

ISER Kursleiterfortbildung 2026, 21.09.-23.09.2026
Handwerkskammer Aachen

WASSERSTOFFINDUZIERTER SPANNUNGSRISSE AN SPANNSTÄHLEN AM BEISPIEL DER CAROLABRÜCKE

Gino Ebell, Andreas Burkert, Lando Seifert, Thoralf Müller

Über die BAM

Standorte in Berlin und Brandenburg



Unser Auftrag: *Sicherheit in Technik und Chemie*



1600 Beschäftigte an 4 Standorten

Über den Fachbereich 7.6

Korrosion und Korrosionsschutz

- Abteilung 7 Bauwerkssicherheit
- Team mit ca. 20 Beschäftigten
- Chemie, Bauingenieurwesen, Werkstoffwissenschaften



Unterscheidung der Korrosionsarten

Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung

- Flächenkorrosion
- Lochkorrosion
- Spaltkorrosion
- galvanische Korrosion
- ...

Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung

- Spannungs(riss)korrosion
- Schwingungs(riss)korrosion
- Erosionskorrosion
- Kavitationskorrosion
- ...

Begrifflichkeiten nach Norm

DIN EN ISO 8044:2025-05



4.30

Spannungskorrosion

Vorgang, bei dem **Dehnung** eines Werkstoffs, in der Regel eines Metalls, als Folge von **Eigen- oder aufgebrachter Spannung** und **Korrosion** (3.1) dieses Werkstoffs beteiligt sind

4.31

Spannungsrissskorrosion

Rissbildung als Folge von *Spannungskorrosion* (4.30)

4.32

Wasserstoffversprödung

Vorgang, der zu einer **Abnahme der Zähigkeit** oder des **Dehnungsvermögens** eines Metalls als Folge der **Absorption von Wasserstoff** führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Wasserstoffversprödung tritt häufig zusammen mit einer Wasserstoffentwicklung auf, z. B. durch *Korrosion* (3.1) oder Elektrolyse. Dies kann zu Rissbildung führen.

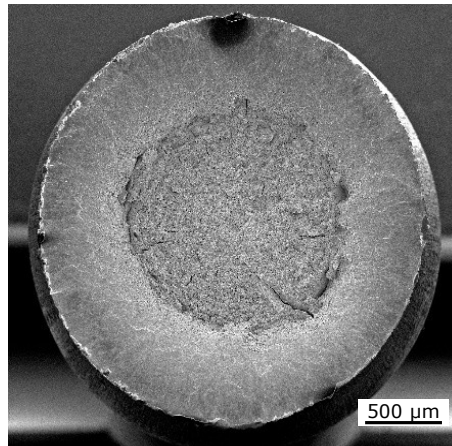
Spannungs(riss)korrosion mit fatalen Folgen



Typische Bruchmerkmale

duktiler Bruch vs. spröder Bruch

duktil
gebrochene
Spannstahllitze



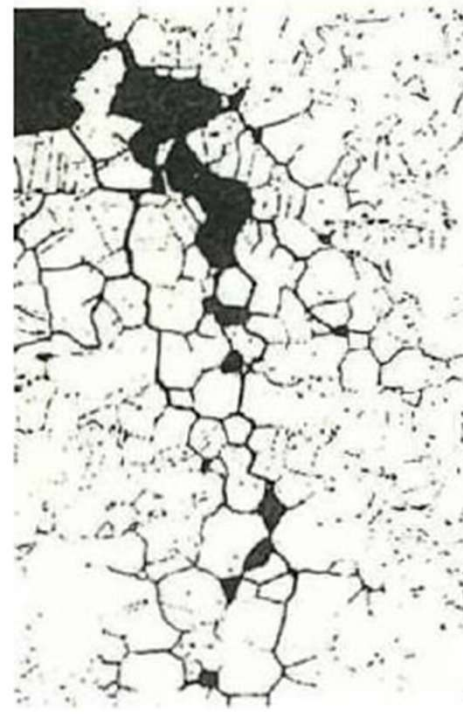
spröde
gebrochener
Spannstahldraht



Rissausbreitung im Gefüge



Transkristalline SpRK



Interkristalline SpRK

Einflüsse auf die Spannungsrissskorrosion

Werkstoff

- Typ
- Zusammensetzung
- Gefügezustand
- Oberfläche

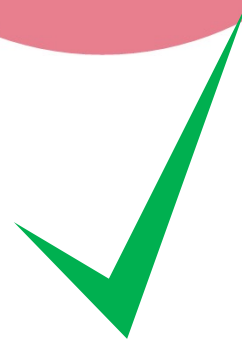
Elektrolyt

- Temperatur
- Zusammensetzung
- pH-Wert
- Strömung

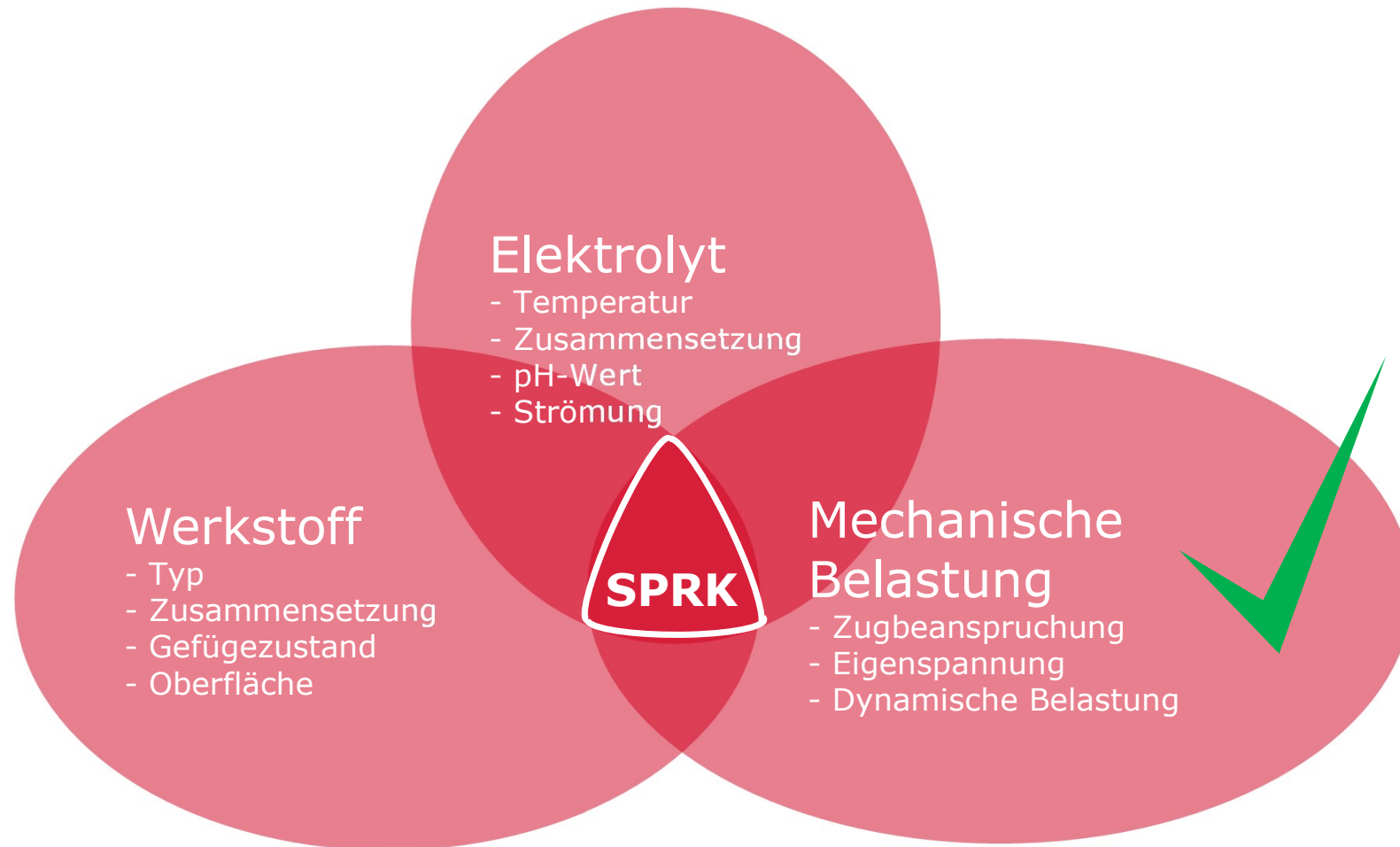
SPRK

Mechanische Belastung

- Zugbeanspruchung
- Eigenspannung
- Dynamische Belastung



Einflüsse auf die Spannungsrissskorrosion



Wasserstoffversprödung

Was ist die Quelle des Wasserstoffs?

H₂: Wasserstoffgas = molekularer Wasserstoff, kann nur bei hohen Drücken in Metalle eindringen

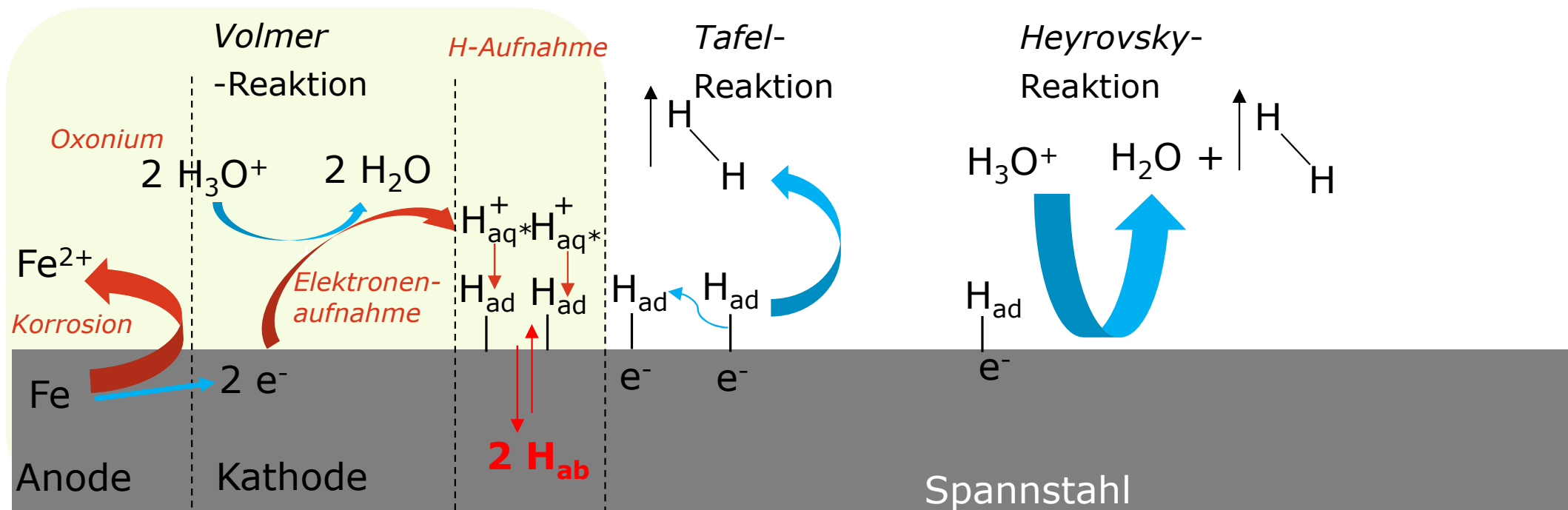
H: Wasserstoffatom = atomarer Wasserstoff, kann durch Metalle diffundieren

- Angebot über saure Feuchtfilme an der Oberfläche
- aus vorgelagerten Korrosionsreaktionen durch Hydrolyse (z.B. bei Loch- und Spaltkorrosion)

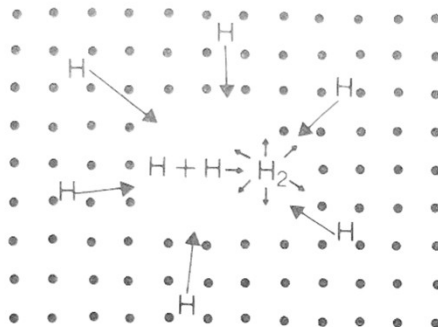
Wasserstoffinduzierte SpRK setzt immer Angebot, Adsorption und Absorption von atomarem Wasserstoff über die Metalloberfläche voraus und führt zur Wasserstoffversprödung.

Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion

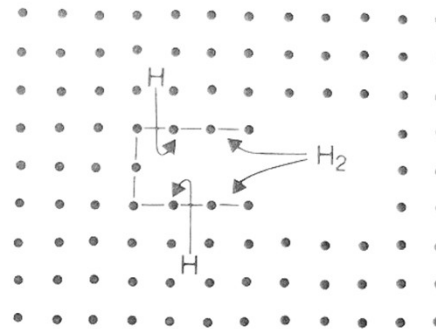
Korrosion von Stahl bei pH-Wert <5



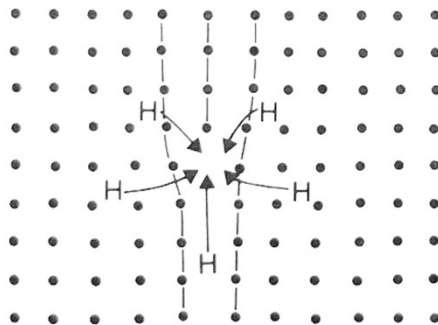
Theorien zur Wirkung des Wasserstoffs im Metallgitter



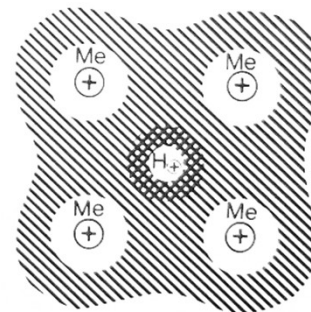
Drucktheorie



Adsorptionstheorie



Versetzungstheorie



Dekohäsionstheorie

Quelle: E. Wendler-Kalsch in
„Wasserstoff und Korrosion“,
2. Aufl., Hrsg. D. Kurn, 2000

Historie der H-induzierten SpRK an Spannstählen



- Phänomen ist seit vielen Jahrzehnten bekannt
 - *1929 wird bereits über Schadensfälle auf Brückenbaustellen in den USA berichtet, Drahtbrüche an vergüteten Spannstählen durch Wasserstoffversprödung an den in Ringen angelieferten Drähten nach kurzer Lagerung, Folge: kein weiterer Einsatz vergüteter Spannstähle in den USA*
- werkstoffspezifische Empfindlichkeit in Abhängigkeit von Festigkeit, Gefüge und den Belastungszuständen wurde erkannt
- medienseitige Einflüsse bei verschiedenen Schadensfällen teilweise unübersichtlich:
 - Schadensphänomen kann bei fehlerfreier Bauausführung in alkalischer Umgebung des Betons nicht auftreten
 - kritische Phase überwiegend vor dem Einbau (Transport, Lagerung) und nach dem Einbau der Spannstähle vor dem Verpressen der Hüllrohre

Publizierte Spannbetonschadensfälle in Deutschland



Spannbetonbauwerk (-brücke) und Baujahr		Verwendeter Spannstahl	Schadensfall	Literatur	Alter
Roof of factory in Lohr	1959	Neptun N40, St 145/160	Anrisse gefunden in 1993	[1]	34 yrs.
Roof of factory in Mannheim	1961	Neptun N40, St 145/160	Einsturz 1989	[2]	28 yrs.
Roof of factory in Mühlacker	1962	Neptun N40, St 145/160	Einsturz verhindert durch Unterstützung in 1992	[1]	30 yrs.
Roof of factory in Berlin	1964	Neptun N40, St 145/160	Anrisse und Brüche bei Rückbau gefunden	[1]	27 yrs.
Roof of factory Schrobenuhausen	1965	Sigma neu, St 145/160	Einsturz verhindert durch Unterstützung in 1995	[2]	27 yrs.
Bridge Hohenzollerndamm, Berlin	1958	Neptun N40, St 145/160	Anrisse gefunden in 1998	[1]	40 yrs.
Bridge Overpass in Bronnzell	1959	Neptun N40, St 145/160	Anrisse bei Rückbau 1984 gefunden	[1]	25 yrs.
Bridge Eisenbrücke, Berlin	1964-68	Hennigsdorfer, St 140/160	Anrisse in Querspannglieder gefunden bei Wiederaufbau in 1998	[1]	30 yrs.
State road L26 Overpass structure in Prenzlau	1971-72	Hennigsdorfer, St 140/160	Abriss aufgrund von Längsrissen 2003	[1]	31 yrs.
Federal road B5 Wustermark	1957-58	Hennigsdorfer, St 140/160	Brüche gefunden	[1]	43 yrs.
Bridge Altstädter Bh. in city of Brandenburg a.d.H.	1968-69	Hennigsdorfer, St 140/160	Abriss aufgrund von Längsrissen 2021, Versagen der Spannglieder über den gesamten Querschnitt	[3, 4]	52 yrs.
Bridge Eisenbrücke, Berlin	1964-68	Hennigsdorfer, St 140/160	Abriss aufgrund von Längsrissen 2022	[1]	52 yrs.
Carolabrücke, Dresden	1971	Hennigsdorfer, St 140/160	Einsturz in 2024	[5, 6]	53 yrs.

[1] J. Lingemann, *Ph.D. Thesis, TU München, Germany, Europe*, 2014.

[2] U. Nürnberger, *federation internationale du beton (fib)*, Lausanne, Switzerland, 2003, vol. bulletin 26.

[3] F. Kaplan, O. Steinbock, K. Saloga, G. Ebell, and S. Schmidt, *Bautechnik*, vol. 99, no. 3, pp. 222–230, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/bate.202200008>

[4] O. Steinbock, T. Bösch, G. Ebell, F. Kaplan, and G. Marzahn, *Beton- und Stahlbetonbau*, Article vol. 117, no. 8, pp. 572–580, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/best.202200051>

[5] S. Marx et al., "Einsturz der Carolabrücke in Dresden Teil 1," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. n/a, no. n/a, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/best.202500029>

[6] S. S. Scheerer, G.; Fiedler, M.; Ritter, R.; Marx, S.; Ebell, G.; Marzahn, G., 34. *Dresdner Brückenbausymposium*, Dresden, 2025, 15.

Empfindliche Spannstahldrähte

DIN EN ISO 15630-3: 2025-11, Anhang B

Vorspannung: 80 % R_m , Elektrolyt: 20% NH_4SCN (22 ± 3)°C,
kathod. Polarisation: 0,125 mA cm⁻², polierte Oberfläche

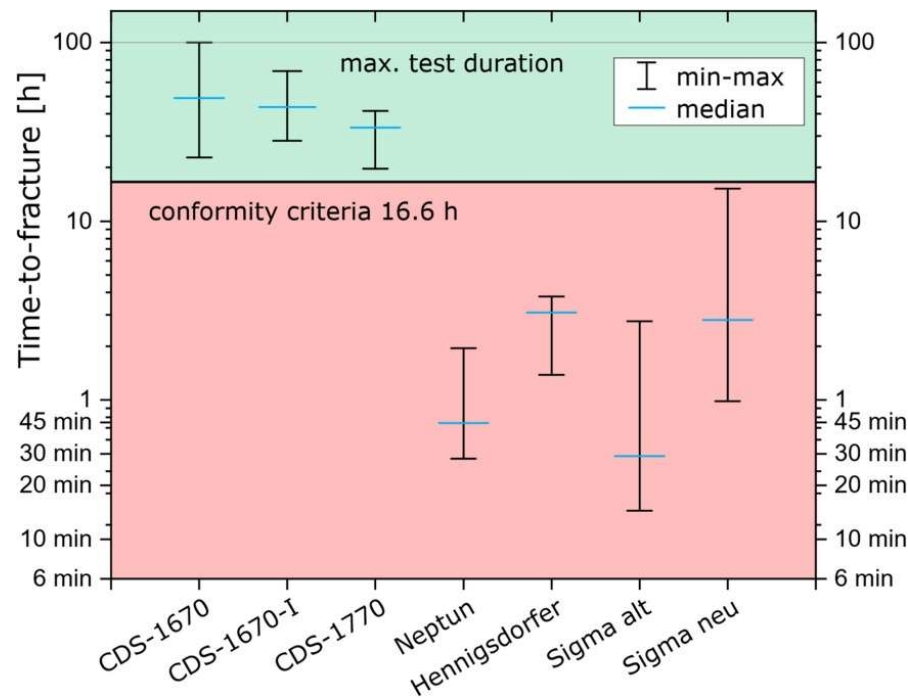
Hochempfindlich:

vergütete Spannstahldrähte:

- Neptun
- Hennigsdorfer
- Sigma alt
- Sigma neu

Robust:

- kaltgezogene Drähte
(engl.: cold-drawn steels, CDS)
bis 1860 MPa Nennfestigkeit



Quelle: Lando Seifert, Thoralf Müller, Dirk Bettge, Jörg Moersch, Bernd Isecke, Gino Ebell,
Stress Corrosion Tests for Prestressing Steels—Part 2: Susceptibility of Quenched and Tempered Wires—Influence of Chromium
Materials & Corrosion, First published: 25 August 2025, <https://doi.org/10.1002/maco.70033>

Vorgehen, Bewertungskriterien

Handlungsanweisung Spannungsrisskorrosion



1. Wiederkehrende Prüfung in einem 6 Jahres Turnus
2. Nachrechnung und Überprüfung ob ein Riss vor Bruch Kriterium gegeben ist
3. Bei Identifikation eines der Kriterien erfolgt ein verkürztes Prüfintervall von drei Jahren anstelle von sechs Jahren
4. Ist eine Nachrechnung nicht möglich, muss eine Spannstahlbeprüfung erfolgen (Nachweis der Rissfreiheit)

Brückenbauwerk gem. Handlungsanweisung geprüft

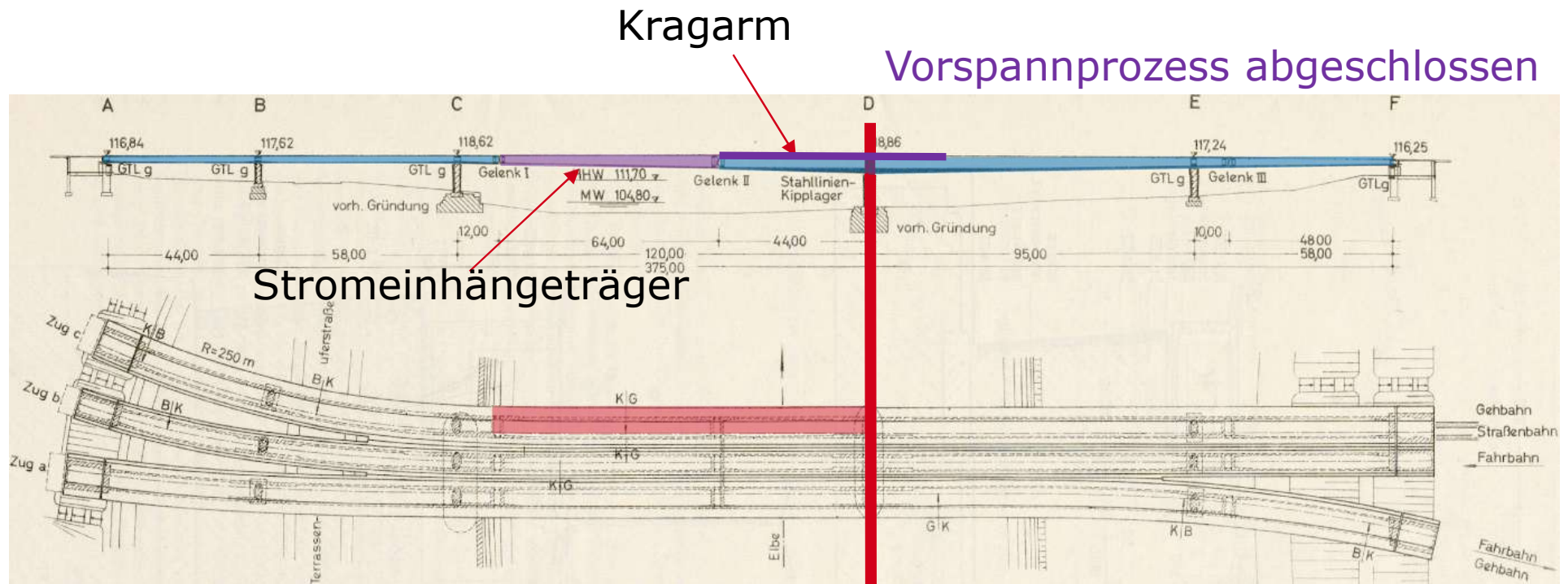


Quelle: Ebell

Einsturz trotz Nachweis des Riss vor Bruch Kriterium!

Carolabrücke in Dresden

Gerbergelenkträger mit drei Gelenken



Spannstahluntersuchungen bei anfälligen Spannstählen im Labor

Öffnung des Spannbetonbauwerks:

- Entnahme von Spannstahlproben und Verpressmörtel
- Dokumentation des Korrosionszustandes des Hüllrohres innen und außen
- Dokumentation von Rissen im Bereich der Entnahmestelle

Im Labor:

- Anrissprüfung MT
- Legierungszusammensetzung mittels FES bestimmen
- Zugfestigkeit
- Metallografische Untersuchungen

Gerissene Spanndrähte und Betonstähle Bilder nach einem Regenereignis



Quelle: Gino Ebell

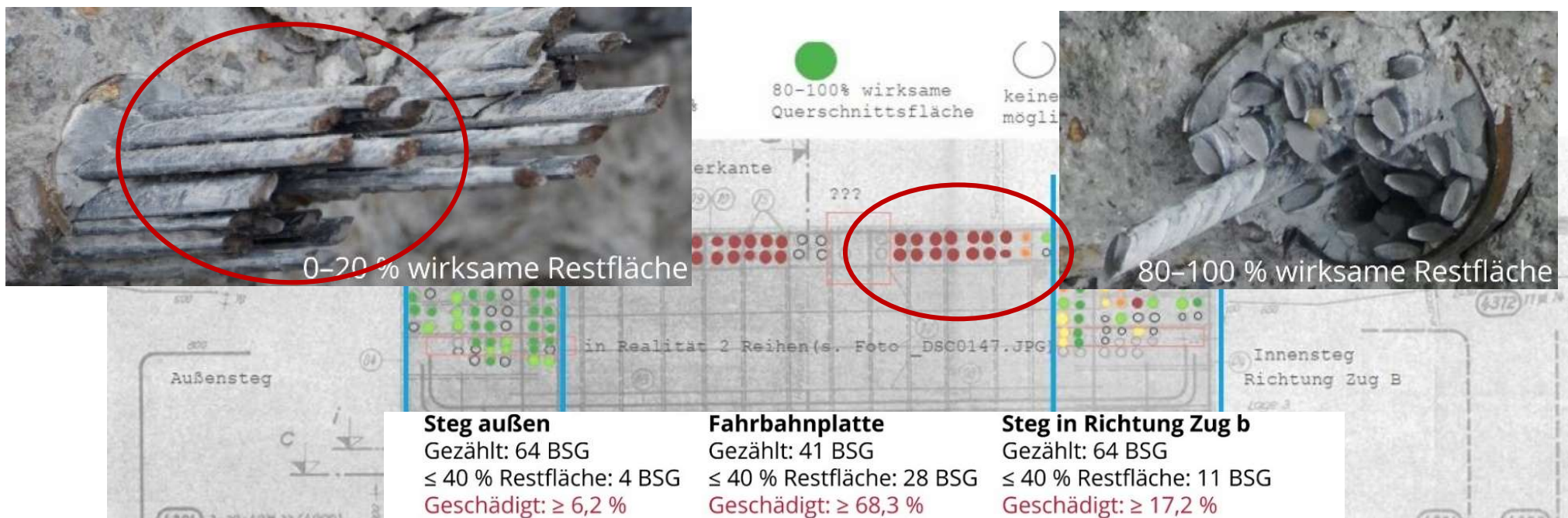
Spannungsrissskorrosion?

Optische Begutachtung und Bewertung Magnetpulverprüfung (MT)



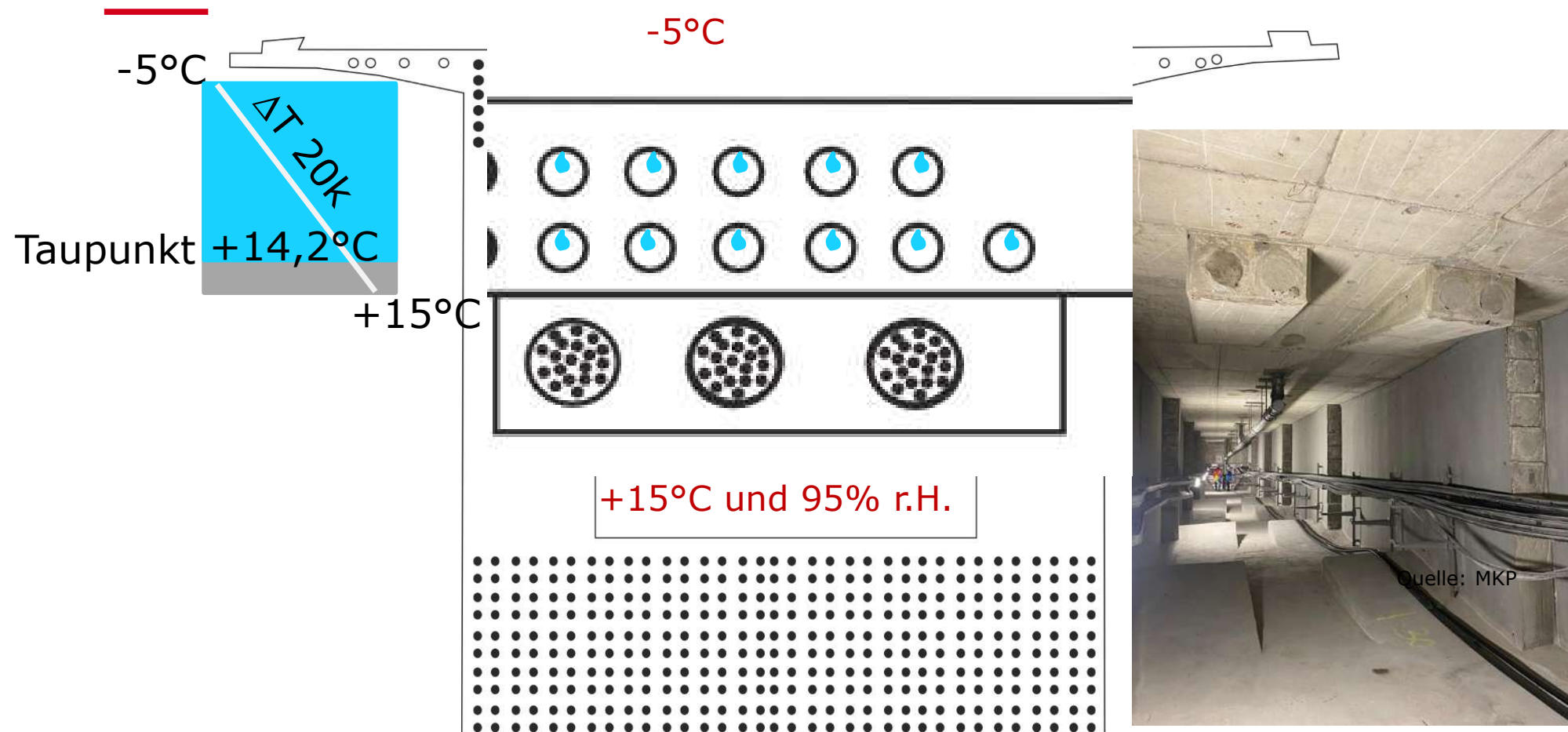


Querschnitt Versagensstelle über der Stütze D



Quelle: MKP

Wie und wann wurde der Schaden initiiert?

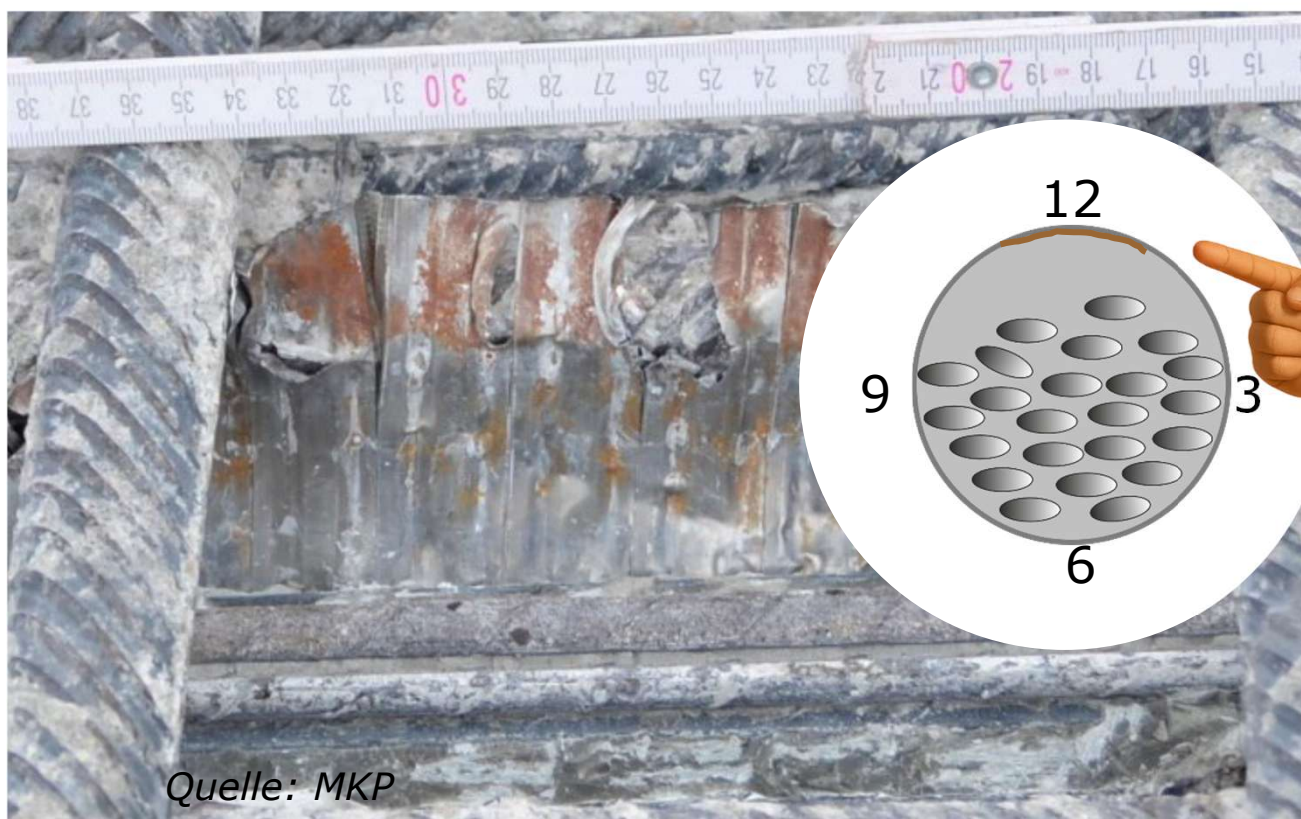


Geöffnetes Hüllrohr an Stütze D im Zug b



Korrosionserscheinungen
an der 12Uhr-Position der
Innenseite des Hüllrohrs

Geöffnetes Hüllrohr an Stütze D im Zug b



Korrosionserscheinungen
an der 12Uhr-Position der
Innenseite des Hüllrohrs

Tauwasseranfall und nun?

- Kann Tauwasser allein signifikante Wasserstoffbeladungen hervorrufen?
- Ist der pH-Wert ausreichend klein, um eine kathodische Teilreaktion unter Wasserstoffentwicklung zu ermöglichen?
- Gibt es weitere Umwelteinflüsse, die mit dem Tauwasser interagieren und die Korrosivität des Elektrolyten drastisch erhöhen?

z.B. Schadgase – Stichwort saurer Regen

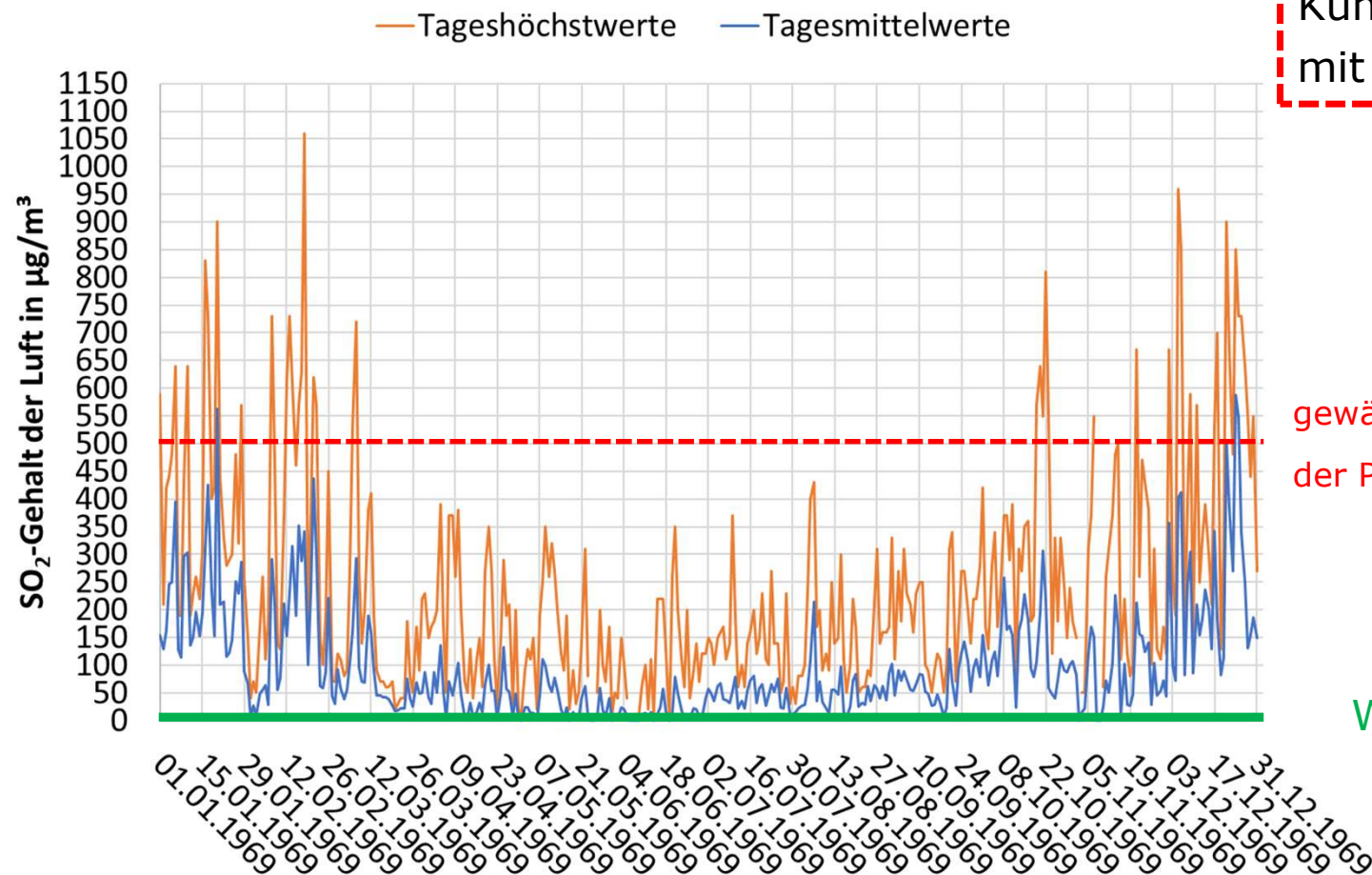


Ehemalige SO₂ Messtationen in Deutschland



- Umweltdaten der DDR als Geheimsache im Ministerium des Inneren unter Verschluss
- im Zuge der Wiedervereinigung an das Umweltbundesamt übertragen und dort recherchierbar

SO₂ Belastung der Atmosphäre bei Dresden im Jahr 1969



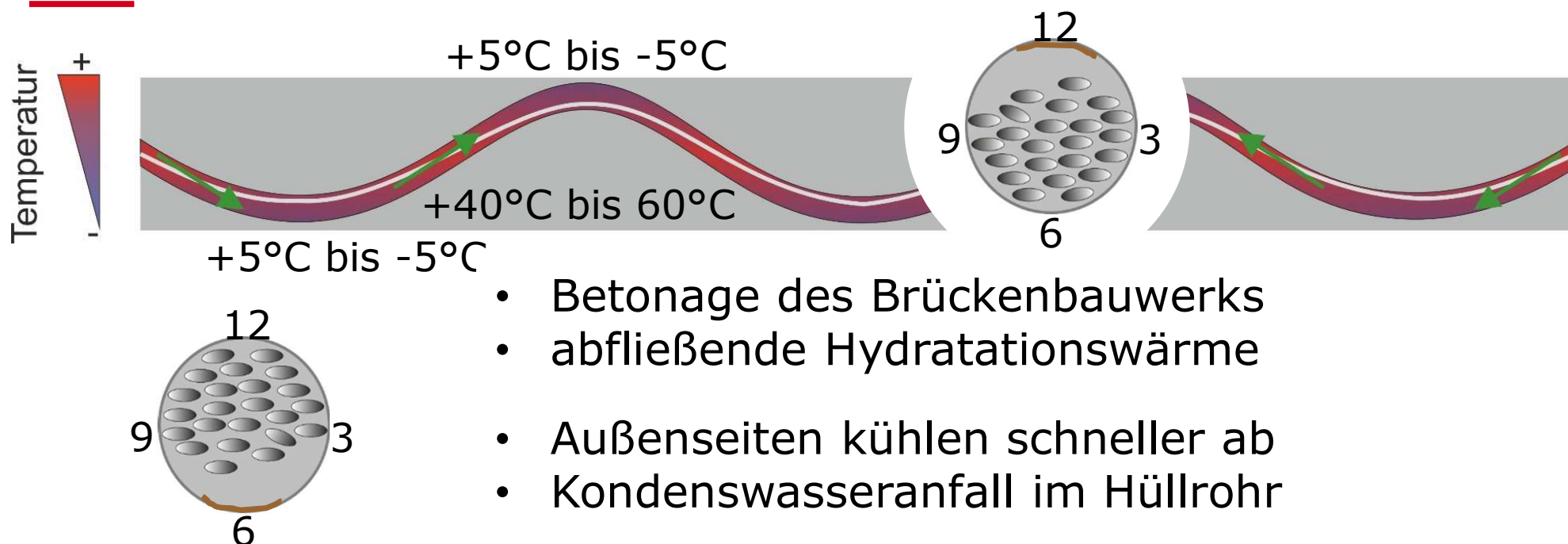
Künstliches Regenwasser
mit pH-Wert 3,55



gewählte Beladung
der Prüfkammer im Test

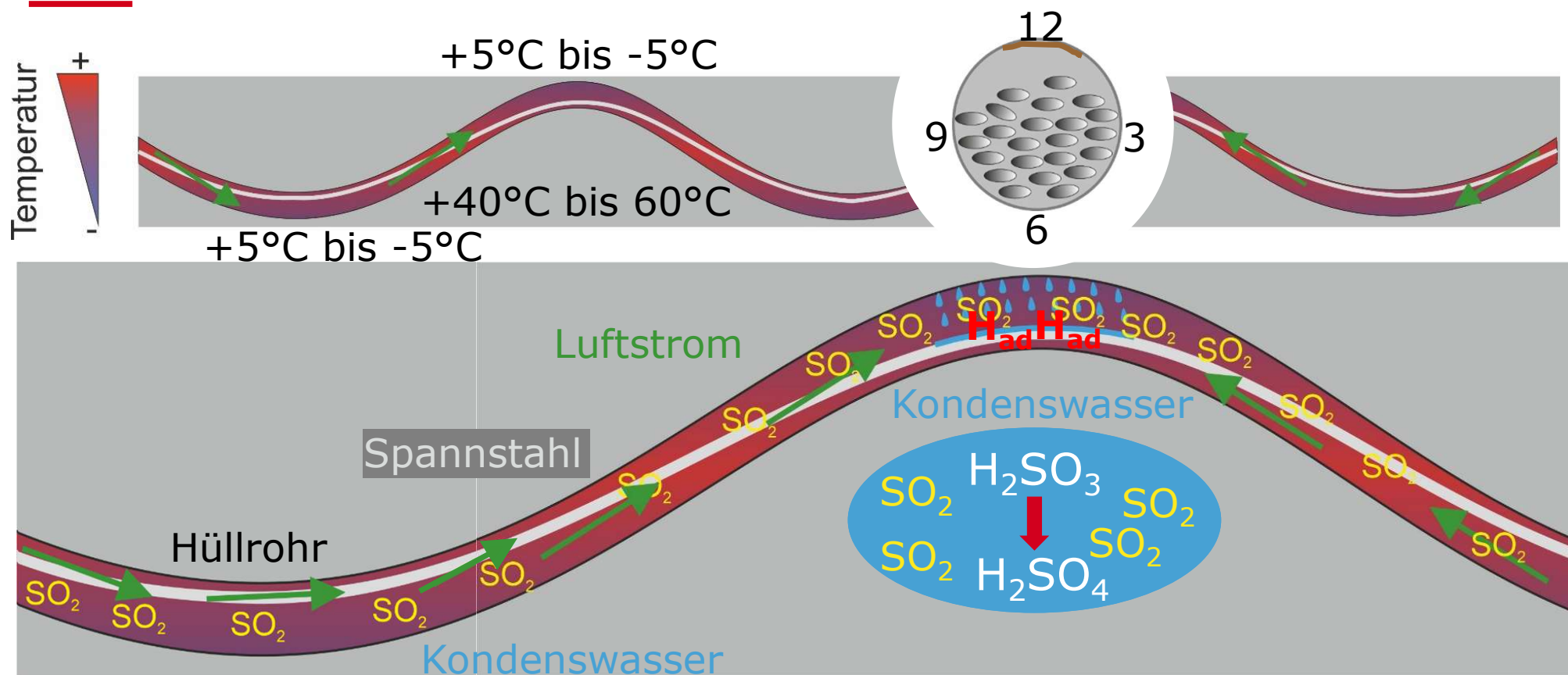
Werte 2025 < 1 µg/m³

Gefährdungspotential im unverpressten Hüllrohr Unterschied Stützbereich und Feldmitte

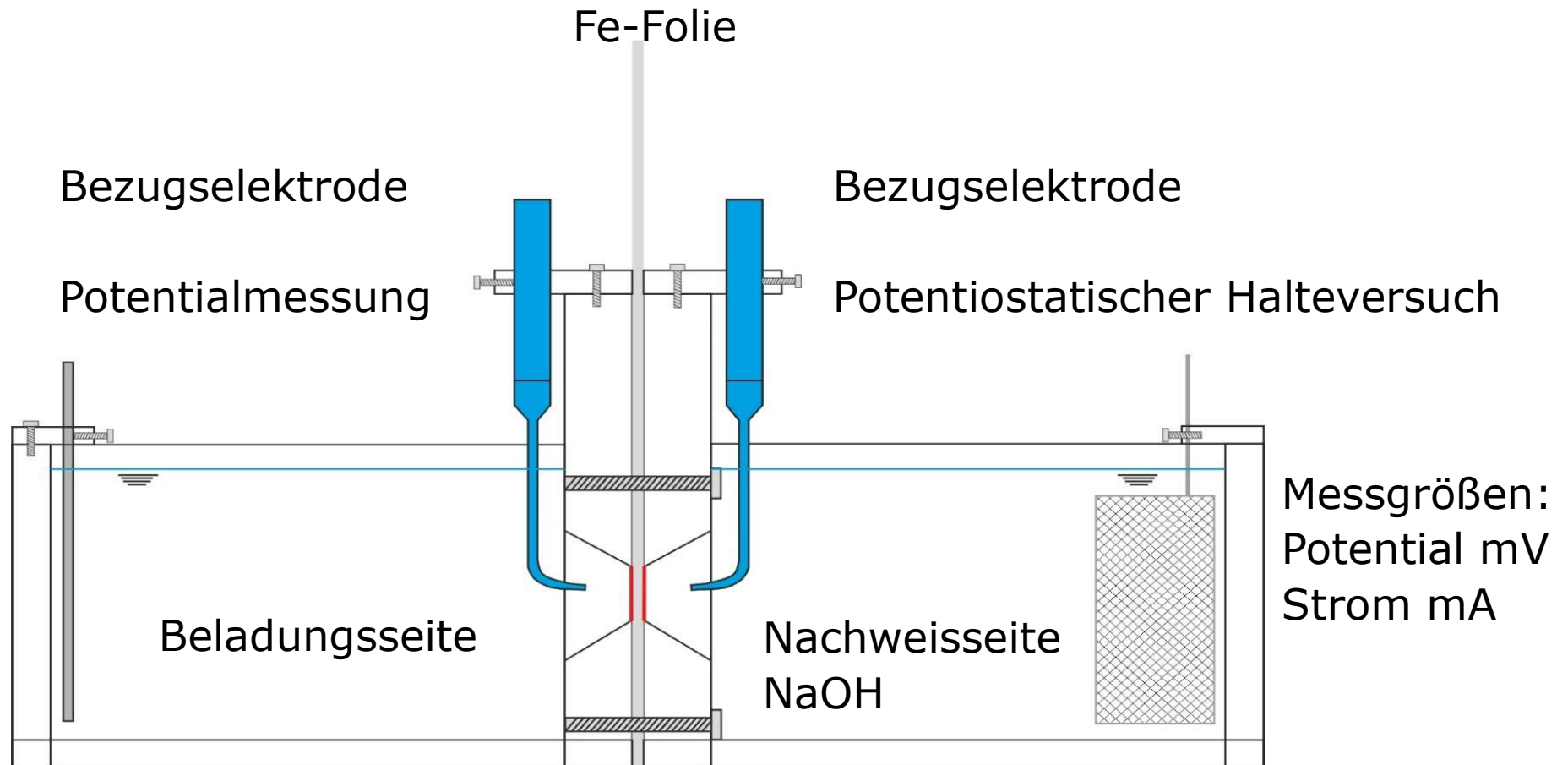


Luftaustausch im Hüllrohr über Entlüftungsöffnungen
und Spannkopfanker gewährleistet

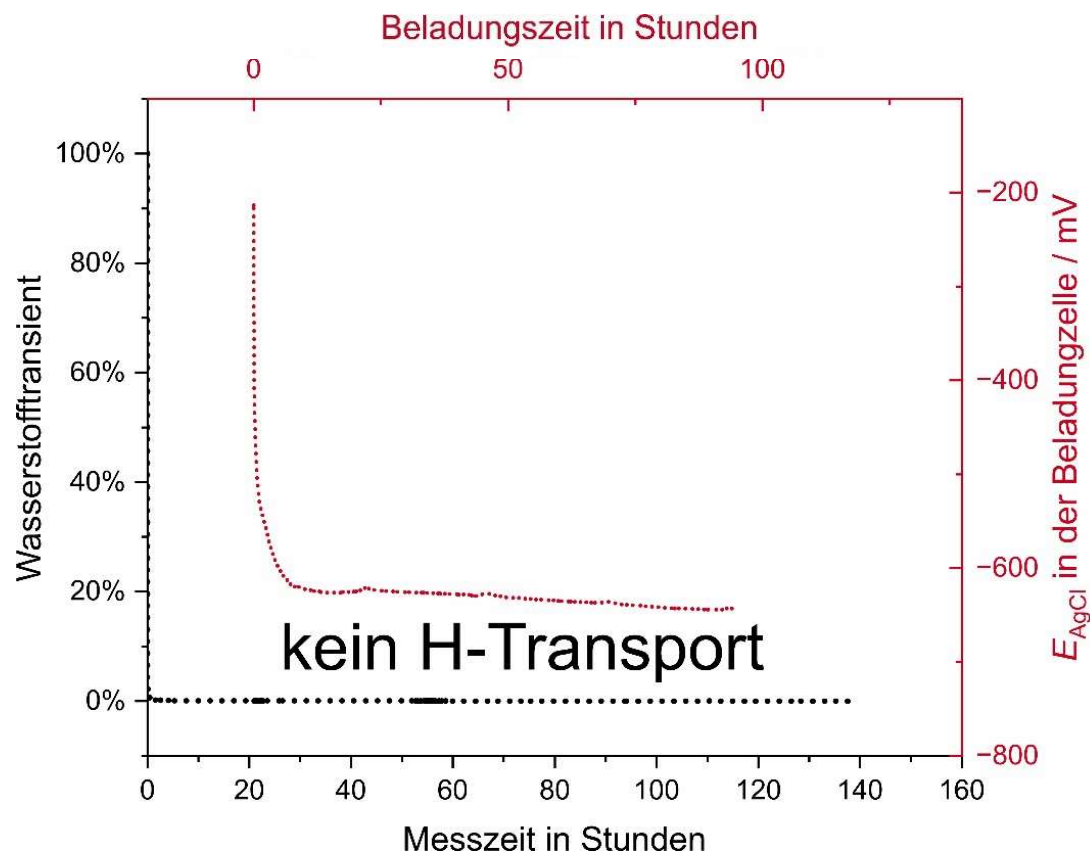
Gefährdungspotential im unverpressten Hüllrohr Unterschied Stützbereich und Feldmitte



Wasserstoffpermeationsmessung im Labor

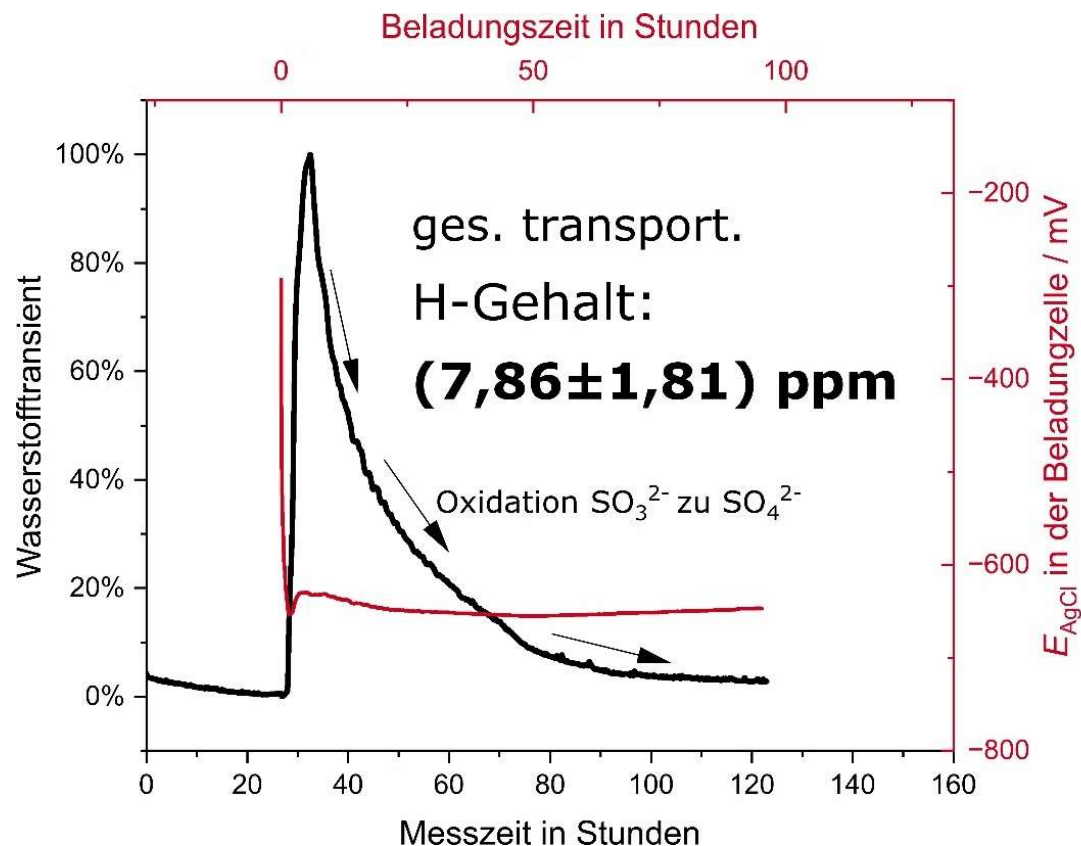


Wasserstoffpermeationsversuch SO_4^{2-}



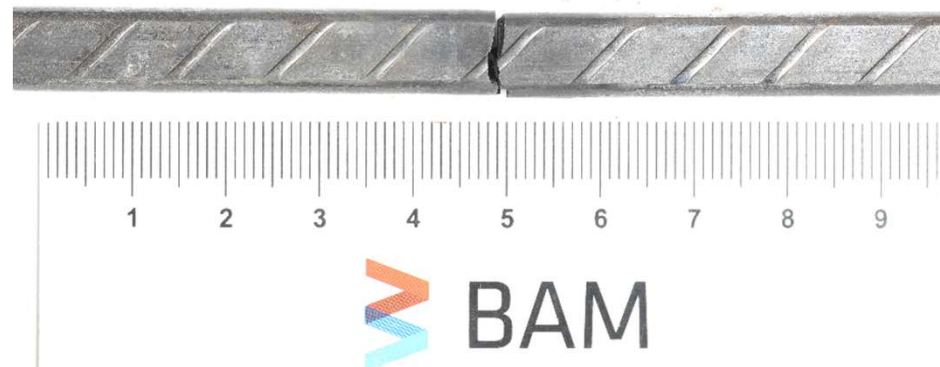
Beladung mit
künstlichen Regenwasser
+ Schwefelsäure
pH= 3,55
Anion: SO_4^{2-}

Wasserstoffpermeationsversuch SO_3^{2-}



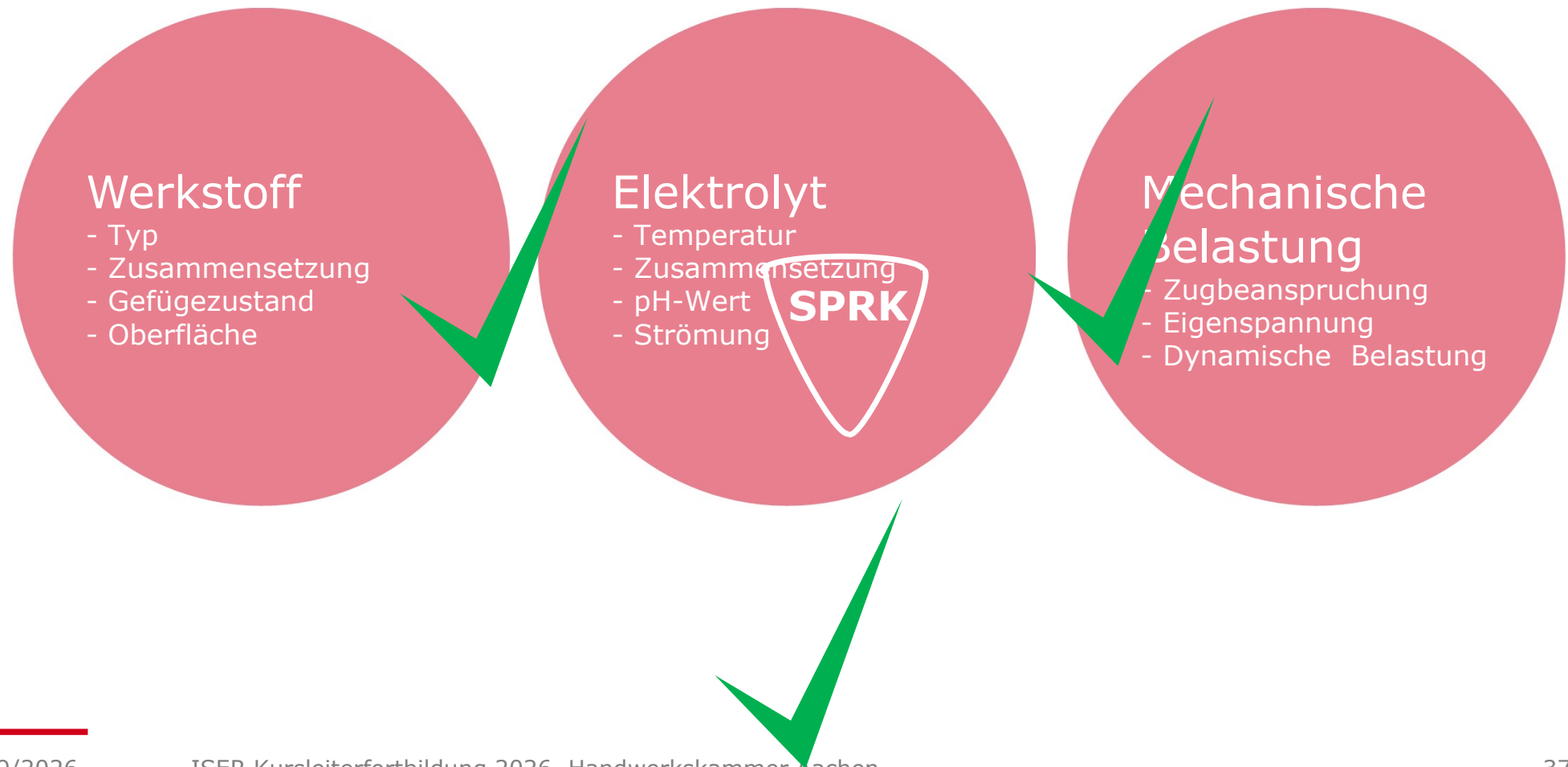
Beladung mit
künstlichem Regenwasser
+ Schwefliger Säure
pH= 3,55
Anion: SO_3^{2-}

Adaption der Versuchsbedingungen mit schwefliger Säure auf Spannstahlversuche im Labor

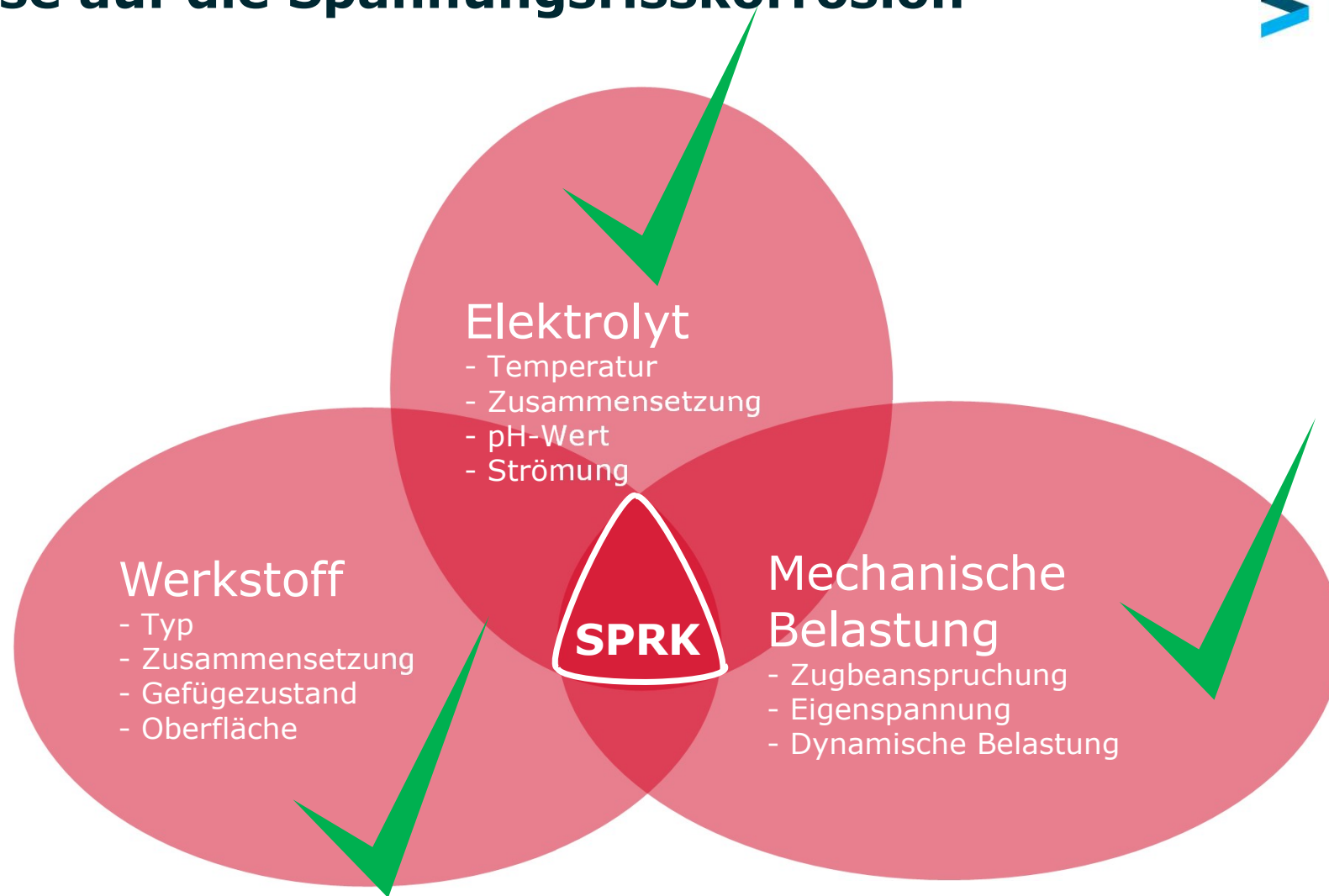


- wasserstoffinduzierte SpRK an Spannstählen medienseitig kontrolliert nachgestellt
- gleichmäßige Randzone um die Bruchfläche durch versuchsbedingt gleichmäßige Wasserstoffbeladung über den gesamten Umfang, in der Praxis ungleichmäßig

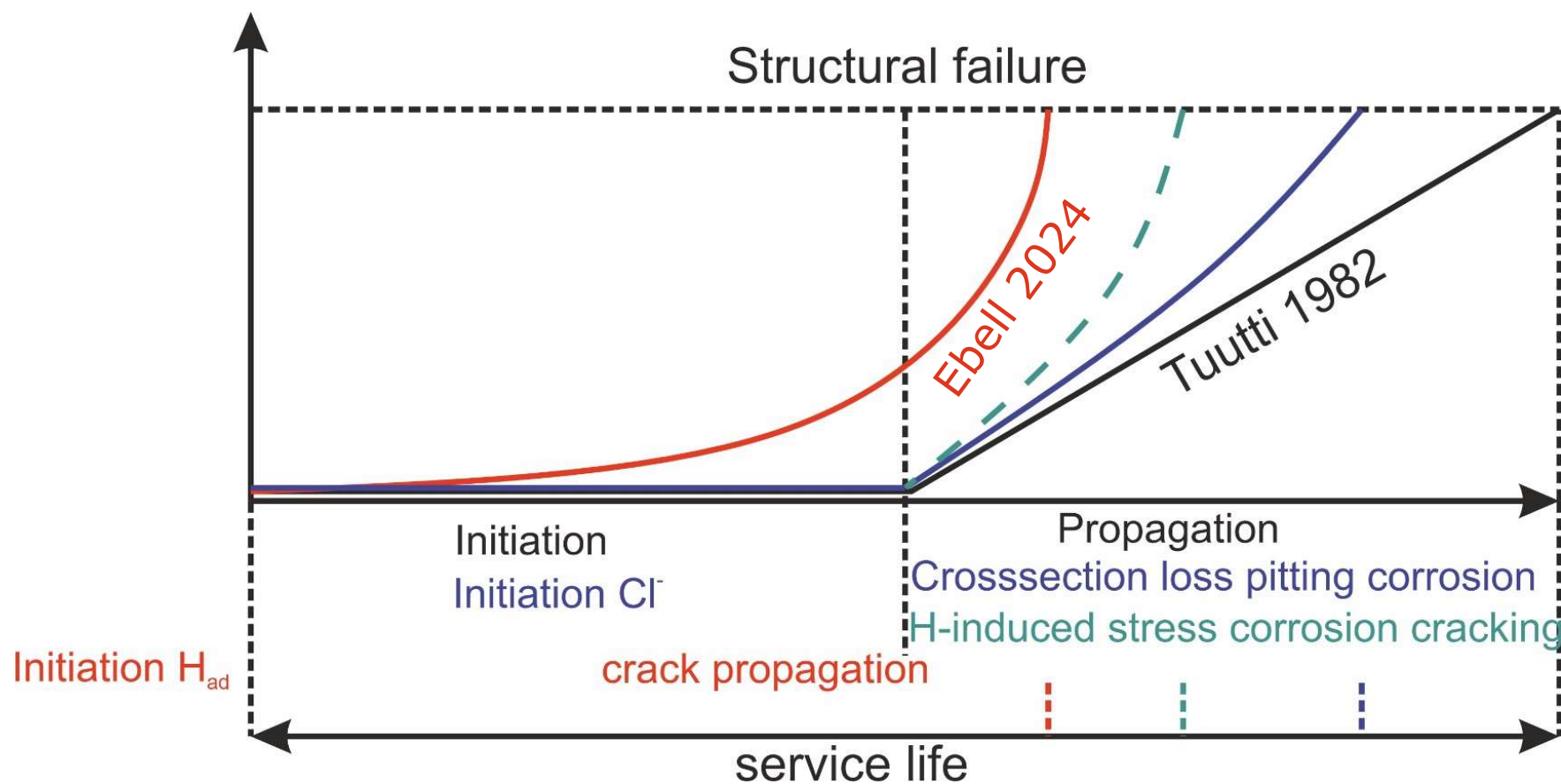
Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion



Einflüsse auf die Spannungsrissskorrosion



Was müssen wir bei Spannungsrisskorrosion beachten



Was müssen wir bei Spannungsrisskorrosion beachten

**Die Brücken gehen defekt in Betrieb.
Schadensursache ist wasserstoffinduzierte
Spannungsrisskorrosion.
Versagensursache ist Ermüdung der
vorgeschädigten Spannstähle.
Kein Fehler der Brückenunterhaltung.**

Welche Folgen haben diese Erkenntnisse?

Abbruch von diversen Brückenbauwerken

Beispiel Magdeburg



Beprobung der Brückenbauwerke
auf Basis der Untersuchungsergebnisse „Carolabrücke“,
Abbruch Brücke Damaschkeplatz



Halberstädterstr.

keine Anrisse in den Tiefpunkten,
aber oberhalb der Stützen, Anrisse
und Spanndrahtbrüche - Abbruch



Zusammenfassung



- aktuelle Schäden basieren auf einer Rissinitiierung vor der bzw. während der Erstellung des Bauwerkes
- eine Rissbildung im Beton bei sprödem Spannstahlversagen ist nicht zwingend zu erwarten
- Überarbeitung der Handlungsanweisung Spannungsrisskorrosion

Weitergehende Maßnahmen erforderlich:

- Modellbildung zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeit von Spanndrahtbrüchen durch SpRK im Erstellungszeitraum
- Beprobung von Spannbetonbrücken unabhängig vom rechnerischem Ankündigungsverhalten
- Bauwerke mit hochanfälligen Spannstählen mit Schallemissionsmonitoring zur Detektion von Spannstahlbrüchen ausrüsten
- Überprüfung der Empfindlichkeit von vergüteten Spannstäben und -drähten mit Festigkeiten kleiner 1450-1600 N/mm² im Labor

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT