

Spannungsrisskorrosion auslösende Bedingungen in Spannkanälen von Spannbetonbauten vor dem Injizieren

T 1170/2

Bericht Nr. 2:

Untersuchungen zur
Widerstandsfähigkeit von Spannstählen
gegen wasserstoffinduzierte
Spannungsrisskorrosion nach
praxisähnlicher Vorkorrosion

T 1170/2

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG (BAM)

Fachgruppe 1.3 Korrosion und Metallschutz

1 Berlin 45, 2. Juli 1982

Unter den Eichen 87

Fernruf (030) 8104-X 9013 Dr.Is/sr

Forschungsförderung durch das Institut für Bautechnik

1. Titel der Forschungsarbeit:

Spannungsrißkorrosion auslösende Bedingungen in Spannkämen
von Spannbetonbauten vor dem Injizieren

Bericht Nr. 2:

Untersuchungen zur Widerstandsfähigkeit von Spannstählen gegen
wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion nach praxisähn-
licher Vorkorrosion

von B. Isecke und W. Stichel

1. Einführung

2. Versuchswerkstoffe

3. Laboruntersuchungen

3.1 Vorkorrosion ohne mechanische Belastung

3.1.2 Ergebnisse der Vorkorrosionsversuche

3.1.2.1 Beurteilung des Korrosionsverhaltens

3.1.2.2 Mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion

3.2 Dauerstandversuche

3.2.1 Aufbau der Versuchsanlage

3.2.2 Ergebnisse

3.2.2.1 Vorkorrosion in destilliertem Wasser

3.2.2.2 Vorkorrosion in nitrathaltiger Umgebung

3.2.2.3 Vorkorrosion in chloridhaltiger Umgebung

3.2.2.4 Vorkorrosion in sulfathaltiger Umgebung

3.2.2.5 Vorkorrosion in sulfat- und chlorid-
haltiger Umgebung

3.2.2.6 Vorkorrosion in sulfidhaltiger Umgebung

3.2.2.7 Vorkorrosion in sulfithaltiger Umgebung

3.2.2.8 Vorkorrosion in rhodanidhaltiger alka-
lischer Umgebung

3.2.2.9 Andere Versuche

3.2.2.10 Bruchauswertungen

4. Zusammenfassung

4.1 Vorkorrosion

4.2 Dauerstandversuche

4.2.1 Spannstahl A (St 835/1030, $d = 26$ mm)

4.2.2 Spannstahl B (St 1080/1230, $d = 26$ mm)

4.2.3 Spannstahl D 2 (St 1420/1570, $d = 12,2$ mm)

4.2.4 Spannstahl E (St 1420/1570, $d = 12,2$ mm)

4.2.5 Vorkorrosion in ges. Ca(OH)_2 -Lösung mit
Zusätzen an Sulfat-, Chlorid- und Rhodanid-
ionen

4.3 Abschließendes Fazit

5. Tabellen

6. Abbildungen

Untersuchungen zur Widerstandsfähigkeit von Spannstählen gegen wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion nach praxisähnlicher Vorkorrosion

1. Einführung:

Im Bericht Nr. 1 der BAM wurden die auf verschiedenen Baustellen ermittelten und für den Korrosionsablauf wesentlichen Umgebungsbedingungen für Spannstähle vor dem Injizieren dargestellt. Die im vorliegenden zweiten Bericht aufgeführten Untersuchungen galten der Frage, inwieweit sich diese durch die Baupraxis vorgegebenen Parameter schädlich auf das Korrosionsverhalten von verschiedenen handelsüblichen Spannstählen auswirken können.

Die Prüfung der Spannstähle vollzog sich in zwei Stufen. Im ersten Teil der Untersuchungen wurden die Stähle einer Feuchtlagerung in salzfreier und salzhaltiger Umgebung ausgesetzt. Eine mechanische Belastung während dieser Phase fand nicht statt. Die Stähle wurden kurzzeitig vollständig mit dem Korrosionsmedium beaufschlagt und anschließend atmosphärisch feuchter Luft ausgesetzt. Die Beanspruchung wiederholte sich zyklisch über drei Wochen. Danach wurde durch optische Begutachtung der Einfluß der Vorkorrosion auf das Oberflächenverhalten der Spannstähle untersucht und weiterhin in Zugversuchen überprüft, ob signifikante Änderungen der mechanischen Kennwerte der Spannstähle eingetreten waren.

Da in der Praxis die bei der Lagerung oder beim Einbau der Spannglieder entstandenen und durch Korrosion bedingten Vorschädigungen nach dem Vorspannen durch das Einwirken der mechanischen Spannung und spezifischer Mikroklimata im Spannkanaal aktiviert und verschärft werden können, wurden im zweiten Teil der Laborversuche die Stähle mit 80 % der Zugfestigkeit vorgespannt und in einem Dauerstandversuch Elektrolyten ausgesetzt, die in ihrer Zusammensetzung den auf Baustellen gefundenen Hüllrohrwässern (s. Teil 1 des Berichtes der BAM) entsprachen. Trat unter diesen Bedingungen innerhalb von 1000 h kein bruchbedingtes Versagen der

Spannstähle auf, wurde anschließend ein Zugversuch an den Proben durchgeführt, um einen eventuell vorhandenen Einfluß auf die mechanischen Kennwerte der Spannstähle nachzuweisen.

2. Versuchswerkstoffe:

Als Versuchswerkstoffe wurden vier handelsübliche Spannstahlqualitäten verwendet. Da die Versuche einen Vergleich mit den Ergebnissen anderer Forschungsstellen ermöglichen sollten, wurden von den Stahlherstellern zur gemeinsamen Untersuchung Referenzmaterialien aus gleichen Chargen zur Verfügung gestellt. Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung der Stähle, Tabelle 2 deren mechanische Kennwerte. Um den Einfluß von Gewinderippen oder Profilierungen der Spannstahloberfläche zu eliminieren, wurden nur Spannstähle mit runder, glatter Oberfläche einbezogen.

3. Laboruntersuchungen:

Wie bereits vorher beschrieben wurde, gliederten sich die Laboruntersuchungen in zwei Stufen, praxisnahe Vorkorrosion in verschiedenen wäßrigen Elektrolyten und Dauerstandsversuche nach Vorkorrosion.

3.1 Vorkorrosion ohne mechanische Belastung:

Um die Vorkorrosion für alle Spannstahlqualitäten reproduzierbar zu gestalten, wurde eine Versuchsanlage entwickelt, bei der gleichzeitig 10 Spannstahlproben geprüft werden können. Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau der Vorkorrosionsanlage. Der Spannstahl befindet sich in einem an den Enden abgedichteten und verschlossenen, gewellten PVC-Hüllrohr von 50 mm Durchmesser. Als Elektrolytlösung wird destilliertes Wasser mit Zusätzen von Chloriden (500 mg/l), Sulfaten (500 mg/l), Nitraten (500 mg/l), Sulfiten (300 mg/l), Sulfiden (300 mg/l) oder destilliertes Wasser allein von oben

über eine Steuereinrichtung in das Hüllrohr geleitet. Der Einfluß jeder Ionensorte wird einzeln geprüft, in einer ergänzenden Versuchsreihe wurden Lösungen, die sowohl Chlorid- als auch Sulfatzusätze enthielten, als Medium eingesetzt. Der Stab bleibt eine Stunde lang vom Prüfmedium völlig umgeben. Danach wird die Lösung aus dem Hüllrohr entfernt. Um den Einfluß von Spalten zu simulieren, liegt der Stab im unteren Teil des Hüllrohres an den Wellungen an, die auch nach dem Ablassen der Prüflösung noch mit einem Rest des Elektrolyten gefüllt bleiben. In diesem Zustand wird der Stahl zwei Stunden einer Feuchtlagerung ausgesetzt, danach wird wieder Lösung zugeführt und der gesamte Prozeß über einen Zeitraum von insgesamt drei Wochen periodisch wiederholt.

Abb. 2 zeigt die praktische Ausführung der Vorkorrosionsanlage im Labor. Im oberen Teil des Bildes sind die Vorratsbehälter der Elektrolyten für die insgesamt zehn gleichzeitig zu prüfenden Stäbe oder Drähte zu erkennen. Aus versuchstechnischen Gründen müssen je zwei Proben mit demselben Elektrolyten beaufschlagt werden. Alle Steuervorgänge (Aufkonzentration der Lösung, Einfüllen und Ablassen der Prüflösung) verlaufen automatisch mittels einer programmierten Umschaltanlage.

3.1.2 Ergebnisse der Vorkorrosionsversuche:

Die Auswertung der Vorkorrosionsversuche erfolgte in zwei Richtungen: zunächst wurden die Korrosionserscheinungen auf der Spannstahloberfläche bezüglich der Rostbildung und des Auftretens von Narbenkorrosion visuell beurteilt, anschließend wurden die Proben in einem Zugversuch geprüft.

3.1.2.1 Beurteilung des Korrosionsverhaltens:

Die Korrosionserscheinungen auf der Stahloberfläche nach Vorkorrosion waren abhängig vom verwendeten Elektrolyten und unterschieden sich nur unwesentlich zwischen den Stahlqualitäten A, B, D 2 und E. Im einzelnen lassen sie sich wie folgt charakterisieren:

500 mg Cl⁻/l (Abb. 3)

dunkle Oberflächenschicht, unter den Anlagestellen des Hüllrohres befanden sich Spaltkorrosionselemente mit ca. 200 - 300 µm tiefen Narben.

500 mg SO₄⁻⁻/l (Abb. 4, unten)

siehe Cl⁻.

500 mg NO₃⁻/l (Abb. 4, oben)

gleichmäßig dichte, rostbraune Oberflächenschicht ohne Spaltkorrosionselemente und Narben.

300 mg SO₃⁻⁻/l (Abb. 5 und 6)

braune, voluminöse aufgewachsene Rostschicht, teilweise mit darunter liegenden Narben bis zu 200 µm Tiefe.

300 mg S⁻⁻/l (Abb. 7)

brauner Oberflächenrost und einzelne aufgewachsene Rostpusteln, unter denen sich lochfraßartige Korrosionsnarben bis zu 200 µm Tiefe befanden.

...

500 mg Cl⁻ + 500 mg SO₄⁻⁻/l

siehe Cl⁻.

dest. Wasser (Abb. 8 und 9)

gleichmäßig, hellbrauner, dünner Oberflächenrost.

Besonders augenfällig erschien, daß die Farbmarkierungen zur Unterscheidung der Stahlqualität korrosionseinschränkend wirken, da, wie beispielsweise aus Bild 10 hervorgeht, dort eine deutlich geringere Verrostung als auf dem Restbereich der Stahloberfläche vorlag.

Zusätzlich zu den Vorkorrosionsversuchen im Labor wurden Stäbe der Qualitäten A und B in einem gewellten Kunststoffschlauch (d = 50 mm) einer Feuchtlagerung auf dem Dach der BAM in destilliertem Wasser ausgesetzt. Während die Oberfläche des Stahles A (Abb. 11, unten) außerhalb der Wasserlinie durch Betauung hervorgerufenen, punktförmigen festhaftenden braunen Rost aufwies, erscheint die Oberfläche des Stahles B (Abb. 11, oben) in einem relativ wenig veränderten Zustand gegenüber einem nicht ausgelagerten Stab.

3.1.2.2 Mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion:

Um zu überprüfen, ob die Einwirkung der Vorkorrosion (Narbenbildung, eventuelle Wasserstoffaufnahme des Stahles bei der Vorkorrosion) den Stahl bereits soweit schädigt, daß eine Veränderung der mechanischen Kennwerte eintritt, sind an Stählen der Qualitäten B, D 2 und E im Anschluß an die Vorkorrosion Zugversuche durchgeführt worden. Der Zeitraum zwischen dem Ausbau der Stähle aus der Vorkorrosionsanlage und dem Zugversuch überschritt in keinem Fall eine Stunde.

Abb. 12 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche nach unterschiedlicher Vorkorrosion bei den drei untersuchten Spannstahlqualitäten. Die relativen mechanischen Kennwerte (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung und -einschnürung) sind in Abhängigkeit von der Art der Vorkorrosion dargestellt. Der relative mechanische Kennwert ist als Quotient aus dem im Zugversuch nach Vorkorrosion ermittelten Wert und dem ursprünglichen Wert der gleichen Probe ohne Vorkorrosion definiert. Ein Quotient von 1 entspräche also keiner Veränderung nach Vorkorrosion gegenüber der unbehandelten Probe, Werte kleiner als 1 sind als korrosionsbedingte Veränderungen der Materialeigenschaften zu werten. Wie aus Abb. 12 hervorgeht, konnten nur in zwei Versuchen (Cl^- -Vorkorrosion, Stahl E Zugfestigkeit und Streckgrenze, bzw. SO_4^{--} -Vorkorrosion, Stahl D 2, Bruchdehnung) geringfügige Abminderungen gegenüber den Ausgangswerten beobachtet werden. Eine Auswertung aller Bruchformen aus den Zugversuchen ergab jedoch ebenso bei den Proben mit den leichten Abminderungen wie auch bei den anderen Prüflingen nur Brüche mit duktilem Charakter. Trotz des zum Teil sehr hohen Schädigungsgrads der Stahloberflächen durch Rostablagerungen, Narben oder lochfraßähnliche Vertiefungen, befand sich der Bruchausgang stets in der Mitte des Stabes.

Andererseits muß berücksichtigt werden, daß die Zugspannungsänderung in den Zugversuchen mit 10 bis 30 N/mm²·sec relativ hoch lag. Bei Anwendung niedrigerer Dehnraten, die zur Zeit der Untersuchungen experimentell nicht realisiert werden konnten, wären Veränderungen insbesondere der Bruchdehnung und -einschnürung nicht auszuschließen.

3.2 Dauerstandversuche:

3.2.1 Aufbau der Versuchsanlage:

Die Dauerstandversuche sollten möglichst genau die praktischen Bedingungen reproduzieren, denen ein Spannstahl vor dem Injizieren im Bauwerk ausgesetzt ist. Die Baustellenun-

tersuchungen (s. Bericht 1) ergaben als wesentliche Ergebnisse:

- a) Das Eindringen von Feuchtigkeit in Spannkanäle ist sehr wahrscheinlich.
- b) Die eingedrungene Feuchtigkeit (Hüllrohrwasser) besitzt zumeist alkalischen Charakter und enthält Anteile an Chloriden und Sulfaten. In wenigen Fällen wurden Wässer gefunden, deren Zusammensetzung Leitungswasser entsprach.
- c) Der Sauerstoffgehalt in Spannkanälen sinkt nach dem Betonieren ab (längere gut abgedichtete Spannglieder) oder stagniert bei 21 % (offene Spannglieder).
- d) Beim Vorliegen von Hüllrohrwässern in Spannkanälen tritt der heftigste Korrosionsangriff im Grenzbereich Elektrolyt/Spannkanalatmosphäre ein.

Um diese Bedingungen im Laborversuch zu simulieren, wurden die Spannstähle nach dem Ausbau aus der Vorkorrosionsanlage in einem Dauerstandversuch mit 80 % ihrer Zugfestigkeit vorgespannt und gleichzeitig hüllrohrähnlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Abb. 13 zeigt schematisch den Aufbau einer Prüfeinrichtung, Abb. 14 deren Realisierung im Labor. Der vorkorrodierte Stab wurde gegen den Rahmen vorgespannt und war auf einer Länge von ca. 1 m von einer hüllrohrähnlichen PVC-Zelle umgeben (Abb. 15), die in zwei Bereiche unterteilt war. Der linke Teil war durch einen Kunststoffschwamm, mit dem der Prüfstab umwickelt war, gasdicht vom rechten Teil der Zelle getrennt. Nach Aufbringen der Prüflast wurden beide Zellbereiche entweder mit übergesättigter $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung, die 1000 mg/l SO_4^{--} und 100 mg/l Cl^- enthielt, bzw. mit Leitungswasser soweit gefüllt, daß nur der untere Teil der Spannstahloberfläche vom Elektrolyten benetzt wird. Sowohl die verwendeten Elektrolyten als auch die geometrischen Bedingungen in der Zelle entsprachen bei dieser Anordnung in hohem Maße den praktischen Gegebenheiten im Spannkanal. Der rechte Einfüllstutzen wurde verschlossen, um auch den möglicher-

weise auf der Baustelle eintretenden abnehmenden Sauerstoffgehalt im Hüllrohr zu simulieren.

Die zeitliche Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der Zellatmosphäre bei verschlossener Zelle wurde in zwei Versuchen mittels eines Sauerstoffsensors überprüft. Abb. 16 zeigt die Veränderung des Sauerstoffgehaltes in der verschlossenen Zelle in Abhängigkeit von der Zeit. Als Spannstahl wurde der Stahl A eingesetzt, die Vorkorrosion erfolgte in chlorid- bzw. nitrathaltiger Umgebung. Beide Messungen weisen nach, daß der Sauerstoffgehalt in der Zelle innerhalb sehr kurzer Zeit durch die einsetzende Korrosionsreaktion verbraucht wurde.

3.2.2. Ergebnisse:

Tabelle 3 gibt eine Übersicht aller insgesamt 150 im Rahmen der Untersuchungen durchgeführten Laborversuche. Neben der Stahlqualität und der Art der Vorkorrosion sind aus den Dauerstandversuchen der Zelltyp (metallisches Hüllrohr oder PVC-Doppelzelle, s. Abschnitt 3.2.1), das Medium (ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung und Zusätze oder Leitungswasser) und die Standzeit im Dauerstandversuch aufgeführt. Um die Ergebnisse der Dauerstandversuche abzusichern bzw. reproduzierbar zu gestalten, ist jeder Versuch zumindest einmal wiederholt worden, bei starken Diskrepanzen zwischen dem Erst- und Zweitversuch erfolgte zusätzlich ein dritter Test.

Die vorgegebene Zeitgrenze in den Dauerstandversuchen betrug 1000 h. Trat innerhalb dieses Zeitraums kein bruchbedingtes Versagen der Probe ein, so schloß sich, ähnlich wie bei den Versuchen mit alleiniger Vorkorrosion, ein Zugversuchen an, dessen Ergebnisse mit den Werten unbehandelter Proben derselben Charge verglichen wurden. Sowohl die Brüche im Dauerstandversuch als auch die Bruchflächen in den Zugversuchen wurden mit den üblichen Untersuchungsmethoden (Lichtmikroskop, Rasterelektronenmikroskop) charakterisiert und dokumentiert. Tabelle 4 enthält in übersichtlicher Form die Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- bzw. Zugversuchen im Anschluß an die Dauerstandversuche nach 1000 h Standzeit.

3.2.2.1 Vorkorrosion in destilliertem Wasser:

Nach Vorkorrosion in destilliertem Wasser konnte im anschließenden Dauerstandversuch in beiden Prüfmedien und bei allen Stahlqualitäten kein Bruch innerhalb von 1000 h beobachtet werden, so daß an allen Proben Zugversuche durchgeführt werden mußten. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abb. 17 dargestellt, die linken Teilbilder entsprechen den Proben für die Zeitstandversuche in gesättigter Ca(OH)_2 -Lösung mit Sulfat- und Chloridzusatz, die rechten Teilbilder gelten für die Proben mit Leitungswasser. Die Werte aus den Ergebnissen der Zugversuche nach dem Dauerstandversuch sind wiederum ins Verhältnis gesetzt zu den Ausgangswerten unbehandelter Proben derselben Charge. Zunächst fällt auf, daß in beiden Prüfelektrolyten Zugfestigkeit und Streckgrenze keinerlei Abweichungen gegenüber den unbehandelten Proben aufweisen. Unter dem Gesichtspunkt einer korrosionsbedingten Wasserstoffaufnahme erscheint dieses Phänomen jedoch nicht ungewöhnlich, da diese Kennwerte bei einer Wasserstoffversprödung des Spannstahles nicht unbedingt abnehmen müssen.

Wesentlich aussagefähiger bezüglich der Wasserstoffversprödung von Stählen sind die Verformungskennwerte (Bruchdehnung A_{10} , Brucheinschnürung Z). Wie die unteren Teilbilder der Abb. 17 nachweisen, werden auch diese Werte nur bei den Stahlqualitäten A, B und D 2 beeinflußt. Der kaltgezogene Spannstahl E erlitt in beiden Elektrolyten keine nachweisbaren korrosionsbedingten Abminderungen von Brucheinschnürung und -dehnung.

Die stärkste Beeinflussung der Verformungskennwerte wurde beim Stahl B in ges. Ca(OH)_2 -Lösung mit Zusätzen beobachtet. Brucheinschnürung und Bruchdehnung sanken auf 25 bis 50 % der Ausgangswerte ab. Auch beim vergüteten Spannstahl D 2 traten leichte Abweichungen vom duktilen Bruchverhalten auf.

Da die Charakteristik des spröden Bruches sich nach der Stahlqualität richtet, werden die Bruchverläufe gemeinsam in einem später folgenden Teil des Berichtes dargestellt und diskutiert.

3.2.2.2 Vorkorrosion in nitrathaltiger Umgebung:

Die Vorkorrosion in nitrathaltiger Lösung erwies sich bei allen Stahlqualitäten und in beiden Medien als die am wenigsten den Stahl gefährdende Art der Vorkorrosion. Abb. 18 zeigt, daß nur geringfügige Änderungen der Bruchdehnung und -einschnürung ermittelt wurden, die jedoch in ihrer Wirkung als unbedeutend eingestuft werden können, da, wie an anderer Stelle gezeigt wird, alle Brüche ohne Versprödungsmerkmale verliefen.

3.2.2.3 Vorkorrosion in chloridhaltiger Umgebung:

Auch bei dieser Art der Vorkorrosion zeigte es sich (Abb. 19), daß Zugfestigkeit und Streckgrenze unbeeinflusst blieben. Beim Dauerstandversuch in Leitungswasser konnte nach 612 h ein Bruch beim Stahl D 2 beobachtet werden. Das Versagen des Stahles (Versuch 75) hing jedoch nicht ursächlich von der Zelllösung ab, da der Bruch außerhalb der Zelle auftrat. Den Ausgangspunkt des Bruches bildete eine ca. 200 µm tiefe lochfraßähnliche Kerbe (Abb. 20), die im Zusammenhang mit dem aus der Luftfeuchtigkeit vorgegebenen Feuchtigkeitsfilm der Stahloberfläche die ausreichenden Bedingungen für einen wasserstoffinduzierten Spröbruch lieferten (Abb. 21). Insgesamt zeichnete sich die gesamte Oberfläche dieser Probe sowohl innerhalb als auch außerhalb des Zellbereiches durch eine ausgeprägte Narbenstruktur aus (Abb. 22).

Bruchdehnung und -einschnürung erfahren in beiden Elektrolyten bei den Stählen B und D 2 erhebliche Veränderungen in Richtung einer durch Wasserstoffaufnahme bedingten Versprödung, während der Stahl A und insbesondere der Stahl E auch unter diesen Prüfverhältnissen unbeeinflusst bleibt (Abb. 19).

...

3.2.2.4 Vorkorrosion in sulfathaltiger Umgebung:

Die Ergebnisse der Dauerstandversuche nach Sulfatvorkorrosion sind qualitativ ähnlich den Ergebnissen nach Chloridvorkorrosion. Auch in diesem Fall treten, wie Abb. 23 verdeutlicht, die stärksten Abminderungen der Verformungskennwerte bei den Stählen B und D 2 ein, Stahl A wird im Bereich der Brucheinschnürung beeinflusst, während der Stahl E die höchste Widerstandsfähigkeit unter diesen Bedingungen aufweist. Insgesamt sind die versprödenden Effekte in der gesättigten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen stärker ausgeprägt als im Leitungswasser, eine Tendenz, die sich auch bei den anderen Arten der Vorkorrosion bestätigte.

3.2.2.5 Vorkorrosion in sulfat- und chloridhaltiger Umgebung:

Durch die Vorkorrosion in Lösungen, die sowohl Sulfat- als auch Chloridzusätze enthielten, sollte geklärt werden, ob durch das gemeinsame Einwirken beider Ionensorten eine verstärkte schädliche Wirkung bezüglich des Korrosionsverhaltens der Spannstähle vorliegt. Aus Abb. 24 geht hervor, daß die gleichzeitige Beaufschlagung mit beiden Ionen nicht zu einem heftigeren Korrosions- bzw. Versprödungseffekt führt. Die Ergebnisse weichen nicht von den Erfahrungen der Versuche mit jeweils alleinigem Einwirken von Chlorid oder Sulfat ab. In der Reihenfolge der Empfindlichkeit sticht wiederum der kaltgezogene Spannstahl E als der Spannstahl mit der höchsten Resistenz gegen Wasserstoffversprödung hervor.

3.2.2.6 Vorkorrosion in sulfidhaltiger Umgebung:

Die Vorkorrosion in sulfidhaltiger Lösung erwies sich als die korrosionschemisch ungünstigste Beanspruchungsform für alle untersuchten Spannstahlqualitäten (Abb. 25). Beim vergüteten Spannstahl D 2 traten sowohl in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen als auch in Leitungswasser innerhalb kurzer Zeit (42 h Versuch 81, 20 h Versuch 110 bzw. 379 h Versuch 111)

spröde Brüche im Dauerstandversuch auf. Alle anderen Spannstahlqualitäten erfuhren wesentliche Abminderungen ihrer Verformungskennwerte, wobei die basische Lösung wiederum stärkere Effekte zeigte als das Leitungswasser.

Im Gegensatz zu den anderen Ionensorten, die vor allem die anodische Teilreaktion beeinflussen, liegt die schädliche, bruchauslösende bzw. Versprödung hervorrufende Wirkungsweise des Sulfids im Einfluß auf die kathodische Teilreaktion des Korrosionsvorgangs. Bekanntermaßen liegt die Wirkung des S^{--} bzw. eventuell vorliegenden HS^- in einer Hemmung der Rekombinationsreaktion der Wasserstoffatome zum Wasserstoffmolekül, so daß die Adsorption des atomaren Wasserstoffs an der Stahloberfläche gefördert wird, hohe Wasserstoffaktivitäten entstehen können und diese das Eindringen des Wasserstoffs in den Stahl und die damit verbundene Versprödung bewirken.

Auch der kaltgezogene Spannstahl E zeigt unter diesen Bedingungen in ges. $Ca(OH)_2$ -Lösung mit Zusätzen deutliche Versprödungsmerkmale, wie zusätzlich durch die Bruchanalyse bestätigt werden konnte.

3.2.2.7 Vorkorrosion in sulfithaltiger Lösung:

Die Vorkorrosion in sulfithaltiger Lösung zeigt bei anschließendem Dauerstandversuch in ges. $Ca(OH)_2$ -Lösung mit Zusätzen ähnliche Effekte wie bei der Vorkorrosion in sulfidhaltigem Elektrolyten, während der Dauerstandversuch in Leitungswasser nur in zwei Fällen beim Stahl D 2 geringfügige Abminderungen der Brucheinschnürung bzw. -dehnung bewirkt (Abb. 26). In gesättigter $Ca(OH)_2$ -Lösung mit Zusätzen brach der vergütete Spannstahl D 2 nach 27 bzw. 150 Stunden spröde im Dauerstandversuch, Stahl A und B zeigten Abminderungen der Verformungskennwerte im Zugver-

such, beim Stahl E blieben die mechanischen Kennwerte unbeeinflusst.

Die Wirkung des Sulfits auf das Korrosionsverhalten muß nach diesen Versuchen ähnlich eingeschätzt und bewertet werden wie das Vorliegen von Sulfid in einer Lösung.

3.2.2.8 Vorkorrosion in rhodanidhaltiger alkalischer Umgebung:

Die Versuche 139 bis 150 beinhalteten bezüglich der Vorkorrosion abweichende Bedingungen von den vorher beschriebenen Verhältnissen. Um die Wirkung kleiner Rhodanidzusätze in üblichen Hüllrohrwässern zu untersuchen, wurde die Vorkorrosion unter ansonsten analogen Bedingungen zu den vorhergehenden Versuchen in einer gesättigten Calciumhydroxidlösung mit Zusätzen von 500 mg $\text{SO}_4^{--}/\text{l}$ (als K_2SO_4), 500 mg Cl^-/l (als NaCl) und 1000 mg SCN^-/l (als KSGN) durchgeführt. Einbezogen wurden Stähle der Qualitäten St 1080/1230 (Stahl B), St 1420/1570 (Stahl D 2) und St 1375/1570 (Stahl E). Nach der Vorkorrosion erfolgte der Dauerstandversuch in der üblichen Weise. Von jeder Stahlqualität wurden in jeder Versuchsreihe zwei Proben geprüft.

In der Abb. 27 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Während des Dauerstandversuches traten Brüche lediglich bei der Qualität D 2 auf. Die Standzeiten betragen 1 bzw. 161 Stunden. Ähnlich den Versuchen mit anderen Arten der Vorkorrosion konnte im Zugversuch nach dem Dauerstandversuch keine Abminderung von Zugfestigkeit oder Streckgrenze ermittelt werden. Bei den im Zugversuch gerissenen Proben der Stahlqualitäten B und E ist die Brucheinschnürung (B und E) bzw. -dehnung (B) erheblich abgemindert gegenüber den Vergleichswerten unbehandelter Proben.

...

Erwartungsgemäß unterschieden sich die Ergebnisse nur unwesentlich, wenn nach gleichartiger Vorkorrosion im Dauerstandversuch die gesättigte Calciumhydroxidlösung mit Zusätzen durch Leitungswasser ersetzt wurde (rechtes Teilbild, Abb. 27). Lediglich beim Stahl D 2 trat eine Abweichung im Verhalten auf, da die zweite Probe im Dauerstandversuch nicht versagte.

Insgesamt bestätigen die Versuche die auch bei anderen Arten der Vorkorrosion gewonnenen Erkenntnisse. Unter gleichartigen Umgebungsbedingungen reagiert der Stahl D 2 am empfindlichsten auf eine korrosionsbedingte Wasserstoffaufnahme. Der Stahl B zeigt im Zugversuch nach dem Dauerstandversuch ausgeprägte Versprödungsmerkmale, während die Veränderung der mechanischen Kennwerte beim Stahl E am geringsten ausgeprägt erscheint.

Die spezifische Wirkung des Rhodanids ist ebenfalls mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine kinetische der Rekombinationsreaktion des Wasserstoffs zurückzuführen.

← Hemmung

3.2.2.9 Andere Versuche:

Neben den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Versuchen wurden noch weitere Dauerstandversuche an mit 80 % der Zugfestigkeit belasteten Spannstählen der Qualitäten A und B durchgeführt. Tabelle 3 zeigt für diese Versuche 1 bis 7, 14 und 15 die Bedingungen der Vorkorrosion und anschließenden Dauerstandversuche. Bei keinem der Stäbe trat ein Bruch auf, obwohl z. T. erhebliche Rostnarben auf der Oberfläche nach dem Ausbau ermittelt wurden. Der stärkste Korrosionsangriff wurde auf dem Stab. Nr. 14 beobachtet (Bilder 28 und 29). Die geometrische Ausbildung der Korrosionsnarben schwankte auf diesem Stab zwischen Narbenlängen von 7 - 20 mm, Breiten von 4 - 9 mm und Eindringtiefen bis zu 370 μm . Die Lage der Narben bewegte sich entlang der Phasengrenze zwischen der ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung und der Atmosphäre im Hüllrohr aus den Dauerstandversuchen. Ein

nachträglicher Zugversuch erbrachte jedoch, ebenso wie in den Versuchen 1 - 7, keinen Abfall der mechanischen Kennwerte gegenüber den Ausgangswerten. Auch der Bruchausgang lag in allen Fällen im Zentrum der Proben. Die mechanischen Verletzungen in Form der Rundkerben können nicht als Punkte bevorzugten korrosiven Angriffs angesehen oder als Ausgangsbereiche von Anrissen angesehen werden.

Zusätzlich zu den geschilderten Versuchen wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen Stäbe der Qualitäten A und B ohne Vorkorrosion wie bei anderen Versuchen Wasser bzw. ges. Calciumhydroxidlösung befand, gespannt wurden und zweimal täglich über 6 Wochen mittels eines Kipp'schen Apparates H_2S eingeleitet wurde (Vers. 38 - 40). Als nach 1000 h noch kein Bruch erfolgt war, wurden die Stäbe im Zugversuch zerrissen. Die mechanischen Kennwerte und das Bruchverhalten entsprechen unbehandelten Proben.

3.2.2.10 Bruchauswertung:

Sowohl die in den Dauerstandversuchen als auch in den Zugversuchen aufgetretenen Brüche wurden im Hinblick auf das Bruchaussehen, die Lage des Bruches in der Zelle und den Bruchausgang ausgewertet. Da die Bruchcharakteristik von der Spannstahlqualität abhängt, werden die einzelnen Bruchverläufe im folgenden für jede der Qualitäten einzeln erläutert.

Wie schon aus den Ergebnissen der Zugversuche hervorging, konnten grundsätzlich zwei Arten von Brüchen nachgewiesen werden: duktile Brüche und wasserstoffinduzierte Sprödbrüche. Der duktile Bruch ist bei allen Stahlqualitäten durch eine makroskopische Einschnürung im Bereich der Bruchfläche gekennzeichnet. Werden die Bruchflächen im REM untersucht, so zeichnet sich die gesamte Bruchfläche durch Wabenbruch aus. Der Bruchausgang liegt stets im Zentrum der Proben, die Randbereiche bestehen aus mehr oder weniger

großen Bereichen mit Scherlippen. Makroskopisch fehlt beim wasserstoffinduzierten Sprödbbruch die Brucheinschnürung, der Bruchausgang kann je nach Stahlqualität vom Rand oder auch vom Zentrum der Probe ausgehen und der Anteil der Scherlippen ist entweder beträchtlich abgemindert bzw. nicht mehr vorhanden. Bei der mikroskopischen Betrachtung variiert das Bruchaussehen außerordentlich in Abhängigkeit von der Stahlqualität, die einzelnen Ergebnisse werden dargestellt und untereinander verglichen.

St 835/1030 (Stahl A)

Bezüglich der Lage der Bruchausgänge im Bereich der Zelle ließ sich keine Regel ermitteln. Bei zwei Versuchen (33 mit Cl^- -Vorkorrosion, 18 mit SO_4^{--} -Vorkorrosion) lagen die Bruchausgänge außerhalb des ehemaligen Zellbereichs. Im Versuch 18 wirkte eine Korrosionsnarbe der Vorkorrosion bruchauslösend, im Versuch 33 trat zwar eingeschränkte Brucheinschnürung auf, der Bruch selbst verlief aber duktil. Die übrigen Stäbe rissen im Zellbereich.

Die meisten Bruchausgänge (Vers. 30 - 32, 42, 43 und 48) konnten an der Phasengrenze Zellatmosphäre/Lösung festgestellt werden, in zwei Fällen (Vers. 18 und 19) lagen die Bruchausgänge direkt unterhalb der Einfüllbohrung in der Zelle. Bruchausgänge im Bereich der von Lösung umgebenen Oberfläche wurden nicht gefunden. Die Brüche traten sowohl in den ehemals sauerstoffreichen als auch sauerstoffarmen Zellbereichen auf, wobei der sauerstoffreiche Bereich überwog. Dieses Ergebnis galt ebenso bei allen nachfolgenden Stahlqualitäten. Obwohl mit Ausnahme der Nitratversuche zum Teil erhebliche Korrosionsnarben (200 - 300 μm Tiefe, 10 mm lang, 5 - 7 mm breit) auftraten, beeinflussen diese das Bruchverhalten kaum. In fast allen Fällen gingen die Brüche eher von kleineren Korrosionsnarben aus, deren Wirkung gefährlicher zu bewerten ist als die großflächiger Narben.

Bei einigen Versuchen wurde die Staboberfläche im Dauerstandversuch in beiden Bereichen mit Bändern aus Stahl umwickelt, um künstliche Spaltwirkungen zu simulieren. Eine bevorzugte Korrosion dieser Stellen bzw. ein Einfluß auf das Bruchverhalten ergab sich nicht.

Um das spröde Bruchverhalten bei dieser Stahlqualität unter den vorgegebenen Bedingungen zu charakterisieren, sind von der Probe 51, welche die stärkste Versprödung aller Proben aufwies, REM-Aufnahmen angefertigt worden. Der Bruch ging von einer Korrosionsnarbe aus. In diesem Gebiet tritt Wabenbruch auf (Abb. 30), der nach ca. 2 mm Abstand vom Rand des Bruchausganges durch Spaltbruch abgelöst wird. Abb. 31 zeigt die Übergangszone, in der Waben- und Spaltbruch nebeneinander vorliegen. Der gesamte Restbruch besteht aus Spaltbruch.

St 1080/1230 (Stahl B)

Zwei Proben (Vers. 8, SO_4^{--} und Vers. 45, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, beide in Leitungswasser vorgespannt) rissen außerhalb des Zellbereichs. Bei den in S^{--} -enthaltenden Lösungen vorkorrodierten Proben trat der Bruch im sauerstoffarmen Zellbereich ein, sonst lagen die Brüche im sauerstoffreichen Teil der Zelle. In den Versuchen 9, 12 und 13 befand sich der Bruchausgang im Bereich der Stahloberfläche, die unterhalb der Einfüllbohrung der Zelle lag, beim Versuch 26 ging der Bruch von einer Korrosionsnarbe rund 5 mm unter der Lösungsoberfläche aus. Bei den anderen Proben entwickelte sich der Bruch am Übergangsbereich zwischen Lösung und Zellatmosphäre.

Für die Wirkung kleiner oder größerer Korrosionsnarben gilt sinngemäß das gleiche wie für die Stäbe der Qualität St 835/1030.

Alle Brüche wurden mittels Stereomikroskop und REM ausgewertet. Bei den duktil zerrissenen Proben bestand die Bruch-

fläche fast ausschließlich aus Wabenbruch mit nur geringen Spaltbruchanteilen.

Die Brüche, bei denen sich die mechanischen Kennwerte gegenüber den Ausgangswerten verändert hatten, wiesen untereinander ähnliches Bruchaussehen auf. Ausgehend von einer Korrosionsnarbe am Umfang verlief die Bruchstruktur sternförmig in die Restbruchfläche hinein. Stellvertretend für die Vielzahl dieser Brüche sind in den Abb. 32 und 33 die Bruchausgänge der Versuche 12 und 13 dargestellt. Beide Brüche zeichnen sich durch einen linsenförmigen ca. 200 bis 300 µm tiefen dunklen Bruchausgang aus, der im REM als Wabenbruch erscheint. Die gesamte Restbruchfläche besteht aus Spaltbruch. Das Bruchverhalten veränderte sich zwischen den Proben insofern, als daß weniger spröde gerissene Proben einen geringen Scherlippenanteil aufwiesen, der sich ebenfalls aus Wabenbruch zusammensetzte.

Aufgetrennte Korngrenzen oder interkristalline Anrisse konnten nicht nachgewiesen werden.

Abb. 34 zeigt eine Übersicht über den Bruchausgang der Probe 53. Der Bruch beginnt an einer Korrosionsnarbe, die ca. 200 µm in die Bruchfläche hineinragt und aus Wabenbruch, der z. T. mit Korrosionsprodukten belegt ist, besteht (Abb.35). Die Restbruchfläche enthält Spaltbruch, der von transkristallinen Rißanteilen durchsetzt ist (Abb. 36).

St 1375/1570 (Stahl E)

Abb. 37 zeigt die Bruchflächen einer duktil gerissenen Probe (Vers. 63), in Abb. 38 sind die Bruchflächen der spröde gerissenen Proben des Versuches 69 nach Sulfidvorkorrosion dargestellt. Der Bruchausgang lag zwar bei beiden Proben im Zentrum, der Scherlippenbereich ist jedoch bei der Probe 69 deutlich kleiner ausgeprägt und zerfasert. Im REM konnte bei der Probe 63 nur Wabenbruch gefunden werden,

bei der Probe 69 lagen im Mikrobereich Spaltbruchinseln innerhalb von Wabenbruch (Abb. 39 - 41), deren Ausbildung den Einfluß der Wasserstoffaufnahme auf das Bruchgefüge verdeutlicht. Zusätzlich konnten sowohl in den REM-Aufnahmen (Abb. 41, 42) als auch in Querschliffen (Abb. 43 - 44) wasserstoffinduzierte Risse nachgewiesen werden.

Im Vergleich zu den naturharten Stabstählen und vergüteten Drähten fällt auf, daß alle Proben trotz der zum Teil erheblichen Korrosionsnarben (Abb. 45 - 47) einen zentrischen Bruchausgang besaßen.

St 1420/1570 (Stahl D 2)

Die Brüche im Dauerstandversuch zeigten ein makroskopisch sprödes Aussehen, daß durch einen mehr oder weniger stark ausgeprägten sternförmig in die Bruchfläche verlaufenden Hauptbruchanteil mit umlaufenden Schubspannungslippen gekennzeichnet ist (Abb. 48). Je nach Grad der Versprödung verändert sich der Anteil der Scherlippe an der Gesamtbruchfläche.

Unversprödete Proben enthalten einen größeren Bereich mit Schubspannungslippen (Abb. 49), bei versprödeten Proben wird der Anteil reduziert (Abb. 48). Bruchproben ohne Scherlippenanteil, die bei der Qualität St 1080/1230 auftreten, konnten auch bei den im Dauerstandversuch gerissenen Proben nicht gefunden werden. Bei der Probe 67 wurde neben der Bruchfläche in einem Abstand von ca. 1 cm ein weiterer Querriß ermittelt (Abb. 50).

Die Bruchausgänge befanden sich in allen Versuchen am Übergang vom Elektrolyten zur Zellatmosphäre. Ebenso wie bei den Stabstählen gingen die Brüche nicht von den jeweils größten vorhandenen Korrosionsnarben aus.

An den vorzeitig gerissenen Proben 67, 102, 81, 110 und 75 wurden eingehende elektronenoptische Untersuchungen de

Bruchgefüge durchgeführt, die qualitativ ähnliche Ergebnisse lieferten. Der Bruchausgang und ein halbkreisförmiger Anrißbereich, der bis maximal 600 µm in die Bruchfläche hineinragt, besteht aus mikrozähen Bereichen mit interkristallin aufgelösten Gebieten entlang der ehemaligen Austenitkorngrenzen (Abb. 51 - 55). Der Restbruch setzt sich aus Wabenbruch zusammen (Abb. 56), der von einer Vielzahl von Makrorissen (Abb. 57 und 58) durchzogen wird.

Das Bruchverhalten der in alkalischer, mit Rhodanid angereicherter Lösung vorkorrodierten Proben (Versuche 146, 147, 161) kann wie folgt beschrieben werden:

Makroskopisch zeigten sowohl die im Dauerstand- als auch im Zugversuch gerissenen Proben mit fehlender bzw. stark abgeminderter Brucheinschnürung und unbedeutenden Anteilen an Scherlippen in der Bruchfläche charakteristische Merkmale eines wasserstoffinduzierten Sprödbrechens. REM-Aufnahmen der Bruchflächen bestätigten diesen Befund auch in mikroskopischen Bereichen der Bruchfläche. Abb. 59 zeigt interkristallin aufgelöste Bereiche im Bruchausgang der nach 161 h im Dauerstandversuch gerissenen Probe des Stahles D 2. Die Restbruchfläche bestand aus Wabenbruch, der teilweise von Innenrissen durchsetzt war (Abb. 60). Qualitativ ergab sich auch bei der nach 1 h gerissenen Probe ein vergleichbares Bruchbild. Der interkristallin aufgelöste Bereich im Randbereich des Bruches nahm jedoch eine geringere Fläche ein als bei der nach 161 h gerissenen Probe. Bestimmend für das Eintreten des Bruches war ein im Inneren der Probe verlaufender, verästelter Makroriß (Abb. 61). Mit großer Wahrscheinlichkeit ist das Versagen dieser kurzfristig gerissenen Probe auf die Wasserstoffabsorption während der Vorkorrosion zurückzuführen. Die anschließende mechanische Belastung bewirkte ein sehr schnelles Rißwachstum bereits vorhandener Rißkeime, so daß ein Versagen der Probe bereits nach 1 h eintrat.

4. Zusammenfassung:

4.1 Vorkorrosion:

Um zu untersuchen, ob die Vorkorrosion mit unterschiedlichen Elektrolyten die mechanischen Eigenschaften des Spannstahles korrosionsbedingt beeinflußt, wurden im Anschluß an die Vorkorrosion Zugversuche an den Spannstählen durchgeführt und deren Ergebnisse mit den Werten von unbehandelten Proben verglichen. Obwohl die Stähle insbesondere nach der Vorkorrosion in chlorid- und sulfathaltigen Elektrolyten zum Teil erhebliche flächen- oder narbenförmige Korrosionserscheinungen aufwiesen (s. Endbericht), trat bei keiner Stahlqualität eine Minderung der Festigkeits- oder Zähigkeitseigenschaften im Zugversuch ein.

4.2 Dauerstandversuche:

4.2.1 Spannstahl A (St 835/1030, d = 26 mm):

Weder in ges. Calciumhydroxidlösung mit Zusätzen an Chloriden und Sulfaten noch in Leitungswasser konnten innerhalb von 1000 Stunden Brüche im Dauerstandversuch beobachtet werden. In den anschließenden Zugversuchen zeigten die Zugfestigkeit und Streckgrenze nur unbedeutende Abweichungen von den Ausgangswerten. Dieses Ergebnis galt für beide im Dauerstandversuch verwendeten Elektrolyten gleichermaßen. Ebenso blieb die Bruchdehnung nach allen Arten der Vorkorrosion und den folgenden Dauerstandversuchen unbeeinflußt. Die Brucheinschnürung, die am empfindlichsten auf eine Wasserstoffaufnahme der Spannstähle oder durch Korrosion bedingte Kerbwirkungen reagiert, wurde mit Ausnahme der Vorkorrosion in nitrathaltiger Umgebung, bei der keine Abminderung beobachtet wurde, auch in den anderen Vorkorrosionsmedien nur geringfügig (20 - 40 %) unter die ursprüng-

lichen Werte abgesenkt. Ein Unterschied zwischen den Elektrolyten im Dauerstandversuch hinsichtlich ihrer Wirkung konnte nicht nachgewiesen werden.

Trotz der teilweise abgeminderten Werte der Brucheinschnürung zeigten die REM-Aufnahmen der Brüche duktilen Charakter, die Veränderung der Werte kann durch die Kerbwirkung der Korrosionsnarben, die auch vielfach den Bruchausgang bilden, erklärt werden.

4.2.2 Spannstahl B (St 1080/1230, d = 26 mm):

Auch bei dieser Stahlqualität trat innerhalb der vorgegebenen Zeitgrenze kein Bruch im Dauerstandversuch ein. Streckgrenze und Zugfestigkeit wiesen mit Ausnahmen der Cl^- -Vorkorrosion und Dauerstandversuch in Leitungswasser keine größeren Abweichungen von den Ausgangswerten auf. Zwischen den Medien im Dauerstandversuch ergaben sich in ihrer Wirkung insofern Unterschiede, als daß die ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen in ihrem Einfluß auf das Korrosionsverhalten der Spannstähle gefährlicher einzuschätzen ist, da in diesem Medium mit Ausnahme der Nitratvorkorrosion alle anderen Arten der Vorkorrosion zu erheblichen Abminderungen sowohl der Bruchdehnung als auch -einschnürung führten. In Leitungswasser waren mit Ausnahme der Cl^- -Vorkorrosion die Abminderungen der Verformungskennwerte zum Teil geringer ausgeprägt.

Brüche mit abgeminderten Werten der Dehnung und Einschnürung zeigten im REM Spaltbruch, der Bruchausgang befand sich am Umfang und ging von Korrosionsnarben aus. Kleinere Korrosionsnarben waren dabei ungünstiger einzuschätzen in ihrer Wirkung auf das Korrosionsverhalten als großflächige Narbenbereiche. Die veränderten Verformungskennwerte sind auf eine kombinierte Wirkung von korrosionsbedingter Wasserstoffaufnahme und Kerben zurückzuführen.

4.2.3 Spannstahl D 2 (St 1420/1570, d = 12,2 mm):

In den Versuchen mit dem vergüteten Spannstahl D 2 rissen beim Dauerstandversuch in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen innerhalb von 1000 Stunden Stähle, die in SO_3^{--} - bzw. S^{--} -haltiger Umgebung vorkorrodieren waren, in Leitungswasser ergaben sich vorzeitige Brüche nach Vorkorrosion in Cl^- - bzw. S^{--} -haltigen Lösungen. Zugfestigkeit und Streckgrenze zeigten in den restlichen im Zugversuch gerissenen Proben keine abweichenden Ergebnisse, während wiederum mit Ausnahme der Nitratvorkorrosion alle anderen eingesetzten Arten der Vorkorrosion erhebliche Abminderungen von Bruchdehnung und -einschnürung bewirkten. In der ges. Calciumhydroxidlösung mit Zusätzen traten diese Versprödungsercheinungen stärker hervor als in Leitungswasser.

Die vorzeitigen Brüche gingen von Randbereichen mit aufgelösten ehemaligen Austenitkorngrenzen aus, während der Restbruch aus Wabenbruch bestand. Bruchauslösend wirkte die bekannte, die Rekombination der durch Korrosion erzeugten Wasserstoffatome zum Wasserstoffmolekül hemmende Wirkung der Sulfid bzw. HS-Ionen an der Oberfläche der Stähle. Dadurch entstanden hohe Wasserstoffaktivitäten, die das Eindringen des Wasserstoffs in den Stahl förderten und zu vorzeitigen Sprödbrüchen führten.

4.2.4 Spannstahl E (St 1375/1570, d = 12,2 mm):

Die höchste Widerstandsfähigkeit gegen korrosionsbedingte Wasserstoffversprödung zeigte der kaltgezogene Spannstahl E. Lediglich die S^{--} -Vorkorrosion mit anschließendem Dauerstandversuch in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen an Chloriden und Sulfaten führte zu einer erheblichen Einschränkung der mechanischen Kennwerte im nachfolgenden Zugversuch. Alle anderen Versuche sowohl in Leitungswasser als auch im praxisnahen Hüllrohrelektrolyten führten zu keiner merklichen Veränderung der Stahleigenschaften.

Die spröden Brüche nach der Sulfidvorkorrosion waren gekennzeichnet durch Wabenbruch mit Spaltbruchanteilen und erheblichen inneren Rissen.

4.2.5 Vorkorrosion in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen an Sulfat-, Chlorid- und Rhodanidionen:

Diese Versuche wurden nur an den Stahlqualitäten B, D 2 und E durchgeführt. Qualitativ ergab sich eine ähnliche Empfindlichkeitsabstufung gegen wasserstoffinduzierte Brüche wie bei den vorher beschriebenen Versuchen. Sowohl in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Zusätzen als auch in Leitungswasser traten Brüche im Dauerstandversuch nach relativ kurzer Zeit nur beim Spannstahl D 2 auf, während die Qualitäten B und E im anschließenden Zugversuch erhebliche Abminderungen in ihren Verformungskennwerten aufwiesen. Insgesamt ist die Wirkung der Rhodanidzusätze vergleichbar mit dem Einfluß der Sulfide. Die passivitätszerstörende bzw. -hemmende Wirkung tritt jedoch stärker in Erscheinung als bei der Sulfidvorkorrosion, während der Einfluß auf die Wasserstoffaufnahme in derselben Größenordnung liegt.

4.3 Abschließendes Fazit:

Unter den äußerlich gleichen Bedingungen einer Vorkorrosion in verschiedenen salzhaltigen Medien zeigen die Spannstähle A und E die höchste Widerstandsfähigkeit gegen wasserstoffinduzierte Versprödungseffekte, während an den Spannstählen B und insbesondere D 2 erhebliche Abminderungen ihrer Zähigkeitseigenschaften bzw. Brüche im Dauerstandversuch (D 2) auftraten. Mit Ausnahme der Nitrate, die eine Stabilisierung bestehender Rostschichten auf den Stählen bewirkten und in keinem Fall zu Versprödungseffekten führten, sind alle anderen Ionensorten in feuchter Umgebung als korrosionsfördernd einzustufen. Sulfide, Sulfite und Rhodanide begünstigen die Ausbildung hoher Wasserstoffaktivitäten durch Hemmung der Rekombinationsreaktion des atomaren Wasserstoffs.

Leitungswasser bewirkt im Vergleich zu dem praxisnahen Hüllrohrwasser (ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung mit Chlorid- und Sulfatzusätzen) eine geringere Gefährdung der Spannstähle hinsichtlich einer wasserstoffinduzierten Abminderung der Gebrauchseigenschaften.

5. Tabellen:

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe

Werkstoff- bezeichnung	handelsübliche Bezeichnung	Durchmesser in mm	Massengehalt in %								
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Al.Lös.	V
A	St 835/1030	26	0,73	0,74	1,37	0,013	0,028	0,17	0,06	0,042	-
B	St1080/1230	26	0,71	0,81	1,41	0,012	0,021	0,15	0,04	0,032	0,26
D 2	St1420/1570	12,2	0,50	1,80	0,62	0,012	0,018	0,05	0,40	0,036	-
E	St1375/1570	12,2	0,83	0,26	0,64	0,010	0,012	0,02	0,03	0,032	-

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte der Versuchswerkstoffe

Werkstoff- bezeichnung	Herstellungs- art	Streckgrenze $R_{p\ 0,2}$ N/mm ²	Zugfestigkeit R_m N/mm ²	Bruchdehnung A_{10} %	Brucheinschnürung Z %
A	warmgewalzt	908	1056	9,9	31,4
B	warmgewalzt	1165	1287	8,1	29,5
D 2	vergütet	1499	1607	8,1	53,0
E	kaltgezogen	1526	1673	7,0	42,0

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
1	St 1080/1230 B	ohne Vorkorrosion 4 Rundkerben	metallisches Hüllrohr	dest. Wasser	> 1000 h
2	St 1080/1230 B	siehe Versuch 1	metallisches Hüllrohr	dest. Wasser	> 1000 h
3	St 835/1030 A	siehe Versuch 1	metallisches Hüllrohr	dest. Wasser	> 1000 h
4	St 835/1030 A	siehe Versuch 1	metallisches Hüllrohr	ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung + 500 mg/l SCN^-	> 1000 h
5	St 1080/1230 B	ohne Vorkorrosion	metallisches Hüllrohr	ges. PZ 45-Lsg. + 500 mg/l SCN^- + 4000 mg/l SO_4^{--}	> 1000 h
6	St 835/1030 A	Dachauslagerung im Hüllrohr	metallisches Hüllrohr	Leitungswasser	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
7	St 1080/1230 B	siehe Versuch 6	metallisches Hüllrohr	Leitungswasser	> 1000 h
8	St 1080/1230 B	SO ₄ ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
9	St 1080/1230 B	SO ₄ ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
10	St 1080/1230 B	NO ₃ ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
11	St 1080/1230 B	NO ₃ ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
12	St 1080/1230 B	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
13	St 1080/1230 B	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
14	St 835/1030 A	Dachauslagerung im Hüllrohr, 2300 h	PVC-Doppelzelle	ges. PZ 45-Lsg. + 500 mg/l SCN ⁻ +4000 mg/l SO ₄ ⁻	> 1000 h
15	St 1080/1230 B	siehe Versuch 14	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 14	> 1000 h
16	St 845/1030 A	SO ₄ ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	ges. Ca(OH) ₂ -Lsg. + 500 mg/l Cl ⁻ +4000 mg/l SO ₄ ⁻	> 1000 h
17	St 835/1030 A	NO ₃ ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16 + Banda- gen als Spaltelemente	> 1000 h
18	St 845/1030 A	SO ₄ ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
19	St 835/1030 A	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
20	St 835/1030 A	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
21	St 835/1030 A	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
22	St 1080/1230 B	NO_3^- , 500 h	--	--	--
23	St 1080/1230 B	SO_4^{--} , 500 h	--	--	--
24	St 1080/1230 B	Cl^- , 500 h	--	--	--
25	St 1080/1230 B	Cl^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
26	St 1080/1230 B	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
27	St 1080/1230 B	NO_2^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
28	St 835/1030 A	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
29	St 835/1030 A	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
30	St 835/1030 A	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
31	St 835/1030 A	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
32	St 835/1030 A	Cl^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
33	St 835/1030 A	Cl^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
34	St 1080/1230 B	SO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
35	St 1080/1230 B	SO_3^{--} , 500 h	--	--	--
36	St 1080/1230 B	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
37	St 1080/1230 B	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
38	St 1080/1230 B	ohne Vorkorrosion	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser + 2 x tägliches Einleiten von H_2S	> 1000 h
39	St 835/1030 A	ohne Vorkorrosion	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 38	> 1000 h
40	St 835/1030 A	ohne Vorkorrosion	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16 + 2 x tägliches Einleiten von H_2S	> 1000 h
41	St 835/1030 A	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
42	St 835/1030 A	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
43	St 835/1030 A	SO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
44	St 1080/1230 B	SO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuche 16	> 1000 h
45	St 1080/1230 B	$Cl^- + SO_4^{--}$, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
46	St 1080/1230 B	$Cl^- + SO_4^{--}$, 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h
47	St 835/1030 A	$Cl^- + SO_4^{--}$, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
48	St 835/1030 A	$Cl^- + SO_4^{--}$, 500 h	PVC-Doppelzelle	siehe Versuch 16	> 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
49	St 1080/1230 B	S ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	> 1000 h
50	St 1080/1230 B	S ⁻⁻⁻ , 500 h	--	--	--
51	St 835/1030 A	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	ges. Ca(OH)-Lsg.+ Zusätze	t > 1000 h
52	St 835/1030 A	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
53	St 1080/1230 B	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
54	St 1080/1230 B	dest.Wasser, 500 h	--	--	--
55	St 835/1030 A	S ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
56	St 835/1030 A	S ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
57	St 835/1030 A	SO ₃ ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
58	St 835/1030 A	SO ₃ ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
59	St 1080/1230 B	SO ₃ ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
60	St 1080/1230 B	SO ₃ ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
61	St 1420/1570 D 2	dest. Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
62	St 1420/1570 D 2	dest. Wasser, 500 h	--	--	--

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
63	St 1375/1570 E	dest. Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
64	St 1375/1570 E	dest. Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
65	St 1375/1570 E	SO ₃ ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
66	St 1375/1570 E	SO ₃ ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
67	St 1420/1570 D 2	SO ₃ ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	Bruch nach 150 h
68	St 1420/1570 D 2	SO ₃ ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
69	St 1375/1570 E	S ⁻⁻⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
70	St 1375/1570 E	S ²⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
71	St 1420/1570 D 2	ohne Vorkorrosion	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
72	St 1420/1570 D 2	S ²⁻ , 500 h	--	--	--
73	St 1375/1570 E	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
74	St 1375/1570 E	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
75	St 1420/1570 D 2	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	Bruch nach 612 h
76	St 1420/1570 D 2	Cl ⁻ , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
77	St 1375/1570 E	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
78	St 1375/1570 E	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
79	St 1420/1570 D 2	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
80	St 1420/1570 D 2	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
81	St 1420/1570 D 2	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	Bruch nach 42 h
82	St 1375/1570 E	NO_3^- , 500 h	--	--	--
83	St 1375/1570 E	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
84	St 1420/1570 D 2	NO_3^- , 500 h	--	--	--
85	St 1375/1570 E	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
86	St 1420/1570 D 2	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
87	St 1420/1570 D 2	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
88	St 1420/1570 D 2	SO_3^{--} , 500 h	--	--	--
89	St 1420/1570 D 2	SO_3^{--} , 500 h	--	--	--
90	St 1375/1570 E	dest.Wasser, 500 h	--	--	--

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
91	St 1375/1570 E	S^{--} , 500 h	--	--	--
92	St 1420/1570 D 2	NO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	t > 1000 h
93	St 1420/1570 D 2	NO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
94	St 1420/1570 D 2	SO_4^{--} , 500 h	--	--	--
95	St 1375/1570 E	SO_4^{--} , 500 h	--	--	--
96	St 1420/1570 D 2	Cl^- , 500 h	--	--	--
97	St 1375/1570 E	Cl^- , 500 h	--	--	--

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
98	St 1420/1570 D 2	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	$t > 1000$ h
99	St 1420/1570 D 2	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	$t > 1000$ h
100	St 1375/1570 E	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	$t > 1000$ h
101	St 1375/1570 E	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	$t > 1000$ h
102	St 1420/1570 D 2	SO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	Bruch nach 27 h
110	St 1420/1570 D 2	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 51	Bruch nach 20 h
111	St 1420/1570 D 2	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	379 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
112	St 1375/1570 E	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung	t > 1000 h
113	St 1375/1570 E	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
114	St 1375/1570 E	SO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
115	St 1375/1570 E	SO_3^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
116	St 1420/1570 E	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
117	St 1420/1570 D 2	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
118	St 1420/1570 D 2	dest. Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
119	St 1420/1570 D 2	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
120	St 1420/1570 D 2	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
121	St 1420/1570 D 2	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
122	St 1375/1570 E	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
123	St 1375/1570 E	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
124	St 1375/1570 E	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
125	St 1375/1570 E	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
126	St 1375/1570 E	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
127	St 1420/1570 D 2	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
128	St 1420/1570 D 2	NO_3^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 112	t > 1000 h
129	St 1375/1570 E	NO_4^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h
130	St 1080/1230 B	Cl^- , 500 h	PVC-Doppelzelle	ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lsg.+ Zus.	t > 1000 h
131	St 1080/1230 B	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
132	St 1080/1230 B	dest.Wasser, 500 h	PVC-Doppelzelle	Leitungswasser	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
133	St 1080/1230 B	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
134	St 835/1030 A	SO_4^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h
135	St 1080/1230 B	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
136	St 835/1030 A	S^{--} , 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h
137	St 1080/1230 B	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
138	St 835/1030 A	$\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$, 500 h	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
139	St 1030/1230 B	ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lsg. + $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^- + \text{SCN}^-$	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
140	St 1080/1230 B	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
141	St 1375/1570 E	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h
142	St 1375/1570 E	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
143	St 1420/1570 D 2	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 130	t = 161 h
144	St 1420/1570 D 2	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h
145	St 1375/1570 E	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h
146	St 1420/1570 D 2	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 130	t = 1 h

Tabelle 3:

Übersicht der Versuche

Versuch Nr.	Qualität	Vorkorrosion	Dauerstandversuche		
			Zelltyp	Medium	Standzeit
147	St 1420/1570 D 2	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 132	t = 65 h
148	St 1375/1570 E	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
149	St 1080/1230 B	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 130	t > 1000 h
150	St 1080/1230	s. 139	PVC-Doppelzelle	s. 132	t > 1000 h

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
1 - 7, ohne Vorkorrosion	duktil	--
8, SO_4^{--}	duktil	außerhalb der Zelle, Bruchausgang zentrisch
9, SO_4^{--}	eingeschränkte Brucheinschnürung	Bruchausgang am Umfang des Stabes oberhalb der Einfüllbohrung im sauerstoffreichen Bereich
10, NO_3^-	duktil	25 cm im sauerstofffreien Bereich, Bruchausgang zentrisch
11, NO_3^-	duktil	Bruchausgang zentrisch im Grenzbereich zwischen sauerstoffreichem und -freiem Bereich
12, Cl^-	spröde	siehe Versuch 9
13, Cl^-	spröde	siehe Versuch 9
14 + 15, Dachauslagerung	duktil	10 bzw. 15 cm im sauerstoffreichen Bereich, zentrischer Bruchausgang

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
16, SO_4^{--}	eingeschränkte Brucheinschnürung	siehe Versuch 9
17, NO_3^-	duktil	außerhalb der Zelle
18, SO_4^{--}	eingeschränkte Brucheinschnürung	von einer Korrosionsnarbe am Umfang außerhalb der Zelle ausgehend
19, Cl^-	eingeschränkte Brucheinschnürung	siehe Versuch 9
20, Cl^-	eingeschränkte Brucheinschnürung	zentrischer Bruchausgang, 30 cm im sauerstoffreichen Bereich
21, NO_3^-	duktil	außerhalb der Zelle, zentrischer Bruchausgang
22 - 24 NO_3^- , SO_4^{--} , Cl	duktil	kein Dauerstandversuch

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
25, Cl ⁻	spröde	siehe Versuch 9, von einer tiefen Korrosionsnarbe
26, SO ₄ ⁻⁻	spröde	14 cm im sauerstoffreichen Bereich, von einer Korrosionsnarbe ungefähr 5 mm unterhalb der Grenzlinie zwischen Zellatmosphäre und Ca(OH) ₂ -Lösung ausgehend
27, NO ₃ ⁻	duktil	zentrischer Bruchausgang 17 cm im sauerstoffreichen Bereich
28, NO ₃ ⁻	duktil	außerhalb der Zelle
29, NO ₃ ⁻	duktil	außerhalb der Zelle
30, SO ₄ ⁻⁻	duktil	sauerstoffarmer Bereich, 7 cm in der Zelle, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre
31, SO ₄ ⁻⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	siehe Versuch 30
32, Cl ⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	sauerstoffarmer Bereich, 6 cm in der Zelle, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
33, Cl ⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	außerhalb der Zelle, Risse neben der Bruchfläche, Bruchausgang zentrisch
34, SO ₃ ⁻⁻	stark verringerte Dehnung	11 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang zentrisch mit normaler Einschnürung
35, SO ₃ ⁻⁻	duktil	zentrischer Bruchausgang
36, S ⁻⁻	eingeschränkte Dehnung und Brucheinschnürung	43 cm im sauerstoffarmen Bereich, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre
37, S ⁻⁻	eingeschränkte Dehnung und Brucheinschnürung	15 cm im sauerstoffarmen Bereich, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre ausgehend von einer großen Korrosionsnarbe
38 - 40 ohne Vorkorrosion	duktil	zentrischer Bruchausgang
41, S ⁻⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	33 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang zentrisch

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
42, S ⁻⁻⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	32 cm im sauerstoffarmen Bereich, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre ausgehend von einer lochfraßähnlichen Korrosionsnarbe
43, SO ₃ ⁻⁻⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	34 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre ausgehend von einer Korrosionsnarbe der Vorkorrosion
44, SO ₃ ⁻⁻⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	14 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang siehe Versuch 43
45, SO ₄ ⁻⁻⁻ + Cl ⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	außerhalb der Zelle
46, SO ₄ ⁻⁻⁻ + Cl ⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung und Dehnung	44 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang seitlich am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre
47, SO ₄ ⁻⁻⁻ + Cl ⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	6 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang siehe Versuch 46
48, SO ₄ ⁻⁻⁻ + Cl ⁻	eingeschränkte Brucheinschnürung	44 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang siehe Versuch 46

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
49, S ⁻⁻	duktil	5 cm im sauerstoffarmen Bereich, Bruchausgang zentrisch
50, S ⁻⁻	duktil	Bruchausgang zentrisch
51, dest. Wasser	spröde	40 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang am Übergang zwischen Lösung und Zellatmosphäre, Spaltkorrosion unterhalb der Zelltrennung
52, dest. Wasser	duktil	29 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang mittig, keine Korrosion größeren Ausmaßes
53, dest. Wasser	spröde	s. Versuch 51
54, dest. Wasser	duktil	38 cm im sauerstoffreichen Bereich, leichte Oberflächenkorrosion
55, S ⁻⁻	duktil	20 cm im sauerstoffreichen Bereich, geringer Korrosionsangriff, Bruchausgang zentrisch
56, S ⁻⁻	spröde	38 cm im sauerstoffarmen Bereich, Bruchausgang oberhalb der Lösung, ausgehend von einer kleinen Korrosionsnarbe, nur geringer Korrosionsangriff

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
57, SO ₃ ⁻⁻	duktil	17 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang zentrisch, vorhandene Korrosionsnarben besitzen keinen Einfluß auf das Bruchverhalten
58, SO ₃ ⁻⁻	duktil	36 cm im sauerstoffreichen Bereich, s. 57
59, SO ₃ ⁻⁻	spröde	39 cm im sauerstoffarmen Bereich, Bruchausgang am Übergang Lösung/Zellatmosphäre
60, SO ₃ ⁻⁻	spröde	20 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang oberhalb der Lösung ausgehend von einer Korrosionsnarbe
61, dest. Wasser	eingeschränkte Dehnung und Brucheinschnürung	12 cm im sauerstoffreichen Bereich, Bruchausgang an einer tiefen Korrosionsnarbe am Übergang Lösung/Atmosphäre
62, dest. Wasser	duktil	Bruchausgang am Übergang Lösung, Atmosphäre, keine Narben
63, dest. Wasser	duktil	Bruchausgang zentrisch
64, dest. Wasser	duktil	s. 63, starke Narbenkorrosion durch Spaltelemente

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
65, SO ₃ ⁻⁻	duktil	s. 63, starke Narbenkorrosion
66, SO ₃ ⁻⁻	duktil	s. 63, starke Narbenkorrosion
67, SO ₃ ⁻⁻	Sprödbbruch im Dauerstandversuch nach 150 h	Bruchausgang 12 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang Lösung/Zellatmosphäre
68, SO ₃ ⁻⁻	duktil	s. 63, Narbenkorrosion
69, S ⁻⁻	spröde	Bruchausgang zentrisch, Scherlippen zerfasert
70, S ⁻⁻	duktil	Bruchausgang zentrisch, Korrosionsnarben, 14 cm im sauerstoffreichen Bereich
71, ohne Vorkorrosion	duktil	Bruchausgang zentrisch 16 cm im sauerstoffreichen Bereich, keine Korrosionsnarben
72, S ⁻⁻	duktil	Spaltkorrosion aus der Vorkorrosion

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
73, Cl ⁻	duktil	Bruchausgang zentrisch 30 cm im sauerstoffreichen Bereich
74, Cl ⁻	duktil	s. 73
75, Cl ⁻	spröde nach 612 h im Dauerstandversuch	außerhalb des Zellbereichs von einer lochfraßähnlichen Korrosionsnarbe ausgehend
76, Cl ⁻	spröde	Bruchausgang 25 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang Lösung/Atmosphäre
77, SO ₄ ⁻⁻	spröde	Bruchausgang 18 cm im sauerstoffreichen Bereich, Lochfraßnarbe als Bruchausgang
78, SO ₄ ⁻⁻	duktil	Bruchausgang zentrisch 6 cm im sauerstoffreichen Bereich
79, SO ₄ ⁻⁻	spröde	Bruchausgang 7 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang Lösung/Atmosphäre
80, SO ₄ ⁻⁻	spröde	12 cm, s. 79

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
81, S ⁻⁻	Sprödbbruch nach 42 h im Dauerstandversuch	Bruchausgang 45 cm im sauerstoffreichen Bereich in der Lösung
82, NO ₃ ⁻	duktil	
83, NO ₃ ⁻	duktil	Bruchausgang 13 cm im sauerstoffarmen Bereich, zentrisch
84, NO ₃ ⁻	duktil	
85, NO ₃ ⁻	duktil	22 cm, s. 83
86, dest. Wasser		42, cm, s. 83
87, S ⁻⁻	duktil	24 cm, s. 83
88, SO ₃ ⁻⁻	duktil	
89, SO ₃ ⁻⁻	duktil	

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
90, dest. Wasser	duktil	
91, S ²⁻	duktil	
92, NO ₃ ²⁻	duktil	
93, NO ₃ ⁻	duktil	
94, SO ₄ ²⁻	duktil	
95, SO ₄	duktil	
96, Cl ⁻	duktil	
97, Cl ⁻	duktil	
98, SO ₄ ²⁻ + Cl	spröde	Bruchausgang 21 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang Lösung/Atmosphäre, starke abtragende Korrosion

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
99, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	duktil	Bruchausgang 12 cm zentrisch im sauerstoffreichen Gebiet
100, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	duktil	Bruchausgang zentrisch im Trennbereich der Zelle
101, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	duktil	s. 99
102, SO_3^{--}	Sprödbbruch nach 27 h im Dauerstandversuch	40 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang zwischen der Lösung und Atmosphäre
110, S^{--}	Sprödbbruch nach 20 h im Dauerstandversuch	s. 102
111, S^{--}	spröde	Bruchausgang 16 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang Lösung/Atmosphäre
112, SO_4^{--}	duktil	Bruchausgang zentrisch 10 cm im sauerstoffreichen Bereich
113, SO_4^{--}	duktil	s. 112 (12 cm)

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
114, SO_3^{--}	duktil	s. 112 (30 cm)
115, SO_3^{--}	duktil	s. 112 (5 cm) starke Narbenkorrosion
116, SO_4^{--}	spröde	s. 111 (35 cm)
117, SO_4^{--}	spröde	s. 111 (19 cm)
118, dest. Wasser	duktil	zentrischer Bruchausgang 10 cm im sauerstoffarmen Bereich, keine Korrosionsnarben
119, dest. Wasser	duktil	Bruchausgang 16 cm im sauerstoffreichen Bereich am Übergang Lösung/Atmosphäre, leichte Narbenbildung
120, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	spröde	Bruchausgang s. 111 (25 cm), sehr starke Narbenkorrosion an der Grenzfläche Lösung/Atmosphäre
121, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	spröde	s. 111 (25 cm)

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
122, dest. Wasser	duktil	s. 112 (20 cm)
123, dest. Wasser	duktil	s. 112 (15 cm)
124, NO_3^-	duktil	s. 112 (23 cm)
125, NO_3^-	duktil	s. 112 (30 cm)
126, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	duktil	s. 112 (12 cm)
127, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$	duktil	s. 112 (11 cm)
128, NO_3^-	spröde	s. 111 (16 cm) leichte Narben
129, NO_3^-	duktil	s. 112 (22 cm)
130, Cl^-	spröde	Bruchausgang 12 cm im sauerstoffreichen Bereich der Zelle, Korrosionsnarbe am Bruchausgang

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
131, dest. Wasser	duktil	Bruchausgang 22 cm im sauerstoffreichen Bereich, gleichmäßige Verrostung, keine Narben
132, dest. Wasser	spröde	s. 130 (12 cm), keine Narben
133, SO_4^{--}	spröde	s. 130 (38 cm)
134, SO_4^{--}	duktil	s. 130 (30 cm), Bruchausgang mittig
135, S^{--}	spröde	s. 130 (19 cm)
136, S^{--}	duktil	s. 130 (44 cm), kleine Narben
137, $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}$	spröde	s. 130 (43 cm), langgezogene Narben am Übergang Lösung/Zellatmosphäre
138, $\text{SO}_4^{--} - \text{Cl}$	spröde	s. 130 (4 cm), Korrosionsnarbe am Übergang als Bruchausgang
139, ges. Ca(OH) Lsg. + SO_4 + Cl^{-2} - SCN^4	spröde	außerhalb der Zelle

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
140, s. 139	spröde	s. 130 (14 cm), Bruchausgang am Umfang
141, s. 139	duktil	Bruchausgang zentrisch 6 cm im sauerstoffreichen Bereich
142, s. 139	duktil	s. 141, zahlreiche lochfraßähnliche Narben auf der Oberfläche
143, s. 139	spröde	$t_s = 161$ h, Bruchausgang am Übergang Lösung/Zellatmosphäre, Lochfraß auf der Oberfläche
144, s. 139	spröde	s. 130 (3 cm) Lochfraß
145, s. 139	duktil	zentrischer Bruchausgang, 16 cm im sauerstoffreichen Teil der Zelle
146, s. 139	spröde	$t_s = 1$ h, s. 143
147, s. 139	spröde	$t_s = 65$ h, s. 143
148, s. 139	duktil	s. 141

Tabelle 4:

Auswertung der Brüche aus den Dauerstand- und Zugversuchen
im Anschluß an die Dauerstandversuche

Versuch-Nr. + Art der Vorkorrosion	Bruchverhalten	Lage des Bruches in der Zelle und Bemerkungen
149, s. 139	spröde	s. 130 (20 cm) starke Narbenkorrosion
150, s. 139	spröde	s. 130 (38 cm) starke Narbenkorrosion

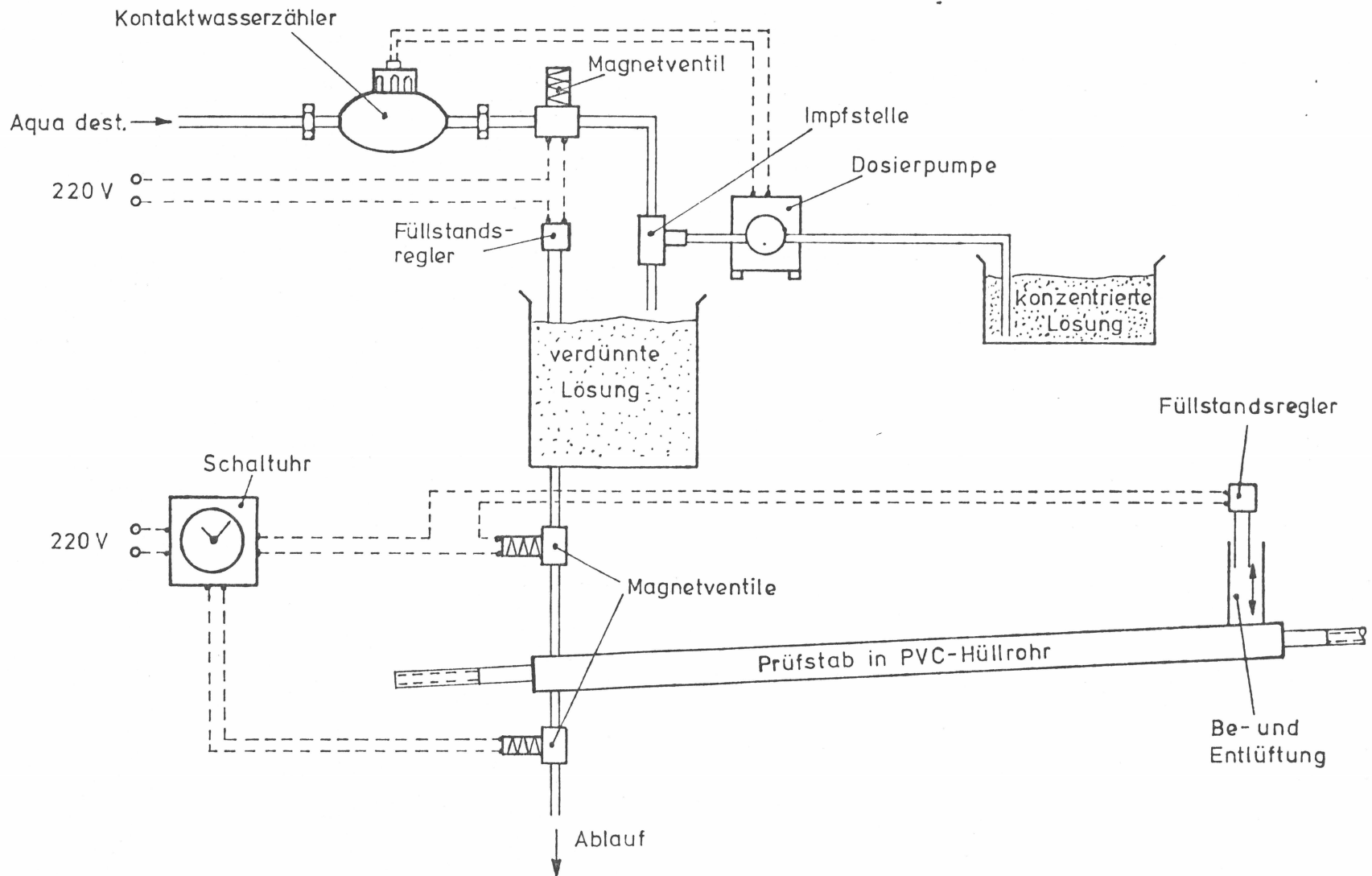


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Vorkorrosions-Prüfanlage

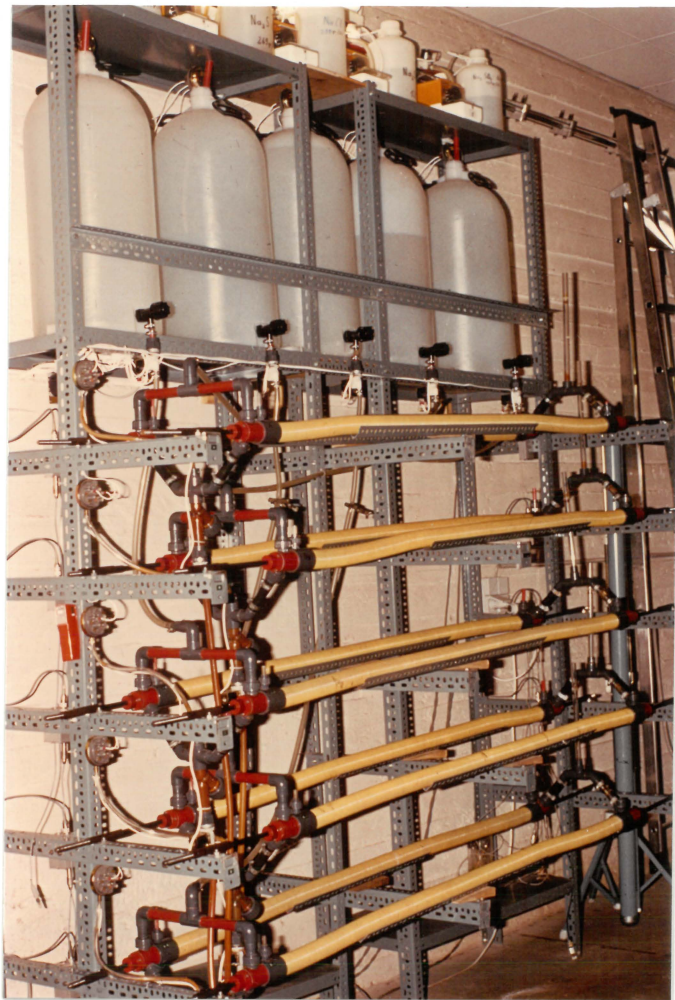


Abb. 2:
Vorkorrosionsanlage

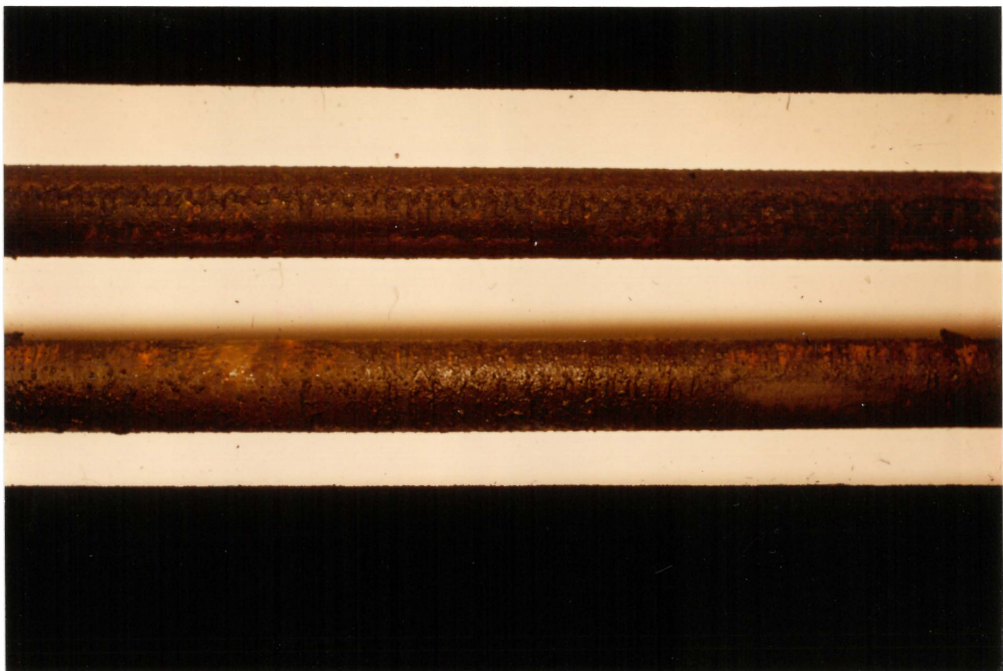


Abb. 3: Vorkorrosion in Cl^- -haltiger Umgebung
(500 mg/l), Stahl B

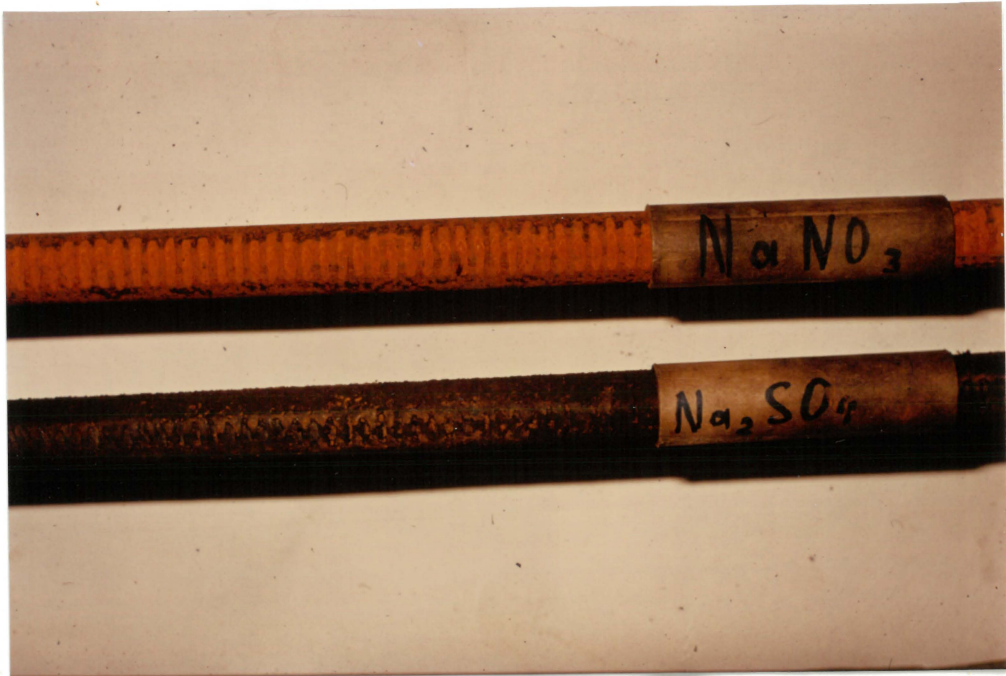


Abb. 4: Vorkorrosion in NO_3^- - bzw. SO_4^{--} -haltiger Umgebung (500 mg/l), Stahl ^B

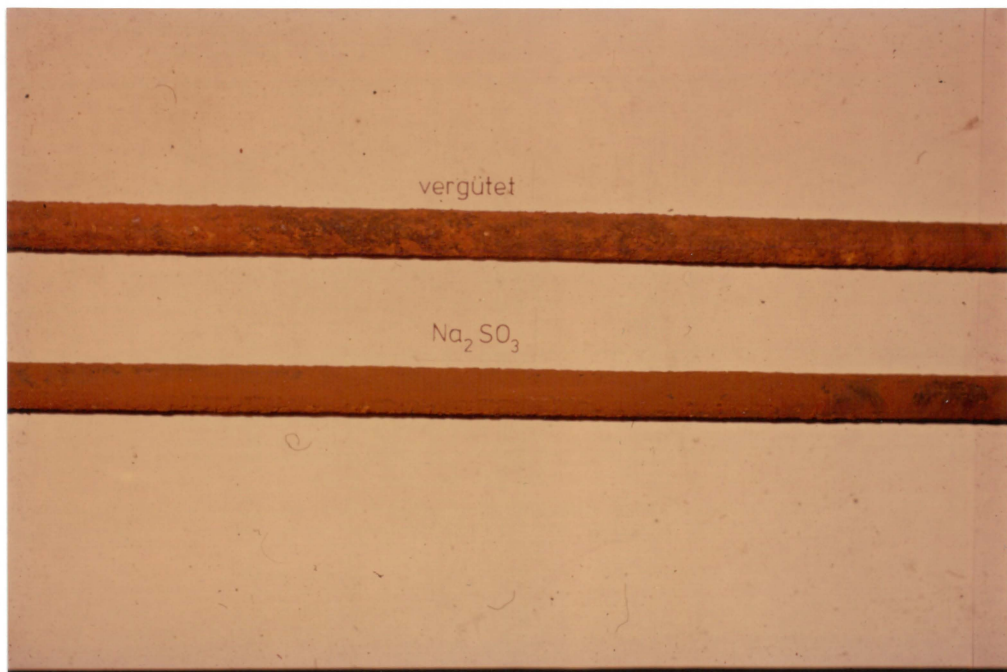


Abb. 5: Vorkorrosion in SO_3^{--} -haltiger Umgebung (300 mg/l) Stahl ^{D 2}



Abb. 6: Vorkorrosion in SO_3^{--} -haltiger Umgebung
(300 mg/l) Stahl E



Abb. 7: Vorkorrosion in S^{--} -haltiger Umgebung
(300 mg/l), Stahl E

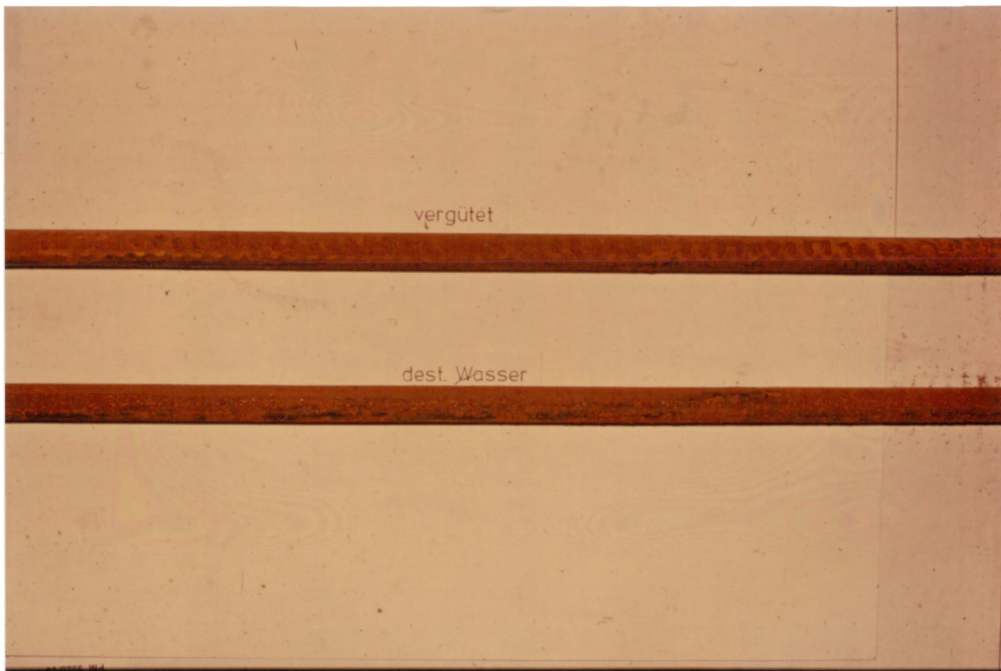


Abb. 8: Vorkorrosion in destilliertem Wasser,
Stahl D 2

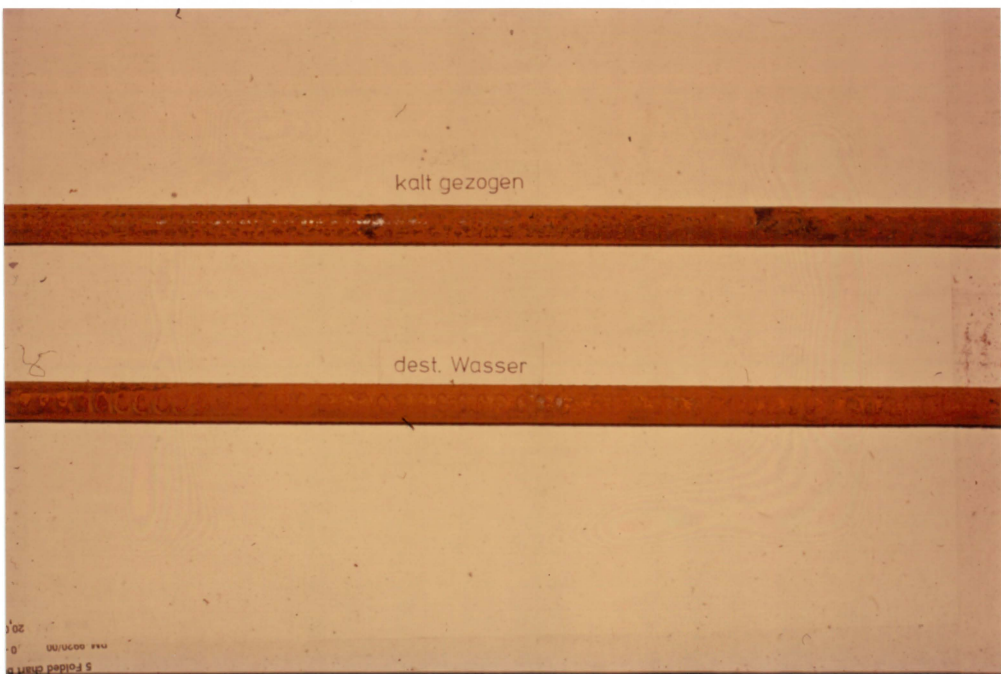


Abb. 9: Vorkorrosion in destilliertem Wasser,
Stahl E

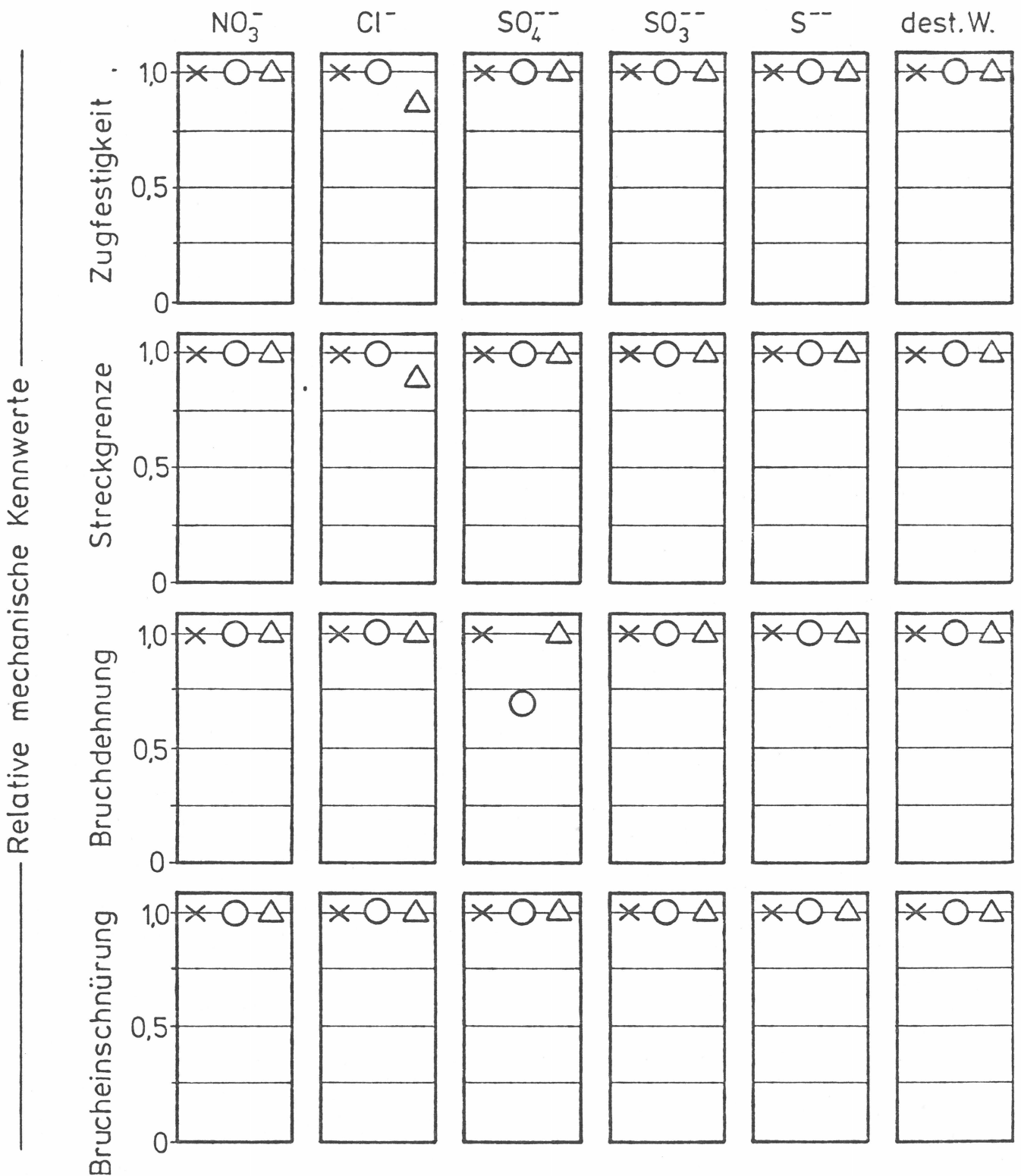


Abb. 10: Vorkorrosion in NO_3^- -haltiger Umgebung im Bereich der Farbmarkierungen, Stahl B



Abb. 11: Korrosionserscheinungen nach 12-wöchiger Auslagerung im Hüllrohr auf dem Dach der BAM, Stahl A unten, Stahl B oben

Vorkorrosion in:

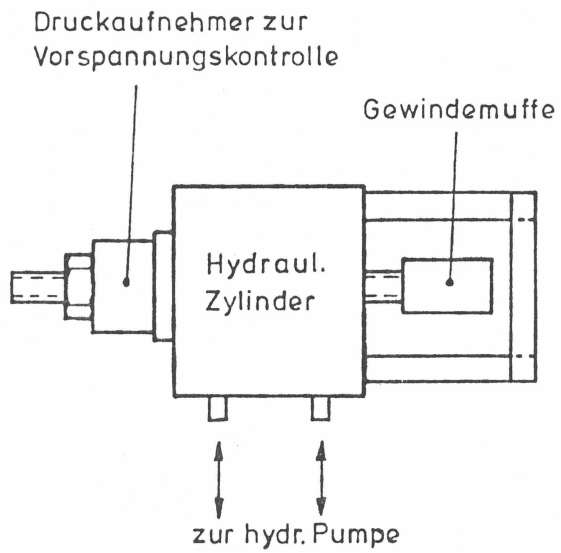


× St 1080 / 1230 (B)

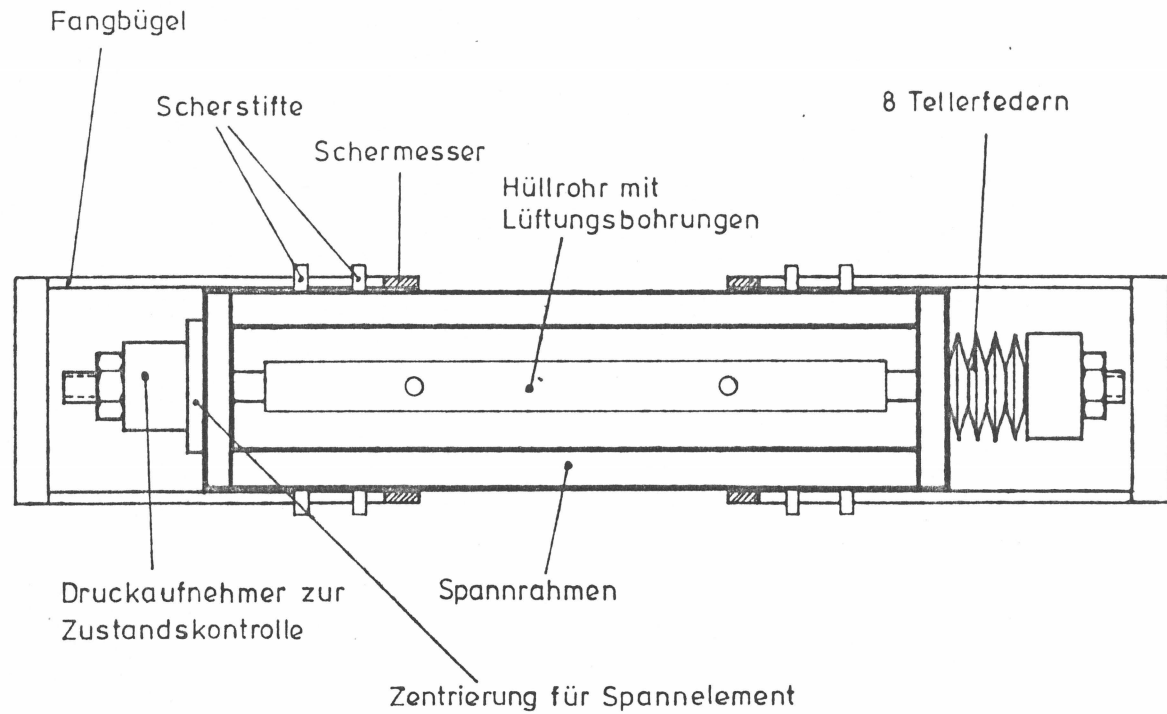
○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

Abb. 12: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion



Abnehmbares Spannelement



Prüfstand in gespanntem Zustand mit Sicherheitsfangbügel. (Draufsicht)

Abb. 13: Dauerstandanlage (schematisch)

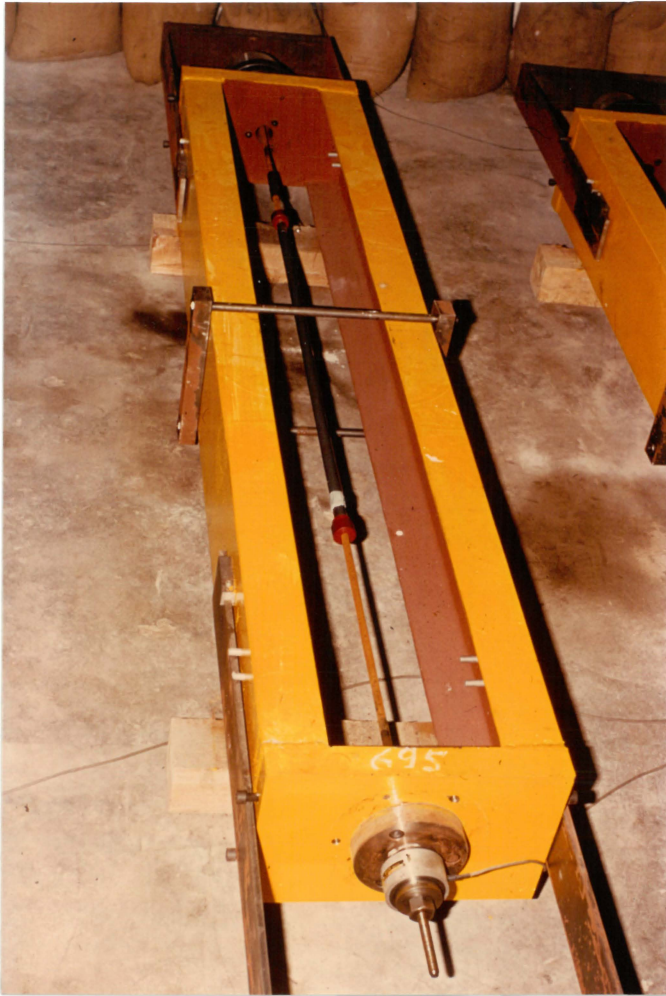
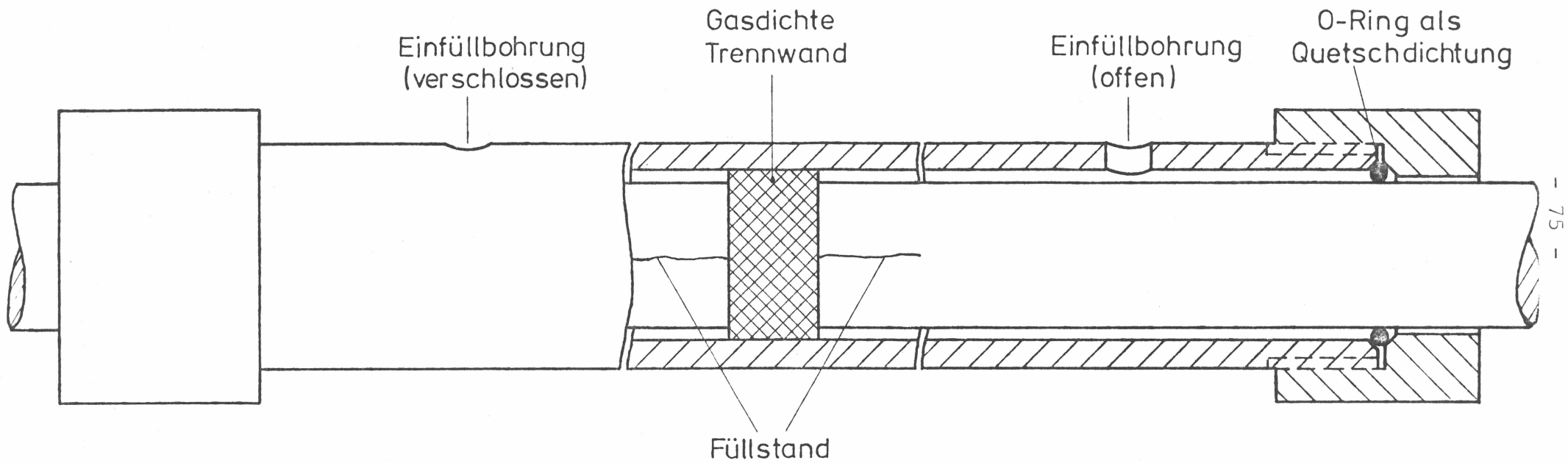


Abb. 14: Dauerstandanlage

Abb. 15:

Prinzipdarstellung einer Prüfzelle



Zellenlänge: 1m

Material : Hart-PVC

Maßstab 1:1

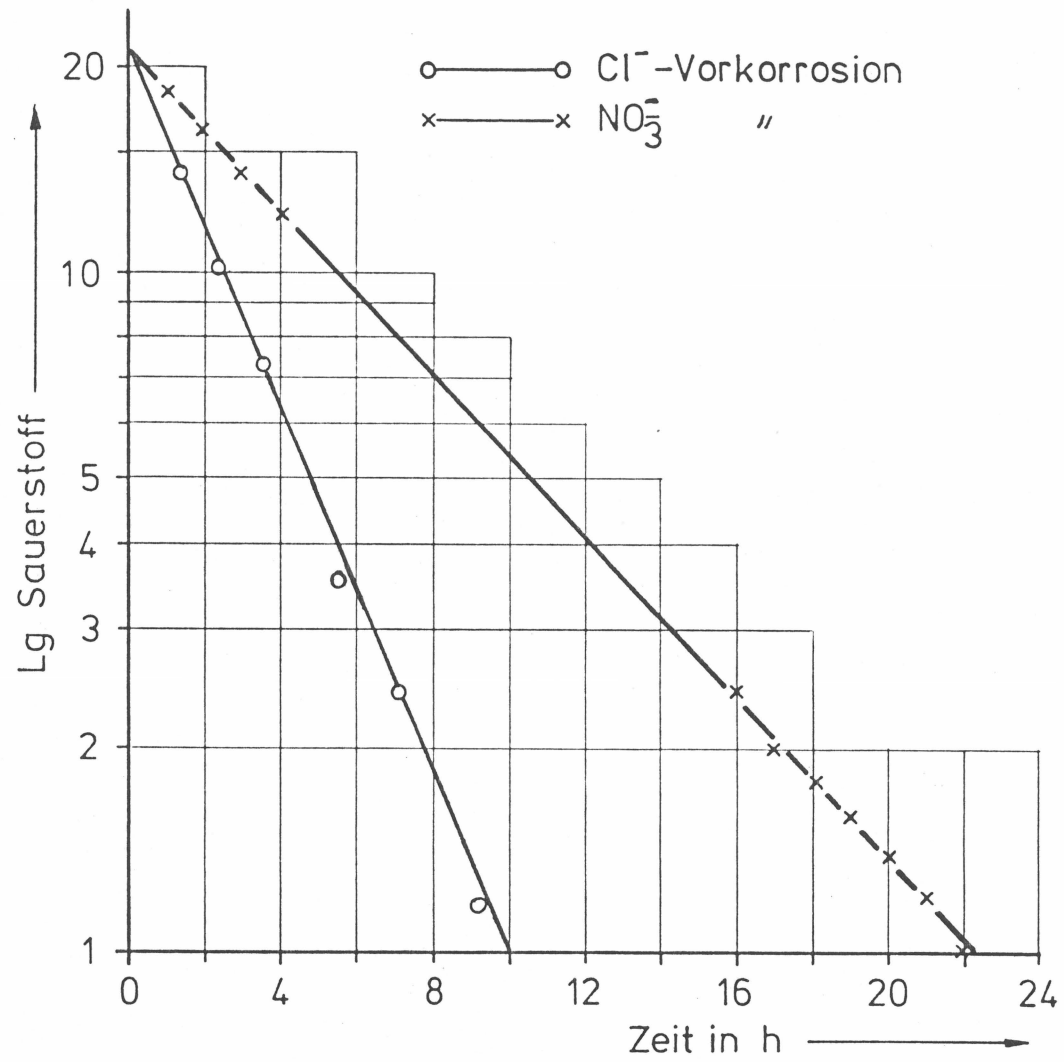


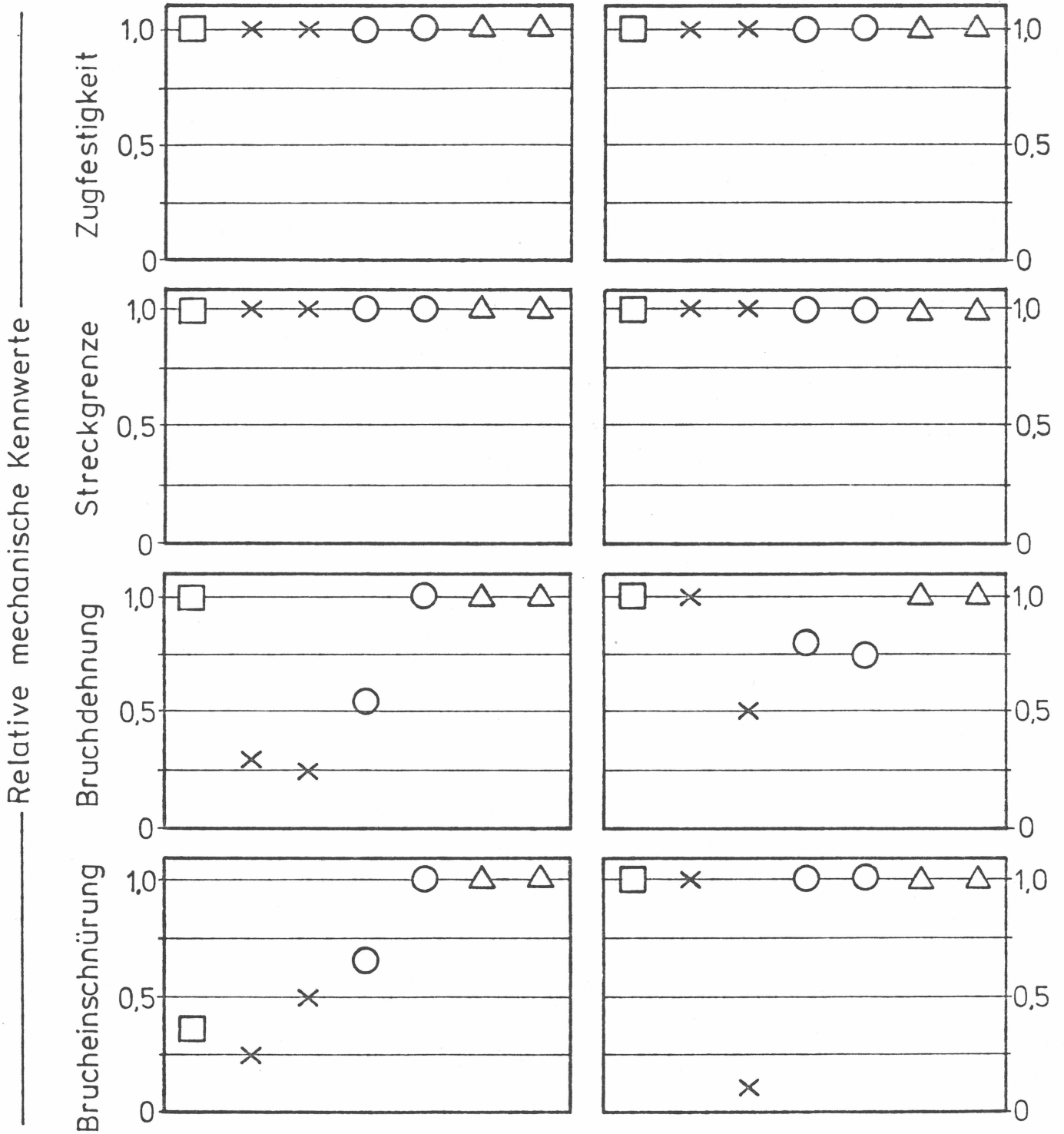
Abb. 16: Sauerstoffgehalt in der Zelle in Abhängigkeit von der Zeit

dest.W.-Vorkorrosion

Zeitstandversuch in:

ges. Ca(OH)₂-Lsg.+Zusätze

Leitungswasser



□ St 835 / 1030 (A)

× St 1080 / 1230 (B)

○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

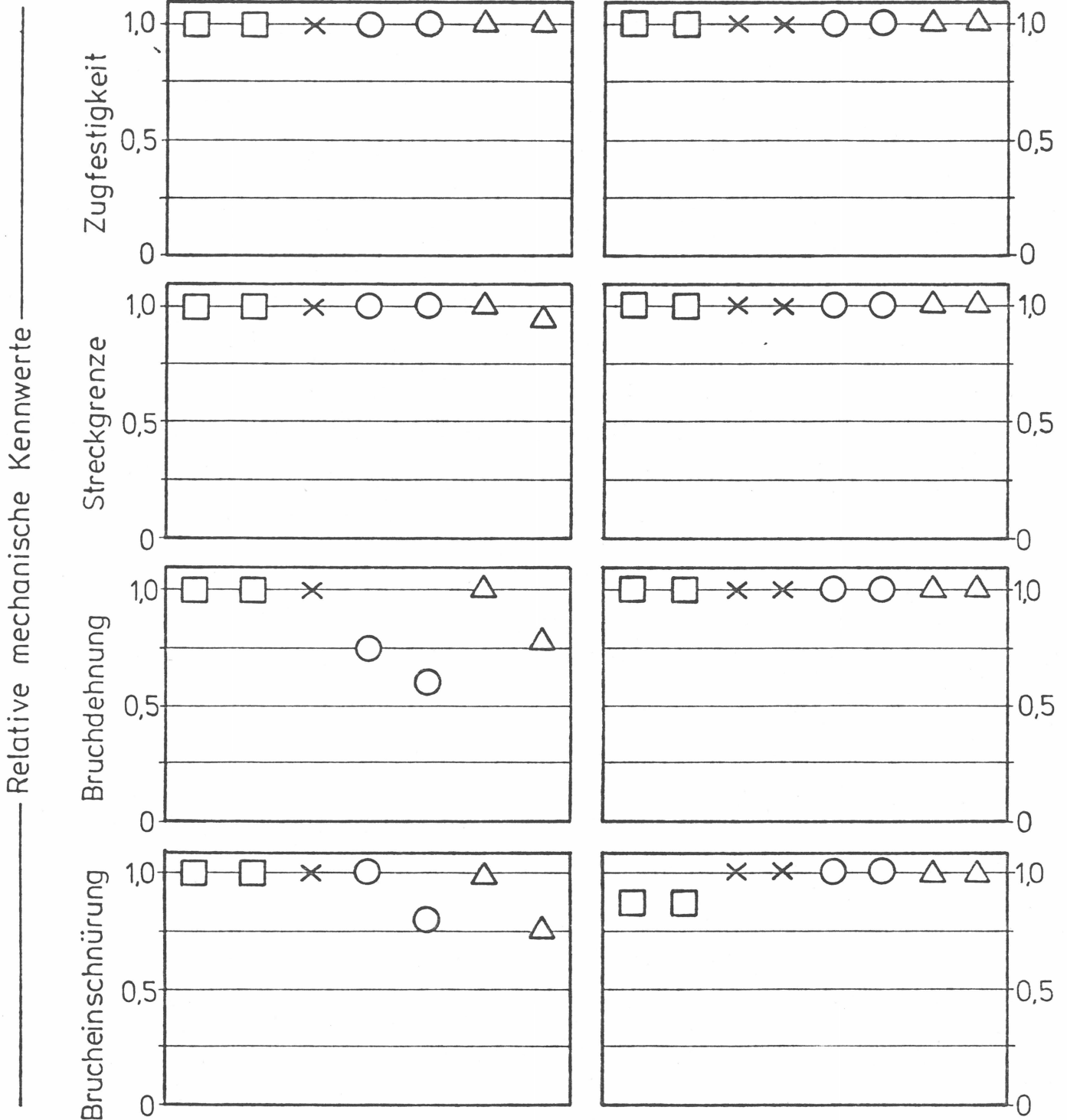
Abb. 17: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in destilliertem Wasser und Dauerstandversuch

NO₃⁻ - Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂ - Lsg. + Zusätze

Leitungswasser



□ St 835 / 1030 (A)

× St 1080 / 1230 (B)

○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

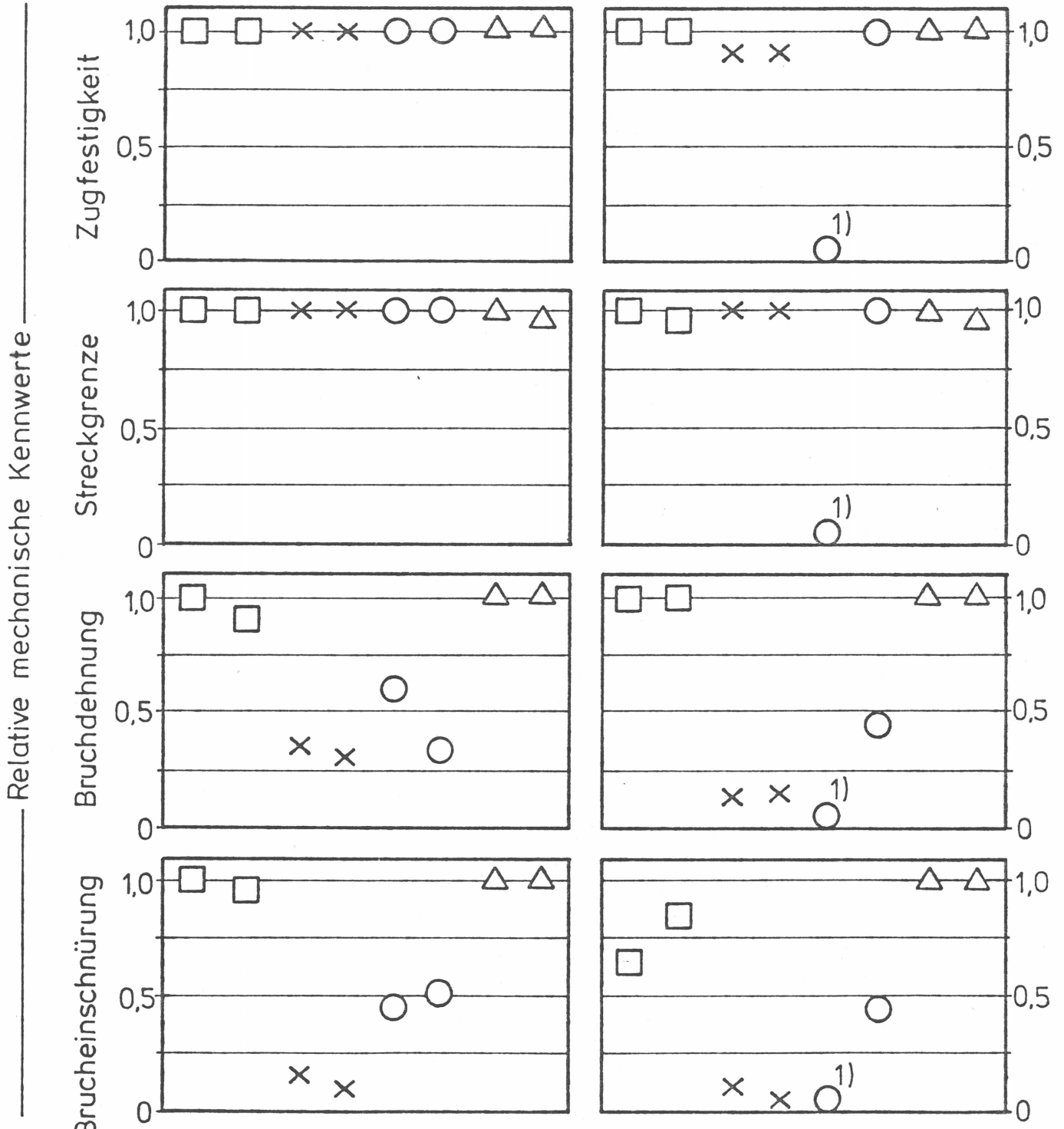
Abb. 18: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in nitrathaltiger Umgebung und Dauerstandversuch

Cl⁻-Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂-Lsg.+Zuschläge

Leitungswasser



1) Bruch im Zeitstandversuch

□ St 835/1030 (A)

× St 1080/1230 (B)

○ St 1420/1570 (D2)

△ St 1375/1570 (E)

Abb. 19: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in chloridhaltiger Umgebung und Dauerstandversuch



Abb. 20: Vergrößerung 30:1
Lochfraßnarbe am Bruchausgang, Versuch 75



Abb. 21: Vergrößerung 3:1
Bruchfläche Versuch 75

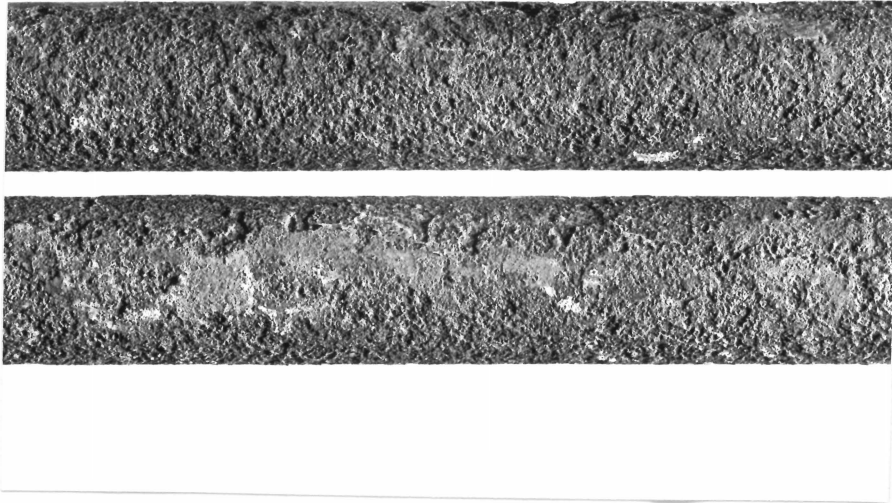


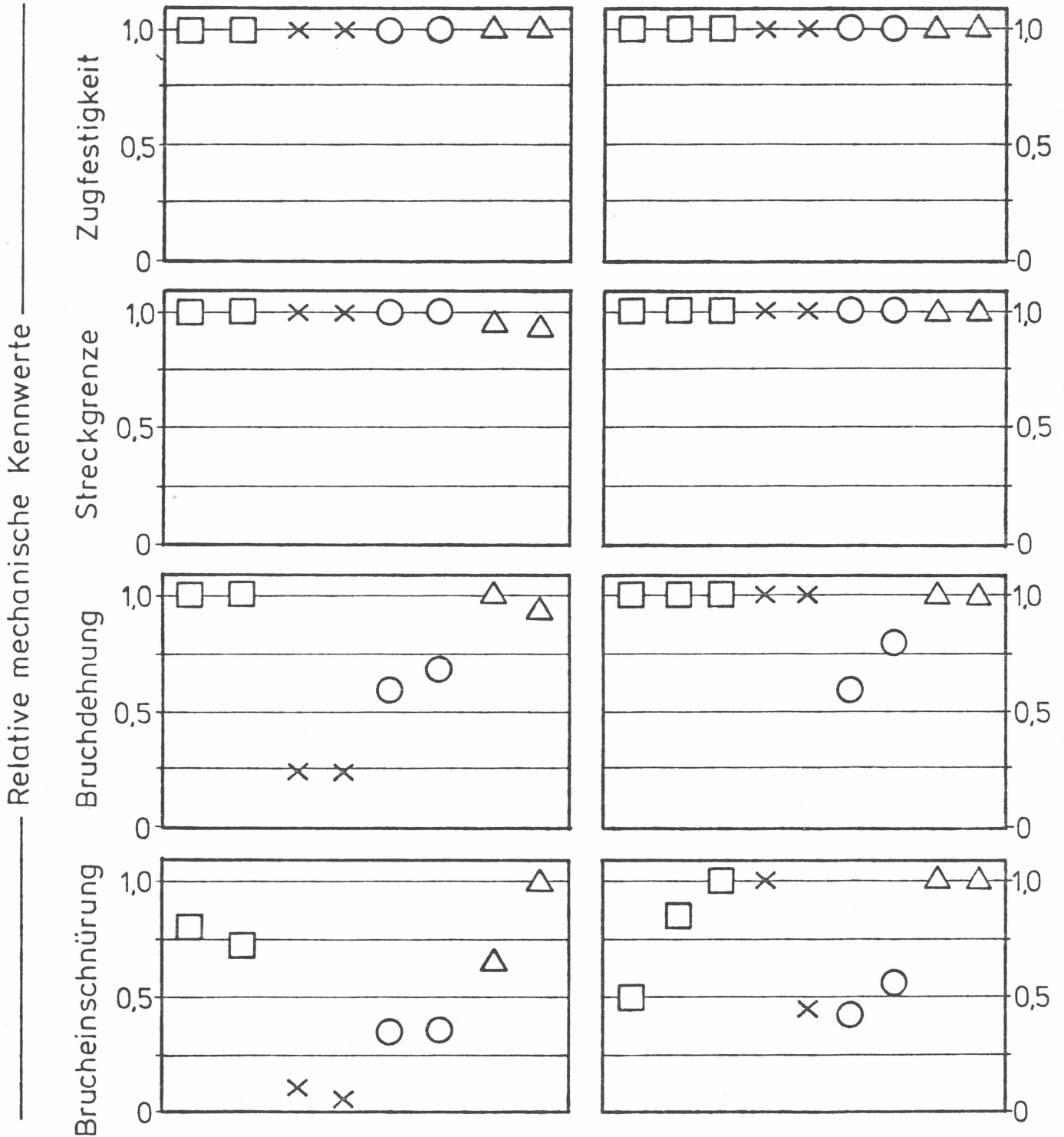
Abb. 22: Vergrößerung 2:1
Stahloberfläche nach der Vorkorrosion
und Dauerstandversuch, Versuch 75

SO₄²⁻-Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂-Lsg. + Zusätze

Leitungswasser



□ St 835 / 1030 (A)

× St 1080 / 1230 (B)

○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

Abb. 23: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in sulfathaltiger Umgebung und Dauerstandversuch

SO₄²⁻+Cl⁻- Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂-Lsg.+Zusätze

Leitungswasser

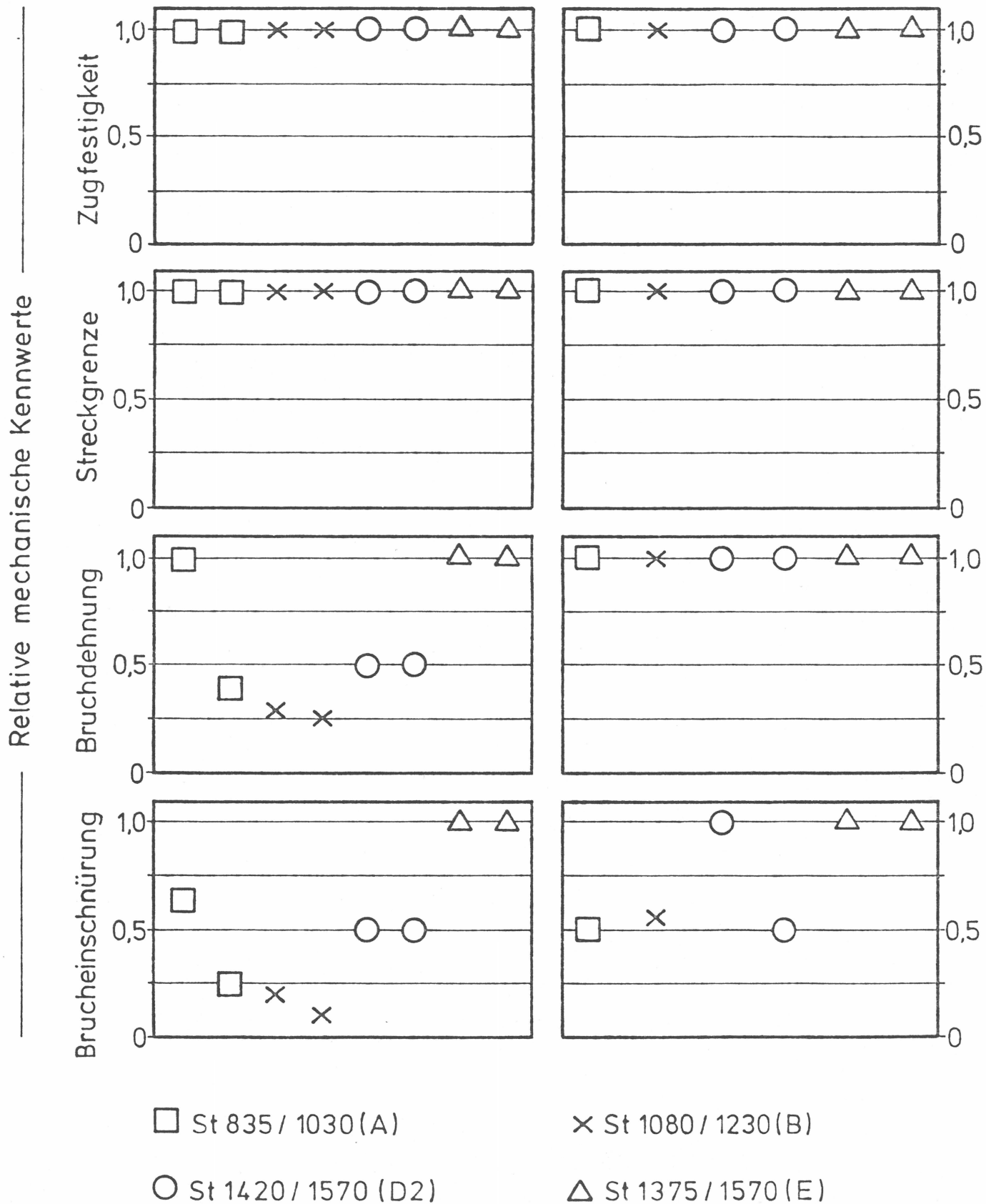


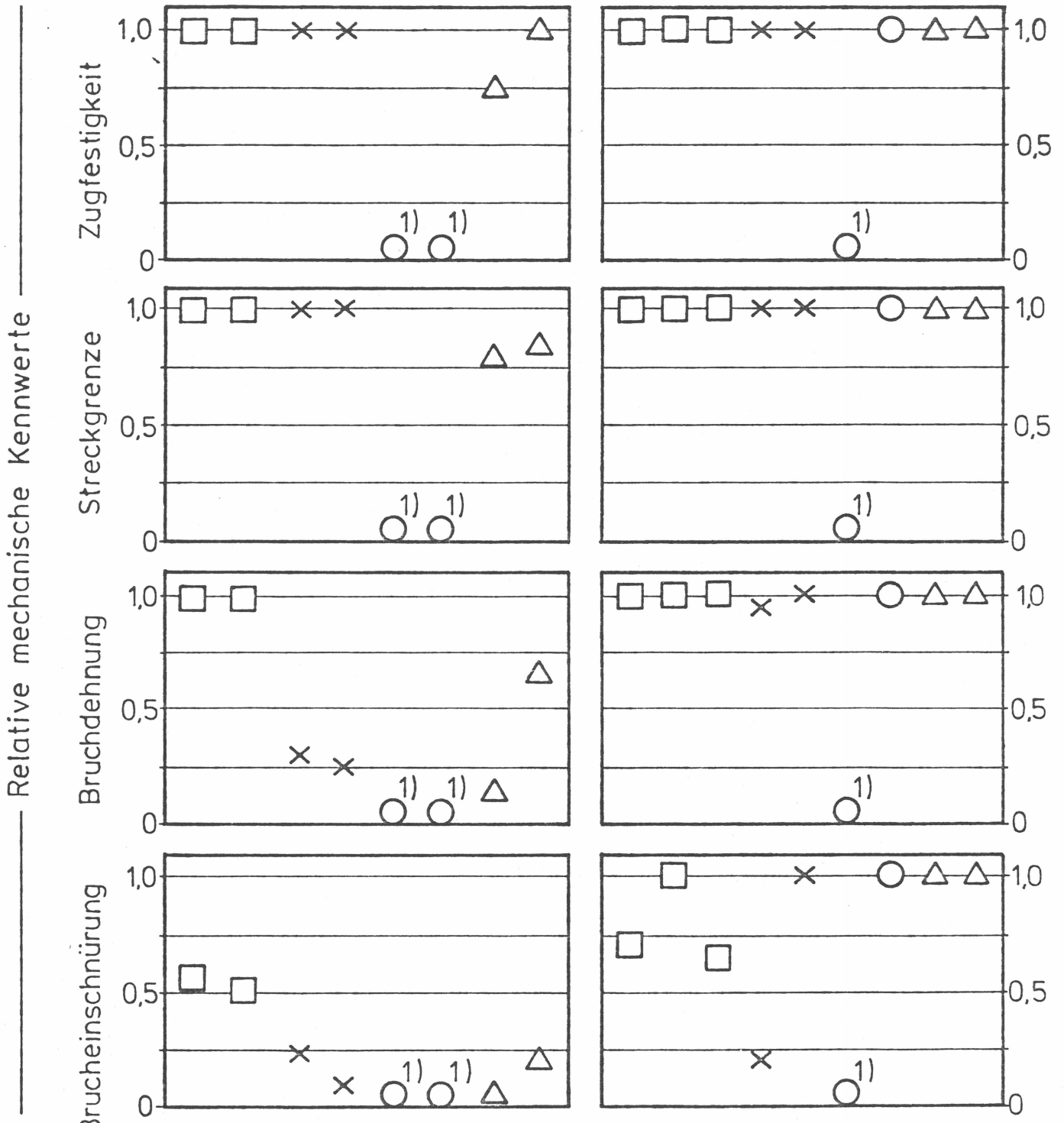
Abb. 24: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in sulfat- und chloridhaltiger Umgebung nach Dauerstandversuch

S²⁻-Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂ - Lsg. + Zusätze

Leitungswasser



1) Bruch im Zeitstandversuch

□ St 835 / 1030 (A)

× St 1080 / 1230 (B)

○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

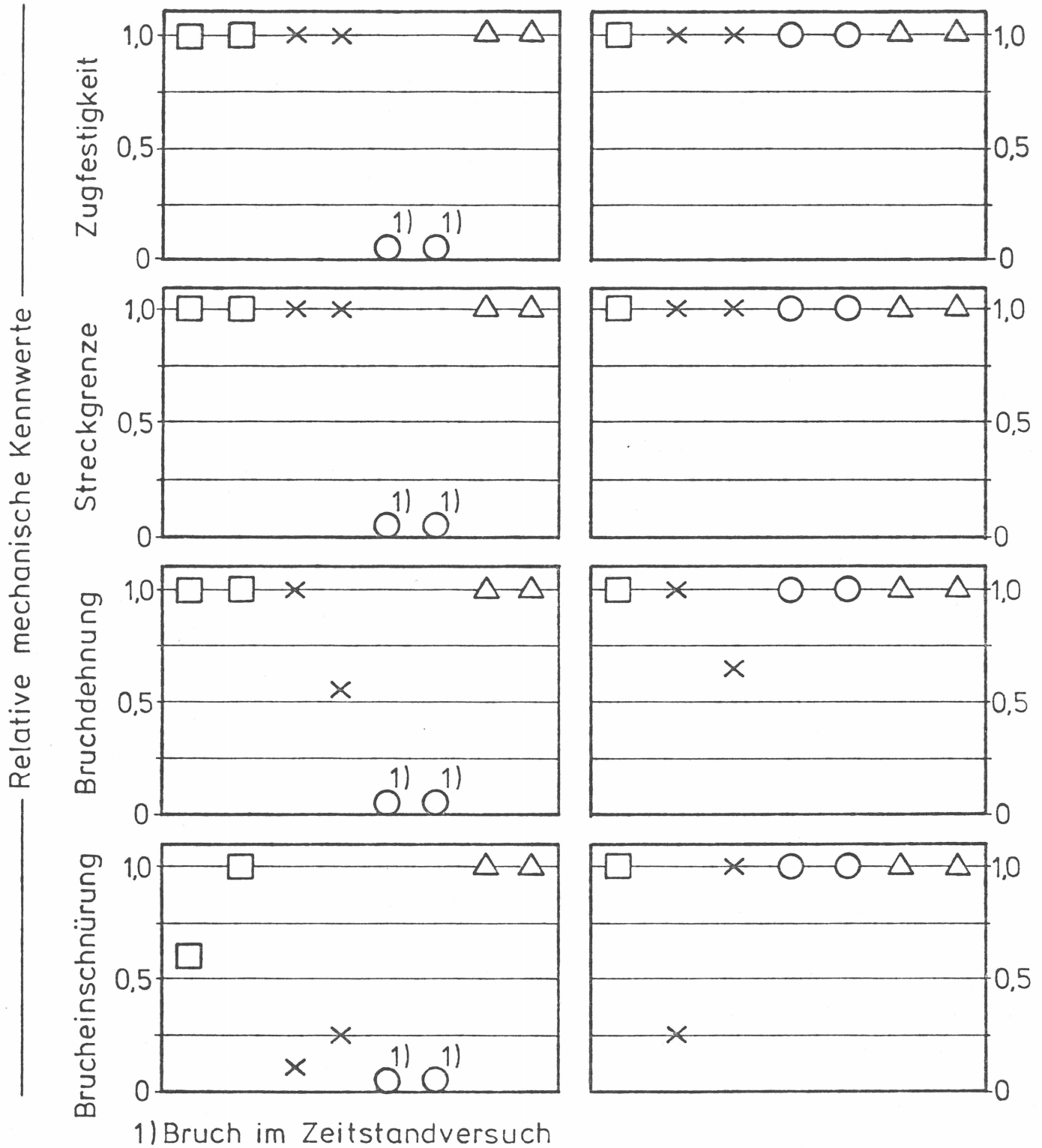
Abb. 25: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in sulfidhaltiger Umgebung und Dauerstandversuch

SO₃⁻-Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂-Lsg.+Zusätze

Leitungswasser



□ St 835 / 1030 (A)

× St 1080 / 1230 (B)

○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

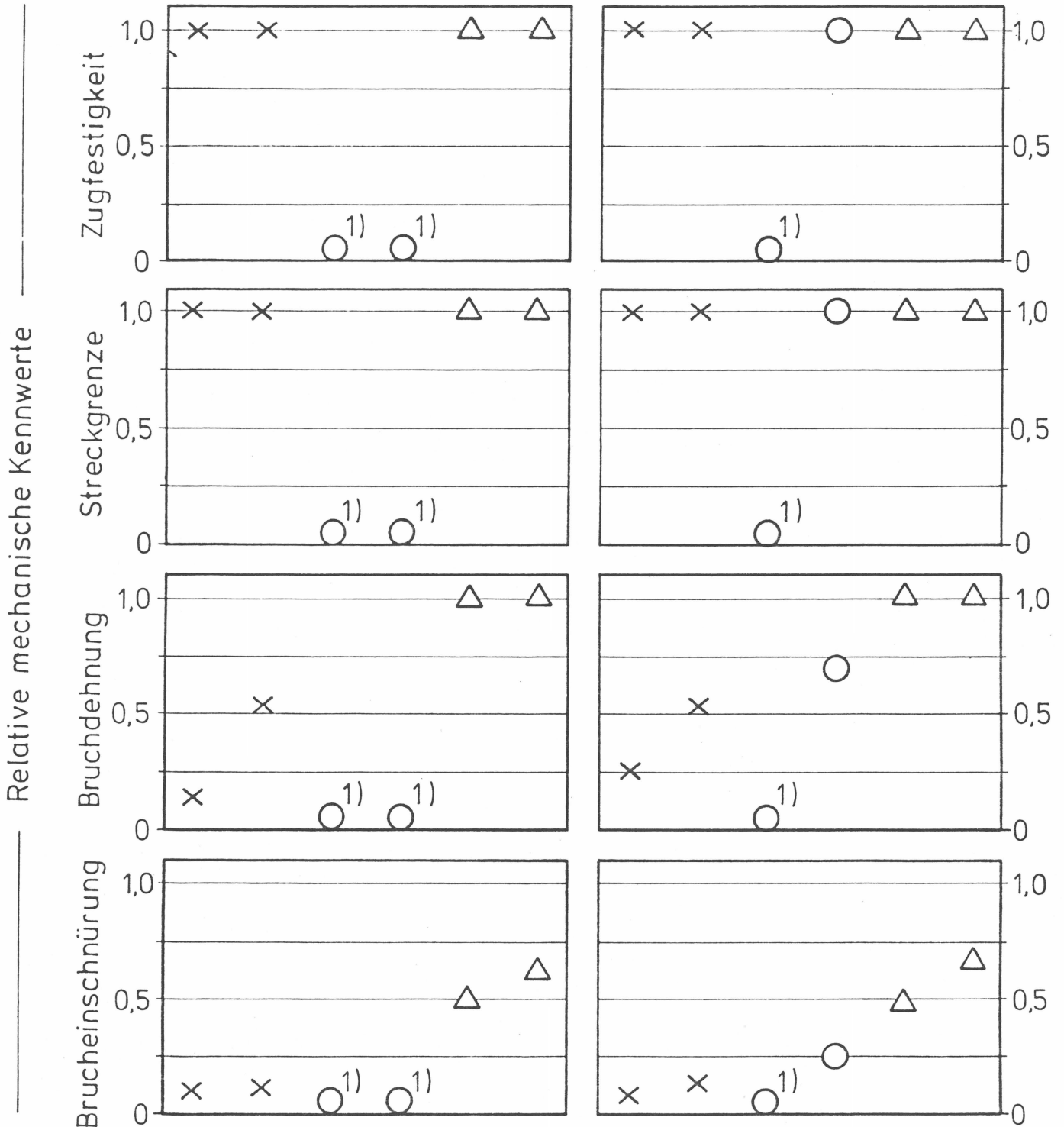
Abb. 26: Relative mechanische Kennwerte nach Vorkorrosion in sulfithaltiger Umgebung und Dauerstandversuch

SCN⁻-Vorkorrosion

Zeitstandversuche in:

ges. Ca(OH)₂-Lsg.+Zusätze

Leitungswasser



1) Bruch im Zeitstandversuch

□ St 835 / 1030 (A)

× St 1080 / 1230 (B)

○ St 1420 / 1570 (D2)

△ St 1375 / 1570 (E)

Abb. 27: Relative mechanische Kennwerten nach Vorkorrosion in rhodanidhaltiger alkalischer Umgebung und Dauerstandversuch



Abb. 28: Vergrößerung 5:1
Korrosionsnarben an Stab Nr. 15, Stahl A
Standzeit >1000 h



Abb. 29: Vergrößerung 5:1
Korrosionsnarben an Stab Nr. 15, Stahl A
Standzeit >1000 h

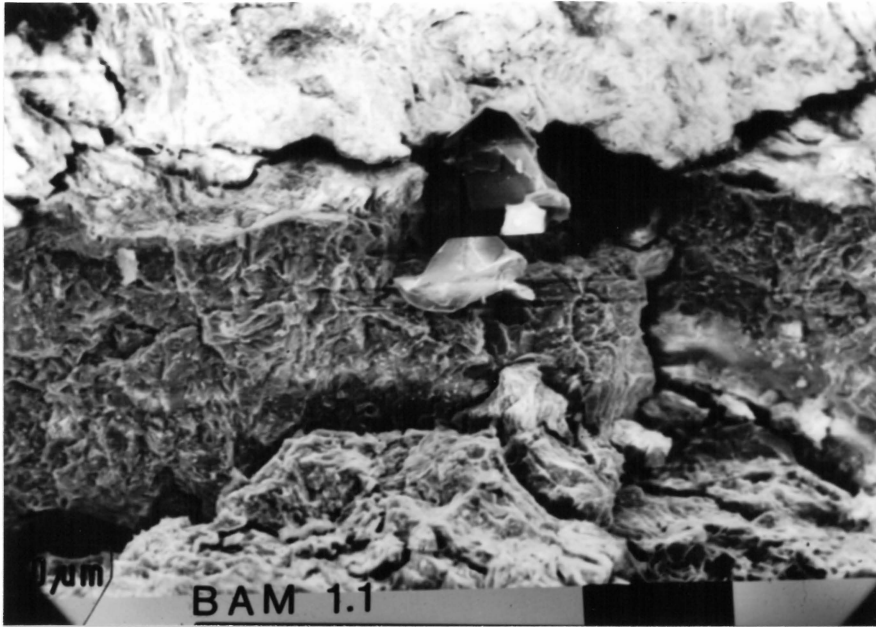


Abb. 30: Vergrößerung 500:1
Bruchausgang Probe 51, Stahl A

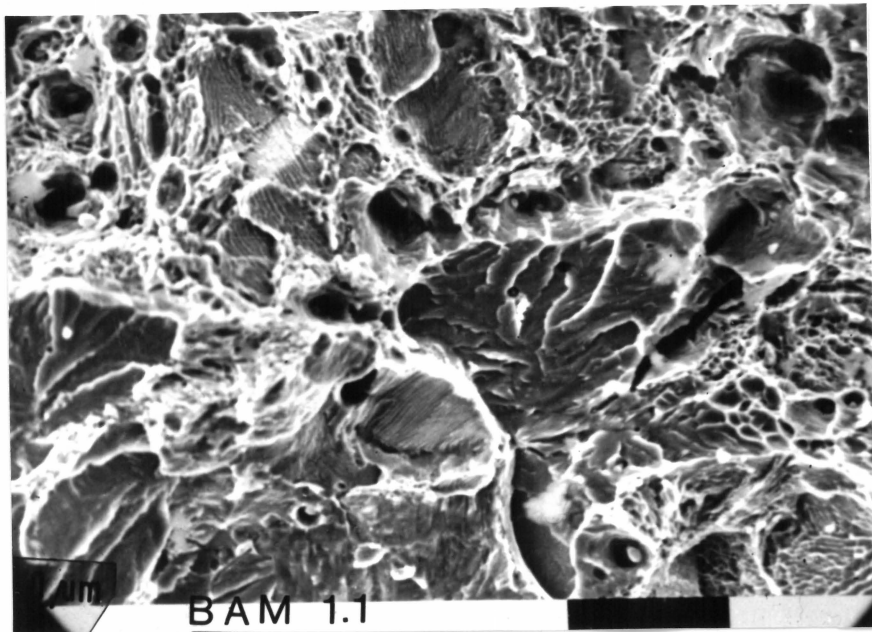


Abb. 31: Vergrößerung 1000:1
Spalt- und Wabenbruch im Innern der Probe 51
Stahl A



Abb. 32: Vergrößerung 12:1
Bruchausgang Versuch 12, Stahl B

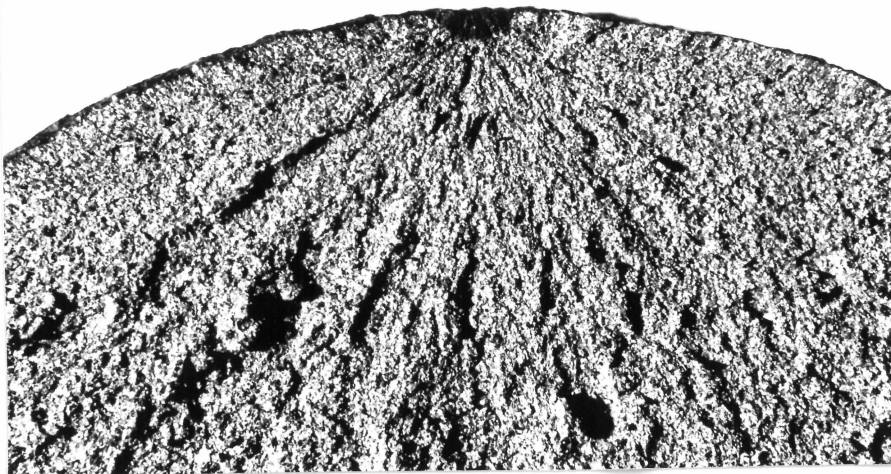


Abb. 33: Vergrößerung 12:1
Bruchausgang Versuch 13, Stahl B

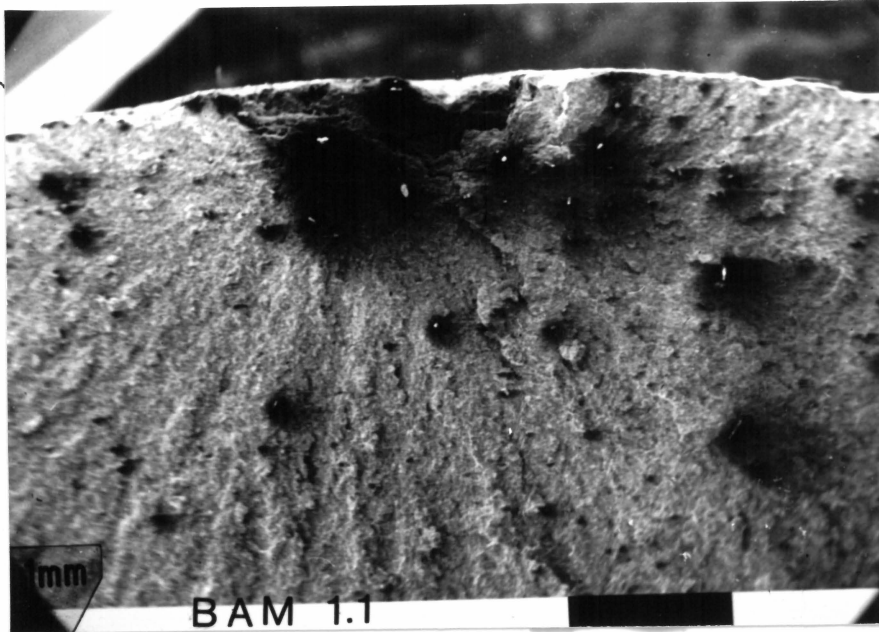


Abb. 34: Vergrößerung 20:1
Bruchausgang Übersicht Versuch 53, Stahl B

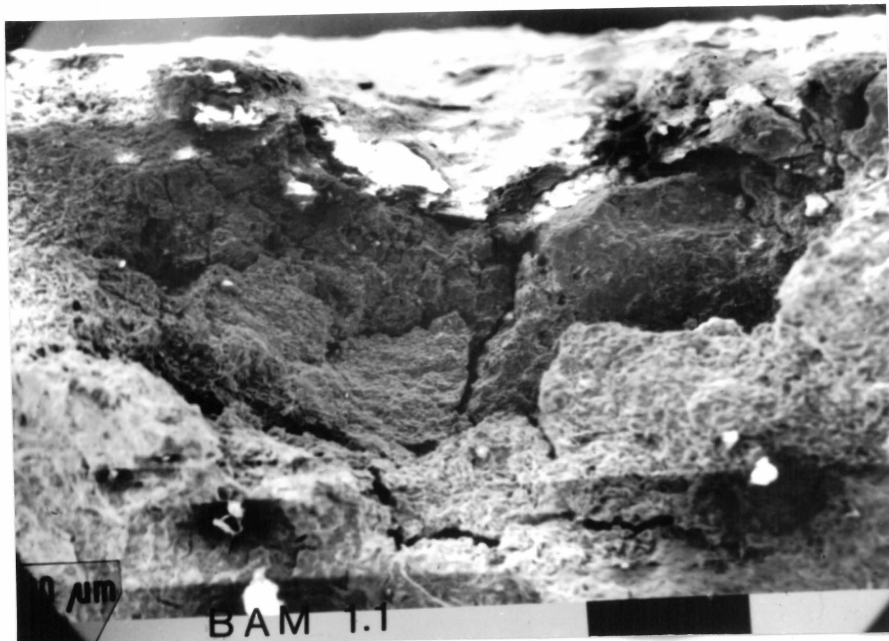


Abb. 35: Vergrößerung 100:1
Korrosionsnarbe am Bruchausgang, Versuch 53,
Stahl B

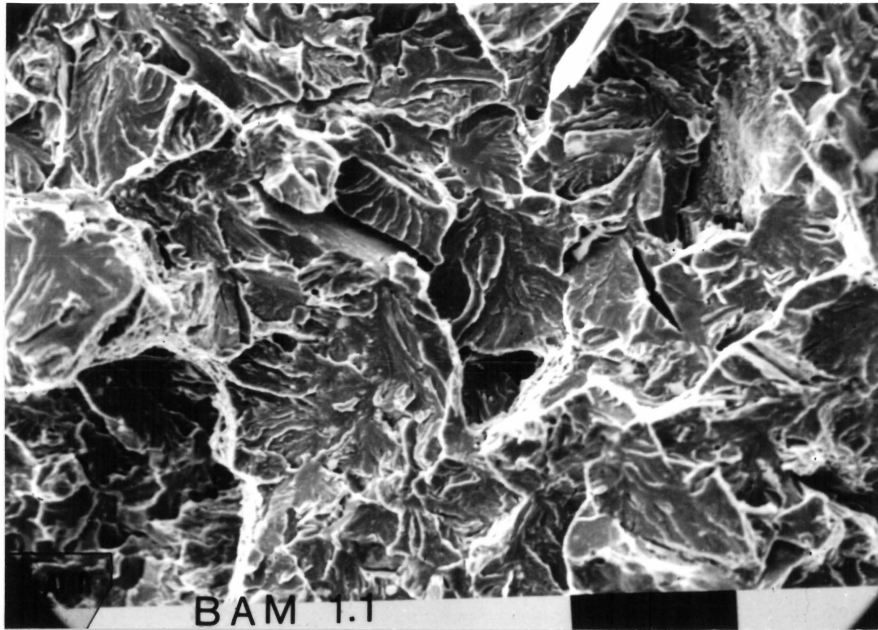


Abb. 36: Vergrößerung 1000 :1
Spaltbruch mit Querrissen



Abb. 37: Vergrößerung 3:1
Duktiler Bruch Stahl E, Versuch 63



Abb. 38: Vergrößerung 3:1
Spröder Bruch Stahl E, Versuch 69

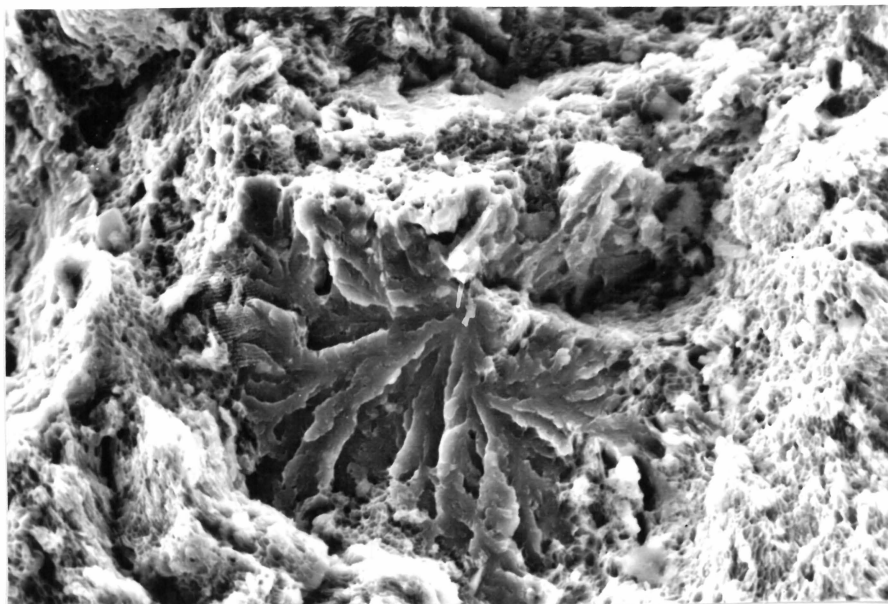


Abb. 39: Vergrößerung 1500:1
Spaltbruch mit Wabenbruch Stahl E, Versuch 69

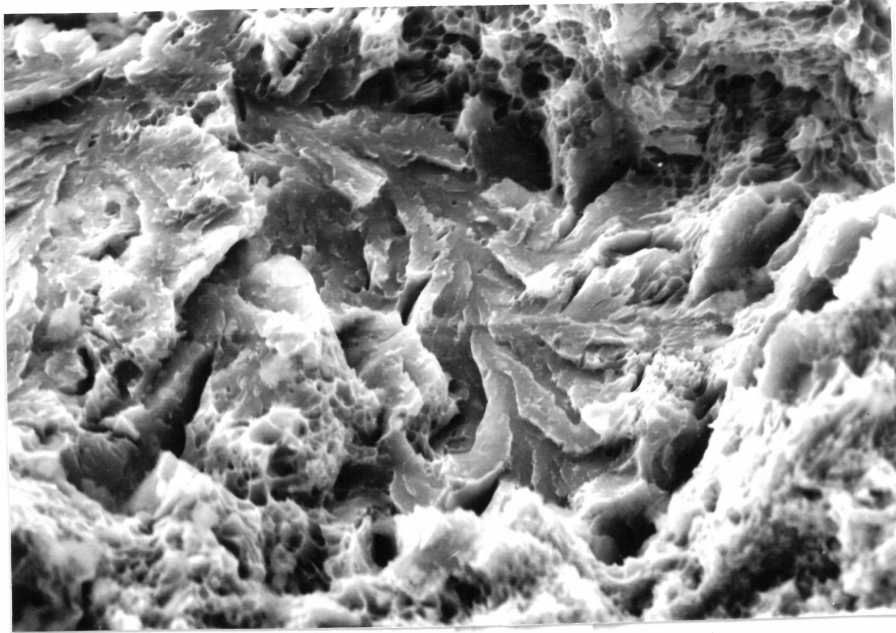


Abb. 40: Vergrößerung 2500:1
Spaltbruch mit Wabenbruch Stahl E, Versuch 69

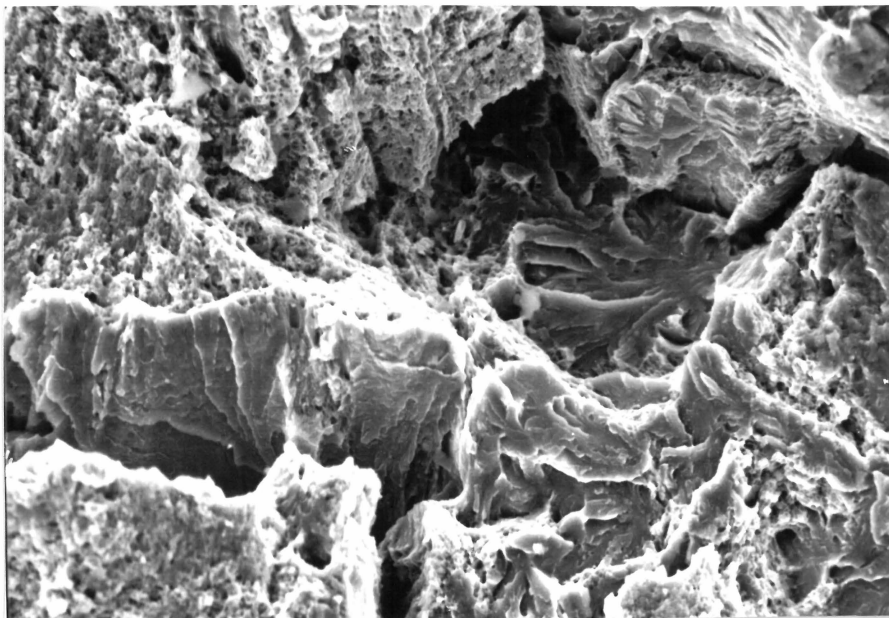


Abb. 41: Vergrößerung 1000:1
Spaltbruch mit Wabenbruch Stahl E, Versuch 69

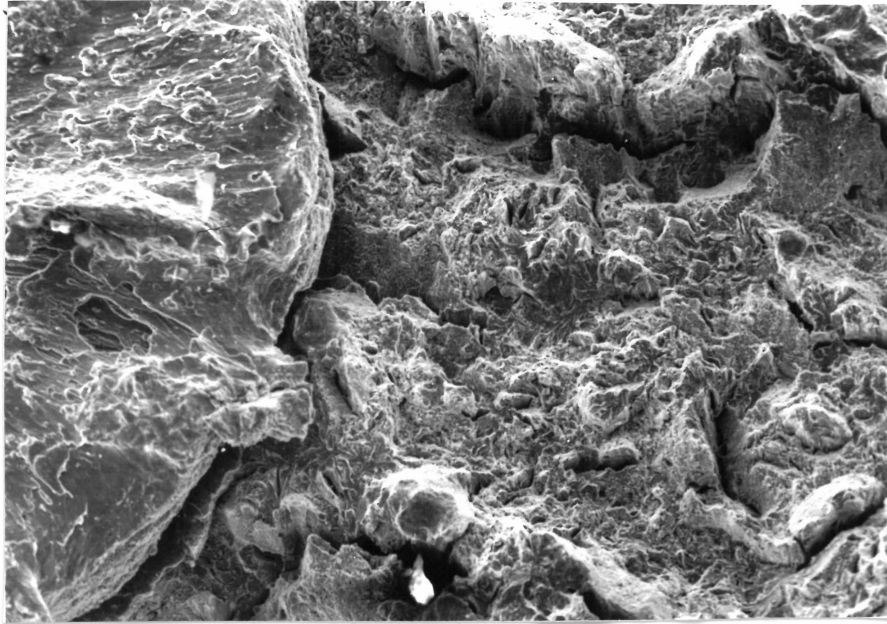


Abb. 42: Vergrößerung 100:1
Spaltbruch mit Wabenbruch Stahl E, Versuch 69

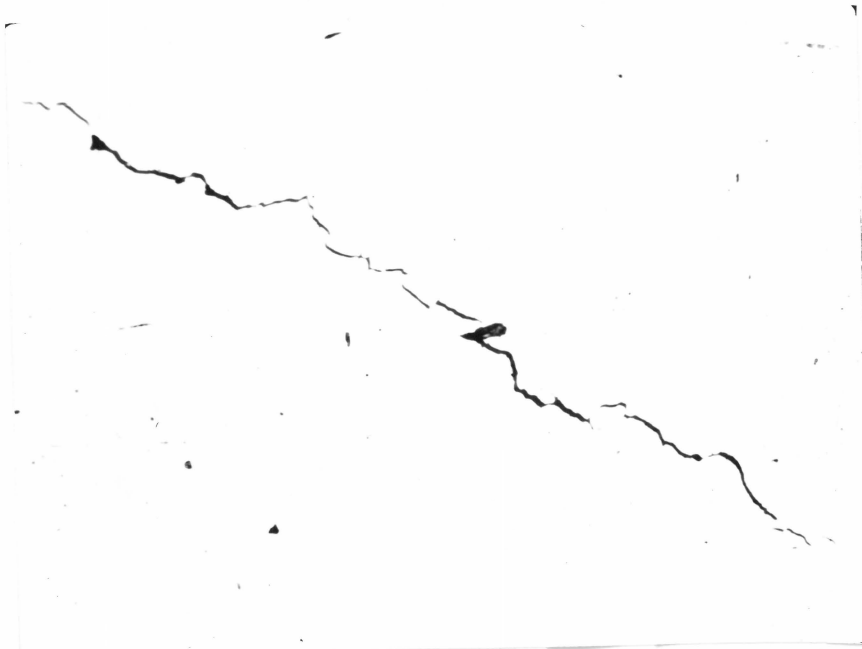


Abb. 43: Vergrößerung 190:1
Querschliff mit Innenriß, Stahl E, Versuch 69



Abb. 44: Vergrößerung 190:1
Querschliff mit Innenriß, Stahl E, Versuch 69



Abb. 45: Vergrößerung 2:1
Narbenkorrosion in der Umgebung des Bruches
Stahl E, Versuch 66

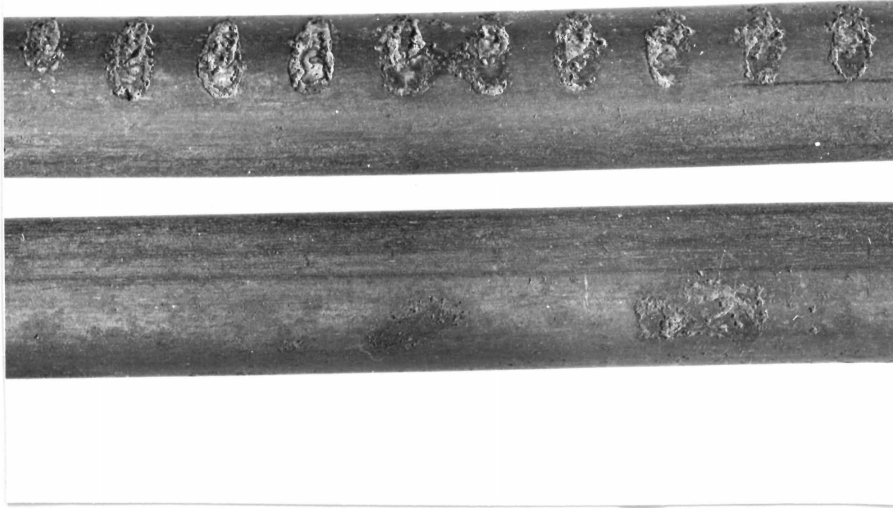


Abb. 46: Vergrößerung 2:1
Narbenkorrosion in der Umgebung des Bruches
Stahl E, Versuch 64

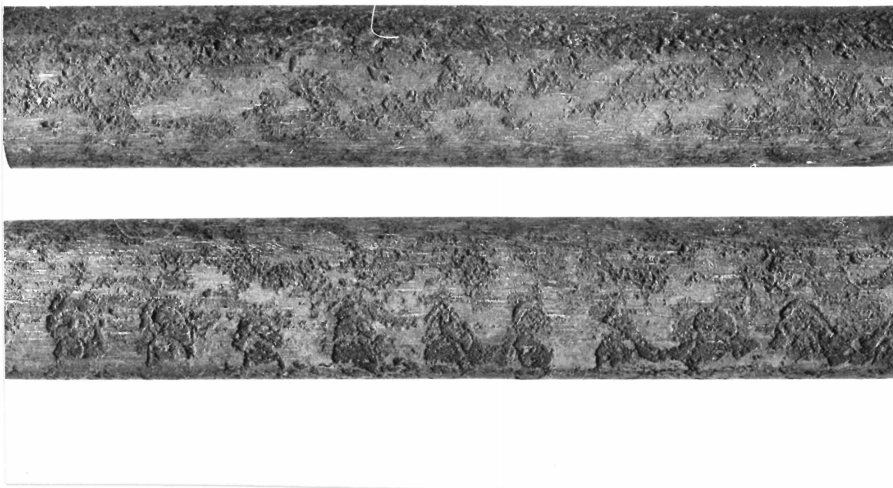


Abb. 47: Vergrößerung 2:1
Narbenkorrosion in der Umgebung des Bruches
Stahl E, Versuch 70



Abb. 48: Vergrößerung 3:1
Sprödbbruch Stahl D 2, Versuch 81



Abb. 49: Vergrößerung 3:1
Duktiler Bruch Stahl D 2, Versuch 86

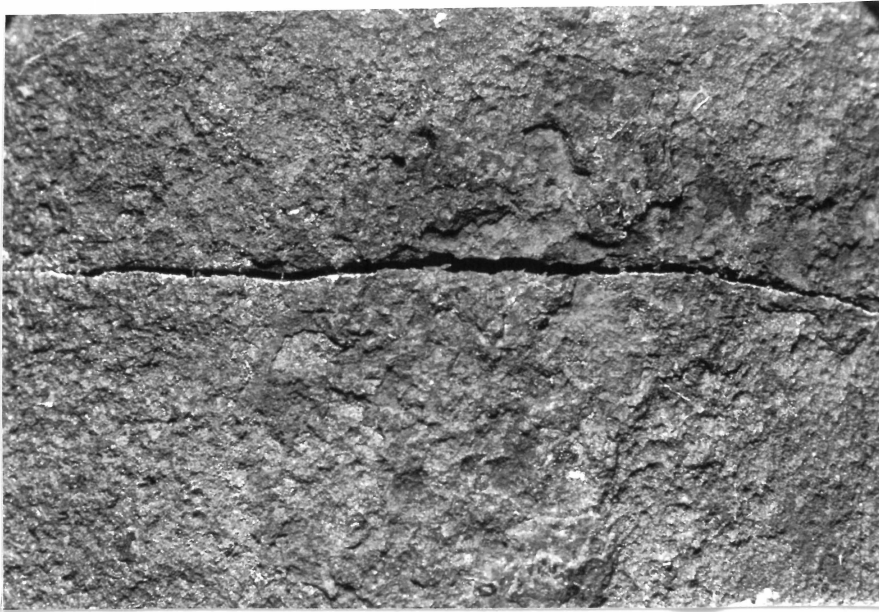


Abb. 50: Vergrößerung 13:1
Querriß neben der Bruchfläche, Stahl D 2,
Versuch 67

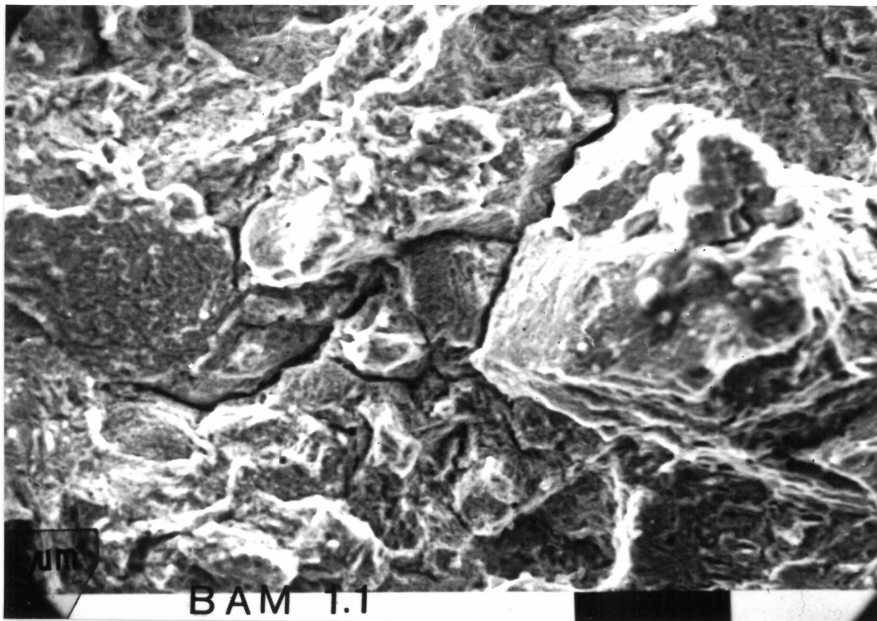


Abb. 51: Vergrößerung 1000:1
Bruchausgang Versuch 67

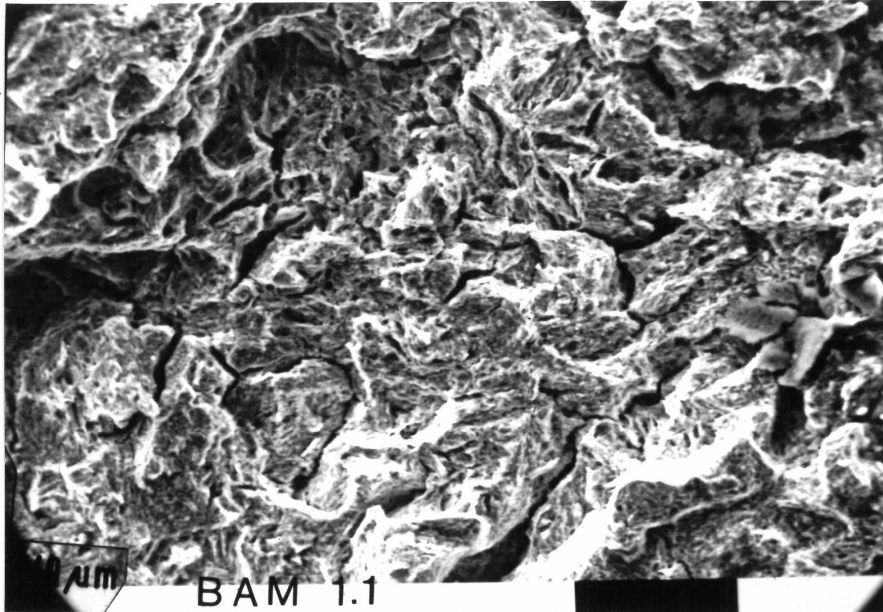


Abb. 52: Vergrößerung 500:1
Bruchausgang Versuch 102

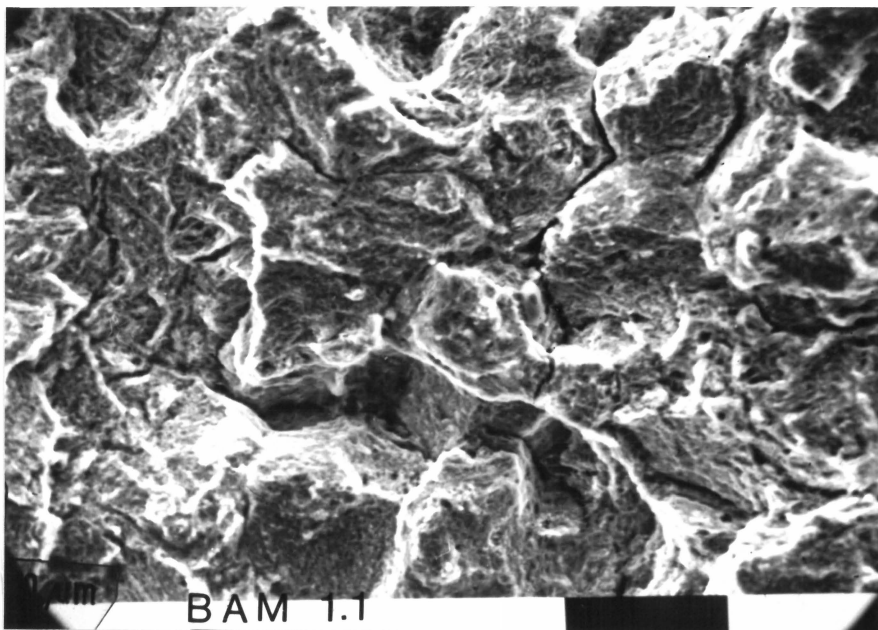


Abb. 53: Vergrößerung 1000:1
Bruchausgang Versuch 81

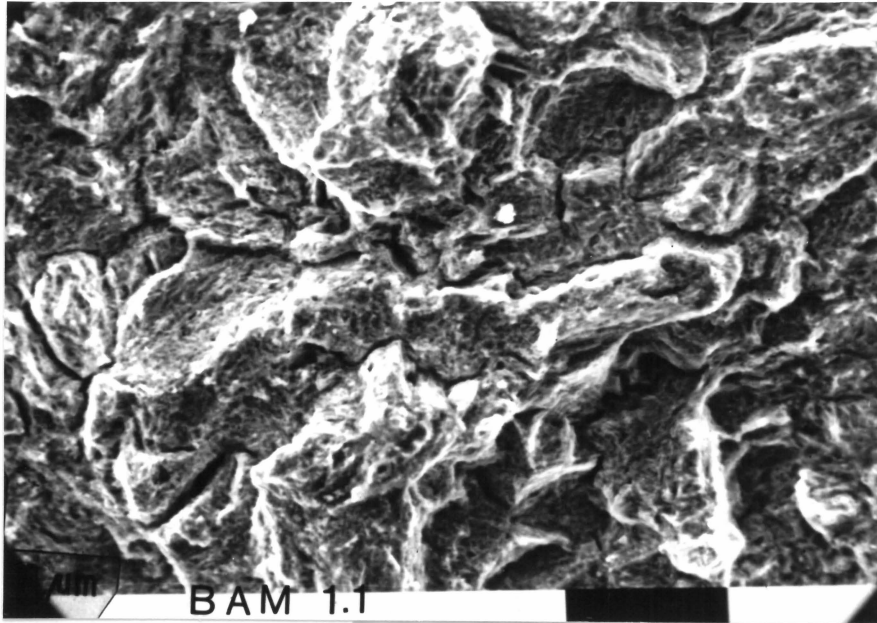


Abb. 54: Vergrößerung 1000:1
Bruchausgang Versuch 110

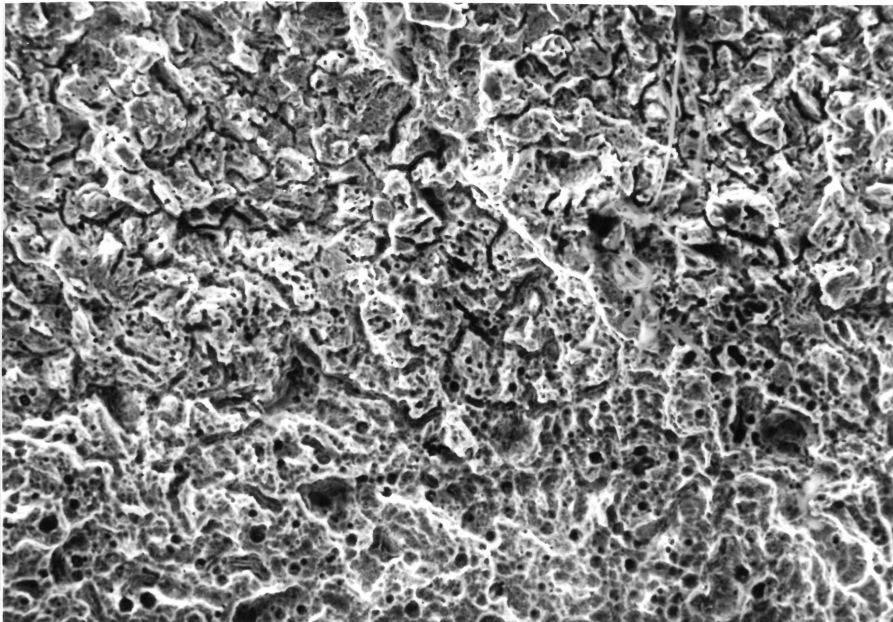


Abb. 55: Vergrößerung 300:1
Bruchausgang Versuch 75

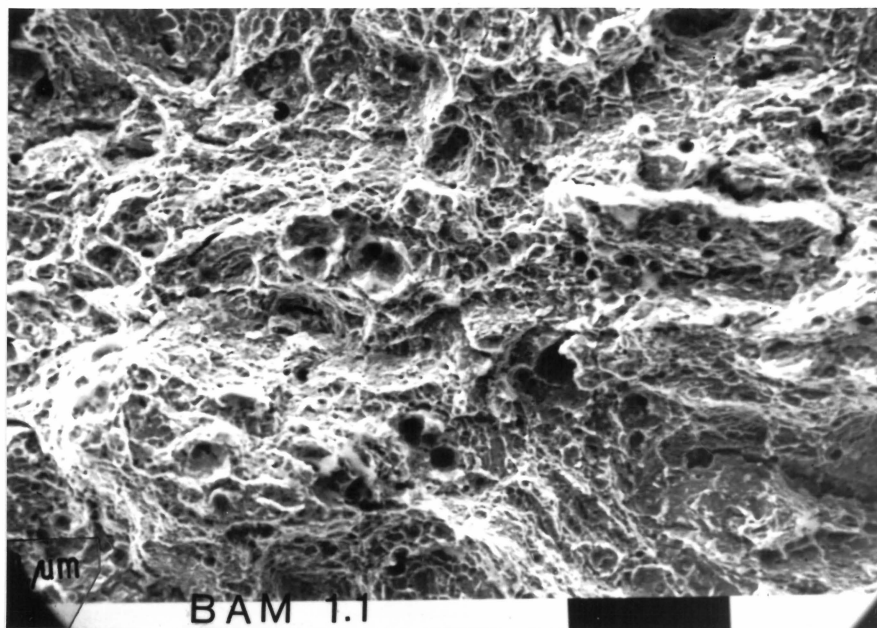


Abb. 56: Vergrößerung 1000:1
Restbruch mit Wabenbruch

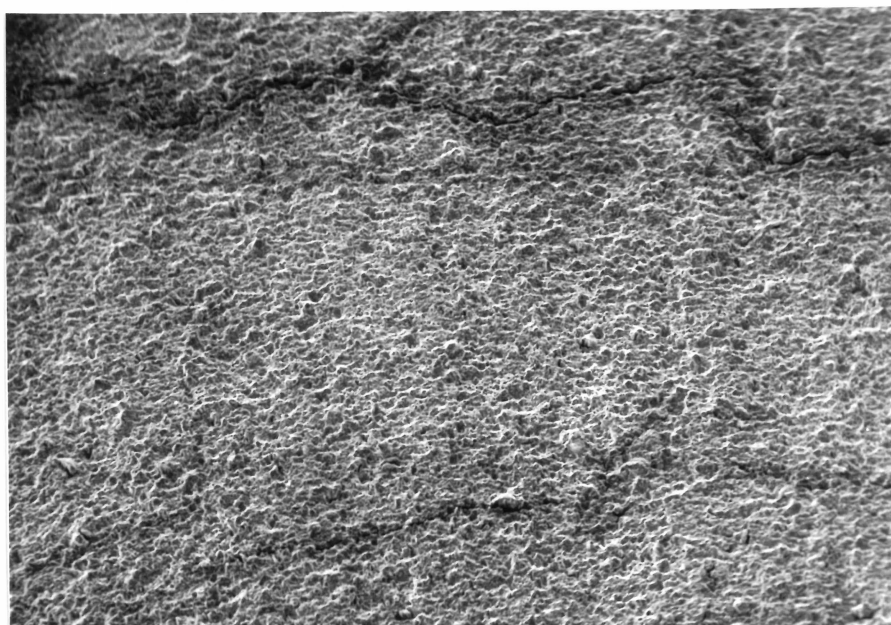


Abb. 57: Vergrößerung 50:1
Wabenbruch mit Makrorissen

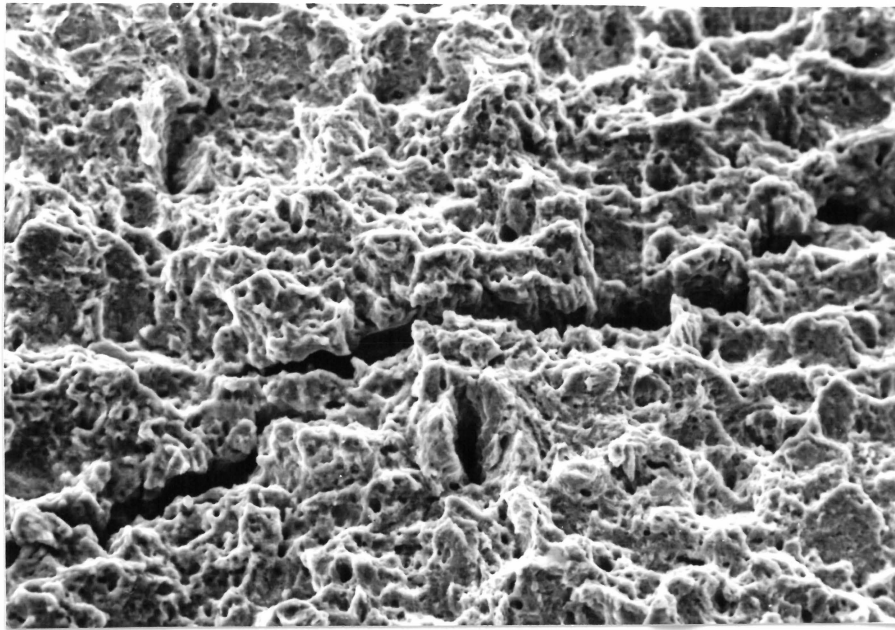


Abb. 58: Vergrößerung 500:1
Wabenbruch mit Makrorissen

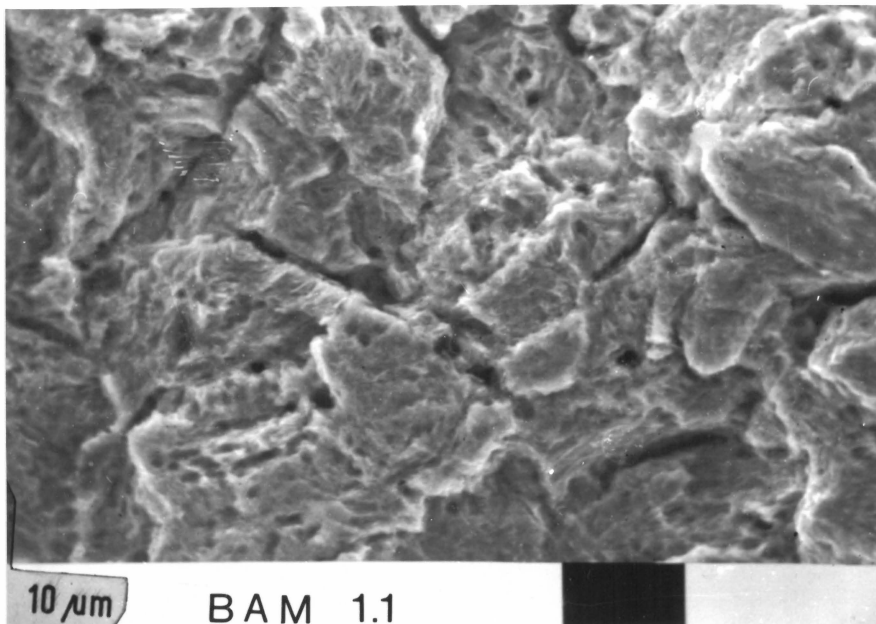


Abb. 59: Interkristallin aufgelöste Bereich im
Bruchausgang beim Stahl D 2 (Versuch 143)

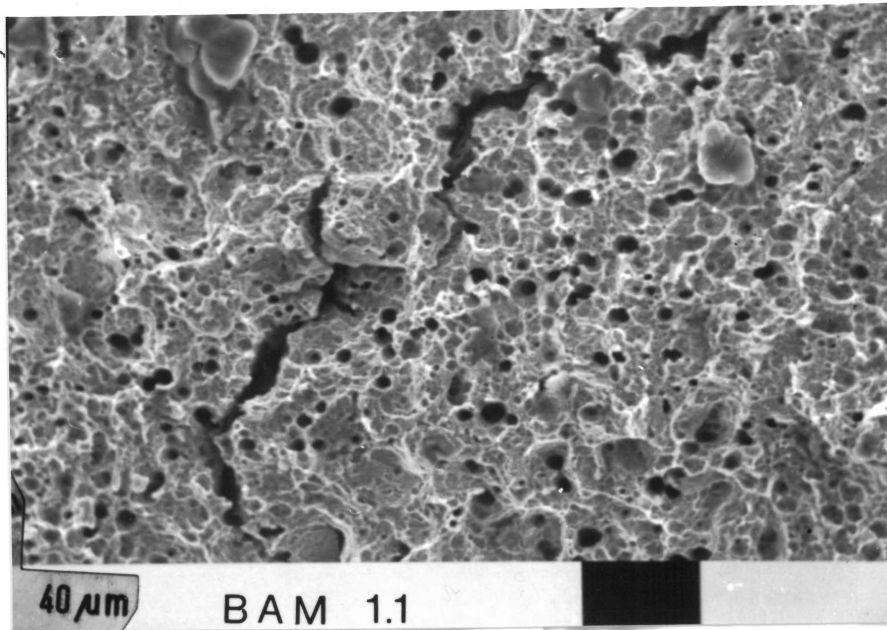


Abb. 60: Wabenbruch mit inneren Rissen beim Stahl D 2 (Versuch 143)

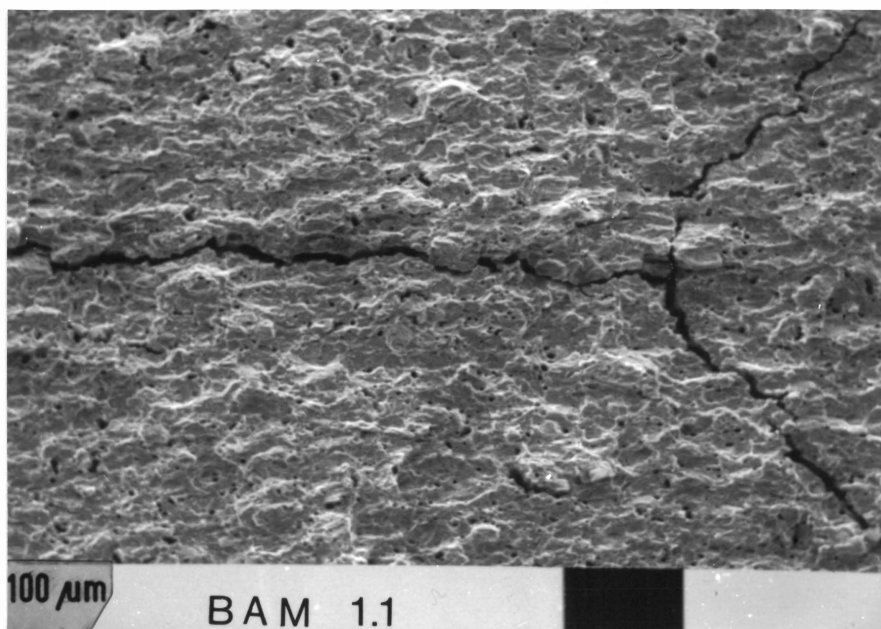


Abb. 61: Makroriß beim Stahl D 2 (Versuch 143).