

**Entwicklung eines einheitlichen
Prüfverfahrens zur Prüfung von
Betonschrauben auf Empfindlichkeit
gegen wasserstoffinduzierte
Rissbildung**

T 3128

T 3128

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2007

ISBN 978-3-8167-7283-5

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

Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens zur Prüfung von Betonschrauben auf Empfindlichkeit gegen wasserstoffinduzierte Rissbildung

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ZP 52-5-8.29-1149/05

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstrasse 30 L
10829 BERLIN

Auftrags-Nr. (MPA): 834 1000 000

Datum des Berichts: 18.05.06

Seite 1 von 15

Beilagen: 22

Gesamtseitenzahl: 38

Anzahl der Ausfertigungen: 4

1 Hintergrund und Anlass des Vorhabens

Schraubdübel oder Betonschrauben (Bild 1) sind ein relativ neues Befestigungssystem in der Bautechnik. Sie werden in ein Bohrloch geschraubt und schneiden beim Setzen ein Gewinde in die Bohrlochwand. Die Lasteinleitung erfolgt dann ähnlich wie bei einem einbetonierten Betonrippenstahl [Eli, 2002]. Das Gelingen des Schneidvorganges erfordert den Einsatz von sehr harten Werkstoffen und kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden, z.B. durch eingesetzte Schneidzähne an der Dübelspitze oder durch Härten nach unterschiedlichen Verfahren (z.B. Einsatzhärten). Betonschrauben sind meist verzinkt um eine gewisse Schmierung beim Schneidvorgang zu erreichen.

Da es sich um tragende und somit sicherheitsrelevante Befestigungsmittel handelt, bedürfen Betonschrauben einer bauaufsichtlichen Zulassung. Schraubdübel mehrerer Hersteller aus galvanisch verzinktem, „unlegiertem“ Stahl sind in Deutschland für die Anwendung in trockenen Innenräumen zugelassen.

Da Stähle hoher Festigkeit (etwa größer 1000 N/mm^2) oder höherer Härte (etwa größer 350 HV) gegenüber wasserstoffinduzierter Rissbildung empfindlich sein können, muß durch eine Zulassungsprüfung sichergestellt werden, dass die Schrauben unter den Bedingungen der Anwendung nicht durch Sprödbrüche innerhalb der geforderten Lebensdauer versagen. Schadensfälle belegen, dass selbst eine kurzzeitige korrosive Beanspruchung Sprödbrüche auslösen kann (Bild 2). Da eine kurzzeitige korrosive Belastung auch in „trockenen“ Innenräumen nicht auszuschließen ist (z.B. durch Malerarbeiten, nachträgliches Verputzen, Kondenswasser, als Folge von Wasserschäden etc.), muss sichergestellt werden, dass auch in solchen Fällen kein Versagen der Befestigung auftreten kann. Risse oder Brüche in nicht tragenden Bereichen („Schneidgewinde“ am inneren Ende der Schraube), die nicht zum Verlust der Tragfähigkeit führen, können durchaus zugelassen werden.

2 Konzepte für eine Prüfung auf Anfälligkeit

Es war naheliegend, zunächst die Anwendbarkeit standardisierter und erprobter Prüfverfahren zu Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung in Erwägung zu ziehen. Zunächst bietet sich der Vergleich mit Spannstählen an, der auf eine ähnliche Fragestellung abzielt: Auch Spannstähle sind, wie Betonschrauben in „trockenen“ Innenräumen, nicht planmäßig korrosiver Belastung ausgesetzt und müssen lediglich die Zeit vor dem Verpressen bzw. Einbetten (je nach Spannkonzentration) schadensfrei und ohne Vorschädigungen überstehen. Danach sind sie durch das passivierende Medium Verpressmörtel bzw. Beton geschützt.

Der klassische Versuch zur Prüfung der Anfälligkeit ist der Zeitstandversuch unter konstanter Last, der die Einhaltung weitgehend praxiskonformer Bedingungen erlaubt [Ise, 2004]. Zur Beschleunigung der Risseinleitung werden den Prüfmedien, die so gewählt sind, dass zumindest anfänglich Korrosion unter Wasserstoffentwicklung stattfindet, Promotoren der Wasserstoffversprödung (Ammoniumthiocyanat) zugegeben. Diese erhöhen die Aktivität absorptionsfähigen, atomaren Wasserstoffs an der Probenoberfläche. Früher wurde in der Regel der **FIP**(jetzt **FIB**)-**Test** [FIP,1981] angewendet, das ist ein Zeitstandversuch in 20% Ammoniumthiocyanatlösung bei 50 °C und einer Zugspannung von 80% der Zugfestigkeit.

Der **DIBT-Test** [Ise, 2004] wird in Deutschland zur Überprüfung neu einzuführender Stähle verlangt. Die Prüflösung enthält 0,5% Sulfat und 0,05 % Chlorid als Kaliumsalze, dazu 0,1% Ammoniumthiocyanat als Promotor und ist Hüllrohr- und Absetzwässern nachempfunden.

Aufgrund von Erfahrungen der letzten Jahrzehnte werden nach Nürnberger [Nür, 1995] Spannstähle dann als besonders empfindlich eingestuft, wenn sie folgende Standzeiten im FIP-Versuch unterschreiten: gezogener Draht: 2-3 Stunden; vergüteter Draht: 10-15 Stunden; warmgewalzter Draht: 30-50 Stunden. Im DIBt-Test gelten Standzeiten größer als 2000 Stunden als normal. Stähle aus Schadensfällen unterschreiten diesen Wert in den

meisten Fällen deutlich. Der Test wird im Rahmen von Zulassungs- und Überwachungsprüfungen durchgeführt.

2.1 Der CUAP –Test

Der CUAP-Test [DIB, 2003] (CUAP = common understanding of assessment procedure) wurde mit einigen, dem Sonderfall „Betonschraube“ angepassten Änderungen auf der Grundlage des „alten“ FIP-Tests entwickelt. Änderungen waren aus folgenden Gründen notwendig:

- Schrauben können mit unterschiedlichen Überzügen oder Beschichtungen versehen sein, die zum einen den Zutritt des Prüfmediums verhindern können, aber auch das freie Korrosionspotential in der Prüflösung beeinflussen
- Betonschrauben haben in der Regel eine inhomogene Härte- bzw. Festigkeitsverteilung, weswegen die gesamte Schraube dem Prüfmedium ausgesetzt werden muss und nicht, wie bei Spannstählen, lediglich ein repräsentativer Abschnitt zwischen den Einspannungen der Zugvorrichtung geprüft werden kann.

Um den Einfluss von Beschichtungen und Überzügen zu eliminieren, werden diese in Längsrichtung streifenartig mechanisch entfernt. Das elektrochemische Potential wird potentiostatisch vorgegeben und auf -1 V gegen die gesättigte Kalomelektrode (entsprechend -755 mV gegen Normalwasserstoff) eingestellt. Der Wert liegt im Bereich mittlerer Standzeiten von hochfesten Spannstählen, wie aus Bild 6 hervorgeht. Die während des Versuchs konstant zu haltende Last ist als kleinerer der Werte $0,7 A_{s,uk}$ oder $0,6 N_{R,k,c}$ festgelegt, wobei $A_{s,uk}$ sich auf die Zugfestigkeit der Schraube bezieht und $N_{R,k,c}$ der charakteristische Widerstand in ungerissenem Beton ist. Als Prüflösung dient 20%-ige (etwa 3 normale) Ammoniumthiocyanatlösung. Die Versuchszeit wurde auf 100 Stunden festgelegt. Der Versuchsaufbau für einen Schraubenversuch nach CUAP ist in Bild 4 dargestellt. Zur Lastaufnahme muss die Schraube in ein Gewindeteil (Mutter) eingespannt werden, das jeweils passend zu der Gewindegeometrie des jeweiligen Schraubentyps angefertigt werden muss.

Verwaltung:

Pfaffenwaldring 32
D-70569 Stuttgart (Vaihingen)
USt-ID-Nr. DE 147794196

Telefon (07 11) 6 85 - 1
Telefax (07 11) 6 85 - 26 35
Internet www.mpa.uni-stuttgart.de

Baden-Württembergische (BW) Bank Stuttgart,
Kto-Nr.: 1 054 611 700, BLZ: 600 200 30
IBAN: DE89600200301054611700
SWIFT-Code: BWBKDE6S600

Der Test prüft unter massiver Wasserstoffbeladung in Gegenwart von Promotoren der Wasserstoffversprödung, erzeugt sehr hohe Wasserstoffaktivitäten in dem Werkstoff und zielt somit auf den Nachweis der **grundsätzlichen Anfälligkeit** gegen wasserstoffinduzierte Rissbildung. Werkstoffe, deren Anfälligkeit bekannt ist (das sind alle hochfesten Stähle mit $R_m > 1200\text{N/mm}^2$, bzw. Härten $>HV\ 350$, aber auch geringere Stähle mit bestimmten Gefügemerkmalen) versagen in diesem Test. Die sich einstellenden Wasserstoffaktivitäten hängen signifikant von dem Gefüge ab. In der Praxis wird man es allgemein mit sehr viel geringeren Wasserstoffaktivitäten, die entweder aus galvanischen Prozessen (Verzinken) stammen, oder als Korrosionswasserstoff bei abtragender Korrosion entstehen, zu tun haben. Das Entstehen von Innenrissen oder Blasen ist bei Abwesenheit von Promotoren nicht zu erwarten, in dem Test jedoch möglich.

2.2 Ergebnisse und Erfahrungen mit der Schraubenprüfung

Das Versagen im Test erfolgt in der Regel durch Bruch am Übergang Schaft/Gewinde oder durch Abscheren der Gewindegänge ohne Schaftbruch (Bild 5).

Die Versagensart „Abscheren der Gewindegänge“ lässt sich in gewissen Grenzen durch die Gestaltung der jeweils vom Hersteller mitgelieferten „Mutter“ beeinflussen. Fallweise wurden Brüche im endseitigen Gewindebereich ohne „Versagen“ der Schraube festgestellt, da die oberen Gewindegänge in der Lage waren, die Prüflast aufzunehmen.

Schaftbrüche wurden auch an einem Produkt festgestellt, dessen Kernquerschnitt aufgrund seiner niedrigen Härte als unempfindlich gegen wasserstoffinduzierte Rissbildung gelten muss. In diesem Fall ergab die fraktografische Untersuchung eindeutige Wasserstoffschäden in Form von Fischaugen und Poren in dem Kernmaterial (Bild 6).

Aus den bisherigen Erfahrungen ist zu erkennen, daß bei der derzeit angewendeten Prüfung:

a. Das Ergebnis von der Art und Maßtoleranz der Einspannung („Mutter“) abhängt

Verwaltung:

Pfaffenwaldring 32

D-70569 Stuttgart (Vaihingen)

USt-ID-Nr. DE 147794196

Telefon (07 11) 6 85 - 1

Telefax (07 11) 6 85 - 26 35

Internet www.mpa.uni-stuttgart.de

Baden-Württembergische (BW) Bank Stuttgart,

Kto-Nr.: 1 054 611 700, BLZ: 600 200 30

IBAN: DE89600200301054611700

SWIFT-Code: BWBKDE6S600

- b. Die Wasserstoffaktivität in der Schraube so hoch werden kann, dass auch nachweislich SpRK-unempfindliche, „weiche“ Stähle geschädigt werden.

3 Ziel des Vorhabens

Um den genannten Defiziten zu begegnen, soll ein Prüfverfahren begründet und getestet werden, das für jeden Schraubentyp gleiche Versuchsbedingungen gewährleistet. Zur Prüfung der Möglichkeit werden Versuche durchgeführt, die zunächst die Wasserstoffbelastung unter bisherigen Versuchsbedingungen und unter „abgemilderten“ Bedingungen ermitteln. Anschliessend werden Versuche unter den abgeänderten Bedingungen durchgeführt, um die Praktikabilität (vor allem hinsichtlich realistischer Standzeiten) und die Aussagefähigkeit zu überprüfen. Die zu prüfende Schraube wird dabei praxisgerecht in Beton gesetzt und belastet. Die Beladung mit Wasserstoff soll so eingestellt werden, dass „weiche“ Stähle nicht geschädigt werden. Dazu ist es erforderlich, die erreichten Wasserstoffgehalte zu ermitteln, mit den Standzeiten im Versuch zu korrelieren und Werkstoffveränderungen durch Wasserstoff zu erfassen.

4 Aufgaben

Folgende Untersuchungen wurden im Rahmen des Vorhabens durchgeführt:

Permeationsmessungen

zur Ermittlung der Wasserstoffaktivität in Stahl in betontypischen Medien bei kathodischer Polarisation mit und ohne Promotor (Ammoniumrhodanid). Gemessen wird dabei die Wasserstoffmenge/Zeiteinheit, die auf der Rückseite einer Blechprobe aus unlegiertem Stahl (Dicke 1,5 mm) die auf der Vorderseite mit Wasserstoff beladen wird austritt. Die Messungen wurden in einer Devanathan-Zelle (Bild 10) durchgeführt.

Aufbau einer Prüfeinrichtung für Schrauben

Der Schritt beinhaltet den Umbau von Versuchsständen zur Prüfung von in Beton gesetzten Schrauben. Hierfür werden vorhandene Prüfraumen so umgebaut, dass in Betonwürfel 20x20x20 cm (B50) gesetzte Schrauben bei potentiostatischer Polarisation mechanisch belastet werden können.

Zeitstandversuche an Schrauben in Beton

Dabei wurden Standzeiten von in hochfesten Beton gesetzten Schrauben unter Zugabe eines Elektrolyten (mit oder ohne Promotor) bei unterschiedlicher Last ermittelt. Die Obergrenze der Last ist dabei begrenzt durch die Last, bei der Betonversagen eintritt.

Fraktographische Untersuchungen

Die Untersuchung zielt auf die Ermittlung der Versagensart und von wasserstoffinduzierten Veränderungen des Gefüges. Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der im Versuch erzielten Brüche soll aufzeigen, welche Gefügebereiche durch den Versuch geschädigt werden. Zusätzlich wurden Schliffbilder angefertigt und Härteverläufe über den Querschnitt gemessen.

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitsschritte wird ein praktikables Prüfverfahren als europäische technische Zulassung im Rahmen des CUAP vorgeschlagen, das die Nachteile des bisherigen Verfahrens vermeidet. .

5 Wasserstoffinduzierte Rissbildung

Die Wechselwirkung von Wasserstoff mit metallischen Werkstoffen ist Gegenstand einer kaum noch übersehbaren Literatur. Wesentliche Zusammenhänge sind in [Kur, 2000] dargestellt. Im folgenden werden lediglich Aspekte behandelt, die für Betonschrauben relevant sind.

Rissbildung und Ausbreitung durch im Stahl gelösten Wasserstoff setzt zunächst voraus, dass der Stahl Wasserstoff aufgenommen hat und auf Zug belastet wird. Herstellungsbedingte Zug-Eigenspannungen sind häufig ausreichend. Die Risse gehen typischerweise von Kerben, Oberflächenfehlern (Überwalzungen, lokale Aufhärtungen, mechanische Verletzungen oder Korrosionsnarben) aus. Die Empfindlichkeit ist abhängig von der Zusammensetzung und dem Gefüge des Stahls und nimmt generell mit steigender Festigkeit und Härte zu.

Der letztlich schadensauslösende Wasserstoff kann aus der Herstellung herrühren oder als „Korrosionswasserstoff“ durch eine Korrosionsreaktion erzeugt werden.

Herstellungsbedingter Wasserstoff stammt bei Schrauben meist aus sauren Beizbädern oder aus galvanischen Prozessen, die mit kathodischer Polarisation verbunden sind. Thermodynamisch betrachtet kann unterhalb der Linie a in dem Potential-pH Diagramm (Bild 7) in wässrigen Lösungen Wasserstoff erzeugt werden. Insbesondere verzinkte, höherfeste Schrauben können, wenn sie Wasserstoff enthalten, nach Einbau und Belastung „verzögert“ brechen. Der Bruch tritt dann Stunden bis Tage nach der Belastung auf. Die Verzögerung erklärt sich aus der Aufkonzentration des zunächst gleichmäßig verteilten Wasserstoffs in Bereiche höchster mechanischer Spannungen nach erfolgter Belastung. Bei Dehnbehinderung aufgrund mehrachsiger Spannungszustände ist dies auch bei „weichen“ Stählen möglich.

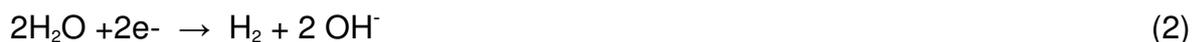
Spannungsrissskorrosion setzt die gleichzeitige Einwirkung von Zugspannungen und korrosivem Medium voraus. Damit Wasserstoff entsteht, muss wiederum der „Arbeitspunkt“ der

korrodierenden Oberfläche unterhalb der Gleichgewichtslinie a in dem Potential-pH Diagramm (Bild 7) liegen. Dies ist z.B möglich, wenn sich der Elektrolyt in Korrosionsnarben (bei Lochkorrosion) durch Hydrolyse gelösten Eisens ansäuert aber auch, wenn das Ruhepotential entsprechend abgesenkt wird. Letzteres ist der Fall, wenn an verzinkten Schrauben die Verzinkung stellenweise verletzt ist und die kathodische Schutzwirkung des Zinks zum Tragen kommt, die ja mit einer Absenkung des Potentials einhergeht. Insbesondere in Kontakt mit alkalischem Beton kann Zink sehr unedle Potentiale einstellen, die bereits erhebliche Wasserstoffentwicklung (als kathodische Teilreaktion der Zinkauflösung) zur Folge haben. Eine sehr aufschlussreiche Messung dazu zeigt Bild 8. In der als Beton-Porenelektrolyt-Modelllösung geltenden Calciumhydroxidlösung wird insbesondere bei mangelnder Belüftung (stickstoffgespülte Lösung) über längere Zeit Wasserstoff entwickelt, der zum Teil (durch Permeationsmessung- Bild 8 unten, nachgewiesen) von dem Stahl absorbiert wird. Die an Spannstählen unter Wasserstoffbeladung (mit Promotoren) ermittelte Potentialabhängigkeit der Standzeit zeigt Bild 3.

Die Kinetik der Wasserstoffentwicklung in „betonähnlichen“, alkalischen Lösungen erschließt sich aus der in Bild 9 wiedergegebenen kathodischen Stromdichte-Potential-Kurve (SPK) von Stahl in gesättigter Calciumhydroxidlösung (pH 12,6): Die mit fallendem Potential ansteigende Stromdichte mündet zunächst in einen Plateaubereich, der diffusionskontrolliert ablaufender Sauerstoffreduktion nach :



zuzuordnen ist und geht dann bei etwa $-1,1\text{V}$ bei logarithmischer Darstellung in eine Tafelgerade über, die von der Reaktion



(Wasserstoffentwicklung durch Wasserzersetzung) bestimmt wird. Merkliche Wasserstoffentwicklung ist demnach bei Potentialen negativer als etwa -900 mV (gegen die ge-

sättigte Kalomelektrode gemessen) zu erwarten. Das freie Korrosionspotential verzinkter Schrauben in feuchtem Beton kann diesen Wert zeitweilig wesentlich unterschreiten.

6 Ergebnisse

6.1 Permeationsversuche

Bild 13 zeigt das Ergebnis einer Messung in der Prüflösung für Spannstähle (nach DIBT) beim Ruhepotential (ohne äussere Polarisation) und bei Raumtemperatur. Die Stromdichte liegt innerhalb 250 Stunden zwischen 0,5 und 0,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ mit sinkender Tendenz und (temperaturbedingten) Schwankungen. Alkalische, betonähnliche Lösungen ergeben bei gleicher Promotorkonzentration sehr viel geringere Permeationsraten (Bild 12). Bei Zusatz von 5g Thiocyanat/l erreicht man in einer Lösung von pH 13 etwa 0,6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Erst 20% Thiocyanatlösung, gesättigt mit Calciumhydroxid ergibt höhere Wasserstoffraten um 15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Bild 11). Der pH-Wert einer solchen Lösung liegt jedoch mit pH 9,1 bei Raumtemperatur nicht mehr im „betonähnlichen“ Bereich

In alkalischer Lösung lässt sich durch potentiostatische Polarisation der Wasserstoffeintrittsseite auch ohne Promotorzusatz ein potentialabhängiger Permeationsstrom erzeugen, wie Abb. 14 zeigt. Polarisation bei $-1,2\text{ V}$ gegen die Kalomelektrode ergibt dabei eine Permeationsrate um 0,75 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, die hinsichtlich Wasserstoffbeladung zu Prüfzwecken geeignet erscheint. Die Art der Beladung schließt eine Gefährdung „weicher“ Gefügebestandteile aus, da keine Promotoren eingesetzt werden müssen.

6.2 Zeitstandversuche in Beton

Die Ergebnisse aller bislang durchgeführten Zeitstandversuche an Betonschrauben, einschließlich der Versuche nach CUAP (in Thiocyanatlösung) sind in Tabelle 1 in Beilage 22 zusammengefasst. Einige der Versuche in Betonkörpern, insbesondere Versuche mit 20% Ammoniumthiocyanatlösung als Elektrolyt und Beton als Verankerung wurden nach Massgabe und Überprüfung der Versuchseinrichtung durch die MPA Univ. Stuttgart bei der Fa. Hilti in Liechtenstein durchgeführt, ein Großteil der Ergebnisse in Beton mit Calciumhydroxid als Elektrolyt bei $-1,2\text{ V}$ (potentiostatisch) wurden von der MPA Darmstadt durchgeführt. Die Versuchseinrichtung aller Versuche in Beton entspricht im Prinzip dem in Bild 15

skizzierten Aufbau. Erzielte Standzeiten in den einzelnen Testvarianten von Schrauben, die aus der Produktion von fünf Herstellern stammen (in der Tabelle 1 als A, B, C, D, E codiert) finden sich in den Bildern 16-18. In Bild 30 sind Standzeiten aus dem „CUAP“-Test, den Standzeiten aus Versuchen in Beton bei -1000 mV GKE gegenübergestellt, Bild 31 enthält Standzeiten bei unterschiedlichen Lasten an jeweils identischen Schrauben aus CUAP-Versuchen.

6.3 Fraktographie / Härtemessungen

Die Abbildungen 19-29 dokumentieren exemplarisch das typische, in den Versuchen erzeugte Bruchbild. Es entspricht in allen Merkmalen den Befunden aus Schadensfällen: makroskopisch spröder Bruch mit Nebenrissen, im Ausgangsbereich ausgeprägt interkristallin mit klaffenden Korngrenzen. Der Restbruch ist stets mikroskopisch duktil (Verformungswaben)

Bild 32 zeigt den Härteverlauf über den Querschnitt zweier Schrauben, deren eine im Versuch bei -1 V GKE in Beton nach 37,7 Stunden brach (vgl. Bild 19). Der Härteverlauf dieser Schraube wurde nahe der Bruchfläche gemessen. Die Bilder 33 und 34. zeigen Härteverläufe über den Querschnitt von Schrauben unterschiedlicher Hersteller. Der Schraubentyp in Bild 33 ist lediglich im unteren, „schneidenden“ Spitzenbereich des Gewindes gehärtet, der Typ in Bild 34 hat auch im Schaftbereich eine relativ hohe Härte von über 400 HV.

Auch Schrauben, die den Test bestehen, weisen in der mikroskopischen Untersuchung häufig Anrisse auf, die jedoch nicht zum Bruch führen. Einen Sonderfall stellen Schrauben dar, die nur im unteren, schneidenden Bereich des Gewindes hohe Härte aufweisen. In diesem Fall kann die Spitze der Schraube versagen, die Tragfähigkeit jedoch erhalten bleiben.

7 Diskussion

Die untersuchten Varianten einer Prüfung auf Anfälligkeit gegen wasserstoffinduzierte Brüche, die hier untersucht wurden, können wie folgt bewertet werden:

- **CUAP- Test:**

Der Test prüft zu scharf und enthält unwägbara Elemente bezüglich der Gestaltung der Prüfapparatur, die zu Streuungen führen (Verankerung im Gewindebereich!)

- **Prüfung in Beton mit Zusatz von Promotoren**

Der Zusatz von Promotoren (Ammoniumthiocyanat) bewirkt eine zeitlich zunehmende Absenkung des pH-Wertes im Laufe des Versuchs. Die Versuchsbedingungen sind dadurch zeitlich nicht konstant und möglicherweise zu scharf, da auch hier einer der Nachteile des CUAP-Versuches (Einsatz von Promotoren) wirksam bleibt.

- **Prüfung in Beton bei kathodischer Polarisation –1V gegen die Kalomelektrode:**

Der Versuch korreliert mit dem CUAP-Test, wenn die Standzeiten im Verhältnis 1:10 umgerechnet werden (vgl. Bild 30). Die Nachteile des CUAP-Tests werden dabei vermieden. Die Beladung der Probe mit Wasserstoff ist jedoch so gering, dass selbst geringe Änderungen des pH, wie sie bei alkalihaltigen Betonen (aus KOH und NaOH) und aus Temperaturänderungen zwangsläufig auftreten, im Laufe der Versuchszeit (die in diesem Test etwa 1000 h betragen sollte), zu einer Abmilderung der Versuchsbedingungen bis zur Wirkungslosigkeit der „Beladung“ führen können. Zudem erscheint die notwendige Versuchszeit von 1000 Stunden zu lang.

- **Prüfung in Beton bei kathodischer Polarisation bei potentiostatischer Polarisation (–1,2 V gegen die Kalomelektrode):**

Da angestrebt wird, den Versuch bei „Raumtemperatur“ und in Versuchskörpern, die mit handelsüblichen Zementen hergestellt werden durchzuführen, sollten die Versuchsbedin-

gungen so gewählt werden, dass die pH-Abhängigkeit der Wasserstoffentwicklung sich möglichst nicht auf das Versuchsergebnis auswirkt. Das pH einer gesättigten Calciumhydroxidlösung beträgt theoretisch bei 20 °C 12,62, bei 40 °C 11,98. Gemessen werden mit einem kalibrierten pH –Messgerät (Fa. Knick) bei 20 °C Werte von 12,68, bei 40 °C von 11,8 (ohne Temperaturkompensation) und 12,15 (mit Temperaturkompensation). Im Versuch mit gesättigter Calciumhydroxidlösung auf Beton wurde innerhalb einer Versuchszeit von 1000 Stunden ein Anstieg des pH von 12,4 auf 12,75 gemessen, der sich aus der Auslaugung von Alkalien aus dem Beton erklärt.

Es erschien sinnvoll, diese Einflüsse im Versuch zu minimieren, indem ein Potential vorgegeben wird, das in den Grenzen möglicher pH-Änderungen eine verlässliche Wasserstoffbeladung sicherstellt. Dies dürfte bei $-1,2$ V gegen die gesättigte Kalomelektrode gegeben sein (man vergleiche dazu das Pourbaix-Diagramm in Bild 7, Linie „a“).

Die Prüfung bei $-1,2$ V in Beton erscheint aufgrund der erzielten Ergebnisse geeignet, innerhalb akzeptabler Versuchszeiten „robuste“ von wenig „robusten“ Schrauben zu unterscheiden. Anfällige Schrauben versagen selbst bei niedrigen Lasten innerhalb weniger Stunden, woraus eine Abminderung der Gesamtversuchszeit auf 240 Stunden (10 Tage) gerechtfertigt erscheint. Da eine Schwächung durch Anrisse auch bei bestandener Prüfung nicht auszuschließen ist, empfiehlt es sich, nach Versuchsende die Resttragfähigkeit im Auszugsversuch zu ermitteln.

Nähere Betrachtung erfordert der Einfluss der Prüflast auf die Standzeit. Zur Orientierung kann dazu Bild 31 hinzugezogen werden. Eine (wünschenswerte) Erhöhung der Prüflast erfordert die Modifizierung der Prüfeinrichtung, dass zylindrische, in Stahlrohr gegossene Prüfkörper verwendet werden, um Spaltbrüche zu vermeiden und / oder die Verwendung einer „engeren“ Abstützung der Belastungseinrichtung, die jedoch dann elektrisch von der Aufhängung der Schraube getrennt werden sollte, da sie in der Prüflösung angeordnet werden muss und ohne Isolierung mit polarisiert würde.

Schrauben, die grundsätzlich keine Anfälligkeit gegen HI-SCC in „tragenden“ Bereichen erwarten lassen, können von der Prüfung ausgenommen werden. Als Ausschlusskriterien wurde vorgeschlagen:

- Kernhärte kleiner 350 HV (ab 0,5 mm Tiefe)
- Härte der einsetzgehärteten Randzone kleiner 600 HV
- Einhärtetiefe kleiner 0,5 mm

Ist nur die schneidende Spitze gehärtet und wird diese nicht als „tragend“ angesetzt, muss ebenfalls nicht geprüft werden.

Die bisherigen Ergebnisse lassen die o.g. Ausnahmen realistisch erscheinen, sind jedoch statistisch noch nicht als abgesichert zu betrachten.

8 Schlussfolgerungen

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung von in Beton gesetzten Schrauben ohne Zusatz von Promotoren grundsätzlich geeignet ist, um eine die Tragfähigkeit abmindernde Anfälligkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Rissbildung zu erkennen. Als Versuchsbedingungen werden folgende vorgeschlagen:

Prüfkörper: hochfester Beton. Bei Gefahr des Spaltens kann der Beton in ein Stahlrohr gegossen werden und/oder eine enge Abstützung gewählt werden.

Prüflösung: gesättigte Calciumhydroxidlösung

Prüflast : 70% der Auszugslast der Schraube oder 50% der Zugfestigkeit der Schraube (jeweils der kleinere der beiden Werte)

Elektrochemische Bedingungen: potentiostatischer Halteversuch bei $-1,2$ V gemessen gegen die gesättigte Kalomelektrode. Es können auch andere Bezugselektroden (z.B. Silber/Silberchlorid) verwendet werden, die Potentiale sind entsprechend zu korrigieren.

Verwaltung:

Pfaffenwaldring 32
D-70569 Stuttgart (Vaihingen)
UST-ID-Nr. DE 147794196

Telefon (07 11) 6 85 - 1
Telefax (07 11) 6 85 - 26 35
Internet www.mpa.uni-stuttgart.de

Baden-Württembergische (BW) Bank Stuttgart,
Kto-Nr.: 1 054 611 700, BLZ: 600 200 30
IBAN: DE89600200301054611700
SWIFT-Code: BWBKDE6S600

Nach Abschluss des Tests soll die Last jeweils bis zum Versagen erhöht werden (Zugversuch) um die Resttragfähigkeit zu ermitteln.

9 Literatur

- [DIB2003] DIBt: CUAP, Common Understanding of Assessment Procedure: Concrete Screw for Anchorage in Normal Weight Concrete. ETA request No 06.01/20, DIBt, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Oct. 2003
- [Eli2002] Eligehausen, R., Künzlen, H.R., Tragverhalten von Befestigungen mit Schraubdübeln; Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 2, S. 61-68
- [FIP1981] FIP: Commission on Prestressing Steels, Proceedings 3rd Symposium on Stress Corrosion of Prestressing Steels, (1981)
- [Gie1992] Gieler-Breßmer, S., Menzel, K.: Korrosionsschutzwirkung von Instandsetzungsmörteln gegenüber chloridinduzierter Korrosion; Bautenschutz und Bausanierung 15(1992), Heft 4, 41-45
- [Ise2004] Isecke, B.(ed.): Test Methods for Assessing the susceptibility of prestressing Steels to Hydrogen induced SCC , European Federation of Corrosion Publications Nr. 37, Maney Publ. London (2004)
- [Kur2000] Kuron, D. (Hrsg): Wasserstoff und Korrosion; Verlag Irene Kuron, Bonn (2000)
- [Men, 1996] Menzel, K., Onuseit, G.: Fractures of prestressing steels caused by contact to zinc, Materials and Corrosion 47, 42-45 (1996)

- [Nür1995] Nürnberger, U,: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen; Bauverlag Wiesbaden, Berlin (1995)
- [Pou1974] Pourbaix, M: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions; NACE/CEBELCOR, Houston, Brussels (1974)
- [Rie1973] Riecke, E.: Über den wasserstoffinduzierten Sprödbruch hochfester Stähle; Arch. Eisenhüttenwesen 44 (1973), Nr. 9, S. 647-656
- [Rie1978] Riecke, E.M., Bohnenkamp, K.: Untersuchungen über den Einfluss des Zinks auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen. Max Planck Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, 1978.

gez. Menzel

gez. Nürnberger

Dr.-Ing. K. Menzel

Prof. Dr. Ing. habil U. Nürnberger

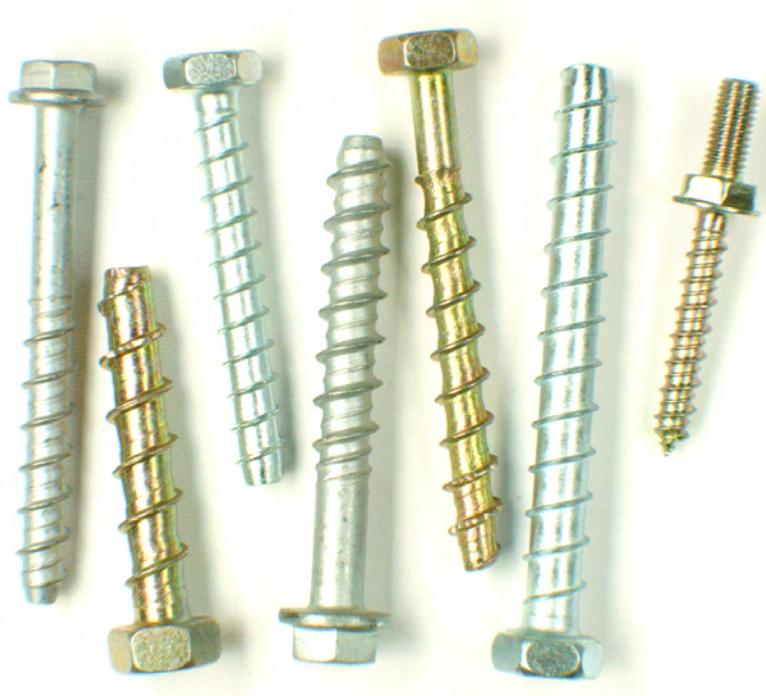


Abb. 1: Betonschrauben (Beispiele)

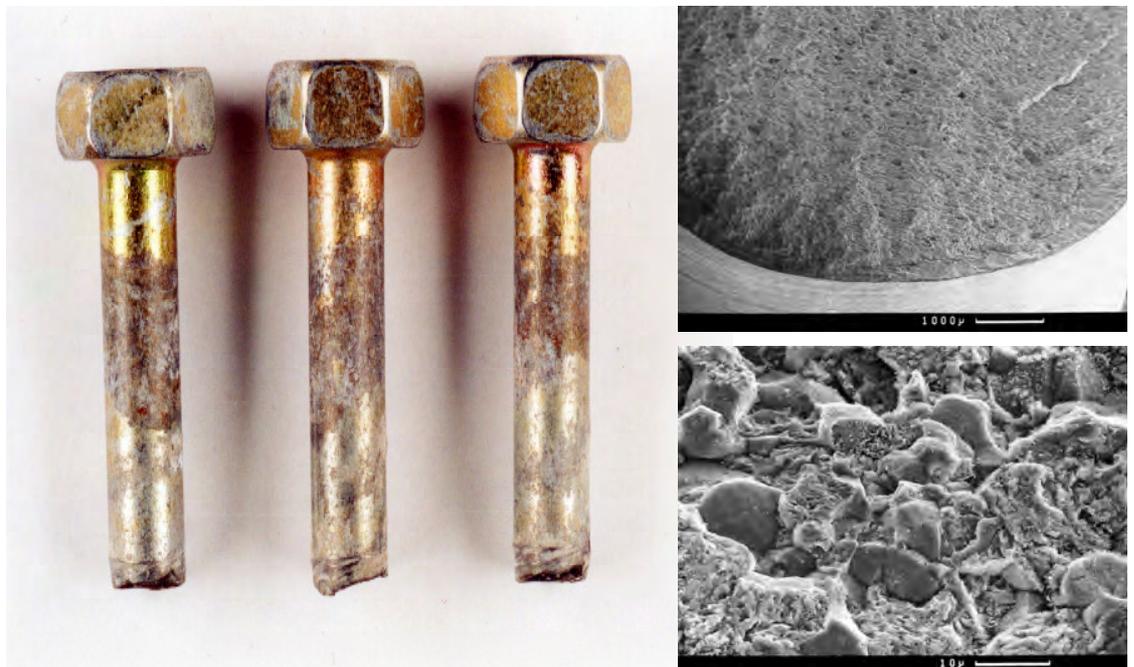


Abb. 2: Nach Anwendung im Freien durch HI-SpRK gebrochene Schrauben (Übersicht und REM-Aufnahmen der Bruchfläche)

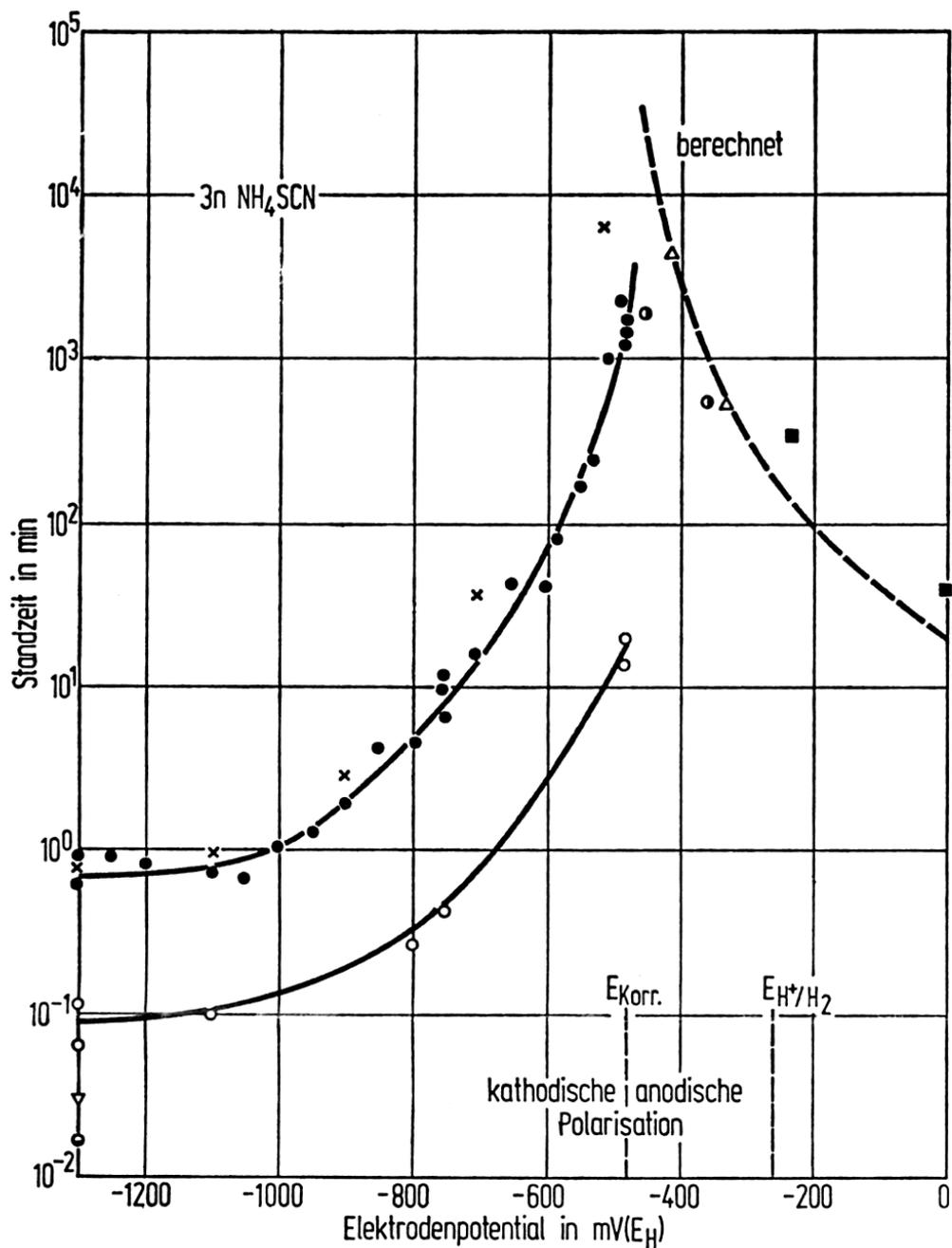


Abb. 3: Abhängigkeit der Standzeit von Spannstählen vom Elektrodenpotential in in 3n Ammoniumrhodanidlösung (FIP-Test) (Riecke, 1973)

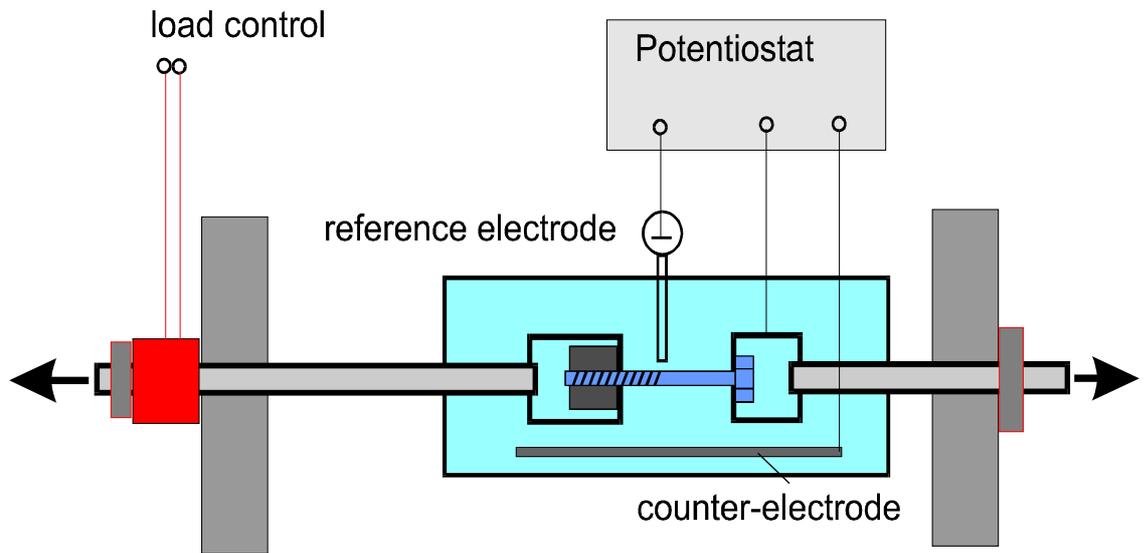


Abb. 4: Versuchsaufbau für die Prüfung nach CUAP



Abb. 5: Versagen einer Schraube durch Abscheren des Gewindes im CUAP-Test

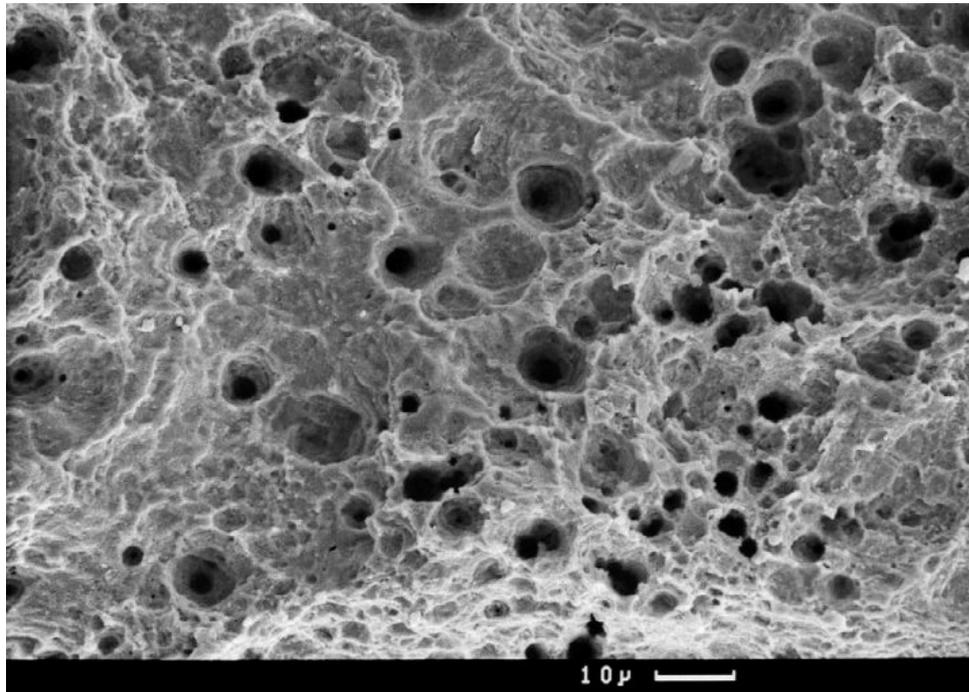


Abb. 6: Wasserstoffschäden (Poren) im „weichen“ Kern einer Betonschraube nach CUAP-Test

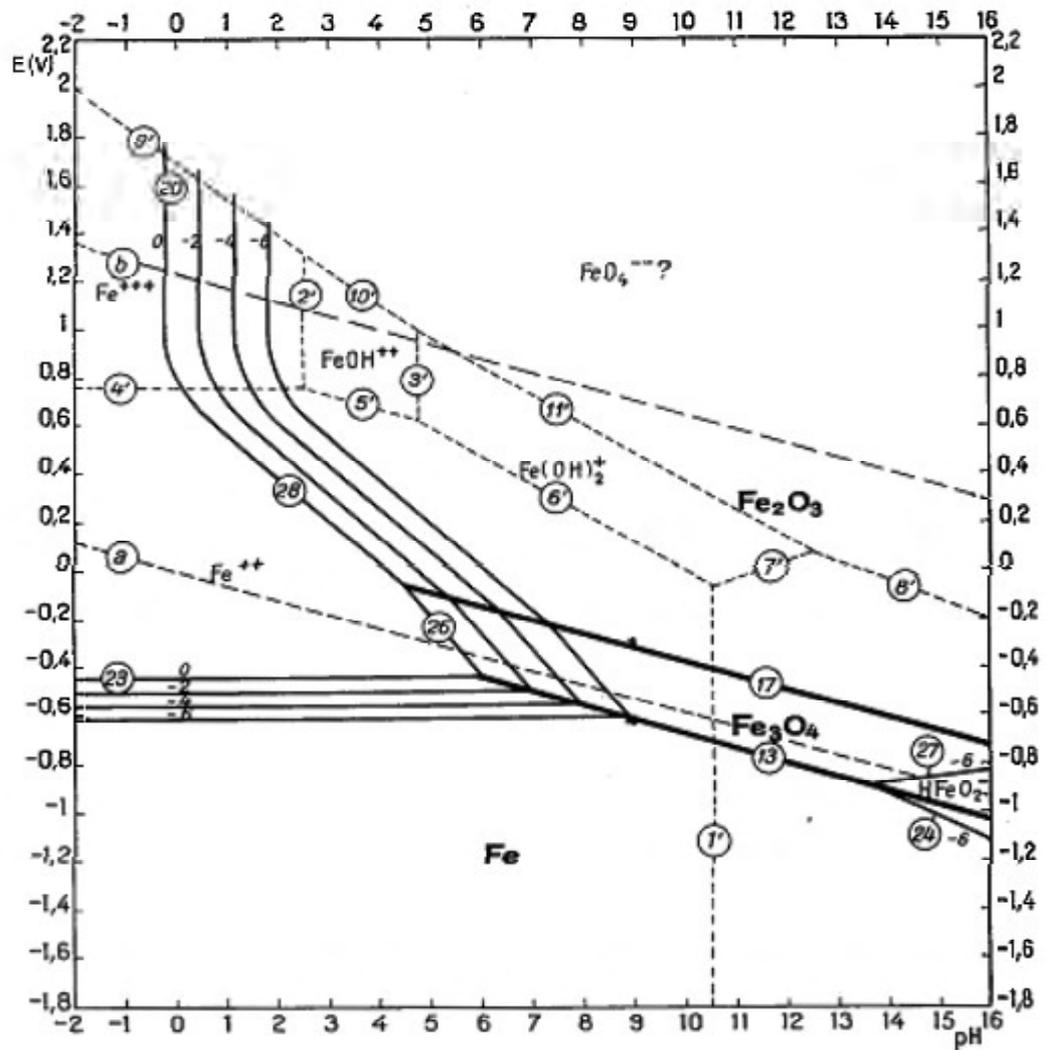


FIG. 4. Potential-pH equilibrium diagram for the system iron-water, at 25°C (considering as solid substances only Fe, Fe₃O₄ and Fe₂O₃).

Abb. 7: Pourbaix-Diagramm des Systems Eisen/Wasser; die gestrichelte Linie "a" gibt das Gleichgewichtspotential der Wasserstoffentwicklung an. Das Potential ist gegen Normalwasserstoff aufgetragen - der Nullpunkt der ges. Kalomelektrode liegt bei +0,245 V

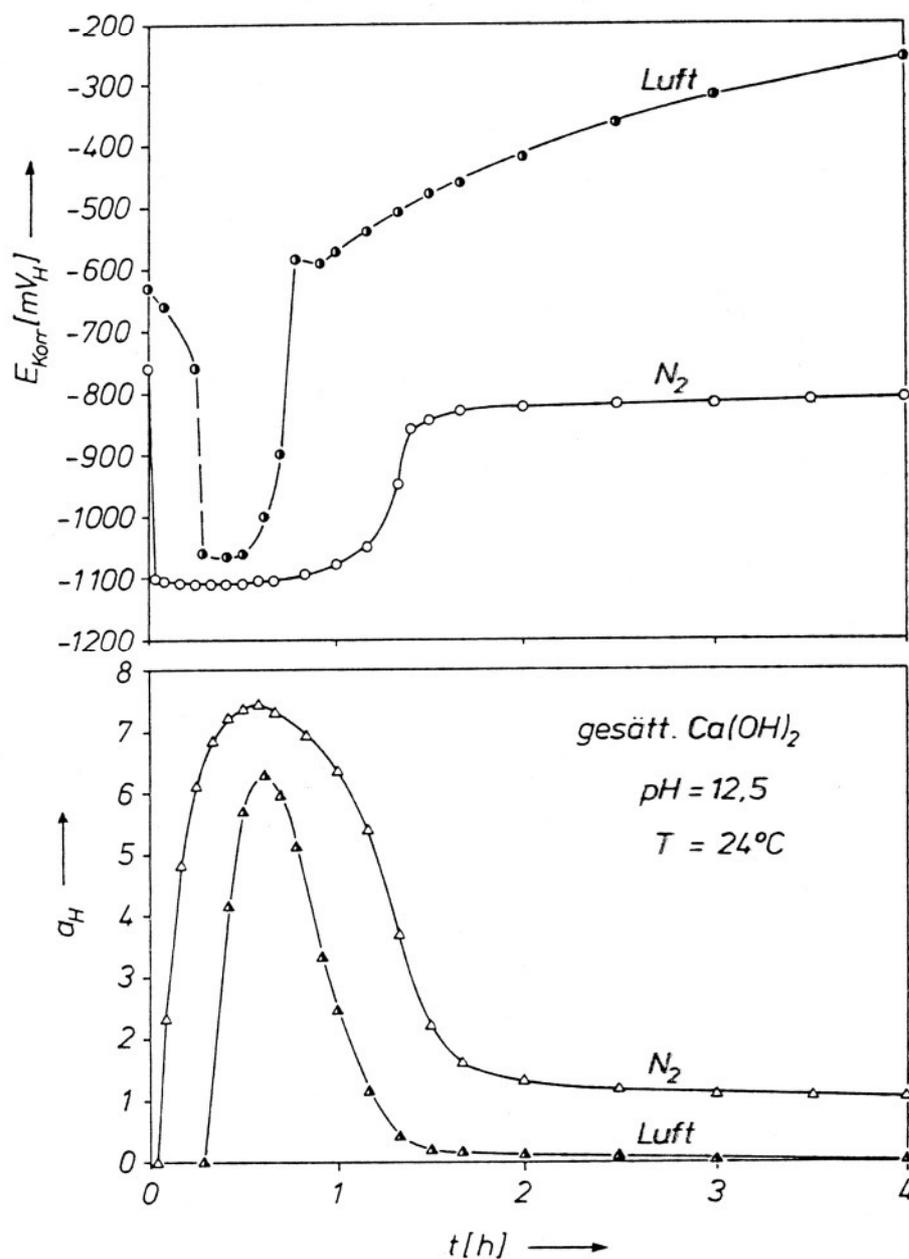


Abb. 8: Ruhepotentialverlauf eines einseitig verzinkten Stahlbleches mit Verletzung der Zinkschicht in gesättigter Calciumhydroxidlösung (luft- und stickstoffgespült) und aus gleichzeitigen Permeationsmessungen ermittelte Wasserstoffaktivität a_H im Stahl [Riecke 1978]

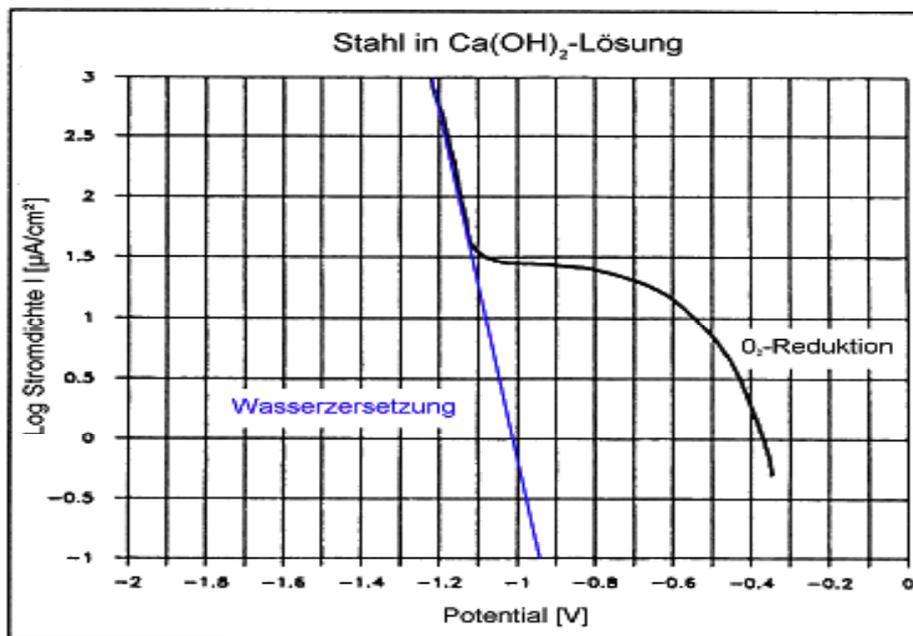


Abb. 9: Potentiodynamisch gemessene SPK von „unlegiertem“ Stahl in gesättigter Ca(OH)_2 -Lösung, ruhend, an Luft, $dE/dt = 0,02 \text{ mV/s}$, Potential bezogen auf GKE [Gie1992]

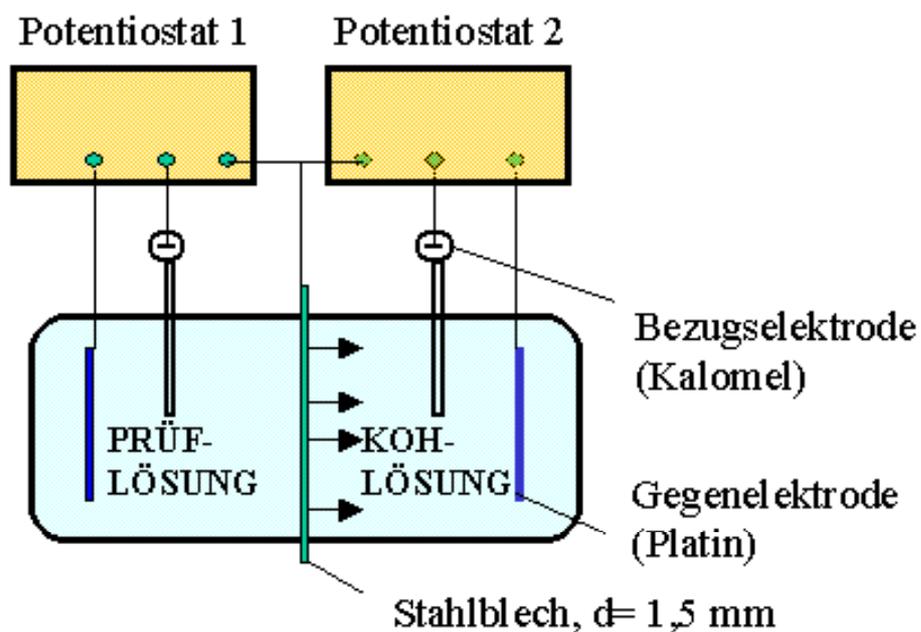


Abb. 10: Permeationszelle nach Devanathan

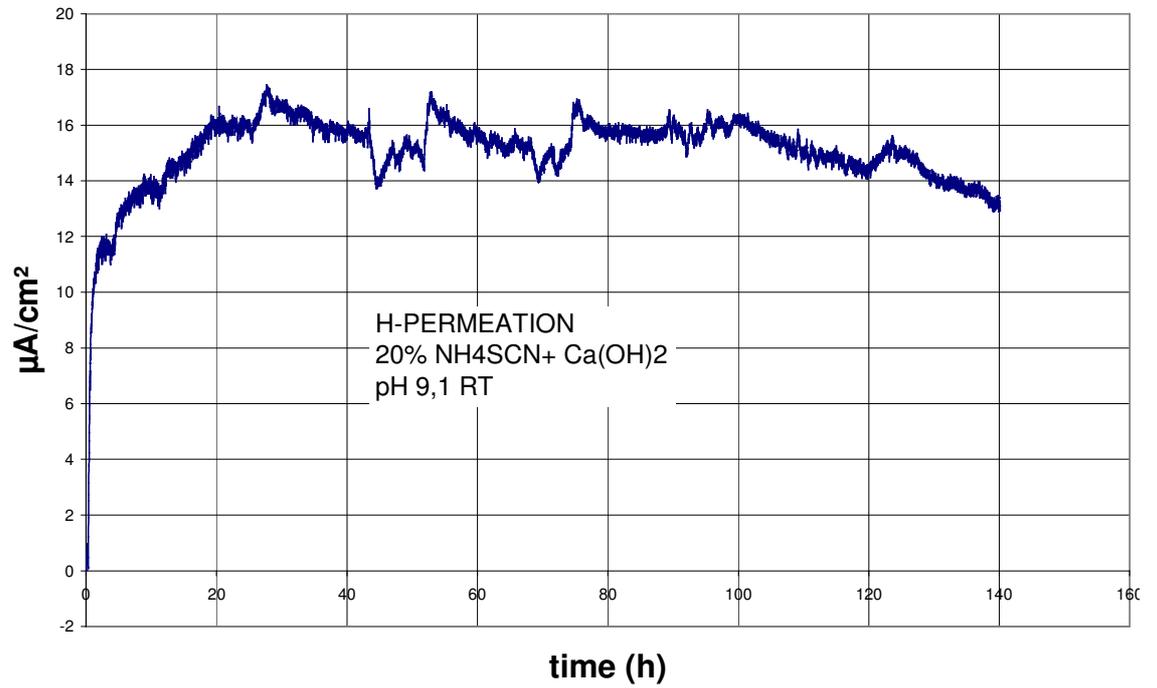


Abb. 11: H- Permeationsstromdichte an einem Stahlblech in alkalischer Rhodanidlösung (Ammoniumthiocyanat)

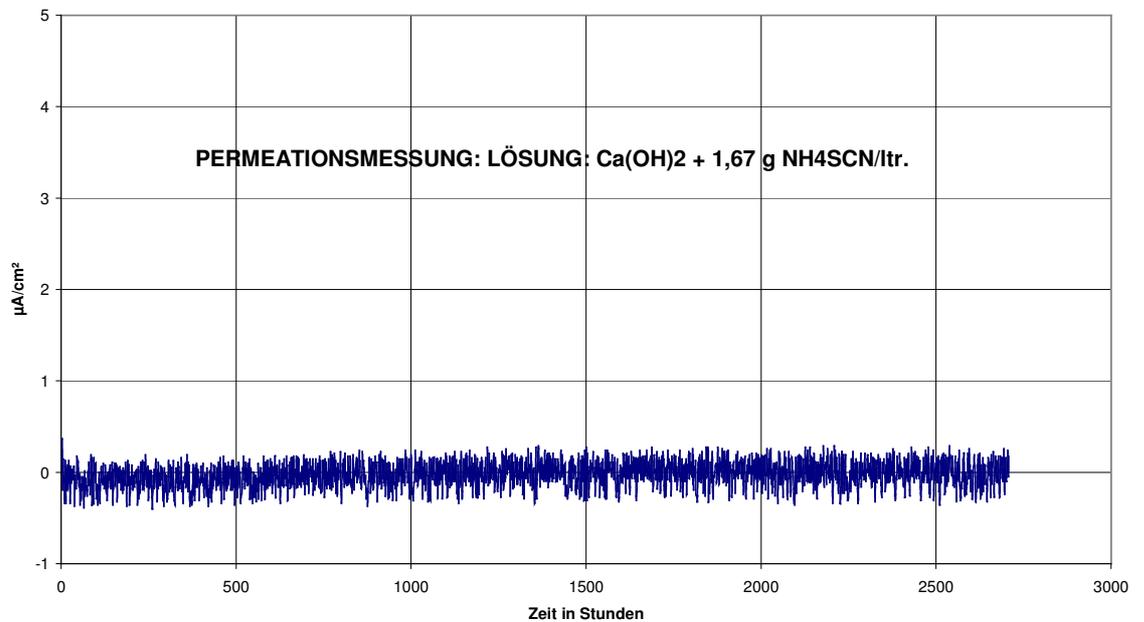


Abb. 12: Permeationsmessung in alkalischer Lösung mit geringem Zusatz von Promotor (entsprechend DIBT-Test)

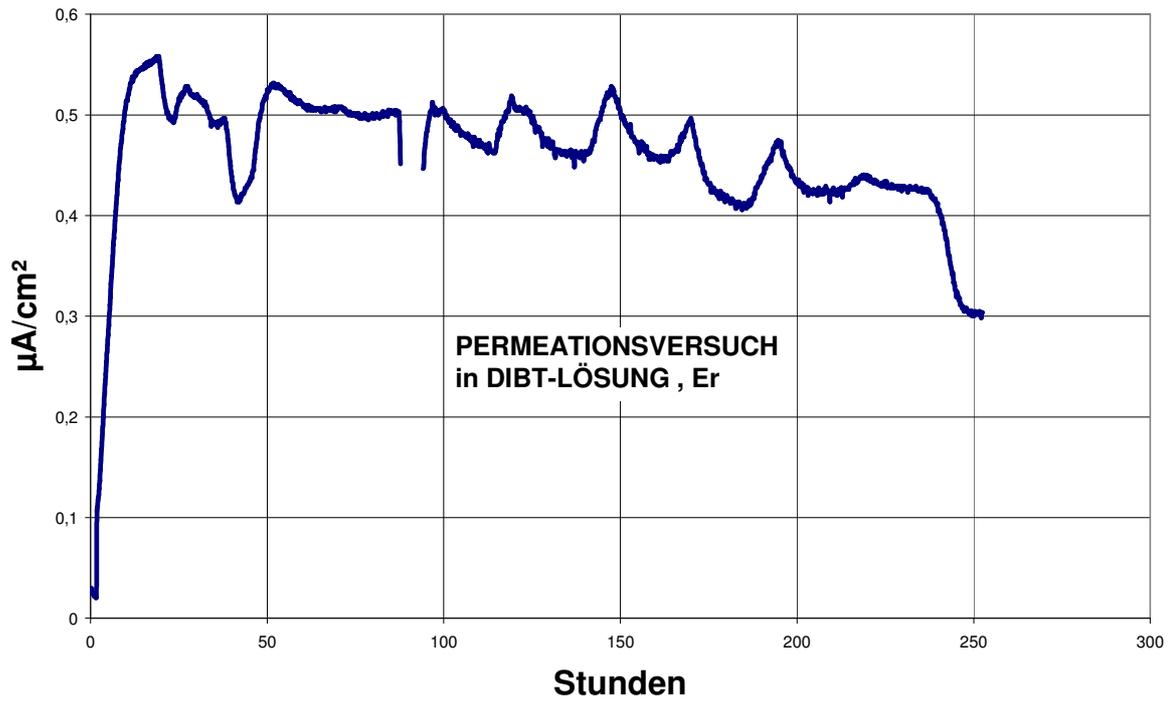


Abb. 13: Permeationsmessung in DIBT-Lösung (Prüfung von Spannstählen)

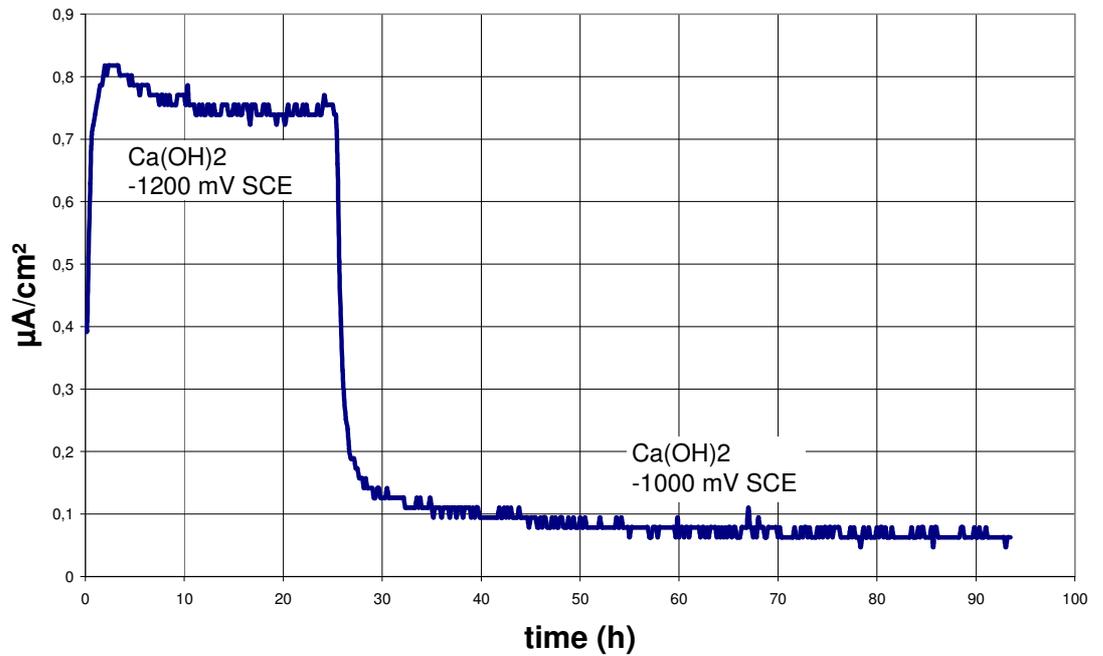


Abb. 14: Permeationsmessung in Ca(OH)₂ Lösung (ohne Promotorzusatz) bei -1200 mV und -1000 mV SCE

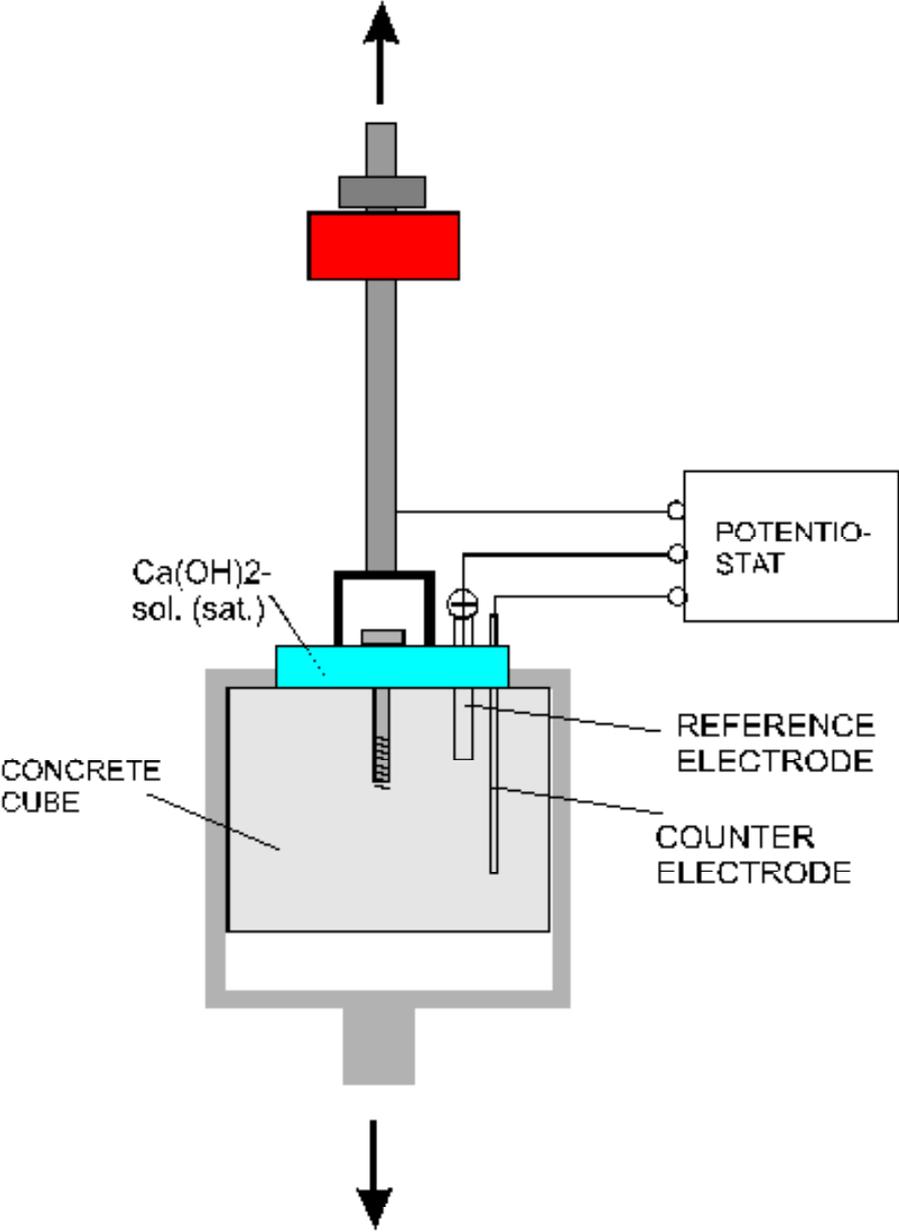


Abb. 15: Prüfeinrichtung für die Prüfung in Beton

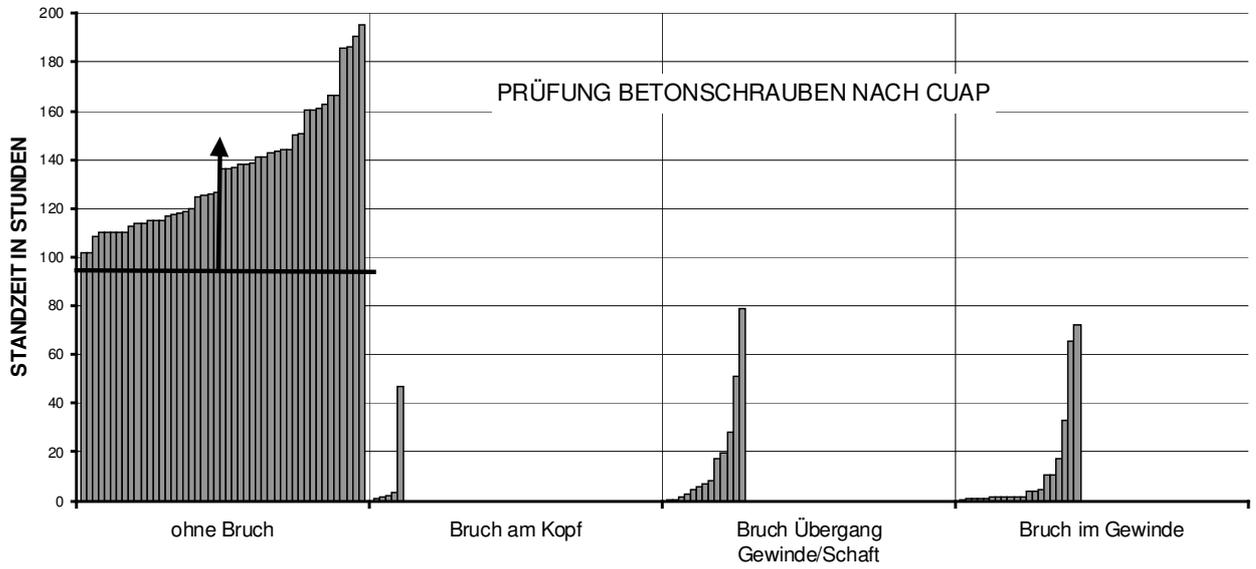


Abb. 16: Standzeiten bei Prüfung nach CUAP

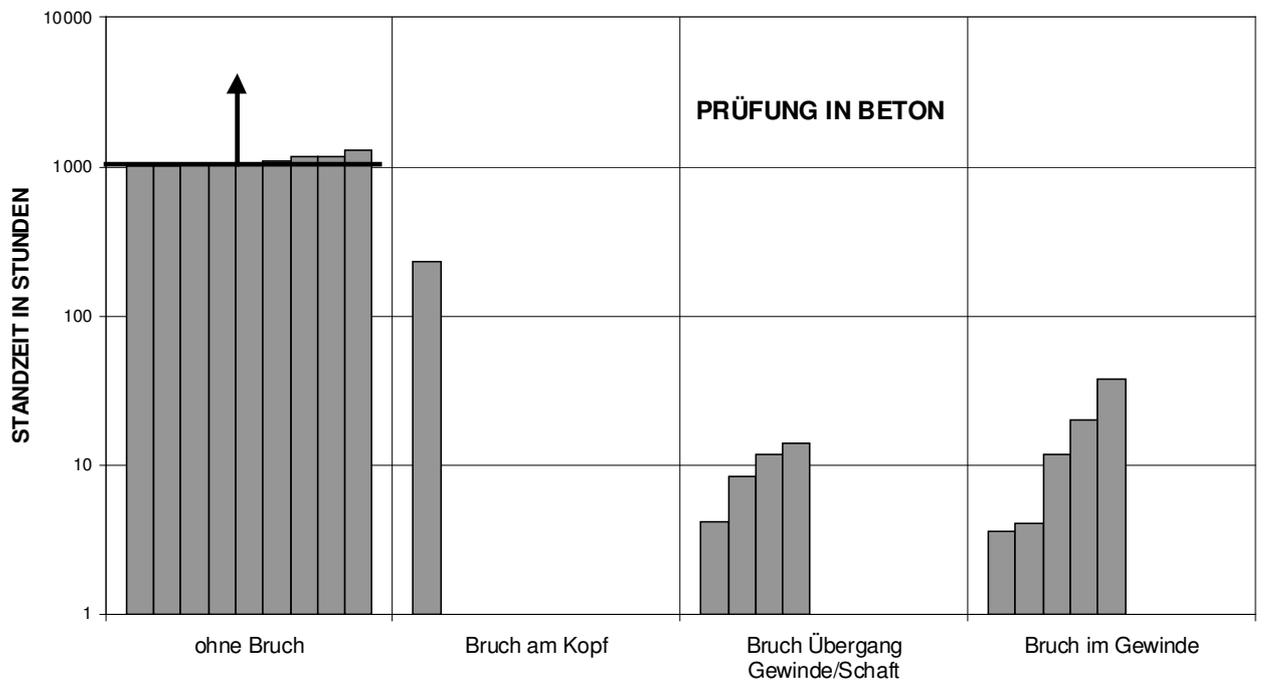


Abb. 17: Prüfung in Beton bei -1000 mV SCE: erzielte Standzeiten

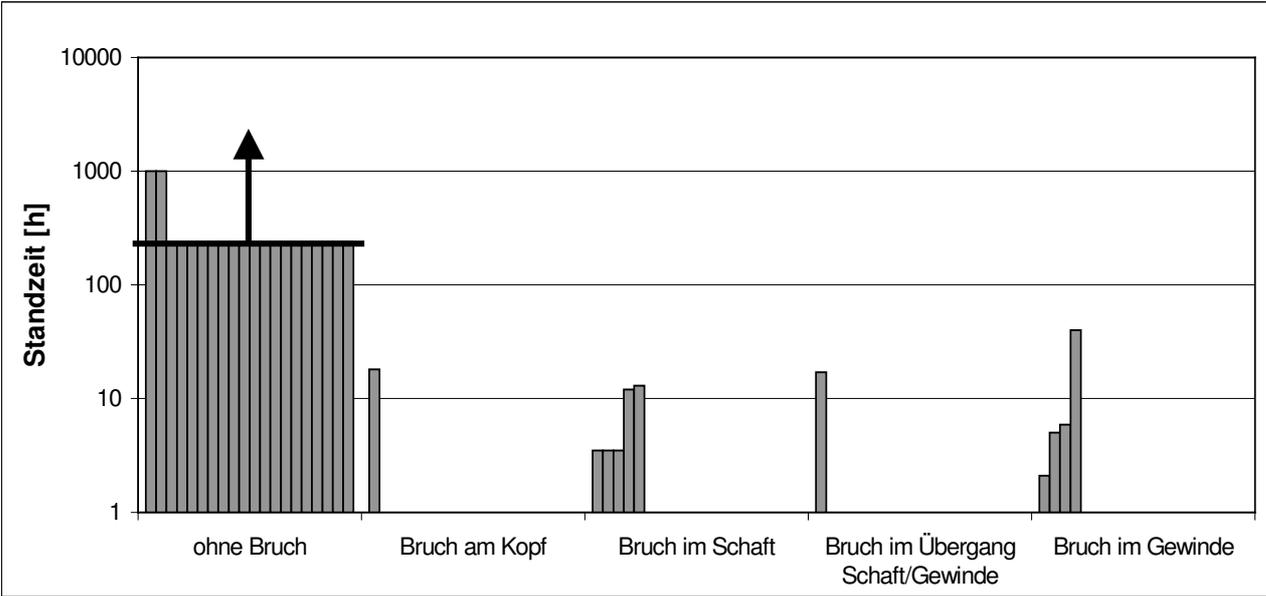


Abb. 18: Prüfung in Beton bei -1200 mV SCE: erzielte Standzeiten



Abb. 19: Im Test gebrochene Schraube (Standzeit 37,7 h , Prüfung in Beton bei -1000 mV)



Abb. 20: Detail aus Abb. 19

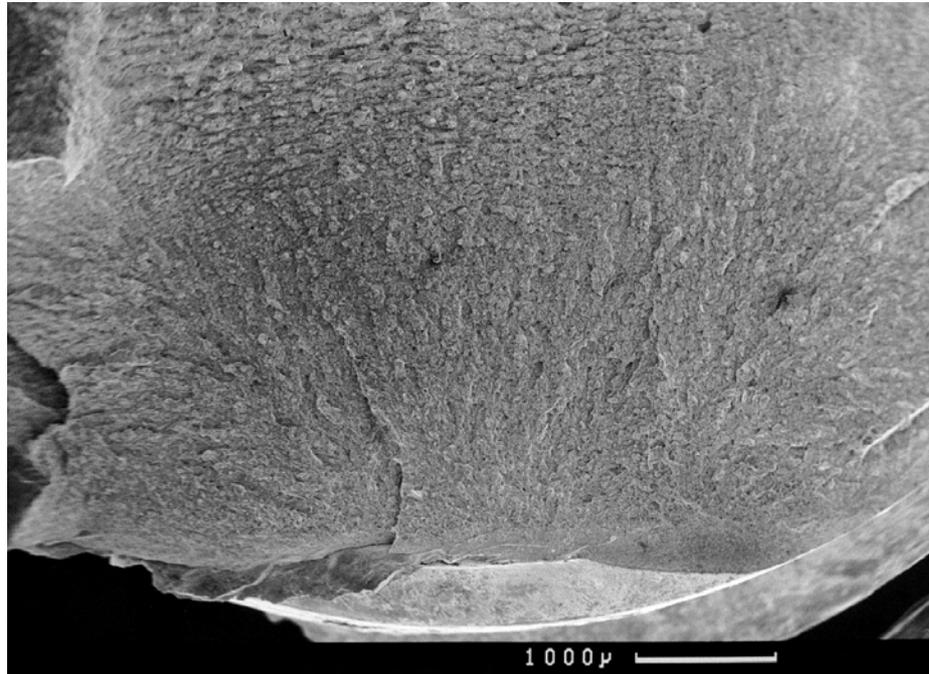


Abb. 21: Detail aus Abb. 19 ; Bruchausgang (REM-Aufnahme)

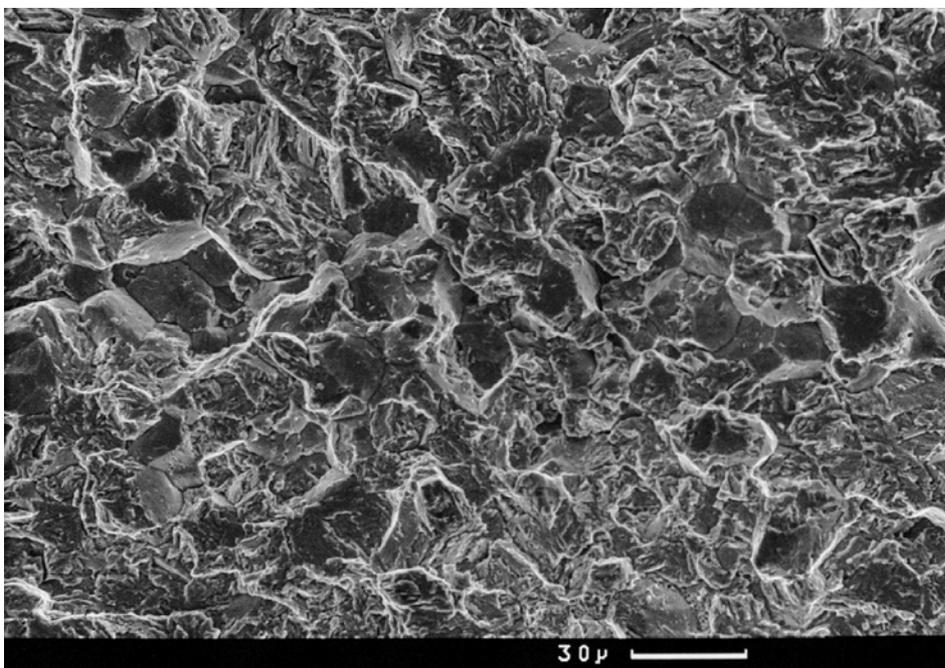


Abb. 22: Detail Bruchausgang (Randzone: trans- und interkristalliner Mischbruch)

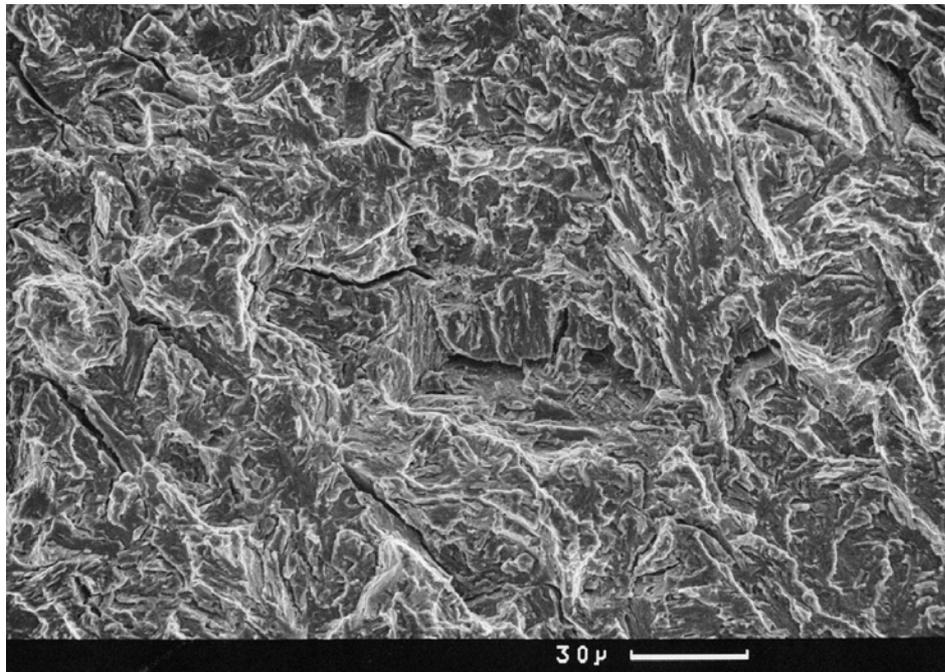


Abb. 23: Nebenrisse in transkristallinem Sprödbruch

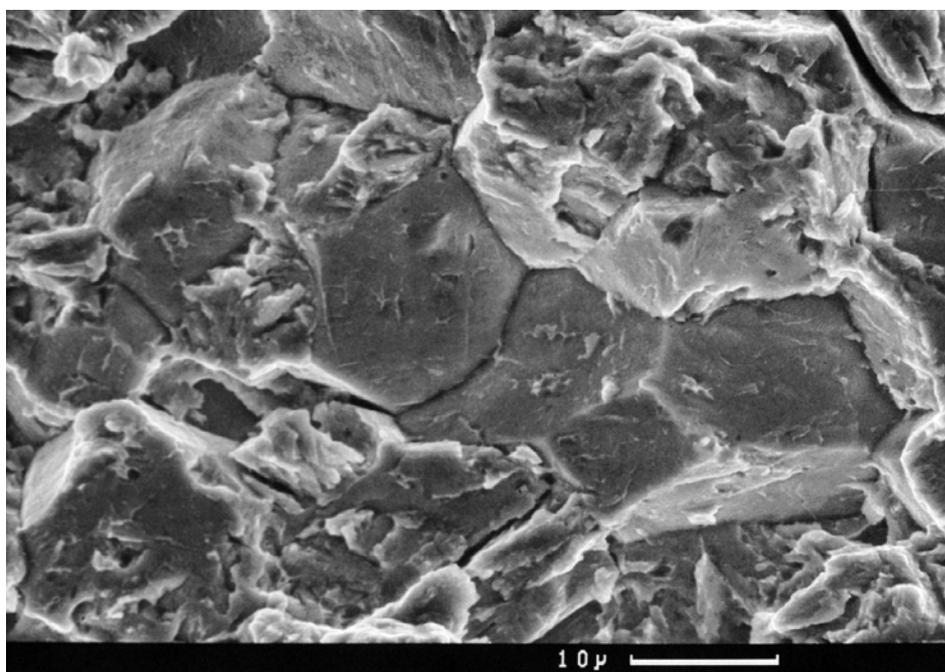


Abb. 24: Interkristalline Anteile der Bruchfläche

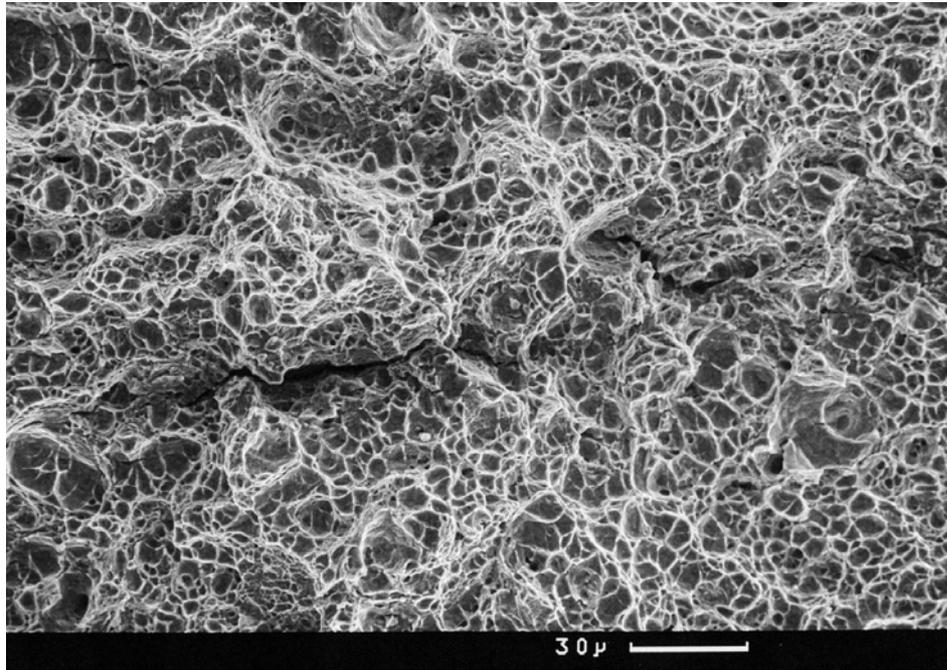


Abb. 25: Zäher Restbruch (Gewaltbruch) mit Verformungswaben



Abb. 26: Längsschliff unterhalb der Bruchfläche mit Nebenrisse



Abb. 27: Detail aus Bild 26 (links Härtezone – geätzt mit alk. HNO_3)

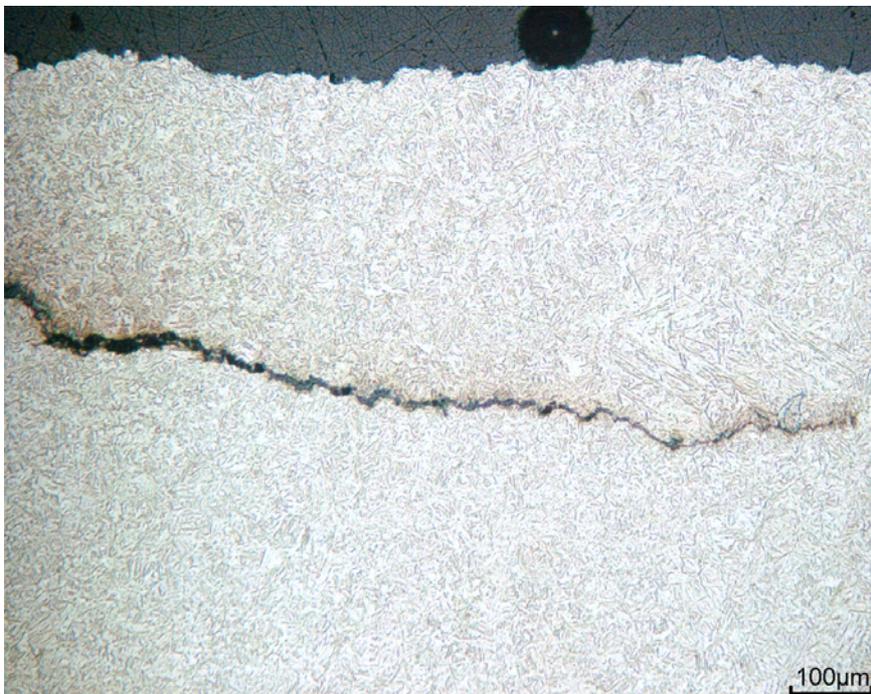


Abb. 28: Detail aus Bild 26: Bruchfläche (oben) und Nebenriss (Interkristalliner Rissverlauf)

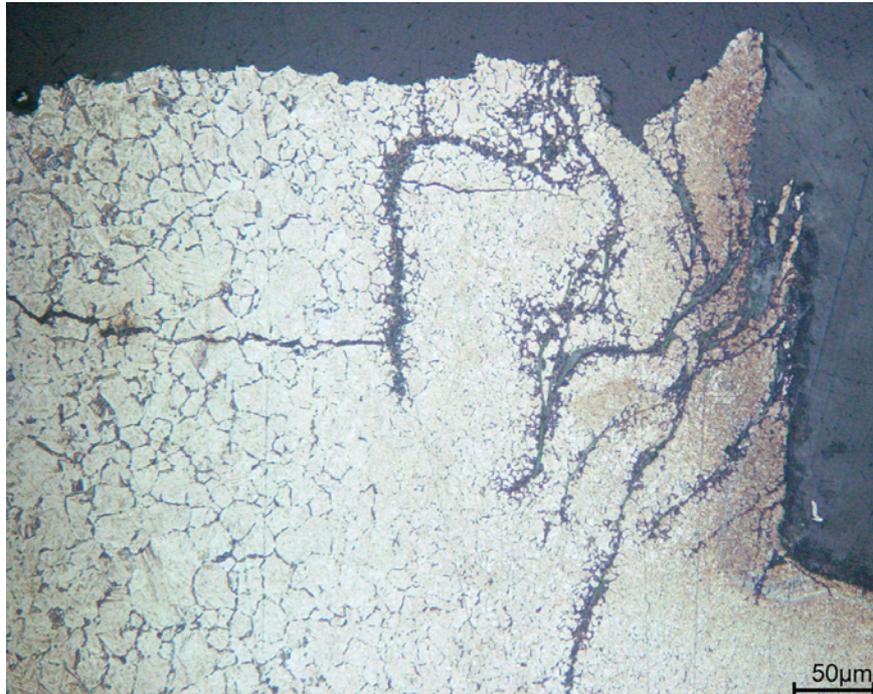


Abb. 29: Anrisse im Randbereich

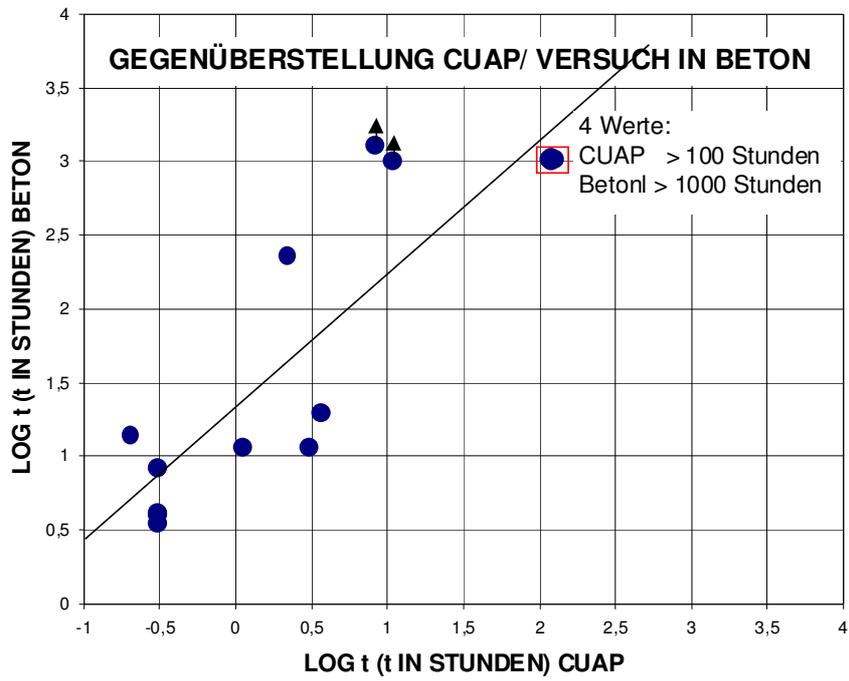


Abb. 30:

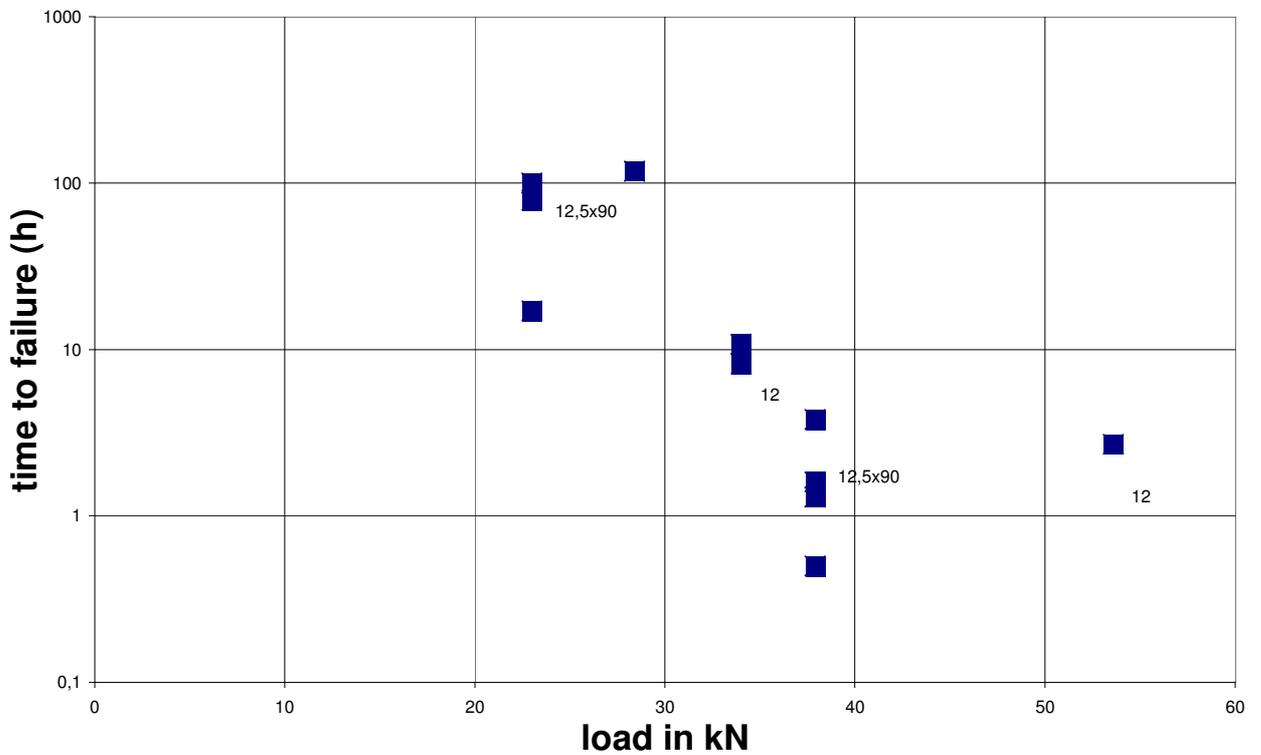


Abb. 31: Lastabhängigkeit der Standzeit bei Prüfung nach CUAP

Einsatzhärtungstiefe Schrauben 62 und 49

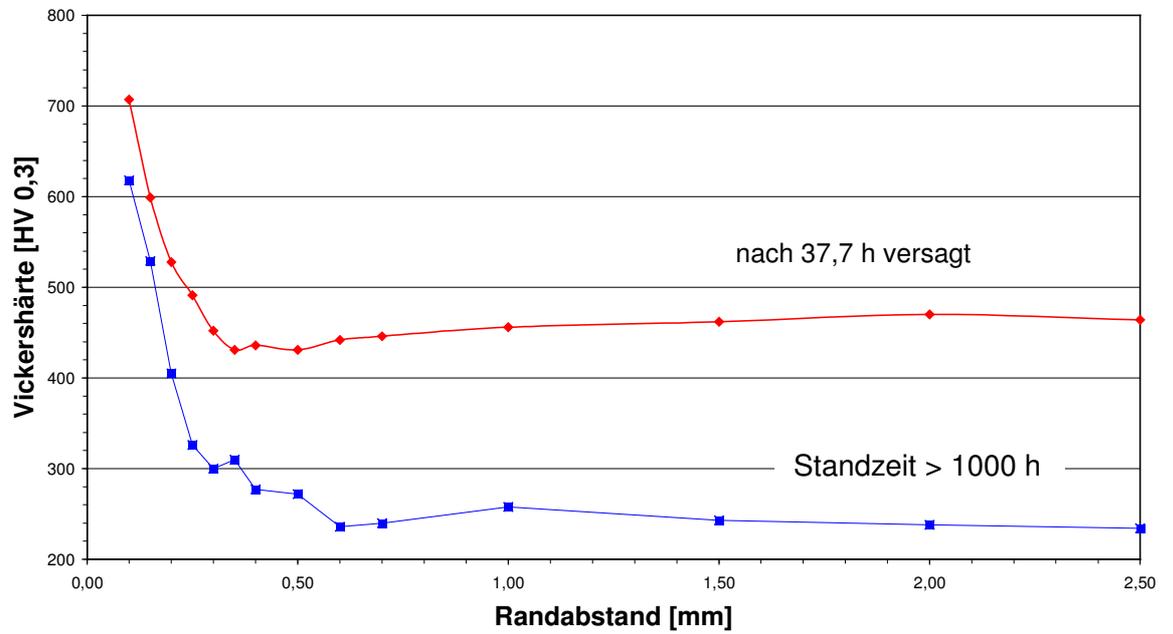


Abb. 32:

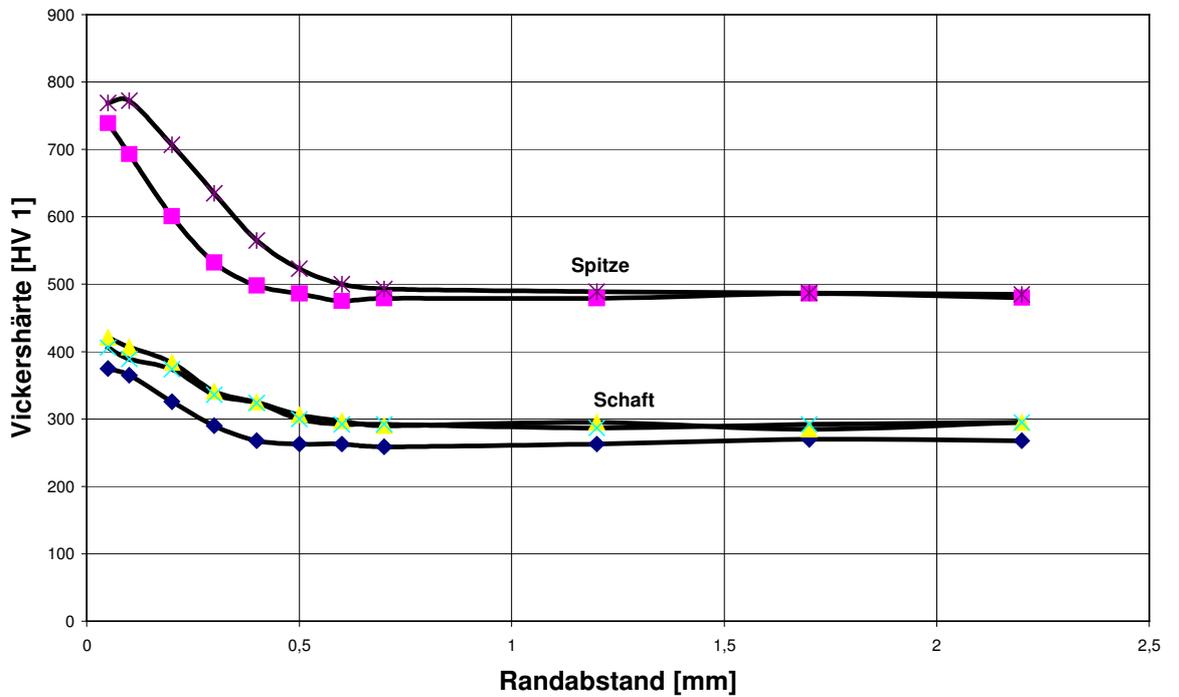


Abb. 33: Härteverlauf über den Querschnitt (Schrauben eines Herstellers)

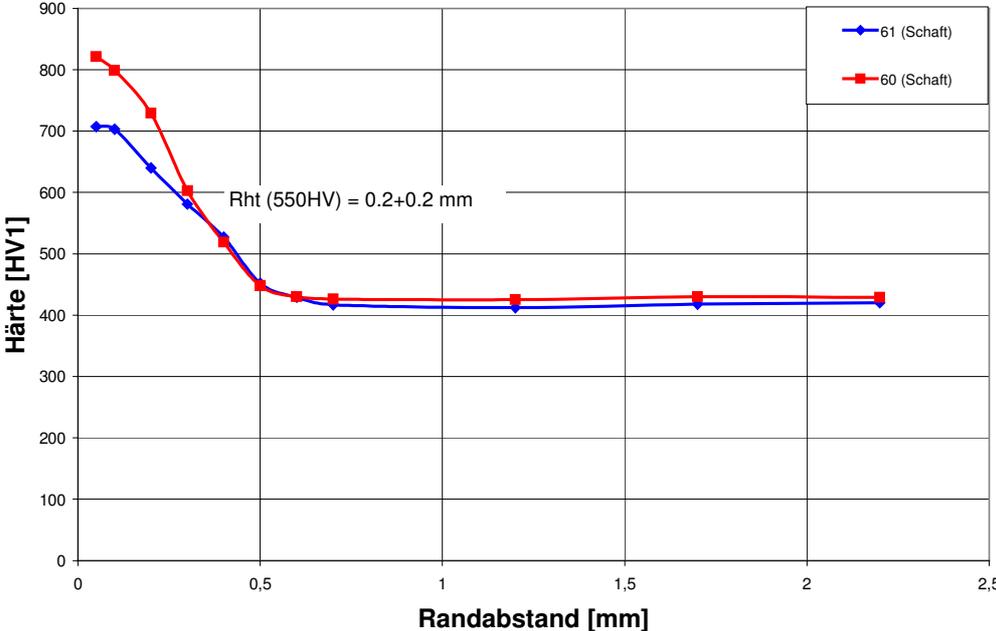


Abb. 34: Härteverlauf über den Querschnitt (Schrauben eines Herstellers)

Ergebnisse der Versuche an Betonschrauben nach CUAP und in Beton

Firma	Typ	Nenndurchmesser mm	Prüflast kN	Anzahl der Versuche	Standzeit in Stunden				Bemerkungen
					Versuche nach CUAP	Versuche in Beton		Versuche in Beton + Rhodanid	
						Potential – 1000 mV	Potential – 1200 mV		
A	7,5 x 80	7,5	11,50	3	-	-	2,1 / 3,5 / 3,5	-	
	10,5 x 100	10,5	17,00	4	19,6 / 3 x > 100	-	-	-	
			26,95	6	1,7 / 4,6 / 1,1 / 1,0 / 1,7	11,7	-	-	
			16,00	8	-	-	-	95,9 / 7 x > 100	
			22,70	7	1,0 / 1,3	1 x > 1000	4 x > 240	-	
	12,5 x 90	12,5	23,00	8	17,1 / 2 x > 100 / 78,8	-	-	4 x > 100	
			37,87	5	0,5 / 1,3 / 3,8 / 1,3 / 1,6	-	-	-	
	12,5 x 120	12,5	28,40	7	3 x > 100	2 x > 1000	2 x > 240	-	
B	7,5 x 80	7,5	13,95	5	28,2 / 4 x > 100	-	-	-	
	10 x 140	10,0	19,00	8	5 x > 100	-	-	3 x > 100	
	12 x 160	12,0	28,00	6	5 x > 100	-	-	1 x > 100	
	14 x 150	14,0	46,50	6	7,1 / 51,0 / 1,7 / 3 x > 100	-	-	-	
	16 x 150	16,0	62,00	3	3 x > 100	-	-	-	
C	10 x 125	10,0	28,00	6	72,1 / 5 x > 100	-	-	-	
	14 x 165	14,0	74,00	4	4 x > 100	-	-	-	
	16 x 220	16,0	79,70	1	> 100	-	-	-	
	8 x 120	8,0	22,70	8	3 x 0,3	4,2 / 4,1 / 8,4	5,9 / 5-17	-	
			15,00	1	-	-	> 240	-	
			7,50	1	-	-	> 240	-	
			24,80	2	-	-	-	1,0 / 1,5	
	10 x 140	10,0	28,40	5	0,3	3,6	5 / 28-40 / > 240	-	
18,70			1	-	-	> 240	-		
D	-	10,0	42,00	3	0,4 / 0,6 / 4,7	-	-	-	
			28,00	1	17,2	-	-	-	
			22,70	8	3,6 / 2,2	20,0 / 229,0 / 37,7	4-18	3,6 / 2,2	
			13,30	1	-	-	> 240	-	
	-	6,5	5,60	1	-	-	> 240	-	
	-	12,0	53,60	1	2,7	-	-	-	
			34,00	5	10,7 / 8,2 / 10,8	2 x > 1000	-	-	
	-	16,0	68,80	3	5,8 / 1,0 / 1,2	-	-	-	
	-	12,7	28,40	2	-	2 x > 1000	-	-	
	E	-	7,5	14,40	4	0,2 / 3,0	14,1 / 11,7	-	-
-		10,0	20,00	2	33,2	-	1 x > 1000	-	
			18,70	2	1 x > 100	350	-	-	
-		12,0	33,00	3	1 x > 100	350	1 x > 1000	-	
	36,2		2	2 x > 100	-	-	-		

A = Hilti, B = Heco, C = Toge, D = Powers, E = Würth