

**Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication**

**Office fédéral des routes**

## **Résumé**

# **Utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton**

**Einsatz von nicht rostenden Bewehrungsstählen im Betonbau**

**Use of stainless steel rebar for reinforced concrete structures**

**TFB, Wildegg  
Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton**

**Dr. F. Hunkeler, dipl. Werkstoffing. ETH**

**Mandat de recherche 95/00 sur demande du groupe de travail en matière de ponts**

**Septembre 2001**

## Résumé

Par rapport aux aciers d'armature normaux, galvanisés ou revêtus de résine époxy, les aciers inoxydables témoignent d'une résistance à la corrosion beaucoup plus élevée. Malgré le coût plus élevé des matériaux, ils peuvent représenter une mesure complémentaire utile pour des éléments de constructions particulièrement menacés par la corrosion. On peut juger de leur utilité cas par cas au moyen du calcul durabilité/coûts. En raison des mauvaises et coûteuses expériences faites par le passé, les maîtres d'ouvrage sont de moins en moins prêts à prendre des risques qui peuvent être évités. Ils veulent que les ouvrages répondent aux exigences posées avec une plus grande certitude que jusqu'à présent. Les exemples toujours plus nombreux des utilisations d'aciers d'armature inoxydables dans le monde entier prouvent à l'évidence que les maîtres d'ouvrage s'efforcent de réaliser des ouvrages en béton durables et rentables avec des aciers d'armature inoxydables, et d'éviter à l'avenir les remises en état prématurées.

En évitant les importantes remises en état, on économise à long terme non seulement sur le plan financier, mais également en ce qui concerne les ressources en matériaux. L'utilisation d'acier d'armature inoxydable permet en outre d'éviter les risques liés à toute remise en état en ce qui concerne l'efficacité et la durabilité.

On réunit sous la désignation «aciers inoxydables» un grand groupe d'aciers, qui se distinguent des aciers non ou faiblement alliés par une plus grande résistance à la corrosion. Leur teneur en chrome est supérieure à 10.5 % et, souvent, ils contiennent en outre également du nickel, du molybdène et de l'azote, leur teneur en éléments accessoires tels que carbone, soufre et phosphore étant en même temps généralement faible. On peut les classer en cinq groupes, qui diffèrent nettement en ce qui concerne la microstructure et les propriétés:

- aciers inoxydables austénitiques
- aciers inoxydables austéno-ferritiques ou aciers duplex
- aciers inoxydables ferritiques
- aciers inoxydables martensitiques
- aciers inoxydables trempés par durcissement structural

Seuls les aciers des trois premiers groupes sont utilisés comme aciers d'armature.

On ne peut pas répondre de façon générale à la question de savoir pour quelles utilisations ou pour quels éléments d'ouvrage ou ouvrages les aciers inoxydables entrent en considération pour remplacer partiellement ou entièrement les aciers d'armature normaux. De nombreux facteurs et critères ne peuvent être évalués correctement que cas par cas. Les aciers inoxydables sont utilisés en raison de leur bonne résistance à la corrosion surtout, et de ce fait, principalement pour des éléments d'ouvrage exposés à une eau chlorurée, devant témoigner d'une grande durabilité, et dont la remise en état est difficile ou très coûteuse.

La résistance des aciers inoxydables à la corrosion par piqûres ou caverneuse dépend principalement des éléments chrome, molybdène et azote, qui exercent une influence positive, et des éléments soufre, manganèse (surtout combiné au soufre) et carbone, dont l'influence est négative. La somme des éléments à action positive WS (Wirksumme) donne l'indice de résistance à la piqûration, également désigné par pitting resistance equivalent number). Le WS n'a pas de signification sur le plan strictement scientifique. Il représente tout de même une règle utilisable pour évaluer la résistance des aciers inoxydables (et alliages au nickel) à la corrosion par piqûres, à la corrosion caverneuse et à la corrosion sous contrainte.

Les connaissances et expériences sur la résistance à la corrosion et les possibilités d'utilisation des aciers inoxydables dans le béton – basées sur une très vaste étude des publications spécialisées et sur les contacts avec plusieurs spécialistes étrangers – sont résumées dans le **tableau**

**Z.1 (voir chapitre 3).** La classification des aciers en classes de résistance donne une vue d'ensemble qui doit faciliter le choix de la nuance d'acier inoxydable appropriée pour une utilisation donnée. Les aciers d'armature normaux, galvanisés ou revêtus de résine époxy figurent également dans ce tableau, pour la comparaison. Une évaluation sûre du comportement à long terme des aciers revêtus de résine époxy est extrêmement difficile. Il n'y a pas à ce sujet de consensus à l'échelon international (voir **chapitres 3, 4.1, 4.3 et 4.7**). Le **tableau Z.2** donne un aperçu des aciers d'armature inoxydables nervurés actuellement à disposition.

Pour les aciers inoxydables, les limites des classes de résistance ont été fixées de façon conservative par rapport aux résultats des analyses en laboratoire et in situ. Il est ainsi tenu compte de « conditions d'essai » plus rudes dans la pratique. Le **tableau Z.1** ne doit pas être interprété de façon excessive, car de nombreux facteurs jouent un rôle dans l'induction et la progression de la corrosion (voir **chapitre 4.4**). De plus, la résistance à la corrosion peut être influencée défavorablement par diverses opérations (p. ex. formage à froid, soudage, traitements thermiques – voir **chapitres 3 et 4.4**).

Pour les éléments d'ouvrage ou ouvrages sollicités moyennement à fortement par les chlorures, qui doivent avoir une très longue durée de service sans remise en état (70 à 100 ans), ou dont la remise en état est très difficile, très longue ou très coûteuse, seuls doivent être utilisés des aciers CrNi ou CrNiMo avec indice de résistance à la piqûration WS de >17. Les aciers au chrome ne sont pas conseillés pour des utilisations de ce genre.

Si des teneurs en chlorures élevées à très élevées sont prévisibles au niveau de l'armature, si d'autres conditions ou influences favorisant la corrosion s'ajoutent à une forte sollicitation par les chlorures (p. ex. fissures où de l'eau s'écoule, enrobage inférieur à 30 mm, béton pas très dense ou avec des défauts de compactage, températures élevées), ou s'il y a de grandes incertitudes quant à l'exécution, seuls doivent être utilisés des aciers CrNiMo avec WS de >23 (classe de résistance 3) ou même de >31 (classe de résistance 4). Cela s'applique également à des zones particulièrement importantes de l'armature, qui ne doivent en aucun cas se corroder, qui ne sont pas ou difficilement accessibles, ou dont le contrôle ou la remise en état est difficile ou impossible.

Il faut en outre signaler que pour des éléments d'ouvrage présentant un danger d'incendie et pouvant être soumis à une action de températures de >300 °C de longue durée, les aciers duplex ne doivent pas être utilisés en raison du danger de fragilisation à partir de 475 °C.

Les aciers inoxydables étant beaucoup plus chers que les aciers d'armature normaux, ils doivent être utilisés de façon ciblée et sélective, ou de façon partielle. Cela conduit à des armatures mixtes et à la question de la compatibilité des aciers normaux et des aciers inoxydables. En théorie aussi bien qu'en pratique, les armatures mixtes soient admissibles sans restriction ou risques particuliers, ainsi que le mentionne le **chapitre 4.5**. Le danger de corrosion n'est pas plus grand que pour des éléments d'ouvrage avec armature traditionnelle.

Pour savoir ce qu'il en est en Suisse de l'utilisation d'aciers inoxydables pour les ouvrages en béton armé, une enquête a été effectuée auprès des offices cantonaux des travaux publics, ainsi que complémentirement, auprès de deux offices fédéraux, sept offices des travaux publics municipaux, cinq exploitants de chemins de fer et quelques fournisseurs suisses d'acier (voir **chapitre 4.1**).

Les résultats de cette enquête sont les suivants:

- Seuls trois offices cantonaux des travaux publics ont utilisé jusqu'à présent des aciers d'armature inoxydables.
- Une grande partie des offices cantonaux des travaux publics est convaincue que d'autres mesures (p. ex. construction, qualité du béton, enrobage, protection de surface ou planification en tant que pièces d'usure, meilleur management de la qualité) sont plus rentables.
- La grande majorité des offices cantonaux des travaux publics déclarent que les coûts sont le principal obstacle pour l'utilisation d'aciers inoxydables.
- Le manque de normes et de directives ainsi que les connaissances insuffisantes des intervenants sont considérés par les offices cantonaux des travaux publics comme d'autres obstacles importants.
- De nombreux offices cantonaux des travaux publics apprécieraient une directive pour l'utilisation d'aciers inoxydables dans la construction en béton ainsi qu'une plus ample formation dans ce domaine.

Le surplus de coûts ayant résultés de l'utilisation d'aciers d'armature inoxydables (1.4003, 1.4462, 1.4571) en Suisse pour des ponts et galeries (voir **chapitres 4.1, 4.6 et annexe**) se situait selon les indications des offices cantonaux des travaux publics entre 0.4 % et 8 % des coûts globaux. Les coûts des matériaux seulement se situaient entre quelque 4.80 et 19.50 fr./kg. La part d'aciers d'armature inoxydables était en l'occurrence d'env. 0.6 à 7.5 % de l'ensemble de l'armature.

Les exemples, aussi bien en Suisse qu'à l'étranger, montrent que l'utilisation d'aciers inoxydables peut augmenter les coûts de réalisation. Le surplus de coûts dépend alors du genre et de la quantité d'acier inoxydable utilisé, mais aussi du mode d'utilisation. Mais si les considérations pour le choix du matériau sont basées sur le rapport coûts/durabilité, il en ressort que l'utilisation d'aciers inoxydables est absolument judicieuse, c'est-à-dire qu'elle peut être rentable, pour des éléments d'ouvrage exposés et menacés. Des éléments d'ouvrage plus durables présentent de nets avantages et réduisent:

- les frais de service, d'entretien, de maintenance, de remise en état et de remplacement.
- les frais dus aux arrêts de service (coûts internes et externes tels que coûts dus aux bouchons et déviations de circulation pour les usagers et coûts pour les arrêts de production).
- les risques pratiquement inévitables concernant l'efficacité et la durabilité des remises en état. Cela s'applique en particulier aux éléments d'ouvrage qui ne sont que difficilement accessibles, et qui, de ce fait, ne peuvent souvent pas être remis en état dans les règles de l'art (p. ex. joints, banquettes de culées ou articulations Gerber).
- les frais administratifs des services publics et propriétaires (p. ex. pour relevés de l'état, planification, soumission, adjudication et surveillance des remises en état).
- la pollution de l'environnement.

La conviction des maîtres d'ouvrages et des mandants que les risques de corrosion de l'armature d'éléments d'ouvrage fortement sollicités par les chlorures peuvent être écartés de façon plus économique avec les mesures actuellement à disposition (p. ex. construction, qualité du béton, enrobage, protection de surface ou planification en tant que pièces d'usure, meilleur management de la qualité) qu'avec l'utilisation d'aciers inoxydables devrait être étayée par des considérations fondées s'étendant à l'ensemble de la durée de service. Cette conviction est partiellement en contradiction avec les résultats de modélisations (voir **chapitre 1**).

En se basant sur les expériences faites jusqu'à ce jour et sur les connaissances actuelles, on peut estimer que les aciers inoxydables ne seront pas à l'avenir, pour des raisons économiques, utilisés moins souvent que jusqu'à présent, mais le seront au contraire dans nettement plus de cas. Cela exige une directive SIA qui traite de tous les aspects de l'utilisation d'aciers inoxydables (corrosion, dimensionnement, fatigue, adhérence, durabilité/nuance d'acier, incendie, etc.) et les règle. De nombreuses confusions et incertitudes pourraient être ainsi éliminées. Le présent rapport, ainsi que les normes anglaise et américaine sur les aciers d'armature inoxydables représentent une bonne base pour une telle directive (voir **chapitre 4.8**). D'autres informations sur les mesures à prendre et les besoins de recherche figurent au **chapitre 4.9**.

**Tableau Z.1:** Vue d'ensemble de l'utilisation d'aciers d'armature inoxydables pour des éléments d'ouvrage en béton très fortement sollicités, avec un enrobage de plus de 30 mm, comparés à d'autres genres d'armature. Nuances d'acier possibles: voir tableau Z.2.

BK: classe de résistance à la corrosion  
WS: indice de résistance à la piqûration (Wirksumme)  
Évaluation: + approprié – inapproprié

Valeurs entre parenthèses: évaluation incertaine

Remarque:  
Tenir compte absolument des notes en bas de page et autres indications des chapitres 4.3 et 4.4!

Matériau pour armature	WS 1)	BK	Béton carbonaté					
			Non	Oui	Non	Oui	Oui 2)	Oui 2)
			Teneur en chlorures 3)					
			Nulle	Nulle	Faible	Faible	Moyenne	Élevée
Acier d'armature normal	0	0	+	-	+/-	(-)	-	-
Acier revêtu de résine époxy	0	?	4)					
Acier galvanisé	0	0/1	+	+	(+)	-	-	-
Aciers au chrome 5)	10-16	1	+	+	+	(+/-)	(+/-)	-
Aciers chrome-nickel et aciers chrome-nickel-molybdène	17-22	2	+	+	+	+	+	(+)
Aciers chrome-nickel-molybdène	23-30	3	+	+	+	+	+	+
Aciers chrome-nickel-molybdène	>31	4	Pour cas spéciaux, p.ex.: -teneur en chlorures très élevée -teneur en chlorures élevée avec autres conditions défavorables					

- 1) WS: indice de résistance à la piqûration calculée avec:  $WS = \%Cr + 3.3\%Mo + 0\%N$ . On a utilisé la teneur minimale en chrome et molybdène pour le calcul selon norme EN 10088 et "Stahlschlüssel" (Allemagne). La teneur en azote n'a pas été prise en considération.
- 2) L'influence de la teneur en chlorures est dominante, alors que celle de la carbonatation est secondaire, car la vitesse de carbonatation est petite ou l'enrobage de l'armature épais.
- 3) Teneur en chlorures: faible:  $\leq 0.6$  M.% - masse de ciment moyenne:  $\geq 0.6$ , mais  $\leq 1.5$  M.% - masse de ciment élevée:  $\geq 1.5$ , mais  $\leq 5$  M.% - masse de ciment très élevée  $> 5$  M.% - masse de ciment
- 4) L'évaluation est incertaine/controversée. Considérations comparatives et évaluations: voir chapitre 4.7.
- 5) La sensibilité à la piqûration des aciers au chrome à faible teneur en chrome augmente fortement lorsque la valeur pH diminue. C'est pourquoi la carbonatation du béton joue un rôle plus ou moins important, selon l'enrobage.

**Tableau Z.2:** Exemples d'aciers d'armature inoxydables nervurés disponibles. L'indice de résistance à la piquûration WS a été calculé d'après les indications figurant dans le **tableau Z.1**.

Acier	Désignation	Cr, % - masse	Mo, % - masse	Indice de ré- sistance à la piquûration WS	Classe de résistance
<b>Aciers ferritiques</b>					
1.4003	X2CrNi12/X2Cr11	10.5		11	1
<b>Aciers austéno-ferritiques ou aciers duplex</b>					
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	21.0	2.5	29	3
1.4501	X2CrNiMoCuWN 25-7-4	24.0	3.0	34	4
<b>Aciers austénitiques</b>					
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

## 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 nicht rostenden 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 nicht rostenden Betonstählen die mit jeder Instandsetzung verbundenen Risiken bzgl. Wirkung und Dauerhaftigkeit vermieden werden.

Unter der Bezeichnung „nicht rostende Stähle“ wird eine grosse Gruppe von Stählen zusammengefasst, die sich gegenüber un- und niedrig legierten 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 nicht rostende Stähle.
- Austenitisch-ferritische nicht rostende oder so genannte Duplexstähle.
- Ferritische nicht rostende Stähle.
- Martensitische nicht rostende Stähle.
- Ausscheidungsgehärtete nicht rostende Stähle.

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

Die Frage, für welche Anwendungen bzw. für welche Bauteile oder Bauwerke nicht rostende 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 nicht rostender 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 so genannten Wirksumme zusammengefasst. Die Wirksumme hat keine streng wissenschaftliche Bedeutung. Trotzdem stellt sie eine brauchbare Richtschnur für die Beurteilung der Beständigkeit von nicht rostenden 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 nicht rostenden 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 nicht rostenden 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 nicht rostenden Betonstähle.

Die Grenzen der Beständigkeitsklassen wurden bei den nicht rostenden 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  $> 300$  °C Duplexstähle wegen der Gefahr der 475 °C-Versprödung nicht eingesetzt werden sollten.

Da nicht rostende 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 nicht rostenden 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 nicht rostenden 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 nicht rostende 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 nicht rostenden 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 nicht rostenden Stählen im Betonbau und eine verstärkte Weiterbildung auf diesem Gebiet begrüssen.

Die Mehrkosten bei den in der Schweiz realisierten Anwendungen von nicht rostenden 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 nicht rostenden 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 nicht rostenden Stählen die Erstellungskosten höher ausfallen können. Die Mehrkosten sind dabei abhängig von der Art und der Menge des eingesetzten nicht rostenden 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 nicht rostenden 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 instand gesetzt 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	+	+	+	+	+	+
			Für Spezialfälle z.B.:					
Chrom-Nickel-Molybdän-Stähle	>31	4	- 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: mittel: hoch: sehr hoch:  $\leq 0.6$  M.% bezogen auf den Zementgehalt  $\geq 0.6$ , aber  $\leq 1.5$  M.% bezogen auf den Zementgehalt  $\geq 1.5$ , aber  $\leq 5$  M.% bezogen auf den Zementgehalt  $> 5$  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.
- 6) 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	Korrosionsbeständigkeitsklasse
<b>Ferritische Stähle</b>					
1.4003	X2CrNi12/X2Cr11	10.5		11	1
<b>Austenitisch-ferritische Duplex-Stähle</b>					
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	21.0	2.5	29	3
1.4501	X2CrNiMoCuWN 25-7-4	24.0	3.0	34	4
<b>Austenitische Stähle</b>					
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

## Summary

Stainless steels exhibit a much higher corrosion resistance than ordinary black, galvanised or ep-oxy-coated rebars. Although the material costs are higher they may be used as an appropriate additional measure for the protection of concrete components with a high risk of corrosion. The suitability in a particular case may be judged on the basis of the life cycle costs. The world-wide increasing number of applications demonstrates impressively the effort of the building contractors, who, considering the widespread bad experiences, wish to avoid in the future premature failure and repair and to realise more durable and more economic concrete structures by the use of stainless steel rebars. This development goes along with a decreasing willingness of the building contractors to accept risks and with their increasing need, respectively, that the structures reach the requirements with a higher certainty than up to now.

The avoidance of extensive repair work saves in a sustainable way not only financial, but also material resources. Additionally, the risks of repairs in respect to their effectiveness and durability can also be avoided by the use of stainless steel rebars.

Under the name "stainless steels" a large group of steels are summarised, which exhibits a higher corrosion resistance than ordinary un- or low alloyed black steels. Stainless steels contain chromium content over 10.5%, often nickel, molybdenum and nitrogen. Simultaneously, their carbon, sulphur and phosphorus content are reduced. They are divided in five classes with different microstructure and properties:

- austenitic stainless steels
- austenitic-ferritic stainless steels
- ferritic stainless steels
- martensitic stainless steels
- precipitation hardened stainless steels

Only stainless steels of the first three groups are commonly used as rebars for concrete structures.

There is no general answer to the question for what type of application, of concrete components or concrete structures, respectively, stainless steels may be considered as partial or complete replacement of ordinary rebars. Many influences and criteria can only be correctly evaluated for a specific case. Stainless steels may be used first of all because of their good corrosion resistance and, therefore, especially for concrete components, which are exposed to chloride containing water or which should have a long life time and if their repair is difficult or costly.

The resistance of stainless steels against pitting or crevice corrosion is improved mainly by the elements chromium, molybdenum and nitrogen. The elements sulphur, manganese (especially in combination with sulphur) and carbon have a negative influence. The positively acting elements are summarised in the so called pitting resistance equivalent. The pitting resistance equivalent has no strict scientific meaning. Even though it is a useful guide for the evaluation of the corrosion resistance of stainless steels (and nickel alloys) against pitting and crevice as well as against stress corrosion cracking.

**Table Z.1** is a summary of the existing knowledge and experiences on the corrosion resistance and the possible applications of stainless steels in concrete. It is based on a very extensive literature survey and on contacts to various experts in different countries (see **Chapter 3**). The classification of the steels in corrosion resistance classes should give an overview and helps to choose the appropriate stainless steel quality for a specific application. As comparison, the ordinary, ep-oxy-coated and galvanised rebars have been included. A qualified and assured judgement of the long term behaviour of epoxy-coated rebars is extremely difficult. There is no international consensus (see **Chapter 3, 4.1, 4.3 and 4.7**). **Table Z.2** contents a list of actually available ripped stainless steel rebars.

The limits of the corrosion resistance classes have been set in a more conservative manner than the results of laboratory or field studies would have allowed. This approach should take the existing “stronger test condition” in a practical application into account. **Table Z.1** should not be “overinterpreted” since the initiation and rate of corrosion is affected by a large variety of factors (see **Chapter 4.4**). Additionally, the corrosion resistance may be negatively influenced by different steps of the processing and handling (e.g. cold working, heat treatment, welding, bending, sees **Chapter 3 and 4.4**).

For middle to highly chloride burdened concrete components or structures, which should have a very long life time with no repair (70 to 100 years) or if their repair is very difficult to be carried out or very time consuming or costly, only CrNi- or CrNiMo-stainless steels with a pitting resistance equivalent WS >17 should be used. For such applications chromium steels are not recommended.

In cases, where high to very high chloride contents are to be expected, or if there are further unfavourable circumstances or corrosive influences combined with a high chloride content (e.g. water draining cracks, concrete cover less than 30 mm, porous or lightweight concrete, high temperature) or if there are unusual uncertainties in the execution of the concrete work, only CrNiMo-stainless steels with a WS >23 (resistance class 3) or even >31 (resistance class 4) should be used. This is also valid for especially important parts of the reinforcement, which should absolutely not corrode or if they are very badly or not accessible for an assessment or repair.

It has to be pointed out, that because of the 475 °C-embrittlement, duplex stainless steels should not be used for concrete constructions with a high risk of fire and the possibility of a longer action of temperature >300 °C.

Since stainless steels are much more expensive than ordinary black rebars they should only be used in specially selected structural parts or as partial replacement of ordinary rebars. This leads to a mixed reinforcement and to the question of the compatibility of ordinary black and stainless steel rebars. As it has been described in **Chapter 4.5**, mixed reinforcement is allowed, for theoretical and practical reasons without special risks or restrictions. There is no higher corrosion risk than with concrete structures exclusively with ordinary black rebars.

In order to explore the actual state of the application of stainless steels for reinforced concrete structures in Switzerland an inquiry has been conducted in the second half of 1999 by the road administrations of the Swiss cantons and, additionally, by two Swiss federal administrations, seven road administration of Swiss cities and five railway companies as well as by some Swiss steel suppliers (see **Chapter 4.1**):

The results of this enquiry are as follows:

- Only three cantonal road administrations have used stainless steel rebars up to now.
- The vast majority of the cantons is convinced that other preventive measures (e.g. construction, concrete quality, concrete cover, surface treatment or designing as wear part – to be replaced easily –, better quality management) are more economic.
- A large majority of the cantons mentions the costs as the main obstacle for the use of stainless steel rebars.
- In the opinion of the cantons missing standards and guidelines as well as insufficient knowledge of the people involved in the building process are further important obstacles.
- Many cantons would appreciate a guideline on the use of stainless steels in concrete constructions as well as a more intense further education on this topic.

The extra costs of the application of stainless steel rebars (1.4003, 1.4462, 1.4571) for bridges and galleries (see **Chapter 4.1, 4.6 and annex**) realised in Switzerland were, according to the information of the road authorities of the cantons, between 0.4% and 8% of the total costs of the structures. The net material costs amounted from 4.80 to 19.50 sFr./kg. The portion of stainless steel rebars was between 0.6 and 7.5% of the whole reinforcement.

The Swiss as well as the foreign examples show that the construction costs might be higher when stainless steels are used. The additional costs depend on the type and the amount of the stainless steels used, but also on the type of application. Taking the life cycle costs as base for the choice of the material it ends up with conclusion that for exposed and endangered concrete structures the use of stainless steels may be very appropriate, i.e. economical. Structures and components with a higher durability exhibit clear advantages and reduce:

- The expenditure for the operation, maintenance, repair and replacement.
- The expenditure for the interruption of the operation (internal and external costs as for traffic jams, detours of the users and loss of production).
- The risks in respect of the effectiveness and durability which are very commonly related to repair work. This is especially true for components with a bad accessibility and which, therefore, can often not be repaired correctly (e.g. joints, the upper side of abutments).
- The work of the administrations and the owners (e.g. condition survey, assessment, planning, execution of repairs, monitoring of repaired structures).
- The environmental impact.

It is the conviction of many building contractors (and engineers), that the risk of chloride induced corrosion of the reinforcement of concrete structures heavily exposed to chloride containing water may be avoided with the common preventive measures (e.g. construction, concrete quality, concrete cover, surface treatment or designing as wear part, better quality management) and that they are more economical than the use of stainless steels. This conviction may be correct, but it needs to be verified by a sound calculation of the life cycle costs. It is partly in contradiction to the results of the modelling of the chloride ingress and corrosion process (s. **Chapter 1**).

Based on the actual experiences and knowledge one can conclude that – primarily because of economical reasons – stainless steel rebars will be used in the future not in less, but in a significant larger number of cases than up to now. This expected development makes it necessary to elaborate a SIA-guideline in which all aspects of the use of stainless steels in concrete construction are treated (corrosion, design, fatigue, bond, durability/steel quality, fire etc.). This would eliminate many of the present uncertainties and confusions. The present report as well as the English and American standard on stainless steel rebars represents a good base for such a guideline (see **Chapter 4.8**). Additional remarks in respect to action and research needed to be carried out are given in **Chapter 4.9**.

**Table Z.1:** Survey of the use of stainless steel rebars for concrete construction exposed to chloride containing environments and with a concrete cover of the reinforcement of about 30 mm, compared to other rebar materials. Possible stainless steel types: see **Table Z.2**.

**BK:** Corrosion resistance class

**WS:** Pitting resistance equivalent

**Classification:** + appropriate – inappropriate Classification in parenthesis:  
classification uncertain

**Comment:**

**The footnotes and the additional remarks in the Chapter 4.3 and 4.4 are to be considered!**

Material of the reinforcement	WS	BK	Carbonation of concrete					
			No	Yes	No	Yes	Yes 2)	Yes 2)
	1)		Chloride content 3)					
			Zero	Zero	Low	Low	Mid	High
Ordinary black rebar	0	0	+	-	+/-	(-)	-	-
Epoxy-coated rebar	0	?	4)					
Galvanised rebar	0	0/1	+	+	(+)	-	-	-
Chromium-Steels 5)	10-16	1	+	+	+	(+/-)	(+/-)	-
Chromium-Nickel-Steels and								
Chromium-Nickel-Molybdenum-Steels	17-22	2	+	+	+	+	+	(+)
Chromium-Nickel-Molybdenum-Steels	23-30	3	+	+	+	+	+	+
Chromium-Nickel-Molybdenum-Steels	>31	4	For special cases e.g.: -Very high chloride content -High chloride content and further unfavourable circumstances					

1) WS: Pitting resistance equivalent calculated according to:  $WS = \%Cr + 3.3\%Mo + 0\%N$ . The minimum content of chromium and molybdenum according to EN 10088 and Stahlschlüssel (Germany) was used for the calculation. The nitrogen content was not taken into account.

2) The influence of the chloride content dominates. Carbonation is of minor importance since the rate of carbonation is low or the concrete cover is high.

3) Chloride content: low:  $\leq 0.6$  M.% in respect to cement content middle:  $\geq 0.6$ , but  $\leq 1.5$  M.% in respect to the cement content high:  $\geq 1.5$ , but  $\leq 5$  M.% in respect to the cement content very high:  $> 5$  M.% in respect to cement content

4) The classification is uncertain/controversial. Comparative considerations and judgement: see **Chapter 4.7**.

5) The susceptibility to pitting corrosion of chromium steels with a low chromium content increases rapidly with decreasing pH. Depending on the concrete cover the carbonation of the concrete is, therefore, more or less important.

**Table Z.2:** Examples of available, ripped stainless steel rebars. For the calculation of the pitting resistance equivalent WS: see **Table Z.1**.

Steel	Designation	Cr, M. %	Mo, M. %	Pitting corrosion equivalent, WS	Corrosion resistance class
<b>Ferritic stainless steels</b>					
1.4003	X2CrNi12/X2Cr11	10.5		11	1
<b>Austenitic-ferritic duplex stainless steels</b>					
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	21.0	2.5	29	3
1.4501	X2CrNiMoCuWN 25-7-4	24.0	3.0	34	4
<b>Austenitic stainless steels</b>					
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