

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 111 (1993)
Heft: 16/17

Artikel: Korrosionsbeständige Befestigungen in Strassentunnels: Feldversuche
Autor: Haselmair, H. / Übleis, A. / Böhni, Hans
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78174>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Werkstoffe	Probenform lt. Bild 2
C-Stahl ■	
unbeschichtet	1
galvanisch verzinkt (8 µm)	1, 3, 5
Dacromet (15 µm)	1
* feuerverzinkt	1, 3
feuerverzinkt + epoxy-beschichtet	1
Cr-Stähle	
* 1.4104 (X12CrMoS17; 430) ■	1
* 1.4521 (X1CrMoTi182; 443) ■	1
CrNi-Stähle	
* 1.4305/A1 (X10CrNiS189; 303) ■	1, 3
* 1.4301/A2 (X5CrNi1810; 304)	1
CrNiMo-Stähle	
* 1.4571 (X6CrNiMoTi17122; 316Ti)	1, 2, 3, 4, 5
* 1.4429TM (X2CrNiMoN17133; 316LNM)	1
* 1.4462 (X2CrNiMoN2253; 316LN)	1
1.4563 (X1NiCrMoCu31274; alloy 28)	0+
CrNiMo-Stähle mit >4% Mo	
* 1.4439 (X2CrNiMoN17135; 317LN)	1
1.4439TM (X2CrNiMoN17135; 317LNM)	0+
* 1.4539 (X1NiCrMoCuN25205; 904L)	1
1.4529 (X1NiCrMoCuN25206)	0+, 1
Avesta 254 SMO	1
1.4565 (X3CrNiMnMoNbN231753; alloy 24)	1
Ni-Legierungen	
* 2.4858 (NiCr21Mo; Incoloy 825)	1
* 2.4856 (NiCr22Mo9Nb; Inconel 625)	1
* 2.4610 (NiMo16Cr16Ti; Hastelloy C-4)	1
* 2.4375 (NiCu30Al; Monel K-500)	1
Cu-Legierungen	
2.0401 (CuZn36Pb3)	1
* 2.0855 (CuNi2Si)	1
Al-Legierungen	
* 3.2315 (AlMgSi1, alloy 6351)	1
3.3206 (AlMgSi0.5; alloy 6060)	1
* 3.4365 (AlMgZnCu1.5; alloy 7075)	1
jeweils im Anlieferungszustand und anodisiert	
Titan	
* 3.7035 (grade 2)	1
* auch belastet geprüft	
■ Automatenqualität (S-legiert)	
+ 0 = Stangenabschnitte	

Tabelle 1. Untersuchte Werkstoffe

angelegtes Prüfprogramm, welches beschichteten C-Stahl, Al-, Cu- und Ni-Legierungen, Titan und vor allem eine Reihe von nichtrostenden Stählen umfasste, wurde 1987 gestartet. Auswertungen nach 9, 11, 19, 24 und 36 Monaten Auslagerungsdauer sowie die Ergebnisse von parallel dazu durchgeführten Laborversuchen ermöglichten die Erstellung eines fundierten Werkstoffvorschlages für die Befestigung der Wandverkleidung, Beleuchtung und Kabeltrassen.

Charakteristika des Mont-Blanc-Tunnels

Die wichtigsten Daten und Masse sind Bild 1 [1] zu entnehmen. Der Tunnel verläuft von NNW nach SSO, ist einröhrig und hat im Abstand von 300 m

jeweils eine Garage von 30 m Länge und 3,15 m nutzbarer Breite.

Die Fahrbahnplatte und die Ventilationschächte wurden bis km 2,9 vorfabriziert (je 10 m lang, 115 – 160 to), bis km 5,8 vom Ort in Schalung gegossen. Die Betonarbeiten wurden nach klassischer Methode mittels beweglicher Metallschalung auf Schiene durchgeführt. Der Ort beton der Tunnelwand ist zwischen 30 und 70 cm dick und enthält als Zuschlagsstoff das Ausbruchsgestein. Der Beton weist gegenwärtig eine Festigkeit von 32 – 55 N/cm² in trockenen Bereichen und 20 – 35 N/cm² in Feuchtzonen auf (Prellhärte mittels Prüfhammer nach Schmidt). Die Karbonatisierungstiefe liegt bei 25 – 29 mm. Die Versalzung des Betons beträgt bis zu einer Tiefe von 10 mm 0,18 – 0,75% Cl⁻ (bezogen auf Betoneinwaage).

Durch Risse im Beton tritt stellenweise Bergwasser aus.

Die Belüftung stellt ein Mischsystem aus transversaler und semitransversaler Belüftung dar. Die Frischluft wird alle 10 m über Öffnungen oberhalb des linken Gehsteigs (Bild 1) zugeführt, die Abluftabsaugung erfolgt alle 300 m in Nischen an der Tunnelkalotte. Je 5 Frischluftventilatoren (davon 1 Notaggregat) mit je 75 m³/sec Leistung bei 432 mm WS sowie 3 Abluftventilatoren mit je 50 m³/sec Leistung bei 672 mm WS sind an den Portalen installiert.

Mehr als 15 000 Fahrzeuge passieren täglich den Tunnel, davon rund 50% LKW.

Korrosionsbedingungen

Die Feuchtigkeit der Tunnelatmosphäre ist sehr hoch (41 – 95%, Mittelwert September 1988 bis September 1989: 72%). Die Lufttemperatur schwankt zwischen 6°C und 25°C (Mittelwert: 18,5°C). Die Temperatur des Gesteins [1] beträgt im Mittel am französischen Portal rund 12°C, bei km 3,3 (unterhalb der Aiguille du Midi, Bild 1) 30°C. Diese Temperatur bleibt bis km 6,2 etwa konstant und sinkt auf 16°C beim italienischen Portal.

Der Anteil an sauren Gasen (SO₂, HCl, NO_x) in der Atmosphäre ist ebenso wie der Russanteil sehr hoch, da besonders die Dieselmotoren der Lastwagen nicht optimal auf diese Höhe eingestellt sind und nur unvollständig verbrennen. Neben Russ enthält der Staub im Tunnel mineralische Substanzen, Pneumabrieb und bis zu 3,5 Gew.-% wasserlösliches Chlorid, welches aus der Salzstreuung auf den Zufahrtsrampen während der Wintermonate stammt. Es wird von den Fahrzeugen mit Schneeresten eingetragen und über die Tunnelänge etwa gleichmässig verteilt. An den von der periodischen Reinigung erfassten Stellen liegt der Cl-Gehalt im Staub unter 1%.

Daraus resultiert bei Kondensationsbedingungen für die ausserhalb von Bohrlöchern liegenden metallischen Teile als Elektrolyt ein dünner Film einer sauren Cl⁻ Lösung, deren Konzentration beim periodischen Auftrocknen bis zur Sättigung steigt. Die Staubablagerungen tragen durch ihre spaltbildende Wirkung zur Verschärfung der Korrosionsbedingungen bei. Im Bohrloch sind die Bedingungen aufgrund des höheren pH-Wertes durch die Betonalkalität milder.

Kondensationsbedingungen können, wie Messungen aus einem Schweizer Tunnel (Gubristtunnel bei Zürich) zeigen, periodisch mit den täglichen Temperaturschwankungen (Bild 8) auftreten.

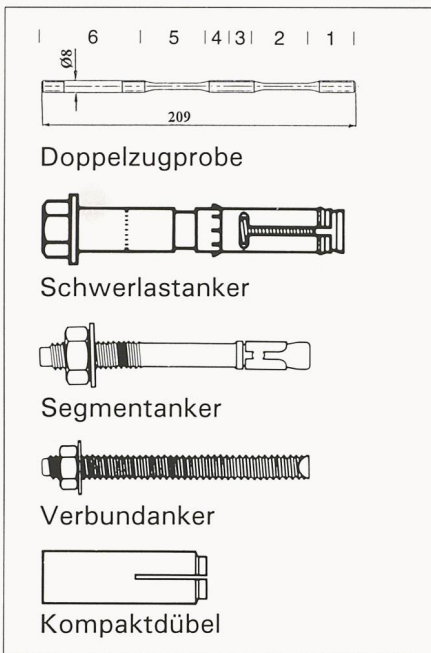


Bild 2. Probenformen

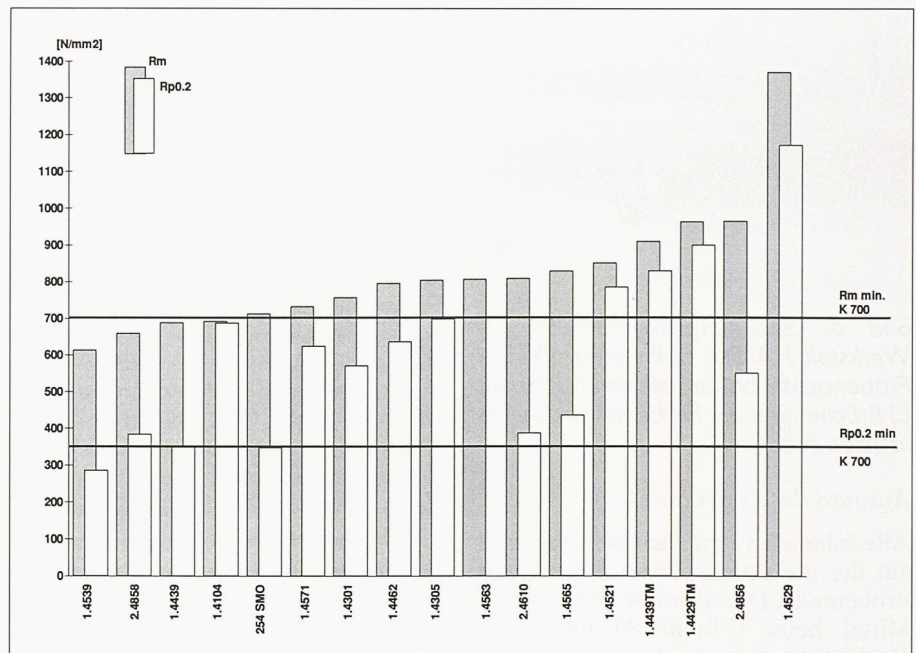


Bild 3. Mechanische Eigenschaften der nichtrostenden Stähle und der Ni-Legierungen

ten, wenn die Dübel- bzw. Wandtemperatur niedriger ist als die Lufttemperatur. Ausserdem ist die Bildung eines Elektrolytfilms infolge des hygroskopischen Effekts der salzhaltigen Staubablagerungen schon bei einer relativen Feuchte von 35 – 30% möglich.

Versuchsablauf, Werkstoffe

Die Proben, verschiedene Dübel und spezielle Doppelzugproben (DZP), wurden am 11. Okt. 1987 in der Garage 3, rund 1 km vom französischen Portal entfernt, ausgelagert. Ein Teil der Proben war auf Betonplatten montiert (3 Serien von 17 Werkstoffen à 6 Proben, die Hälfte davon mittels Federtöpfen auf 90% der 0,2%-Dehngrenze belastet), das gesamte Werkstoffspektrum war direkt in der Tunnelwand montiert. In Summe umfasste der Versuch 960 Proben. Tabelle 1 enthält die untersuchten Werkstoffe. Die mit «*» gekennzeichneten Werkstoffe wurden im belasteten Zustand geprüft. Die Probenformen sind Bild 2 zu entnehmen.

Die Werkstoffe 1.4565, 254 SMO und 1.4529 wurden erst 1989 bzw. 1990 ins Prüfprogramm aufgenommen.

Die mechanischen Eigenschaften der nichtrostenden Stähle und der Ni-Legierungen sind in Bild 3 graphisch dargestellt. Mit Ausnahme von 1.4539, 1.4439 und 2.4858 waren alle mehr oder weniger stark kaltverformt, so dass die für Dübel üblicherweise verwendete Festigkeit von 700 MPa in etwa erreicht wurde.

Ein kompletter Probensatz wurde nach 11 und 36 Monaten Auslagerungsdauer

entnommen, nach 9, 19, 24 und 32 Monaten wurden nur Proben aus der Tunnelwand entnommen, vor allem nichtrostende Stähle. Die aus der Wand entnommenen DZP wurden teilweise wieder durch neue ersetzt, so dass vergleichbare Daten aus verschiedenen Jahren vorliegen. An den belasteten Proben wurde nach 7 Tagen sowie 11, 19, 32 und 36 Monaten die Verschiebung gemessen.

Auswertung

Die gereinigten Proben wurden visuell (Lupe 10x) beurteilt, Zone 2 der Doppelzugproben (vgl. Bild 2) bild-analytisch ausgewertet, wobei der korrodierte Flächenanteil in% bestimmt wurde. Die Angriffstiefe wurde mittels Messmikroskop oder an Schliften bestimmt. An allen Proben aus nichtrostenden Stählen und Ni-Legierungen wurde eine Rissprüfung mittels Farbeindringverfahren durchgeführt.

Ergebnisse

Korrosionserscheinungen

Sowohl Ausmass als auch Intensität der Korrosion waren innerhalb des Bohrlochs wesentlich geringer als an der Atmosphäre. Im Bohrloch war nach 36 Monaten Korrosion am C-Stahl einschliesslich aller Beschichtungsvarianten, an den Cu- und Al-Legierungen, an den Cr-Stählen und den Werkstoffen 1.4305, 1.4301 und 2.4858 (Incoloy 825) festzustellen.

An der Atmosphäre und im Übergangsbereich blieben innerhalb von 36 Monaten Auslagerungsdauer nur die Werkstoffe 1.4462, 2.4856 (Inconel 625), 2.4610 (Hastelloy C-4) und Titan frei von Korrosion, die Werkstoffe 1.4529 (auch in extrem hochfester Version), 1.4565 und 254 SMO waren bei der letzten Auswertung ebenfalls ohne Korrosion, allerdings erst 27 (1.4529) bzw. 12 Monate ausgelagert.

Je nach Werkstofftyp lag gleichmässige Flächenkorrosion bzw. muldenförmige Korrosion vor (C-Stahl, Cu-Legierungen, AlZnMgCu1.5) oder Loch- bzw. Spaltkorrosion (nichtrostende Stähle, 2.4858, Al-Legierungen, vor allem in anodisiertem Zustand).

Bei den nichtrostenden Stählen 1.4104 und 1.4305 führte das dichte Auftreten von lokalen Korrosionsstellen zu einem quasi flächenförmigen Angriff, der jedoch im Mittel noch keine signifikante (<0,015 mm) Abnahme des Querschnitts zur Folge hatte.

Risse (bzw. Brüche bei den belasteten Proben) traten nur am Werkstoff 1.4305 auf, und zwar die ersten Anrisse bereits nach 11 Monaten (Bild 4). Rissausslösend wirkten nicht nur die Spannungen aufgrund äusserer Belastung, sondern auch Eigenspannungen, z.B. aus der Probenherstellung. Letztere führten an unbelasteten Proben zu Rissen parallel zur Probenachse (vgl. Bild 4a).

Die Risse sind eindeutig auf Cl^- induzierte Spannungsrissskorrosion zurückzuführen (verformungslos, transkristallin, z.T. von Lochfrass ausgehend).

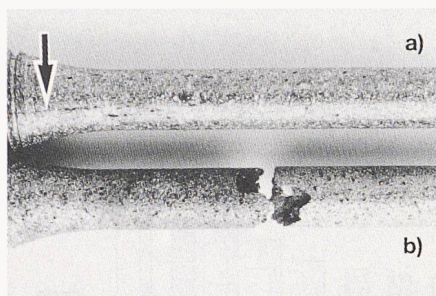


Bild 4. Spannungsrisskorrosion am Werkstoff 1.4305: a) Risse parallel zur Probenachse bei unbelasteten Proben; b) Brüche quer zur Probenachse bei belasteten Proben

Ausmass der Korrosion

Alle folgenden Angaben beziehen sich auf die der Atmosphäre ausgesetzten Probenteile. Die Abtragsrate betrug im Mittel beim C-Stahl 80 $\mu\text{m/a}$, bei CuNi2Si 14 $\mu\text{m/a}$, bei Messing 10 $\mu\text{m/a}$ und bei Monel K-500 9 $\mu\text{m/a}$.

Die galvanische Verzinkung und die Dacromet-Beschichtung waren abkorrodiert, so dass bereits die wesentlich schneller als die Zinkkorrosion ablaufende Korrosion des Stahles eingesetzt hatte. Bei der Feuerverzinkung war die FeZn-Legierungsschicht auf eine minimale Dicke von 24 μm abkorrodiert. Die mittlere Restzinkschicht betrug 70 μm , die Restzinkschicht war rissig. Die Epoxy-Beschichtung war vor allem an Kanten rissig geworden, stark unterrostet und teilweise grossflächig abgeplatzt. An diesen Stellen konnte nach 36 Monaten kein Unterschied im Korrosionszustand zwischen unbeschichteten und epoxybeschichteten, feuerverzinkten Proben festgestellt werden.

Die Korrosion der nichtrostenden Stähle und Ni-Legierungen in Zone 2 der Doppelzugproben (Bild 2) wurde bildanalytisch erfasst und ist in Diagrammform in Bild 5a zu sehen. Es wurden die jeweils bestimmten Maximalwerte ein-

getragen. Bild 5b zeigt die jeweils festgestellten maximalen Angriffstiefen.

Die Werte nach 36 Monaten Auslagungsdauer für die Al-Legierungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Aus einem Vergleich der Bilder 5a und 5b ist zu erkennen, dass Flächenanteil der Korrosion und Angriffstiefe nicht konform verlaufen. Dies ist aus unterschiedlichem Reinheitsgrad bei verschiedenem Legierungsgehalt erklärbar. Am augenfälligsten ist der Effekt bei den thermomechanisch (TM) gewalzten Stählen, die im Vergleich zu gleich oder ähnlich hoch legierten Stählen jeweils deutlich schlechter abschneiden, vor allem hinsichtlich der Angriffstiefe. In diesem Fall dürfte dieses Verhalten auf herstellungsbedingte Ausscheidungen zurückzuführen sein. Die Beherrschung der TM-Technik wird mit steigendem Mo-Gehalt schwieriger, was auch im Vergleich der Ergebnisse von 1.4429TM und 1.4439TM zum Ausdruck kommt. Bei den TM-gewalzten Werkstoffen wurde offenkundig erhöhte Festigkeit auf Kosten der Korrosionsbeständigkeit erreicht.

Kriechverhalten

Mit Ausnahme von Titan lag die Verschiebung bei allen Werkstoffen innerhalb der Messgenauigkeit von 0,02 mm. Titan wies zwischen 7 Tagen und 11 Monaten 0,58 mm Verschiebung auf, zwischen 11 und 19 Monaten 0,08 mm. Ab 19 Monaten lag die Verschiebung mit 0,03 mm knapp oberhalb der Messgenauigkeit.

Laborversuche

An einigen ausgewählten nichtrostenden Stählen und Ni-Legierungen wurde parallel zum Feldversuch der verschärfte FeCl_3 -Test in Anlehnung an ASTM G-48 als Spaltkorrosionstest durchgeführt. Dabei wurden Gewindestangen zur Hälfte in Verbundankerharz HIT C100 eingegossen und bei $-7,5^\circ\text{C}$ in einer 10% -FeCl_3 -Lösung ausgelagert. In Intervallen von 24 Stunden wurde die Temperatur um $2,5^\circ\text{C}$ erhöht. Die Temperatur, bei der Korrosion auftritt, wird als kritische Spaltkorrosionstemperatur (CCT) registriert. Die Ergebnisse sind Bild 6 zu entnehmen: Einen CCT-Wert $>30^\circ\text{C}$ – entsprechend der maximalen Temperatur im Tunnel – haben nur die 6%-Mo-Stähle, 1.4565 und 2.4856. Demgegenüber liegen 1.4539 und 1.4462 knapp darunter. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus dem Feldversuch ist der Duplex-Stahl 1.4462 nach diesem Test nicht korrosionsbeständiger als 1.4539. Die CrNiMo-Stäh-

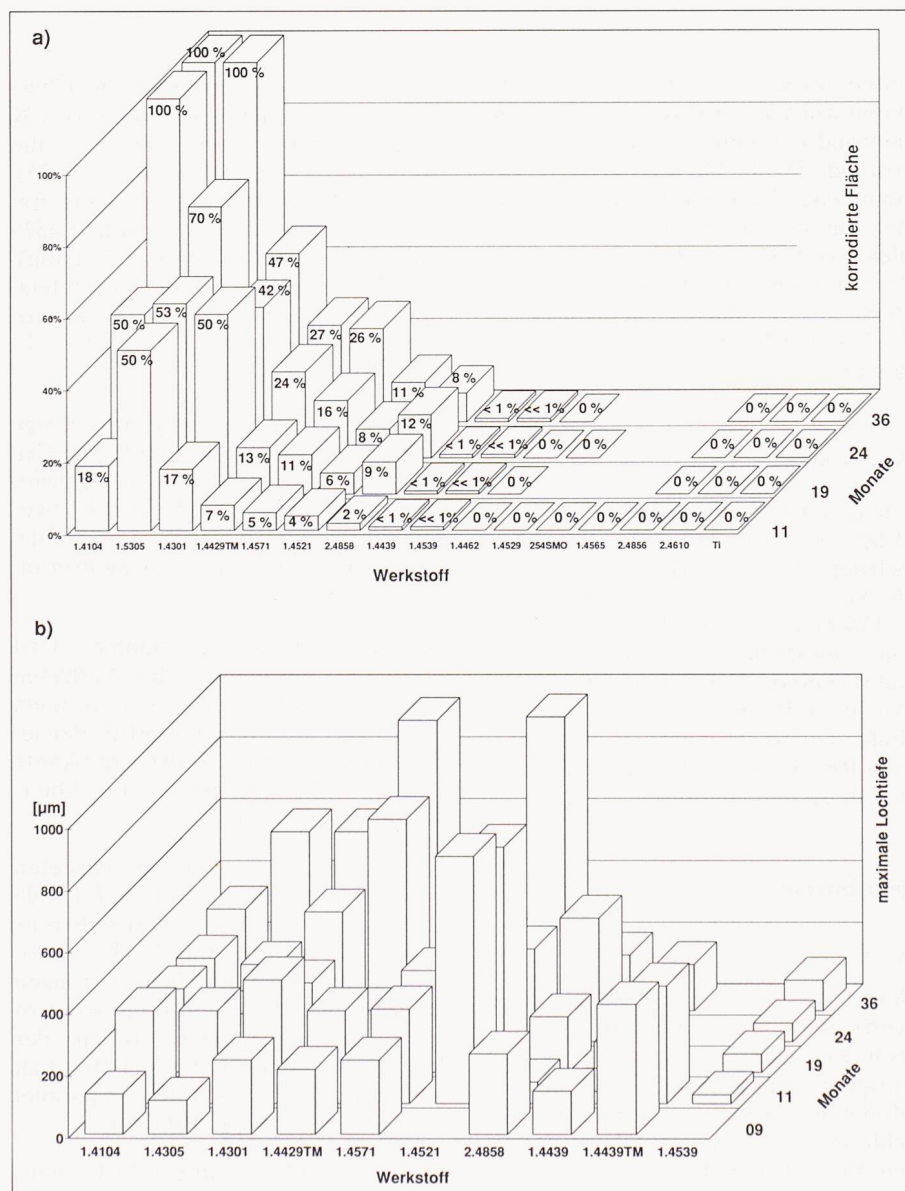


Bild 5. Korrosion an nichtrostenden Stählen und Ni-Legierungen: a) Ausmass der Loch-/Spaltkorrosion in % der Probenoberfläche; b) Maximale Angriffstiefe

le mit 2 – 3% Mo, welche normalerweise für nichtrostende Bauteile im Bauwesen verwendet werden, korrodieren in diesem Test schon bei der tiefstmöglichen Temperatur.

Titan wird von dieser Prüflösung im untersuchten Temperaturbereich nicht angegriffen.

Anforderungen an die Werkstoffe

Sicherheit und geringer Wartungsaufwand sind die wichtigsten Anforderungen an Befestigungen in Strassentunnels.

Korrosion

Korrosion, welche die Funktion beeinträchtigt, darf innerhalb der vorgesehenen Lebensdauer nicht eintreten. Für die Befestigungen im Mt. Blanc Tunnel wurde eine Garantie von 10 Jahren gefordert. Ausserdem waren stark gefärbte Korrosionsprodukte nicht erwünscht.

Mechanische Eigenschaften

Bei der Bemessung von Befestigungen sind neben der Last, die vom befestigten Bauteil übertragen wird, auch Beanspruchungen durch Fremdeinwirkung, z.B. Fahrtwind und Unfalleinwirkungen zu berücksichtigen. Daraus resultiert die Forderung nach ausreichender Festigkeit und hoher Duktilität.

Erfahrungsgemäss genügt eine Zugfestigkeit von 700 MPa und eine 0,2%-Dehngrenze von 350 MPa (Ankerbolzen) bzw. 450 MPa (Gewindestangen). Diese Werte beruhen auf Mindestwerten für kaltverformte, nichtrostende Stähle nach DIN 17 440 bzw. DIN 267 Teil 11 (Zustand K700 bzw. K70) und werden für Befestigungselemente aus 1.4401 (A4) normalerweise vorgeschrieben. Für die Auslegung der Befestigungen im Mont-Blanc-Tunnel wurden diese Werte für die mechanischen Eigenschaften zugrundegelegt.

Austenitische Werkstoffe (CrNiMo-Stähle, Ni-Legierungen) mit Ausnahme von 1.4565 und 2.4856 erreichen diese Festigkeitswerte im lösungsgeglühten und abgeschreckten Zustand (optimale Korrosionsbeständigkeit) nicht. Diese Werkstoffe müssen thermomechanisch (TM) gewalzt oder im kaltverformten Zustand eingesetzt werden.

TM-gewalzt sind am Markt nur die Werkstoffe 1.4429 und 1.4439 erhältlich. Für die zur Anwendung im Tunnel in Frage kommenden austenitischen Werkstoffe ist eine Kaltverformung von 5 – 10% notwendig, um die erforderliche Festigkeit und Dehngrenze zu er-

Werkstoff		korrodierte Fläche (%)	Angriffstiefe (µm)
AlMgSi1	(3.2315)	80	455
AlMgSi1	(3.2315), anodisiert	19	n. b. *)
AlMgSiO.5	(3.3206)	58	910
AlMgSiO.5	(3.3206), anodisiert	n. b.	1030
AlMgZnCu1.5	(3.4365)	100	n. b.
AlMgZnCu1.5	(3.4365), anodisiert	36	250

*) n. b. = nicht bestimmt/bestimmbar

Tabelle 2. Korrosion der Al-Legierungen nach 36 Monaten

reichen. Diese Kaltverformung bewirkt eine gewisse Abnahme der Bruchdehnung, wegen der hohen Ausgangswerte werden aber trotzdem im Vergleich zu 1.4401 noch höhere Werte erreicht (rund 20%).

Die Kaltverformung kann das Korrosionsverhalten negativ beeinflussen. Dieser Einfluss ist aber im Feldversuch auch bei den weichen Stählen insofern berücksichtigt, als die spanende Bearbeitung im oberflächennahen Bereich ebenfalls zu Kaltverformungen führt und die Proben somit bezüglich der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Loch- und Spaltkorrosion das Verhalten eines kaltverformten Zustands widerspiegeln.

Der Duplexstahl 1.4462 hat im lösungsgeglühten und abgeschreckten Zustand ausreichende Festigkeitseigenschaften.

CuNi2Si ist ein ausscheidungshärtender Werkstoff, bei dem die 1.4401-Vergleichswerte bezüglich Festigkeit aber nicht erreicht werden. Eine ausreichende Dehngrenze wird in den Zuständen F49 und F64 nach DIN 17672 Teil 1 (aus-

gehärtet) erreicht. Die Bruchdehnung ist aber in jedem Fall geringer als bei austenitischen Werkstoffen (15 bzw. 10%). Reintitan der handelsüblichen Sorten erreicht die 1.4401-Vergleichswerte nicht. Zudem sind die Bruchdehnungswerte niedrig.

Verfügbarkeit

Als Vormaterial für Befestigungselemente werden im wesentlichen Stangen und Bandmaterial, in Ausnahmefällen Rohre, benötigt. In den hauptsächlich verwendeten Dimensionen und der erforderlichen Festigkeit sind inzwischen auch die höherlegierten CrNiMo-Stähle mit akzeptabler Lieferzeit verfügbar. Stangen mit 8 – 40 mm Durchmesser aus den Werkstoffen 1.4539, 1.4462, 1.4529, 254 SMO, 2.4856, 2.4610 und Titan sind sogar ab Lager lieferbar.

Bearbeitbarkeit

Gewindestangen werden gerollt, Dübelbolzen sowie derzeit vielfach noch die Muttern und Scheiben werden durch spanende Bearbeitung herge-

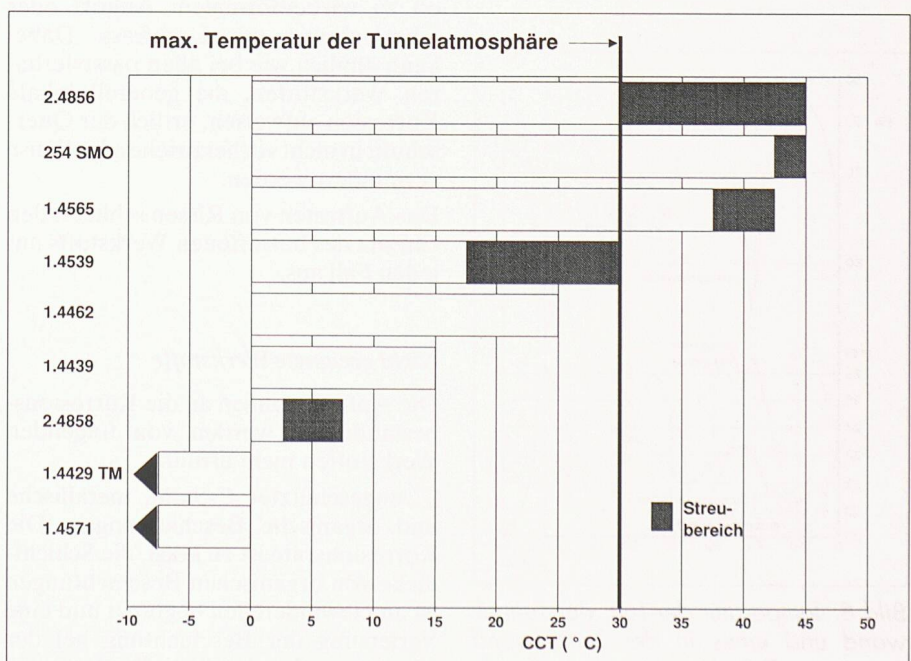


Bild 6. Spaltkorrosionstest in 10%-FeCl₃-Lösung

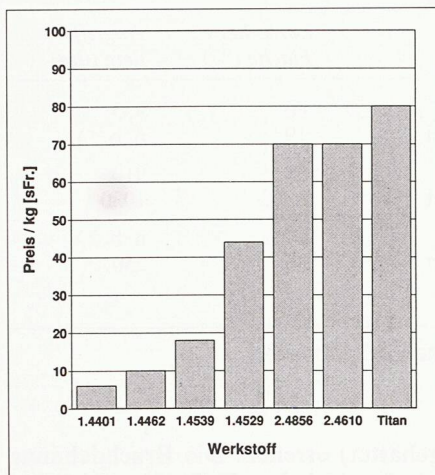


Bild 7. Preise einiger nichtrostender Stähle und Ni-Legierungen

stellt. Die spanende Bearbeitung der höherlegierten CrNiMoStähle ist generell schwieriger als die von 1.4401. Noch schwieriger sind die Ni-Legierungen zu bearbeiten. Teure Spezialwerkzeuge und längere Bearbeitungszeiten führen zu erhöhten Herstellkosten.

Preis

Der Preis eines Befestigungselementes wird im wesentlichen von den Werkstoffkosten, in zweiter Linie von den Herstellkosten bestimmt. Die Werkstoffkosten hängen nicht nur vom Legierungsgehalt der Werkstoffe, sondern auch von der Gängigkeit und vom Halbzeug (Form und Dimension) ab. Häufig verwendete Werkstoffe sind naturgemäss relativ gesehen billiger als Sonderwerkstoffe. Bild 7 zeigt die wichtigsten Werkstoffe im Vergleich (Stand Febr./92).

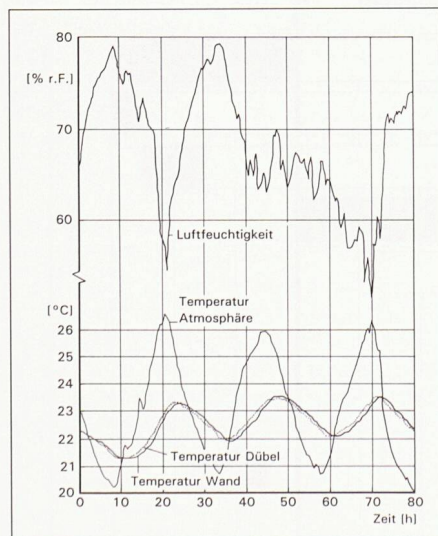


Bild 8. Temperatur der Luft, der Tunnelwand und eines in der Tunnelwand montierten Dübels sowie die Luftfeuchtigkeit im Gubristunnel, Schweiz.

Bewertung der Ergebnisse

Die Werkstoffwahl für Befestigungselemente im Mont-Blanc-Tunnel war so zu treffen, dass alle Anforderungen in optimaler Weise erfüllt werden.

Befestigungselemente werden üblicherweise auf 3fache Sicherheit gegen Versagen ausgelegt [2]. Die Auslegung kann auf Betonversagen (üblich in Europa) oder auf Stahlversagen (USA) erfolgen. Bei gegebener Werkstofffestigkeit bleibt für eine bestimmte Art von Befestigungselement je nach Dimension ein mehr oder weniger grosser Anteil am Querschnitt, der über das von der Sicherheitsauslegung geforderte Mass hinausgeht. Dieser Anteil ist als «Korrosionszuschlag» nutzbar und kann wegkorrodieren, ohne dass die geforderte Sicherheit beeinträchtigt wird. Dieser Querschnittsanteil ist üblicherweise gering. Ein grösserer Korrosionszuschlag kann somit nur durch Verwendung von Befestigungselementen einer grösseren als der erforderlichen Dimension erreicht werden. Bei der Auslegung auf Stahlversagen sind dem allerdings Grenzen gesetzt. Diese Vorgehensweise führt zudem zu wesentlich erhöhten Kosten, da z.B. für einen Sprung von M8 auf M10 für einen Dübel vom Typ 3 (siehe Bild 2) 87% mehr Material benötigt wird.

Bei gleichmässiger Flächenkorrosion kann im Prinzip von der Abtragsrate für einen gegebenen Querschnitt eines Befestigungselementes auf die Lebensdauer geschlossen werden.

Wirklich gleichmässige Flächenkorrosion trat aber nur bei den Kupferlegierungen auf. Die anderen Werkstoffe neigen bei sogenannter Flächenkorrosion zu narbenförmigem Angriff oder Überlagerung mit Lochfrass. Dabei kann ähnlich wie bei allen passivierbaren Werkstoffen, die generell lokale Korrosion aufweisen, örtlich der Querschnitt in nicht vorherzusehender Weise vermindert werden.

Das Auftreten von Rissen schliesst den Einsatz des betroffenen Werkstoffs auf jeden Fall aus.

Nicht geeignete Werkstoffe

Die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit werden von folgenden Werkstoffen nicht erfüllt:

☐ ungeschützter C-Stahl, metallische und organische Beschichtungen: Die Korrosionsrate ist zu hoch, die Schichtdicke von organischen Beschichtungen ist an Gewindeteilen begrenzt und eine Verletzung der Beschichtung bei der Montage wahrscheinlich. Die Unterrostung an Fehlstellen der Beschichtung

führt innerhalb kurzer Zeit zu starker Korrosion.

☐ Cr-Stähle: starke Korrosion, hohe Angriffstiefe bei 1.4521

☐ CrNi-Stähle: hohe Angriffstiefe bei 1.4301, Spannungsrissskorrosion bei 1.4305

☐ CrNiMo-Stähle mit 2–3% Mo: hohe Angriffstiefe, besonders im TM-gewalzten Zustand

☐ CrNiMo-Stähle mit 4–5% Mo (1.4439, 1.4539): Die Lochkorrosion war zwar gering, vereinzelt schnelles Wachstum ist aber nicht auszuschliessen.

☐ Al-Legierungen: starke Korrosion, im eloxierten Zustand hohe Angriffstiefe der örtlichen Korrosion. Zudem werden die erforderlichen Festigkeitswerte bei weitem nicht erreicht.

☐ Messing: Abtragsrate zwar gering, Spannungsrissskorrosion aber nicht auszuschliessen; Festigkeit zu niedrig

☐ 1.4563: starke Lochkorrosion

☐ Monel K-500: Die Abtragsrate ist zwar gering, die gleichmässige Flächenkorrosion ist aber von Lochkorrosion überlagert. Vereinzelt schnelleres Tiefenwachstum ist nicht auszuschliessen. Wegen dieser Unsicherheit und des hohen Preises der Legierung wurde sie nicht weiter in Betracht gezogen.

Es verbleiben somit folgende Werkstoffe:

Der Duplexstahl 1.4462, die hMo-Stähle 1.4529 und 254 SMO, 1.4565, die Ni-Legierungen 625 und C-4 (bzw. die vergleichbaren Legierungen C-276 und C-22), CuNi2Si und Titan.

Mit Einschränkungen geeignete Werkstoffe

☐ Duplexstahl 1.4462: Aufgrund der allgemeinen Erfahrung und auch der Laborergebnisse ist dieser Werkstoff trotz der bisherigen Beständigkeit im Feldversuch als der Legierung 904L vergleichbar zu betrachten. Loch- bzw. Spaltkorrosion sind daher langfristig nicht gänzlich auszuschliessen. Dieser Werkstoff sollte daher nur für untergeordnete Befestigungen eingesetzt werden. Ansonsten wird eine periodische Überwachung als notwendig erachtet.

☐ CuNi2Si: Dieser Werkstoff wird wegen seiner guten elektrischen Leitfähigkeit für Befestigungselemente vor allem in der Elektrotechnik, z.B. Fahrleitungen bei Eisenbahnen, eingesetzt. Die Abtragsrate im Tunnel ist verhältnismässig gering und gleichmässig. Da keine Erfahrungen aus vergleichbaren Anwendungen vorliegen, ist eine periodische Überwachung zu empfehlen. Ein Problem stellen die niedrigen

Festigkeitswerte und die ausgesprochen geringe Zähigkeit dar. Bei Verwendung dieses Werkstoffs müsste die zulässige Last für die Befestigungselemente herabgesetzt werden. Vorteil von CuNi2Si ist der niedrige Preis.

□ Ni-Legierungen (Inconel 625 und Hastelloy-Typen): Die Korrosionsbeständigkeit ist ausgezeichnet, die mechanischen Eigenschaften ausreichend hoch, die Legierungen sind aber schwierig zu bearbeiten und sehr teuer.

□ Titan: Die Beständigkeit ist ausgezeichnet, die Festigkeit der handelsüblichen Reintitansorten ist aber zu gering. Verwendbar wäre eine japanische Neuentwicklung mit stark erhöhter Festigkeit. Titan erfordert Erfahrung in der Bearbeitung. Der Preis ist hoch und unterliegt grossen Schwankungen.

□ 1.4565: Dieser relativ neue Werkstoff ist laut Herstellerangaben und den bisherigen Ergebnissen in der Korrosionsbeständigkeit den 6%-Mo-Stählen gleichzusetzen. Er bietet eine optimale Kombination von Korrosionsbeständigkeit und hoher Festigkeit. Es liegen jedoch noch keine Langzeitreferenzen aus Praxisanwendungen vor. Die Verfügbbarkeit ist noch begrenzt.

Optimale Werkstoffwahl

Als optimale Lösung bieten sich die 6% Mo-Stähle 1.4529 bzw. 254 SMO an. Diese in der chemischen Industrie, Ener-

gietechnik und im Offshore-Einsatz vielfach bewährten Werkstoffe können unter den im Tunnel vorliegenden Bedingungen als beständig angesehen werden. Der an Ankerstangen durchgeführte Spaltkorrosionstest sowie die Praxiserfahrung bestätigen dies. Ferner sind sie leichter zu bearbeiten und merklich billiger als die ebenfalls in Frage kommenden Ni-Legierungen 625 und C-4.

Die Befestigungen für die Beleuchtung und verschiedene Leitungen wurden inzwischen bereits in der Qualität 1.4529 ausgeführt.

Übertragbarkeit auf andere Tunnels

Aufgrund der bisherigen Erfahrung muss davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse aus dem Mont-Blanc-Tunnel nicht 1:1 auf andere Strassen- oder Eisenbahntunnels übertragen werden können. Die Aggressivität der Tunnelatmosphäre hängt im wesentlichen von der Feuchtigkeit der Cl^- Belastung, dem Anteil an sauren Abgasbestandteilen und der Staubbelastung ab. Indirekt wirken sich auch die Verkehrsfrequenz, der LKW-Anteil, konstruktive Merkmale (ein/zweiröhrige Bauweise, Länge, Belüftungsverhältnisse) und geographische Merkmale (Höhenlage, Himmelsrichtung) aus. Diese Zusammenhänge sind bisher nicht im Detail untersucht worden. Eine auf den Einzelfall optimierte Lösung ist daher derzeit nicht möglich.

Empfehlung

Aufgrund der relativ geringen Differenz in den Kosten für die Erstinvestition zwischen den 6%-Mo-Stählen und etwas niedriger legierten Stählen, gemessen an den Kosten für periodische Überwachung bzw. Reparaturmassnahmen, erscheint es sinnvoller die als langfristig korrosionsbeständig anzusehenden 6%-Mo-Stähle auch dort einzusetzen, wo weniger aggressive Bedingungen vermutet werden.

Adresse der Verfasser: H. Haselmair, Hilti Bauchemie GmbH, Eisenstrasse 38, D-6090 Rüsselsheim, A. Übleis, Hilti AG, Konzernforschung, Feldkirchstrasse, FL-9494 Schaan, und Prof. Dr. H. Böhni, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Literatur

- [1] Quelques notes sur le tunnel routier du Mont Blanc, Société Concessionnaire Française pour la Construction & l'Exploitation du Tunnel Routier sous le Mont Blanc, Paris, o. Jg.
- [2] Hilti Handbuch der Befestigungstechnik, Anker- und Dübelmontage, 8/1991, S. 41.

Die Autoren danken Herrn G. Roncoli, Technischer Direktor der Mont-Blanc-Tunnel-Betriebsgesellschaft, und den Herren Gamay und Bernard für die Unterstützung bei der Durchführung des Feldversuchs. Besonderer Dank gebührt den Herren P. Gschwend und F. Peter für ihren Einsatz bei der Auswertung der Versuche.

Cimavilla-Brücke, Poschiavo

Eine unkonventionelle Lösung aufgrund der Erfahrungen aus dem Unwetter vom Juli 1987

Eingehende Untersuchungen und Modellversuche, gestützt auf den Beobachtungen aus der Hochwasserkatastrophe vom 18./19. Juli 1987, führen zu einem unkonventionellen Vorschlag, der – in Abweichung zur herkömmlichen Dimensionierungspraxis – die Abflusskapazität beträchtlich erhöht und allenfalls auch für weitere Brücken Modellcharakter haben könnte.

Ausserordentliche Regenfälle führten am 18./19. Juli 1987 im Veltlin und im angrenzenden Puschlav zu extremen

VON M. JÄGGI UND J. ABEGG,
ZÜRICH

Hochwasserabflüssen. Im Val Varuna wurden mehrere Murschübe ausgelöst, welche insgesamt rund 350 000 m³ Material zu Tale beförderten. Zwar lagerte sich der grösste Teil davon auf dem

Schwemmkegel in Privilasco ab, doch erreichten etwa 10% des Materials den Hauptfluss im Tal, den Poschiavino. Dieser führte zwar gleichzeitig Hochwasser, doch verursachten diese extremen Materialeinstösse im Mündungsbereich Sohlenhebungen von mehreren Metern. Das Hochwasser des Poschiavino verteilte diese Ablagerungen talwärts. Auf einer Strecke von einigen 100 m wurde so das ganze Flussbett aufgefüllt, und Wasser und Geschiebe breiteten sich über die Kantonsstrasse tal-

wärts aus (Bild 1). Was an Abfluss noch im Gerinne verblieb, wurde schliesslich grösstenteils bei der Cimavilla-Brücke seitlich abgedrängt. Unterhalb der Brücke verblieb im Gerinne des Poschiavinos nur noch ein kleiner Restabfluss. Dafür ergossen sich Wasser und Geschiebemassen vor allem durch die Via Maestra und verwüsteten Häuser, Strassen und Plätze.

Hydraulische Wirkung der Cimavilla-Brücke

Heute, das heisst etwas mehr als 5 Jahre nach dem Ereignis, steht einigermassen fest, welche Prozesse zum Schaden führten. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich untersuchte im Auftrag der Gemeinde Poschiavo und des Kantonalen Tiefbauamts Graubünden, wie hoch die Gefährdung des Dorfs Poschiavo bei einem hohem Feststoffeintrag aus dem Val Varuna noch sei. Das Problem wurde mit Hilfe einer numeri-