Technische Universität Graz
**Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft**

# LifeCycleCosting
und
# LifeCycleManagement
## Eisenbahninfrastruktur

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit

# Verhalten

Dynamische Systeme → e-Funktion

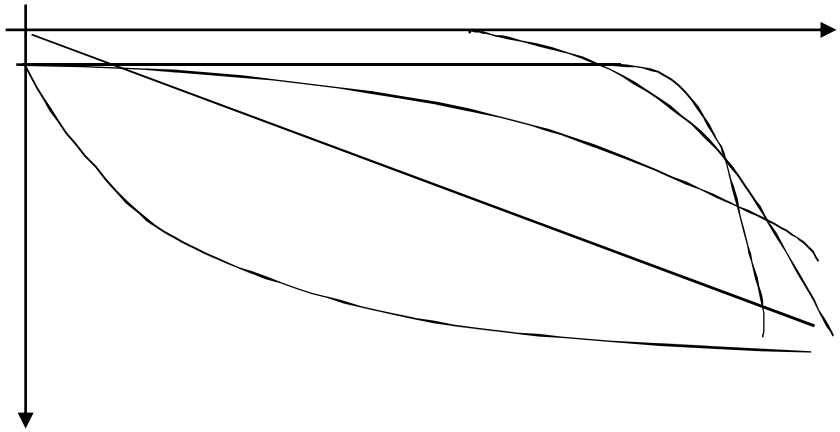
Grundsetzungen → log-Funktion

Abreibender Verschleiß → ~ linear

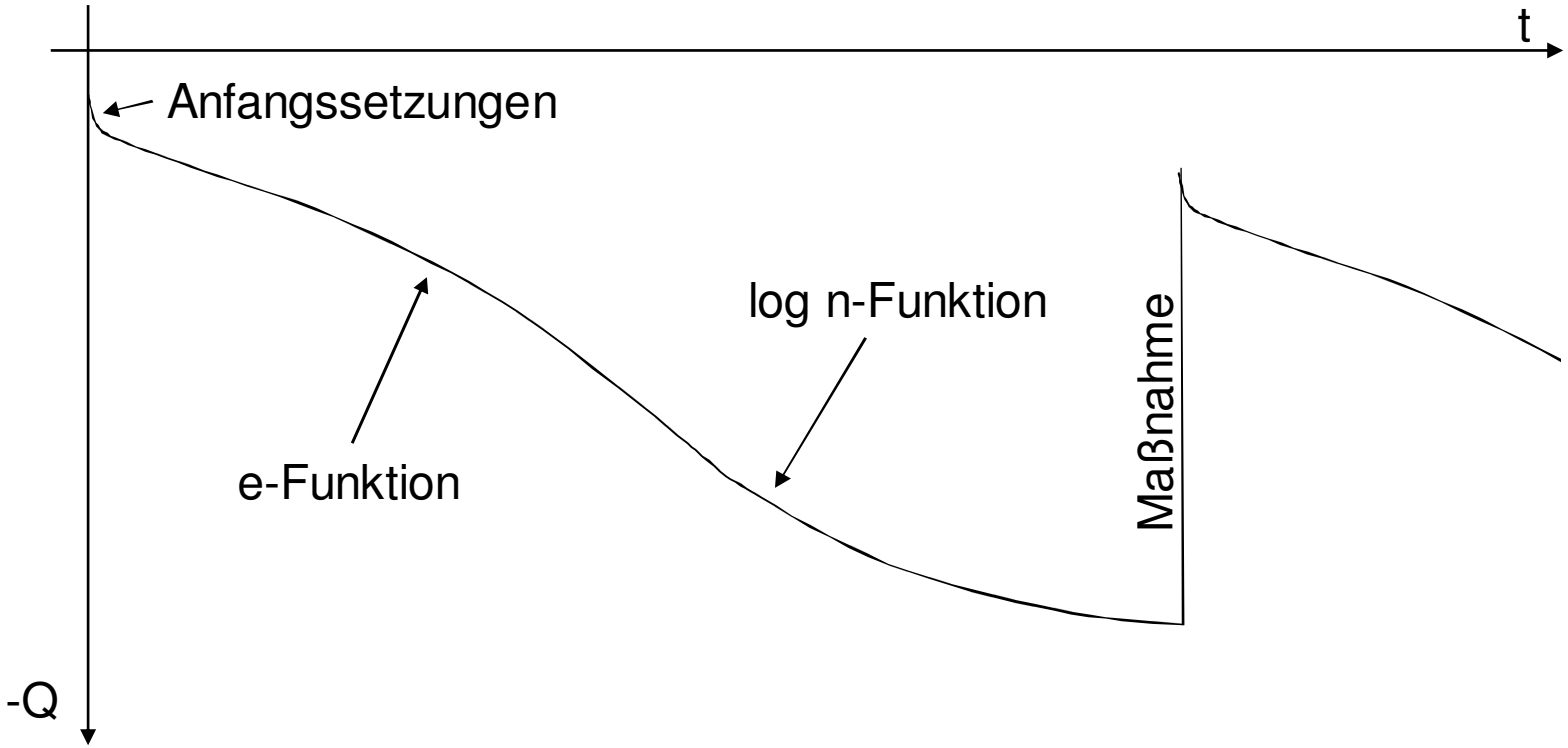
Dauerfestigkeit → überlinear, ab gewisser kumulierter Belastung

nicht verschleißabhängig → stochastisch

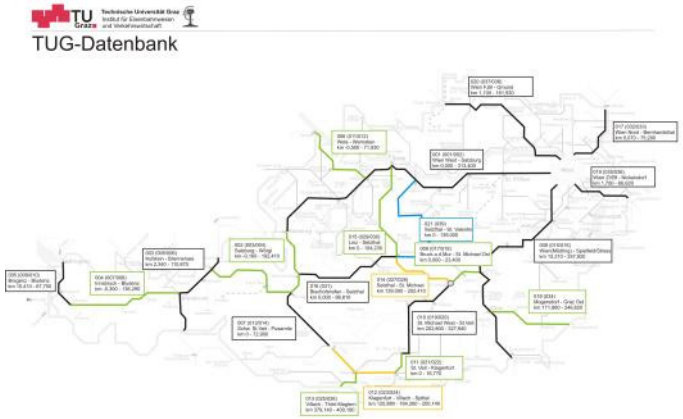
… und alles das nicht beliebig wiederholbar!



# Verhalten

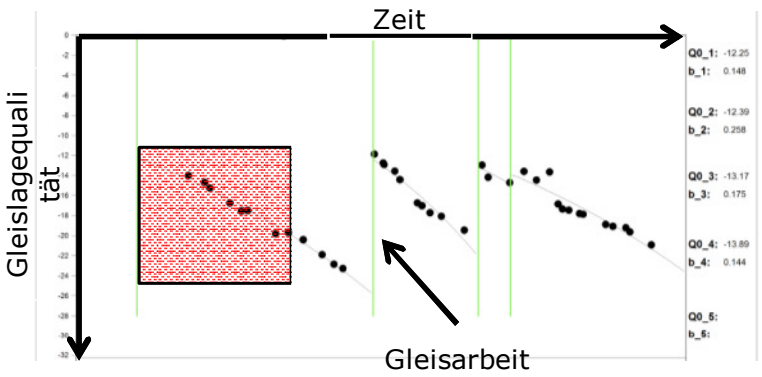


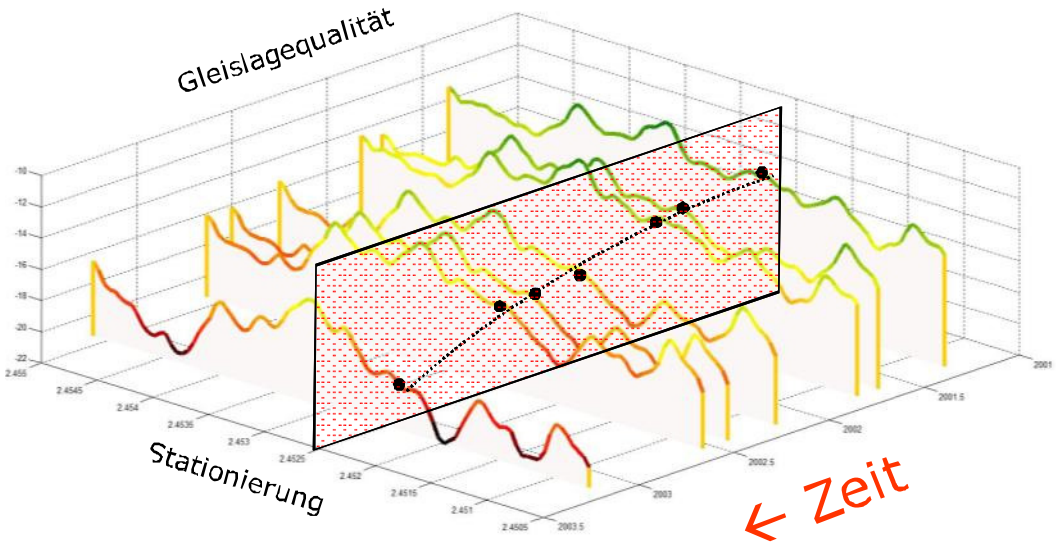
# Deterministische Modelle brauchen Daten




- Messwagendaten seit 2000
- ~ 4.000 km durchgehendes Hauptgleis (Kernnetz) der ÖBB

Qualitätsverlauf (Trendanalysen) aus nicht linearer Regression der Messwerte




$$Q(t) = Q_n \times e^{b_n t}$$

# Datenanalyse

Ein gutes Gleis verhält sich gut,
ein schlechtes verfällt schneller.

Lebenszykluskosten

Verschlechterungsrate hängt vom aktuellen Qualitätslevel ab

Qualitätsverhalten

$$Q_{(t)} = Q_0 \times e^{bt}$$

Investition + Instandhaltung + Betriebserschwernis-kosten = LCC

# Datenanalyse

$$Q(t) = Q_0 \times e^{bt}$$

Investition + Instandsetzung

Aus LCC-Sicht bekommen Investition, Instandsetzung und Nutzungsdauer neue Definitionen:

Investitionen stellt eine Anfangsqualität zur Verfügung.

Instandsetzung transformiert die Anfangsqualität in Nutzungsdauer.

**→ Unzureichende Instandsetzung entwertet die Investition!**

# Datenanalyse

theoretisch mehr als 18.000 Standardkilometer

300 realistische Kombinationen

~ 50 Kombinationen beschreiben das ÖBB-Netz

# Werkzeuge

## Standardelemente für generelle Strategien

Charakteristik des Standardkilometers

Investition

Nutzungsdauer

| guter Unterbau | 400<R<600 | zweigleisig |
|---|---|---|
| GBT/Tag und Gleis | Schienenprofil | Stahlgüte |
| 80.000 | 60E1 | R260 |

| Nutzungsdauer | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Neulage | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Durcharbeitung | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | |
| Kleinteilewechsel | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| Schleifen | | | | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | 1 | | | | 1 | | |
| Schienenwechsel | | | | | | | | | | | | 0,3 | | | | | | | | | | | |
| Stoßpflege | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zwischenlagenwechsel | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mangelbehebung | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

geplante Instandhaltung

ungeplante Instandhaltung

Daten aus Zeitreihen (Datenbank) *und* Erfahrung

Berechnung aller Gleisarbeiten inklusive der verursachten Betriebserschwerniskosten → Lebenszykluskosten

# Kostentreiber

1. Ausgangsqualität

   Voraussetzung: Unterbauqualität und funktionsfähige Entwässerung

   1:9

2. Weichendichte

   1 EW500 ~ 450 m Gleis

3. Radius

   1:3

4. Betriebserschwerniskosten

   bis zu 30%

*Falls Unterbau und/oder Entwässerung in ihren Qualitäten nicht entsprechen ist eine Optimierung des Oberbaus nicht möglich.*

5. Verkehrsdichte

   unterlinear

6. Bauabschnittslänge - Sperrpause

   + 20%

7. Qualität der Fahrzeuge

   ± 10%

# Umsetzung von Nachhaltigkeit

Benjamin Franklin

Nachhaltigkeit ist offenbar ein nachhaltiges Problem.

# Umsetzung von Nachhaltigkeit

Art der Fragestellung

netzweit Basisstrategien für Investition und Instandhaltung

Optimierung für definierte Projekte

Standardelemente LCC

Annuitätenmonitoring LCM

Art der Basisdaten

# Strategie Schiene

| Verkehrsbelastung [GBt/Tag,Gleis] | R>3000 | 1000<R<3000 | 600 <R<1000 | 600 <R<400 | 400 <R<250 | R<250 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| zweigleisig, > 70.000 | 60E1 260, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, H |
| zweigleisig, 45.000 - 70.000 | 60E1 260, B | 60E1 350HT, B<br>60E1, 260, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, H |
| zweigleisig, 30.000 - 45.000 | 60E1 260, B | 60E1, 350HT, B<br>60E1 260, B | 60E1 350HT, B<br>60E1 260, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, B | 60E1 350HT, H |
| zweigleisig, 15.000 - 30.000 | 60E1 260, B | 60E1 260, B | 60E1 260, B | 60E1 350HT, B<br>60E1 260, B | 60E1 350HT, B | 54E2 350HT, H |

# Umsetzung von Nachhaltigkeit

Art der Fragestellung

netzweit Basisstrategien für Investition und Instandhaltung

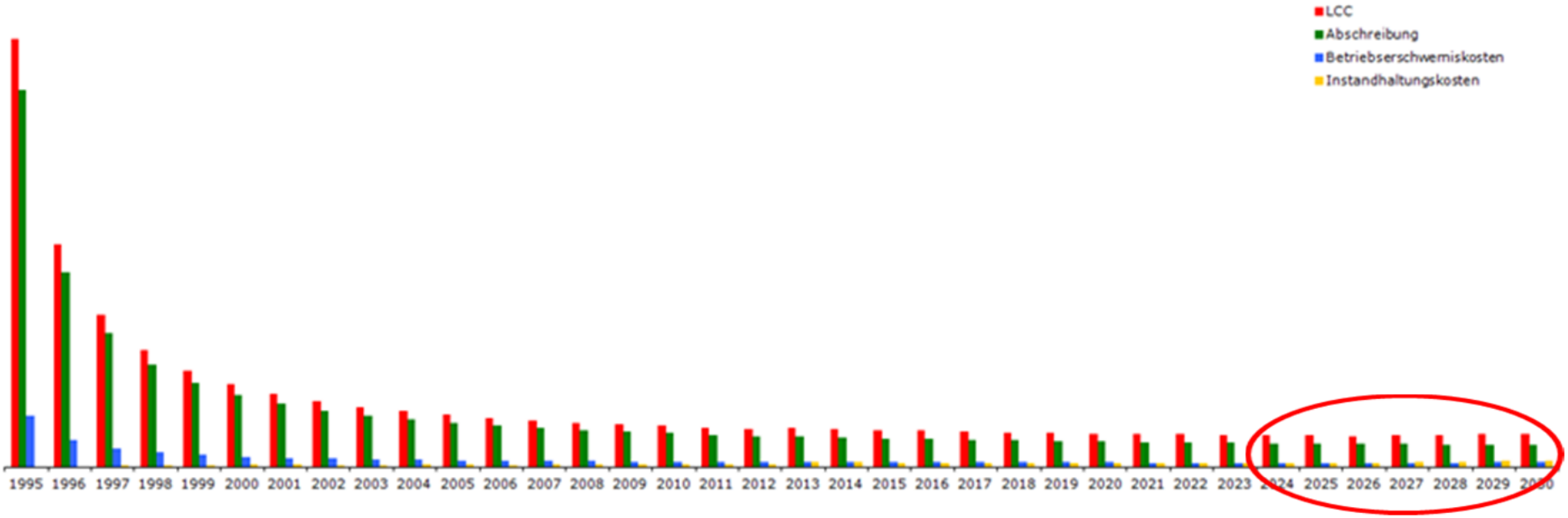
Optimierung für definierte Projekte

Standardelemente LCC

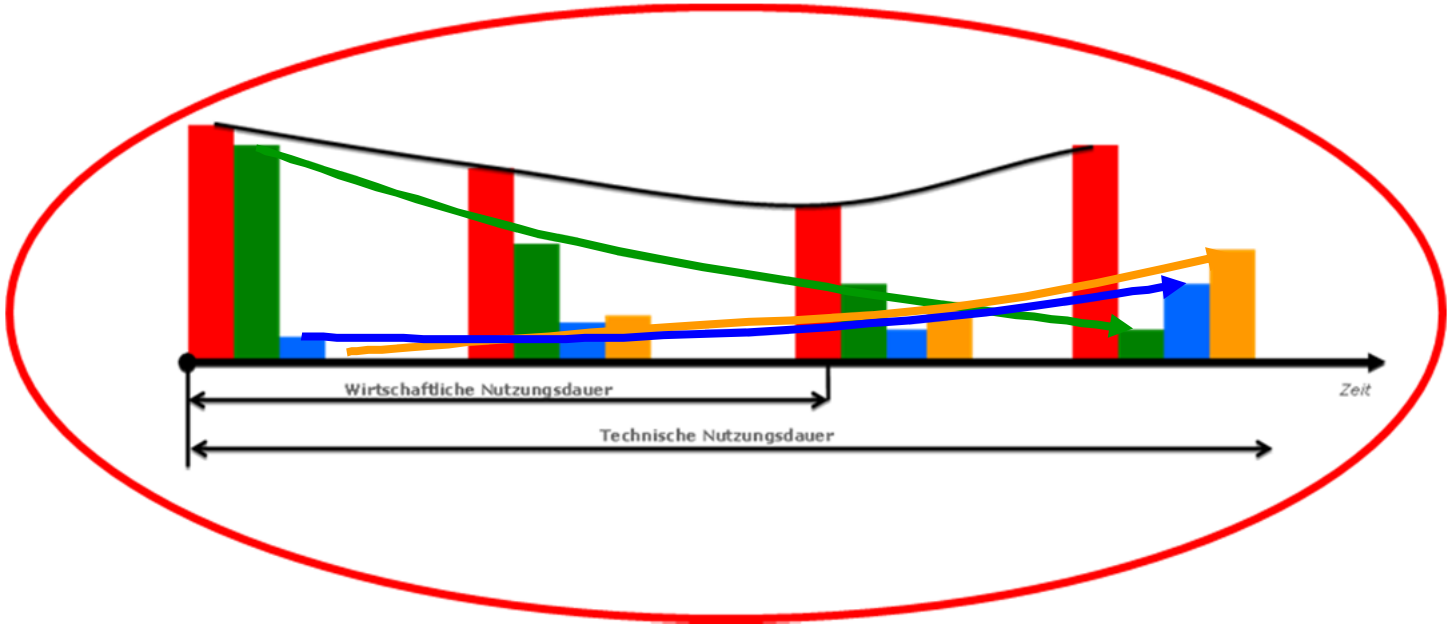
Annuitätenmonitoring LCM

Art der Basisdaten

# Bestimmung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer



# Bestimmung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer



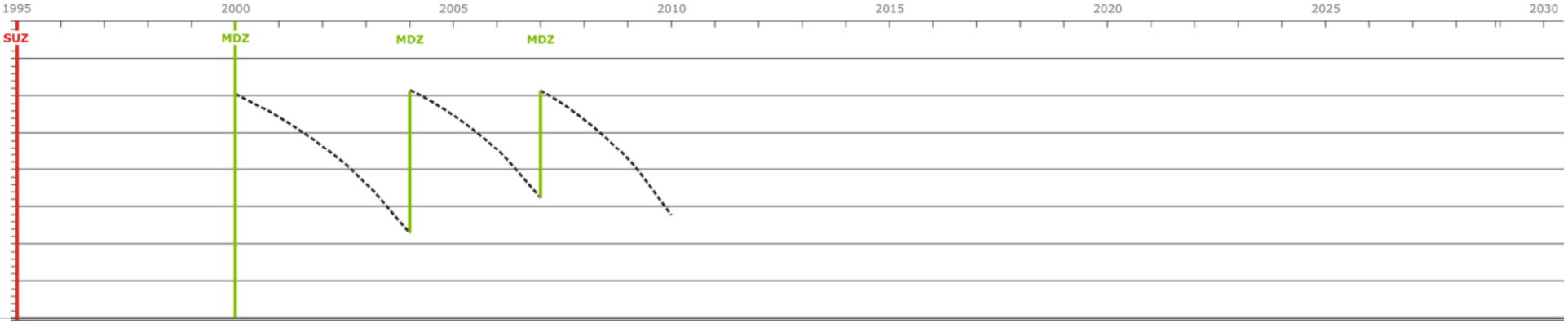

$$\frac{dAbschreibung}{dt} = \frac{dInstandhaltungszuwachs}{dt}$$

Wenn der Anstieg der Betriebs- und Instandhaltungskosten die Reduktion der Abschreibung übersteigt ist es wirtschaftlich, die Anlage zu ersetzen.

# Prognose Beispiel Stopfen

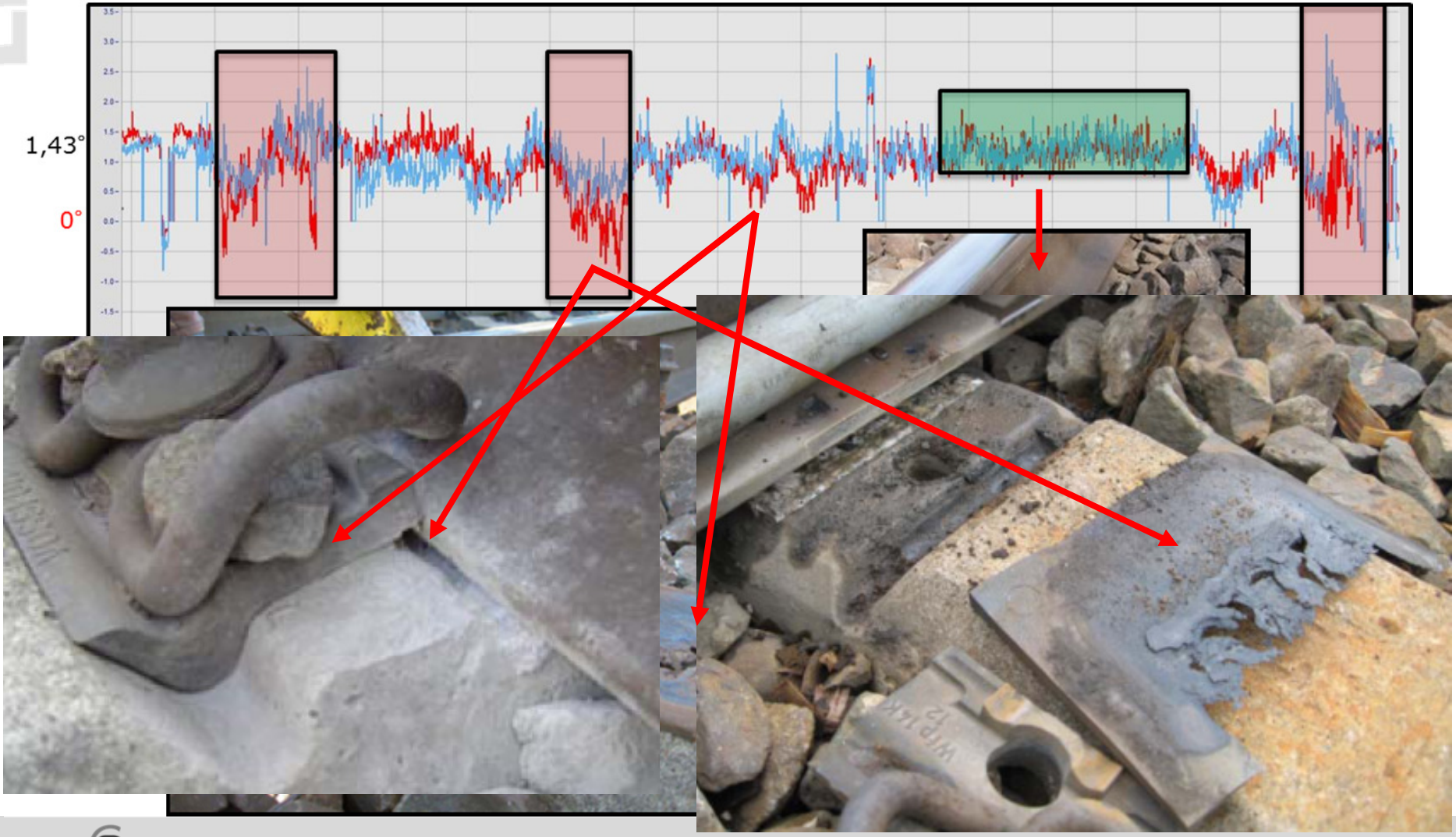
| "Südbahn" | 400<R<600 | zweigleisig | | |
|---|---|---|---|---|
| GesBT/Tag, Gleis | Profil | Güte | Unterbau | Schwelle |
| 42.189 | 60E1 | 260 | gut | Beton |

| Instandhaltungsarbeit | ND in Jahren | | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Re-Investition (SUZ/AHM) | | 1,0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stopfen | alle x Jahre | 10,0 | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |

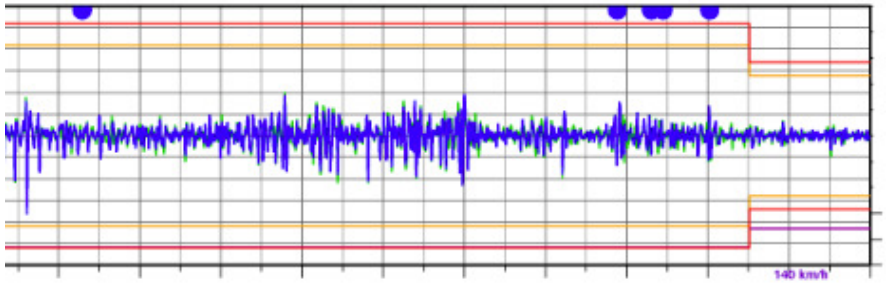


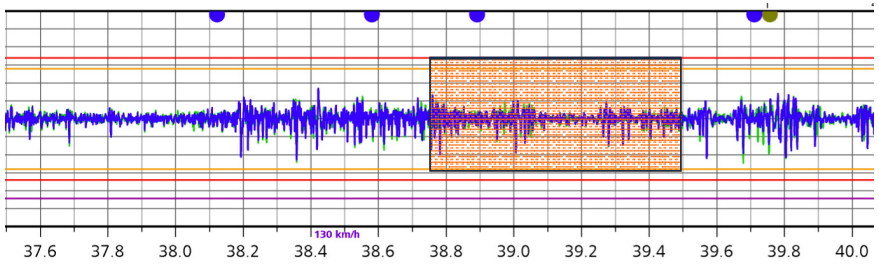

Gleisforschung: Analyse der Verschlechterungsraten unter verschiedenen Randbedingungen

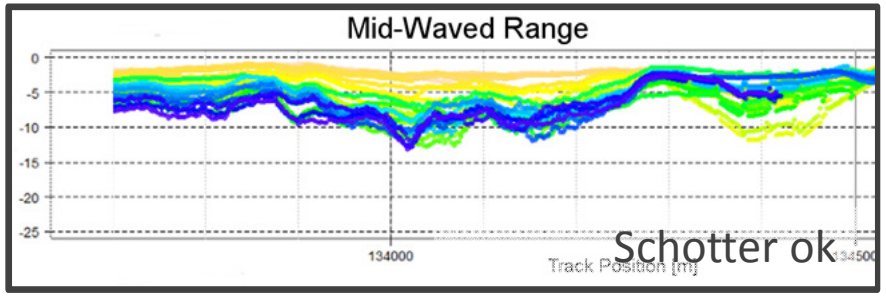
# Prognose Beispiel Zwischenlagen

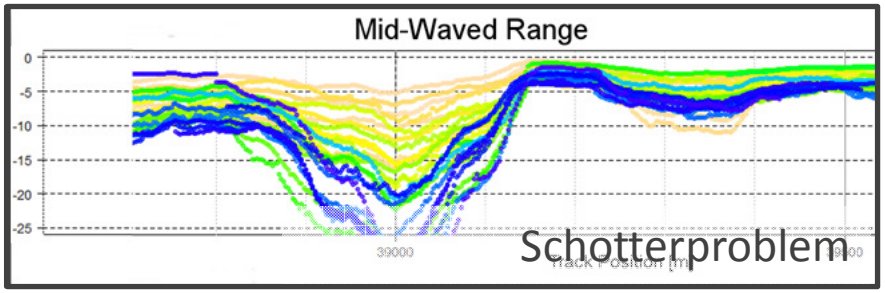


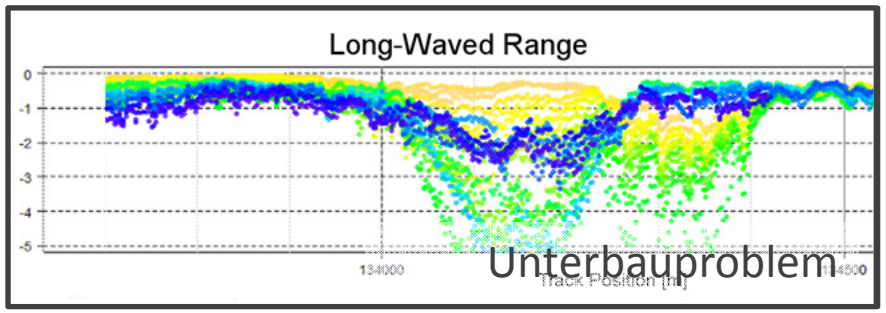
# Prognose Beispiel Schotter, Unterbau

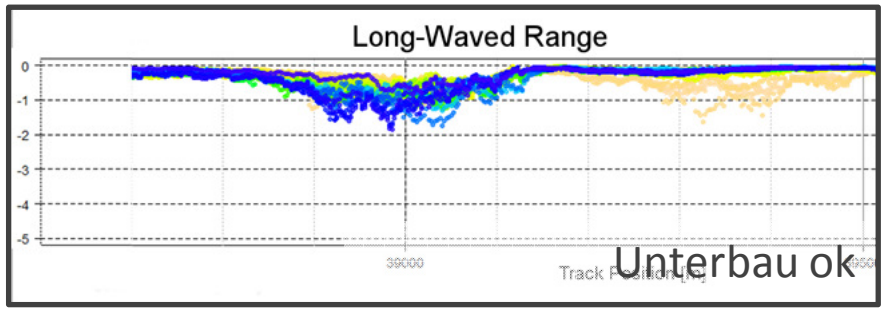


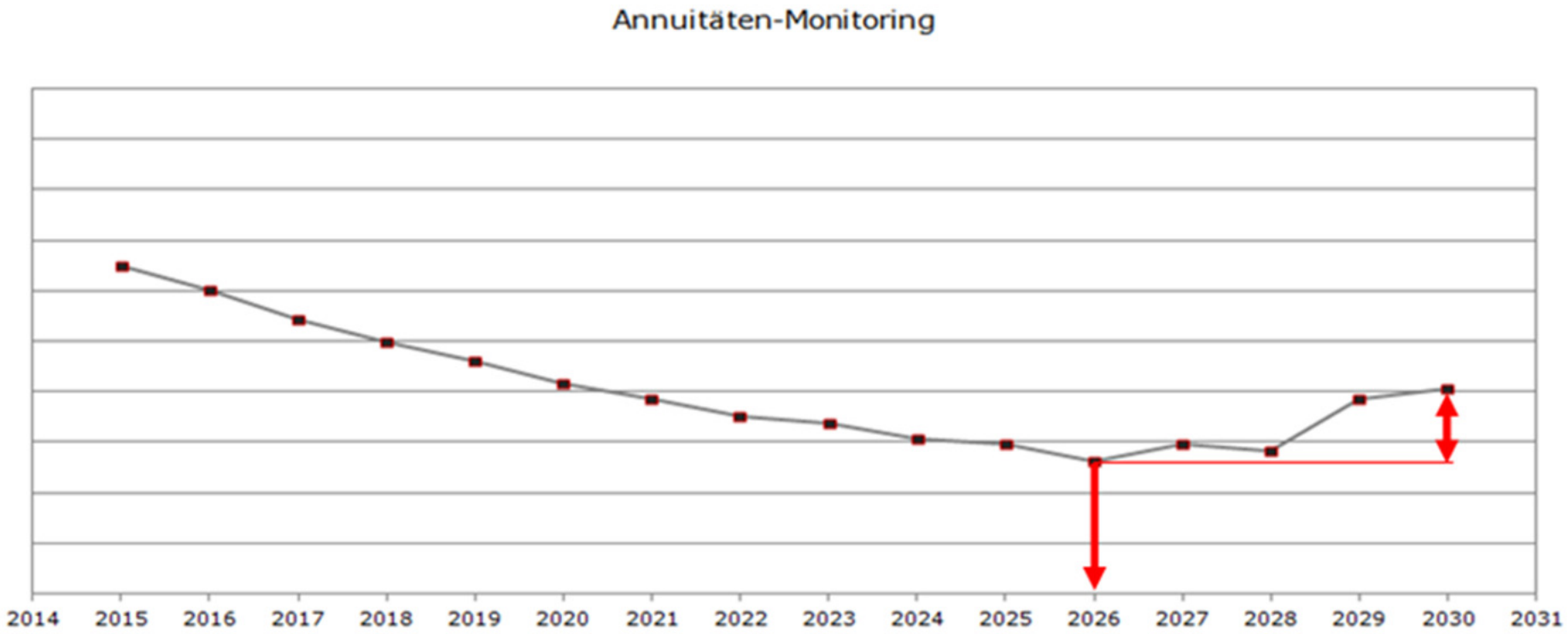



# Wirtschaftliche Nutzungsdauer



# Fahrstromanlagen

Vergleich von Investitionsmethoden

Vergleich Kettenwerk – Stromschiene im Tunnel (Neubau oder Bestandstunnel elektrifiziert)

# Vergleich Investitionsmethoden

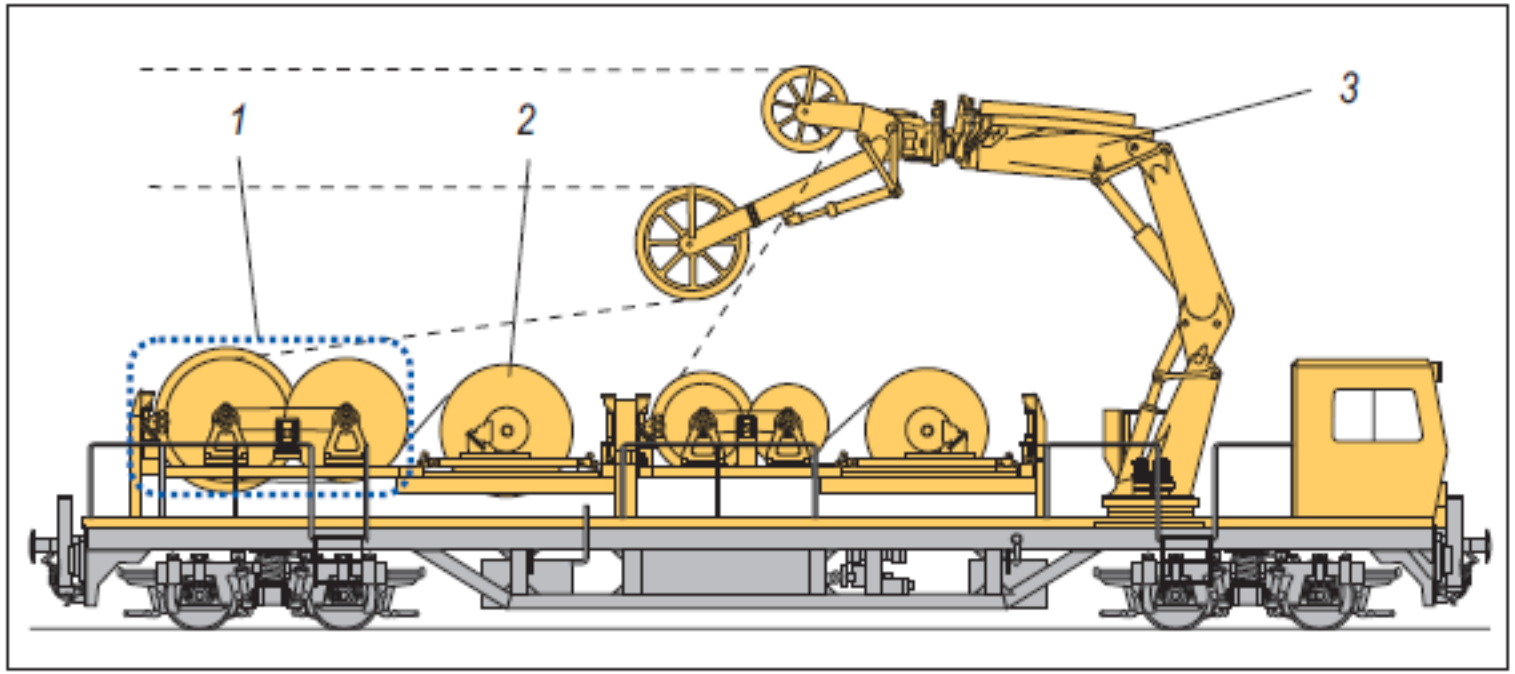
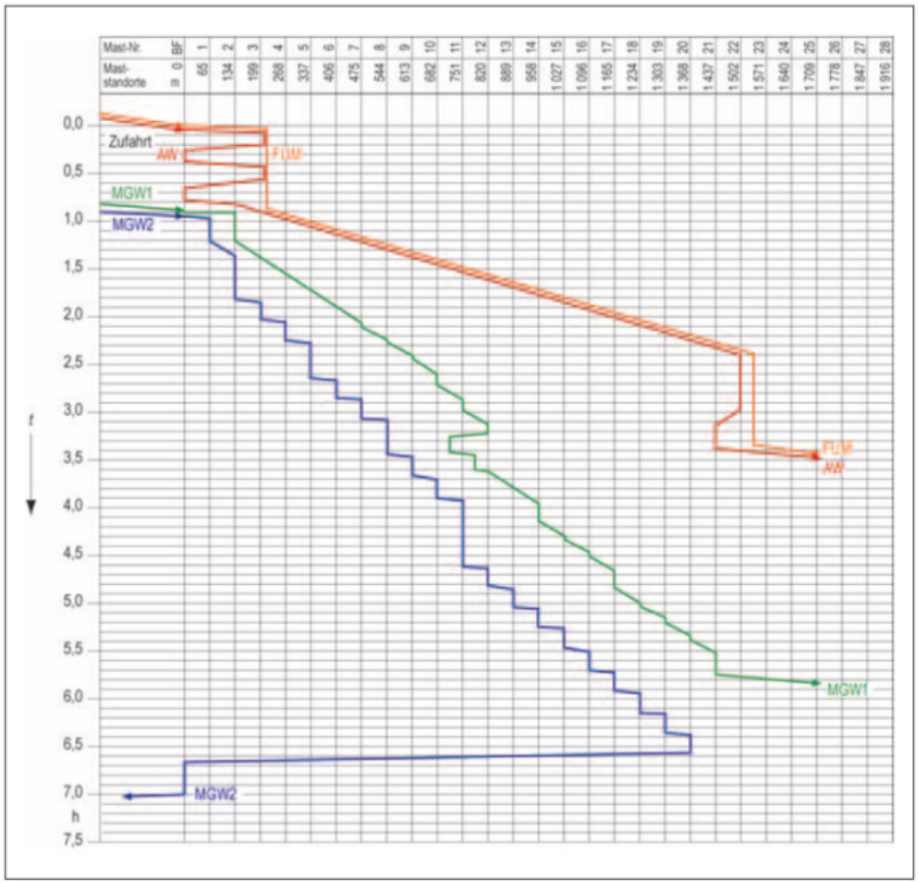



**Bild 2:** Prinzipbild der Oberleitungsumbau- und -neubaumaschine mit hydraulischem Verlegekran.

*1* Friktionswinde
*2* Speichertrommel
*3* Verlegekran mit Umlenkrollen

# Investition




| | |
|---|---|
| FUM | Auflegen von Tragseil und Fahrdraht |
| AW | Positionieren von Tragseil und Fahrdraht an den Stützpunkten, Radspannwerk streckenseitig einbinden, teilweise Stromverbinder montieren |
| MGW 1 | Ausleger einrichten; Montieren Hänger, Festpunktseil, Festpunktanker, Stromverbinder teilweise |
| MGW 2 | Einbau der Y-Beiseile; Montieren Einspeisung, Stromverbinder teilweise; Radspannwerk bahnhofseitig einbinden |

# Investition

Der Umbau mit Fahrleitungsumbaumaschine ergibt eine geringere Annuitäten als der Umbau mit Seilwinde.

| Bauablauf | Züge/Tag,Gleis \| STA/Tag,Gleis | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200 \| 300 | 150 \| 225 | 100 \| 150 | 50 \| 75 |
| **Seilwinde** | € 23.972 | € 21.007 | € 17.684 | € 14.492 |
| **Fahrleitungsum-baumaschine (FUMA)** | € 22.935 | € 20.065 | € 16.843 | € 13.762 |

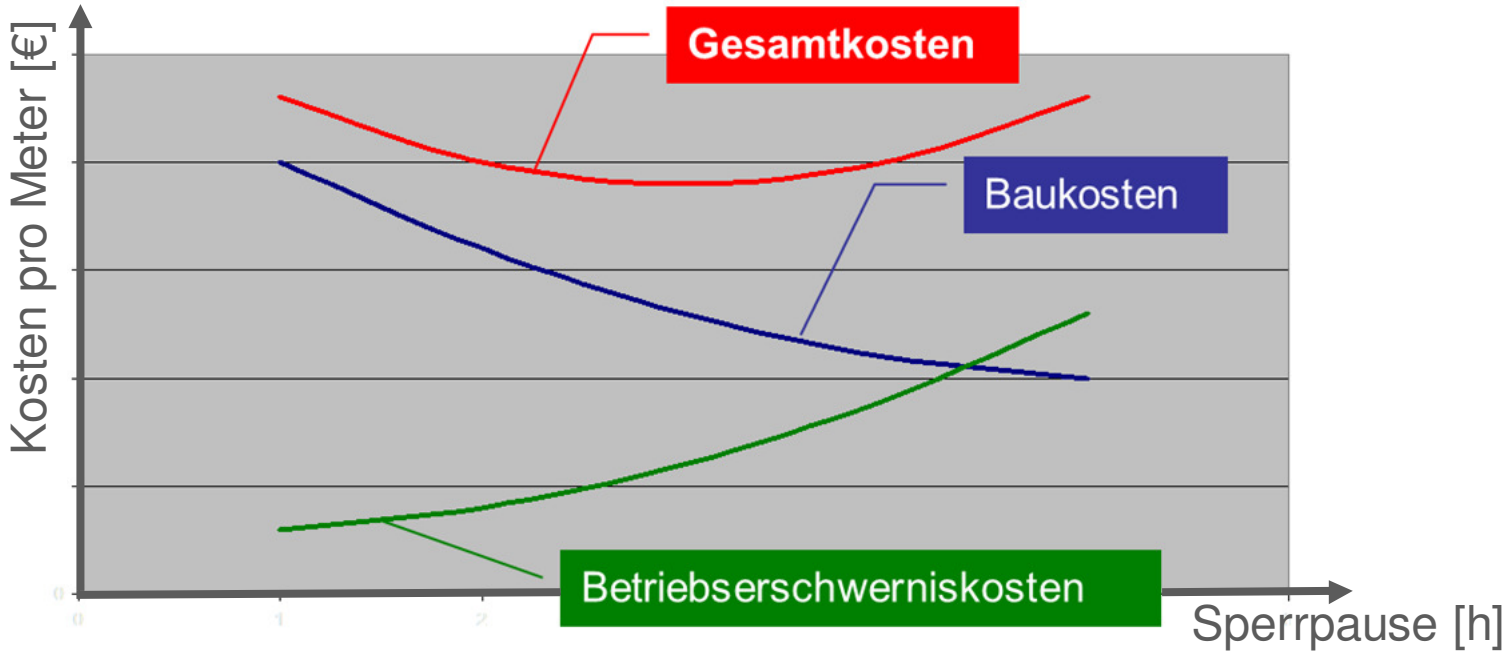
*Die Annuitäten unterscheiden sich nicht sehr stark.*

*Allerdings zeigen alle Sensitivitätsanalysen, dass die Reihung – FUMA vor Seilwinde stabil bleibt – und dies ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen erreichbaren Qualitäten!*

*Einsatz daher grundsätzlich empfehlen?*

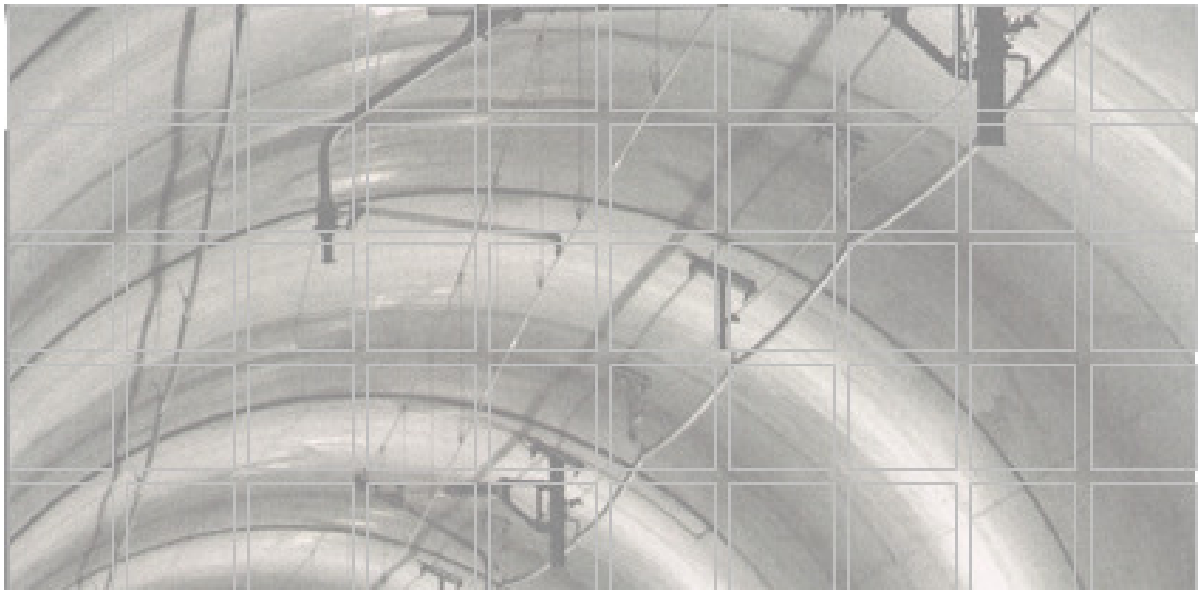
# Investition

Für jede Arbeit am Fahrweg, die mit Gleissperren verbunden ist, gibt es neben der Abhängigkeit der Meter-Preise von der Bauabschnittslänge auch die Abhängigkeit der Betriebserschwerniskosten (Kosten der Nicht-Verfügbakeit) von der Bauabschnittslänge und damit Einsatzoptima.




*Einsatz gerechnet für 2 km Umbaulänge, bei kürzeren Abschnitten steigen Meterkosten der Arbeit deutlich stärker als die Betriebs-erschwerniskosten sinken. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der FUMA ist von der Umbaulänge abhängig.*

# Vergleich Kettenwerk – Stromschiene im Tunnel



*Ein Vergleich derart unterschiedlicher Systeme kann nicht ausschließlich auf Basis der Investition erfolgen, sondern bedarf einer Betrachtung der gesamten Nutzungsdauer. Diese wurde für beide Systeme mit 50 Jahren angesetzt, wobei zusätzlich Sensitivitäten durchgeführt wurden.*

## Kettenwerk

130 Züge/Tag,Gleis - 195 STA/Tag,Gleis

V = 160 - 250 km/h | durchgehendes Tunnelgleis

| Investition | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stützenmontage | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nachspannungen (fest + beweglich) | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kettenwerk (komplett, regulieren,...) | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leitungen (Umgehungs-, Speise-, Verstärkungs- und Schalterleitungen) | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bahnerdungssystem und Rückstromführung (Erdungsleitung, Rückleiter, Bahnerdungen,...) | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schalter, Kabelanlage, Schaltkaverne,... | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Instandhaltung** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Inspektion Befahrung | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| Inspektion Begehung | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Messfahrt | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| Fahrdrahttausch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Instandsetzung inklusive Störungsbehebung | | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0 |
| Ordentliche Untersuchung | 1 | | | | | | | | | | 1 | | | | | 1 | | | | | 1 | | | |
| Mängelbehebung Bahnerdungssystem und Rückstromführung | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Mängelbehebung Schalter, Kabelanlage | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |

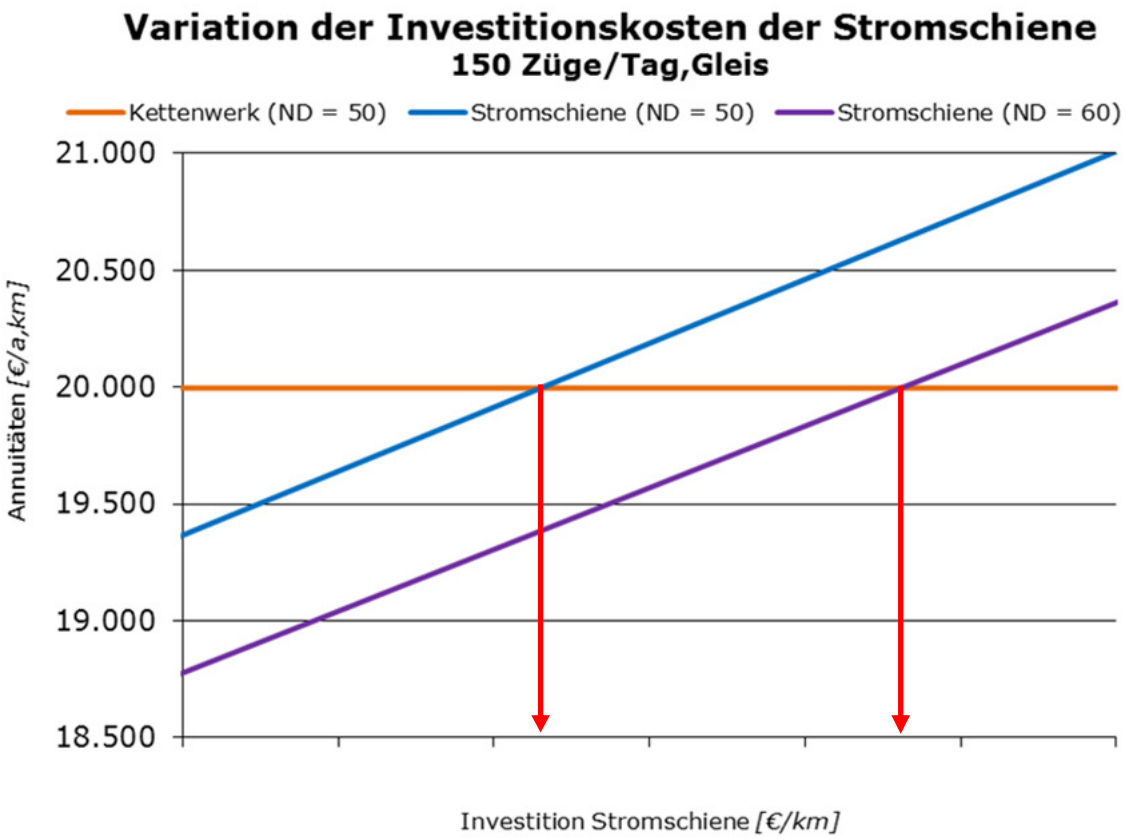
## Stromschiene

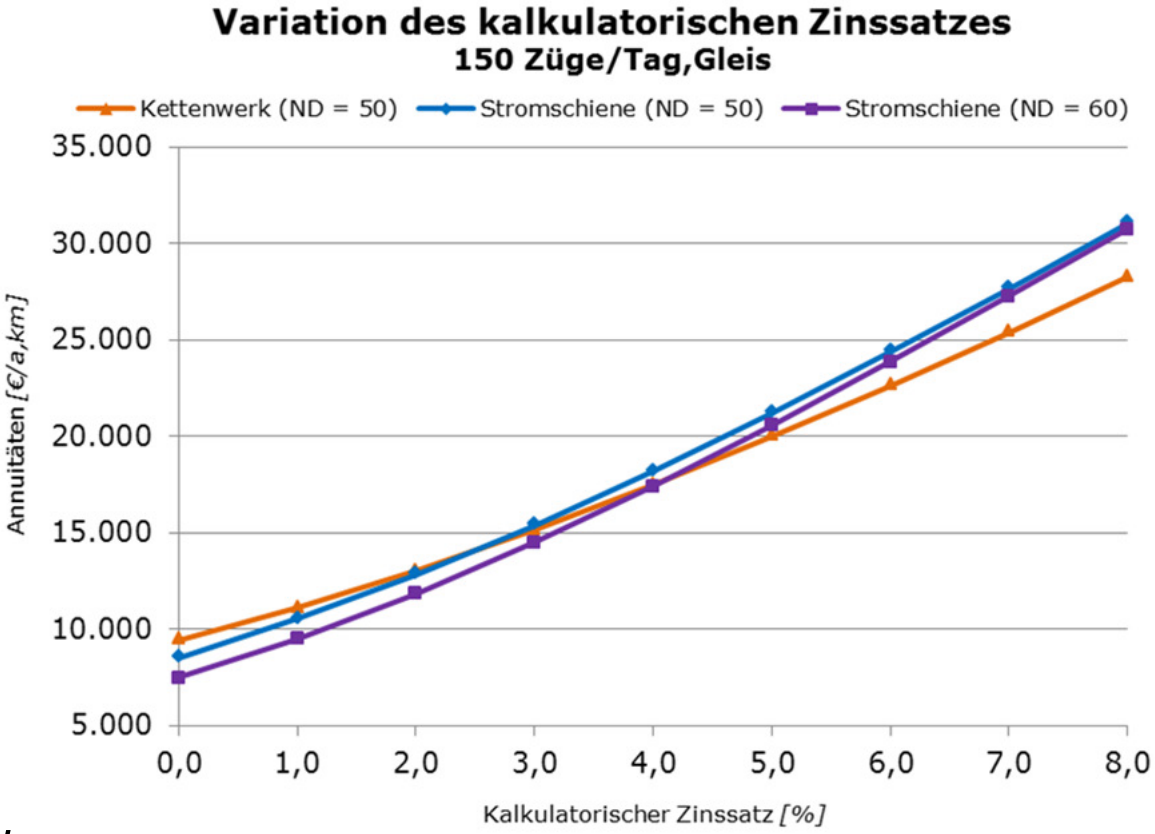
130 Züge/Tag,Gleis - 195 STA/Tag,Gleis

V = 160 - 250 km/h | durchgehendes Tunnelgleis

| Investition | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stützenmontage | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dilatationen (Dehungselemente) | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stromschiene | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leitungen (Umgehungs-, Speise- und Schalterleitungen) | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bahnerdungssystem und Rückstromführung (Erdungsleitung, Rückleiter, Bahnerdun | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schalter, Kabelanlage, Schaltkaverne,... | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Instandhaltung** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Inspektion Befahrung | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 |
| Inspektion Begehung | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Messfahrt | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Fahrdrahttausch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Instandsetzung inklusive Störungsbehebung | | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0, |
| Ordentliche Untersuchung | 1 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | 1 | |
| Mängelbehebung Bahnerdungssystem und Rückstromführung | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Mängelbehebung Schalter, Kabelanlage | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | Durchgehendes Tunnelgleis | |
|---|---|---|
| | Nutzungsdauer | Annuität |
| | [a] | [€/a,km] |
| | 150 Züge/Tag,Gleis | |
| Kettenwerk | 50 | 19.995 |
| Stromschiene | 50 | 21.223 |


Variation der Investitionskosten der Stromschiene
150 Züge/Tag,Gleis
Kettenwerk (ND = 50)
Stromschiene (ND = 50)
Stromschiene (ND = 60)
21.000
20.500
20.000
19.500
19.000
18.500
Annuitäten [€/a,km]
Investition Stromschiene [€/km]



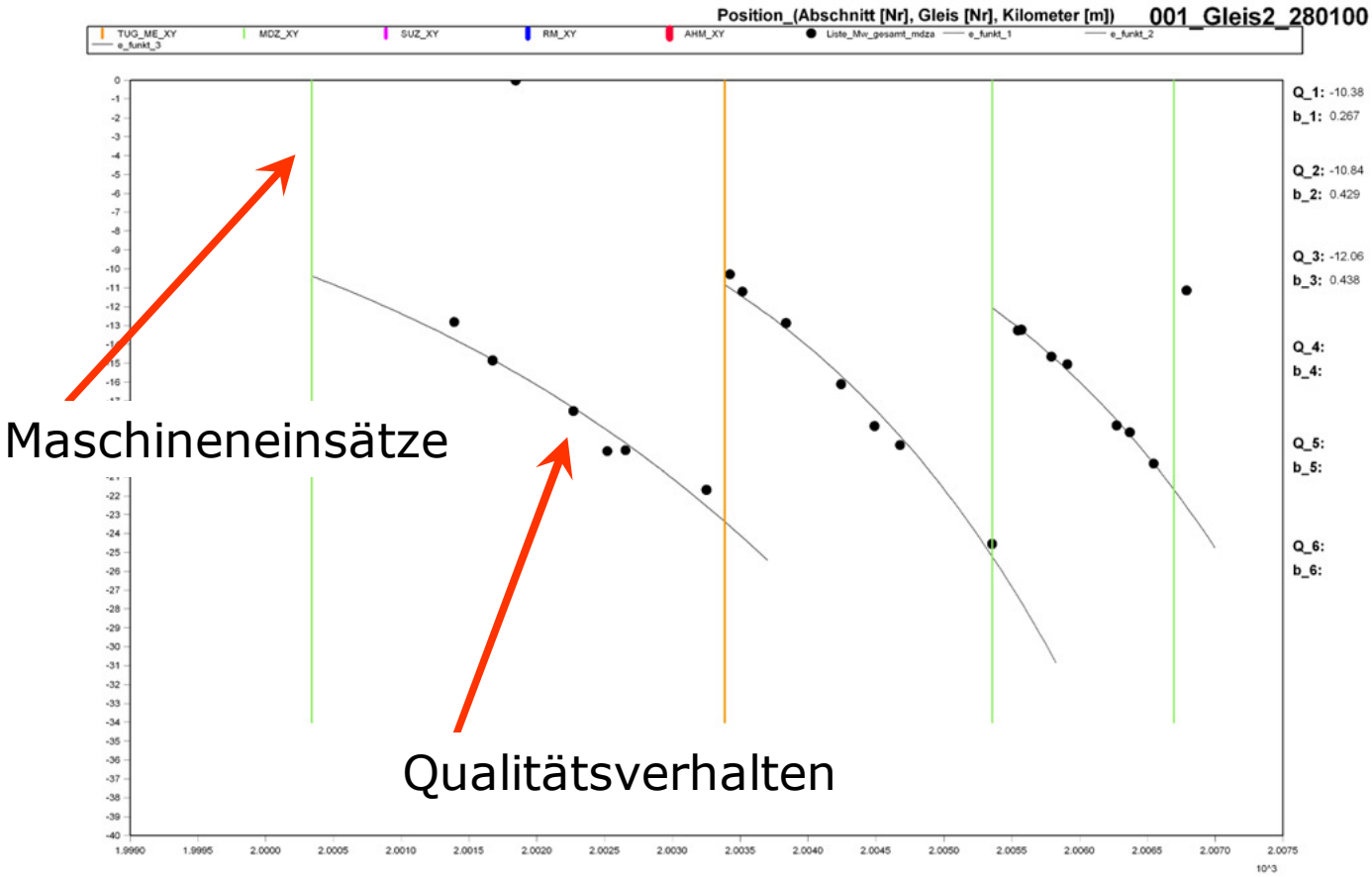

*Bauhöhe*

*Tunnellänge (Einfluss der Instandhaltungsreduktion, Einfluss der Übergangselemente)*

# *Ich bedanke mich für Ihre Aufmerksamkeit*

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit

# Datenanalyse
# Qualitätsverhalten



# Systemvergleich

| *Investitionsarbeiten* |
|---|
| *Stützenmontage* |
| *Nachspannungen (fest + beweglich)* |
| *Kettenwerk (komplett, regulieren,…)* |
| *Leitungen (Umgehungs-, Speise-, Verstärkungs- und Schalterleitungen)* |
| *Bahnerdungssystem und Rückstromführung (Erdungsleitung, Rückleiter, Bahnerdungen,…)* |
| *Schalter, Kabelanlage, Schaltkaverne,…* |

*Investitionsarbeiten – Oberleitungen – Kettenwerk*

| *Investitionsarbeiten* |
|---|
| *Stützenmontage* |
| *Dilatationen (Dehnungselemente)* |
| *Stromschiene* |
| *Leitungen (Umgehungs-, Speise- und Schalterleitungen)* |
| *Bahnerdungssystem und Rückstromführung (Erdungsleitung, Rückleiter, Bahn-erdungen,…)* |
| *Schalter, Kabelanlage, Schaltkaverne,…* |
| *Einfluss der Übergangskonstruktion (Anhängigkeit der Tunnellänge)* |

*Investitionsarbeiten – Oberleitungen – Stromschiene*

| *Instandhaltungsarbeiten* |
|---|
| *Inspektion Befahrung* |
| *Inspektion Begehung* |
| *Messfahrt* |
| *Fahrdrahttausch* |
| *Instandsetzung inklusive Störungsbehebung* |
| *Ordentliche Untersuchung* |
| *Mängelbehebung Bahnerdungssystem und Rückstromführung* |
| *Stromschiene: Übergangskonstruktion* |
| *Mängelbehebung Schalter, Kabelanlage* |