

LANDESGÜTEGEMEINSCHAFT
INSTANDSETZUNG VON
BETONBAUWERKEN
BADEN-WÜRTTEMBERG +
BAYERN E.V.



Dr. Amir Rahimi

Auslaugungsinduzierte Betonstahlkorrosion in Verkehrswasserbauwerken

– Grundlagen, Fallbeispiele, Instandsetzung –

Betoninstandsetzung im Ingenieur- und Wohnungsbau

LG BW+BY

Germering, 31. Januar 2024

Filderstadt, 07. Februar 2024



- Fallbeispiel Nr. 1
 - Grundlagen: Theorie, Laboruntersuchung
- Fallbeispiel Nr. 2
 - Schadensanalyse
- Fallbeispiel Nr. 3
 - Vorbeugende Maßnahmen
 - Instandsetzungsmaßnahmen

Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 1

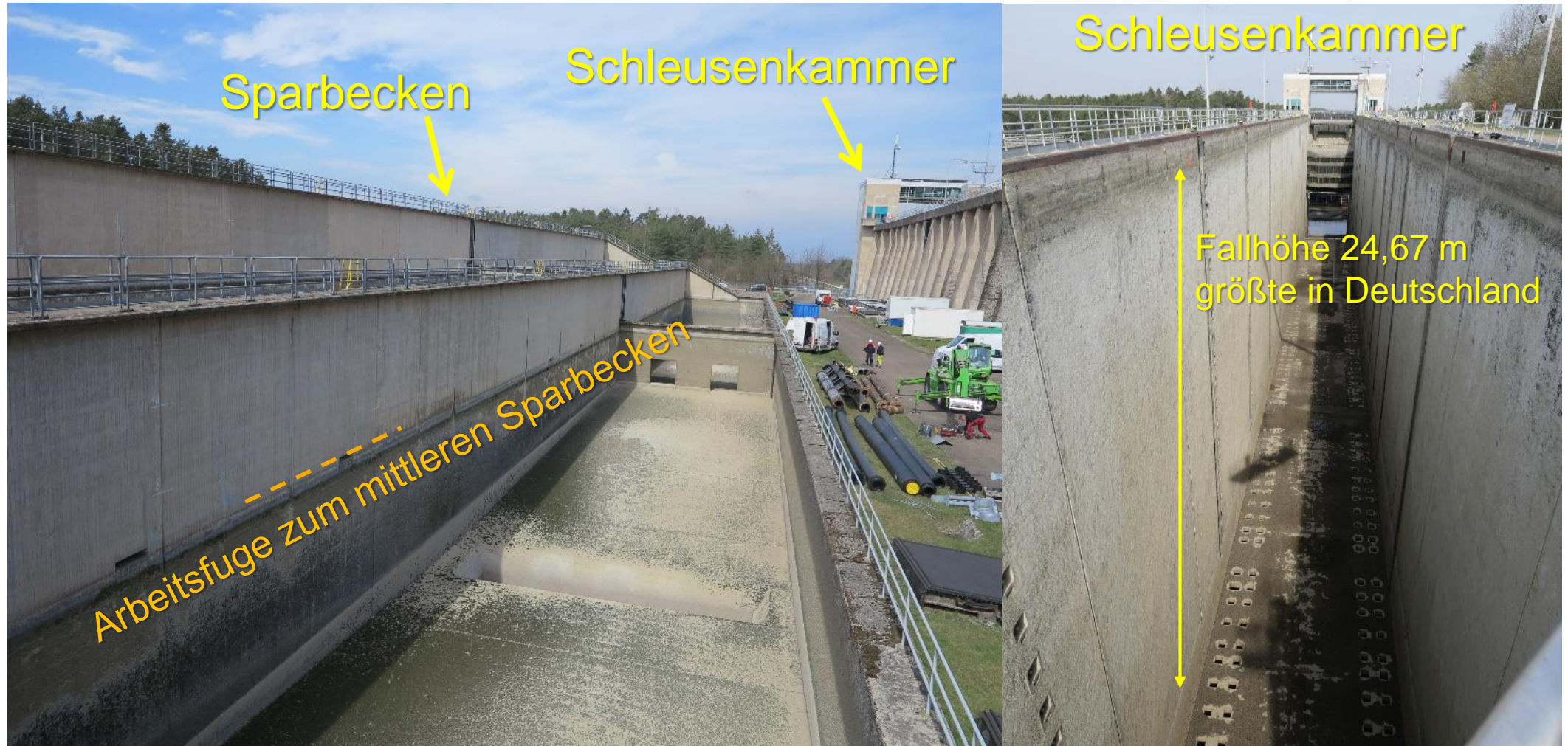
Schleuse Nr. 1, am Main-Donau-Kanal, Baujahr 1980



Quelle: Landeskraftwerke Bayern

Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 1

Schleuse Nr. 1, am Main-Donau-Kanal, Baujahr 1980



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 1

Schleuse Nr. 1, am Main-Donau-Kanal, Baujahr 1980



Voraussetzungen für die Korrosion des Stahls im Beton

1. Depassivierung der Betonstahloberfläche:

- Abnahme des pH-Wertes
 - Carbonatisierung der Betondeckung
 - Auslaugen des Betons ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Ca^{2+})
- Kritischer Chloridgehalt

(geringer Relevanz bei Wasserbauwerken)

(relevant bei wasserführenden Trennrissen) ✓

2. Elektrische Leitfähigkeit des Betonstahls ✓

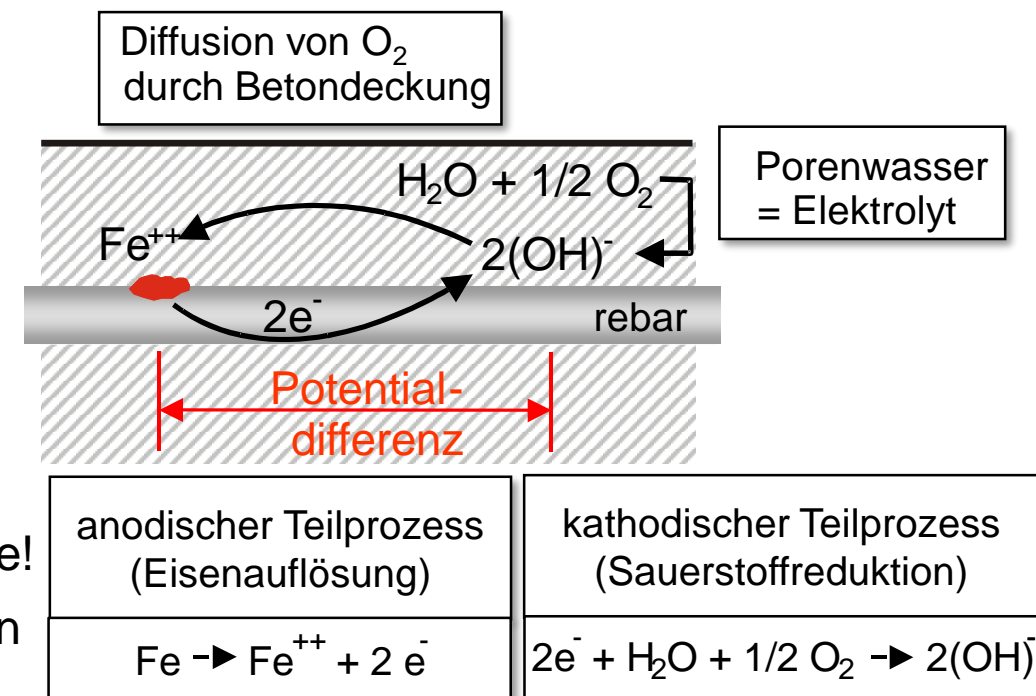
3. Elektrolytische Leitfähigkeit des Betons ✓

4. Ausbildung anodischer und kathodischer Elemente ✓

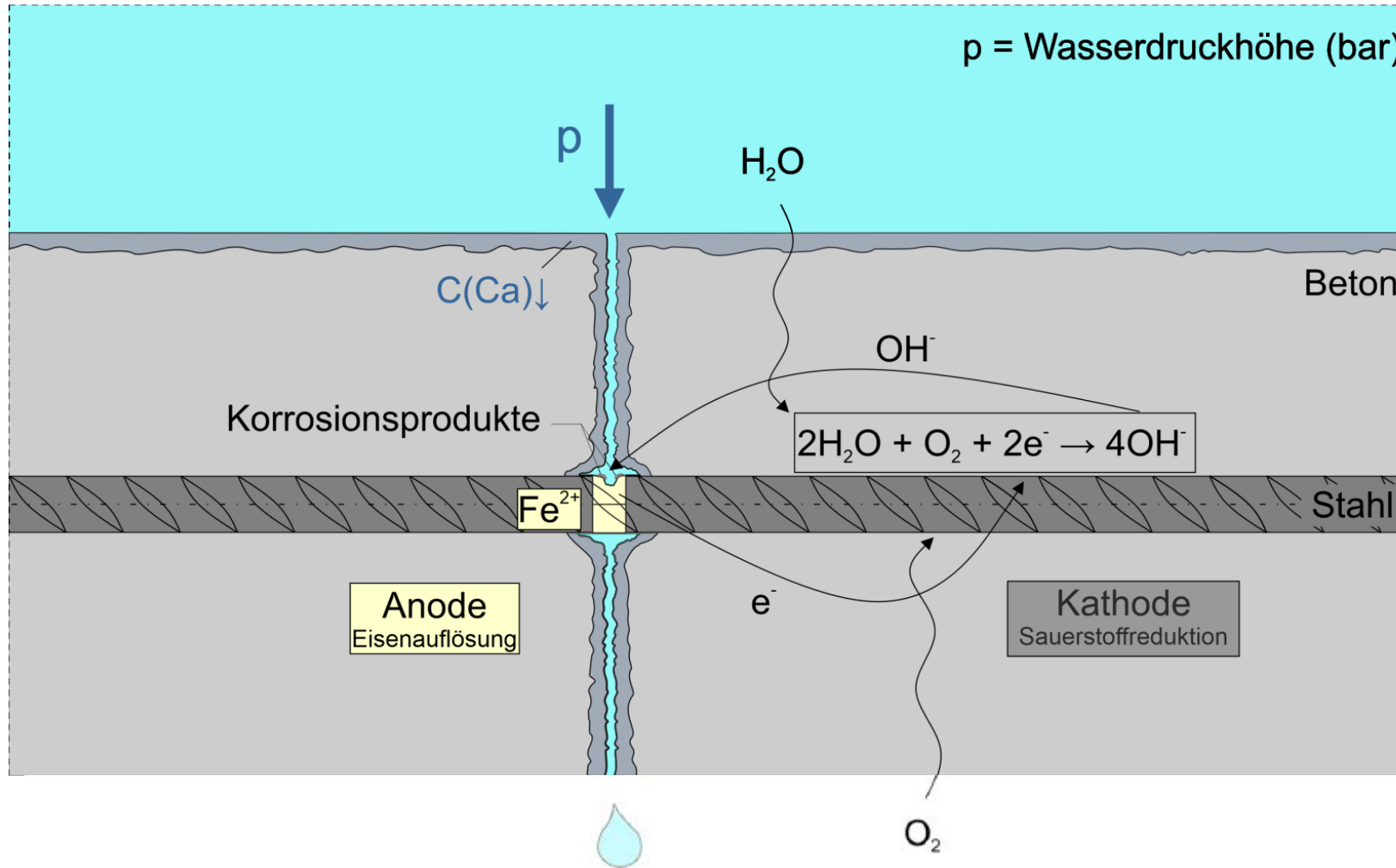
5. Sauerstoffzutritt zu kathodischen Elementen ✓

? Unterwasserbauteile!

- ✓ geringer Sauerstoffgehalt, aber große passive Bereiche!
- ✓ Möglichkeit Bildung kathodischer Elemente in Bauteilen oberhalb Wasser!



Mechanismus der Betonstahlkorrosion in wasserführenden Trennrissen



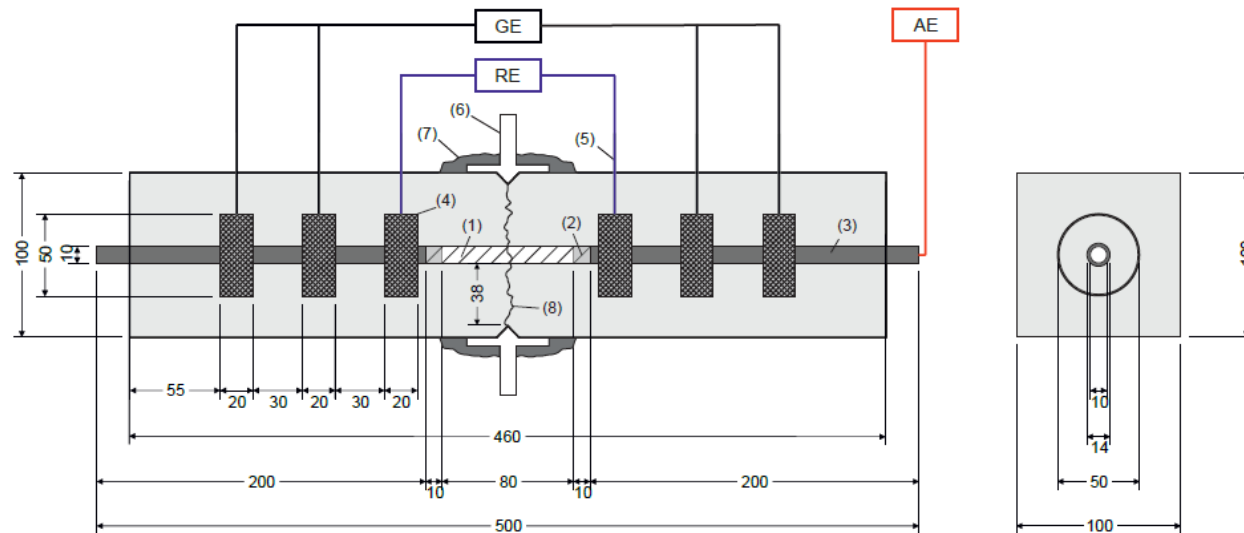
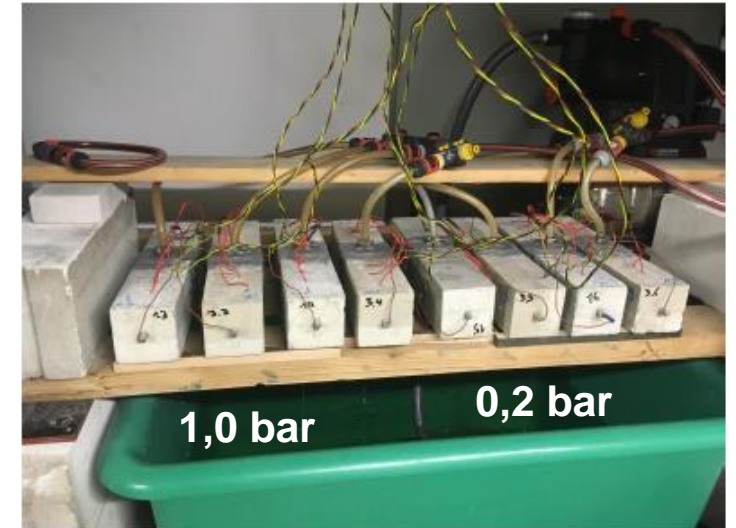
- Beton in direktem Kontakt mit weichem Wasser
- Auslaugung des Betons im Randbereich ($Ca\downarrow$)
- Verringerung des pH-Werts
- **Depassivierung** des Betonstahls im Rissbereich
- gut belüftete passive Bereiche
- **Korrosion** im Rissbereich
- Makroelementkorrosion mit ungünstigem Flächenverhältnis
- Abtransport der Korrosionsprodukte

(Pollner & Dauberschmidt 2023)

Nachbildung auslaugungsinduzierter Betonstahlkorrosion im Labor

Pollner & Dauberschmidt (2023)
Hochschule München

- Trennrisse ca. 0,25 mm
- CEM I- und CEM III/A-Betone je zwei Probekörper
- Drucklos, 0,2 bar, 1,0 bar



- | | |
|---|----------------------|
| (1) Betonstahl B500B $d_s = 10$ mm mit unbehandelter Walzhaut | AE Arbeitselektrode |
| (2) Gestrahlter Übergangsbereich des Betonstahls | GE Gegenelektrode |
| (3) Beschichteter Bereich des Betonstahls | RE Referenzelektrode |
| (4) Ti/MMO-Elektroden | |
| (5) Kabel | |
| (6) Klebepacker | |
| (7) Abdichtungsmaterial | |
| (8) Trennriss mit $w \approx 0,25$ mm | |

Alle Maße in Millimeter

Nachbildung auslaugungsinduzierter Betonstahlkorrosion im Labor

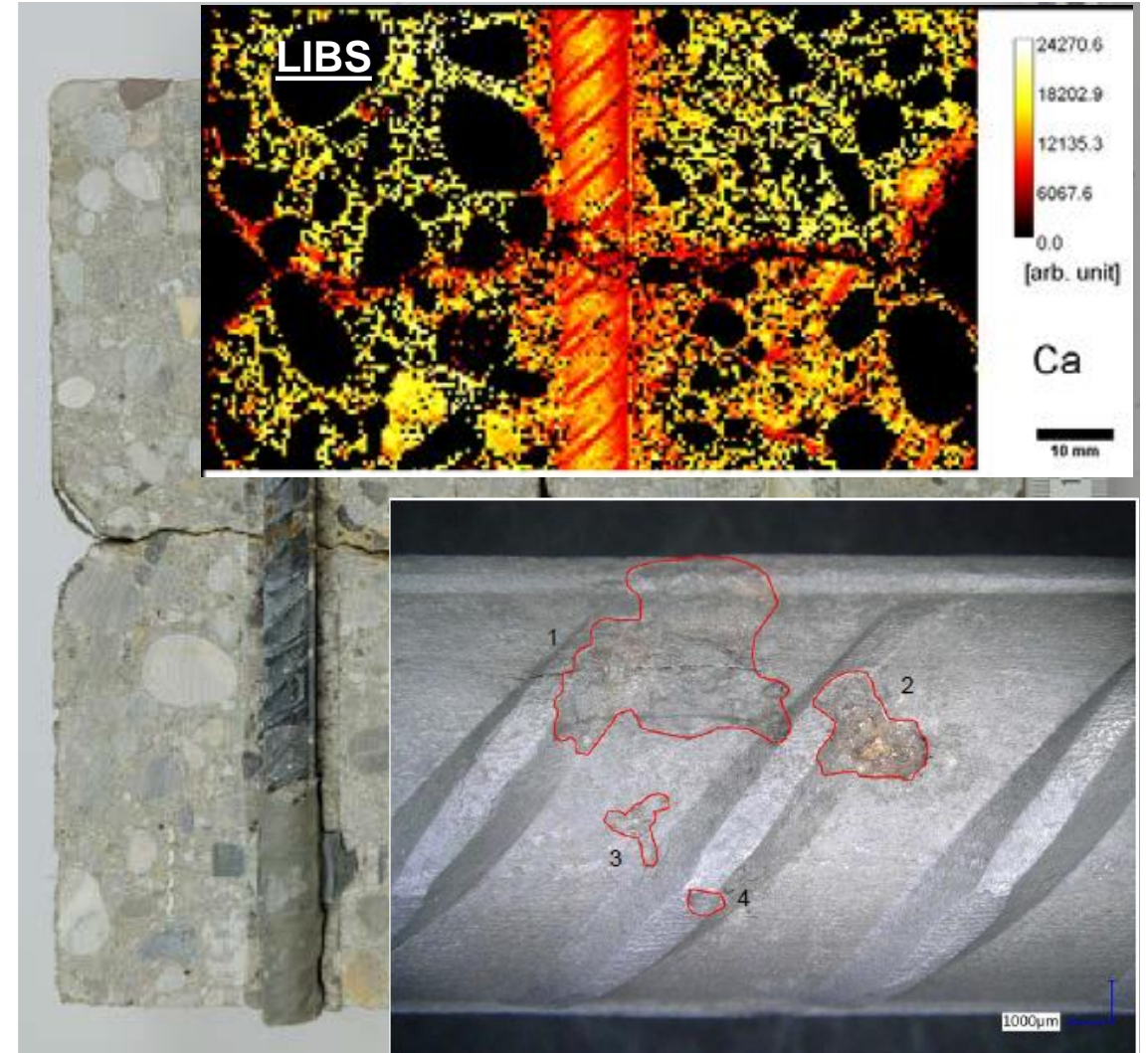
Pollner & Dauberschmidt (2023)
Hochschule München



Nachbildung auslaugungsinduzierter Betonstahlkorrosion im Labor

Pollner & Dauberschmidt (2023)
Hochschule München

- Geringere Konzentrationen von Ca im Rissbereich und in der Kontaktzone zum Betonstahl
- Einfluss nur wenige Millimeter senkrecht zur Rissebene
- Korrosion trotz nur zeitweisem Anschluss an Kathode
- Korrosionsrate
 - Anstieg mit zunehmendem Wasserdruck
 - weitestgehend unabhängig von Zementsorte
 - mit 30 bis 406 $\mu\text{m}/\text{a}$ im Bereich von Beton mit hohem Chloridgehalten und sehr hoher Luftfeuchtigkeit



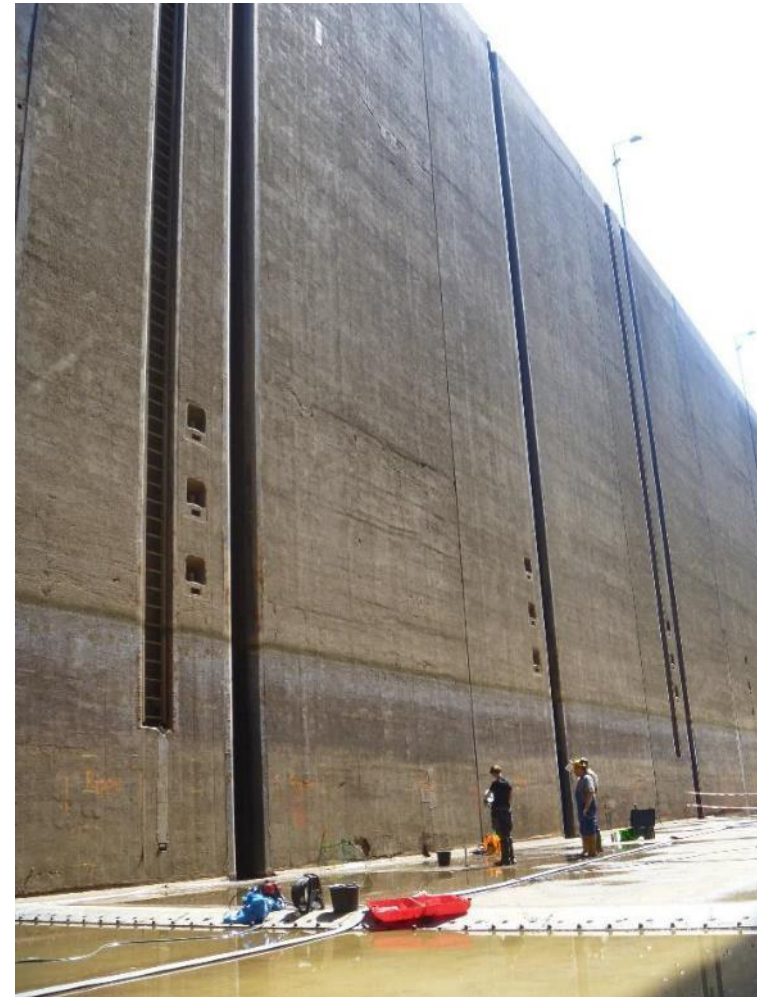
Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2

Schleuse Nr. 1, am Elbe-Seitenkanal, Baujahr 1976, Fallhöhe 23,0 m



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2

Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2

Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2

Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2

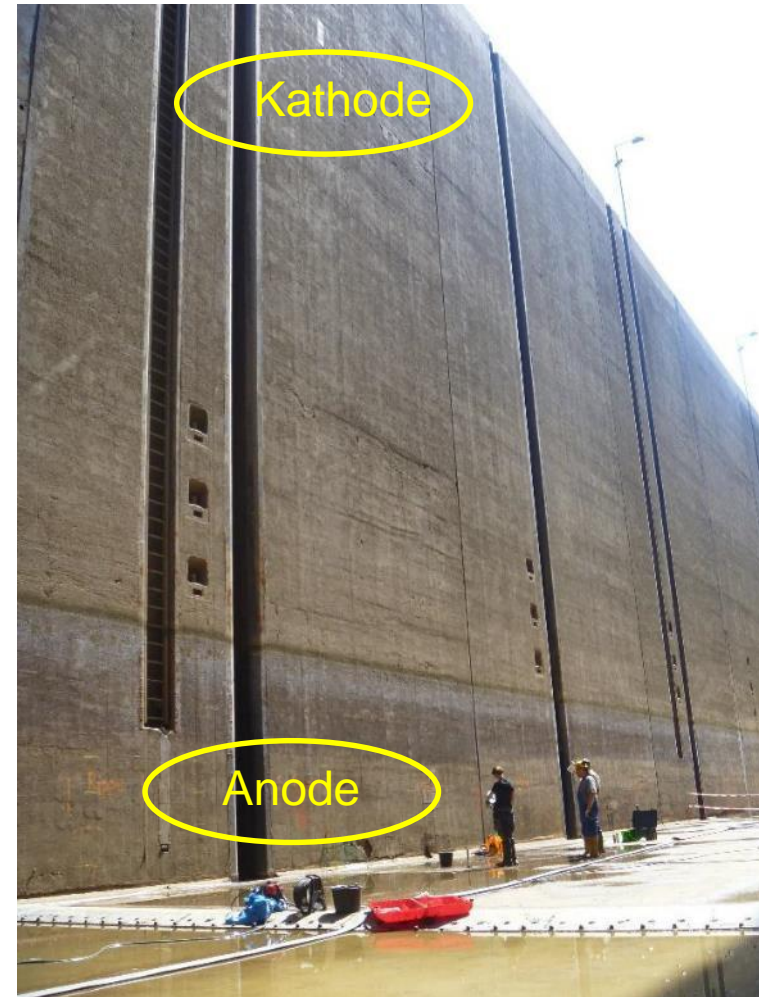
⚙️ **Bewehrungskorrosion unter Wasser
(trotz Sauerstoffarmut)?**

💡 **Ja, Sauerstoff ist am kathodisch aktiven
Bereich notwendig, nicht an der Anode!**

⚙️ **Bewehrungskorrosion im Wasser ohne
Chloride?**

💡 **Ja, Depassivierung der Bewehrung
infolge des Auslaugens des Betons
(auslaugungsinduzierte Korrosion)!**

Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2

⚙️ Bewehrungskorrosion unter Wasser
(trotz Sauerstoffarmut)?

💡 Ja, Sauerstoff ist am kathodisch aktiven
Bereich notwendig, nicht an der Anode!

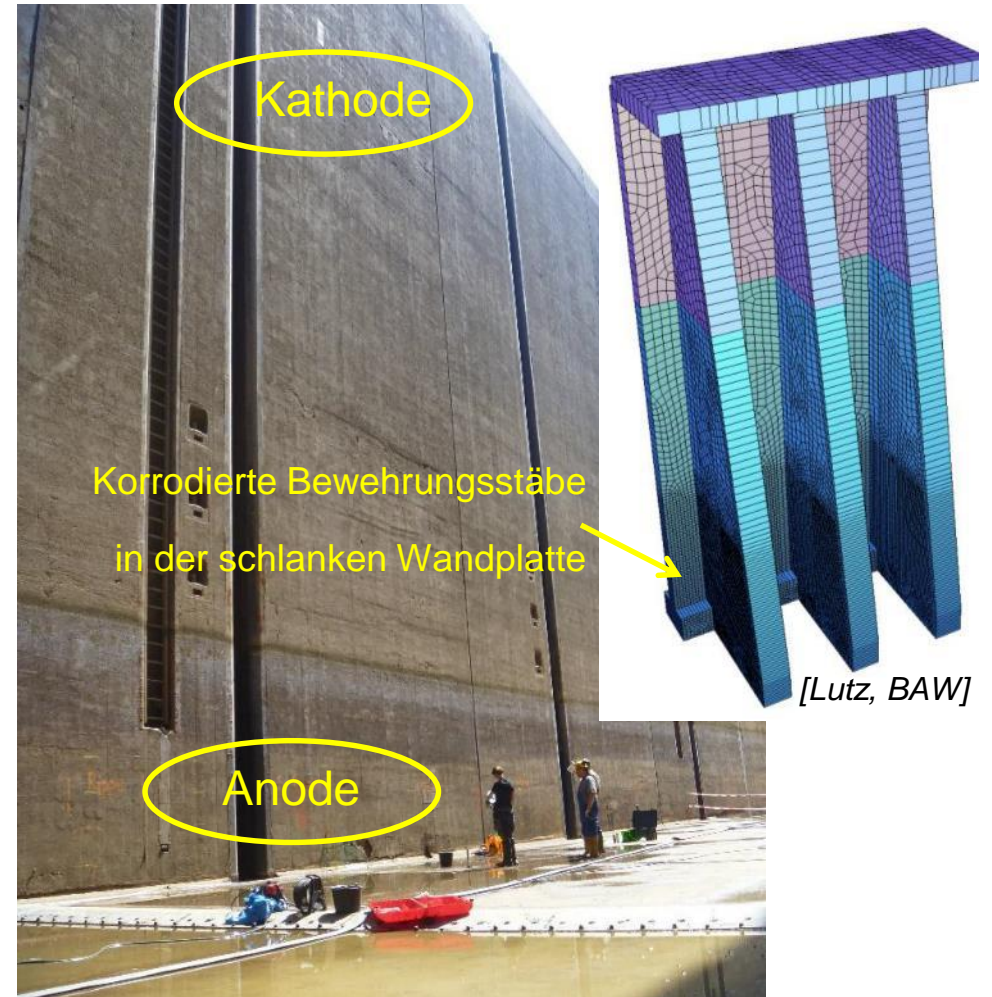
⚙️ Bewehrungskorrosion im Wasser ohne
Chloride?

💡 Ja, Depassivierung der Bewehrung
infolge des Auslaugens des Betons
(auslaugungsinduzierte Korrosion)!

⚙️ Wieso Abriss der Bewehrung?

💡 Aufgrund mechanischer Überbeanspruchung
der Bewehrung!

Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2



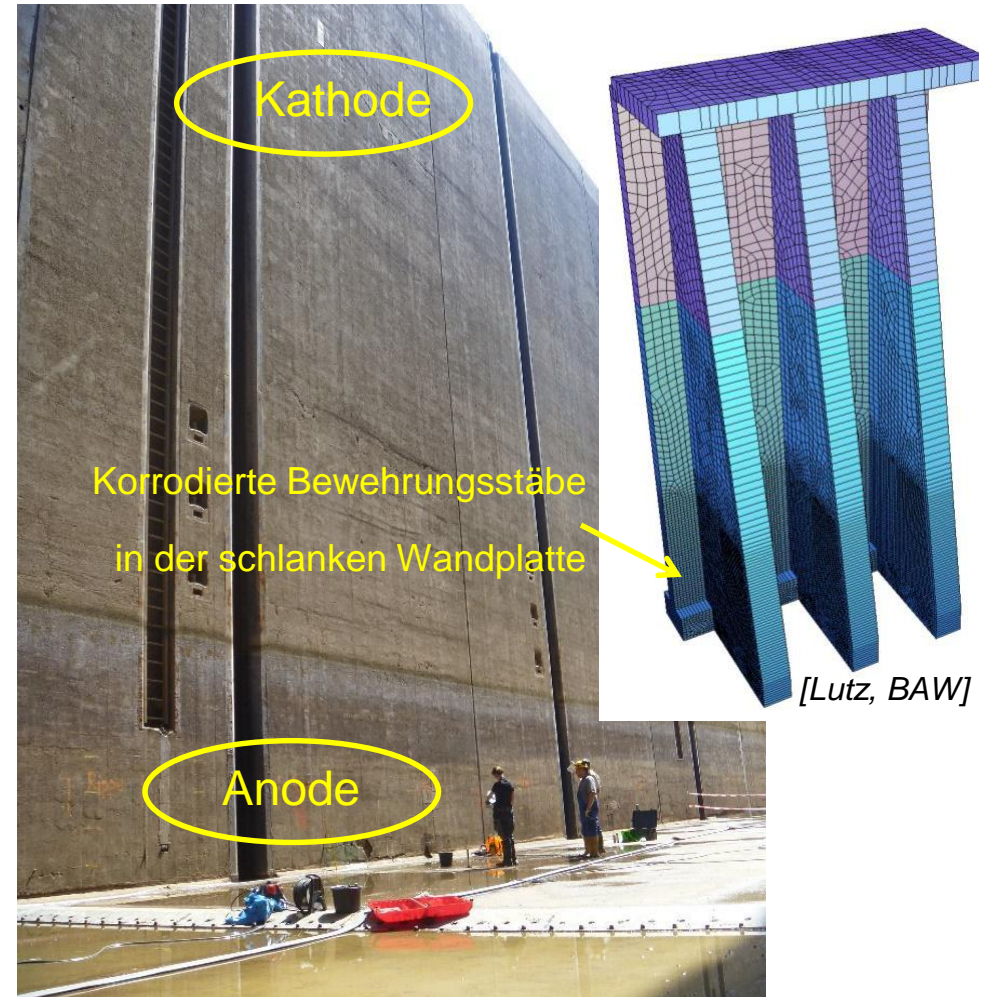
Was ist das für ein Schädigungsmechanismus?



Spannungsrissskorrosion:
hohe Zugspannung (oder eine innere Spannung, z. B. aufgrund Schweißnaht) und sehr korrosives Medium.

Schwingungsrissskorrosion:
zyklische mechanische Belastung und leicht korrosives Medium.

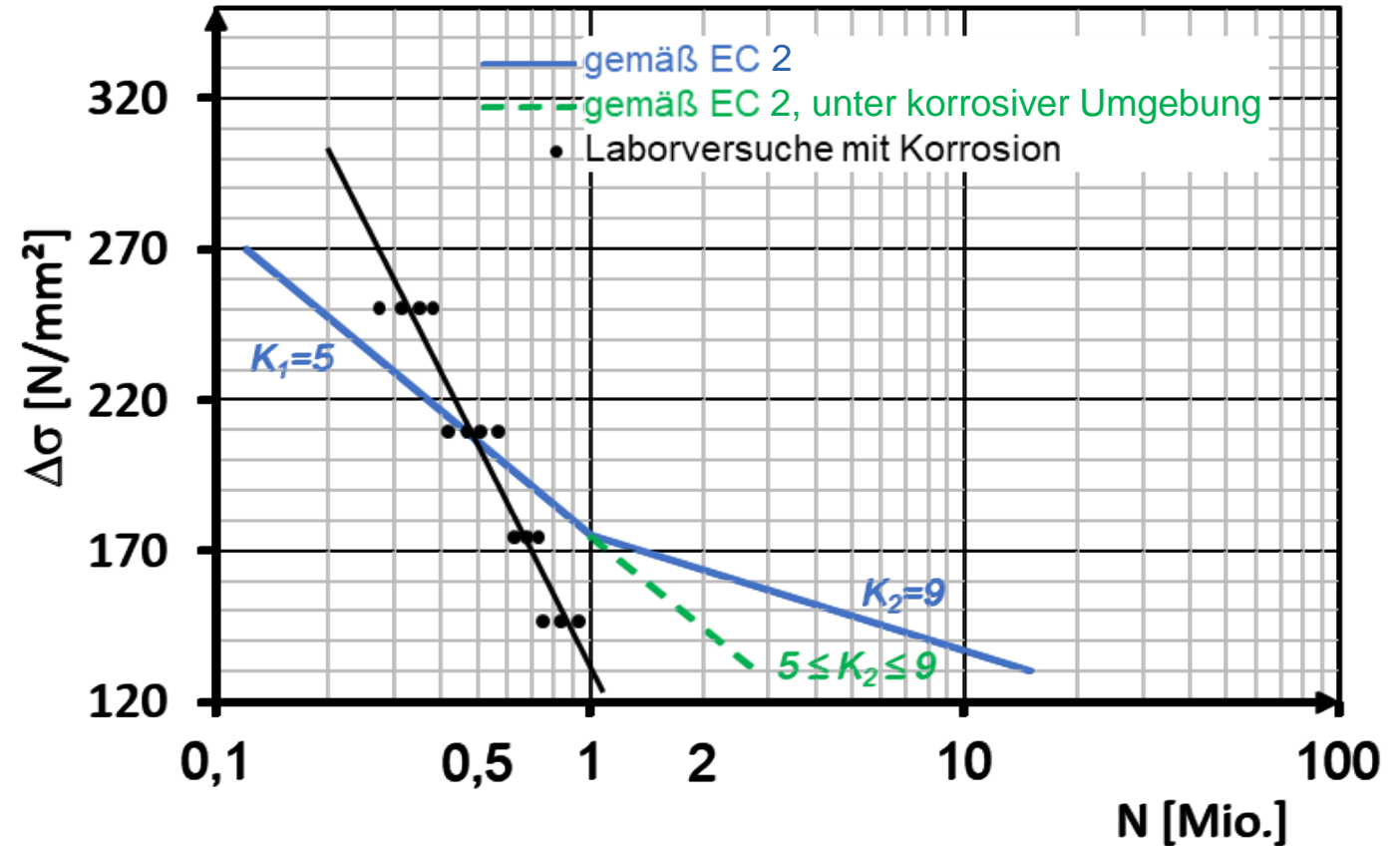
Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Schwingungsrisskorrosion: Ermüdung der Bewehrung in korrosiver Umgebung

➤ Schädigungsmechanismus bei Schwingungsrisskorrosion:

- Einleitung von Anrissen an der Bewehrungsoberfläche infolge Korrosion
 - Ausbreitung der Risse durch zyklische Zugbeanspruchung
 - spröder Bruch ohne Einschnürung
- ! ungünstigerer Verlauf der Wöhler-Linien infolge Korrosion als derzeit in EC2 berücksichtigt (mit $k_2 = k_1 = 5$) !
- ! Abhängigkeit der Wöhler-Linien von der Belastungsfrequenz: je geringer desto kritischer !
- Ermüdungsnachweis für Uelzen I erbracht.



(aus: Volkwein, Weirich, Gehlen, cbm TUM)

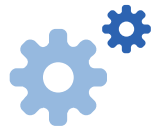
Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 2



Was ist das für ein Schädigungsmechanismus?



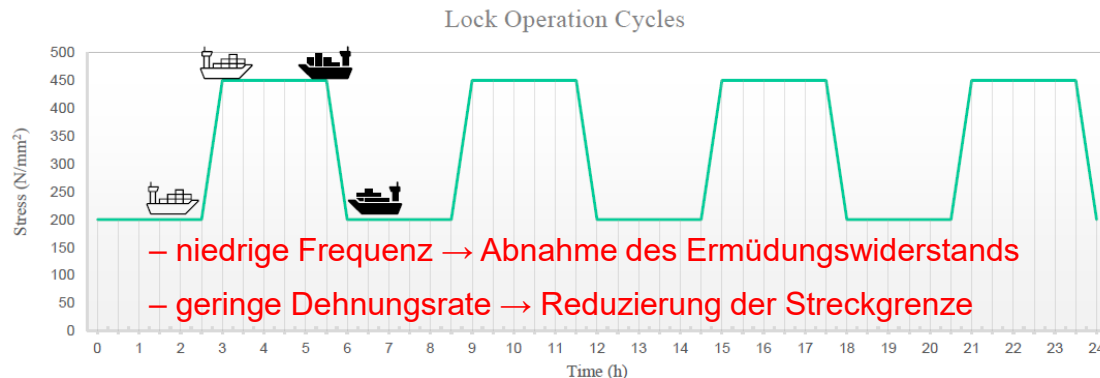
Vermutlich dehnungsinduzierte Betonstahlkorrosion!



Wie gefährdet sind unsere Bestandsbauwerke und Bauweisen?

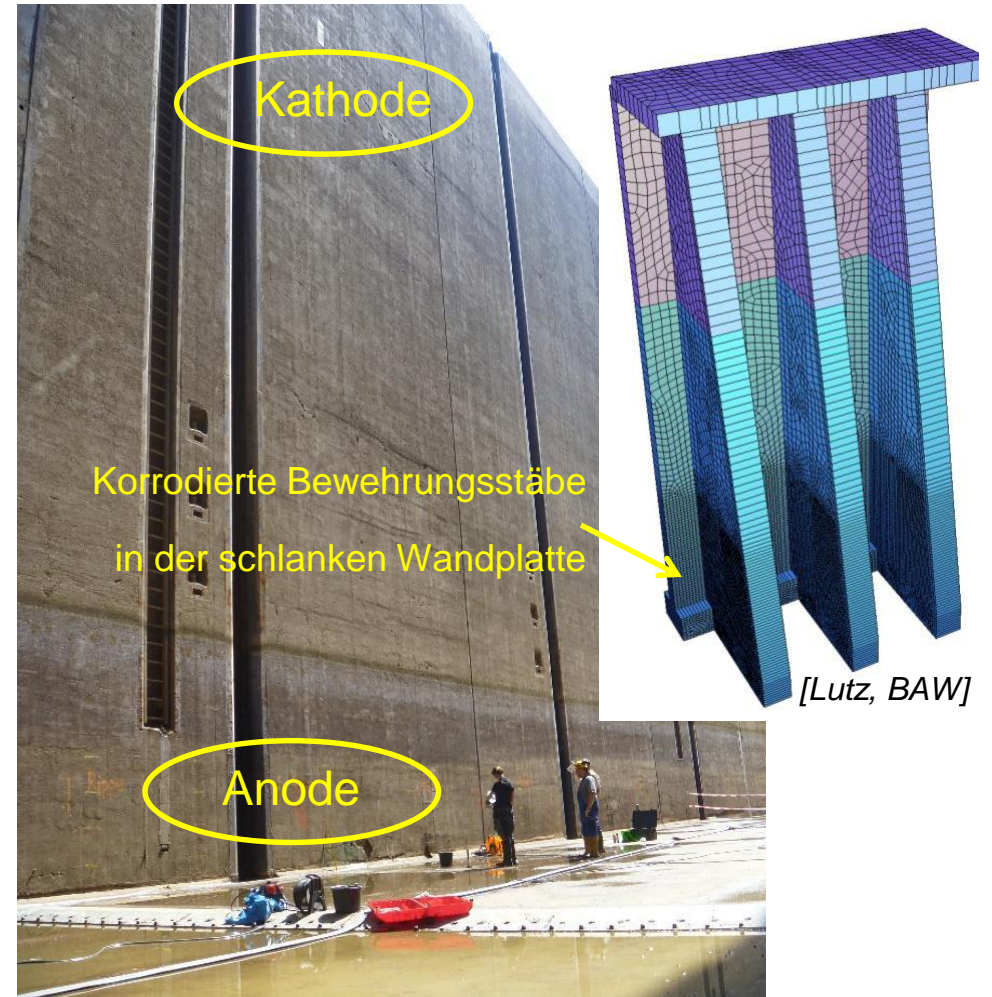


Schäden nur in stark geschädigten horizontalen Arbeitsfugen von schwach bewehrten (oder schlanken) Bauteilen!



(Takriti, Keßler, HSU 2021)

Schleuse Nr. 2, Baujahr 1976



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3

Schleuse Nr. 3

am Mittellandkanal

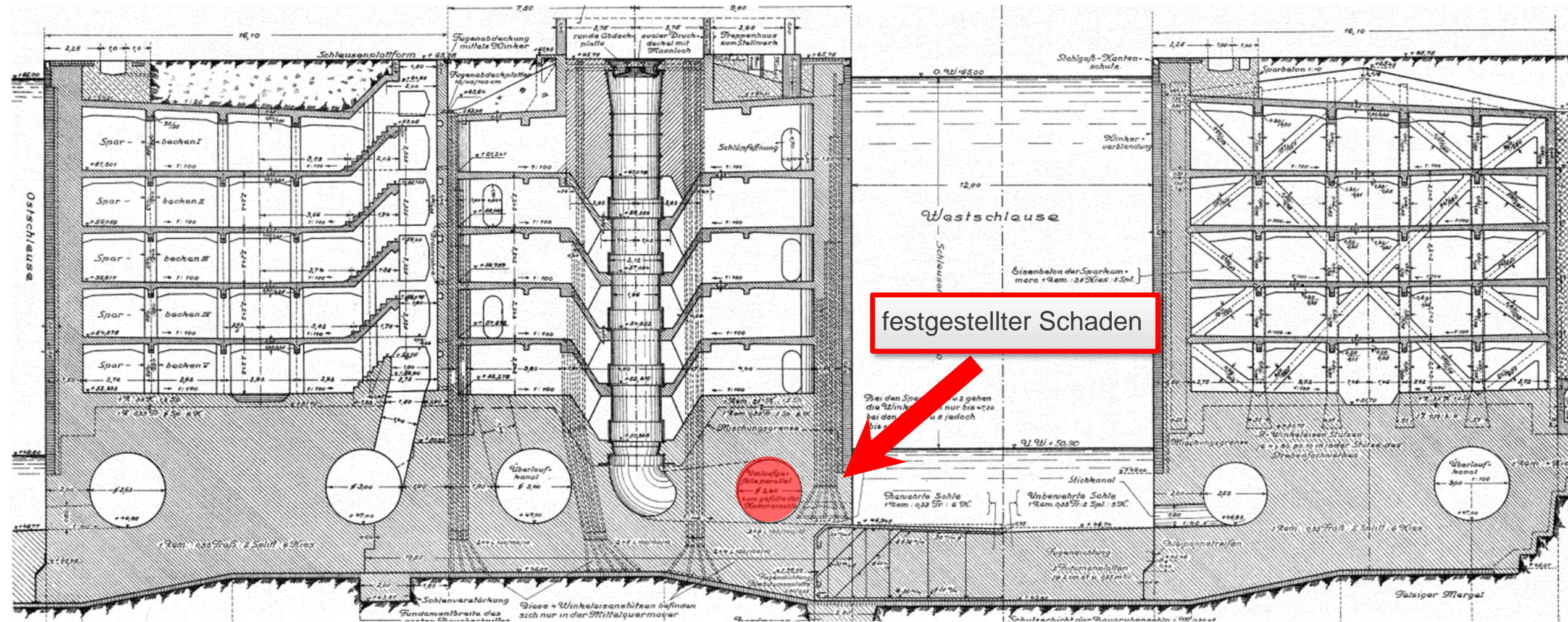
Baujahr 1928

(größte Binnenschleuse Europas ihrer Zeit)

Fallhöhe 14,7 m

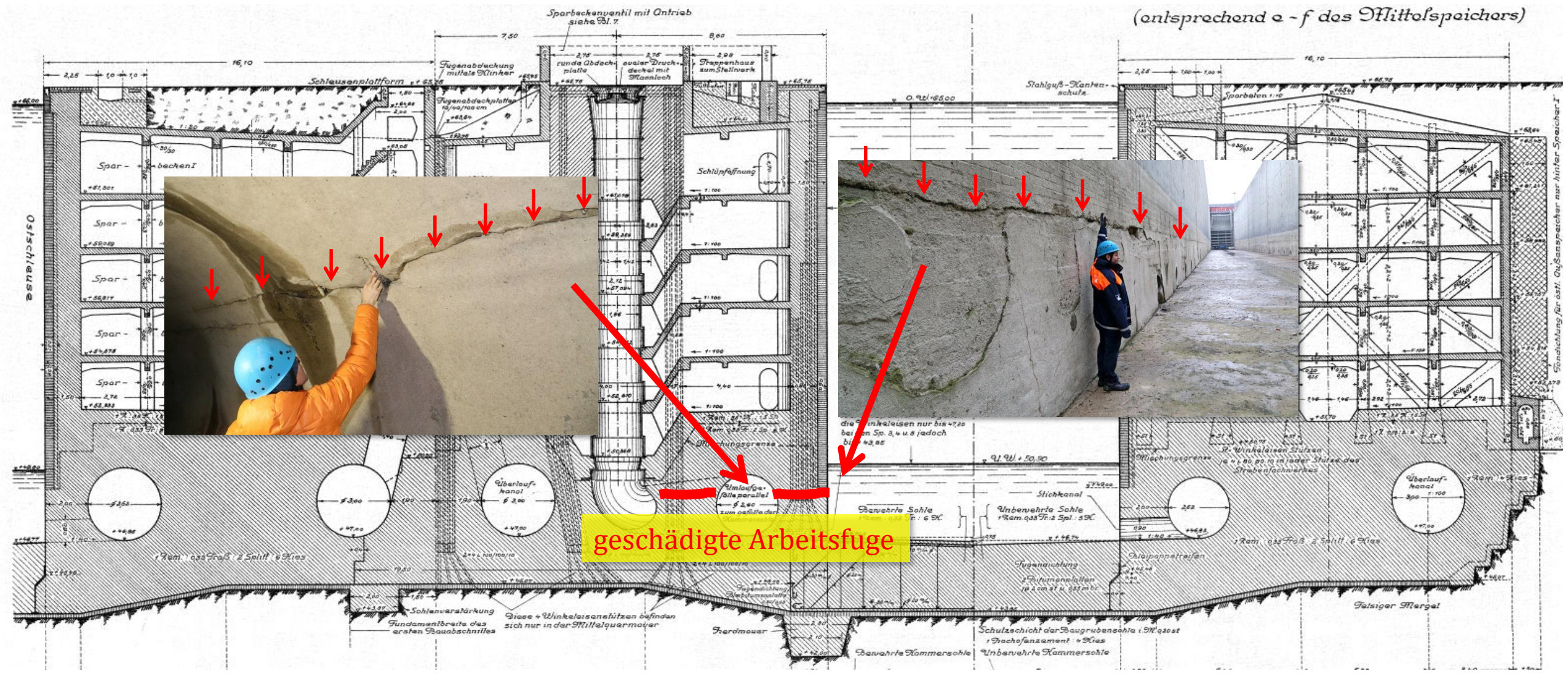


Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3

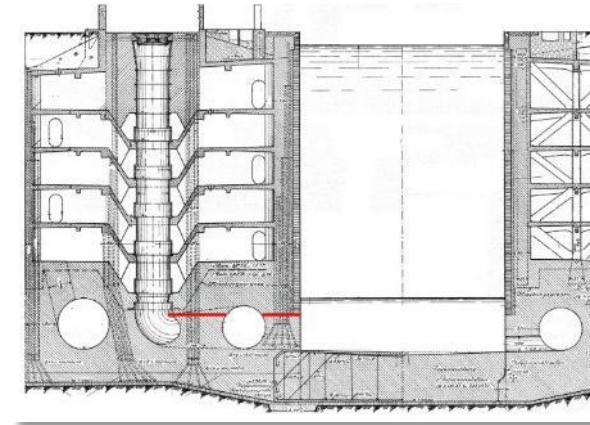


Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3

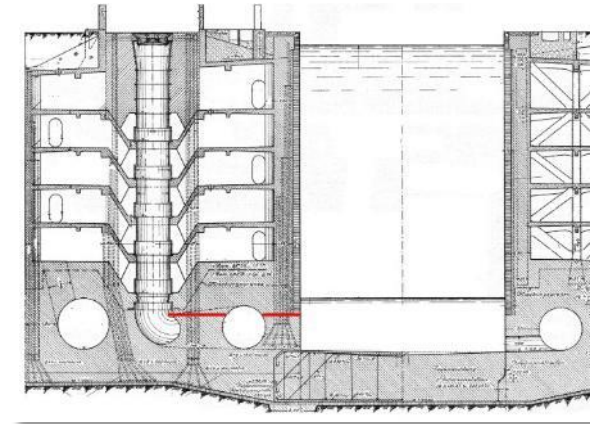
(entsprechend e - f des Mittelspächers)



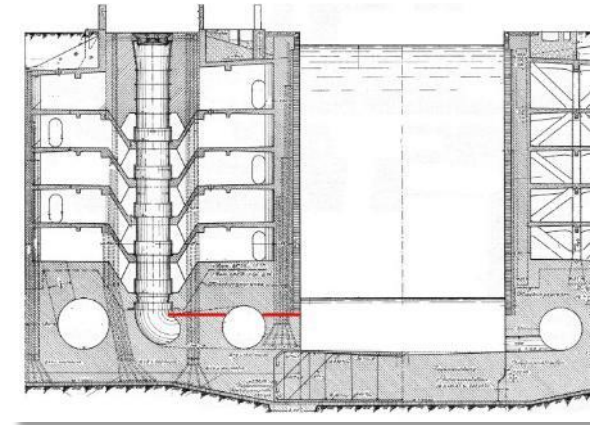
Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



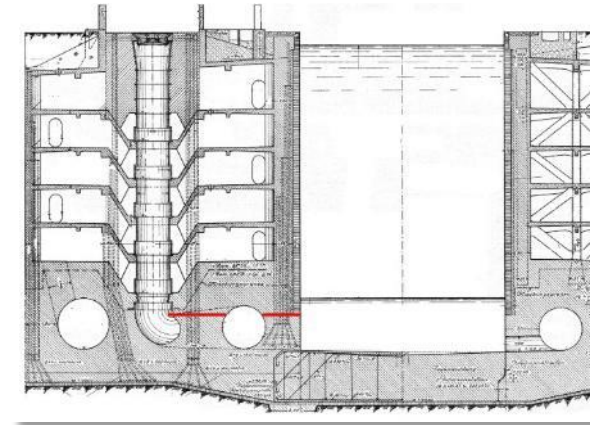
Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



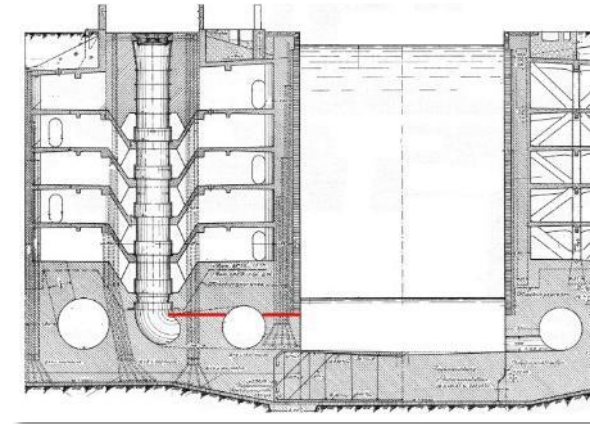
Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3

vollflächig und in beiden Wänden der Kammer



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3



Betonstahlkorrosion in Rissen mit Süßwasserbeaufschlagung – Beispiel Nr. 3

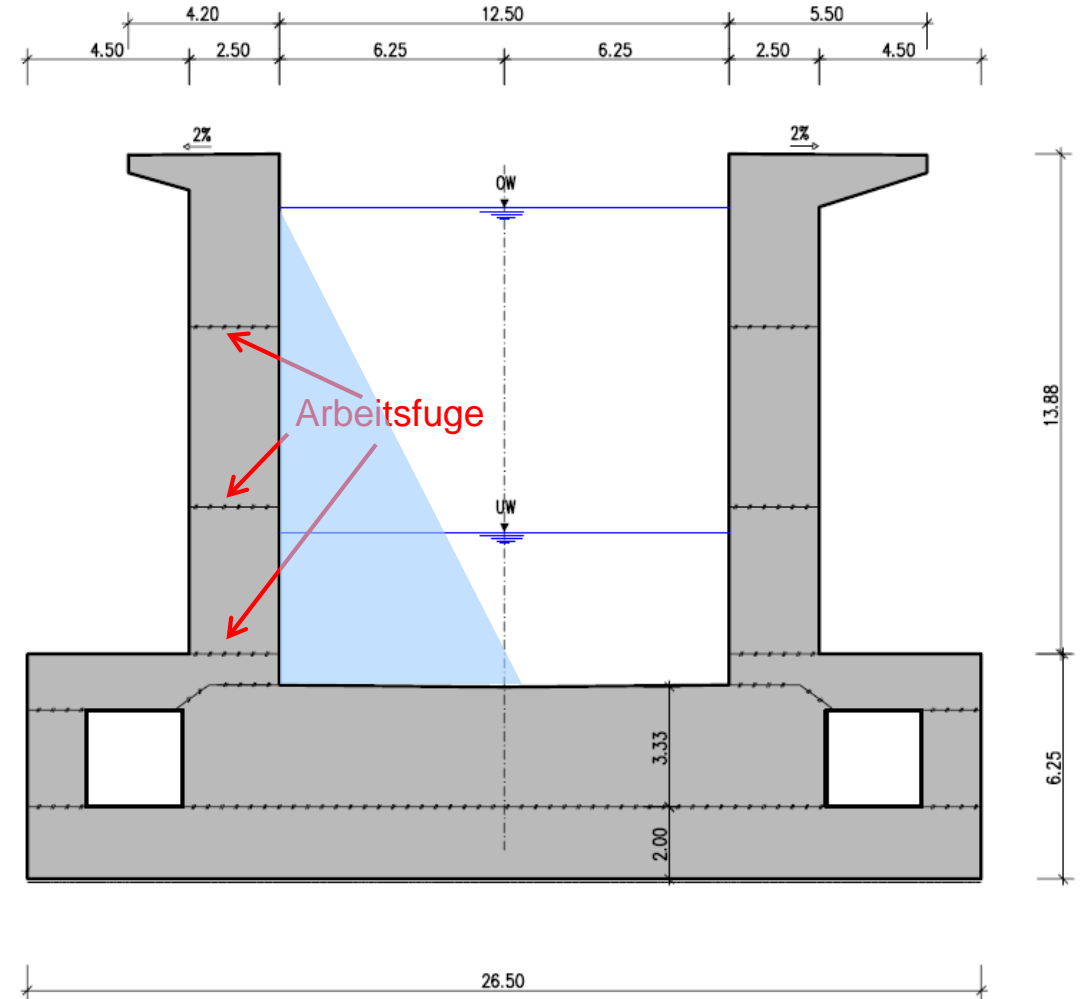


Vorbeugende Maßnahmen

- Sorgfältige Ausbildung von horizontalen Arbeitsfugen, auch unterhalb des Unterwasserstands.
- (Nachweis der Ermüdung bei nicht vorwiegend ruhender Belastung.)



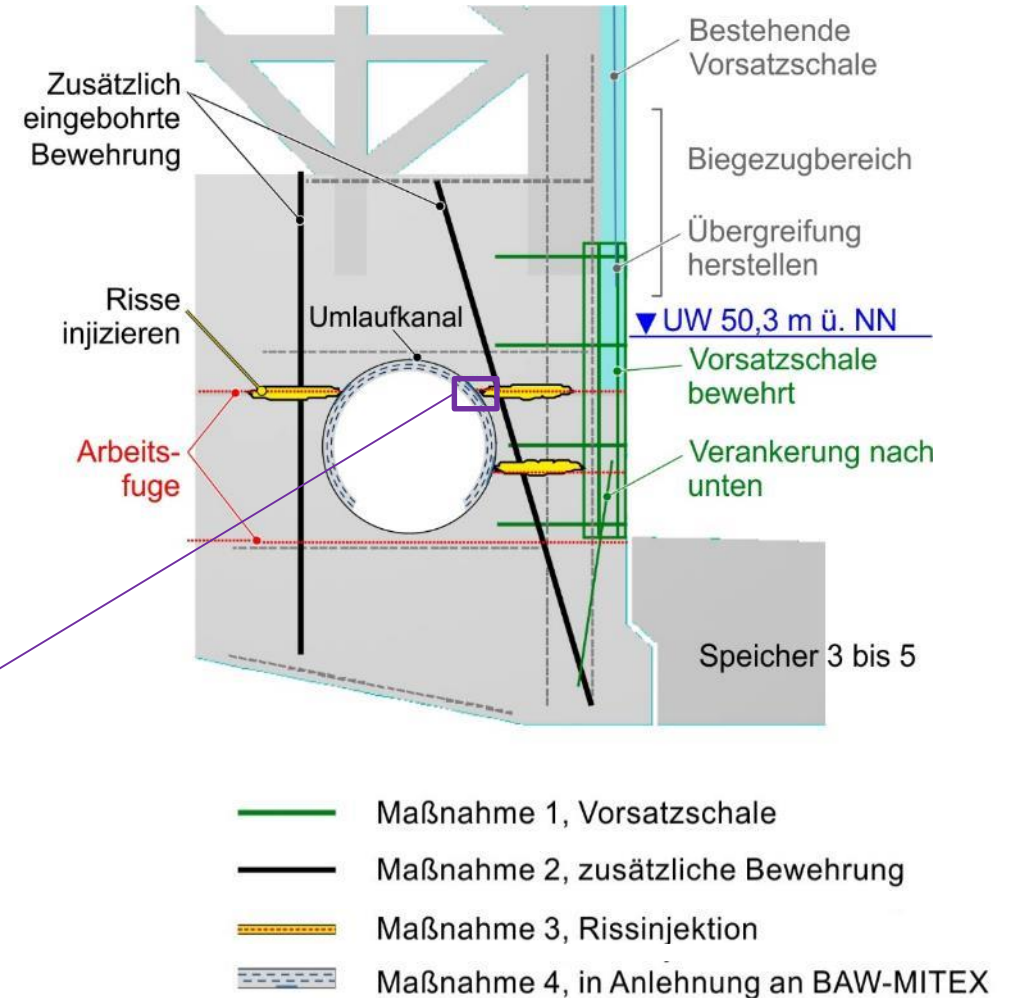
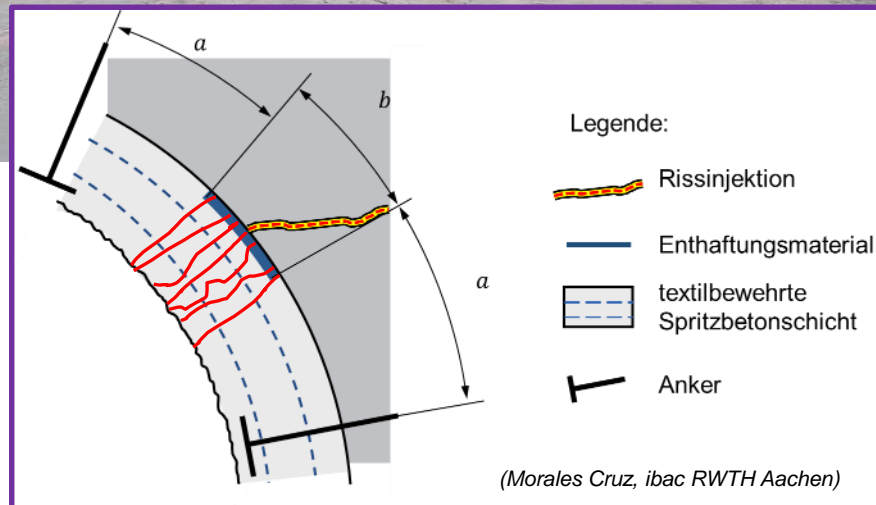
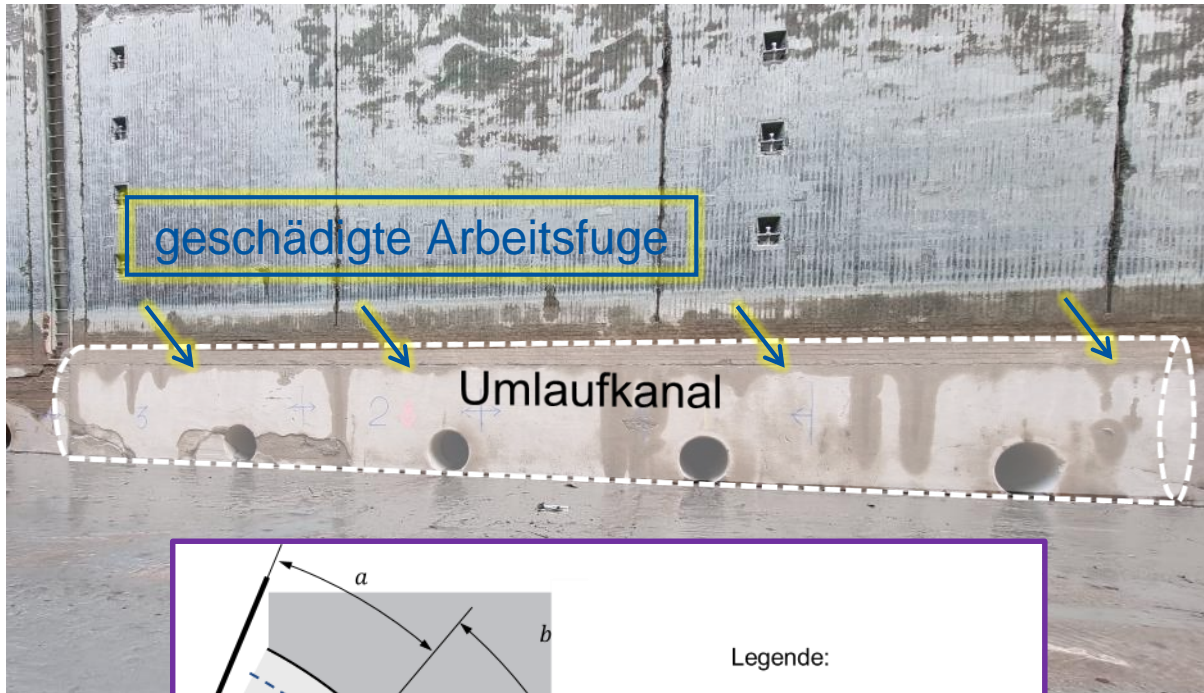
Schematischer Querschnitt einer Schleusenammer



Instandsetzung geschädigter Bereiche

- Mögliche Instandsetzungsmaßnahmen (auch in Kombination)
 - Unterbinden des weiteren Wasserdurchtritts
 - Repassivierung der Bewehrungsoberfläche mittels Bsp. Injizieren mit zementgebundenen Baustoffen → Anstieg pH-Wertes
 - Kathodischer Korrosionsschutz
 - Betonabtrag, Bewehrungsergänzung und Reprofilierung bei standsicherheitsrelevanter Querschnittsminderung der Bewehrung

Probeinstandsetzung an der Schleuse Nr. 3 (10.2022 – 06.2023)



Probeinstandsetzung an der Schleuse Nr. 3 (10.2022 – 06.2023)







Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Bundesanstalt für Wasserbau
76187 Karlsruhe

www.baw.de

Dr.-Ing. Amir Rahimi
amir.rahimi@baw.de