

Prof. Dr.-Ing. habil. **Ulf Nürnberger** Stirnenweg 7, 70378 Stuttgart
Universität Stuttgart Tel. [REDACTED]
Lehrgebiet: Korrosionsschutz im Bauwesen Fax. [REDACTED]

5.1.2.e

Gutachten

Korrosionsvergleich von DSI-Stäben mit Stäben aus Baustahl S 355JO

Auftraggeber: DYWIDAG-Systems
International GmbH
P.O. Box 1554
D-85705 Unterschleissheim

Datum der Auftragserteilung: 6. März 2006

Datum des Berichts: 27.3.2006

Textseiten: 15

Sachverständiger für „Korrosionsschutz im Bauwesen“ - DIBt (SVA Spannstähle, SVA Metallbau-Werkstoffe, Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR (Fachbeirat, AK Korrosion im Bauwesen), fib (Commission on Reinforcing Materials and Systems), EFC (WP Corrosion of Steel in Concrete), IHK Stuttgart (öffentl. bestellt und vereidigt), Sachverständiger für Korrosionsschäden bei Bauwerken).

1. Sachverhalt

Mit Schreiben vom 6.3.2006 bittet mich die Firma Dywidag-Systems International (DSI) in Unterschleissheim bei Münschen um eine gutachterliche Stellungnahme zum Korrosionsverhalten ihrer Gewindestäbe

- GEWI, Durchmesser 12 bis 50 mm (BSt 500/550)
- GEWI, Durchmesser 63,5 mm (S 555/700)
- GEWI-Plus (S670/800)

im Vergleich zu einem Baustahl S355JO.

Die Firma DSI möchte mit den genannten Gewindestäben Spundwände, z. B. im Hafenbau (Flusswasser, Meerwasser), zusammenspannen. Hierfür werden derzeit sehr häufig Rundstäbe mit nachträglich aufgerolltem Gewinde aus dem Baustahl S355JO angeboten und in Ausschreibungstexten ausgeschrieben. Wegen der ungeklärten Vergleichbarkeit des Korrosionsverhaltens der Stäbe der Typen GEWI und GEWI-Plus mit dem Baustahl S355JO bittet die Firma DSI um eine Begutachtung des Sachverhalts. Insbesondere soll geklärt werden, ob die Gewindestäbe der Firma DSI aus ingenieurmäßiger Sicht korrosionstechnisch mit dem Verhalten eines Baustahls aus dem Werkstoff S355JO vergleichbar sind.

2. Beschreibung der Produkte

Baustahl S355JO

Stahl der Sorte S355JO ist ein allgemeiner Baustahl. Mit dem Begriff allgemeiner Baustahl werden unlegierte Stähle bezeichnet, welche in der DIN EN 10025 „Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen“ genormt sind. Es handelt sich um Werkstoffe, die besonders in der Bautechnik in vielfältigen Formen, Ausführungsarten und Dimensionen als Stäbe, Profile, Rohre und Blech benötigt werden. Die allgemeinen Baustähle sind relativ billige Stähle, die im Wesentlichen durch ihre Festigkeit (Streckgrenze) gekennzeichnet werden. Sie kommen zumeist als warmgewalztes Halbzeug in den Handel.

Der Stahl S355JO ist ein Werkstoff mit einer Mindeststreckgrenze von 335 bis 355 N/mm² (bis zu Dicken von 63 mm) und einer Zugfestigkeit von 470 bis 630 N/mm². Die

Bezeichnung JO verweist auf die Gütegruppe. Der Stahl wurde unter der Bezeichnung St 52-3 U (in der ehemals gültigen DIN 17100) als Prototyp der höherfesten schweißgeeigneten Feinkornbaustähle entwickelt. Er weist einen Kohlenstoffgehalt von nur 0,2 M.-% auf und besitzt daher auch gute Schweißeigenschaften und eine ausreichende Zähigkeit. Seine hohe Streckgrenze erhält er durch seinen erhöhten Mangangehalt sowie durch das feine Gefüge. Letzteres wird durch einen geringen Aluminiumzusatz und eine geregelte Temperaturführung beim Walzen erzielt. Der Stahl S355 wird für hoch belastete Bauteile verwendet. Er verfügt über die allen unlegierten und niedriglegierten Stählen anhaftende Empfindlichkeit gegenüber jeglicher Art von abtragender Korrosion, weshalb im Hinblick auf eine hohe Dauerhaftigkeit üblicherweise ein besonderer Korrosionsschutz erforderlich ist.

Die Analyse des Baustahls S355JO wird nach DIN EN 10025-2 (2004) wie folgt angegeben (in M.-%):

Kohlenstoff	C	max. 0,20
Silicium	Si	max. 0,55
Mangan	Mn	max. 1,60
Phosphor	P	max. 0,030
Schwefel	S	max. 0,030
Stickstoff	N	max. 0,012
Kupfer	Cu	max. 0,55

GEWI-Plus (670/800)

Der Stahl GEWI-Plus (S670/800) wurde von DSI für geotechnische Anwendungen entwickelt. Es handelt sich um einen warmgewalzten und aus der Walzhitze wärmebehandelter Stahl mit aufgewalzten Gewinderippen. Die Nennstreckgrenze beträgt 670 N/mm², die Nennfestigkeit 800 N/mm² und die Nenndurchmesser 18,0 bis 63,5 mm. Die geforderte Gleichmaßdehnung beträgt 5 %. Dieser Stabstahl besitzt folgende charakteristische chemische Zusammensetzung (in M.-%):

Kohlstoff	C	0,15 - 0,30
Silicium	Si	0,30 - 0,80
Mangan	Mn	1,30 - 1,60
Phosphor	P	max. 0,035
Schwefel	S	max. 0,035
Kupfer	Cu	max. 0,50
Vanadium	V	0,07 - 0,30

Die Herstellung des Stahles erfolgt nach dem Tempcore - Verfahren [1, 2]. Hierbei erhält der Stab nach dem Aufwalzen der Gewinderippen seine erhöhte Endfestigkeit durch eine spezielle Wärmebehandlung, welche die Eigenwärme des Walzgutes nutzt. Der auf etwa 1000° C erwärmte Stahl durchläuft nach dem letzten Walzgerüst für wenige Sekunden eine Wasserkühlstrecke, in welcher eine Abkühlung des Walzgutes (Stäbe) erfolgt. Dabei kommt es in den randnahen Schichten zunächst zu einer Härtung infolge Martensitbildung. Der Kern des Stabes verbleibt auf einer höheren Temperatur und aufgrund des instationären Temperaturfeldes wird die martensitische Randzone bei etwa 550 bis 600° C angelassen. Nach der anschließenden weiteren Abkühlung an ruhender Luft ergibt sich überwiegend Bainit im Kern, ein Mischgefüge in der Übergangszone und feinkörniger hoch angelassener Martensit im Randbereich.

Das Endprodukt weist demzufolge gefügebedingt über den Querschnitt gesehen unterschiedliche Festigkeiten auf und zwar

- in der Randzone hohe Werte,
- daran schließt sich eine Übergangszone an, in der die Festigkeit stetig bis zu den niedrigeren Werten im Kern abfällt.

Die insgesamt gegenüber Betonstahl erhöhte Festigkeit und Streckgrenze wird durch Anhebung / Zusatz von Legierungselementen, insbesondere Kohlenstoff, Mangan und Vanadium erreicht. Der Zusatz von Vanadium dient einer Ausscheidungshärtung; dadurch werden die Zugfestigkeit und vor allem die Streckgrenze angehoben.

In [1, 2] wurden Zugversuche an abgedrehten Proben von 16 mm Durchmesser durchgeführt. Der Festigkeitswert des Gesamtstabes ist demnach ein „Mischwert“ der einzelnen Gefügezonen. Relativ zu den tatsächlichen Festigkeitswerten mit Zugfestigkeiten um 830 N/mm² und Streckgrenzen um 720 N/mm² ist die Verformbarkeit der Stäbe im Zug- und Biegeversuch außergewöhnlich gut. Die Bruchdehnungen liegen um 10% und die Gleichmaßdehnungen über 6% [3].

In [4] wird die Verteilung der Härte (HV 1) über den Querschnitt des Tempcore - Stahls aufgezeigt. Diese beträgt etwa 330 am Rand und um 230 im Kern; der Härteübergang erfolgt allmählich. Die Festigkeitszunahme zum Rand entspricht einer nur gering ausgeprägten Aufhärtung.

GEWI BSt 500S (BSt 500/550)

Der GEWI-Stahl bis 50 mm Durchmesser ist ein gewöhnlicher Betonstahl BSt 500S mit Gewinderippen nach DIN 488 Betonstahl (1986). Es handelt sich um einen warmgewalzten und aus der Walzhitze wärmebehandelter Stahl mit aufgewalzten Gewinderippen. Die Nennstreckgrenze beträgt 500 N/mm², die Nennfestigkeit 550 N/mm². Die geforderte Gleichmaßdehnung beträgt 6 %. Dieser Stabstahl besitzt folgende charakteristische chemische Zusammensetzung (in M.-%):

Kohlstoff	C	max. 0,22
Phosphor	P	max. 0,050
Schwefel	S	max. 0,050
Stickstoff	N	max. 0,012

Der GEWI-Stahl wird wie der GEWI-Plus (siehe oben) nach dem Tempcore-Verfahren hergestellt. Nach dem Warmwalzen wird der Stahl aus der Walzhitze vergütet: Nach dem Aufwalzen der Gewinderippen läuft der Stahl, er hat noch eine Temperatur von etwa 1000° C, durch eine Wasserkühlstrecke. Dadurch wird der Randbereich des Stahls gehärtet und anschließend auf dem Kühlbett durch die Kernwärme angelassen. Legierungsbedingt ist die Festigkeit bzw. Härte über den Querschnitt deutlich niedriger als beim GEWI-Plus (670/800).

GEWI (S555/700)

Der Stahl GEWI (S555/700), Durchmesser 63,5 mm, wurde von DSI für Verpresspfähle und Bodenvernagelungen entwickelt. Es handelt sich um einen warmgewalzten und aus der Walzhitze wärmebehandelten Stahl mit aufgewalzten Gewinderippen. Die Nennstreckgrenze beträgt 555 N/mm² und die Nennfestigkeit 700 N/mm². Die geforderte Gleichmaßdehnung beträgt 5 %. Für diese mikrolegierten Stabstahl sind 16 chemische Elemente festgelegt (in M.-%):

Kohlstoff	C	0,20 - 0,25
Silicium	Si	0,20 - 0,45
Mangan	Mn	1,30 - 1,50
Phosphor	P	max. 0,035
Schwefel	S	max. 0,035
Stickstoff	N	max. 0,016
Chrom	Cr	max. 0,30
Kupfer	Cu	max. 0,50
Molybdän	Mo	max. 0,05
Nickel	Ni	max. 0,20

Zinn	Sn	max. 0,04
Aluminium	Al	0,005-0,020
Vanadium	V	0,07 - 0,30
Niob	Nb	max. 0,06
Titan	Ti	Spuren
Arsen	As	max. 0,025

Der GEWI (S555/700) wird wie der GEWI-Plus (siehe oben) nach dem Tempcore-Verfahren hergestellt. Nach dem Warmwalzen wird der Stahl aus der Walzhitze vergütet: Nach dem Aufwalzen der Gewinderippen läuft der Stahl, er hat noch eine Temperatur von etwa 1000° C, durch eine Wasserkühlstrecke. Dadurch wird der Randbereich des Stahls gehärtet und anschließend auf dem Kühlbett durch die Kernwärme angelassen. Legierungsbedingte Festigkeit bzw. Härte über den Querschnitt eher niedriger als beim GEWI-Plus (670/800).

3. Korrosionsverhalten

Im Zusammenhang mit der Frage einer vergleichbaren Anwendung der DSI-Stähle und des Baustahls S355JO für das Zusammenspannen von Spundwänden stellte sich die Frage nach der grundsätzlichen Korrosionsempfindlichkeit dieser Stahlgüten gegenüber abtragender Korrosion und Spannungsrisskorrosion (SpRK) (anodische und wasserstoffinduzierte SpRK). Insbesondere gilt es zu beantworten, ob im Vergleich zu dem Baustahl S355JO bei den DSI-Stählen GEWI-Plus (670/800), GEWI BSt 500S und GEWI (S555/700) eine besondere Empfindlichkeit gegenüber den vorgenannten Korrosionsarten vorliegt.

3.1 Verhalten gegenüber Spannungsrisskorrosion

Bei den herkömmlichen Bau- und Betonstählen sind mit Ausnahme der kohlenstoffarmen Stähle keine Schäden durch Spannungsrisskorrosion irgendeiner Art bekannt geworden [5 bis 7].

Baustähle S355JO weisen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und der Gefügeausbildung (ferritisch-perlitisch, feinkörnig) sowie der sich durch das Warmwalzen einstellenden mechanischen Kennwerte keine Anfälligkeit gegenüber jeglicher Form

von Spannungsrisskorrosion auf [5]. Sie verfügen über die allen unlegierten und niedriglegierten Stählen anhaftende Empfindlichkeit gegenüber jeglicher Art von abtragender Korrosion, weshalb im Hinblick auf eine hohe Dauerhaftigkeit ein besonderer Korrosionsschutz erforderlich ist.

Im Bauwesen existieren jedoch umfangreiche Schäden infolge Spannungsrisskorrosion an solchen unlegierten und vor allem niedriglegierten Bewehrungsstählen (Spannstähle), die ihre Endfestigkeit durch eine Wärmebehandlung erhalten haben, so z. B. an vergüteten Spannstählen (Drähte) eines sog. alten Typs und an warmgewalzten Stäben mit bainitschem Gefüge [5, 8, 9, 10]. Im ersteren Fall handelt es sich um einen vergüteten Draht mit etwa 0,7 M.-% C, 1,1 M.-% Si und 0,9 M.-% Mn. Im zweiten Fall enthielt der Stab etwa 0,3 M.-% C, 1,5 M.-% Si, 0,7 M.-% Mn und 2,5 M.-% Cr. Die Nennfestigkeit der Stähle betrug 1470 bzw. 1320 N/mm² und eine besonders hohe Anfälligkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion wurde bei deutlichen Überfestigkeiten festgestellt (> 1700 bzw. >1500 N/mm²).

Da es sich bei Tempcore - Stählen ebenfalls um wärmebehandelte Stähle handelt, wurde der Frage der Korrosionsempfindlichkeit wiederholt nachgegangen. Es wurden Prüfungen vorgenommen, die speziell auf die sog. anodische Spannungsrisskorrosion ansprechen und solche, die im Hinblick auf wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion testen. Zum Verständnis dieser Problematik und zum Zwecke einer diesbezüglichen Beurteilung der Tempcore - Stähle sei kurz auf die Grundlagen dieser Korrosionsarten und insbesondere auf die Einflussgrößen eingegangen.

3.1.1 Anodische Spannungsrisskorrosion [5]

Bei der anodischen Spannungsrisskorrosion (A-SpRk) handelt es sich um eine unter dem Einfluss von Zugspannungen und kritischen Agenzien auftretende, über Rissbildung und allmähliche Rissausbreitung verlaufende Zerstörung mit plötzlich auftretender Sprödbuchbildung. Die Rissausbreitung erfolgt über eine örtlich beschleunigte, durch die Wirkung sog. Lokalelemente gesteuerte elektrolytische Metallauflösung an der Risspitze in Kombination mit Zugspannungen. Die für Stähle typische A-SpRK kann im Betonbau bei diesbezüglich empfindlichen Stählen bei Einwirkung nitrathaltiger wässriger Elektrolyte auftreten. Sie erfolgt hier stets interkristallin (entlang der Kornflächen

verlaufend) und ist vor allem an kritische Zementitausscheidungen (Fe_3C) auf den Kornflächen gebunden. Letztere können nur bei sehr weichen Stählen mit sehr geringem Kohlenstoffgehalt ($< 0,1 \text{ M.-%}$) auftreten, die noch vor wenigen Jahrzehnten auch als naturharte und kaltumgeformte Betonstähle zur Anwendung kamen. Aufgrund der Untersuchungen von Schadensfällen (eingestürzte Viehstaldecken) und von Laboruntersuchungen [5, 6, 9, 11] konnten Stickstoff- und Phosphor-angereicherte Stähle mit Kohlenstoffgehalten um $0,05 \text{ M.-%}$ und solche mit Kohlenstoffgehalten bis $0,2 \text{ M.-%}$ und vorhandenen randentkohlten Zonen als besonders empfindlich eingestuft werden. Ein Ausscheidungsglühen (Wärmebehandlung um 600° C) konnte eine vorhandene Empfindlichkeit reduzieren, da hierbei kritische Zementitausscheidungen beseitigt werden.

Die zur Auslösung von A-SpRK kritischen Nitrate entstehen in Stallungen aus der Cyansäure des Harnstoffes, die in der Jauche zu Ammoniak und Kohlendioxid zerfällt. Bakterien oxidieren den flüchtigen Salmiakgeist oder seine organischen Verbindungen unter Verbrauch von Sauerstoff zu dem sich an Mauern und Decken ablagernden Mauersalpeter [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]. Ebenso ergeben sich größere Mengen von Nitraten an Betonoberflächen bei der Düngemittellagerung. Vergleichbar den Verhältnissen bei der Chlorideindringung von z. B. Tausalzen dringen die Nitrate nur in gelöster Form über das Porensystem in einen Zementstein ein. Auch nitrose Gase in der Umgebung eines Betonbauteils können zu erhöhten Nitratgehalten in dessen Innern führen.

Eine Gefährdung durch A-SpRK ist auch bei empfindlichen Betonstählen nur dann zu erwarten, wenn neben ausreichend hohen Nitratgehalten im Elektrolyten ($> 1 \text{ M.-% NO}_3^-$) der Zementstein carbonatisiert ist: pH - Werte $> 9,5$ bewirken gegenüber solchen von rd. $5,5$ bis $9,5$ eine um etwa den Faktor 4 erhöhte Beständigkeit. Der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt hochalkalischer Betone verändert offenbar das spezifische Passivierungsvermögen der Nitratlösungen, welches für das Auftreten von A-SpRK entscheidend ist.

Im Hinblick auf die Anfälligkeit von Bewehrungsstählen gegenüber anodischer Spannungsrißkorrosion A-SpRK wird der Stahl meistens unter Zugspannung (z.B. $0,8 R_m$) in einer erwärmten (z.B. Siedetemperatur) hochkonzentrierten (z.B. 30 %igen) Calciumnitratlösung $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ im Zeitstandversuch geprüft [5]. Anderweitige vergütete Stähle mit einer dem Tempcore-Stahl annähernd vergleichbaren chemischen Zusammensetzung und Festigkeit zeigten in derartigen Prüflösungen eine hohe Beständigkeit, wenn - wie

im Fall der Tempcore-Stähle - der Martensit vollständig angelassen wurde [6]. Bei Vorliegen eines feinen Anlassgefüges besitzen selbst hochfeste Stähle mit Festigkeiten deutlich über 100 N/mm^2 noch eine recht hohe Beständigkeit [12].

Bei Tempcore-Stählen wurden bei Prüfung in siedender Nitratlösung stets Standzeiten > 200 Stunden und auch noch deutlich höher erzielt [2, 3], was im Sinne einer sehr hohen Beständigkeit zu werten ist. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass keine erhöhte Empfindlichkeit bezüglich anodischer Spannungsrisskorrosion gegenüber warmgewalzten Baustählen der Güte S355JO vorliegt.

3.1.2 Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion [5, 13, 14, 15]

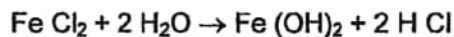
Eine wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion H-SpRk tritt praktisch nur bei hochfesten Stählen mit Festigkeiten $> 1200 \text{ N/mm}^2$ auf (siehe unten). Es ist erforderlich, dass während eines Korrosionsprozesses an der Stahloberfläche Wasserstoff freigesetzt und vom Stahl absorbiert werden kann. Hierzu muss mindestens ein geringer Korrosionsangriff (als Medium reichen z.B. Wasser oder Kondensat aus) an der Stahloberfläche stattfinden und es muss ein hochfester Stahl betroffen sein, welcher bei den vorherrschenden Zugspannungen gegenüber dem Einfluss von im Stahl gelösten Wasserstoff empfindlich reagiert. Bei einem diesbezüglich wasserstoffempfindlichen Stahl würden sich lokal im Stahlinnern, vor allem aber im Kerbgrund vorhandener äußerer Kerben, Anrisse bilden, die bis zum plötzlichen Bruch der Stähle weiterwachsen.

Im Betonbau sind solche Erscheinungen bei Spannstählen bekannt. Spannstahlbrüche infolge H-SpRK können beim Spannbeton mit nachträglichem Verbund im noch nicht mit Zementstein umhüllten Zustand, also noch vor dem Verpressen der Spannglieder, oder während der späteren Nutzung der Spannbetonkonstruktion auftreten. Auch bei Spannbeton mit sofortigem Verbund sind korrosionsbedingte Spannstahlbrüche während der Verarbeitung im Spannbett oder zu einem späteren Zeitpunkt möglich. Ursache eines späteren Versagens ist stets ein Verlust des alkalischen Schutzes durch den Beton bzw. Zementstein und / oder eine Depassivierung durch Chloridangriff.

Eine Wasserstoffabscheidung an der Spannstahloberfläche findet insbesondere in sauren Elektrolyten statt und in Gegenwart sog. Promotoren wie Sulfid, Selen oder Thiocy-

anat, welche eine Rekombination des bei der kathodischen Teilreaktion entstehenden schädlichen atomaren Wasserstoffs H zu unschädlichem molekularem H₂ behindern. Solche Promotoren können in einer normalen baupraktischen Umgebung in Spuren immer auftreten.

Für das Verhalten hochfester Stähle in der Baupraxis ist vor allem die über Lochkorrosion verlaufende Rissbildung von Bedeutung. Dabei entstehen Anrisse in Korrosionsnarben, da in diesen Bereichen eine Ansäuerung von Elektrolyten durch sog. Hydrolyse, z. B.



möglich ist. Deshalb sind bei hochfesten Stählen solche Korrosionsangriffe möglichst zu vermeiden, die zu lokaler Korrosion führen. Dies sind langzeitige Angriffe von Kondenswasser und von insbesondere Sulfat- und chloridhaltigen Elektrolyten.

Die Festigkeit bzw. Härte der Stähle ist eine wesentliche Einflussgröße auf die Empfindlichkeit gegenüber H-SpRK. In einer Härtegruppe bis etwa HV 350, entsprechend einer Streckgrenze von etwa 1000 N/mm² und einer Zugfestigkeit von etwa 1200 N/mm² ist H-SpRK nur in Medien mit Promotoren technisch interessant. Jedoch sollten zur Auslösung von Wasserstoff - Rissen selbst in promoterhaltigen Lösungen die Streckgrenzen etwa 800 N/mm² übersteigen. Erst bei Stählen oder Gefügebestandteilen mit Härten über HV 350 nimmt die Beständigkeit bei weiter ansteigender Härte so stark ab, dass eine hohe potentielle Wasserstoffgefährdung gegeben ist. In [16] wird für kaltumgeformte und vergütete Stähle mit unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten festgestellt, dass die Beständigkeit gegenüber Wasserstoff im Verhältnis der steigenden Härten wie folgt abnimmt:

$$\text{HV 250} : \text{HV 350} : \text{HV 450} : \text{HV 550} = 1265 : 60 : 6 : 1$$

Bei Untersuchungen in [17] an niedriglegierten vergüteten Stählen für hochfeste vorge-spannte Schrauben wurde erkannt, dass die kritische Zugfestigkeit bei deren Überschreitung H-SpRK auftreten kann, auch bei sehr unterschiedlichen Analysen, Arten der Vergütung und Oberflächenzuständen (glatt, gekerbt) stets weit oberhalb 1000 N/mm² liegt. Auch vergütete Spannstähle mit nicht zu hohem Kohlenstoffgehalt (<0,5 M.-%) und Zusätzen von Chrom (etwa 0,5 M.-%) sind gegenüber Wasserstoffeinfluss nicht besonders empfindlich [9, 13].

Die Empfindlichkeit der Stähle gegenüber H-SpRK ist auch vom Gefüge und damit von der chemischen Zusammensetzung und Wärmebehandlung abhängig. Sie nimmt in der Reihenfolge austenitisch - perlitisch - ferritisch - bainitisch - martensitisch zu, und grobkörnige Stähle sind empfindlicher als feinkörnige [1]. Bei unlegierten Stählen bis etwa 800 N/mm² Festigkeit hat das Gefüge allerdings keinen nennenswerten Einfluss auf die H-SpRK.

Im Hinblick auf eine Anfälligkeit von Bewehrungsstählen (insbesondere von Spannstählen), aber auch hochfesten Befestigungselementen, gegenüber wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion werden Zugstäbe oder Bauteile wie beispielsweise Schrauben bei Belastungen von 0,8 R_m u. a. in auf 50° C erwärmten, 20 %igen NH₄SCN-Lösungen (sog. FIP-Versuch) im Zeitstandversuch geprüft [15]. Grundsätzlich gilt, dass nicht zu hochfeste Stähle bei dieser Prüfung innerhalb von mehr als 500 Stunden nicht brechen und somit eine sehr hohe Beständigkeit aufweisen.

Auch bei Tempcore-Stählen kam es trotz der vorhandenen härteren Randzone innerhalb dieser Versuchszeit nicht zu einem Versagen [1, 2, 5] und die im Zugversuch ermittelten Kennwerte wurden gegenüber einem neuwertigen Stahl selbst durch eine mehr als 500 stündige Wasserstoffbeladung nicht ungünstig verändert. Dies bestätigen auch die am Stahl GEWI-Plus (670/800) durchgeführte Versuche mit mehr als 1000 Stunden Standzeit [3]. Im übrigen verhalten sich auch die zugelassenen Spannstähle im Regelfall so, dass diese sehr strenge Prüfung (keine Spannstahlbrüche innerhalb kurzer Prüfzeiten) bestanden wird und hieraus kann eine ausreichend hohe Beständigkeit unter baupraktischen Bedingungen abgeleitet werden.

Es besteht somit für den Stahl GEWI-Plus (670/800) und erst recht für die niedrigfestesten Sorten GEWI BSt 500S und GEWI (S555/700) keine besondere Anfälligkeit gegenüber Wasserstoffeinfluss und insbesondere wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion.

3.2 Verhalten gegenüber abtragender Korrosion

Tempcore-Stahl GEWI BSt 500S ist ein unlegierter Stahl, die Sorten GEWI-Plus (S670/800) und GEWI (S555/700) sind wegen des Vanadium- bzw. Vanadin plus Chrom-Zusatzes niedriglegierte Stähle. Niedriglegierte Stähle weisen, wie auch der unlegierte Baustahl S355JO und alle sonstigen unlegierten Stähle, eine hohe Anfälligkeit gegenüber abtragender Korrosion auf, weshalb diese im Dauereinsatz korrosionsschutz geschützt werden müssen, es sei denn, man akzeptiert die Abrostraten.

Bei diesen unlegierten und niedriglegierten Stählen besteht auch kein aus ingenieurmäßiger Sicht bemerkenswerter Einfluss von Begleitelementen, Gefügebau und Herstellungsverfahren. Das Verhalten dieser Werkstoffe an der Atmosphäre, in Fluss- und Meereswasser wird nach den Ergebnissen zahlreicher Naturversuche weder durch Kaltverformung als auch Wärmebehandlung in zusätzlichem Maße ungünstig beeinflusst [18].

Die Legierungsgehalte der unlegierten und niedriglegierten Stähle üben nur einen geringen Einfluss auf das Korrosionsverhalten in wässrigen Medien aus. Am ehesten findet noch der Einfluss von Schwefel Beachtung. Es gilt generell die Regel, dass im Rahmen einer stets vorhandenen Basis - Empfindlichkeit die Korrosionsempfindlichkeit mit steigendem Gehalt an Schwefel eher noch zunimmt [19]. Schwefel im Stahl ist überwiegend als Mangansulfid gebunden, und solche nichtmetallischen Einflüsse können lokale Korrosionsangriffe begünstigen.

Das wichtigste Legierungselement dieser Werkstoffe ist der Kohlenstoffgehalt. Bei Korrosion in Wasser ist der Kohlenstoffgehalt praktisch jedoch ohne Einfluss, während in Meerwasser eine leicht erhöhte Auflösung bei zunehmendem Kohlenstoffgehalt zu finden ist [19].

Das Korrosionsverhalten der niedriglegierten Stähle in der Atmosphäre und in wässrigen Lösungen kann jedoch durch die Eigenschaften sich bildender Rostschichten beeinflusst werden. Diese Tatsache lässt sich zum Schutz der Stähle derart nutzen, dass man Bestandteile zusetzen kann, die die Rostschichten dichter machen und damit das Weiterrosten erschweren. Vor allem Kupfer und Phosphor, in noch stärkerem Maße Chrom, zeigen diese Eigenschaft der Bildung fest und dicht haftender Rostschichten [5, 19, 20], weshalb sog. wetterfeste Stähle erhöhte Gehalte dieser Legie-

rungselemente aufweisen. Hervorzuheben ist jedoch, dass gerade das Kupfer als wesentlicher Bestandteil der wetterfesten Stähle bei der Korrosion in Wässern und in Böden keinen so ausgeprägten die Beständigkeit steigernden Einfluss ausübt wie in der Atmosphäre.

Betrachtet man nunmehr die für DSI - Stähle geltende Analyse (Abschn. 2), so wirken die beim GEWI (BSt 500/550) gegenüber dem S355JO erhöhten Schwefelgehalte eher etwas korrosionssteigernd.

Beim GEWI-Plus (S670/800) sind keine entscheidenden Analysenunterschiede im Vergleich zum S355JO vorhanden. Also kann auch ein vergleichbares Korrosionsverhalten vorausgesetzt werden.

Beim GEWI (S555/700) kann aus dem Zusatz von Chrom in geringen Mengen im Vergleich zum Baustahl S355JO eher ein verbessertes Korrosionsverhalten abgeleitet werden.

Es wird allerdings bezweifelt, dass sich die durch leichte Verschiebungen des Legierungsgehaltes theoretisch abzuleitenden Veränderungen des Korrosionsverhaltens unter baupraktischen Bedingungen bemerkbar machen.

4. Abschließende Stellungnahme

Die DSI-Gewindestähle GEWI (BSt 500/550), GEWI (S555/700) und GEWI-Plus (S670/800) sind nach dem Tempcore-Verfahren hergestellte warmgewalzte und aus der Walzhitze wärmebehandelte unlegierte bzw. niedriglegierte Gewindestähle.

Die Stähle weisen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Gefügeausbildung im Vergleich zu warmgewalztem Baustahl S355JO keine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber anodischer, vorwiegend durch Nitrateinwirkung (Düngemittel) induzierte Spannungsrisskorrosion auf. Tempcore - Stähle der hier verwendeten Güte besitzen wegen ihrer zur Oberfläche auf max. 330 HV 1 ansteigende Härte (beim GEWI-Plus (S670/800)) auch keine besondere Empfindlichkeit gegenüber Wasserstoffeinfluss, vor

allem aber wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion. Bei vorübergehender Einwirkung von Flusswasser und Meerwasser ist daher kein rissartiges Versagen zu erwarten.

Die nach dem Tempcore-Verfahren hergestellten unlegierten (GEWI (BSt 500/550)) und niedriglegierten (Stähle GEWI (S555/ 700) und GEWI-Plus (S670/800)) verhalten sich bei Angriff sauerstoffhaltiger neutralsalzhaltiger wässriger Medien (Flusswasser, Meerwasser) empfindlich gegenüber abtragender Korrosion und unterscheiden sich somit nicht von anderweitigen unlegierten Stählen wie Baustähle der Sorte S355JO. Bei allen genannten Werkstoffen ist daher ein sorgfältiger Korrosionsschutz bei Einsatz als Daueranker erforderlich, es sei denn, man akzeptiert (bei einem nur vorübergehenden Einsatz) eine gewisse Abrostung.

Aus der gegenüber einem warmgewalzten Baustahl S355JO mit feinkörnigem, ferritisch-perlitischem Gefüge andersartigen Gefügeausbildung der Tempcore-Stähle (Wärmebehandlungsgefüge) lässt sich kein verändertes Korrosionsverhalten der von Dywidag angebotenen Gewindestäbe ableiten. Auch aus der gegenüber dem Baustahl S355JO geringfügig abweichenden bzw. modifizierten Analyse der DSI-Gewindestähle ist kein grundsätzlich anderes Korrosionsverhalten zu erwarten.

Literatur

- [1] G. Rehm:
Bericht Nr. 0554 über die generelle Eignung des nach dem Tempcore-Verfahren hergestellten Betonrippenstahls.
Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart 1976
- [2] G. Rehm, D. Rußwurm:
Beurteilung von Betonstählen hergestellt nach dem Tempcore-Verfahren.
Betonwerk + Fertigteil – Technik (1977) 6, 300 – 307
- [3] Untersuchungen des Stahlwerkes Annahütte, Hammerau, zur Spannungsrissskorrosion an Stählen der Güte S 670 nach DIN EN ISO 15630 – 3, 1999
- [4] Technische Information des Stahlwerkes Annahütte, Hammerau, an den Gutachter vom 12.7.2004
- [5] U. Nürnberger:
Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen.
Bauverlag Wiesbaden, 1995
- [6] U. Nürnberger:
Zur Frage des Spannungsrissskorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse.
Dissertation TU Braunschweig, 1972
- [7] U. Nürnberger:
Korrosionsbedingte Rissbildung von Betonstählen.
Berichtsband zum 75. Geburtstag von Prof. Dr. G. Rehm, 13.11.1999 München
- [8] B. Isecke, K. Menzel, J. Mietz, U. Nürnberger:
Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrissskorrosion.
Beton und Stahlbetonbau 90 (1995), 120 – 123
- [9] U. Nürnberger:
Influence of Material and Processing on Stress Corrosion Cracking of Prestressing Steel – Case Studies. State-of-art report prepared by Task Group of fib Commission 9. fib Publ. 2002
- [10] U. Nürnberger:
Schäden an Spannbetonbauwerken.
In: Schäden in Betonbauwerken, neuere Methoden einer Instandsetzung. Verband Deutscher Architekten und Ingenieure, 2002
- [11] G. Rehm, U. Nürnberger, N.V. Waubke:
Untersuchungen an Betonstählen aus Viehstaldecken im Hinblick auf Spannungsrissskorrosionserscheinungen.
Betonwerk + Fertigteiltechnik 39 (1973) 642 – 651
Kurzberichte aus Bauforschung Nr. 04/76-036, 207 – 212

- [12] G. Rehm, U. Nürnberger:
Spannungsrisskorrosion hochfester Spannstähle.
Cement (holländisch) XXIV (1972), 106 – 115
- [13] U. Nürnberger:
Mehr Sicherheit im Spannbetonbau; wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion an Spannbetonkonstruktionen mit vorbeugenden Maßnahmen vermeiden.
Maschinenmarkt 95 (1989) 30 – 34
- Chloridgehalt und Feuchte beachten; korrosionsfördernde Bedingungen bei Spannbetonkonstruktion vermeiden.
Maschinenmarkt 95 (1989) 68 – 72
- Korrosion behindern; Auswahlkriterien beachten für Rohstoffe und die Stahlsorte von Spannbetonbauten.
Maschinenmarkt 95 (1989) 128 – 134
- [14] J. Mietz, J. Fischer, B. Isecke:
Spannstahlschäden an einem Brückenbauwerk infolge von Spannungsrisskorrosion.
Beton- und Stahlbetonbau (1998) Heft 7, in Vorbereitung
- [15] B. Isecke:
Kritische Beurteilung neuer Spannstahlentwicklungen.
Forschungsbericht i.A. des Deutschen Betonvereins e.V., Berlin 1998
- [16] F.K. Naumann, W. Carius:
Bruchbildung an Stählen bei Einwirkung von Schwefelwasserstoff.
Archiv Eisenhüttenwesen 30 (1959), 233 – 238
- [17] F.W. Hirth, H. Speckhardt:
Beitrag zur Versprödung von Vergütungsstählen durch Wasserstoff.
Draht 29 (1978) 276 - 285 und 448 - 453
- [18] Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, 2. Auflage, 1937
- [19] G. Knörschild, E. Hargarter, M. Stratmann:
Korrosion von unlegierten und niedriglegierten Stählen, S. 851 – 921.
In: E. Kunze: Korrosion und Korrosionsschutz. Wiley-VCH, Berlin 2001
- [20] H.-J. Wiester, H. Ternes:
Der Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die atmosphärische Korrosion von unlegierten und niedriglegierten Stählen.
Stahl und Eisen 87 (1967), 746 - 749