Allianz Fahrweg Normalspur / Freiburgstrasse 130, CH-3001 Bern / info@allianz-fahrweg.ch / allianz-fahrweg.ch

Technische und wirtschaftliche Bewertung von besohlten Betonschwellen in Weichen

Impressum

Autoren
Katharina Korenjak, Institute of Railway Engineering and Transport Economics, TU Graz
Julia Egger, Institute of Railway Engineering and Transport Economics, TU Graz
Makus Loidolt, Institute of Railway Engineering and Transport Economics, TU Graz
Stefan Marschnig, Institute of Railway Engineering and Transport Economics, TU Graz

Herausgeber
Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, https://allianz-fahrweg.ch

Lizenz
Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz CC-BY 4.0 freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

Link
https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/PRJ-100-092-201.pdf

Zitierung
Korenjak, K., Egger, J., Loidolt, M., Marschnig, S., *Technische und wirtschaftliche Bewertung von besohlten Betonschwellen in Weichen*, Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2026

Version
1.0.0

Interne Referenznummer
PRJ-100-092-201

ALLIANZ FAHRWEG

Inhaltsverzeichnis

1 Management Summary 4

2 Anhang 6

1 Management Summary

Die durch die Allianz Fahrweg Normalspur beauftragte Studie am Institut of Railway Engineering and Transport Economics der TU Graz untersucht den technischen und wirtschaftlichen Nutzen von besohlten Betonschwellen in Weichen im Vergleich zu konventionellen Betonschwellen. Grundlage sind Messdaten der SBB sowie ein umfangreicher Referenzdatensatz der ÖBB mit rund 1'000 Weichen. Die Kombination beider Datensätze ermöglicht sowohl eine Schweiz-spezifische Beurteilung als auch eine statistisch robuste Absicherung der Ergebnisse.

Technische Erkenntnisse

- Besohlte Betonschwellen verbessern das Gleislageverhalten deutlich.
- Zwar zeigen sie höhere mittlere Einsenkungen, diese erfolgen jedoch gleichmässiger und führen zu einer günstigeren Lastverteilung im Gleis.
- Die Verschlechterungsrate der vertikalen Gleislage ist geringer, was längere Stopfintervalle und eine höhere Nutzungsdauer der Weichen ermöglicht.
- Im SBB-Datensatz wurde eine Verbesserung der Verschlechterungsrate von rund 36% festgestellt.
- Die ÖBB-Daten bestätigen den positiven Effekt über unterschiedliche Randbedingungen hinweg mit Verbesserungen von etwa 20% bis 60%.

Wirtschaftliche Erkenntnisse

- Die technischen Vorteile führen in den meisten Szenarien zu tieferen Lebenszykluskosten.
- Im Erwartungsszenario (Szenario 0) ergeben sich:
  - 8,6% tiefere Kosten in der statischen Betrachtung.
  - 3,6% tiefere Kosten bei dynamischer Bewertung mit 5% Kalkulationszins.

Einfluss der Belastung

- Die Wirtschaftlichkeit steigt mit zunehmender Verkehrsbelastung.
- Bei Belastungen von über 15'000 t/Tag zeigt sich ein klarer wirtschaftlicher Nutzen.
- Bei Belastungen unter 15'000 t/Tag sind die Vorteile zwar technisch vorhanden, wirtschaftlich jedoch nicht in allen konservativen Szenarien eindeutig nachweisbar.

Robustheit der Ergebnisse

- Der wirtschaftliche Vorteil bleibt auch bei veränderten Randbedingungen bestehen, beispielsweise bei:
  - höheren Erneuerungskosten,
  - Berücksichtigung von Betriebserschwerniskosten,
  - anderen Weichentypen (z. B. Bogenweichen),
  - unterschiedlichen Abzweigradien.

Empfehlung

- Standardmässiger Einsatz von besohlten Betonschwellen für Weichen mit einer Belastung > 15'000 t/Tag.
- Für schwächer belastete Weichen wird der Einsatz ebenfalls als technisch sinnvoll angesehen; zur abschliessenden wirtschaftlichen Beurteilung werden jedoch zusätzliche Schweizer Erfahrungsdaten empfohlen.

Fazit: Besohlte Betonschwellen bieten eine nachweisbare Verbesserung des Gleislageverhaltens und reduzieren über den Lebenszyklus die Gesamtkosten von Weichen. Besonders bei stark belasteten Weichen stellen sie eine wirtschaftlich und technisch überzeugende Lösung dar.

2 Anhang



Technische und wirtschaftliche Bewertung von besohlten Betonschwelle in Weichen

Projekt

2026

SBB CFF FFS Schweizerische Bundesbahnen

Katharina Korenjak
Dipl.-Ing.
+43 316 873 4993
andrea.korenjak@tugraz.at

Julia Egger
Dipl.-Ing.
+43 316 873 4995
julia.egger@tugraz.at

Markus Loidolt
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech
+43 316 873 4994
markus.loidolt@tugraz.at

Stefan Marschnig
Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech
+43 316 873 6717
stefan.marschnig@tugraz.at

www.ebw.TUGraz.at

C2 - Intern

0 Management Summary

Weichen stellen einen wesentlichen Kosten- und Verfügbarkeitsfaktor im Eisenbahninfrastrukturnetz dar. Ziel dieses Projekts ist die technische und wirtschaftliche Bewertung von Weichen mit besohlten Betonschwellen im Vergleich zu konventionellen Betonschwellen. Grundlage der Untersuchung bilden zwei komplementäre Datenquellen: Einerseits Messdaten aus dem schweizerischen Streckennetz (SBB) mit detaillierten Einsenk-, Setzungs- und Gleislagemessungen, jedoch begrenzter Anzahl an Referenzweichen. Andererseits ein umfangreicher Datensatz aus dem österreichischen Netz (ÖBB) mit rund 1000 Weichen, der eine robuste statistische Absicherung und eine differenzierte Analyse über verschiedene Randbedingungen hinweg ermöglicht. Die Kombination beider Datenquellen erlaubt somit sowohl eine netzspezifische Bewertung als auch eine belastbare Einordnung der Ergebnisse.

Die technische Analyse zeigt, dass besohlte Betonschwellen das Gleislageverhalten signifikant verbessern. Zwar treten höhere mittlere Einsenkungen auf, diese sind jedoch gleichmässig und führen zu einer günstigeren Lastverteilung im Gleis. Gleichzeitig weisen besohlte Betonschwellen reduzierte Verschlechterungsraten der vertikalen Gleislage auf, was sich direkt in verlängerten Unterhaltsintervallen, insbesondere bei Stopfarbeiten, sowie in einer erhöhten Nutzungsdauer der Weichen widerspiegelt. Im schweizerischen Datensatz ergibt sich eine mittlere Verbesserung der Verschlechterungsrate von rund 36 %. Aufgrund der begrenzten Stichprobe ist dieser Wert jedoch nur eingeschränkt belastbar. Die österreichischen Daten bestätigen einen positiven Effekt konsistent über unterschiedliche Randbedingungen hinweg (u. a. Abzweigradius, Belastung, Weichengeometrie und Geschwindigkeit) und zeigen Verbesserungen in einer Grössenordnung von etwa 20 % bis 60 %. Dadurch wird das im schweizerischen Datensatz beobachtete Ergebnis in seiner Grössenordnung und Wirkungsrichtung plausibilisiert und zusätzlich gestützt.

Die wirtschaftliche Bewertung zeigt, dass die technischen Vorteile für nahezu alle Szenarien zu reduzierten Lebenszykluskosten führen. Selbst unter konservativen Annahmen bleibt die Massnahme in vielen Szenarien wirtschaftlich.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen belegen, dass die Wirtschaftlichkeit massgeblich von der Belastung abhängt. Mit steigender Verkehrsbelastung nimmt der wirtschaftliche Vorteil deutlich zu. Bei sehr niedrigen Belastungen (<15.000 t/Tag) ist der wirtschaftliche Nutzen hingegen geringer und unter konservativen Annahmen nicht in allen Fällen eindeutig nachweisbar. Gleichzeitig zeigen weitere Sensitivitätsanalysen, dass sich der wirtschaftliche Vorteil der Schwellenbesohlung unter unterschiedlichen Randbedingungen robust bestätigt. Insbesondere führen höhere Erneuerungskosten (z. B. durch Unterbausanierun-

C2 - Intern

gen), die Berücksichtigung von Betriebserschwerniskosten sowie die Anwendung auf andere Weichentypen (z. B. Bogenweichen) zu teilweise deutlich erhöhten Einsparpotenzialen. Auch bei Variation von Abzweigradien und technischen Eingangswerten ergeben sich durchgehend wirtschaftliche Vorteile, sodass die Ergebnisse insgesamt als robust gegenüber Änderungen der wesentlichen Einflussgrössen bewertet werden können.

Insgesamt zeigt sich, dass besohlte Betonschwellen eine robuste technische Verbesserung darstellen, deren Wirkung über unterschiedliche Randbedingungen hinweg konsistent nachgewiesen werden kann. Daraus ergibt sich folgende Empfehlung:

- Weichen mit einer täglichen Belastung >15.000 t/Tag sollten standardmässig mit besohlten Betonschwellen ausgeführt werden.
- Für schwächer belastete Weichen ist die Besohlung technisch sinnvoll und potenziell wirtschaftlich, jedoch mit eingeschränkter Nachweissicherheit.

Für diesen Bereich sind zusätzliche empirische Daten – insbesondere aus dem schweizerischen Netz – empfehlenswert, um die wirtschaftliche Bewertung weiter abzusichern. Insgesamt stellt die Schwellenbesohlung, insbesondere in stärker beanspruchten Weichen, eine effektive Massnahme zur Verbesserung des Gleislageverhaltens und zur Reduktion der Lebenszykluskosten dar.

C2 - Intern

Inhaltsverzeichnis

0 Management Summary 2
1 Einleitung 5
2 Datengrundlage 8
2.1 Daten – SBB 8
2.1.0 Einsenk- und Setzungsmessungen 9
2.1.1 Gleismessdaten 10
2.1.2 Asset- und Unterhaltsdaten 12
2.2 Daten – ÖBB 12
2.3 Datenaufbereitung und Datenselektion 13
3 Grundlagen der technischen Bewertung 15
3.1 Qualitätskennwerte der Gleislage 15
3.2 Analyse des Verschlechterungsverhaltens 17
3.3 Vergleichsdesign (Referenzweichen) 18
4 Ergebnisse der technischen Analyse 21
4.1 Einsenk- und Setzungsmessungen (SBB) 21
4.1.1 Gefilterte Einsenkung 22
4.2 Analyse Gleislageverhalten 27
4.2.1 SBB-Weichen 27
4.2.2 Referenzweichen ÖBB 35
4.3 Vergleich der Ergebnisse SBB und ÖBB und Limitationen 42
5 Wirtschaftliche Bewertung 44
6 Schlussfolgerungen/Fazit 45
7 Appendix 48
8 Abkürzungsverzeichnis 53

C2 - Intern

1 Einleitung

Weichen sind ein zentraler Bestandteil der Eisenbahninfrastruktur. Sie ermöglichen den Spurwechsel von Zügen und sind wesentlich für die betriebliche Flexibilität und Verfügbarkeit des Netzes. Für einen zuverlässigen Betrieb ist es daher erforderlich, den Zustand von Weichen und ihrer Komponenten zu kennen und regelmässig zu überwachen. Dies bildet die Grundlage für eine gezielte Planung und Durchführung von Unterhaltsmassnahmen. Neben der betrieblichen Bedeutung sind Weichen auch aus wirtschaftlicher Sicht relevant. Erfahrungen aus verschiedenen Bahnnetzen zeigen, dass ein grosser Anteil der Fahrwegerhaltungskosten auf Weichen entfällt. In vielen Fällen wird berichtet, dass bis zu einem Drittel der jährlichen Unterhaltskosten durch Weichen verursacht werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, den Zustand von Weichen systematisch zu analysieren und technische Lösungen einzusetzen, die das Gleissystem schonen und den Unterhaltsbedarf reduzieren. Eine sich bei der ÖBB bewährte technische Lösung ist die Besohlung von Betonschwellen.

Ziel dieses Projektes ist es, den technischen und wirtschaftlichen Nutzen von Weichen mit besohlten Betonschwellen im Vergleich zu konventionellen Betonschwellen zu untersuchen und zu bewerten. Der erste Fokus der Untersuchung liegt auf Weichen im schweizerischen Streckennetz. Dabei soll analysiert werden, inwieweit die Schwellenbesohlung das Gleislageverhalten beeinflusst und welche Auswirkungen sich daraus auf den Unterhaltsbedarf und die Wirtschaftlichkeit ergeben.

Die Datengrundlage des Projektes umfasst Messdaten von ca. 40 Weichen im Netz der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), die mit besohlten Betonschwellen ausgestattet sind. Zusätzlich stehen Referenzweichen mit konventionellen Betonschwellen zur Verfügung, die hinsichtlich Belastung und geometrischer Eigenschaften möglichst vergleichbar ausgewählt wurden. Für diese Weichen liegen Gleislagemessungen aus dem Gleismesswagen sowie teilweise Einsenk- und Setzungsmessungen vor.

Aufgrund der begrenzten Stichprobengrösse im Schweizer Datensatz werden ergänzend Daten aus dem österreichischen Streckennetz herangezogen. In Österreich werden besohlte Betonschwellen bereits seit dem Jahr 2009 eingesetzt, wodurch eine deutlich grössere Datengrundlage verfügbar ist. Insgesamt stehen dort Daten von rund 1000 Weichen mit konventionellen sowie besohlten Betonschwellen zur Verfügung. Diese zusätzlichen Daten ermöglichen es, die Ergebnisse der Analyse zu erweitern und die beobachteten Effekte besser einzuordnen.

C2 - Intern

Im Rahmen des Projektes erfolgt zunächst eine technische Analyse des Gleislageverhaltens von Weichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen. Dazu werden Qualitätskennwerte der Gleislage sowie deren zeitliche Entwicklung untersucht. Die Ergebnisse dieser technischen Bewertung bilden die Grundlage für die anschliessende wirtschaftliche Analyse, in der die zusätzlichen Investitionskosten der Schwellenbesohlung den potenziellen Einsparungen bei Unterhaltsmassnahmen gegenübergestellt werden.

Das übergeordnete Ziel des Projektes besteht darin, das Potenzial von besohlten Betonschwellen in Weichen hinsichtlich Gleislageverhalten, Unterhaltsbedarf und Wirtschaftlichkeit zu bewerten und daraus mögliche Einsatzkriterien für den Infrastrukturbetreiber abzuleiten.

Das Projekt gliedert sich in vier Arbeitspakete, die das methodische Vorgehen sowie den inhaltlichen und zeitlichen Ablauf der Untersuchung strukturieren:

- AP1 Datensichtung und Data Preprocessing
  In Arbeitspaket 1 werden die von der SBB bereitgestellten Messdaten sowie die ergänzend herangezogenen österreichischen Daten systematisch gesichtet, aufbereitet und hinsichtlich ihrer Auswertbarkeit geprüft. Dies umfasst insbesondere die Bereinigung und Strukturierung der Gleislagemessdaten aus dem Diagnosefahrzeug sowie der verfügbaren Einsenk- und Setzungsmessungen. Darüber hinaus wird sichergestellt, dass die Messdaten eindeutig den zugehörigen Anlagedaten – etwa zur täglichen Belastung, zum Weichentyp, zur Geometrie oder zu weiteren betrieblichen Randbedingungen – zugeordnet werden können. Das Ziel dieses Arbeitspakets besteht darin, eine konsistente und belastbare Datengrundlage für die weiteren Analysen zu schaffen.
- AP2 Analyse des Gleislageverhaltens und Berechnung von Qualitätskennwerten
  In Arbeitspaket 2 wird das Gleislageverhalten von Weichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen technisch bewertet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der vertikalen Gleislage, insbesondere auf dem Längshöhensignal D1 im Wellenlängenbereich von 3 bis 25 m. Auf Basis dieses sicherheitsrelevanten Messsignals wurden Qualitätskennwerte berechnet und deren zeitliche Entwicklung untersucht, um das Verschlechterungsverhalten der Weichen sowie den daraus ableitbaren Unterhaltsbedarf zu bewerten.
- AP3 Wirtschaftliche Bewertung von Weichen mit besohlte Betonschwellen
  Das Arbeitspaket 3 baut auf den Ergebnissen der technischen Analyse auf. Ziel ist es, die technische Wirkung der Schwellenbesohlung nicht nur zu bewerten, sondern auch ihre wirtschaftliche Relevanz im Vergleich zu konventionellen Betonschwellen zu untersuchen. Dazu werden die zusätzlichen Investitionskosten den potenziellen Einsparungen bei Unterhaltsmassnahmen gegenübergestellt. Grundlage hierfür sind

C2 - Intern

Standardelemente zur Beschreibung des Lebenszyklus von Komponenten sowie die im Rahmen der technischen Analyse gewonnenen Erkenntnisse zum Gleislageverhalten und zu möglichen Veränderungen von Stopf- und Unterhaltszyklen. Ergänzend werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss wichtiger Randbedingungen, wie etwa der Betriebskosten, der Anschaffungskosten oder eines verminderten technischen Effekts der Besohlung, auf die Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

- AP4 Projektbericht

  Im Arbeitspaket 4 werden die im Projekt angewandten Methoden, die Datengrundlagen sowie die Ergebnisse der technischen und wirtschaftlichen Analysen systematisch dokumentiert und zusammenfassend dargestellt.

Die zeitliche Einordnung der Arbeitspakete ist im Projektablaufplan (Abbildung 1) dargestellt. Die vorgesehenen Arbeitsschritte konnten im Wesentlichen innerhalb der geplanten Zeitspannen umgesetzt werden.

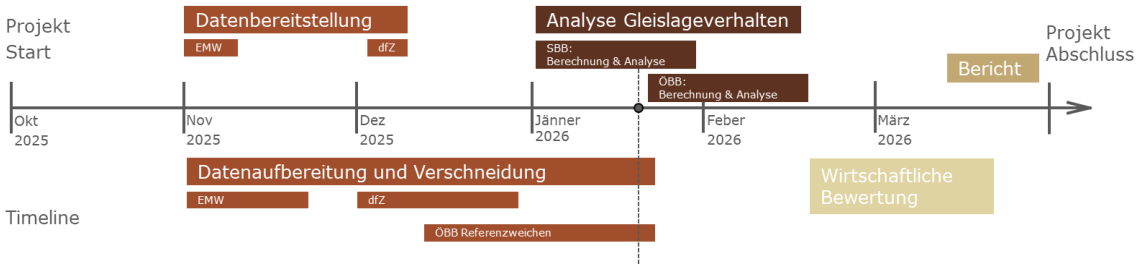


Abbildung 1: Projektablaufplan

Ergänzend ist anzumerken, dass aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Daten zu Weichen mit konventionellen und besohlten Betonschwellen im Schweizer Streckennetz zusätzliche Daten aus Österreich herangezogen wurden. Dies erfolgte in Abstimmung mit der ÖBB; die Verwendung der österreichischen Daten wurde nach entsprechender Rücksprache seitens der ÖBB freigegeben. Diese dienen insbesondere dazu, das Langzeitverhalten von Weichen mit besohlten Betonschwellen im Vergleich zu konventionellen Betonschwellen fundierter zu bewerten. Die österreichischen Daten erweitern somit die Datengrundlage des Projekts und tragen dazu bei, die Ergebnisse der technischen Analyse der Schweizer Daten besser einzuordnen und zu stützen.

C2 - Intern

2 Datengrundlage

Für die technische Bewertung von Weichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen stehen verschiedene Datensätze zur Verfügung. Dazu zählen Einsenk- und Setzungsmessungen sowie Gleislagemessungen vom Diagnosefahrzeug (Dfz). Diese Messdaten bilden die Grundlage zur Analyse des Gleislageverhaltens. Ergänzend liegen für ausgewählte Weichen Asset- und Betriebsdaten vor. Dazu gehören insbesondere Informationen zur täglichen Belastung, zum Zustand des Unterbaus, zu durchgeführten Unterhaltsmassnahmen sowie zur zulässigen Betriebsgeschwindigkeit. Sämtliche Messdaten werden über die Streckenstationierung eindeutig den jeweiligen Weichen zugeordnet, sodass eine konsistente zeitliche Analyse des Gleislagezustands ermöglicht wird.

Insbesondere bei der Analyse von Weichen sind die Datensichtung, Datenbereinigung sowie die Synchronisierung bzw. Verortung der Messsignale von zentraler Bedeutung. Da sich Weichen nur über einen vergleichsweise kurzen Bereich erstrecken – im Regelfall etwa 30 bis 70 m –, ist eine präzise räumliche Zuordnung der Daten besonders wichtig. Nur wenn die Messsignale sowohl zueinander als auch absolut korrekt verortet sind, ist eine belastbare und aussagekräftige Analyse des Gleislageverhaltens möglich.

Zur Erweiterung der Datengrundlage werden ergänzend Gleislagemessungen von Weichen aus dem österreichischen Streckennetz herangezogen. Ziel ist es, das Langzeitverhalten von Weichen mit besohlten Betonschwellen fundierter zu bewerten und zugleich die begrenzte Stichprobengrösse der im schweizerischen Bahnnetz verfügbaren Referenzdaten für Weichen mit konventionellen Betonschwellen zu kompensieren. Für diese liegen lediglich Messdaten von zwei mit dem Diagnosefahrzeug erfassten Weichen vor. Durch die Einbeziehung der österreichischen Daten kann der Effekt der Schwellenbesohlung robuster analysiert und die Aussagekraft der Untersuchung verbessert werden.

2.1 Daten – SBB

Insgesamt stehen aus dem schweizerischen Streckennetz Messdaten von 28 Weichen mit Einsenk- und Setzungsmessungen sowie von 35 Weichen mit Gleislagemessungen zur Verfügung. Der vorliegende Datensatz umfasst dabei überwiegend Weichen mit besohlten Betonschwellen. Demgegenüber ist die Anzahl verfügbarer Referenzweichen mit konventionellen Betonschwellen stark limitiert. Für diese liegen lediglich Einsenk- und Setzungsmessungen von drei Weichen sowie Gleislagemessungen von zwei Weichen vor. Bei der Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 3.2 ist diese begrenzte Vergleichsgrundlage entsprechend zu berücksichtigen.

C2 - Intern

2.1.2 Einsenk- und Setzungsmessungen

Der Einsenk- und Setzungsmesswagen erfasst die Einsenkung des Gleiskörpers unter Überfahrt und erlaubt damit Rückschlüsse auf die Steifigkeit des Oberbau- und Unterbausystems. Für die vorliegende Untersuchung stehen Einsenk- und Setzungsmessdaten von insgesamt 28 Weichen zur Verfügung. Darunter befinden sich 23 Weichen mit besohlten Betonschwellen sowie 5 Referenzweichen mit konventionellen Betonschwellen. Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Weichen nach Weichentyp und Abzweigradius. Für die weiteren Analysen werden ausschliesslich Einfachweichen (EW) berücksichtigt.

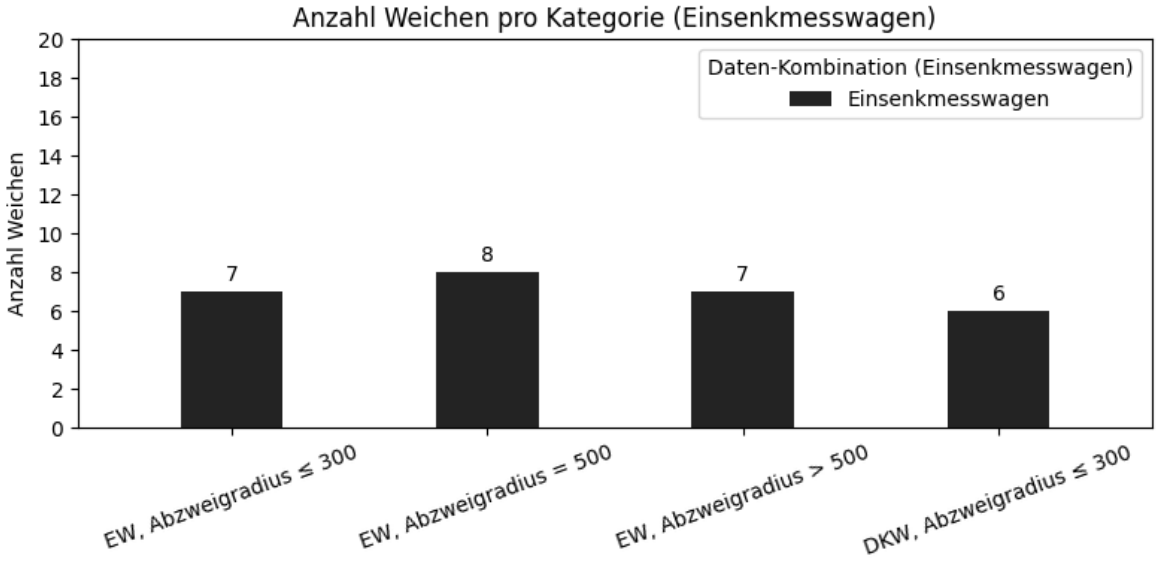


Abbildung 2: Verteilung der im Datensatz enthaltenen Weichen mit Einsenk- und Setzungsmessungen nach Weichentyp und Abzweigradius.

Die Referenzweichen wurden so ausgewählt, dass sie hinsichtlich Belastung, Unterbau und geometrischer Eigenschaften möglichst gut mit den Weichen mit besohlten Betonschwellen vergleichbar sind. Je nach Weiche liegen zwischen einer und vier Messfahrten vor, die in der Regel in einem Abstand von etwa zwölf Monaten durchgeführt wurden. Die Messdaten umfassen sowohl den durchgehenden als auch den ablenkenden Strang der Weiche.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Verlauf der Einsenk- und Setzungsmessungen einer ausgewählten Weiche für mehrere Messfahrten. Dargestellt ist die gemittelte Einsenkung der linken und rechten Schiene in mm über der Streckenlage in km. Die Abbildung verdeutlicht, dass sowohl die Datenqualität als auch die räumliche Zuordnung der Messsignale für die durchgeführten Analysen ausreichend sind.

C2 - Intern

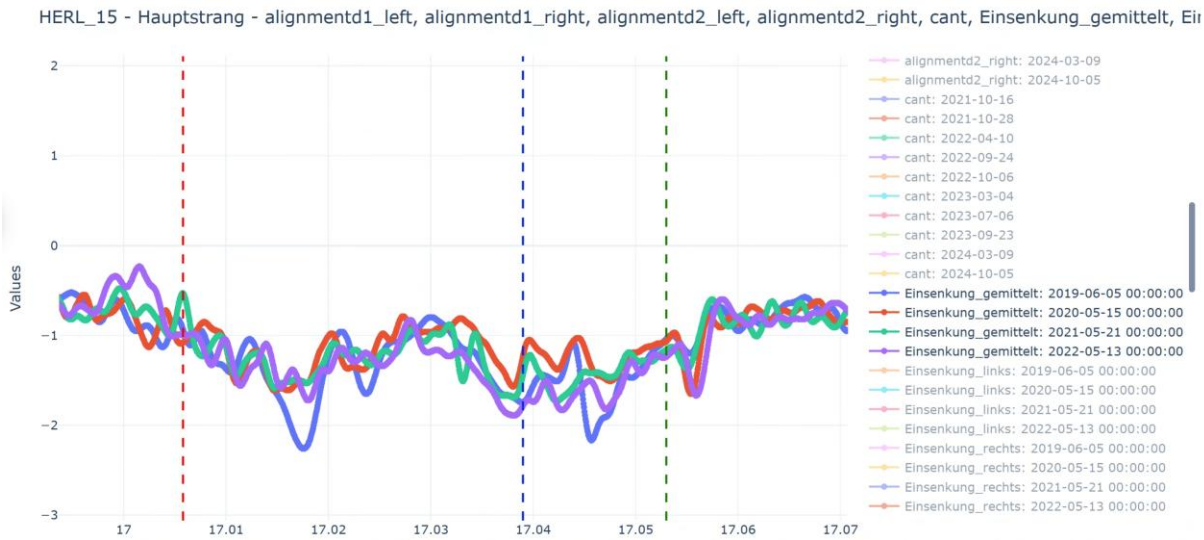


Abbildung 3: Beispielhafte Einsenk- und Setzungsmessungen einer ausgewählten Weiche über mehrere Messfahrten.

2.1.1 Gleismessdaten

Die Gleislagemessungen des Diagnosefahrzeugs (Dfz) bilden die Grundlage für die Analyse des Gleislageverhaltens der untersuchten Weichen. Insgesamt stehen Messdaten von 35 Weichen zur Verfügung: 32 Weichen mit besohlten Betonschwellen und drei Weichen mit konventionellen Betonschwellen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist die eingeschränkte Anzahl an Referenzweichen entsprechend zu berücksichtigen. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der im Dfz-Datensatz enthaltenen Weichen nach Weichentyp und Abzweigradius. Für die weiteren Analysen werden ausschliesslich Einfachweichen (EW) berücksichtigt.

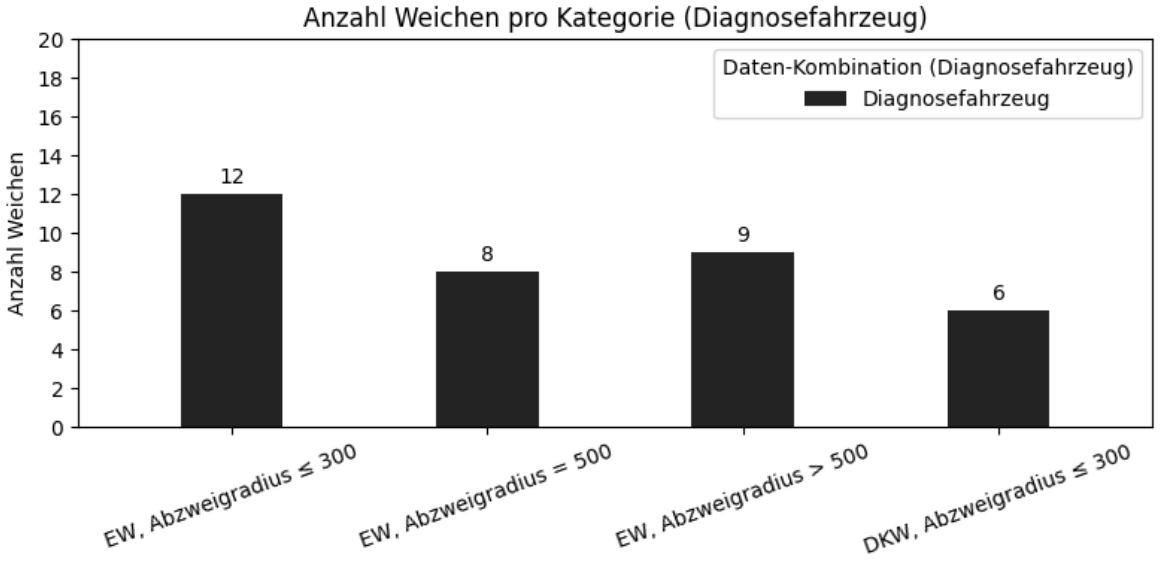


Abbildung 4: Verteilung der mit dem Dfz erfassten Weichen nach Weichentyp und Abzweigradius.

C2 - Intern

Die Messdaten umfassen verschiedene Gleislageparameter wie die vertikale Gleislage, die Richtung, die Spurweite und die Verwindung und sind in einer Abtastrate von 25 cm abgespeichert. Für die vorliegende Analyse wurde insbesondere die vertikale Gleislage im Wellenlängenbereich D1 (3–25 m) herangezogen, da dieser Bereich für die Beurteilung der Gleislagequalität und des Verschlechterungsverhaltens von massgeblicher Bedeutung ist.

Die Daten wurden für jede Weiche und jede Messfahrt bereitgestellt und weichenweise für die Auswertung zusammengeführt. Je nach Weiche erstreckt sich die Datengrundlage über einen Zeitraum von etwa einem bis drei Jahren, wobei in der Regel zwei bis drei Messfahrten pro Jahr vorliegen. Zu berücksichtigen ist, dass das Diagnosefahrzeug im Weichenbereich meist den Hauptstrang befährt. Potenzielle Befahrungen des abzweigenden Asts werden aus dem Datenset entfernt und werden bei den weiteren Analysen nicht berücksichtigt.

Für die Auswertung werden die Messdaten über die Streckenstationierung eindeutig den jeweiligen Weichen zugeordnet. Aufgrund der geringen Längsausdehnung von Weichen ist eine präzise räumliche Verortung der Messsignale wesentlich für eine belastbare Analyse. Die Datenqualität und die Zuordnung der Messsignale sind für die durchgeführten Auswertungen ausreichend. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Verlauf der vertikalen Gleislage D1 im Wellenlängenbereich von 3 bis 25 m der linken Schiene einer ausgewählten Weiche über mehrere Messfahrten des Diagnosefahrzeugs. Die y-Achse stellt die Messwerte der vertikalen Gleislage in mm dar, während auf der x-Achse die Streckenlage in km abgetragen ist.

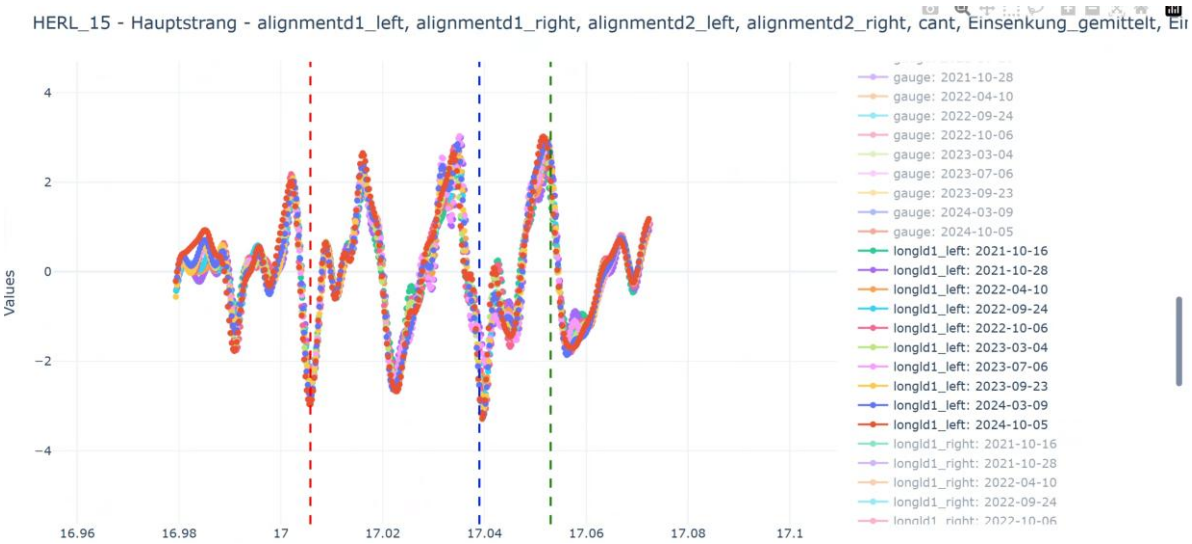


Abbildung 5: Beispielhafter Verlauf der vertikalen Gleislage D1 einer ausgewählten Weiche über mehrere Messfahrten.

C2 - Intern

Asset- und Unterhaltsdaten

Ergänzend zu den Messdaten wurden für die einzelnen Weichen Asset- und Unterhaltsdaten bereitgestellt. Diese umfassen Angaben zum Anlagenbaujahr, zum Schwellentyp, zum Weichentyp, zum Abzweigradius sowie zur Unterbauausführung. Zusätzlich liegen betriebliche Kenngrössen wie die tägliche Belastung, die maximale zulässige Geschwindigkeit (V_{max}) und die Aufteilung des Verkehrs auf Hauptstrang und Ablenkung vor.

2.1.2

Für die Interpretation der Zeitreihen sind darüber hinaus Informationen zu durchgeführten Unterhaltsmassnahmen wesentlich, da diese das Gleislageverhalten und dessen zeitliche Entwicklung massgeblich beeinflussen können.

2.2 Daten – ÖBB

Zur zusätzlichen Absicherung und Einordnung der auf Basis der schweizerischen Daten gewonnenen Erkenntnisse werden im Rahmen dieses Projekts ergänzend Messdaten aus dem österreichischen Streckennetz herangezogen. Ziel ist es, die Aussagen der technischen Analyse zu untermauern und insbesondere die Auswirkungen besohlter Betonschwellen im Vergleich zu konventionellen Betonschwellen auf einer breiteren Datengrundlage zu bewerten.

Der in Österreich verfügbare Datensatz umfasst knapp 1000 Weichen mit unterschiedlichen Geometrien, Abzweigradien, Konfigurationen, täglichen Belastungen und Anlagenbaujahren. Für die vorliegende Untersuchung werden daraus ausschliesslich Weichen mit starren Herzen betrachtet, die entweder mit konventionellen oder mit besohlten Betonschwellen ausgestattet sind. Die verfügbaren Daten umfassen Gleislagemessungen, die mit den Messfahrzeugen EM250 und EM160 erfasst wurden. Wie bereits für die schweizerischen Daten beschrieben, liegt der Schwerpunkt der Auswertung auf der vertikalen Gleislage, insbesondere auf dem Längshöhensignal D1 im Wellenlängenbereich von 3 bis 25 m. Dieses Signal liegt mit einer Abtastrate von 25 cm vor und bildet die Grundlage für die spätere Zeitreihenanalyse.

Ergänzend stehen zu den österreichischen Weichen auch Anlagendaten zur Verfügung, darunter insbesondere Informationen zum Schwellentyp, zum Einbaujahr sowie zur täglichen Belastung. Für die Verwendung der Messdaten ist ebenfalls eine Synchronisierung und räumliche Verortung der einzelnen Messfahrten erforderlich, da nur auf dieser Grundlage eine konsistente Zeitreihenanalyse des Gleislageverhaltens durchgeführt werden kann.

C2 - Intern

2.3 Datenaufbereitung und Datenselektion

Vor Beginn der eigentlichen Analyse ist sicherzustellen, dass die Gleislagedaten korrekt synchronisiert und räumlich verortet sind. Nur wenn Messfahrten aus unterschiedlichen Zeitpunkten dieselbe örtliche Lage innerhalb der Weiche beschreiben, können konsistente Zeitreihenanalysen durchgeführt werden. Darüber hinaus sind vorhandene Unterhaltsmassnahmen mit den Messdaten zu verknüpfen, da Eingriffe wie Stopf- oder Schleifarbeiten die Signalcharakteristik und insbesondere die vertikale Gleislage wesentlich beeinflussen.

Für die Bewertung des Gleislageverhaltens ist zudem zu berücksichtigen, dass dieses nicht ausschliesslich vom Schwellentyp abhängt. Weitere relevante Einflussgrössen sind insbesondere Geometrie, Abzweigradius, tägliche Belastung, V_{max} und Anlagenalter. Aufgrund der geringen Stichprobengrösse im schweizerischen Datensatz ist eine getrennte Betrachtung dieser Einflussgrössen dort jedoch nur eingeschränkt möglich. Dies gilt insbesondere für den Vergleich mit Weichen mit konventionellen Betonschwellen, für die nur sehr wenige Referenzdaten vorliegen. Aus diesem Grund werden ergänzend österreichische Daten herangezogen. Aufgrund der deutlich grösseren Stichprobe ist es hier möglich, ein hinsichtlich zentraler Einflussgrössen möglichst ausgewogenes Vergleichskollektiv aus Beobachtungen mit konventionellen und mit besohlten Betonschwellen zusammenzustellen. Hierzu werden die Daten zunächst nach den Merkmalen Alter, tägliche Belastung, Abzweigradius und maximal zulässige Geschwindigkeit (V_{max}) in vergleichbare Gruppen eingeteilt. Berücksichtigt werden anschliessend nur jene Gruppen, in denen sowohl Beobachtungen zu konventionellen als auch zu besohlten Betonschwellen vorliegen. Innerhalb dieser Gruppen wird aus beiden Schwellentypen jeweils dieselbe Anzahl an Beobachtungen ausgewählt, sodass ein balanciertes Vergleichskollektiv entsteht. Eine Methode, die in der Datenverarbeitung unter dem Begriff Matching bekannt ist.

Ziel dieser Datenselektion ist es, Unterschiede in der Zusammensetzung der Vergleichsgruppen zu reduzieren und den Einfluss der Schwellenbesohlung belastbarer bewerten zu können. Auf dieser Grundlage gehen rund 400 Beobachtungen in die technische Analyse der österreichischen Daten ein.

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der zuvor genannten Einflussgrössen im österreichischen Datensatz vor und nach der Datenselektion. Dargestellt sind die Schwellenart, die V_{max}-Klassen, die Belastungsklassen, die Altersklassen sowie die Radiusklassen jeweils getrennt nach konventionellen und besohlten Betonschwellen. Es ist erkennbar, dass sich die Verteilungen der beiden Vergleichsgruppen durch die balancierte Auswahl deutlich angleichen. Gleichzeitig reduziert sich der ursprüngliche Datenumfang. Die Abbildung verdeutlicht damit, dass die Datenselektion nicht der Maximierung der Stichprobe dient, sondern der Ver-

C2 - Intern

besserung der Vergleichbarkeit beider Gruppen hinsichtlich der wesentlichen Randbedingungen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um den Einfluss der Schwellenbesohlung in der späteren technischen Analyse belastbarer bewerten zu können.

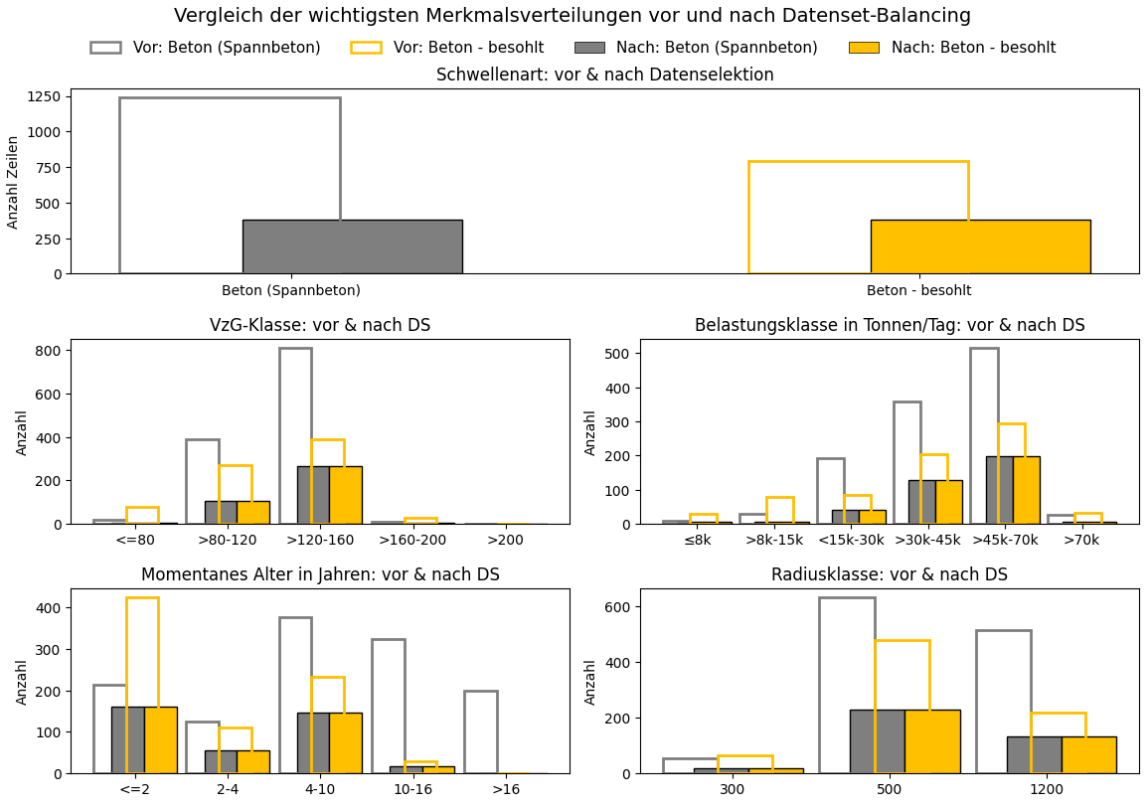


Abbildung 6: Vergleich der wichtigsten Merkmalsverteilungen im österreichischen Datensatz vor und nach der Datenselektion, getrennt nach konventionellen (in Grau) und besohlten Betonschwellen (in Gelb).

Abbildung 6 zeigt, dass ohne eine Angleichung des Datensatzes einzelne Merkmale in einer Gruppe überrepräsentiert sein könnten. So würden beispielsweise ältere Weichen mit konventionellen Betonschwellen häufiger im Datensatz enthalten sein als vergleichbare Weichen mit besohlten Betonschwellen. In diesem Fall wären Unterschiede im Gleislageverhalten nicht eindeutig dem Schwellentyp zuzuordnen. Durch die gewählte Stichprobenziehung werden solche Ungleichgewichte reduziert und die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen verbessert. Das daraus resultierende balancierte Teilkollektiv bildet die Grundlage für die nachfolgende technische Analyse.

C2 - Intern

3 Grundlagen der technischen Bewertung

Ziel der technischen Bewertung ist es, das Gleislageverhalten von Weichen mit besohlten Betonschwellen mit jenem von Weichen mit konventionellen Betonschwellen zu vergleichen und den Einfluss der Schwellenbesohlung auf das Verschlechterungsverhalten der Gleislage zu bewerten. Grundlage der Analyse sind Messungen der vertikalen Gleislage, die im schweizerischen Datensatz durch das Diagnosefahrzeug der SBB und im österreichischen Datensatz durch die Gleismesswagen der ÖBB erfasst wurden. Im Mittelpunkt steht dabei das Längshöhensignal D1 im Wellenlängenbereich von 3 bis 25 m, da dieser Bereich aufgrund des Einflusses auf die Fahrdynamik für die Beurteilung der Gleislagequalität und des Unterhaltsbedarfs besonders relevant ist.

Nach der Aufbereitung und Synchronisierung der Messdaten wird das Gleislageverhalten nicht anhand einzelner Messwerte, sondern mithilfe eines Qualitätskennwerts und dessen zeitlicher Entwicklung beschrieben. Im Folgenden wird zunächst die Herleitung dieses Kennwerts erläutert und anschliessend die Bestimmung der Verschlechterungsrate dargestellt.

Die Ergebnisse der technischen Bewertung bilden die Grundlage für die nachfolgende wirtschaftliche Analyse. Ziel ist es, aus den beobachteten Unterschieden im Verschlechterungsverhalten Aussagen zum technischen und wirtschaftlichen Nutzen besohlter Betonschwellen abzuleiten.

3.1 Qualitätskennwerte der Gleislage

Zur quantitativen Beschreibung des Gleislagezustands wird aus dem Längshöhensignal D1 ein zusammenfassender Qualitätskennwert abgeleitet. Bei Weichen ist die direkte Anwendung üblicher Kennwerte jedoch nur eingeschränkt möglich, da Weichen im Vergleich zur freien Strecke relativ kurze Komponenten darstellen. So ist beispielsweise die Berechnung einer gleitenden Standardabweichung problematisch, da hierfür in der Regel ein Betrachtungsfenster von mindestens 25 m erforderlich ist, während Weichen oft nur eine ähnliche oder geringere Länge aufweisen.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit der cumulative Track Geometry Index (cTGI) verwendet. Dabei werden die Beträge der Werte des Längshöhensignals über den betrachteten Weichenbereich aufsummiert und durch die Anzahl der gültigen Messwerte dividiert.

$$cTGI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|D1_i|$$

C2 - Intern

Der Kennwert beschreibt damit die mittlere betragsmässige Abweichung der vertikalen Gleislage innerhalb der Weiche. Höhere Werte weisen auf einen schlechteren Gleislagezustand hin, niedrigere Werte auf eine günstigeren Gleislagezustand. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die robuste Handhabung fehlender Messwerte. Sollte es zu Messausfällen im Signal kommen – was im Längshöhensignal jedoch nur selten der Fall ist – können diese durch die Normierung auf die Anzahl der gültigen Messwerte einfach berücksichtigt werden.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft das Längshöhensignal mehrerer Messfahrten über den betrachteten Weichenbereich. Negative Signalwerte gehen dabei betragsmässig in die cTGI-Berechnung ein. Abbildung 8 zeigt darauf aufbauend das betragsmässige Längshöhensignal sowie dessen kumulierte Summe. Der Endwert über den betrachteten Weichenbereich bildet die Grundlage für die Berechnung des cTGI. Hierfür wird der Endwert mit der Anzahl der berücksichtigten Messpunkte (entspricht der Weichenlänge) skaliert und dadurch vergleichbar gemacht. Die zeitliche Entwicklung des cTGI über mehrere Messfahrten hinweg bildet anschliessend die Grundlage für die Beschreibung des Verschlechterungsverhaltens der vertikalen Gleislage von Weichen.

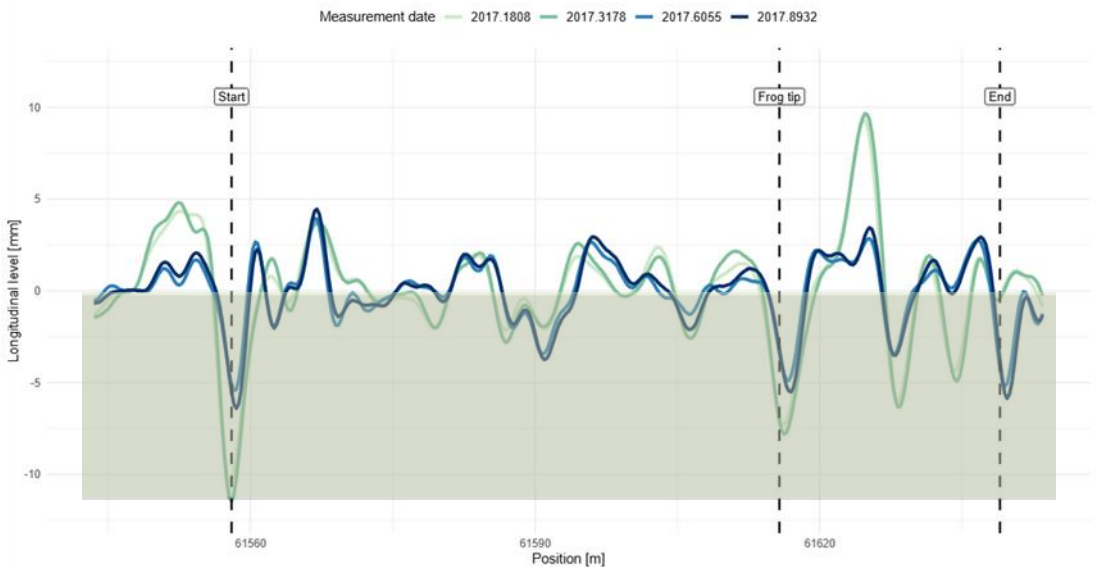


Abbildung 7: Längshöhensignal mehrerer Messfahrten über den betrachteten Weichenbereich. Negative Signalwerte sind grün markiert und gehen betragsmässig in die cTGI-Berechnung ein.

C2 - Intern

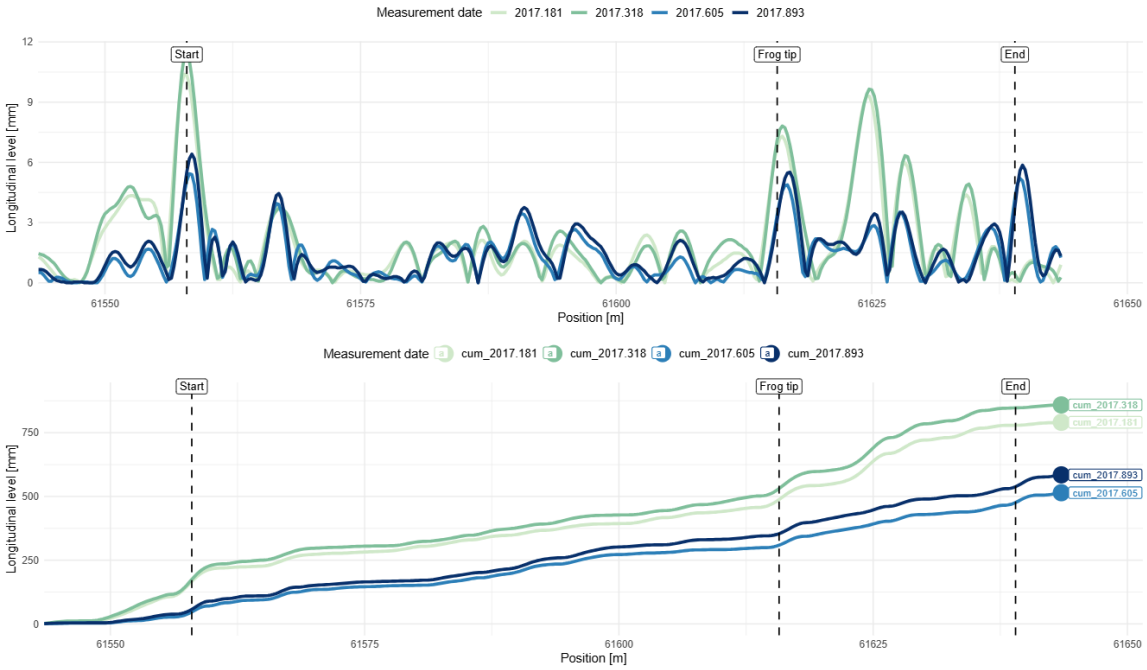


Abbildung 8: Oberer Plot: betragsmässiges Längshöhensignal mehrerer Messfahrten. Unterer Plot: kumulierte Summe des betragsmässigen Längshöhensignals; der Endwert über den betrachteten Weichenbereich wird zur Berechnung des cTGI herangezogen.

3.2 Analyse des Verschlechterungsverhaltens

Für die Beurteilung des Gleislageverhaltens ist nicht nur der absolute Wert eines Qualitätskennwerts relevant, sondern ebenso dessen zeitliche Entwicklung. Zwar beschreibt ein einzelner cTGI-Wert den Zustand der vertikalen Gleislage zu einem bestimmten Zeitpunkt, Aussagen über das Verschlechterungsverhalten sind jedoch erst durch die Betrachtung mehrerer Messfahrten im Zeitverlauf möglich. Dabei beschreibt das Niveau des cTGI den absoluten Gleislagezustand: niedrige Werte stehen für eine bessere Gleislagequalität, hohe Werte für einen schlechteren Zustand. Die zeitliche Änderung des cTGI zeigt hingegen, wie sich dieser Zustand entwickelt.

Für die Analyse werden daher nur Zeiträume berücksichtigt, in denen keine Unterhaltsmassnahmen durchgeführt wurden, die die Gleislage beeinflussen. Andernfalls würden die Auswirkungen der Gleislage durch Eingriffe, wie etwa Stopfarbeiten, überlagert. Aus diesem Grund werden für jede Weiche Zeitabschnitte zwischen zwei Unterhaltsereignissen gebildet und die cTGI-Werte innerhalb dieser Abschnitte mit einer linearen Funktion angenähert. In die weitere Analyse fliessen nur solche Verschlechterungsraten ein, für deren Bestimmung mindestens drei cTGI-Werte innerhalb eines unterhaltsfreien Zeitabschnitts vorliegen. Zusätzlich wird nur dann eine lineare Regression verwendet, wenn das zugehörige Bestimmtheitsmass $R^2>0,8$ beträgt. Diese Einschränkung ist notwendig, da lineare Regressionen auf Basis von lediglich zwei Punkten keine belastbare Aussage über das tatsächliche Verschlechterungsverhalten erlauben.

C2 - Intern

Die Steigung dieser linearen Funktion beschreibt die Veränderung des Gleislagezustands innerhalb des betrachteten Zeitraums und wird als Verschlechterungsrate in mm/Jahr angegeben. Eine grosse positive Steigung weist auf eine rasche Verschlechterung hin, eine geringe positive Steigung auf eine langsamere Zustandsverschlechterung. Die Verschlechterungsrate dient als zentraler Kennwert für die weiteren Analysen und bildet die Grundlage für den Vergleich zwischen Weichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen.

Abbildung 9 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf des cTGI für eine ausgewählte Weiche. Die gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen Zeitpunkte von Unterhaltsmassnahmen. Da solche Eingriffe in der Regel zu sprunghaften Änderungen des Kennwerts führen, werden für die Bestimmung der Verschlechterungsrate die einzelnen Zeitabschnitte zwischen zwei Unterhaltsereignissen getrennt ausgewertet.

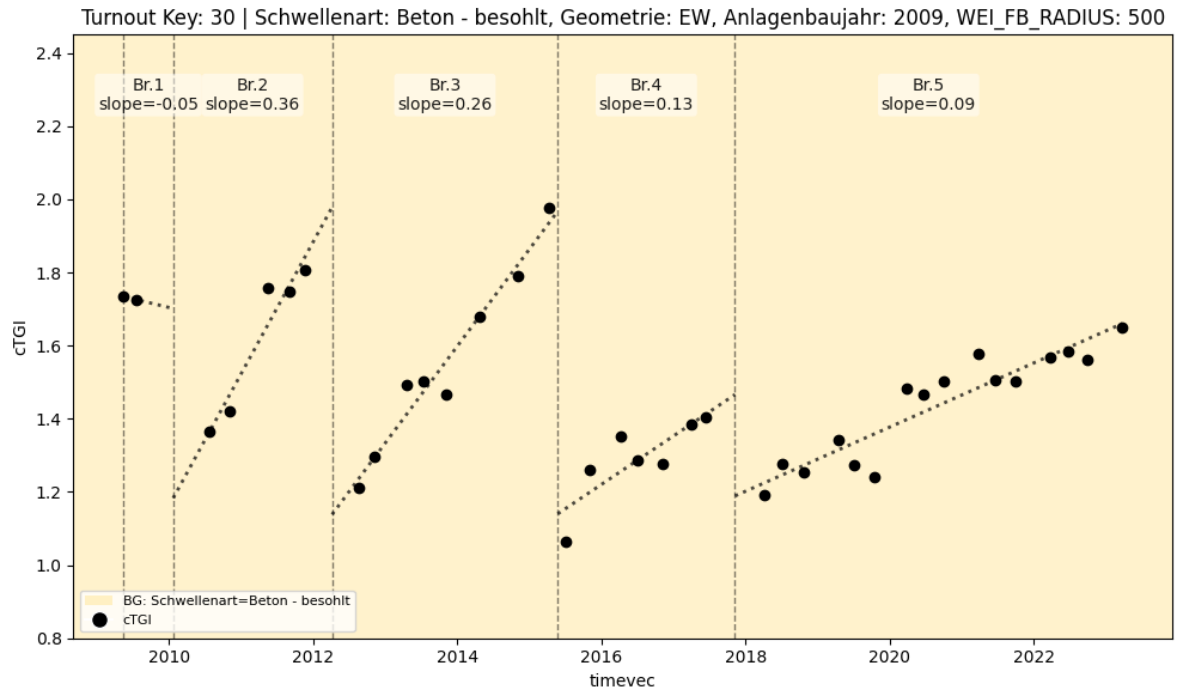


Abbildung 9: Beispielhafter zeitlicher Verlauf des Gleislagekennwerts einer Weiche zwischen Unterhaltsmassnahmen.

3.3 Vergleichsdesign (Referenzweichen)

Um den Einfluss der Schwellenbesohlung möglichst belastbar untersuchen zu können, ist zu berücksichtigen, dass das Gleislageverhalten nicht ausschliesslich vom Schwellentyp abhängt. Auch Alter, Belastung, Abzweigradius, Geschwindigkeit und geometrische Randbedingungen können die Zustandsentwicklung wesentlich beeinflussen. Aus diesem Grund wurde insbesondere das ergänzende österreichische Referenzdatenset so ausgewählt, dass diese Einflussgrössen zwischen den Vergleichsgruppen möglichst ähnlich verteilt sind.

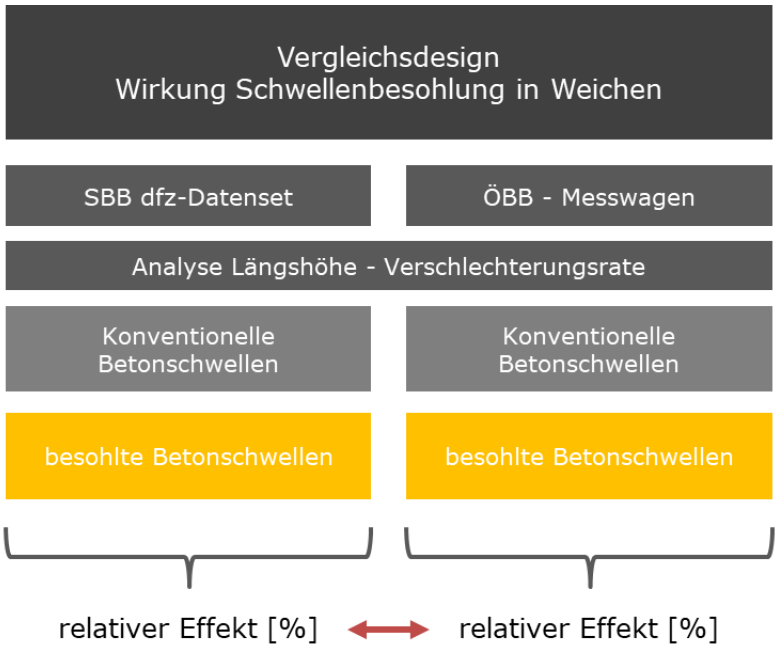
C2 - Intern

Die technische Bewertung des Gleislageverhaltens im schweizerischen Datensatz stützt sich nur auf eine sehr begrenzte Zahl an Referenzweichen mit konventionellen Betonschwellen. Insbesondere stehen für die Analyse der Gleislagemessdaten lediglich zwei auswertbare Weichen mit konventionellen Betonschwellen zur Verfügung. Dadurch ist die Aussagekraft eines rein auf den schweizerischen Daten basierenden Vergleichs eingeschränkt. Aus diesem Grund werden ergänzend österreichische Daten in die technische Bewertung einbezogen.

Das Vergleichsdesign basiert nicht auf einem direkten Vergleich absoluter Kennwerte zwischen dem schweizerischen und dem österreichischen Datensatz. Stattdessen wird die Wirkung der Schwellenbesohlung jeweils innerhalb eines Datensatzes über den relativen Unterschied zwischen Weichen mit konventionellen und mit besohlten Betonschwellen beurteilt.

Im ersten Schritt wird daher im schweizerischen Datensatz untersucht, ob Weichen mit besohlten Betonschwellen geringere Verschlechterungsraten aufweisen als vergleichbare Weichen mit konventionellen Betonschwellen. Im zweiten Schritt wird dieselbe Fragestellung anhand des österreichischen Datensatzes betrachtet. Anschliessend wird geprüft, ob sich in beiden Datensätzen dieselbe Wirkungsrichtung und eine ähnliche Grössenordnung des Effekts zeigen. Stimmen diese überein, können die österreichischen Ergebnisse dazu beitragen, die auf Basis der schweizerischen Daten beobachteten Zusammenhänge besser einzuordnen und zusätzlich zu stützen. Abbildung 10 zeigt das zugrunde liegende Vergleichsdesign schematisch. Dargestellt ist, dass die Wirkung der Schwellenbesohlung zunächst jeweils innerhalb des schweizerischen und des österreichischen Datensatzes separat bestimmt wird. Erst in einem zweiten Schritt werden die daraus resultierenden relativen Effekte miteinander verglichen.

C2 - Intern



$$relativer\ Effekt = \frac{Verschl.Rate_{konventionell} - Verschl.Rate_{besohlt}}{Verschl.Rate_{besohlt}}$$

Abbildung 10: Schematische Darstellung des Vergleichsdesigns zur Einordnung der Wirkung der Schwellenbesohlung anhand der schweizerischen und österreichischen Daten

Voraussetzung für diesen Vergleich ist, dass die technische Bewertung in beiden Datensätzen nach demselben methodischen Prinzip erfolgt. Dazu zählen insbesondere die Verwendung desselben Eingangssignals, die einheitliche Berechnung des cTGI sowie die identische Ableitung der Verschlechterungsrate. Verglichen werden somit nicht die absoluten Zustandsniveaus der beiden Netze, sondern der jeweilige relative Effekt der Schwellenbesohlung innerhalb des schweizerischen und des österreichischen Datensatzes.

C2 - Intern

4 Ergebnisse der technischen Analyse

4.1 Einsenk- und Setzungsmessungen (SBB)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Einsenkungsmessungen präsentiert. Dieses Messsystem wird lediglich in der Schweiz eingesetzt, für Österreich liegen keine entsprechenden Daten vor. Insgesamt wurden 38 Weichen analysiert, von denen 35 mit einer Besohlung ausgestattet sind. Bei drei Weichen wurden hingegen Betonschwellen ohne Besohlung verwendet.

Die in Abbildung 11 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Einsenkungen in den Weichenhauptsträngen. Die Darstellung erfolgt schienenspezifisch und gemittelt. Es zeigt sich ein klares Muster: Besohlte Betonschwellen sinken im Mittel deutlich stärker ein als konventionelle Betonschwellen.

Ergänzend ist anzumerken, dass die dargestellte Einsenkung gemittelt kein eigenständig berechneter Kennwert ist, sondern bereits in den bereitgestellten Daten enthalten war. Neben den separat ausgewiesenen Einsenkungen für die linke und rechte Schiene liegt auch eine vorab gebildete, gemittelte Einsenkung vor, die hier verwendet wurde. Auf Basis dieser Signale wurde für jede Weiche ein mittlerer Einsenkungswert gebildet, d. h. das Signal wurde innerhalb der jeweiligen Weiche gemittelt. Die Boxplots zeigen anschliessend die Verteilung dieser Mittelwerte über alle betrachteten Weichen. Die dargestellten Einsenkungen beziehen sich dabei ausschliesslich auf die Verformung innerhalb einzelner Weichen.

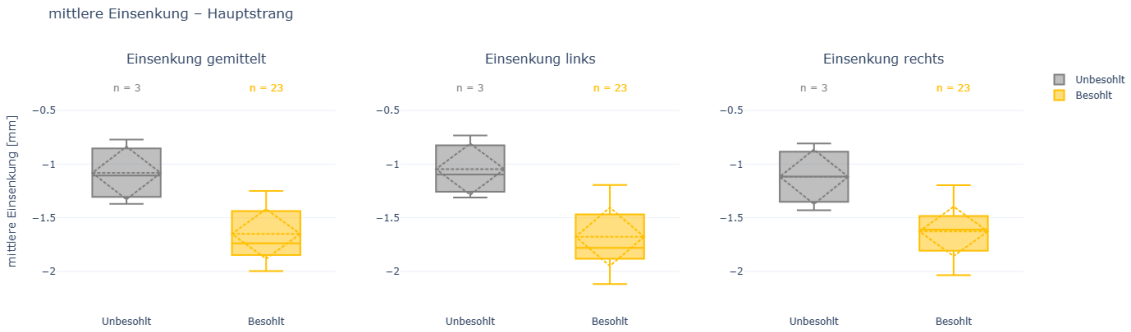


Abbildung 11: mittlere Einsenkung – Hauptstrang

Abbildung 12 zeigt die Einsenkungen der Weichennebenstränge. Auch hier zeigen sich höhere Einsenkungen für besohlte Betonschwellen. Einsenkungen in den Nebensträngen streuen generell stärker, ein Effekt der sowohl bei besohlten als auch bei konventionellen Betonschwellen sichtbar ist. Dies ist mutmasslich auf die lokal komplexeren Kräfte und Belastungen in den Abzweigungen zurückzuführen.

C2 - Intern

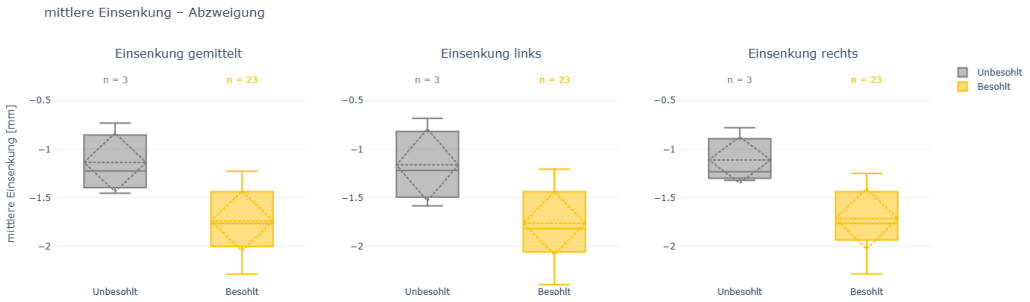


Abbildung 12: mittlere Einsenkung – Ablenkung

Höhere Einsenkungen von Gleisen mit Schwellenbesohlungen sind aus Erfahrungswerten und Literatur gut bekannt und lassen sich mechanisch erklären. Der zusätzliche, leicht kompressionsfähige Layer unter der Schwelle sorgt für höhere Einsenkungen bei gleichen Lasteinträgen. Konventionelle Betonschwellen weisen im Vergleich eine höhere Steifigkeit auf und zeigen entsprechend geringere Einsenkungen. Während Einsenkungen bei konventionellen Betonschwellen auf einen schlechten Systemzustand hindeuten, sind höhere Einsenkungen bei besohlten Betonschwellen – zumindest im vorliegenden Bereich - eine zur schotterschonenden Lastabtragung beitragende Systemeigenschaft. Erfahrungen in Österreich deuten auf keine negativen Folgen dieser erhöhten Einsenkungen hin.

Zusammenfassend verdeutlichen die Abbildung 11 und Abbildung 12 den messbaren Einfluss der Besohlung auf das Einsenkungsverhalten von Betonschwellen. In den Abzweigungen ist die Streuung höher, während die Werte am Hauptstrang homogener bleiben. Das Muster bleibt in allen drei Messvarianten konsistent: Besohlte Betonschwellen sinken stärker ein als konventionelle. Diese Einsenkung ergibt sich aus den verbesserten Lastabtragungseigenschaften durch die Besohlung und ist daher zufolge der Erfahrungen unproblematisch beziehungsweise vorteilhaft. Um den Einfluss von lokal höheren Einsenkungen auf die Komponentenbelastung zu bewerten, werden die Einsenkungen im folgenden Kapitel gefiltert und erneut verglichen.

4.1.1 Gefilterte Einsenkung

In der Schweiz wurde bei einigen Weichen ein Mehrbesohlungskonzept umgesetzt. Das bedeutet, dass innerhalb einer Weiche nicht nur eine Steifigkeit pro Besohlung vorliegt, sondern dass mehrere Steifigkeitsniveaus existieren können. Darüber hinaus wurden auch die Kastenschwellen mit Besohlung verlegt.

Um diese Effekte zu berücksichtigen, wurde das Signal entsprechend gefiltert. Hierbei wurden verschiedene Filterlängen untersucht, um die Längenbereiche zu ermitteln, die die meisten Informationen über den Zustand der Schwellen enthalten. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 13 dargestellt. Abgebildet sind sowohl die Wellenlängen als auch

C2 - Intern

die berechneten RMS-Werte der gefilterten Signale. Die unterschiedlich gefärbten Linien repräsentieren jeweils eine Weiche über die verschiedenen Filterlängen.

Deutlich wird, dass die grösste Veränderung des Signals im Bereich von etwa 1 bis 13 Metern Filterlänge erfolgt. Ab einer Filterlänge von 13 Metern stabilisiert sich der RMS-Wert, wobei die Veränderungsrate unter 2 % liegt. Dies zeigt, dass ab diesem Punkt nur noch wenige zusätzliche Informationen über den Zustand der Weiche gewonnen werden können, während kürzere Filterlängen empfindlicher auf lokale Unterschiede reagieren.

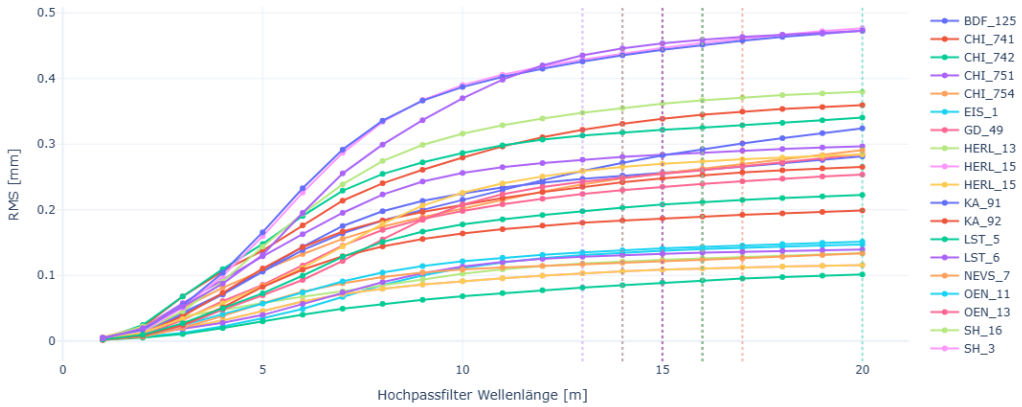


Abbildung 13: RMS-Werte der Hochpass-gefilterten Einsenkungen

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden die Einsenkungen einmal als Rohsignal und einmal mit Bandpassfiltern von 1 bis 13 Metern bzw. ein Hochpassfilter mit 5 Metern Wellenlänge dargestellt. Letzterer wird in der Schweiz verwendet, um Effekte kurzwelligerer Einsenkungen zu bewerten.

Die Abbildung 14 zeigt exemplarisch eine Weiche mit den unterschiedlichen Filterstufen. Das Rohsignal ist grau dargestellt, der Bandpassfilter von 1 bis 13 Metern ist blau gestrichelt und der Hochpassfilter mit 5 Metern ist rot dargestellt. Deutlich wird, dass das Signal je nach gewählter Filterstufe unterschiedlich abgeschwächt wird. Dabei zeigt der Hochpassfilter die stärkste Reduktion des Signals.

C2 - Intern

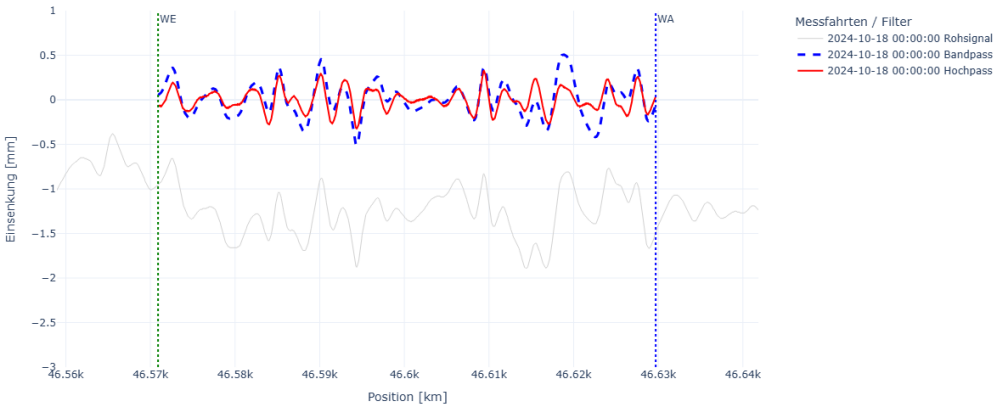


Abbildung 14: Unterschiedliche Filterungen des Einsenkungssignals

Für die weiteren Auswertungen wurde ein Hochpassfilter mit einer Wellenlänge von 5 m verwendet, da dieses Filterverfahren in der Schweiz zur Beurteilung von Einsenkungsmessungen eingesetzt wird. Auf Basis des gefilterten Signals wurde für jede Weiche über den gesamten betrachteten Bereich – vom Weichenanfang bis zum Weichenende – die Standardabweichung berechnet. Diese Kenngrösse dient als Mass für die Streuung der Einsenkung entlang der jeweiligen Weiche und bildet die Grundlage der nachfolgenden vergleichenden Analysen.

Die resultierenden Standardabweichungen sind in den folgenden Abbildungen in Form von Boxplots dargestellt. Abbildung 15 zeigt den Vergleich sämtlicher untersuchter Einfachweichen (EW). Für diese Auswertung wurde ausschliesslich der Hauptstrang berücksichtigt, um eine Vergleichbarkeit mit Messungen eines Diagnosefahrzeugs sicherzustellen, das überwiegend im Hauptstrang verkehrt.

In der Darstellung sind besohlte Betonschwellen gelb und konventionelle, unbesohlte Betonschwellen grau gekennzeichnet. Zusätzlich sind links neben den jeweiligen Boxplots die Einzelwerte als Punkte aufgetragen. Die Farbgebung dieser Punkte repräsentiert die jeweilige Belastungsklasse der durchschnittlichen täglichen Verkehrsbelastung. Somit kann neben dem strukturellen Aufbau der Schwelle auch der Einfluss der Beanspruchung visuell eingeordnet werden.

Aus Abbildung 15 geht hervor, dass die Standardabweichung der Einsenkung bei besohlten Betonschwellen im Mittel geringer ausfällt als bei konventionellen Betonschwellen. Dies weist auf ein homogeneres Einsenkungsverhalten entlang der Weiche hin.

C2 - Intern

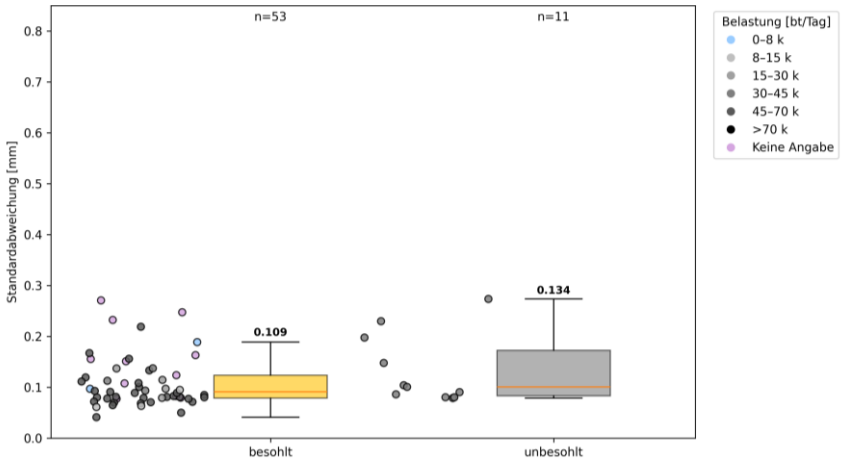


Abbildung 15: Standardabweichung der Einsenkungsmessungen nach Hochpassfilterung (5 m Wellenlänge) – Gegenüberstellung besohlter und konventioneller Betonschwellen bei Einfachweichen

In Abbildung 16 ist eine Darstellung gewählt, die in ihrer Struktur jener aus Abbildung 15 entspricht, jedoch einen gezielten Fokus auf Weichenpaare legt. Dabei handelt es sich um Weichen mit weitgehend identischen Randbedingungen – beispielsweise hinsichtlich Lage, Verkehrsbelastung und betrieblichem Umfeld –, die sich im Wesentlichen nur durch die verwendete Schwellenart unterscheiden. Diese Weichen befinden sich meist im selben Bahnhofsbereich, wodurch äussere Einflussgrössen möglichst konstant gehalten werden können.

Durch diese paarweise Gegenüberstellung lässt sich der Einfluss der Schwellenart isoliert betrachten, da Unterschiede im Einsenkungsverhalten nicht primär auf variierende Rahmenbedingungen zurückgeführt werden können. Der Vergleich unter ähnlichen betrieblichen und konstruktiven Voraussetzungen ermöglicht somit eine von äusseren Randbedingungen ungestörte Bewertung des Effekts der Besohlung, bei jedoch reduzierter Stichprobengrösse.

Die Ergebnisse zeigen auch in dieser Konstellation, dass besohlte Betonschwellen eine geringere Standardabweichung der Einsenkung aufweisen als unbesohlte Betonschwellen. Damit bestätigt sich das zuvor beobachtete Muster eines homogeneren Einsenkungsverhaltens bei besohlten Schwellen auch unter nahezu identischen Randbedingungen.

C2 - Intern

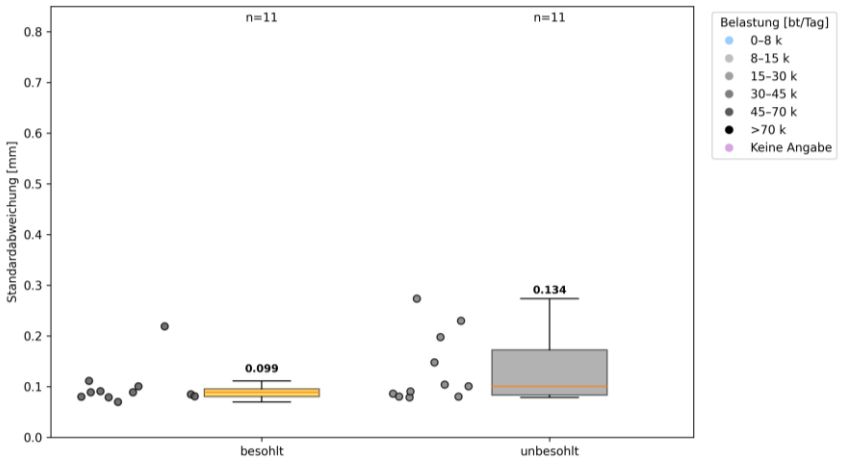


Abbildung 16: Standardabweichung der Einsenkungsmessungen nach Hochpassfilterung (5 m Wellenlänge) – Gegenüberstellung besohlter und konventioneller Betonschwellen (Paarvergleich)

In Abbildung 17 werden die untersuchten Weichen zusätzlich in drei Abzweigradienklassen (≤ 300 m, 500 m und > 500 m) differenziert. Durch diese Einteilung ist es möglich, den Einfluss des Krümmungsradius auf die Standardabweichung der Einsenkung isoliert zu betrachten, ohne zunächst weitere Einflussgrössen zu berücksichtigen.

Die Darstellung zeigt einen klaren Trend, dass mit abnehmendem Radius die Standardabweichung der Einsenkung zunimmt. Weichen mit kleineren Abzweigradien weisen somit tendenziell eine grössere Streuung im Einsenkungsverhalten auf als Weichen mit grösseren Abzweigradien.

Für eine weiterführende Analyse wäre eine zusätzliche Aufsplittung des Datensatzes sinnvoll, bei der beispielsweise Besohlung und Belastung innerhalb der jeweiligen Radienklasse berücksichtigt werden. Aufgrund der begrenzten Stichprobengrösse würde eine solche Differenzierung jedoch zu sehr kleinen Teilkollektiven führen und die Aussagekraft der statistischen Kennwerte reduzieren. Aus diesem Grund wurden in dieser Abbildung die Einzelwerte zusätzlich entsprechend ihrer Belastungsklasse eingefärbt. Dabei wird erkennbar, dass höhere Verkehrsbelastungen überwiegend in den grösseren Radienklassen auftreten. Dieser Umstand ist bei der Interpretation der Zusammenhänge zwischen Abzweigradius und Standardabweichung zu berücksichtigen.

C2 - Intern

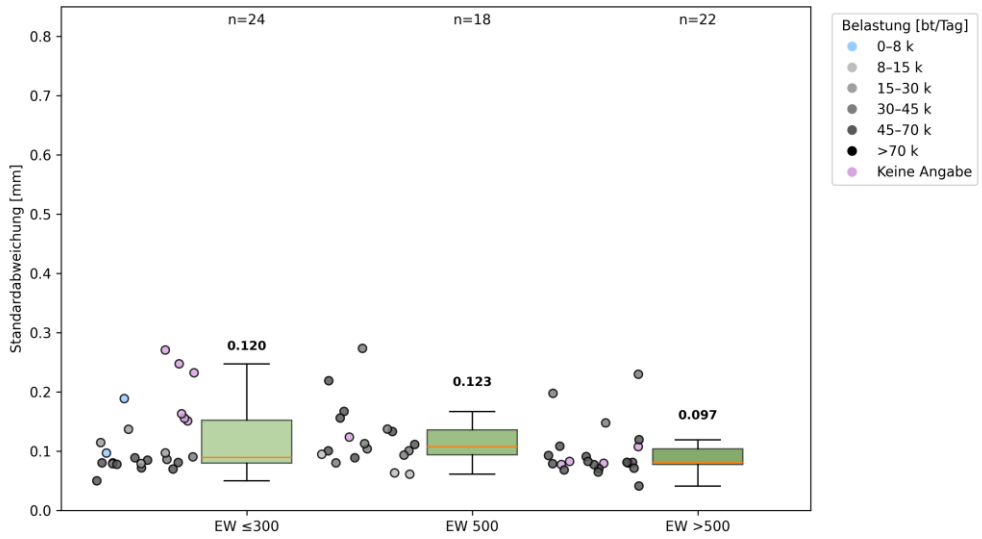


Abbildung 17: Standardabweichung der Einsenkungsmessungen nach Hochpassfilterung (5 m Wellenlänge) – Gegenüberstellung verschiedener Radienklassen (EW)

4.2 Analyse Gleislageverhalten

4.2.1 SBB-Weichen

Im Rahmen der Messungen mit dem Diagnosefahrzeug wurden insgesamt 35 Weichen erfasst. Zur Beschreibung des Gleislagezustands wurde der in Kapitel 3.1 erläuterte cTGI-Wertherangezogen. Dieser Kennwert basiert auf der Längshöhe im Wellenlängenbereich von 3 bis 25 m und dient somit als Mass für die vertikale Gleislagequalität.

Um die Zustandsentwicklung einer Weiche über die Zeit beurteilen zu können, wurde der jeweilige cTGI-Wert chronologisch dargestellt und anschliessend mittels linearer Regression ausgewertet. Aus der Steigung der Regressionsgeraden ergibt sich die Verschlechterungsrate (b-Rate), die eine quantitative Aussage über die zeitliche Veränderung der vertikalen Gleislage ermöglicht.

Nach Anwendung der in Kapitel 3.2 definierten Kriterien zur Bestimmung der Verschlechterungsrate verbleiben 26 Weichen für die Auswertung. Die Reduktion gegenüber dem Ausgangsdatensatz ergibt sich aus der Mindestanforderung an die Zahl der verfügbaren Messzeitpunkte sowie aus der Berücksichtigung dokumentierter Unterhaltsmassnahmen, durch die nicht alle Zeitabschnitte für eine belastbare Regression geeignet waren. Davon sind 24 Weichen mit besohlten und lediglich 2 Weichen mit konventionellen Betonschwellen ausgestattet.

C2 - Intern

4.2.1.1 Vergleich der cTGI-Entwicklung über die Zeit bei besohlten und konventionellen Betonschwellen unter gleichen Rahmenbedingungen

Um die nachfolgenden Auswertungen und Vergleiche besser einordnen zu können, werden im Folgenden ausgewählte Weichen mit möglichst ähnlichen Randbedingungen gegenübergestellt. Die zeitliche Entwicklung des cTGI ermöglicht dabei eine direkte Betrachtung der Zustandsentwicklung und liefert erste Hinweise auf Unterschiede im Gleislageverhalten zwischen den Schwellentypen, ist aber statistisch nicht aussagekräftig.

Ein Beispiel für einen solchen Vergleich ist in Abbildung 18 zu sehen, die zwei Weichen im Bereich Herrliberg–Feldmeilen zeigt. Dabei ist der zeitliche Verlauf der Weiche mit konventionellen Betonschwellen grau dargestellt, während die Weiche mit besohlten Betonschwellen gelb gekennzeichnet ist. Die einzelnen Punkte repräsentieren die aus den Messfahrten berechneten cTGI-Werte, die auf derselben Skala dargestellt sind und somit direkt miteinander verglichen werden können. Zusätzlich sind vertikale Markierungen eingezeichnet, die durchgeführte Unterhaltmassnahmen kennzeichnen: Blau markierte Linien weisen auf Schleifmassnahmen hin.

Zu Beginn der Zeitreihe zeigen beide Systeme ein ähnliches Verhalten. Im weiteren Verlauf weist die Weiche mit konventionellen Betonschwellen jedoch eine stärkere Zunahme der cTGI-Werte auf, während die Entwicklung bei der Weiche mit besohlten Betonschwellen flacher verläuft. Dies deutet in diesem Beispiel auf eine geringere Verschlechterungsrate bei besohlten Betonschwellen hin.

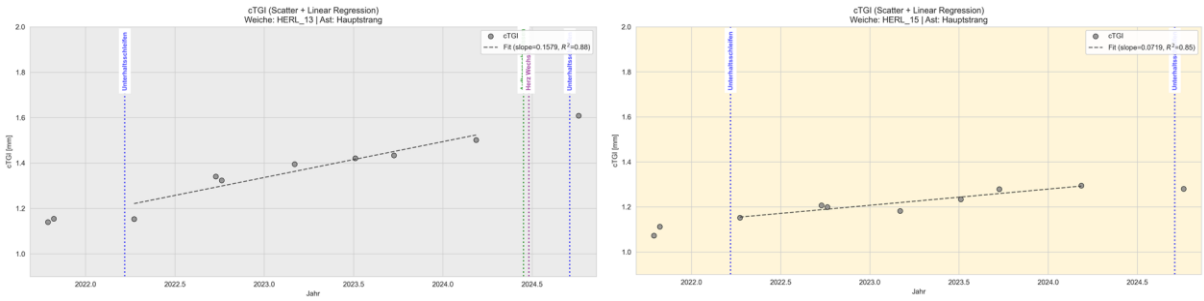


Abbildung 18: Zeitliche Entwicklung des cTGI bei Weichen (HERL_13 und HERL_15) mit besohlten (gelb) und konventionellen (grau) Betonschwellen unter vergleichbaren Randbedingungen

Ein weiterer vergleichbarer Abschnitt befindet sich im Bereich Oensingen. In diesem Fall kann der Vergleich sogar auf zwei Weichen mit besohlten Betonschwellen gegenüber einer Weiche mit konventionellen Betonschwellen erweitert werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, das Gleislageverhalten mehrerer Systeme unter ähnlichen betrieblichen und örtlichen Randbedingungen gegenüberzustellen.

C2 - Intern

Die Darstellung in Abbildung 19 zeigt, dass die Ausgangssituation der betrachteten Weichen zu Beginn der Zeitreihe nicht identisch ist. So weist die Weiche mit konventionellen Betonschwellen zu Beginn eine höhere Anfangsqualität der vertikalen Gleislage auf als die Weichen mit besohlten Betonschwellen. Trotz dieser unterschiedlichen Ausgangsbedingungen wurden die Unterhaltmassnahmen im gleichen Zeitraum durchgeführt. In der Abbildung sind diese Massnahmen durch vertikale Markierungen dargestellt: Blau kennzeichnet Unterhaltsschleifarbeiten, während Rot durchgeführte Stopfarbeiten anzeigt.

Der Einfluss Unterhaltmassnahmen ist in der Zeitreihe deutlich erkennbar. Insbesondere die Stopfarbeiten führen in beiden betrachteten Fällen zu einer deutlichen Verbesserung der Gleislagequalität, was sich in einem merklichen Rückgang der cTGI-Werte widerspiegelt. Dieses Verhalten bestätigt den erwarteten positiven Effekt solcher Massnahmen auf die vertikale Gleislage. Darüber hinaus zeigt sich im weiteren zeitlichen Verlauf erneut ein ähnliches Muster wie im vorherigen Beispiel. Die Verschlechterung der Gleislage verläuft bei Weichen mit besohlten Betonschwellen über die Zeit tendenziell flacher als bei Weichen mit konventionellen Betonschwellen. Damit deutet auch dieser Vergleich darauf hin, dass besohlte Betonschwellen ein stabileres langfristiges Gleislageverhalten aufweisen können. Dieses Ergebnis steht somit im Einklang mit den Beobachtungen aus dem zuvor dargestellten Beispiel.

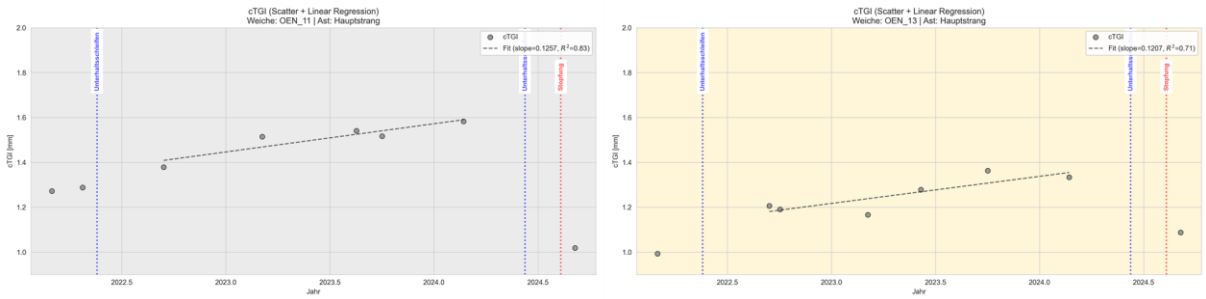


Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung des cTGI bei Weichen (OEN_11 und OEN_13) mit besohlten (gelb) und unbesohlten (grau) Betonschwellen unter vergleichbaren Randbedingungen

Die Abbildung 20 zeigt den Vergleich mit der zweiten Weiche mit besohlten Betonschwellen. Im Gegensatz zum zuvor betrachteten Beispiel zeigen sich hier zu Beginn der Zeitreihe sehr ähnliche Ausgangssituationen beider Systeme. Insbesondere in den ersten drei Messzeitpunkten verlaufen die cTGI-Werte nahezu identisch, sodass von einer vergleichbaren Anfangsqualität der vertikalen Gleislage ausgegangen werden kann. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits im Beispiel aus Abbildung 18 beobachtet. Auch in diesem Fall wurden die Unterhaltmassnahmen ungefähr im gleichen Zeitraum durchgeführt. Die entsprechenden Markierungen in der Abbildung verdeutlichen, dass die Stopfarbeiten insbesondere zu einer deutlichen Verbesserung der Gleislagequalität geführt haben. Dieser Effekt zeigt sich in beiden Systemen durch einen klaren Rückgang der cTGI-Werte nach Durchführung der Massnahme.

C2 - Intern

Im weiteren zeitlichen Verlauf unterscheidet sich dieses Beispiel jedoch von den zuvor dargestellten Vergleichen. Während in den vorherigen Abbildungen eine flachere Verschlechterungsrate bei besohlten Betonschwellen erkennbar war, zeigen die beiden Systeme in Abbildung 20 eine sehr ähnliche Entwicklung der cTGI-Werte über die Zeit. Die Verschlechterungsraten der vertikalen Gleislage verlaufen somit in beiden Fällen vergleichbar. Aus diesem spezifischen Beispiel lässt sich daher kein eindeutiger Hinweis darauf ableiten, dass die Besohlung der Betonschwellen einen direkten positiven Einfluss auf die Verschlechterungsrate der vertikalen Gleislage hat. Vielmehr ist davon auszugehen, dass in diesem Fall andere, nicht unmittelbar erfasste Einflussgrössen, wie beispielsweise Unterschiede im Unterbau, in der Entwässerung oder im betrieblichen Umfeld, einen stärkeren Einfluss auf die Entwicklung der Gleislage ausgeübt haben.

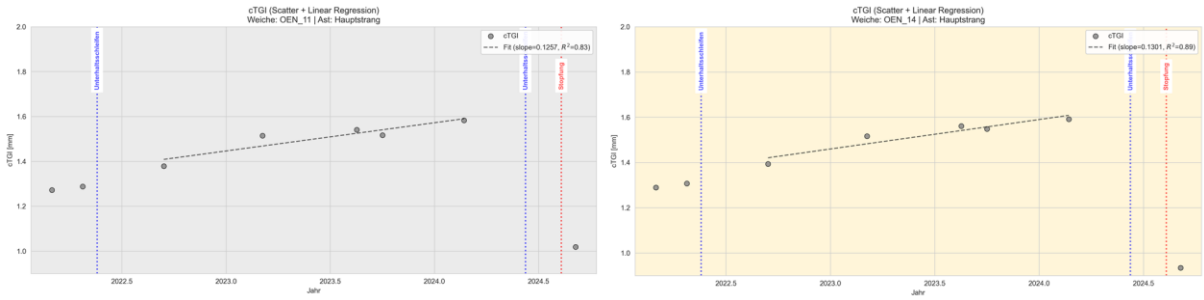


Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung des cTGI bei Weichen (OEN_11 und OEN_14) mit besohlten (gelb) und konventionellen (grau) Betonschwellen unter vergleichbaren Randbedingungen

Die dargestellten Einzelvergleiche zeigen somit eine tendenzielle, aber nicht in allen Fällen konsistente Verbesserung des Gleislageverhaltens bei besohlten Betonschwellen. Aus einzelnen Beispielen allein können jedoch keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden. Daher erfolgt im nächsten Schritt eine übergeordnete Betrachtung der aus den Zeitreihen abgeleiteten Verschlechterungsraten.

4.2.1.2 Vergleich der Verschlechterungsraten besohlter und konventioneller Betonschwellen in Weichen unter verschiedenen Randbedingungen (Belastung, Schwellenart, Radienklasse)

Im nächsten Schritt werden die aus den Zeitreihen abgeleiteten Verschlechterungsraten (b-Raten) für alle auswertbaren Weichen gegenübergestellt. Ziel ist es, das Verhalten der vertikalen Gleislage nicht nur anhand einzelner Beispiele, sondern über das gesamte verfügbare Datenset hinweg zu bewerten.

Abbildung 21 zeigt die Verschlechterungsraten, aufgeteilt nach Weichengeometrie und Abzweigradius. Die Verteilung der Werte innerhalb jeder Kategorie wird durch Boxplots visualisiert. Die Punkte sind entsprechend der täglichen Belastung eingefärbt. Auffällig ist, dass

C2 - Intern

Doppelkreuzungsweichen (DKW) im Mittel höhere und zugleich stärker streuende Verschlechterungsraten aufweisen als Einfachweichen (EW). Aus diesem Grund werden DKW in den nachfolgenden Vergleichen nicht weiter berücksichtigt, um eine möglichst homogene Vergleichsgrundlage zu schaffen.

Innerhalb der Einfachweichen zeigt sich zudem ein Zusammenhang zwischen Abzweigradius und Verschlechterungsrate. Mit zunehmendem Abzweigradius nehmen die beobachteten Verschlechterungsraten tendenziell ab. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte in der unterschiedlichen Länge der Weichen liegen, da grössere Radien häufig mit längeren Weichen verbunden sind und sich lokale Unregelmässigkeiten dadurch stärker mitteln können. Gleichzeitig treten bei kleinen Abzweigradien teilweise hohe Verschlechterungsraten auf, auch wenn die zugehörigen Belastungsklassen vergleichsweise niedrig sind. Aufgrund der geringen Stichprobe lässt sich daraus jedoch kein belastbarer Zusammenhang ableiten.

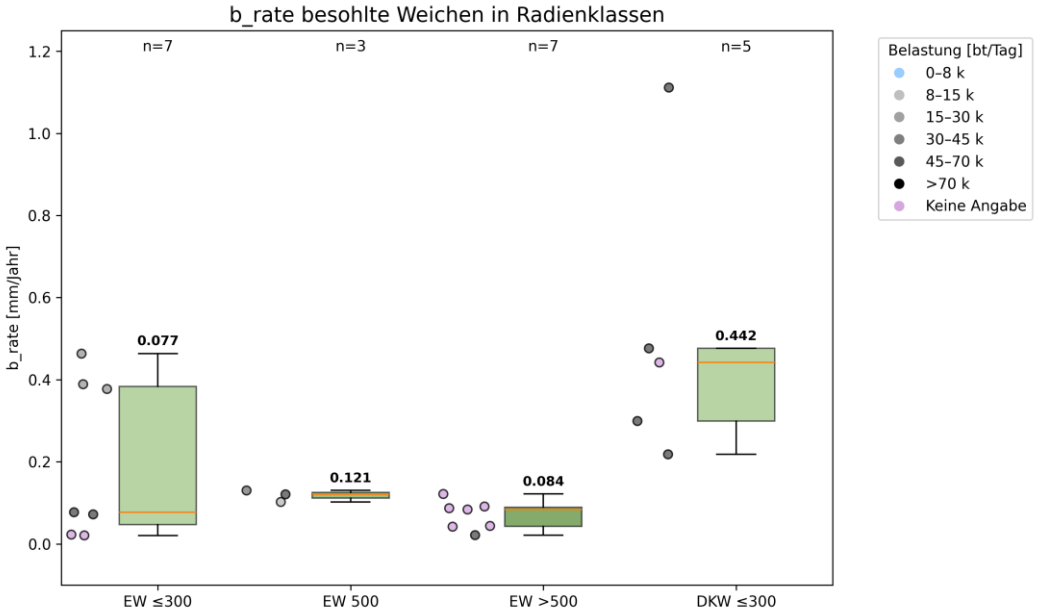


Abbildung 21: Vergleich der Verschlechterungsraten über die Abzweigradienklassen

Für den direkten Vergleich zwischen besohlten und konventionellen Betonschwellen werden anschliessend ausschliesslich Einfachweichen betrachtet.

In Abbildung 22 werden daher ausschliesslich Einfachweichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen gegenübergestellt. Auf eine weitere Differenzierung, beispielsweise nach Abzweigradienklassen, wurde verzichtet, da die verfügbare Datenbasis hierfür zu gering ist und eine zusätzliche Aufteilung zu sehr kleinen Teilkollektiven führen würde. Für die Gruppe der Weichen mit konventionellen Betonschwellen liegen lediglich zwei ermittelte Verschlechterungsraten vor. Diese geringe Anzahl ist statistisch nicht ausreichend,

C2 - Intern

um eine repräsentative Aussage über das gesamte Netz zu treffen. Dennoch zeigt die Darstellung, dass beide Werte höher liegen als der Grossteil der Verschlechterungsraten von Weichen mit besohlten Betonschwellen.

Auch hier sind die einzelnen Verschlechterungsraten als Punkte neben den Boxplots dargestellt und entsprechend ihren Belastungsklasse eingefärbt. Auffällig ist, dass die höchsten Verschlechterungsraten innerhalb der Gruppe der besohlten Betonschwellen in vergleichsweise niedrigen Belastungsklassen auftreten. Dabei handelt es sich um dieselben drei Werte (Weiche BNFI_2 und ZUE_65), die bereits in Abbildung 21 innerhalb der Radienklasse ≤ 300 m auffällig waren. Aufgrund der geringen Stichprobengrösse lassen sich jedoch keine belastbaren Schlussfolgerungen über die Ursache dieser hohen Verschlechterungsraten ziehen.

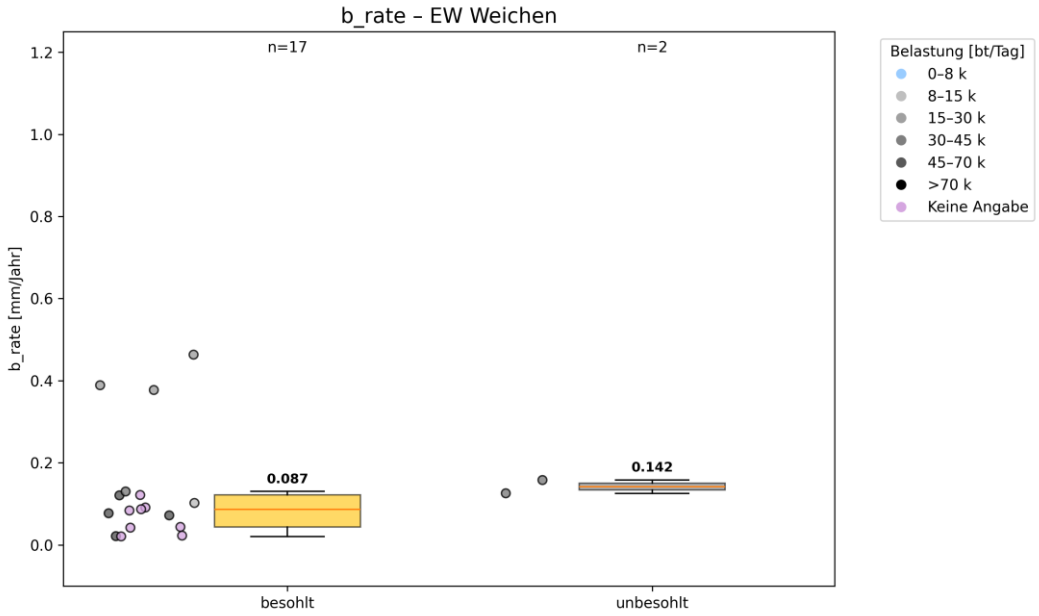


Abbildung 22: Verschlechterungsraten von Einfachweichen – Vergleich besohlter und konventioneller Betonschwellen

In Abbildung 23 ist ein ähnliches Bild wie in Abbildung 22 zu sehen. Die Darstellung beschränkt sich hier jedoch auf Weichen mit identischen Rahmenbedingungen, konkret die Weichen aus Herrliberg–Feldmeilen und Oensingen. Diese Weichen sind bereits aus Kapitel 4.2.1.1 bekannt, in dem ihre zeitlichen cTGI-Verläufe analysiert und beschrieben wurden.

Auch in diesem fokussierten Vergleich zeigen die besohlten Betonschwellen im Median eine geringere Verschlechterungsrate als die konventionellen Betonschwellen, obwohl die Unterbaubedingungen für eine der beiden besohlten Betonschwellen andere sind. Aufgrund der sehr kleinen Stichprobe ist dieses Ergebnis jedoch als Hinweis und nicht als verallgemeinerbare Aussage zu interpretieren.

C2 - Intern

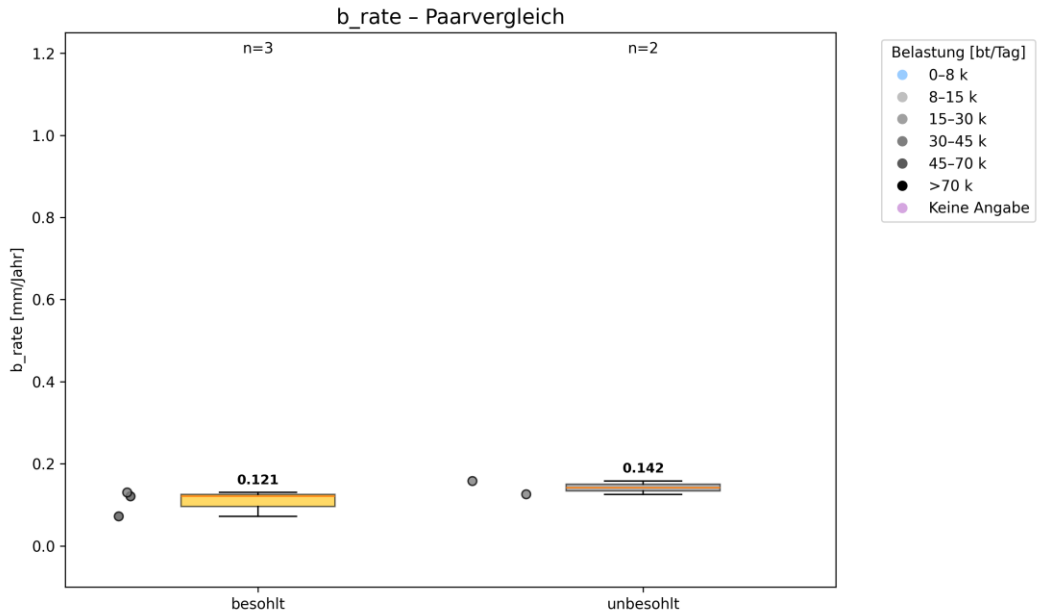


Abbildung 23: Verschlechterungsraten von Einfachweichen – Vergleich besohlter und konventioneller Betonschwellen mit gleichen Rahmenbedingungen.

4.2.1.3 Vergleich der Verschlechterungsraten besohlter und konventioneller Betonschwellen in Weichen unter verschiedenen Randbedingungen (V_{MAX}, Schwellenart, Abzweigradienklasse)

In diesem Kapitel werden die aus dem vorherigen Kapitel bekannten Plots erneut präsentiert, jedoch mit einer veränderten Zuordnung der Einzelpunkte links neben den Boxplots. Anstelle der Belastungsklassen erfolgt die Einfärbung der Punkte nun entsprechend der jeweiligen zulässigen maximal Geschwindigkeit (V_{MAX}) der Weichen.

Abbildung 24 zeigt, dass Weichen mit höheren zulässigen Geschwindigkeiten (dargestellt in dunklem Lila) innerhalb der Abzweigradien tendenziell geringere Verschlechterungsraten aufweisen als Weichen mit geringeren zulässigen Geschwindigkeiten. Dies könnte auf den ersten Blick den Eindruck erwecken, dass höhere zulässige Geschwindigkeiten zu weniger Verschlechterung führen. Allerdings ist diese Interpretation nur eingeschränkt aussagekräftig, da die zulässige Geschwindigkeit nicht notwendigerweise der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit entspricht. Zudem werden Weichen bei höheren Geschwindigkeiten häufig früher gewartet, sodass Unterhaltmassnahmen schneller eingeleitet werden als bei Weichen mit niedrigeren V_{MAX}. Dies muss bei der Bewertung der beobachteten Unterschiede berücksichtigt werden.

C2 - Intern

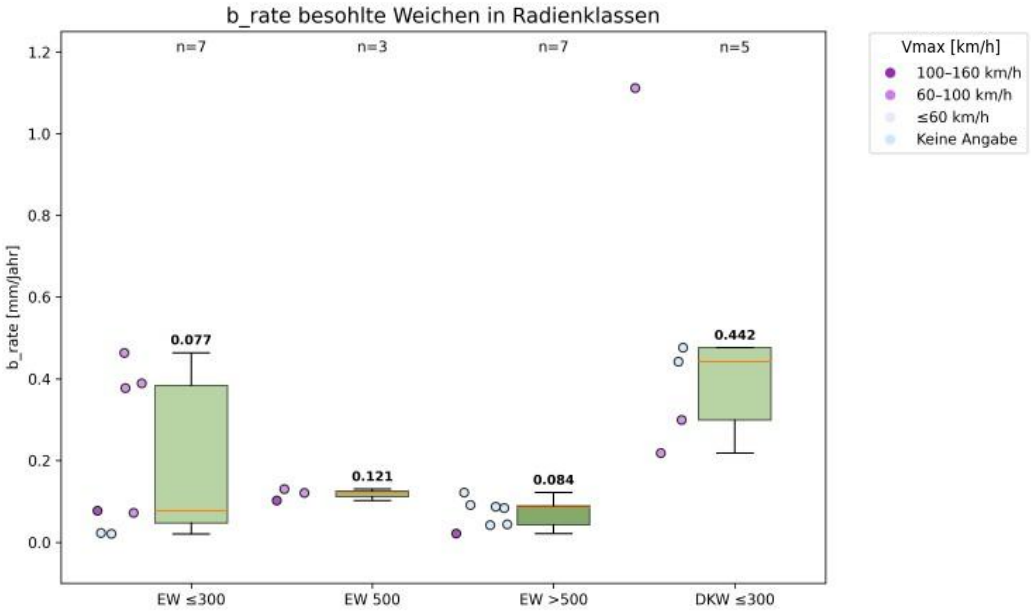


Abbildung 24: Vergleich der Verschlechterungsraten über die Radienklassen

Auch in Abbildung 25, die erneut den Vergleich der Einfachweichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen zeigt, ergibt sich kein belastbarer Zusammenhang zwischen V_{MAX} und Verschlechterungsrate. Gleichzeitig fallen innerhalb der Gruppe der besohlten Betonschwellen dieselben drei hohen Einzelwerte auf, die bereits zuvor beschrieben wurden. Diese Weichen sind durch kleine Abzweigradien, geringe tägliche Belastung und V_{MAX}-Werte zwischen 60-100 km/h gekennzeichnet.

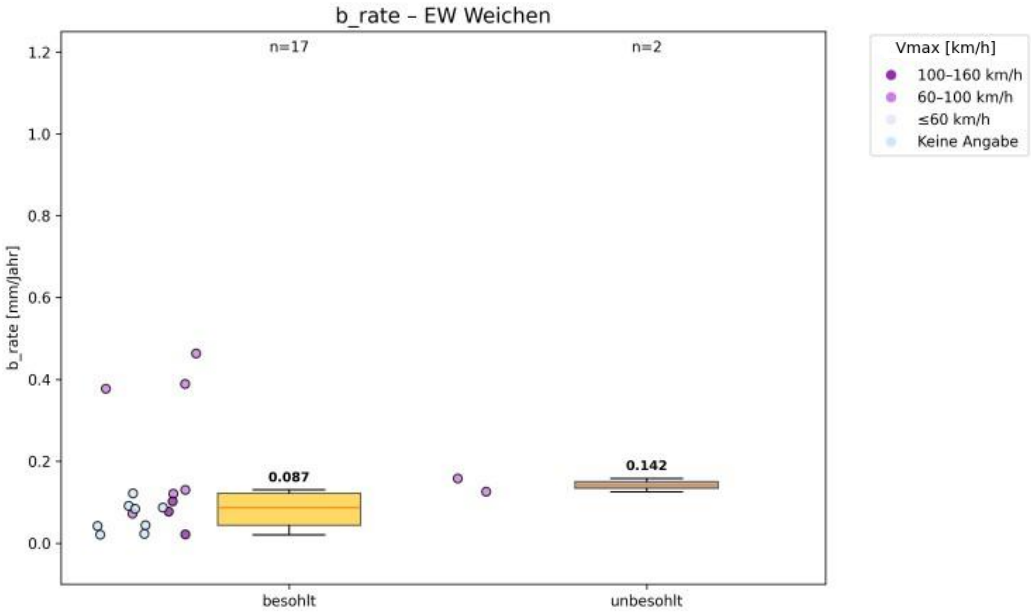


Abbildung 25: Verschlechterungsraten von Einfachweichen – Vergleich besohlter und unbesohlter Betonschwellen.

Die Auswertung der schweizerischen Daten zeigt insgesamt, dass neben der Schwellenart auch Einflussgrössen wie tägliche Belastung, Abzweigradius und V_{MAX} bei der Beurteilung

C2 - Intern

des Verschlechterungsverhaltens berücksichtigt werden müssen, die Stichprobengrösse dafür jedoch nicht ausreichend ist. Für die Eingangswerte der Wirtschaftlichkeitsbewertung werden daher Medianwerte über alle verfügbaren Weichen verwendet, womit sich für Weichen mit besohlten Betonschwellen eine Setzungsrate von 0.09 mm/Jahr und für Weichen mit konventionellen Betonschwellen eine Setzungsrate von 0,14 mm/Jahr ergibt. Dieses Verhätlnis entspricht zufällig auch jenem, der verglichenen Weichenpaare. Da sich diese Bewertung im schweizerischen Datensatz jedoch nur auf wenige Weichen stützt, werden ergänzend österreichische Daten einbezogen. Damit soll geprüft werden, ob sich die in der Schweiz beobachteten Zusammenhänge auch im grösseren österreichischen Datensatz bestätigen. Insgesamt unterstreicht dies die Notwendigkeit, die österreichischen Daten ergänzend einzubeziehen, um die Ergebnisse der technischen Bewertung im schweizerischen Netz belastbarer einordnen zu können.

4.2.2 Referenzweichen ÖBB

Aufgrund der sehr begrenzten Anzahl an Referenzweichen mit konventionellen Betonschwellen im schweizerischen Datensatz erfolgt im Folgenden die ergänzende technische Bewertung anhand der österreichischen Referenzweichen. Dabei wird das bereits in Kapitel 2.3 beschriebene balancierte Datenset verwendet, um den Einfluss von Alter, Belastung, Abzweigradius und V_{max} zwischen den Vergleichsgruppen möglichst zu reduzieren.

Die grössere Stichprobe und die längeren Zeitreihen der österreichischen Daten ermöglichen eine belastbarere Untersuchung des Effekts der Schwellenbesohlung sowie eine gezieltere Analyse jener Einflussgrössen, die das Verschlechterungsverhalten der vertikalen Gleislage mitbestimmen. Im Unterschied zu den schweizerischen Daten werden dabei keine Einzelvergleiche zwischen ausgewählten Weichen dargestellt. Die Auswertung erfolgt stattdessen systematisch innerhalb definierter Vergleichsgruppen mit möglichst ähnlichen Randbedingungen. Grundlage ist dasselbe methodische Vorgehen wie bei den schweizerischen Weichen auf Basis des Längshöhensignals D1, des daraus berechneten cTGI sowie der abgeleiteten Verschlechterungsrate.

Im Folgenden wird der Vergleich zwischen Weichen mit besohlten und konventionellen Betonschwellen unter Berücksichtigung ausgewählter Einflussgrössen durchgeführt:

- die Weichengeometrie (EW, IBW, ABW)
- der Abzweigradius (300, 500, 1200)
- die Belastungsklasse sowie
- die maximal zulässige Geschwindigkeit (V_{max})

C2 - Intern

Für alle angeführten Einflussgrössen werden in den nachfolgenden Abschnitten die jeweiligen Verschlechterungsraten statistisch ausgewertet und jeweils im Vergleich zwischen besohlten und konventionellen Betonschwellen dargestellt und interpretiert.

4.2.2.1 Vergleich Verschlechterungsverhalten – Weichengeometrie (EW, IBW, ABW)

Ziel dieser Auswertung ist es zu untersuchen, inwieweit sich das Verschlechterungsverhalten der vertikalen Gleislage in Abhängigkeit von der Weichengeometrie unterscheidet und ob sich der Effekt der Schwellenbesohlung zwischen den verschiedenen Weichentypen unterschiedlich ausprägt. Betrachtet werden dabei Einfachweichen (EW), Innenbogenweichen (IBW) und Aussenbogenweichen (ABW). Da im österreichischen Datensatz überwiegend EWs vorhanden sind, ist zu berücksichtigen, dass die Stichprobe für Innenbogen- und Aussenbogenweichen deutlich kleiner ausfällt. Um dennoch eine möglichst belastbare Vergleichbarkeit zwischen den Weichengeometrien herzustellen, wird die Auswertung in diesem Abschnitt ausschliesslich für Abzweigradien von 500 m durchgeführt. Für andere Abzweigradien liegen insbesondere für IBW und ABW nicht ausreichend Daten sowohl für besohlte als auch für konventionelle Betonschwellen vor.

Abbildung 26 zeigt die Verteilung der Verschlechterungsraten getrennt nach Weichengeometrie und Schwellentyp. Die Boxplots stellen jeweils die Verteilungen für konventionelle Betonschwellen (grau) und besohlte Betonschwellen (gelb) dar. Zusätzlich sind die jeweiligen Verschlechterungsraten als Punkte dargestellt. Dabei bezeichnet N die Anzahl der im Datensatz enthaltenen Weichen, während n die Anzahl der in den Boxplot eingehenden Verschlechterungsraten angibt. Die Differenz zwischen beiden Grössen ergibt sich daraus, dass für einzelne Weichen mehrere auswertbare Zeitabschnitte vorliegen können.

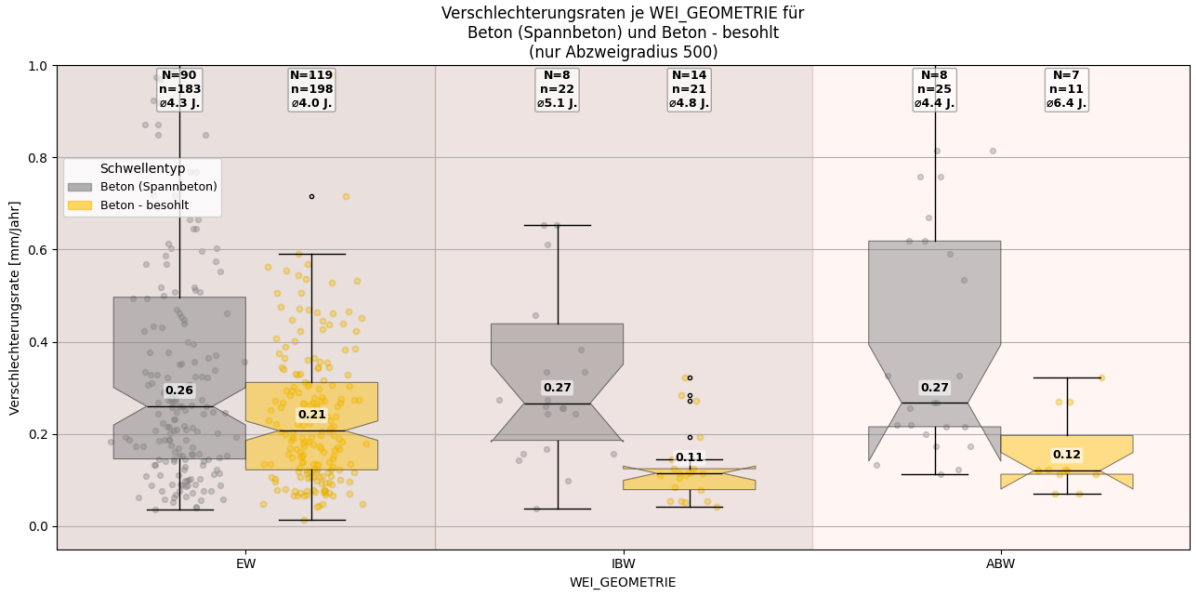


Abbildung 26: Vergleich der Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von der Weichengeometrie

C2 - Intern

Die Abbildung zeigt, dass die Medianwerte der Verschlechterungsrate bei besohlten Betonschwellen in allen drei betrachteten Weichengeometrien unter jenen der konventionellen Betonschwellen liegen. Bei den Einfachweichen (EW) sinkt der Median von 0,26 mm/Jahr auf 0,21 mm/Jahr, was einer Verbesserung von rund 19 % entspricht. Bei den Innenbogenweichen (IBW) reduziert sich der Median von 0,27 mm/Jahr auf 0,11 mm/Jahr und damit um rund 59 %. Bei den Aussenbogenweichen (ABW) ergibt sich mit einer Reduktion von 0,27 mm/Jahr auf 0,12 mm/Jahr eine Verbesserung von rund 66 %. Zusätzlich deutet der deutlich kleinere Interquartilsabstand bei besohlten Betonschwellen auf ein zuverlässigeres und stabileres Qualitätsverhalten hin.

Insgesamt deutet diese Analyse darauf hin, dass besohlte Betonschwellen in allen drei betrachteten Weichengeometrien geringere Verschlechterungsraten aufweisen als konventionelle Betonschwellen. Aufgrund der kleineren Stichprobe bei IBW und ABW sind diese Ergebnisse jedoch vorsichtig zu interpretieren. Am belastbarsten ist der Vergleich bei den Einfachweichen, da hier die grösste Datenbasis vorliegt

4.2.2.1 Vergleich Verschlechterungsverhalten – Abzweigradius (300,500,1200)

Zur Untersuchung des Effekts der Schwellenbesohlung in Abhängigkeit vom Abzweigradius werden die in Österreich häufig vorkommenden Radienklassen 300 m, 500 m und 1200 m betrachtet. Diese können näherungsweise als kleine, mittlere und grosse Abzweigradien verstanden werden. Die Auswertung wird ausschliesslich für Einfachweichen (EW) durchgeführt, da nur für diese Weichenart eine ausreichend belastbare Datengrundlage vorliegt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit den verschiedenen Radienklassen auch unterschiedliche Randbedingungen einhergehen. Insbesondere unterscheiden sich die Altersverteilungen und Belastungsklassen zwischen den betrachteten Radiusgruppen. Der Vergleich zwischen besohlten und konventionellen Betonschwellen ist innerhalb jeder einzelnen Radienklasse möglich, da das Datenset so zusammengestellt wurde, dass die Randbedingungen innerhalb dieser Gruppen möglichst ähnlich sind. Ein direkter Vergleich der drei Radienklassen untereinander ist dagegen nur eingeschränkt zulässig, da sich die Gruppen in ihrer Zusammensetzung unterscheiden.

Abbildung 27 zeigt die Verteilung der Verschlechterungsraten getrennt nach Abzweigradius und Schwellentyp. Dargestellt sind wiederum Boxplots für konventionelle Betonschwellen (grau) und besohlte Betonschwellen (gelb) sowie die zugehörigen Verschlechterungsraten. Dabei steht N für die Anzahl der enthaltenen Weichen, n für die Anzahl der in die Auswertung eingehenden Verschlechterungsraten. Zusätzlich ist die mittlere jährliche tägliche Belastung je Gruppe angegeben.

C2 - Intern

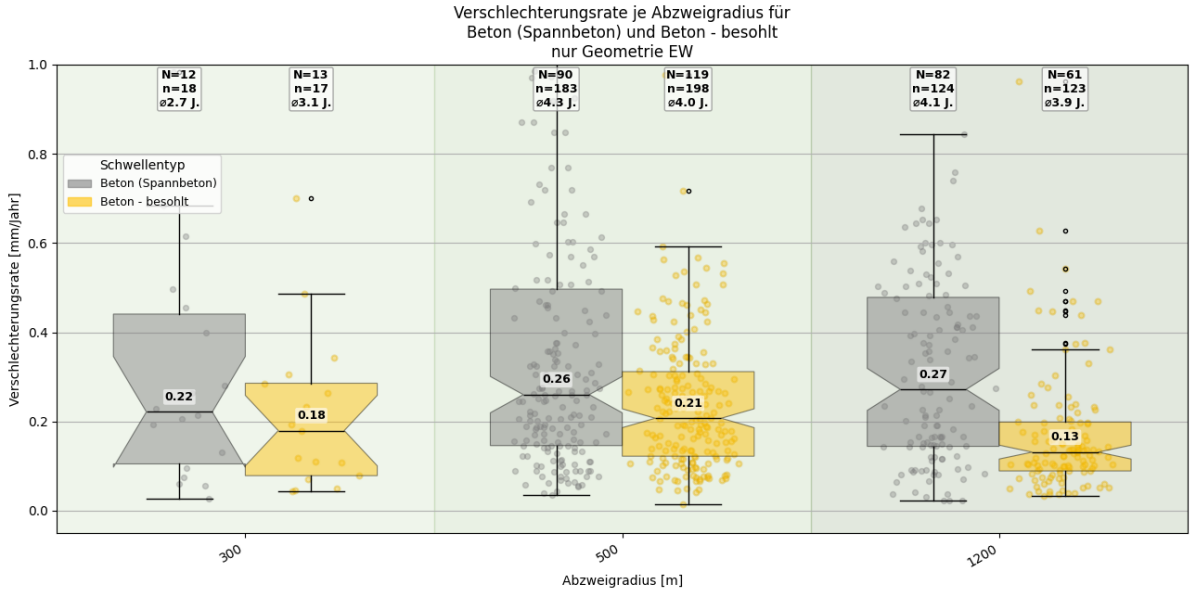


Abbildung 27: Vergleich der Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von Abzweigradius

Die Abbildung zeigt, dass die Medianwerte der Verschlechterungsrate bei besohlten Betonschwellen in allen drei Radienklassen unter jenen der konventionellen Betonschwellen liegen. Bei einem Abzweigradius von 300 m sinkt der Median von 0,22 mm/Jahr auf 0,18 mm/Jahr, was einer Verbesserung von rund 18 % entspricht. Bei 500 m reduziert sich der Median von 0,26 mm/Jahr auf 0,21 mm/Jahr und damit um rund 19 %. Am deutlichsten ist der Unterschied bei 1200 m, wo der Median von 0,27 mm/Jahr auf 0,13 mm/Jahr sinkt, was einer Verbesserung von rund 52 % entspricht. Auch in dieser Auswertung deutet der geringere Interquartilsabstand für Weichen mit besohlten Betonschwellen auf ein stabileres Qualitätsverhalten hin.

Insgesamt deutet die Abbildung darauf hin, dass besohlte Betonschwellen in allen betrachteten Radienklassen geringere Verschlechterungsraten aufweisen als konventionelle Betonschwellen. Besonders ausgeprägt ist dieser Unterschied in der Radienklasse 1200 m. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Radienklassen aufgrund ihrer unterschiedlichen Randbedingungen nicht uneingeschränkt direkt miteinander verglichen werden können. Belastbar ist daher vor allem der Vergleich innerhalb der jeweiligen Radienklasse zwischen besohlten und konventionellen Betonschwellen.

4.2.2.2 Vergleich Verschlechterungsverhalten – Belastungsklassen [br.t/Tag]

Zur Untersuchung des Effekts der Schwellenbesohlung in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung werden die Verschlechterungsraten nach Belastungsklassen ausgewertet. Dabei werden ausschliesslich Einfachweichen (EW) betrachtet. Zusätzlich werden Weichen mit Abzweigradien ≤300 m in dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da diese im vorliegenden

C2 - Intern

Datensatz ein abweichendes Verhalten zeigen und die Vergleichbarkeit zwischen den Belastungsklassen zusätzlich erschweren würden. Es ist zudem anzumerken, dass eine belastbare Interpretation vor allem für den Belastungsbereich zwischen >15.000 und etwa 75.000 möglich ist, da in diesem Bereich die grösste und zugleich ausgewogenste Datengrundlage vorliegt. Die nachfolgende Auswertung ist daher im Wesentlichen auf diesen Bereich zu beziehen.

Abbildung 28 zeigt die Verteilung der Verschlechterungsraten getrennt nach Belastungsklasse und Schwellentyp. Dargestellt sind wiederum Boxplots für konventionelle Betonschwellen (grau) und besohlte Betonschwellen (gelb) sowie die zugehörigen Verschlechterungsraten. Dabei bezeichnet N die Anzahl der im Datensatz enthaltenen Weichen, während n die Anzahl der in die Auswertung eingehenden Verschlechterungsraten angibt.

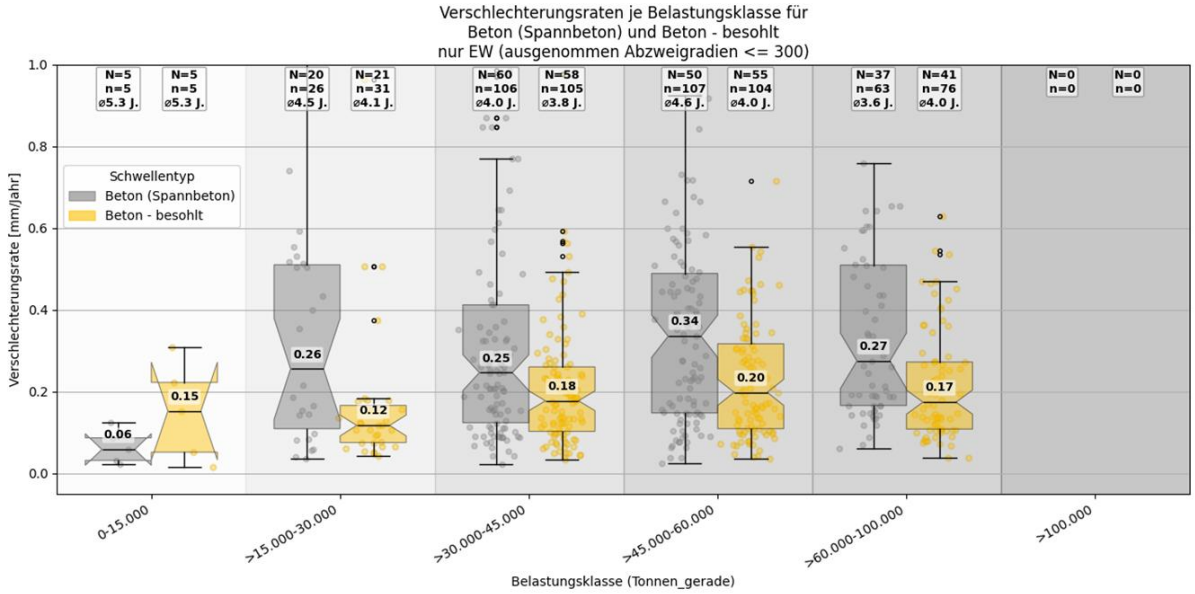


Abbildung 28: Vergleich der Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von Belastunsgsklassen

Abbildung 28 zeigt, dass die Medianwerte der Verschlechterungsrate bei besohlten Betonschwellen in nahezu allen betrachteten Belastungsklassen unter jenen der konventionellen Betonschwellen liegen. In der Belastungsklasse >15.000–30.000 t/Tag sinkt der Median von 0,26 mm/Jahr auf 0,12 mm/Jahr, was einer Verbesserung von rund 54 % entspricht. In der Klasse >30.000–45.000 t/Tag reduziert sich der Median von 0,25 mm/Jahr auf 0,18 mm/Jahr, entsprechend rund 28 %. In der Belastungsklasse >45.000-60.000 ergibt sich eine Reduktion von 0,34 mm/Jahr auf 0,20 mm/Jahr, was einer Verbesserung von rund 41 % entspricht. In der Klasse >60.000–100.000 sinkt der Median von 0,27 mm/Jahr auf 0,17 mm/Jahr und damit um rund 37 %.

Lediglich in der niedrigsten Belastungsklasse 0–15.000 t/Tag liegt der Median der besohlten Betonschwellen mit 0,15 mm/Jahr über jenem der konventionellen Betonschwellen mit 0,06 mm/Jahr. Dieser Vergleich ist jedoch aufgrund der sehr kleinen Stichprobe von jeweils

C2 - Intern

nur fünf Weichen vorsichtig zu interpretieren. Für die höchste Belastungsklasse >100.000 liegen in der vorliegenden Auswertung keine auswertbaren Daten vor.

Insgesamt deutet die Abbildung darauf hin, dass besohlte Betonschwellen über einen breiten Bereich der betrachteten Belastungsklassen geringere Verschlechterungsraten aufweisen als konventionelle Betonschwellen. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Belastung nicht unabhängig von anderen Randbedingungen betrachtet werden kann. Belastbare Aussagen sind daher vor allem innerhalb der jeweiligen Belastungsklasse möglich.

4.2.2.3 Vergleich Verschlechterungsverhalten – V_{max}

Zur Untersuchung des Effekts der Schwellenbesohlung in Abhängigkeit von der maximal zulässigen Geschwindigkeit (V_{max}) werden die Verschlechterungsraten nach Geschwindigkeitsklassen ausgewertet. Die Einteilung der Klassen orientiert sich an betrieblich üblichen Kategorien, wie sie auch im Rahmen von Unterhaltsstrategien berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass die V_{max} lediglich die zulässige Höchstgeschwindigkeit beschreibt und nicht die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit. Insbesondere im Mischverkehr können die real gefahrenen Geschwindigkeiten davon teils deutlich abweichen.

Die Auswertung erfolgt wiederum auf Basis des balancierten Datensets und beschränkt sich auf Einfachweichen (EW). Im Unterschied zur belastungsklassenbezogenen Auswertung werden hier jedoch alle Abzweigradien berücksichtigt, da kleine Abzweigradien typischerweise mit niedrigeren zulässigen Geschwindigkeiten einhergehen und deshalb in der Betrachtung der V_{max} -Klassen mit enthalten sein sollen.

Abbildung 29 zeigt die Verteilung der Verschlechterungsraten getrennt nach V_{max}-Klasse und Schwellentyp. Dargestellt sind Boxplots für konventionelle Betonschwellen (grau) und besohlte Betonschwellen (gelb) sowie die zugehörigen Einzelwerte. Dabei bezeichnet N die Anzahl der im Datensatz enthaltenen Weichen, während n die Anzahl der in die Auswertung eingehenden Verschlechterungsraten angibt.

C2 - Intern

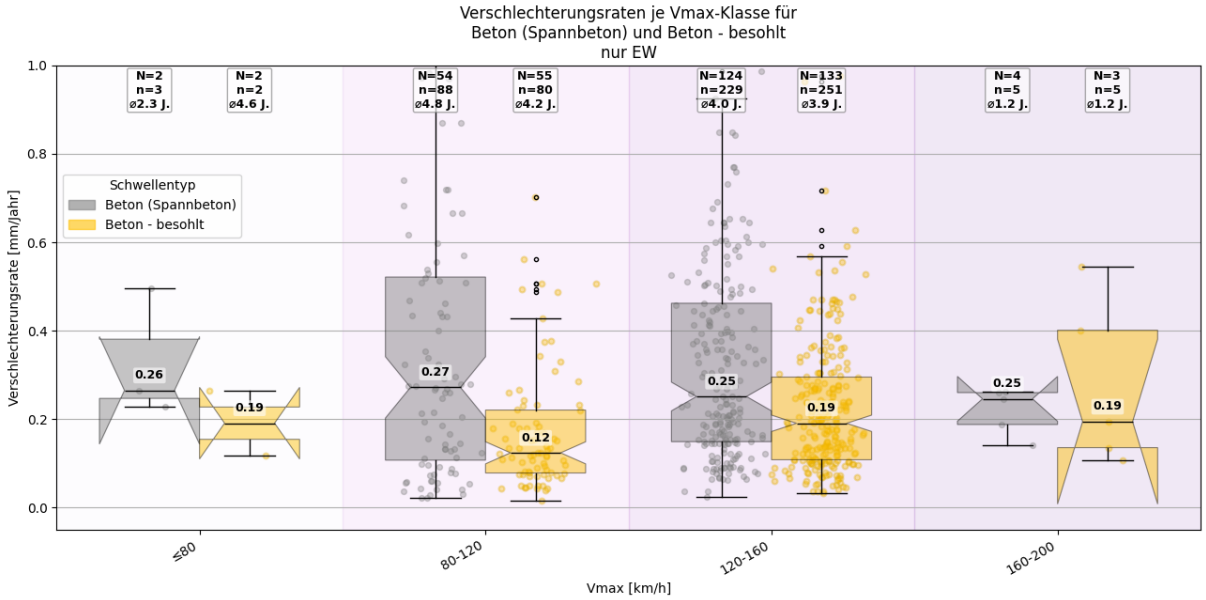


Abbildung 29: Vergleich der Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von V_{max}

Die Abbildung zeigt, dass die Medianwerte der Verschlechterungsrate bei besohlten Betonschwellen in allen auswertbaren V_{max}-Klassen unter jenen der konventionellen Betonschwellen liegen. In der Klasse ≤80km/h sinkt der Median von 0,26 mm/Jahr auf 0,19 mm/Jahr, was einer Verbesserung von rund 27 % entspricht. In der Klasse 120km/h reduziert sich der Median von 0,27 mm/Jahr auf 0,12 mm/Jahr und damit um rund 56 %. In der Klasse 120-160km/h ergibt sich eine Reduktion von 0,25 mm/Jahr auf 0,19 mm/Jahr, entsprechend rund 24 %. Auch in der Klasse 160–200km/h liegt der Median der besohlten Betonschwellen mit 0,19 mm/Jahr unter jenem der konventionellen Betonschwellen mit 0,25 mm/Jahr, was einer Verbesserung von rund 24 % entspricht.

Besonders belastbar erscheint die Auswertung in den Geschwindigkeitsklassen 80-120km/h und 120–160km/h, da hier die grösste Datengrundlage vorliegt. Die Klassen ≤80km/h und 160–200km/h sind dagegen aufgrund der kleinen Stichprobe vorsichtiger zu interpretieren. Für die Klasse >200km/h liegen keine auswertbaren Daten vor.

Insgesamt deutet die Abbildung darauf hin, dass besohlte Betonschwellen über die betrachteten V_{max} -Klassen hinweg geringere Verschlechterungsraten aufweisen als konventionelle Betonschwellen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass das V_{max} nicht unabhängig von anderen Einflussgrössen, insbesondere vom Abzweigradius und den betrieblichen Einsatzbedingungen, betrachtet werden kann.

4.2.2.4 Fazit des Gleislageverhaltens der Referenzweichen in Österreich

Die Auswertung der österreichischen Referenzweichen zeigt insgesamt, dass Weichen mit besohlten Betonschwellen im Vergleich zu Weichen mit konventionellen Betonschwellen

C2 - Intern

tendenziell geringere Verschlechterungsraten der vertikalen Gleislage aufweisen. Dieser Zusammenhang zeigt sich über mehrere betrachtete Einflussgrössen hinweg, insbesondere in der Auswertung nach Weichengeometrie, Abzweigradius, Belastungsklasse und zulässiger Geschwindigkeit (V_{max}).

Besonders belastbar sind jene Ergebnisse, für die eine grössere und ausgewogenere Datenbasis vorliegt, insbesondere bei Einfachweichen sowie in den mittleren Belastungs- und Geschwindigkeitsklassen. Gleichzeitig zeigen die Auswertungen, dass das Verschlechterungsverhalten nicht ausschliesslich vom Schwellentyp abhängt. Auch Einflussgrössen wie Abzweigradius, Belastung und V_{max} wirken sich auf die Höhe der Verschlechterungsrate aus und müssen daher bei der Interpretation mitberücksichtigt werden.

Insgesamt stützen die österreichischen Daten die Annahme, dass die Schwellenbesohlung zu einem günstigeren Gleislageverhalten beitragen kann. Die grössere Stichprobe und die längeren Zeitreihen ermöglichen dabei eine belastbarere Einordnung des Effekts als im schweizerischen Datensatz allein.

4.3 Vergleich der Ergebnisse SBB und ÖBB und Limitationen

Die Auswertung der schweizerischen Daten zeigt anhand der wenigen verfügbaren Referenzweichen erste Hinweise darauf, dass Weichen mit besohlten Betonschwellen tendenziell geringere Verschlechterungsraten aufweisen als vergleichbare Weichen mit konventionellen Betonschwellen. Aufgrund der stark begrenzten Referenzbasis – insbesondere der nur zwei auswertbaren Weichen mit konventionellen Betonschwellen – ist die Aussagekraft dieser Ergebnisse jedoch eingeschränkt.

Die österreichischen Daten ermöglichen aufgrund der deutlich grösseren Stichprobe und des balancierten Datensets eine wesentlich breitere Einordnung des Effekts. Über die verschiedenen Vergleichsgruppen hinweg zeigen sich dort für besohlte Betonschwellen gegenüber konventionellen Betonschwellen durchgehend geringere Verschlechterungsraten. Die Grössenordnung der Verbesserung liegt – abhängig von den jeweiligen Randbedingungen – etwa im Bereich von 20 % bis 60 %.

Abbildung 30 veranschaulicht das zugrunde liegende Vergleichskonzept. Für beide Datensätze wird jeweils nicht das absolute Zustandsniveau verglichen, sondern der Unterschied zwischen konventionellen und besohlten Betonschwellen innerhalb desselben Netzes. Entscheidend ist somit, ob sich in der Schweiz und in Österreich dieselbe Richtung des Effekts zeigt und ob die Grössenordnung der beobachteten Reduktion vergleichbar ist.

C2 - Intern

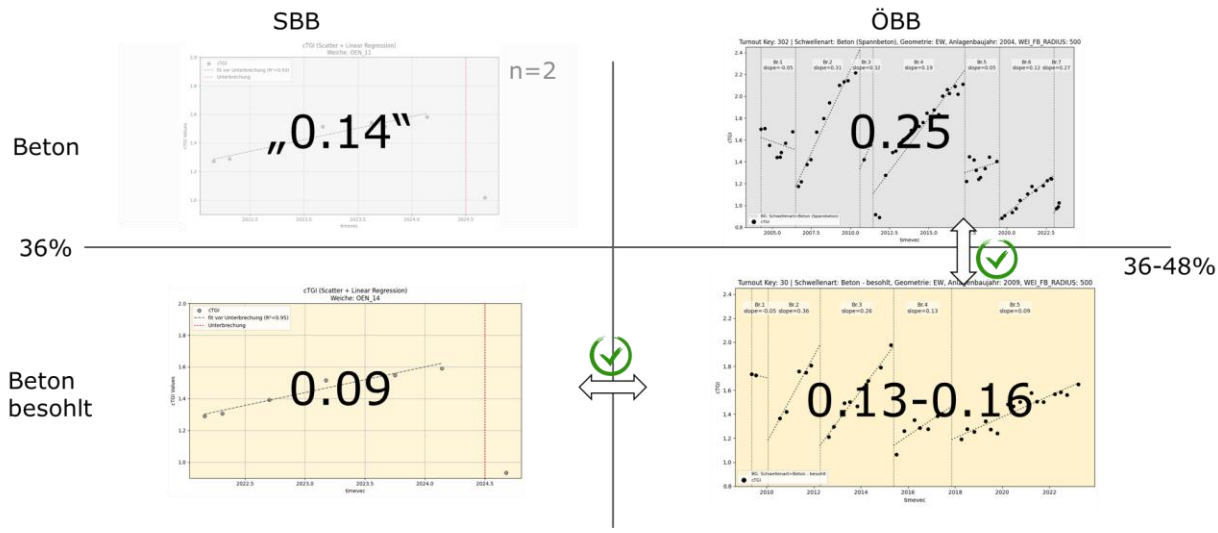


Abbildung 30: Vergleichskonzept zur Einordnung der schweizerischen Ergebnisse anhand der österreichischen Referenzdaten.

Anhand der technischen Bewertung der Referenzweichen in Österreich lässt sich auch das schweizerische Paarbeispiel mit einer Verschlechterungsrate von 0,14 mm/Jahr für die konventionelle Weiche und 0,09 mm/Jahr für die besohlte Weiche einordnen. Dies entspricht einer Reduktion um rund 36 % und liegt damit innerhalb jenes Bereichs, der auch in den österreichischen Auswertungen beobachtet wird. Das schweizerische Ergebnis ist somit in seiner Grössenordnung plausibel und steht im Einklang mit den Beobachtungen aus dem österreichischen Datensatz.

Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass sich die beiden Datensätze in ihren Randbedingungen unterscheiden. Insbesondere ist im schweizerischen Netz insgesamt von einer besseren Schotterqualität auszugehen als im österreichischen Vergleichsdatensatz. Dadurch fallen die absoluten Verschlechterungsraten in der Schweiz niedriger aus. Für die Bewertung des Effekts der Schwellenbesohlung ist daher nicht der direkte Vergleich absoluter Werte zwischen beiden Netzen massgeblich, sondern der relative Unterschied zwischen konventionellen und besohlten Betonschwellen innerhalb des jeweiligen Datensatzes.

Zusammenfassend stützen die österreichischen Daten die im schweizerischen Datensatz beobachtete Tendenz und ermöglichen eine belastbarere Einordnung des Effekts der Schwellenbesohlung. Die grösste Limitation der technischen Bewertung bleibt jedoch die geringe Zahl an schweizerischen Referenzweichen mit konventionellen Betonschwellen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass trotz der Balancierung des österreichischen Datensatzes netz- und systemspezifische Unterschiede – etwa in Schotterqualität, Unterbau oder Unterhaltsstrategien – nicht vollständig ausgeschlossen werden können.

C2 - Intern

5 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung von Innovationen im Weichenbau dient dazu, technische Erkenntnisse in handlungsrelevante Entscheidungen umzusetzen. Während die technische Bewertung das Qualitätsverhalten von Weichen unterschiedlicher Bauart darstellt, zeigt die wirtschaftliche Betrachtung die Auswirkungen dieses Qualitätsverhaltens auf die Kosten und den Ressourceneinsatz.

Für diese Analysen werden neben den technischen Kennwerten zusätzliche Eingangsdaten herangezogen, darunter Kostensätze für Unterhaltsarbeiten, Schwellenersatz, Stopfung, den Einsatz von Maschinen und Personal sowie mögliche Ausfallkosten. Durch die Kombination von technischen und ökonomischen Parametern lässt sich beurteilen, welche Massnahmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten effizient sind und wie Innovationen im Schwellenbau langfristig zur Optimierung von Wartung und Betrieb beitragen können.

Die wirtschaftlichen Analysen wurden unter Verwendung interner Kosten- und Betriebsdaten durchgeführt. Aufgrund der Vertraulichkeit dieser Daten können die zugrunde liegenden Einheitspreise, Kostensätze sowie detaillierten Berechnungsgrundlagen nicht veröffentlicht werden. Die dargestellten Ergebnisse basieren jedoch auf konsistenten Bewertungsansätzen und erlauben eine belastbare Beurteilung der wirtschaftlichen Auswirkungen der untersuchten Innovationen.

C2 - Intern

6 Schlussfolgerungen/Fazit

Ziel des Projekts ist die technische und wirtschaftliche Bewertung von Weichen mit besohlten Betonschwellen im Vergleich zu Weichen mit konventionellen Betonschwellen. Grundlage hierfür bilden Messdaten aus dem schweizerischen Streckennetz sowie ergänzende Referenzdaten aus dem österreichischen Netz.

Die Analyse der Einsenkmessungen zeigt, dass sich Weichen mit besohlten Betonschwellen stärker einsenken als Weichen mit konventionellen Schwellen. Dieser Effekt ist erwartbar und stellt einen wesentlichen Wirkmechanismus der Besohlung dar, durch den sich die Lastabtragung im Gleis positiv verändert. Es handelt sich dabei überwiegend um gleichmässige Setzungen, die die Beanspruchung der Komponenten nicht wesentlich erhöhen. Werden hingegen ausschliesslich Wellenlängen kleiner 5 m betrachtet, sodass lokale (ungleichmässige) Einsenkungen bewertet werden, weisen Weichen mit besohlten Betonschwellen geringere Werte auf als Vergleichsweichen mit konventionellen Schwellen. Daraus ist abzuleiten, dass durch den Einsatz der Besohlung keine negativen Auswirkungen infolge erhöhter Einsenkungen zu erwarten sind. Diese Einschätzung wird auch durch Betriebserfahrungen der ÖBB gestützt, bei denen durch den Einsatz besohlter Betonschwellen keine erhöhte Schadensrate an Komponenten festgestellt wurde.

Der Fokus der Auswertungen lag auf Setzungsraten der Gleislage, da hohe Setzungsraten erhöhte Unterhaltsmassnahmen und eine reduzierte Nutzungsdauer bewirken. Die technische Analyse zeigt, dass Weichen mit besohlten Betonschwellen geringere Verschlechterungsraten der vertikalen Gleislage aufweisen als vergleichbare Weichen mit konventionellen Betonschwellen. Im Mittel ergibt sich für das schweizerische Datensample eine um 36 % geringere Verschlechterung für besohlte Betonschwellen. Aufgrund der sehr geringen Zahl an Referenzweichen im schweizerischen Datensatz ist diese Aussage dort jedoch nur eingeschränkt belastbar. Die österreichischen Daten stützen diese Tendenz und zeigen Verbesserungen in einer Grössenordnung von etwa 20 % bis 60 %.

Ein wesentliches Ergebnis der Auswertungen ist, dass dieser technische Vorteil über eine Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen hinweg konsistent nachgewiesen werden kann. Die Auswertungen zeigen, dass sich der positive Effekt der Schwellenbesohlung unabhängig von der betrachteten Einflussgrösse ergibt. So weisen besohlte Betonschwellen sowohl bei unterschiedlichen Weichengeometrien (EW, IBW, ABW) als auch über verschiedene Abzweigradienklassen hinweg durchgehend geringere Verschlechterungsraten auf. Ebenso zeigt sich dieser Zusammenhang über alle untersuchten Belastungsklassen und Geschwindigkeitsbereiche hinweg.

C2 - Intern

Dabei variiert zwar die Höhe des Effekts – beispielsweise ist die Verbesserung bei grossen Radien oder hohen Belastungen teilweise stärker ausgeprägt als bei kleinen Radien oder niedrigen Belastungen – die Wirkungsrichtung bleibt jedoch in allen Auswertungen gleich. Auch in den Sensitivitätsanalysen sowie in den paarweisen Vergleichen unter nahezu identischen Randbedingungen bestätigt sich dieses Bild. Unterschiede im Gleislageverhalten lassen sich somit systematisch auf die Wirkung der Schwellenbesohlung zurückführen und nicht ausschliesslich auf andere Einflussgrössen wie Unterbau, Belastung oder Geometrie.

Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass die Schwellenbesohlung insbesondere bei komplexeren Beanspruchungssituationen – etwa bei hohen Verkehrsbelastungen, grösseren Abzweigradien oder bei Bogenweichen – ihre Wirkung besonders deutlich entfaltet. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass bei sehr niedrigen Belastungen andere Einflussgrössen stärker ins Gewicht fallen können, wodurch sich der relative Vorteil reduziert, jedoch in der technischen Bewertung nicht grundsätzlich umkehrt.

Auch die wirtschaftliche Bewertung zeigt in den meisten betrachteten Fällen Vorteile für die Schwellenbesohlung. Besonders ausgeprägt ist dieser Nutzen bei mittleren bis hohen Belastungen über 15.000 t/Tag. Nur in sehr konservativen Szenarien, in denen der technische Effekt der Besohlung deutlich reduziert angesetzt wird, kann insbesondere bei niedrigen Belastungen bis 15.000 t/Tag und dynamischer Bewertung mit hohen kalkulatorischen Zinssätzen kein wirtschaftlicher Vorteil mehr dargestellt werden.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz besohlter Betonschwellen unter den betrachteten Randbedingungen sowohl technisch als auch wirtschaftlich vorteilhaft ist. Für sehr schwach belastete und langsam befahrene Weichen ist die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit auf Basis der verfügbaren Daten zwar grundsätzlich darstellbar, wird jedoch unter sehr konservativen Annahmen in der Sensitivitätsanalyse relativiert und ist daher nur eingeschränkt belastbar zu beurteilen. Gerade in diesem Bereich wären zusätzliche empirische Daten erforderlich, um die Ergebnisse weiter abzusichern und die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Netzbedingungen verlässlicher bewerten zu können.

Die abschliessende Empfehlung lautet, Weichen mit einer täglichen Belastung von mehr als 15.000 Bt/Tag durchgehend mit besohlten Betonschwellen auszurüsten. Für schwächer belastete Weichen sind Besohlungen technisch ebenfalls vorteilhaft. Auch ein wirtschaftlicher Vorteil ist grundsätzlich zu erwarten, kann auf Basis der verfügbaren Daten jedoch nicht in allen Fällen belastbar nachgewiesen werden. In diesen Fällen sollte die Entscheidung für oder gegen den Einsatz der Besohlung unter Berücksichtigung weiterer technischer, betrieblicher und strategischer Aspekte getroffen werden.

C2 - Intern

Ergänzend deuten Erfahrungen des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft darauf hin, dass durch den Einsatz von Besohlungen weitere positive Effekte auftreten können, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht vollständig quantifiziert werden konnten. Dazu zählen insbesondere Verbesserungen des Schienenzustands, wie eine Reduktion von Schweissstossunebenheiten oder des Squat-Aufkommens, die langfristig ebenfalls zu einer Reduktion des Unterhaltsaufwands beitragen können.

C2 - Intern

7 Appendix

Dieses Kapitel stellt einen Nachtrag zu den bisherigen Analysen und Bewertungen dar. Zum Ende des Projekts wurden zusätzliche Daten des Diagnosefahrzeugs aus dem schweizerischen Streckennetz bereitgestellt. Diese umfassen rund 418 Weichen mit konventionellen Betonschwellen und erweitern die bisherige Datengrundlage wesentlich, da für die ursprünglichen Auswertungen lediglich zwei auswertbare Weichen mit konventionellen Betonschwellen zur Verfügung standen.

Ziel der ergänzenden Analyse ist es, die bislang auf dieser eingeschränkten Datengrundlage basierenden Ergebnisse mit dem erweiterten Datensatz zu überprüfen und – soweit möglich – zu bestätigen. Gleichzeitig sollen bestehende Einschränkungen und Limitationen transparent dargestellt werden.

Da für die Analyse des Gleislageverhaltens auswertbare Zeitreihen erforderlich sind, konnten nicht alle bereitgestellten Weichen in die Auswertung aufgenommen werden. Unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen an die Zeitreihenanalyse – insbesondere hinsichtlich der Anzahl verfügbarer Messpunkte und der Regressionsgüte – wurden schliesslich rund 200 Weichen mit konventionellen Betonschwellen berücksichtigt. Abbildung 31 zeigt die Verteilung der in die Bewertung einfliessenden Einflussgrössen, insbesondere Abzweigradius, V_{max}, tägliche Belastung und Anlagenbaujahr, getrennt nach Schwellenart.

Abbildung 31 verdeutlicht, dass für die konventionellen Betonschwellen eine deutlich grössere Datenbasis zur Verfügung steht als für die besohlten Betonschwellen. Gleichzeitig zeigt sie, dass die betrachteten Weichen eine breite Spannweite hinsichtlich Belastung, Trassierungsgeschwindigkeit, Einbaujahr und Radius abdecken. Für die besohlten Betonschwellen stehen demgegenüber nur wenige Weichen zur Verfügung, sodass deren Verteilungen nur eingeschränkt interpretierbar sind. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass für die besohlten Weichen Angaben zu V_{max} und täglicher Belastung nur für einen Teil der Weichen vorliegen. Die Vergleichbarkeit zwischen beiden Gruppen ist daher trotz der erweiterten Datengrundlage weiterhin eingeschränkt.

Die grössere Datenbasis ermöglicht dennoch zusätzliche Auswertungen unter Berücksichtigung der Einflussgrössen V_{max}, tägliche Belastung und Abzweigradius. Zudem wurde versucht, auch Weichen mit besohlten Betonschwellen in die grafischen Darstellungen einzubeziehen. Hierfür konnten insgesamt 17 Weichen berücksichtigt werden. Da für diese jedoch nur eingeschränkt Informationen zu V_{max} und täglicher Belastung vorliegen, ist die Vergleichbarkeit teilweise begrenzt.

C2 - Intern

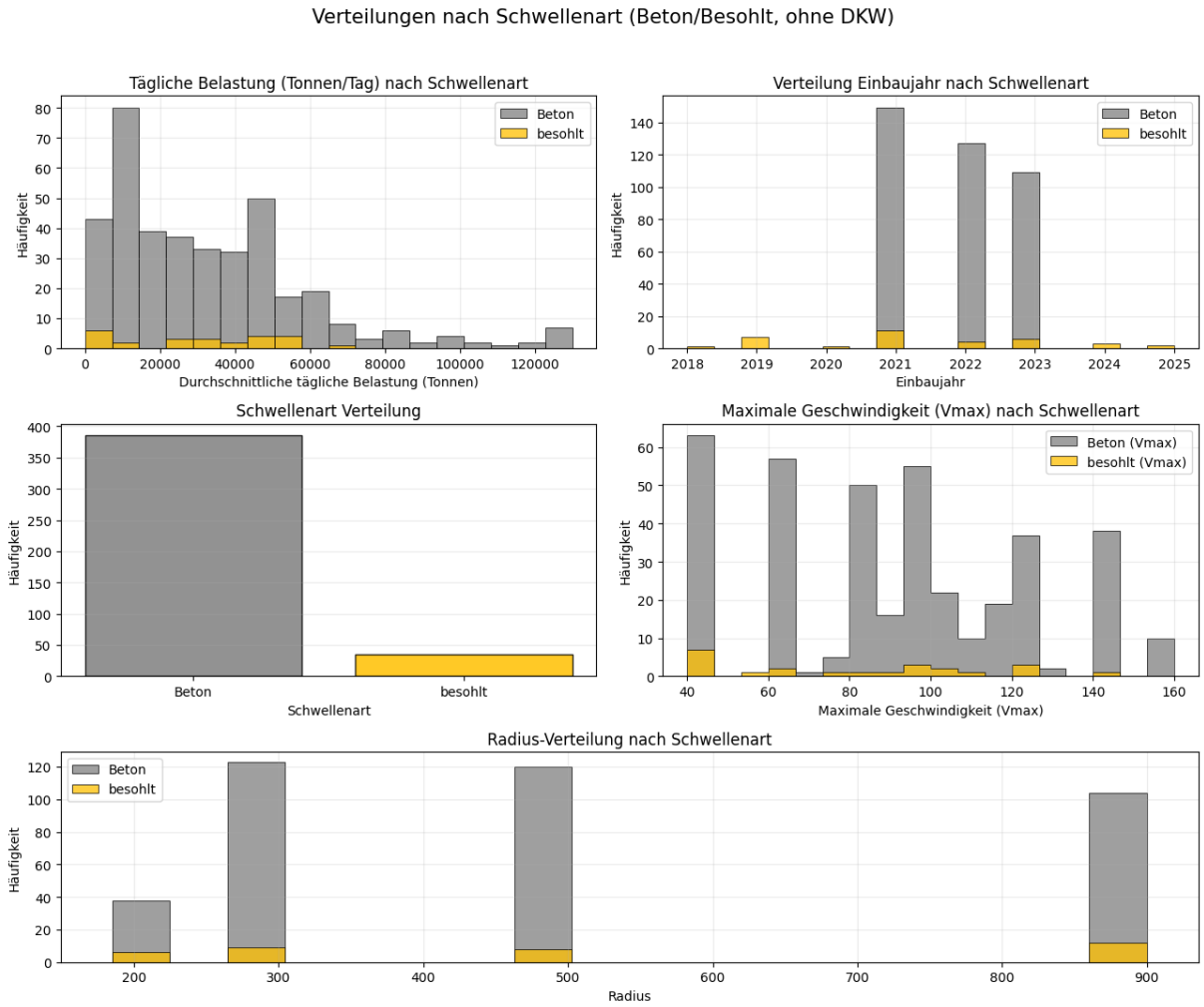


Abbildung 31: Verteilung der berücksichtigten Weichen und Einflussgrössen nach Schwellenart

Um die Eingangswerte der Wirtschaftlichkeitsrechnung mit der erweiterten Datengrundlage zunächst zu plausibilisieren, wurde in einem ersten Schritt ohne weitere Filterung untersucht, wie sich das Gleislageverhalten in Abhängigkeit von der Schwellenart verhält.

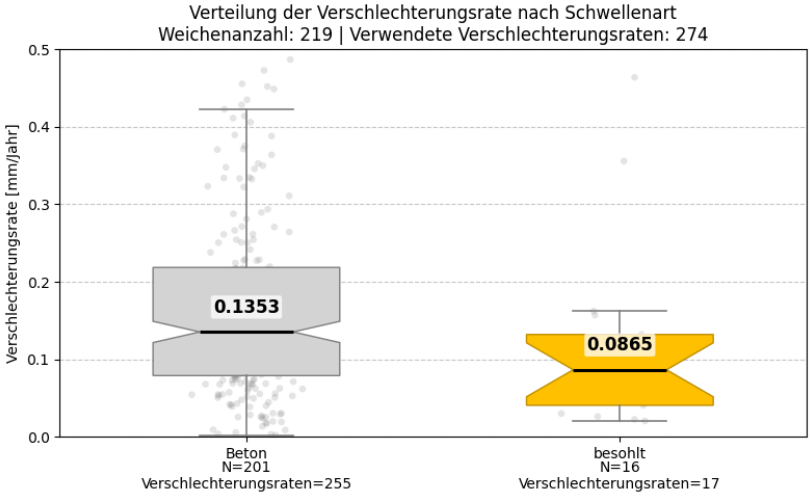


Abbildung 32: Verschlechterungsverhalten – konventionelle vs. besohlte Betonschwellen im schweizerischen Netz

C2 - Intern

Abbildung 32 zeigt die berechneten Verschlechterungsraten für 201 Weichen mit konventionellen Betonschwellen sowie 16 Weichen mit besohlten Betonschwellen. Insgesamt gehen dabei 274 Verschlechterungsraten in die Darstellung ein. Die Mediane liegen bei 0,1353 mm/Jahr für konventionelle und 0,0865 mm/Jahr für besohlte Betonschwellen. Dies entspricht einer Reduktion der Verschlechterungsrate um rund 36 % bei Weichen mit besohlten Betonschwellen. Damit bestätigt auch der erweiterte SBB-Datensatz die bereits im Hauptteil beobachtete Tendenz, dass besohlte Betonschwellen ein günstigeres Gleislageverhalten aufweisen.

Zur weitergehenden Einordnung wurden die Verschlechterungsraten zusätzlich in Abhängigkeit von einzelnen Einflussgrössen ausgewertet. Abbildung 33 zeigt die Verteilung der Verschlechterungsraten über die täglichen Belastungsklassen, getrennt nach Schwellenart. Für die Weichen mit konventionellen Betonschwellen ist dabei erkennbar, dass mit zunehmender Belastung tendenziell auch höhere Verschlechterungsraten auftreten. Für die besohlten Betonschwellen stehen hingegen nur sehr wenige Weichen mit Angaben zur täglichen Belastung zur Verfügung, sodass die entsprechenden Werte nur eingeschränkt interpretierbar sind. Die Auswertung stützt damit zumindest qualitativ den auch in den österreichischen Daten beobachteten Zusammenhang, dass höhere Belastungen mit ungünstigeren Verschlechterungsraten einhergehen.

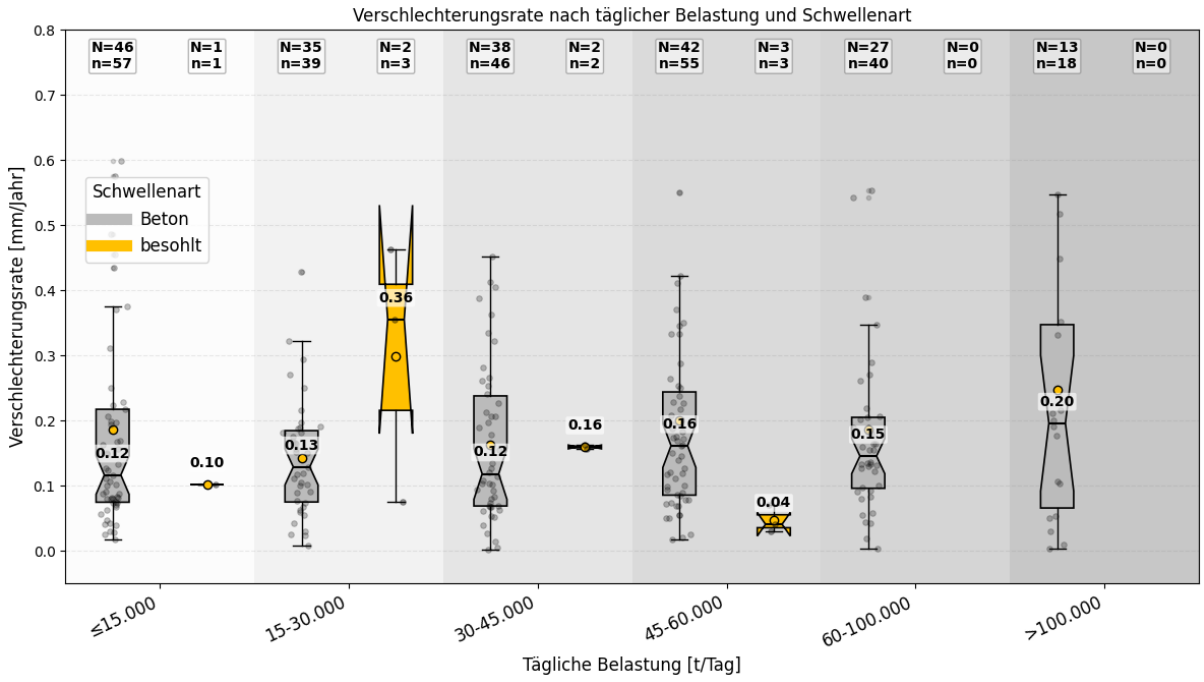


Abbildung 33: Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von der täglichen Belastungsklasse

Abbildung 34 zeigt die Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von der Trassierungsgeschwindigkeit, wiederum getrennt nach Schwellenart. Für die konventionellen Betonweichen ergibt sich auf Basis der vorliegenden Zusatzdaten kein klarer und belastbarer Trend über die Geschwindigkeitsklassen hinweg. Auch für die besohlten Betonschwellen ist die

C2 - Intern

Aussagekraft aufgrund der geringen Zahl verfügbarer Weichen mit vollständigen Zusatzinformationen eingeschränkt. Im Unterschied zur Belastungsauswertung kann aus den ergänzenden SBB-Daten daher kein belastbarer geschwindigkeitsabhängiger Zusammenhang abgeleitet werden.

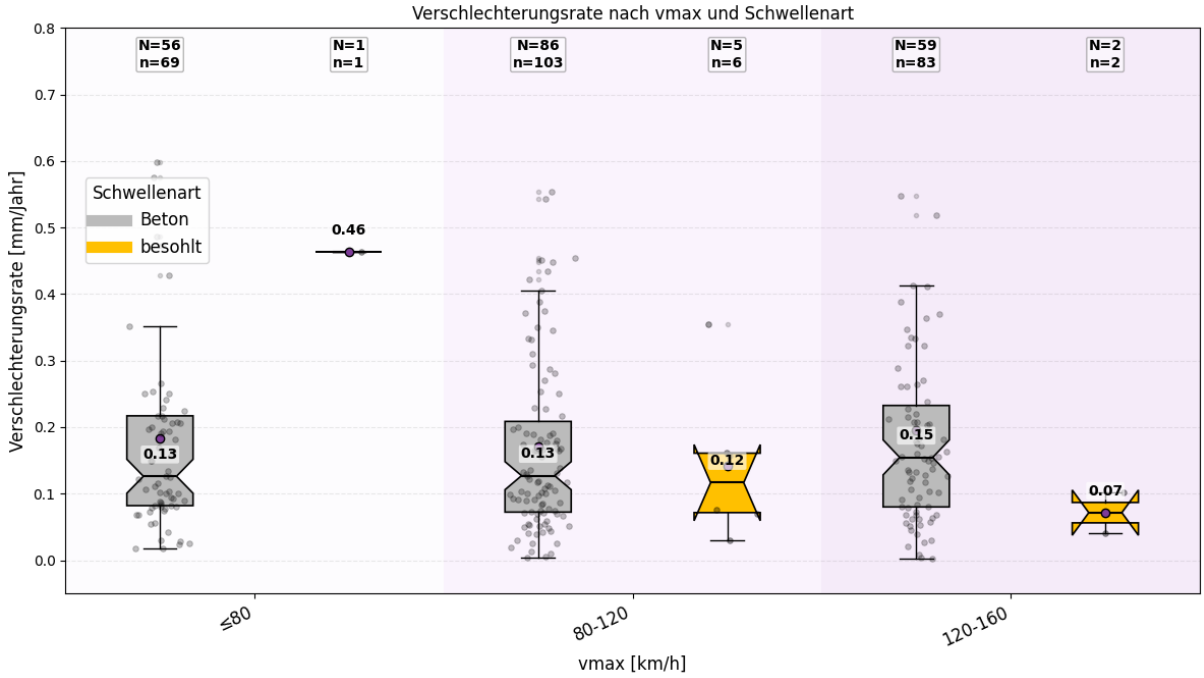


Abbildung 34: Verschlechterungsraten in Abhängigkeit von der Trassierungsgeschwindigkeit

Abbildung A5 zeigt die Verschlechterungsraten in Abhängigkeit vom Abzweigradius für Weichen mit einer täglichen Belastung von über 30.000 t/Tag. Diese Eingrenzung wurde gewählt, da der Einfluss des Abzweigradius nicht unabhängig von der Belastung betrachtet werden kann und höher belastete Weichen im Datensatz tendenziell auch grössere Abzweigradien aufweisen. Durch die Beschränkung auf Weichen mit höherer Belastung wird versucht, den Einfluss der Belastung zu reduzieren und den Zusammenhang mit dem Radius besser sichtbar zu machen.

Für die konventionellen Betonweichen ist auf Basis der vorliegenden Daten erkennbar, dass mit zunehmenden Abzweigradius die Verschlechterungsraten abnehmen. Die Medianwerte sinken von etwa 0,20 mm/Jahr bei 300 m über 0,18 mm/Jahr bei 500 m auf rund 0,10 mm/Jahr bei 900 m. Damit zeigt sich für die konventionellen Betonweichen, dass grössere Abzweigradien mit einem günstigeren Gleislageverhalten verbunden sind. Für die besohlten Betonschwellen stehen hingegen weiterhin nur sehr wenige Weichen zur Verfügung. Die dargestellten Werte deuten ebenfalls auf geringere Verschlechterungsraten hin, sind aufgrund der kleinen Stichprobe jedoch nur eingeschränkt belastbar. Für diese Schwellenart kann der Zusammenhang zwischen Abzweigradius und Verschlechterungsrate mit den vorliegenden SBB-Zusatzdaten daher nicht in gleicher Sicherheit beurteilt werden wie für die konventionellen Betonweichen.

C2 - Intern

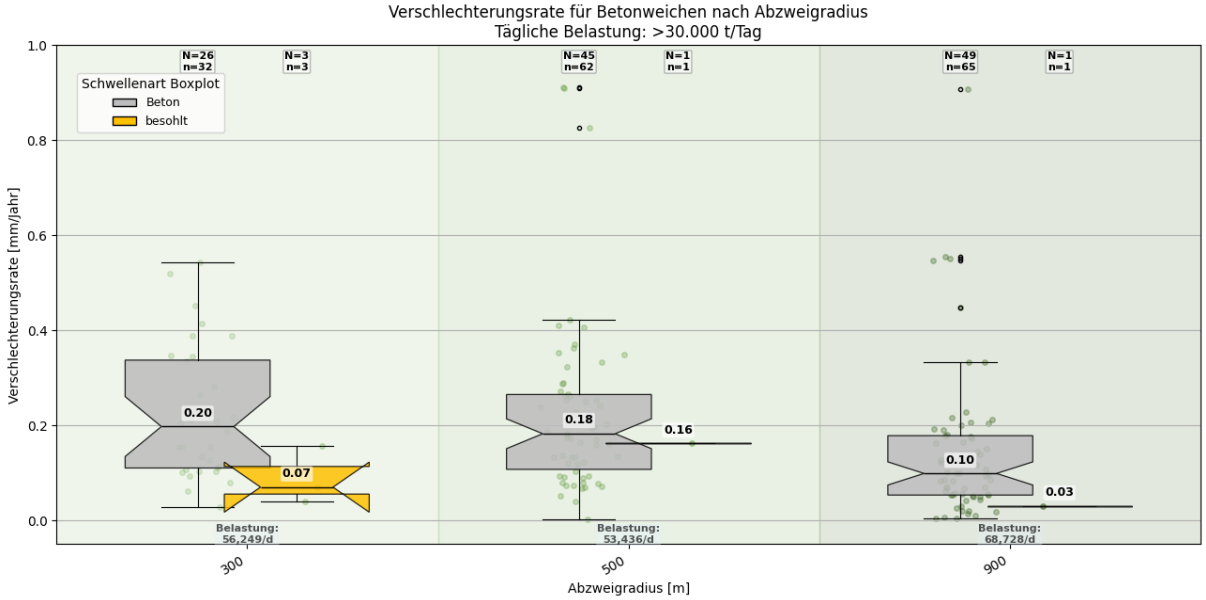


Abbildung 35: Verschlechterungsraten in Abhängigkeit vom Abzweigradius für die Belastungsklasse > 30.000

Insgesamt tragen die ergänzenden Daten dazu bei, die im Hauptteil beschriebenen Limitationen, die sich aus der sehr geringen Zahl an konventionellen Betonweichen im schweizerischen Datensatz ergeben, deutlich abzuschwächen. Anhand der ergänzenden Analysen kann gezeigt werden, dass die konventionellen Betonweichen im schweizerischen Netz in ihrer Tendenz ein ähnliches Verhalten aufweisen wie die konventionellen Betonweichen im österreichischen Datensatz. Dies betrifft zwar nicht die absolute Höhe der Verschlechterungsraten, wohl aber die beobachteten Zusammenhänge mit Einflussgrössen wie insbesondere der Belastung und teilweise auch dem Abzweigradius.

Darüber hinaus zeigt die ergänzende Auswertung erneut, dass konventionelle Betonweichen im schweizerischen Datensatz tendenziell höhere Verschlechterungsraten aufweisen als Weichen mit besohlten Betonschwellen. Damit wird die im Hauptteil dargestellte Grundtendenz zusätzlich gestützt. Gleichzeitig bleibt zu berücksichtigen, dass für die besohlten Betonschwellen im ergänzenden schweizerischen Datensatz weiterhin nur wenige Weichen mit ausreichenden Zusatzinformationen zur Verfügung stehen. Ein belastbarer Vergleich innerhalb verschiedener Untergruppen konnte daher auf Basis dieser Zusatzdaten nicht in gleicher Weise durchgeführt werden wie bei den österreichischen Referenzweichen.

Insgesamt liefert die ergänzende Analyse somit eine wichtige zusätzliche Plausibilisierung der im Hauptteil getroffenen Aussagen. Die wesentliche Limitation einer kleinen schweizerischen Referenzbasis für konventionelle Betonweichen wird dadurch deutlich reduziert, jedoch nicht vollständig aufgehoben.

C2 - Intern

8 Abkürzungsverzeichnis

ABW – Aussenbogenweiche

AP1 – Arbeitspaket 1

AP2 – Arbeitspaket 2

AP3 – Arbeitspaket 3

AP4 – Arbeitspaket 4

AT – Österreich

BEK – Betriebserschwerniskosten

bt/Tag – Bruttotonnen pro Tag

CHF – Schweizer Franken

cTGI – cumulative Track Geometry Index

D1 – Längshöhensignal im Wellenlängenbereich 3–25 m

Dfz – Diagnosefahrzeug

DKW – Doppelkreuzungsweiche

EM160 – Messfahrzeug EM160

EM250 – Messfahrzeug EM250

EW – Einfachweiche

HZV – Halbe Zungenvorrichtung

i – kalkulatorischer Zinssatz

IQR - Interquartilsabstand

IBW – Innenbogenweiche

KW – Kapitalwert

KWF – Kapitalwiedergewinnungsfaktor

C2 - Intern

LCC – Life Cycle Cost / Lebenszykluskosten

V_{max} – maximale bzw. maximal zulässige Geschwindigkeit

ND – Nutzungsdauer

ÖBB – Österreichische Bundesbahnen

Ref. - Referenz

R^2 – Bestimmtheitsmass

R260 – Schienenstahlgüte R260

RMS – Root Mean Square

SBB – Schweizerische Bundesbahnen

u. a. – unter anderem

Ergänzung Boxplot:

Abbildung 36 zeigt einen schematischen Boxplot mit Median, Quartilen, Whiskern und Ausreißern. Die Box umfasst den Interquartilsabstand IQR und damit die mittleren 50 % der Daten. Die Notches um den Median stellen ein approximatives 95 %-Konfidenzintervall des Medians dar und ermöglichen einen visuellen Vergleich der Medianwerte zwischen Gruppen.

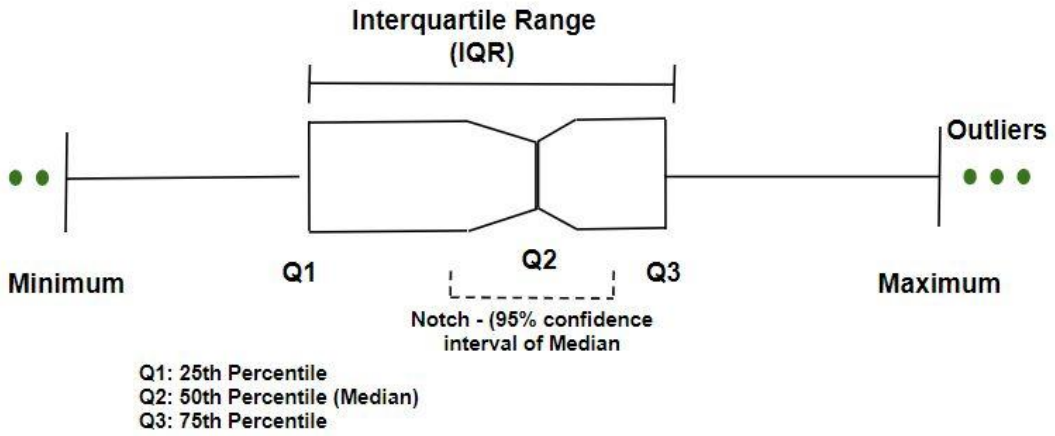


Abbildung 36: Schematische Darstellung Boxplot

C2 - Intern

C2 - Intern

WISSEN § TECHNIK § LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
www.ebw.tugraz.at