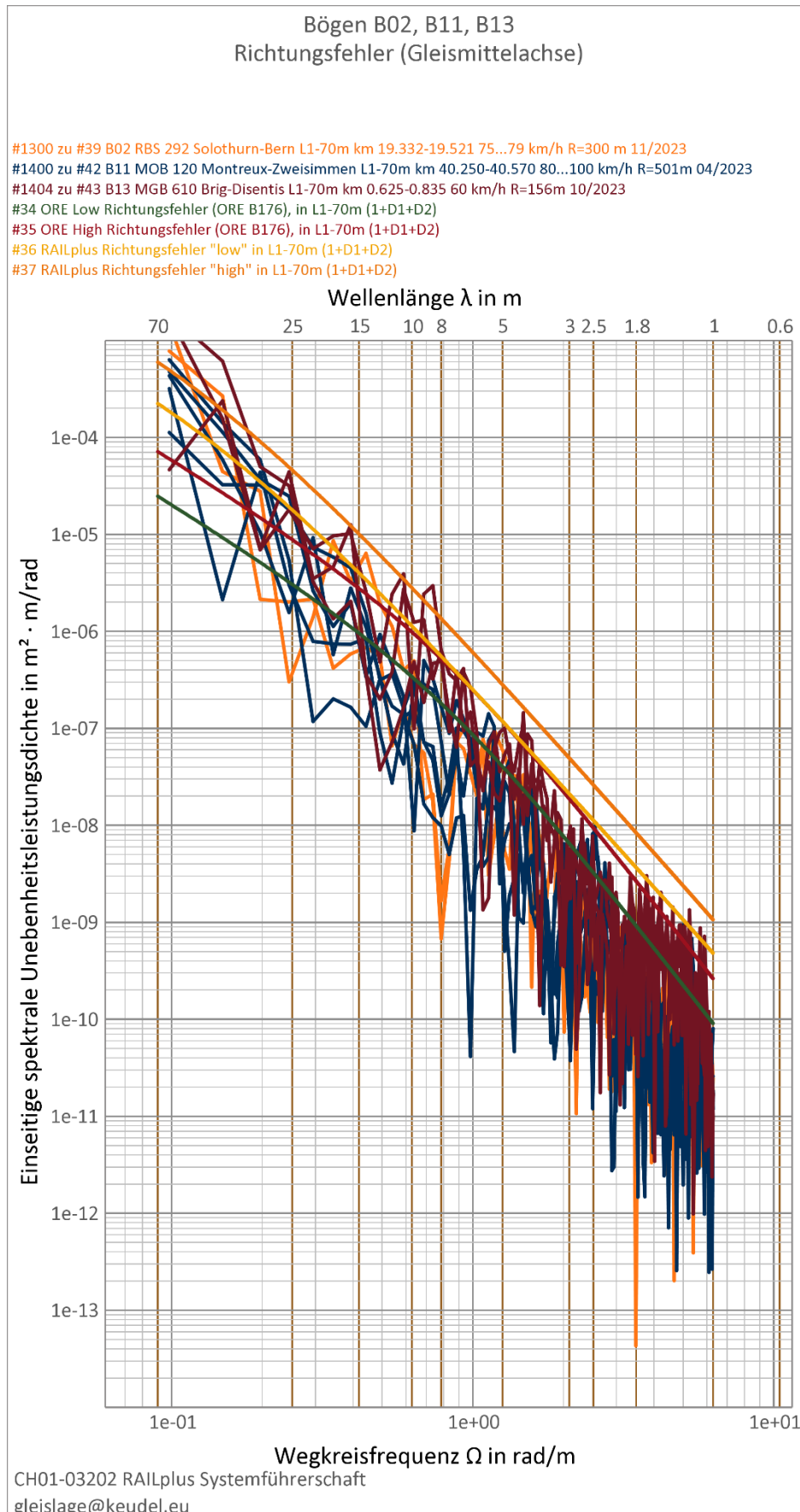


Abbildung 69: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4

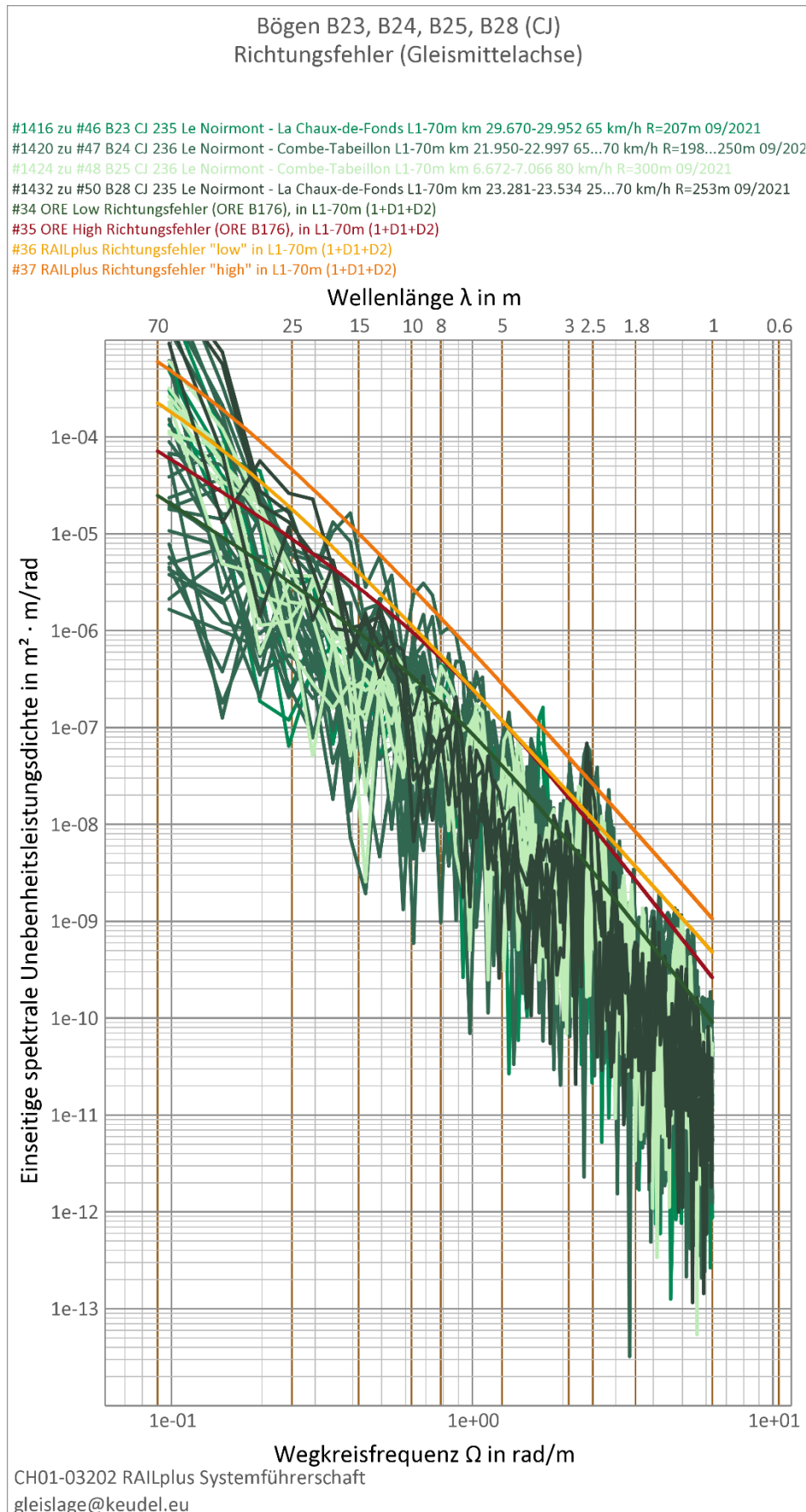


Abbildung 70: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4

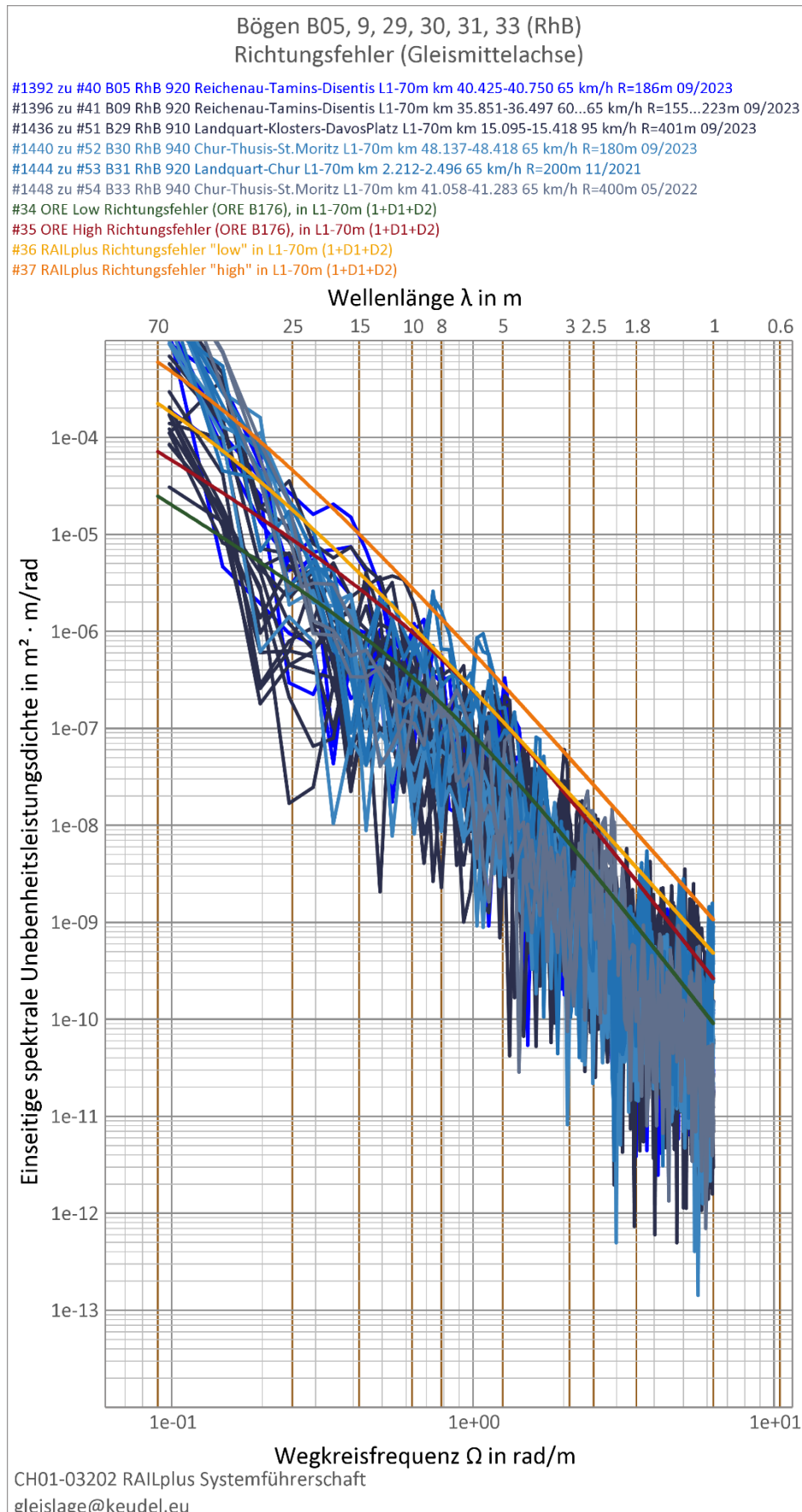


Abbildung 71: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4

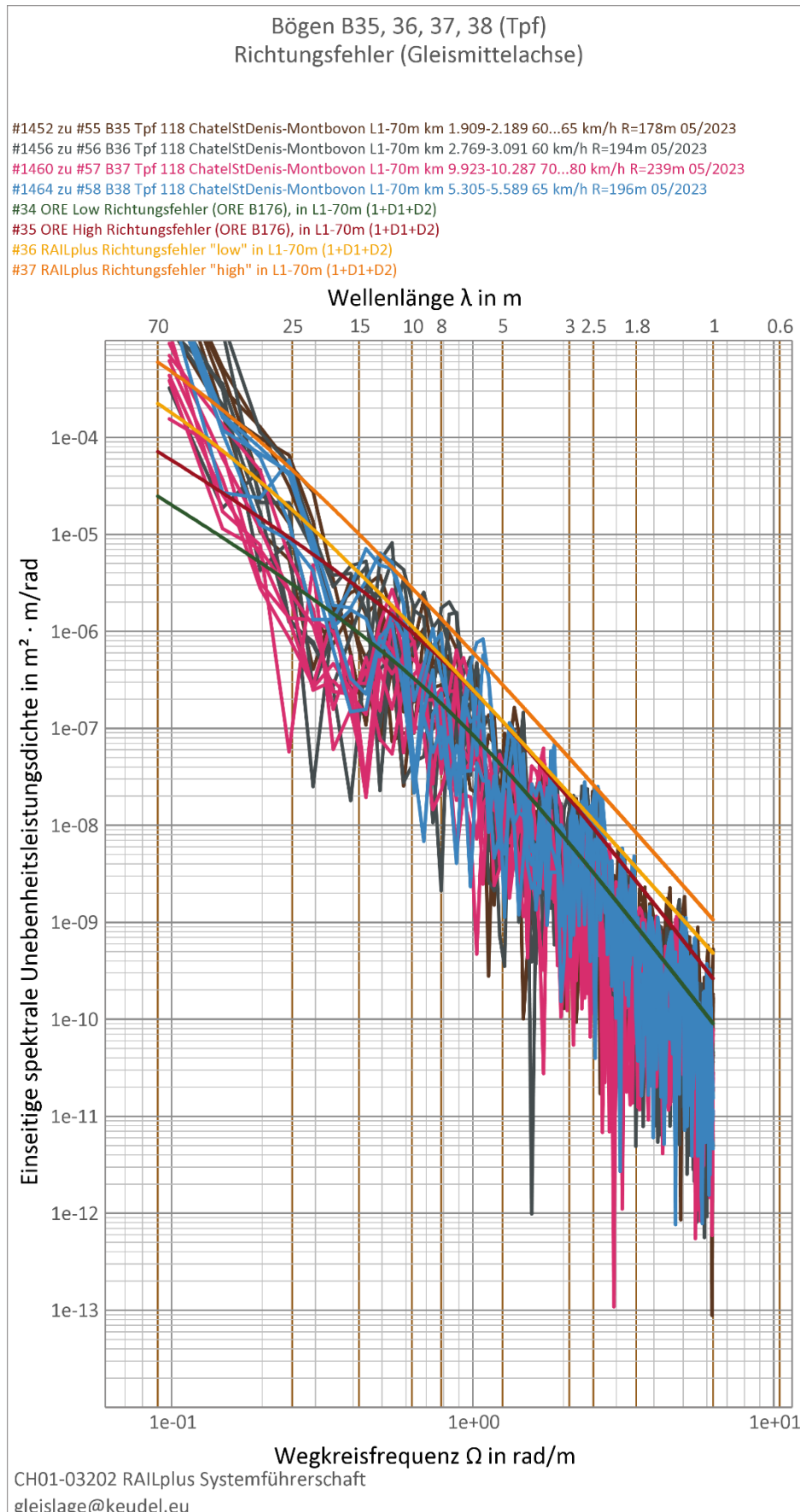


Abbildung 72: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4

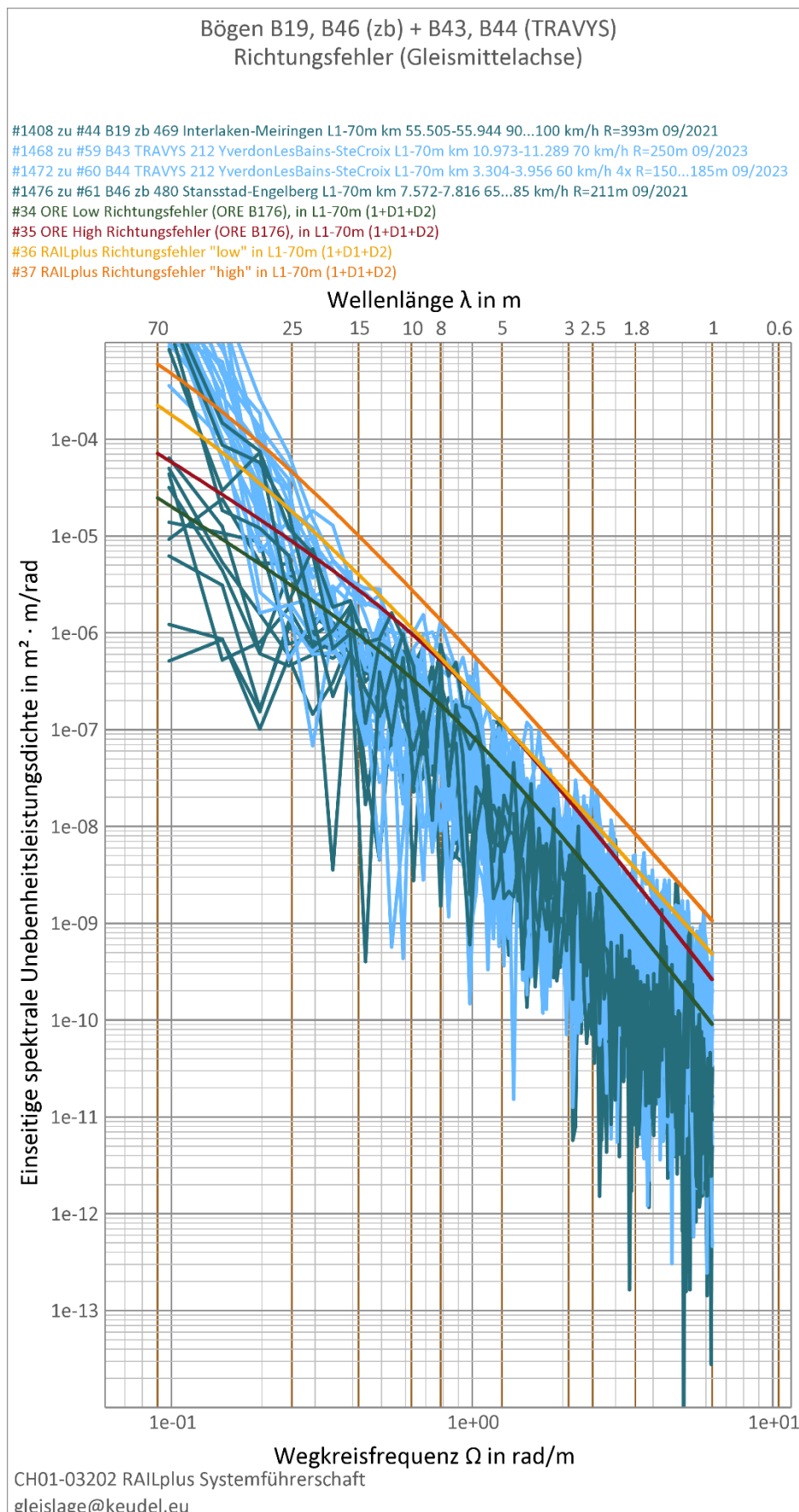


Abbildung 73: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Richtungsfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4

8.5.2 Leistungsdichtespektren zum gleisachsenbezogenen Längshöhenfehler zu Tabelle 4

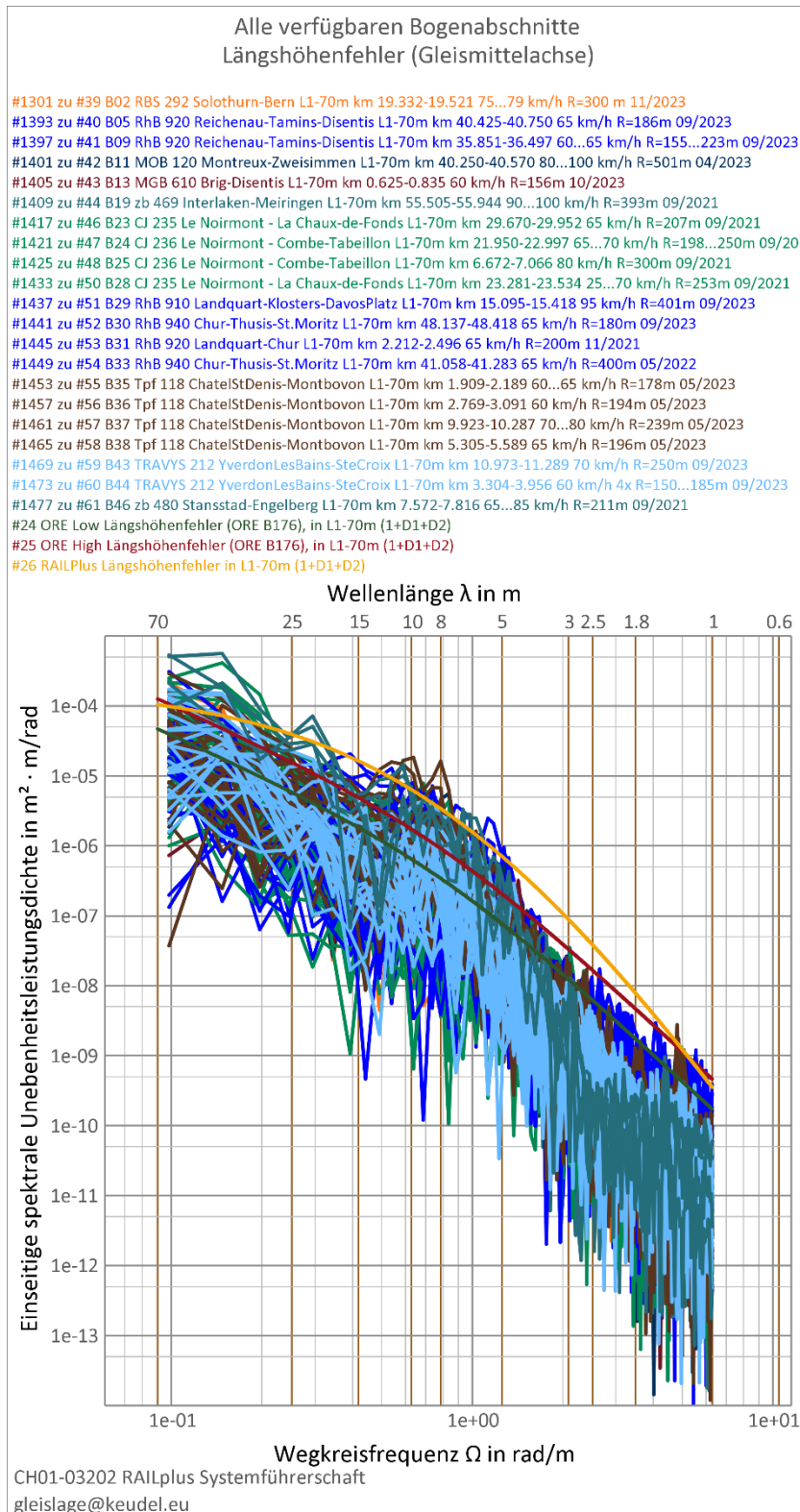


Abbildung 74: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4

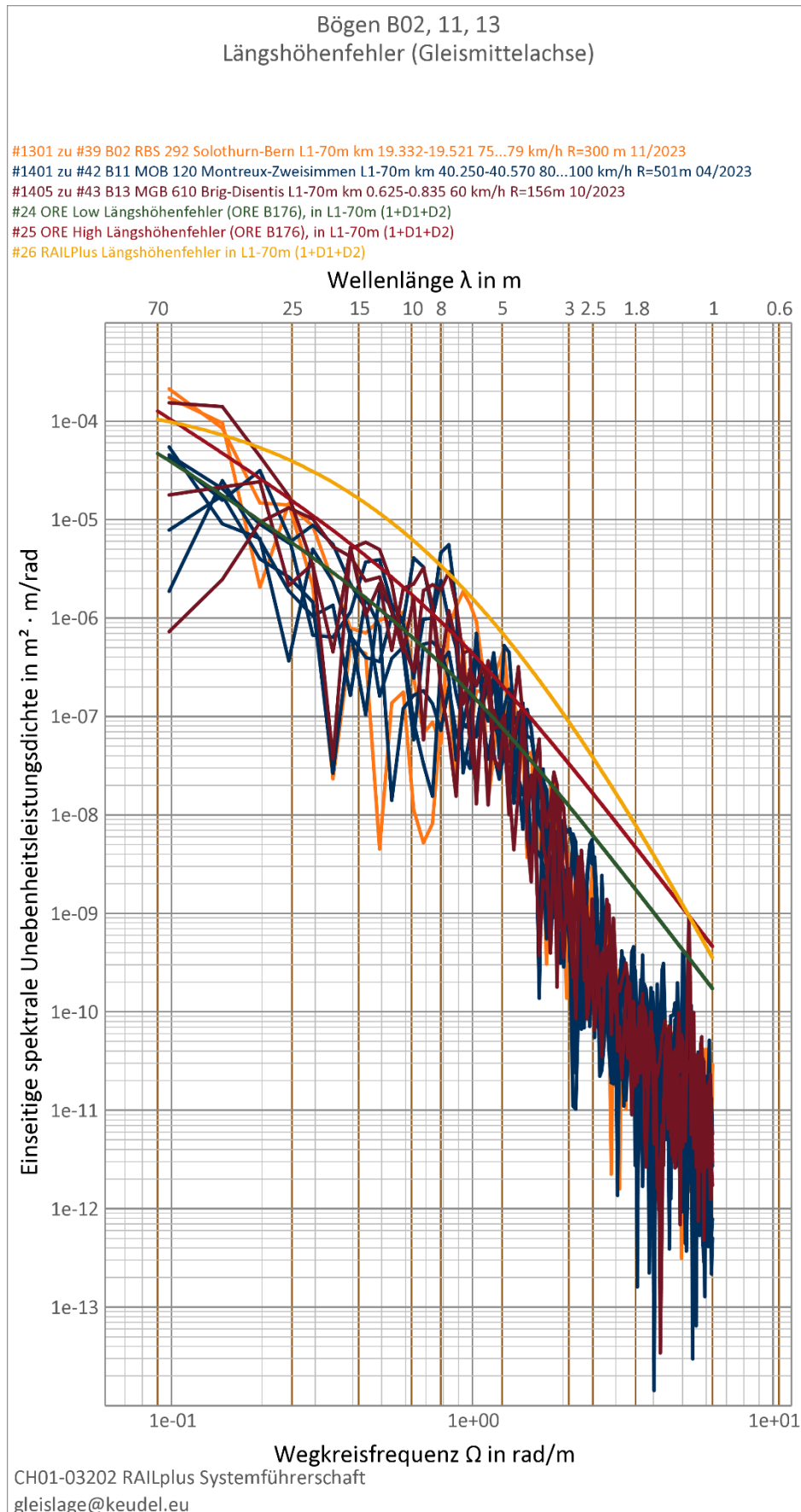


Abbildung 75: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4

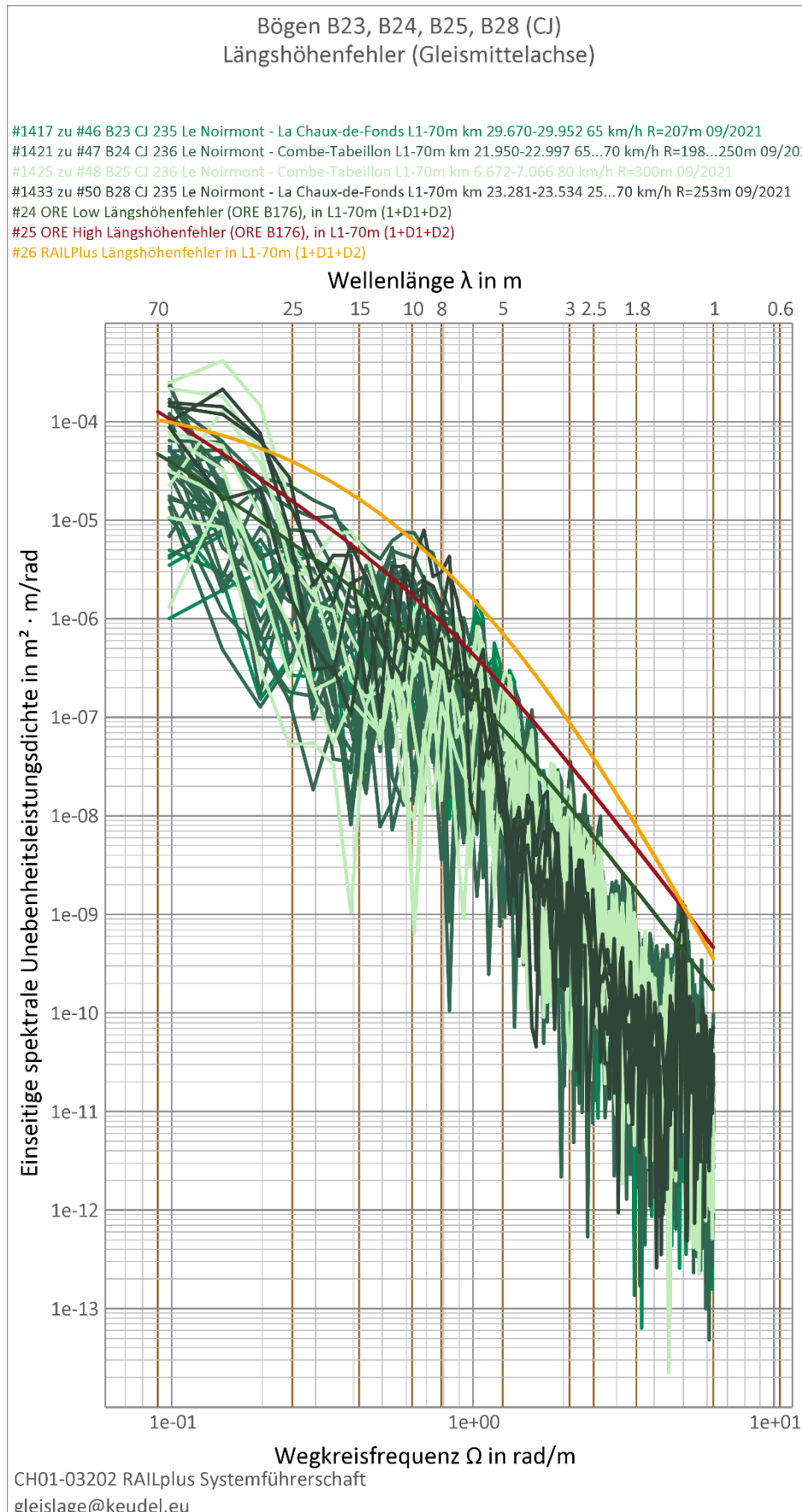


Abbildung 76: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4

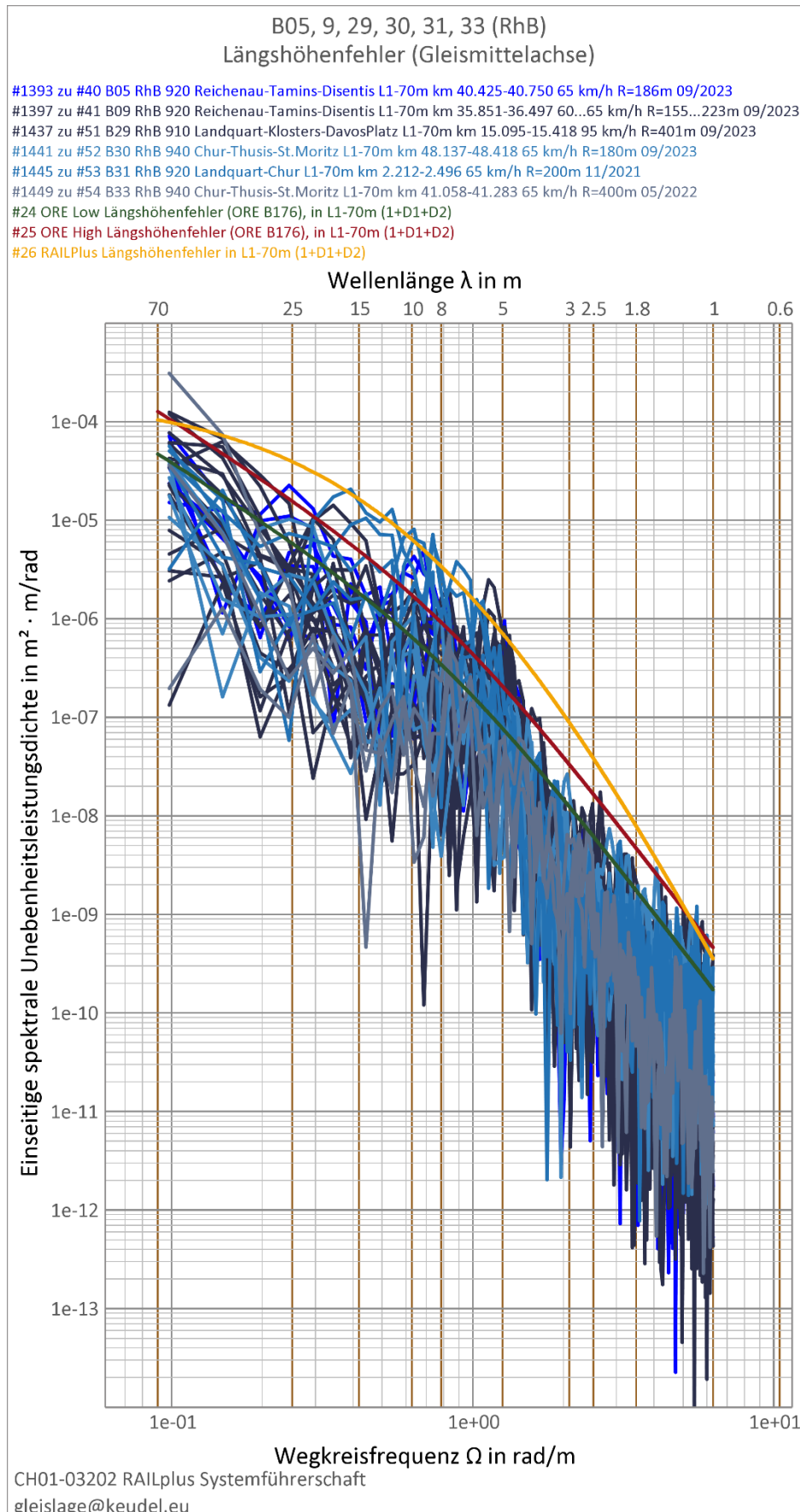


Abbildung 77: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4

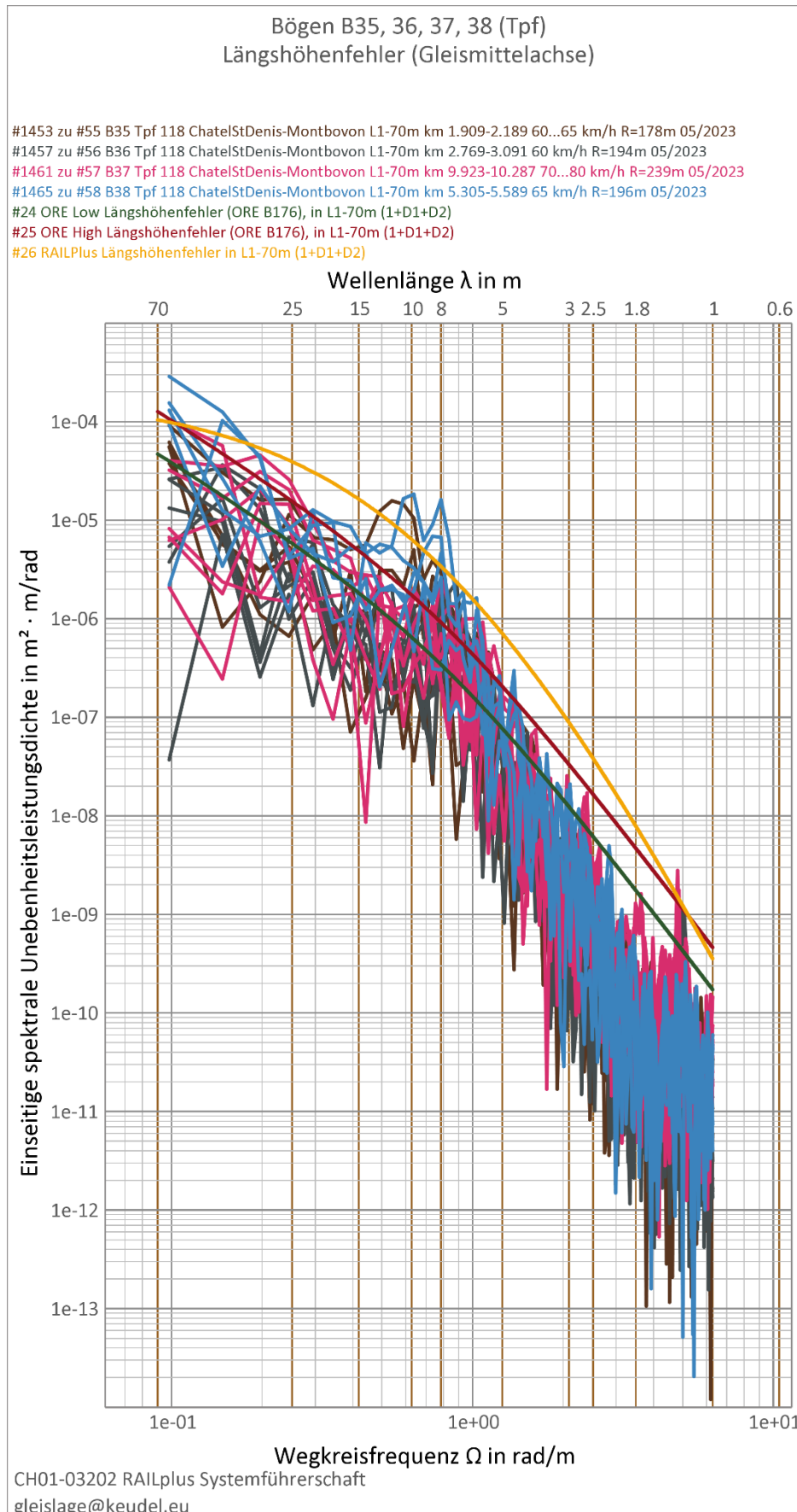


Abbildung 78: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4

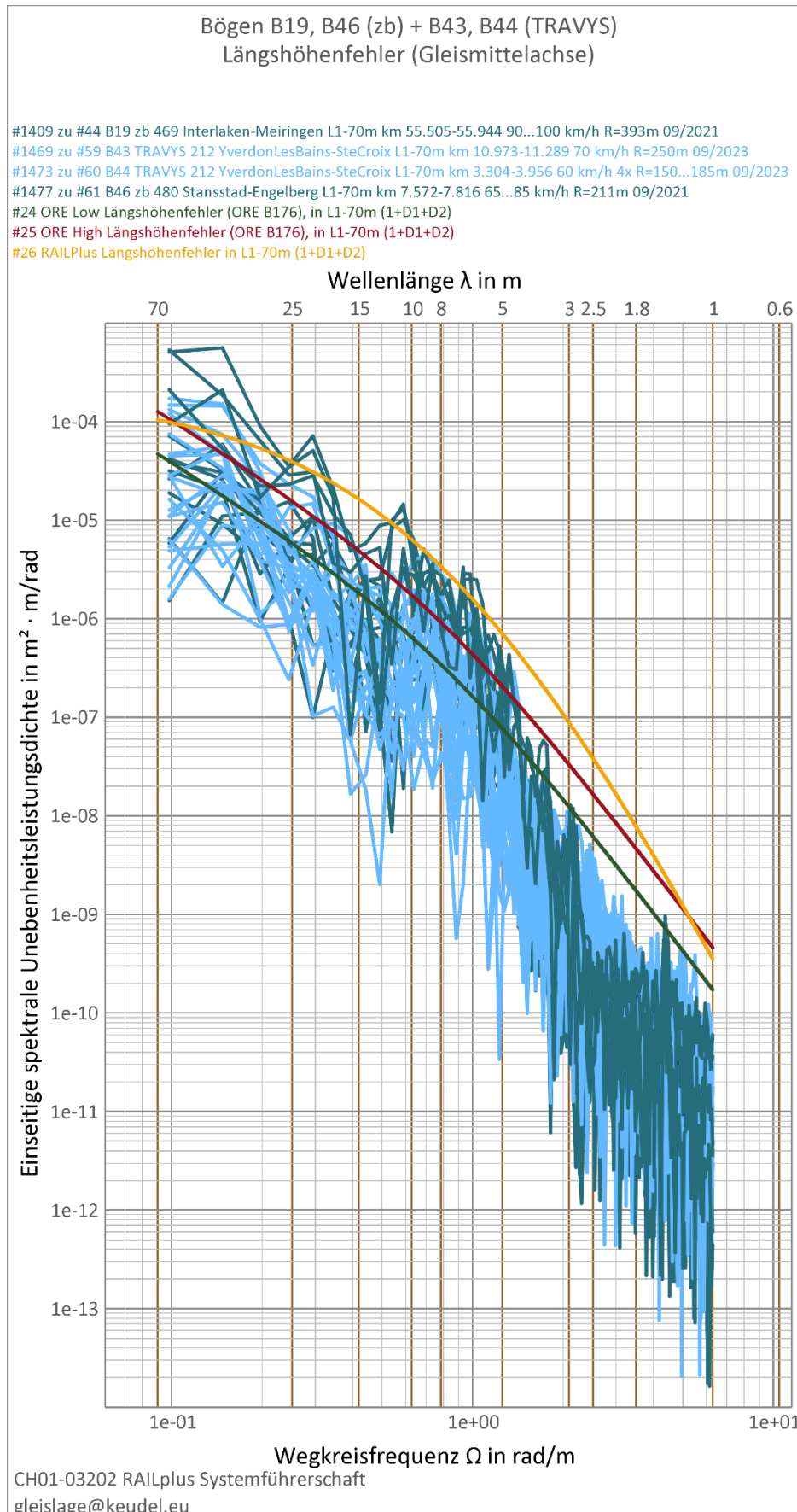


Abbildung 79: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des gleisachsenbezogenen Längshöhenfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4

8.5.3 Leistungsdichtespektren zum Spurweitenfehler zu Tabelle 4

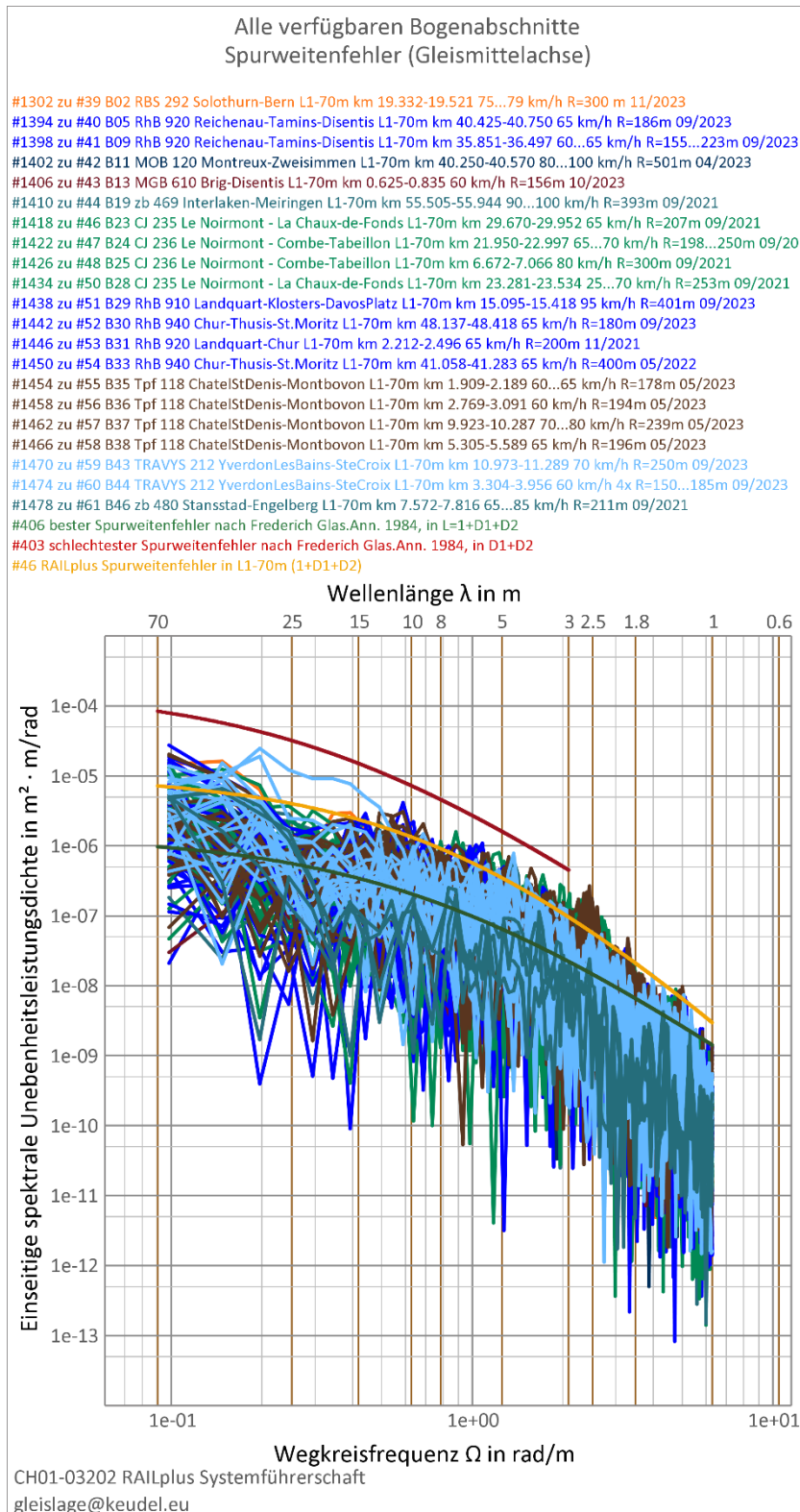


Abbildung 80: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4

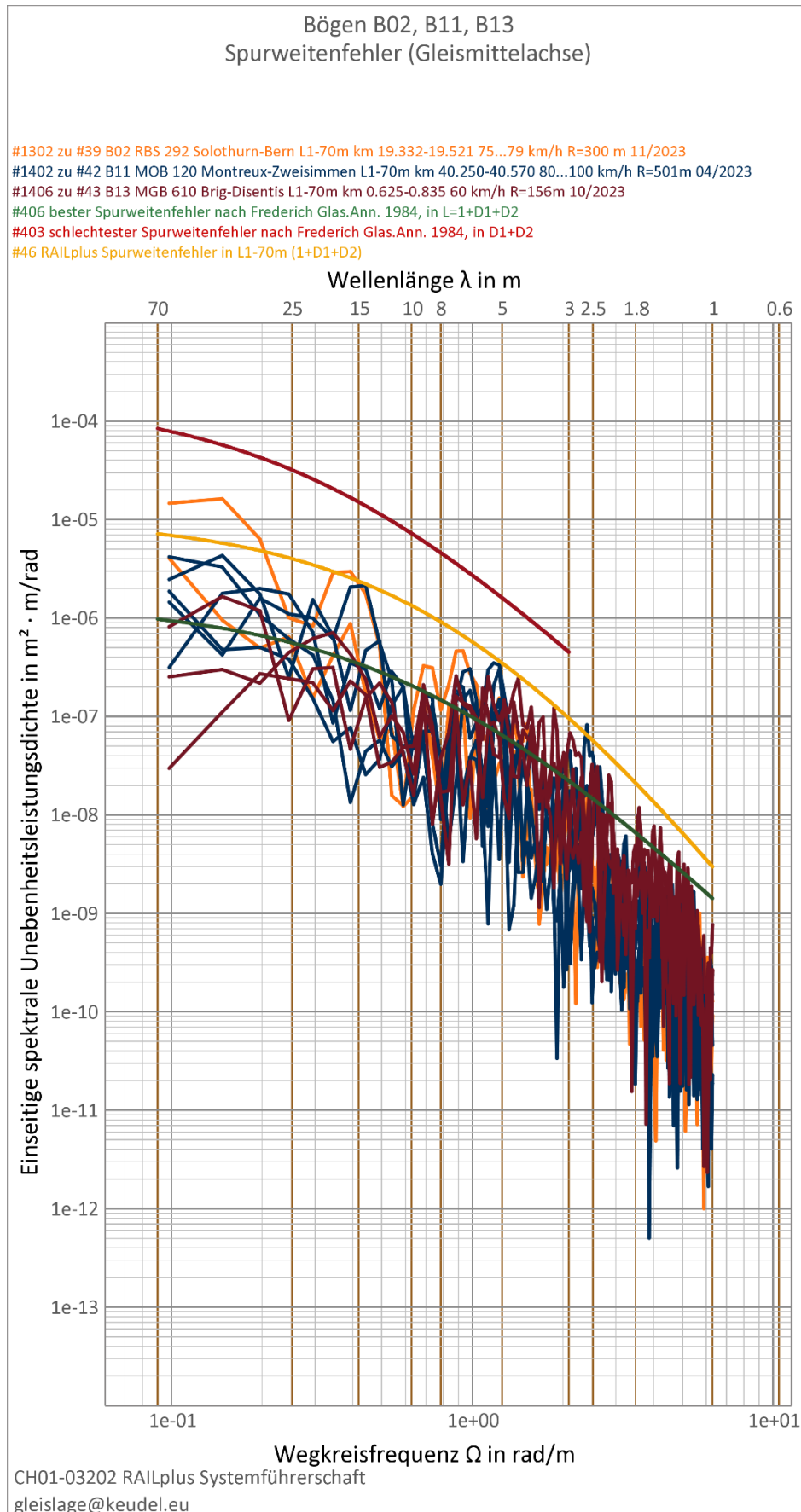


Abbildung 81: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4

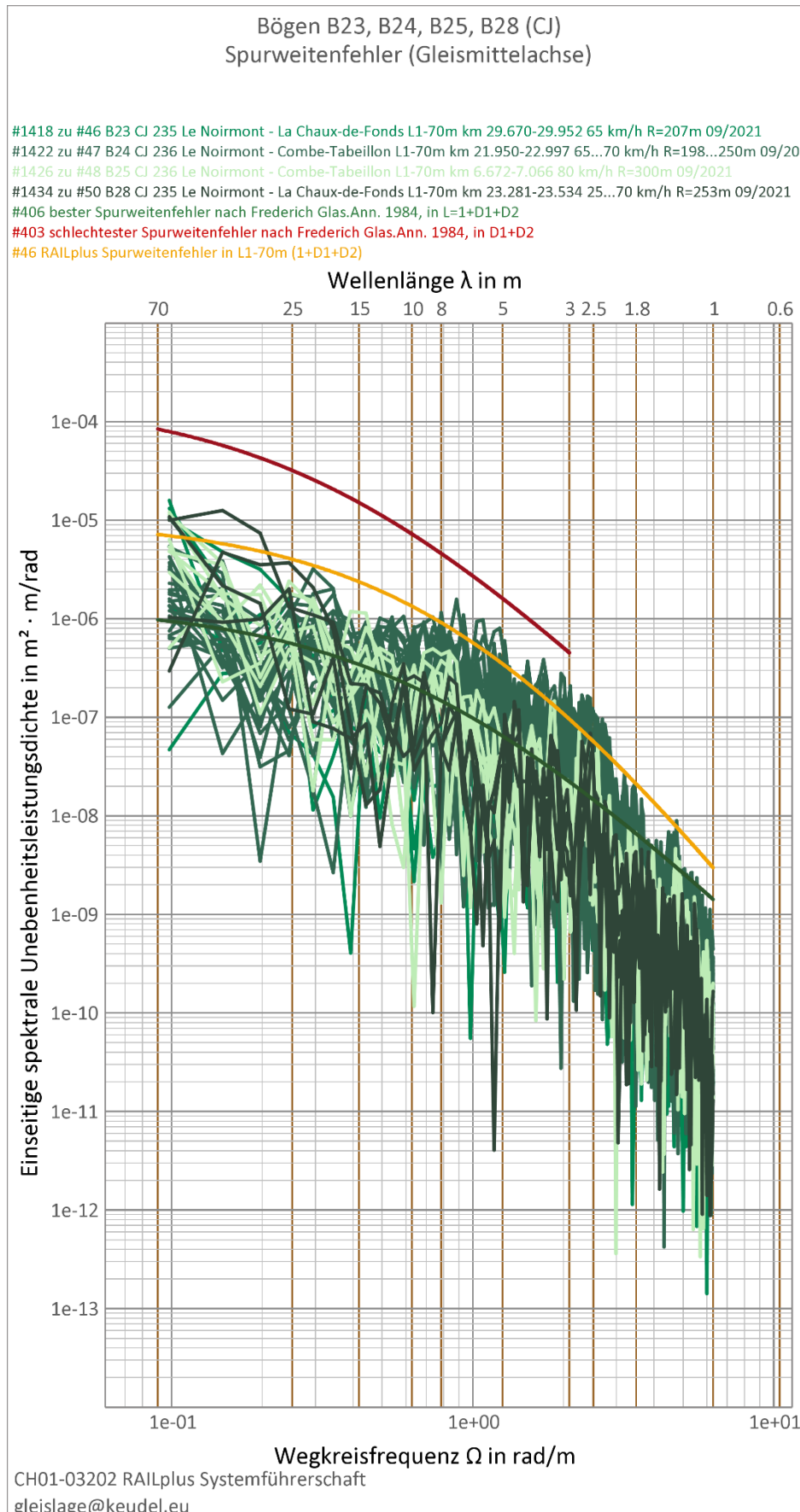


Abbildung 82: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4

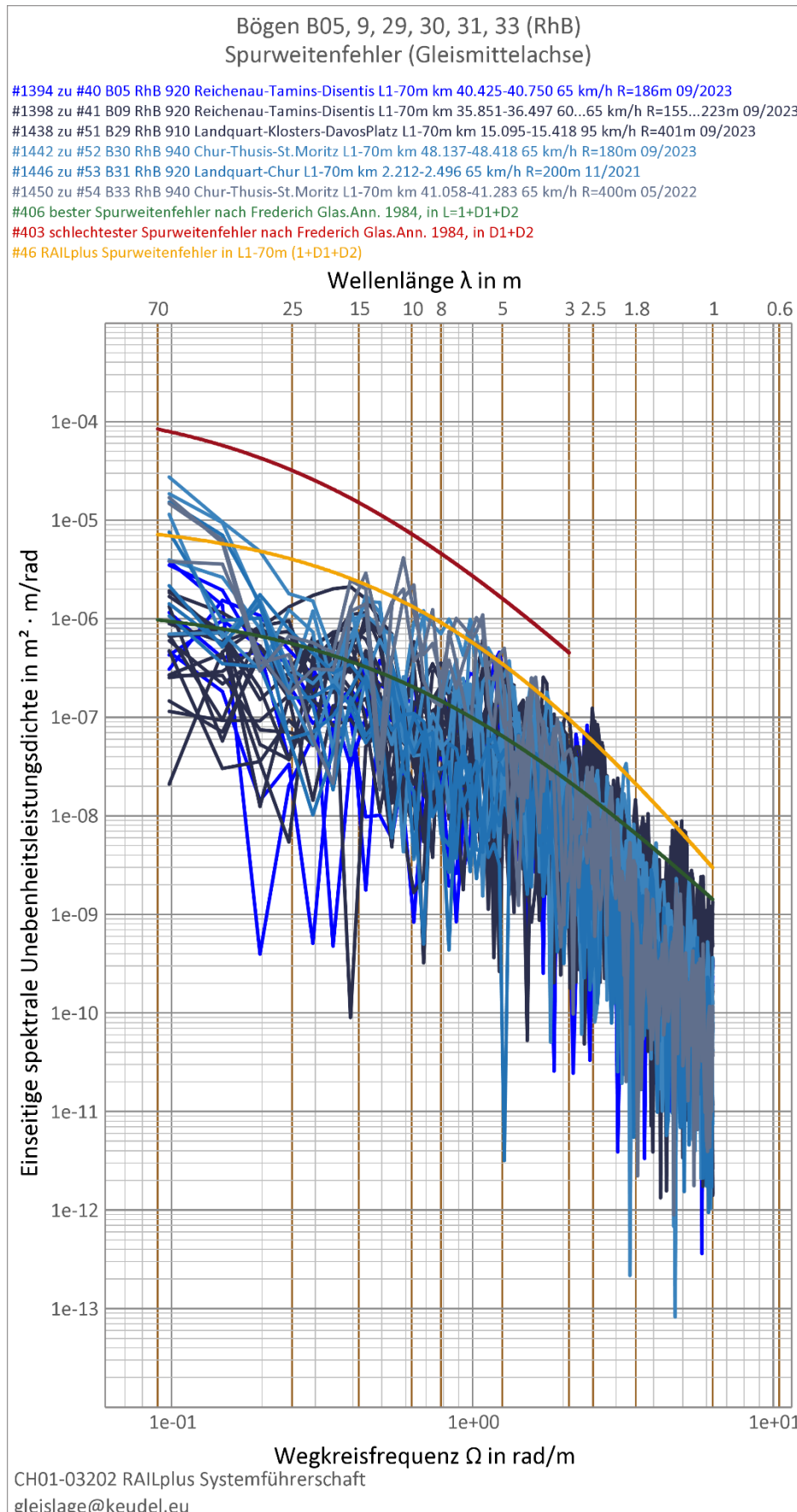


Abbildung 83: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4

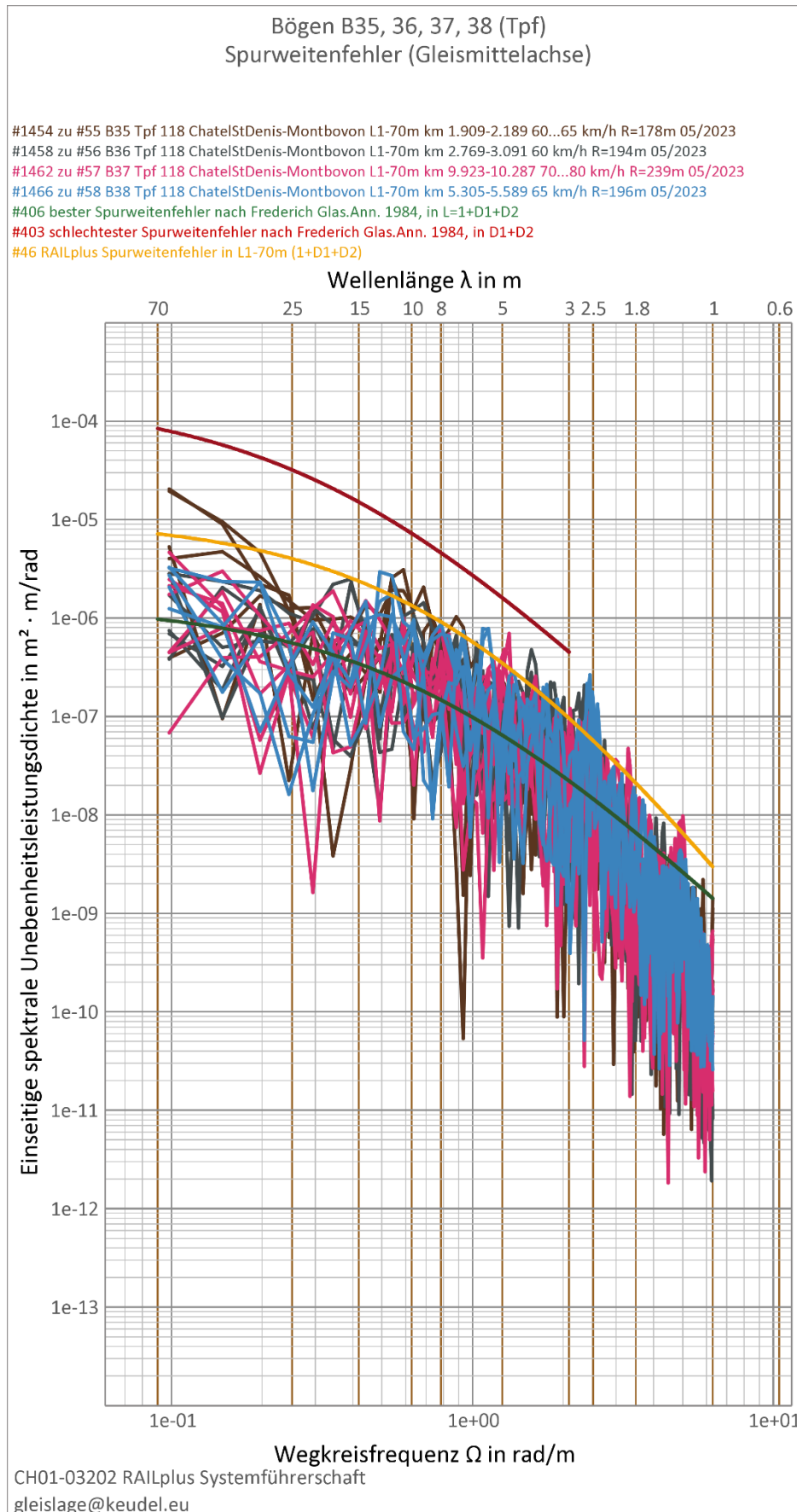


Abbildung 84: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4

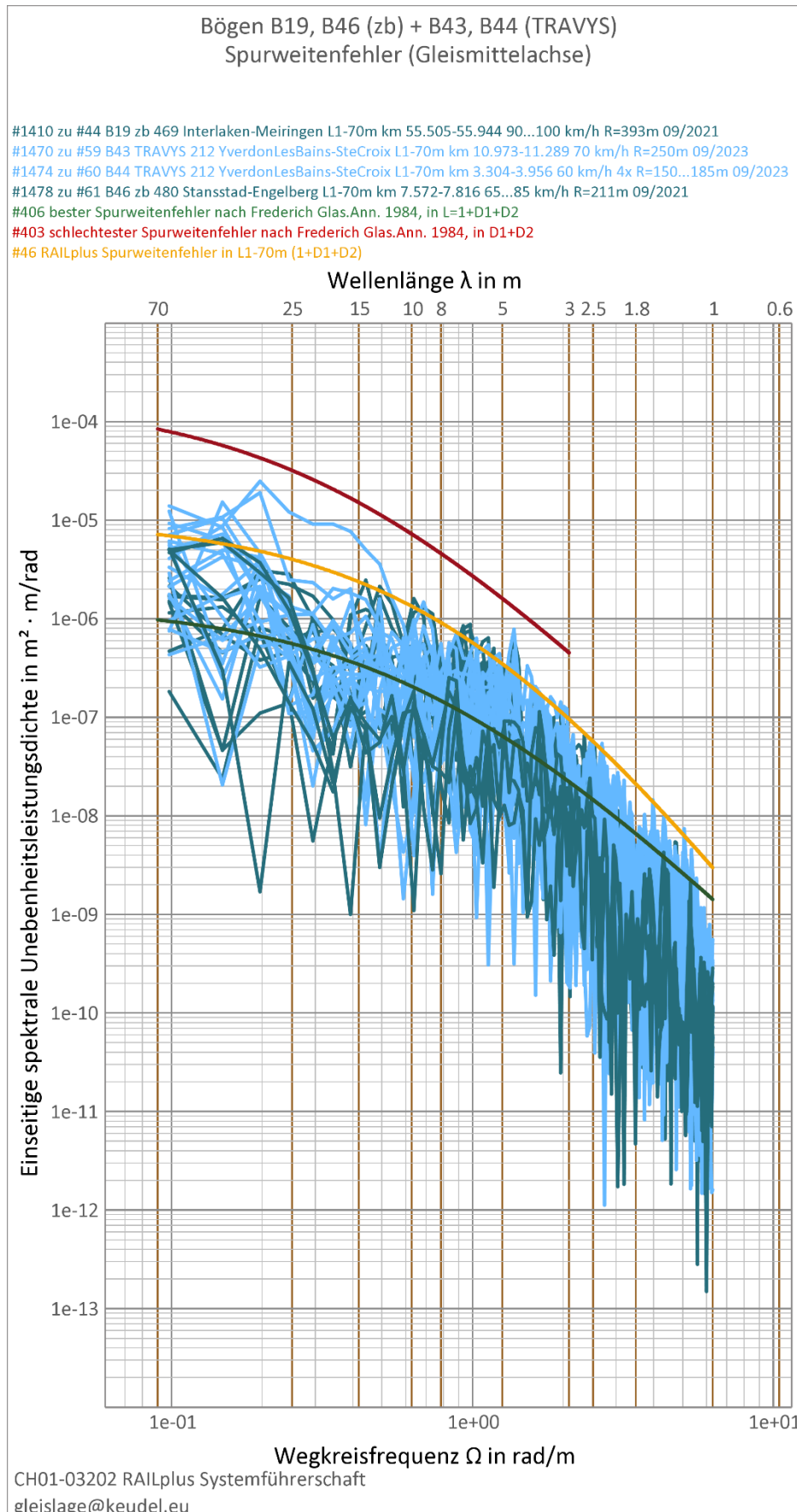


Abbildung 85: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Spurweitenfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4

8.5.4 Leistungsdichtespektren zum Querhöhenfehler zu Tabelle 4

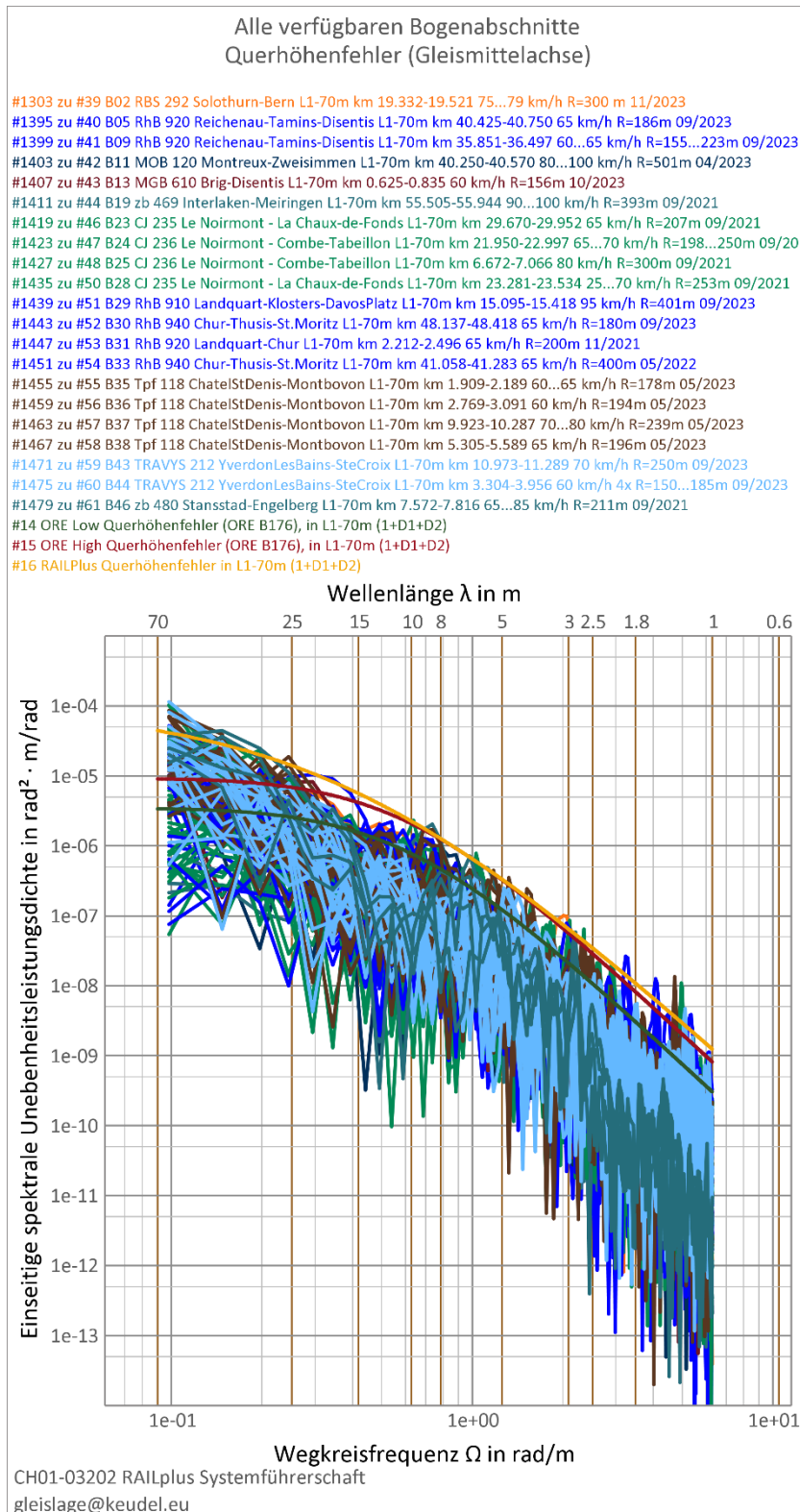


Abbildung 86: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu allen Abschnitten aus Tabelle 4

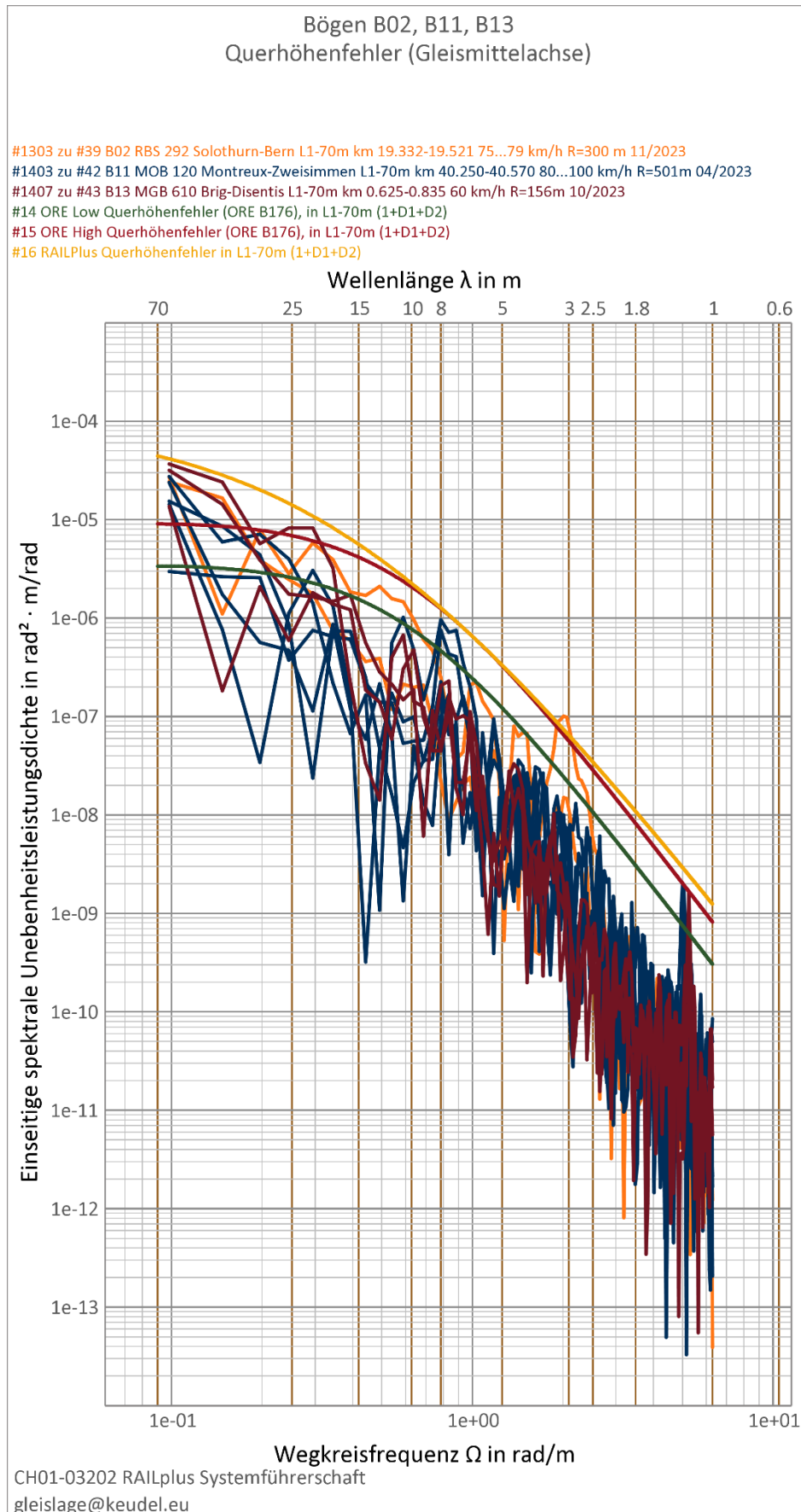


Abbildung 87: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B02, B11 und B13 aus Tabelle 4

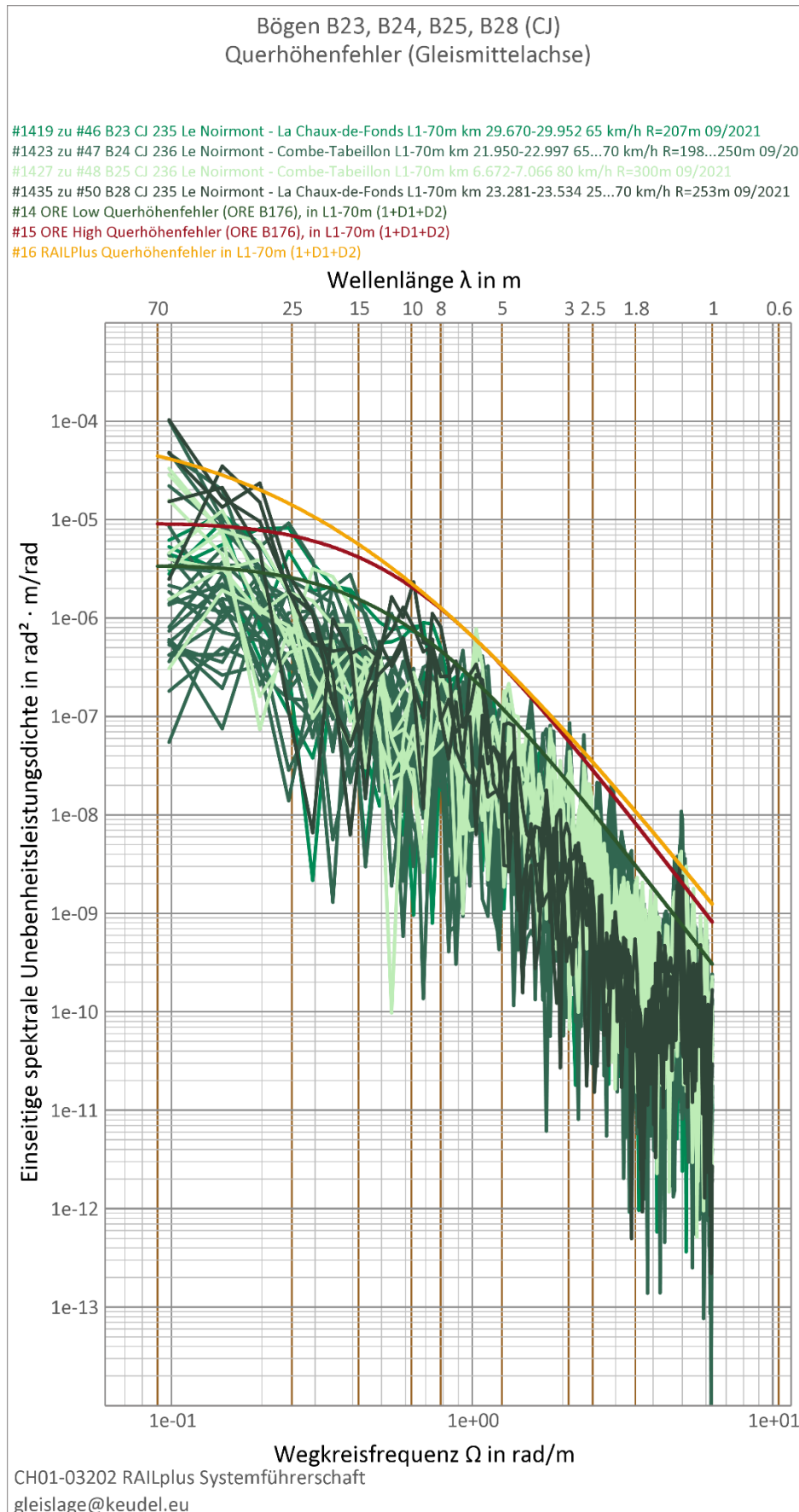


Abbildung 88: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B23, B24, B25 und B28 (CJ) aus Tabelle 4

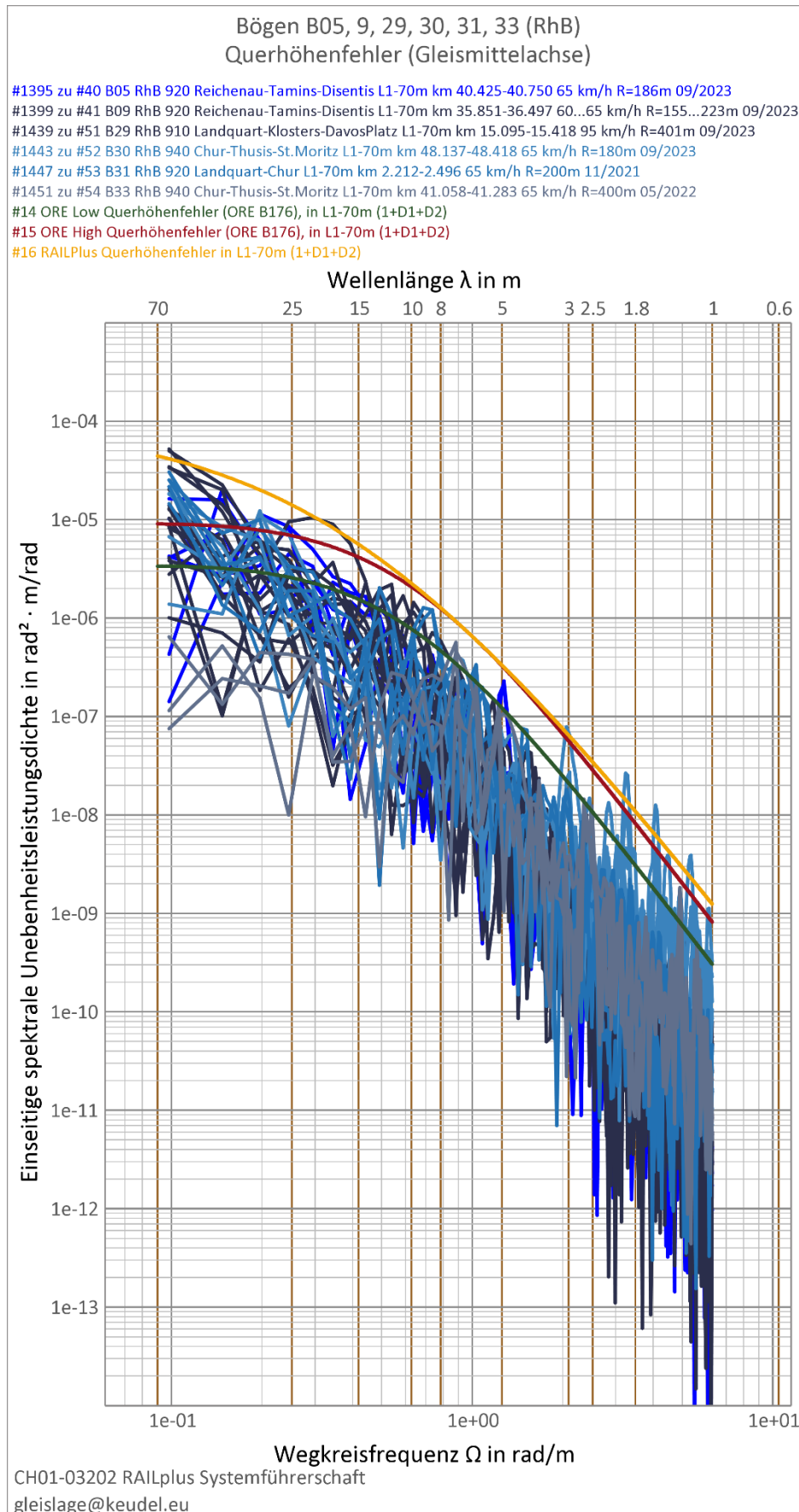


Abbildung 89: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B05, B09, B29, B30, B31 und B33 (RhB) aus Tabelle 4

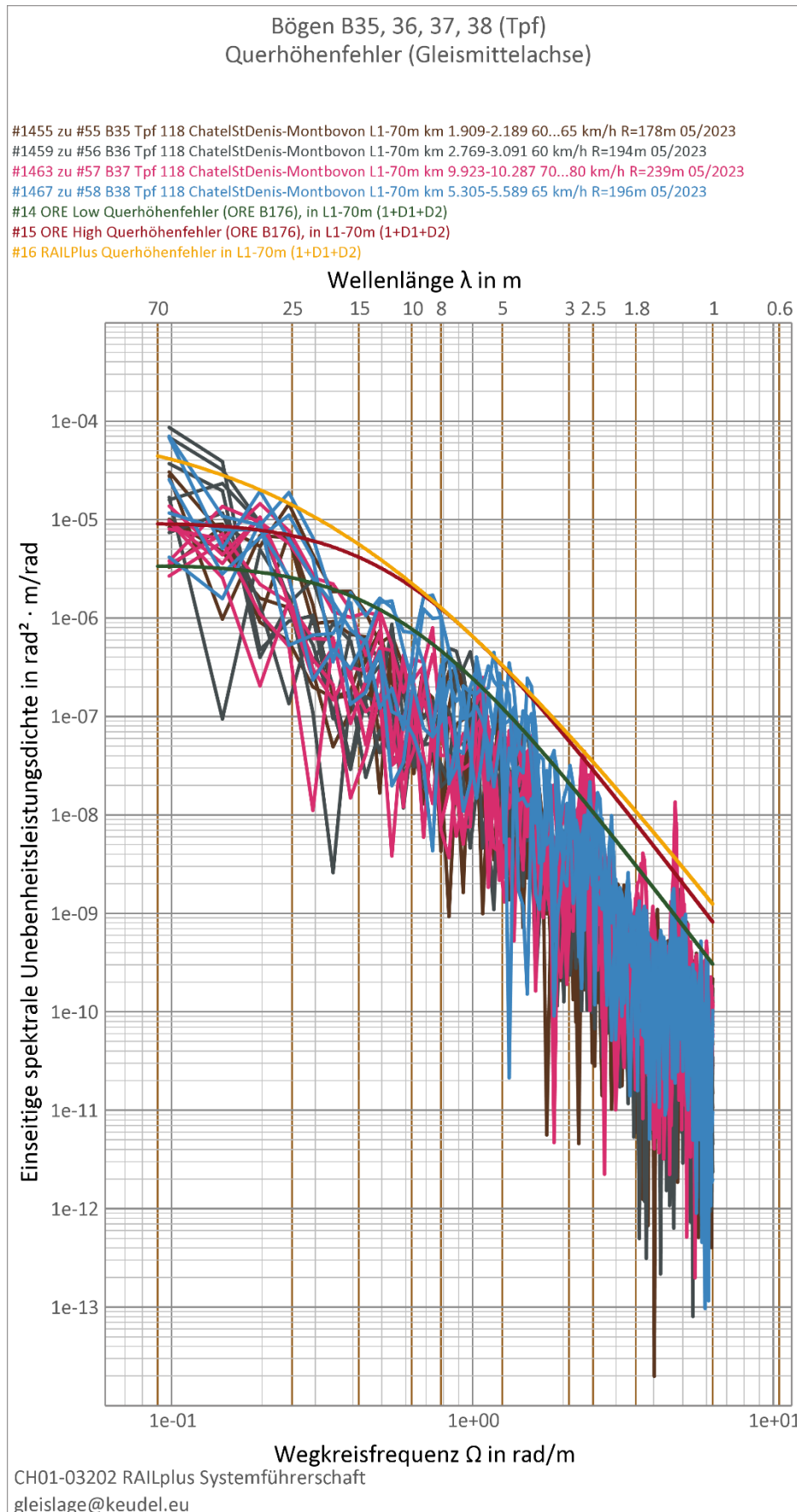


Abbildung 90: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B35, B36, B37 und B38 (Tpf) aus Tabelle 4

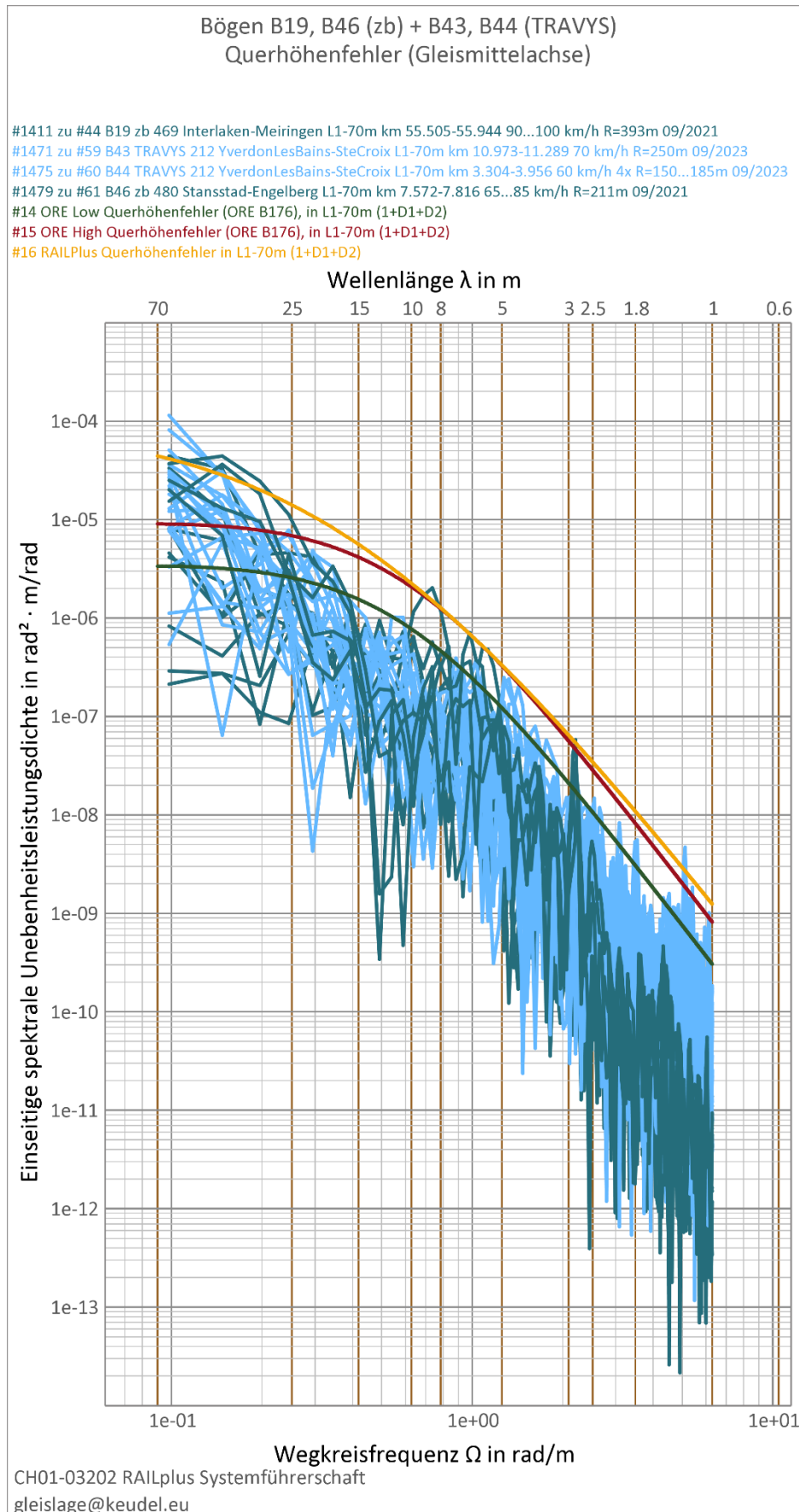


Abbildung 91: Spektrale Unebenheitsleistungsdichte des Querhöhenfehlers zu Abschnitten B19 und B46 (zb) sowie B43 und B44 (TRAVYS) aus Tabelle 4

8.6 Grafische Darstellungen zu periodischen Längshöhenfehlern

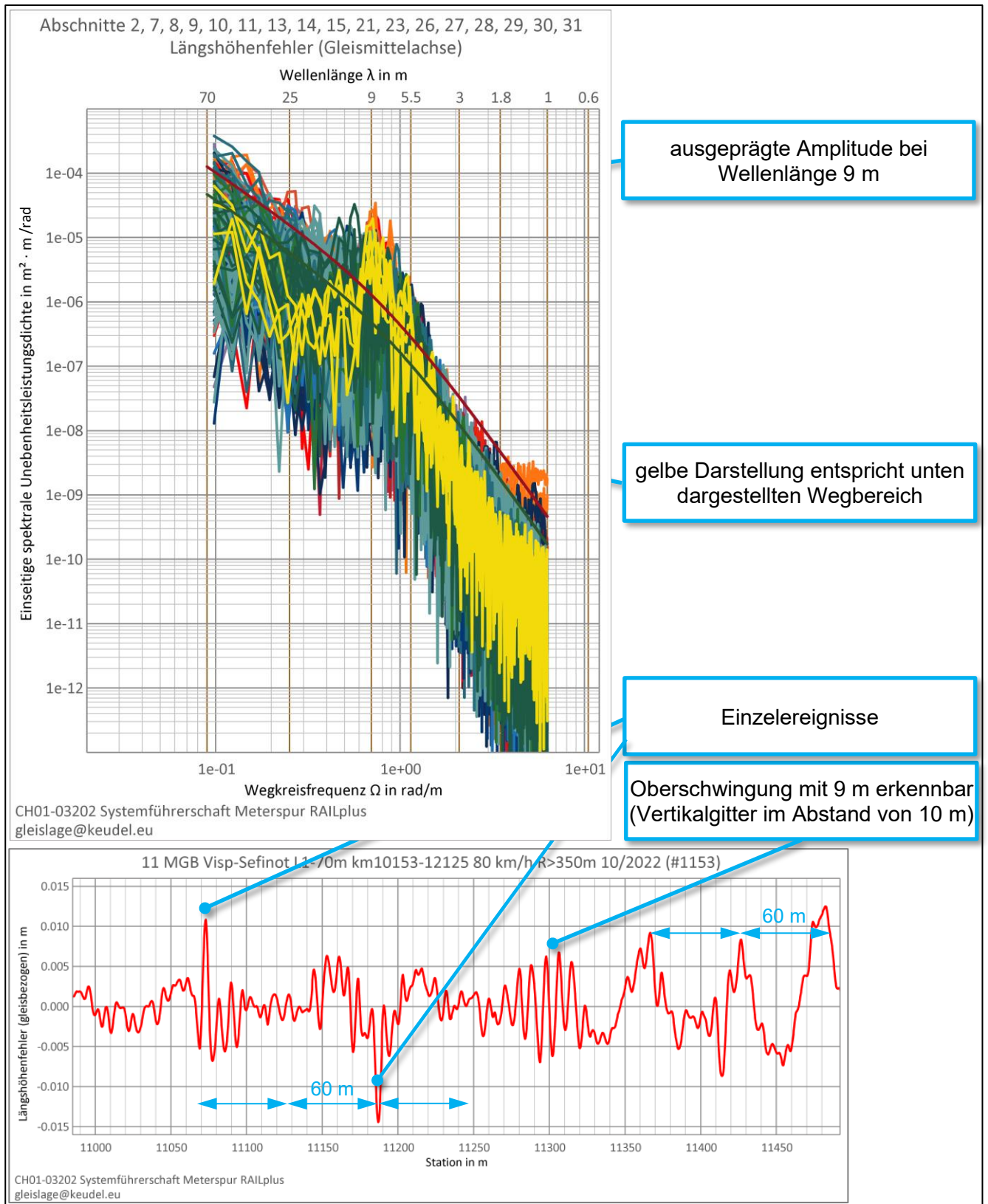


Abbildung 92: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, betreffend km 11,0 bis km 11,5

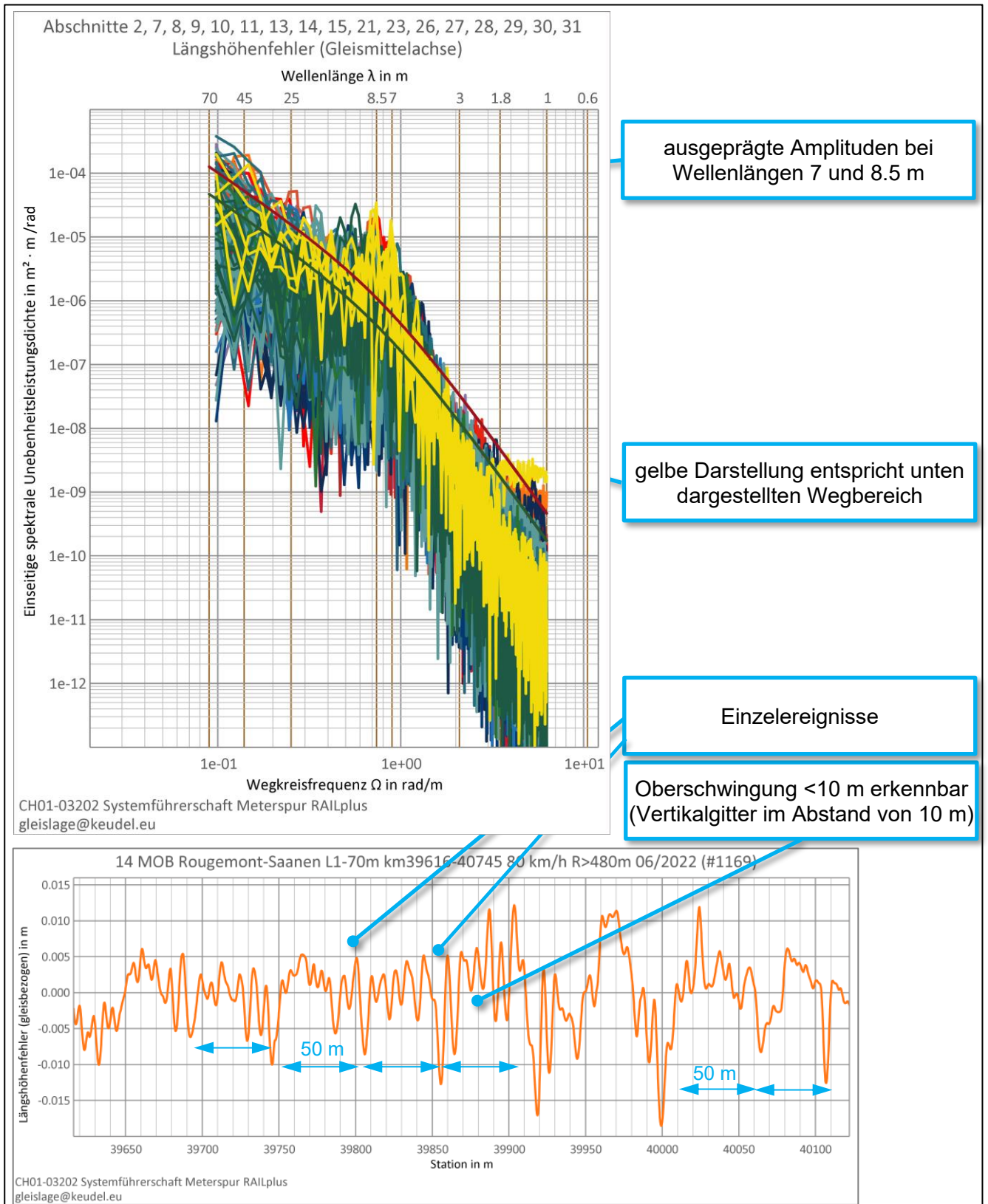


Abbildung 93: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 14 aus Tabelle 3, betreffend km 39,6 bis km 40,1

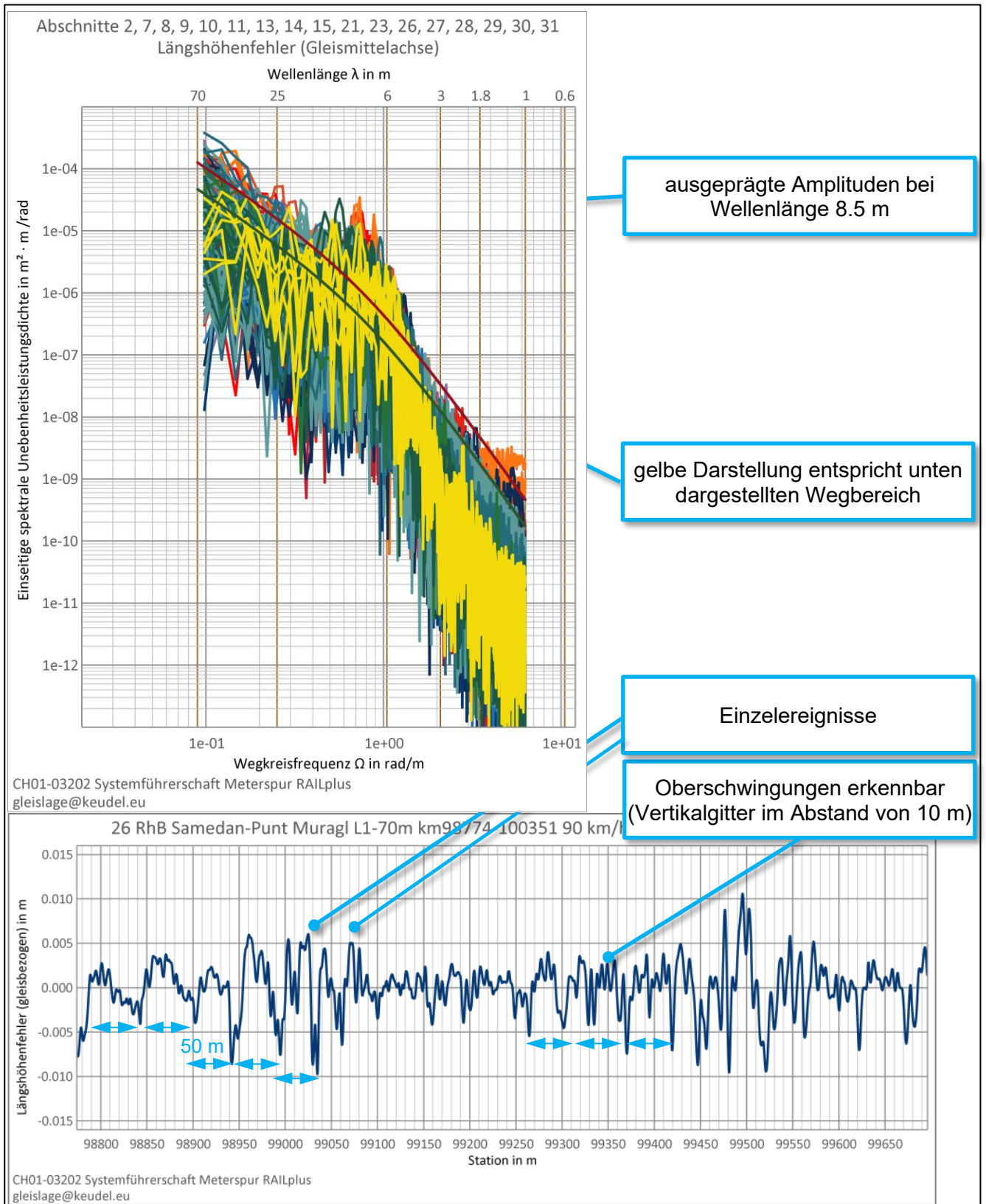


Abbildung 94: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3, betreffend km 98,8 bis km 99,7

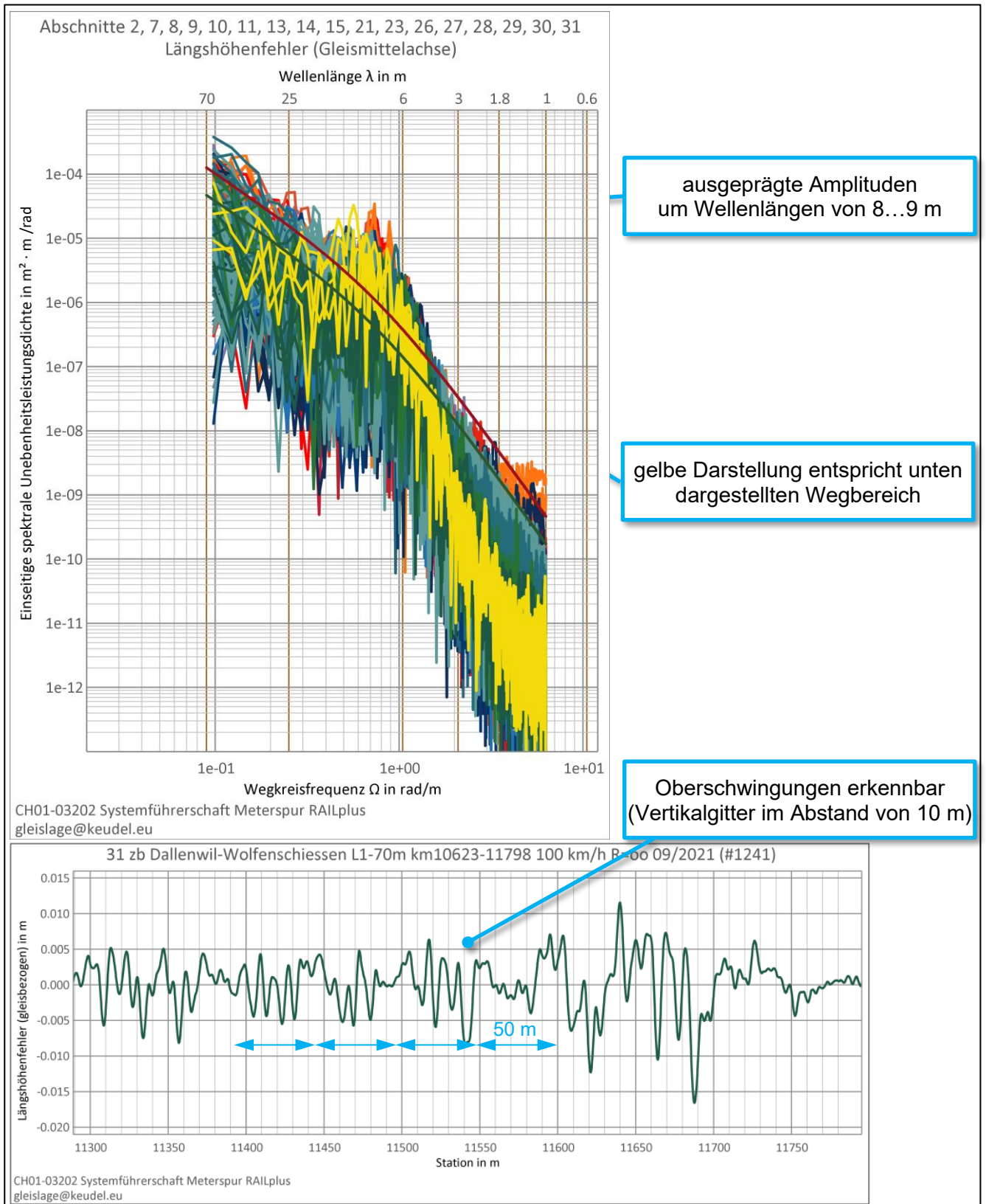


Abbildung 95: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 31 aus Tabelle 3, betreffend km 11,3 bis km 11,8

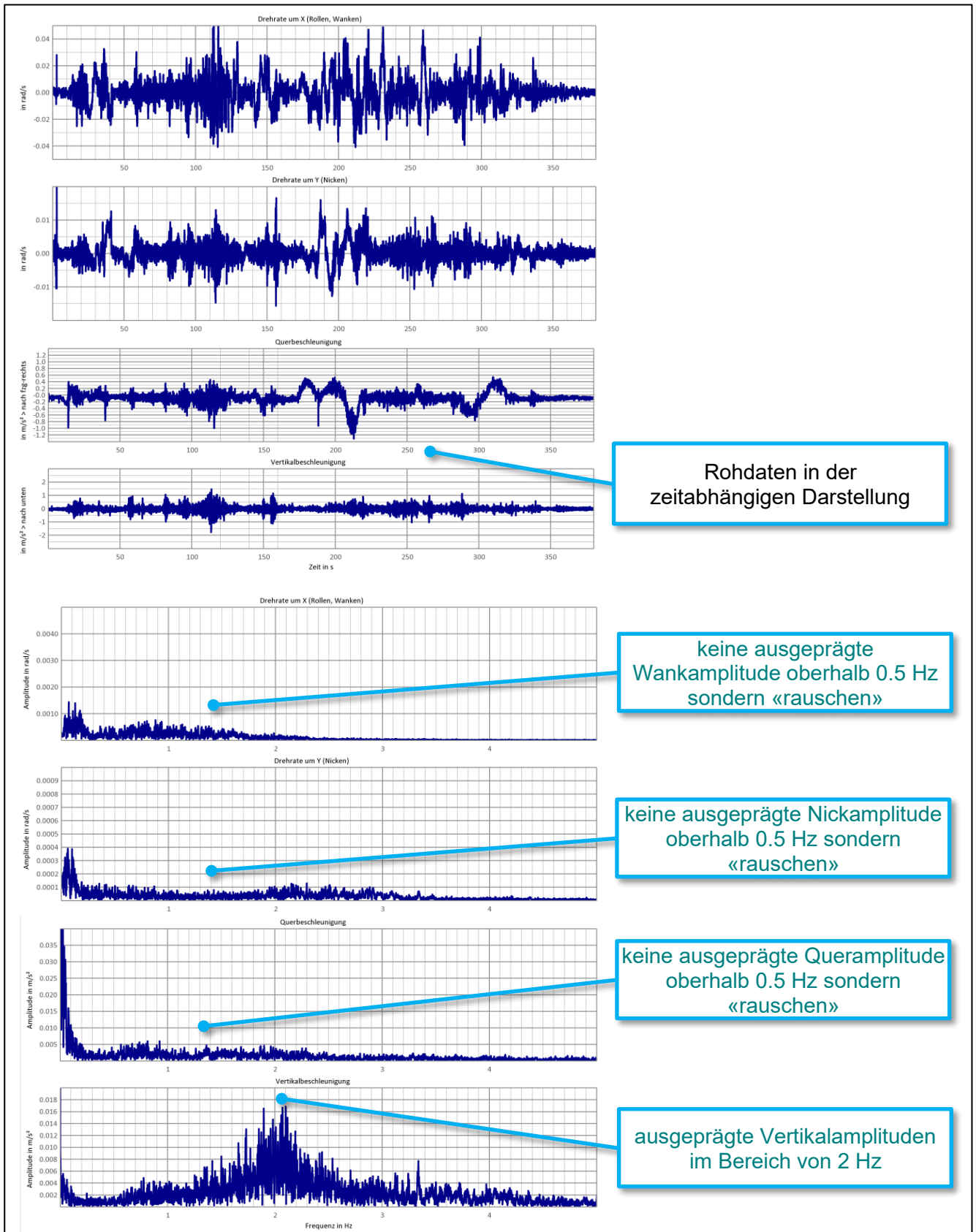


Abbildung 96: Quer- und Vertikalbeschleunigung sowie Nickrate von Samedan bis Pontresina erfasst via Smartphone im Wagen Nr. 2433 als Fahrgast im Regelbetrieb am 13.05.2023 (zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3 sowie Abbildung 94)

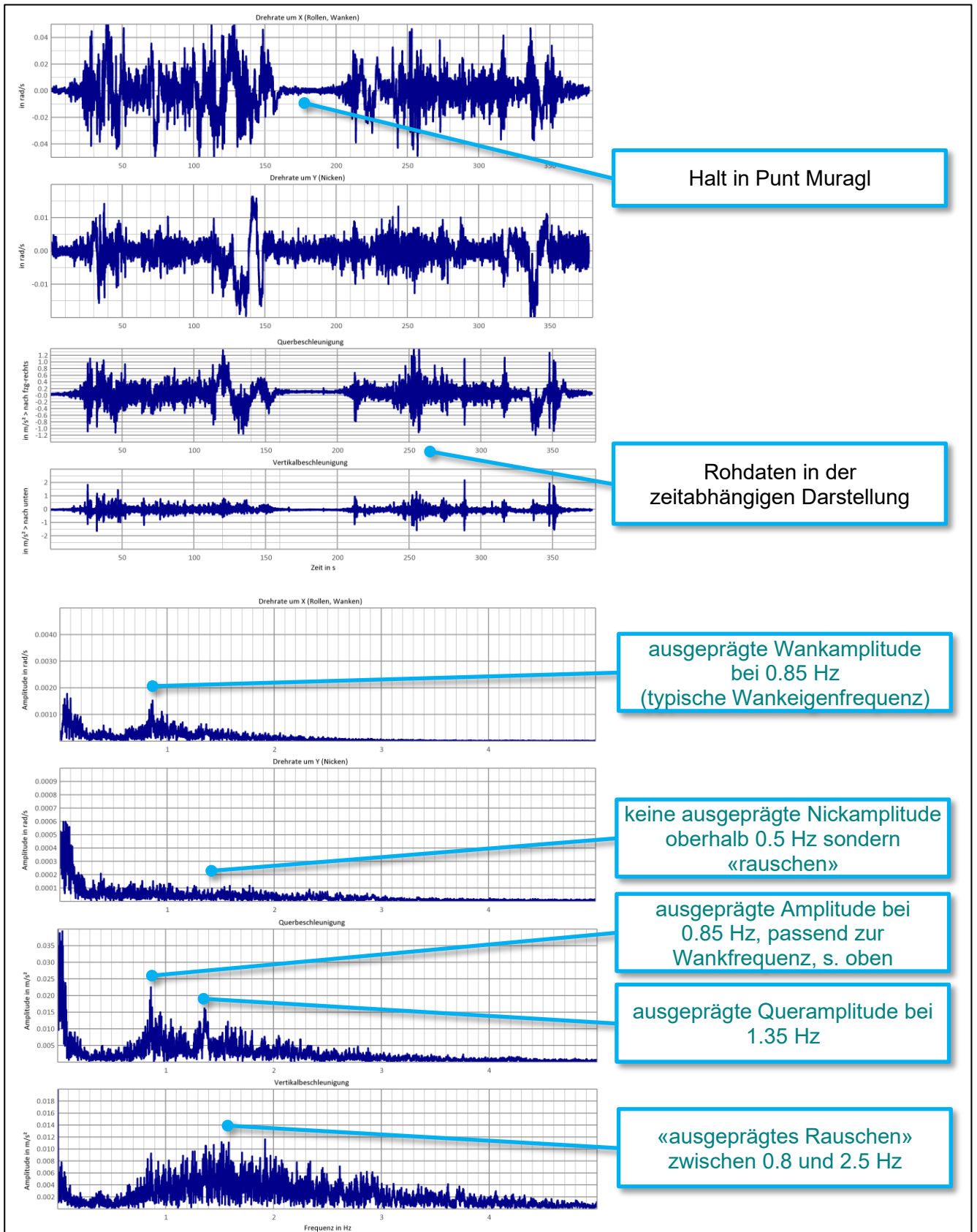


Abbildung 97: Quer- und Vertikalbeschleunigung sowie Nickrate von Pontresina bis Samedan erfasst via Smartphone in einem Triebzug (vsl. Allegra) als Fahrgast im Regelbetrieb am 13.05.2023 (zu Abschnitt 26 aus Tabelle 3 sowie Abbildung 94)

8.7 Grafische Darstellungen zu periodischen Richtungs- und Spurweitenfehlern

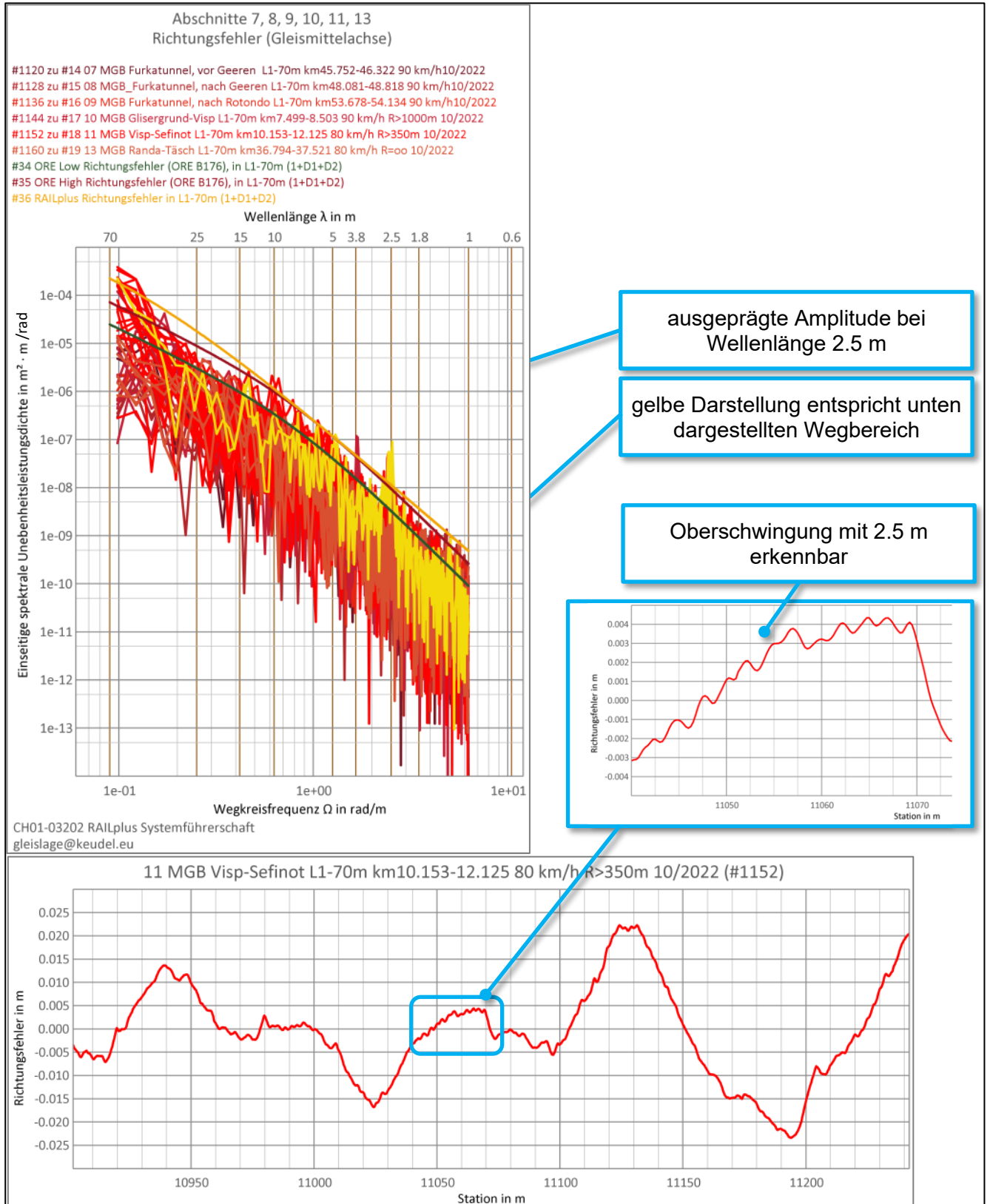


Abbildung 98: Ausschnitt des Richtungsfehlers zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, betreffend km 10,9 bis km 11,2 (synchron zum Längshöhenfehler in Abbildung 92)

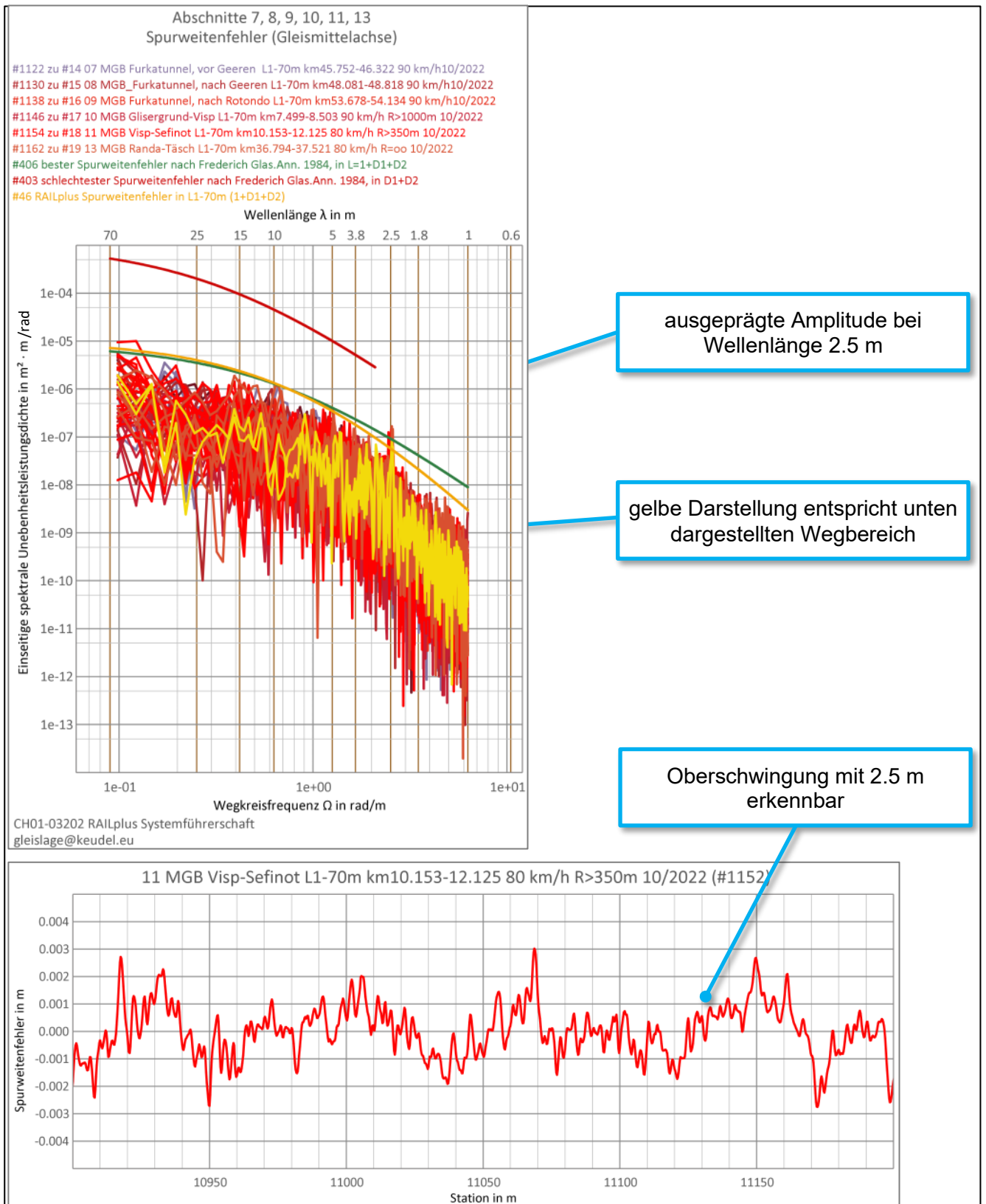


Abbildung 99: Ausschnitt des Spurweitenfehlers zu Abschnitt 11 aus Tabelle 3, betreffend km 10,9 bis km 11,2 (synchron zu Ausschnitten in Abbildung 92 und Abbildung 98)

8.8 Grafische Darstellungen zu Einzelereignissen der Gleislage

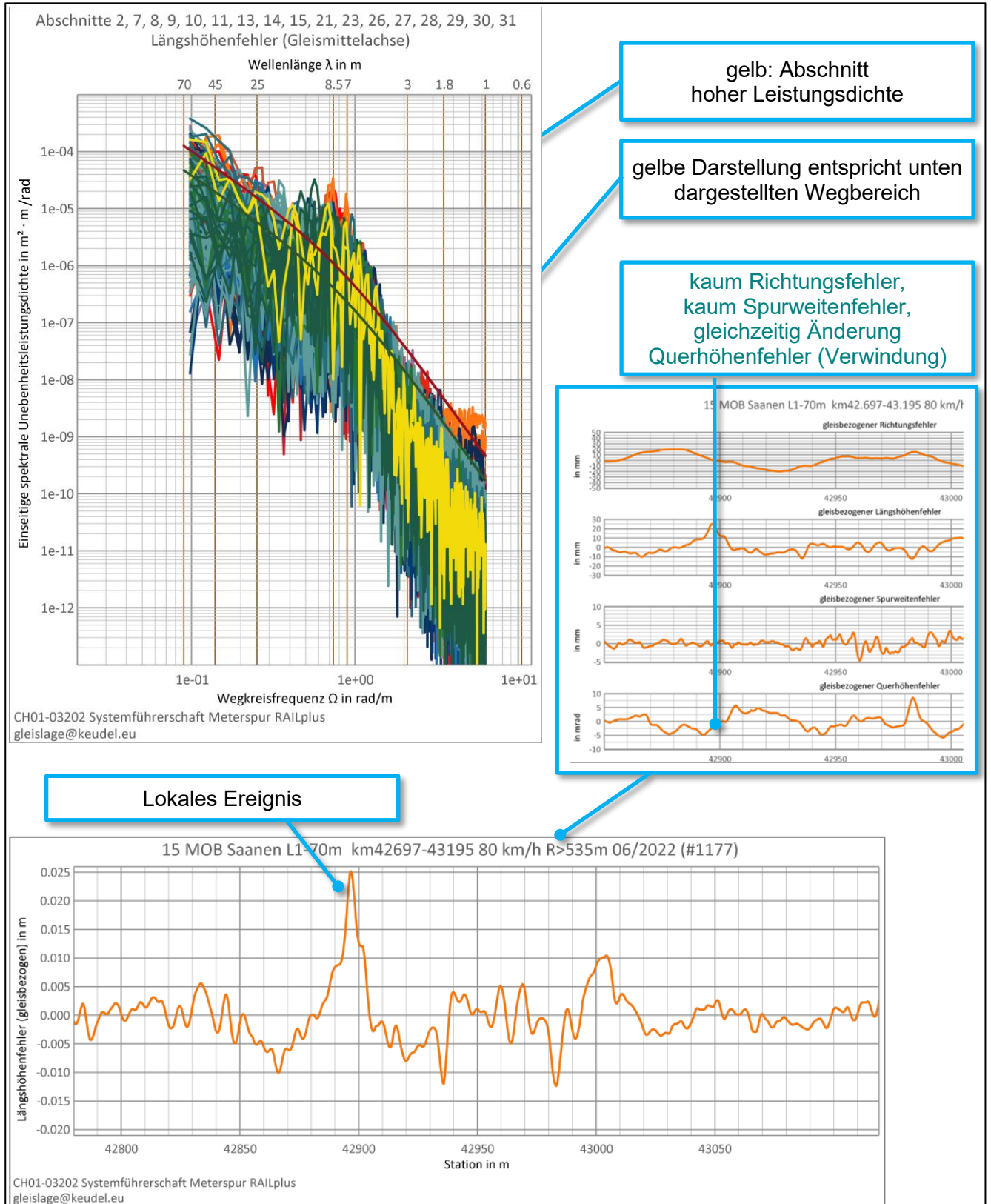


Abbildung 100: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 15 aus Tabelle 3, betreffend km 42,8 bis km 43,1

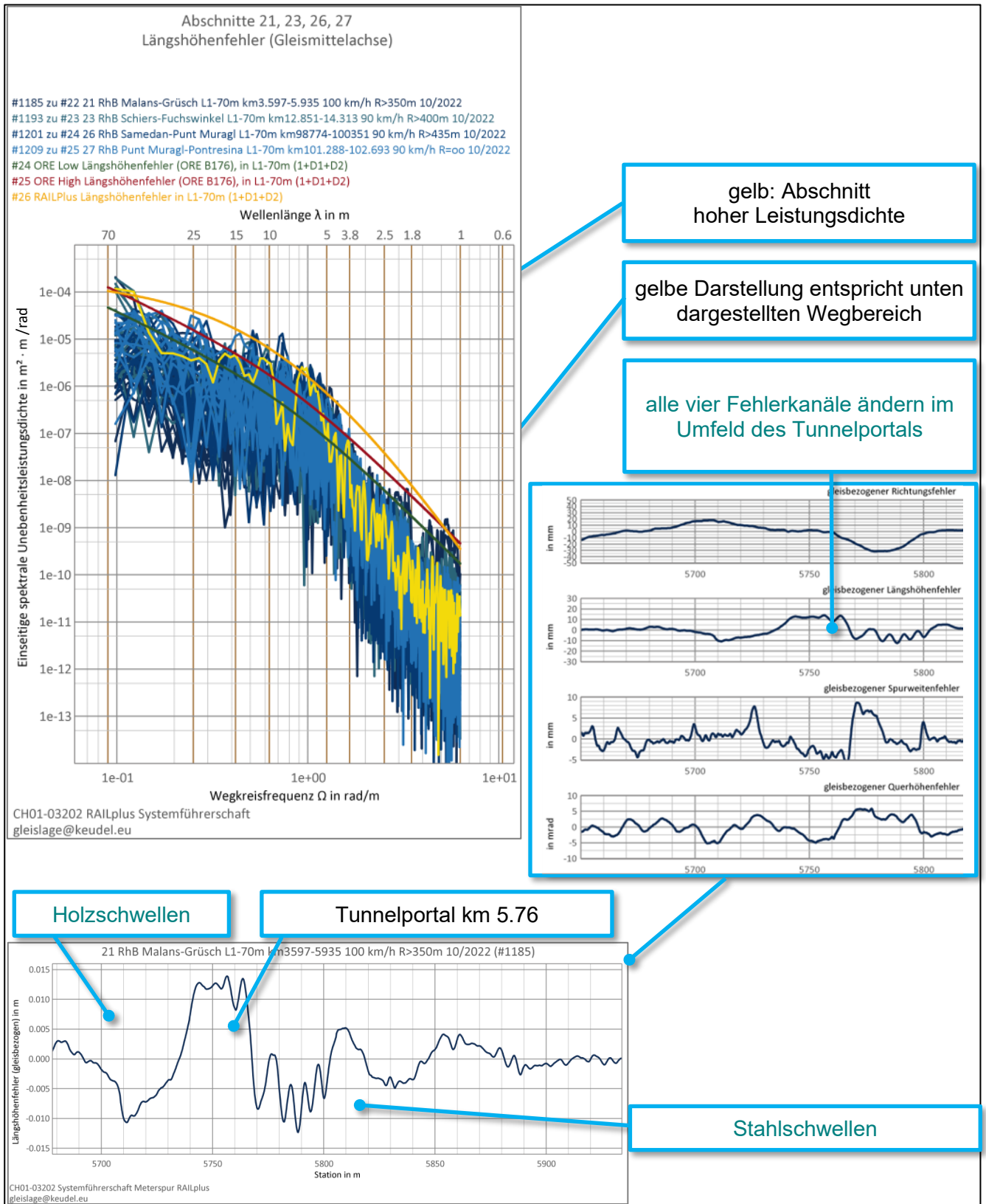


Abbildung 101: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 21 aus Tabelle 3, betreffend km 5,7 bis km 5,9

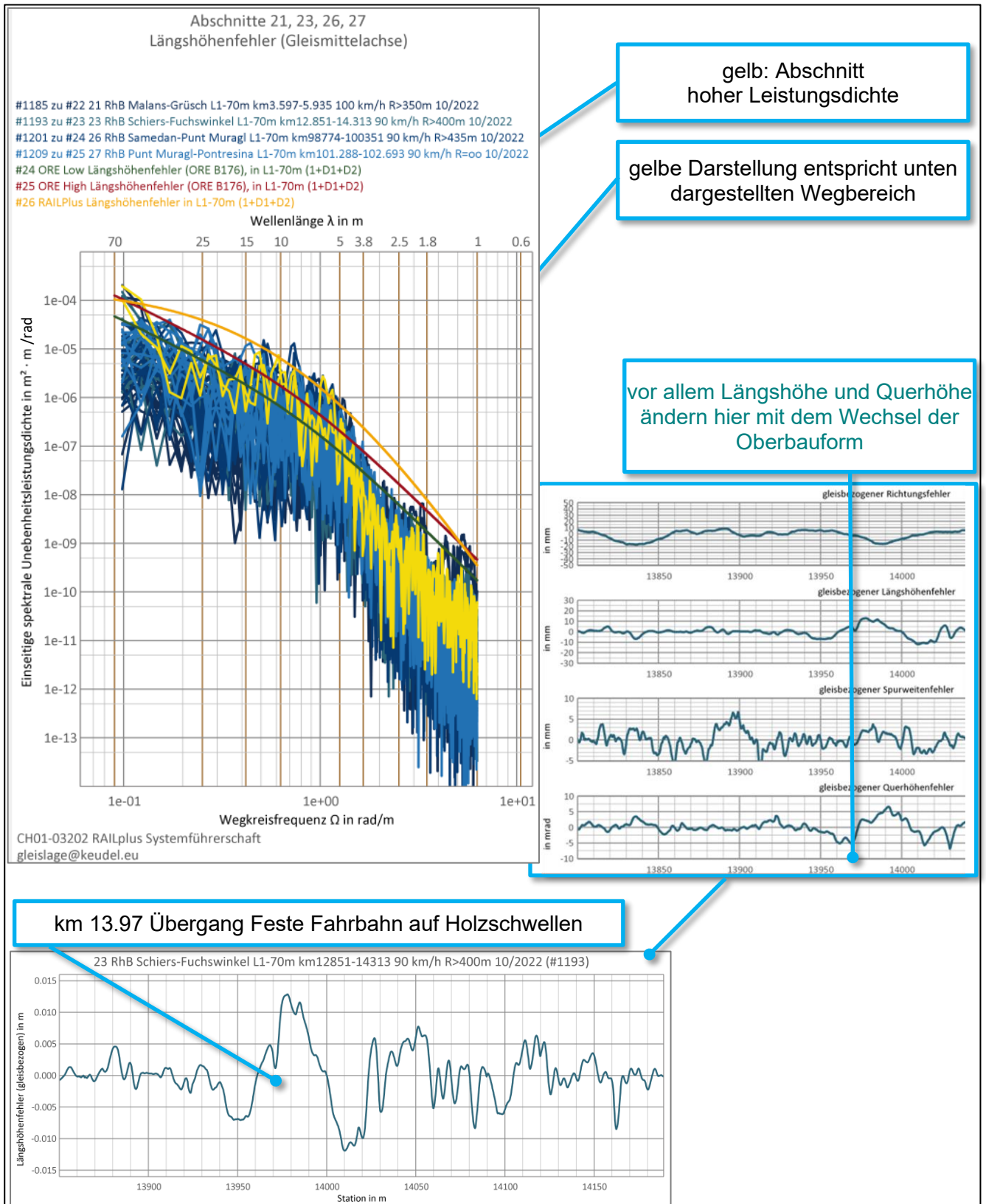


Abbildung 102: Ausschnitt des Längshöhenfehlers zu Abschnitt 23 aus Tabelle 3, betreffend km 13,8 bis km 14,2

8.9 Wegabhängige Darstellungen zu RAILplus-Gleislagefehlern für Lauftechniksimulationen

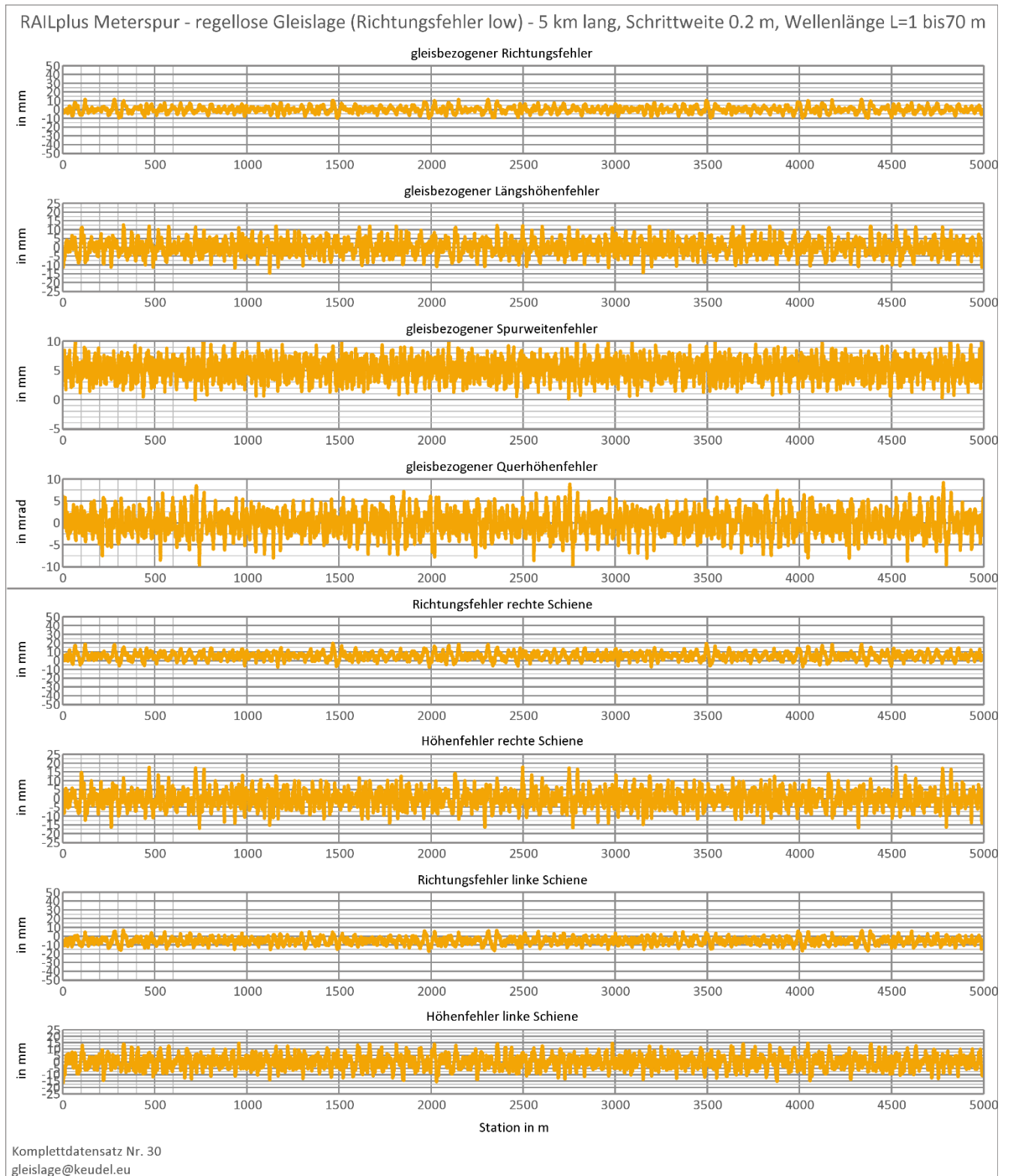


Abbildung 103: Wegabhängige Darstellung regelloser Gleislagefehler mit Störpegel «RAILplus» für $V > 80 \text{ km/h}$ entsprechend Spektren aus Abbildung 44, Abbildung 50, Abbildung 56, Abbildung 62 obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)

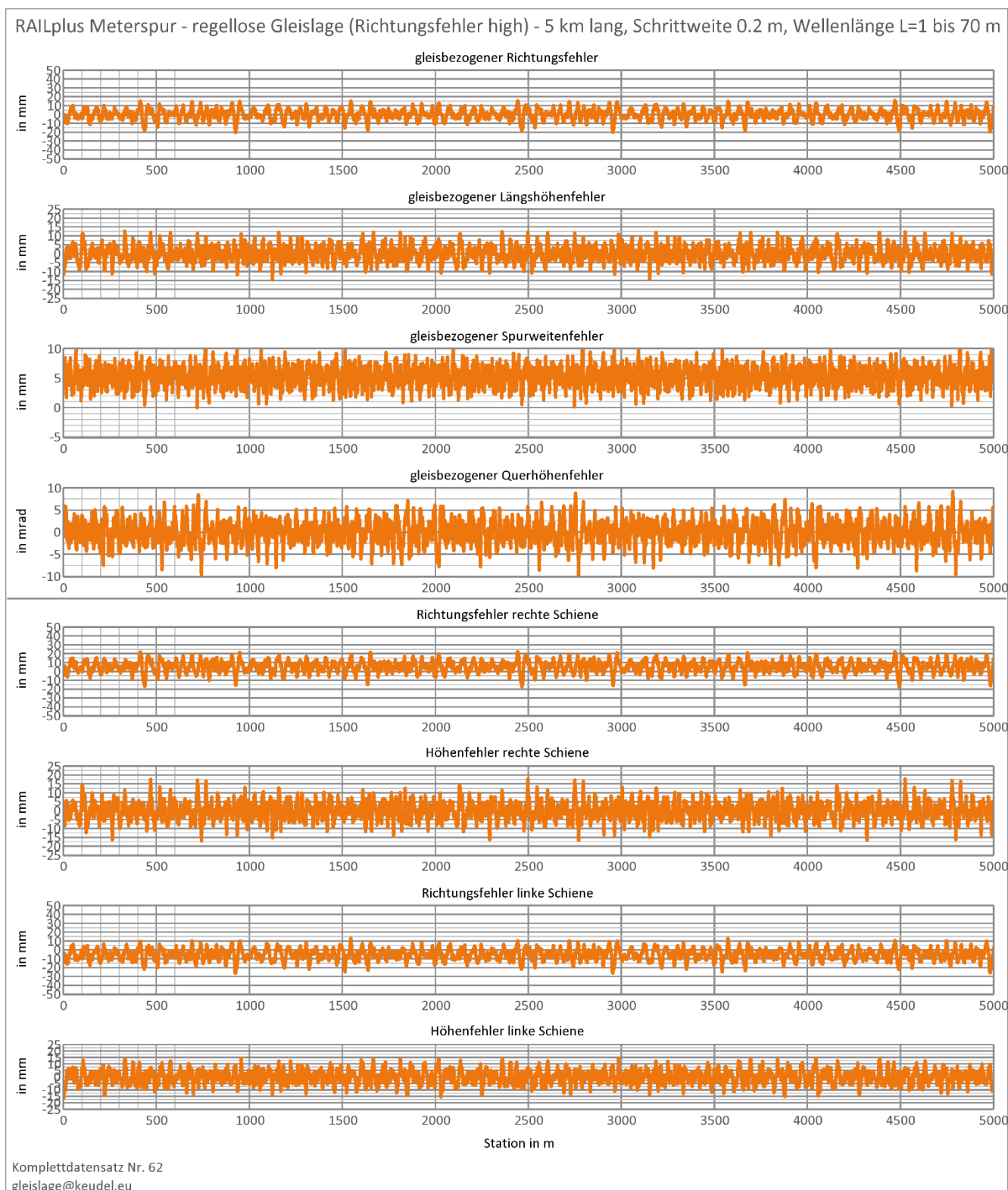


Abbildung 104: Wegabhängige Darstellung regelloser Gleislagefehler mit Störpegel «RAILplus» für $V \leq 80 \text{ km/h}$ entsprechend Spektren aus Abbildung 68, Abbildung 74, Abbildung 80, Abbildung 86

obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2),
untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)

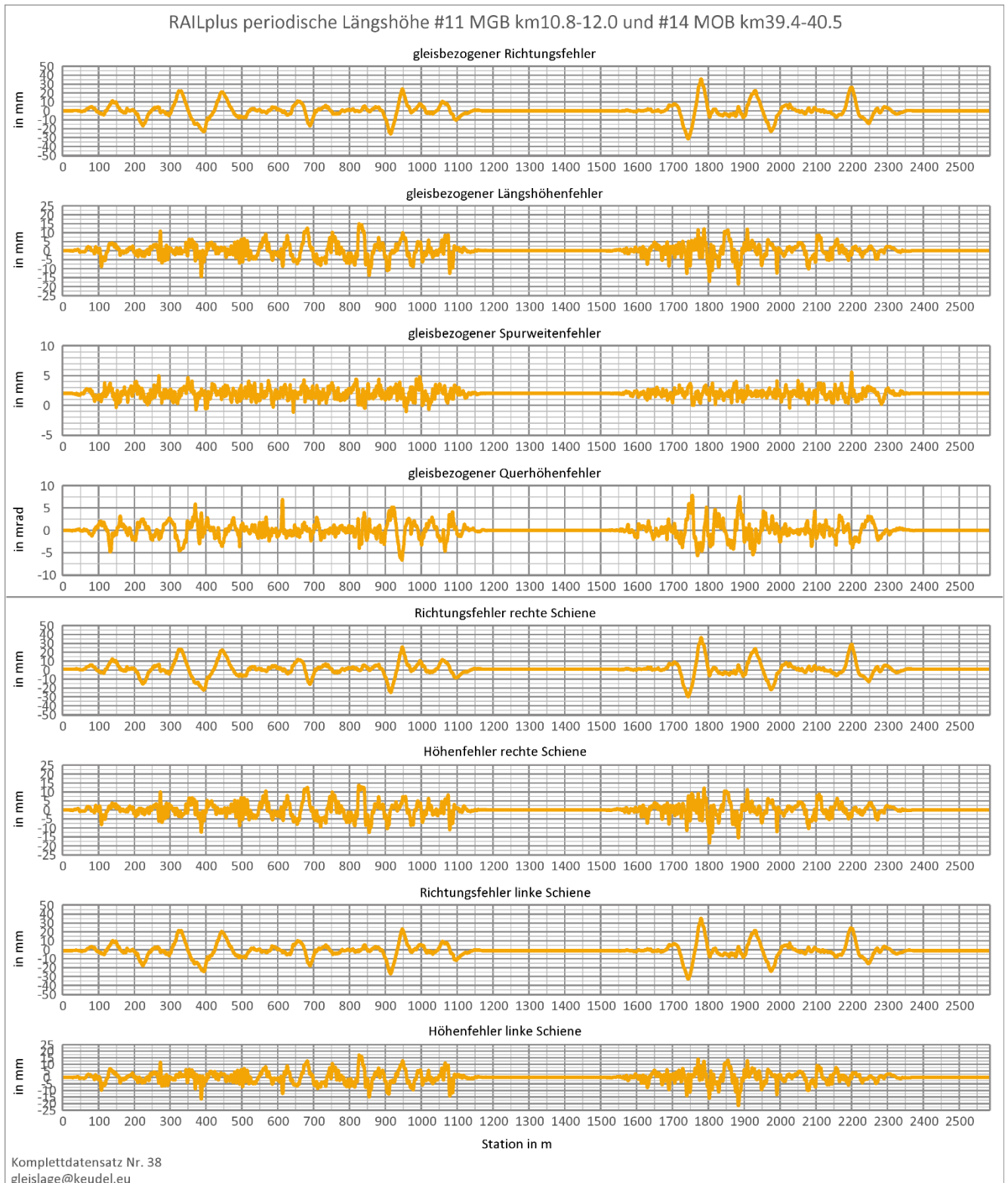


Abbildung 105: Wegabhängige Darstellung RAILplus-Gleislagefehler mit periodischen Längshöhenfehlern, zusammengesetzt aus den Messabschnitten gemäss Abbildung 92 und Abbildung 93, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)

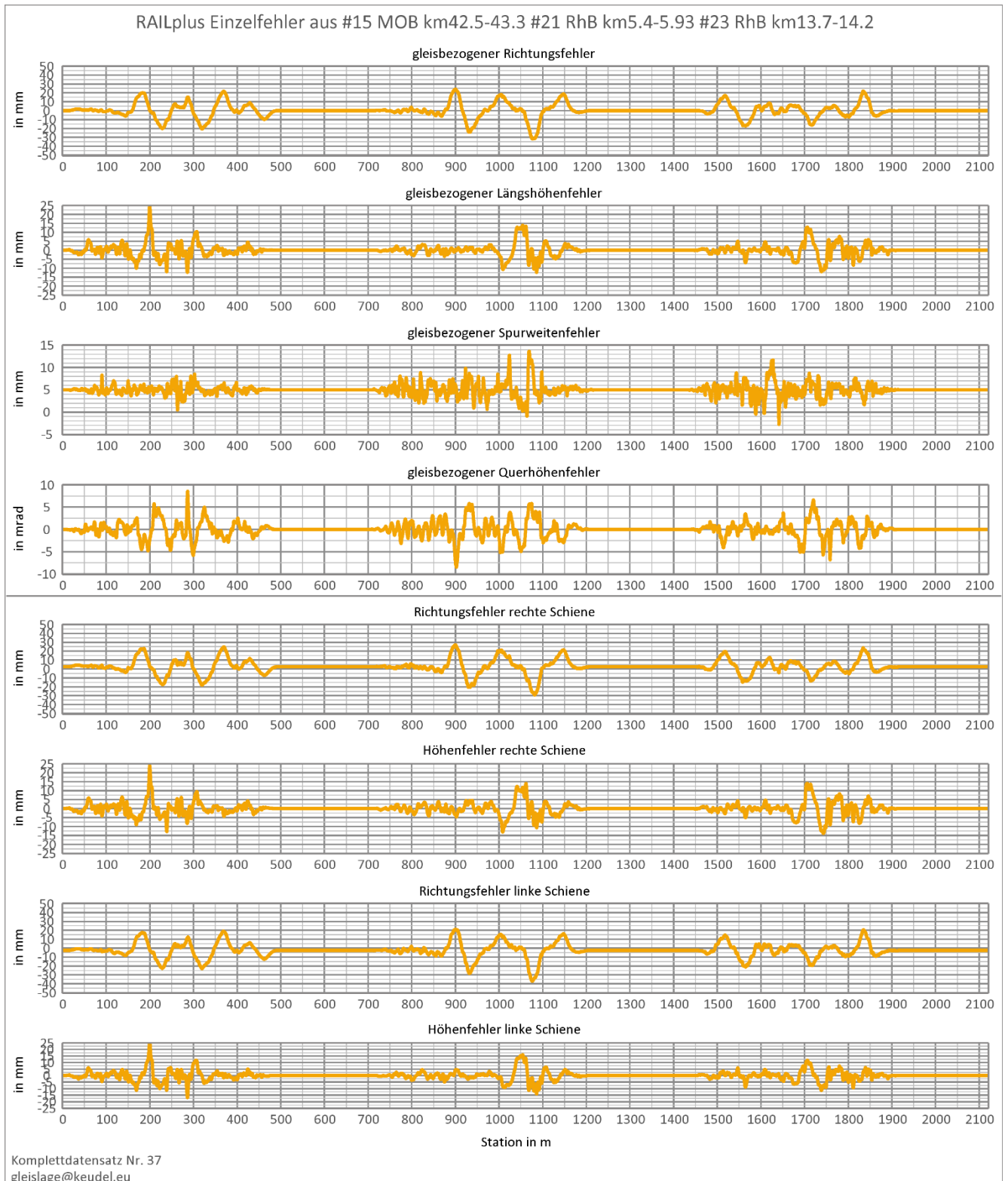


Abbildung 106: Wegabhängige Darstellung RAILplus-Gleislagefehler mit Einzelereignissen, zusammengesetzt aus den Messabschnitten gemäss Abbildung 100, Abbildung 101 und Abbildung 102, obere vier Grafikzeilen in gleisachsenabhängiger Beschreibung (Abbildung 2), untere vier Grafikzeilen in schienenabhängiger Beschreibung (Abbildung 3)