

Merkblatt 833

Edelstahl Rostfrei in Erdböden



Die Informations- stelle Edelstahl Rostfrei

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

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

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

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

Alle ISER Publikationen stehen zum kostenfreien Download unter www.edelstahl-rostfrei.de zur Verfügung.

Impressum

Merkblatt 833
Edelstahl Rostfrei in Erdböden
2. überarbeitete Auflage 2019

Herausgeber:

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

Autoren:

Dr.-Ing. Andreas Burkert,
Dipl.-Ing. Jens Lehmann,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Titelfoto:

HUBER SE, Berching

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

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	2
2 Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle in Erdböden	3
2.1 Lochkorrosion	4
2.2 Spaltkorrosion	5
2.3 Mikrobiologisch induzierte Korrosion	5
2.4 Spannungsrissskorrosion	5
2.5 Interkristalline Korrosion	5
3 Vorliegende Erfahrungen	6
4 Regelwerke	7
5 Praktische Anwendungen und Erfahrungen	10
5.1 Behälter / Leitungen	10
5.2 Erdanker	11
5.3 Garten-/Landschaftsbau	11
5.4 Blitzschutz	12
5.5 Umhüllungen	12
6 Literatur	12

1 Einleitung

Edelstahl Rostfrei ist ein Sammelbegriff für die nichtrostenden Stähle. Sie enthalten mindestens 10,5 % Chrom und weisen gegenüber unlegierten Stählen eine deutlich bessere Korrosionsbeständigkeit auf [1]. In der Tat führt das Legierungselement Chrom in diesem Mindestanteil zur Ausbildung einer sehr dünnen, aber fest haftenden und bei Verletzung auch selbstheilenden so genannten Passivschicht, die das darunter liegende Metall vor Korrosion durch die umgebenden Medien schützt.

Der ohne weitere Korrosionsschutzmaßnahmen sehr gute Widerstand dieser Legierungen gegen Korrosion in natürlichen Umgebungsatmosphären ohne wesentliche Verunreinigungen hat zur Namensgebung „nichtrostende Stähle“ geführt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese Werkstoffe beliebigen Medien ohne Korrosionserscheinungen ausgesetzt werden können. Mit einer Erhöhung des Chrom (Cr)-Gehalts über den oben genannten Mindestgehalt hinaus und dem Hinzufügen von weiteren Legierungselementen – insbesondere Nickel (Ni) und Molybdän (Mo) –, aber ggf. auch Mangan und Kupfer kann die Korrosionsbeständigkeit in Anpassung an die jeweils umgebenden Medien weiter erhöht werden. Weitere Legierungselemente beeinflussen im Wesentlichen die technologischen Eigenschaften wie spanende Bearbeitung und/oder Schweißbarkeit.

rosionsbeständigkeit in Anpassung an die jeweils umgebenden Medien weiter erhöht werden. Weitere Legierungselemente beeinflussen im Wesentlichen die technologischen Eigenschaften wie spanende Bearbeitung und/oder Schweißbarkeit.

Daneben ist als herstellungsbedingte Beimengung immer etwas Kohlenstoff (C) vorhanden. Dieser kann insbesondere nach dem Schweißen zu interkristalliner Korrosion führen, sofern er nicht sehr niedrig gehalten wird oder durch die Zugabe von Titan (Ti) oder Niob (Nb) abgebunden ist. Man bezeichnet diese Werkstoffe dann als stabilisiert.

Stahlsorte		Chemische Zusammensetzung in Masse-%					PREN ⁷⁾
Werkstoff-Nr.	EN Kurzname	C	Cr	Mo	Ni	Andere	
1.4003 ¹⁾	X2CrNi12	≤ 0,030	10,5/12,5	-	0,30/1,00		11,5
1.4512 ¹⁾	X2CrTi12	≤ 0,030	10,5/12,5	-	-	Ti 6x(C+N) bis 0,65	11,5
1.4006 ²⁾	X12Cr13	0,08/0,15	11,5/13,5	-	≤ 0,75		12,5
1.4016 ¹⁾	X6Cr17	≤ 0,08	16,0/18,0	-	-		17,0
1.4372 ⁴⁾	X12CrMnNiN17-7-5	≤ 0,15	16,0/18,0	-	3,5/5,5	Mn 5,5/7,5; N 0,05/0,25	17,0
1.4301 ³⁾	X5CrNi18-10	≤ 0,07	17,5/19,5	-	8,0/10,5	N ≤ 0,10	18,5
1.4307 ³⁾	X2CrNi18-9	≤ 0,030	17,5/19,5	-	8,0/10,5	N ≤ 0,10	18,5
1.4310 ³⁾	X10CrNi18-8	0,05/0,15	16,0/19,0	≤ 0,80	6,0/9,5	N ≤ 0,10	18,8
1.4113 ¹⁾	X6CrMo17-1	≤ 0,08	16,0/18,0	0,90/1,40	-		20,8
1.4828 ³⁾	X15CrNiS20-12	≤ 0,20	19,0/21,0	-	11,0/13,0	Si 1,50/2,50; N ≤ 0,10; Mn ≤ 2,00	21,5
1.4401 ³⁾	X5CrNiMo17-12-2	≤ 0,07	16,5/18,5	2,00/2,50	10,0/13,0	N ≤ 0,10	24,9
1.4404 ³⁾	X2CrNiMo17-12-2	≤ 0,030	16,5/18,5	2,00/2,50	10,0/13,0	N ≤ 0,10	24,9
1.4571 ³⁾	X6CrNiMoTi17-12-2	≤ 0,08	16,5/18,5	2,00/2,50	10,5/13,5	Ti 5xC bis 0,70	24,9
1.4521 ¹⁾	X2CrMoTi18-2	≤ 0,025	17,0/20,0	1,80/2,50	-	Ti [4x(C+N)+0,15] bis 0,80	25,6
1.4362 ⁵⁾	X2CrNiN23-4	≤ 0,03	22,0/24,5	0,10/0,60	3,5/5,5	Cu 0,10/0,60; N 0,05/0,20	26,4
1.4436 ³⁾	X2CrNiMo17-13-3	≤ 0,05	16,5/18,5	2,50/3,00	10,5/13,0	N ≤ 0,10	26,6
1.4162 ⁵⁾	X2CrMnNiN21-5-1	≤ 0,04	21,0/22,0	0,10/0,80	1,35/1,90	Mn 4,0/6,0; N 0,20/0,25; Cu 0,10/0,80	26,6
1.4429 ³⁾	X2CrNiMoN17-13-3	≤ 0,030	16,5/18,5	2,50/3,00	11,0/14,0	N 0,12/0,22	26,6
1.4062 ⁵⁾	X2CrNi22-2	≤ 0,03	21,5/24,0	≤ 0,45	1,00/2,90	N 0,16/0,28	27,0
1.4462 ⁵⁾	X2CrNiMoN22-5-3	≤ 0,03	21,0/23,0	2,50/3,5	4,5/6,5	N 0,10/0,22	34,5
1.4539 ³⁾	X1NiCrMoCu25-20-5	≤ 0,020	19,0/21,0	4,0/5,0	24,0/26,0	N ≤ 0,15; Cu 1,20/2,00	36,0
1.4410 ⁶⁾	X2CrNiMoN25-7-4	≤ 0,030	24,0/26,0	3,0/4,5	6,0/8,0	N 0,24/0,35; Mn ≤ 2,00	42,1
1.4529 ³⁾	X1NiCrMoCuN25-20-7	≤ 0,020	19,0/21,0	6,0/7,0	24,0/26,0	N 0,15/0,25; Cu 0,50/1,50	47,5
1.4547 ³⁾	X1CrNiMoCuN20-18-7	≤ 0,020	19,5/20,5	6,0/7,0	17,5/18,5	N 0,18/0,25; Cu 0,50/1,00	48,9
1.4565 ³⁾	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	≤ 0,030	24,0/26,0	4,0/5,0	16,0/19,0	Mn 5,0/7,0; N 0,30/0,60; Nb ≤ 0,15	53,4

¹⁾ Ferrit ²⁾ Martensit ³⁾ Austenit ⁴⁾ Manganaustenit ⁵⁾ Duplex ⁶⁾ Superduplex ⁷⁾ PREN = % Cr + 3,3 [(% Mo) + 0,5 (% W)] + x (% N)

Tabelle 1: Bezeichnung und chemische Zusammensetzung einiger in Erdböden verwendeter nichtrostender Stähle nach DIN EN 10088-1 [2]

Seit Erfindung der nichtrostenden Stähle im Jahre 1912 haben Hersteller und Verarbeiter unterschiedliche Synonyme wie V2A, V4A oder Inox in Umlauf gebracht, die in der Regel jedoch nur eine Werkstoffgruppe spezifizieren. Eindeutig werden die Werkstoffe mit den in diesem Merkblatt verwendeten Bezeichnungen der aktuellen europäischen Normung DIN EN 10088-1 [2] mit Werkstoff-Nummer oder Kurzname gekennzeichnet.

2 Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle in Erdböden

Böden können in ihrer Zusammensetzung und ihrem Schichtaufbau sehr unterschiedlich sein und so ist auch das Korrosionsverhalten von Metallen in Böden ein komplexes Thema. Ein Vergleich zur atmosphärischen Korrosion und zur Korrosion in wässrigen Lösungen ist nur bedingt möglich, da sich die Mechanismen aufgrund der Inhomogenität eines Bodens als Korrosionsmedium davon deutlich unterscheiden.

So ist in Abhängigkeit der physikalischen Bodeneigenschaften wie Permeabilität, Partikelgröße, Bindigkeit oder Porengefüge ein variierendes und abnehmendes Sauerstoffangebot bis hin zu anaeroben Bedingungen bei zunehmender Tiefe im Erdboden möglich. Sauerstoff ist dabei für verschiedene Korrosionsmechanismen und -reaktionen und auch für die Passivschichtausbildung und die Repassivierung nichtrostender Stähle relevant. Mit abnehmender Sauerstoffkonzentration werden diese Reaktionen gehemmt.

Die chemischen Eigenschaften werden durch die Bodeninhaltsstoffe bestimmt und spielen für die Korrosivität eine wichtige Rolle. Hier sind u.a. der Chlorid- und Sulfatgehalt, der pH-Wert und die Temperatur von maßgebender Bedeutung. Liegen Verunreinigungen vor, die polarisierend wirken (z.B. Aschen, Kohlebestandteile), können diese das Korrosionsverhalten ebenfalls dramatisch verändern. Auch bio-

logisch, sprich mikrobiell, ist eine ungünstige Beeinflussung der Korrosionseigenschaften möglich. Einige Bakterienarten können durch ihre Stoffwechselprodukte Korrosion auslösen oder verstärken.

Des Weiteren können Böden hinsichtlich der Zusammensetzung in die Tiefe homogen aufgebaut sein, aber auch heterogene Schichten enthalten. Daraus resultierend können sich Korrosionselemente ausbilden, wenn die Bauteile mehrere Schichten durchdringen. Wechselwirkungen positiver und negativer Einflüsse auf metallene Bauteile sind durch diese Einflüsse möglich und können die Korrosionsgeschwindigkeit erheblich beeinflussen. Viele dieser Faktoren sind für metallene Werkstoffe aus korrosionstechni-

scher Sicht kritisch und können zu strukturellen Schädigungen der Bauteile führen.

Nichtrostender Stahl weist im Vergleich zu unlegiertem Stahl eine wesentlich höhere Beständigkeit in den unterschiedlichen Bodenarten gegenüber gleichmäßiger Flächenkorrosion auf. Grund dafür ist die sog. Passivschicht, die auf der Oberfläche des nichtrostenden Stahls vorliegt. Die Passivschicht ist dabei keine starre Schicht, sondern bildet sich bei wechselnder Beanspruchung durch Reaktionen um. Solange die Passivschicht unter Einsatzbedingungen erhalten bleibt, tritt auch beim Durchdringen unterschiedlich zusammengesetzter bzw. unterschiedlich belüfteter Bodenschichten keine relevante Ele-



Bild 1: Fertigschacht, der als Brunnenkopf im Erdboden eingesetzt wird, Werkstoff: 1.4307 (Foto: HUBER SE, Berching)

mentbildung auf, was gegenüber anderen Werkstoffen einen großen Vorteil darstellt.

Dem aufgrund der Passivschicht vernachlässigbar geringen Flächenabtrag steht jedoch eine spezifische Empfindlichkeit für lokale Korrosionserscheinungen gegenüber. Lokale Korrosion auf der Oberfläche von nichtrostenden Stählen kann vorwiegend durch die Anwesenheit von Chloridionen ausgelöst werden. Die Korrosion erfolgt nur nach Überschreiten eines kritischen Potentials, welches von den Parametern des Werkstoffes und des Bodens sowie von konstruktiven Gegebenheiten abhängig ist. Mit ansteigenden Gehalten an Legierungselementen wie Chrom (Cr) und Molybdän (Mo) nimmt die Wahrscheinlich-

keit der Lochkorrosionsbildung ab. Sensibilisierungen des Werkstoffes durch Schweißen, unsachgemäße Oberflächenbearbeitung, Fremdstoffablagerungen, falsche Reinigung, ansteigende Gehalte an Chloridionen und zunehmende Temperatur begünstigen lokale Korrosionserscheinungen.

Im Folgenden sind für Anwendungen nichtrostender Stähle in Erdböden relevante lokale Korrosionsarten aufgeführt und beschrieben.

2.1 Lochkorrosion

Grund für das Auftreten von Lochkorrosion ist eine lokale Depassivierung und Störung der Passivschicht. Dies kann vorwiegend durch Chloride aus-

gelöst werden, die allgegenwärtig sind und auch in Erdböden vorkommen. Die Korrosionsbeständigkeit der nichtrostenden Stähle gegenüber chloridinduzierter Lochkorrosion ist maßgeblich abhängig von der Konzentration der Chloridionen im Boden und der Legierungszusammensetzung des nichtrostenden Stahls.

Die Initiierung von Lochkorrosion ist bei nichtrostenden Stählen immer abhängig von der Potentiallage des Bauteils im Umgebungsmedium. Dabei sind zwei Kennwerte wichtig. Das Oxidationsvermögen des Mediums wird durch das Redoxpotential beschrieben. Dieses ist von der chemischen Zusammensetzung des Mediums abhängig (u.a. Sauerstoffgehalt etc.) und bestimmt die Lage des freien Korrosionspotentials E_{cor} des Bauteils. Das kritische Korrosionspotential E_{krit} ist ein systemspezifischer Kennwert, bei dessen Überschreitung es zur Auslösung von Korrosion kommt.

Aus werkstoffseitiger Sicht hat sich die **Wirksomme PREN (Pitting Resistance Equivalent Number)** nach Formel (1) als Vergleichswert für die Lochkorrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle gegenüber chloridhaltigen Lösungen auch normativ in DIN EN ISO 8044 [5] etabliert:

$$PREN = \% Cr + 3,3 [(\% Mo) + 0,5 (\% W)] + x (\% N) \quad (1)$$

Im Gegensatz zu den Wirksommenfaktoren für Chrom (Cr), Molybdän (Mo) und Wolfram (W) hängt derjenige für Stickstoff (N) stark von der Stahlgrundzusammensetzung ab. Ein Wert von 30 kommt nur bei sehr hochlegierten nichtrostenden austenitischen Stählen zum Tragen. Bei nichtrostenden austenitischen Standardstählen der Typen 18/8-CrNi oder 17/12/2-CrNi-Mo ließ sich dagegen kein nutzbarer Stickstoffeffekt zur Erhöhung der Lochkorrosionsbeständigkeit feststellen. Bei nichtrostenden austenitisch-ferritischen Stählen wird dem Stickstoff meist ein Wirksommenfaktor 16 zugeordnet.

Mit Hilfe dieser recht simplen Formel kann man eine erste Abschätzung zur Lochkorrosionsbeständigkeit durchführen. In der Regel folgt die Wirksommen-



Bild 2: Die Edelstahlprofile sind mit Fundamenten im Erdreich verankert, Werkstoff: 1.4301 (Foto: Wilhelm Modersohn GmbH & Co. KG, Spenge)

me aus dem arithmetischen Mittel aus Maximal- und Minimalwert der normativ spezifizierten Cr-, Mo-, W- und N-Gehalte. Weitere Legierungselemente sind jedoch ebenfalls zu beachten, die in die Berechnung nicht eingehen, aber maßgeblichen negativen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit haben. So begünstigt beispielsweise ein erhöhter Schwefelgehalt die Ausscheidung von Mangansulfiden, welche die Korrosionsbeständigkeit massiv verschlechtern. Die Wirksumme ist deshalb nicht mehr als eine Orientierungshilfe und keine Gesetzmäßigkeit mit definierten Randbedingungen.

2.2 Spaltkorrosion

Spaltkorrosion wird konstruktiv durch einen physikalischen Spalt zwischen zwei Metallen oder einer Metall-Kunststoff Paarung hervorgerufen. Dabei bildet sich durch die Veränderung des Elektrolyten im Spaltraum ein galvanisches Element aus, welches zu einer signifikanten Herabsetzung der Korrosionsbeständigkeit führt. Die Depassivierung und Initiierung von Korrosion tritt dadurch im Spaltbereich deutlich früher auf, als auf der freien Bauteiloberfläche. Die Spaltkorrosionsneigung wird von vielen Parametern beeinflusst. Spaltmaß und Spaltgeometrie sowie das Material des Spaltkörpers (Metall, Kunststoff) sind ebenso von Bedeutung wie die Zusammensetzung und Strömung des Mediums. Aufgrund der vielgestaltigen Einflussparameter kann Spaltkorrosion als ein statistisch auftretendes Phänomen angesehen werden, da nicht alle Spalte gleichermaßen reagieren. Eine Prävention von Spaltkorrosion ist durch die konstruktive Vermeidung von engen Spaltgeometrien kleiner 0,5 mm möglich [6].

2.3 Mikrobiologisch induzierte Korrosion

Siedeln sich spezielle Mikroorganismen auf Oberflächen nichtrostender Stähle an, bilden sie sog. Biofilme aus und können durch ihre Stoffwechselprodukte die Bauteiloberflächen korrosiv schädigen. Korrosionsrelevante Mikroorganismen sind beispielsweise Schwefel und Ammoniak oxidierende Bakterien, sulfatreduzierende Bakterien (SRB) sowie Mangan und Eisen reduzierende Bakterien. Als relevantes Beispiel zersetzen – wie der Name

schon sagt – sulfatreduzierende Bakterien (SRB) Schwefelverbindungen (Sulfate) aus dem Umgebungsmedium zu HS^- und in Folgereaktionen zu FeS . Dabei kommt es unterhalb des Biofilms zu einer Verschiebung des freien Korrosionspotentials des Metalls um mehrere hundert Millivolt in anodische Richtung [9]. Das kritische Lochkorrosionspotential des nichtrostenden Stahls kann dadurch überschritten werden und es kommt zu einer Korrosionsinitiierung. Durch Folgereaktionen von Schwefelwasserstoff und Sulfiden wird die Eisenauflösung durch Bildung von Eisensulfid zusätzlich beschleunigt und kann zu einer flächigen Ausprägung der Korrosion am nichtrostenden Stahl führen [10].

Die Zusammensetzung des anliegenden Bodens ist für die Ansiedlung von korrosionsrelevanten Mikroorganismen von entscheidender Bedeutung, da dieser deren Nahrungsgrundlage darstellt. So kann nach [10] gebrochenes Diabas Gestein die Besiedlung von Mikroorganismen fördern.

2.4 Spannungsrissskorrosion

Ein durch ein korrosives Medium und unter Vorhandensein einer Zugspannung hervorgerufener Riss, wird als Spannungsrissskorrosion (SpRK) bezeichnet. Das Medium kann dabei werkstoffspezifisch sehr unterschiedlich sein und wird von weiteren Einflussparametern begleitet, die in einem komplexen Zusammenspiel Spannungsrissskorrosion auslösen. Es muss in jedem Fall ein kritisches System Werkstoff/Medium vorliegen. Die wesentlichsten mediumseitigen Einflussfaktoren sind Temperatur, Chloridkonzentration und pH-Wert, die wichtigsten werkstoffseitigen Einflussparameter sind Legierungszusammensetzung, Spannungsniveau und Oberflächenbeschaffenheit des Werkstoffs. Dabei können neben einsatzbedingten Spannungen auch Spannungen aus der Herstellung und Verarbeitung des Materials (sog. Eigenspannungen) ursächlich für Spannungsrissskorrosion sein. Aus werkstoffseitiger Sicht gelten nichtrostende Stähle mit Nickelgehalten um 10 % als besonders spannungsrissskorrosionsgefährdet [11].

Eine Möglichkeit zur Rissinitiierung

besteht darin, dass durch das korrosive, meist chloridhaltige Medium, am anfälligen Werkstoff lokal Lochkorrosion ausgelöst wird. Infolge Hydrolyse der Korrosionsprodukte und der damit verbundenen starken Ansäuerung des Lochelektrolyten können Risse entstehen. Eine weitere Möglichkeit ist die Spannungsrissskorrosion im aktiven Oberflächenzustand des Werkstoffes, welche bei spontaner (z.B. chemischer) Aktivierung unter Chlorideinfluss auftreten kann [12]. Weiterhin ist Spannungsrissskorrosion bei nichtrostenden austenitischen Stählen in Alkalilaugen bei erhöhten Temperaturen bekannt [11].

Für Anwendungen in Erdböden ist Spannungsrissskorrosion nur bei warmgehenden Bauteilen von Anlagen in Erwägung zu ziehen, bei denen sich korrosive Bodeninhaltsstoffe (z.B. Chloride) auf der Bauteiloberfläche aufkonzentrieren können.

Zur Abhilfe bei einer anzunehmenden SpRK Gefährdung kann man die Beständigkeit gegenüber SpRK durch legierungstechnische, oberflächenbearbeitende oder auch fertigungstechnische Maßnahmen erhöhen.

2.5 Interkristalline Korrosion

Interkristalline Korrosion tritt bei nichtrostenden Stählen mit höheren Kohlenstoffgehalten auf, wenn diese im Zuge der Abkühlung nach einem thermischen Prozess (z.B. Wärmebehandlung, Schweißen etc.) zulange in einem kritischen Temperaturbereich verbleiben. Der im Stahl gelöste Kohlenstoff reagiert mit dem Chrom zu Chromcarbiden, die sich im Metallgefüge ausscheiden. Dadurch verbraucht sich der Chromgehalt an den Korngrenzen und setzt die Korrosionsbeständigkeit der Korngrenzen signifikant herab, man spricht hierbei von einer Sensibilisierung. Schon bei leichter korrosiver Beanspruchung korrodieren bevorzugt die chromverarmten Korngrenzen und das Korngerüst zerfällt an diesen Bereichen.

Für alle handelsüblichen Halbzeuge ist gemäß Liefernorm DIN EN 10088-1 vom Hersteller ein nicht sensibilisierter Werkstoffzustand nachzuweisen.

Um einer Sensibilisierung infolge einer thermischen Ver-/Bearbeitung entgegenzuwirken, können besonders bei massiveren Querschnitten stabilisierte nichtrostende Stähle verwendet werden. Beispielhafte Vertreter sind die Werkstoffe 1.4541 und 1.4571, denen Titan hinzulegiert wurde, welches sich bei der Abkühlung mit Kohlenstoff als Titancarbid ausscheidet und die Chromcarbiddbildung verhindert. Weiterhin können Werkstoffe mit geringen Kohlenstoffgehalten ausgewählt werden, z.B. die Werkstoffe 1.4307 oder 1.4404, die für eine Sensibilisierung zu wenig Kohlenstoff enthalten.

3 Vorliegende Erfahrungen

Es gibt nur wenige systematische Untersuchungen zum Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe, insbesondere nichtrostender Stähle, in Böden. Viele davon sind bereits Jahrzehnte alt, wie z.B. die Untersuchungen von Romanoff [13] in den USA aus den 1930er Jahren, der zusammenfassend feststellt, dass die Korrosionsbeständigkeit der nichtrostenden Stähle maßgeblich vom Chromgehalt abhängt und die Korrosivität des Bodens von Sauerstoffbedingungen und Chloridgehalt bestimmt wird. Das kann auch in dem von Gerhold et al. [14] in den 1970er Jahren ebenfalls in den USA durchgeführten Untersuchungsprogramm festgestellt werden. Mit stei-

gendem Chrom- und Molybdängehalt konnte eine bessere Korrosionsbeständigkeit bei sehr hoher korrosiver Beanspruchung durch den anstehenden Erdboden beobachtet werden. Ein aktuelleres Untersuchungsprogramm wurde in den Jahren 2002-2007 von der Europäischen Union gefördert und in einer schwedisch-französisch-belgischen Gemeinschaftsarbeit durchgeführt [15,16]. Die untersuchten nichtrostenden austenitischen und Duplexstähle wurden dabei über mehrere Jahre in verschiedenen Böden ausgelagert, die repräsentativ für große Teile der europäischen Geologie sind. Auch diese Untersuchungen kamen zum Ergebnis, dass der Chloridgehalt des Bodens den maßgeblichen Parameter für die Korrosionsintensität darstellt. Spaltkorrosion unter Bodenablagerungen oder gezielten Spaltanordnungen waren ebenfalls dominierend. Weiterhin wurde eine Korrelation der Korrosionszustände zur Wirksumme PREN festgestellt.

Die umfangreichen Untersuchungsergebnisse sind in Tabellen für Erdböden im inländischen (**Tabelle 2**) und im maritimen Bereich (**Tabelle 3**) zusammenfassend dargestellt.

Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse dieser Quellen, so wird deutlich, dass es neben dem Chloridgehalt noch weitere Einflussgrößen gibt, deren Wechselwirkungen miteinander über die Beständigkeit von nichtrostenden Stählen entscheiden. Weitere wesentliche Faktoren sind die Leitfähigkeit des Bodens, die über den Bodenwiderstand definiert wird, der Wassergehalt, der pH-Wert und die Potentiallage. Um diese Vielfalt und auch deren Wechselwirkung bewerten zu können, kann in der DIN 50929-3 [4] aufgrund umfangreicher Parameter aus Bodenproben und örtlichen Gegebenheiten, eine Beurteilung der Erdböden vorgenommen und Bodenklassen zugeordnet werden. Diese Bewertungen und Klassifizierungen gelten nur für un- und niedriglegierte Eisenwerkstoffe bzw. verzinkte Stähle, können aber bzgl. der Korrosivität von Böden auch für nichtrostende Stähle als Orientierung dienen.

Bei allen Untersuchungsergebnissen im Landesinneren (**Tabelle 2**) kann



Bild 3: Weinbergstickel aus Edelstahl Rostfrei, 20 Jahre freibewittert, Werkstoff: 1.4003 (Foto: Gaubatz, Hochschule Geisenheim University, Geisenheim)

festgestellt werden, dass auch bei mittlerer Korrosivität natürlicher Böden relevante Korrosion an nichtrostenden Säulen nur bis zu einer Wirksumme von 18 zu beobachten war. In verschiedenen mineralischen Lehm-, Ton- und Sandböden und auch organischen Torf- und Moorböden sind die schwächer legierten nichtrostenden Stähle ($PREN \leq 17$) lochkorrosionsgefährdet. In den meisten Böden ist der nichtrostende austenitische Standardwerkstoff 1.4301 ($PREN = 18$) korrosionsbeständig und zeigt ggf. lediglich Verfärbungen der Oberflächen. In einem mineralischen Tonboden mittlerer Korrosivität konnte jedoch Lochkorrosion nach 14 Jahren Auslagerungszeit festgestellt werden. Für höher legierte Stähle ($PREN > 18$) war in allen Böden auch nach teils sehr langen Auslagerungszeiten keine relevante Korrosion vorhanden.

In maritimen Böden (**Tabelle 3**) mit mittlerer Korrosivität konnten erst bei Werkstoffen mit Wirksummen größer 25 korrosionsfreie Oberflächen festgestellt werden. Bei geringerer Wirksumme waren in den meisten Böden hingegen Lochkorrosionserscheinungen an den Proben vorhanden. Mit steigender Korrosivität des Bodens wurde auch bei höher legierten nichtrostenden Stählen Loch- und Spaltkorrosion dokumentiert. Erst ab einer Wirksumme von 31 konnte auch nach teilweise sehr langen Auslagerungszeiten in keinem Boden mehr Lochkorrosion vorgefunden werden. Lediglich am Werkstoff 1.4462 ($PREN = 35$) war in einem hoch korrosiv eingestuften Boden Spaltkorrosion detektiert worden.

Für Anwendungen in **verunreinigten Böden** müssen die einzusetzenden Werkstoffe gleichzeitig korrosionsbeständig sein gegenüber chloridionenhaltigen Lösungen sowie oxidierenden und nichtoxidierenden Medien, die aus anorganischen und/oder organischen Säuren bestehen können. Bei der konstruktiven Ausführung der Stähle sollten Spalte und tote Räume vermieden werden, um eine Ansammlung und Konzentrationserhöhung aggressiver Flüssigkeiten an solchen Stellen zu vermeiden. Eine Gefahr für Edelstahl Rostfrei besteht auch dann, wenn in verunreinigten Böden ein Werkstoffteil in sulfidhaltigen (anaer-

oben) Bodenbereichen liegt und weitere Teile in gut belüfteten Bereichen. Der gut belüftete Bereich des Stahls kann den Stahl im anaeroben Bereich des Bodens dann über das Lochkorrosionspotential polarisieren, wenn dort gleichzeitig höhere Chloridgehalte vorliegen. Je nach den zu erwartenden Bedingungen empfiehlt sich dann der Einsatz höher legierter nichtrostender Stähle mit einer Wirksumme von mindestens 24.

4 Regelwerke

Es gibt national nur wenige Regelwerke, die Korrosion in Erdböden behandeln und Werkstoffempfehlungen geben. Insbesondere für nichtrostenden

de Stähle werden nur in der Normenreihe DIN 50929 Teil 1+3 [3,4] Hinweise gegeben und Regelungen getroffen. Hier werden nichtrostende Stähle ab einer Wirksumme von mindestens 18 betrachtet. Ab dieser Wirksumme gelten nichtrostende Stähle in Erdböden als passiv, mit der Einschränkung, dass bei ungünstigen Bodenzusammensetzungen (z.B. erhöhte Chloridgehalte) und dauerhaftem Feuchteangebot typische lokale Korrosionserscheinungen auftreten können. Die Korrosionswahrscheinlichkeit nimmt ebenfalls bei anodischer Polarisation durch Streustromaustritt in Gegenwart von Chloridionen zu. Das früher normativ angeführte Objekt-Boden-Potentialkriterium von $< 0,2 \text{ mV}_{\text{NHE}}$ wird in der aktuell gültigen DIN 50929-3 [4] für nichtrostende Stähle nicht mehr

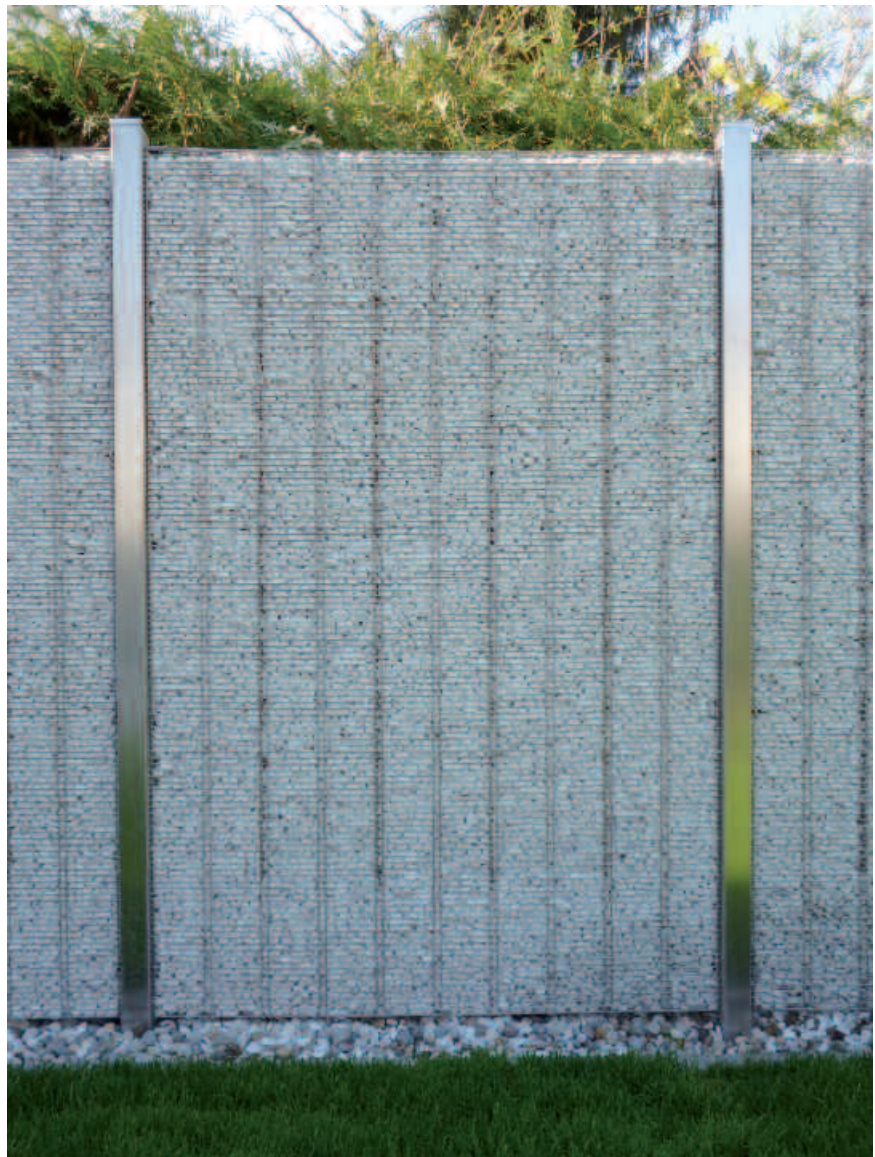


Bild 4: Gabione aus nichtrostendem Stahl als langzeitbeständiger Sichtschutz, Werkstoff: 1.4301 (Foto: Garten Bronder, Utting)

Wst.	AISI	PREN	Kurzname	Mineralische Böden								Organische Böden			
				Lehm	schluffiger, sulfidhaltiger Lehm	sandiger Lehm	Lehm	Lehm	Ton	Ton	schluffiger Sand	Torf	Torf	Moor	
1.4512 ^F	409	11	X2CrTi12			- 775 µm	- 350 µm								
1.4006 ^M	410	12	X12Cr13			- 1.200 µm	- 75 µm	- 1.575 µm					- 940 µm		+
1.4016 ^F	430	17	X6Cr17			- 550 µm	+	- 1.575 µm			- 152 µm		- 406 µm		+
1.4372 ^A	201	17	X12CrMnNiN17-7-5			+	+								
1.4301 ^A	304	18	X5CrNi18-10		+	+	+	+/- <152 µm	- 820 µm	+	+		+		+
1.4310 ^A	302	19	X10CrNi18-8			+	+	+					+		+/- <152 µm
1.4113 ^F	434	21	X6CrMo17-1			+	+								
1.4828 ^A	309	23	X15CrNiSi20-12					+					+		+/- <152 µm
1.4401 ^A	316	24	X5CrNiMo17-12-2			+	+	+	+/- <152 µm	+	+	+	+	+	+
1.4521 ^F	444	25	X2CrMoTi18-2			+	+								
1.4436 ^A	316	25	X3CrNiMo17-13-3	+											
1.4162 ^D	S32101	26	X2CrMnNiN22-5-2		+							+			
1.4362 ^D	S32304	26	X2CrNiN23-4		+						+	+			
1.4539 ^A	926	31	X1NiCrMoCu25-20-5					+	+	+			+		+
1.4462 ^D	S32205	35	X2CrNiMoN22-5-3		+						+	+			
1.4529 ^A	926	42	X1NiCrMoCuN25-20-7			+	+								
Bodenklasse (Korrosivität) nach DIN 50929-3				la (sehr gering)	II (mittel)	II (mittel)	Ib (gering)	II (mittel)	II (mittel)	Ib (gering)	II (mittel)	III (hoch)	III (hoch)	III (hoch)	
Bodenwiderstand [Ωcm]				n.b.	1.4 k	400	12.6 k - 34.8 k	232	406	6.9 k	6.0 k	13.1 k	218	1.7 k	
Chloridgehalt [mg Cl⁻/kg]				14	60	9	n.b.	28	16	n. b.	70	220	0	35	
Sulfatgehalt [mg SO₄²⁻/kg]				9	47	5	n.b.	30	30	n. b.	220	41	567	10	
Wassergehalt [%]				23	30	7	n.b.	17	29	35	14	92	43	44	
pH Wert				7,8	6,8	8,8	5,3	8	7,1	4,5	7,4	4,2	2,6	5,6	

Quelle	Auslagerungszeit
Sjögren [15]	2-3 Jahre
	7 Jahre
Gerhold [14]	7-8 Jahre
Romanoff [13]	14 Jahre

+ keine Korrosion
- Lochkorrosion / max. Lochtiefe [µm]

F Ferrit
M Martensit
A Austenit
D Duplex
SD Super Duplex

PREN = % Cr + 3,3 [(% Mo) + 0,5 (% W)] + x (% N)

Tabelle 2: Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle in verschiedenen Böden im Landesinneren; Auszug von Untersuchungsergebnissen aus [13,14,15,16]

Wst.	AISI	PREN	Kurzname	Mineralische Böden						Organische Böden			Andere Schlacke
				schluffiger Lehm	Ton	Ton	Ton	schluffiger Sand	Sand	Tide- marsch	Tide- marsch	Moor	
1.4512 ^F	409	11	X2CrTi12			-			-		-		
1.4006 ^M	410	12	X12Cr13	- 1.575 µm		-	- 1.600 µm		-		-		
1.4016 ^F	430	17	X6Cr17	- 1.550 µm		-	- 1.600 µm		-	- 330 µm	-	- 1.321 µm	- 1.855 µm
1.4372 ^A	201	17	X12CrMnNiN17-7-5			-			-		-		
1.4301 ^A	304	18	X5CrNi18-10	- 406 µm	- = 1.600 µm	-	- 178 µm	- =	-	- <152 µm	-	- 280 µm	- 305 µm
1.4310 ^A	302	19	X10CrNi18-8	+		-	+		-		-		
1.4113 ^F	434	21	X6CrMo17-1			-			-		-		
1.4828 ^A	309	23	X15CrNiSi20-12	+			+						
1.4401 ^A	316	24	X5CrNiMo17-12-2	+		-	+	- = 1.000 µm	-	+	-	+	+
1.4521 ^F	444	25	X2CrMoTi18-2			- 1.575 µm			-		-		
1.4436 ^A	316	25	X3CrNiMo17-13-3		+								
1.4162 ^D	S32101	26	X2CrMnNiN22-5-2		+			- =					
1.4362 ^D	S32304	26	X2CrNiN23-4		- = 100-1300 µm			- = 1.500 µm					
1.4429 ^A	S31653	28	X2CrNiMoN17-13-3		+/- <50 µm			- =					
1.4539 ^A	926	31	X1NiCrMoCu25-20-5	+			+			+		+	+
1.4462 ^D	S32205	35	X2CrNiMoN22-5-3		+			=					
1.4529 ^A	926	42	X1NiCrMoCuN25-20-7			+			+		+		
1.4547 ^A	S31254	43	X1CrNiMoCuN20-18-7		+								
1.4410 ^{SD}	S32750	43	X2CrNiMoN25-7-4					+					
Bodenklasse (Korrosivität) nach DIN 50929-3				II (mittel)	III (hoch)	II (mittel)	II (mittel)	III (hoch)	II (mittel)	III (hoch)	III (hoch)	III (hoch)	III (hoch)
Bodenwiderstand [Ωcm]				148	345	400 - 1.2 k	62	300	1.3 k - 49.5 k	84	400 - 15.5 k	712	455
Chloridgehalt [mg Cl⁻/kg]				60	2.200	99	288	12.946	162	127	92	5	1
Sulfatgehalt [mg SO₄²⁻/kg]				166	322	140	3	219	236	366	356	25	29
Wassergehalt [%]				26	54	15	41	22	11	47	12	58	11
pH Wert				8	7,4	4,3	7,5	7,1	7,1	6,9	6	4,8	7,6

Quelle	Auslagerungszeit
Sjögren [15]	2-3 Jahre 7 Jahre
Gerhold [14]	7-8 Jahre
Romanoff [13]	14 Jahre

- + keine Korrosion
- Lochkorrosion / max. Lochtiefe [µm]
- = Spaltkorrosion / max. Lochtiefe [µm]
- = Korrosion mit Perforation der Wandstärke

- F Ferrit
- M Martensit
- A Austenit
- D Duplex
- SD Super Duplex

PREN = % Cr + 3,3 [(% Mo) + 0,5 (% W)] + x (% N)

Tabelle 3: Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle in verschiedenen Böden in Küstengebieten; Auszug von Untersuchungsergebnissen aus [13,14,15,16]



Bild 5: Extensiv begrüntes, rollennahtgeschweißtes Flachdach aus Edelstahl Rostfrei, Werkstoff: 1.4404 (Foto: Binder und Sohn GmbH, Ingolstadt)

angegeben, kann aber als Orientierungshilfe dennoch herangezogen werden.

Weiterhin wird in DIN 50929-3 [4] ausgeführt, dass nichtrostende Stähle ab einer Wirksumme von mindestens 23 in allen natürlichen Böden beständig gegen lokale Korrosion sind.

Für Deponien und andere verunreinigte Böden steigt je nach Art die Korrosivität und somit die Wahrscheinlichkeit für Korrosion. Hier wird nach DIN 50929-3 [4] eine Einzelfallprüfung hinsichtlich der erforderlichen Korrosionsbeständigkeit des nichtrostenden Stahls empfohlen.

5 Praktische Anwendungen und Erfahrungen

Nichtrostender Stahl wird für verschiedene Anwendungen in Erdböden eingesetzt. Insbesondere wenn aufgrund der Bodenparameter andere Materialien an ihre technischen Einsatzgrenzen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit kommen, ist der Einsatz von nichtrostendem Stahl fast schon obligatorisch. Verschiedene Anwendungsgebiete sind im Folgenden kurz beschrieben.

5.1 Behälter / Leitungen

Erdverlegte Rohre und Behälter werden in vielen Branchen (beispielsweise in der Lebensmittel- und Chemieindustrie) aufgrund der zu transportierenden Medien aus nichtrostenden Stählen ausgeführt. Hierbei kommt neben der Beständigkeit gegenüber den zu transportierenden Medien auch die Beständigkeit gegenüber den Bettungsmaterialien zum Tragen. Ein geeigneter nichtrostender Stahl weist hierfür eine hohe Beständigkeit für diese Doppelbelastung im Vergleich zu vielen anderen Materialien auf. Hinzu kommen auch verschiedene Anwendungen für die Aufbereitung kontaminierter Böden und die Deponietechnik, für die sich

Edelstahl Rostfrei wegen seiner hohen Korrosionsbeständigkeit besonders gut eignet.

5.2 Erdanker

Nichtrostende Stähle werden lt. [7] als Werkstoff für Erdanker (z.B. zur Hangabfangung) in Europa nur selten verwendet. In Schweden, der Schweiz und Großbritannien sind vereinzelt Anwendungen bekannt. Die häufig angeführten Argumente gegenüber dem Einsatz unlegierter Stähle (wie z.B. höhere Werkstoffkosten und geringere Festigkeit) sind jedoch nicht immer begründet. Gerade die in den letzten Jahren populär gewordenen nichtrostenden Duplexstähle haben etwa die doppelte Grundfestigkeit gegenüber Standardausteniten und bieten somit hinsichtlich der Festigkeit gute Substitutionsmöglichkeiten zu Kohlenstoffstählen.

Bodenschraubanker werden vielfältig eingesetzt, beispielsweise für die Sicherung von Spielgeräten. Die Verwendung von nichtrostenden Stählen stellt auch hier eine dauerhafte und optisch ansprechende Lösung dar.

Auch für durch Betonwände geführte Rohrleitungen im Boden sowie für teilweise in Betonbauteile einbindende Verankerungs- oder Verbindungsmittel mit Bodenkontakt stellen nichtrostende Stähle unter dem Aspekt des Korrosionsschutzes eine optimale Lösung dar. Sie sind im Kontakt mit dem alkalischen Baustoff Beton auch unter dauerfeuchten Bedingungen korrosionsbeständig und führen mit ihren gleichzeitig bodenberührten Abschnitten nicht zu einer Elementbildung.

5.3 Garten-/Landschaftsbau

Im Gartenbau sind nichtrostende Stähle als Rasenbegrenzung oder auch für Weinbergstickel bekannt. Hier werden auch ferritische Werkstoffe seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Obwohl Korrosionserscheinungen bei diesen niedriger legierten nichtrostenden Stahlgüten nicht in jedem Boden auszuschließen sind, ist der Korrosionsfortschritt nur sehr gering. Da hier weder optische Anforderungen, noch Anforderungen an die



Bild 6: Hochbeete aus Edelstahl Rostfrei in direktem Kontakt mit der Pflanzerde, Werkstoff: 1.4301 (Foto: cp-garden Edelstahlhochbeete, Salem)



Bild 7: Sockelbereich aus nichtrostendem Stahl im Bodenanschluss, Werkstoff: 1.4301 (Foto: Roofinox GmbH, Sulz (A))

Dichtigkeit bzw. die Tragfähigkeit unter Sicherheitsaspekten bestehen, können diese Stähle mit günstigem Preis-Leistungs-Verhältnis hier entsprechend erfolgreich eingesetzt werden.

Nichtrostende Stähle finden im Garten- und Landschaftsbau beispielsweise als Gabionenkörbe Verwendung. Der große Vorteil dabei ist, dass nichtrostender Stahl keine Restriktionen hinsichtlich der Füllmaterialien aufgibt und somit auch alkalisches Füllmaterial möglich wird, bei dem andere Materialien an ihre Einsatzgrenzen kommen. Auch eine rückseitige Berührung der Gabionenwand mit korrosiveren Böden für Stahl und Zink, wie z.B. Humus, ist durch den Einsatz

nichtrostender Stähle problemlos möglich.

Die sowohl architektonisch gern eingesetzten und auch ökologisch zunehmend geforderten Dachbegrünungen können mit einer Dachhaut aus nichtrostendem Stahl in rollenahtgeschweißter Ausführung funktions-sicher und dauerhaft erstellt werden. Nichtrostender Stahl ist beständig gegen Durchwurzelung und Algenbelag. Er eignet sich deshalb besonders für Dachbegrünungen. In der Regel kommen hier molybdänlegierte nichtrostende austenitische Stahlsorten (bspw. Werkstoffe 1.4401, 1.4404 und 1.4436) zur Anwendung. In Kombination mit einem entsprechenden



Bild 8: Ringerder aus nichtrostendem Stahl für Blitzschutzanlagen, Werkstoff: 1.4571 (Foto: J. Pröpster GmbH, Neumarkt OPf.)

Entwässerungssystem und Pflanzsubstrat entsteht ein Garten für alle Jahreszeiten.

5.4 Blitzschutz

Bei Blitzschutzanlagen werden die Erder aus metallenen Werkstoffen im Erdboden verbaut. Aufgrund der zunehmenden Stahlbetonbauweise der Fundamente, Keller und Tragstrukturen von Gebäuden kann eine Elementbildung und damit verbunden eine beschleunigte Korrosion der metallenen Erder hervorgerufen werden. Grund für die Elementbildung ist die passive Stahlbewehrung in den Stahlbetonbauteilen, die durch ihren großen Flächenanteil die metallenen Erder polarisieren kann. Eine dauerhaft korrosionssichere Herstellung des Erders kann durch die Verwendung von nichtrostendem Stahl sichergestellt werden, für den diese Elementbildung unkritisch ist.

Für Erdungsanlagen wird in der seit Jahrzehnten gültigen und bewährten DIN VDE 0151 [8] ein Werkstoff 1.4571 oder vergleichbar empfohlen.

5.5 Umhüllungen

Besteht metallischer Kontakt zu anderen Bauteilen, dann wirkt Edelstahl Rostfrei als Fremdkathode. Daher empfiehlt es sich, die Bauteile aus Edelstahl Rostfrei zu umhüllen, damit

die freie Fläche möglichst klein und die Korrosionsgefahr für andere Bauteile, deren Werkstoffe im Erdboden ein negativeres freies Korrosionspotential haben (z.B. unlegierter Stahl), nicht verstärkt wird und so die anderen Bauteile nicht gefährdet werden.

Bei einem großen Flächenverhältnis „unedler Werkstoff/Edelstahl Rostfrei“ wird der letztere in der Regel kathodisch polarisiert. Allgemein dürfte dieser Zustand vorliegen, da Edelstahlleitungen nicht elektrisch abgeflanscht sind, sondern metallisch leitend mit Fremdobjekten aus anderen Werkstoffen verbunden sind, wobei diese den nichtrostenden Stahl im Boden dann praktisch zusätzlich kathodisch schützen.

6 Literatur

- [1] **Edelstahl Rostfrei – Eigenschaften**
ISER-Merkblatt 821, 5. aktualisierte Auflage 2014
- [2] **DIN EN 10088-1:2014-12**
Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle
- [3] **DIN 50929-1:2017-03**
Korrosion der Metalle – Korrosionsschutzwahrscheinlichkeit

metallener Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung – Teil 1: Allgemeines

- [4] **DIN 50929-3:2018-03**
Korrosion der Metalle – Korrosionswahrscheinlichkeit metallener Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung – Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern
- [5] **DIN EN ISO 8044:2015-12**
Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe
- [6] **DIN EN 12502-4:2005-03**
Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen, Teil 4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle
- [7] Mietz et. al.
„Dauerhafte Anker für den Grundbau – Neue Werkstoffkonzepte“
Tagungsbandbeitrag GfKORR Jahrestagung 2005
- [8] **DIN VDE 0151:1986-06**
Werkstoffe und Mindestmaße von Erdern bezüglich der Korrosion
- [9] H. von Rège
„Bedeutung von Mikroorganismen des Schwefelkreislaufes für die Korrosion von Metallen“
Diss. Hamburg 1999: Shaker Verlag Aachen 2000
- [10] Allertshammer, W., Warscheid, T.
„Schadensanalyse MIC – am Beispiel des Angriffes sulfatreduzierender Bakterien auf nichtrostenden Stahl im Erdboden“
Tagungsbandbeitrag 3-Länder-Korrosionstagung, Wien, 2005
- [11] Wendler-Kalsch, E. und Gräfen, H.
„Korrosionsschadenkunde“
Springer-Verlag GmbH, 1998
- [12] Herbsleb, G. und Theiler, F.
„Spannungsrißkorrosion nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stähle bei Raumtemperatur“
Materials and Corrosion, 40: 467–480, 1989

- [13] M. Romanoff
„Underground Corrosion“
National bureau of Standards Circular 579. US Government Printing Office, Washington, 1957
- [14] W. F. Gerhold, E. Escalante, B. Sanderson
„The Corrosion Behaviour of Selected Stainless Steels in Underground Soil Environments“
Report no. NBSIR 81-2228. National Bureau of Standards, Washington, 1981
- [15] **„Corrosion resistance of stainless steel in soil“**
European Commission, Directorate-General for Research, 2009, EU Bookshop,
SBN: 978-92-79-09765-2
- [16] Sjögren, L., Camitz, G., Peultier, J., Jacques, S., Baudu, V., Barrau, F., Chareyre, B., Bergquist, A., Pourbaix, A. and Carpentiers, P.
„Corrosion resistance of stainless steel pipes in soil“
Materials and Corrosion 62: 299-309. doi:10.1002/maco.200905552, 2011



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

