

Herausforderungen im Rad/Schiene-System

Statistische Quervergleiche und Prognose des Squat-Bildungsrisikos in den Eisenbahnnetzen der D-A-CH-Region

Josef Fuchs

Department Rail System

Forum Schiene, 16. April 2026



Über Squats

... und Studs



Schienenoberflächenfehler

- Lungenförmige Vertiefung
- Halbkreis- oder v-förmige Risse an der Oberfläche, können bis tief ins Schienenmaterial verlaufen

Graubereich

- Oft nicht zu unterscheiden im Feld
- In den Aufzeichnungen gibt es nur '**Squats**'



- Begriff 2011 eingeführt von Stuard L. Grassie ^[1]
- Andere Rissmuster (wandernd)
- Wachsen schneller
- ...

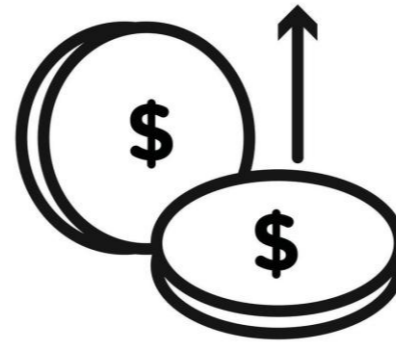
Squat-type defects

⇒ Keine Unterscheidung in der statistischen Analyse
⇒ '**Squats**' wird synonym verwendet für '**Squat-type defects**'

Squat als Risiko für aktuellen und zukünftigen Betrieb



- Tauchen plötzlich und scheinbar regellos auf
- Im Frühstadium kaum erkennbar
- Können bis zu Schienentrümmerbrüchen führen



- Verursachen hohe Kosten
- z.B.: Jährlich zweistellige Millionenbeträge bei SBB^[2]
 - Massive Auswirkungen auf Verfügbarkeit



Ursachen unklar:
“Zusammenspiel ungünstiger Parameterkombinationen im Gesamtsystem” ^{[1][2][3]}

[1] I. Nerlich, 'Netzweite statistische Analyse von Squat-Rollkontaktermüdungsfehlern unter Berücksichtigung von Kontaktgeometrie und Zusammensetzung der Traktionsmittel in einem Bahnsystem mit Mischverkehr', Technischen Universität Berlin, Berlin, 2024.

[2] R. Stock, W. Kubin, W. Daves, and K. Six, 'Advanced maintenance strategies for improved squat mitigation', Wear, vol. 436–437, p. 203034, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.203034.

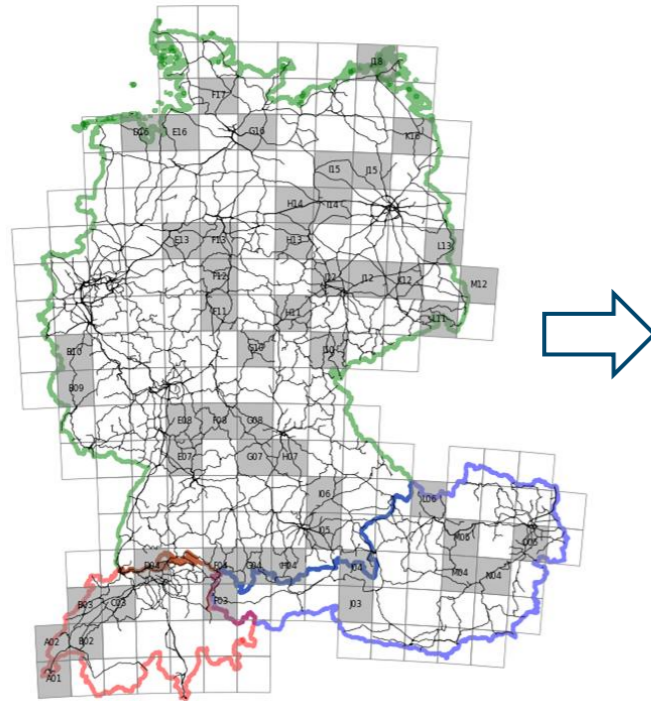
[3] M. Luther, K. Mädler, and R. Heyder, 'Prevention of Multiple Squats and Rail Maintenance Measures', presented at the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Delft, NL, Sept. 2018.

SquatY

Welche Parameterkombinationen sind entscheidend für Squat-Bildung?



Datenbasis & Stichprobe



Daten Aggregation

Messtechnik

- Schienenfehler
- Schienenprofile
- Gleislage

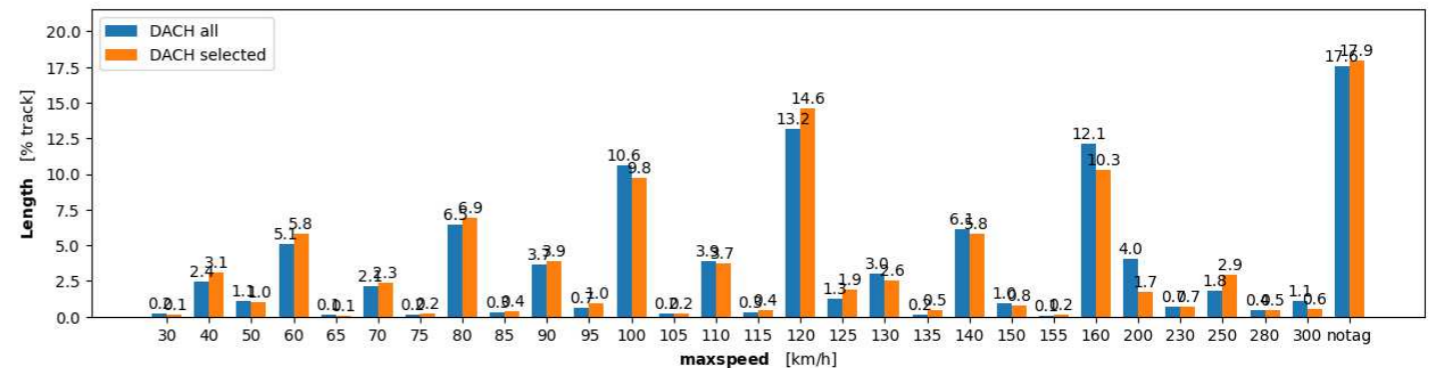
Betrieb

- Fahrpläne
- Betriebsstatistiken

Anlagenmanagement

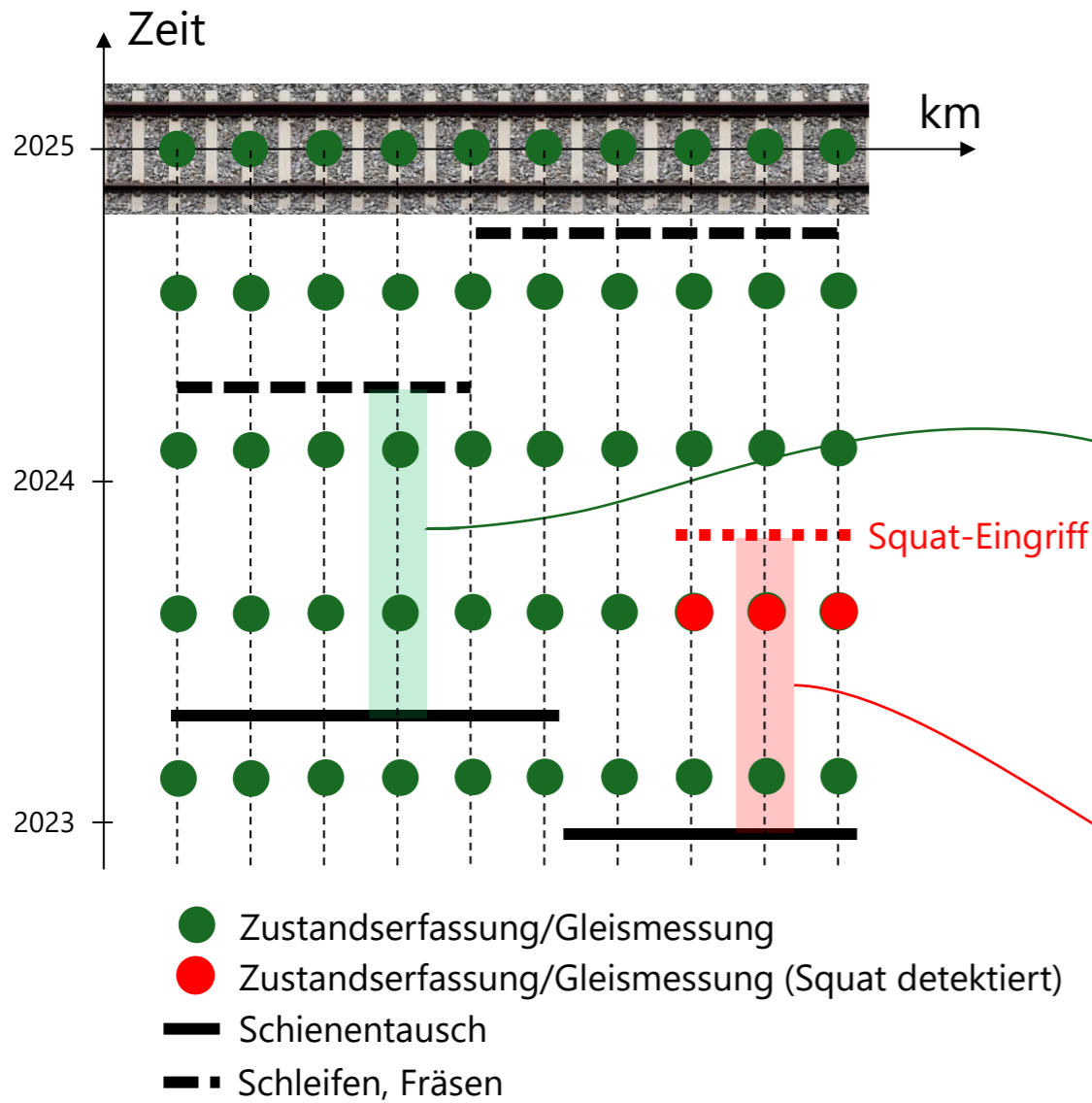
- Anlagenstammdaten
- Georeferenz-Daten
- Instandhaltungshistorie

- **DACH-Raum in 50 km x 50 km Kästchen gerastert**
- **Zufällig Kästchen gezogen**
 - Ohne Wissen über Squat-Vorkommen
 - Stichprobe bildet die gesamte Vielfalt der Netze ab z.B. Geschwindigkeitsverteilung:



Breite und fundierte Datenbasis für Analyse von Squats und Komponentenzuständen vorhanden!

Vereinheitlichte Datenbasis (Positionspunkte)



Positionspunkt-Konzept (©SBB^[2])

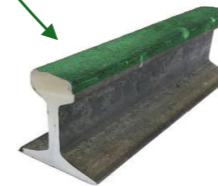
- Alle Daten aus unterschiedlichsten Quellen werden auf GPS-Punkte gemappt (1 Punkt pro Meter Gleis)
- In der Zeit zurück verfolgbar, übertragbar auf alle Eisenbahnsysteme
- Übertragbar auf andere Fragestellungen

Lebenszyklen der Schienenkopfoberfläche

- Schienenkopfoberfläche wird als Individuum mit Lebensdauer modelliert (akkumulierte Tonnage in MGT)
- Von einem Schienenprofil-Reset-Event (Schienentausch, Schleifen, Fräsen) zum nächsten

Gesunder Lebenszyklus

Squat-befallener Lebenszyklus



Statistische Modellierung – Cox' lifetime model

Squat-Risiko eines Lebenszyklus

$$h(\tau, \mathbf{x}) = h_B(\tau) \cdot \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{x})$$

Wird z.B. in der Medizin zur Modellierung von Erkrankungsrisiken verwendet

Altersabhängiger Teil des Risikos

Die **Baseline Hazard** h_B ist eine Funktion der **akkumulierten Tonnage** τ und wird von allen aufgezeichneten Squat-Vorfällen abgeleitet.

Die **Kumulative Baseline Hazard** $H_B(\tau) = \int_0^\tau h_B(\bar{\tau}) d\bar{\tau}$ wird auf der nächsten Folie benötigt.

Skaliert mit individuellen Faktoren

Abgebildet mit dem **Systemcharakteristik-Vektor** \mathbf{x} (beinhaltet Eigenschaften wie lokale Krümmung, Stahlgüte, ...) und den **Koeffizienten** $\boldsymbol{\beta}$, die via Model-Training gefittet werden (siehe auch^[4]).

⇒ Was beeinflusst das Squat-Risiko?

- Kombination mehrerer Faktoren
- Die signifikantesten Treiber sind:
 - ✳ Geringer Güterverkehrsanteil
 - ✳ Geringe tägliche Tonnage
 - ✳ Gerades Gleis
 - ✳ R350HT > R260

[4] N. Haselgruber and I. Nerlich, 'Statistical Models for Health Monitoring of Rare Events in Railway Tracks', in Methodological and Applied Statistics and Demography 2025, pp. 117–122. doi: 10.1007/978-3-031-64346-0_20.

Statistische Modellierung – Squat-Prädiktion

Squat-Wahrscheinlichkeit pro Meter Gleis,
nach Tonnage τ

$$F(\tau, \mathbf{x}) = 1 - \exp(-H_B(\tau) \cdot \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{x}))$$

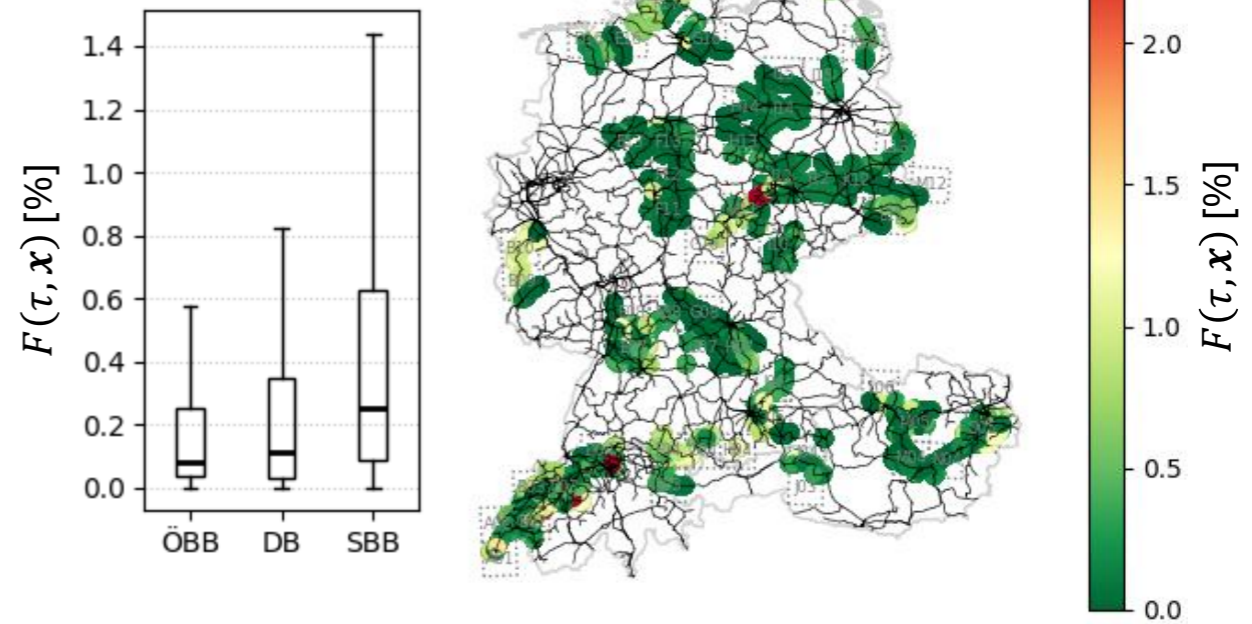
5 weitreichend verfügbare
Inputs als **Systemcharakteristik** \mathbf{x}

Güterverkehrsanteil	[1]
Tägliche Tonnage	[t]
\mathbf{x} Absolute Steigung	[‰]
Bogenradius > 5km	[1]
Stahlgüte R350HT	[1]

⇒ Was ist bei ÖBB anders?

- Signifikant geringere Squat-Wahrscheinlichkeiten
- Günstigere Bedingungen in mehreren Dimensionen

Squat-Wahrscheinlichkeit pro Meter nach 2 Jahren ohne Profil-Reset



Wahrscheinlichkeit für einen Squat in einem 100m-Abschnitt:

$F_{100} = 1 - (1 - F)^{100}$
 ÖBB-Median ($F=0.0008$) \approx **7%**
 DB-Median ($F=0.0012$) \approx **11%**
 SBB-Median ($F=0.0025$) \approx **22%**

Werkzeug für das Risikomanagement

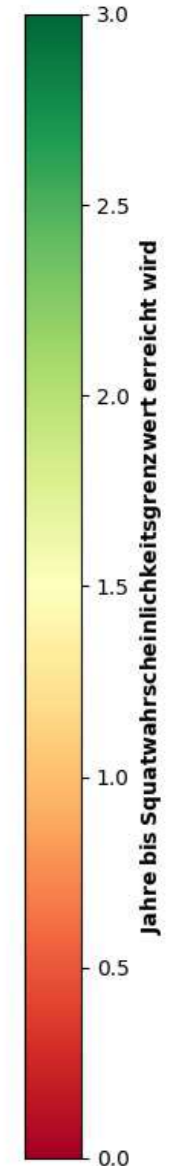
Grenzwert für Squatwahrscheinlichkeit F100 [%]



Güterverkehrsanteil



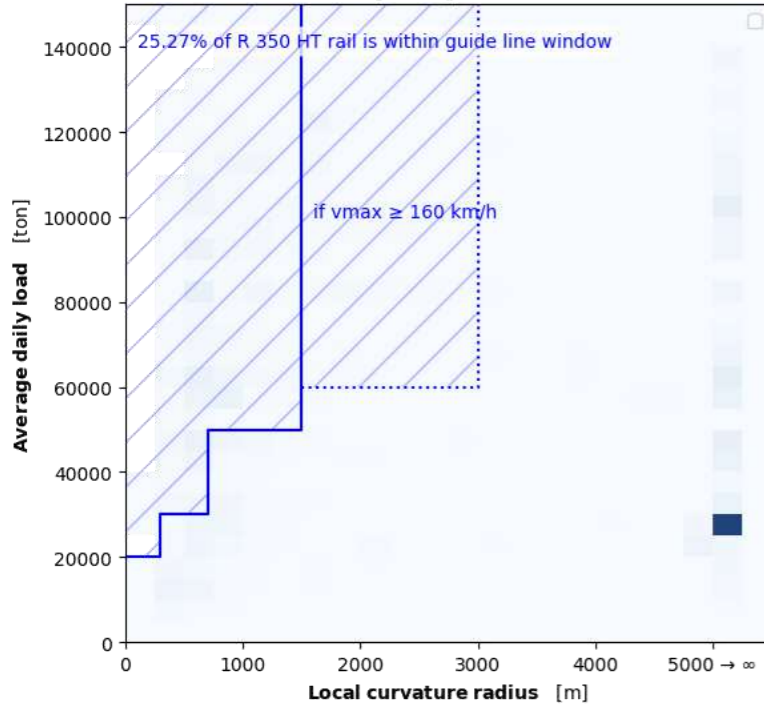
Tägliche Tonnage [t]



Wissenschaftliche Evidenz statt Erfahrungsberichte

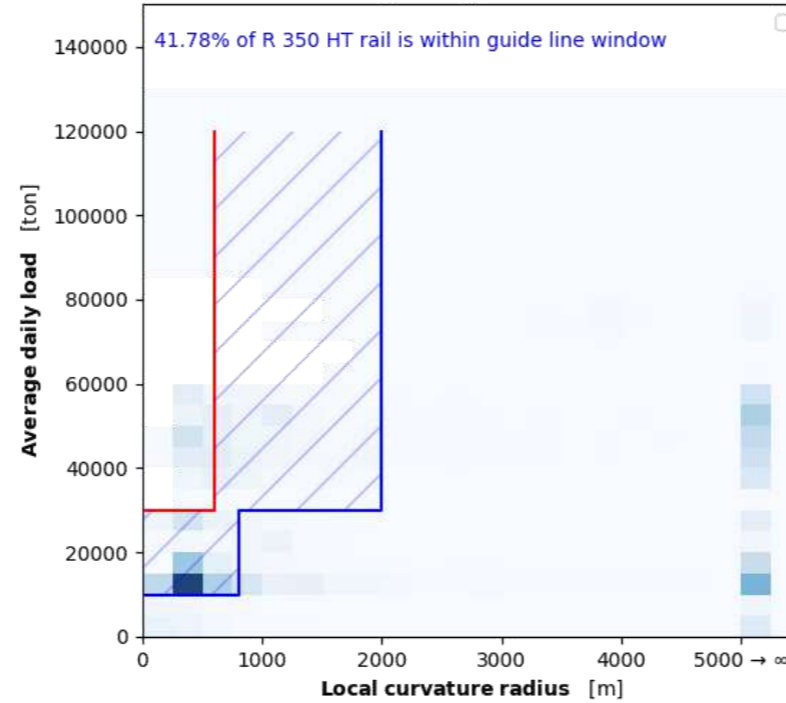
DB

steel grade guideline DB



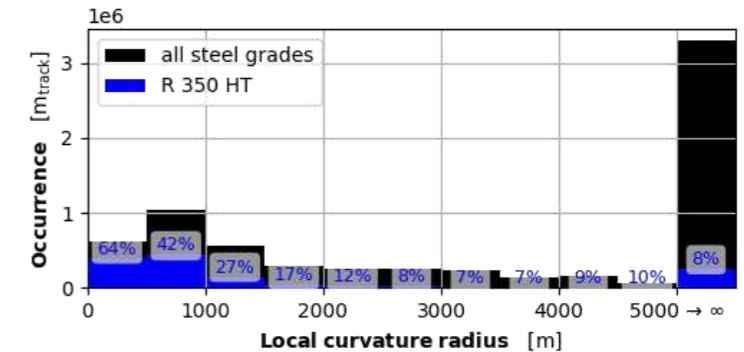
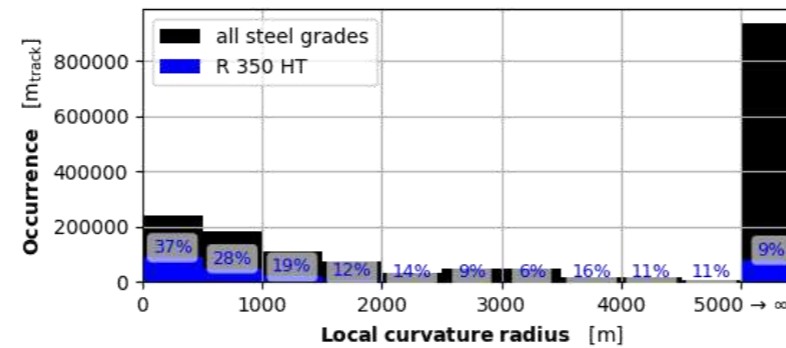
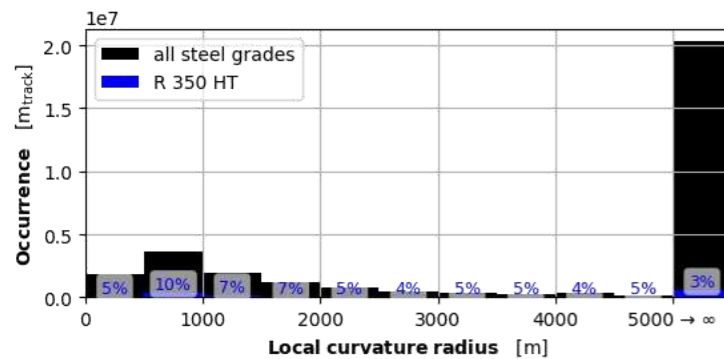
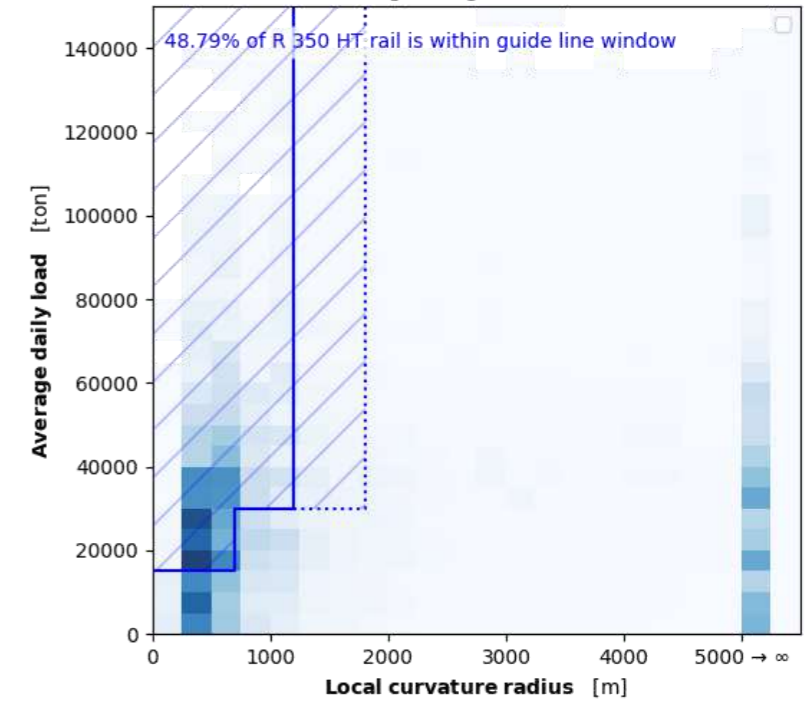
ÖBB

steel grade guideline ÖBB



SBB

steel grade guideline SBB



⇒ R350HT-Schienen kommen (aus Prozessgründen) auch in Geraden vor

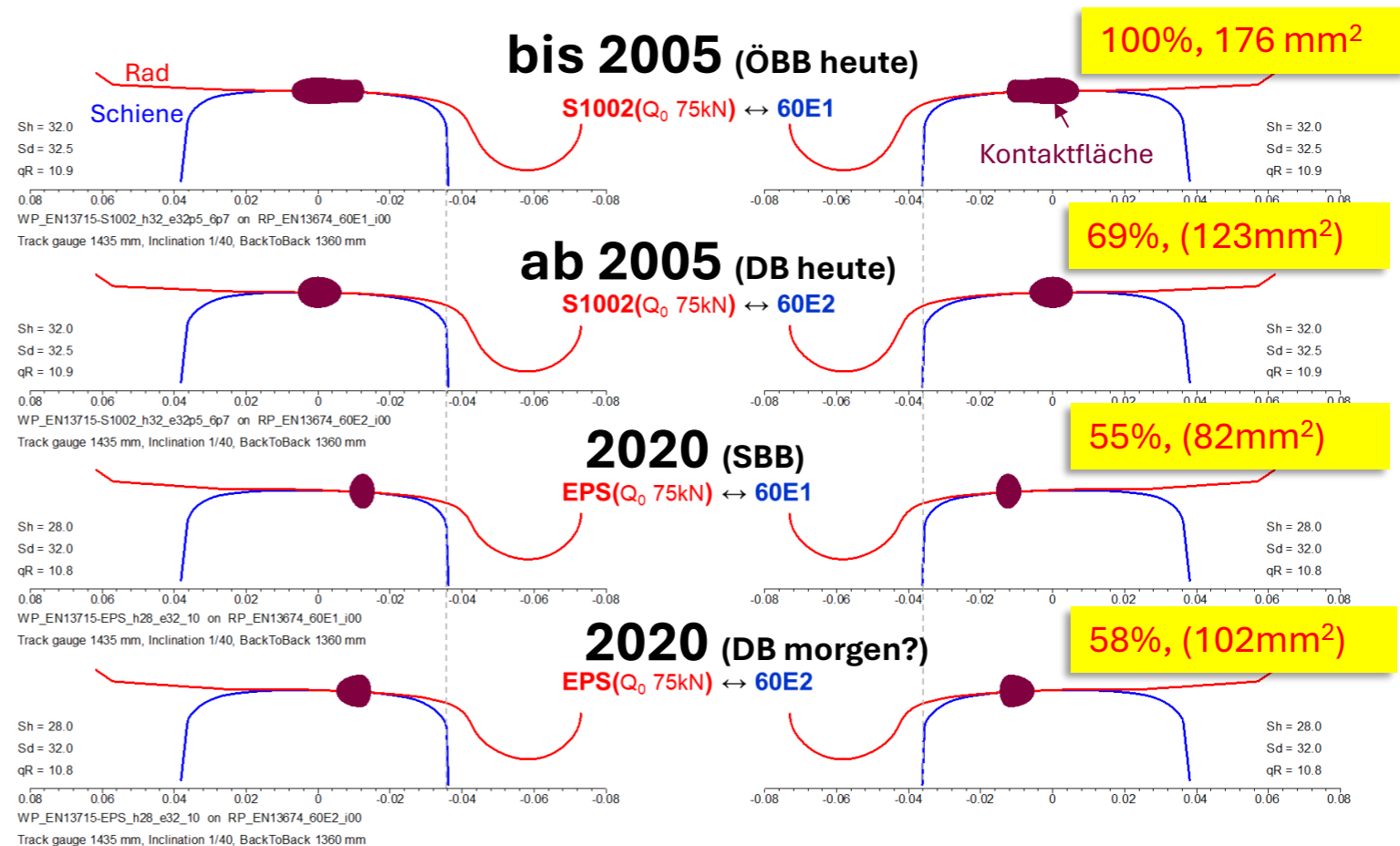
Entwicklungen in der Rad/Schiene-Interaktion

- Rad-Seite ist zur Änderung gezwungen, Schienen sind durch Schleifen beweisbar steiler «Toblerone»
- LowBodyMotion Problem: Steile Schienen = 0 Konizität! Konizitätsgewinn? → steilere Räder (EPS)

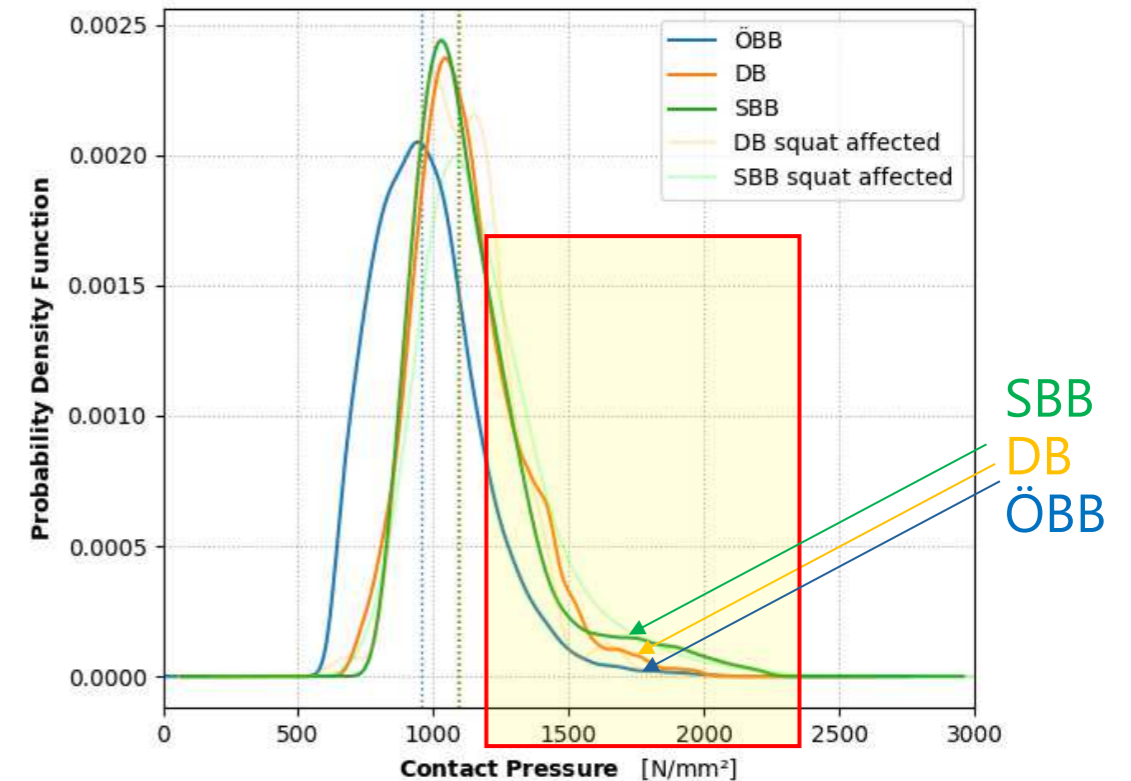
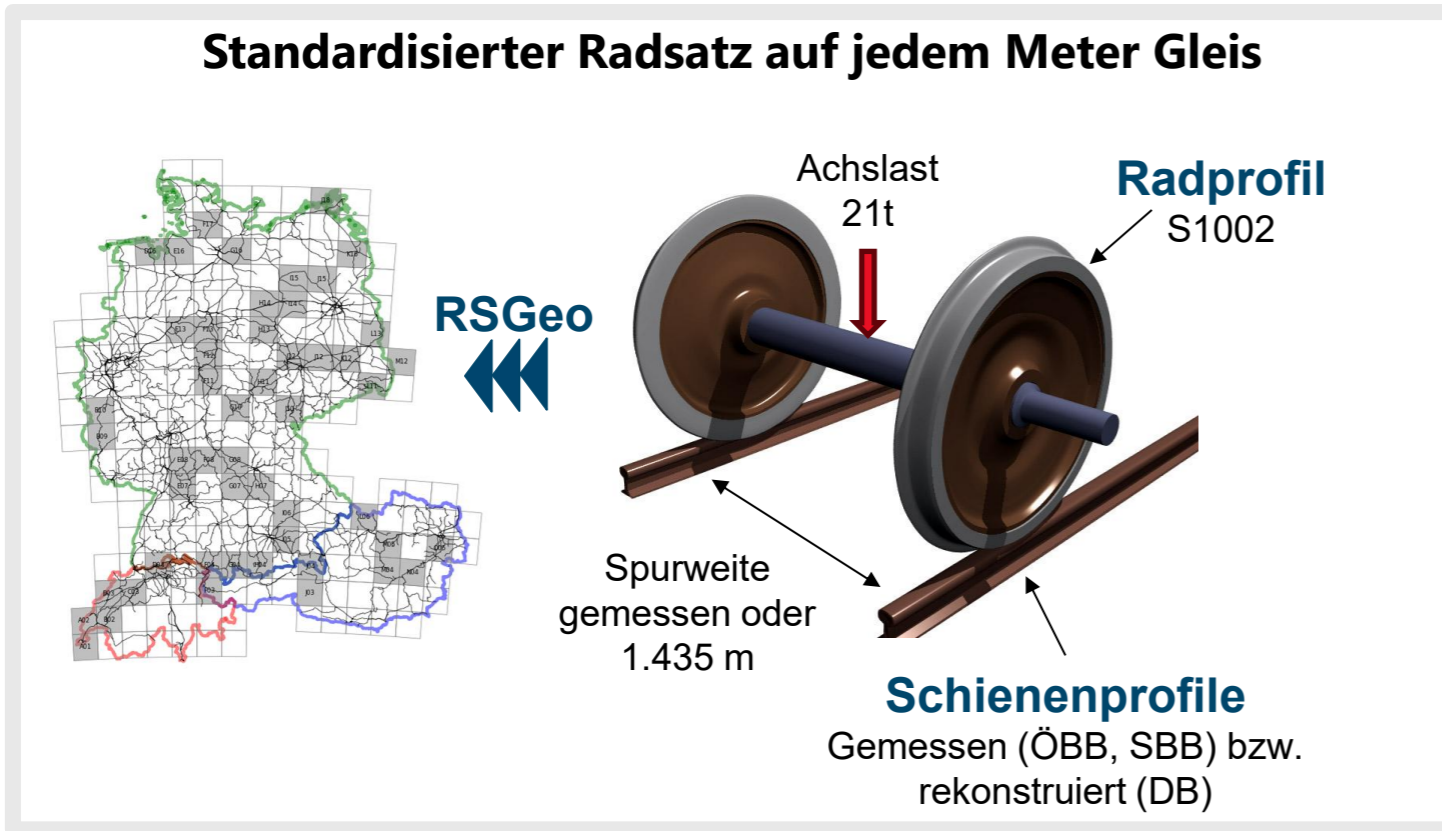
Engineering? In 1½ Dekaden die Beanspruchung fast verdoppelt

Frankfurter Allgemeine
Seekrank im Obergeschoss

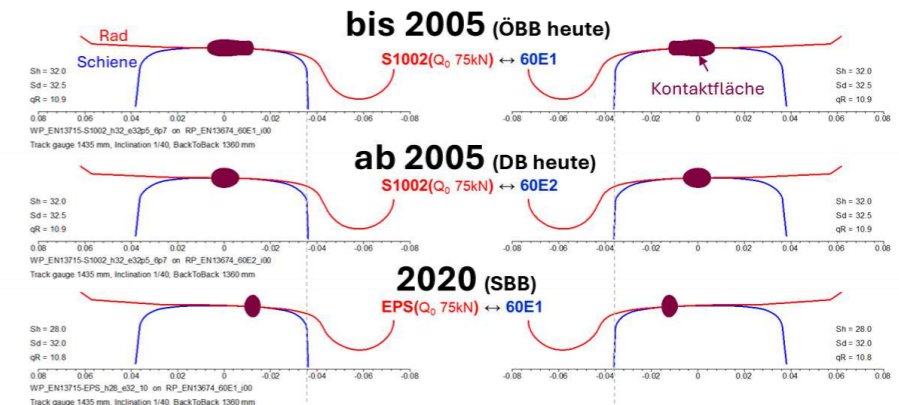
VON PETER THOMAS - AKTUALISIERT AM 01.06.2016 - 16:37



Tendenzen im Netz beobachtbar (nur Schiene)



- Squats treten in Bereichen mit Ausnahme-Geometrien auf
- Tendenziell hat SBB die höchsten Kontaktspannungsausreisser
- DB, SBB liegen im Mittel der Kontaktspannungen über der ÖBB (die Schienen müssen steiler sein → 60E1 vs. 60E2)
- Verschärfend kommen bei SBB neue andere Rad-Profile zum Einsatz



Zusammenfassung

- **Positionspunkt-Konzept ermöglicht einen internationalen Vergleich von Eisenbahnsystemen**
- **Die signifikantesten Treiber für Squat-Risiko sind:**
 - ✦ Geringer Güterverkehrsanteil
 - ✦ Geringe tägliche Tonnage
 - ✦ Gerades Gleis
 - ✦ R350HT > R260
- **Squat-Risiko kann mit einfacher Formel abgeschätzt werden**
 - Basierend auf 5 weitreichend verfügbaren Input-Parametern



Thank You For Your Attention

Diese Arbeit entstand an der Virtual Vehicle Research GmbH in Graz, Österreich. Die AutorInnen bedanken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 Competence Centers for Excellent Technologies durch das Österreichische Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI), das Österreichische Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus (BMWET), das Land Steiermark (Abt. 12) sowie die Steirische Wirtschaftsförderung (SFG). Das Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) abgewickelt. Ebenfalls danken sie den unterstützenden Industriepartnern SBB, ÖBB, DB, Siemens Mobility, Alstom, voestAlpine und Plasser & Theurer

In Kooperation mit:



JOSEF FUCHS

Virtual Vehicle Research

 : +43 664 88371330

 : josef.fuchs@v2c2.at

VIELEN DANK DEM PROJEKTTEAM:

Matthias Moser | matthias.moser@v2c2.at

Bernd Luber | bernd.luber@v2c2.at

Anna Pichler | anna.pichler@v2c2.at