

Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstählen im Betonbau

Zusammenfassung

Nichtrostende Stähle weisen gegenüber normalen, verzinkten oder epoxidharzbeschichteten Betonstählen eine wesentlich höhere Korrosionsbeständigkeit auf. Sie können - trotz höherer Materialkosten - eine zweckmässige zusätzliche Schutzmassnahme für besonders gefährdete Bauteile darstellen. Die Zweckmässigkeit kann im Einzelfall über die Lebensdauer-Kosten beurteilt werden. Die weltweit zunehmende Zahl von Anwendungen belegt eindrücklich das Bestreben der Bauherren, in Anbetracht der vielen schlechten Erfahrungen in Zukunft frühzeitige Instandsetzungen zu vermeiden und mit nichtrostenden Betonstählen dauerhaftere und wirtschaftlichere Betonbauten zu realisieren. Dies geht einher mit der abnehmenden Risikobereitschaft der Bauherren bzw. mit ihrem gestiegenen Bedürfnis, die gestellten Anforderungen an Bauwerke mit grösserer Sicherheit zu erreichen als bisher.

Durch das Vermeiden von umfangreichen Instandsetzungen werden nachhaltig nicht nur finanzielle, sondern auch materielle Ressourcen eingespart. Zudem können mit dem Einsatz von nichtrostenden Betonstählen die mit jeder Instandsetzung verbundenen Risiken bzgl. Wirkung und Dauerhaftigkeit vermieden werden.

Unter der Bezeichnung „nichtrostende Stähle“ wird eine grosse Gruppe von Stählen zusammengefasst, die sich gegenüber un- und niedriglegierten Stählen durch eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit auszeichnen. Sie weisen einen Chromgehalt von über 10.5%, in vielen Fällen zusätzlich auch Nickel, Molybdän und Stickstoff sowie gleichzeitig i.a. einen tiefen Gehalt an Begleitelementen wie z.B. Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor auf. Sie lassen sich in fünf Gruppen einteilen, die sich bezüglich Mikrostruktur und Eigenschaften deutlich unterscheiden:

- Austenitische nichtrostende Stähle.
- Austenitisch-ferritische nichtrostende oder sogenannte Duplexstähle.
- Ferritische nichtrostende Stähle.
- Martensitische nichtrostende Stähle.
- Ausscheidungsgehärtete nichtrostende Stähle.

Als Betonstähle werden lediglich Stähle aus den ersten drei Gruppen eingesetzt.

Die Frage, für welche Anwendungen bzw. für welche Bauteile oder Bauwerke nichtrostende Stähle als teilweiser oder vollständiger Ersatz für normale Betonstähle in Betracht zu ziehen sind, kann nicht allgemein beantwortet werden. Viele Faktoren und Kriterien sind nur im Einzelfall korrekt zu bewerten. Nichtrostende Stähle kommen vor allem wegen der guten Korrosionsbeständigkeit und deshalb vorab für Bauteile, die chloridhaltigem Wasser ausgesetzt sind, eine lange Nutzungsdauer aufweisen müssen und deren Instandsetzung schwierig oder kostenintensiv ist, in Frage.

Die Beständigkeit nichtrostender Stähle gegen Loch- und Spaltkorrosion wird im wesentlichen durch die Elemente Chrom, Molybdän und Stickstoff positiv, durch die Elemente Schwefel, Mangan (vor allem zusammen mit Schwefel) und Kohlenstoff negativ beeinflusst. Die positiv wirkenden Elemente werden in der sogenannten Wirksamkeit zusammengefasst. Die

Wirksumme hat keine streng wissenschaftliche Bedeutung. Trotzdem stellt sie eine brauchbare Richtschnur für die Beurteilung der Beständigkeit von nichtrostenden Stählen (und Nickellegierungen) gegen Lochfrass, Spalt- und Spannungsrissskorrosion dar.

Die **Tabelle Z.1** fasst die vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen über die Korrosionsbeständigkeit und die Einsatzmöglichkeiten von nichtrostenden Stählen im Beton – basierend auf einer sehr umfangreichen Literaturstudie und den Kontakten zu mehreren ausländischen Spezialisten - zusammen (s. **Kap. 3**). Die Einteilung der Stähle in Beständigkeitsklassen soll die Übersicht und die Wahl einer geeigneten nichtrostenden Stahlqualität für eine bestimmte Anwendung erleichtern. Dabei wurde zum Vergleich auch der normale, epoxidharzbeschichtete und verzinkte Betonstahl mit einbezogen. Eine gesicherte Beurteilung des Langzeitverhaltens von epoxidharzbeschichteten Stählen fällt ausserordentlich schwer. International ist diesbezüglich kein Konsens vorhanden. (s. **Kap. 3, 4.1, 4.3 und 4.7**). Die **Tabelle Z.2** gibt eine Übersicht über die heute verfügbaren, gerippten nichtrostenden Betonstähle.

Die Grenzen der Beständigkeitsklassen wurden bei den nichtrostenden Stählen konservativer angesetzt als dies teilweise aus Labor- und Felduntersuchungen hervorgegangen ist. Damit soll den unter praktischen Verhältnissen vorhandenen „härteren Prüfbedingungen“ Rechnung getragen werden. Die **Tabelle Z.1** darf nicht „überinterpretiert“ werden, spielen doch bei der Initiierung und dem Fortschritt der Korrosion vielfältige Faktoren eine Rolle (s. **Kap. 4.4**). Zudem kann die Korrosionsbeständigkeit durch verschiedene Bearbeitungsschritte ungünstig beeinflusst werden (z.B. Kaltverformen, Schweißen, Wärmebehandlungen, s. **Kap. 3 und 4.4**).

Für mittel bis hoch chlorid-belastete Bauteile oder Bauwerke, die eine sehr lange, instandsetzungsfreie Nutzungszeit (70 bis 100 Jahre) haben sollten oder deren Instandsetzung sehr schwierig auszuführen, sehr zeit- oder kostenintensiv ist, sollten nur CrNi- oder CrNiMo-Stähle mit einer Wirksumme $WS > 17$ verwendet werden. Für derartige Anwendungen sind Chromstähle nicht zu empfehlen.

Sind hohe bis sehr hohe Chloridgehalte zu erwarten oder liegen bei hoher Chloridbelastung gleichzeitig noch weitere ungünstige Umstände oder korrosiv wirkende Einflüsse vor (z.B. wasserführende Risse, Überdeckung unter 30 mm, kein sehr dichter oder nicht gefügedichter Beton, erhöhte Temperaturen) oder bestehen grössere Unsicherheiten bei der Ausführung, so sollten nur CrNiMo-Stähle mit einer $WS > 23$ (Beständigkeitsklasse 3) oder sogar > 31 (Beständigkeitsklasse 4) zum Einsatz gelangen. Dies gilt auch für besonders wichtige Bereiche der Bewehrung, die unter keinen Umständen korrodieren dürfen oder die nur schlecht oder gar nicht zugänglich, zu kontrollieren und instand zusetzen sind.

Weiter muss darauf hingewiesen werden, dass bei brandgefährdeten Bauteilen mit der Möglichkeit einer länger andauernden Einwirkung von Temperaturen $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ Duplexstähle wegen der Gefahr der $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Versprödung nicht eingesetzt werden sollten.

Da nichtrostende Stähle viel teurer sind als normale Betonstähle, sollten diese gezielt und selektiv bzw. partiell eingesetzt werden. Dies führt zu Mischbewehrungen und der Frage nach der Kompatibilität von normalen und nichtrostenden Stählen. Wie im **Kap. 4.5** dargelegt wird, sind Mischbewehrungen aus theoretischen und praktischen Gründen ohne besondere Risiken oder Einschränkungen zulässig. Es ist keine grössere Korrosionsgefährdung zu befürchten als bei konventionell bewehrten Bauteilen ohne Mischbewehrung.

Um den aktuellen Stand der Anwendungen von nichtrostenden Stählen bei Stahlbetonbauten in der Schweiz zu erfahren, wurde in der zweiten Hälfte 1999 eine Umfrage bei den kantonalen Tiefbauämtern sowie ergänzend bei zwei Bundesämtern, sieben städtischen Bauämtern und fünf Bahnbetreibern wie auch bei einigen schweizerischen Stahllieferanten durchgeführt (s. **Kap. 4.1**).

Diese Umfrage hat Folgendes ergeben:

- Nur drei kantonale Tiefbauämter haben bisher nichtrostende Betonstähle eingesetzt.
- Ein Grossteil der kantonalen Tiefbauämter ist der Überzeugung, dass andere Massnahmen (z.B. Konstruktion, Betonqualität, Überdeckung, Oberflächenschutz oder Planung als Verschleissteile, besseres Qualitätsmanagement) wirtschaftlicher sind.
- Die überwiegende Mehrheit der kantonalen Tiefbauämter nennt die Kosten als Haupthindernis für den Einsatz von nichtrostenden Stählen.
- Fehlende Normen und Richtlinien sowie ungenügende Kenntnisse der am Bau Beteiligten erachten die kantonalen Tiefbauämter als weitere wichtige Hindernisse.
- Viele kantonale Tiefbauämter würden eine Richtlinie für die Anwendung von nichtrostenden Stählen im Betonbau und eine verstärkte Weiterbildung auf diesem Gebiet begrüssen.

Die Mehrkosten bei den in der Schweiz realisierten Anwendungen von nichtrostenden Betonstählen (1.4003, 1.4462, 1.4571) bei Brücken und Galerien (s. **Kap. 4.1, 4.6 und Anhang**) lagen gemäss den Angaben der kantonalen Tiefbauämter zwischen 0.4% und 8% bezogen auf die Gesamtbaukosten. Die reinen Materialkosten lagen zwischen etwa 4.80 und 19.50 Fr./kg. Der Anteil an nichtrostenden Betonstählen belief sich dabei auf etwa 0.6 bis 7.5% der gesamten Bewehrung.

Die schweizerischen wie auch die ausländischen Beispiele zeigen, dass mit dem Einsatz von nichtrostenden Stählen die Erstellungskosten höher ausfallen können. Die Mehrkosten sind dabei abhängig von der Art und der Menge des eingesetzten nichtrostenden Stahls, aber auch von der Art der Verwendung. Werden aber Betrachtungen zu den Lebensdauer-Kosten dem Materialentscheid zu Grunde gelegt, dann ergibt sich für exponierte und gefährdete Bauteile, dass die Verwendung von nichtrostenden Stählen durchaus sehr sinnvoll, d.h. wirtschaftlich sein kann. Dauerhaftere Bauteile bringen klare Vorteile und vermindern:

- den Aufwand für Betrieb, Unterhalt, Instandhaltung, Instandsetzung, Ersatz.
- den Aufwand für Betriebsunterbrüche (interne und externe Kosten, wie „Stau- und Umwegkosten“ der Benutzer und Kosten für Produktionsausfälle).
- die Risiken bzgl. Wirkung und Dauerhaftigkeit, die Instandsetzungen praktisch immer mit sich bringen. Dies gilt insbesondere für Bauteile, die nur schlecht zugänglich sind und deshalb oft nicht fachgerecht instandgesetzt werden können (z.B. Fugen, Bankette von Widerlagern oder Gerbergelenke).
- den administrativen Aufwand der Verwaltungen und der Eigentümer (z.B. für Zustandsuntersuchungen, Projektierung, Submission, Vergabe und Überwachung von Instandsetzungen).
- die Umweltbelastung.

Die Überzeugung der Bauherren und Auftraggeber, dass sich die Gefährdung der Bewehrung von stark belasteten Bauteilen durch chloridinduzierte Korrosion mit den heute möglichen Massnahmen (z.B. Konstruktion, Betonqualität, Überdeckung, Oberflächenschutz oder Planung als Verschleissteile, besseres Qualitätsmanagement) wirtschaftlicher lösen lassen kann als mit dem Einsatz von nichtrostenden Stählen, müsste mit fundierten Kostenbetrachtungen über die gesamte Nutzungsdauer untermauert werden. Sie steht teilweise im Widerspruch zu den Ergebnissen von Modellrechnungen (s. **Kap. 1**).

Auf Grund der heutigen Erfahrungen und Kenntnisse kann man davon ausgehen, dass aus wirtschaftlichen Gründen in Zukunft nicht in weniger, sondern in deutlich mehr Fällen nichtrostende Stähle eingesetzt werden als bisher. Dies erfordert eine SIA-Richtlinie, die sämtliche Aspekte der Anwendung von nichtrostenden Betonstählen (Korrosion, Bemessung, Ermüdung, Verbund, Dauerhaftigkeit/Stahlqualität, Brand etc.) behandelt und regelt. Damit könnten viele Unklarheiten und Unsicherheiten beseitigt werden. Der vorhandene Bericht wie auch die englische und amerikanische Norm über nichtrostende Betonstähle stellen eine gute

Basis für eine solche Richtlinie dar (s. **Kap. 4.8**). Weitere Hinweise zum Handlungs- und Forschungsbedarf enthält das **Kap. 4.9**.

Tabelle Z.1: Übersicht über den Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstählen bei höchst beanspruchten Betonbauteilen mit einer Überdeckung der Bewehrung über etwa 30 mm im Vergleich zu anderen Bewehrungsarten. Mögliche Stahlsorten: s.

Tabelle Z.2.

BK: Korrosionsbeständigkeitsklasse

WS: Wirksumme

Beurteilung: + geeignet – nicht geeignet

Beurteilung in Klammern: Beurteilung unsicher

Anmerkung:

Die Fussnoten und die weiteren Hinweise in den Kap. 4.3 und 4.4 sind unbedingt zu beachten!

Werkstoff für Bewehrung	WS 1)	BK	Karbonatisierter Beton					
			Nein	Ja	Nein	Ja	Ja 2)	Ja 2)
			Chloridgehalt 3)					
			Null	Null	Tief	Tief	Mittel	Hoch
Normaler Betonstahl	0	0	+	–	+/-	(–)	–	–
Epoxidharzbeschichteter Stahl	0	?	4)					
Verzinkter Stahl	0	0/1	+	+	(+)	–	–	–
Chromstähle 5)	10-16	1	+	+	+	(+/-)	(+/-)	–
Chrom-Nickel-Stähle und Chrom-Nickel-Molybdän-Stähle	17-22	2	+	+	+	+	+	(+)
Chrom-Nickel-Molybdän-Stähle	23-30	3	+	+	+	+	+	+
Chrom-Nickel-Molybdän-Stähle	>31	4	Für Spezialfälle z.B.: - Sehr hoher Chloridgehalt - Hoher Chloridgehalt und weitere ungünstige Umstände					

1) WS: Wirksumme berechnet mit: $WS = \%Cr + 3.3\%Mo + 0\%N$.

Für die Berechnung wurde der minimale Gehalt an Chrom und Molybdän gemäss Norm EN 10088 und Stahlschlüssel eingesetzt. Der Stickstoffgehalt wurde nicht berücksichtigt.

2) Einfluss des Chloridgehaltes dominiert, untergeordnete Bedeutung der Karbonatisierung, da Karbonatisierungsgeschwindigkeit klein oder Überdeckung der Bewehrung gross.

3) Chloridgehalt: tief: ≤ 0.6 M.% bezogen auf den Zementgehalt
mittel: ≥ 0.6 , aber ≤ 1.5 M.% bezogen auf den Zementgehalt
hoch: ≥ 1.5 , aber ≤ 5 M.% bezogen auf den Zementgehalt
sehr hoch: > 5 M.% bezogen auf den Zementgehalt

4) Die Beurteilung ist unsicher/kontrovers. Vergleichende Betrachtung und Bewertung siehe **Kap. 4.7**.

5) Die Lochfrassanfälligkeit der Chromstähle mit einem tiefen Chromgehalt nimmt mit abnehmendem pH-Wert stark zu. Je nach Überdeckung spielt daher die Karbonatisierung des Betons eine mehr oder weniger wichtige Rolle.

Tabelle Z.2: Beispiele von verfügbaren, gerippten nichtrostenden Betonstählen.
Die Wirksumme WS wurde gemäss den Angaben in der **Tabelle Z.1** berechnet.

Stahl	Bezeichnung	Cr, M. %	Mo, M. %	Wirksumme WS	Korrosions- beständig- keitsklasse
Ferritische Stähle					
1.4003	X2CrNi12/X2Cr11	10.5		11	1
Austenitisch-ferritische Duplex-Stähle					
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	21.0	2.5	29	3
1.4501	X2CrNiMoCuWN 25-7-4	24.0	3.0	34	4
Austenitische Stähle					
1.4301	X5CrNi 18-10	17.0		17	2
1.4306	X2CrNi 19-11	18.0		18	2
1.4311	X2CrNiN 18-10	17.0		17	2
1.4401	X5CrNiMo 17-12-2	16.5	2.0	23	3
1.4404	X2CrNiMo 17-12-2	16.5	2.0	23	3
1.4571	X6CrNiMoTi 17-12-2	16.5	2.0	23	3
1.4429	X2CrNiMoN 17-13-3	16.5	2.5	25	3
1.4529	X1CrNiMoCuN 25-20-7 / X1CrNiMoCuN 25-20-6	19.0	6.0	39	4

Dr. F. Hunkeler, TFB, Wildegg

Bericht VSS Nr. 543, Mai 2000 (deutsch)

Bericht VSS Nr. 558, September 2001 (französische Übersetzung)

Der Bericht kann beim VSS, Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich, bezogen werden.