

GRAVIS Wissenswelt Beitrag

Ermüdungsversuche von Duplex-Betonstahl (1.4062)

von Ines Dällenbach
(Hochschule Luzern)

Nichtrostende Betonstähle enthalten in der Regel mehr als 10.5% Chrom und weisen häufig zusätzlich Nickel, Molybdän und Stickstoff auf. Zudem sind Begleitelemente wie Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor in geringen Konzentrationen vorhanden. Das Hauptziel von nichtrostenden Betonstählen ist die Verlängerung der Initiierungszeit bis zum Korrosionsbeginn. Während herkömmliche Betonstähle durch eine Eisenoxidschicht (Passivierung) im stark alkalischen Milieu geschützt

sind, bilden nichtrostende Stähle eine stabile Chromoxidschicht, die auch bei geringerer Alkalität ($\text{pH} < 10.5$) und höheren Chloridgehalten wirksam bleibt.

Aufgrund seines erhöhten Korrosionswiderstands gewinnt er in Neubau- und Instandsetzungsprojekten zunehmend an Bedeutung. Das Merkblatt SIA 2029:2012 [1] empfiehlt zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit oder zur Reduktion der Bewehrungsüberdeckung gemäss der Norm SIA 262:2025 [2] den Einsatz von nichtrostenden Betonstahl.

Trotz höherer Materialkosten eignet sich nichtrostender Betonstahl besonders für exponierte Bauteile, die chloridhaltigem Wasser ausgesetzt sind, eine hohe Lebensdauer erfordern oder bei denen eine Instandsetzung mit hohem Aufwand und Kosten verbunden wäre. Im Brückenbau findet er daher auch vermehrt Anwendung bei ermüdungsbeanspruchten Elementen wie z.B. Kragplatten. Bild 1 zeigt schematisch ein mögliches Instandsetzungskonzept: Das Beispiel veranschaulicht die Verstärkung eines

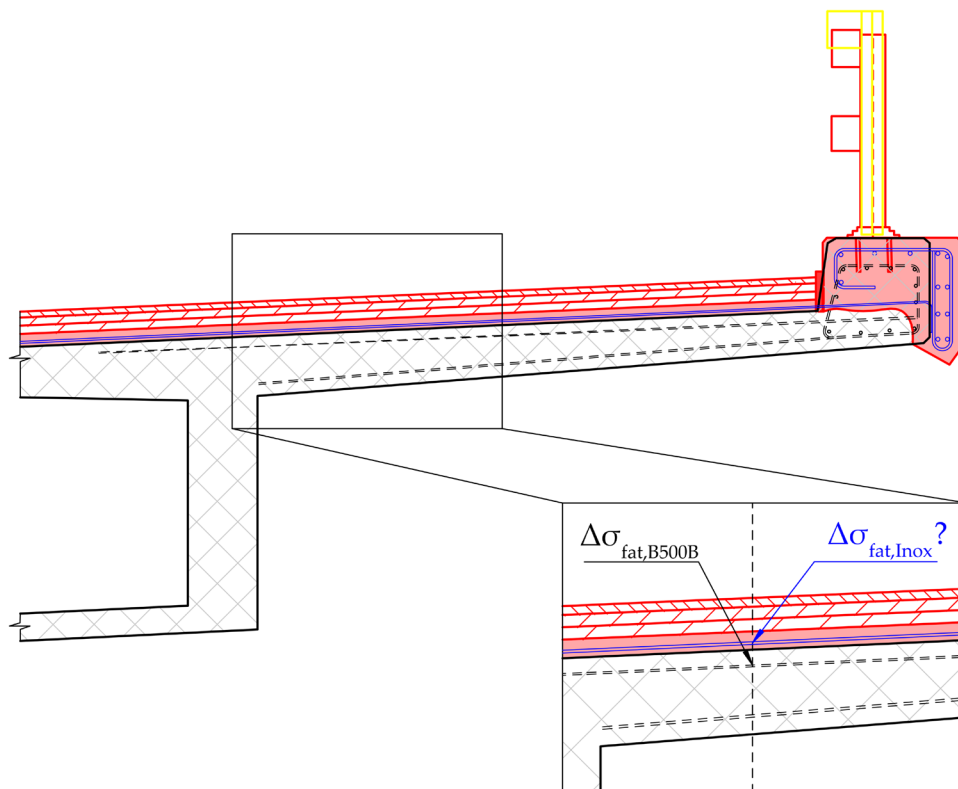


Bild 1: Schematische Darstellung einer möglichen Instandsetzung der Kragplatte einer bestehenden Autobahnbrücke unter Verwendung von nichtrostendem Betonstahl.

Brückenträgers durch Aufbeton und den Einsatz von nichtrostendem Bewehrungsstahl bei geringer Bewehrungsüberdeckung.

In Tabelle 13 der SIA-Norm 262:2025 [2] sind die Ermüdungsfestigkeiten von «konventionellem» Betonstahl¹⁾ für verschiedene Durchmesser und Biegeformen angegeben. Diese Werte basieren auf der Wöhlerkurve (Figur 6 der SIA-Norm 262:2025 [2]), welche auf Dauerschwingversuchen von Tilly et al. (1982) [3] und Canteli et al. (1984) [4] beruht und in der SIA-Dokumentation D0133:1997 [5] festgehalten ist. Bislang stehen für in der Schweiz gängige Betonstäbe keine umfassenden Tabellen mit aktuelleren Angaben zu deren Ermüdungseigenschaften zur Verfügung.

Für die Bemessung auf Ermüdung von nichtrostendem Betonstahl geben weder die SIA-Norm 262:2025 [2] noch das Merkblatt SIA 2029:2012 [1] spezifische Werte zur Ermüdungsfestigkeit an. In der Praxis werden daher die gleichen Ermüdungskennwerte wie für Betonstahl verwendet. Da derzeit praktisch keine hochzyklischen Einstufenversuche mit nichtrostendem Betonstahl vorliegen – weder von Herstellern noch aus der Fachliteratur – bleibt offen, ob seine Ermüdungsfestigkeit tatsächlich den normativen Werten entspricht. Im Rahmen einer Projektarbeit während des Masterstudiums an der HSLU hat die Autorin in Zusammenarbeit mit der Empa (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) Ermüdungsversuche an nichtrostendem Betonstahl durchgeführt.

Ziel der Projektarbeit war die experimentelle Untersuchung, Dokumentation und Auswertung des Ermüdungsverhaltens von Duplexstahl mit dem Stahltyp 1.4062. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Bereitstellung valider Versuchsdaten, die als Grundlage für weitere wissenschaftliche Untersuchungen dienen können.

Die Versuche wurden gemäss SN EN ISO 15630-1:2019 [6] an der Empa in Dübendorf durchgeführt. Sie erfolgten im Zeitfestigkeitsbereich als einstufige Belastungsversuche, bei denen die Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma$) konstant gehalten und die Bruchlastwechselzahl N_B in Abhängigkeit von $\Delta\sigma$ bestimmt wurde. Für jede untersuchte Spannungsschwingbreite wurden mindestens fünf Betonstahlstäbe desselben Durchmessers geprüft. Nach Abschluss der Versuche wurden die Bruchflächen und Bruchansichten dokumentiert.

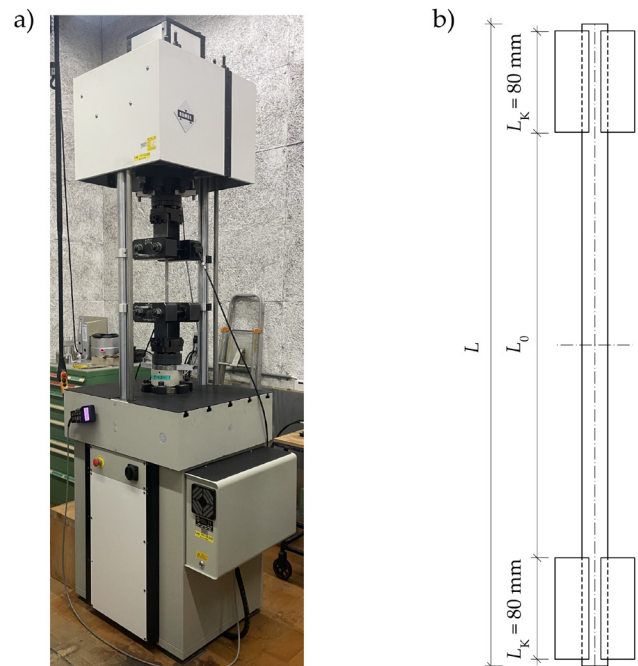


Bild 2: a) Prüfmaschine «RUMUL Testronic 8601 150kN» und b) Skizze der Versuchseinrichtung, wobei L die Probelänge, L_0 die freie Länge und L_K die Länge der Klemmen darstellen

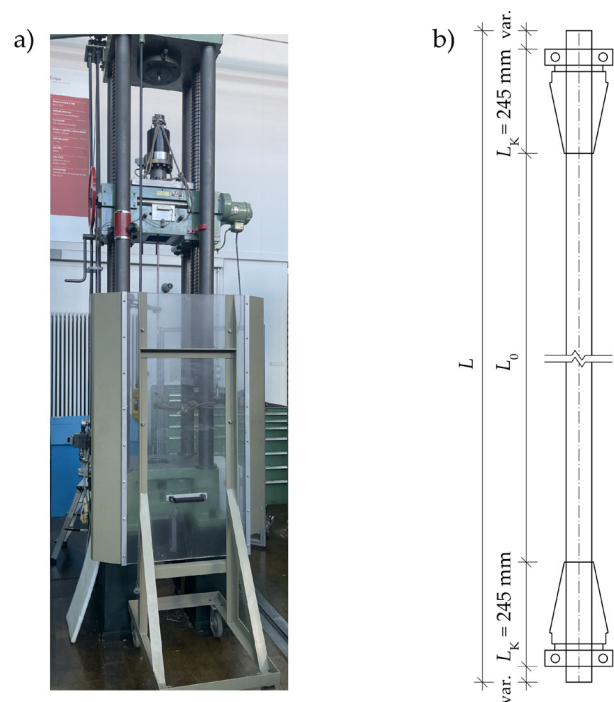


Bild 3: a) Hydraulische Ermüdungsprüfmaschine «Amsler P960 300 kN» und b) Skizze der Versuchseinrichtung, wobei L die Probelänge, L_0 die freie Länge und L_K die Länge der Klemmen darstellen.

¹⁾ In diesem Beitrag wird nachfolgend der Begriff «Betonstahl» zur Bezeichnung des in der Praxis üblichen «konventionellen» Betonstahls (wie z. B. B500B) verwendet.

Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens wurden zwei unterschiedliche Prüflängen untersucht:

- Proben mit einer Länge von 400 mm wurden auf einer 150-kN-Hochfrequenzprüfmaschine bei 78 Hz geprüft; insgesamt umfasste die Untersuchung 82 Proben, davon 42 aus Ringmaterial (Ø14 mm) und 40 aus Stabmaterial (Ø 16 mm) (Siehe Bild 2)
- Versuche an 3000 mm langen Proben wurden auf einer 300-kN-hydraulischen Ermüdungsprüfmaschine bei 7 Hz durchgeführt; insgesamt wurden 30 Stäbe geprüft, davon 15 aus Ringmaterial (Ø 14 mm) und 15 aus Stabmaterial (Ø 16 mm) (Siehe Bild 3)

Zudem wurden die vorliegenden Daten zu zyklischen Einstufenversuchen an Betonstahl herangezogen, um die Ergebnisse der eigenen Versuche mit nichtrostendem Betonstahl vergleichen und einordnen zu können. Berücksichtigt wurden dabei Ergebnisse aus axialen Einstufenversuchen an der Luft, also an nicht einbetonierten Proben. Die verwendeten Daten stammen von Canteli et al. (1984) [4] sowie aus den von Fehlmann (2012) [7] durchgeführten Versuchen. Auf detaillierte Angaben zu den in diesen Studien verwendeten Betonstahlstäben wird hier nicht eingegangen; sie können den jeweiligen Originalquellen entnommen werden.

Bild 4 und Bild 5 zeigen exemplarisch die Bruchansichten und Bruchflächen der Kurzproben ($L = 400$ mm) und Langproben ($L = 3000$ mm) mit einem Durchmesser von 14 mm bzw. 16 mm. Dargestellt sind jeweils die Ergebnisse bei der höchsten untersuchten Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma$).

Die Rissbildung setzte beim Ringmaterial überwiegend im Bereich der Längsrippe ein, während sie beim

Stabmaterial bevorzugt an den Rippenwurzeln auftrat. Walzzeichen zeigten keinen erkennbaren Einfluss auf die Rissentstehung. Mit zunehmender Spannungsschwingbreite bildeten sich deutlich ausgeprägtere Bruchflächen; insbesondere bei den Langproben des Stabmaterials traten grobe, zerstörte Strukturen ohne die für Ermüdungsbruchflächen charakteristische Muschelform auf. Zudem wurde mit steigender Spannungsschwingbreite eine höhere Anzahl von Rissen im verbleibenden Reststab festgestellt.

Bruchbilder und Rissvorkommen wichen von bekannten Beobachtungen an Betonstahl ab. Die Ursachen dieser Befunde könnten in der Zusammensetzung des Duplexstahls und seinen spezifischen Legierungselementen liegen. Während Betonstahl ausschliesslich aus Ferrit besteht, setzt sich der nichtrostende Duplex-Betonstahl aus Ferrit und Austenit zusammen und enthält zusätzlich Legierungselemente. Diese zweiphasige Gefügestruktur sowie die abweichende chemische Zusammensetzung könnten lokale Spannungsverteilungen und das Rissausbreitungsverhalten beeinflussen und damit eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Bruchbilder liefern.

Die Daten von Canteli et al. (1984) [4] und Fehlmann (2012) [7] zum Betonstahl werden mit den Versuchsergebnissen der nichtrostenden Betonstäbe mit einer Probenlänge von $L = 400$ mm verglichen. Um eine Aussage über die nominelle Ermüdungsfestigkeit treffen zu können, wurde im (doppelt logarithmischen) Wöhlerdiagramm eine Mittelwertlinie (50 %-Quantil) mittels Regressionsanalyse bestimmt. Die Steigung der Regressionslinie wurde mit $m = 4$ angesetzt, wie sie in der SIA 262:2025 [2] für Betonstahl vorgegeben ist. Die nominelle Ermüdungsfestigkeit wurde entsprechend bei $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ermittelt.

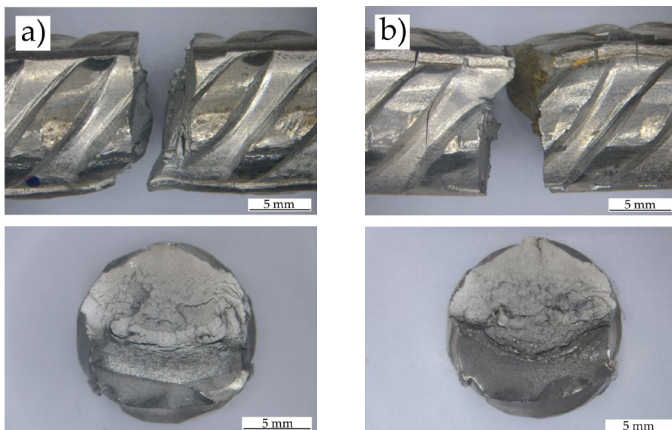


Bild 4: Ø14 mm, Ansicht und Bruchfläche (a) $L = 400$ mm; $\Delta\sigma = 375$ MPa und (b) $L = 3000$ mm; $\Delta\sigma = 375$ MPa

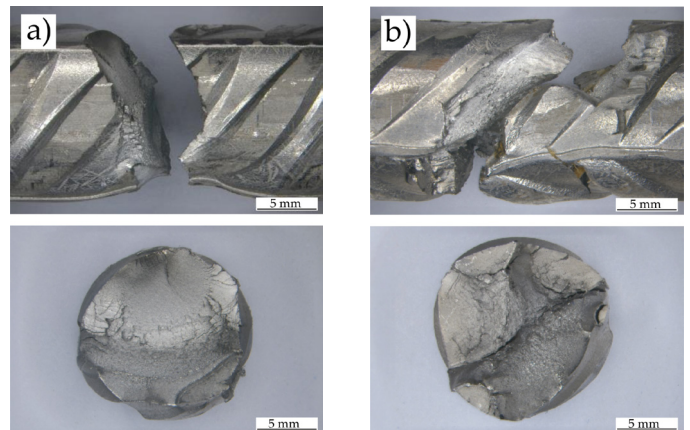


Bild 5: Ø16 mm, Ansicht und Bruchfläche (a) $L = 400$ mm; $\Delta\sigma = 375$ MPa und (b) $L = 3000$ mm; $\Delta\sigma = 413$ MPa

Tabelle 1 enthält die mittleren nominalen Ermüdungsfestigkeiten von konventionellem und nichtrostendem Betonstahl, während Bild 6 sämtliche Datenpunkte beider Gruppen sowie die jeweiligen Mittelwertlinien zeigt.

Die in der Grafik dargestellte Normlinie der SIA 262:2025 [2] dient rein zur Orientierung, besitzt aber keine statistische Aussagekraft und erlaubt keinen direkten Vergleich mit den Mittelwertlinien.

Tabelle 1: Nominelle mittlere Ermüdungsfestigkeiten von Betonstahl (Daten von Canteli et al. [4], Fehlmann [7]) und Duplex-Betonstahl

	Betonstahl	Duplex-Betonstahl 1.4062 ¹⁾
$\sigma_{fat,nom} \pm s \{n\}$ ²⁾	207 ± 32 {116}	183 ± 15 {76}

¹⁾ Daten Duplex-Betonstäbe mit einer Probelänge von (L=400mm), Ø14/16
²⁾ Mittlere nominale Ermüdungsfestigkeit ± Mittlere Standardabweichung [MPa] {Anzahl Versuchswerte}

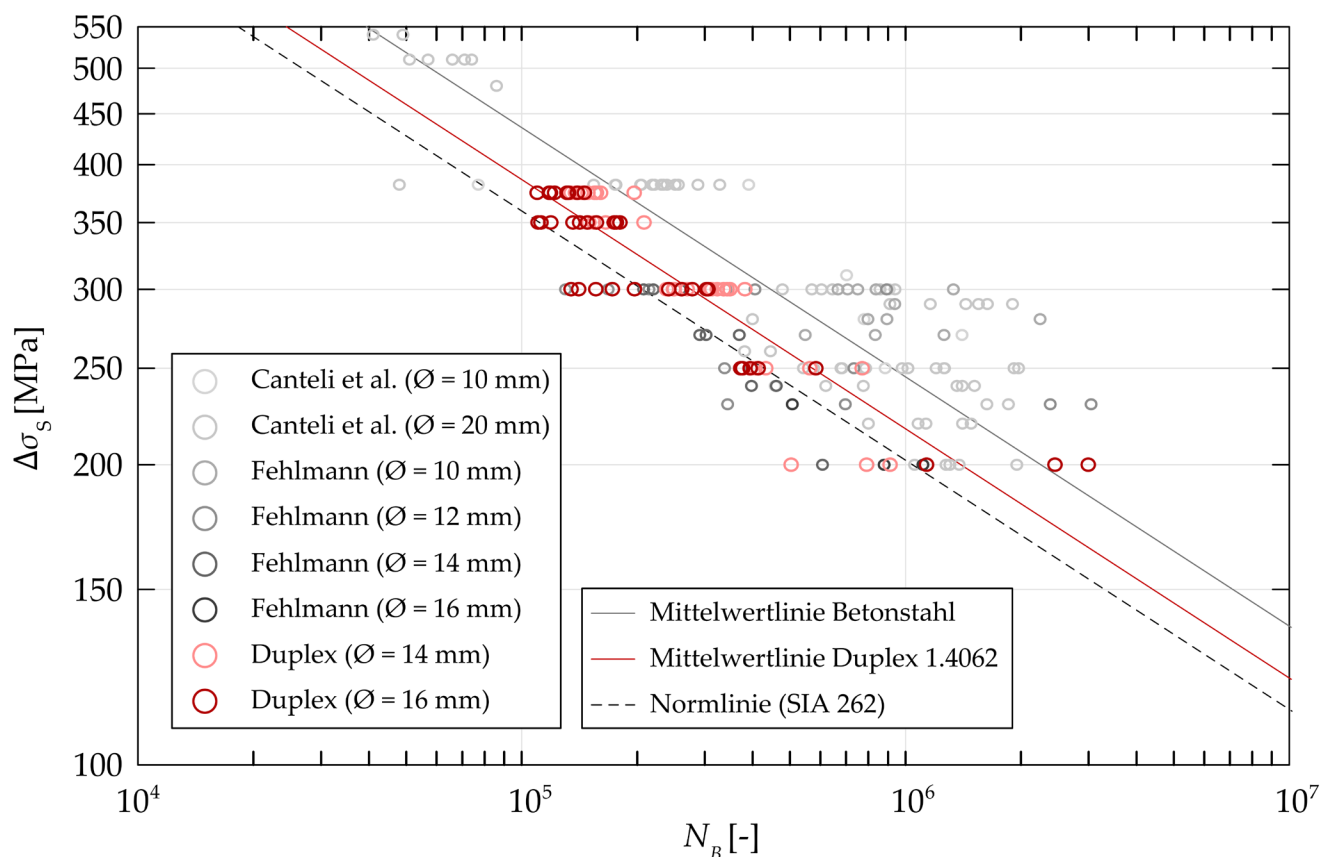


Bild 6: Datenpunkte sowie Mittelwertlinie im Wöhlerdiagramm von Betonstahl (Canteli et al. [4], Fehlmann [7]) sowie Duplex-Betonstahl.

In der Grafik ist erkennbar, dass die Messwerte des nichtrostenden Stahls tendenziell im unteren Bereich der Werte des Betonstahls liegen. Die in Tabelle 1 ausgewiesene mittlere Ermüdungsfestigkeit des Duplex-Betonstahls 1.4062 liegt unter jener des Betonstahls, wobei dieser eine deutlich grössere Streuung der Ergebnisse aufweist. In Anbetracht des breiten Konfidenzintervalls für den Betonstahl kann kein statistisch signifikanter Nachteil im Sinne einer geringeren Festigkeit des Duplex-Betonstahls gegenüber dem herkömmlichen Betonstahl nachgewiesen werden.

Unter Berücksichtigung der Streuung sind die Ermüdungsfestigkeiten des untersuchten Duplex-Betonstahls vergleichbar mit den Ermüdungsfestigkeiten von Betonstahl. Auch wenn kein signifikanter Nachteil in der Ermüdungsfestigkeit gegenüber «konventionellem» Betonstahl nachweisbar ist, zeigen sich Unterschiede in den Bruchbildern sowie im Auftreten von Rissen. Für eine allgemeinere Beurteilung wären daher weiterführende Untersuchungen mit nichtrostendem Stahl sinnvoll, beispielsweise unter Einbezug unterschiedlicher Stahlsorten und verschiedener Durchmesser.

Literatur

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), „Merkblatt 2029 - Nichtrostender Betonstahl,“ SIA, Zürich, 2012.
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), „Norm SIA 262 - Betonbau,“ Zürich, 2025.
- [3] G.P.Tilly und D.S.Moss, „Long Endurance Fatigue of Steel Reinforcement,“ IABSE Reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte 37, pp. 229-238, 1982.
- [4] A.F. Canteli, V. Esslinger, B. Thürlimann, „Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen,“ Bericht 8002, Zürich, pp. 1-87, 1984.
- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „Dokumentation D0133: Betonbau – Ermüdung von Betonbauten,“ SIA, Zürich, 1997.
- [6] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), „Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton - Prüfverfahren - Teil 1: Bewehrungsstäbe Walzdraht und Draht,“ EN ISO 15630-1:2019, 2019.
- [7] P. Fehlmann, „Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken,“ Zürich, 2012.



GRAVIS AG
Birchstrasse 17, 3186 Düringen



+41 26 492 30 10



info@gravis.ch



www.gravis.ch

