



# Korrosionsmechanismen an unserer Infrastruktur: Wie gehen wir heute und morgen damit um?

Infoveranstaltung suicorr AG vom 19. Mai 2025

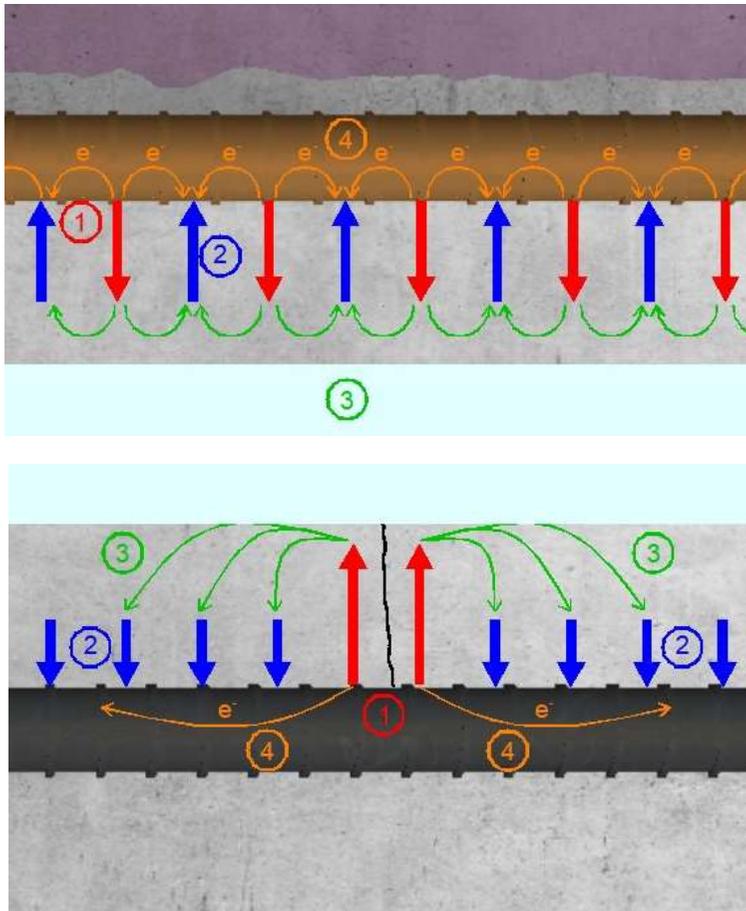
Prof. Felix Wenk  
Institut für Bau und Umwelt IBU

## Inhalt

- Einleitung: Korrosion und Instandsetzungsprinzipien
- Korrosionsformen: Karbonatisierung, Chloridionen, rückseitige Bewehrung von Stützmauern, Trinkwasserbehälter, Streuströme
- Instandsetzungsvarianten: Betonabtrag und -ersatz, KKS
- Prävention: Betonqualität, NRST, KKS

## Einleitung

### ■ Korrosion



Gleichmässige Korrosion, z.B. infolge Karbonatisierung

1. Anodische Teilreaktion:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$
2. Kathodische Teilreaktion:  $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$
3. Ionenmigration im Beton:  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$
4. Elektronen in Bewehrung:  $\text{e}^-$

Makroelement: z.B. infolge Chloridionen

# Einleitung

## ■ Instandsetzungsprinzipien

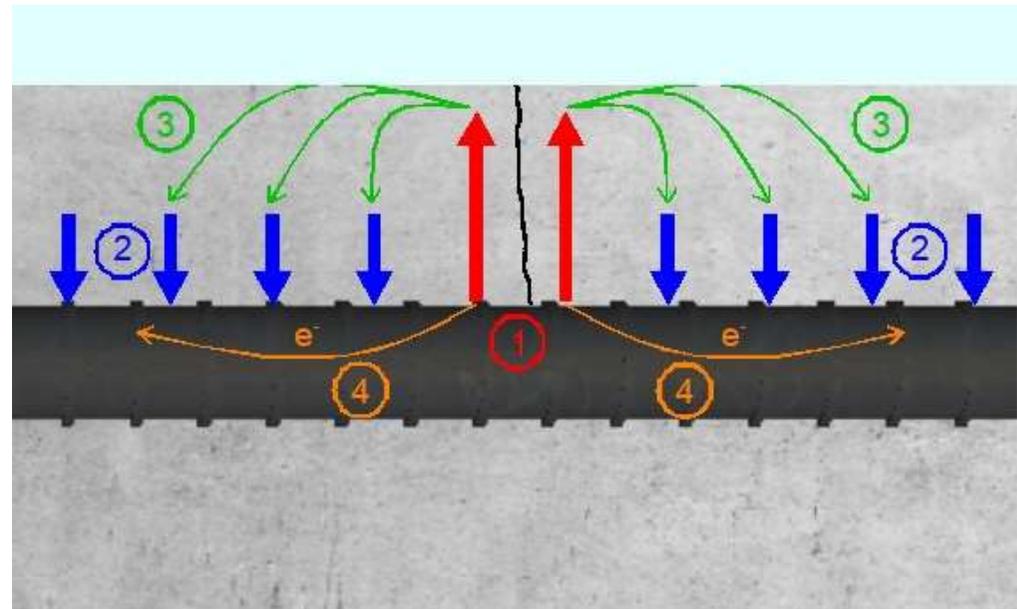
| Grundprinzipien bei Schädigungen infolge Korrosion an der Bewehrung  | Zugeordnete Verfahren   | Normen für die Projektierung und Anforderungen an die Produkte           |
|--|---|--|
| <b>7 Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität</b><br>(Preserving or restoring passivity [RP])<br><br>Schaffen von chemischen Bedingungen, bei denen die Oberfläche der Bewehrung ihren passiven Zustand beibehält oder wieder in einen passiven Zustand versetzt wird. | 7.1 Erhöhung der Betondeckung mit zusätzlichem zementgebundenem Mörtel oder Beton       | SN EN 1504-3 und -10, SN EN 206-1, SN EN 14487-1 und -2, SIA 262 und 179 |
|  | 7.2 Ersatz von schadstoffhaltigem oder karbonatisiertem Beton                           | SN EN 1504-3 und -10, SN EN 206-1, SN EN 14487-1 und -2                  |
|  | 7.3 Elektrochemische Realkalisierung von karbonatisiertem Beton <sup>1)</sup>           | CEN/TS 14038-1   |
|  | 7.4 Realkalisierung von karbonatisiertem Beton durch Diffusion                          | (SN EN 1504-10, das Verfahren wird nicht empfohlen.)                     |
|  | 7.5 Elektrochemische Chloridentfernung <sup>1)</sup>                                    | CEN/TS 14038-2   |
| <b>8 Erhöhung des elektrischen Widerstands</b><br>(Increasing resistivity [IR])<br><br>Erhöhen der elektrischen Widerstandsfähigkeit des Betons.   | 8.1 Hydrophobierende Imprägnierung  | SN EN 1504-2 und -10   |
|  | 8.2 Imprägnierung   | SN EN 1504-2 und -10   |
|  | 8.3 Beschichtung  | SN EN 1504-2 und -10   |
| <b>9 Kontrolle kathodischer Bereiche</b><br>(Cathodic control [CC])<br><br>Schaffen von Bedingungen, unter denen potenziell kathodische Bereiche der Bewehrung keine anodische Reaktion herbeiführen können.   | 9.1 Begrenzung des Sauerstoffgehalts (an der Kathode) durch Sättigung oder Beschichtung | (SN EN 1504-10, das Verfahren wird nicht empfohlen.)                     |
| <b>10 Kathodischer Schutz</b><br>(Cathodic protection [CP])  | 10.1 Anlegen eines elektrischen Potentials <sup>1)</sup>                                | SN EN 12696, SN EN 1504-10   |
| <b>11 Kontrolle anodischer Bereiche</b><br>(Control of anodic areas [CA])<br><br>Schaffen von Bedingungen, bei denen potenziell anodische Bereiche der Bewehrung daran gehindert werden, an der Korrosionsreaktion teilzunehmen.   | 11.1 Anstrich der Bewehrung durch aktiv pigmentierte Beschichtungen                     | SN EN 1504-7 und 10  |
|  | 11.2 Anstrich der Bewehrung mit Beschichtungen nach dem Barriereprinzip                 | SN EN 1504-7 und 10  |
|  | 11.3 Aufbringen von Korrosionsinhibitoren im oder am Beton <sup>1)</sup>                | (SN EN 1504-10, Anhang)  |

SN EN 1504-9  
SIA 269/2

7, 10: Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität

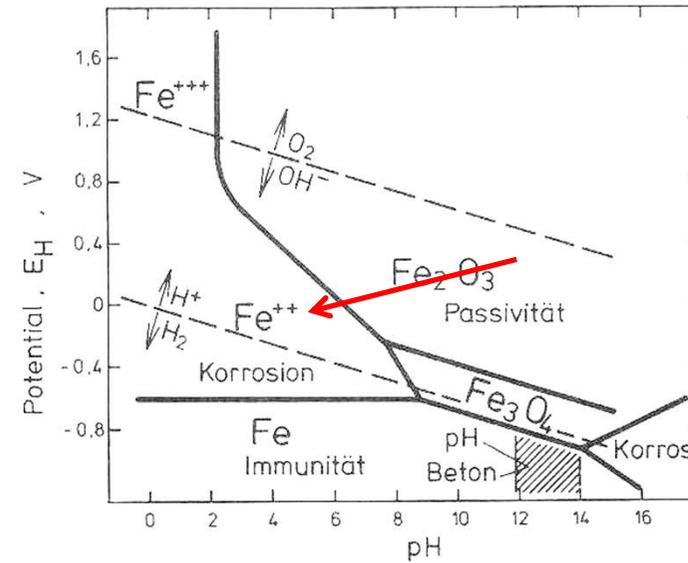
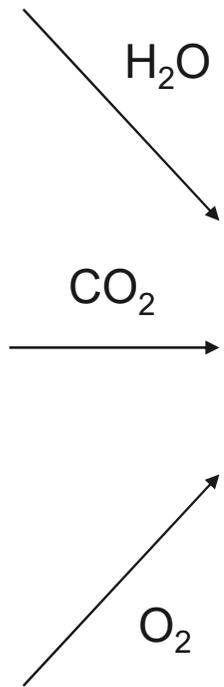
8: Erhöhung des elektrischen Widerstands

9: Kontrolle kathodischer Bereiche



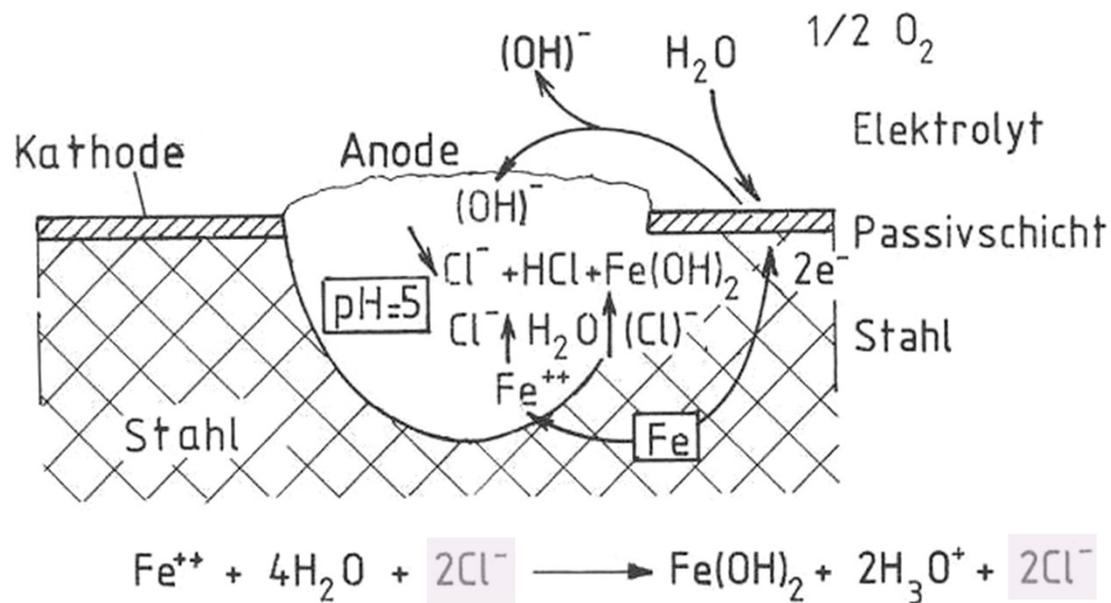
# Korrosionsformen

- Karbonatisierung des Betons



## Korrosionsformen

- Chloridinduzierte Korrosion



Quelle:

Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bauverlag

# Korrosionsformen

- Rückseitige Korrosion von Stützmauern

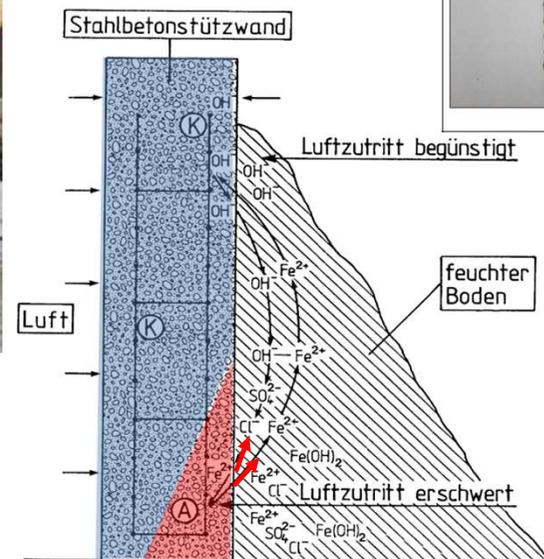
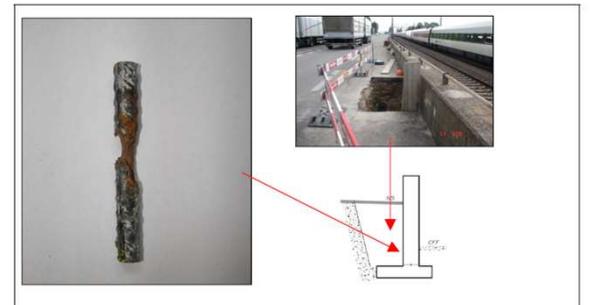
**Evaluation de l'état  
 des murs de soutènement béton à semelles  
 Etude pilote  
 Rapport de synthèse des phases 1 et 2**

Brennerautobahn: Laster unter Betonmauer begraben



Brennerautobahn (c) APA/ZEITUNGSFOTO.AT/DANIEL LIEBL  
 (ZEITUNGSFOTO.AT/DANIEL LIEBL)

Quelle: 20.03.2012 [www.diepresse.com](http://www.diepresse.com)



Quellen:

Bundesamt für Strassen

Korrosion und Korrosionsschutz  
 im Bauwesen, Bauverlag

## Korrosionsformen

- Korrosion in Trinkwasserkammern

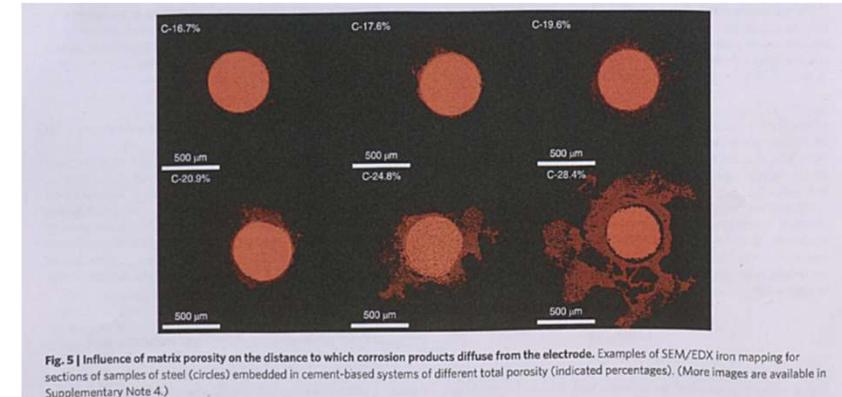


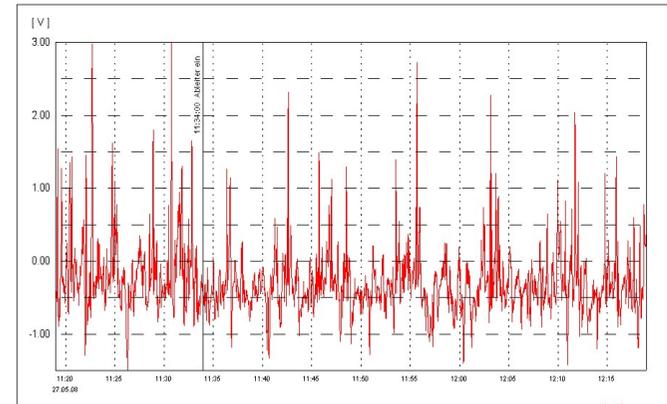
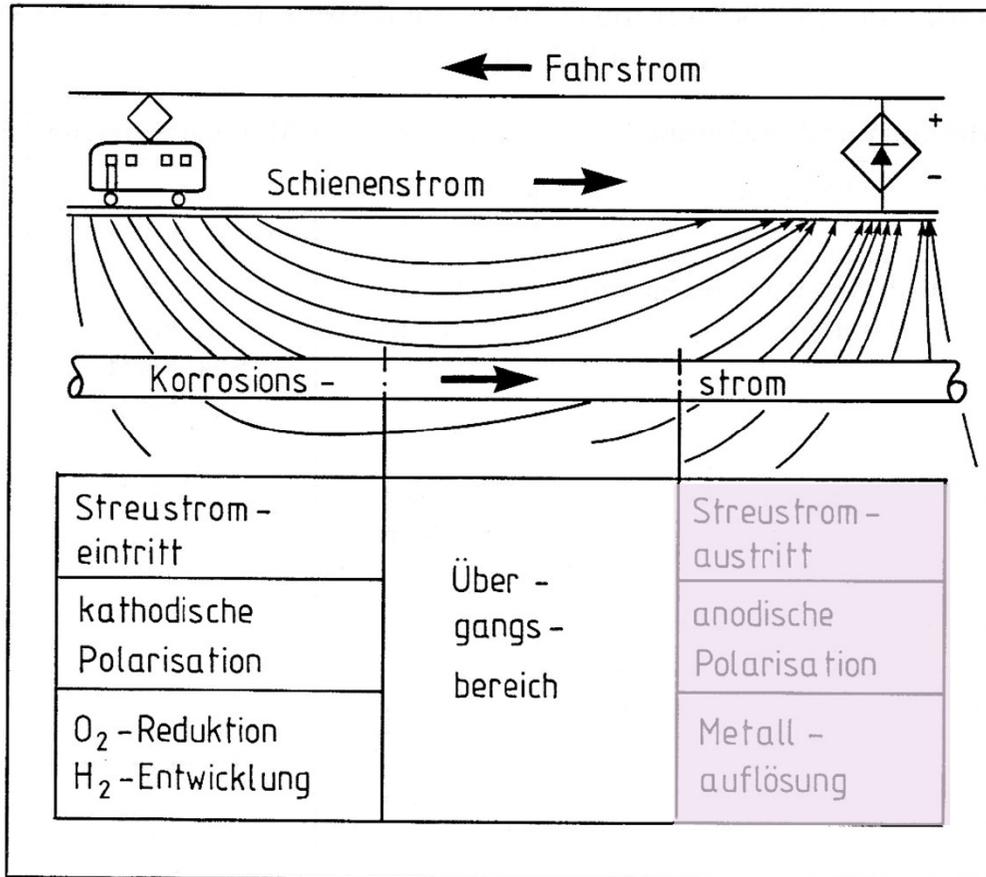
Fig. 5 | Influence of matrix porosity on the distance to which corrosion products diffuse from the electrode. Examples of SEM/EDX iron mapping for sections of samples of steel (circles) embedded in cement-based systems of different total porosity (indicated percentages). (More images are available in Supplementary Note 4.)

Quelle: Nature Materials,  
Vol 18, September 2019, p. 942-947

Korrosion der Bewehrung  
in Abhängigkeit der Porosität:  
dichter Beton: keine/geringe Korrosion  
poröser Beton: erhöhte Korrosion

# Korrosionsformen

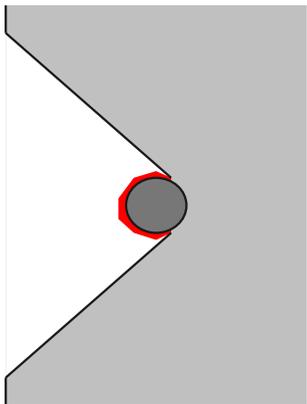
- Streustromkorrosion



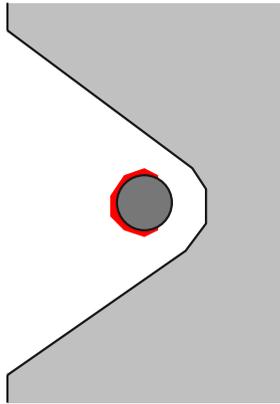
Quelle: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bauverlag

## Instandsetzungsvarianten

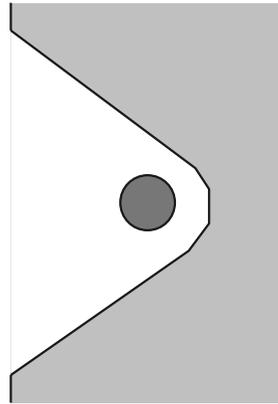
- Betonabtrag und -ersatz: partielle Instandsetzung  
SN EN 1504-9 Prinzip 7: Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität



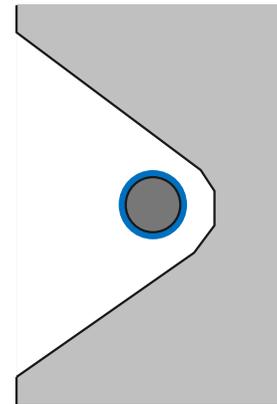
Abplatzungen



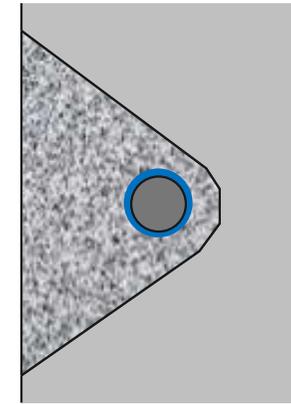
Freilegen der  
Bewehrung



Entrosten



Korrosionsschutz  
auftragen



Reprofilieren

## Instandsetzungsvarianten

- Betonabtrag und -ersatz: strukturelle Instandsetzung  
SN EN 1504-9 Prinzip 7: Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität



Aufrauen der Betonoberfläche: 3 – 5 mm  
Abtrag der chloridkontaminierten Betonschicht



Applikation einer Mörtelschicht  
inkl. Vor- und Nachbehandlung



## Instandsetzungsvarianten

- Kathodischer Korrosionsschutz  
(SN EN 1504-9 Prinzip 7: Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität)  
SN EN 1504-9 Prinzip 10: Kathodischer Schutz



Anoden: z.B. mischoxidbeschichtete Titanbänder oder -netze



Applikation Einbettungsmörtel

## Instandsetzungsvarianten

- Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Baukosten (grobe Schätzung für horizontale, einfache Flächen > 1'000 m<sup>2</sup>)

Prinzip 7: konventionelle Instandsetzung (Restnutzungsdauer: 50 Jahre):

HDW-Abtrag 3 cm: CHF 150.- pro m<sup>2</sup>

Mörtelauftrag 3 cm: CHF 100.- pro m<sup>2</sup>

Beschichtung OS 8: CHF 300.- pro m<sup>2</sup> (muss ca. 2 - 3mal erneuert werden)

Total: CHF 550.- pro m<sup>2</sup>

Prinzip 10: KKS (inkl. 50 Jahre Betrieb):

Untergrundvorbereitung: CHF 25.- pro m<sup>2</sup>

Titananodenbänder, Abstand 20 cm: CHF 60.- pro m<sup>2</sup>

Sensoren, Elektroinstallation, Schutzstromgerät: CHF 40.- pro m<sup>2</sup>

2 cm Einbettungsmörtel: CHF 75.- pro m<sup>2</sup>

Dokumentation, Inbetriebnahme, Wartung, Strom: CHF 100.- pro m<sup>2</sup>

Total: CHF 300.- pro m<sup>2</sup>

## Instandsetzungsvarianten

- Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich: [Ökobilanzdaten im Baubereich](#)

UBP = Umweltbelastungspunkte → Vollständiges Bild der Umweltauswirkungen

- Beton Tiefbau: 163 UBK/kg → Abtrag / Ersatz 1 cm: ca. 3'800 UBK pro m<sup>2</sup>
- Zementputz: 391 UBK/kg → Abtrag / Ersatz 1 cm: ca. 6'000 UBK pro m<sup>2</sup>
- Bewehrungsstahl: 1'590 UBK/kg → 1 Lage, d = 10 mm, s = 15 cm: ca. 6'500 UBK pro m<sup>2</sup>
- NRST 18/8: 9'710 UBK/kg → 1 Lage, d = 10 mm, s = 15 cm: ca. 39'900 UBK pro m<sup>2</sup>
- Titanzinkblech: 27'800 UBK/kg → 5 Bänder, 100 g: ca. 3'000 UBK pro m<sup>2</sup>
- HDW, 250 kW: 170'000 UBK/h → Abtrag 1 cm: ca. 23'000 UBK pro m<sup>2</sup> (Schätzung)
- KKS, 0.1 W: 674 UBK/kWh → ca. 600 UBK pro m<sup>2</sup> \* a (Schätzung)

Prinzip 7: konventionelle Instandsetzung (Restnutzungsdauer: 50 Jahre):

HDW-Abtrag 3 cm, Mörtelauftrag 3 cm, Beschichtung → ca. 120'000 UBK pro m<sup>2</sup> (Schätzung)

Prinzip 10: KKS (inkl. 50 Jahre Betrieb, Wartung):

Sandstrahlen, Anode, 2 cm Einbettungsmörtel → ca. 60'000 UBK pro m<sup>2</sup> (Schätzung)

## Instandsetzungsvarianten

- Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Ökobilanzierung von Instandsetzungsvarianten, Dauberschmidt Ch., Stengel, Th., Beton und Stahlbetonbau 119 (2024), Heft 10

GWP = Global Warming Potential → Treibhauspotential, CO<sub>2</sub>-Äquivalenz

Verfahren 7.2: Betonabtrag und -ersatz  
Ersatz der Beschichtung nach 20 Jahren

Verfahren 8.3: Austrocknen des Betons  
Ersatz der Beschichtung nach 20 Jahren  
(Chloridgehalt < 1.0 M%Cl-/Z)

Abbruch und Neubau: ca. 5mal höher

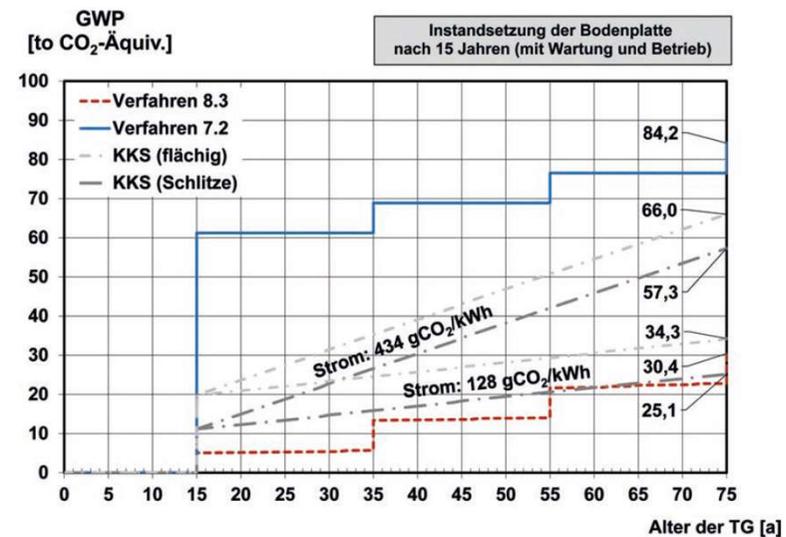


Bild 7 Errechnete GWP-Werte für eine Instandsetzung in einem Tiefgaragenalter von 15 Jahren mit Berücksichtigung von Wartung und Betrieb  
Calculated GWP values for a repair at an underground car park age of 15 years, taking into account maintenance and operation

## Instandsetzungsvarianten

- Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Masterarbeit «Lebenszykluskosten von Stahlbetoninstandsetzungsvarianten an Musterobjekten», Tobias Künstel, 2014

SN 604 907 Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement EM:

- Betreiberkosten (Neubau-, Erhaltungs-, Betriebs-, Rückbaukosten)
- Strassennutzerkosten (Zeit-, Fahrzeugbetriebs-, Unfallkosten)
- Kosten Dritter (Lärm-, Luftverschmutzungs-, Klima-, externe Unfallkosten)

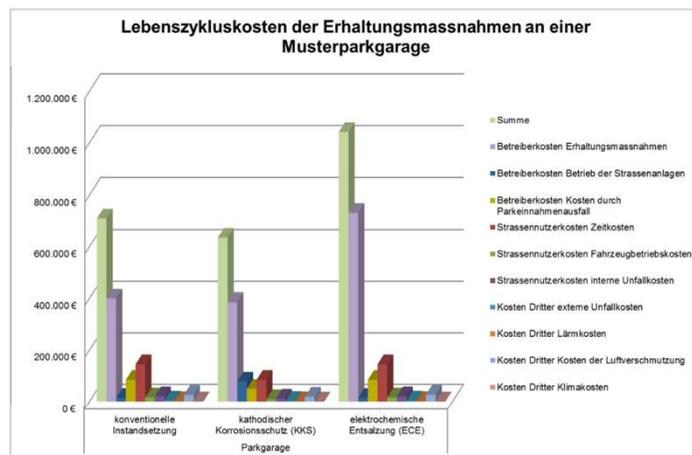
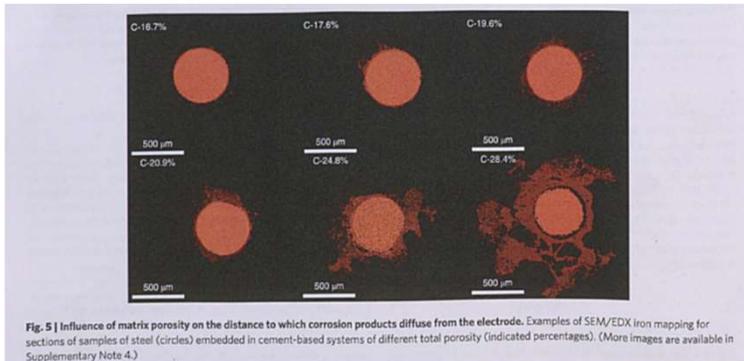


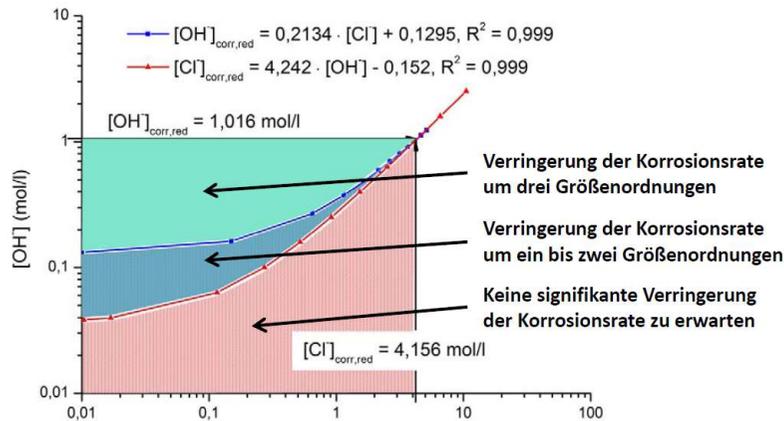
Abbildung 36 Gesamtkosten der verfahrensabhängigen Lebenszykluskosten der Musterparkgarage.

# Prävention

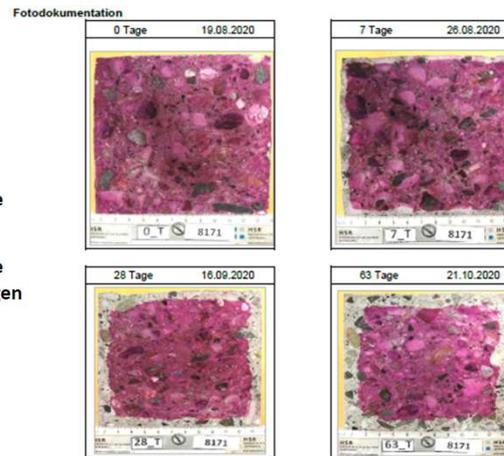
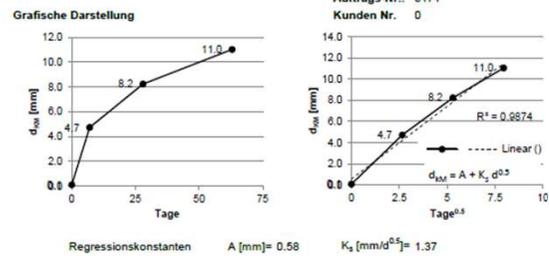
## ■ Betonqualität



Quellen: Nature Materials, Vol. 18, 2019  
Thorsten Eichler, Dissertation, 2012



Ostschweizer Fachhochschule  
 Telefon: 055/222 42 59  
 Telefax: 055/222 42 16  
 CH-8640 Rapperswil, Oberseestrasse 10



Ostschweizer Fachhochschule  
 Telefon: 055/222 42 59  
 Mail: baustoffpruefung@ost.ch  
 CH-8640 Rapperswil, Oberseestrasse 10

Auftrags-Nr.:  
 Kunden Nr.:  
 Bauobjekt:  
 Bauteil:

Prüfbericht: Chloridwiderstand  
 SIA 262/1 (2019) Anhang B

Angaben zum Beton (Angaben des Auftraggebers)

|                     |               |                       |                 |
|---------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| Bezeichnung         | G700          | Festigkeitsklasse     | C30/37          |
| Expositionsklasse   | XC4, XD3, XF4 | Rezeptur Nr.:         |                 |
| Lieferchein-Nr.     | 421460        | Hersteldatum          | 22.03.2023      |
| Betonsorte:         | G700          | Gehalt:               | 340 kg/m³       |
| Zementart:          | CEM III/A-LL  | Dosierung:            | 0.4 % v. Zement |
| Zusatzmittel 1:     | LP            | Dosierung:            | 0.9 % v. Zement |
| Zusatzmittel 2:     | HBV           | Dosierung:            | kg/m³           |
| Grobskorn:          | 32 mm         | Betonlieferant/Werk:  |                 |
| Frischbetonrohichte | 2345 kg/m³    | Konsistenzklasse      | C 1.07          |
| W/Z-Wert            | 0.41          | LP-Gehalt Frischbeton | 4.1 Vol.-%      |
| Betontemperatur     | 14 °C         | Lufttemperatur        | 6.5 °C          |

Angaben zu Proben  
 Datum Prüfbeginn: 22.03.2023  
 Datum Probenherstellung: 23.03.2023  
 Probenalter: 28 d  
 Bedingungen: 24h/20V  
 Probeneingang: 23.03.2023  
 Prüfkörper: Bohrkern aus Würfeln  
 Probennr. Würfel:  
 Probendurchmesser: 49.80 mm  
 Probentiefe: 50.98 mm

Resultate Chloridwiderstand

| Prüfkörper Nr. | Nassrohichte kg/m³ | Maximale Cl-Eindringtiefe X <sub>max</sub> mm | Mittlere Cl-Eindringtiefe X <sub>κ</sub> mm | Chloridmigrationskoeffizient D <sub>Cl</sub> m²/s · 10 <sup>-11</sup> |
|----------------|--------------------|---|---|---|
| 1              | 2407               | 13.0  | 12.5  | 8.2   |
| 2              | 2429               | 14.5  | 12.9  | 8.5   |
| 3              | 2438               | 13.0  | 11.5  | 7.6   |
| 4              | 2365               | 13.5  | 12.0  | 8.0   |
| 5              | 2417               | 11.5  | 11.3  | 7.5   |
| Mittelwert:    | 2411               | 13.1  | 12.0  | 8.0   |
| Stabw.         | 28                 | 1.0   | 0.7   | 0.4   |



W/Z-Wert / Porosität, pH-Wert, Karbonatisierungswiderstand, Chloridwiderstand

# Prävention

- Betonqualität: reduzierter CO<sub>2</sub>- Fussabdruck

## zirkulit beton®

2350 kg / 1m<sup>3</sup> / NPK A

### Primärrohstoffe

570 kg

### Sekundärrohstoffe

1500 kg

Davon 10 kg gespeichertes CO<sub>2</sub>\*

### Zement

280 kg



\*Die CO<sub>2</sub>-Speicherung resp. CO<sub>2</sub>-Senkenleistung ist bereits abgegolten und darf nicht anderweitig geltend gemacht werden.

## zireco beton®

2350 kg / 1m<sup>3</sup> / NPK A

### Primärrohstoffe

820 kg

### Sekundärrohstoffe

1250 kg

### Zement

280 kg



KLARK



|               | Biogener Kohlenstoff<br>[kg C / m <sup>3</sup> ] | Senkenleistung<br>[kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup> ] | Treibhausgasemissionen<br>[kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup> ] |
|---------------|--|---|---|
| Klark Sorte A | 57.5   | 211   | 209   |
| Klark Sorte C | 68.6   | 252   | 252   |

Tabelle 2: Umrechnung CO<sub>2</sub>-Senkenleistung der KLARK Betonsorten

Die Treibhausgasemissionen der Herstellung und die Senkenleistung pro Kubikmeter Beton für alle betrachteten Sorten sind in Abbildung 2 dargestellt und ergeben jeweils eine Bilanz von mindestens Netto-Null.

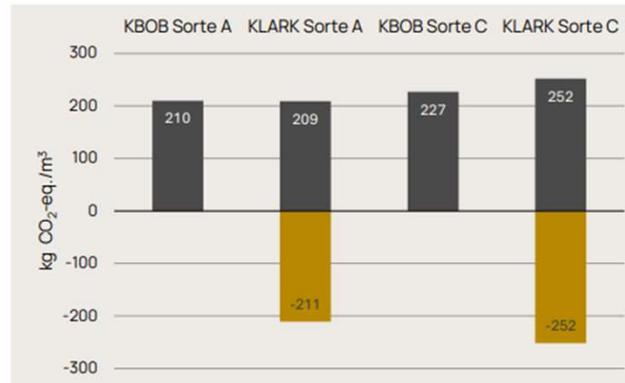


Abbildung 2: Treibhausgasemissionen und CO<sub>2</sub>-Senke in der Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Beton

# Anwendungen



## OULESSE MAGERBETON

Materialpreis:  
125 - 154 CHF /m<sup>3</sup>

Erhältlich bei:  
[kibag.ch](http://kibag.ch)



## OULESSE BETON

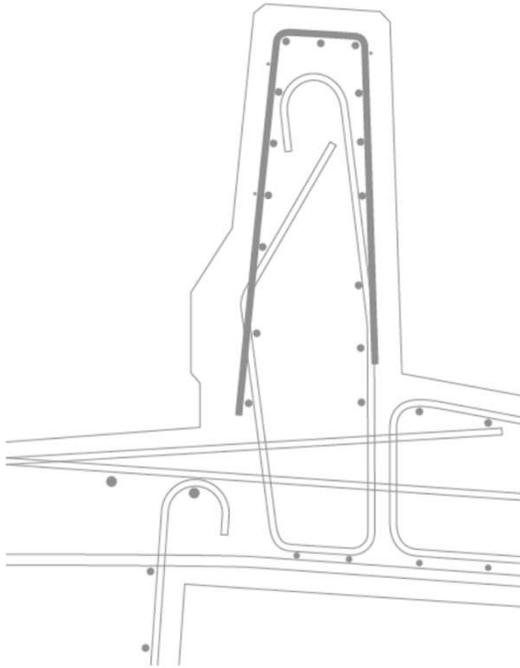
Materialpreis:  
auf Anfrage

Erhältlich bei:  
[kibag.ch](http://kibag.ch)

CO<sub>2</sub>-Speicherung, Zementreduktion, Zementersatz

## Prävention

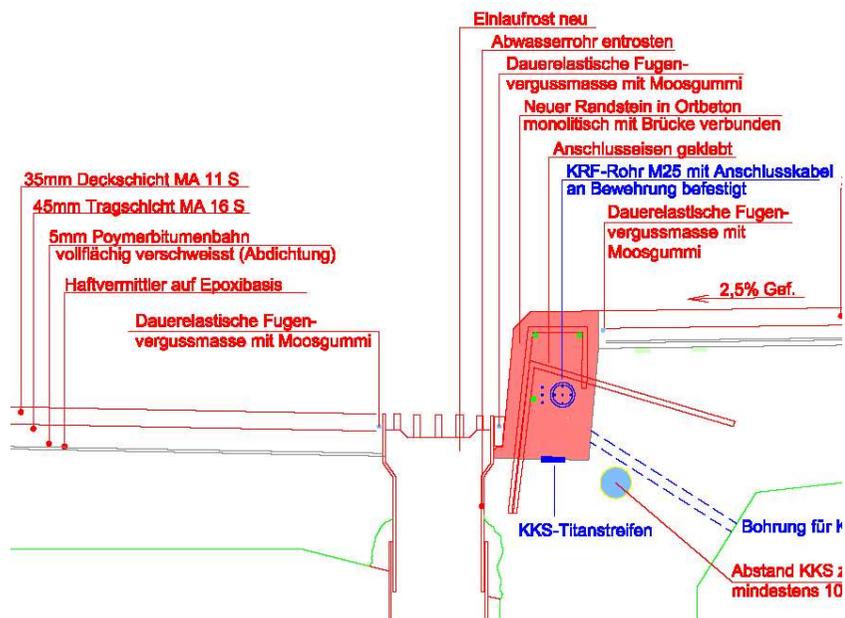
- Nichtrostender Stahl



Präventiv geschützter Konsolkopf bei Sunnibergbrücke, Umfahrung Klosters (Quelle: Steeltec)

## Prävention

- Kathodischer Korrosionsschutz  
(SN EN 1504-9 Prinzip 7: Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität)  
SN EN 1504-9 Prinzip 10: Kathodischer Schutz



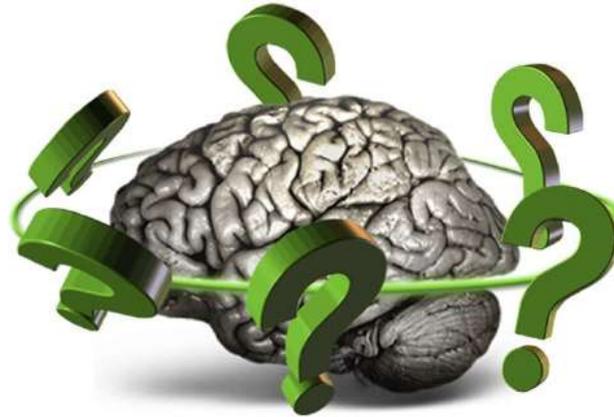
Präventiv geschützter Randstein mittels mischoxidbeschichtetem Titanband

## Prävention

- Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit (Nutzungsdauer 50 Jahre)

| Variante  | Mehrkosten                       | Zusätzliche Umweltbelastungspunkte | Bemerkung   |
|---|----------------------------------|------------------------------------|---|
| NRST, äusserste Lage  | Ca. 15 – 45 CHF / m <sup>2</sup> | + ca. 30'000                       | Kritischer Chloridgehalt bei Rissen ev. nicht ausreichend |
| Rissüberbrückende Beschichtung OS 11 b (2mal erneuern)  | Ca. 300 CHF / m <sup>2</sup>     | + ca. 70'000 (Schätzung)           | Ev. auch überarbeitbar                                    |
| KKS<br>- 5 Titanbänder pro m <sup>2</sup><br>- Sensoren, Elektroinstallation, Schutzstromgerät<br>- Dokumentation, Inbetriebnahme, Wartung, Strom | Ca. 175 CHF / m <sup>2</sup>     | + ca. 10'000 (Schätzung)           |   |
| Konventionelle Instandsetzung<br>- HDW-Abtrag 3 cm<br>- Mörtelauftrag 3 cm<br>- Beschichtung OS 11 b  | Ca. 350 CHF / m <sup>2</sup>     | + ca. 100'000 (Schätzung)          | Ev. ist eine Instandsetzung nicht ausreichend             |

# Korrosionsmechanismen an unserer Infrastruktur: Wie gehen wir heute und morgen damit um?



Felix Wenk, dipl. Bauing. ETH SIA, Zertifiziert SN EN ISO 15257 Stahlbeton Grad 4, [felix.wenk@ost.ch](mailto:felix.wenk@ost.ch)