



Merkblatt 866

Nichtrostender Betonstahl



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER) ist eine Gemeinschaftsorganisation von Unternehmen und Institutionen aus den Bereichen

- Edelstahlherstellung,
- Edelstahlhandel und Anarbeitung,
- Edelstahlverarbeitung,
- Oberflächenveredelung,
- Legierungsmittelindustrie,
- Marktforschung und Verlage für nichtrostende Stähle.

Die Aufgaben der ISER umfassen die firmenneutrale Information über Eigenschaften und Anwendungen von Edelstahl Rostfrei. Schwerpunkte der Aktivitäten sind

- praxisbezogene, zielgruppenorientierte Publikationen,
- Online-Informationsplattform unter www.edelstahl-rostfrei.de
- Pressearbeit für Fach- und Publikumsmedien,
- Messebeteiligungen,
- Durchführung von Schulungsveranstaltungen,
- Errichtung von Kompetenzzentren „Edelstahl-Rostfrei-Verarbeitung“,
- Informationen über Bezugsmöglichkeiten von Produkten aus Edelstahl Rostfrei,
- individuelle Bearbeitung technischer Anfragen.

Ein aktuelles Schriftenverzeichnis wird auf Anforderung gerne übersandt – oder ist einsehbar unter www.edelstahl-rostfrei.de/ Publikationen.

Inhalt

	Seite
1	1
2	3
2.1	3
2.2	4
2.2.1	4
2.2.2	5
2.2.3	6
2.3	7
3	8
3.1	8
3.2	9
3.3	13
4	13
4.1	13
4.2	14
4.3	15
5	16
5.1	16
5.2	17
5.3	17
6	19
6.1	19
6.2	20
7	21

Impressum

Merkblatt 866
Nichtrostender Betonstahl
1. Auflage 2011

Herausgeber:

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 10 22 05
40013 Düsseldorf
Telefon: 0211 / 67 07-8 35
Telefax: 0211 / 67 07-3 44
Internet: www.edelstahl-rostfrei.de
E-Mail: info@edelstahl-rostfrei.de

Autor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Ulf Nürnberg, Stuttgart

Bilder Umschlag, 9, 11 und 12:

Hagener Feinstahl GmbH, Hagen;
Ugitech GmbH, Renningen

Die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen vermitteln Orientierungshilfen. Gewährleistungsansprüche können hieraus nicht abgeleitet werden. Nachdrucke aus dieser Dokumentation bzw. Veröffentlichungen im Internet, auch auszugsweise, sind nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und mit deutlicher Quellenangabe gestattet.

1 Warum nicht-rostende Stähle im Betonbau?

Beim Stahlbeton gewährt der Beton der eingebetteten Bewehrung aus unlegiertem Stahl einen doppelten Korrosionsschutz [1]: Der hochalkalische Porenelektrolyt passiviert den Stahl und die Überdeckung aus Beton hält aufgrund ihrer weitgehenden Undurchlässigkeit für Gase und wässrige Lösungen die für die Korrosion notwendigen Angriffsmittel vom eingebetteten Betonstahl fern. Im Hinblick auf eine hohe Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen regelt die zuständige DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-1 [2] die betontechnologischen Maßnahmen zur Sicherung des Korrosionsschutzes. Wichtige Kriterien hierfür sind eine ausreichende Betongüte und -deckung, die Beschränkung der Rissbreite, der Entwurf betoniergerechter Bauteile (z.B. keine zu dichte Bewehrung) und ein korrosionsschutzgerechtes Gestalten (z.B. Möglichkeiten zur Abführung aufstehenden Wassers). Wenn diese Vorkehrungen eingehalten werden, sind im Regelfall keine Bewehrungsstahlkorrosion und hieraus resultierende Schäden zu erwarten.

Stahlbetonbauwerke sind nicht unbeschränkt dauerhaft und nicht frei von Unterhaltungsaufwand. In besonderen Fällen, vor allem wenn mit einer Carbonatisierung der Betondeckung oder mit dem Zutritt von Chloriden und somit mit Bewehrungsstahlkorrosion und Abplatzung der Betondeckung zu rechnen ist, ist es daher technisch und auch wirtschaftlich sinnvoll, zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen anzuwenden. Andernfalls müssten u.U. kostspielige Instandsetzungsmaßnahmen in Kauf genommen werden. Unter den folgenden Voraussetzungen ist die Anwendung zusätzlicher Korrosionsschutzmaßnahmen sinnvoll (Bild 1) [3, 4]:

- Es liegen extrem ungünstige, korrosionsfördernde Umgebungsverhältnisse vor (z.B. bei tausalzbeaufschlagten Parkdecks, Treppen und Stützwänden entlang befahrener Straßen).
- Aufgrund einer erforderlichen Wärmedämmung oder aus Gewichtsgründen werden bewehrte nichtge-

fügedichte Leichtbetone eingesetzt, deren poröse Gefügestruktur keinen dauerhaften Korrosionsschutz gewährleistet.

- Es sind Sonderkonstruktionen, wie Anschlussbewehrungen zwischen Ortbetonbauteilen und Fertigteilen oder wärmegeämmte Übergänge zwischen einem Baukörper und außen liegenden Anbauten (z.B. Balkone), zu erstellen. In diesen Fällen kann die Bewehrung Fugen kreuzen, wobei der alkalische Schutz an dieser Stelle entfällt. Oder es werden wärmegeämmte Sandwich-Elemente für Wände und Decken konstruiert. Hier muss für die im Wandinnern teilweise nicht im Beton eingebettete Bewehrung korrosionsschutzierter Stahl eingesetzt werden.
- Es wird bezüglich der Güte des Betons und der in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen notwendigen Betondeckung von anerkannten Regeln der Bauausführung bewusst oder unbewusst abgewichen (z.B. Herstellung sehr filigraner Bauteile).

Es existieren die unterschiedlichsten Ansätze, um im bewehrten Betonbau durch zusätzliche vorbeugende oder Instandsetzungsmaßnahmen eine Bewehrungsstahlkorrosion auszuschließen. Zu unterscheiden sind Maßnahmen beim Beton und beim Stahl und sonstige Maßnahmen [1, 5]:

Betongüte

Der wichtigste Korrosionsschutz für die Bewehrung ist der Beton. Zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen sollten nur dann in Erwägung gezogen werden, wenn alle Möglichkeiten, die sich von der Betontechnologie her bieten, ausgeschöpft sind. Besondere Faktoren, die in dieser Hinsicht zu beachten wären, sind ein geringer Wasser/Zement-Wert, ein ausreichend hoher Zementgehalt, der sorgfältige Umgang mit Betonzusatzmitteln, eine gute Verdichtung und sorgfältige Nachbehandlung, sowie eine auf die Korrosivität der Umgebung abgestimmte Betondeckung.

Inhibitoren

Dem Frischbeton zugegebene Inhibitoren sind im Regelfall Nitrite. Sie sollen beim Stahl auch in Anwesenheit

erhöhter Chloridgehalte die Passivität aufrecht erhalten. Da diese Stoffe dazu neigen durch Wasser aus dem Beton herausgelöst zu werden, schützen diese nur bei Wahl höherer Betongüten und Betondeckungen und im rissfreien Beton zuverlässig. In Deutschland kommen Inhibitoren kaum zur Anwendung.

Betonbeschichtungen

Betonbeschichtungen können je nach Art und Dicke den Eintritt gasförmiger Stoffe und wässriger Lösungen in den Beton bzw. verhindern. Sie schützen damit den Beton (z.B. vor Frostabplatzungen), den darin eingebetteten Stahl vor Korrosion (mittels sog. rissüberbrückender Beschichtungen auch im rissbehafteten Beton) und sie erleichtern die Pflege von Betonflächen (z.B. bei befahrenen Decks in Parkhäusern). Es ist jedoch von Nachteil, dass Betonbeschichtungen nur eine begrenzte Lebensdauer haben und gewartet werden müssen.

Feuerverzinkte Betonstähle

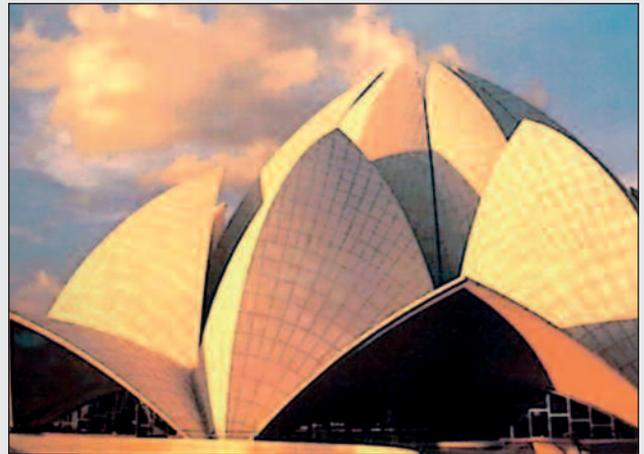
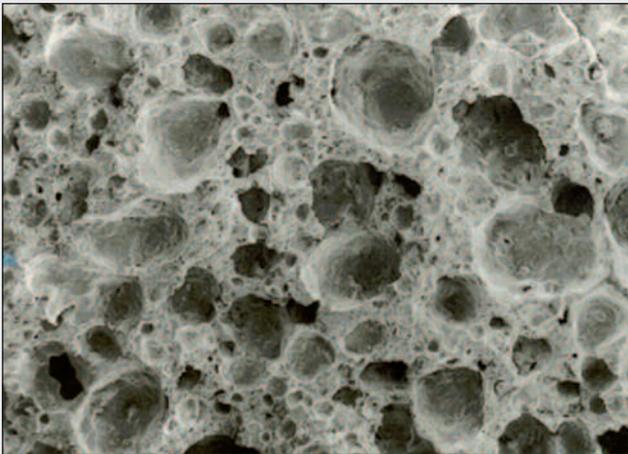
In alkalischem Beton sind Zinküberzüge wegen Bildung von Deckschichten aus Calciumhydroxozinkat beständig. In carbonatisiertem Beton entstehen auf Zinküberzügen basische Zinkcarbonate mit geringer Löslichkeit. Die Abtragsgeschwindigkeit ist dann erheblich geringer als bei unverzinktem Stahl und die Verzinkung ist auf Dauer korrosionssicher. In chloridhaltigem Beton sind verzinkte Stähle beständiger als unverzinkte, jedoch muss bei Chloridgehalten $> 1,5 \text{ M.-%}$ (bezogen auf Zement) mit einem raschen Zinkabtrag gerechnet werden. Wenn bestimmungsgemäß erhöhte Chloridgehalte anfallen (z.B. bei Parkdecks), dann weisen Zinküberzüge lediglich einen temporären Korrosionsschutz auf.

Epoxidharzüberzüge

Epoxidharzbeschichtungen zeichnen sich durch eine sehr gute Verträglichkeit mit alkalischem und carbonatisiertem Beton, einen hohen Diffusionswiderstand gegenüber Wasserdampf und Sauerstoff sowie Dichtigkeit gegenüber Chloriden aus und schützen bei vorhandener Haftung auf dem Stahluntergrund und ausreichender Dicke vor Bewehrungsstahlkorrosion. Aufgrund von negativen Erfahrungen mit epoxidharzbeschichteten Beton-

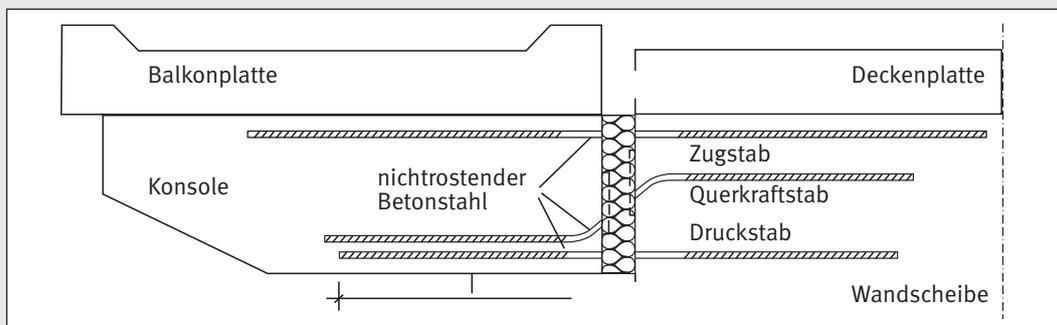


Hohe Korrosionsbeanspruchung: Die Bewehrung einer Stützwand bzw. Treppe korrodierte als Folge einer Tausalzbeanspruchung. Die Folge sind Stahlabtrag, Bildung voluminöser Korrosionsprodukte und Betonabspaltung. Die Anwendung zusätzlicher Korrosionsschutzmaßnahmen kann diese Schäden verhindern.



Bewehrter Leichtbeton: Im nicht gefügedichten Beton finden Schadstoffe, Wasser und Sauerstoff leicht Zugang zur Bewehrung. Deshalb muss diese immer zusätzlich korrosionsschutz geschützt werden.

Reduzierte Betondeckung: Sehr feingliedrige Bauwerke (z.B. Betonschalen) erfordern gelegentlich geringere Betondeckungen, die durch eine zusätzlich korrosionsschutzgeschützte Bewehrung ausgeglichen werden müssen.



Sonderbauweisen: Bei diesem wärmedämmenden Kragplattenanschluss wird durch die Verwendung austenitischer nichtrostender Betonstähle mit geringer Wärmeleitung eine effizientere thermische Trennung der außen liegenden Balkonplatte vom warmen Innenbereich erreicht und auch die Korrosionsbeständigkeit wird im Übergangsbereich sichergestellt.

Bild 1: Möglichkeiten einer Verwendung nichtrostender Stähle im Betonbau

stählen in chloridhaltiger Umgebung, die auch durch Beschichtungsmängel bedingt waren, bestehen jedoch Vorbehalte gegenüber einer Anwendung von epoxidharzbeschichteten Betonstählen. Häufig wird argumentiert, dass die Beschichtung wegen mangelnder Robustheit beim Transport, bei der Handhabung auf der Baustelle und beim Einbau beschädigt werden kann und der vollständige Korrosionsschutz deshalb nicht sichergestellt ist. Es gilt auch zu beachten, dass der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient von Epoxidharz erheblich größer ist als jener von Stahl, so dass bei Abkühlung Risse im Überzug zu befürchten sind. In Deutschland werden epoxidharzbeschichtete Betonstähle derzeit nicht angewendet.

Kathodischer Korrosionsschutz

Neben den herkömmlichen Instandsetzungsverfahren ist der kathodische Korrosionsschutz (KKS), welcher hauptsächlich dann eingesetzt wird, wenn eine Depassivierung des Bewehrungsstahls durch Chlorideinwirkung vorliegt, häufig ein sinnvolles Mittel zur Instandsetzung geschädigter Bauwerke. Grundsätzliches Ziel des kathodischen Korrosionsschutzes ist es, die Korrosionsrate aktiver Systeme soweit zu verringern, dass sie technisch vernachlässigbar wird und die Lebensdauer des Objektes in gewünschtem Maße verlängert wird. Gegen die Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes im Betonbau spricht der vielfach nicht akzeptierte Umstand, dass eine langjährige Wartung der Anlage erforderlich ist und dass dadurch Zusatzkosten entstehen.

Nichtrostende Betonstähle

Die Verwendung nichtrostender Betonstähle ist eine der zuverlässigsten Möglichkeiten eines zusätzlichen Korrosionsschutzes für die Bewehrung. Diese Bewehrungstähle sind im alkalischen und carbonatisierten Beton passiv. In Anwesenheit von Chloridsalzen neigen nicht ausreichend hoch legierte Edelstähle zu Lochkorrosion, am ehesten in Bereichen von Schweißungen. Dem kann durch Anheben der Gehalte an Chrom und Molybdän im Edelstahl zuverlässig begegnet werden. Bei geeigneter Legierungszusammensetzung sind nichtrostende Betonstähle deshalb auch unter extre-

men Korrosionsbeanspruchungen absolut sicher vor einem Angriff.

Ein Nachteil der nichtrostenden Stähle ist der vergleichsweise hohe Beschaffungspreis. Bei Verwendung nichtrostender Stähle fallen bei geeigneter Auswahl jedoch keine zusätzlichen Betriebskosten für Instandsetzung und Erneuerungsmaßnahmen während der gesamten Lebensdauer des Bauwerkes an. Letztendlich sind Konstruktionen, die unter Verwendung nichtrostender Betonstähle erstellt werden, kostengünstiger und zuverlässiger über lange Zeiträume. Zusammenfassende Darstellungen zum weltweiten Einsatz nichtrostender Bewehrungsstähle im Betonbau sind in [3-8] enthalten.

In der Folge wird schwerpunktmäßig über die Eigenschaften nichtrostender Betonstähle berichtet, die als Stabstahl, Betonstahlmatten oder bei Gitterträgern im Stahlbetonbau Anwendung finden. Die in Deutschland verwendeten nichtrostenden Betonstähle besitzen im Regelfall eine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin. In der Bautechnik können allerdings auch anderweitige Konstruktionsteile aus nichtrostendem Stahl in Beton eingebettet werden. Beispielhaft zu nennen sind Einlegeteile für Befestigungen im Betonbau wie Ankerschienen und Kopfbolzenverankerungen, anderweitige Verankerungen und Anschlussbewehrungen sowie Befestigungsmittel für Porenbetonwandplatten. Die Anwendung solcher Bauteile aus Edelstahl wird teilweise durch Bauteilzulassungen geregelt. So weit es zum generellen Verständnis des Verhaltens nichtrostender Stähle im Betonbau erforderlich ist, wird auch auf das korrosionstechnische Verhalten der gegenwärtig nicht als Betonstahl zugelassenen, aber dennoch im Kontakt mit Beton verwendeten Edelstähle eingegangen.

2 Allgemeine Gebrauchseigenschaften nichtrostender Betonstähle

2.1 Passivität

Als nichtrostende Stähle werden solche hochlegierten Stähle bezeichnet, bei denen, im Gegensatz zu den unlegierten und niedriglegierten Stählen, unter üblichen Umweltbedingungen (Luftsauerstoff, Feuchtigkeit) und in wässrigen, annähernd neutralen bis alkalischen Lösungen keine Flächenkorrosion und merkliche Rostbildung erfolgen. Deshalb erübrigt sich bei diesen Stählen ein zusätzlicher Korrosionsschutz. Voraussetzung für das genannte Verhalten ist ein Minimalgehalt des Stahls an bestimmten Legierungselementen und die Anwesenheit eines Oxidationsmittels (z.B. Sauerstoff) im umgebenden Medium. Hierdurch wird eine Passivierung der Oberfläche bewirkt. Bei Metallen beschreibt der Begriff „Passivität“ den Zustand einer starken Reaktionshemmung der anodischen Eisenauflösung nach Bildung von Passivschichten auf der Oberfläche. Solche Schutzschichten sind sehr dünne Oxidschichten. Vor allem Chrom ist ein zu Passivierung neigendes Element. Durch Legieren überträgt es diese Eigenschaft auf Eisen bzw. Stahl: Die aktive Korrosion (Flächenkorrosion) nimmt in korrosionsfördernden Medien mit steigendem Chromgehalt ab. Der Chromgehalt, bei dessen Überschreitung Passivität eintritt, hängt vom Angriffsmittel ab. In Wasser und in der Atmosphäre sollte der Chromgehalt mindestens 12 M.-% betragen.

Passive nichtrostende Stähle sind beständig gegenüber Flächenkorrosion, jedoch bei nicht ausreichendem Legierungsgehalt empfindlich gegenüber Lochkorrosion und Spannungsrisskorrosion in Gegenwart spezifischer Medien (z.B. Chloridionen). Die Anfälligkeit der nichtrostenden Stähle gegenüber den genannten Korrosionsarten ist wegen deren pH-Abhängigkeit in Zementmörtel und Beton jedoch geringer als bei atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung.

Werkstoff-Nr.	Kurzname	Gefüge	Hauptlegierungselemente in M.-%					
			C	Cr	Ni	Mo	N	Sonstige
1.4003 ¹⁾²⁾	X2CrNi 12	F kv	< 0,03	10,5 - 12,5	0,3 - 1,0	–	< 0,03	
1.4301 ¹⁾²⁾	X5CrNi 18-10	A kv	< 0,07	17,5 - 19,5	8,0 - 10,5	–	< 0,11	
1.4311 ²⁾	X2CrNiN 18-10	A	< 0,03	17,5 - 19,5	8,5 - 11,5	–	0,12 - 0,22	
1.4401 ²⁾	X5CrNiMo 17-12-2	A kv	< 0,07	16,5 - 18,5	10,0 - 13,0	2,0 - 2,5	< 0,11	
1.4571 ¹⁾²⁾	X6CrNiMoTi 17-12-2	A kv	< 0,08	16,5 - 18,5	10,0 - 13,5	2,0 - 2,5	–	Ti: 5xC bis 0,7
1.4406 ²⁾	X2CrNiMoN 17-11-2	A	< 0,03	16,5 - 18,5	10,0 - 12,5	2,0 - 2,5	0,12 - 0,22	
1.4436 ²⁾	X3CrNiMo 17-13-3	A kv	< 0,05	16,5 - 18,5	10,5 - 13,0	2,5 - 3,0	< 0,11	
1.4429 ¹⁾²⁾	X2CrNiMoN 17-13-3	A wgw	< 0,03	16,5 - 18,5	11,0 - 14,0	2,5 - 3,0	0,12 - 0,22	
1.4529 ¹⁾	X1NiCrMoCuN 25-20-7	A wgw	< 0,02	19,0 - 21,0	24,0 - 26,0	6,0 - 7,0	0,15 - 0,25	Cu: 0,5 - 1,5
1.4362 ¹⁾²⁾	X2CrNiN 23-4	F-A kv F-A wgw	< 0,03	22,0 - 24,0	3,5 - 5,5	0,10 - 0,60	0,05 - 0,20	
1.4462 ¹⁾²⁾	X2CrNiMoN 22-5-3	F-A kv F-A wgw	< 0,03	21,0 - 23,0	4,5 - 6,5	2,5 - 3,5	0,10 - 0,22	

F = ferritisch A = austenitisch FA = ferritisch-austenitisch (Duplex) kv = kaltumgeformt wgw = warmgewalzt

¹⁾ derzeit in Deutschland verwendet ²⁾ in einer vorläufigen Version der pr EN 10080 (Betonstahl) aufgelistet

Tab. 1: Hauptlegierungselemente der im Betonbau verwendeten nichtrostenden Stähle (Analyse gemäß DIN EN 10088-1 [9])

2.2 Nichtrostende Betonstahlsorten

Mit der Auswahl und dem Gehalt der Legierungselemente wird ein bestimmter Gefügestand erzeugt. Deshalb werden nichtrostende Stähle nach ihrem Gefügestand eingeteilt, nämlich in ferritische, austenitische, ferritisch-austenitische und martensitische Stähle. Martensitische nichtrostende Stähle haben für den Betonbau jedoch keine Bedeutung. Insofern werden sie hier nicht behandelt. **Tab. 1** zeigt eine Übersicht jener nichtrostenden Stähle, die für eine Anwendung im Kontakt mit Beton in Frage kommen. Unterschieden wird nach Güten, die derzeit in Deutschland bereits angewendet werden und solchen, die in einer vorläufigen Version der pr EN 10080 (Betonstahl) aufgelistet sind. Diese Edelstähle werden grundsätzlich nach ihrer Beständigkeit im angreifenden Medium ausgewählt,

aber es werden auch bestimmte technologische Eigenschaften in Hinblick auf Verarbeitung und Anwendung angestrebt. Der Legierungsgehalt sollte aus wirtschaftlichen Gründen nicht unangemessen hoch sein, jedoch unter den beabsichtigten Einsatzbedingungen auch nicht zu niedrig sein, so dass die erforderliche Beständigkeit im angreifenden Medium erzielt wird.

2.2.1 Ferritische nichtrostende Betonstähle

Mechanische Eigenschaften

Eisen-Chrom-Legierungen haben ein ferritisches Gefüge. Im Bauwesen werden hauptsächlich ferritische nichtrostende Stähle mit einem Chromgehalt bis 18 M.-% technisch genutzt. Zusätzlich können ferritstabilisierende Legierungselemente wie Molybdän zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit zugegeben werden.

Ein Vorteil der ferritischen nichtrostenden Stähle gegenüber den austenitischen ist ihre vergleichsweise höhere Streck- bzw. 0,2-Dehngrenze im lösungsgeglühten und warmgefertigten Zustand [9]. Dagegen ist die Zähigkeit im Vergleich zu den austenitischen Stählen geringer und die Verarbeitbarkeit schwieriger. Ferrite haben auch eine gewisse Neigung zu Kerbempfindlichkeit und Kaltsprödigkeit. Die Verwendung der ferritischen nichtrostenden Stähle bei tiefen Temperaturen ist daher begrenzt; eine gute Zähigkeit besteht nur bis etwa 0 °C. Das genannte Verhalten ist auf den nachteiligen austenitstabilisierenden Einfluss von Kohlenstoff und Stickstoff zurückzuführen. Diese Elemente bewirken Ausscheidungs- und Verfestigungsvorgänge und bereits geringe Mengen führen zur Bildung von Austenit in der ferritischen Matrix, der sich bei Abkühlung auf Raumtemperatur

in Martensit umwandelt. Bei dem ferritischen nichtrostenden Betonstahl 1.4003 ist selbst bei langsamer Abkühlung neben Ferrit auch Martensit im Gefüge vorhanden. Nachteilig wirkt sich auch die Tendenz der Ferrite zur Grobkornbildung aus. Betroffen sind vor allem wärmebeeinflusste Schweißzonen, da dort am ehesten mit groben Korn und Zähigkeitsabfall zu rechnen ist. Im Hinblick auf die genannten Gefährdungen wurde der Edelstahl 1.4003 sehr speziell legiert: Durch eine Begrenzung des Kohlen- und Stickstoffgehaltes ($\Sigma C+N \approx 0,03$) sowie Zusatz von Mangan und Nickel werden bei der Umwandlung von Austenit in Martensit eine zu starke Aufhärtung und Grobkornbildung und somit auch verminderte Zähigkeit in der Wärmeinflusszone neben der Schweißnaht vermindert.

Physikalische Eigenschaften

Ferritische nichtrostende Stähle haben eine Dichte von 7,7 kg/dm³ und sind ferromagnetisch, also magnetisierbar. Von den physikalischen Eigenschaften sind im Hinblick auf das Konstruieren und Schweißen insbesondere die Wärmeausdehnung und die Wärmeleitfähigkeit von Bedeutung. Bei ferritischen Edelstählen beträgt der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 und 100 °C wie bei Beton etwa $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Bei Verwendung als Betonstahl können somit keine Spannungen und Verbundstörungen im Kontaktbereich Stahl/Beton aufgrund einer hohen Temperaturbelastung entstehen. Die Wärmeleitfähigkeit von nichtrostenden Stählen ist gegenüber anderen Baumetallen generell niedrig und verhält sich etwa wie in Tab. 2 angegeben.

austenitischer, ferritisch-austenitischer nichtrostender Stahl	ferritischer nichtrostender Stahl	unlegierter Stahl	Zink	Aluminium	Kupfer					
1	:	2	:	4	:	8	:	15	:	25

Tab. 2: Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baumetalle

Die ferritischen nichtrostenden Stähle, insbesondere jedoch die austenitischen nichtrostenden Stähle, weisen somit eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf als andere Baumetalle.

Korrosionsverhalten

Ferritische nichtrostende Stähle weisen unter den üblicherweise im Bau-

wesen vorherrschenden Bedingungen (Angriff schwach saurer bis alkalischer wässriger Medien) eine ausreichende Beständigkeit gegenüber Flächenkorrosion auf. Bei Zugabe ausreichend hoher Gehalte an Chrom und Molybdän kann auch Beständigkeit gegenüber Lochkorrosion erreicht werden. Vergleichbare Chromgehalte vorausgesetzt, ist das Verhalten gegenüber Spaltkorrosion deutlich ungünstiger als z.B. bei den austenitischen nichtrostenden Stählen. Die Nickelzugabe bei den austenitischen nichtrostenden Stählen erhöht die Säurebeständigkeit. In Spalten reagiert ein Elektrolyt wegen Hydrolyse der Korrosionsprodukte häufig sauer, was einen Angriff durch Chloridionen verstärken kann.

Ferritische nichtrostende Stähle weisen generell eine hohe Beständigkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion in chloridhaltiger Umgebung auf. Sie haben jedoch eine gewisse Neigung zu interkristalliner Korrosion. Die Ursache hierfür ist die geringe Löslichkeit des chromreichen Ferrits für Kohlenstoff und Stickstoff und die damit verbundene Ausscheidung von Carbiden und Nitriden an der Korngrenze. Um eine Anfälligkeit gegenüber interkristalliner Korrosion nach einem Schweißen auszuschließen, wird bei dem Edelstahl 1.4003 der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt abgesenkt.

Anwendung

Zur Herstellung von kaltumgeformten ferritischen nichtrostenden Betonstahl in Ringen von 4 bis 14 mm Durchmesser wird die Edelstahlsorte 1.4003 (X2CrNi12) verwendet (Tab. 1). Sie ist mit den für herkömmliche Betonstähle üblichen Verfahren schweißbar.

Nichtrostender Betonstahl 1.4003 kann in allen Stahlbetonkonstruktionen aus Normal- und Leichtbeton, auch in Bereichen in denen mit Carbonatisierung zu rechnen ist, angewendet werden, sofern erhöhte Belastungen durch Chloride ausgeschlossen werden können. Der nichtrostende Betonstahl 1.4003 ist nur bedingt

beständig gegenüber Lochkorrosion, dieses gilt insbesondere für Bereiche neben Verbindungsschweißungen.

Für Entwurf und Bemessung nach DIN EN 206-1 bzw. 1045-1 [2] ist für den kaltumgeformten ferritischen nichtrostenden Betonstahl 1.4003 der E-Modul bei 20 °C mit 190 kN/mm² anzunehmen. Der Werkstoff lässt sich ohne Schwierigkeiten durch das für Betonstähle erforderliche Biegen verarbeiten.

2.2.2 Austenitische nichtrostende Betonstähle

Durch Zugabe von ca. 10 bis 12 M.-% Nickel zu einem Edelstahl mit 17 bis 18 M.-% Chrom verändert sich das Gefüge, es wird austenitisch. Dabei verändern sich die mechanisch-technologischen, physikalischen und Korrosionseigenschaften. Austenitische nichtrostende Stähle werden vor allem wegen ihren guten Korrosionseigenschaften und ihrer, gegenüber anderen nichtrostenden Stählen, vergleichsweise besseren Verarbeitbarkeit eingesetzt.

Mechanische Eigenschaften

Gegenüber den ferritischen nichtrostenden Stählen weisen lösungsgeglühte Edelstähle mit austenitischem Gefüge niedrigere Festigkeitswerte, dagegen hohe Zähigkeitswerte auf [9]. Auch bei tiefen Temperaturen treten bei den austenitischen nichtrostenden Stählen nur unwesentliche Einbußen an Verformbarkeit ein. Für die meisten Einsatzgebiete im konstruktiven Ingenieurbau, so auch im Betonbau, werden Stähle mit höheren 0,2-Dehngrenzen gefordert. Austenitische nichtrostende Stähle weisen gegenüber den ferritischen ein deutlich höheres Verfestigungsvermögen bei Kaltumformung auf. Dadurch lassen sich die Dehngrenzen, aber auch die Zugfestigkeit, beachtlich steigern, ohne dass dabei die Verformbarkeit unakzeptabel eingeschränkt wird. Deshalb kann man bei diesen Edelstählen vor allem über Kaltumformung, jedoch auch über die Zugabe Mischkristallverfestigender Elemente wie Kohlenstoff und Stickstoff, die Festigkeitseigenschaften verbessern. Auf die Zugabe von Kohlenstoff wird jedoch aus korrosionsschemischen Gründen (erhöhte Neigung gegenüber interkristalliner Kor-

rosion) verzichtet. Im Vergleich zu Kohlenstoff hat das Zulegieren von Stickstoff den Vorteil, dass sowohl die Streckgrenze angehoben als auch die Korrosionsbeständigkeit verbessert wird.

Bei Betonstählen aus austenitischem nichtrostenden Stahl werden bei dünneren Abmessungen von zumeist 4 bis 20 mm Durchmesser die erforderlichen Festigkeitswerte über eine Kaltumformung erzielt. Die für glatte Rundstäbe und Rippenstahl größerer Abmessung (Durchmesser 10 bis 40 mm) in Deutschland verwendeten Edelmstähe 1.4429 und 1.4529 (Tab. 1) sind stickstofflegiert. Durch Warmwalzen und anschließendes sog. „warmworking“ (Walzen unterhalb der Rekristallisationstemperatur bei nur wenigen 100 °C) werden über spezielle Ausscheidungszustände hohe Festigkeitswerte erzielt. Diese dickeren Stabstähle werden nicht als Bewehrung im herkömmlichen Sinn verwendet und haben keine bauaufsichtliche Zulassung als Betonstahl.

Physikalische Eigenschaften

Austenitische Chrom-Nickel-Stähle ohne Molybdänzusatz haben eine Dichte von $7,9 \text{ kg/dm}^3$, jene mit Molybdän eine solche von $8,0 \text{ kg/dm}^3$. Sie sind im lösungsgeglühten Zustand nicht ferromagnetisch, also nicht magnetisierbar und haben mit $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ eine deutlich größere Wärmedehnung als Beton (etwa $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Bei einer Verwendung als Betonstahl könnten bei Erwärmung theoretisch in der Grenzfläche Stahl/Beton Spannungen mit Verbundstörungen als Folge auftreten. Jedoch wurde diese Erscheinung bisher nicht festgestellt. Die austenitischen nichtrostenden Stähle weisen eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit als andere Metalle auf. Dieser geringere Wärmefluss wird im Betonbau beispielsweise bei wärmedämmenden Kragplattenanschlüssen zur thermischen Trennung außen liegender Bauteile vom warmen Innenbereich genutzt. Aufgrund des hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten und der geringen Wärmeleitfähigkeit austenitischer Edelmstähe ist beim Schweißen zur Vermeidung von Verzug und Verzunderung und zur Erzielung möglichst schmaler Schweißnähte mit engen Anlauffarbenbereichen

auf eine geringe Wärmeeinbringung zu achten.

Korrosionsverhalten

Austenitische nichtrostende Stähle haben im Vergleich zu den ferritischen nichtrostenden Stählen bei vergleichbarem Chromgehalt eine höhere Beständigkeit gegenüber Flächen-, Loch- und vor allem Spaltkorrosion. Sie sind in der typischen Zusammensetzung mit etwa 10 M.-% Nickel grundsätzlich empfindlich gegen Spannungsrissskorrosion. Im Betonbau liegen die medienseitigen Voraussetzungen für diese Korrosionsart allerdings nicht vor. Eine Zugabe von Molybdän verbessert das Verhalten gegenüber Loch-, Spalt- und Spannungsrissskorrosion.

Anwendung

Während die dünneren Abmessungen bis 14 mm vom Ring neben Betonrippenstahl vor allem für Betonstahlmatten und Gitterträger eingesetzt werden, werden die dickeren warmgewalzten glatten Rundstäbe und gerippten Stäbe (Betonrippenstähle) als Bewehrungen, Verankerungen und Anschlussbewehrungen verwendet. Insbesondere die dünneren Abmessungen werden geschweißt. Sie sind mit den für herkömmliche Betonstähle üblichen Verfahren schweißbar und weisen eine bessere Schweißeignung auf als die ferritischen Edelmstähe.

Die in Deutschland im Betonbau verwendeten austenitischen nichtrostenden Stähle 1.4571, 1.4429 und 1.4529 (Tab. 1) sind in chloridhaltigem alkalischen und carbonatisierten Beton gegenüber allen Korrosionsarten ausreichend beständig. Zulassungen (Beispiele siehe [10]) empfehlen den Edelmstahl 1.4571 für eine mäßige Korrosionsbelastung durch Chloride. Die molybdänfreie Edelmstahlorte 1.4301 ist, insbesondere im Schweißnahtbereich, in chloridangereichertem Beton nicht ausreichend beständig gegenüber Lochkorrosion.

Für Entwurf und Bemessung nach DIN EN 206-1 bzw. 1045-1 [2] ist der E-Modul bei 20 °C beim kaltumgeformten austenitischen nichtrostenden Betonstahl mit 160 kN/mm^2 anzunehmen. Er lässt sich ohne Schwierigkeiten durch das für Betonstähle erforderliche Biegen verarbeiten.

2.2.3 Ferritisch-austenitische nichtrostende Betonstähle

Ferritisch-austenitische nichtrostende Stähle besitzen ein Zweiphasengefüge aus Ferrit und Austenit. Gegenüber den Austeniten wird dieses Mischgefüge durch Anheben der Gehalte an ferritstabilisierenden Elementen wie Chrom und durch Absenken des austenitstabilisierenden Nickels erreicht. Die typische Zusammensetzung der für Betonstähle verwendeten Güten liegt bei 21 bis 24 M.-% Chrom und 3,5 bis 6,5 M.-% Nickel. Molybdän kann zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit zugegeben werden. Der Kohlenstoffgehalt wird auf Werte $\leq 0,03 \text{ M.-%}$ eingestellt, um eine Anfälligkeit gegenüber interkristalliner Korrosion nach dem Schweißen auszuschließen. Zur Austenitstabilisierung sowie zur Verzögerung der Bildung intermetallischer Phasen enthalten sie gezielt Stickstoffzusätze. Die mit Abstand wichtigsten Vertreter sind die Edelmstähe 1.4462 und 1.4362 (Tab. 1). Der relativ niedrige Nickelgehalt im Vergleich zum konventionellen nichtrostenden Austenit macht die Werkstoffe auch vom ökonomischen Standpunkt interessant.

Mechanische Eigenschaften

Bei den ferritisch-austenitischen nichtrostenden Stählen sichert die Ferritphase die Festigkeit, die Austenitphase die Zähigkeit. Diese Edelmstähe vereinigen dadurch günstige Eigenschaften der Ferrite (hohe Streckgrenze) und Austenite (gute Zähigkeit, verbesserte Korrosionseigenschaften). Auch bei den ferritisch-austenitischen nichtrostenden Stählen können die Festigkeitseigenschaften neben Kaltumformung noch durch Mischkristallverfestigung des Austenits verbessert werden. Stickstoff hat eine positive Wirkung auf die Festigkeit und steigert die Korrosionsbeständigkeit.

Die Verwendbarkeit der ferritisch-austenitischen nichtrostenden Betonstähle bei tiefen Temperaturen ist beschränkt. Die Edelmstähe 1.4462 und 1.4362 sind nur für den Einsatz bei Tieftemperaturen bis -100 °C bzw. -50 °C geeignet. In der Wärme ist die technische Einsetzbarkeit der ferritisch-austenitischen Edelmstähe durch die sog. „475°C-Versprödung“ des Ferrits begrenzt, die bei längerer Verweil-

zeit auch schon bei Temperaturen ab 280 °C beobachtet werden kann. Bei brandgefährdeten Bauteilen mit der Möglichkeit einer länger andauernden Temperatur > etwa 300 °C sollten ferritisch-austenitische nichtrostende Betonstähle nicht eingesetzt werden.

Physikalische Eigenschaften

Ferritisch-austenitische nichtrostende Stähle haben eine Dichte von 7,8 kg/dm³. Sie sind ferromagnetisch, also magnetisierbar. Bei diesen Edelstählen beträgt der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 und 100 °C $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Korrosionsverhalten

Die ferritisch-austenitischen nichtrostenden Stähle weisen eine hohe Beständigkeit gegenüber Loch- und Spaltkorrosion und eine sehr geringe Gefährdung gegenüber chloridinduzierter Spannungsrisskorrosion auf. Den verbesserten Festigkeitseigenschaften in Verbindung mit der sehr guten Korrosionsbeständigkeit entspricht ein verbessertes Verhalten gegenüber Schwingungsrisskorrosion.

Anwendung

Die ferritisch-austenitischen Edelstähle 1.4462 und neuerlich auch 1.4362 (Tab. 1) werden zur Herstellung von kaltumgeformten und warmgewalzten nichtrostenden Betonstählen verwendet. Sie dürfen in allen Stahlbetonkonstruktionen aus Normal- und Leichtbeton eingesetzt werden, wenn mit Carbonatisierung und Chloridbelastung zu rechnen ist. Die Zulassung empfiehlt den Edelstahl 1.4362 für eine mäßige Korrosionsbelastung und den Edelstahl 1.4462 für eine hohe Korrosionsbelastung durch Chloride (z.B. bei Bauteilen mit Tausalzbelastung und im Meerwasser).

Für Entwurf und Bemessung nach DIN EN 206-1 bzw. 1045-1 [2] ist der E-Modul bei 20 °C für den kaltumgeformten ferritisch-austenitischen nichtrostenden Betonstahl mit 160 kN/mm² (Edelstahl 1.4462) bzw. 150 kN/mm² (Edelstahl 1.4362) anzunehmen. Bei der Verarbeitung durch z.B. Biegen sind höhere Umformkräfte erforderlich als bei den anderen nichtrostenden Stählen.

Die ferritisch-austenitischen Edelstähle weisen nur bei Beachtung geeigneter

Schweißvorgaben für die üblichen Schweißverfahren mit Zusatzwerkstoff eine gute Schweißbeugung auf. Beim Schweißen ist darauf zu achten, dass hohe Temperaturen zu einer fast vollständigen Ferritisierung des Gefüges einhergehend mit einer Kornvergrößerung führen können. Durch ein zu schnelles Abkühlen aus der Schweißhitze kann sich der Austenit nicht im erforderlichen Maß ausscheiden, was in der Wärmeeinflusszone eine drastische Herabsetzung der Zähigkeit und eine stark abgeminderte Korrosionsbeständigkeit bewirkt.

2.3 Produkte

In Deutschland kommt ausschließlich Betonstahl mit einer Streck- bzw. 0,2-Dehngrenze von mind. 500 N/mm² zur Anwendung. Die erforderlichen Eigenschaften der bauaufsichtlich zugelassenen Produkte sind in der DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-1 [2] bzw. in DIN 488 [11] geregelt. Wichtige Gebrauchseigenschaften von nichtrost-

500 NG (glatt) in Ringen wird aus den Edelstählen 1.4003, 1.4571, 1.4362 und 1.4462, Nenndurchmesser von 4 bis 14 mm, angeboten. Des Weiteren ist kaltumgeformter gerippter Betonstahl, Nenndurchmesser 6-14 mm, aus dem Edelstahl 1.4301 (aktuell nicht bauaufsichtlich zugelassen) lieferbar. Nichtrostender Betonstahl in Ringen wird durch Kaltverformung, d.h. durch Ziehen und/oder Kaltwalzen des warmgewalzten glatten Ausgangserzeugnisses hergestellt. Auf die Oberfläche werden 3 Reihen schräg zur Stabachse verlaufende Rippen kalt aufgewalzt. Profilierter Betonstahl BSt 500 NR und glatter Betonstahl BSt 500 NG wird auf Spulen in Ringform geliefert. Zwecks Weiterverarbeitung zu Bewehrungen wird das Ringmaterial werksmäßig gerichtet und geschnitten. Insbesondere aus dem profilierten Betonstahl werden Stabstahl, Betonstahlmatten oder Gitterträger oder anderweitige Bewehrungen hergestellt.

Werkstoff-Nr.	1.4003, 1.4571	1.4362, 1.4462
Durchmesser (mm)	4 bzw. 6-14	
0,2-Dehngrenze (N/mm ²)	≥ 500	≥ 700
Zugfestigkeit (N/mm ²)	≥ 550	≥ 800
Bruchdehnung A ₁₀ (%)	15	10
Gleichmaßdehnung A _g (%)	5	5
Dauerschwingfestigkeit ¹⁾ (N/mm ²)	165 (1.4003) 175 (1.4571)	165 (1.4362) 175 (1.4462)

¹⁾ Prüfung an freien geraden Stäben, Schwingbreite 2σ_A bei 2 x 10⁶ Schwingspielzahlen

Tab. 3: Gebrauchseigenschaften von nichtrostenden Betonstählen in Ringen BSt 500 NR und BSt 500 NG nach bauaufsichtlicher Zulassung

tenden Betonstählen in Ringen sind in Tab. 3 aufgeführt. Insbesondere bei den kaltumgeformten ferritisch-austenitischen Edelstählen lassen sich deutlich höhere Festigkeitswerte als bisher von den Regelwerken für Betonstähle gefordert erzielen. Hierdurch sind im Vergleich zu den austenitischen Güten Querschnittsreduzierungen und damit Materialeinsparungen möglich.

Nichtrostender kaltumgeformter Betonstahl BSt 500 NR (gerippt) und BSt

Nichtrostende warmgewalzte glatte Rundstäbe und gerippte Stäbe (Betonrippenstähle) werden aus den stickstofflegierten Edelstählen 1.4429, 1.4529, 1.4362 und 1.4462, Nenndurchmesser von 6 bis 52 mm (nicht bauaufsichtlich zugelassen), gefertigt. Die schräg angeordneten Rippen zur Verbesserung des Verbundes werden bei den gerippten Stabstählen warm aufgewalzt. Die dickeren warmgewalzten glatten Rundstäbe und gerippten Stäbe (Betonrippenstähle) werden als Bewehrungen und für Verankerungen

Werkstoff-Nr. 1.4429	
0,2%-Dehngrenze	880 N/mm ² (10 mm Ø) bis 600 N/mm ² (40 mm Ø)
Zugfestigkeit	990 N/mm ² (10 mm Ø) bis 790 N/mm ² (40 mm Ø)
Bruchdehnung (A ₁₀)	15 % (10 mm Ø) bis 30 % (40 mm Ø)
Werkstoff-Nr. 1.4529	
0,2%-Dehngrenze	700 N/mm ² (12 mm Ø) bis 600 N/mm ² (40 mm Ø)
Zugfestigkeit	900 N/mm ² (12 mm Ø) bis 800 N/mm ² (40 mm Ø)
Bruchdehnung (A ₁₀)	15 % (12 mm Ø) bis 30 % (40 mm Ø)
Werkstoff-Nr. 1.4362	
0,2%-Dehngrenze	650 N/mm ² (6 mm Ø) bis 500 N/mm ² (25 mm Ø)
Zugfestigkeit	800 N/mm ² (6 mm Ø) bis 700 N/mm ² (25 mm Ø)
Bruchdehnung (A ₁₀)	15 % (6 mm Ø) bis 30 % (25 mm Ø)
Werkstoff-Nr. 1.4462	
0,2%-Dehngrenze	700 N/mm ² (6 mm Ø) bis 550 N/mm ² (40 mm Ø)
Zugfestigkeit	850 N/mm ² (6 mm Ø) bis 680 N/mm ² (40 mm Ø)
Bruchdehnung (A ₁₀)	15 % (6 mm Ø) bis 30 % (40 mm Ø)

Tab. 4: Mechanische Kennwerte für warmgewalzte gerippte Stäbe eines Herstellers

und Anschlussbewehrungen angewendet. Die mechanischen Kennwerte der warmgewalzten Stäbe sind durchmesserabhängig, wobei die 0,2-Dehngrenze und Zugfestigkeit mit zunehmendem Durchmesser abnehmen, während sich die Bruchdehnung umgekehrt verhält. In Tab. 4 sind beispielhaft die mechanischen Kennwerte für gerippte Stäbe eines Herstellers angegeben.

Nichtrostende Betonstähle können auf der Baustelle und in Betrieben geschweißt werden. Für das Schweißen gelten die Bestimmungen der „Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung“ [12] in Verbindung mit EN ISO 17660 [13]. Von den derzeit bauaufsichtlich zugelassenen nichtrostenden Betonstählen in Ringen BSt 500 NR und BSt 500 NG aus den Edelstählen 1.4003, 1.4571, 1.4362 und 1.4462 darf der geschweißte Edelstahl 1.4362 laut Zulassung nur bei vorwiegend ruhender Belastung eingesetzt werden.

3 Korrosionsverhalten nichtrostender Betonstähle

3.1 Mögliche Korrosionsarten [1,14]

Flächenkorrosion

Nichtrostende Stähle können lediglich in sauren wässrigen Medien durch mehr oder weniger gleichmäßige Flächenkorrosion angegriffen werden. Für die atmosphärische Korrosion ist von Bedeutung, dass bei ansteigendem pH-Wert die Korrosionsgeschwindigkeit im aktiven Zustand stark abnimmt. Oberhalb pH 4 besteht i.a. Korrosionsbeständigkeit. In schwach sauren Medien, also auch in üblicher Atmosphäre und erst recht im Beton, sind daher Chromstähle mit > 12 M.-% Chrom und alle höher legierten Stähle passiv.

Lochkorrosion

Lochkorrosion wird eingeleitet durch eine Wechselwirkung zwischen den Halogenidionen und der Passivschicht, wobei die Passivschicht lokal durchbrochen wird. Es bilden sich nadelstichartige Vertiefungen und durch deren Wachstum Lochkorrosionsstellen. Im Bauwesen sind es meist die Chloridionen aus Meerwasser, Aero-

solen oder Tausalznebeln, die Lochkorrosion bewirken. Die Korrosionsgefährdung der nichtrostenden Stähle nimmt bei fallendem Chloridgehalt, fallender Temperatur und steigendem pH-Wert ab. Besonders kritisch sind daher chloridangereicherte saure Medien, die im Betonbau nicht vorkommen.

Werkstoffseitig wird die Lochkorrosion insbesondere durch die Legierungselemente Chrom, Nickel und Molybdän, des Weiteren auch durch Stickstoff beeinflusst. Die Beständigkeit lässt sich annähernd durch die Wirksumme $W = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + (16-30) \times \% N$ abschätzen (der Einfluss von Stickstoff ist gefügeabhängig). Mit steigender Wirksumme nimmt die Beständigkeit gegenüber chloridinduzierter örtlicher Korrosion zu. Die Wirksumme der gebräuchlichen Betonstähle beträgt:

Werkstoff-Nr.	Kurzname	Wirksumme
1.4003	X2CrNi12	12
1.4301	X5CrNi18-10	18
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	24
1.4429	X2CrNiMoN17-13-3	33
1.4529	X1NiCrMoCuN25-20-7	49
1.4362	X2CrNiN23-4	27
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	37

Die Korrosionsbeständigkeit in lochkorrosionserzeugenden Medien hängt weiterhin von der Oberflächengüte der nichtrostenden Stähle ab und kann somit auch durch den Herstellungsprozess der Stähle beeinträchtigt werden. Auf Betonstähle bezogen bedeutet das, dass warmgewalzte Edelstähle mit Zunderbelegung in der Regel anfälliger sind als kaltumgeformte Edelstähle.

Schweißverbindungen weisen eine höhere Anfälligkeit gegenüber Lochkorrosion auf als ungeschweißte Edelstahlabschnitte. Schweißverbindungen sind vor allem dann hinsichtlich Lochkorrosion stärker gefährdet als ungeschweißte gleichartige Edelstähle, wenn bei Verbindungsschweißungen infolge fehlender Schutzgasführung Oxidfilme (Anlauffarben) oder

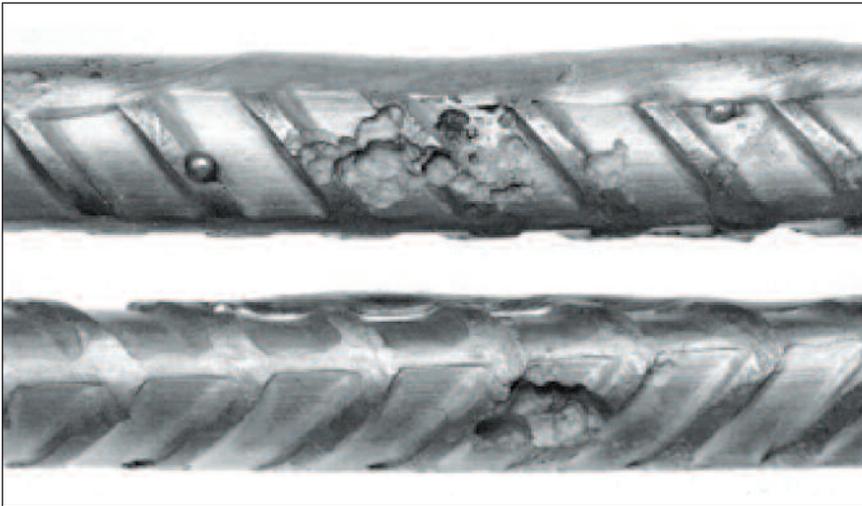


Bild 2: Korrosion im Schweißnahtbereich eines nichtrostenden Stahls 1.4003 in chloridhaltigem Beton

Zunderschichten im Schweißnahtbereich entstanden sind (**Bild 2**). Betonstähle werden auf der Baustelle überwiegend nicht unter Schutzgas geschweißt und es erfolgt auch keine besondere Behandlung zur Entfernung von schweißbedingten Belägen.

Spannungsrissskorrosion

Bei dieser Korrosionsart entstehen Risse, die bei nichtrostenden Stählen im Allgemeinen transkristallin verlaufen. Nur wenn die folgenden drei Bedingungen gleichzeitig vorliegen, ist Spannungsrissskorrosion möglich:

- die Oberfläche des Bauteils steht unter Zugspannungen;
- Einwirkungen eines spezifisch wirkenden Mediums (meist Chloridionen);
- Neigung des Werkstoffs zur Spannungsrissskorrosion.

Mit Spannungsrissskorrosion ist in erster Linie in chloridhaltigen Medien zu rechnen, wobei die Gefährdung generell mit steigendem Chloridgehalt, fallendem pH-Wert und steigender Temperatur zunimmt.

Die Beständigkeit der nichtrostenden Stähle gegenüber chloridinduzierter Spannungsrissskorrosion nimmt in der Reihenfolge ferritische Chromstähle, ferritisch-austenitische Stähle, austenitische Chrom-Nickel-(Molybdän)-Stähle ab. Dieses ist vor allem mit dem Einfluss des Nickelgehaltes auf die Anfälligkeit hochchromhaltiger Edelmetalle gegenüber Spannungsrissskorrosion zu erklären. Eine gewisse Anfälligkeit liegt bei Nickelgehalten zwischen et-

wa 5 und 20 M.-% vor und ein Minimum der Beständigkeit existiert bei etwa 10 M.-% Nickel. Die im Betonbau verwendeten austenitischen nichtrostenden Stähle weisen häufig Nickelgehalte um 10 M.-% auf. Selbst bei empfindlichen nichtrostenden Stählen kann Spannungsrissskorrosion bei Raumtemperatur jedoch nur dann auftreten, wenn das Angriffsmittel hochchloridhaltig und zudem noch sauer ist. Da die wässrige Phase des Betons stets pH-Werte $\geq 8,3$ (carbonatisierter Beton) aufweist, sind in Beton eingebettete nichtrostende Betonstähle stets ausreichend sicher gegenüber Spannungsrissskorrosion.

Interkristalline Korrosion

Unter interkristalliner Korrosion wird ein Angriff entlang der Korngrenzen des Gefüges verstanden. Dabei können einzelne Körner aus dem Kornverband herausgelöst werden. Ursache der interkristallinen Korrosion bei nichtrostenden Stählen sind Ausscheidungen von chromreichen Karbiden an den Korngrenzen, die eine Chromverarmung in den korngrenznahen Bereichen zur Folge haben. Die so gebildeten chromarmen Zonen an den Korngrenzen sind gegen insbesondere saure angreifende Medien nicht korrosionsbeständig genug und gehen daher bevorzugt in Lösung.

Die Chromkarbidausscheidungen setzen einen bestimmten Kohlenstoffgehalt voraus und finden in einem Temperaturbereich statt, der z.B. in der Wärmeeinflusszone von Schweißverbindungen durchlaufen wird. Zur Vermeidung der Chromkarbidausschei-

dung kann man in nichtrostenden Stählen den Kohlenstoffgehalt auf unter 0,03 % absenken oder aber den vorhandenen Kohlenstoff durch so genannte Stabilisierungselemente wie Titan (Ti) oder Niob (Nb), die eine größere Kohlenstoffaffinität als Chrom haben, abbinden. Interkristalline Korrosion spielt bei den für das Schweißen zugelassenen Betonstählen keine Rolle.

3.2 Lochkorrosionsverhalten nichtrostender Betonstähle

Bei in Beton eingebetteten nichtrostenden Betonstählen ist das Verhalten gegenüber Lochkorrosion zu beachten. Es galt, zunächst unter den zur Verfügung stehenden Werkstoffen eine optimale und wirtschaftlich sinnvolle Auswahl hinsichtlich folgender Eigenschaften zu treffen:

- Verhalten in alkalischem plus chloridhaltigem, carbonatisiertem sowie carbonatisiert plus chloridhaltigem Beton;
- Verhalten der Betonstähle in den typischen Ausführungen (glatte und gerippte Oberfläche, auch zusätzlich geschweißt).

Unter Beachtung dieser Gesichtspunkte wurden in der Vergangenheit zahlreiche Ergebnisse von Labor- und Auslagerungsversuchen veröffentlicht. Die in Deutschland an nichtrostenden Betonstählen durchgeführten Versuche sind vor allem in [3, 5, 15-17] wiedergegeben. Eine zusammenfassende Darstellung der weltweit durchgeführten Versuche, die sich im Hinblick auf die Wirkung der wesentlichen Einflussparameter nicht widersprechen, erfolgte in [4, 6].

Nichtrostende Betonstähle sind sowohl in alkalischem als auch carbonatisiertem Beton passiv. Sind im Beton zusätzlich Chloride vorhanden, dann ist je nach Stahlzusammensetzung, Chloridgehalt und pH-Wert des Betons Korrosion in Form lokaler Angriffe möglich. Diesbezüglich am ehesten gefährdet sind Bereiche von Schweißnähten (**Bild 2**).

In den elektrochemischen Untersuchungen in alkalischen Lösungen und an Mörtелеlektroden dient das in po-

potentiostatischen Halteversuchen ermittelte sog. Lochkorrosionspotential zur Beschreibung des Lochkorrosionsverhaltens: Mit fallendem (negativer werdendem) Lochkorrosionspotential nimmt die Gefährdung hinsichtlich Lochkorrosion im betreffenden Korrosionssystem Stahl/Medium zu. Die in der Folge dargestellten Ergebnisse zum Einfluss wichtiger Parameter auf das Lochkorrosionspotential sind [15, 18] entnommen.

Da Betonstähle bei der Verarbeitung häufig geschweißt werden, interessiert, um bei der Beurteilung auf der sicheren Seite zu liegen, vor allem das eher ungünstigere Korrosionsverhalten im Bereich der Schweißnaht, wenn der Beton erhöhte Chloridgehalte aufweist. In **Bild 3** wird das Verhalten unterschiedlich legierter Stähle und eines unlegierten Stahls in Abhängigkeit vom Chloridgehalt des Betons aufgezeigt. Die kaltgezogenen Rundstäbe erhielten eine mittels Lichtbogenhandschweißens aufgetragene Längsschweißnaht. Zum Aufbringen einer Schweißraupe wurden die zum Lichtbogenschweißen dieser Stähle gebräuchlichen umhüllten Schweißelektroden verwendet. Die Schweißnähte wurden, wie im Betonbau üblich, nicht behandelt, die Prüfung erfolgte mit vorhandenen Resten von festhaftendem Schweißzunder und dünnen Oxidschichten (Anlauffarben) auf dem Drahtumfang im Bereich der Schweißung. Dargestellt ist das in sog. potentiostatischen Halteversuchen ermittelte Lochkorrosionspotential; bei steigendem Lochkorrosionspotential nimmt die Korrosionsbeständigkeit zu. Aus ingenieurmäßiger Sicht lassen sich bezüglich der Einordnung des Korrosionswiderstandes drei Gruppen von nichtrostenden Stählen unterscheiden:

- die austenitischen nichtrostenden Stähle 1.4439 und 1.4571 sowie der ferritisch-austenitische nichtrostende Stahl 1.4462 mit einer hohen Korrosionsbeständigkeit;
- die ferritischen nichtrostenden Stähle 1.4016, 1.4021 und 1.4003 mit > 10,5 M.-% Chrom und einer gegenüber unlegierten Stählen verbesserten Korrosionsbeständigkeit;
- der ferritische Stahl 1.4713 mit Chromgehalten ≤ 7 M.-% und der unlegierte Stahl mit Korrosionsanfälligkeit.

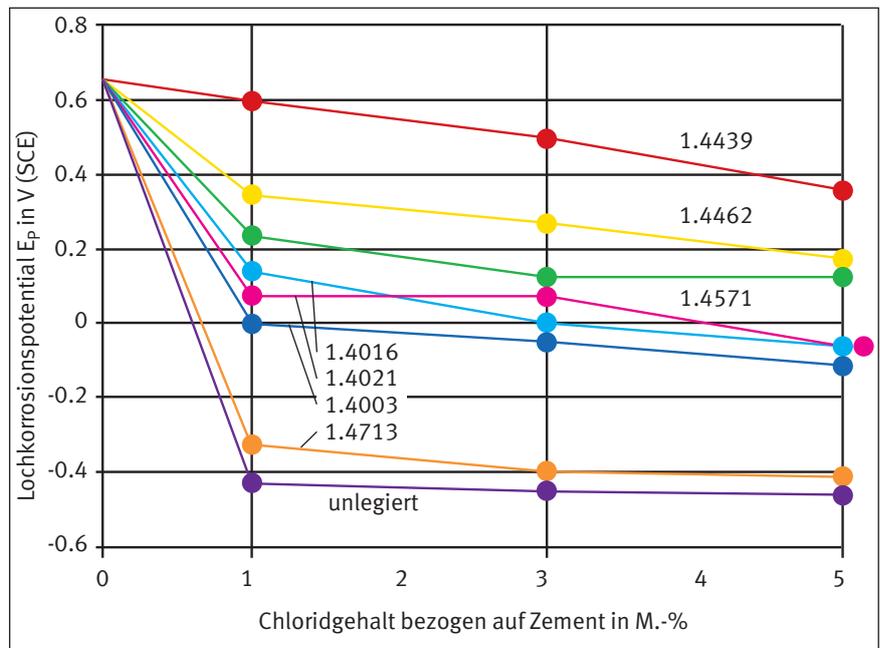


Bild 3: Lochkorrosionspotentiale geschweißter kaltumgeformter glatter legierter Rundstäbe und eines unlegierten Stahls in chloridhaltigem Beton (1 bis 5 M.-% Chlorid als NaCl); die durch Lichtbogenhandschweißens hergestellten Schweißnähte wurden nicht behandelt [15]

Mit steigendem Chloridgehalt des Betons fällt das Lochkorrosionspotential erwartungsgemäß. Im Bereich zwischen 0 und 1 M.-% Chlorid ist diese Abminderung bei den geringer legierten Stahlsorten deutlich ausgeprägter als zwischen 1 und 5 M.-% Chlorid.

Der Einfluss der Stahlsorte und des pH-Wertes auf den sog. kritischen

Chloridgehalt, bei dessen Überschreitung bei der jeweiligen Stahlsorte mit Korrosion zu rechnen ist, ist in **Bild 4** wiedergegeben. Der pH-Wert 9 steht für den carbonatisierten Beton, die pH-Werte 12,6 und 13,9 geben die mögliche Spannweite der Alkalität eines Betons wieder.

Bild 4 verdeutlicht, dass der kritische

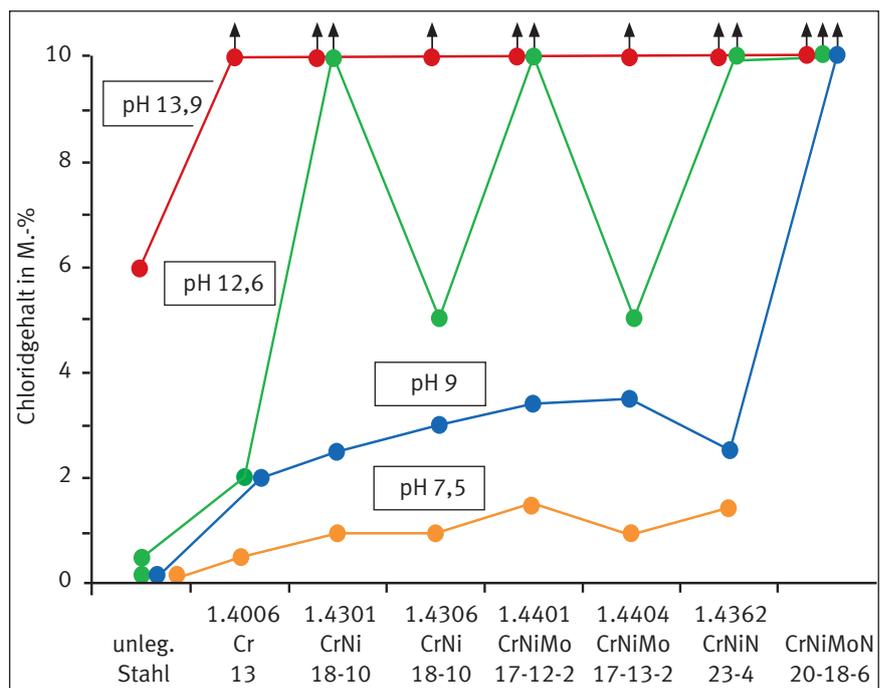


Bild 4: Kritischer Chloridgehalt von legierten Stählen und eines unlegierten Stahls in Lösungen von pH 7,5 bis 13,9 (potentiostatische Versuche bei +0,2 V (GKE) [18])

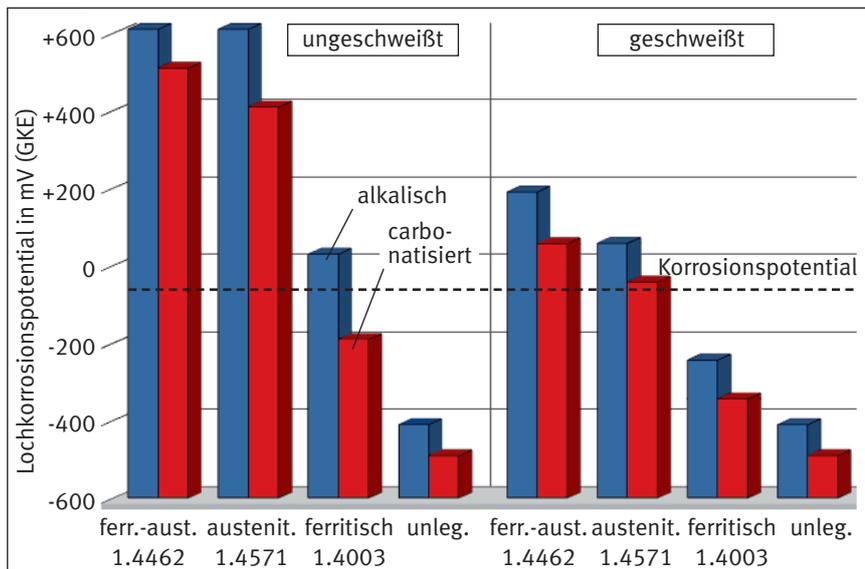


Bild 5: Lochkorrosionspotentiale ungeschweißter und geschweißter kaltumgeformter gerippter nichtrostender Betonstähle und eines unlegierten Stahls in chloridhaltigem Beton (5 M.-% Chlorid als NaCl); die durch Lichtbogenhandschweißen hergestellten Schweißnähte wurden nicht behandelt [15]

Chloridgehalt in erster Linie von der Stahlzusammensetzung und vom pH-Wert des wässrigen Angriffsmediums (der Zementsteinporenlösung) abhängt. In chloridhaltigem carbonatisiertem Beton ist demnach die Beständigkeit deutlich geringer als in chloridhaltigem alkalischen Beton. Im Hinblick auf Grenzbetrachtungen sollte das Verhalten in chloridhaltigem carbonatisiertem Beton herangezogen werden, da in bestimmten Anwendungsfällen (Parkdecks, Stützmauern neben verkehrsreichen Straßen) häufig Trennrisse entstehen, die verhältnismäßig rasch carbonatisieren. Im Betonriss wäre der Stahl dann u.U. einem chloridhaltigen carbonatisierten Beton ausgesetzt.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse von elektrochemischen Untersuchungen an nichtrostenden Betonrippenstählen der Güten 1.4003, 1.4571 und 1.4462 sowie eines herkömmlichen (unlegierten) Stahls, die in Deutschland als kaltumgeformte Betonrippenstähle zugelassen sind. Aufgetragen sind die Lochkorrosionspotentiale an ungeschweißten und geschweißten Proben in alkalischem und carbonatisiertem Beton C25/20 mit 5 M.-% Chlorid (bezogen auf den Zementgehalt). Aus der Darstellung lässt sich folgendes ableiten:

- Es besteht eine deutliche, durch den Legierungsgehalt der Stähle bedingte Abstufung im Korrosionsverhal-

ten: In der Reihenfolge unlegiert - 1.4003 - 1.4571 - 1.4462 nimmt die Beständigkeit deutlich zu, wobei der Unterschied zwischen den beiden letztgenannten Stählen eher gering ist.

- In carbonatisiertem chloridhaltigen Beton ist das Lochkorrosionspotential gegenüber dem alkalischen chloridhaltigen Beton stets zu negativeren Werten verschoben.
- Geschweißte Betonrippenstähle aus nichtrostendem Stahl sind in chloridhaltigem Beton deutlich korrosionsanfälliger als ungeschweißte. Dennoch sind diese erheblich beständiger als geschweißte unlegierte Betonstähle.

Der Edelstahl 1.4362 wurde bisher nicht in gleicher Weise wie die in **Bild 5** dargestellten Stähle im Hinblick auf eine Anwendung im Betonbau untersucht. Aufgrund von Untersuchungen zum Korrosionsverhalten in der Atmosphäre wird jedoch davon ausgegangen, dass sein Korrosionsverhalten in etwa jenem des Edelstahls der Güte 1.4571 gleichkommt.

Zur ingenieurmäßigen Beurteilung der in den **Bildern 3 und 5** dargestellten Ergebnisse können folgende Überlegungen dienen: Aufgrund von Potentialmessungen an im Freien ausgelagerten chloridhaltigen, mit nichtrostenden Betonrippenstählen bewehrten Bauteilen [16] wurde erkannt, dass das Korrosionspotential von Stählen,

die nach Chloridbeaufschlagung Lochkorrosion erleiden, in frei bewittertem Beton stets negativer als etwa -100 mV (GKE) ist. D.h., dass Korrosion bei Stahlbeton im Freien nur dann zu erwarten ist, wenn das Lochkorrosionspotential negativer als -100 mV (GKE) ist. Dann ist die notwendige Forderung für Korrosion erfüllt (Lochkorrosionspotential < Korrosionspotential). Aufgrund dieser Definition und der in **Bild 5** dargestellten Ergebnisse können diese kaltgerippten nichtrostenden Betonrippenstähle unter folgenden korrosiven Bedingungen als korrosionssicher eingestuft werden:

- der austenitische nichtrostende Stahl 1.4571 (ungeschweißt und geschweißt) und der ferritisch-austenitische nichtrostende Stahl 1.4462 (ungeschweißt und geschweißt) unter allen denkbaren Korrosionsverhältnissen (carbonatisiert, chloridhaltig alkalisch, chloridhaltig carbonatisiert);
- der ferritische nichtrostende Stahl 1.4003 (ungeschweißt und geschweißt) in chloridfreiem carbonatisiertem Beton;
- der ferritische ungeschweißte nichtrostende Stahl 1.4003 in chloridhaltigem alkalischem Beton.

Die Ergebnisse der in mehreren Ländern durchgeführten Langzeitauslagerungen [6] mit Schwerpunkt der in Deutschland von der MPA Universität Stuttgart in bewehrten Bauteilen aus Normalbeton [15, 16] und Leichtbeton [17] durchgeführten Auslagerungen im Freien bestätigen jene der vorgenannten Laboruntersuchungen. Eine zusammenfassende Darstellung der in Stuttgart über 2,5 Jahre durchgeführten Auslagerungsversuche zum Korrosionsverhalten von unlegiertem und nichtrostendem Stahl ohne und mit Verbindungsschweißung in Beton ist in **Bild 6** dargestellt:

- Erwartungsgemäß korrodiert unlegierter Stahl in carbonatisiertem und/oder chloridhaltigem Beton. In carbonatisiertem Beton überwiegt Flächenkorrosion; bei steigendem Chloridgehalt tritt in zunehmendem Maße Loch- und Muldenkorrosion auf. Die stärksten Angriffe sind in carbonatisiertem plus chloridhaltigen Beton möglich.
- Der ferritische nichtrostende Stahl

1.4003 verhält sich deutlich günstiger als ein unlegierter Stahl. In chloridfreiem carbonatisiertem Beton tritt im ungeschweißten und geschweißten Zustand keine Korrosion auf. Dieses Korrosionsverhalten deckt sich mit neueren Untersuchungen in [19]. Beim ungeschweißten 1.4003 tritt nur geringe Korrosion auf, solange der Chloridgehalt im alkalischen Beton etwa 2 M.-% (bezogen auf Zement) nicht übersteigt. Bei deutlich höheren Chloridgehalten wird jedoch Lochkorrosion auftreten. Vor allem bei gleichzeitiger Anwesenheit von Chloriden und Carbonatisierung besteht die Gefahr einer Lochkorrosion. In Bereichen von Schweißraupen ist schon bei Anwesenheit von Chloriden um 1 M.-% mit einer ausgeprägten Lochkorrosion zu rechnen (Bild 2). Die Narbentiefe nimmt bei steigendem Chloridgehalt zu und ist in gleichzeitig carbonatisiertem Beton am ausgeprägtesten. Geschweißte ferritische nichtrostende Stähle verhalten sich somit deutlich ungünstiger als ungeschweißte.

- Bei dem austenitischen nichtrostenden Stahl 1.4571 und dem ferritisch-austenitischen nichtrostenden Stahl 1.4462 tritt sowohl im ungeschweißten als auch im geschweißten Zustand für alle möglichen Zustände des Betons (carbonatisiert, alkalisch chloridhaltig, carbonati-

Stahlsorte	Beton	alkalisch					carbonatisiert		
		Cl (M.-%)	0	0,5	1	2	>2-5	0	2
unlegiert	ungeschweißte	grün	gelb	orange	rot	rot	rot	rot	rot
	geschweißte	grün	gelb	orange	rot	rot	rot	rot	rot
1.4003 12 Cr	ungeschweißte	grün	grün	grün	gelb	rot	grün	orange	rot
	geschweißte	grün	grün	orange	rot	rot	grün	rot	rot
1.4571 17Cr-12Ni-2Mo	ungeschweißte	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
	geschweißte	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
1.4462 22Cr-5Ni-3Mo	ungeschweißte	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
	geschweißte	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün

Bild 6: Korrosionsverhalten von unlegiertem und nichtrostendem Stahl in Beton (zusammenfassende Darstellung von Auslagerungsversuchen; Chloridgehalte auf den Zementanteil bezogen) [15]

siert chloridhaltig) kein beachtenswerter Korrosionsangriff auf. Chloridgehalte bis 5 M.-% können ohne Angriff ertragen werden.

Das unterschiedliche Korrosionsverhalten von unlegiertem Stahl und nichtrostendem Stahl 1.4571 ist beispielhaft in Bild 7 dargestellt [16]. Bewehrte gerissene Stahlbetonkörper wurden 2,5 Jahre im Außenbereich regelmäßig mit chloridhaltigem Wasser beansprucht. Nach 2,5 Jahren lag der Chloridgehalt des im Riss carbonatisierten

Betons im rissnahen Bereich bei 5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt.

Aufgrund der bekannten Ergebnisse zum Korrosionsverhalten bieten somit austenitische (1.4571) und ferritisch-austenitische nichtrostende Stähle (1.4462), auch im geschweißten Zustand, eine hohe Sicherheit gegenüber Korrosion. Sie empfehlen sich vor allem dann, wenn ein erheblicher Chlordintrag in den Beton nicht verhindert werden kann. Ferritische nichtrostende Stähle (1.4003) sind im car-

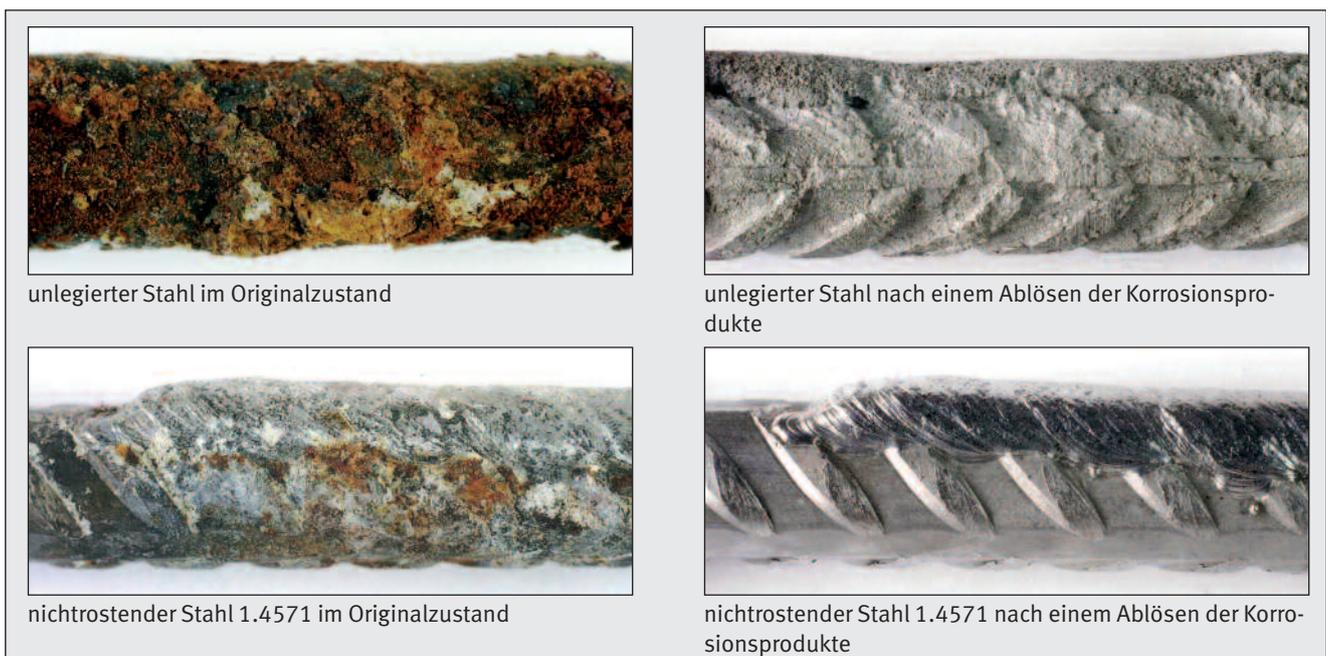


Bild 7: Korrosionszustand von kaltumgeformten Betonrippenstähle nach 2,5 jähriger Lagerung in gerissenem Beton (Betonriss von 0,4 mm Breite kreuzte die Stähle etwa in Bildmitte); der Chloridgehalt betrug nach Abschluss der Versuche etwa 5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt [16]

bonatisierten Beton korrosionssicher. Im ungeschweißten Zustand widersteht der Edelstahl auch mäßig hohen Chloridgehalten. Der ferritisch-austenitische Edelstahl 1.4362 wird bisher von Fachleuten wie der austenitische Stahl 1.4571 eingeordnet.

3.3 Korrosion unlegierter Stähle im Kontakt mit nichtrostendem Stahl (Mischbewehrung)

Zwecks Kosteneinsparung kann zum vorbeugenden Schutz auch eine Mischbewehrung eingesetzt werden. Hierbei werden nichtrostende Betonstähle, z.B. als Hauptbewehrung, nur an solchen Stellen eingebaut, an denen Chloride eindringen können und die Korrosionsgefahr am größten ist, während ansonsten unlegierte Bewehrungsstähle eingesetzt werden. Bei Kontakt von unlegiertem und nichtrostendem Betonstahl und Vorhandensein eines Elektrolyten (feuchter Beton) bildet sich ein galvanisches Element, in dem das edlere Metall (nichtrostender Stahl) als Kathode und das unedlere Metall (unlegierter Stahl) als Anode fungieren kann.

Im passiven Zustand gibt es zunächst kaum einen Potentialunterschied zwischen nichtrostendem und unlegiertem Stahl. Falls der unlegierte Stahl unter Chlorideinwirkung korrodiert und

nichtrostender Stahl sich noch im passiven Zustand befindet, ist theoretisch die Voraussetzung für eine Kontaktkorrosion gegeben. Tatsächlich wurde in Versuchen jedoch festgestellt, dass die Gefährdung beim Kontakt von korrodierter Bewehrung aus unlegiertem Stahl mit nichtrostendem Stahl vernachlässigbar ist [4, 7, 20, 21]. In [20] wurden Versuche zur Makroelementbildung von korrodierendem einbetoniertem unlegierten Stahl mit einerseits passivem unlegierten, aber auch mit nichtrostendem Stahl mittels Messung der Elementstromdichte durchgeführt und bewertet. Bekanntlich ist die Elementstromdichte ein Maßstab für die Korrosion des unedleren Partners im Korrosionselement. Es wurden folgende Situation eines in chloridhaltigem Beton korrodierenden unlegierten Stahls untersucht (Bild 8):

- Kontakt mit einem passiven unlegierten Stahl in Beton ohne Chloridbelastung;
- Kontakt mit nichtrostendem Stahl 1.4571 im Beton ohne Chloridbelastung;
- Kontakt mit nichtrostendem Stahl 1.4571 im Beton mit einer Belastung von 3 M.-% Chlorid.

Beim Kontakt mit passivem unlegiertem Stahl ist die Stromdichte fast 10fach größer als jene beim Kontakt mit nichtrostendem Stahl. Das bedeu-

tet, dass die Korrosion des korrodierenden unlegierten Stahls durch den Kontakt mit nichtrostendem Stahl (im chloridfreien und chloridhaltigen Beton) nicht nachteilig beeinflusst wird. Nichtrostender Betonstahl im Kontakt mit unlegiertem Betonstahl ist demnach keine wirksame Kathode für Makrokorrosionselemente. Als Ursache hierfür kann angeführt werden, dass die kathodische Teilreaktion der Sauerstoffreduktion am nichtrostenden Stahl wesentlich stärker gehemmt ist als am unlegierten Stahl. Eine Elementbildung ist eher beim Kontakt zwischen aktivem und passivem unlegierten Stahl zu erwarten.

4 Werkstoffauswahl der nichtrostenden Betonstähle und erforderliche Betondeckungen

4.1 Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons sowie die Mindestbetondeckung nach Expositionsklassen

Bei der Planung von Bauteilen bzw. Bauwerken sind sowohl lastabhängige als auch die lastunabhängigen Einwirkungen wie eine Korrosionsbeanspruchung zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit zu berücksichtigen. Um dauerhafte Betonkonstruktionen zu erstellen, müssen deshalb auch geeignete Annahmen für die zu erwartenden Umwelteinwirkungen getroffen werden, um durch eine sinnvolle Festlegung der Betongüte und konstruktiver Parameter, wie die Betondeckung, unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen korrosionsbedingte Schäden im Nutzungszeitraum auszuschließen.

In DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-1 [2] sind die Anforderungen an den Beton in Abhängigkeit von den möglichen korrosiven Einwirkungen festgelegt. U.a. werden die Betonzusammensetzung, die Mindestdruckfestigkeitsklassen und die Betondeckung der Bewehrung Expositionsklassen zugeordnet,

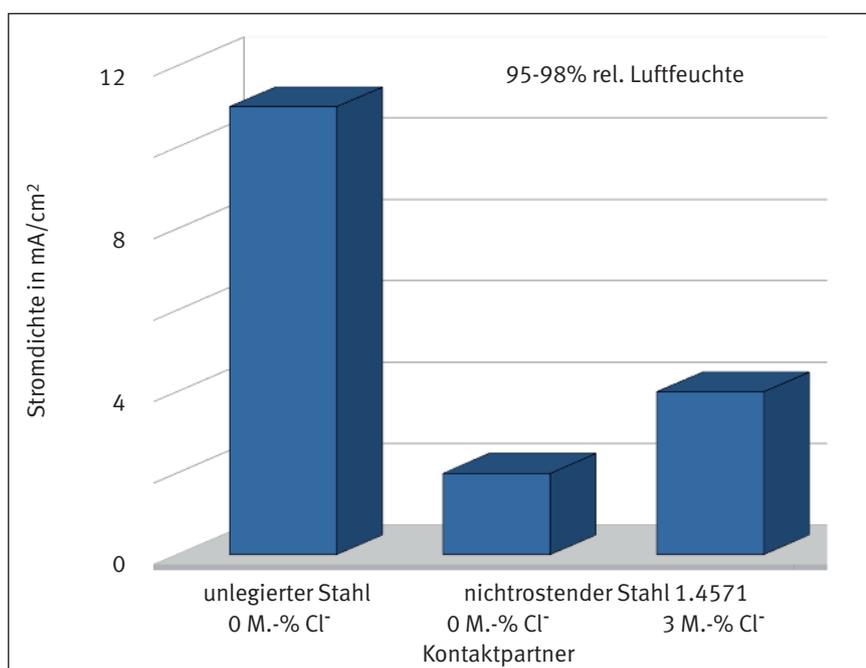


Bild 8 : Stromdichte einer unlegierten Stahlbewehrung in Abhängigkeit vom Kontaktpartner und einer Chloridbelastung im Beton [20]

welche den Korrosionsangriff der eingebetteten Bewehrung sowie den chemischen Angriff und Frostangriff und den Verschleiß des Betons betreffen. In **Tab. 5** sind für die drei typischen Korrosionsbelastungen

- Korrosion durch Carbonatisierung;
- Korrosion ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser;
- Korrosion ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser;

die wichtigsten betonseitigen und konstruktiven Anforderungen genannt.

Zur Berücksichtigung von unplanmäßigen Abweichungen ist die in **Tab. 5** genannte erforderliche Mindestbetondeckung c_{min} durch Addition eines Vor-

haltemaßes Δc zu vergrößern. Dieser Wert beträgt für die Expositionsklasse XC1 10 mm und für alle übrigen Klassen 15 mm. Hieraus ergibt sich die nominelle Betondeckung $c_{nom} = c_{min} + \Delta c$.

4.2 Reduzierte Betondeckung durch Wahl nichtrostender Betonstähle

Als Betonüberdeckung oder einfach Betondeckung wird im Stahlbetonbau der Abstand zwischen der Betonoberfläche und der Außenkante eines vom Beton umhüllten Betonstahls bezeichnet. Eine ausreichende Betondeckung ist bei Stahlbetonbauteilen zur Übertragung der Verbundkräfte zwischen Beton und Bewehrung erforderlich.

Des Weiteren muss die Betondeckung eine genügende Dauerhaftigkeit des Bauteils (Korrosionsschutz des eingebetteten Bewehrungsstahls) sowie einen entsprechenden Feuerwiderstand sicherstellen. Zur Sicherung des Verbundes darf die Mindestbetondeckung c_{min} für Bewehrungsstähle nicht kleiner sein als der Stabdurchmesser d_s des Betonstahls.

Die für herkömmliche (unlegierte) Bewehrungsstähle in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen erforderliche Betondeckung geht aus **Tab. 5** hervor. Die darin genannten Werte gehen, wie bei Dauerhaftigkeitsbemessungen in der Bautechnik üblich, von einer mittleren Lebens- und Nutzungsdauer von mindestens 50

Expositionsklasse	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für Zuordnung	c_{min} (mm)	c_{nom} (mm)	max. w/z-Wert	min. Zement (kg/m ³)	min. Druckfest. (kp/mm ²)
Korrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung							
XC1	trocken oder ständig nass	trockene Innenräume, Beton unter Wasser	10	20	0,75	240	C16/20
XC2	nass, selten trocken	Wasserbehälter	20	35	0,75	240	C16/20
XC3	mäßige Feuchte	Außenbereich, nicht bewittert	20	35	0,65	260	C20/25
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbereich, bewittert	25	40	0,60	280	C25/30
Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser							
XD1	mäßige Feuchte	Sprühnebelbereich neben Verkehrsflächen	40	55	0,55	300	C30/37
XD2	nass, selten trocken	Solebäder, chloridhaltige Industrieabwässer	40	55	0,50	320	C35/45
XD3	wechselnd nass und trocken	Spritzwasserbereich neben Verkehrsflächen	40	55	0,45	320	C35/45
Korrosion, ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser							
XS1	Meeresluft	Außenbauteile in Küstennähe	40	55	0,55	300	C30/37
XS2	ständig unter Wasser	Hafenanlagen, Off-shore Bereich	40	55	0,50	320	C35/45
XS3	wechselnd Meerwasser		40	55	0,45	320	C35/45

c = Betondeckung

Spritzwasserbereich / Sprühnebelbereich: etwa 0 bis 10 m / 10 bis 30 m neben einer taumittelbehandelten, verkehrsreichen Straße (innerhalb einer Ortschaft)

Meeresluft: Entfernung bis zu etwa 1 km von der Küste

Tab. 5: Anforderungen an die Betonzusammensetzung, die Betongüte und die Betondeckung in Abhängigkeit von möglichen korrosiven Einwirkungen (Expositionsklassen) (Auszug aus DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-1 [2])

Expositions-klasse	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für Zuordnung	empfohlener Werkstoff
Korrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung			
XC1	trocken oder ständig nass	trockene Innenräume, Beton unter Wasser	hier reicht im Regelfall die Anwendung herkömmlicher (unlegierter) Betonstähle unter Berücksichtigung der in DIN EN 206-1/DIN 1045-1 genannten erforderlichen Betongüten und Betondeckungen aus
XC2	nass, selten trocken	Wasserbehälter	
XC3	mäßige Feuchte	Außenbereich, nicht bewittert	
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbereich, bewittert	1.4003, 1.4301
Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser			
XD1	mäßige Feuchte	Sprühnebelbereich neben Verkehrsflächen	1.4301, 1.4571, 1.4362
XD2	nass, selten trocken	Solebäder, chloridhaltige Industrieabwässer	hier reicht im Regelfall die Anwendung herkömmlicher (unlegierter) Betonstähle ¹⁾
XD3	wechselnd nass und trocken	Spritzwasserbereich neben Verkehrsflächen	1.4571, 1.4429, 1.4529, 1.4362, 1.4462
Korrosion, ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser			
XS1	Meeresluft	Außenbauteile in Küstennähe	1.4301, 1.4571, 1.4362
XS2	ständig unter Wasser	Hafenanlagen, Off-shore Bereich	hier reicht im Regelfall die Anwendung herkömmlicher (unlegierter) Betonstähle ¹⁾
XS3	wechselnd Meerwasser		1.4571, 1.4429, 1.4529, 1.4362, 1.4462

¹⁾ Verwendung von nichtrostenden Betonstählen wie bei XS3/XD3, falls mit Makrokorrosionselementen zu rechnen ist

Tab. 6: Zuordnung der nichtrostenden Betonstähle zu Expositionsklassen aufgrund von Ergebnissen der Forschung [5, 6]

Jahren bei angemessenem Instandhaltungsaufwand aus. Die genannten Betondeckungen setzen einen Beton mit den aufgeführten betontechnologischen Eigenschaften voraus.

Die bauaufsichtlichen Zulassungen für kaltgerippten nichtrostenden Betonstahl in Ringen enthalten auch Angaben für eine Reduzierung der nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-1 [2] erforderlichen Betondeckung. Für die Betondeckung der nichtrostenden Bewehrungen 1.4571, 1.4362 und 1.4462 gilt für alle Expositionsklassen die für XC1 ausgewiesene Betondeckung in **Tab. 5**. Es ist jedoch zu beachten, dass zur Verbundsicherung die Mindestbetondeckung c_{\min} nicht kleiner sein darf als der Stabdurchmesser d_s des Betonstahls.

4.3 Wahl eines geeigneten nichtrostenden Bewehrungsstahls

Die nichtrostenden Betonstähle könnten aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit im ungeschweißten und geschweißten Zustand wie in **Tab. 6** angegeben angewendet werden. Diese Tabelle weicht insofern von den Empfehlungen der bauaufsichtlichen Zulassungen für kaltgerippten nichtrostenden Betonstahl in Ringen ab, als hier der Edelstahl 1.4462 für eine hohe Chloridbelastung empfohlen wird, während die Edelstähle 1.4571 und 1.4362 nur für eine mäßige Chloridbelastung empfohlen werden. Labor- und baupraktische Untersuchungen haben jedoch eindeutig gezeigt, dass auch der Edel-

stahl 1.4571 hohen Chloridbelastungen im Beton gewachsen ist (**Bilder 5 und 6**).

Bei den Angaben in **Tab. 6** ist zu beachten, dass die Angaben für XS2 und XD2 sich auf ein komplett eingetauchtes bzw. durchweg nasses Bauteil beziehen. Bei ständig in Wasser eingetauchten Stahlbetonbauteilen kann nicht der für die Korrosion erforderliche Sauerstoff durch die Betondeckung an den Stahl gelangen, weshalb Korrosion nicht möglich ist. Wenn dieses nicht der Fall ist und sich beispielsweise bei nur teilweisem Eintauchen in das Meerwasser (z.B. Kaimauer) Makrokorrosionselemente ausbilden können [1], so sind nichtrostende Bewehrungsstähle wie für XS3 bzw. XD3 genannt anzuwenden (**Bild 9**).



Bild 9: Nichtrostende Betonbewehrung in durch salzhaltige Luft und Dünung belasteten Außenwänden und Stützfeilern der Moschee König Hassan II. in Casablanca (Marokko)

5 Anwendung nichtrostender Betonstähle

5.1 Richtlinien

Nichtrostende Bewehrungsstähle werden weltweit eingesetzt, jedoch ist deren Anteil an der gesamten verbauten Bewehrung eher gering. Zum Stand der internationalen Normung bzw. Richtlinien findet man Angaben in [4, 6, 8].

Der Umgang mit nichtrostenden Bewehrungsstählen wird in wenigen Ländern wie z.B. Deutschland [10], Frankreich [22], Großbritannien [8] und den USA [23] besonders geregelt. In China, Indien und Japan orientiert man sich an den amerikanischen Regelungen, im mittleren Osten eher an den britischen. Die in Deutschland verwendeten nichtrostenden Betonstähle besitzen im Regelfall eine Bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für

Bautechnik in Berlin. In der Bautechnik können allerdings auch anderweitige Konstruktionsteile aus nichtrostendem Stahl in Beton eingebettet werden. Die Anwendung solcher Bauteile (z.B. Ankerschienen und Kopfbolzenverankerungen, Anschlussbewehrungen sowie Befestigungsmittel) wird teilweise durch Bauteilzulassungen geregelt. Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6 [12] deckt den Korrosionsschutz bei atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung ab

und gilt nicht für nichtrostende Betonstähle und auch nicht für anderweitige Produkte aus nichtrostendem Stahl im Kontakt mit Beton. Auf europäischer Ebene ist derzeit eine Norm über nichtrostenden Betonstahl in Arbeit.

In den verschiedenen Ländern finden vor allem die folgenden Edelmetalle im kaltumgeformten und warmgewalzten Zustand Anwendung im Betonbau (die Bezeichnung der Stähle erfolgt in Anlehnung an DIN EN 10088 [9]):

Deutschland	1.4003, 1.4571, 1.4362, 1.4462, 1.4429, 1.4529
Frankreich	breite Palette von Stählen, empfohlen werden 1.4511, 1.4301, 1.4311, 1.4462, 1.4539
Großbritannien	1.4301, 1.4436, 1.4429, 1.4162, 1.4362, 1.4462, 1.4501, 1.4529
Italien	1.4301, 1.4401, 1.4571, 1.4436, 1.4462
Schweiz	1.4003, 1.4301, 1.4401, 1.4362, 1.4462
Skandinavien	1.4301, 1.4401, 1.4436 (Norwegen, Finnland)
USA	breite Palette von Stählen, am meisten verwendet werden 1.4404, 1.4429, 1.4462



Bild 10: Landebrücken aus Stahlbeton in Progreso (Mexiko, Yucatan Halbinsel) [25]; rechte Landungsbrücke nach 60 Jahren mit nichtrostendem Betonstahl bewehrt; linke Landungsbrücke nach ca. 35 Jahren mit unlegiertem Betonstahl bewehrt

5.2 Baupraktische Erfahrungen

Ältere und neuere Ausführungen von weltweit mit nichtrostendem Betonstahl bewehrten Betonbauten sind in [4, 8, 24] beschrieben. Die geschilderten Erfahrungen sind ausschließlich positiv.

Das bekannteste Beispiel einer langzeitigen Anwendung nichtrostender Betonstähle ist die mehr als 2 km lange Landebrücke aus Stahlbeton in Progreso (Mexiko, Yucatan Halbinsel) [25]. Die Brücke wurde um 1940 gebaut. Wegen des heißen und feuchten Meeresklimas, der Verwendung von relativ porösem Beton mit Kalksteinzuschlag aus der Umgebung und entsprechend erhöhter Korrosionsgefahr für die Bewehrung wurde an kritischen Stellen eine Bewehrung aus nichtrostendem Stahl verwendet, wobei die verwendete Legierung der heutigen Legierung 1.4301 entspricht. Insgesamt wurden 220 Tonnen nichtrostender Stahl mit 28 bis 30 mm Durchmesser eingesetzt. Bis heute wurden an der Brücke keine größeren

Unterhaltsarbeiten benötigt. Eine detaillierte Untersuchung 1999 ergab, dass sich die Brücke in einem einwandfreien Zustand befindet. In den 60-er Jahren wurde parallel zur bestehenden Konstruktion eine Landungsbrücke aus Stahlbeton unter Verwendung von herkömmlichem Betonstahl gebaut, die infolge von Korrosion eingestürzt und nahezu verschwunden ist (Bild 10).

5.3 Anwendungsbeispiele

Nichtrostende Betonstähle empfehlen sich in erster Linie überall dort, wo mit einer häufigen Feuchtigkeitsbeaufschlagung und mit der Anwesenheit von Chloriden an der Betonoberfläche zu rechnen ist. Dieses sind in erster Linie Meeresbauwerke und Verkehrsbauwerke (z.B. Parkhäuser, Straßenbrücken, Stützwände und Tunnelauskleidungen) (Bilder 11 und 12). In den folgenden Abschnitten soll auf einige bereits zur Anwendung kommende Sonderanwendungen von nichtrostendem Stahl im Betonbau besonders hingewiesen werden.

Sandwich-Elemente

Sandwich-Elemente sind zweischalige Dach-, Wand-, oder Deckenbauteile aus Beton mit dazwischen liegender Dämmschicht. Die beiden äußeren Schalen werden durch einen Gitterträger (Bewehrungselement) fest miteinander verbunden. Die Außenschale dient dem Witterungsschutz, während die Innenschale wirkende Kräfte weiterleitet. Die Dämmschicht kann aus einer Wärmedämmung (PU-Hartschaum, Mineralfaserplatten) an der Innenseite einer äußeren Fertigplatte und einem Luftraum bestehen oder die Wärmedämmung füllt den gesamten Raum zwischen den Fertigplatten aus. Alternativ kann der Luftraum auf der Baustelle nach dem Einbau auch mit Ortbeton verfüllt werden.

Der Gitterträger besteht aus dem jeweils einbetonierten Obergurt und Untergurt und den dazwischen liegenden Diagonalen. Abschnitte der Diagonalen liegen in einem abgeschlossenen Luftraum zwischen Dämmung und Fertigplatte und ein Teil der Diagonalen wird stets von der Dämmung umgeben sein. Die Zulassungen für wärmege-



Bild 11: Nichtrostende Betonstahlmatten in einer Lawinenschutz-Konstruktion in Frankreich



Bild 12: Nichtrostende Bewehrung einer Stütz wand zur Uferbefestigung eines Flusses in Tschechien

dämmte Plattenwände mit Gitterträger verlangen für eine derartige Anwendung einen nichtrostenden Betonstahl BSt 500 NR/NG.

Rissbehaftete Bauteile, Anschlussbewehrung

Betonbauwerke unterliegen einer zeitlich veränderlichen Verformung, die im Wesentlichen durch lastunabhängige Kräfte (z.B. Temperaturänderungen) hervorgerufen wird. Bei Behinderung der Verformungen kann dieses Risse zur Folge haben, wodurch korrosionsfördernde Stoffe (z.B. Chloride) rasch ins Betoninnere zum Bewehrungsstahl gelangen. Hinzu kommt, dass Betonrisse in verhältnismäßig kurzer Zeit carbonatisieren. Folglich können Betonstähle im Rissbereich des Betons bevorzugt korrodieren. Diese Problematik bezieht sich z.B. auf „lange“ Konstruktionen wie Parkdecks oder Stützwände, bei denen trotz Dehnfugen Trennrisse aus behinderter Verformung auftreten können. Auch die Fugen an der Anschlussbewehrung zwischen Betonfertigteilen und Ortbeton sind im Hinblick auf Dichtigkeit Schwachstellen der Konstruktion und müssen korrosionstechnisch sicher mit geeigneten Dichtstoffen abgedichtet werden. Sie können aber auch mit nichtrostendem Betonstahl bewehrt werden, um Korrosion zu vermeiden.

Was den gerissenen Beton (Trennrisse) anbetrifft, so wird zum Zweck des Korrosionsschutzes für befahrene und chloridhaltigem Wasser ausgesetzte Bauteile häufig eine rissüberbrückende Beschichtung vorgesehen. Da diese Maßnahme nicht dauerhaft ist und einer wiederkehrenden Erneuerung bedarf, wurden korrosionsbeständige nichtrostende Betonstähle (1.4571 und 1.4462) in gerissenem chloridhaltigem Beton (> 5 M.-% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht) in baupraktischen Auslagerungsversuchen unter Einbeziehen der wesentlichen Einflussparameter des Stahls (Stahlsorte, Schweißung), der Konstruktion (Betondeckung, Rissbreite), des Betons (carbonatisierter, nicht carbonatisierter Betonriss) und typische Problemfälle (Parkdecks, Stützwand) untersucht und bewertet [16]. Der unlegierte Stahl unterlag bereits nach wenigen Wochen in Betonrissen einer

starken abtragenden Korrosion. Die nichtrostenden Stähle 1.4571 mit austenitischem Gefüge und 1.4462 mit ferritisch-austenitischem Gefüge wurden im Betonriss in einem Versuchszeitraum von 2,5 Jahren nicht angegriffen.

Balkonanschlüsse

Bei konventionellen Konstruktionen für frei auskragende bzw. frei gelagerte Stahlbetonplatten (z.B. außen liegende Balkone, Podeste) können Probleme hinsichtlich der Wärmedämmung, Trittschalldämmung und Bewehrungsstahlkorrosion am Übergang außen liegende Betonbauteile/Decke bzw. Wand entstehen. In diesen Bereichen kann es zur Ausbildung kritischer Wärmebrücken kommen, bedingt durch spezielle geometrische Verhältnisse oder durch die Aneinanderreihung von Baustoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit. Es findet ein starker Wärmeabfluss nach außen statt, welcher zur Erniedrigung der inneren Oberflächentemperatur im Bauwerk führt. Die Folge einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur der Raumluft ist die Bildung von Tauwasser auf der Bauteiloberfläche mit entsprechenden Folgeerscheinungen (z.B. Schimmelpilz und feuchte innere Ecken).

Besonders stark wirkende Wärmebrücken sind freiauskragende Balkone (**Bild 1**), da die Abkühlung sowohl nach der Ober- als auch nach der Unterseite der Balkonfläche gegeben ist. Durch den Einsatz eines wärmegeprägten Kragplattenanschlusses, der unter Verwendung von nichtrostendem Stahl erstellt wurde, kann eine Verbesserung erzielt werden, da für den Wärmeabfluss auch die Bewehrungsstähle verantwortlich sind. Austenitischer nichtrostender Stahl besitzt eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit ($\approx 15 \text{ W/m K}$) und erreicht damit gegenüber unlegiertem Betonstahl einen um 50 bis 60 % geringeren Wärmeabfluss. Durch die Verwendung eines wärmedämmenden Kragplattenanschlusses mit derartigen nichtrostenden Betonstählen wird jedoch nicht nur eine effizientere thermische Trennung der außen liegenden Balkonplatte vom warmen Innenbereich erreicht, sondern auch die Korrosionsbeständigkeit wird im Übergangsbereich sichergestellt.

Nichtgefügedichter Leichtbeton

Die physikalische Schutzwirkung eines Betons ist der Diffusionswiderstand gegen Zutritt von Korrosionsstimulatoren (Wasser, Chloride, CO_2). Dieser Schutz ist bei den höherwertigeren Normalbetonen und den gefügedichten Leichtbetonen i.a. gegeben. Die nichtgefügedichten Leichtbetone (z.B. Porenbeton), welche zum Zwecke der Gewichtseinsparung und des Wärmeschutzes eingesetzt werden, weisen im Vergleich aufgrund ihres porigen Gefüges eine viel geringere diesbezügliche Schutzwirkung auf. Die in hohem Umfang vorhandenen Makroporen sind durchlässig für Gase und Wasser sowie dessen Inhaltsstoffe. Mit ungeschütztem unlegiertem Betonstahl bewehrte nichtgefügedichte Leichtbetone sind daher nicht einsetzbar, falls die Bauteiloberflächen bewittert werden. Selbst bei einer Außenbeschichtung von Porenbeton kann eine zeitweise Durchfeuchtung des Betons nicht in jedem Anwendungsfall ausgeschlossen werden.

Da bei nichtgefügedichten Betonen ein vollständiger Korrosionsschutz der Stahleinlage nicht gegeben ist, müssen diese zusätzlich geschützt werden. Bisherige Schutzsysteme (Zementleimhüllung, bituminöse Überzüge) können bautechnische Mängel aufweisen. Durch den Einsatz nichtrostender Bewehrungsstähle kann dieser Korrosionsgefahr wirksam und zuverlässig begegnet werden [1, 17].

6 Kosten

6.1 Allgemeine Zusammenhänge

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit eines Bauwerks wird der verantwortungsbewusste Ingenieur eine Kosten-Nutzen-Analyse und eine Risikoeinschätzung durchführen, welche die Materialkosten, die Erstellungskosten und auch die Unterhaltungs- bzw. Instandsetzungs- oder Erneuerungskosten beinhalten. Gerade letztere werden jedoch bei der Bauwerkserstellung häufig außer Acht gelassen. Bauteile unterliegen immer einer natürlichen Alterung und dem Verschleiß, auch infolge Korrosion, so

dass keine unbegrenzte Lebensdauer erwartet werden kann. Eine Verwendung von Werkstoffen mit geringer Dauerhaftigkeit ist jedoch oft mit hohen Gesamtkosten für das Bauwerk behaftet, da neben den reinen Materialkosten auch die Folgekosten in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einzubeziehen sind. Diese gesamten Betriebskosten können dann die eigentlichen Herstellkosten um ein Vielfaches übersteigen.

Insbesondere beim Einsatz von nichtrostendem Betonrippenstahl sind die anfänglichen Werkstoffkosten um ein mehrfaches höher als beim unlegierten Betonrippenstahl. Ursache ist der Anteil an teuren Legierungselementen, welche die Kosten für die einzelnen nichtrostenden Stahlsorten wesentlich beeinflussen. Nichtrostender Betonrippenstahl ist größenordnungsmäßig um das 4 bis 8fache teurer als herkömmlicher Betonrippenstahl. Die Zusatzkosten für den Ersatz der unlegierten Bewehrung durch nichtrostende Bewehrung betragen i.a. zwischen 0,5 % und 15 % der gesamten Baukosten [3].

Bei ansonsten aufwendigen Konstruktionen geht der Preis für die nichtrostende Bewehrung von Betonbauteilen nicht wesentlich in die Gesamtkosten ein. Auch die Verwendung einer Mischbewehrung (nichtrostende Betonstähle nur in stark korrosionsgefährdeten Bereichen) senkt die Zusatzkosten für den Korrosionsschutz. Zu einem höheren Anteil von Mehrkosten kommt es eher bei stärker bewehrten einfacheren Konstruktionen und wenn die gesamte Bewehrung aus nichtrostendem Stahl besteht.

Bei Verwendung geeigneter nichtrostender Stähle fallen keine zusätzlichen Betriebskosten für Instandsetzung und Erneuerungsmaßnahmen während der gesamten Lebensdauer des Bauwerkes an. Letztendlich sind Konstruktionen, die unter Verwendung nichtrostender Betonstähle erstellt werden, kostengünstiger und zuverlässiger über lange Zeiträume.

6.2 Kosten-Nutzen-Analyse

Im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse, basierend auf betrieblicher Kostenrechnung, wurden in [26] die Le-

bensdauerkosten einer Straßenbrücke ermittelt, falls diese unter Verwendung korrosionsgeschützter Bewehrung erstellt wird. Es handelt sich um die aufwendige Konstruktion zur Überquerung des Rheins bei Schaffhausen in der Schweiz. Die statischen Betonelemente dieser Brücke sind der Kabelpylon und die Längsträger der Brückenplatte. Die Stahlbetonbauteile wurden wie folgt bewehrt:

- Für die Hautbewehrung unter den exponierten Flächen (Spritzwasserzone) der Längsträger der Brückenplatte wurde der nichtrostende Stahl 1.4301 verwendet;
- Für die Hautbewehrung des Pylons in der Spritzwasser- und Sprühnebelzone wurde der nichtrostende Stahl 1.4462 eingesetzt;
- Die restliche Bewehrung im Inneren der Querschnitte ist aus unlegiertem Betonstahl S 500.

Diese unter Verwendung von nichtrostendem Bewehrungsstahl durchgeführte Konstruktion hat wegen der höheren Ausgaben für den nichtrostenden Stahl höhere Herstellungskosten, jedoch auch eine höhere Beständigkeit während der Nutzungsdauer des Bauwerkes von 80 Jahren. Zusätzliche Unterhaltsmaßnahmen und Betriebskosten wurden als nicht erforderlich erachtet.

Die Lebensdauer-Kosten-Ermittlung berechnet die gesamten Kosten unter der Annahme, dass die Hautbewehrung aus unlegiertem Betonstahl oder aus nichtrostendem Stahl hergestellt wurde. Die Verwendung von nichtrostendem Stahl in den korrosionsgefährdeten Bereichen der Konstruktion erhöhte die gesamten Baukosten (Herstellungskosten) dieser aufwendigen Konstruktion von 9,76 Millionen Euro auf 9,81 Millionen Euro, also nur um 0,5%. Dieses ergibt sich aufgrund des geringen Anteils der Bewehrungsstahlkosten an den gesamten Herstellungskosten. Zusätzlich zu beachten ist, dass es sich um eine Mischbewehrung handelt, welche die Bewehrungsstahlkosten niedrig hält. Die gesamten Lebensdauer-Kosten sind bei Verwendung von nichtrostendem Stahl mit 9,81 Millionen Euro um etwa 18 % günstiger als bei Verwendung von unlegiertem Betonstahl (12 Millionen Euro). Diese Kostendifferenz wird

hauptsächlich durch die künftigen Betriebskosten (Instandsetzung, Nutzungsausfall) verursacht, die für den Erhalt des Bauwerkes während der Nutzungsdauer nötig sind, falls unlegierter Betonstahl verwendet wird.

7 Literatur

- /1/ U. Nürnberger
Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen
Bauverlag Wiesbaden, 1995
- /2/ **DIN EN 206-1** (07.2001)
Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
DIN 1045-1-4 (08.2008)
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- /3/ U. Nürnberger, S. Agouridou
Nichtrostende Betonstähle in der Bautechnik
Beton- und Stahlbetonbau 96, 2001, S. 561-570 und 603-613
- /4/ F. Hunkeler
Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstählen im Betonbau
Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen, Heft 543, 2000, 96 Seiten
- /5/ U. Nürnberger, H.-W. Reinhardt
Corrosion protection of reinforcing steels
Fib bulletin 49, technical report, Lausanne, 2009, 116 Seiten
- /6/ U. Nürnberger
Stainless Steel in Concrete
London: The Institute of Materials, 1996, Book 657, 30 Seiten
- /7/ D.J. Cochrane
Making the Infrastructure Work
International Congress Stainless Steel, Neuss, 1996, S. 157-162
- /8/ **Guidance on the use of stainless steel reinforcement**
Concrete Society Technical Report No. 51, Slough Berkshire, 1998
BS 6744:2009 “Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete. Requirements and test methods”
- /9/ **DIN EN 10088** (09.2005)
Nichtrostende Stähle - Teil 1: „Verzeichnis der nichtrostenden Stähle“
- Nichtrostende Stähle - Teil 3: „Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung“
- /10/ **Zulassung Z-1.4-...** (Beispiel)
Kaltgerippter, nichtrostender Betonstahl in Ringen BSt 500 NR (B) aus den Werkstoffen 1.4571 und 1.4462, Nenn-durchmesser 6 bis 14 mm
Zulassung Z-1.4-... (Beispiel)
Nichtrostender, kaltverformter, gerippter Betonstahl in Ringen BSt 500 NR (A)
Werkstoff 1.4362, Nenndurchmesser 6 bis 12 mm
- /11/ **DIN 488** (08.2009)
Betonstahl
- /12/ **Bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6** (04.2009)
Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen
- /13/ **EN ISO 17660** (12.2006)
Schweißen von Betonstahl
- /14/ E. Kunze
Korrosion und Korrosionsschutz
Wiley-VCH Weinheim, 2001
- /15/ U. Nürnberger, W. Beul, G. Onuseit
Korrosionsverhalten geschweißter nichtrostender Bewehrungsstähle in Beton
Bauingenieur 70 (1995), S. 73-81
- /16/ U. Nürnberger, W. Beul
Korrosion von nichtrostendem Betonstahl in gerissenem Beton
Otto-Graf-Journal 10, 1999, S. 23-37
- /17/ T. Mansour
Möglichkeiten des Korrosionsschutzes von Bewehrungsstahl in Leichtbeton
Dissertation Universität Stuttgart 1994
T. Mansour
Porenbeton, Korrosionsschutz von Bewehrungsstahl
Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999) 8, S. 321-327
- /18/ L. Bertolini, F. Bolzoni, T. Pastore, P. Pedferri
Stainless Steel Behaviour in Simulated Concrete Pore Solution
British Corrosion Journal 31 (1996), S. 218 - 222
- /19/ F. Hunkeler, L. Baurle
Korrosionsbeständigkeit eines nichtrostenden Chromstahls in karbonatisiertem Normal-, Leicht- und Recyclingbeton
Beton- und stahlbetonbau 105, 2010, S. 797-904
- /20/ L. Bertolini, M. Gastaldi, M.P. Pedferri, P. Pedferri
Galvanic Corrosion in Concrete
COST 521 Workshop, Annecy, Sept. 1999
- /21/ Force Institutet
Corrosion Aspects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel in concrete
Concrete Inspection and Analysis Department, Broenby (DK), 1999
- /22/ **Betonbewehrungen aus rostfreiem Stahl**
Technische Dokumentationsreihe CIMBETON, T81
- /23/ **American Society of Testing and Materials**
ASTM A955M-96: Standard Specification for deformed and plain stainless steel bars for concrete reinforcement, 1996
ASTM A276-10: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes, 2004
- /24/ A.E. Bauer
Nichtrostende Stähle für Betonbewehrungen
Bauer Engineering AG, Ebmatingen/Schweiz, 2000, ISBN 3-9522005-0-6
- /25/ Arminox
Pier in Progreso, Mexico
Inspection report, 1999
- /26/ Euro Inox
Edelstahl Rostfrei im Lebensdauerkostenvergleich
London 1992.



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 10 22 05
40013 Düsseldorf
www.edelstahl-rostfrei.de