Universität Stuttgart
Institut für Werkstoffe im Bauwesen

Alternative Korrosionsschutzsysteme für Verbindungsmittel in der Befestigungstechnik bei Anwendung im Außenbereich

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Eşref Cenk Köse
aus Istanbul, Türkei

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Ulf Nürnberger

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann
Mitberichter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gregor Mori

Tag der mündlichen Prüfung: 02.09.2019

Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart
2019

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig ohne Hilfe Dritter verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle aus fremden Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommene Passagen sind als solche kenntlich gemacht. Diese Dissertation wurde zu keiner Zeit in derselben oder substantiell ähnlichen Version einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Stuttgart, den 23. Februar 2019

_____

Dipl.-Ing. E. Cenk Köse

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner mehrjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe im Bauwesen an der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt zunächst der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG für die großzügige langjährige Finanzierung eines Forschungsprojekts „Korrosion in der Befestigungstechnik“ und die Bereitstellung von Probematerial. Beides haben die Möglichkeit der Anfertigung dieser Dissertation erst ermöglicht.

Mein besonderer und innigster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Ulf Nürnberger für seine unermüdliche Unterstützung, sein andauerndes Vertrauen und für seine hervorragende fachliche Betreuung sowohl in der vorliegenden Arbeit als auch in meiner Diplomarbeit. Ohne Ihn hätte ich den Weg der Promotion wahrscheinlich nicht eingeschlagen. Durch seine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Korrosion konnte er mir in zahlreichen fachlichen Diskussionen eine Vielzahl konstruktiver Ideen und wertvolle Ratschläge geben, die zum Vollenden dieser Arbeit unverzichtbar beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann für die Möglichkeit, die Arbeit am Institut für Werkstoffe im Bauwesen in der Abteilung Befestigungs- und Verstärkungsmethoden anzufertigen. Weiterhin gilt mein Dank für die Übernahme des Mitberichts.

Weiterhin danke ich Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gregor Mori von der Montanuniversität Leoben für die Übernahme des Mitberichts und der damit verbundenen Mühe.

Ein Dank gebührt den Firmen REISSER-Schraubentechnik GmbH und MÜPRO GmbH für die Bereitstellung von weiterem Probematerial.

Darüber hinaus möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen für die stets vorhandene Hilfsbereitschaft und das gute Arbeitsklima bedanken. Herrn Dr.-Ing. Thomas Rauscher danke ich sehr herzlich für zahlreiche interessante fachliche Gespräche und seine Unterstützung an den Auslagerungsversuchen.

Einem ganz großen Dank verpflichtet bin ich meinen Eltern und meiner gesamten Familie, die mir meinen Bildungsweg und beruflichen Werdegang ermöglichten, stets hinter mir standen und mich zu jederzeit unterstützt haben.

Stuttgart, den 23. Februar 2019 Dipl.-Ing. E. Cenk Köse

Kurzfassung

In der Bautechnik werden Verbindungsmittel für eine Anwendung im Außenbereich aus optischen und/oder sicherheitstechnischen Gründen bevorzugt aus nichtrostendem Stahl eingesetzt. Diese bisherige nahezu ausschließliche Verwendung von nichtrostendem Stahl ist jedoch aus korrosionstechnischer Sicht nicht immer nachvollziehbar und eine Verwendung ist häufig auch unwirtschaftlich.

Die Aufgabe der hier durchgeführten Forschung bestand deshalb darin, in den letzten Jahrzehnten neu entwickelte Überzüge wie

- galvanische ZnNi-Überzüge
- und ZnAl-Lamellenüberzüge

auch unter Berücksichtigung von zusätzlichen Passivierungen und Deckbeschichtungen (Topcoats) im Hinblick auf eine Anwendung als

- Holzschraube im Holzbau,
- Selbstbohrschraube im Metallbau
- sowie Spreiz- und Kunststoffrahmendübel im Betonbau,

unter Berücksichtigung von möglichen mechanischen Beeinflussungen beim Einbau und korrosiven Beeinflussungen während der Nutzung zu untersuchen. Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl sowie feuerverzinktem und galvanisch verzinktem Stahl wurden zum Vergleich ebenfalls untersucht. Denn letztlich war es auch Ziel der Untersuchungen festzustellen, ob und wenn ja, unter welchen Außenanwendungen ein Schutz durch Zinküberzüge und die derzeit offerierten ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge die erheblich teureren nichtrostenden Stähle ersetzen können. Anderseits galt es zu klären, ob bei den „legierten“ metallischen Überzügen auch unter baupraktischen Umgebungsbedingungen eine deutliche Verbesserung der Schutzwirkung gegenüber den herkömmlichen Verzinkungen (galvanische Verzinkung, Feuerverzinkung) besteht.

Kleinteile wie Verbindungsmittel sind wirtschaftlich nur in Trommeln mit den genannten Überzügen zu schützen. Deshalb stand die sog. „Trommelware“ im Vordergrund der Untersuchungen.

Seitens der Beanspruchung wurde die Korrosionsschutzwirkung der genannten Schutzsysteme

- unter bautechnisch relevanten Bedingungen wie Konstantklima (20 °C und etwa 84 bzw. 100 % relative Luftfeuchte),
- bei Auslagerung unter atmosphärischen Bedingungen (Stadtatmosphäre, Meeresatmosphäre)
- sowie in einem Kurzbewitterungstest (Salzsprühtest)

vergleichend festgestellt. Der Salzsprühtest deshalb, weil in der Korrosionsschutztechnik Aussagen zum langzeitigen Korrosionsschutzverhalten der vorgenannten metallischen Überzüge, einschließlich zusätzlicher Passivierungen und Deckbeschichtungen, nahezu ausschließlich aus Ergebnissen von labormäßig durchgeführten Schnelltests, meist aus dem Salzsprühtest, abgeleitet werden. Unter den Korrosionsbedingungen

Konstantklima und Naturversuche wurden die Verbindungsmittel stets im eingebauten Zustand ausgelagert. Im Salzsprühtest wurden „nackte“ Proben geprüft, wobei auch mechanische Beanspruchungen, wie sie typisch für den Einbau sind, berücksichtigt wurden. Ergänzend wurden auch die korrosiven Randbedingungen in der umgebenden Außen- und Bohrlochatmosphäre (bei Dübeln) sowie in den verwendeten Baustoffen Holz (Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche) und Normalbeton untersucht und in die Bewertung einbezogen.

Die Ergebnisse der Naturversuche zeigen, dass die **Feuerverzinkung** insgesamt gesehen im Vergleich zu den anderen Korrosionsschutzüberzügen den besten Korrosionsschutz aufweist.

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass bei geeigneter Konzeption galvanischer Zink- und Zink-Nickel-Überzüge sowie ZnAl-Lamellenüberzüge ein langzeitiger Schutz gegenüber Stahlkorrosion erreicht werden kann. Insbesondere in Stadtatmosphäre sind sinnvoll konzipierte Überzüge (siehe unten) im Regelfall ausreichend und können auch nichtrostende Stähle ersetzen. Folgende Anforderungen sind an die genannten Überzüge zu stellen:

- **Galvanische Zink- und Zink-Nickel-Überzüge**. Beide galvanischen Überzüge müssen eine ausreichende Schichtdicke vorweisen (je nach Umgebungsverhältnisse Schichtdicken um etwa i.M. 10 bis 15 µm), wobei bereits Reinzinküberzüge aus hiesiger Sicht einen langzeitigen Korrosionsschutz bieten. Als Trommelware hergestellte ZnNi-Überzüge sind wegen vorhandener Risse, Abplatzungen und Nullstellen nicht grundsätzlich besser als Zinküberzüge.
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Für einen langzeitigen Korrosionsschutz bedürfen ZnAl-Lamellenüberzüge, die im Trommelverfahren auf Verbindungsmitteln appliziert werden (hohe Schichtdickenschwankungen, Nullstellen), einen Haftvermittler (galvanische Unterzinkung und/oder Phosphatierung). Weiterhin müssen ZnAl-Lamellenüberzüge eine ausreichende Schichtdicke von etwa i.M. 10 µm vorweisen.

Passivierungen und Deckbeschichtungen für galvanische Überzüge sowie Deckbeschichtungen für ZnAl-Lamellenüberzüge führen bei Trommelware zu keiner wesentlichen systematischen Verbesserung des Korrosionsschutzes.

Bei den vergleichenden Untersuchungen im Salzsprühtest und im Naturversuch (Stadt- und Meeresatmosphäre) wurde festgestellt, dass die im Salzsprühtest ermittelten Ergebnisse bezüglich der Qualität und Quantität der Schutzwirkung nicht mit dem Korrosionsverhalten unter realistischen Bedingungen (der Baupraxis) übereinstimmen. Die Ursache dieses Verhaltens liegt darin begründet, dass im Salzsprühtest wegen Dauerbefeuchtung und hoher Chloridbelastung der Korrosionsmechanismus gegenüber dem Verhalten in der Baupraxis verändert wird. Das betrifft sowohl den Metallabtrag (Möglichkeit der Bildung von korrosionsschützenden Deckschichten) als auch die Möglichkeit eines kathodischen Korrosionsschutzes (dieser funktioniert nur im Salzsprühtest). Außerdem werden bei Verbindungsmitteln der Bautechnik baustoffseitige und verarbeitungsbedingte Einflüsse (Beschädigungen des Überzuges) im Salzsprühtest nicht ausreichend erfasst.

Deshalb ist nach hiesigen Untersuchungen der Salzsprühtest weder geeignet Materialien oder unterschiedliche metallische Überzüge miteinander zu vergleichen, noch hieraus Aussagen für deren Langzeitverhalten unter natürlichen Umgebungsbedingungen abzuleiten. Aus dem Salzsprühtest kann bei als Trommelware hergestellten Überzügen von Verbindungsmitteln u. U. sogar ein falsches Verhalten im Hinblick auf den Langzeitschutz unter natürlichen Umgebungsbedingungen abgeleitet werden.

Abstract

In structural engineering, in outdoor applications stainless steel fasteners are preferably used for reasons of appearance and safety. However, this previous almost exclusive use of stainless steel from a corrosion point of view is not understandable in any case. Then the use of stainless steel fasteners is uneconomical.

Therefore the objective of this research project consisted of the investigation of newly developed coatings in recent decades such as

- galvanic zinc-nickel-coatings
- and zinc flake coatings

also taking into account additional passivations and top coats with a view to their application as

- wood screw in timber constructions,
- self-tapping screw in metal constructions
- as well as expansion anchor and plastic frame anchor in concrete constructions,

in consideration of possible mechanical influences during installation and to investigate corrosive influences during use. For reference fasteners made of stainless steel as well as hot-dip galvanized and galvanized steel were tested, the corresponding results evaluated and compared to the results with the new coatings. A further objective of these investigations was to determine if and in which outdoor applications zinc-, currently offered zinc-nickel- and zinc flake coatings could replace the considerably more expensive stainless steel use. In addition, it was necessary to clarify if case of "alloyed" metallic coatings under constructional environmental conditions show a significant improvement in regard to corrosion protection compared to state-of-art galvanizing (galvanizing, hot-dip galvanizing).

Small parts such as fasteners are economically produced only in drums with the aforementioned coatings. Therefore, the so-called "drum-ware" was in the focus of the investigations.

The corrosion protection effect of the protective systems was comparatively determined under the following exposure conditions:

- construction-relevant conditions such as constant climate (20 °C and about 84 or 100 % relative humidity),
- atmospheric conditions (urban atmosphere, marine atmosphere),
- abbreviated weathering test (salt spray test).

The salt spray test therefore, because in corrosion engineering statements on long-term corrosion protection of the aforementioned metallic coatings, including additional passivations and top coats, are derived almost exclusively from the results of laboratory tests, mostly from the salt spray test. In the constant climate and atmospheric condition tests, the fasteners were always stored installed to the corresponding base material. In the salt spray test, the individual fasteners were tested, whereby mechanical stresses typical of the installation were taken into account. In addition, the corrosive boundary conditions in the surrounding outer and borehole atmosphere (with anchors) as well as

in the used building materials timber (spruce without and with impregnation, oak) and normal concrete were examined and considered in the assessment.

The results of the atmospheric tests demonstrate that, **hot-dip galvanizing** yields the best corrosion protection compared to the other anti-corrosion coatings on the whole.

The results of the investigations have further demonstrated that, with a suitable design of galvanic zinc and zinc-nickel coatings as well as zinc flake coatings, long-term protection against steel corrosion can be achieved. Especially in urban atmosphere sensibly designed coatings (see below) are usually sufficient and can thus replace stainless steels. The above-mentioned coatings shall meet the following requirements:

- **Galvanic zinc and zinc-nickel-coatings**. Both galvanic coatings must have a sufficient layer thickness (depending on the ambient conditions, layer thicknesses of approximately 10 to 15 µm on average), where pure zinc coatings already offer a long-term corrosion protection. Zinc-nickel-coatings produced as drum-ware are not basically better than zinc coatings because of existing cracks, spalling and uncoated spots.
- **Zinc flake coatings**. For a long-term corrosion protection, zinc flake coatings, which are applied to fasteners in the drum process (high layer thickness fluctuations, uncoated spots), require an adhesion promoter (galvanic zinc plating and/or phosphating). Furthermore, zinc flake coatings must have a sufficient layer thickness of about 10 µm on average.

Passivations and top coats for galvanic coatings as well as top coats for zinc flake coatings do not result in a significant systematic improvement of the corrosion protection of drum products.

Comparative investigations were performed via salt spray and atmospheric tests (urban and marine atmosphere). The results obtained in the salt spray test with regard to the quality and quantity of the protective effect do not correspond to the corrosion behavior under realistic conditions. This is due to the fact that in the salt spray test permanent humidification and high chloride contamination change the corrosion mechanism in comparison to the behavior in construction practice. This applies to both, the metal removal (possibility of forming corrosion-protective cover layers) and the possibility of cathodic corrosion protection (works only in the salt spray test). Other than in case of fasteners used in practice, influences of the building materials and from installation (damage to the coating) are not considered in the salt spray test.

Therefore, based on this investigation, the salt spray test is neither suitable to compare materials and different metallic coatings, nor to derive assessments for their long-term behavior under normal climate conditions. From the results of the salt spray test, in case of coatings produced by means of drums, even a wrong behavior with regard to long-term protection under normal climate conditions may be derived.

Inhaltsverzeichnis

1. Sachverhalt 1

2. Zielsetzung und Vorgehensweise 9

3. Korrosionsbeanspruchung in der Befestigungstechnik 11

3.1 Bewitterter Außenbereich 11
3.1.1 Feuchte, Wasser, Temperatur 11
3.1.2 Schadgase 12
3.1.3 Salze und Stäube 13
3.2 Nicht bewitterter Außenbereich 14
3.2.1 Tauwasserbildung 14
3.2.2 Hygroskopisch reagierende Salze 16
3.2.3 Aufkonzentration von Chloriden in Meeresatmosphäre 17
3.3 Kontakt der Verbindungsmittel mit Baustoffen 19
3.3.1 Holz 20
3.3.2 Wärmedämmstoffe 27
3.3.3 Beton 27
3.4 Regelwerke die Korrosionsbeanspruchung betreffend 27
3.4.1 Verbindungsmittel in der Atmosphäre (DIN EN ISO 9223, DIN EN ISO 12944) 29
3.4.2 Verbindungsmittel im Kontakt mit Holz (DIN EN 1995, DIN EN 14592) 29

4. Eigenschaften von metallischen Überzügen auf Zinkbasis 33

4.1 Überblick 33
4.2 Feuerverzinkte Verbindungsmittel 34
4.3 Verbindungsmittel mit elektrolytisch abgeschiedenen Überzügen 36
4.4 Verbindungsmittel mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen 38
4.5 Möglichkeit eines kathodischen Korrosionsschutzes 40
4.6 Korrosionsschutz durch Zinküberzüge 43
4.6.1 Atmosphärische Korrosion 43
4.6.2 Korrosion bei Kontakt mit Holz 47
4.6.3 Korrosion bei Kontakt mit Beton 51
4.7 Korrosionsschutz durch Zink-Nickel-Überzüge 52
4.8 Korrosionsschutz durch Zink-Aluminium-Lamellenüberzüge 53

5. Passivierung und Deckbeschichtungen metallischer Überzüge 57

5.1 Chromatierung und Passivierung 57
5.2 Deckbeschichtungen (Topcoats) 58

6. Korrosionsschutz durch Verwendung nichtrostender Stähle 61

6.1 Allgemeine Zusammenhänge 61
6.2 Maßgebliche Korrosionsarten 63
6.2.1 Loch- und Spaltkorrosion 63
6.2.2 Interkristalline Korrosion 66
6.2.3 Spannungsrisskorrosion 67
6.3 Regelwerk für die Anwendung nichtrostender Stähle in der Bautechnik 68

6.4 Verhalten bei atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung 71
6.5 Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle bei Kontakt mit Holz 73

7. Untersuchte Verbindungsmittel 75

7.1 Holzschrauben 75
7.1.1 Herstellung und Wirkungsweise 75
7.1.2 Bisheriger Korrosionsschutz 76
7.2 Bohrschrauben 77
7.2.1 Herstellung und Wirkungsweise 77
7.2.2 Bisheriger Korrosionsschutz 77
7.3 Spreizdübel 78
7.3.1 Herstellung und Wirkungsweise 78
7.3.2 Bisheriger Korrosionsschutz 79
7.3.3 Korrosionsbeanspruchung des Dübels 80
7.3.4 Korrosionsszenarien bei einem Spreizdübel 90
7.4 Kunststoffrahmendübel 93
7.4.1 Herstellung und Wirkungsweise 93
7.4.2 Bisheriger Korrosionsschutz 94
7.4.3 Korrosionsbeanspruchung der Dübelschraube 95

8. Detailangaben zu den untersuchten Korrosionsschutzsystemen 99

8.1 Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) 99
8.2 Elektrolytische (galvanische) Verzinkung 101
8.3 Elektrolytisch (galvanisch) applizierter Zink-Nickel-Überzug 104
8.4 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug 107
8.4.1 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 1 107
8.4.2 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 2 111
8.4.3 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 3 114
8.4.4 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 4 116
8.4.5 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 5 118
8.4.6 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 6 120
8.5 Haftvermittler 121
8.6 Passivierung 122
8.7 Deckbeschichtung (Topcoat) 122
8.7.1 Deckbeschichtung 1 122
8.7.2 Deckbeschichtung 2 122
8.7.3 Deckbeschichtung 3 122
8.8 Kopfbeschichtung 122
8.8.1 Kopfbeschichtung 1 123
8.8.2 Kopfbeschichtung 2 123
8.9 Nichtrostender Stahl 123

9. Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte 125

9.1 Zweck der Untersuchungen 125
9.2 Auslagerungsbedingungen 125
9.3 Beschreibung der Versuchskörper 126
9.3.1 Holzschrauben 126
9.3.2 Bohrschrauben 127
9.3.3 Spreizdübel 127

9.3.4 Kunststoffrahmendübel (Lieferung 2) 128
9.4 Ergebnisse und deren Bewertung 129
9.4.1 Bewertungskriterien 129
9.4.2 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Holzschrauben 130
9.4.3 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Bohrschrauben 143
9.4.4 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Spreizdübeln 147
9.4.5 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 2) 152

10. Naturversuche (Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre) 159

10.1 Zweck der Untersuchungen 159
10.2 Auslagerungsbedingungen 159
10.3 Beschreibung der Versuchskörper 162
10.3.1 Holzschrauben 162
10.3.2 Bohrschrauben 163
10.3.3 Spreizdübel 164
10.3.4 Kunststoffrahmendübel (Lieferung 1) 165
10.4 Ergebnisse und deren Bewertung 166
10.4.1 Bewertungskriterien 166
10.4.2 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Holzschrauben 168
10.4.3 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Bohrschrauben 188
10.4.4 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Spreizdübeln 192
10.4.5 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 1) 206
10.5 Korrosionsverhalten von Anbauteilen 215
10.5.1 Kontakt zur Stadt- und Meeresatmosphäre (bewittert) 217
10.5.2 Kontakt zur Stadt- und Meeresatmosphäre (nicht bewittert) 217
10.5.3 Loser Kontakt mit dem Beton in Stadt- und Meeresatmosphäre (bewittert) 217
10.5.4 Loser Kontakt mit dem Beton in Stadt- und Meeresatmosphäre (nicht bewittert) 218
10.6 Ergänzende Langzeituntersuchungen an korrosionsgeschützte Verbindungsmittel in Meeresatmosphäre 226
10.6.1 Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzügen unterschiedlicher Dicke, ohne bzw. mit Haftvermittler bis zu 6 Jahren in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) 226
10.6.2 Köpfe von in Holz eingedrehten Holzschrauben mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen ohne und mit Passivierung sowie zusätzlicher Deckbeschichtung bis zu 7 Jahren in Meeresatmosphäre (bewittert) 228
10.6.3 Gewindefurchschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen mit Schlagschrauber in Aluminiumprofile eingeschraubt, nach Auslagerung in Landatmosphäre 231

11. Salzsprühtests 235

11.1 Versuchsdurchführung 235
11.2 Erfahrungen mit Salzsprühtests 235
11.3 Eigene Salzsprühtests 236
11.3.1 Ziel der Untersuchungen 236
11.3.2 Probenherstellung 236
11.3.3 Ergebnisse und deren Bewertung 237

12. Vergleich Naturversuch und Salzsprühtest anhand von Beispielen 247
12.1 Einführung 247
12.2 Vergleichende Prüfung: Untersuchung von Korrosionsschutzsystemen im Salzsprühtest und in Meeresatmosphäre 247
12.3 Kritische Betrachtung des Salzsprühtests 253

13. Gesamtbeurteilung der Schutzsysteme auf Verbindungsmitteln 257
13.1 Dicke und Gleichmäßigkeit der Überzüge 258
13.2 Gesamtbewertung der Naturversuche bezüglich der Korrosionsschutzsysteme 259
13.3 Gesamtbewertung des Salzsprühtests 264

Anlagen 267
Anlagen - Abschnitt 7: Einzelergebnisse der Feuchtemessungen der Bohrlochatmosphäre und in der umgebenden Außenatmosphäre 269
Anlagen - Abschnitt 9: Ergebnisse der Auslagerungen bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte 279
Anlagen - Abschnitt 10: Ergebnisse der Auslagerungen in Stadt und Meeresatmosphäre 299
Anlagen - Abschnitt 11: Einzelergebnisse im Salzsprühtest 331

1. Sachverhalt

In der Bautechnik werden Bauteile in vielfältiger Weise miteinander verbunden bzw. befestigt. Dabei kommt den Verbindungs- bzw. Befestigungsmitteln[1)] eine wesentliche Bedeutung im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit von Bauwerken zu. In Abhängigkeit vom statischen System und vom Baustoff wird die Aufgabe des Verbindens unterschiedlich gelöst:

- Im **Holzbau** werden stiftförmige Verbindungsmittel wie Bolzen, Stabdübel, Nägel und Schrauben eingesetzt, um Holzbauteile miteinander zu verbinden oder z. B. Stahlbauteile am Holz zu befestigen. Die Verbindungsmittel kommen teilweise mit der äußeren Atmosphäre und mit dem Holz in Kontakt und unterliegen somit einem atmosphärischen Korrosionsangriff und einem holzseitigen Angriff von Feuchte und Inhaltstoffen des Holzes.
- Im **Metallbau** sind neben dem Schweißen und Nieten vor allem Schrauben häufig angewendete Verbindungsmittel. Für den Metallbau bzw. für Verbindungsmittel im atmosphärisch berührten Bereich stehen Schraubverbindungen bestehend aus Schraube, Mutter und Unterlegscheibe sowie Bohrschrauben zur Verfügung, wobei in der Folge die Selbstbohrschraube hier stellvertretend behandelt werden. Schraubverbindungen und Bohrschrauben werden häufig durch die umliegende Atmosphäre korrosionsbeansprucht.
- Im **Beton- und Mauerwerksbau** kommen häufig Dübel zur Anwendung. Dabei sind wichtige Vertreter der Spreizdübel und der Kunststoffrahmendübel. Dübel können im Bohrloch mit der Bohrlochatmosphäre und dem Beton in Kontakt stehen, sind kopfseitig aber auch der äußeren Atmosphäre ausgesetzt.

Stellvertretend wurden in den hiesigen Untersuchungen

- für den Holzbau Holzschrauben,
- für den Metallbau Bohrschrauben
- und für den Betonbau Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel

behandelt.

Typische Anwendungen dieser Verbindungsmittel in der Bautechnik werden in der Folge beispielhaft genannt.

Holzbau

Typische Holzverbindungsmittel, wie vor allem Holzschrauben und Stabdübel, sind in **Bild 1.1** dargestellt. Im Weiteren kommen im Holzbau auch Passbolzen, Bolzen und Gewindestangen zum Einsatz:

[1)] Es existiert keine eindeutige Definition zur Abgrenzung von Verbindungen (Verbindungsmitteln) und Befestigungen (Befestigungsmitteln), da sich die Funktionen dieser Bauteile oftmals überschneiden. In [1] und [2] wird der Begriff „Verbindung“ als Oberbegriff für alle Befestigungen, Stöße und Anschlüsse definiert. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde zwischen beiden Begriffen nicht unterschieden und alle untersuchten Bauteile als Verbindungsmittel bezeichnet.

- Holzschrauben dienen als Verbindungsmittel für tragende Holzverbindungen zwischen Holzbauteilen aus Vollholz, Brettschichtholz oder Holzwerkstoffen und zur Befestigung von Stahlbauteilen mit Holz. Sie werden mit einem Schrauber ohne Vorbohren in das Holz eingedreht.
- Stabdübel dagegen werden in vorgebohrte Löcher von Hand passgenau eingetrieben.

Die Anzahl und die Abmessungen aller genannten Verbindungsmittel für die jeweilige Anwendung hängen von der Höhe der Last, der Art der Beanspruchung, Materialdicke und Einbausituation ab. Holzverbindungsmittel befinden sich im Hinblick auf korrosive Einflüsse im Kontakt mit Holz und sind häufig aber auch zusätzlich der umgebenden Atmosphäre ausgesetzt.

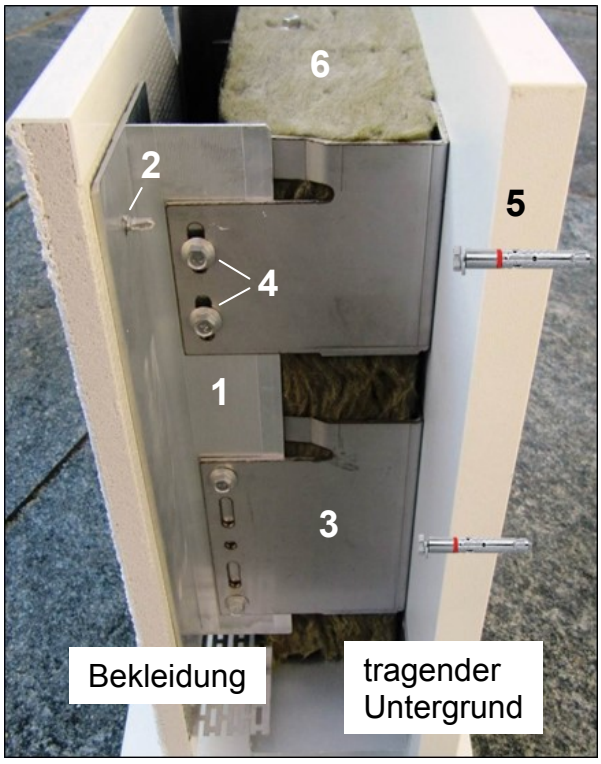
Bild 1.1:
Verbindungsmittel zwischen Holzbauteilen (Holzschrauben, Bild oben links), Stahlteilen (Holzschrauben, Bild oben rechts) und Holzbindern (Stabdübel, Bild unten)

Metallbau, Betonbau

Eine hinterlüftete Außenwandbekleidung (**Bild 1.2**), für diese ist der Begriff„ vorgehängte, hinterlüftete Fassade“ gleichbedeutend, enthält häufig Verbindungsmittel für den Metallbau und den Betonbau. Sie kann bestehen aus

- einer Bekleidung aus z. B. Metall-, Keramik- oder Naturwerksteinplatten mit offenen oder geschlossenen Fugen,
- Bohrschrauben, welche die Bekleidung an der Unterkonstruktion mechanisch befestigen (Bekleidung und Unterkonstruktion verbinden),
- einer Unterkonstruktion aus z. B. metallischen Tragprofilen,
- den metallischen Verbindungen, welche jeweils Teile der Unterkonstruktion untereinander verbinden,
- den Dübeln, welche die Unterkonstruktion mechanisch in der Wand verankern (verbinden),
- einer auf der Außenwand aufliegenden Wärmedämmstoffschicht und Dämmstoffhalter.

Die Verbindungsmittel befinden sich bei dieser Anwendung im nichtberegneten Hinterlüftungsbereich und im Kontakt mit Beton. Unterkonstruktionen können allerdings auch Holzbauteile beinhalten, so dass (bei anderen Fassadentypen) auch Holzverbindungsmittel zu Anwendung kommen können.



1 Unterkonstruktionsprofil
2 Bohrschraube
3 Wandhalter
4 Bohrschraube
5 Spreizdübel
6 Wärmedämmung

Bild 1.2:
Modell der StoVentecfassade mit der Unterkonstruktion und der Verankerung mittels Dübel im Untergrund (Dübel: Fotomontage)

Hinsichtlich der Bauwerkssicherheit von Verbindungsmitteln ist zu beachten:
Verbindungsmittel übertragen hohe Lasten aus dem Eigengewicht befestigter Kon-

struktionen sowie im Außenbereich zusätzlich auf das Bauwerk einwirkende dynamische Windlasten. Außerdem können diese metallischen Bauelemente korrosiven Einflüssen ausgesetzt sein, sei es durch die umgebende Atmosphäre oder im Kontakt mit Baustoffen.

Die für die Lastübertragung zur Verfügung stehenden Querschnitte von Verbindungsmitteln sind im Vergleich zum Gesamtbauwerk relativ klein. Eine korrosionsbedingte Querschnittsminderung dieser Bauteile könnte deshalb nachteilige Auswirkungen auf deren Tragverhalten und die Sicherheit der gesamten Konstruktion haben. Auch die Optik und das Funktionsverhalten können durch sich ablagernde Korrosionsprodukte (z. B. Rost) beeinträchtigt werden: So ist nicht auszuschließen, dass beispielsweise bei Spreizdübeln bereits durch einen mäßig starken Korrosionsangriff und Rostbildung das Nachspreizverhalten beeinträchtigt wird [3]. Für Verbindungsmittel ist daher eine ausreichende, im Hinblick auf die zu erwartende Korrosionsbelastung und geplante Schutzdauer ausgelegte Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, welche durch einen geeigneten und dauerhaft wirksamen Korrosionsschutz sicherzustellen ist.

Im Außenbereich für Verbindungsmittel angewendete Schutzmaßnahmen

Reinzinküberzüge. Weltweit werden metallische Verbindungen aus Stahl für den Holz-, Metall- und Betonbau häufig galvanisch oder feuerverzinkt. In Deutschland und anderen Industrieländern werden diese aus optischen und/oder aus sicherheitstechnischen Gründen bevorzugt aus nichtrostendem Stahl hergestellt, falls es zu einer Anwendung im Außenbereich kommt [4].

Nichtrostende Stähle. Beim Einsatz nichtrostender Stähle liegt man für den Schutz im Außenbereich bei entsprechender Werkstoffauswahl zumeist auf der sicheren Seite, auch wenn mit verschärften Korrosionsbedingungen zu rechnen ist. Dabei hat sich durchgesetzt, Stähle für alle Atmosphärentypen (Stadt-, Industrie-, Meeresatmosphäre) mindestens einer Korrosionsbeständigkeitsklasse III (z. B. 1.4401 oder 1.4571) nach der bauaufsichtlichen Zulassung [5, 6] einzusetzen. Die Notwendigkeit für nichtrostenden Stahl im Außenbereich wird zumeist deshalb gesehen, weil andere Korrosionsschutzsysteme bzw. Werkstoffe (verzinkter Stahl, beschichteter Stahl, Nichteisenmetalle) nicht in allen Fällen den Korrosionsschutzbedürfnissen gerecht werden [7 bis 10] und man es im Regelfall mit unzugänglichen Konstruktionen (z. B. bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen) zu tun hat, an die einerseits eine hohe Lebenserwartung gestellt wird, die andererseits aber weder überprüft noch instandgesetzt werden können.

Die bisherige bevorzugte Verwendung von nichtrostendem Stahl für Verbindungen bei Anwendungen im Außenbereich ist jedoch aus korrosionstechnischer Sicht nicht immer nachvollziehbar und eine Verwendung ist häufig auch unwirtschaftlich. Es besteht seitens der Anwender daher der Wunsch nach preiswerteren und dennoch sicheren Lösungen für den Korrosionsschutz. Beispielsweise im Automobilbau werden z. B. für Schraubverbindungen schon seit geraumer Zeit modifizierte metallische Überzüge auf Zinkbasis angewendet. Auch für Kleinteile in der Befestigungstechnik werden diese neuerlich für den nur mäßig korrosiven Außenbereich angeboten und auch eingesetzt.

Neben galvanisch aufgebrachten Zink- und Zink-Nickel-Überzügen (in der Folge ZnNi-Überzüge genannt), häufig mit zusätzlicher Passivierung und Deckbeschichtung, sind dies aus wässrigen Lösungen abgeschiedene und eingebrannte Zink-Aluminium-Lamellenüberzüge (in der Folge ZnAl-Lamellenüberzüge genannt).

Legierte Zinküberzüge. Zu den alternativen Korrosionsschutzmaßnahmen zum Zink gehören im Baubereich auch Überzüge aus **Zink-Aluminium-Magnesium**. Diese werden in einem modifizierten Schmelztauchprozess auf Stahlband aufgebracht. Aus dem beschichteten Blech können dann Bauteile hergestellt werden. In der Befestigungstechnik haben solche Überzüge nur für Anbauteile Bedeutung, weshalb hier keine vertiefte Betrachtung erfolgt.

Bezüglich der nur dünnen **Zink-Nickel-Überzüge** (ZnNi-Überzüge) **und Zink-Aluminium-Lamellenüberzüge** (ZnAl-Lamellenüberzüge), die Schichtdicken liegen in der Regel unter 20 µm, wurde aus den Ergebnissen von Salzsprühversuchen wiederholt geschlossen, dass diese 50 Jahre Korrosionsschutz garantieren. Nicht immer erfüllen sich allerdings die an solche Überzüge gestellten Erwartungen, insbesondere auch deshalb, weil

- es bei der Fertigung produkt- und herstellungsbedingt (die Überzüge werden in Trommelverfahren aufgebracht) zu sehr ungleichmäßigen Schichtdicken kommen kann,
- die Überzüge bei der Montage der korrosionsgeschützten Bauteile aufgrund von einwirkenden Pressungen und Reibungen beschädigt werden,
- aus Ergebnissen ungeeigneter bzw. praxisfremder Korrosionsschutzuntersuchungen (z. B. Salzsprühtest) direkt auf das langzeitige baupraktische Verhalten geschlossen wird.

Dabei bieten die aus dünnen Schichten bestehenden „legierten“ Überzüge auf Zinkbasis durchaus Potential für den Außenbereich. Man ist bisher zumeist davon überzeugt, dass diese Überzüge aus korrosionstechnischer Sicht bei geschlossener, nicht zu dünner Schicht nämlich gerade dort Vorteile aufweisen, wo die traditionellen Zinküberzüge und insbesondere die dünnen galvanischen Zinküberzüge Nachteile zeigen, nämlich bei dauerfeuchter Umgebung und bei Angriff von chloridionenhaltigen wässrigen Lösungen. Sie würden sich daher durchaus zum Zwecke des Korrosionsschutzes von stählernen Bauteilen und auch von Verbindungselementen empfehlen und könnten die erheblich teureren nichtrostenden Stähle bei manchen Anwendungen mit nicht zu hoher Korrosivität ersetzen. Dies setzt allerdings voraus, dass diese Überzüge wesentliche Anforderungen an die Applikation und die Eigenschaften von Korrosionsschutzsystemen für Verbindungen erfüllen. Aus korrosionstechnischer und anwendungstechnischer Sicht wären dies:

- Auf allen Oberflächen mechanisch beanspruchter Querschnitte (also beispielsweise bei Schrauben auch im tragenden Gewindebereich) sollten eine ausreichende Schichtdicke des Überzuges und eine möglichst gleichmäßige Schichtdickenverteilung vorhanden sein.
- Die Oberflächen der Bauteile sind häufig Funktionsflächen (z. B. Gewindeteile,

Spreizteile bei Dübeln), die mechanisch beansprucht werden und eine bestimmte Passung benötigen. Die Eigenschaften dieser Funktionsflächen (z. B. Nachspreizverhalten von Dübeln) dürfen durch die metallischen Überzüge und deren Korrosion nicht unzulässig beeinträchtigt werden.

- Unter den mechanischen Belastungen, die das Bauteil beim Einbau oder im Betrieb erfahren kann, muss die Korrosionsschutzschicht ausreichend unempfindlich gegenüber Querpressungen und Abrieb sein. Sie darf beispielsweise als Folge lokaler Pressungen nicht enthaften und abplatzen.
- Die Schutzschicht (metallischer Überzug) muss einen ausreichenden Korrosionsschutz insbesondere gegenüber Sonderbelastungen und Störfällen, z. B. Kontakt mit chloridionenhaltigen wässrigen Medien oder feuchten Baustoffen (Beton, Holz und Wärmedämmung) aufweisen.
- An Verletzungen und durch Korrosion lokal freigelegten Stahloberflächen wäre ein unter typischen Anwendungsbedingungen wirksamer lokaler kathodischer Schutz wünschenswert.

In den verschiedenen Anwendungsbereichen sind für Deutschland bezüglich des Korrosionsschutzes für Verbindungsmittel folgende Besonderheiten zu beachten:

Holzbau. Im Holzbau sind für stiftförmige Verbindungsmittel zwar Verzinkungen auch im bewitterten Außenbereich erlaubt [11, 12], wobei die jeweils erforderliche Zinkdicke den vorherrschenden Korrosionsverhältnissen angepasst wird, jedoch treten unter diesen Bedingungen auch Schäden auf [13]. Alternativ werden deshalb im Holzbau für Verbindungen auch nichtrostende Stähle angeboten bzw. werden für bestimmte Anwendungen, wie Bauteile im bewitterten Außenbereich, verlangt.

Metallbau. Verbindungsmittel im Metallbau, auch die in der Folge näher behandelten beim Einbau stark mechanisch beanspruchten Bohrschrauben, werden zum Zwecke des Korrosionsschutzes in atmosphärischer Umgebung häufig mit dünnen Überzügen auf Zinkbasis versehen, weshalb deren Schutz im Außenbereich begrenzt ist. Für gehobene Ansprüche werden Schrauben aus nichtrostendem Stahl verwendet [14], wobei die Bohrspitzen zum Bohren des Kernloches beispielsweise aus einem stumpf angeschweißten, gehärteten niedriglegiertem Stahl bestehen. Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl kommen in vielfacher Ausführung auch bei der Unterkonstruktion oder als Einzelbefestigung bei hinterlüfteten Fassaden zur Anwendung [15, 16].

Betonbau. Im **Betonbau** dürfen Dübel aus galvanisch oder feuerverzinktem Stahl, mit Ausnahme der Kunststoffrahmendübel [17], nur zur Befestigung von Anbauteilen in geschlossenen Räumen, z. B. Wohnungen, Büroräumen etc., mit Ausnahme von Feuchträumen, verwendet werden [3]. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Verzinkung den Dübel bei Einbau in Feuchträumen und im Außenbereich während einer angestrebten Nutzungsdauer von 50 Jahren nicht dauerhaft schützt. In Feuchträumen und im Freien, vor allem aber in Industrieatmosphäre und in Meeresnähe, finden Dübel aus nichtrostendem Stahl Anwendung.

Verbindungsmittel aus hochfestem Stahl

Verbindungsmittel aus hochfestem Stahl (z. B. HV-Schrauben für den Stahlbau) werden zum Zwecke des Korrosionsschutzes auch verzinkt. Bei diesen Verbindungsmitteln, die allerdings bei den folgenden Betrachtungen und Untersuchungen nicht im Fokus der hiesigen Untersuchungen stehen, wäre zusätzlich zu fordern:

- Bei der Applikation einer Schutzschicht darf es zu keinem Festigkeitsabfall kommen. Diese Forderung wird insbesondere bei hochfesten Stählen dann nicht erfüllt, wenn die Aufbringung einer Schutzschicht (wie beim Feuerverzinken) zu einer unzulässigen Erwärmung des Bauteils führt.
- Bei der Applikation eines Überzuges und bei Korrosionsprozessen darf es zu keiner unzulässigen Beladung des Werkstoffes mit Wasserstoff kommen, da ansonsten Rissbildung und Brüche während des Prozesses oder im betrieblichen Einsatz zu befürchten sind.

Literatur Abschnitt 1

[1] R. Kindmann, M. Stracke: Verbindungen im Stahl- und Verbundbau, Bauingenieur-Praxis, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2009

[2] H. D. Seghezzi: Befestigungsverfahren im Bauwesen, mit besonderer Berücksichtigung des Bolzensetzens. In: Gallus Rehm zum 60. Geburtstag, Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn Verlag, 1984, S.285-295

[3] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten von verzinkten Dübeln bei Anwendung im Außenbereich. In: Befestigungstechnik, ibidem-Verlag, Stuttgart 2012, S.223-246

[4] U. Nürnberger: Verwendung nichtrostender Stähle in der Befestigungstechnik - Stellungnahme zum korrosionstechnischen Regelwerk. In: Beiträge zum 46. DAfStb-Forschungskolloquium, Universität Stuttgart, 2006, S. 69-83

[5] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z- 30.3-6 „Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen“ (2017)

[6] DIN EN 1993-1-4 (2015) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen

[7] G. Rehm, R. Lehmann, U. Nürnberger: Korrosion der Befestigungselemente bei vorgehängten Fassaden. FMPA Baden-Württemberg, Stuttgart, 1980

[8] H. Wieland: Korrosion von Befestigern in nicht belüfteten Flachdächern. SFS Stadler, Heerbrugg/Schweiz, 1992

[9] K. Menzel, B. Hagmayer: „Durability of Galvanized, Post-Installed Fasteners to Concrete“; Connections between Steel and Concrete S. 329-337; RILEM Publ., Cachan Cedex, France, 2001

[10] 3-Länder-Korrosionstagung “Befestigungsmittel im Hochbau - Korrosionsprobleme und Abhilfemaßnahmen”, Stuttgart, 2007, Tagungsunterlagen Gesellschaft für Korrosionsschutz-GfKORR, Frankfurt

[11] DIN EN 1995 (2013) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

[12] DIN EN 14592 (2012) Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen; europäischer Vorschlag

[13] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten der Baumaterialien in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Holz. In: Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage, 8.-9. Oktober 2009, Universität Karlsruhe, Tagungsband S. 47-64

[14] U. Nürnberger: Hochfeste nichtrostende Stähle - Alternativwerkstoffe für Zugglieder im Ingenieurbau und Blechschrauben für den Dach- und Wandbereich. Jahrestagung 2000 der GfKORR, Tagungsband, 91-118

[15] U. Nürnberger, C. Köse: Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Naturwerkstein. Bautechnik 87(2010), 373-382

[16] U. Nürnberger, C. Köse: Korrosionsbeanspruchung von Befestigungsmitteln bei hinterlüfteten Fassaden. 3-Länder-Korrosionstagung: Korrosionssicheres Bauen, 12/13 April 2018, EMPA, Dübendorf, Schweiz

[17] U. Nürnberger, J. Küenzlen: Einsatz von Kunststoffrahmendübeln bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen. Zeitschrift $ql^2/8$ Fa. Würth. 5(2012)Nr. 8, S.5-13

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Neuartige Überzüge auf Zinkbasis wie ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge[1)] werden häufig vor allem dann angewendet und sind für eine Anwendung in der Befestigungstechnik dann von Interesse,

- wenn mittels dünner metallischer Überzüge die Passfähigkeit sichergestellt werden soll,
- wenn die Absicht besteht mit dünnen Überzügen vergleichbare Schutzdauern zu erzielen wie bei den dickeren Feuerverzinkungen,
- wenn gegenüber den ebenfalls eher dünnen galvanischen Zinküberzügen ein verbessertes Korrosionsschutzverhalten erreicht werden soll
- und um preiswerte Alternativen zu nichtrostenden Stählen zu erhalten.

Die Möglichkeiten und Grenzen des Korrosionsschutzes derartiger Überzüge für Verbindungsmittel, unter Berücksichtigung der beim Einbau und der Nutzung im Außenbereich vorherrschenden notwendigen mechanischen und typischen korrosiven Beanspruchungen, sind jedoch bisher nicht systematisch untersucht worden.

In der Korrosionsschutztechnik werden Aussagen zum langzeitigen Korrosionsschutzverhalten der vorgenannten metallischen Überzüge, einschließlich zusätzlicher Passivierungen und Funktionsbeschichtungen, nahezu lediglich aus Ergebnissen von labormäßig durchgeführten Schnelltest abgeleitet. Dabei spielt der Salzsprühtest eine dominante Rolle. Aus diesem Schnelltest allerdings verbindliche Folgerungen für das baupraktische Verhalten abzuleiten, ist nicht möglich. Hierauf wird im Vorwort der Norm DIN EN ISO 9227 [1] ausdrücklich hingewiesen:
„Nur selten besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Beständigkeit gegen die Einwirkung von Salzsprühnebel und der Beständigkeit gegen Korrosion in anderen Medien. Die verschiedenen Faktoren, welche das Fortschreiten der Korrosion beeinflussen, können sich je nach den herrschenden Bedingungen sehr unterschiedlich auswirken. Dazu gehört z. B. auch die Bildung von Schutzschichten. Die Prüfergebnisse sollten deshalb nicht als direkter Hinweis auf die Korrosionsbeständigkeit der geprüften metallischen Werkstoffe in allen Umgebungsbedingungen betrachtet werden, in denen diese Werkstoffe verwendet werden können."

Fachleute sind sich darin einig, dass der Salzsprühtest keine Freibewitterung ersetzt. Dieses vor allem deshalb, da im Salzsprühtest der Korrosionsmechanismus gegenüber dem Verhalten unter baupraktischen Verhältnissen verändert wird [2]. Es war daher Aufgabe der dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschung, ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge im Hinblick auf eine Anwendung für Verbindungsmittel am Beispiel der Holzschraube im Holzbau, der Selbstbohrschraube im Metallbau sowie des Spreiz-

---

[1)] Korrosionsschutzsysteme, die auf dem Untergrund aufbauen, wie z. B. die Feuerverzinkung, werden richtigerweise als Überzüge bezeichnet. Dem gegenüber bezeichnet man Systeme, die den Untergrund lediglich überlagern als Beschichtungen. Abweichend hiervon werden Beschichtungen, bestehend aus ZnAl-Lamellen in einer anorganischen Matrix im zuständigen Regelwerk (DIN EN 13858 [3] und DIN EN ISO 10683 [4]) als „Überzüge" bezeichnet. Aus formalen Gründen wird diese Bezeichnung für alle Systeme in der hiesigen Arbeit beibehalten.

und Kunststoffrahmendübels im Betonbau, unter Berücksichtigung der genannten mechanischen und korrosiven Beeinflussungen zu untersuchen und zu bewerten. Bei den Untersuchungen wurden zum Vergleich auch nichtrostende sowie feuerverzinkte (kleinteilverzinkte) und galvanisch verzinkte Verbindungsmittel einbezogen.

Seitens der Beanspruchung wurde die Schutzwirkung der genannten Systeme

- unter bautechnisch relevanten Bedingungen wie Normklima (20 °C mit etwa 84 bzw. 100 % relative Luftfeuchte),
- bei Auslagerung unter atmosphärischen Bedingungen (Stadtatmosphäre, Meeresatmosphäre)
- sowie vergleichend auch in einem Kurzbewitterungstest (Salzsprühtest),

festgestellt. Unter den genannten Korrosionsbedingungen wurden Holzschrauben, Selbstbohrschrauben, Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel im eingebauten Zustand ausgelagert und deren Korrosionsschutzwirkung bewertet. Dabei wurden auch die korrosiven Randbedingungen in der umgebenden Außen- und Bohrlochatmosphäre sowie in den verwendeten Baustoffen Holz (Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche) und Normalbeton untersucht und in die Bewertung einbezogen. Die Untersuchungen erfolgten auch unter Berücksichtigung von zusätzlichen Passivierungen und Deckbeschichtungen (Topcoats), die bei einigen Überzügen als Funktionsbeschichtung zum Zwecke eines zusätzlichen Korrosionsschutzes und/oder z. B. als Gleitmittel (bei Holzschrauben) aufgebracht werden.

Letztlich war es auch Ziel der Untersuchungen festzustellen, ob und wenn ja unter welchen Außenanwendungen ein Schutz durch Zinküberzüge und die derzeit offerierten ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge die erheblich teureren nichtrostenden Stähle ersetzen können. Anderseits galt zu klären, ob bei den „legierten“ metallischen Überzügen auch unter baupraktischen Umgebungsbedingungen eine deutliche Verbesserung der Schutzwirkung gegenüber den herkömmlichen Verzinkungen (galvanische Verzinkung, Feuerverzinkung) besteht. Die Ergebnisse sollen den Anwendern derart geschützter Verbindungsmittel die Möglichkeit geben, die Korrosionsbeständigkeit unter den verschiedensten Anwendungsbedingungen mit geringer bis starker Korrosionsbelastung im Hinblick auf eine Langzeitanwendung im Außenbereich besser abschätzen zu können.

Literatur Abschnitt 2

[1] DIN EN ISO 9227 (2006) Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray test, (früher DIN 50021)

[2] U. Nürnberger: Salzsprühtest kontra Naturversuch - vergleichende Betrachtung von Befestigungsmitteln für die Bautechnik mit metallischen Überzügen auf Zinkbasis. ZVO-Oberflächentage (Kongress für Galvano- und Oberflächentechnik), Leipzig, 19-21.09.2018

[3] DIN EN 13858 (2007) Korrosionsschutz von Metallen - Nicht elektrolytisch aufgebrachte schuppenförmige Zinküberzüge auf Werkstücken aus Eisen und Stahl

[4] DIN EN ISO 10683 (2014) Verbindungselemente - Nichtelektrolytisch aufgebrachte Zink-lamellenüberzüge

3. Korrosionsbeanspruchung in der Befestigungstechnik

Für eine Metallkorrosion in der Atmosphäre oder bei Kontakt mit Baustoffen ist neben dem Vorliegen eines unter den jeweiligen Angriffsbedingungen korrosionsempfindlichen Werkstoffs mindestens die Anwesenheit von Sauerstoff und Wasser erforderlich. In der Umgebung enthaltene gasförmige und/oder salzhaltige Verunreinigungen verstärken zumeist den Korrosionsangriff.

3.1 Bewitterter Außenbereich

Bei Verbindungsmitteln, welche einer atmosphärischen Beanspruchung ausgesetzt werden, sind folgende Einflüsse korrosionsfördernd [1]:

- Feuchte (wasserdampfhaltige) Luft und die Bildung von Tauwasser infolge Taupunktunterschreitung aufgrund der vorhandenen konstruktiven bzw. bauphysikalischen und klimatischen Verhältnisse,
- Emissionen an vor allem Schwefeldioxid und Staub in städtischen und industriellen Ballungsräumen,
- chloridhaltige Wässer und Aerosole im Meeresbereich und neben tausalzbehandelten Verkehrsflächen.

In der Atmosphäre entscheiden deshalb das jeweils am Bauteil vorherrschende Makroklima und das von der jeweiligen Bauausführung abhängige Mikroklima sowie der Gehalt an korrosionswirksamen Verunreinigungen in der Bauwerksumgebung, ob und welchem Maße Korrosion möglich ist [2]. In der Folge werden diese Zusammenhänge für den Außenbereich beschrieben.

3.1.1 Feuchte, Wasser, Temperatur

Korrosion setzt Feuchtigkeit bzw. Wasser auf der Metalloberfläche voraus. Die Bildung extrem dünner Elektrolytfilme oberhalb bestimmter **Luftfeuchten** sowie durch Betauung bedingte regelmäßige Auftreten von Feucht/Trocken-Zyklen und, bei Korrosion im Freien, auch Niederschläge und deren Abtrocknung, sind wesentliche Eigenschaften der atmosphärischen Beanspruchung.

Verunreinigungen, die in der Außenatmosphäre enthalten sind, erleichtern einerseits die Kondensation von Luftfeuchte, bestimmte Verunreinigungen fördern auch Korrosionsprozesse (siehe unten). Wegen der Begünstigung einer Kondensation durch Luftverunreinigungen bilden sich dünne Elektrolytfilme bereits bei relativen Luftfeuchten <100 %. Die Korrosion der Metalle in der Atmosphäre nimmt aufgrund der erwähnten Zusammenhänge oberhalb 60 % relativer Luftfeuchte mit zunehmender Feuchte sowie dem Gehalt gasförmiger und/oder fester Verunreinigungen in der Luft zu [2].

Eine Erhöhung der **Temperatur** begünstigt die Metallkorrosion: Einerseits laufen die Korrosionsreaktionen beschleunigt ab (in sauerstoffhaltigen Wässern wird durch eine Temperaturerhöhung um 20 °C der Korrosionsabtrag von unlegiertem Stahl in etwa verdoppelt), andererseits nimmt der Gehalt der Luft an Wasserdampf mit steigender Temperatur zu (Abschn. 3.2.1). In Mitteleuropa herrscht gemäßigtes Klima, wobei bei-

spielsweise für eine Stadt wie Stuttgart die in **Bild 3.1** genannten Klimawerte charakteristisch sind.

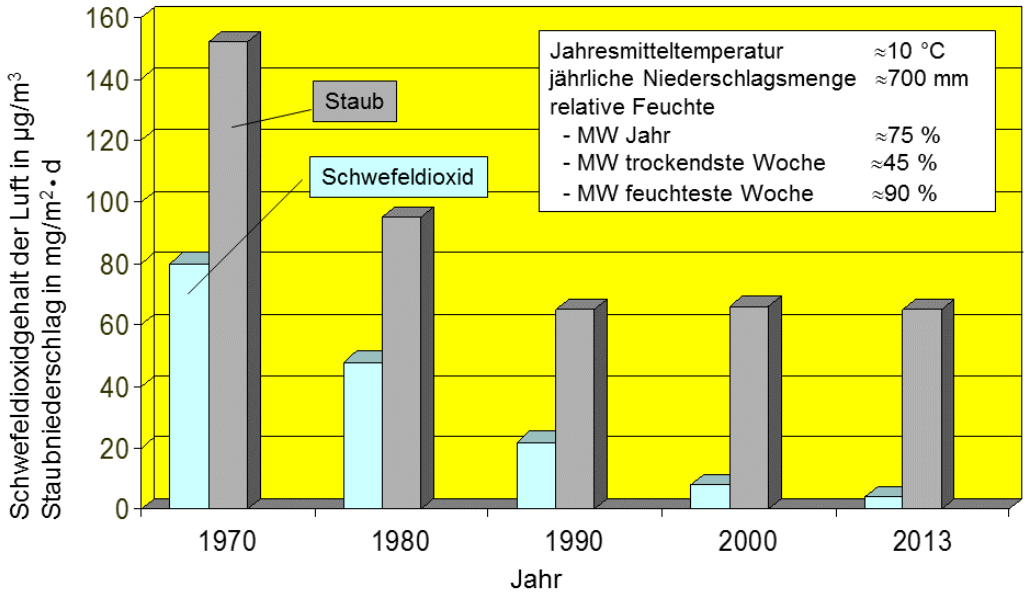


Bild 3.1:
Schwefeldioxidgehalte und Staubniederschläge (Jahresmittelwerte) sowie Angaben zum Klima in der Innenstadt von Stuttgart zwischen 1970 und 2013 [2]

Die Korrosion von Verbindungsmitteln wird durch den Zutritt bzw. die Bildung von Feuchte (Wasserdampf) und Wasser unterstützt. Andererseits ist zu beachten, dass Schmutz und Salzablagerungen durch Beregnung abgewaschen werden und die Korrosion dadurch eher behindert wird [2]. In chloridsalzhaltiger Atmosphäre (z. B. in Meeresatmosphäre) wird in nicht beregneten Bereichen meist ein stärkerer Korrosionsbefall vorgefunden als in beregneten, da sich hygroskopisch reagierende Salze ablagern und aufkonzentrieren können (Abschn. 3.2.2).

3.1.2 Schadgase

Luftverunreinigungen im städtischen und industriellen Bereich sind in erster Linie Emissionen technischer Prozesse. Korrosiv wirken Schadgase wie vor allem Schwefeldioxid, daneben in deutlich geringerem Maße Stickoxide und Kohlendioxid. Schwefeldioxid entsteht vorrangig als unerwünschtes Nebenprodukt bei Verbrennungsprozessen durch Oxidation des Schwefels, der insbesondere in der Kohle und im Öl enthalten ist. Die bei der Verbrennung von Benzin oder Diesel im Motor entlang von Verkehrswegen entstehenden Abgase bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid und Wasser; daneben sind noch Stickoxide enthalten. Aufgrund gesetzlicher Vorschriften und technischer Vorrichtungen ist der Ausstoß der genannten Schadgase stark rückläufig.

Die Intensität der Korrosionswirkung von Luftimmissionsstoffen wird durch die Höhe der ohnehin schon als Korrosionsmittel wirkenden Luftfeuchtigkeit und auch atmosphärische Wässer beeinflusst. Die Luftfeuchtigkeit und dünne Wasserfilme auf Bauteilen lösen Verunreinigungen oder gehen mit ihnen aus korrosionschemischer Sicht besonders

aggressive Verbindungen ein. **Schwefeldioxid** (SO_2), das diesbezüglich wichtigste Schadgas, bildet bei gleichzeitig hoher Luftfeuchte schweflige Säure, die sich durch weitere Sauerstoffaufnahme zu Schwefelsäure umsetzt. Mit zunehmender SO_2-Konzentration in der Luft nimmt deshalb die Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Korrosionsgefährdung von ungeschütztem und auch korrosionsgeschütztem Stahl zu.

In den zurückliegenden zwei Jahrzehnten hat der SO_2-Gehalt der Luft in den europäischen städtischen und industriellen Ballungsräumen erheblich abgenommen [1]. Beispielsweise in Stuttgart, wo wegen der Kessellage widerholt eine Luftstagnation vorherrscht, lagen die aus dem Hausbrand resultierenden Gehalte an Schwefeldioxid im Jahresmittel früher zwischen 200 und 2000 µg/m^3 (Messung nach G. Schikorr, 1960) [2]. In sog. Landluft wurden Schwefeldioxidgehalte von 10 bis 100 µg/m^3 festgestellt. Derzeit werden in mitteleuropäischen Großstädten im Jahresmittel SO_2-Konzentrationen von max. 10 µg/m^3 (im Regelfall <5 µg/m^3) gemessen (z. B. **Bild 3.1**). Der Einfluss des SO_2-Gehaltes auf die atmosphärische Korrosion der Baumetalle kann dann praktisch unberücksichtigt bleiben.

3.1.3 Salze und Stäube

Vor allem die **Chloridsalze** sind sehr korrosionswirksam. Salzhaltige Aerosole entstehen durch den Einsatz von Tausalz oder in Meeresnähe. Die Meeresatmosphäre in den Küstengebieten enthält vor allem Natriumchlorid. Meerwasser wird als „Aerosol“ (feste und flüssige Teilchen von 0,1 bis 100 µm Durchmesser) durch den Wind auf das Land getragen und lagert sich auf Konstruktionen ab.

Der Einfluss des Meeres auf die Korrosion metallischer Strukturen beschränkt sich lediglich auf einen schmalen Küstensaum. Bereits nach wenigen Kilometern landeinwärts sind die Gehalte gegenüber üblichen Werten in der Luft nur noch leicht erhöht (**Bild 3.2**). Hohe Gehalte an Aerosolen auf Bauteilen sind im bewitterten Außenbereich allerdings nur bei Zutritt von Meeresspritzwasser zu finden [1, 2]. Außerhalb des Spritzwasserbereiches werden sich ablagernde Salze immer wieder durch Regen abgewaschen (Abschn. 3.2.3 und Abschn. 10.2).

Chloride sind weiterhin in Salznebeln nahe von tausalzbehandelten Straßen und Brücken vorhanden. Gestreut werden vor allem Natriumchlorid (NaCl), auch mit Zusätzen von Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) und Calciumchlorid ($CaCl_2$). Die max. Ausdehnung des Spritzwasserbereiches, beispielsweise neben tausalzbehandelten verkehrsreichen Straßen, beträgt im innerstädtischen Bereich etwa 10 m. Die Reichweite des geringer belasteten Sprühnebelbereiches neben einer gestreuten Straße beträgt etwa 10 bis 30 m [2]. Neben gestreuten Autobahnen mit vermehrter Tausalzbelastung und sehr viel höherer Geschwindigkeit der Kraftfahrzeuge können die Salze vom Wind auch weiter getragen werden.

Staubteilchen mit einer Größe der Dispersionen bis etwa 300 µm, entstehen aus Abgasen der Energieerzeugung, aus industriellen Produktionen oder resultieren aus Erdstoffen [1, 2]. Sie gelangen durch Wind auf metallische Strukturen und können Schadstoffe und Wasser speichern und deshalb als Ablagerung die Korrosion begünstigen. Be-

dingt durch technische Verbesserungen ist der Gehalt von Stäuben in der städtischen und industriellen Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen. Während deshalb vor Jahrzehnten Staubemissionen noch einen wesentlichen Einfluss auf die atmosphärische Korrosion ausübten, sind diese heute nur noch von untergeordneter Bedeutung für die Korrosion. Der Gehalt an Staubniederschlag in der Innenstadt von Stuttgart in den letzten Jahrzehnten geht aus **Bild 3.1** hervor.

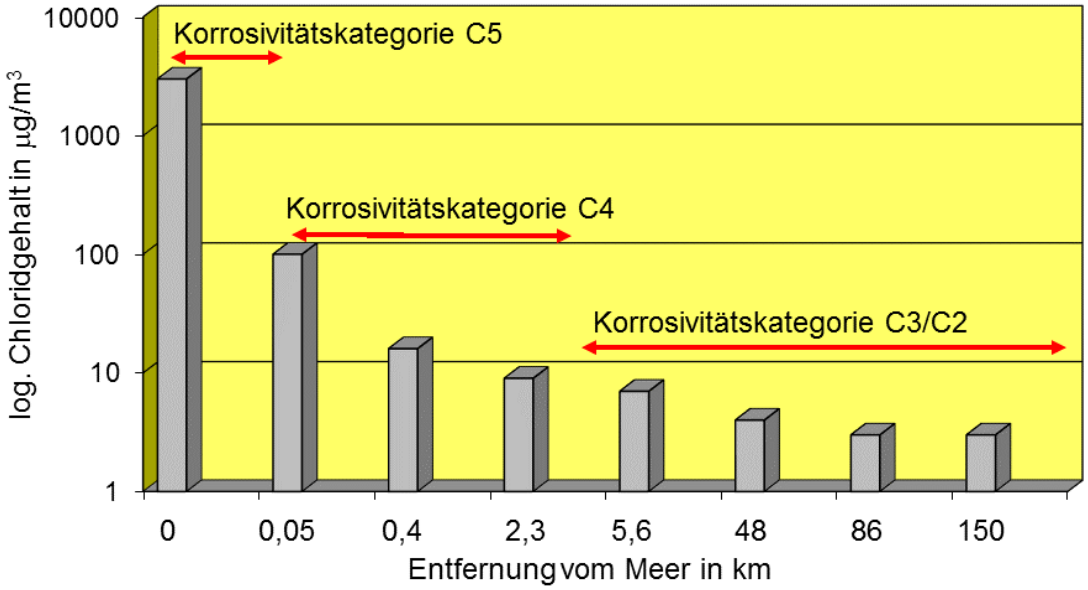


Bild 3.2:
Chloridgehalte in der Meeresatmosphäre, mit Angabe der Korrosivitätskategorie (Abschn. 3.4) (nach Barton in [1])

3.2 Nicht bewitterter Außenbereich

Im nicht bewitterten (beregneten) Außenbereich, beispielsweise

- unterhalb überkragender Dächer,
- in nach außen offenen Hallen,
- im Luftraum hinterlüfteter Fassaden [3],
- unterhalb von Solarmodulen von Freilandphotovoltaikanlagen,

kommen Verbindungselemente im Regelfall nicht oder nur selten mit wässrigen Medien in Berührung. Korrosionsbelastungen ergeben sich am ehesten

- aus dem Einfluss der Luftfeuchte (analog dem Makroklima in der Bauwerksumgebung) und einer vorübergehende Kondenswasserbildung als Folge einer lokalen Taupunktunterschreitung
- und/oder aus Schadstoffen (z. B. abgelagerten hygroskopisch reagierenden Chloridsalzen) aus der Umgebung, da diese nicht durch Regen abgewaschen werden.

3.2.1 Tauwasserbildung

Die Bildung von Wasser (Tauwasser) im nicht beregneten Außenbereich ist die Folge einer Taupunktunterschreitung. Kühlt Luft klimabedingt soweit ab, dass die relative Luftfeuchte die max. mögliche Sättigungskonzentration überschreitet, wird Flüssigwasser ausgeschieden. Dieses ist der Fall, wenn wasserdampfhaltige (feuchte) Luft abgekühlt

wird bzw. mit kälteren Bauteilen in Kontakt steht. Temperaturdifferenzen zwischen Luft und Bauteil ergeben sich aus der Wirkung von Wärmebrücken. Dies sind Stellen in der Konstruktion, die einen geringeren Wärmedämmwert aufweisen als ihre Umgebung. Hierzu gehören beispielsweise Metallteile wie die Unterkonstruktionen einer hinterlüfteten Fassade, welche Bauteile in einem zeitweise kälteren Außenbereich mit einer wärmeren Umgebung im Innenbereich der Wand verbinden. Die Wirkung solcher Wärmebrücken im Hinblick auf eine Taupunktunterschreitung ist besonders im Metallbau, dagegen weniger bei Verbindungsmitteln im Holzbau zu beachten.

Zur Ausscheidung von Flüssigwasser aus der wasserdampfhaltigen Luft ist eine umso geringere Temperaturdifferenz zwischen Bauteil und Umgebungsluft erforderlich, je höher die relative Luftfeuchte ist. In **Bild 3.3** ist erkennbar, dass beispielsweise in einer Umgebung von 20 °C und 80 % relativer Luftfeuchte die Taupunkttemperatur (diejenige Temperatur von feuchter Luft, die bei unverändertem Druck unterschritten werden muss, damit sich Wasserdampf in Form von Tauwasser ausscheiden kann) 4 °C niedriger liegt (Strecke A-B), während bei 50 % relativer Luftfeuchte um etwa 11 °C abgekühlt werden muss, um Kondenswasser auszuscheiden (Strecke C-D). Kondenswasser trägt insbesondere dann zur Korrosion bei, wenn eine Abtrocknung aufstehender Feuchte und der Abtransport wasserdampfangereicherter Luft behindert sind (z. B. bei unzureichender Belüftung von konstruktiven Spalten oder im Bohrloch eines Dübels) und wenn das Tauwasser den Feuchtigkeitsgehalt angrenzender Baustoffe (Holz, Wärmedämmung) lokal erhöht [2].

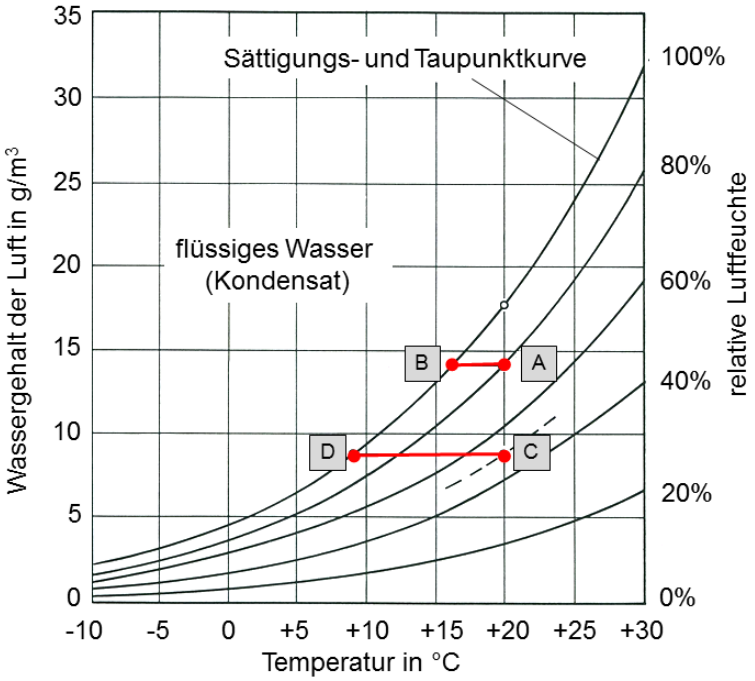


Bild 3.3:
Wassergehalt der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

Auch eine mögliche Taupunktunterschreitung innerhalb von porösen Baustoffen ist zu beachten, beispielsweise bei raumabschließenden Wänden. Bei Wänden aus porösen

Baustoffen wie Beton findet, abhängig von der Innenraumnutzung und dem Außenklima, stets eine mehr oder weniger starke Wasserdampfdiffusion von innen nach außen statt. Wenn wasserdampfhaltige (feuchte) Luft in der Wand abkühlt, so kann es bei ausreichend großen Temperaturunterschieden in der Wand im äußeren Bereich der Wand zu Taupunktunterschreitung und demnach zu einer Feuchtebelastung und Korrosion bei dort eingebauten Verbindungsmitteln (Dübeln) kommen. Bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden lässt sich durch eine ausreichend bemessene wasserdampfdurchlässige Wärmedämmung auf der Außenwand eine solche Taupunktunterschreitung in der Wand sicher ausschließen. Der Taupunkt wird quasi in die Wärmedämmung verlagert und der von innen ankommende Wasserdampf kann kontinuierlich nach außen in den Hinterlüftungsspalt entweichen und dort abgeführt werden.

3.2.2 Hygroskopisch reagierende Salze

In nicht beregneten Außenbereichen (z. B. hinter der Bekleidung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade) können sich Chloride bei entsprechendem Angebot auf metallischen Strukturen ablagern und aufkonzentrieren (Abschn. 3.2.3). Dies gilt vor allem für Fassaden in Meeresnähe (Abschn. 3.2.3). Im Belüftungsraum von Fassaden neben tausalzbehandelten Straßen wurden dagegen auch nach Jahrzehnten keine auffälligen Salzanreicherungen festgestellt [4].

Chloridsalze erfüllen auch in Abwesenheit von Flüssigwasser als hygroskopische Salze eine wichtige Voraussetzung für Korrosion, indem sie (auch bei geringen Luftfeuchten) die Elektrolytbildung fördern und zudem noch korrosionsstimulierend sind. Durch das hygroskopische Verhalten von Salzen können sich selbst in nicht unmittelbar bewitterten (beregneten) Bereichen hochkonzentrierte wässrige Salzlösungen bilden, die Oberflächen von metallischen Bauteilen stark angreifen. Unter „hygroskopisch“ wird das Verhalten eines Salzes, aus der Luft dampfförmiges Wasser zu binden und als Flüssigwasser auszuscheiden, verstanden.

Die Fähigkeit hygroskopischer Substanzen zur Bildung wässriger Lösungen wird durch die Sättigungsfeuchte bestimmt. Bei der für jedes Salz charakteristischen Sättigungsfeuchte (**Bild 3.4**), bilden diese gesättigte Salzlösungen (**Bild 3.5**). Das Salz nimmt oberhalb der Sättigungsfeuchte bei steigender relativer Feuchte Wasser auf. Mit dieser Wasseraufnahme findet eine zunehmende Verdünnung der Salzlösung statt. Nach Überschreiten der Sättigungsfeuchte kann es somit bei Metallen im Kontakt mit Aerosolen mit der Bildung eines salzreichen Elektrolyten und bei diesbezüglich empfindlichen Metallen zu Korrosion kommen [2].

Calcium- und Magnesiumchlorid, die anteilig im Meeressalz enthalten sind und auch dem Tausalz zugegeben werden, haben eine Sättigungsfeuchte von wenig mehr als 30 %. Das heißt, sie bilden bereits in sehr trockener Luft hochkonzentrierte und somit äußerst korrosionsaggressive Salzlösungen. Mit einer Sättigungsfeuchte von 78 % hat Natriumchlorid ein geringer ausgeprägtes hygroskopisches Verhalten. Dieses Salz bildet Lösungen erst in einem feuchteren Klima bzw. bei Zutritt von Wasser [2].

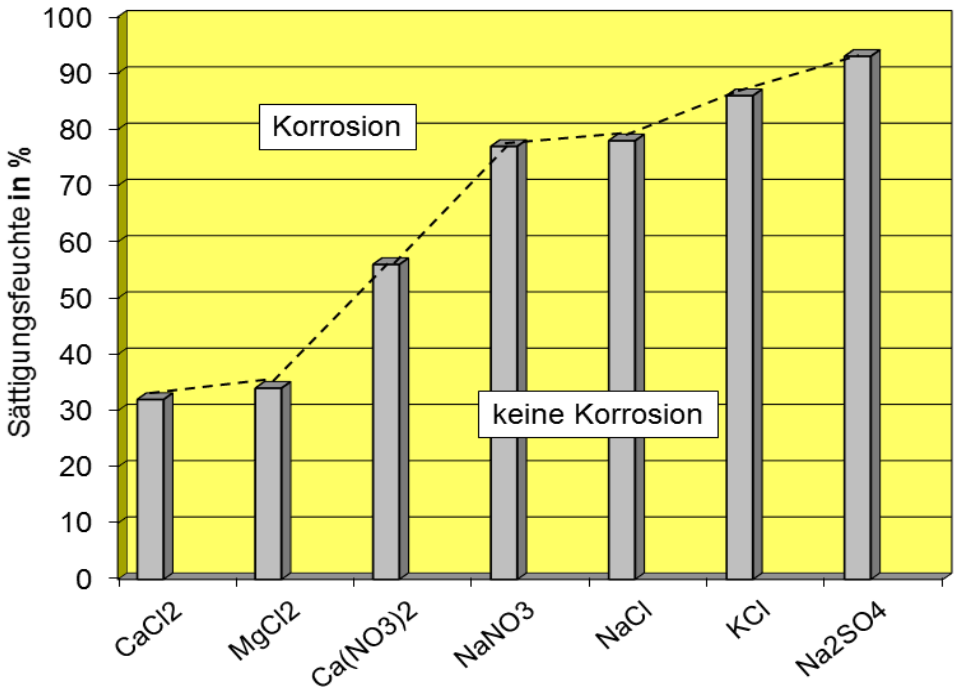


Bild 3.4:
Sättigungsfeuchte einiger Neutralsalze [2]

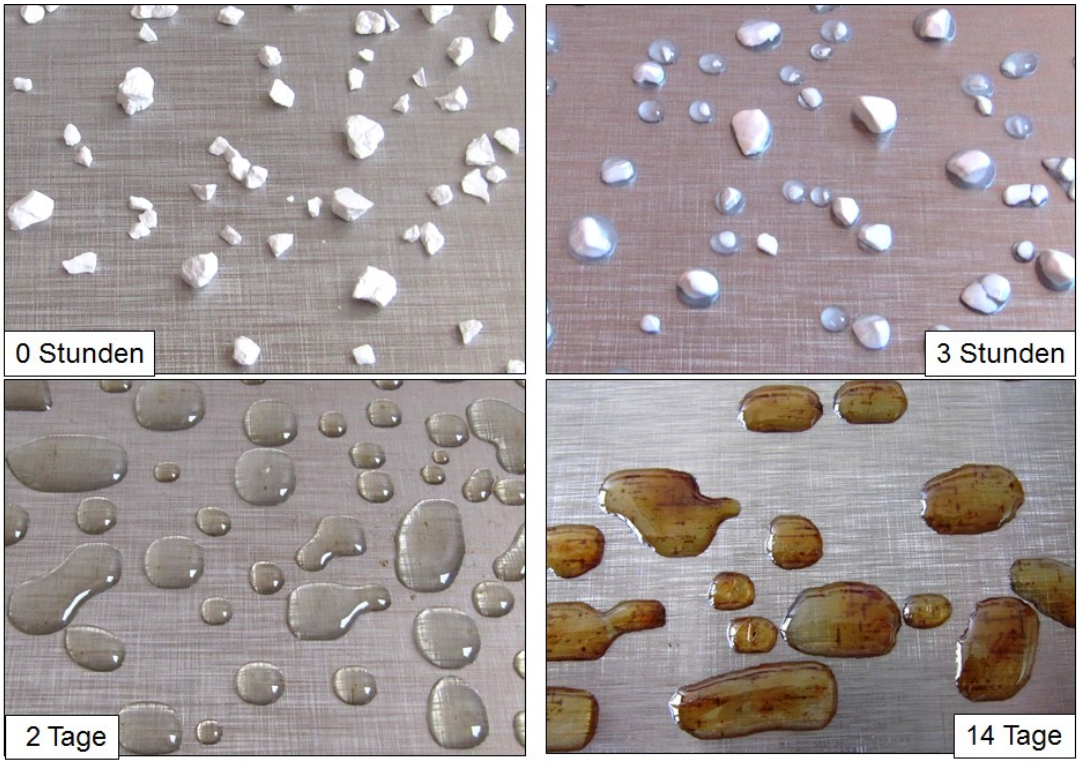
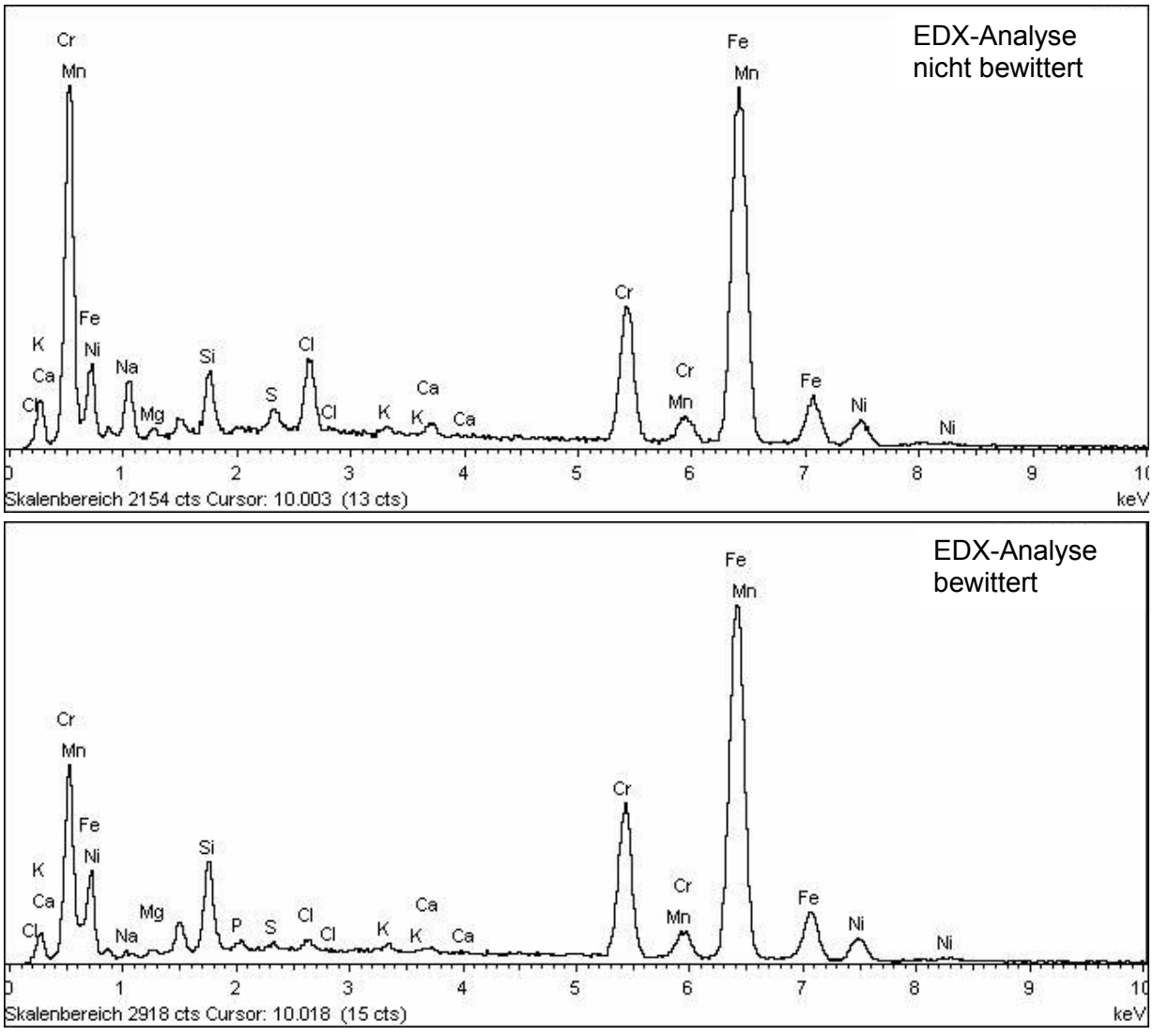


Bild 3.5:
Verflüssigung von Calciumchlorid auf Blech aus Stahl 1.4401 in trockener Luft (≈ 45 % relative Luftfeuchte) (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

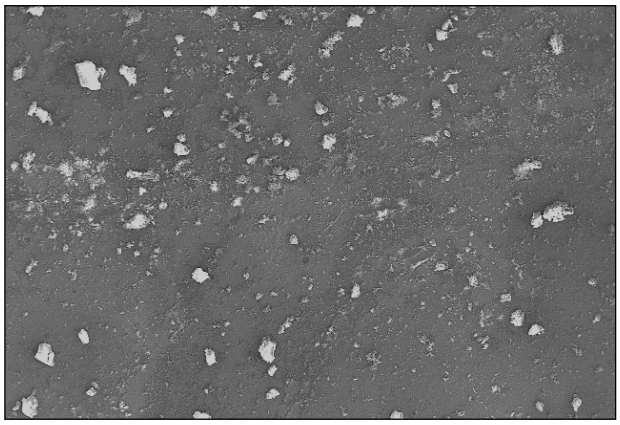
3.2.3 Aufkonzentration von Chloriden in Meeresatmosphäre

Durch „Wischproben“ und Messungen der Chloridgehalte mittels nasschemischer Analyse (unveröffentlichte Untersuchungen von M. Faller, EMPA Dübendorf, Schweiz) wur-

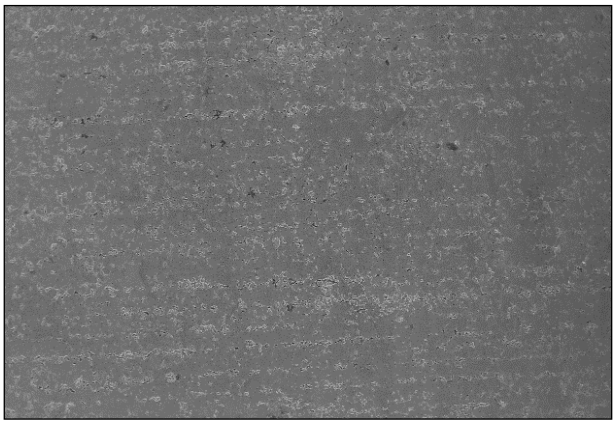
den auf nicht beregneten Flächen auf Helgoland etwa 10fach höhere Chloridgehalte festgestellt als im beregneten Bereich (Abschn. 10.2). Des Weiteren wurden folgende eigene Untersuchungen durchgeführt:
Auf der Insel Helgoland wurden auf ausgelagerten Verbindungsmitteln (Muttern von Dübelschrauben) in einer Entfernung von etwa 50 m vom Meer nach 3 Jahren die sich abgelagerten Chloride ermittelt. Die Muttern waren einerseits bewittert und andererseits vor Beregnung geschützt unter einem Vordach ausgelagert. Die **Bilder 3.6 und 3.7** zeigen das röntgenographisch ermittelte EDX-Spektrum der Oberflächen von Muttern aus dem nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II und **Tabelle 3.1** die zugehörigen quantitativen Werte. Die **Bilder 3.8 und 3.9** verdeutlichen bei starker Vergrößerung die Belegung mit Salzen. Nur bei den nicht beregneten Muttern wurde eine auffällige Salzbelegung festgestellt. Die Aufkonzentration von Natriumchlorid (NaCl) beregnet zu nicht beregnet beträgt etwa 1:10. Durch eine Bewitterung im Freien werden sich ablagernde Salze somit immer wieder abgewaschen und eine auffällige Aufkonzentration wie im nicht bewitterten Bereich findet nicht statt.



Bilder 3.6 und 3.7:
Röntgenanalysen von Oberflächen nichtrostender Stähle (Dübelmuttern) nach 3 Jahren atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung auf Helgoland (Entfernung zum Meer 50 m)



nicht bewittert



bewittert

Bilder 3.8 und 3.9:
Probenoberlächen nach 3 Jahren (Analysen siehe Bilder 3.6 und 3.7)

	Na	Mg	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Mn	Cr	Ni
	Gehalt in M.-%											
bewittert	0,9	0,7	5,8	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	65,5	1,2	17,2	6,6
nicht bewittert	7,8	0,9	3,6	0	1,1	4,1	0,4	0,8	59,6	1,2	14,3	6,3

Tabelle 3.1:
Quantitative Röntgenanalysen zu den Bildern 3.6 und 3.7

3.3 Kontakt der Verbindungsmittel mit Baustoffen

Ein Korrosionsangriff durch Baustoffe ist nur in Anwesenheit von Sauerstoff und Wasser möglich. Poröse Baustoffe (Holz, Wärmedämmstoff, Beton) sind ausreichend durchlässig für Sauerstoff, solange deren Hohlräume nicht komplett mit Wasser gefüllt sind, was zumeist der Fall ist. Für die korrosive Belastung metallischer Bauteile im Kontakt mit porösen Baustoffen ist deshalb in erster Linie von Bedeutung, ob diese in ihren inneren Poren und Hohlräumen das für die Korrosion erforderliche freie (ungebundene) Wasser enthalten und ob im Wasser korrosionsfördernde Inhaltsstoffe gelöst sind. Wenn kein Wasser auf der Oberfläche vorhanden ist und durch kapillares Saugen aufgenommen wird, stellt sich im Baustoff eine vergleichsweise niedrige Ausgleichsfeuchte ein. Diese sind dann „trocken“ und im Kontakt mit metallischen Verbindungsmitteln ist eine schädigende Korrosion auszuschließen [2]. Deshalb gelten folgende Bedingungen für Korrosion [1, 5]:

- Ein technisch bedeutsamer Korrosionsangriff kann nur stattfinden, wenn die im Baustoff enthaltenen Kapillarporen und kanalförmigen Hohlräume ausreichend ungebundenes (freies) Wasser enthalten.
- Darüber hinaus können deckschicht- bzw. passivitätszerstörende Bedingungen die Korrosion begünstigen. Beispielsweise bei verzinktem Stahl ist mit verstärkter Korrosion zu rechnen, wenn sich im Kontakt mit einem dauerfeuchten/nassen Baustoff keine carbo-

natischen Deckschichten ausbilden können. Bei nichtrostenden Stählen sind Chloridionen in der Lage, die korrosionsschützenden Passivschichten zu zerstören.

- Stets wirkt sich nachteilig aus, wenn in den Poren vorhandenes Wasser korrosionsfördernde Bestandteile aus dem Baustoff löst (z. B. Chloride aus Beton) bzw. diese durch Reaktion mit dem Baustoff bildet (z. B. Essigsäure bei Holz) oder den Antransport von Schadstoffen (beispielsweise Tausalze) aus der Bauteilumgebung erleichtert.

3.3.1 Holz

In Europa werden Nadelhölzer und Laubhölzer für tragende Konstruktionen verwendet. Fichten-, Tannen- und Eichenholz sind die in Deutschland am häufigsten eingesetzten Bauhölzer. Daneben können weitere Holzarten wie z. B. Kiefer, Lärche, Buche, Douglasie, Meranti, Bangkirai und Bongossi verwendet werden. Alle Hölzer bestehen hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin.

Holz wirkt im Kontakt mit Metallen unter bestimmten Voraussetzungen, insbesondere bei Anwesenheit erhöhter Wassergehalte, korrosiv. Hölzer enthalten auch korrosive Inhaltsstoffe. Die Korrosivität kann durch eine Behandlung des Holzes, z. B. durch das Einbringen von Holzschutzmitteln, noch zusätzlich erhöht werden [1].

Feuchte von Holzbauteilen im Gleichgewicht mit der Atmosphäre

Holz ist ein offenzelliger Baustoff (**Bild 3.10**) und kann bei entsprechendem Angebot Wasser aus der Luft über Wasserdampfdiffusion oder kapillar aus einer wässrigen Umgebung (Wasserlagerung, Schlagregen) aufnehmen, dieses chemisch/physikalisch binden und es gibt Feuchte bei abnehmender relativer Luftfeuchte über Wasserdampfdiffusion (Verdunstung) wieder ab. Bei steigender Luftfeuchte reichert sich Wasser zunächst durch Diffusion in den Zellwänden des Holzes an und es stellen sich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte Ausgleichsfeuchten gemäß **Bild 3.11** ein [5]. Bei den in der Bautechnik eingesetzten Nadelholzarten liegt Fasersättigung bei etwa 30 % Ausgleichsfeuchte, wobei das gesamte Mikrosystem der Zellwände mit Wasser gefüllt ist. Dieser Wasseranteil im Holz wird als gebundenes Wasser bezeichnet.

Oberhalb der Fasersättigung von etwa 30 M.-% nimmt Holz zusätzlich Wasser in den Zellhohlräumen auf. Das hier eingelagerte Wasser wird als freies Wasser bezeichnet. Kenngröße für die Wasseraufnahme ist der **Wasseraufnahmekoeffizient**. Er gibt an, wieviel Wasser ein Stoff innerhalb einer bestimmten Saugzeit aufnimmt. Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme hängt u. a. ab von der Holzart und der Faserrichtung. Technisch bedeutsam ist bei Holzbauteilen vor allem die Aufnahme quer zur Faser. **Tabelle 3.2** gibt den Wasseraufnahmekoeffizient von verschiedenen Holzarten wieder [6]. In der Baustofftechnik werden Wasseraufnahmekoeffizienten <0,5 $kg/m^2 \cdot h^{0,5}$ als wasserabweisend und solche <0,1 $kg/m^2 \cdot h^{0,5}$ als wasserundurchlässig bezeichnet. Demnach ist die Wasseraufnahme von Holz seitens der bewitterten Außenfläche sehr gering. Zum Vergleich: Beispielsweise bei Beton einer mittleren Güte beträgt der Wasseraufnahmekoeffizient etwa 1 bis 2 $kg/m^2 \cdot h^{0,5}$.

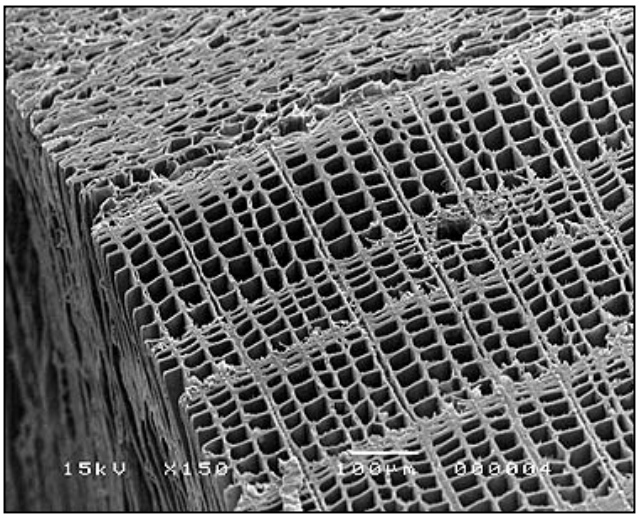


Bild 3.10:
Holz im Rasterelektronenmikroskop (Quelle: C. Sander)

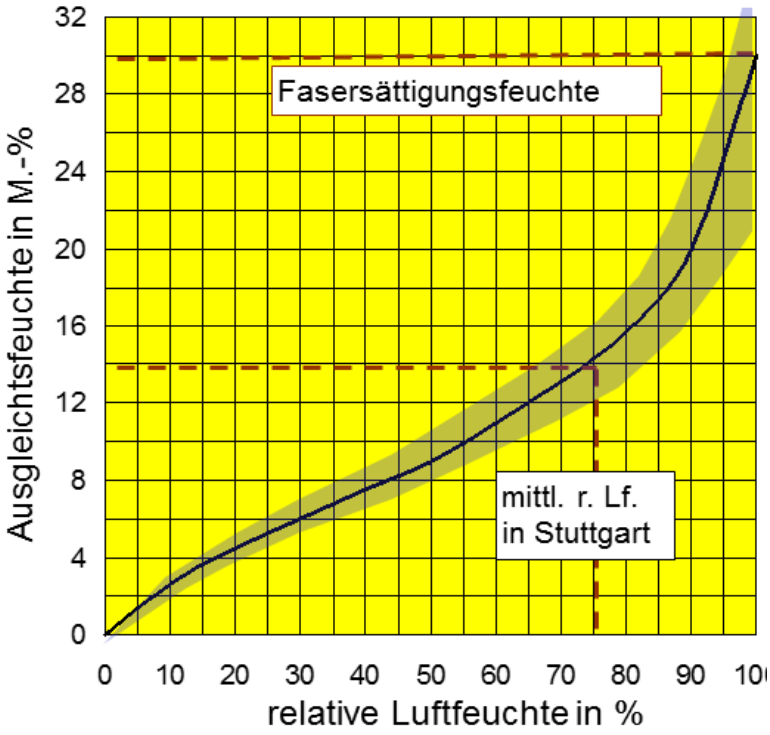


Bild 3.11:
Ausgleichsfeuchte von Bauholz (Fichte) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte [5]

Die genannte geringe Wasseraufnahme von Holz senkrecht zur Faser gilt auch für die Feuchteaufnahme durch Wasserdampfdiffusion. Deshalb ist es auch bei dem Bauholz bei Fichte im trockenen Zustand sehr schwierig, eine vollständige Wiederbefeuchtung zu erreichen. Unter realen Bedingungen schwankt die Feuchte meist nur in den Randzonen stärker. Die genannten Zusammenhänge gelten in erster Linie für Brettschichtholz, das im Regelfall ungerissen ist. Bei Vollholz, das nach erfolgtem Schwinden generell als gerissen einzustufen ist, führt die Rissbildung zu Streuungen der Wasseraufnahme.

Holzart	Wasseraufnahmekoeffizient ($kg/m^2 \cdot h^{0,5}$)	
	in Faserrichtung	quer zur Faser
Fichte	1,8	0,21
Kiefer	1,8	0,13
Buche	1,2	0,18
Eiche	0,8	0,17
Lärche	0,3	0,12

Tabelle 3.2:
Wasseraufnahmekoeffizient von verschiedenen Holzarten [6]

Der Feuchtegehalt im Holz, der letztlich die Korrosion von Verbindungsmitteln im Kontakt mit diesem bestimmt, ist klimabedingt. In unseren Breiten häufig vorkommende Feuchtegehalte (im Holz enthaltene Wassermasse bezogen auf die Trockenmasse des (darrgetrockneten) Holzes) für tragende Holzbauteile aus z. B. Fichtenholz, Kernholz und Splintholz sind [7]:

- Normklima: 20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte ≈10 bis 12 M.-%,
- beheizter Innenraum: ≤10 M.-%,
- unbeheizter Innenraum: 12 bis 15 M.-%,
- überdachter Außenbereich: ≈14 bis 16 M.-% (bei rel. Luftfeuchten von 75 bis 80 %),
- bewitterter Außenbereich (Holzprofile senkrecht eingebaut): ≈18 bis 20 M.-%,
- permanenter Feuchteanfall: >30 M.-%.

In Außenklimaten können unter anhaltenden extremen Witterungsbedingungen Abweichungen der Feuchtegehalte nach oben und unten vorkommen. Temporäre Feuchtigkeitserhöhungen (vorübergehend höhere Luftfeuchten oder kurzzeitig auftretende Benetzungen mit Wasser) in der unmittelbaren Umgebung einer hölzernen Konstruktion führen jedoch nicht zu einer wirksamen Feuchtebelastung des Holzes und zu einer wesentlichen Beeinflussung des Korrosionsverhaltens von Verbindungsmitteln im Kontakt mit Holz. Nur vorübergehende Befeuchtungen führen lediglich in den randnahen Schichten von 1 bis 2 mm Tiefe zu einer Wasseraufnahme.

Eigene Messungen an den hier untersuchten Hölzern (Querschnitt: 125 x 125 mm) im Konstantklima (84 und 100 % relative Luftfeuchte, jeweils 20 °C) und bei Bewitterung in Stadt- und Meeresatmosphäre ergaben nach 3jähriger Auslagerung die in **Tabelle 3.3** ausgewiesenen Feuchtegehalte (im Holz enthaltene Wassermasse bezogen auf die Trockenmasse des Holzes). Man erkennt folgende Zusammenhänge:

- Der Feuchtegehalt von im Konstantklima (20 °C, 84 % relative Luftfeuchte) ausgelagertem Fichtenholz (ohne und mit Imprägnierung) ist mit 20 bzw. 18 M.-% deutlich höher als der Feuchtegehalt von Hölzern im überdachten Außenbereich (≈14 bis 16 M.-%, siehe oben). Dies ist auf die unterschiedlichen Klimawerte (im überdachten Außenbereich beträgt die mittlere Jahrestemperatur in Deutschland ≈10 °C, beim Konstantklima 20 °C) und die dadurch bedingte höhere Aufnahmefähigkeit der Luft für gasförmiges Wasser (Wasserdampf) beim Konstantklima zurückzuführen.
- Die Feuchtegehalte der im Konstantklima bei 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchte

ausgelagerten Hölzer sind nach 3jähriger Auslagerung mit 52 bis 248 M.-% deutlich höher als beim vorgenannten Konstantklima (20 °C, 84 % relative Luftfeuchte). Die bei Fichte eingebrachte kupferhaltige Imprägnierung vermindert offensichtlich die Wasseraufnahme.

- Die Feuchtegehalte von bewitterten Hölzern in **Stadt- und Meeresatmosphäre** liegen im Bereich der für das Normklima (20 °C, 84 % relative Luftfeuchte) angegebenen typischen Gehalte. In Meeresatmosphäre (Helgoland) sind die Jahresmittelwerte für den absoluten Wassergehalt in Luft und die Niederschlagsmenge im Vergleich zur Stadtatmosphäre (Stuttgart) leicht erhöht. Dieser etwas höhere Wassergehalt der in Meeresatmosphäre (Helgoland) ausgelagerten Hölzer ist klimabedingt.

Dauer der Auslagerung	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche
	Feuchtegehalt in M.-%		
Auslagerung bei 20 °C, 84 % relative Luftfeuchte			
3 Jahre	20	18	19
Auslagerung bei 20 °C, 100 % relative Luftfeuchte			
3 Jahre	236 - 248	52 - 65	108 - 115
Auslagerung bei Bewitterung (Stuttgart)			
3 Jahre	-	17	18
Auslagerung bei Bewitterung (Helgoland)			
3 Jahre	-	19	21

Tabelle 3.3:
Feuchtegehalte (Mittelwerte von 3 Messungen) von Hölzern nach Auslagerung in unterschiedlichen Klimaten

Korrosionsbeanspruchung durch Holzinhaltsstoffe

Holz kann bei Durchfeuchtung und unterstützt durch erhöhte Temperaturen mehr oder weniger sauer reagieren: Holz enthält Anteile an Essigsäure, die zunächst als Ester an Zellulose gebunden sind. Bei Anwesenheit von ungebundenem Wasser können die Ester hydrolysieren und Säure freisetzen. Dadurch ist die Feuchte (das freie Wasser) im Holz immer schwach essigsauer. Die Essigsäurebildung erfolgt holzspezifisch. Wässrige Auszüge von Hölzern weisen je nach Holzart folgende pH-Werte auf [8]:

- Eiche 3,3…..3,9,
- Douglasie 3,4…..4,4,
- Lärche 4,3…..4,7,
- Fichte 4,8…..5,3.

Somit gilt:

- Insbesondere Eiche kann in feuchter Umgebung ein ausgeprägt saures Milieu aufweisen; Bauholz wie Fichte reagiert dagegen weniger stark sauer. In Verbindung mit Feuchte wirkt Eiche somit auf Metalle stärker korrodierend als Fichtenholz.

- Nur in ausreichend feuchten Hölzern ist eine Ansäuerung möglich. In eher trocknen Hölzern, die insbesondere für den nicht bewitterten Außenbereich typisch sind, spielen diese Zusammenhänge daher keine wesentliche Rolle [7]. Wie in [9] durch Spezialuntersuchungen an Hölzern mittels aufgesetzter Oberflächenelektroden festgestellt wurde, können jedoch bereits kurzzeitige Befeuchtungen der Holzoberfläche mit Wasser Inhaltsstoffe aus dem Holz lösen, wodurch sich dort ein wässriges Medium mit holzspezifischem pH-Wert einstellt.
- Die genannten Vorgänge der Ansäuerung fördern die Korrosion der Metalle im Kontakt mit feuchtem/nassem Holz. Selbst schwache organische Säuren wie Essigsäure wirken bei Zink korrosionsverstärkend.

Holzschutz

Bei den angewendeten wasserlöslichen Mitteln (Hauptbestandteile bzw. Wirkstoffe) zum vorbeugenden Schutz von Holzbauteilen gegen holzzerstörende Pilze und Insekten unterscheidet man nach [10]

- Bor-Salze (anorganische Borverbindungen),
- anorganische Chrom-Kupferverbindungen,
- anorganische Chrom-, Kupfer- und Borverbindungen,
- quartäre Ammoniumverbindungen,
- quartäre Ammonium-Borverbindungen,

chromfreie Kupferpräparate.

Fast alle wasserlöslichen und wasseremulgierbaren Holzschutzmittel eignen sich zur Kesseldruckimprägnierung.

Die genannten Holzschutzmittel sind oder enthalten Wirkstoffe, die aufgrund ihrer biociden Eigenschaften Holz und Holzwerkstoffe vor einem Befall durch holzzerstörende oder holzverfärbende Organismen schützen. Chloridhaltige und kupferhaltige Holzschutzmittel wirken bei metallischen Überzügen auf Zinkbasis in Gegenwart von Feuchte korrosiv [10, 11]. Bei den üblicherweise verwendeten wasserlöslichen Holzschutzmitteln stellt sich bei Ausschluss von Dauerfeuchte gegenüber den Hölzern ohne Holzschutzmittel zumeist keine wesentlich geänderte Feuchte im Holz ein (siehe auch **Tabelle 3.3**) [7].

Eindringen von Chloriden aus der Umgebung in Holz

Bezüglich des Eindringens von Chloriden in Holzkonstruktionen sind aus korrosionstechnischer Sicht zwei Fragestellungen von Interesse:

- Können in einer Meeresatmosphäre Chloride in die Struktur des Holzes gelangen?
- Können in einer Meeresatmosphäre Chloride entlang der Oberfläche von Verbindungsmitteln wie Holzschrauben in den Baukörper eindringen?

Eindringen von Chloriden in die Struktur des Holzes. Chloride aus der Bauteilumgebung können nur in gelöster Form über die Flüssigphase in poröse Baustoffe eindringen und dort transportiert werden. Sie können

- aus einer angrenzenden wässrigen Phase in ein nasses Holz diffundieren

- oder gelöst in Wasser über kapillares Saugen in das Holzinnere gelangen.

Somit gilt:

- Wenn eine Holzkonstruktion im **nicht bewitterten Außenbereich** beispielsweise mit salzhaltiger Meeresluft beaufschlagt wird, so können diese auf der Holzoberfläche ablagernden Feststoffe nicht in das Holzinnere gelangen.
- Selbst im **bewitterten Außenbereich** ist das Eindringen von Chloriden in die Holzstruktur kaum möglich, weil einerseits die Zellen des Holzes kein freies Wasser enthalten (siehe oben) und zum anderen auftreffender Regen sich ablagernde Salze auch abwaschen kann.

Eigene Messungen der Chloridgehalte in bewittertem Fichtenholz, welches bis zu 10 Jahren in Meeresluft auf Helgoland gelagert wurde (die Lagerung erfolgte beim Versuchsstand C1 (Abschn. 10.2), konnten selbst in einer Tiefe von nur 1 mm keinerlei Chloride im Holz nachweisen.

Eindringen von Chloriden entlang der Oberfläche von Verbindungsmitteln. Auf Holzschrauben, die im Rahmen der hiesigen Auslagerungen in Holzbauteile eingeschraubt für 3 Jahre in Meeresatmosphäre mit Bewitterung ausgelagert wurden, waren auch in tieferen Lagen (bis zu 5 cm von der Oberfläche entfernt) erhebliche Chloridmengen nachzuweisen. Auffallend ist, dass insbesondere bei in Fichtenholz eingeschraubten Schrauben ein massives Eindringen von Chloriden entlang der Schraube stattfindet. Entlang von in Eichenholz eingedrehten Holzschrauben dringen nur geringe Gehalte und auch nur in eine sehr begrenzte Tiefe vor.

Tabelle 3.4 zeigt Ergebnisse von Röntgenanalysen für die in **Bild 3.12** ausgewiesenen Stellen. Für die Analyse wurde eine in imprägniertes **Fichtenholz** eingebaute Holzschraube mit einem derartigen Korrosionsschutz ausgewählt (ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1, siehe Abschn. 8.4.1), bei der nach Auslagerung in Meeresatmosphäre noch keine merkliche Stahlkorrosion aufgetreten war. **Tabelle 3.4** zeigt folgenden Sachverhalt:

- Hinsichtlich der Oberflächenanalysen entlang der Schraube im Kontakt mit Holz wurde bei allen in Fichte eingedrehten korrosionsschutzgeschützten Holzschrauben bezüglich des Chloridgehaltes eine vergleichbare Tendenz festgestellt: Eine erhebliche Chloridanreicherung entlang des Schaftes bis in den 1.Gewindegrund und in der Folge eine rasche Abnahme auf sehr geringe Werte.
- Der festgestellte Zinkanteil ist immer höher als im ZnAl-Lamellenüberzug vorhanden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der ZnAl-Lamellenüberzug Nullstellen aufweist und bei der Analyse auch die Unterzinkung (Haftvermittler) erfasst wird.
- Die festgestellten Gehalte an Silicium und Magnesium stammen überwiegend aus dem ZnAl-Lamellenüberzug. Auch Aerosole des Meeres enthalten Magnesium.
- Die festgestellten Gehalte an Chlor (Chlorid), Kalium, Calcium und Schwefel sind im Meerwasser und somit auch in den Aerosolen enthalten.
- Erhöhte Gehalte an Eisen deuten auf einen lokalen Abtrag des Überzuges hin.

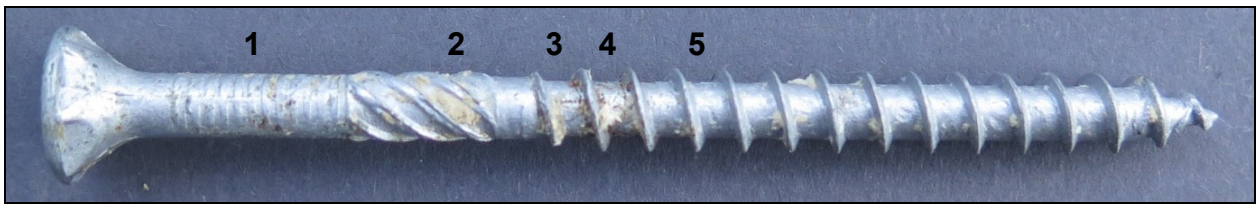


Bild 3.12:
Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert), rauspräpariert aus imprägnierter Fichte nach 3 Jahren in Meeresatmosphäre, ergänzt durch ausgewiesene Stellen für Röntgenanalysen

Stelle		Analyse (M.-%), ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Analyse betrifft Holzschraube/Korrosionsschutz/Meeresatmosphäre)								
		Zn	Al	Fe	Mg	Si	S	Ca	K	**Cl**
1	Mitte Schaft	40	35	4	5	6	3,5	1	0,5	**5**
2	Ende Schaftfräse	28	45	7	5	6	1	0	0	**7**
3	1. Gewindegrund	35	35	9	4	5	1,5	0	0,5	**10**
4	2. Gewindegrund	36	30	16	4	4,5	0,5	0	1	**8**
5	4. Gewindegrund	27	54	2	6	10	0,5	0	0	**0,5**

Tabelle 3.4:
Ergebnisse von Röntgenanalysen entlang einer in imprägnierter Fichte eingebauten Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 nach 3 Jahren in Meeresmosphäre (Überzug ohne visuell erkennbare Stahlkorrosion)

Es wurde weiterhin eine in **Eichenholz** eingedrehte Holzschraube mit einem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (siehe Abschn. 8.4.1) ausgewählt. Bei dieser Schraube ist bereits Stahlkorrosion entlang der gesamten Schraubenlänge vorhanden. **Tabelle 3.5** zeigt Röntgenanalysen für die in **Bild 3.13** ausgewiesenen Stellen einer Holzschraube und verdeutlicht folgenden Sachverhalt:

- Auf allen in Eiche eingedrehten korrosionsschutzgeschützten Holzschrauben wurde entlang der Schraube ein im Vergleich zu imprägnierter Fichte erheblich geringerer Chloridgehalt bis zum ersten Gewindegrund festgestellt.
- Der hohe Eisenanteil ist die Folge der gegenüber Fichte (siehe oben) verstärkten Stahlkorrosion bei Kontakt mit Eichenholz.
- Für die Herkunft der festgestellten Gehalte an Silicium, Chlor (Chlorid), Kalium, Calcium und Schwefel gelten die Ausführungen zu **Tabelle 3.4**.

Das unterschiedliche Eindringen von Chloriden entlang der Holzschraube im Fichten- bzw. Eichenholz ist wie folgt zu erklären: Auf die Oberfläche einer Holzschraube wirken beim Eindrehen und danach Reibungen, Abscherkräfte und Pressungen. Diese sind bei einem Weichholz mit geringer Darrdichte wie Fichte geringer als bei einem Hartholz wie Eiche mit einer hohen Darrdichte. Das geringere Eindringen von Chloriden entlang der Schraubenoberfläche im Eichenholz ist somit die Folge erhöhter Pressungen des Holzes auf der Schraubenoberfläche.

Bild 3.13:
Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert), rauspräpariert aus dem Eichenholz nach 3 Jahren in Meeresatmosphäre, ergänzt durch ausgewiesene Stellen für Röntgenanalysen

Stelle		Analyse (M.-%), ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Analyse betrifft Holzschraube/Korrosionsschutz/Meeresatmosphäre)									
		Zn	Al	Fe	Mn	Mg	Si	S	Ca	K	**Cl**
1	Anfang Schaft	5	36	43	0	4	6,5	2	0,5	1	**2**
2	Mitte Schaft	11	33	48	1	2,5	2,5	0,5	0	0,5	**1**
3	Ende Schaft	6,5	4	85	1	0,5	1	0,5	0	1	**0,5**
4	Mitte Schaftfräse	12	15	65	1,5	2	2	0	0,5	1,5	**0,5**
5	1. Gewindegrund	16	9,5	70	1	1	1	0,5	0	1	**0**

Tabelle 3.5:
Ergebnisse von Röntgenanalysen entlang einer in Eiche eingebauten Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 nach 3 Jahren in Meeresatmosphäre

3.3.2 Wärmedämmstoffe

Faserdämmstoffe (Mineralwolle, Steinwolle) und Schaumkunststoffe sind für die Bautechnik geeignete Wärmedämmstoffe. Offenzellige Faserdämmstoffe besitzen die Fähigkeit, Wasser kapillar aufzusaugen und zu speichern. Letzteres tritt dann ein, wenn die Baustoffoberfläche unzureichend belüftet ist [2]. Da die Wirkung der Wärmedämmung dadurch allerdings verloren geht, ist dieser Zustand unbedingt zu vermeiden.

Im Kontakt mit Verbindungsmitteln kann durch eine nasse Dämmung somit Korrosion gefördert werden. Vorwiegend bei Kontakt von verzinkten Verbindungsmitteln mit durchfeuchteter bzw. durchnässter Wärmedämmung können sich wegen Behinderung der Bildung schützender Deckschichten kritische Korrosionsverhältnisse einstellen. Diese sind dann vergleichbar den Verhältnissen bei Kontakt mit nassem Holz. Wärmedämmstoffe weisen in der Regel keine korrosionsfördernden Stoffe auf. Daher sind sie korrosionschemisch unbedenklich [2].

3.3.3 Beton

Verbindungsmittel, in erster Linie Dübel (Spreizdübel) stehen im erhärteten Beton neben der umgebenden Atmosphäre (Kopfbereich) und Bohrlochatmosphäre auch mit der Bohrlochwandung in losem Kontakt. Die sich hieraus ergebenden Korrosionsbeanspruchungen sind sehr einbauspezifisch und werden in Abschn. 7.3 behandelt.

3.4 Regelwerke die Korrosionsbeanspruchung betreffend

Die in den Abschn. 3.1 bis 3.3 aufgeführten Korrosionsbeanspruchungen in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Baustoffen werden in Regelwerken klassifiziert.

Korrosivitäts-kategorie		Klima/ Feuchte	Chloridbelastung		SO_2-Belastung	
			typische Umgebung	Gehalt µg/m³	typische Umgebung	Gehalt µg/m³
C1	unbe-deutend	trockene und kalte Klima-zone, atmosphärische Umgebung mit kurzer Befeuchtungsdauer	atmosphärische Umgebung mit sehr geringer Verunreini-gung, z. B. bestimmte Wüstengebiete , Zentrum der Arktis / Antarktis			
C2	gering	gemäßigte Klimazone	atmosphärische Umgebung mit geringer Verunreinigung			
			>10 km vom Meer	<5	gering belastete ländliche Gebiete und Städte	<5
C3	mäßig	gemäßigte Klimazone	atmosphärische Umgebung mit mäßigen Luftverunrei-nigung oder mit geringer Beeinflussung durch Chloride			
			10-3 km vom Meer	5-10	mäßig stark be-lastete Gebiete (Städte und Industrien)	5-30
			Sprühnebel neben Straße			
		subtropische / tropische Klimazone	atmosphärische Umgebung mit geringer Verunreinigung, vergleichbar C2			
C4	stark	gemäßigte Klimazone	atmosphärische Umgebung mit hoher Verunreinigung oder mit wesentlicher Beeinflussung durch Chloride			
			dicht am Meer, kein Sprühnebel	10-100	stark belastete städtische und industrielle Bereiche	30-90
			Spritzwasser neben Straße			
		subtropische / tropische Klimazone	atmosphärische Umgebung mit mäßiger Verunreinigung, vergleichbar C3			
C5	sehr stark	gemäßigte / subtropische Klimazone	atmosphärische Umgebung mit sehr hoher Luftverunrei-nigung und/oder signifikanter Beeinflussung durch Chloride			
			dicht am Meer, gelegentlich Sprühnebel	>100	Umgebungen mit sehr hohen industriellen Ver-unreinigungen	90-250
CX	extrem	subtropische / tropische Klimazone (sehr lange Befeuchtungsdauer)	atmosphärische Umgebung mit sehr hoher Luftverunrei-nigung und/oder stark beeinflusst durch Chloride			
			Küsten- und Offshorebereiche mit Spritzwasser und Sprühnebel	>1000	Umgebung mit extremen indus-triellen Verunrei-nigungen	>250

gemäßigtes Klima: z. B. Mittel-, West- und Nordeuropa
subtropisches Klima: z. B. Mittelmeerraum
tropisches Klima: z. B. Bereiche beidseitig des Äquators

Tabelle 3.6:
Korrosivitätskategorien für Außenatmosphären in Anlehnung an DIN EN ISO 9223 [12] und DIN EN ISO 12944-2 [13] und korrosive Belastung typischer Regionen (Zahlenangaben für Chloride: Anhaltswerte der Literatur für die Atmosphäre in µg/m³ [1, 2])

3.4.1 Verbindungsmittel in der Atmosphäre (DIN EN ISO 9223, DIN EN ISO 12944)

Die DIN EN ISO 9223 [12] und die daraus abgeleitete DIN EN ISO 12944 (Teil 2) [13] behandeln die Einteilung wichtiger Umgebungsbedingungen, denen Stahlbauten und Verbindungsmittel aus unlegiertem und niedriglegiertem Stahl (ungeschützt, beschichtet oder verzinkt) in der Atmosphäre ausgesetzt sein können und unterteilen die atmosphärische Korrosionsbeanspruchung in Korrosivitätskategorien (**Tabelle 3.6**). Diese Bewertung der Korrosivität ermöglicht eine Abschätzung der in einem speziellen Fall vorliegenden atmosphärischen Belastung und des zu erwartenden Korrosionsverhaltens metallischer Strukturen. Die jeweilige Korrosivitätskategorie ist die Grundlage für die Bemessung des erforderlichen Korrosionsschutzes nichtmetallischen und der hier behandelten metallischen Überzügen (Abschn. 4).

Um die Einstufung einer Korrosivitätskategorie und die Festlegung des erforderlichen Korrosionsschutzes zu erleichtern, wurden in [2, 5] die Angaben der Normen zur korrosiven Belastung durch Feuchte, Schwefeldioxid und Chloridsalze durch Zahlenwerte typischer Regionen bzw. Korrosionsbelastungen und Benennung typischer Umgebungen ergänzt. Im Hinblick auf eine Beurteilung der Umgebungsbedingungen bei Anwendung nichtrostender Stähle gelten andere Kriterien (Abschn. 6). Bei der Bewertung der Korrosivität gehen als Kriterien ein: das Klima und die Feuchte, die Beanspruchung durch Chloride (aus Meeresatmosphäre und Tausalzbeanspruchung) und Schwefeldioxid (aus belasteten Städten und Industrien). Mit zunehmender Kategorie C1 bis CX nimmt die Korrosionsbelastung durch diese Einflüsse allein oder in Kombination zu.

Tabelle 3.6 gilt in erster Linie für eine freie Bewitterung. Einflüsse aus einer Nichtberegnung der Oberflächen und mögliche Aufkonzentrierungen von Schadstoffen werden nicht berücksichtigt. Dieser Einfluss kann jedoch am Beispiel der Insel Helgoland den Ergebnissen in **Tabelle 10.3** entnommen werden. Nach diesen Ergebnissen entspricht die Chloridbeanspruchung auch in Meeresnähe (außerhalb der Spritzwasserzone) eher einer Korrosivitätskategorie C3, wenn die Oberfläche der Bauteile wiederholt beregnet wird und sich ablagernde Chloridsalze immer wieder vom Regen abgewaschen werden. Die in **Bild 3.2** genannten Zuordnungen von Korrosivitätskategorien zu Entfernungen vom Meer können daher aus hiesiger Sicht nur als Anhaltspunkte für den Fall angesehen werden, dass die Oberfläche von der Meeresatmosphäre ausgesetzten Bauteilen bewittert (beregnet) werden.

3.4.2 Verbindungsmittel im Kontakt mit Holz (DIN EN 1995, DIN EN 14592)

Metallische Verbindungen und Anschlüsse an tragenden Holzbauteilen haben stets unmittelbaren Kontakt mit dem Holz und stehen häufig gleichzeitig, zumindest abschnittsweise, auch mit der umgebenden Atmosphäre in Berührung. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit sind somit Gesichtspunkte der atmosphärischen Korrosion und Korrosion im Kontakt mit Holz zu betrachten.

Den erforderlichen Korrosionsschutz von Verbindungsmitteln im Kontakt mit Holz regelt die DIN EN 1995 (Teil 1) [14] (eine Bemessungsnorm) und DIN EN 14592 [15] (eine Produktnorm). Die DIN EN 14592 unterscheidet in Abhängigkeit von der baulichen Situ-

ation und Feuchtebeanspruchung im Hinblick auf eine Korrosionsgefährdung von Verbindungsmitteln für Holzkonstruktionen Holzklassen (timber classes), die Bezug nehmen auf die Korrosivitätskategorien nach DIN EN ISO 9223 [12]. Die Holzklassen charakterisieren die Verhältnisse im Holz, die Korrosivitätskategorien jene im atmosphärischen Bereich (Abschn. 3.4.1) (**Tabellen 3.6 und 3.7**).

Situation	trockener (beheizter) Innenraum	unbewitterter Außenbereich	bewitterter Außenbereich			Nasslagerung
Beispiele für Umgebung	Wohn-räume	offene Lagerhalle, hinterlüftete Fassade	Verbindungsmittel beregnet / häufig Kondenswasser			nasser Boden
Atmosphäre: DIN EN ISO 9223 [12]	C1	C2	C2	C3	C4	entspricht ≈CX
Holz: DIN EN 1995-1 [14]	Nutzungskl. 1	Nutzungskl. 2	Nutzungsklasse 3			(nicht definiert)
Holz: DIN EN 14592 [15]	Holzklasse 1	Holzklasse 2	Holz-klasse 3	Holz-klasse 4		Holzklasse 5
Holzschutzmittel	Einfluss auf die Korrosion sehr gering		unbe-handelt	behandelt		
Holzart	Einfluss der Holzart auf die Korrosion ist gering		pH 4-6 (Fichte)	pH ≤4 (Eiche)		
Holzfeuchte nach DIN EN 14592 [15]	<10 M.%	10 bis 16 M.-%	16 bis 20 M.-%			>20 M.-%
Holzfeuchte nach [7]	≤10 M.-%	14 bis 16 M.-%	18 bis 20 M.-%			>30 M.-%

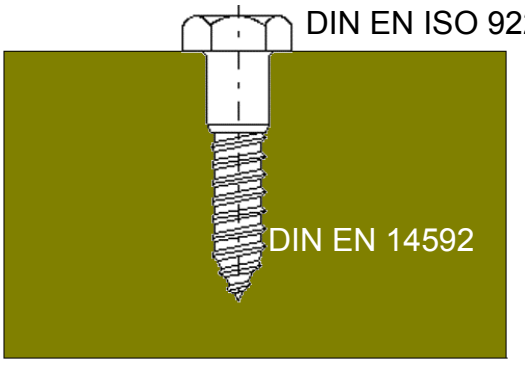


Tabelle 3.7:
Zuständigkeit der Regelwerke für den Korrosionsschutz im Holzbau am Beispiel einer Holzschraube und Holzfeuchten

Folgende Holzklassen werden nach DIN EN 14592 [15] unterschieden:
Die **Holzklasse 1** ist gekennzeichnet durch ein Klima mit etwa 20 °C und einer relativen Luftfeuchte, deren Höhe nur für wenige Wochen pro Jahr einen Wert von 65 % übersteigt, wie z. B. in allseitig geschlossenen und beheizten Bauwerken. Unter solchen Bedingungen stellt sich bei Hölzern im Mittel nur eine sehr geringe Feuchte unter 10 M.-% ein (Abschn. 3.3.1); das Holz ist praktisch „trocken“ und im Kontakt mit Baumetallen findet keine Korrosion statt (Abschn. 4.6.2).

Die **Holzklasse 2** ist gekennzeichnet durch ein Klima mit etwa 20 °C und einer relativen Luftfeuchte, deren Höhe nur für wenige Wochen pro Jahr einen Wert von 85 % über-

steigt, wie im nicht bewitterten (beregneten) Außenbereich (z. B. im Hinterlüftungsraum von Fassaden). Unter solchen Bedingungen stellt sich bei Hölzern erfahrungsgemäß im Mittel nur eine Feuchte von etwa ≤16 M.-% ein (Abschn. 3.3.1). Auch diese Feuchte im Holz reicht nicht aus, um im Kontakt mit Baumetallen nennenswerte Korrosion zu bewirken.

Die **Holzklasse 3** steht für Holzkonstruktionen im Außenbereich, die wegen wiederholter Bewitterung Wassergehalte von etwa 16 bis 20 M.-% aufweisen. Sie betrifft unbehandelte Bauhölzer wie Fichte, die im Zusammenhang mit Wasser mäßig starke Ansäuerungen im Bereich pH 4 bis 6 ermöglichen. Unbehandelt bedeutet, dass keine korrosionsfördernden Holzschutzmittel zur Anwendung kommen.

Die **Holzklasse 4** steht für Holzkonstruktionen im Außenbereich, die wegen wiederholter Bewitterung Wassergehalte von etwa 16 bis 20 M.-% aufweisen. Sie betrifft behandelte Bauhölzer und/oder Harthölzer wie Eiche, die im Zusammenhang mit Wasser starke Ansäuerungen im Bereich pH ≤4 ermöglichen. Behandelt bedeutet, dass korrosionsfördernde Holzschutzmittel zur Anwendung kommen.

Die **Holzklasse 5** steht für bewitterte Holzkonstruktionen, die wegen Nasslagerung dauerhaft höhere Holzfeuchten >20 M.-% (nach [15]), häufig sogar >30 M.-% aufweisen.

Literatur Abschnitt 3

[1] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

[2] U. Nürnberger: Schadstoffbelastung von Befestigungsmitteln und deren normenmäßige Erfassung in Deutschland. 3-Länder-Korrosionstagung „Befestigungsmittel im Hochbau“, Stuttgart 18./19.4.2007, Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR, Tagungsunterlagen, S. 15-39

[3] H. M. Künzel: Feuchteverhältnisse bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen. 3-Länder-Korrosionstagung „Befestigungsmittel im Hochbau“, Stuttgart 18./19.4.2007, Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR, Tagungsunterlagen, S. 40-48

[4] U. Nürnberger, C. Köse: Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Naturwerkstein. Bautechnik 87(2010), 373-382

[5] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten der Baumaterialien in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Holz. In: Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage, 8.-9. Oktober 2009, Universität Karlsruhe, Tagungsband S. 47-64

[6] Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V., München, 2006

[7] B. Radovic: Persönliche Auskunft

[8] J. Rückert: Korrosionsverhalten von Metallen in Verbindung mit Holz. Werkstoffe und Korrosion 37 (1986), 336-339

[9] S. Reinsch: Messung der pH-Werte von Nutzhölzern. Bachelorarbeit Universität Hamburg, 2009

[10] Korrosion metallischer Verbindungsmittel in Holz und Holzwerkstoffen. Informationsdienst Holz, 2013

[11] Holzschutz bei Ingenieurholzbauten. Informationsdienst Holz, 2015

[12] DIN EN ISO 9223 (2012) Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung

[13] DIN EN ISO 12944-2 (1998) Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Einteilung der Umgebungsbedingungen

[14] DIN EN 1995 (2013) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

[15] DIN EN 14592 (Stand Juli 2017) Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen; europäischer Vorschlag

4. Eigenschaften von metallischen Überzügen auf Zinkbasis

4.1 Überblick

Im modernen Bauwesen sind Befestigungselemente aus verzinktem Stahl die bei weitem größte verwendete Gruppe [1]. Metallische Überzüge auf Zinkbasis werden in der Bautechnik in erster Linie zur Herstellung eines dauerhaften Korrosionsschutzes von Stählen gegenüber natürlichen Medien (Atmosphäre, wässrige Lösungen mit begrenztem Salzgehalt) und Baustoffen aufgebracht. Verbindungsmittel werden wie folgt mit einem metallischen Überzug versehen:

- Sie werden durch Eintauchen in ein flüssiges Zinkbad schmelztauchverzinkt (**feuerverzinkt**).
- Sie können mit **elektrolytisch abgeschiedenen Reinzink oder Zinklegierungen** geschützt werden. Die wichtigsten Legierungsmetalle sind Eisen, Nickel und Kobalt, wobei insbesondere Zink-Nickel-Überzüge (in der Folge ZnNi-Überzüge genannt) in der Automobilindustrie und in zunehmendem Maße auch in der Bautechnik angewendet und hier behandelt werden.
- Sie werden mit **nichtelektrolytisch aufgebrachten Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen** (in der Folge ZnAl-Lamellenüberzüge genannt) geschützt.

Stählerne Kleinteile wie Verbindungsmittel für die Bautechnik (Schrauben, Dübel etc.) werden nach entsprechender Vorbereitung als Schüttgut in Trommeln mit einem Überzug versehen. Diese Teile werden als **Trommelware** bezeichnet. Größere Teile dagegen werden einzeln im Gestell mit einem Überzug versehen (Gestellware). In der hiesigen Arbeit stehen im Trommelverfahren geschützte Verbindungsmittel im Vordergrund des Interesses.

Die erwähnten Überzüge weisen Unterschiede in ihrer Herstellung, ihrem strukturellen Aufbau, ihrer Schichtdicke, Härte und Haftung auf dem Stahluntergrund auf. Dies hat Einfluss auf die korrosionsschützenden Eigenschaften und somit die Schutzdauer.

Metallische Überzüge auf Zinkbasis können bei Kontakt mit der Atmosphäre, mit wässrigen Elektrolyten und mit feuchten Baustoffen den Stahl in zweifacher Weise schützen:

- Die vorrangig genutzte Wirkung besteht in einem sog**. passiven Korrosionsschutz**, bei dem der Stahl, vergleichbar den Verhältnissen bei organischen Beschichtungen, aufgrund der Abschirmung der Oberfläche durch den Überzug vom angreifenden Medium getrennt und somit geschützt wird. Voraussetzung für diese sog. Barrierewirkung ist, dass der Überzug im angreifenden Medium selbst dauerhaft eine hohe Beständigkeit aufweist. Durch korrosive Einflüsse werden die Überzüge mit der Zeit abgetragen, was letztlich zu einer Abnahme der Überzugsdicke führt. Der Korrosionsschutz beruht auf folgendem Mechanismus:
  - **Reinzinkschichten** weisen eine erhöhte Beständigkeit auf, wenn sich im Kontakt mit der Umgebung auf der Zinkoberfläche schützende Deckschichten aus wasserunlöslichen Korrosionsprodukten (Zinkoxide, Zinksalze) bilden.
  - Bei den elektrolytisch abgeschiedenen Überzügen aus **Zinklegierungen** werden

der Zinkschicht in geringen Mengen solche Metalle zulegiert, die den Überzug elektrochemisch edler machen und dadurch die Korrosionsgeschwindigkeit gegenüber Reinzink verringern.

- Gleiches gilt im Prinzip auch für die **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Der besondere Korrosionsschutz dieser Werkstoffe stützt sich in erster Linie nicht (wie bei den Reinzinküberzügen) auf einer von der Umgebung abhängigen Deckschichtbildung, sondern auf einer Änderung der Schichtmorphologie bzw. der Zusammensetzung und Struktur sich bildender Oberflächenfilme.

Die Korrosionsprodukte sind bei legierten Überzügen insbesondere in Gegenwart von Dauerfeuchte deutlich weniger voluminös als bei Reinzinkschichten.

- Metallische Überzüge auf Zinkbasis können außerdem Merkmale eines **aktiven Korrosionsschutzes** aufweisen. Unter bestimmten Umgebungsbedingungen besteht die Möglichkeit, dass der Überzug bei Vorhandensein von Verletzungen oder nach lokalem Abtrag des Zinks den Stahl an den nicht mehr mit vom Überzug bedeckten Stellen als sog. Opferanode kathodisch schützt. In den überzugsfreien Bereichen wird dann der Stahl in geringerem Umfang als ungeschützt durch Korrosion abgetragen. Diese Fernschutzwirkung unterliegt allerdings bestimmten Voraussetzungen, die unter atmosphärischen Korrosionsverhältnissen meistens nicht vorhanden sind (Abschn. 4.5).

Vorwiegend die galvanisch erzeugten Zink- und Zinklegierungsüberzüge, gewöhnlich mit Dicken unter 20 µm, werden zur Verbesserung der Korrosionsschutzeigenschaften auch zusätzlich **passiviert**, wobei häufig oxidische Schutzschichten (Passivschichten) gezielt gebildet werden, die den Angriff auf den Überzug und das Basismaterial Stahl verzögern (siehe Abschn. 5.1). Von Chromatieren spricht man in der Regel, wenn Chrom(VI)-haltige Prozesslösungen zur Anwendung kommen. Im Gegensatz dazu kommen bei den sog. Passivierungen Chrom(VI)-freie Lösungen zum Einsatz.

Bei metallischen Überzügen besteht weiterhin die Möglichkeit diese mit einer zusätzlichen dünnen **organischen Deckbeschichtung** (Topcoat) zu kombinieren, um so optimierte Lösungen in Bezug auf Funktionseigenschaften, wie z. B. Reibverhalten (Aufbringung eines Gleitmittels), und Korrosion der Schicht zu erreichen (siehe Abschn. 5.2).

4.2 Feuerverzinkte Verbindungsmittel [2, 3]

Verfahren

Stählerne Bauteile werden bei der **Stückverzinkung** nach entsprechender Vorbereitung (Beizen, Fluxen) einzeln kurzfristig in schmelzflüssiges Zink (Badtemperatur ca. 450 °C) eingetaucht. Bei dieser Feuerverzinkung nach DIN EN ISO 1461 [4] findet eine metallurgische Reaktion von Zink und Stahl und die Bildung von Eisen-Zink-Legierungsschichten statt. Beim Herausnehmen der Bauteile aus dem Zinkbad überlagert eine Reinzinkauflage die Legierungsschicht. Die Gesamtdicke des metallischen Überzuges beträgt je nach Stahlzusammensetzung, Dicke des Bauteils, Verzinkungsbedingungen (z. B. erforderliche Tauchdauer) größenordnungsmäßig meistens etwa 80 bis 200 µm.

Stählerne Kleinteile wie Verbindungsmittel werden nach entsprechender Vorbereitung (Beizen, Fluxen) als Schüttgut in einen metallischen Lochkorb komplett in das schmelzflüssige Zink eingetaucht. Im Vergleich zur Stückverzinkung liegen bei dieser **Kleinteilverzinkung** (für Schrauben und Muttern gilt die DIN EN ISO 10684 [5]) folgende Unterschiede vor (**Bild 4.1**):

- Die Zinkbadtemperaturen liegen zwischen 520 und 560 °C (Hochtemperaturverzinkung).
- Die Teile werden gleich nach dem Verzinken durch Rotation des Metallkorbes zentrifugiert. Dadurch wird überflüssiges Reinzink abgeschleudert (es tropft ab).
- Im nächsten Schritt müssen die Teile häufig noch auf einem Rütteltisch gerüttelt werden, um „Verklebungen“ zwischen den Teilen zu lösen. Durch ein darauffolgendes Rütteln gemeinsam mit einem Schüttgut können Mikrorauheiten beseitigt werden (dadurch werden die Oberflächeneigenschaften verbessert).

Bild 4.1:
Zinkauflage beim Kleinteilverzinken (Feuerverzinken) (Bild links [6], Bild rechts Quelle: Vorlesung Nürnberger)

Überzugsdicke

Das Reinzink wird durch das Zentrifugieren abgeschleudert und dabei die Dicke der Zinkschicht auf Werte um 50 µm reduziert. Dies ist notwendig bei Teilen mit Gewinde um genaue Maßtoleranzen einzuhalten. Ohne das Zentrifugieren wären Gewinde oft nicht gängig.

Gefahr einer Wasserstoffversprödung

Beim Feuerverzinken wird beim zuvorigen Beizen der Stähle Wasserstoff aufgenommen, der während des Tauchvorgangs im schmelzflüssigen Zink überwiegend entweicht. Gewöhnliche (niedrigfeste) Baustähle verspröden allerdings nicht durch die Aufnahme von Wasserstoff beim Beizen, auch wenn Wasserstoff im Stahl verbleiben sollte.

Anwendungstechnische Eigenschaften der Überzüge

Durch Feuerverzinken hergestellte Überzüge haften bei nicht zu großen Schichtdicken, bewirkt durch „metallurgische Verzahnung“, gut auf dem Stahluntergrund. Daher plat-

zen sie auch bei den bei Verbindungsmitteln möglichen mechanischen Beanspruchungen üblicherweise nicht ab.

Zink-Eisen-Legierungsschichten besitzen eine Härte um 150 HV0,1 [2]. Zum Vergleich: Baustahl weist eine Härte um 200 HV auf. Zink-Eisen-Legierungsschichten sind verschleiß- und abriebfest, weisen allerdings eine mäßig hohe Sprödigkeit auf. Falls der Stahluntergrund gebogen wird (was bei Verbindungsmitteln kaum vorkommt), können deshalb Risse im Überzug und dessen Enthaftung auftreten. Mit zunehmender Dicke der Zink-Eisenschicht (bei Kleinteilverzinkung entspricht diese der Dicke des Gesamtüberzuges) nimmt die Intensität dieser Erscheinungen zu.

4.3 Verbindungsmittel mit elektrolytisch abgeschiedenen Überzügen

Metallische **Überzüge aus Reinzink** [7] und Zinklegierungen, hier vor allem **Zink-Nickel-Überzüge** [8 bis 11], werden zum Zwecke des Korrosionsschutzes auf vorbereiteten Oberflächen von Kleinteilen für die Befestigungstechnik durch elektrochemische Verfahren abgeschieden. Für Verbindungsmittel sind die Normen DIN EN ISO 2081 [12], DIN EN ISO 4042 [13] und DIN 50979 [14] zuständig.

Verfahren

Beim galvanischen Abscheiden von Metallüberzügen wird mittels Gleichstrom in sauren oder alkalischen Elektrolyten das Überzugsmetall als dünne Schicht auf den zu schützenden vorbereiteten Stahlteilen abgeschieden. Alkalische Zink- bzw. Zink-Nickel-Elektrolyte weisen hinsichtlich der Abscheideeigenschaften eine bessere Makrostreufähigkeit auf, wodurch gleichmäßigere Schichten erzielt werden können (siehe unten). Heutzutage werden galvanische Schichten auf Verbindungsmitteln bevorzugt aus wässrigen alkalischen cyanidfreien Metall-Elektrolyten abgeschieden, um nahezu gleichmäßige Schichtdicken herzustellen.

In **Bild 4.2** sind beispielhaft die Verhältnisse beim galvanischen Verzinken dargestellt. Das Beschichten findet abhängig von den Ansprüchen an die Oberfläche und von der Größe und Geometrie der Teile entweder in einer Trommel oder im Gestell statt. Das Aufbringen des Überzuges für Kleinteile in hoher Stückzahl wird im Trommelverfahren durchgeführt. Dabei wird beispielsweise folgendermaßen vorgegangen:

- Die in Trommeln befindlichen Kleinteile werden im ersten Schritt chemisch gereinigt und dabei in Beizbottiche getaucht.
- Daraufhin werden die Kleinteile in Trommeln elektrolytisch verzinkt und im Anschluss in spezielle Reinigungsbäder getaucht. Danach werden die Trommeln aus den Reinigungsbädern gehoben und die Kleinteile werden in zylindrische gelochte Bottiche umgefüllt.
- Dann werden diese für die Applikation der Passivierung für kurze Zeit in z. B. eine Cr(III)-haltige Lösung getaucht und passiviert.
- Falls ein Bedarf besteht, ist im Anschluss eine Applikation einer Deckbeschichtung durch kurzzeitiges Tauchen in spezielle Lösungen möglich.

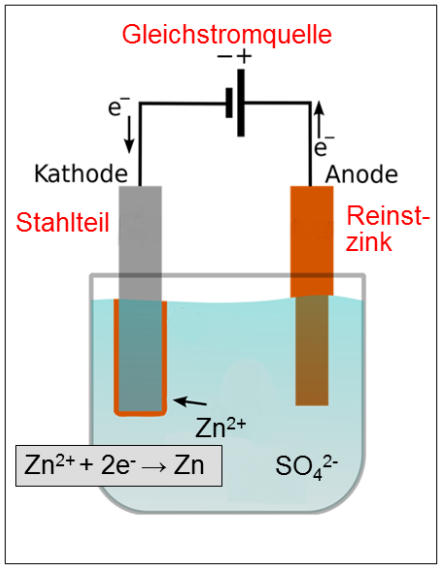


Bild 4.2:
Prinzip des elektrolytischen (galvanischen) Verzinkens (Quelle: T. Henning)

Überzugsdicke

Bei Reinzinküberzügen kann die mittlere Dicke des Überzuges auf ebenen Flächen etwa 5 bis 25 µm betragen. Bei ZnNi-Überzügen sind Überzugsdicken von ungefähr 8 bis 12 µm üblich. Bei galvanischen Überzügen auf Bauteilen, erzeugt in sauren Bädern, ist die Metallverteilung allerdings häufig nicht einheitlich. An konvexen Kanten (z. B. Gewindespitzen) entstehen wegen erhöhter Felddichte eher Verdickungen, an konkaven Flächen (z. B. Gewindegrund, Vertiefungen) eher eine Schichtschwächung (bei dünnen Schichten ist ein Tendieren der Schichtdicke gegen Null möglich). An Ecken und Kanten wird in sauren Elektrolyten zwischen 200 bis 300 % mehr Zink abgeschieden als an ebenen Flächen. Verdickungen des Überzuges an Gewindespitzen betragen in alkalischen Bädern nur etwa 20 bis 50 %. Gerade für Verbindungsmittel besitzen die alkalischen (cyanidfreien) Elektrolyte somit eine wesentlich bessere Metallverteilung. Von daher werden sie heutzutage für viele Anwendungsbereiche (auch bei den hiesigen Überzügen der Verbindungsmittel) bevorzugt angewendet.

Gefahr einer Wasserstoffversprödung

Auf der Stahloberfläche entsteht in den verschiedenen Prozessabläufen verfahrensbedingt Wasserstoff, nämlich beim Beizen, beim kathodischen elektrolytischen Entfetten sowie bei der eigentlichen galvanischen Metallabscheidung. Der Wasserstoff kann in das Grundmetall eindiffundieren und vorwiegend bei hochfesten Stählen (etwa >1000 N/mm² Festigkeit) zu Versprödung und unter Belastung zu Rissbildung und Bruch führen.

Die Wasserstoffentwicklung ist bei der elektrolytischen Verzinkung in alkalischen Bädern ausgeprägter als in sauren. Die Stromausbeute ist in schwachsauren Elektrolyten höher als in alkalischen Elektrolyttypen, weshalb insgesamt weniger Wasserstoff entwickelt wird. Im Falle von ZnNi-Überzügen ist der Wasserstoffeintrag geringer als bei Reinzinküberzügen [15]. Deshalb ist es möglich beispielsweise Bauteile der Festigkeits-

klasse 10.9 auch ohne nachfolgende Wärmebehandlung galvanisch mit Zink-Nickel zu beschichten, ohne dass wasserstoffbedingte Schäden zu erwarten sind.

Hochfeste Stähle finden im Bereich der Befestigungstechnik bisher nicht bevorzugt Anwendung, weshalb das Wasserstoffproblem in der Folge nicht näher behandelt bzw. untersucht wird.

Anwendungstechnische Eigenschaften [10]

Bezüglich einer Anwendung bei Verbindungsmitteln sind in erster Linie die Härte, Haftung und Rauigkeit von metallischen Überzügen von Interesse.

- **Reinzink** hat eine Härte um 50 HV0,1. Bei Abscheidung aus alkalischen Bädern haben **Zinküberzüge** eine Härte von etwa 80 bis 150 HV0,1. Galvanisch erzeugte Reinzinküberzüge besitzen eine sehr gute Haftfestigkeit auf dem Stahluntergrund. Bei mäßig starkem Biegen kommt es zu keinerlei Rissbildung und Enthaftung.
- Die Eigenschaften der galvanischen Überzüge auf Zinkbasis ändern sich mit dem Anteil des Legierungsmetalls. So nimmt die Härte mit dem Anteil von Nickel in der Legierung zu. **ZnNi-Überzüge** weisen deshalb eine höhere Härte (und damit eine bessere Verschleißbeständigkeit) als Zink- und Zink-Eisen-Legierungsschichten auf. Für in alkalischen Elektrolyten erzeugten Schichten mit 12 bis 16 M.-% Nickel liegt die Härte legierungsbedingt bei 410 bis 430 HV0,1. Für diese hohe Härte ist die Bildung der homogenen γ-Phase Ni_5Zn_{21} mit einer sog. Säulenstruktur verantwortlich.

  Die hohe Härte der ZnNi-Überzüge bedeutet zugleich geringe Duktilität und erhöhte Sprödigkeit. Bei ZnNi-Überzügen mit 12 bis 16 M.-% Nickel können deshalb bereits bei der Herstellung (besonders bei im Trommelverfahren erzeugten Schichten) und bei der späteren Verarbeitung der Verbindungsmittel Risse in der Schicht entstehen. Bei Reinzink- und Zink-Eisen-Legierungsschichten von Kleinteilverzinkungen existieren solche Einschränkungen nicht.

4.4 Verbindungsmittel mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen

ZnAl-Lamellenüberzüge [2, 16 bis 20] sind Beschichtungen, die nicht-elektrolytisch aufgebracht werden. Sie beinhalten eine Mischung von Zink- und Aluminiumlamellen, die mittels einer anorganischen Matrix verbunden sind. Wegen des zumeist geringeren Anteils an Aluminium bezeichnet man sie auch als Zink-Aluminium-Lamellenbeschichtung. ZnAl-Lamellenüberzüge sind beispielsweise unter den Handelsnamen Ruspert®, Dacromet®, Geomet® oder Delta® bekannt. ISO 10683 [21] und DIN EN 13858 [22] regeln die Anforderungen der ZnAl-Lamellenüberzüge. DIN EN ISO 10683 legt die Anforderungen der ZnAl-Lamellenüberzüge für Verbindungselemente mit Gewinde fest und DIN EN 13858 behandelt die Anforderungen der ZnAl-Lamellenüberzüge für Verbindungselemente ohne Gewinde und auch für andere Bauteile.

Verfahren

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Haftung der ZnAl-Lamellenüberzüge, müssen die Werkstücke vorbehandelt werden:

- Meistens (zu etwa 90 %) wird als Vorbehandlung das Entfetten plus **Glasperlen- oder Sandstrahlen** durchgeführt.
- In seltenen Fällen (zu etwa 5 %), insbesondere weil das Strahlen der Teile nicht möglich ist, wird nach dem Entfetten als Haftvermittler bzw. Trägerschicht für den ZnAl-Lamellenüberzug auch ein Phosphatieren mittels **Zinkphosphatierung** durchgeführt.
- Wiederum auch selten (zu etwa 5 %), werden im Anschluss zum Entfetten als Haftvermittler auch eine **Unterzinkung plus Passivierung** oder eine **Unterzinkung plus Zinkphosphatierung** aufgebracht. Die genannten Trägerschichten (in der Folge Haftvermittler genannt) verbessern darüber hinaus auch den Korrosionsschutz und erschweren die Unterrostung an schadhaften Stellen der Beschichtung. Derart geschützte Kleinteile/Verbindungsmittel gehen weitgehend in den Baubereich.

Unter Haftvermittler sind Substanzen zu verstehen, die in der Grenzfläche unmischbarer Stoffe eine enge physikalische oder meist chemische Bindung herstellen. In der Korrosionsschutztechnik findet überwiegend die **Zinkphosphatierung** in zink- und phosphorsäurehaltigen Bädern Anwendung. Die wenige Mikrometer dicke, schwerlösliche Zinkphosphatschicht weist eine sehr gute Haftung auf dem Untergrund auf und ermöglicht durch die mikroporöse bzw. mikrokapillare Schichtstruktur eine gute Verankerung nachfolgender Beschichtungen. Die erwähnten Haftvermittler verbessern darüber hinaus den Korrosionsschutz und erschweren die Unterrostung an schadhaften Stellen der Beschichtung.

Größere Teile (sog. Gestellware) werden auf einem Gestell mit dem Zink-Aluminium-Lamellenmaterial besprüht bzw. gespritzt. Kleinere (schüttfähige) Teile wie Verbindungsmittel (sog. Trommelware) werden in einen Behälter getaucht und im Anschluss zentrifugiert (Tauch-/Schleuder-Verfahren): Nach der Vorbehandlung des Stahluntergrundes werden diese in Beschichtungszentrifugen mit einer wässrigen Dispersion auf Basis von staubförmigen Zink- und Aluminiumlamellen und einem spezifischen anorganischen Trägermittel, eventuell versetzt mit Chromsalzen, benetzt. Das überschüssige Material wird anschließend abgeschleudert. Der Überzug wird im Anschluss verfahrensabhängig bei Temperaturen von etwa 200 bis 320 °C eingebrannt. Hierdurch bildet sich infolge Vernetzung der Metallpartikel mit dem anorganischen Bindersystem eine sich untereinander und mit dem Untergrund verzahnende, metallisch graue bis silbrige Schicht aus. Der Trockenfilm beinhaltet häufig mehr als 80 M.-% Zink und Aluminiumpartikel. Im Unterschied zu elektrolytisch erzeugten Überzügen scheiden sich ZnAl-Lamellenüberzüge auch in Spalten des Bauteils ab.

Diese Art der Überzüge wurden als Korrosionsschutz für Verbindungsmittel in der Automobilindustrie entwickelt und werden neuerlich auch in der Bautechnik angewendet. Seit vielen Jahren existieren Chrom(VI)-haltige, neuerlich auch Chrom(VI)-freie ZnAl-Lamellenüberzüge. Aus gesundheitlichen Gründen sollen metallische und nichtmetallische Überzüge kein sechswertiges Chrom (Chromat) mehr enthalten. Deshalb wurden von den Herstellern von ZnAl-Lamellenüberzügen die chromatfreien Systeme entwickelt. Jedoch sind alle Cr(VI)-freien ZnAl-Lamellenüberzüge den Cr(VI)-haltigen in der

Gesamtbeurteilung, einschließlich des Korrosionsverhaltens, unterlegen. Der abgeminderte Korrosionsschutz wird durch höhere Schichtdicken und/oder eine zusätzliche anorganische oder organische Deckschicht ausgeglichen, um eine weitestgehend ähnliche Korrosionsschutzwirkung wie bei den chromathaltigen Systemen zu erreichen (siehe auch Abschn. 8).

Überzugsdicke

Eine Schicht entspricht der Dicke von ca. 6 µm. Um die Schutzwirkung heraufzusetzen wird gewöhnlich mehrfach beschichtet und teilweise zusätzlich auf Silikatbasis versiegelt bzw. mit organischem Decklack überbeschichtet. Bei den meist aufgebrachten Schichtdicken von im Mittel 15 µm liegen drei ZnAl-Lamellenschichten übereinander.

Gefahr einer Wasserstoffversprödung

Eine Gefahr durch Wasserstoff induzierte Schädigungen bestehen nicht, da beim Beschichtungsprozess kein Wasserstoff erzeugt wird. Deshalb sind ZnAl-Lamellenüberzüge auch zum Korrosionsschutz hochfester Stähle geeignet.

Anwendungstechnische Eigenschaften

Durch ZnAl-Lamellenüberzüge wird eine harte metallische Oberfläche erzeugt. Die Haftung auf dem Stahluntergrund ist geringer als bei elektrolytisch abgeschiedenen Schichten und feuerverzinkten Überzügen. Dies kann sich u. U. bei Verbindungsmitteln, besonders bei fehlendem Haftvermittler, als ein Nachteil auswirken, da hier hohe lokale Querpressungen und Scherbeanspruchungen systembedingt unvermeidbar sind.

4.5 Möglichkeit eines kathodischen Korrosionsschutzes

Neben der Abschirmung der Oberfläche von der Atmosphäre (passiver Korrosionsschutz) kann beim Korrosionsschutz von Stählen durch metallische Überzüge auf Zinkbasis auch die Fähigkeit des Überzuges zum kathodischen Korrosionsschutz eine Rolle spielen [2, 23]. Dieser sog. aktive Korrosionsschutz kann unter bestimmten Voraussetzungen sowohl bei Reinzink- und ZnNi-Überzüge als auch bei hochgefüllte ZnAl-Lamellenüberzüge eintreten:

- An mechanischen Verletzungen eines schützenden Überzuges,
- aber auch als Ergebnis einer starken Korrosion, wird der Stahluntergrund möglicherweise freigelegt.
- Der Überzug kann bedingt durch die Herstellung auch lokal fehlen, z. B. in Spalten/ Überlappungen bei galvanisch erzeugten Überzügen oder an herstellungsbedingten Oberflächenfehlern des Bauteils.

Durch den kathodischen Schutz wird die Korrosionsgeschwindigkeit des freiliegenden Stahls abgemindert (im günstigsten Fall besteht kein Abtrag, keine Rostbildung) und die Korrosion des unmittelbar benachbarten Zinks wird verstärkt. Das Zink wirkt somit als sog. Opferanode. Die für den Korrosionsschutz verantwortliche Opferwirkung des Überzugsmetalls kann jedoch bei Vorhandensein einer zusätzlichen elektrisch nicht leitenden Deckbeschichtung (Topcoat) nicht eintreten.

Ein kathodischer Schutz aufgrund der Bildung sog. Korrosionselemente findet nur statt,

- wenn das Überzugsmetall elektrochemisch unedler ist als das Basismetall (Stahl)
- und wenn der Kontaktbereich von einem gut leitfähigen wässrigen Elektrolyten benetzt wird.

Potentialseitige Voraussetzungen

Durch den kathodischen Schutz wird die Korrosionsgeschwindigkeit des freiliegenden edleren Stahls abgemindert und jene des unmittelbar benachbarten unedleren Zinks verstärkt. Mit „unedler“ wird ausgedrückt, dass bei Korrosion in einem bestimmten wässrigen Medium das sog. **Korrosionspotential** (des Überzugsmetalls Zink) relativ negativer ist als das des Kontaktmaterials (Stahl). Aus den in **Bild 4.3** dargestellten sog. praktischen Spannungsreihen lässt sich entnehmen, dass z. B. die Überzugsmetalle Zink und Aluminium aus korrosionstechnischer Sicht sowohl im Falle einer Benetzung mit Regenwasser bzw. Tau als auch bei Benetzung mit chloridhaltigen wässrigen Medien (Meerwasser) stets um mehrere 100 mV unedler sind als der zu schützende Stahl. Bei Zink-Nickel-Legierungen wird das Korrosionspotential des Überzuges mit Zunahme des Nickelgehaltes zwar edler, jedoch bleibt die kathodische Schutzwirkung für Stahl bestehen: Eine Zink-Nickel-Legierung mit 10 bis 15 M.-% Nickel weist ein etwa 150 mV positiveres Potential als Zink auf [10]. Damit sind die potentialseitigen Voraussetzungen für den kathodischen Schutz unter Bildung eines Korrosionselementes bei den hier behandelten metallischen Überzügen gegeben.

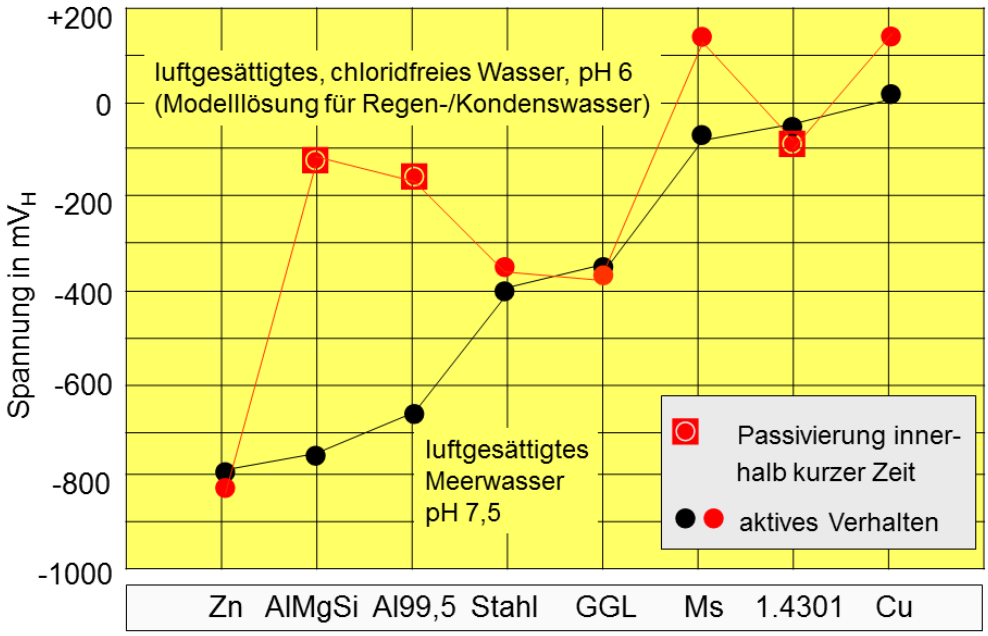


Bild 4.3:
Praktische Spannungsreihen ausgewählter Metalle in Modelllösungen (Quelle für Wasser: Elze, Quelle für Meerwasser: Audi Ingolstadt)

Elektrolytseitige Voraussetzungen

Die elektrolytseitigen Voraussetzungen für den kathodischen Korrosionsschutz unter atmosphärischen Bedingungen sind wie folgt:

- Der kathodische Schutz erfordert die Überdeckung des Kontaktbereiches mit einem Elektrolyten. In der Atmosphäre kann jedoch im Regelfall nicht von einem über eine längere Zeit hinweg die gesamte Fehlstelle im Zinküberzug durchgängig benetzenden Elektrolyten ausgegangen werden. Auf Metalloberflächen können sich unter atmosphärischen Bedingungen nur sehr dünne Elektrolytfilme (im Nanometerbereich) bilden.
- Die Schutzwirkung steigt mit der Leitfähigkeit des benetzenden Elektrolyten. Atmosphärische Wässer (Regenwasser und Tauwasser in ländlicher und städtischer Atmosphäre) sind jedoch sehr reine Elektrolyte und weisen somit keine ausreichend hohe elektrolytische Leitfähigkeit auf (**Bild 4.4**). Bei Kontakt mit einem an Salzen angereicherten Elektrolyten ist der Schutz deshalb erheblich effektiver als bei Benetzung mit Tau- oder Regenwasser. Diese Zusammenhänge erklären auch, warum der kathodische Korrosionsschutz beispielweise zwar im Salzsprühtest sehr effektiv ist, jedoch bei atmosphärischer Korrosion im Regelfall keine Rolle spielt. Im Hinblick auf eine Anwendung unter baupraktischen Verhältnissen liefert der Salzsprühtest deshalb zu optimistische bzw. falsche Informationen (siehe auch Abschn. 12.3).

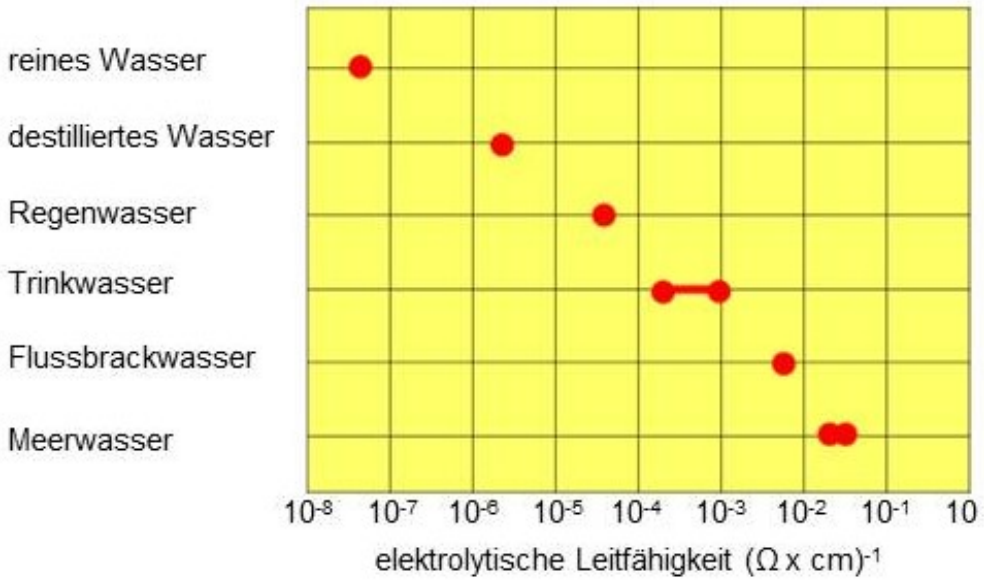


Bild 4.4:
Anhaltswerte für die elektrolytische Leitfähigkeit von „Wässern“ (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

Geometrische Einflüsse

Die Wirksamkeit des kathodischen Schutzes durch das Überzugsmetall (die sog. Fernschutzwirkung) ist neben dem Korrosionspotential und der Zusammensetzung des angreifenden Elektrolyten auch abhängig von der Größe und Entfernung der zu schützenden (freien) Stahlfläche und der Auflagendicke des Überzuges:

- Umso geringer die Unterbrechung der Metallauflage, desto besser der Schutz.
- Umso dicker die Metallauflage, desto langzeitiger die Schutzwirkung.

Fazit

Wegen der genannten Zusammenhänge ist bei metallischen Überzügen unter atmo-

sphärischen Bedingungen im Regelfall lediglich von keinem oder höchstens einem begrenzt wirksamen Schutz an freien Stahloberflächen auszugehen. Nur wenn beispielsweise chloridhaltige Wässer Zutritt zur Verbindung haben oder in Meeresnähe sich hygroskopisch reagierende Chloride auf geschützten (nicht beregneten Kontaktstellen) ablagern können, ist eine wirksame Kontaktkorrosion zu erwarten.

4.6 Korrosionsschutz durch Zinküberzüge

4.6.1 Atmosphärische Korrosion [2, 6, 24]

Schutzmechanismus

Die Korrosion von Überzügen auf Zinkbasis unter atmosphärischen Bedingungen ist eine Sauerstoffkorrosion. Bei der Korrosion von Reinzink bildet sich durch Reaktion mit Wasser und Sauerstoff als Korrosionsprodukt vorerst ein lediglich mäßig schützendes Zinkhydroxid ($Zn(OH)_2$) (Reaktion 1 in **Bild 4.5**), das bei Zutritt von Kohlendioxid (CO_2) der Luft teilweise zu schwer wasserlöslichem und gut schützendem Zinkcarbonat ($Zn(OH)_2 \times 2ZnCO_3$) umgewandelt wird (Reaktion 2 in **Bild 4.5**). Ob und inwieweit Zink den Stahl schützt, ist demnach davon abhängig, ob sich im angreifenden wässrigen Medium die genannte Deckschicht ausbildet und ob diese auch unter Berücksichtigung von umgebungsbedingten Veränderungen stabil bleiben. Wenn sich stabile Deckschichten bilden, wird die Schutzdauer des Überzuges durch die Korrosivität der Umgebung und die Zinkschichtdicke bestimmt.

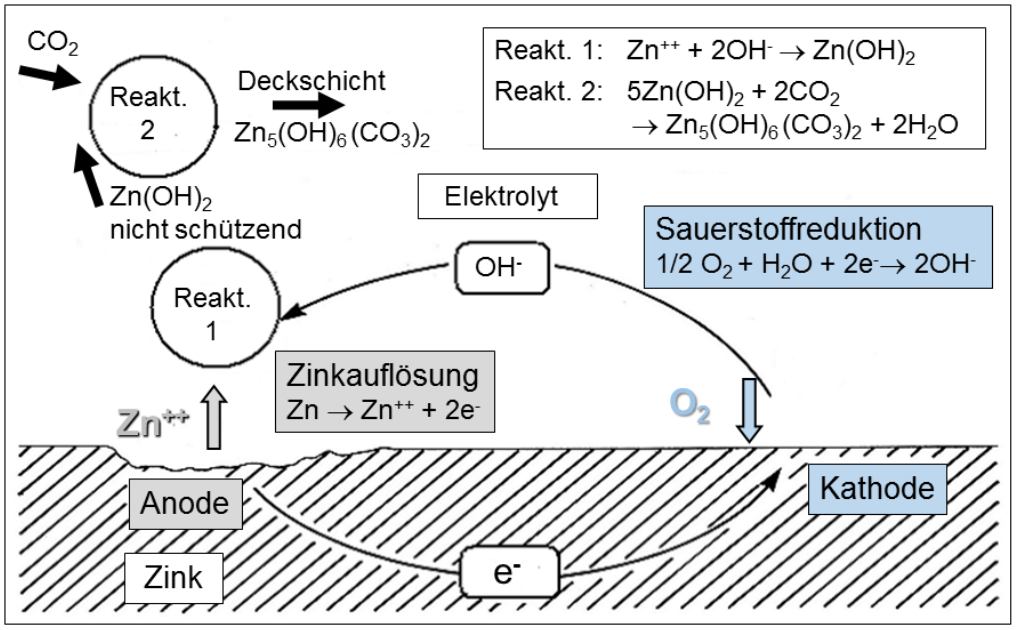


Bild 4.5:
Mechanismus der Sauerstoffkorrosion von Zink (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

Einflüsse auf die Zinkkorrosion

Die Geschwindigkeit der atmosphärischen Korrosion von Zink bzw. der Zinkabtrag (Zeitpunkt einer Entstehung von Rotrost) verzinkter Oberflächen von Verbindungsmitteln bzw. deren Dauerhaftigkeit wird primär von folgenden Einflüssen bestimmt:

- **Dicke der Zinkauflage**. Die Zinkschichtdicke bestimmt in Abhängigkeit von der Korrosivität der Umgebung die Lebensdauer. Einerseits sollte die Zinkschicht nicht zu

dick sein, da dicke Schichten zum Abplatzen neigen. Andererseits sollte die Verzinkung auch ausreichend dick sein, damit der erforderliche Korrosionsschutz im angreifenden Medium während der geplanten Nutzungsdauer sichergestellt wird.

- **Wasserdampfgehalt (relative Luftfeuchte), Schwefeldioxidgehalt**. In der Luft enthaltenes Schwefeldioxid setzt in erster Linie in Zusammenwirken mit dem Wasserdampfgehalt der Luft den Zinkabtrag herauf. Die Auflösungsgeschwindigkeit der Deckschichten aus Zinkcarbonat nimmt deshalb oberhalb etwa 70 % mit zunehmender relativer Luftfeuchte und mit dem Gehalt der Luft an Schwefeldioxid merklich zu. Die bei Wasserzutritt oder hohen relativen Luftfeuchten in Anwesenheit von Schwefeldioxid gebildete Säure löst die auf der Zinkoberfläche gegenwärtigen, korrosionsschützenden Deckschichten chemisch auf.
- **Chloridgehalt (Aerosolgehalt) der Luft**. In Wasser gelöste Chloridsalze (Meeresaerosole, Tausalz) greifen den Überzug an, wobei der Zinkabtrag mit zunehmender Chloridkonzentration steigt. Allerdings ist der Einfluss niedriger bis mäßig hoher Chloridgehalte in der Atmosphäre auf die Zinkkorrosion nur gering. In Wasser gelöst bilden sich lediglich verdünnte Lösungen und deren Wirkung ist vergleichsweise gering, da Chloride im gewissen Ausmaß in die Zinkkorrosionsprodukte eingebunden und folglich unschädlich werden. Falls sich die Bauteile beispielsweise in unmittelbarer Meeresnähe oder neben einer mit Tausalzen beaufschlagten verkehrsreichen Straße befinden und salzhaltiges Spritzwasser bzw. Sprühnebel auf die Oberfläche auftreffen, ist jedoch von einem erhöhten Zinkabtrag auszugehen.
- **Benetzung mit Wasser**. Die Korrosion von Zink wird bei mehrfacher bis ständiger Benetzung von verzinkten Oberflächen mit Wasser (Kondenswasser, Wasser in konstruktiv bedingten Spalten) beschleunigt, da der Zutritt des zur Bildung carbonatischer Deckschichten erforderlichen Kohlendioxids der Luft zur korrodierenden Oberfläche behindert ist. In diesem Zusammenhang wird bei Korrosion lediglich Zinkhydroxid ($Zn(OH)_2$) gebildet, das keine dauerhaft schützende Wirkung besitzt (**Bild 4.5**). Bei dem Zinkhydroxid handelt es sich um ein voluminöses, häufig schlecht haftendes Zinkkorrosionsprodukt, das angesichts seiner weißen Farbe Weißrost genannt wird (**Bild 4.6**). Die Geschwindigkeit des Zinkabtrages kann unter Bedingungen der Weißrostbildung den normalen atmosphärischen Abtrag um ein Vielfaches übersteigen [2]. Erfahrungsgemäß treten solche Zustände bevorzugt auf, wenn
  - die Luftfeuchte sehr stark erhöht ist,
  - sich als Folge einer Taupunktunterschreitung oftmals Kondenswasser auf der Oberfläche bildet (Abschn. 3.2.1),
  - sich in konstruktiv bedingten Spalten Wasser über längere Zeiten hält.

Korrosionsabtrag von Zink an der Atmosphäre

Bewitterter (beregneter) Außenbereich. Folgende mittlere Zinkabtragungen wurden bei mehrjähriger Auslagerungen von Krupp Hoesch Stahl (7 Jahre) [25] und der MPA Universität Stuttgart (bis zu 15 Jahre) [26, 27] in neuerer Zeit bestimmt und können zur Berechnung der Schutzdauer im mitteleuropäischen Raum herangezogen werden (die Angaben C2 bis C5 verweisen auf die jeweilige Korrosivitätskategorie nach **Tabelle 3.6**, Abschn. 3.4.1):

- Land-/Stadtatmosphäre ohne Industrienähe C2
  - Olpe-Westfalen [25] 0,9 µm/Jahr
  - Stuttgart-Vaihingen [26] 0,8 µm/Jahr
- Industrieatmosphäre C3, Hüttenwerk Duisburg [26] 1,5 µm/Jahr
- Meeresklima C4, Insel Baltrum, Nordsee [25] 2,4 µm/Jahr
- Meeresklima C5 (gelegentlich Sprühnebel), Helgoland [27] ~5 µm/Jahr

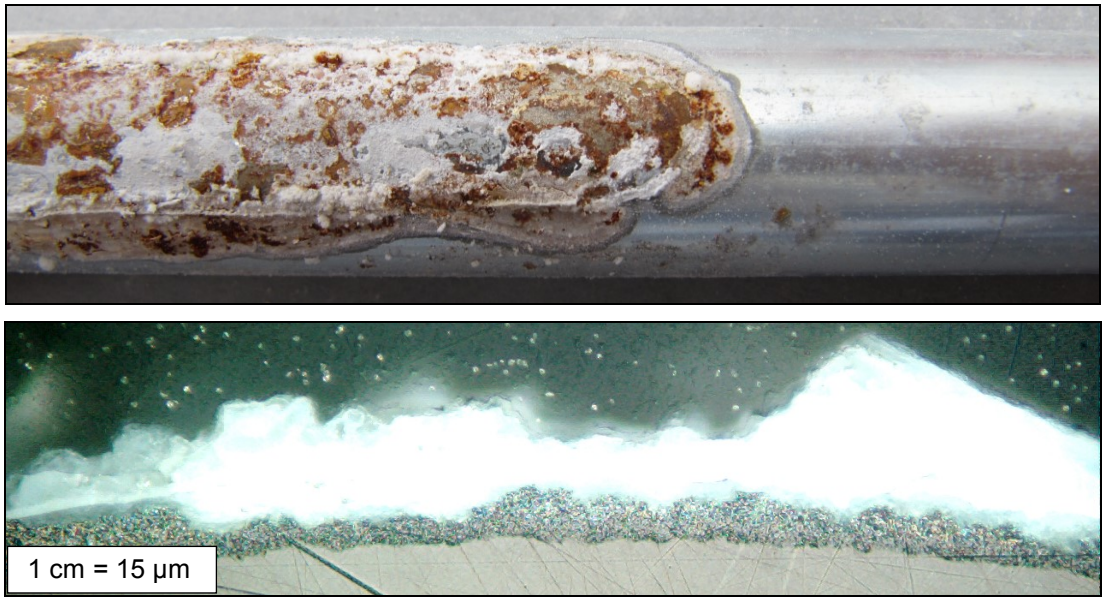


Bild 4.6:
oben: Weißrost und Rotrost auf der Oberfläche eines galvanisch verzinkten Rohres nach längerzeitigem lokalem Kontakt mit einer nassen Wärmedämmung; unten: Schliff durch den Zinkangriff unter Weißrostbildung (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

Nicht bewitterter (nicht beregneter) schadstoffarmer Außenbereich (Stadtatmosphäre) (C2/C3). Bei verzinkten Bauteiloberflächen in schadstoffarmer Außenatmosphäre unter Regenschutz, also z. B. auch im Hinterlüftungsbereich einer Fassade, ist der Abtrag des Zinks gewöhnlich deutlich geringer als bei bewitterten (beregneten) Proben und beträgt nach umfangreichen Versuchen um die Hälfte [6]:

- Von der MPA Dortmund zwischen 1985 und 1993 durchgeführte Versuche unter Bedingungen einer Korrosivitätskategorie C3 (Industrieatmosphäre) lieferten im Mittel Zinkabtragungen von 1 µm/Jahr bei bewitterten Proben und 0,5 µm/Jahr bei Proben im Freien mit Regenschutz.
- Schwedische Untersuchungen zeigten in einer schadstoffarmen Atmosphäre über 4 Jahre einen Mittelwert von 0,4 µm/Jahr bei verzinkten Proben im Freien unter Dach.

Nicht bewitterte (nicht beregnete) chloridhaltige Atmosphäre (unmittelbare Meeresnähe, Solebad) (C4). Im nichtbewitterten chloridhaltigen Außenbereich werden höhere Abtragsraten vorgefunden als bei Bewitterung, da sich auf der Oberfläche ablagernde Chloride nicht durch Regen abgewaschen werden und sich dadurch aufkonzentrieren:

Untersuchungen in einem salzreichen Solebad liefern Anhaltswerte für die chloridinduzierte Korrosion durch sich ablagernde hygroskopisch reagierende Salze [28]. Die Thermalsole wies ca. 14 g Chlorid/Liter mit überwiegenden Anteilen von NaCl, daneben die stark hygroskopischen Salze $CaCl_2$ und $MgCl_2$, auf. An feuerverzinkten Drähten von offenen Spiralseilen für die Aussteifung eines Glasdaches betrug der Zinkkorrosionsabtrag in der äußeren Drahtlage ungefähr 4 µm/Jahr. Diese sehr hohe Abtragsrate ist einerseits bedingt durch sich einstellende sehr hohe Salzkonzentrationen aber auch durch die ständig vorherrschende Temperatur um 30 °C.

Normenmäßige Erfassung des Zinkabtrags in der Atmosphäre

Bei atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung unterliegen Zinküberzüge einem gleichmäßigen Korrosionsabtrag, nämlich einer sog. Flächenkorrosion. Der langfristige tatsächliche mittlere Korrosionsabtrag in Außenklimaten unter Verhältnissen der Korrosivitätskategorien C2 bis C5 kann unter Einbeziehung der DIN EN ISO 9224 [29] abgeschätzt werden. Hierbei besteht die Erfahrung, dass der Zinkabtrag (die Korrosionsgeschwindigkeit) in den ersten Jahren erhöht ist. Aufgrund der Deckschichtbildung (Ablagerung von schützenden Korrosionsprodukten) nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit später ab. Die erwähnte Norm nennt auch Schichtdickenabnahmen (Minimal- und Maximalwert) für das Langzeitkorrosionsverhalten gemittelt über einen Zeitraum von 0 bis 10 Jahren und für den Zeitraum danach.

Tabelle 4.1 enthält langfristige Korrosionsgeschwindigkeiten von Zink unter Verhältnissen der Korrosivitätskategorien C2 bis C5. In **Tabelle 4.2** wird der maximale langjährige mittlere Korrosionsabtrag (oberer Grenzwert einer möglichen Streuung) von Zinküberzügen für diese Korrosivitätskategorien unter Einbeziehung der Angaben in **Tabelle 4.1** angegeben. Man stellt fest, dass bei Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von etwa 50 Jahren metallische Überzüge auf Reinzinkbasis mit einer Schichtdicke bis ≈60 µm unter Bedingungen der Korrosivitätskategorie C2 und C3 genügen, allerdings nicht unter Bedingungen der Korrosivitätskategorien C4 und höher.

Metall	Korrosivitäts-kategorie, Korrosivität	0 bis 10 Jahre	>10 Jahre
		DIN EN ISO 9224	
Zink	C1 unbedeutend	≤0,07	≤0,05
	C2 gering	0,07 bis 0,5	0,05 bis 0,4
	C3 mäßig	0,5 bis 1,4	0,4 bis 1,1
	C4 stark	1,4 bis 2,7	1,1 bis 2,2
	C5 sehr stark	2,7 bis 5,5	2,2 bis 4,4
	CX extrem	5,5 bis 16	4,4 bis 13

Tabelle 4.1:
Langfristige Korrosionsgeschwindigkeiten und Abtragungen von Zink in µm unter Bedingungen der Korrosivitätskategorien C1 bis CX [29]

Korros. Kategor.	Umgebung	maximaler Korrosionsabtrag nach ……Jahren in µm			
		5	10	20	50
C1	beheizter Innenraum	0,4	0,6	1,1	≈3,1
C2	Land-, Stadtklima	2,6	4,5	8,0	≈21
C3	Stadt-, Industrieklima	7,8	13,6	24,0	≈58
C4	Meeresklima, Industrieklima	15,5	27,3	48,0	≈115
C5	Offshore-Bereich, Industrieeinfluss	31,1	54,6	95,9	≈231
CX	extrem hohe Feuchte, ständige Kondensation	93	162	286	≈676

Tabelle 4.2:
Maximaler Korrosionsangriff von Zink für verschiedene Korrosivitätskategorien und Zeiten [29]

4.6.2 Korrosion bei Kontakt mit Holz [2, 30, 31]

Schutzmechanismus

Für die Zinkkorrosion im Kontakt mit Holz gelten als Sauerstoffkorrosion dieselben Gesetzmäßigkeiten wie die atmosphärische Korrosion. Holz besitzt eine nach außen offene Porosität, weshalb das Kohlendioxid der Luft auch im Kontakt mit dem Holz carbonatische Deckschichten bilden kann. Lediglich sehr erhöhte Wassergehalte im Holz, über etwa 30 M.-%, be- bzw. verhindern eine Eindiffusion von Kohlendioxid und eine anschließende Bildung von Deckschichten auf verzinkten Oberflächen.

Einflüsse auf die Zinkkorrosion

Holzfeuchte/Wassergehalt. Im Kontakt mit Holz ist die Korrosion metallischer Bauteile primär vom Wassergehalt des Holzes abhängig (Abschn. 3.3.1). Für den Fall, dass kein Wasser an die Oberfläche herangeführt und durch kapillares Saugen aufgenommen wird, stellt sich stets eine geringe Ausgleichsfeuchte (≈ <16 M.-% bei Fichtenholz) ein. Das Holz ist dann „trocken“ und im Kontakt mit diesem kann eine schädigende Korrosion ausgeschlossen werden.

Die erforderliche Holzfeuchte bzw. Wassergehalt für Metallkorrosion im Kontakt mit Holz beträgt mindestens 16 bis 18 M.-% [30]. In Fichtenholz stellt sich eine solche Feuchte bei einer Temperatur von 20 °C bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 85 % ein (**Bild 3.11**). Für eine deutlich verstärkte Metallkorrosion im Kontakt mit Holz ist eine Feuchte von >30 M.-% notwendig, d. h. das Vorhandensein von freiem Wasser in den Zellhohlräumen des Holzes. Lediglich bei Nasslagerung oder beispielsweise in Räumen mit stark erhöhter Luftfeuchte (z. B. schlecht belüftete Viehställe) können solche Feuchten im Holz vorliegen und würden außerdem zu einem bakteriellen Angriff des Holzes führen.

Holzinhaltstoffe. Die Korrosion von Zink und auch Eisen wird aufgrund der bei feuch-

ten/nassen Hölzern freiwerdenden **Essigsäure** verstärkt. Dies gilt vor allem bei Kontakt mit z. B. Eichenholz (vergl. Abschn. 3.3.1) [32].

Holzschutzmittel (vergl. Abschn. 3.3.1) auf Basis quartärer (organischer) Ammoniumverbindungen haben eine stark korrosive Wirkung. Auch Holzschutzmittel, die Kupfer enthalten, fördern insbesondere bei Nichteisenmetallen Korrosion, sofern das Holz feucht/nass ist. Kupfer ist edler als beispielsweise Zink und in Verbindung mit Wasser kann sich zwischen den beiden Metallen offensichtlich eine Art galvanisches Element bilden, bei dem in erster Linie das unedlere Metall (Zink) abgetragen wird.

Korrosionsabtrag von Zink bei Kontakt mit Holz

In Übereinstimmung mit praktischen Erfahrungen erfolgt der Korrosionsabtrag von verzinkten Bauteilen im Kontakt mit Holz annähernd unabhängig vom Schadstoffgehalt der Umgebung. Mit der Bedingung, dass im Holz keine korrosionsfördernden Holzschutzmittel enthalten sind, gilt für Bauholz (Fichte) [2, 33]:

- Holz im Freien beregnet: Ähnlicher Größenordnung wie bei bewittertem Zink in einer schadstoffarmen Umgebung der Korrosivitätskategorie C2.
- Holz im Freien nicht beregnet: Ungefähr 50 % des Abtrages bei Bewitterung.
- Holz ständig nass: Sehr hohe Abtragsraten sind möglich; bis zu 50 µm/Jahr wurden festgestellt [2]. Dünne galvanische Zinküberzüge werden in diesem Fall innerhalb weniger Wochen bis Monate vollständig abgetragen und der freiliegende Stahl wird auf Dauer stark angegriffen (**Bild 4.7**).

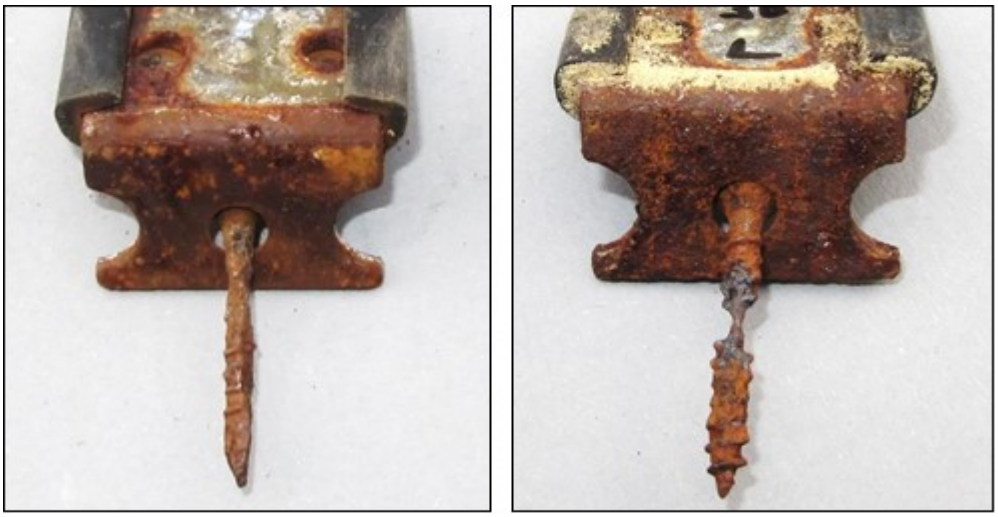


Bild 4.7:
Glashalter und deren verzinkte Befestigungsschrauben nach mehrjährigem Kontakt mit häufig feuchtem/nassem Holz (unterer Querholm eines geneigten Dachfensters) (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

Tabelle 4.3 stellt Daten zum Korrosionsabtrag von verzinkten Holzverbindungsmitteln, eingeteilt nach Korrosion in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Holz (verschiedene Nutzungs- bzw. Holzklassen) zusammen:

- Die jährlichen **Abtragungen in der Atmosphäre** nehmen Bezug auf Angaben in der

DIN EN ISO 9224 [29] (hier für Auslagerungen >10 Jahre). Die genannte Norm gibt Streubereiche der mittleren jährlichen Abtragungen an (siehe **Tabelle 4.1**). Die Tabelle berücksichtigt die auf der sicheren Seite liegenden maximalen mittleren Korrosionsgeschwindigkeiten.

Situation	trockener (beheizter) Innenraum	unbewitterter Außenbereich	bewitterter Außenbereich			Nasslagerung	
Beispiele für Umgebung	Wohnräume	offene Lagerhalle, hinterlüftete Fassade	Verbindungsmittel beregnet / häufig Kondenswasser			nasser Boden	
Atmosphäre: DIN EN ISO 9223 (Abschn. 3.4.1)	C1	C2	C2	C3	C4	entspricht ≈CX	
Holz: DIN EN 1995-1 [34]	Nutzungskl. 1	Nutzungskl. 2	Nutzungsklasse 3			(nicht definiert)	
Holz: DIN EN 14592 [35]	Holzklasse 1	Holzklasse 2	Holzklasse 3			Holzkl. 4	Holzkl. 5
Holzschutzmittel	Einfluss auf die Korrosion gering					unbehandelt	behandelt
Holzart	Einfluss der Holzart auf die Korrosion ist gering					pH 4-6 (Fichte)	pH ≤4 (Eiche)
Holzfeuchte nach DIN EN 14592 [35]	<10 M.%	10 bis 16 M.-%	16 bis 20 M.-%			>20 M.-%	
Holzfeuchte (Abschn. 3.3.1)	≤10 M.-%	14 bis 16 M.-%	18 bis 20 M.-%			>30 M.-%	

Auslagerung >10 Jahre	max. mittlere Korrosionsgeschwindigkeit nach DIN EN ISO 9224 [29] (in den ersten 30 Jahren)					
Zink-Korrosion in der Atmosphäre	≤0,05 µm/a	≈≤0,2 µm/a[2)]	≤0,4 µm/a	≤1,1 µm/a	≤2,2 µm/a	KG ≤13 µm/a[1)]
Zink-Korrosion bei Holzkontakt			Korrosion wie in Atmosphäre C2			

[1)] bei Annahme einer Korrosivitätskategorie CX
[2)] bei Zink beträgt das Verhältnis der Korrosionsgeschwindigkeiten von nicht bewittert / bewittert etwa 0,5:1

Tabelle 4.3:
Zuständigkeit der Regelwerke für den Korrosionsschutz im Holzbau und Holzfeuchten unter Angabe der Korrosion von verzinkten Verbindungsmitteln in verschiedenen Umgebungen

- Die Angaben für die **Korrosion im Kontakt mit Holz**, die auch bei der aktuellen Überarbeitung der Holzbaunorm DIN EN 1995 [34] und der Norm für stiftförmige

Verbindungsmittel für Holzbauwerke wie Nägel, Klammern, Schrauben, Stabdübel und Bolzen mit Muttern DIN EN 14592 [35] Berücksichtigung finden, werden aus den oben genannten Zusammenhängen unter Einbeziehung der Angaben in der Norm DIN EN ISO 9224 [29] gefolgert.

Angabe der Norm zum erforderlichen Korrosionsschutz

Unter Berücksichtigung der Angaben in **Tabelle 4.3** geben die Normen DIN EN 1995 [34] und DIN EN 14592 [35] in der derzeitigen Überarbeitung, auch Hinweise zum erforderlichen Korrosionsschutz. Zumindest in einer Umgebung der Korrosivitätskategorie C2 könnte auch die zukünftig ausschließlich erlaubte Chrom(III)-Passivierung angerechnet werden. Falls eine galvanische Verzinkung zusätzlich passiviert wird, wird die Lebensdauer der Verzinkung fiktiv um 25 % heraufgesetzt. In aggressiverer Umgebung z. B. einer Korrosivitätskategorie C4 wäre von einer geringeren Wirkung/Verbesserung der zusätzlichen Chrom(III)-Passivierung auszugehen.

Bei Verwendung chloridhaltiger Holzschutzmittel können u. U. höherwertigere Korrosionsschutzmaßnahmen erforderlich sein. Die Korrosionsschutzmaßnahmen gelten auch für Hölzer wie Douglasie und Eiche, solange die Sättigungsfeuchte der Hölzer nicht überschritten wird. Mit korrosionsfördernden Ansäuerungen ist nur bei erhöhter Feuchte des Holzes zu rechnen (Abschn. 3.3.1).

<table>
<tr><td>DIN EN 14592 (Holz)</td><td rowspan="3">Umge-bung</td><td>Holzkl. 1</td><td>Holzkl. 2</td><td colspan="3">Holzklasse 3</td><td>Holzkl. 4/5</td></tr>
<tr><td>DIN EN ISO 9223 (Atmosphäre)</td><td>C1</td><td>C2</td><td>C2</td><td>C3</td><td>C4</td><td>≈CX</td></tr>
<tr><td></td><td>trocken</td><td>nicht bewittert</td><td colspan="3">bewittert</td><td>dauer-feucht</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Zinküberzug</td><td>Atmo-sphäre</td><td rowspan="3">kein Korr. schutz</td><td>10 µm</td><td>20 µm</td><td>55 µm</td><td>110 µm</td><td rowspan="2">nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Holz</td><td>10 µm</td><td colspan="3">20 µm</td></tr>
<tr><td>nichtrostender Stahl</td><td>-</td><td colspan="5">nichtrostender Stahl (siehe Abschn. 6)</td></tr>
</table>

Tabelle 4.4:
Erforderliche Zinkdicke bzw. Werkstoffe und korrosionsbeständige Werkstoffe für Holzverbindungsmittel für einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren
C1 bis CX = Korrosivitätskategorie (siehe **Tabelle 3.6**)

Tabelle 4.4 benennt, unabhängig von der Art und Dicke von Verbindungsmitteln, die berechnete erforderliche Zinkschichtdicke für einen Zeitraum von 50 Jahren und eine Anwendung in den Holzklassen 1 bis 3. Den Berechnungen liegen Korrosionsraten für >10 Jahre, wie in **Tabelle 4.3** beschrieben, zu Grunde. Bei einer zusätzlichen Blaupassivierung wird davon ausgegangen, dass erfahrungsgemäß zumindest in einer schadstoffarmen Umgebung der Korrosivitätskategorie C2 die in **Tabelle 4.4** genannte erforderliche Zinkdicke um 25 % reduziert werden kann. Falls optische Gesichtspunkte keine Rolle spielen, ist in der Nutzungsklasse 1 prinzipiell kein Korrosionsschutz notwendig. Als Alternative, oder wenn die Verzinkung nicht ausreicht, können auch nichtrostende

Stähle eingesetzt werden. Für Verbindungsmittel, die unter Bedingungen einer Korrosivitätskategorie C5 und CX eingesetzt werden sollen, kämen ausschließlich nichtrostende Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse IV oder V in Frage (**Tabelle 6.1**).

4.6.3 Korrosion bei Kontakt mit Beton [2]

Verbindungsmittel werden üblicherweise zwar nicht „einbetoniert“, sie können jedoch mit erhärtetem Beton in Kontakt kommen. Falls durch eine Verzinkung geschützte Oberflächen im losen Kontakt mit feuchtem Beton stehen, tritt in der Folge eine Spaltkorrosion des Zinks im Kontaktbereich ein. Da die Zinkoberfläche im Spaltbereich unbelüftet ist und gleichzeitig eine Benetzung mit Feuchte/Wasser erfolgt, können sich hier die carbonatischen Deckschichten mit Schutzwirkung nicht ausbilden. Das Kohlendioxid, das in der Luft enthalten und für die Deckschichtbildung notwendig ist, hat unter solchen Verhältnissen keinen Zutritt zur Zinkoberfläche. Wird der Zutritt von Kohlendioxid zur verzinkten Oberfläche verhindert, so entsteht in Anwesenheit von Wasser bei Korrosion nur Zinkhydroxid ($Zn(OH)_2$), das keine dauerhafte Schutzwirkung besitzt (siehe Abschn. 4.6.1). Die Korrosionsgeschwindigkeit des Zinks ist dann höher als bei atmosphärischer Korrosion.

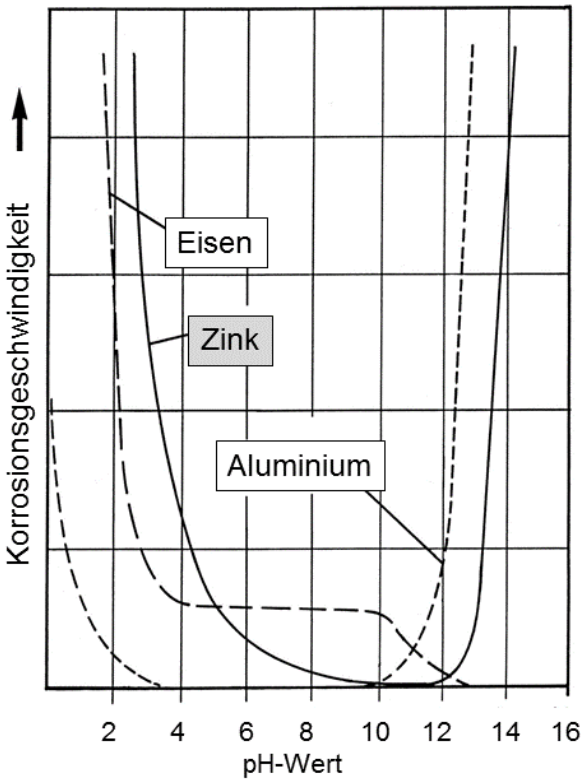


Bild 4.8:
Metallkorrosion in wässrigen Lösungen in Abhängigkeit vom pH-Wert [2]

Bei der Zinkkorrosion im Kontakt mit feuchtem/nassem Beton ist weiterhin zu beachten, dass Zink als sog. amphoteres Metall eine erhöhte Korrosionsgeschwindigkeit im alkalischen Bereich aufweist (**Bild 4.8**). Wenn somit feuchter/nasser Beton mit der Zinkoberfläche in losem Kontakt steht, dann ist dieses Wasser hochalkalisch, da unter solchen

Verhältnissen eine Carbonatisierung des Betons mit einhergehender Abminderung des pH-Wertes nicht erfolgt. In diesem Fall hat die erhöhte Alkalität des Betons somit einen weiteren unvorteilhaften Einfluss auf die Korrosion verzinkter Oberflächen im Kontakt mit Beton.

Die genannten Zusammenhänge sind wichtig für das Korrosionsverhalten von Spreizdübeln mit Zinküberzug, die im Bohrloch mit der Bohrlochwandung in Berührung kommen. Zu einem verstärkten Zinkabtrag bei Dübeln kam es beispielsweise in feuchten/nassen Betonen im bewitterten Außenbereich sowie in sehr dickwandigen beschichteten Betonen von Kernkraftwerken, bei denen die Austrocknung behindert ist (weitere Ausführungen hierzu siehe Abschn. 7.3.3 und 7.3.4).

4.7 Korrosionsschutz durch Zink-Nickel-Überzüge [8 bis 11]

Zum langzeitigen Korrosionsverhalten von ZnNi-Überzügen unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen liegen kaum veröffentlichte Erfahrungen vor. Die Überlegenheit des legierten Überzuges im Vergleich zum Reinzinküberzug wird vorwiegend durch das günstigere Verhalten bzw. Ergebnis im Salzsprühtest begründet (z. B. [10]).

Schutzmechanismus

Die Korrosionsbeständigkeit des ZnNi-Überzuges ist, wie in **Bild 4.9** gezeigt, abhängig vom Nickelgehalt. Die höchste Beständigkeit besteht bei Nickelgehalten zwischen 12 und 16 M.-%. Hierfür ist die Bildung der γ-Phase verantwortlich, die chemisch sehr stabil ist [10]. Bei der anfänglichen Auflösung von Zink-Nickel geht gewöhnlich Zink in Lösung. In der Folge wird ein dünner Nickelfilm auf der Oberfläche gebildet (Nickelanreicherung), der eine gewisse Barrierewirkung gegenüber einem Korrosionsangriff vorweist. Die Änderung der Schichtmorphologie an der Oberfläche bzw. der Zusammensetzung und Struktur sich bildender edlerer Oberflächenfilme sind somit für den verbesserten Korrosionsschutz im Vergleich zum Reinzink verantwortlich. Auf die Möglichkeit eines kathodischen Schutzes durch einen ZnNi-Überzug wurde in Abschn. 4.5 hingewiesen.

Einflüsse auf die Korrosion von ZnNi-Überzügen

Die Schutzdauer der Zink-Nickel-Legierung ist wie bei Reinzink von der Schichtdicke und von der Korrosivität der Umgebung abhängig. Unter Dauerfeuchte bieten geschlossene ZnNi-Überzüge allerdings ein deutlich besseres Verhalten als Reinzinküberzüge. Dies ist auf den unterschiedlichen Schutzmechanismus beider Überzugsmetalle zurückzuführen.

Auch in chloridsalzreicher feuchter Umgebung bietet der ZnNi-Überzug einen besseren Korrosionsschutz, was sich auch im unterschiedlichen Verhalten im Salzsprühtest (Abschn. 11) bemerkbar macht. Auf das nachteilige Verhalten von ZnNi-Überzügen für den Fall, dass bei Trommelware der spröde ZnNi-Überzug lokal abplatzt (Abschn. 8.3) und dass hierdurch der Korrosionsschutz zumindest lokal nicht vorhanden ist, wird im Rahmen der eigenen Untersuchungen hingewiesen.

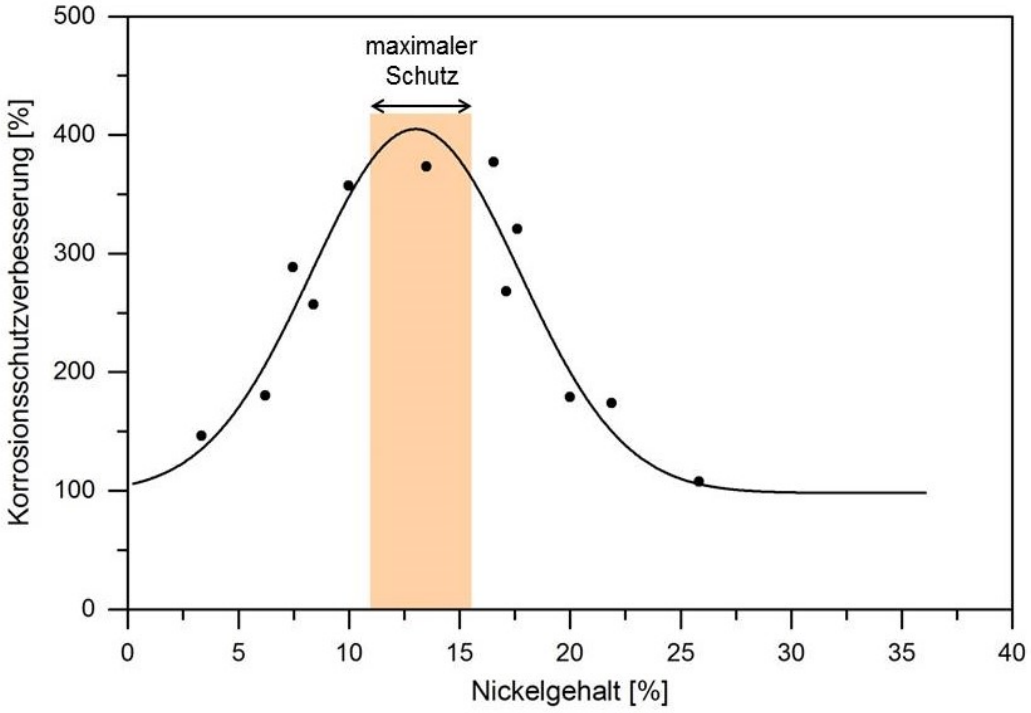


Bild 4.9:
Korrosionsbeständigkeit (normiert auf Reinzink, neutraler Salzsprühtest) von Zink-Nickel in Abhängigkeit vom Nickelgehalt [10]

Korrosionsabtrag von Zink-Nickel an der Atmosphäre

Zink-Nickel-Überzüge mit 12 bis 15 M.-% Nickel weisen bei gleicher Schichtdicke eine bessere Korrosionsbeständigkeit im Vergleich zu Reinzinküberzügen:

- Auf der Grundlage von Salzsprühtests wird in [10] bei gleicher Schichtdicke auf eine dreifach längere Beständigkeit von ZnNi-Überzügen im Vergleich zu Reinzinküberzügen bei korrosiver Belastung hingewiesen. Diese im Salzsprühtest festgestellten Unterschiede im Korrosionsverhalten zwischen Zink und ZnNi können jedoch nicht auf das Verhalten unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen übertragen werden (Abschn. 11).
- Für Gestellware wird von [36] in der Atmosphäre eine etwa 2,5fach höhere Beständigkeit im Vergleich zu Reinzink angegeben.

4.8 Korrosionsschutz durch Zink-Aluminium-Lamellenüberzüge [2, 16 bis 19]

Zum langzeitigen Korrosionsverhalten von ZnAl-Lamellenüberzügen unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen liegen kaum veröffentlichte Erfahrungen vor. Die Überlegenheit des ZnAl-Lamellenüberzuges im Vergleich zum Reinzinküberzug wird, wie bei ZnNi-Überzügen, vorwiegend durch das günstigere Verhalten im Salzsprühtest begründet.

Schutzmechanismus

Die erhöhte Korrosionsbeständigkeit der ZnAl-Lamellenüberzüge im Vergleich zur Verzinkung bei gleicher Schichtdicke ist auf den Barriereeffekt der lamellenförmig ausgebildeten Schichten zurückzuführen. Durch das zusätzlich enthaltene Aluminium im Über-

zug wird der Korrosionswiderstand des Zinks insbesondere in schwach saurer Umgebung heraufgesetzt. Die Abtragsgeschwindigkeit einer (intakten) Lamellenschicht ist wegen der inneren Passivierung geringer als für Zinküberzüge, wie z. B. galvanisch applizierte Verzinkungen. Auf die Möglichkeit eines kathodischen Schutzes durch einen ZnAl-Lamellenüberzug wurde in Abschn. 4.5 hingewiesen.

Einflüsse auf die Korrosion von ZnAl-Lamellenüberzügen

Die Schutzdauer von ZnAl-Lamellenüberzügen ist wie bei Reinzink von der Schichtdicke und von der Korrosivität der Umgebung abhängig. Unter Dauerfeuchte bieten gut haftende ZnAl-Lamellenüberzüge jedoch ein deutlich besseres Verhalten als Reinzinküberzüge. Dies ist auf den unterschiedlichen Schutzmechanismus beider Überzugsmetalle zurückzuführen.

Korrosionsabtrag von ZnAl-Lamellenüberzügen an der Atmosphäre

Zum langzeitigen Korrosionsabtrag unter baupraktischen Korrosionsbedingungen existieren für Chrom(VI)-haltige Systeme unveröffentlichte Erfahrungswerte [37]: In einer normalen Stadt-/Landatmosphäre wurde eine ca. dreifach geringere Abtragsgeschwindigkeit gegenüber Zinküberzügen ermittelt. In einer Meeresatmosphäre ist der Abtrag beim ZnAl-Lamellenüberzug 5 bis 8 mal geringer als bei einer Feuerverzinkung. Cr(VI)-freie ZnAl-Lamellenüberzüge sind den Cr(VI)-haltigen hinsichtlich des Korrosionsschutzes allerdings unterlegen.

Eine Überlegenheit der Zinklamellenschichten gegenüber einer normalen Verzinkung besteht vor allem in dauerfeuchter Umgebung, was mit dem verschiedenen Passivierungsverhalten der beiden Systeme zusammenhängt. Auch in chloridsalzreicher feuchter Umgebung zeigt ein ZnAl-Lamellenüberzug ein besseres Verhalten, was sich auch im unterschiedlichen Verhalten im Salzsprühtest (Abschn. 11) ausdrückt. Das im Salzsprühtest festgestellte Korrosionsverhalten kann allerdings nicht auf das Verhalten unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen übertragen werden.

Literatur Abschnitt 4

[1] A. Übleis: Einsatz und Grenzen verzinkter Befestigungsmittel. 3-Länder-Korrosionstagung „Befestigungsmittel im Hochbau“, Stuttgart 18./19.4.2007, Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR, Tagungsunterlagen, S. 49-58

[2] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

[3] P. Maaß, P. Peißker: Handbuch Feuerverzinken. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA, Weinheim, 2012

[4] DIN EN ISO 1461 „Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrachte Zinküberzüge (Stückverzinken)“ in der Ausgabe August 2009

[5] DIN EN ISO 10684 (2011) „Verbindungselemente - Feuerverzinkung“

[6] Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl. Gemeinschaftsausschuss Verzinken GAV, Düsseldorf, 2001

[7] W. Paatsch: Die funktionelle galvanische Verzinkung. Korrosionsschutzmöglichkeiten und Erläuterungen. Galvanotechnik 81 (1990), 2352-2357

[8] P. Preikschat, R. Jansen: Chromatierungen und Passivierungen auf Zink und Zinklegierungen, Jahrbuch Oberflächentechnik 57 (2001), 71-83

[9] M. Silomon: Werkstoffkundliche Betrachtung von galvanischen Zink- und Zinklegierungsüberzügen und deren Nachbehandlungen. Galvanotechnik 91 (2000), 2932 – 2939

[10] Ch. Schade, H. Käszmann: Korrosionsschutz der Spitzenklasse - Galvanisch abgeschiedenes Zink-Nickel auf Eisenwerkstoffe. WoMag (2013), 1-6

[11] B. Gysen: Anwendung von Zink-Nickel-Legierungen als Kadmiumersatz zum Korrosionsschutz hochfester Stähle. Dissertation Universität Dortmund, 2000

[12] DIN EN ISO 2081 (2009) Metallische und andere anorganische Überzüge - Galvanische Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlicher Behandlung

[13] DIN EN ISO 4042 (2018) Verbindungselemente - Galvanisch aufgebrachte Überzugssysteme

[14] DIN 50979 (2008) Metallische Überzüge - Galvanische Zink- und Zinklegierungsüberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlichen Cr(VI)-freien Behandlungen

[15] W. Paatsch, R. Landgrebe, M.M. Lohrengel: Wasserstoffgefährdungspotenzial von Zink- und Zink-Nickel-Beschichtungen bei hochfesten Bauteilen aus Stahl. In: Galvanotechnik, 2009, S. 1280-1287

[16] S. Beyer: Chrom (VI)-freie Zinklamellen-Überzüge für Verbindungselemente in der Automobilindustrie. Vortrag beim Stuttgarter DGO-Seminar am 13.12.2001

[17] VDA-AK Mechanische Verbindungselemente: Chrom(VI)freie Zinklamellenüberzüge Teil 2: Korrosionsschutzuntersuchungen. Abschlussbericht, Februar 2002

[18] VDA-AK Mechanische Verbindungselemente: Untersuchung und Bewertung neuer Cr(VI)-freier Zinklamellenüberzüge für Verbindungselemente im Vergleich zu herkömmlichen Zinklamellenüberzügen. Abschlussbericht zum Großversuch 2001 der VDA AG CR(VI)-freie Zinklamellenüberzüge

[19] T. Kahle: Korrosionsschutzverfahren auf Zink/Aluminium-Lamellenbasis. Galvanotechnik 92 (2001), 2367-2369

[20] H. W. Belz: Delta-Tone, eine anorganische Beschichtung mit hohen Korrosionsschutzeigenschaften. Techn. Mitteilungen Essen 91 (1998), 148-154

[21] DIN EN ISO 10683 (2014) Verbindungselemente - Nichtelektrolytisch aufgebrachte Zinklamellenüberzüge

[22] DIN EN 13858 (2007) Korrosionsschutz von Metallen - Nicht elektrolytisch aufgebrachte schuppenförmige Zinküberzüge auf Werkstücken aus Eisen und Stahl

[23] U. Nürnberger: Bimetallkorrosion von Aluminium in der Bautechnik - ein oft überbewertetes Problem. In: Aluminium - bereit für die Zukunft. GfKORR - Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V., Tagung Frankfurt, November 2011, Unterlagen S. 74-89

[24] Zink im Bauwesen. GfKORR-Tagung, FH Würzburg-Schweinfurt, 2004, Tagungsunterlagen

[25] B. Schuhmacher, D. Wolfhard: Korrosionsbeständigkeit metallisch und organisch veredelter Stahlfeinbleche in der Freibewitterung. Materials and Corrosion 49 (1998), 725-735

[26] U. Nürnberger: Sind Vorbehalte gegenüber einer Verwendung verzinkter Bauteile in Hallenbädern gerechtfertigt? Stahlbau 81 (2012)12, 49-56

[27] M. Zecho: Korrosionsverhalten von Zink- und Zink-Aluminium-Überzügen auf Stahl. Dissertation Universität Stuttgart 1999, Schriftenreihe des Otto-Graf Institutes der Universität Stuttgart, Nr. 85, 2000.

[28] U. Nürnberger, M. Zehnder: Condition of Galfan-coated open spiral ropes after 15 years in the atmosphere of a brine bat. Materials and Corrosion 67 (2016), 652-659

[29] DIN EN ISO 9224 (2012) Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Anhaltswerte für die Korrosivitätskategorien

[30] J. Rückert: Korrosionsverhalten von Metallen in Verbindung mit Holz. Werkstoffe und Korrosion 37 (1986), 336-339

[31] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten der Baumaterialien in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Holz. In: Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage, 8.-9. Oktober 2009, Universität Karlsruhe, Tagungsband S. 47-64

[32] M. Tuchschmid, R. Werner: Vergleichende Untersuchungen korrosiver Brandgaskondensate. Allianz Report (2001) 5

[33] U. Nürnberger: Gutachten und Langzeitauslagerungen im Auftrag von Firmen

[34] U. Nürnberger: Beitrag zur Überarbeitung der DIN EN 1995-1-1/A2 (Stand Mai 2016) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten -Teil 1-1: Allgemeines

[35] DIN EN 14592 (Stand Juli 2017) Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen; europäischer Vorschlag

[36] M. Silomon: Persönliche Auskunft

[37] Firma Dacral, Markgröningen: Vergleich Dacromet/Feuerverzinkung, 2002

5. Passivierung und Deckbeschichtungen metallischer Überzüge

5.1 Chromatierung und Passivierung

Zum Zwecke des Korrosionsschutzes, vor allem unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen, werden Kleinteile für die Befestigungstechnik mit elektrolytisch / galvanisch abgeschiedenen dünnen Überzügen aus Reinzink oder Zinklegierungen, hier vor allem Zink-Nickel, versehen (Abschn. 4.3). Die galvanische Aufbringung dickerer Schichten ist unwirtschaftlich. Dünne Schichten gewährleisten allerdings nur einen begrenzten Korrosionsschutz. Deshalb werden galvanisch erzeugte metallische Überzüge in der Befestigungstechnik und auch anderweitig in Verbindung mit einer zusätzlichen Passivierung angewendet.

Passivierungsverfahren

Die galvanisch erzeugten Zink- und Zinklegierungsüberzüge werden zur Verbesserung der Korrosionsschutzeigenschaften beispielsweise durch bloßes Tauchen in eine wässrige Chromatierungslösung zusätzlich passiviert, wobei durch Reaktion mit dem Metalluntergrund chromhaltige Schutzschichten (Passivschichten) von etwa 0,01 bis etwa 1 µm (10 bis 1000 nm) Dicke gezielt aufgebaut werden [1 bis 4]. Dadurch wird der Korrosionsangriff auf den metallischen Überzug verzögert und der Korrosionsschutz des Gesamtsystems erhöht.

Wegen der Problematik des sechswertigen Chroms (siehe unten) wird häufig zwischen chrom(VI)-haltigen „Chromatierungen“ und chrom(VI)-freien „Passivierungen“ sprachlich unterschieden:
Von **Chromatieren** spricht man, wenn Chrom(VI)-haltige Prozesslösungen verwendet werden. Hierzu wird bei einem entfetteten und gebeizten Teil durch Tauchen in einer modifizierten Chromsäurelösung nach einem Auflösungs-Ausfällungsmechanismus eine komplexe Zinkchromatschicht aufgebaut.

Bei den Chromatschichten sind als Inhibitoren wirkende Cr(VI)-Ionen in die Schicht eingebaut. Da diese durch Wasser ausgewaschen werden können und eine toxische Wirkung aufweisen, wurde die Anwendung Chrom (VI)-haltiger Korrosionsschutzsysteme in manchen Branchen verboten und diese werden auch in der Bautechnik nur noch beschränkt eingesetzt. Lösliche Chromate in der Chromatierung sind in der Lage, an Beschädigungen der Chromatschicht erneut schwerlösliche Chromatverbindungen zu bilden und Schadstellen durch Passivierung auszuheilen (Selbstheilungseffekt).

Wegen der Giftigkeit Cr(VI)-Ionen haltiger Chromatschichten versucht man diese durch **Cr(III)-Ionen haltige Überzüge** zu ersetzen. Bei diesen ungiftigen Passivierungen kommen (Chrom(VI)-freie) Konzentrate auf Chrom(III)-Basis zum Einsatz. Ein Nachteil der Cr(VI)-freien Passivierungen gegenüber den Cr(VI)-haltigen Schichten ist, dass diese Schichten insgesamt weniger gut schützen und keinen Selbstheilungseffekt zeigen. Somit bewirkt jede Verletzung der Passivierung eine Verringerung der Schutzwirkung.

Chromatierungen und Chrom(III)-Passivierungsschichten weisen prinzipiell den glei-

chen Aufbau, jedoch unterschiedliche Dicken und ein unterschiedliches Korrosionsschutzverhalten auf. Man unterscheidet folgende Passivierungsarten:

- Die **Chrom(VI)-haltige Gelbchromatierung** mit einer Schichtdicke von etwa 250 bis 500 nm (meist um 300 nm) schützt erheblich besser als Cr(VI)-freie Passivierungen. Dieses Verfahren hat wegen seines hervorragenden Korrosionsschutzes und seiner Wirtschaftlichkeit große Verbreitung gefunden.
- Bei der **Blaupassivierung und Transparentpassivierung** auf **Chrom(III)-Basis** mit Dicken von 25 bis 80 nm ist der Korrosionsschutz schwächer.
- **Chrom(III)-basierte Dickschichtpassivierungen** mit 300 bis 500 nm Dicke, haben eine vergleichbare Schutzwirkung wie die Gelbchromatierung und sollen diese ersetzen. Allerdings haben die Qualität des Grundmaterials und die Art der Bauteile einen deutlich höheren Einfluss auf die erzielbare Schutzwirkung. Besonders kritisch sind Teile mit scharfen Kanten, Stanzgraten oder ungleichmäßiger Oberfläche.

Korrosionsschutz

Für den Korrosionsschutz von Passivierungen ist hauptsächlich die Dicke sowie Dichtigkeit und Härte der Schicht verantwortlich und somit nicht der Gehalt an sechswertigem Chrom [4]. Die zumeist dünneren Passivierungen schützen im Regelfall weniger gut als die Chromatierung. Der Schutzmechanismus von Passivierungen besteht im Wesentlichen in einer kinetischen Hemmung der anodischen und kathodischen Teilreaktion der Zinkkorrosion.

In Wasser und feuchter Luft, nicht jedoch in Säuren und Alkalien, haben diese eine gute Beständigkeit. Von den in der Bautechnik bisher üblichen Chromatierungen wurde beispielsweise die Gelbchromatierung auch unter aggressiveren Umweltbedingungen eingesetzt. Bei einer zusätzlichen Blaupassivierung geht man davon aus, dass ein wirksamer zusätzlicher Schutz lediglich in schadstofffreier Atmosphäre besteht. Beide Passivierungen schützen auch unter Bedingungen, unter denen sich carbonatische Deckschichten beim Zink nur erschwert ausbilden können und es deshalb zu einer höheren Korrosionsrate beim Zink kommt. Solche Verhältnisse treten auf, wenn Oberflächen kaum abtrocknen können und/oder der Zutritt von Luft (Kohlendioxid) durch aufliegende Wasserfilme oder konstruktive Gegebenheiten (Spalte) behindert ist (Abschn. 4.6.1).

Der Schutzwert unterschiedlicher Schichtdicken von Chromatierungen äußert sich auch im Ergebnis von Salzsprühtests [4]: Während die Chrom(VI)-freie, etwa 25 bis 80 nm dicke Blaupassivierung einen zusätzlichen Korrosionsschutz für 10 bis 40 Stunden ausübt, beträgt dieser zusätzliche Schutz bei der Chrom(VI)-haltigen, etwa 250 bis 500 nm dicken Gelbchromatierung 100 bis 200 Stunden.

5.2 Deckbeschichtungen (Topcoats)

Die Korrosionsschutzwirkung von insbesondere dünneren metallischen Überzügen ohne und mit Passivierung kann durch eine abschließend aufgebrachte dünne organische Deckbeschichtung, auch als „Topcoat“ bezeichnet, zusätzlich verbessert werden. Häufig steht jedoch bei der Applikation einer Deckbeschichtung die Verbesserung der

Gleiteigenschaften bzw. gezielte Einstellung von Reibbeiwerten (wichtig für Schraubverbindungen) im Vordergrund, weshalb diese auch als Gleitmittel bezeichnet werden.

Die Deckbeschichtung ist eine sehr dünne Beschichtung mit Mitteln auf Wachsbasis, silikatischer Basis oder Polymerbasis: Sie werden angeboten auf der Basis von Acrylaten, Polyester, PE-Wachsen, Silikaten, Silanen und Siloxanen. Durch Nanopartikel als Füllstoffe können weiter verbesserte Eigenschaften erzielt werden. Typische Schichtdicken betragen 0,5 bis 2 µm. Die Deckbeschichtung wird meist nass (z. B. im Tauch-Schleuder-Verfahren) aufgebracht. Dabei zieht diese in die noch nicht ausgehärtete Passivschicht ein und bildet einen besseren Verbund. Weitere Ausführungen sind Abschn. 8.7 zu entnehmen.

Literatur Abschnitt 5

[1] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

[2] M. Silomon: Werkstoffkundliche Betrachtung von galvanischen Zink- und Zinklegierungsüberzügen und deren Nachbehandlungen. Galvanotechnik 91 (2000), 2932-2939

[3] R. Vogel, B. Sonntag: Zink-Eisen, Zink-Kobalt und Nachbehandlungsverfahren in der Praxis. Galvanotechnik 91 (2000), 2970-2976

[4] P. Preikschat, R. Jansen: Chromatierungen und Passivierungen auf Zink und Zinklegierungen, Jahrbuch Oberflächentechnik 57 (2001), 71-83

6. Korrosionsschutz durch Verwendung nichtrostender Stähle [1-4]

6.1 Allgemeine Zusammenhänge

„Nichtrostende Stähle“ sind hochlegierte Stähle, bei denen bei ausreichendem Legierungsgehalt, im Gegensatz zu den unlegierten und niedriglegierten Stählen, unter natürlichen Umweltverhältnissen und in wässrigen, annähernd neutralen wässrigen Medien keine Flächenkorrosion und Rostbildung auftritt. Deshalb ist bei diesen Stählen ein zusätzlicher Schutz in der Regel nicht notwendig. Nichtrostende Stähle haben sich durch ihre hervorragende Langzeitkorrosionsbeständigkeit in natürlich auftretender Umgebung bewährt und werden heute vermehrt in der Befestigungstechnik eingesetzt [5].

Nichtrostende Stähle besitzen gegenüber unlegierte bzw. niedriglegierte Stähle eine geringere Festigkeit. Durch gezielte Legierungsentwicklung und definierte Weiterverarbeitung ist es möglich, Stähle für Befestigungselemente mit immer höheren Festigkeits- und besseren Korrosionseigenschaften herzustellen [6].

Der Stahl benötigt für dieses Korrosionsverhalten ein Chromgehalt (Cr) von mindestens etwa 11 M.-% sowie einen Oxidationsmittel wie Sauerstoff im umgebenden Medium. Diese Voraussetzung ist bei Kontakt mit der Atmosphäre und mit sauerstoffhaltigen Wässern gegeben. In Gegenwart von Sauerstoff wird die Oberfläche passiviert und damit Korrosionsschutz gegenüber einer Vielzahl von chemischen angreifenden Stoffen erreicht. Unter Passivierung versteht man, dass sich der Stahl, nachdem sich Passivschichten (schützende Oxidschichten) auf der Stahloberfläche gebildet haben, im Zustand einer starken Reaktionshemmung der Eisenauflösung befindet.

Die Korrosionsbeständigkeit des Stahls gegenüber den möglichen Korrosionsarten wird durch Erhöhung der Gehalte an Chrom und/oder Zulegieren weiterer Elemente wie Nickel (Ni) und/oder Molybdän (Mo) sowie Stickstoff (N) weiter verbessert. Durch Auswahl und Variation der Gehalte der Legierungselemente wird bei den nichtrostenden Stählen ein spezieller Gefügezustand erzeugt. Deshalb erfolgt bei diesen Werkstoffen eine Einteilung nach ihrem Gefügezustand und zwar in ferritische, austenitische, ferritisch-austenitische und martensitische Stähle. Sie weisen Unterschiede in ihren physikalischen, mechanischen und Korrosionseigenschaften auf [3].

Für metallische Verbindungsmittel und angrenzende Bauteile werden die in **Tabelle 6.1** genannten Stähle verwendet, die unterschiedliche Gehalte an den genannten Legierungselementen aufweisen. Chrom stabilisiert die Passivschicht, Molybdän verbessert vor allem das Korrosionsverhalten in Anwesenheit von Chloriden und Nickel ist primär für die Säurebeständigkeit verantwortlich. Da in konstruktiven Spalten in Anwesenheit von z. B. Eisenchlorid $FeCl_2$ auch eine Ansäuerung des Elektrolyten im Spalt infolge Hydrolyse möglich ist (Abschn. 6.2), steigert Nickel auch die Beständigkeit gegenüber Spaltkorrosion und bei erhöhten Gehalten auch die Beständigkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion.

Die Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC I bis CRC V in **Tabelle 6.1** fassen verschiedene Legierungen zusammen, die unter gleichen Korrosionsbelastungen eine vergleich-

bare Korrosionsbeständigkeit zeigen. Die Beständigkeit nimmt in der Reihenfolge CRC I bis CRC V zu. Stähle aus einer höheren Korrosionsbeständigkeitsklasse zu verwenden ist grundsätzlich möglich, aber in der Regel unwirtschaftlich. Es werden Innen- und Außenbereiche unterschieden. Stähle in CRC I gelten bevorzugt für Innenräume und die Stähle in CRC II bis CRC V bevorzugt für den Außenbereich. Als Innenbereich gelten beheizte und/oder belüftete geschlossene Räume. Gebäude mit großen Öffnungen nach außen, z. B. Parkhäuser, sind dem Außenbereich zuzuordnen.

Passive Stähle sind bei nicht ausreichendem Legierungsgehalt gegenüber bestimmten Korrosionsarten (korrosions)empfindlich, wenn spezifische Medien angreifen. Dabei sind vor allem in wässrigen Medien gelöste Chloride (in Meerwasser und Tausalz vorhanden) Korrosion auslösend:

- Hierzu gehört vor allem die sog. **Lochkorrosion**. Es handelt sich um einen örtlichen Angriff, der unter Rostbildung abläuft.
- Die Lochkorrosion, ist verstärkt, wenn Bauteile aus Edelstahl untereinander oder im Kontakt mit anderen Materialien Spalte bilden. Man spricht dann von **Spaltkorrosion**.
- Des Weiteren gibt es die **Spannungsrisskorrosion** und **interkristalline Korrosion**; dabei handelt es sich um über Rissbildung verlaufende Korrosionsarten.

Gefüge	Werkst. Nr.	Kurzname	CRC
ferritisch ferritisch ferritisch	1.4003 1.4016 1.4512	X2CrNi 12 X6Cr 17 X2CrTi 12	I gering
austenitisch austenitisch austenitisch ferrit.-austenit.	1.4301 1.4567 1.4311 1.4482	X5CrNi 18-10 X3CrNiCu 18-9-4 X2CrNiN 18-10 X2CrMnNiMoN 21-5-3	II mäßig
austenitisch austenitisch austenitisch austenitisch ferrit.-austenit. ferrit.-austenit. ferrit.-austenit.	1.4401 1.4404 1.4578 1.4571 1.4362 1.4062 1.4162	X5CrNiMo 17-12-2 X2CrNiMo 17-12-2 X3CrNiCuMo 17-11-3-2 X6CrNiMoTi 17-12-2 X2CrNiN 23-4 X2CrNiN 22-2 X2CrMnNiN 21-5-1	III mittel
austenitisch ferrit.-austenit	1.4439 1.4462	X2CrNiMoN 17-13-5 X2CrNiMoN 22-5-3	IV stark
austenitisch austenitisch	1.4565 1.4529	X2CrNiMnMoN 25-18-6-5 X1NiCrMoCuN 25-20-7	V sehr stark

Tabelle 6.1:
Einteilung der nichtrostenden Stähle in Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC (Auswahl: Verbindungsmittel und Anbauteile in der Befestigungstechnik) [7]

Regen oder Kondenswasser ist für nichtrostende Stähle völlig unbedenklich. Auch der geringe Schwefeldioxidgehalt der Atmosphäre schadet für sich allein diesem Werkstoff nicht, da die Passivschicht gegenüber verdünnten Säuren beständig ist.

Der Korrosionsmechanismus der nichtrostenden Stähle unterscheidet sich grundsätzlich von jenem der metallischen Überzüge: Während in einem korrosionsauslösenden Medium wie einer chloridhaltigen wässrigen Lösung ein schützender metallischer Zinküberzug allmählich abgetragen wird, u. U. jedoch zumindest einen temporären Korrosionsschutz bietet, beginnt ein nichtrostender Stahl sofort zu korrodieren, falls der Legierungsgehalt nicht ausreicht (**Bild 6.1**).

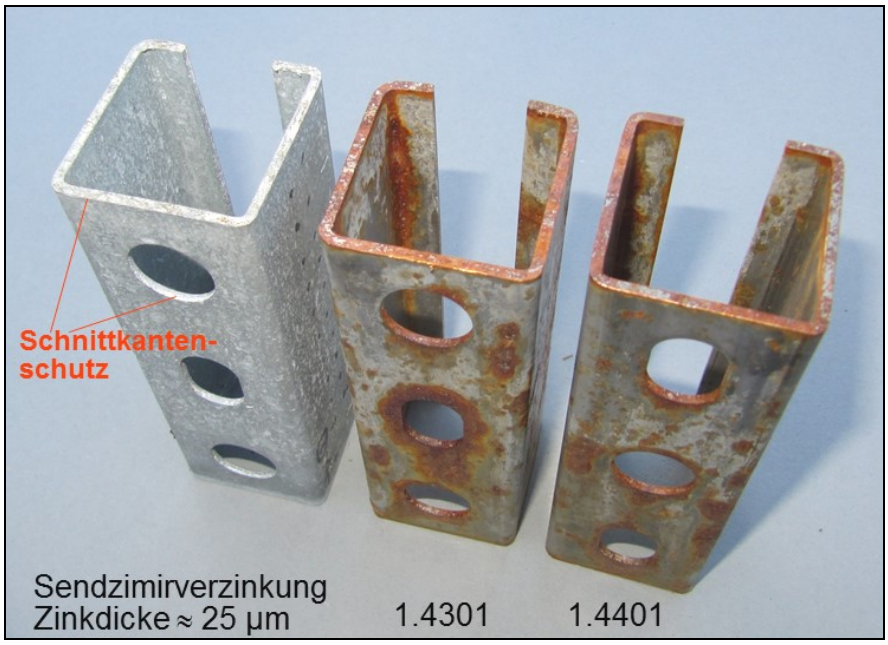


Bild 6.1:
Korrosionsverhalten von verzinkten und nichtrostenden Halteschienen nach ½-jährigem Besprühen (alle 3 Tage) mit chloridhaltiger Lösung (Quelle: Vorlesung Nürnberger)

6.2 Maßgebliche Korrosionsarten

6.2.1 Loch- und Spaltkorrosion

Mechanismus der Lochkorrosion

Lochkorrosion wird durch eine Wechselwirkung zwischen Chloridionen (in Wasser gelöste Chloridsalze) und der schützenden Passivschicht eingeleitet. Dabei wird die Passivschicht lokal durchbrochen. In der Folge bilden sich nadelstichartige Vertiefungen und durch deren Wachstum Lochkorrosionsstellen. Lochkorrosion auslösende Schadstoffe im Bauwesen sind meist die Chloridionen aus Meerwasser, Aerosolen oder Tausalznebeln.

Mechanismus der Spaltkorrosion

Nicht ausreichend hoch legierte Stähle können in lochkorrosionserzeugenden wässrigen Angriffsmitteln, insbesondere chloridhaltige wässrigen Medien, im besonderen Maße durch Spaltkorrosion gefährdet sein, falls Verbindungselemente wie z. B. Schraubenverbindungen oder sich überlappende bzw. im losen Kontakt stehende Bauteile untereinander Spalte bilden.

Die Spaltkorrosion ist eine in Spalten ablaufende verstärkte Lochkorrosion. Unter Bedingungen der Spaltkorrosion kommt es zu einer Sauerstoffverarmung im Spalt, was zu

einer erschwerten Passivierung führt. Bei Anwesenheit von Chloriden kommt es weiterhin zu einer Aufkonzentrierung von Chloridionen im Spalt und zu einer Hydrolyse der Korrosionsprodukte führt. Dabei kommt es unter Sauerstoffverarmung zu einer Ansäuerung des Spaltelektrolyten infolge Hydrolyse von Eisenchlorid ($FeCl_2$):

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl$$

Der pH-Wert kann dadurch auf etwa 4 bis 5 abfallen.

Verglichen mit Lochkorrosion in spaltenfreien Bereichen tritt Spaltkorrosion bei nichtrostenden Stählen in Anwesenheit von Schadstoffen wie Chloridionen daher schon bei deutlich schwächerer Korrosionsbelastung auf. Anders ausgedrückt: Bei vergleichbarer Korrosionsbelastung (z. B. bei Angriff von Meerwasser) ist die Korrosion (Spaltkorrosion) in spaltbehafteten Bereichen erheblich stärker ausgeprägt als die Lochkorrosion in spaltenfreien Bereichen.

Spalte haben nur dann einen negativen Einfluss auf das Korrosionsverhalten von nichtrostenden Stählen, wenn aufgrund ausreichend hoher Chloridgehalte und/oder sehr hoher Schwefeldioxidgehalte in der Luft sowie auch Anwesenheit von Wasser die grundsätzliche Bereitschaft für (Loch-) Korrosion vorhanden ist. Diese Voraussetzungen werden in der Befestigungstechnik, beispielsweise im Hinterlüftungsbereich von Fassaden, zumeist nicht erfüllt.

Einflüsse auf die Loch- und Spaltkorrosion

Die Beständigkeit der nichtrostenden Stähle hinsichtlich Loch- und Spaltkorrosion wird durch werkstoffseitige und umgebungsbedingte Einflüsse begünstigt:

Werkstoffeinfluss. Auf die Loch- und Spaltkorrosion haben stahlseitig insbesondere die Legierungselemente Chrom (Cr) und Molybdän (Mo), des Weiteren auch Stickstoff (N) einen Einfluss. Neben dem Molybdän, das schon in geringen Gehalten einen günstigen Einfluss auf die Lochkorrosion hat, hat Chrom den größten Einfluss auf die Lochkorrosionsbeständigkeit in chloridhaltigen wässrigen Medien. Die Beständigkeit gegenüber Loch- und Spaltkorrosion kann annähernd durch die Wirksumme

$$WS = 1\ \%\ Cr + 3{,}3\ \%\ Mo + (16\text{-}30)\ \%\ N$$

abgeschätzt werden. Mit Zunahme der Wirksumme ist eine Erhöhung der Beständigkeit gegenüber chloridinduzierter örtlicher Korrosion verbunden. Einige in der Befestigungstechnik häufig eingesetzte Stähle weisen folgende Wirksummen auf:

1.4301 (X5CrNi 18-10)	18
1.4567 (X3CrNiCu18-9-4)	18
1.4401 (X5CrNiMo 17-12-2)	24
1.4571 (X6CrNiMoTi 17-12-2)	24
1.4529 (X1NiCrMoCuN 25-20-6)	42

In normaler **Stadtatmosphäre** sind Wirksummen um 24 (Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC III) ausreichend, um Korrosion zu verhindern. Für die meisten technischen Anwendungen in Stadtatmosphäre, bei denen die Tragfähigkeit und nicht die Optik im Vordergrund steht, reichen allerdings bereits nichtrostende Stähle mit einer

Wirksumme von 18 (Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC II) aus. Bei diesen Stählen ist jedoch auf Dauer mit einer gewissen Rostablagerung infolge mit dem Auge kaum wahrnehmbarer Lochkorrosion bei nicht optimaler Oberflächengüte zu rechnen.

Um bei einem nichtrostenden Stahl absolute Korrosionsbeständigkeit in chloridhaltiger Umgebung (z. B. bei **Angriff von Meerwasser** oder von chloridhaltigen Lösungen) zu erreichen, wäre bei spaltenfreien Konstruktionen je nach Oberflächenzustand eine Wirksumme oberhalb 30 bis 35 notwendig. Bei spaltbehafteten sicherheitsrelevanten Konstruktionen (z. B. Schraubverbindungen oder sich überlappenden Bauteilverbindungen) empfehlen sich Wirksummen im Bereich von 40 und höher.

Nickel verbessert zusätzlich die Beständigkeit gegenüber Spaltkorrosion. Die Ursache dafür ist, dass Nickel sich günstig auf das Korrosionsverhalten in sauren Medien auswirkt und dass in Spalten eine Möglichkeit der Ansäuerung eines vorhandenen Elektrolyten durch Hydrolyse besteht.

Oberflächeneinfluss. In lochkorrosionserzeugenden Medien hängt die Korrosionsbeständigkeit auch von der Oberflächengüte der Stahlteile ab. Sie ist grundsätzlich umso besser, je glatter und homogener die Oberflächen sind, da hierdurch der für die Korrosionsbeständigkeit erforderliche Aufbau von Passivschichten begünstigt wird. Aus korrosionstechnischer Sicht nimmt die Oberflächengüte etwa in der Reihenfolge

verzundert - gestrahlt - geschliffen - gebeizt - poliert

zu. Kaltumgeformte Oberflächen entsprechen hinsichtlich ihrer Anfälligkeit etwa dem Zustand geschliffen. Die Oberflächengüte hat unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen aus ingenieurmäßiger Sicht (Tragfähigkeit) i. a. jedoch nur einen untergeordneten Einfluss.

Einfluss einer Schweißung. Auch ein Schweißen, z. B. bei Anbauteilen, führt in der Umgebung der Schweißverbindung zu einer korrosionschemisch ungünstigeren Oberfläche. Schweißverbindungen, die nicht unter Schutzgas erstellt werden, weisen unmittelbar neben der Schweißnaht einen schmalen Saum sog. Anlauffarben auf (dünne Oxidschichten, die sich wegen der vorherrschenden hohen Temperaturen des Lichtbogens von 3000 bis 4000 °C bilden), welche das Korrosionsverhalten (die Passivierung) von nichtrostenden Stählen an diesen Stellen unter Korrosionsbelastung nachteilig beeinflussen können. Zum Zwecke des Korrosionsschutzes wird daher bei geschweißten Konstruktionen häufig die Beseitigung von schweißbedingten Anlauffarben gefordert. Bei Verbindungsmitteln spielen diese Zusammenhänge zumeist keine Rolle, da an diesen zumeist nicht geschweißt wird. Falls dieses doch erfolgt, z. B. bei Anschweißankern bzw. Halteankern im Fassadenbau, wären schweißgeeignete Stähle erforderlich (siehe unten: interkristalline Korrosion).

Umgebungseinfluss. Die Lochkorrosion wird seitens der Umgebung durch zunehmende Chloridgehalte und Temperaturen sowie fallende pH-Werte (Ansäuerung) verstärkt. Insbesondere saure Medien, die durch Chloridionen angereichert sind, jedoch in einer normalen Stadtatmosphäre nicht vorliegen, sind daher besonders kritisch. In Hallenschwimmbädern und Tunneln beispielsweise kommen häufig saure chloridhaltige

Elektrolyte vor, wodurch Konstruktionen und Verbindungsmittel aus nicht ausreichend hoch legierten nichtrostenden Stählen gefährdet sind.

6.2.2 Interkristalline Korrosion

Mechanismus

Bei der interkristallinen Korrosion, die auch „Kornzerfall“ genannt wird, werden schmale korngrenzennahe Bereiche selektiv aufgelöst. Dadurch entsteht das Bild eines netzförmigen Vordringens von Korrosionspfaden in das Metall hinein. Diese Korrosionsart kann in der Befestigungstechnik bei geschweißten Anbauteilen und geschweißten Ankern (Anschweißankern) eine Rolle spielen. Interkristalline Korrosion wurde allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht, da sie primär von stahlseitigen und verarbeitungsbedingten Einflüssen abhängt.

Der Kohlenstoffgehalt der Stähle hat in Verbindung mit bestimmten Wärmebehandlungen (z. B. das Schweißen dieser Stähle bei größeren Abmessungen) Einfluss auf diese Korrosionsart. Der Wärmeeintrag in den Stahl ist bei größeren Abmessungen größer als bei kleineren. Dies führt bei dicken gegenüber dünneren Abmessungen zu einer langsameren Abkühlung der Bauteile und die Erwärmung auf hohe Temperaturen erfolgt länger. Dies hat zur Folge, dass es bei Temperaturen zwischen 450 und 800 °C durch zeitabhängige Diffusionsvorgänge im Werkstoff zur Bildung von Chromcarbiden (z. B. $(Fe,Cr)_{23}C_6$) kommt. Die Keimbildung dieser Carbide ist im Bereich der Korngrenzen erleichtert. Dadurch werden Carbidausscheidungen bevorzugt auf den Korngrenzen gebildet, wobei der Gehalt an gelöstem (korrosionsschützendem) Chrom in Korngrenzennähe zwangsläufig abnimmt. Dieser Vorgang wird als Sensibilisierung bezeichnet, falls der Chromgehalt in der Nähe von Korngrenzen so stark abgemindert wird, dass hier die Resistenzgrenze von etwa 10 bis 13 M.-% an gelöstem Chrom unterschritten wird.

Demnach kommt es in unmittelbarer Korngrenzennähe zu einer Verminderung des Korrosionswiderstandes: Bei Angriff bestimmter korrosiver Medien können sich diese Bereiche deshalb interkristallin (entlang der Korngrenzen) auflösen. Dies hat zur Folge, dass ein Zusammenhalt der oberflächennahen Körner nicht mehr gegeben ist. Der tragende Querschnitt wird bei fortgesetztem Angriff vermindert und einzelne Risskeime können bei mechanischer Beanspruchung des Bauteils auch in eine über Rissbildung verlaufende Korrosion (Spannungsrisskorrosion) überleiten.

Einflüsse auf die interkristalline Korrosion

Die Beständigkeit der nichtrostenden Stähle gegenüber interkristalliner Korrosion wird durch werkstoffseitige, bauteilseitige und umgebungsbedingte Einflüsse begünstigt:
Werkstoffeinfluss. Stahlseitig nimmt die Anfälligkeit mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt zu, da die Möglichkeit einer Sensibilisierung (Bildung von Chromcarbiden auf den Korngrenzen) bei erhöhter Wärmeeinbringung mit dem Kohlenstoffgehalt steigt. Beispielsweise bei dem Werkstoff 1.4401 ist mit Sensibilisierung zu rechnen,

- wenn bei normgerechtem Kohlenstoffgehalt (<0,07 M.-%) die zulässige Bauteildicke (siehe unten) überschritten wird und/oder

- wenn der Kohlenstoffgehalt >0,07 M.-% beträgt.

Bauteileinfluss. Bauteilseitig nimmt die Empfindlichkeit (Möglichkeit einer Sensibilisierung) mit zunehmender Werkstoffdicke zu (siehe oben):
- da beim Schweißen der Wärmeeintrag mit der Bauteilabmessung zunimmt
- und die Wärmeabfuhr bei dickwandigen Bauteilen langsamer erfolgt als bei dünneren.

In der wärmebeeinflussten Zone einer Schweißnaht ist somit mit einer Sensibilisierung des Gefüges bevorzugt bei dickwandigen Teilen zu rechnen.

Umgebungseinfluss. In der Fachliteratur [1, 4] wird herausgestellt, dass seitens der Umgebung interkristalline Korrosion bei sensibilisiertem Werkstoff vor allem bei Angriff von Säuren oder chloridionenhaltigen wässrigen Medien stattfinden kann. Schäden, die durch interkristalline Korrosion entstanden sind, werden beispielsweise auf den Kontakt von sensibilisierten Werkstoffen mit saurem Kondensat wie schweflige Säure zurückgeführt [8]. Die Bildung derartiger Säuren ist auch unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen möglich, wenn diese erhöhte Gehalte an Schwefeldioxid aufweist. In [9] wird darauf hingewiesen, dass in Werkstoffbereichen mit stark überhöhtem Kohlenstoffgehalt bis 0,2 M.-% und hohem Sensibilisierungsgrad bereits dauerhafter Feuchtigkeitszutritt interkristalline Korrosion ermöglicht.

6.2.3 Spannungsrisskorrosion

Mechanismus

Spannungsrisskorrosion ist eine bei nichtrostenden Stählen, über transkristalline Rissbildung verlaufende Korrosion.

Einflüsse auf die Spannungsrisskorrosion

Spannungsrisskorrosion kann auftreten, wenn gleichzeitig folgende Bedingungen zutreffen:
- die Bauteiloberfläche steht unter Zugspannungen,
- Angriff eines spezifisch wirkenden Mediums (meist Chloridionen),
- es besteht eine werkstoffbedingte Anfälligkeit gegenüber dieser Korrosionsart.

Werkstoffeinfluss. Die Beständigkeit der nichtrostenden Stähle gegenüber Spannungsrisskorrosion nimmt in der Reihenfolge ferritische Chromstähle, ferritisch-austenitische Stähle, austenitische Chrom-Nickel-(Molybdän)-Stähle ab. Dieses ist vor allem mit dem Einfluss des Nickelgehaltes auf die Anfälligkeit hochchromhaltiger Stähle gegenüber Spannungsrisskorrosion zu erklären. Eine gewisse Anfälligkeit besteht bei Nickelgehalten zwischen etwa 5 und 20 M.-% und ein Minimum der Beständigkeit existiert bei etwa 10 M.-% Nickel. Die häufig verwendeten austenitischen Stähle der Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC II und III (**Tabelle 6.1**), die Nickelgehalte um 10 M.-% aufweisen, gelten in kritischen Medien deshalb als empfindlich gegenüber Spannungsrisskorrosion.

Umgebungseinfluss. Mit Spannungsrisskorrosion ist in erster Linie in chloridionenhal-

tigen Medien zu rechnen, wobei die Gefährdung generell mit steigendem Chloridgehalt, fallendem pH-Wert und steigender Temperatur zunimmt. Dies sind Bedingungen, welche auch Lochkorrosion begünstigen. In chloridhaltigen sauren Medien kann deshalb **lochfraßinduzierte Spannungsrisskorrosion** auftreten. Zunächst bilden sich Korrosionslöcher und innerhalb dieser Angriffsstellen werden durch Ansäuerung über Hydrolyse (siehe oben) die notwendigen Voraussetzungen für Rissbildung geschaffen. Unter normalen atmosphärischen Bedingungen treten diese Korrosionsbedingungen im Regelfall nicht auf, weshalb Spannungsrisskorrosion bei nichtrostenden Stählen unter normalen atmosphärischen Korrosionsverhältnissen noch nie festgestellt wurde. Diese Korrosionsart ist lediglich Sonderklimaten wie Hallenschwimmbädern und Tunneln vorbehalten, da hier nutzungsbedingt chloridhaltige saure wässrige Medien häufig vorkommen [1, 10].

6.3 Regelwerk für die Anwendung nichtrostender Stähle in der Bautechnik

Für die Werkstoffauswahl aus Sicht der Korrosionsbeständigkeit ist die Exposition der Bauteile bzw. Verbindungsmittel gegenüber korrosiven Einflüssen festzulegen. Die hierfür zuständige bauaufsichtliche Zulassung [7] regelt in Verbindung mit der DIN EN 1993-1-4 [11] die sicherheitsrelevanten Anforderungen für statisch beanspruchte Bauteile und Verbindungsmittel

- unter atmosphärischen Bedingungen,
- auch im losen Kontakt mit Baustoffen (z. B. Spreizdübel), im pH-Bereich 4 bis 10,

nicht jedoch die dekorative Beständigkeit (z. B. korrosionsbedingte Verfärbungen).

Das genannte Regelwerk verwendet ein Punktesystem mit dem Ziel eine von 5 Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC (siehe **Tabelle 6.1**) festzulegen.

Das Verfahren zur Werkstoffauswahl (Festlegung der erforderlichen Korrosionsbeständigkeitsklasse) erfolgt in drei Schritten:

a) Bewertung verschiedener möglicher Korrosionseinflüsse F1, F2 und F3.

b) Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF für die jeweilige Umgebung. Dieser ergibt sich aus einer Summierung der verschiedenen, unter a) ermittelten Korrosionseinflüsse F1, F2 und F3.

c) Ermittlung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC in **Tabelle 6.1** in Abhängigkeit vom Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF und Auswahl einer Stahlsorte, die mindestens der ermittelten Korrosionsbeständigkeitsklasse zugeordnet ist.

a) Bewertung der verschiedenen Korrosionseinflüsse

Für die Bestimmung der Korrosionsrisiken F1, F2 und F3 gilt **Tabelle 6.2**:

- Dabei beinhaltet F1 das Risiko der Exposition gegenüber Chloriden aus Meerwasser oder Tausalzen. Bei Meerwasser ist der Abstand zum Meer entscheidend.
- F2 beinhaltet das Risiko einer Exposition gegenüber Schwefeldioxid, z. B. durch Industrieemissionen.
- F3 beinhaltet die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen und auch Reinigungsvorgaben: letztere hat jedoch in der Befestigungstechnik kaum Bedeutung.

Dabei werden den möglichen Risiken wie in der Tabelle vorgegeben Plus- und Minuspunkte zugeordnet.

Für verschiedene Teile einer Konstruktion können sich unterschiedliche Bewertungen F3 und somit unterschiedliche Korrosionsbeständigkeitsfaktoren CRF ergeben, z. B. wenn einige Bereiche Regen ausgesetzt sind und andere nicht:
Durch eine Bewitterung (Beregnung) werden in einer schadstoffreichen Atmosphäre sich ablagernde korrosionsfördernde Stoffe regelmäßig abgewaschen, was sich korrosionsvermindernd auswirkt. Andererseits können sich in nicht bewitterten Außenbereichen (wie hinterlüfteten Fassaden) Schadstoffe, falls vorhanden, aufkonzentrieren (siehe Abschn. 3.2.2). Hinsichtlich der Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen ist deshalb zu beachten: Wenn eine Belastung durch SO_2 und Chloride nicht vorliegen (F1 + F2 ≥ 0), dann ist F3=0, da ein Abwaschen durch Regen dann keine Bedeutung hat.

F1 Risiko der Expositionen gegenüber Chloriden aus Salzwasser und Tausalzen		
M ist der Abstand vom Meer S ist der Abstand von Straßen mit Einsatz von Auftausalzen		
1	Innenräume	
0	niedriges Expositionsrisiko	M > 10 km S > 0,1 km
-3	mittleres Expositionsrisiko	1 km < M ≤ 10 km 0,01 km < S ≤ 0,1 km
-7	hohes Expositionsrisiko	0,25 km < M ≤ 1 km S ≤ 0,01 km
-10	sehr hohes Expositionsrisiko	Straßentunnel, bei denen Auftausalz ausgebracht wird oder wenn Fahrzeuge Auftausalze in den Tunnel einbringen können
-10	sehr hohes Expositionsrisiko	M ≤ 0,25 km Nordseeküste Deutschlands und alle Küstenregionen der Ostsee
-15	sehr hohes Expositionsrisiko	M ≤ 0,25 km europäische Küstenregionen außerhalb Deutschlands
F2 Risiko der Exposition gegenüber Schwefeldioxid		
0	Niedriges Expositionsrisiko	Jahresmittelwert < 10 µg/m^3
-5	Mittleres Expositionsrisiko	Jahresmittelwert 10 µg/m^3 bis 90 µg/m^3
-10	Hohes Expositionsrisiko	Jahresmittelwert 90 µg/m^3 bis 250 µg/m^3
F3 Reinigungskonzept oder die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen (wenn F1 + F2 ≥ 0, dann F3 = 0)		
0	vollständige Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen	
-2	spezifisches Reinigungskonzept	
-7	kein Abwaschen durch Regen oder keine spezifische Reinigung	

Tabelle 6.2:
Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF = F1 + F2 + F3 [11]

b) Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF
Der Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF ist abhängig von den auf die die Bauteile bzw. Verbindungsmittel einwirkenden Korrosionsbelastungen F1, F2 und F3 und wird wie folgt bestimmt:

$$CRF = F1 + F2 + F3$$

c) Ermittlung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC
Nach Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF wird gemäß **Tabelle 6.3** die Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC festgelegt und die erforderliche Stahlsorte ausgewählt (**Tabelle 6.1**).

Korrosionsbeständigkeitsfaktor (CRF)	Korrosionsbeständigkeitsklasse (CRC)
CRF = 1	I
0 ≥ CRF > -7	II
-7 ≥ CRF > -15	III
-15 ≥ CRF ≥ -20	IV
CRF < -20	V

Tabelle 6.3:
Bestimmung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC [11]

Sonderregelungen

Neben den vorgenannten Ausführungen besteht eine Reihe von Sonderregelungen:
Hallenschwimmbäder. Für die Verwendung von nichtrostenden Stählen in der besonders korrosiven Hallenbadatmosphäre gelten, insbesondere wegen der Möglichkeit des Auftretens von Spannungsrisskorrosion, besondere (höhere) Anforderungen. In Hallenbädern dürfen nur ausgewählte Stähle der Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC III bis CRC V verwendet werden. Dabei ist besonders zu beachten, dass für Bauteile und Verbindungsmittel, die weder von Wasser umspült werden, noch bei Anwendung in der Atmosphäre regelmäßig gereinigt werden, besonders hohe Anforderungen (Korrosionsbeständigkeitsklasse V) gelten.

Kontakt mit Hölzern. Im Kontakt mit Hölzern, die einen pH-Wert ≤4 aufweisen (siehe Abschn. 3.3.1), ist im frei bewitterten Außenbereich mindestens die Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC II zu wählen.

Geschweißte Teile. Zur Sicherstellung des Korrosionsschutzes ist ein Entfernen von Anlauffarben und ein verschließen schweißbedingter Spalte erforderlich. Dieses ist entbehrlich, wenn ein Eintrag und eine Aufkonzentrierung von korrosionsfördernden Stoffen (z. B. Chloride) sicher ausgeschlossen werden kann (siehe Abschn. 6.2.1).

Interkristalline Korrosion. Um eine Sensibilisierung und Gefährdung durch interkristalline Korrosion zu vermeiden, sind für zu schweißende Teile Höchstdicken zu beachten (siehe Abschn. 6.2.2).

6.4 Verhalten bei atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung

Bewitterte Bauteile und Verbindungsmittel

Bei Verbindungsmitteln nehmen Werkstoffe einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II und III eine zentrale Bedeutung ein, obwohl gerade Dübel häufig auch aus höherwertigeren Werkstoffen einer Korrosionsbeständigkeitsklasse IV (z. B. Werkstoff-Nr. 1.4529) hergestellt werden. Nichtrostende Stähle, insbesondere aus den Werkstoffen 1.4301 (Korrosionsbeständigkeitsklasse II) und 1.4401 (Korrosionsbeständigkeitsklasse III), wurden in der Vergangenheit wiederholt im Hinblick auf ihr Verhalten unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen (mit Bewitterung) untersucht [1, 12]. Dabei wurde aufgrund der spezifischen Korrosionsverhältnisse in unterschiedlichen Gebieten unterschieden zwischen Land-, Stadt- und Industrieatmosphäre. Demnach haben diese Werkstoffe ihre Einsatzberechtigung bei Bewitterung (hier besteht die Möglichkeit, dass Schadstoffe durch Regen abgewaschen werden) wie folgt [13]:

Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse I. Diese Stähle werden in Meeres- und Industrieatmosphäre stark angegriffen und sind demnach für eine solche Anwendung ungeeignet. Die Anwendung in einer schadstoffarmen Stadtatmosphäre ist möglich, mäßig starke Angriffe unter Rostbildung jedoch unvermeidbar.

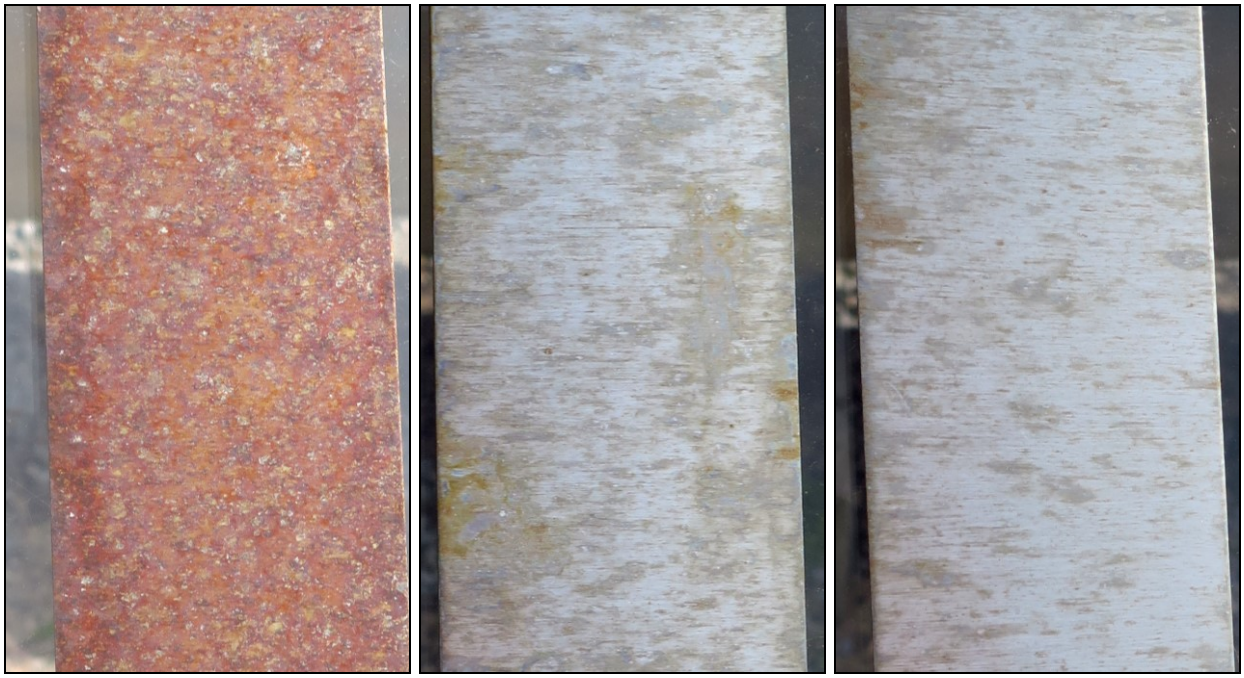
Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II. In einer Land-/Stadtatmosphäre (Korrosivitätskategorie C2) ohne nennenswerte Beanspruchung mit Schadstoffen (Chloride, Schwefeldioxid) erleiden diese Stähle keine Korrosion. Selbst in mäßig stark korrosionsbelasteten Industriezonen (Korrosivitätskategorie C3) erfahren sie nur einen unbedeutenden und mit dem bloßen Auge auch nur als Verfärbung erkennbaren Angriff. Feine Lochkorrosionsangriffe sind, wenn überhaupt, nur bei stärkerer Vergrößerung feststellbar. Bei diesen Stählen ist ein mit Rostbildung verbundener, über Lochkorrosion verlaufender Angriff nur in stärker belasteten städtischen und industriellen Bereichen (Korrosivitätskategorie C4) zu rechnen. Allerdings sind die festgestellten Angriffstiefen in diesen Umgebungen auch nach vielen Jahren weit unter 100 µm und haben im Regelfall keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit von statisch ausgenutzten Konstruktionsteilen wie beispielsweise Verbindungsmittel.

Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse III. Stähle dieser Beständigkeitsklasse sind auch nach längerer Auslagerung in einer schadstoffhaltigen atmosphärischen Umgebung (Korrosivitätskategorie C4) kaum erkennbar angegriffen und können daher unter den schärferen Angriffsbedingungen in Industrie- und Meeresluft ohne Tragfähigkeitsverlust eingesetzt werden. Die mit dem Auge nicht erkennbaren Angriffe hinterlassen jedoch Rost, der sich auf der Metalloberfläche verteilt und ein bräunliches Aussehen entstehen lässt.

Korrosionsbeständigkeitsklasse IV und V. Höher legiertere Stähle der Beständigkeitsklassen IV und V sind nur für Sonderanwendungen erforderlich, wie tragende Bauteile, die unmittelbar sehr hohen Korrosionsbeanspruchungen ausgesetzt sind. Zu nennen sind Anwendungen im Spritzwasser- und Sprühnebelbereich des Meeres und in Tunneln sowie in Hallenbädern, bei welchen gleichzeitig saure und chloridreiche Wässer einwirken können.

Die geschilderten baupraktischen Erfahrungen spiegeln sich auch im Regelwerk für die Anwendung nichtrostender Stähle in der Bautechnik (Abschn. 6.3) wieder.

Bild 6.2 zeigt Blechproben, die langjährig in Meeresatmosphäre mit Bewitterung/Beregnung (Auslagerung auf Helgoland ca. 40 m vom Meer entfernt) ausgelagert wurden. Der Auslagerungsort auf Helgoland ist der Stelle C2 in **Bild 10.1** zuzuordnen. Trotz der Meeresatmosphäre ist die Chloridbelegung dieser bewitterten Proben im Allgemeinen nicht sehr hoch, da Regen in der Lage ist Chloride abzuwaschen und diese sich erst allmählich wieder aufkonzentrieren. Bei nicht bewitterten Blechen wäre in dieser Meeresatmosphäre die Chloridbelegung höher und die Korrosion mit Sicherheit stärker.



1.4003 1.4301 1.4401

Bild 6.2:
Nichtrostende Stähle verschiedener Korrosionsbeständigkeitsklassen mit geschliffener Oberfläche (Körnung 160) nach 7 Jahren in Meeresatmosphäre (Aufnahmen: Prof. P. Gümpel, Hochschule Konstanz)

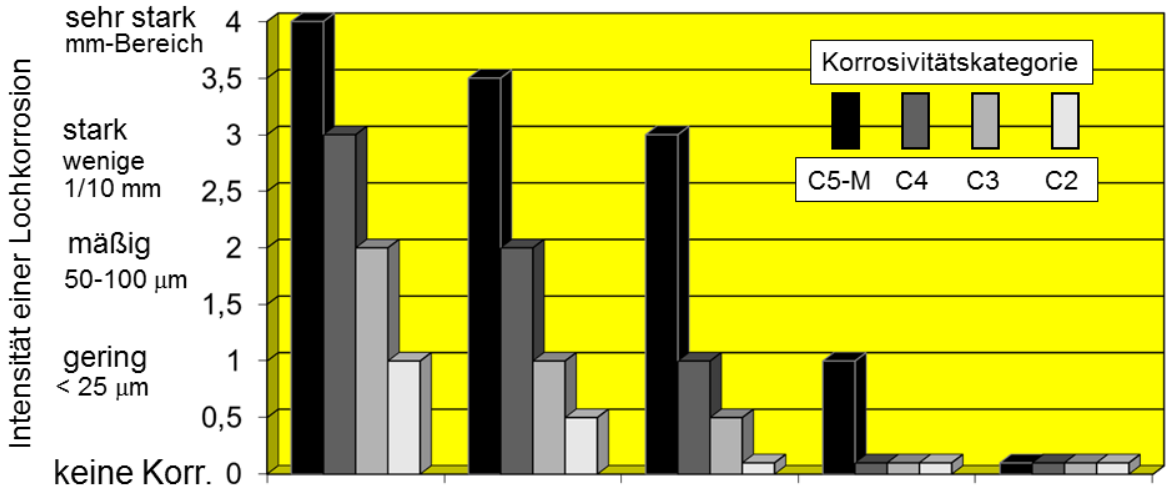
Als Ergebnis stellt sich heraus, dass der ferritische Werkstoff 1.4003 bei dieser Korrosionsbeanspruchung nicht beständig ist. Die austenitischen Werkstoffe 1.4301 und 1.4401 zeigten ein deutlich besseres Verhalten, wobei zwischen beiden Stählen kaum ein Unterschied festgestellt wurde.

Nicht bewitterte Bauteile und Verbindungsmittel

Beispielsweise im Hinterlüftungsraum einer Fassade kommen Bauteile im Regelfall nicht mit Niederschlagswasser (Regen) in Berührung. Deshalb muss z. B. in einer salzreichen Umgebung hier mit einer Anreicherung von Salzen gerechnet werden (Abschn. 3.2.3), was die Korrosionsbeanspruchung zu den Verhältnissen vor der Fassade eher verschärft und deshalb die Zuordnung zur Korrosivitätskategorie C4 und

möglicherweise sogar C5 rechtfertigt. Aufgrund eigener Messungen auf der Insel Helgoland sind die Chloridgehalte etwa 50 m vom Meer entfernt im nichtberegneten Außenbereich (entspricht dem Hinterlüftungsraum einer Fassade) etwa 10fach höher als im beregneten Außenbereich (Abschn. 10.2, **Tabelle 10.2**) und entsprechen dabei jenen unmittelbar am Meer (Entfernung 5 bis 30 m).

Bild 6.3 fasst in diesem Zusammenhang Aussagen der Literatur in einer Darstellung zusammen. Dabei wird unterschieden nach den Korrosivitätskategorien C2 bis C5 (**Tabelle 3.6**). Berücksichtigt wurden bei etwa 10jähriger Auslagerungen an geschliffenen und gewalzten Blechen (ungünstige Oberflächengüte) die Blechunterseiten, auf denen sich Schadstoffe eher aufkonzentrieren können, da ein Abwaschen durch atmosphärische Wässer behindert ist. Dieses entspricht am ehesten den Verhältnissen im Hinterlüftungsraum von Fassaden. Unter Bedingungen einer Korrosivitätskategorie C5 (starke Aufkonzentration von Salzen) erleiden nichtrostende Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II (1.4301) eine starke bis sehr starke Lochkorrosion und solche einer Korrosionsbeständigkeitsklasse III (1.4401) eine starke Lochkorrosion.



Werkstoff-Nummer	1.4016	1.4301	1.4401	1.4439	1.4529
Korr.best.klasse	I	II	III	III	IV
Wirksumme	17	18	24	36	42

Bild 6.3:
Lochkorrosion auf der Unterseite geschliffener und kaltgewalzter Bleche in verschiedenen Atmosphären (Literaturauswertung), Korrosion nach etwa 10 Jahren (nach Literaturergebnissen in [13]) Korr.best.klasse = Korrosionsbeständigkeitsklasse

6.5 Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle bei Kontakt mit Holz

Nichtrostende Stähle der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC II und höher sind unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen im Kontakt mit Bauholz wie Fichte korrosionsbeständig. Auch wenn bei z. B. Eichenholz insbesondere bei Zutritt von Feuchtigkeit mit einer mäßig starken Ansäuerung (pH ≤4) gerechnet werden muss, fordert das Regelwerk lediglich die Anwendung eines nichtrostenden Stahls der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC II (Abschn. 6.3). Bei Verwendung chloridhaltiger Holzschutzmittel ist

die Verwendung eines Stahls mind. der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC III angebracht.

Literatur Abschnitt 6

[1] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

[2] P. Gümpel u. a.: Rostfreie Stähle. expert-verlag, 2000

[3] Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften. Merkblatt 821, Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 2011

[4] R. Ergang: Edelstahl rostfrei, Eigenschaften, Verwendung, Informationsstelle Edelstahl Rostfrei 1989

[5] P. Gümpel: Nichtrostende Stähle und deren Einsatzmöglichkeiten in der Befestigungstechnik. 3-Länder-Korrosionstagung „Befestigungsmittel im Hochbau“, Stuttgart 18./19.4.2007, Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR, Tagungsunterlagen, S. 80-91

[6] G. Hochörtler, S. Eglsäer, G. Mori: Entwicklungen bei hochfesten nichtrostenden Stählen für Befestigungselemente. 3-Länder-Korrosionstagung „Befestigungsmittel im Hochbau“, Stuttgart 18./19.4.2007, Gesellschaft für Korrosionsschutz GfKORR, Tagungsunterlagen, S. 92-101

[7] Allgemein bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6 vom 01.05.2017 „Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen“

[8] C. Jüde-Esser, R. Mohrmann, F. Neumann: Analyse von Schädigungen durch interkristalline Korrosion. GfKORR Jahrestagung, 2017, Frankfurt

[9] BAM Berlin: Beeinträchtigung der Funktionalität nichtrostender Stähle durch unzureichende Passivschichtausbildung. AIF-Forschungsvorhaben 15554 N/1, 2010 und A. Burkert, J. Lehmann, H.-P. Wilbert: Edelstahl Rostfrei - Korrosionserscheinungen beim Einsatz im Außenbereich. Internet

[10] H. Haslmaier, A. Übleis, H. Böhni: Corrosion-resistant materials for fastenings in road tunnels-field tests in the Mont Blanc Tunnels. Structural Engineering International (19092) Heft 4

[11] DIN EN 1993-1-4 (2015) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen

[12] J. Mietz: Studie zum Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle im Bauwesen. Sonderdruck 876, Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Düsseldorf 1998

[13] U. Nürnberger: Verwendung nichtrostender Stähle in der Befestigungstechnik. 46. Forschungskolloquium Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Stuttgart, 30.-31.03. 2006, Tagungsunterlagen (Sonderheft DAfStb-Forschungskolloquium)

7. Untersuchte Verbindungsmittel

In Labor- und Naturversuchen wurde die Korrosionsschutzwirkung der in Abschn. 4 aufgeführten metallischen Überzüge, z. T. kombiniert mit zusätzlichen Maßnahmen wie Passivierung und Deckbeschichtung, auf häufig verwendeten Verbindungsmitteln wie Holzschraube, Bohrschraube, Spreizdübel (Bolzenanker) und Kunststoffrahmendübel, festgestellt. Ausschließlich zum Vergleich wurden auch Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II mit in die Untersuchungen einbezogen. Um spezielle Einflüsse der Herstellung und Verarbeitung herauszustellen, wurden die oben genannten Versuche ergänzt durch „Sonderuntersuchungen“. Hierbei wurden längerfristig angesetzte Untersuchungen und Korrosionsschäden aus der Baupraxis ausgewertet bzw. bewertet (siehe Abschn. 8 und 10).

7.1 Holzschrauben

7.1.1 Herstellung und Wirkungsweise

Mit „Holzschrauben“ werden Schrauben bezeichnet, welche ihr Gewinde im Holz selbst formen (bei weicheren Hölzern) bzw. schneiden (bei härteren Hölzern) und deshalb ohne Mutter verwendet werden. Als Holzverbindungsmittel dienen sie der Verbindung von Holzbauteilen aus Vollholz, Brettschichtholz oder Holzwerkstoffen oder zum Anschluss von Stahlteilen (Beschlägen) an Holzbauteile. Für tragende Holzverbindungen stehen zwei Arten von Schrauben zur Verfügung [1]:

- Genormte Holzschrauben, die alle ein geschnittenes Gewinde mit Gewindeform nach DIN 7998 [2] aufweisen und in vorgebohrte Löcher eingedreht werden
- und bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben, die als selbstbohrende Schrauben ohne Vorbohren eingedreht werden.

Im vorliegendem Fall wurde die bauaufsichtlich zugelassenen ASSY-Holzschraube der Abmessung 5,0 x 70/42 (Gewindedurchmesser x Schraubenlänge / Gewindelänge) mit Senkfrästaschenkopf, Teilgewinde und Schaftfräser, unterschiedlich korrosionsgeschützt (Abschn. 8), untersucht [3] (**Bild 7.1**). Typischerweise haben diese Schrauben eine große Gewindesteigung mit auseinandergezogenen Gängen und scharfen Gewindeflanken; das Schraubenende ist angespitzt. Die Schrauben wurden ohne Vorbohren eingedreht.

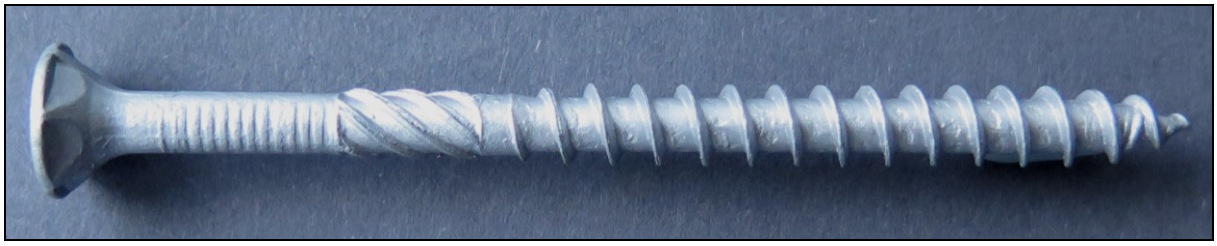


Bild 7.1:
Würth-ASSY Holzschraube Senkkopf, Teilgewinde und Schaftfräsen

Bauaufsichtlich zugelassene selbstbohrende **Holzschrauben aus niedriglegiertem Stahl** werden im Unterschied zu den genormten Schrauben nach einer Kaltmassivum-

formung und nach dem Aufrollen des Gewindes gehärtet bzw. einsatzgehärtet und angelassen (vergütet), um höhere Werte des Fließmomentes, der Zugtragfähigkeit sowie der Torsionstragfähigkeit zu erreichen. Wegen der Umformung durch das Gewindewalzen weisen die Schrauben zwischen den Gewindegängen Oberflächenfehler auf, die vom metallischen Überzug in unterschiedlicher Weise überdeckt werden (Abschn. 8). **Bild 7.2** zeigt beispielhaft das Gewinde einer Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2.

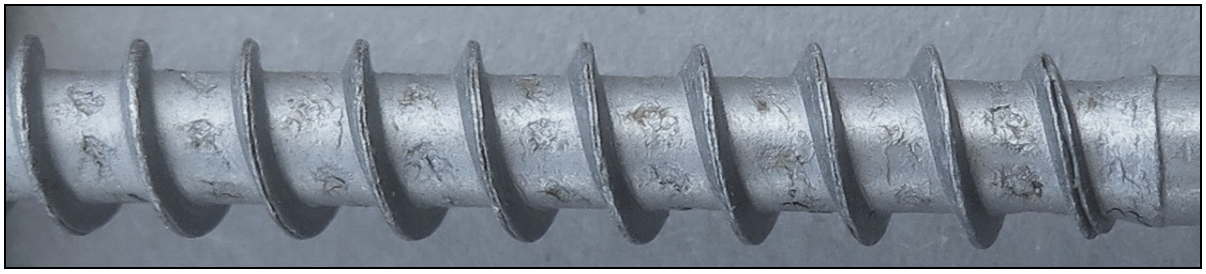


Bild 7.2:
Gewinde einer kaltumgeformten Würth-ASSY Holzschraube

Die vergleichsweise untersuchten **Holzschrauben aus nichtrostendem Stahl** der Abmessung 5,0 x 80/52 (Gewindedurchmesser x Schraubenlänge / Gewindelänge) mit Senkkopf und Teilgewinde wurden aus dem Werkstoff 1.4567 (X3CrNiCu 18-9-4) einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II (**Tabelle 6.1**) hergestellt und sind kaltumgeformt. Dieser Werkstoff weist aufgrund seines austenitischen Gefüges auch im kaltumgeformten Zustand bei hoher Zähigkeit nur eine begrenzte Festigkeit bzw. Härte auf. Hohe Eindreh- und Anziehmomenten sollten daher bei der Verwendung solcher Edelstahlschrauben vermieden werden.

7.1.2 Bisheriger Korrosionsschutz

Gängige Schraubenmaterialien für Holzverbindungen unter „normalen“ Umgebungsbedingungen sind im Regelfall galvanisch oder feuerverzinkt. Für höherwertigere Aufgaben (z. B. feuchtebelasteter Außenbereich oder in Gegenwart chloridhaltiger Angriffsmittel) werden Holzschrauben bevorzugt aus nichtrostendem Stahl (Abschn. 6 und 7.1.1) verwendet.

Aus den bekannten Abtragsraten für Zink (Abschn. 4.6) ergeben sich je nach Nutzungsklasse / Holzklasse (Gewinde und Schaft im Holz) und Korrosivitätskategorie (Kopf in Atmosphäre) für eine langzeitige Nutzungsdauer von etwa 50 Jahren die in **Tabelle 4.4** genannten Anforderungen. Diese lassen sich für die verschiedenen Korrosivitätskategorien und Nutzungsklassen aus den Abtragsraten im Kontakt mit der Atmosphäre und Holz (**Tabelle 4.3**) herleiten.

Bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben verweisen bezüglich des erforderlichen Korrosionsschutzes durch Zinküberzüge auf die DIN EN 1995 [4] (Abschn. 4.6) bzw. auf die bauaufsichtliche Zulassung [5] bei Verwendung nichtrostender Stähle (Abschn. 6). Neuerlich werden gelegentlich auch Holzschrauben mit Zink-Nickel-Überzug oder Zink-Aluminium-Lamellenüberzug angeboten, die als Kleinteile im Trommelverfahren herge-

stellt werden. Das Korrosionsschutzverhalten der genannten Überzüge im Kontakt mit der Atmosphäre und insbesondere feuchtem Holz wurde bisher noch nicht im Detail untersucht.

7.2 Bohrschrauben [6]

7.2.1 Herstellung und Wirkungsweise

Bohrschrauben aus niedriglegiertem Stahl. Selbstbohrschrauben mit Blechschraubengewinde für den industriellen Leichtbau (**Bild 7.3**), in der Folge Bohrschraube genannt, werden dort eingesetzt, wo große Stückzahlen verwendet werden. Sie dienen beispielsweise zum Verbinden von Blechen, z. B. im Dach- und Fassadenbereich von Hochbauten oder bei Photovoltaikanlagen zur Befestigung der Module auf einem stählernen Rahmen. Sie bohren sich beim Einschrauben durch eine entsprechende Formgebung der Spitze (Bohrspitze) ihren Kernloch selbst und formen spanlos mit dem anschließenden Einlaufteil des Gewindes das Gegengewinde. Hierfür sind folgende Eigenschaften erforderlich: eine ausreichende Oberflächenhärte, eine Eignung zum Bohren des Kernloches und zum Formen des Gegengewindes sowie ein ausreichend hohes Bruchmoment als Sicherheit gegenüber Schraubenbruch beim Eindrehen. Bohrschrauben werden im Regelfall aus einem wärmebehandelten Einsatz- oder Vergütungsstahl hergestellt. Die Oberflächenhärte zum Verbinden von Stahlteilen sollte nach der Wärmebehandlung mindestens etwa 560 HV 0,3 und die Kernhärte etwa zwischen 270 HV5 und 425 HV5 betragen.

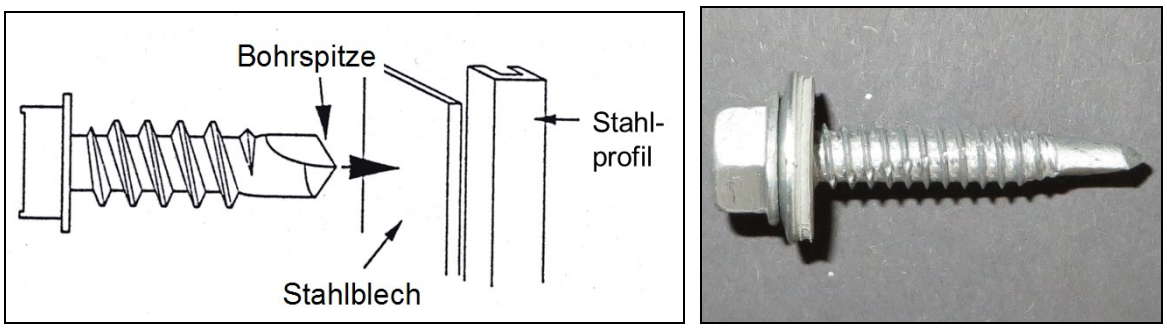


Bild 7.3:
Prinzip der selbstbohrenden Schraube (Bohrschraube)

Die hier untersuchten bauaufsichtlich zugelassenen Bohrschrauben der Abmessung 6,5 x 35 (Gewindedurchmesser x Länge) und Dichtscheibe mit EPDM-Dichtung [7] wurden aus einem niedriglegiertem Stahl hergestellt und unterschiedlich korrosionsgeschützt (Abschn. 8). Die Schrauben wurden nach dem Aufwalzen des Gewindes und nach einer Kaltmassivumformung einsatzgehärtet. Durch diese Kaltumformung weisen sie, vergleichbar den Holzschrauben (**Bild 7.2**), zwischen den Gewindegängen Oberflächenfehler auf, die vom metallischen Überzug in unterschiedlicher Weise überdeckt werden (Abschn. 8).

7.2.2 Bisheriger Korrosionsschutz

Zum Zwecke des Korrosionsschutzes werden Bohrschrauben häufig galvanisch ver-

zinkt. Sie dürfen allerdings gemäß Zulassung, schon wegen der nur geringen Zinkauflage um 10 µm, nur dort eingesetzt werden, „wo eine Befeuchtung des Verbindungselementes nicht zu erwarten ist“, demnach nicht im bewitterten Außenbereich. Bei Anwendung im Außenbereich und bei Angriff von Kondenswasser besteht bei diesen hochfesten Stählen nämlich das Problem der wasserstoffinduzierten Rissbildung [8] und wegen der geringen Zinkauflage um 10 µm nur ein begrenzter Korrosionsschutz (siehe Angaben zum Zinkabtrag an Holzschrauben, Abschn. 4.6.2). Bei der Bewitterung ausgesetzten Verbindungen oder ähnlichen Feuchtebelastungen fordern die zuständigen Zulassungen für Bohrschrauben eine Verwendung von Schrauben aus geeignetem nichtrostendem Stahl (siehe Abschn. 6).

7.3 Spreizdübel

7.3.1 Herstellung und Wirkungsweise [9]

Dübel aus korrosionsgeschütztem Stahl sind sicherheitsrelevante Bauteile, die zur Verankerung/Befestigung von Anbauteilen in festen Untergründen (Beton, Mauerwerk, Porenbeton) verwendet werden. In der hiesigen Arbeit wird als Untergrund nur Normalbeton im Außenbereich behandelt. Beispielhaft wird der kraftkontrolliert spreizende Metalldübel näher untersucht und auch aus korrosionstechnischer Sicht bewertet.

Bei der Montage werden kraftkontrolliert spreizende Metalldübel zunächst in ein Bohrloch gesetzt und im Anschluss mit einem definierten Drehmoment vorgespannt und dabei verankert. Beim Spannvorgang wird der Spreizkonus des Dübels in die Spreizhülse gezogen. Dies führt dazu, dass die Spreizhülse an die Wandung des Bohrloches gepresst wird. Zugkräfte können über Reibschluss in das Bauwerk abgetragen werden. Falls die Zugkräfte erhöht werden oder, wenn sich nach der Montage des Dübels ein Betonriss durch das Bohrloch öffnet (z. B. hervorgerufen durch Belastungen oder Schwindvorgängen), dann wird der Spreizkonus infolge der Vorspannung bzw. aufgrund der auf den Dübel wirkenden Zugbelastung weiter in die Spreizhülse hineingezogen. Dadurch wird die Spreizhülse wieder an die Wandung gepresst und der Dübel nimmt die Last erneut sicher auf.

Bei kraftkontrolliert spreizenden Dübeln ist bezüglich deren Funktion das Nachspreizverhalten und bei allen Dübeltypen ein Verlust an Tragfähigkeit durch korrosionsbedingten Substanzverlust von Interesse. Für das Nachspreizverhalten der kraftkontrolliert spreizenden Dübel ist eine geringe Reibung und ein Gleiten zwischen den Reibpartnern Spreizhülse und Konus notwendig. Dieses könnte theoretisch durch Korrosionsvorgänge (Rotrostbildung) ungünstig beeinflusst werden. Für die Funktionalität des Dübels muss die Reibung zwischen der Spreizsegment-Innenseite und dem Konus geringer sein als jene in der Kontaktfläche Spreizsegment-Ankergrund. Andernfalls könnte es dazu führen, dass der Dübel nicht ausreichend nachspreizt und dieser unter Zugbeanspruchung aus dem Bohrloch herausgezogen wird.

Die bauaufsichtlich zugelassenen Spreizdübel [10] der Größe M10 (d_{Konus} = 10 mm, d_{Schaft} = 8,9 mm, Dübellänge = 82,8 mm, Gewindelänge = 37,0 mm) (**Bild 7.4**) werden aus einem niedriglegiertem Stahl hergestellt und unterschiedlich korrosionsgeschützt

(Abschn. 8). Der Stahl ist kaltumgeformt (Festigkeitsklasse 8.8). Das Spreizblech besteht, in Abweichung von üblichen Ausführungen (siehe unten), aus einem nichtrostendem Stahlblech 1.4301. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass der metallische Überzug der Spreizhülse im Kontakt mit einer noch nassen Bohrlochwandung frühzeitig abgetragen wird.

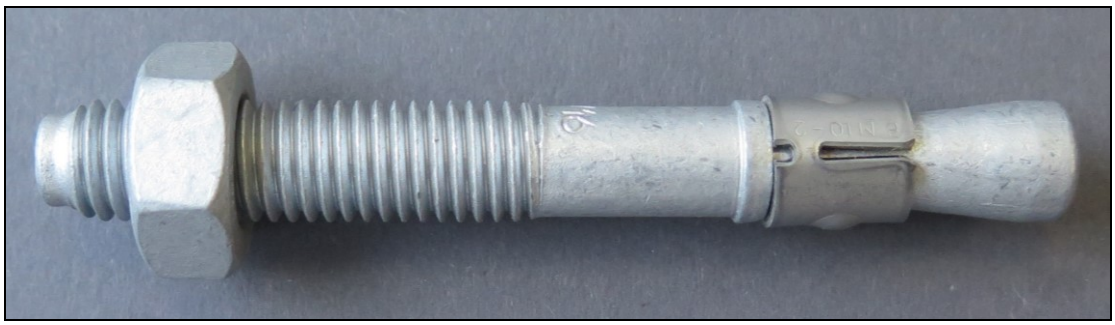


Bild 7.4:
Bolzenanker W-FA der Firma Würth

Die bei den hiesigen Untersuchungen vergleichsweise untersuchten bauaufsichtlich zugelassene Dübel besteht aus nichtrostendem Stahl des Werkstoffs 1.4301 (X5CrNi 18-10) der Abmessung der Größe M8 (d_{Konus} = 8 mm, d_{Schaft} = 7,1 mm, Dübellänge = 75,3 mm, Gewindelänge = 37,0 mm).

7.3.2 Bisheriger Korrosionsschutz

Derzeit werden in der Bautechnik Dübel aus galvanisch verzinktem und feuerverzinktem Stahl sowie aus nichtrostendem Stahl eingesetzt. In Bezug auf eine ausreichende Dauerhaftigkeit muss der Korrosionsschutz,

- bei galvanisch verzinkten Dübeln in der Regel etwa 10 µm Zink
- und bei feuerverzinkten Dübeln eine etwa 50 µm dicke Zinkauflage,

im Kontakt mit der Atmosphäre und bei Berührung mit dem der Atmosphäre ausgesetzten Beton eine ausreichende Beständigkeit aufweisen, um die Tragfähigkeit des Dübels über einen geforderten Zeitraum zu gewährleisten.

Dübel aus galvanisch oder feuerverzinktem Stahl dürfen derzeit im Zuständigkeitsbereich deutscher Zulassungen nur zur Befestigung von Anbauteilen in geschlossenen Räumen, z. B. Wohnungen, Büroräumen etc., mit Ausnahme von Feuchträumen, verwendet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Verzinkung den Dübel bei Einbau in Feuchträumen und im Außenbereich nicht dauerhaft schützt. Sowohl in Feuchträumen und im Freien als auch in Industrieatmosphäre und in Meeresnähe (jedoch nicht im Einflussbereich von Meerwasser), finden Dübel aus nichtrostendem Stahl A4 der Werkstoff-Nr. 1.4401 oder 1.4571 Anwendung. In Gegenwart von besonders korrosiven Bedingungen (z. B. in Hallenschwimmbädern) werden noch höherwertigere nichtrostende Stähle (z. B. Werkstoff-Nr. 1.4529) eingesetzt.

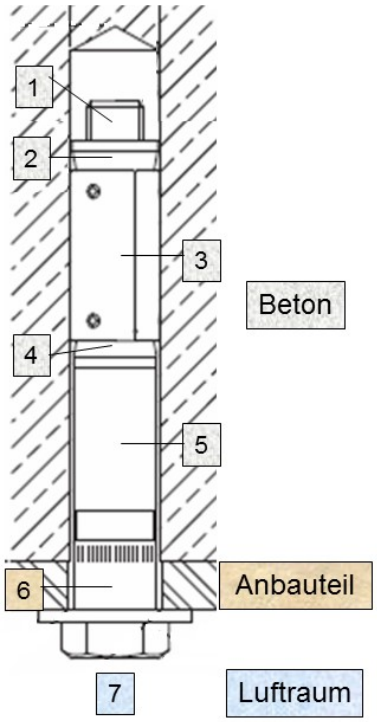
Wie in [11] gezeigt wurde, bieten Dübel in verzinkter Ausführung auch Potenzial insbesondere für den nicht bewitterten Außenbereich (Abschn. 7.3.4). Dieses würde erst

recht dann gelten, wenn durch Verwendung von Zink-Nickel- oder Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Korrosionsschutz der metallischen Überzüge noch verbessert werden könnte.

7.3.3 Korrosionsbeanspruchung des Dübels

Spreizdübel werden in ein im Beton vorgebohrtes Loch eingesetzt und können im Einbauzustand wie folgt mit einer Umgebung in Kontakt kommen (**Bild 7.5**):

- **Außerhalb des Bohrlochs** mit der das Bauteil umgebenden Außenatmosphäre, mit anschließenden Bauteilen aus Wärmedämmstoffen oder Holz. Die Korrosionsbeanspruchung in der Außenatmosphäre und bei Kontakt mit Holz wird in Abschn. 3 behandelt.
- **Im Bohrloch** mit der Bohrlochatmosphäre und mit dem erhärteten Beton. Für das Korrosionsverhalten sind folgende Einflüsse maßgeblich verantwortlich: Die Feuchteverhältnisse im Bohrloch, eine Carbonatisierung der Bohrlochwandung und die Möglichkeit eines Zutritts von Chloriden zum Dübel.



Nr.	Bezeichnung	Korrosionsszenarien
1	Gewindebolzen	atmosphärische Korrosion im Bohrloch
2	Gewindekonus	atmosphärische Korrosion im Bohrloch, Korrosion im Kontakt mit Beton
3a	Spreizhülse (Außenseite)	Korrosion im Kontakt mit Beton
3b	Spreizhülse (Innenseite)	atmosphärische Korrosion im Bohrloch
4	Konus (kein Gewinde)	atmosphärische Korrosion im Bohrloch
5	Distanzhülse (Innen- und Außenseite)	atmosphärische Korrosion im Bohrloch
6	Distanzhülse (Innen- und Außenseite)	atmosphärische Korrosion im Anbauteil
7	äußere Dübelteile	atmosphärische Korrosion

Bild 7.5:
Mögliche Korrosionsszenarien bei Spreizdübeln (hier: Liebig-Sicherheitsdübel) [11]

Korrosionsbeanspruchung durch Feuchte im Bohrloch

In der Folge wird die Korrosionsbeanspruchung im Bohrloch bei Kontakt des Betons mit der Außenatmosphäre vor der Wand betrachtet. Einflüsse aus einem u. U. feuchten Innenraumklima bei einer Wand von Gebäuden bleiben unberücksichtigt. Diese werden im Zusammenhang mit dem Kunststoffrahmendübel (Abschn. 7.4.3) behandelt, da solche Dübel typischerweise in Außenwänden eingesetzt werden, bei denen die Klimaten beiderseits der Wand Einfluss auf die Feuchteverhältnisse im Innern der Wand haben.

Bei der Korrosionsbeanspruchung im Bohrloch wird unterschieden zwischen dem Spreizteil des Dübels im Kontakt mit der Bohrlochwandung und den Dübelabschnitten im direkten Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre.

Kontakt mit Beton. Der Kontakt mit dem Beton kann besondere Auswirkungen auf das Korrosionsverhalten von insbesondere Zinküberzügen haben, da im Kontaktbereich Dübel/Beton die Ausbildung von schützenden Deckschichten behindert ist, so dass insbesondere dann mit verstärkter (Spalt-)Korrosion im Kontaktbereich gerechnet werden muss, wenn der Beton (die Bohrlochwandung) sehr feucht bzw. nass ist.

Bei losem Kontakt der Dübel mit porösen Baustoffen wie Beton entscheiden aber auch dessen gelöste Inhaltsstoffe über dessen Korrosivität. Der Beton einer Bohrlochwandung kann je nach Betonfeuchte und Zutritt von Luft carbonatisiert (pH ≈ 8,3) oder hochalkalisch sein (pH >12,5), wobei eine hohe Alkalität der angreifenden wässrigen Phase eine Korrosion von Überzügen auf Zinkbasis verstärken würde. Beispielsweise in Meeresatmosphäre können auch Chloride eine Rolle spielen.

Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre. Beim Kontakt zwischen den nicht vom Baustoff berührten Oberflächen,

- Gewinde und glatter Abschnitt des Gewindebolzens beim Dübel in **Bild 7.4** bzw.
- Gewindebolzen, Konus und Distanzhülse beim Dübel im **Bild 7.5**

und der im Hohlraum zwischen Beton und Dübel eingeschlossenen Luft findet eine **atmosphärische Korrosion** statt. Diese wird beeinflusst von der Höhe der relativen Luftfeuchte im Bohrloch und somit auch der Möglichkeit einer Tauwasserbildung auf Grund von Wärmebrücken (Abschn. 3.2.1):

- Die Luftfeuchte im Bohrloch wird vom Feuchtegehalt der Bohrlochwandung, von der Temperatur im Bohrloch und den Belüftungsverhältnissen im Bohrloch bestimmt.
- Bei Einbau eines Dübels in einem der Außenatmosphäre ausgesetzten Beton ist wegen dessen Wirkung als Wärmebrücke mit Taupunktunterschreitung am Dübel und somit mit der Möglichkeit einer Kondenswasserbildung zu rechnen.

Beim Kontakt des Dübels mit der Bohrlochwandung und der Bohrlochatmosphäre sind für die Korrosion somit folgende Einflüsse von wesentlicher Bedeutung:

- der Wassergehalt der Bohrlochwandung,
- die Feuchte der Bohrlochatmosphäre,

weshalb diese Einflussparameter in der Folge näher betrachtet werden.

Wassergehalt der Bohrlochwandung. Bei verzinkten Dübeln im losen Kontakt mit Beton ist Korrosion möglich, wenn die Ausgleichsfeuchte des Betons (**Bild 7.6**) deutlich mehr als etwa 60 % beträgt [8]. Dabei nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit von Zink bei steigender Betonfeuchte von mäßig feucht (Ausgleichsfeuchte <60 %) über feucht (Ausgleichfeuchte etwa 60 bis 80 %) bis nass (Ausgleichsfeuchte >80 %) rasch zu, da die Ausbildung der schützenden carbonatischen Deckschichten zunehmend gehemmt wird (Abschn. 4.6.1). Um einem frühzeitigen Korrosionsabtrag des Zinküberzuges bei Kontakt mit feuchtem/nassem Beton (z. B. Einsetzen von Dübeln in jungen Beton) vor-

zubeugen, wurde von der herstellenden Firma beim Dübel in **Bild 7.4** das Spreizblech aus nichtrostendem Stahl hergestellt.

Wegen der genannten Zusammenhänge ist der Wassergehalt des Betons und somit auch der Bohrlochwandung eine wichtige Einflussgröße insbesondere für die Korrosion von Spreizdübeln im Kontakt mit dem Beton. Der Wassergehalt des Betons hängt in erster Linie ab vom Wasserdampfgehalt der umgebenden Atmosphäre und der Möglichkeit einer Beregnung. Bezüglich des Wassergehaltes des **nicht beregneten Betons** gilt folgendes (**Bild 7.6, links**): Bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von etwa 80 % sind bei einem nicht beregneten Beton mittlerer Güte nur etwa 45 % der für Wasser zugänglichen Poren mit Wasser gefüllt. Demnach ist ein nicht bewitterter (nicht beregneter) Beton im Freien eher zu trocken, um bei einem Spreizdübel im Kontakt mit dem Baustoff eine frühzeitige schädigende Korrosion zu bewirken (siehe oben).

Im **beregneten Beton** ergeben sich, je nach Intensität einer Beregnung, höhere Ausgleichsfeuchten zwischen etwa 60 und nahezu 100 % ein und verstärkte Korrosion des Dübels im Kontakt mit dem Beton ist möglich. Je nach Umgebungsverhältnissen stellt sich ein mehr oder weniger starkes Feuchtegefälle vom Kernbereich zur Oberfläche ein (**Bild 7.6, rechts,** Kurve C). Beim beregneten Beton nimmt somit der Wassergehalt in den Zementsteinporen mit zunehmender Tiefe zu.

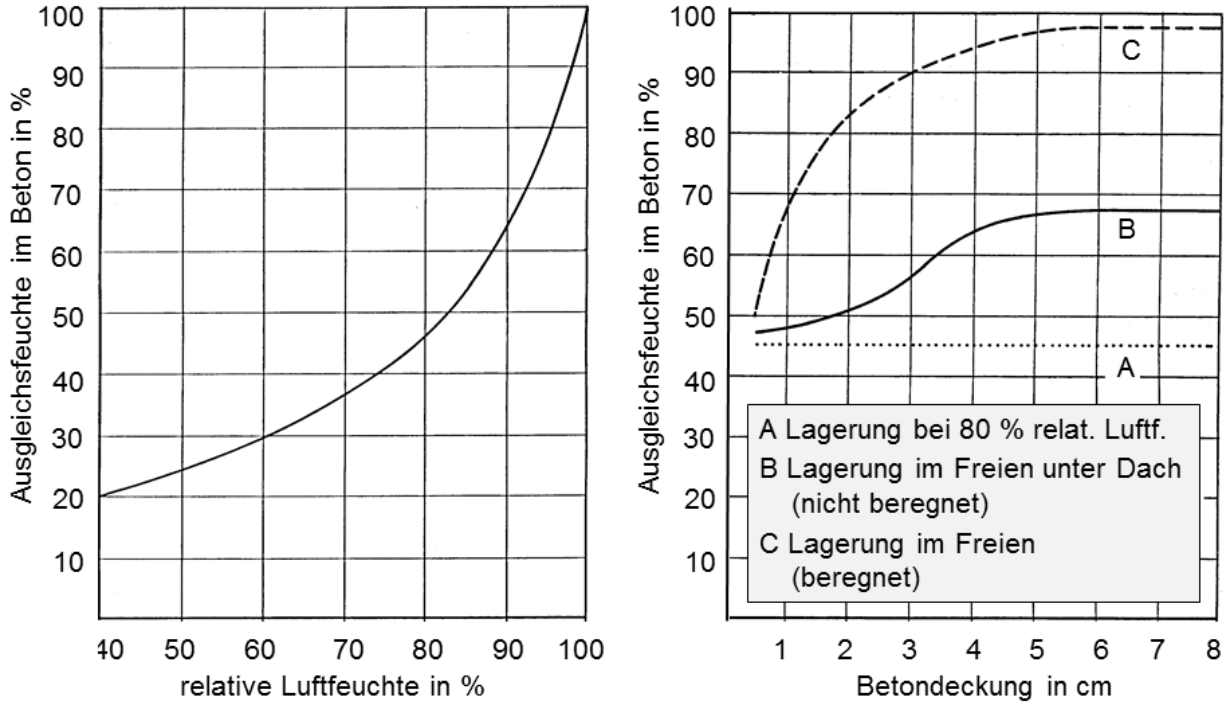


Bild 7.6:
Links: Ausgleichsfeuchte für Normalbeton mittlerer Güte in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte (nach Haller in [8])
Rechts: Relative Luftfeuchte von Beton in Abhängigkeit vom Feuchteangebot und der Betondeckung (typisch für gemäßigtes Klima) [8]

Feuchte der Bohrlochatmosphäre. In Versuchen wurde der Wasserdampfgehalt in Bohrlöchern von senkrechten Flächen von mind. 40 Jahre alten Betonbauteilen im

Stuttgarter Stadtklima und zum Vergleich in der umgebenen Atmosphäre festgestellt. Der Feuchtegehalt der älteren Betone befand sich somit im Gleichgewicht mit dem umgebenden Klima. Werden Dübel dagegen in einen jungen Beton mit noch vorhandenem Überschusswasser gesetzt, kann die Beton- und Bohrlochfeuchte höher sein. Die Messungen wurden durchgeführt an dauerhaft nicht beregnete und wiederholt beregneten ausgedehnten Betonoberflächen.

Die kontinuierliche Feststellung von Temperatur in °C und relativer Luftfeuchte in % über Zeiträume von mehreren Wochen erfolgte jeweils für die in der Befestigungstechnik möglichen Varianten:

- Bohrloch gegenüber der Umgebung mittels Kunststoff abgedichtet,
- Bohrloch gegenüber der Umgebung nicht abgedichtet (zwischen dem Messfühler und der Bohrlochwandung existierte ein 1 mm breiter Spalt).

Aus den genannten Messdaten wurde anhand der in **Bild 3.3** dargestellten Verhältnisse der Wasserdampfgehalt in g/m^3 berechnet. Die Messungen erfolgten in zwei unterschiedlichen Jahreszeiten, nämlich Februar/März und Juni/Juli. An jeweils 40 Tagen dieser Zeiträume wurde 3 mal pro Tag (10 Uhr, 14 Uhr, 17 Uhr) gemessen.

Die Einzelergebnisse der Messungen sind in den **Anlagen 7.1 und 7.2** dargestellt. Der besseren Übersicht halber wurden für die beiden Zeiträume Mittelwerte gebildet, nachdem festgestellt wurde, dass diese Vorgehensweise die Tendenz der Einzelmessungen nicht verfälscht. Die Mittelwerte der Messungen sind in **Tabelle 7.1** enthalten.

	Feuchtemessungen der Bohrlochatmosphäre im Februar/März 2016				
	Bauteil senkrecht, nicht bewittert		Bauteil senkrecht, bewittert		Außenklima (bewittert)
	Bohrloch offen	Bohrloch geschlossen	Bohrloch offen	Bohrloch geschlossen	
WDG (g/m^3) MW	5,1	5,2	7,2	7,9	5,2
Streubereich WDG (g/m^3)	3,9 – 7,2	3,9 – 7,1	4,2 – 12,7	4,9 – 12,1	3,8 – 9,3
Temp. (°C) MW	4,7	4,6	8,5	9,5	7,4
Verhältnis WDG	0,98	1,00	1,38	1,52	1
	Feuchtemessungen der Bohrlochatmosphäre im Juni/Juli 2016				
	Bauteil senkrecht, nicht bewittert		Bauteil senkrecht, bewittert		Außenklima (bewittert)
	Bohrloch offen	Bohrloch geschlossen	Bohrloch offen	Bohrloch geschlossen	
WDG (g/m^3) MW	12,9	13,8	18,8	18,1	11,8
Streubereich WDG (g/m^3)	9,7 – 20,0	10,1 – 22,1	12,1 – 30,9	12,4 – 31,4	7,8 – 16,6
Temp. (°C) MW	20,4	20,4	23,0	22,9	25,9
Verhältnis WDG	1,09	1,17	1,59	1,53	1

Tabelle 7.1:
Wasserdampfgehalt (WDG) in Bohrlöchern und in der umgebenden Außenatmosphäre in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur (MW = Mittelwert)

Hinsichtlich der Parameter

- Umgebung der Bauteile (nicht bewittert / bewittert),
- Bohrlochabschluss (Bohrloch offen / Bohrloch geschlossen),
- Jahreszeit (Winter/Sommer)

wurden folgende Verhältnisse hinsichtlich der Klimadaten Wasserdampfgehalt (gemessen in g/m^3) und Temperatur festgestellt. Eine Zunahme des Wasserdampfgehaltes verweist auf eine erhöhte Luftfeuchte im Bohrloch und somit ein ungünstigeres Bohrlochklima mit erhöhter Korrosionsgefährdung.

- **Einfluss der Temperatur**. Der Wasserdampfgehalt nimmt sowohl in der umgebenden Atmosphäre als auch in der Atmosphäre des Bohrloches mit steigender Temperatur zu. Wenn die Temperatur im Bohrloch im Mittel aller Werte im Winter 6,8 °C beträgt und im Sommer 21,7 °C dann verhält sich der Wasserdampfgehalt in g/m^3 wie

  Winter : Sommer = 6,4 : 15,9 (1 : 2,5).

  Dieses temperaturabhängige Verhalten orientiert sich an den im **Bild 3.3** dargestellten Verhältnissen.

- **Vergleich der Wasserdampfgehalte von umgebender Atmosphäre und Bohrlochatmosphäre**. In der **Tabelle 7.1** wird das Verhältnis WDG (Wasserdampfgehalt in g/m³ im Bohrloch / Wasserdampfgehalt in g/m³ in der Außenatmosphäre) ausgewiesen. Danach gilt:
  - Der Wasserdampfgehalt ist sowohl im Winter als auch im Sommer im Bohrloch (offen bzw. geschlossen) eines **nicht bewitterten Betons** in einer vergleichbaren Größenordnung wie in der umgebenden Atmosphäre.
  - Im Bohrloch eines **bewitterten Betons** ist der Wasserdampfgehalt dagegen bis zu 45 % (Winter) bzw. 56 % (Sommer) höher als in der umgebenden Atmosphäre.

  Diese gegenüber der Bauteilumgebung erhöhte Feuchte im Bohrloch eines bewitterten Betons ist darauf zurückzuführen, dass dieser Beton und somit auch dessen Bohrlochwandung in tieferen Bereichen bewitterungsbedingt erhöhte Wassergehalte aufweisen, die insbesondere bei erhöhten Temperaturen von der Bohrlochluft in Form von Wasserdampf aufgenommen werden. Ein nicht bewitterter Beton hat über den Querschnitt dagegen eine konstant niedrige Ausgleichsfeuchte.

- **Vergleich der Wasserdampfgehalte der Bohrlochatmosphäre im nicht bewitterten und bewitterten Beton**. Die Wasserdampfgehalte im Bohrloch (offen/geschlossen) von bewitterten Bauteilen ist sowohl im Winter als auch im Sommer bis zu 50 % höher als im nicht bewitterten Bauteil.

  Dies hängt damit zusammen, dass die Temperatur der Betonoberfläche und somit des Bohrlochs wegen wiederholter Sonnenbestrahlung beim bewitterten Beton stets höher ist als beim nicht bewitterten Beton.

- **Vergleich der Wasserdampfgehalte der Bohrlochatmosphäre im offenen und geschlossenen Bohrloch**. Sowohl im Winter als auch im Sommer ist der über das Jahr gemittelte Wasserdampfgehalt von Bauteilen (bewittert / nicht bewittert) bei offenem und geschlossenem Bohrloch in derselben Größenordnung.

Dies ist primär wohl darauf zurückzuführen, dass die Temperaturen im Bohrloch sich für beide Zustände kaum unterscheiden. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Streuungen des Wasserdampfgehaltes im Bohrloch bei bewitterten Bauteilen (Bohrloch offen / Bohrloch geschlossen) größer sind als bei nicht bewitterten Bauteilen.

Folgerungen. Aus den vorgenannten Ergebnissen folgt:

- Die Luftfeuchte im Bohrloch ist im Mittel aller betrachteten Fälle deutlich höher und damit bezüglich einer Korrosionsbeanspruchung ungünstiger als in der umgebenden Atmosphäre.
- Bei hohen Außentemperaturen ist die Luftfeuchte im Bohrloch im Vergleich zur Luftfeuchte außerhalb des Bohrloches höher und damit deutlich ungünstiger als bei niedrigen Außentemperaturen.
- Bei bewitterten Bauteilen ist, wegen erhöhter Temperatur und demzufolge höherem Wasserdampfgehalt, die Luftfeuchte im Bohrloch deutlich höher und damit deutlich ungünstiger als bei nicht bewitterten Bauteilen.
- Es besteht kein gravierender Unterschied zwischen der Luftfeuchte im Bohrloch zwischen Dübeln mit offenem und geschlossenem Bohrloch.

Carbonatisierung des Betons der Bohrlochwandung

Die Bohrlochwandung kann im Kontakt mit der Bohrlochluft carbonatisieren. Diese Carbonatisierung hängt wesentlich von dem Wassergehalt des das Bohrloch umgebenden Betons, damit auch vom Wasserdampfgehalt im Bohrloch (siehe oben) und der Möglichkeit einer Abtrocknung der Bohrlochwandung ab. Bekanntlich carbonatisiert trockener Beton schneller als ein feuchter Beton. Da der Beton mit zunehmender Betontiefe feuchter wird, werden tiefere Betonwandungen langsamer carbonatisieren als oberflächennahe.

Es ist davon auszugehen, dass die Korrosionsgeschwindigkeit von stählernen Einbauteilen im Kontakt mit der Bohrlochwandung bei carbonatisierten Bohrlochwandungen (pH ≈ 8,3) größer ist als bei nicht carbonatisierten (pH ≈ 13). Bei metallischen Überzügen auf Zinkbasis ist dagegen aufgrund des amphoteren Verhaltens von Zink (**Bild 4.8**) zu beachten, dass die Korrosion mit einer feuchten/nassen nicht carbonatisierten Wandung ausgeprägter sein kann als mit einer carbonatisierten.

In Untersuchungen an Bohrlöchern mit gesetzten Spreizdübeln wurde nach 1jähriger und 3jähriger Auslagerung in Stadtklima und Konstantklima (84 % bzw. 100 % relative Luftfeuchte) durch Betupfen mit Phenolphthalein das Carbonatisierungsverhalten der Bohrlochwandung festgestellt. Die Bohrlochwandung war in jedem Fall bis zu einer bestimmten Tiefe carbonatisiert, wobei die Tiefe der carbonatisierten Bohrlochwandung (bei starker Streuung) tendenzmäßig jeweils in folgender Reihenfolge zunimmt:

- 100 % relative Luftfeuchte → 84 % relative Luftfeuchte / Stadtklima,
- Bohrloch geschlossen → Bohrloch offen,
- 1 Jahr → 3 Jahre.

Bild 7.7 zeigt beispielhaft den Carbonatisierungszustand für eine Betonprobe mit offe-

nem Bohrloch, die bei 84 % relativer Luftfeuchte ausgelagert wurde, wobei dieser Zustand auch für Auslagerung in Stadtklima typisch ist.

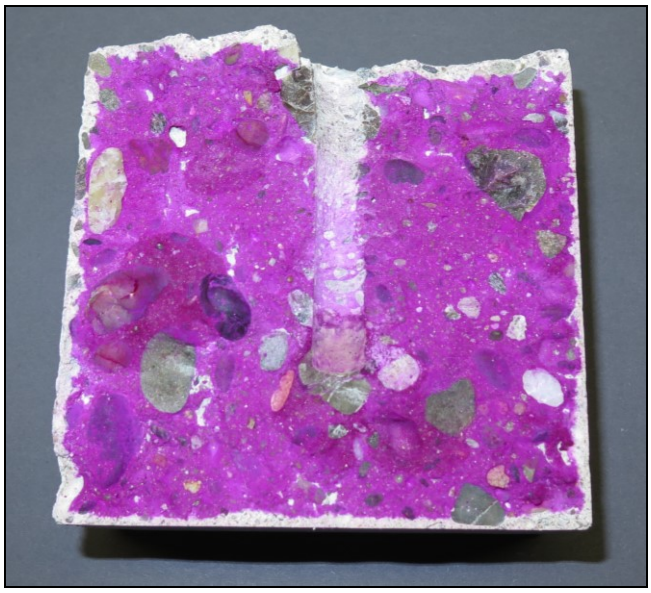


Bild 7.7:
Gespaltener Betonwürfel nach Ausbau eines Dübels (offenes Bohrloch) nach Abtupfen der Oberfläche mit Phenolphthalein; Probe 3 Jahre bei 84 % relativer Luftfeuchte; die hellen Bereiche verweisen auf eine Carbonatisierung

In der Folge werden eigene Chloridmessungen bei eingebauten Spreizdübeln behandelt. Nach 3jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (Entfernung vom Meer etwa 50 m) wurden mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX-Analyse) bei in Beton gesetzten verzinkten Spreizdübeln die Chloridgehalte

- im Bohrlochinnern auf der Bohrlochwandung
- und auf Spreizdübeln außerhalb und innerhalb des Bohrlochs

bestimmt. Dabei wird zwischen Bohrloch offen und geschlossen, Beton bewittert und nicht bewittert (beregnet) unterschieden. Die nicht bewitterten Betonkörper wurden derart gelagert, dass die Dübel in eine senkrechte Fläche eingebaut wurden. Die bewitterten Körper wurden unter einer Neigung von ca. 30° flachgelagert (**Bild 10.5**). Nähere Details zum Versuchsaufbau werden in Abschn. 10.3.3 beschrieben.

Chloridgehalte im Bohrlochinnern auf der Bohrlochwandung

Beispielsweise in küstennahen Bereichen können sich auf **Betonoberflächen** Chloridaerosole ablagern. Da diese nur zusammen mit Wasser (im gelösten Zustand) in den Beton eindringen können, ist auf nichtberegneten Betonoberflächen ein tieferes Eindringen dieser Salze über Diffusion auszuschließen. Bei Beregnung würden Salzablagerungen auch wieder aus dem Beton abgewaschen bzw. herausgelöst werden. Demnach können korrosionswirksame Chloridmengen kaum über den Beton in das Bohrloch gelangen.

Chloride können über die Atmosphäre oder zusammen mit Wasser vor allem dann in das **Bohrloch** gelangen, wenn dieses nach außen hin offen ist. Eine diffusionsoffene Verbindung zwischen innerem Dübelhohlraum und umgebender Atmosphäre über das

Anbauteil ist zwar häufig gegeben, jedoch wird der Zutritt von Chloriden (oder auch Schadgasen) von außen am Eindringen in das Bohrloch zumindest behindert. Die Korrosion der Dübel im Bohrloch wird deshalb unter Chlorideinfluss in erster Linie durch den Feuchtegehalt des Betons im dübelnahen Bereich und im Hohlraum selbst bestimmt.

In keinem Fall wurden innerhalb der Bohrlöcher entlang der gesamten Tiefe auf **Bohrlochwandungen** auch nur Spuren von Chloriden festgestellt. **Bild 7.8** zeigt beispielhaft EDX-Spektren in 0 bis 5 mm Tiefe der Bohrlochwandung eines in Meeresatmosphäre nicht bewitterten und bewitterten Dübels mit offenem Bohrloch. Die vorhandenen elementspezifischen Peaks verweisen auf die üblichen Bestandteile von Zementstein und ihre unterschiedlichen Gehalte sowie auf Ablagerungen von Zink des verzinkten Dübels. Ein Chlorpeak (dieser würde bei 2,6 keV liegen) ist nicht vorhanden.

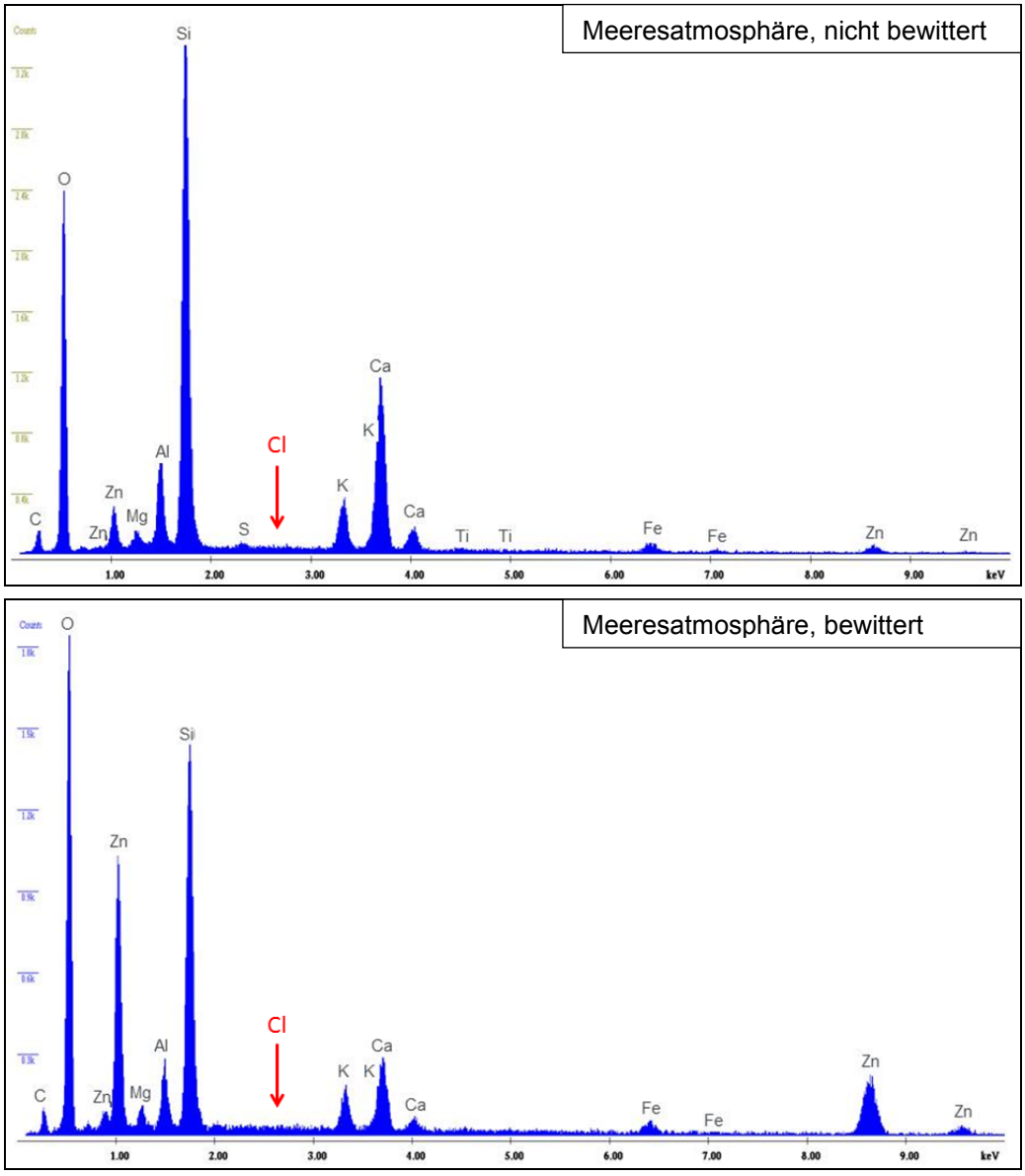


Bild 7.8:
EDX-Analyse der Bohrlochwandung (Bohrlochtiefe 0 bis 5 mm) von Dübeln mit offenem Bohrloch nach 3jähriger Lagerung in Meeresatmosphäre

ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4

Bild 7.9:
Analysenbereiche von Muttern nach 3 Jahren in Meeresatmosphäre, bewittert

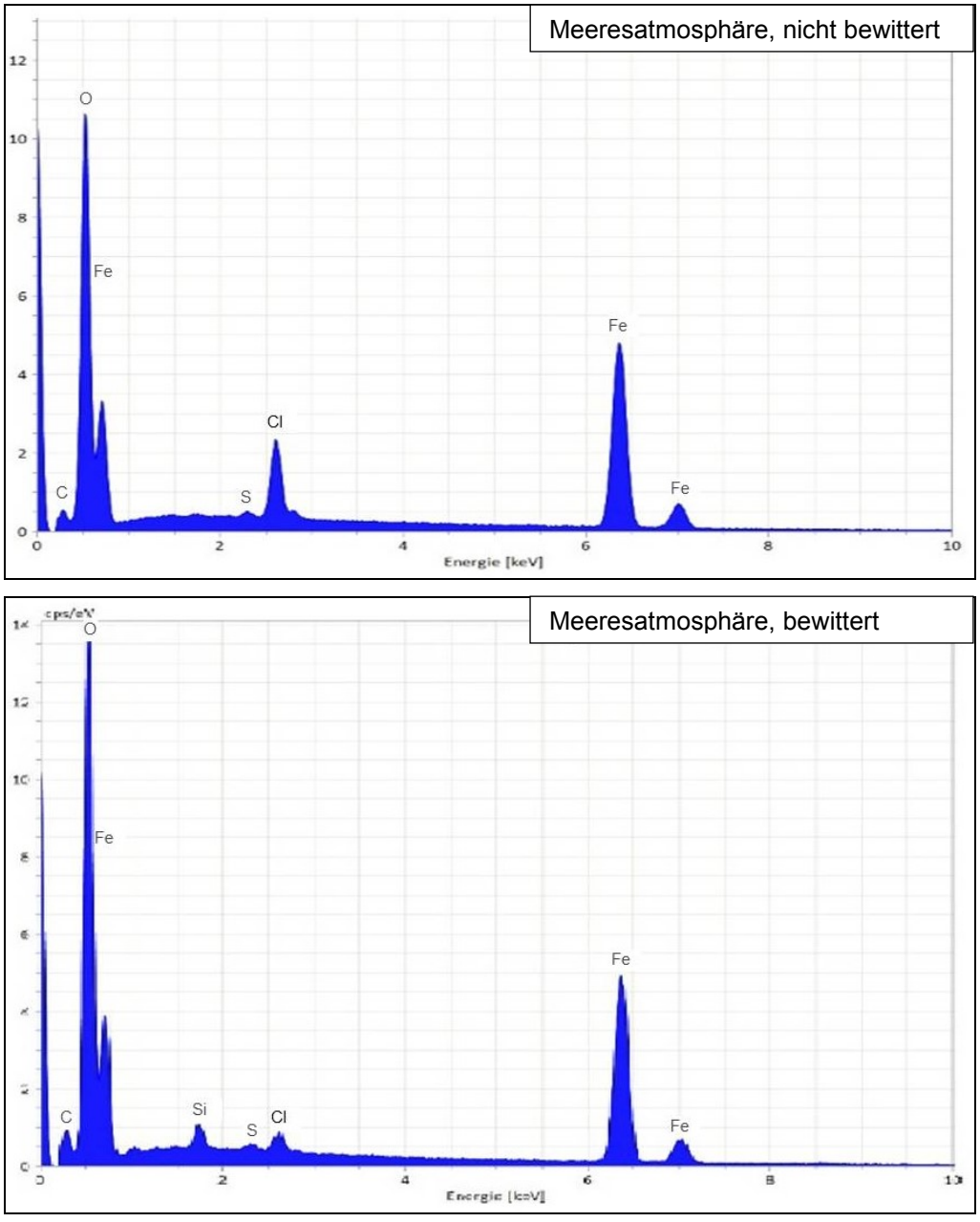


Bild 7.10:
EDX-Analyse (Übersichtsanalyse) auf Muttern in Meeresatmosphäre, ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach 3 Jahren

Chloridgehalte auf Dübeln außerhalb und innerhalb des Bohrlochs

Die **Bilder 7.9 bis 7.12** zeigen Beispiele von EDX-Analysen auf Dübelteilen außerhalb und innerhalb von Bohrlöchern. Den Bildern kann folgender Sachverhalt entnommen werden:

Muttern außerhalb des Bohrloches. Auf Muttern außerhalb des Bohrloches (ohne und mit Abtrag des metallischen Überzuges, **Bild 7.9**) wurden Chloride in den Korrosionsprodukten nachgewiesen (**Bild 7.10**). Die Chloridgehalte in Korrosionsprodukten nicht bewitterter Oberflächen sind deutlich höher als jene in Korrosionsprodukten bewitterter (beregneter) Muttern. Dies bestätigt die Ergebnisse von Messungen der Chloridgehalte auf anderweitigen Oberflächen in Meeresatmosphäre (Abschn. 10.2), wonach dauerhaft nicht beregnete Bereiche deutlich höhere Chloridgehalte aufweisen als wiederholt beregnete.

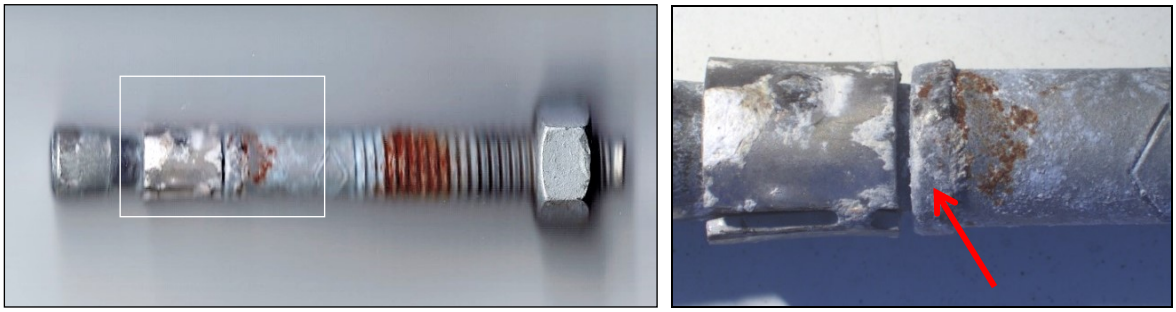


Bild 7.11:
Spreizdübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 in offenem Bohrloch, bewittert, nach 3 Jahren Auslagerung des Betonkörpers in Meeresatmosphäre

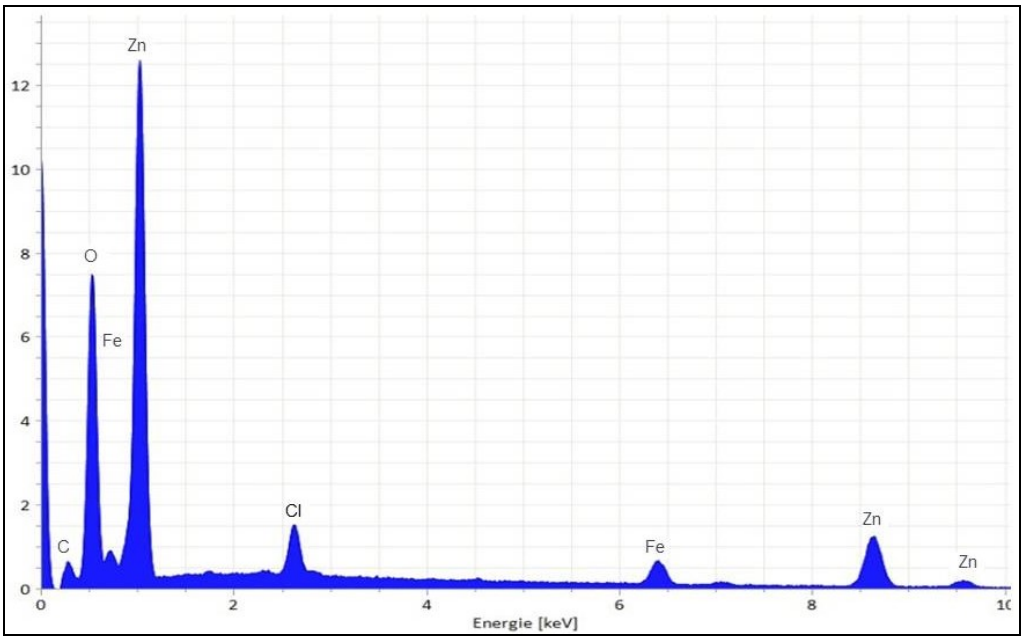


Bild 7.12:
EDX-Analyse in mit Pfeil bezeichnetem Bereich in **Bild 7.11** (lokale Chloridanreicherung)

Spreizdübel im Bohrloch. Bei nicht bewitterten Dübeln wurden innerhalb des Bohrloches keine Chloride auf den Oberflächen festgestellt. Bewitterte (beregnete) Spreizdü-

bel (**Bild 7.11**) weisen dagegen auch Chloride in lokal erhöhter Konzentration auf Dübeloberflächen im Bohrloch auf (**Bild 7.12**). Diese Chloride gelangen offensichtlich gelöst in Wasser in das Bohrlochinnere.

7.3.4 Korrosionsszenarien bei einem Spreizdübel

Hinsichtlich der Korrosion eines verzinkten Dübels im Beton-Bohrloch sind 3 typische Situationen zu unterscheiden:

a) Der Dübel wird in einen schon weitgehend abgetrockneten Beton mit Ausgleichsfeuchten des Betons unter 50 % eingesetzt.

b) Der Dübel wird in einen noch feuchten/nassen jungen Beton eingesetzt, der allmählich (auch über die Bohrlochwandung) austrocknet und bei dem erst nach wenigen Monaten bis Jahren der Beton der Bohrlochwandung eine Ausgleichsfeuchte unter 50 % annimmt.

c1) Der Dübel wird in einen wiederholt feuchten/nassen Beton mit Ausgleichsfeuchten des Betons über 80 % eingesetzt (bewitterter Beton im Freien).

c2) Es dringt gelegentlich Wasser in das nach außen nicht abgedichtete Bohrloch ein.

Diese Zustände wurden bei galvanisch verzinkten Spreizdübeln (die ursprüngliche Zinkdicke lag im Mittel bei 20 µm) vorgefunden und bewertet [11], die 40 Jahre in der Betonwandung und im Bodenbereich eines Kernkraftwerkes eingebaut waren. Bei den Spreizdübeln (Liebig-Sicherheitsdübel, **Bild 7.5**) stehen die Spreizhülse und die Außenfläche des Gewindekonus im Bohrloch mit dem Beton in Kontakt, während andere Teile (Gewindebolzen, Konus, Distanzhülse) mit der Bohrlochatmosphäre in Berührung kommen.

Zu a), Ständig trockener Beton. Der Dübel zeigt bei allen Dübelteilen überwiegend eine noch geschlossene Zinkauflage und die für Zinkkorrosion in feuchter Atmosphäre charakteristische Belegung mit Weißrost (Zinkhydroxid) fehlt (**Bild 7.13**). Rotrost ohne erkennbaren Stahlabtrag ist lokal vorhanden. Hier bestand ein Kontakt mit der anfänglich noch feuchten Bohrlochwandung, denn im Rost wurden neben Eisen und Zink in die für Zement bzw. Beton typischen Elemente Calcium, Silicium, Kalium, Schwefel und Aluminium in charakteristischer Konzentration nachgewiesen, dagegen nicht auf den Flächen mit Restzink.

Nach einer Einbauzeit von etwa 40 Jahren im Wandbereich wurde in Bereichen mit Restzink zerstörungsfrei eine mittlere Zinkdicke von 14,0 µm (25 Werte, Streuung 11,0 bis 17,4 µm) festgestellt. Wenn man davon ausgeht, dass die Zinkauflage ursprünglich bei 20 µm lag, so wurde das Zink im Bohrloch infolge Korrosion um 6,0 µm abgetragen, was bei einem Alter der Dübel von rd. 40 Jahren einer mittleren jährlichen Korrosionsrate beim Zink von etwa 0,15 µm/a entspricht.

Nach DIN EN ISO 9224 (**Tabelle 4.1**) sind Zinkabtragungen der genannten Größenordnung einer Korrosivitätskategorie C2 zuzuordnen. Diese Kategorie entspricht einer geringen Korrosionsbelastung, wie sie beispielsweise im Innenbereich in nach außen offe-

nen, schadstofffreien Hallen mit einer mittleren relativen Luftfeuchte von 75 % und sehr seltener Kondensation vorkommt.

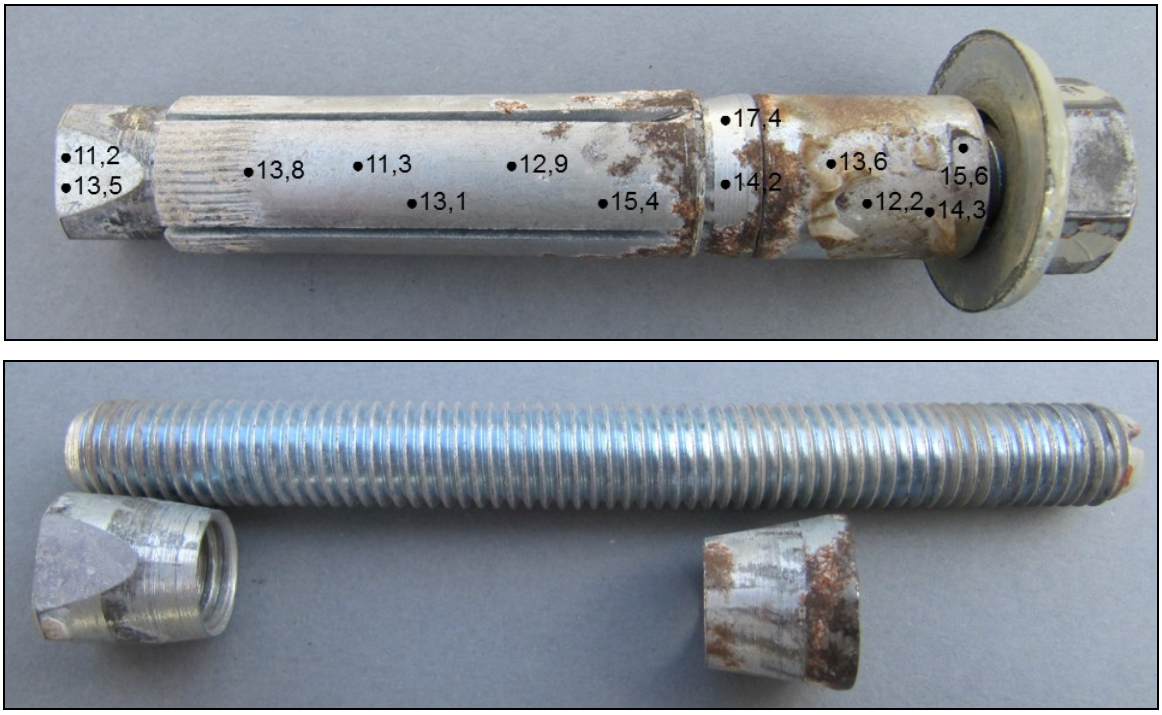


Bild 7.13:
Dübel in ständig trockenem Beton nach 40 jährigem Einbau (Zahlen: zerstörungsfrei gemessene Restzinkschichtdicken)

Zu b), anfänglich feuchter/nasser Beton. Im gesamten Spreizbereich und in Abschnitten vom unteren Konus ist Rotrost vorhanden und der Stahl ist infolge Flächenkorrosion abgetragen (**Bild 7.14**). Die Angriffstiefe beim Stahl liegt in einer Größenordnung von 50 µm und ist somit gering. Die Rotrostbereiche des Spreizteils sind die Folge einer Spaltkorrosion (Kontakt mit dem anfänglich noch nassen erhärteten Beton). Auf dem oberen Konus, der Distanzhülse und dem Gewindebolzen (Flächen, die ausschließlich mit der Bohrlochatmosphäre in Kontakt stehen und nicht etwa den Beton berühren) ist noch flächendeckend Zink vorhanden und die für Zinkkorrosion in feuchter Atmosphäre charakteristische Belegung mit Weißrost (Zinkhydroxid) fehlt.

Nach einer Einbauzeit von etwa 40 Jahren im Wandbereich wurde in Bereichen mit Restzink zerstörungsfrei eine mittlere Zinkdicke von 8,6 µm (13 Werte, Streuung 7,7 bis 10,6 µm) festgestellt. Bei einer ursprünglichen Zinkauflage von 20 µm beträgt der Zinkabtrag somit 11,4 µm, was bei einer Nutzungsdauer von 40 Jahren einer mittleren jährlichen Korrosionsrate beim Zink von etwa 0,29 µm/a entspricht. Auch diese Zinkabtragung wäre einer Korrosivitätskategorie C2 zuzuordnen (**Tabelle 4.1**).

In jenen Bohrlöchern von ständig trockenen und anfänglich feuchten/nassen Betonwänden, denen die Dübel nach 40 Jahren entnommen wurden, wurde zum Zeitpunkt der Entnahme auch das Klima festgestellt [12]. Im Mittel beträgt die relative Luftfeuchte etwa 79 %, welches bei einer Temperatur von 21 °C einem Wasserdampfgehalt von

14,8 g/m³ entspricht. Dieses Klima entspricht in etwa jenem im Bohrloch eines nicht bewitterten Betons im Freien in den Sommermonaten (**Tabelle 7.1**).

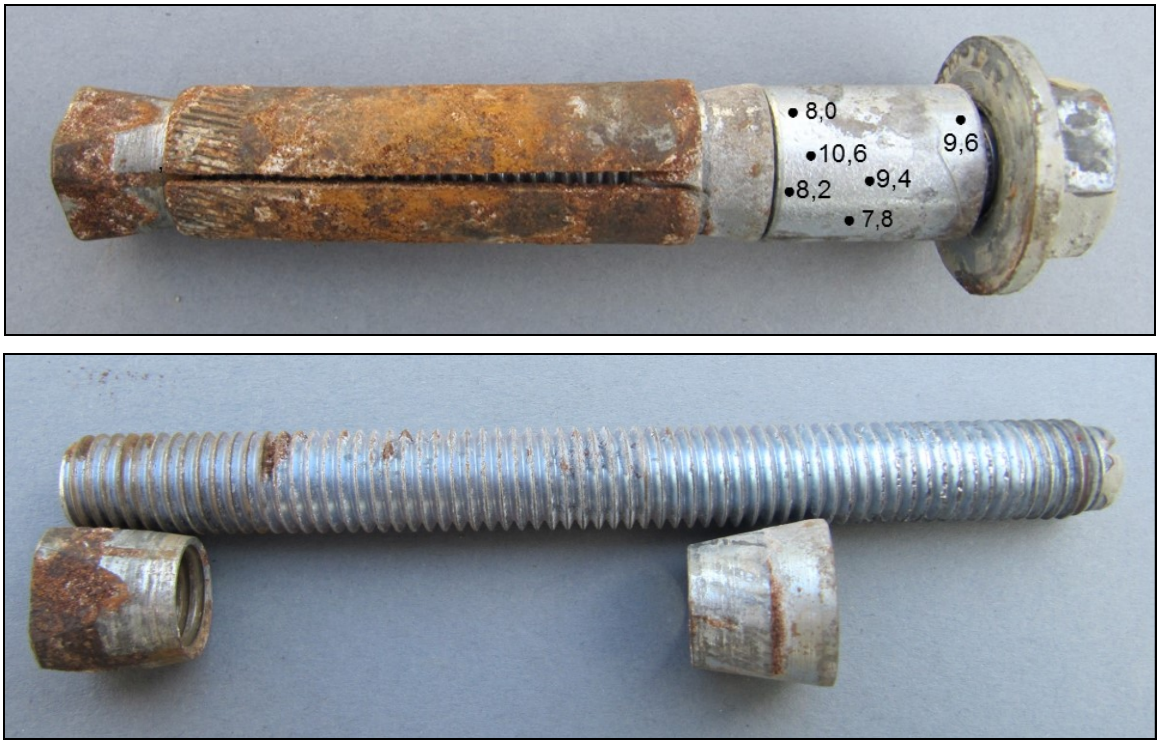


Bild 7.14:
Dübel in anfänglich feuchtem/nassen Beton nach 40 jährigem Einbau (Zahlen: zerstörungsfrei gemessene Restzinkschichtdicken)

Zu c), häufig nasser Beton. Alle Teile des Dübels zeigen einen nahezu kompletten Zinkabtrag (**Bild 7.15**). Der eher flächige Stahlabtrag liegt in einer Größenordnung von 100 µm. Im Rost der betonberührten Flächen wurden neben Eisen und Zink in die für Zement bzw. Beton typischen Elemente Calcium, Silicium, Kalium, Schwefel und Aluminium in charakteristischer Konzentration nachgewiesen, dagegen nicht auf den Flächen, die mit dem Beton keinen Kontakt hatten. Im Unterschied zu den vorgenannten Situationen (ständig trockener Beton und anfänglich feuchter/nasser Beton) sind hier also auch solche Flächen stark korrodiert, die keinen Kontakt zum Beton der Bohrlochwandung hatten. Wegen des erfolgten Korrosionsangriffes konnte eine zerstörungsfreie Ermittlung der Restschichtdicke nicht durchgeführt werden.

Im vorliegenden Fall hatten die Dübelteile im Bodenbereich temporär wiederholt Kontakt mit zeitweise in das Bohrloch eingedrungenem Wasser und somit auch mit einem nassen Beton. Die Zuordnung der Bohrlochverhältnisse zu einer Korrosivitätskategorie ist bei dieser Korrosionsangriffsstärke nicht möglich, jedoch ist von einer Korrosivitätskategorie > C2 auszugehen.

In jenen häufig nassen Bohrlöchern von Böden, denen die Dübel nach 40 Jahren entnommen wurden, wurde zum Zeitpunkt der Entnahme folgendes Klima festgestellt [12]: Im Mittel beträgt die relative Luftfeuchte etwa 97 %, was bei einer Temperatur von 22 °C einem Wasserdampfgehalt von 19,3 g/m³ entspricht. Dieses Klima entspricht in

etwa jenem im Bohrloch eines bewitterten Betons im Freien in den Sommermonaten (**Tabelle 7.1**).

Bild 7.15:
Dübel in häufig nassem Beton nach 40 jährigem Einbau

Folgerungen. Aus den dargelegten Beispielen kann gefolgert werden, dass die Exposition des Betons (z. B. Beton im Freien bewittert bzw. nicht bewittert) einen wesentlichen Einfluss auf die Korrosionsverhältnisse im Bohrloch von Dübeln hat. Deshalb wird dem bei der Versuchsdurchführung in Abschn. 10 gezielt Rechnung getragen.

7.4 Kunststoffrahmendübel

7.4.1 Herstellung und Wirkungsweise

Kunststoffrahmendübel dienen der Mehrfachbefestigung von nichttragenden Systemen zur Verankerung in Beton und in Mauerwerk. Eine wichtige und im vorliegenden Fall zu betrachtende Anwendung ist die Befestigung einer Unterkonstruktion aus Holz in den vorgenannten Untergründen bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden.

Herkömmliche Kunststoffrahmendübel bestehen aus einer Dübelhülse aus Polyamid mit Spreizteil und einer zugehörigen Flachkopfschraube aus korrosionsgeschütztem Stahl (**Bild 7.16**). Das Schraubgewinde und der Schaft der Schraube liegen im Innern der Dübelhülse, der Schraubenkopf befindet sich außerhalb des Untergrundes, z. B. im hinterlüfteten Spalt der vorgehängten hinterlüfteten Fassade. Die Schraube wird bis zum Anliegen des Kopfes auf dem Kragen der Dübelhülse angezogen und dichtet dabei den

inneren Luftbereich zwischen Schraube und Hülse gegenüber der äußeren Atmosphäre ab.

Bild 7.16:
Beispiel eines Kunststoffrahmendübels (Dübelhülse und Schraube)

Der gezahnte Spreizteil der Dübelhülse ist geschlitzt. Zunächst wird der Dübel in ein vorgebohrtes Loch gesetzt und anschließend durch vollständiges Eindrehen der Schraube in die Dübelhülse im Bereich des Schraubengewindes gespreizt. Die Schraube prägt und schneidet beim Eindrehen ein Gewinde in den Kunststoff. Dabei wird gleichzeitig die Hülse gegen die Bohrlochwand gepresst. Die Dübel tragen in Vollmaterial, wie Beton und Vollsteine, in Loch- und Hohlsteinen weniger, durch Reibung zwischen der Hülse und der Bohrlochwand.

Es ist möglich, den Dübel auch derart einzubauen (**Bild 10.6**), dass der offene Bereich des Spreizdübels (das Spreizelement) bis zu 20 mm tief im Holz mit unmittelbar angrenzender Wärmedämmung zu liegen kommt. Hieraus resultieren keine besonderen Korrosionsbelastungen für die Dübelschraube [13].

Die hier untersuchten bauaufsichtlich zugelassenen Kunststoffrahmendübel [14] in der Ausführung W-UR F bestehend aus einer Sechskantschraube mit Teilgewinde (Sechskant-Flachkopf mit angepresster Scheibe) der Abmessung 7 x 107 (7 mm Durchmesser und 107 mm Länge) und einer Polyamid-Hülse der Abmessung 10 x 100 (10 mm Durchmesser und 100 mm Länge) wurden aus einem niedriglegiertem Stahl hergestellt und unterschiedlich korrosionsgeschützt (Abschn. 8). Die Schrauben wurden nach einer Kaltmassivumformung und nach dem Aufwalzen des Gewindes einsatzgehärtet. Durch das Gewindewalzen weisen die Schrauben, vergleichbar den Holzschrauben (**Bild 7.2**) und Bohrschrauben zwischen den Gewindegängen Oberflächenfehler auf, die vom metallischen Überzug in unterschiedlicher Weise überdeckt werden (Abschn. 8).

7.4.2 Bisheriger Korrosionsschutz

Die europäische technische Zulassung [14] erfordert bezüglich korrosionstechnischer Anforderungen eine Dauerhaftigkeit des Kunststoffrahmendübels für etwa 50 Jahre. Unter Umgebungsbedingungen einer Korrosivitätskategorie C1 bis C3, also höchstens in Stadtatmosphäre und mäßig belasteter Industrieatmosphäre und wenn Belastungen der Atmosphäre durch Chloride nur eine untergeordnete Rolle spielen (vergl. Abschn. 3.4.1), akzeptiert die Zulassung galvanisch verzinkte Schrauben mit einer Mindestzinkdicke von 5 µm, die auch zusätzlich blaupassiviert werden. Durch eine galvanische

Verzinkung geschützte Spezialschraube ohne zusätzlichen Schutz darf allerdings nur in Bauteilen unter Bedingungen trockener Innenräume eingesetzt werden. Erst wenn der Bereich des Schraubenkopfes gegen Feuchtigkeit und Schlagregen so geschützt ist, dass auch ein Eindringen von Feuchtigkeit in den Dübelschaft nicht möglich ist, darf der Dübel auch im Freien verwendet werden. Am Übergang Schraube/Dübelschaft muss deshalb das Eindringen von Wasser in das Innere des Dübels durch Aufbringen einer abdichtenden dickschichtigen Kopfbeschichtung (z. B. eine weichplastische dauerelastische Bitumen-Öl-Kombinationsbeschichtung) verhindert und gleichzeitig der Schraubenkopf zusätzlich geschützt werden.

Die Regelung, wonach zum Zwecke des Korrosionsschutzes in normaler Stadtatmosphäre die Aufbringung einer galvanischen Verzinkung als ausreichend erachtet wird, basiert auf korrosionstechnische Untersuchungen an bestehenden Fassadenkonstruktionen [15], Naturversuchen [16] sowie der Kenntnis des Feuchte- und Wärmehaushaltes von nicht bewitterten Untergründen hinter vorgehängten hinterlüfteten Fassaden [13].

Da bei stärkerer Korrosionsbeanspruchung (Korrosivitätskategorie C4, z. B. in Meeresatmosphäre) ein anspruchsvollerer Korrosionsschutz als eine galvanische Verzinkung erforderlich ist, werden für solche Anwendungen die Dübelschrauben bisher aus nichtrostendem Stahl hergestellt. Da die Korrosionsbeanspruchung im Innern der nach außen abgeschirmten Dübelhülse begrenzt ist, wäre der Korrosionsschutz von Schrauben aus unlegiertem Stahl durch einen ZnNi-Überzug oder ZnAl-Lamellenüberzug u. U. eine sinnvolle und wirtschaftliche Alternative, weshalb diese Variante in der vorliegenden Arbeit näher untersucht wurde.

7.4.3 Korrosionsbeanspruchung der Dübelschraube

Die Korrosionsbeanspruchung des Kunststoffrahmendübels soll hier am Beispiel der vorgehängten hinterlüfteten Fassade besprochen werden. Sie kommen im Luftspalt hinter der Bekleidung mit der Außenatmosphäre in Berührung. Die Kunststoffhülse kommt abschnittsweise mit Baustoffen wie Beton bzw. Mauerwerk und Holz in Kontakt; der geschlitzte Bereich kann bis zu 2 cm in das Holz eines Anbauteils hineinreichen. Daraus folgt:

- Im **Luftspalt von hinterlüfteten Außenwandbekleidungen** wird die zu erwartende korrosive Belastung aus den einwirkenden äußeren atmosphärischen Einflüssen bestimmt (Abschn. 3.2).
- Für die Korrosionsbeanspruchung der Schraube im **Innern der Dübelhülse (im Bohrloch)** sind hauptsächlich die feuchtetechnischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe der Unterkonstruktion (Holz, Abschn. 3.3.1) und des Untergrundes (z. B. Beton, Abschn. 7.3) und bauphysikalische Gegebenheiten, einschließlich des Wärmedurchlasswiderstandes einer verwendeten Wärmedämmung bei Außenwänden von Gebäuden (siehe unten), von Bedeutung. Ein Austausch von korrosionsfördernden Schadstoffen (z. B. Chloriden) zwischen Hinterlüftungsspalt und dem Innern der Dübelhülse findet wegen der Abdichtung des Bohrloches nicht statt. Ein Transport von Schadstoffen in den Beton und in das Holz ist nur im feuchten/nassen Bau-

stoff möglich (Abschn. 7.3.3). Von einem solchen Zustand ist im Hinterlüftungsbereich einer Fassade jedoch nicht auszugehen.

Korrosionsbeanspruchung durch Feuchte in der Dübelhülse

Die Korrosion der Schraube im Luftraum der Dübelhülse wird unter allen Korrosivitätskategorien C2 bis C4 stets durch den Feuchtegehalt von Beton und Holz im dübelnahen Bereich und damit zusammenhängend im Hohlraum selbst bestimmt. Die atmosphärische Korrosion wird beeinflusst von der relativen Luftfeuchte in der Hülse und der Möglichkeit einer Kondenswasserbildung infolge von Taupunktunterschreitung (Abschn. 3.2.1). Da der Luftraum innerhalb der Dübelhülse gegenüber der Atmosphäre im hinterlüfteten Luftspalt einer Fassade abgedichtet ist, ergibt sich die vorherrschende Luftfeuchte aus dem Gleichgewicht mit den umgebenden Baustoffen Beton und Holz.

Kontakt mit Beton. Die sich im Gleichgewicht mit der äußeren Atmosphäre im Bohrloch einstellende **Luftfeuchte** folgt wegen der Abdichtung des Schraubenkopfes vergleichbaren Gesetzmäßigkeiten wie für das geschlossene Bohrlochinnere des Spreizdübels beschrieben (Abschn. 7.3.3). Dies gilt allerdings nur bei vergleichbaren Anwendungen von Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel. Dann stellen sich innerhalb der Bohrlochatmosphäre vergleichbare Feuchtegehalte ein wie in **Tabelle 7.1** bei Dübeln in nicht bewitterten Bauteilen mit geschlossenem Bohrloch.

Da Kunststoffrahmendübel häufig in Außenwänden von Gebäuden eingesetzt werden, ist allerdings auch das unterschiedliche Klima beiderseits der Wand zu beachten, welches die Möglichkeit einer zusätzlichen **Tauwasserbildung** innerhalb der Betonwand in Höhe der Dübel zulässt. Hinsichtlich dieser Möglichkeit einer zusätzlichen Feuchtebelastung durch Taupunktunterschreitung gilt folgendes:
Bei Wänden aus porösen Baustoffen zwischen einem Innen- und Außenbereich findet stets eine gewisse Wasserdampfdiffusion von innen nach außen statt. Besteht aufgrund der vorhandenen Klimabedingungen ein Wasserdampfteildruckgefälle zwischen den beiden angrenzenden Luftschichten (innen und außen) eines porösen Wandbauteils, dann bewegt sich der Wasserdampf aufgrund des Druckunterschiedes durch die Wandkonstruktion von der Seite des höheren Wasserdampfteildruckes zur Seite des niedrigeren, um die Teildruckdifferenz auszugleichen. Es findet dann eine Wasserdampfdiffusion statt. Hohe Dampfdruckunterschiede sind zu erwarten zwischen warm und hoher relativer Luftfeuchte (hoher Wasserdampfteildruck, eher im Gebäudeinnern) und kalt und niedriger relativer Luftfeuchte (niedriger Wasserdampfteildruck, meistens im Winter außen). Wenn wasserdampfhaltige (feuchte) Luft in der Wand abkühlt, so kann es bei starken Temperaturunterschieden in der Wand im äußeren Drittel der Wand zu Taupunktunterschreitung, demnach zu einer Feuchtebelastung integrierter Verbindungsmittel und u. U. zu Korrosion kommen. Für Kunststoffrahmendübel wurde nachgewiesen [15], dass bei Wänden mit niedrigen bis sehr hohem Wärmedurchlasswiderstand und zusätzlicher wirksamer Wärmedämmung, unabhängig vom Einbauzustand (Lage des Schlitzes) in der Dübelhülse zu keinem Zeitpunkt Tauwasseranfall entlang der Schraube zu erwarten ist. Für eine wirksame Wärmedämmung zur Verhinderung von Wand-

feuchte und Korrosion muss die Dicke mind. 4 cm bzw. der Wärmedurchlasswiderstand 1/Λ mindestens

$$1/\Lambda \geq 1{,}0\ (m^2 \cdot K) / W$$

betragen. Auf diese Weise ergibt sich hinter der Wärmedämmung ein Klima mit geringer relativer Luftfeuchte ≤60 % und Korrosion wird unterbunden. Auch die Möglichkeit einer Taupunktunterschreitung an der Dübelschraube infolge einer Wärmebrückenwirkung ist daher auszuschließen.

Der Einfluss der äußeren Wärmedämmung bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden beruht demnach auch darauf, dass bei dieser Konstruktionsart der Taupunkt aus der Wand in den Dämmungsbereich verlagert wird, wodurch Tauwasser theoretisch nur in der Dämmschicht entstehen kann. Tatsächlich gibt es in einer diffusionsoffenen Wärmedämmung im Hinterlüftungsbereich jedoch keine Taupunktunterschreitung, da der von innen ankommende Wasserdampf kontinuierlich nach außen in den Luftraum entweicht und über den Hinterlüftungsstrom sofort abgeführt wird. Nur wenn der Wasserdampf nicht abtransportiert wird (wenn keine ausreichende Hinterlüftung erfolgt) kann sich Wasser im Dämmstoff niederschlagen und setzt die Wirksamkeit der Wärmedämmung herab.

Wegen der genannten Zusammenhänge (keine erhöhte relative Luftfeuchte in der Dübelhülse, keine Taupunktunterschreitung an der Dübelschraube und im dübelnahen Beton) ist eine merkliche Korrosionsbeanspruchung der geschlitzten Dübelschraube innerhalb der Dübelhülse auszuschließen. Der Korrosionsschutz muss daher in erster Linie der korrosiven Belastung im Hinterlüftungsbereich der Fassaden, also jenen des Schraubenkopfes, genügen.

Literatur Abschnitt 7

[1] H.J. Blaß, Ireneusz Bejtka: Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten. Holzbaukalender 2004, Bruderverlag Karlsruhe, 2004

[2] DIN 7998 (1975) Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben

[3] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Würth ASSY Holzschrauben, selbstbohrende Holzschrauben als Holzverbindungsmittel Z-9.1-514 vom 28.03.2012

[4] DIN EN 1995 (2013), Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

[5] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6 vom 05.03.2018 „Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen“

[6] U. Nürnberger: Hochfeste Bauteile und Verbindungsmittel im Ingenieurbau. In: Nichtrostende Stähle können rosten? GfKORR-Seminar DECHEMA-Haus Frankfurt, 27.09.2004, Seminarunterlagen

[7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.1-4 vom 29.04.2016 „Verbindungselemente zur Verbindung von Bauteilen im Metallleichtbau“

[8] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

[9] R. Eligehausen, R. Mallee: Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2000

[10] Europäische Technische Zulassung ETA-02/0001, Würth Fixanker W-FA, Stand 2016

[11] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten von verzinkten Dübeln bei Anwendung im Außenbereich. In: Befestigungstechnik, ibidem-Verlag, Stuttgart 2012, S.223-246

[12] T. Peiser: Gutachten Nr. SIb 8405.2010.a, sibet gmbh Stelle, 2011

[13] U. Nürnberger, J. Küenzlen: Einsatz von Kunststoffrahmendübeln bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen. Zeitschrift ql²/8 Fa. Würth. 5 (2012) Nr. 8, S.5-13

[14] Europäische Technische Zulassung ETA-08/0190, Würth Kunststoffrahmendübel W-UR, 12. August 1011

[15] G. Rieche, U. Weißmann, S. Wehrle: Galvanisch verzinkte Stahlschrauben in Kunststoffdübeln zur Verankerung der Unterkonstruktion für Fassadenbekleidungen in Porenbeton. Materials and Corrosion 49 (1998), 585-590

[16] J. Küenzlen, U. Nürnberger, A. Wieland: Auslagerungsversuche an in Betonbauteilen eingesetzten Kunststoffrahmendübeln unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen (Städtisches Klima, Meeresklima), 2009

8. Detailangaben zu den untersuchten Korrosionsschutzsystemen

In der Folge wird der Aufbau der Korrosionsschutzsysteme auf den Verbindungsmitteln aus unlegiertem bzw. niedriglegiertem Stahl beschrieben. Es werden 2 Lieferungen unterschieden:

- Zur **Lieferung 1 (L1)** gehören Kunststoffrahmendübel, die unterschiedlich korrosionsgeschützt bis zu 10 Jahren in Stadt- und Meeresatmosphäre ausgelagert wurden. Auch Holzschrauben für Sonderuntersuchungen, die ebenfalls langjährig in Meeresatmosphäre ausgelagert wurden, wurden einer Lieferung 1 (L1) zugeordnet.
- Zur **Lieferung 2 (L2)** gehören Holzschrauben, Bohrschrauben, Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel, die unterschiedlich korrosionsgeschützt bis zu 3 Jahren in Konstantklima sowie in Stadt- und Meeresatmosphäre ausgelagert wurden.

Alle in Stadt- und Meeresatmosphäre ausgelagerten Probenvarianten wurden vergleichend auch im Salzsprühtest geprüft.

Die in den nachfolgenden Tabellen (Angaben zum Korrosionsschutz) genannten Verbindungsmittel (Holzschrauben, Bohrschrauben, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) der einzelnen Hersteller einer Lieferung 2 wurden mit dem jeweiligen Korrosionsschutz Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung), elektrolytischer (galvanischer) Zink- bzw. ZnNi-Überzug und ZnAl-Lamellenüberzug versehen. Die Angaben zum Korrosionsschutz beziehen sich auf Informationen der Hersteller. Sämtliche Angaben zur Dicke der Überzüge und deren stoffliche Zusammensetzung sind das Ergebnis eigener metallographischer Untersuchungen. Die Mittelwerte wurden jeweils aus ca. 50 Einzelwerten errechnet. Die Streuungen der Werte entsprechen in etwa einer 90 %-Fraktile. Die Bauteile für Sonderuntersuchungen dienen der Erfassung spezieller Einflüsse aus Herstellung und Verarbeitung. Nähere Angaben hierzu sind Abschn. 10.6 zu entnehmen.

8.1. Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)

Herstellung

Die Verbindungsmittel wurden, wie in Abschn. 4.2 beschrieben, kleinteilverzinkt.

Angaben zum Korrosionsschutz

Die angewendeten Überzugssysteme und die beim Zinküberzug gemessenen Schichtdicken werden in den **Tabellen 8.1 und 8.2** genannt.

Überzugssystem. Bei den durch Feuerverzinkung erzeugten Überzügen existiert produktbezogen (Holzschrauben) eine zusätzliche Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 1) (Abschn. 5.2 und 8.7.1). **Tabelle 8.1** beschreibt die Überzugssysteme der feuerverzinkten Verbindungsmittel.

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des Zinküberzuges getroffen (**Tabelle 8.2**):

- Die Dicke der Kleinteilverzinkungen beträgt, bei verhältnismäßig geringen Streuungen im Mittel etwa 40 bis 62 µm. An konkaven Querschnittsübergängen sind Verdickungen des Zinküberzuges um ein Vielfaches möglich.

Bauteil	Hersteller vom Bauteil und OS		Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz	
	Bauteil	OS	Zinküberzug	Deck-beschichtung Db
Holzschraube L2	1	A	Schichtdicke siehe Tabelle 8.2	Db 1
Spreizdübel L2	2			keine Db
Kunststoffrahmen-dübel L2	1			

L2 = Lieferung 2

Tabelle 8.1:
Oberflächenschutzsysteme OS der feuerverzinkten Verbindungsmittel

Bauteil	Holzschraube L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmen-dübel L2	
Messbereich	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewin-de[1)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Mittelwert MW	62		die Bohrschraube wurde nicht feuerverzinkt		40	G: 50 M: 55	40	50
Streuung S	≈ 48-75				35-50	40-65	30-60	40-65
Nullstellen, Abplatzungen	vereinzelte Abplatzungen an Schaft, Gewinde und Schraubenkopf (nicht in Zahlen enthalten)				keine		keine	
Lage von Verdickungen	keine				Gewindegrund (bis 300)		Zahnansatz (bis 85)	
Oberflächen-fehler (Stahl)	vorhanden, durch Zink überdeckt				nicht vorhanden		vorhanden, durch Zink überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: lokale Verdickungen im Gewindebereich sowie der Bereich über Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L2 = Lieferung 2,
G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.2:
Angaben zur Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) der untersuchten Verbindungsmittel

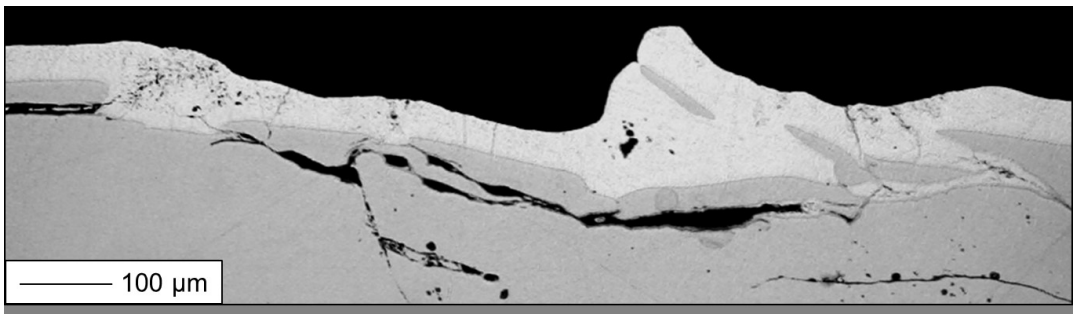


Bild 8.1:
Feuerverzinkte Holzschraube, Bereich zwischen den Gewindezähnen: Durch Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler sind durch Zink überdeckt

- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schrauben werden vom Zinküberzug überdeckt (**Bild 8.1**).

- Bei den feuerverzinkten Holzschrauben sind vereinzelt herstellungsbedingte Abplatzungen am Schaft, dem Kopf und beim Gewinde vorhanden (**Bild 8.2**).

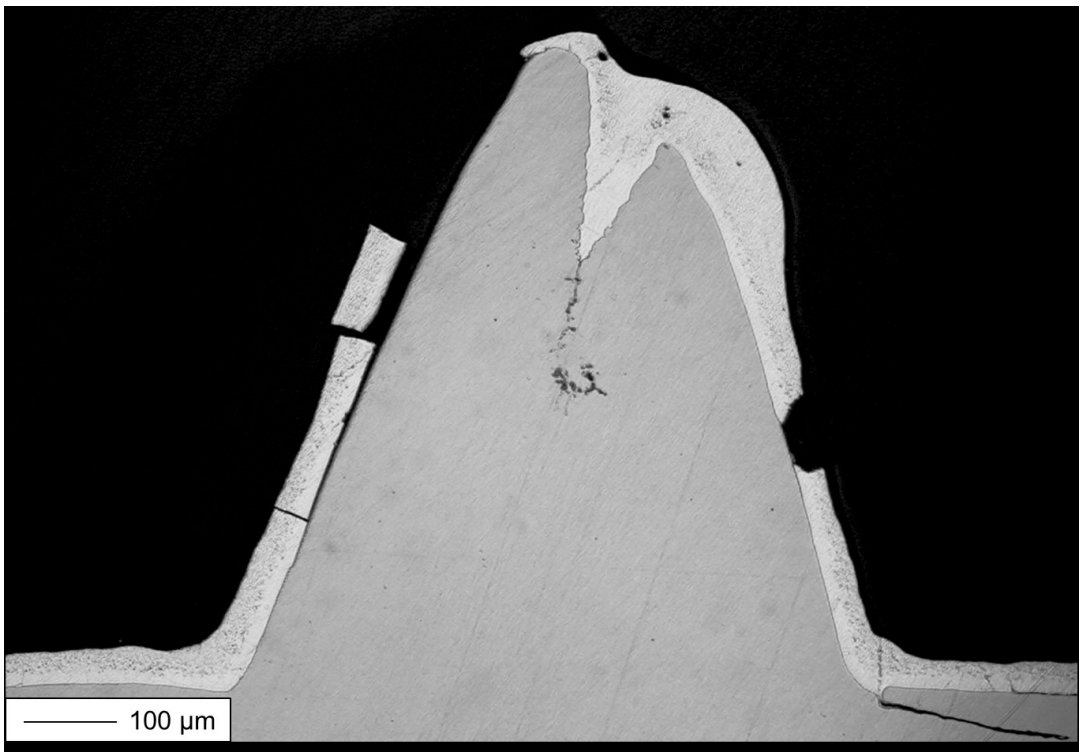


Bild 8.2:
Feuerverzinkte Holzschraube, Gewindezahn: Abplatzungen und lokale Ausbrüche in der Zinkschicht

8.2 Elektrolytische (galvanische) Verzinkung

Herstellung

Die Verbindungsmittel wurden, wie in Abschn. 4.3 beschrieben, als Trommelware galvanisch verzinkt. Bei den Kunststoffrahmendübeln wurden Teile aus 2 Lieferungen (Lieferung 1 und Lieferung 2) untersucht.

Angaben zum Korrosionsschutz

Die angewendeten Überzugssysteme und die beim Zinküberzug gemessenen Schichtdicken werden in den **Tabellen 8.3 bzw. 8.4** genannt.

Überzugssystem. Bei den galvanisch applizierten Überzügen aus Reinzink wurde alternativ auch ein zusätzlicher Korrosionsschutz durch Blaupassivierung, Gelbchromatierung oder Dickschichtpassivierung 1 (Abschn. 5.1 und 8.6) sowie produktbezogen (Holzschraube) eine weitere Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 1) (Abschn. 5.2 und 8.7.1) appliziert. Bei den Kunststoffrahmendübeln der Lieferung 1 wurde auch die zusätzliche Kopfbeschichtung von zwei Herstellern untersucht (Abschn. 8.8). Die Zulassung dieser Verbindungsmittel fordert eine solche zusätzliche Beschichtung im Fall einer Anwendung galvanischer Überzüge im Außenbereich (siehe Abschn. 7.4.2). **Tabelle 8.3** beschreibt die Überzugssysteme der galvanisch verzinkten Verbindungsmittel.

<table>
<tr><th rowspan="2">Bauteil</th><th colspan="2">Hersteller vom Bauteil und OS</th><th colspan="3">Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz</th></tr>
<tr><th>Bauteil</th><th>OS</th><th>Zink-überzug</th><th>Passi-vierung</th><th>Deckbe-schichtung Db</th></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td rowspan="4">1</td><td rowspan="12">B</td><td rowspan="4">Schicht-dicke siehe Tabelle 8.4</td><td>keine Passivierg.</td><td rowspan="4">Db 1</td></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td>Blau-passivg.</td></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td>Gelb-chromatg.</td></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td rowspan="4">2</td><td rowspan="4">Schicht-dicke siehe Tabelle 8.4</td><td>keine Passivierg.</td><td rowspan="6">keine Db</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td>Blau-passivg.</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td>Gelb-chromatg.</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L1</td><td rowspan="6">1</td><td rowspan="6">Schicht-dicke siehe Tabelle 8.4</td><td>Blau-passivg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L1</td><td>Gelb-chromatg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L1</td><td>Blau-passivg.</td><td rowspan="2">Kopf-beschichg. 1 oder 2</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L1</td><td>Gelb-chromatg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L2</td><td>keine Passivierg.</td><td rowspan="4">keine Db</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L2</td><td>Blau-passivg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L2</td><td>Gelb-chromatg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
</table>

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
U = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 8.3:
Oberflächenschutzsysteme OS der galvanisch verzinkten Verbindungsmittel bzw. Prüfteile

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit der galvanischen Zinküberzüge getroffen (**Tabelle 8.4**):

- Die Dicken der Überzüge (**Bild 8.3**) liegen bei geringen Schichtdickenschwankungen im Mittel unter 15 µm. Es fällt auf, dass gleiche Bauteile von ein und derselben Firma mit unterschiedlichen Dicken verzinkt werden (siehe Kunststoffrahmendübel, Lieferung 1 und 2).
- Die verschiedenen Bereiche eines Bauteils (Kopf/Schaft und Gewinde) weisen wiederholt deutlich voneinander abweichende Überzugsdicken auf: Bei Verbindungsmitteln mit Außengewinde sind die Zähne z. T. erheblich geringer verzinkt als gewindefreie (glatte) Bereiche. Bei Gewinden sind zumindest lokal auch Zinkdicken von nur

wenigen Mikrometern vorhanden. Ungewöhnliche Verdickungen des Zinküberzuges, beispielsweise an konvexen Oberflächen (siehe Abschn. 4.3) und auch Nullstellen wurden nicht festgestellt.

- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schrauben werden vom Zinküberzug nicht überall (z. B. nicht in Spalten) überdeckt (**Bild 8.4**).

Bauteil	Holzschraube L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmen-dübel L1, L2	
Messbereich	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewinde[1)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Lieferung 1: Mittelwert	-	-	die Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		-	-	14	8
Lieferung 1 Streuung	-	-			-	-	12-18	6-12
Lieferung 2 Mittelwert	9	6			4	G: 5 M: 10	6	2
Lieferung 2 Streuung	6-10	6-7			3-5	G: 3-8 M: 6-14	5-10	1-4
Nullstellen, Abplatzungen	keine				keine		keine	
Lage von Verdickungen	keine				keine		keine	
Oberflächen-fehler (Stahl)	vorhanden, durch Zink nicht überdeckt				nicht vorhanden		vorhanden, durch Zink nicht überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen. Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: Bereich über Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund.

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2, G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.4:
Angaben zu galvanisch aufgebrachten Zinküberzügen (Trommelware) der untersuchten Verbindungsmittel

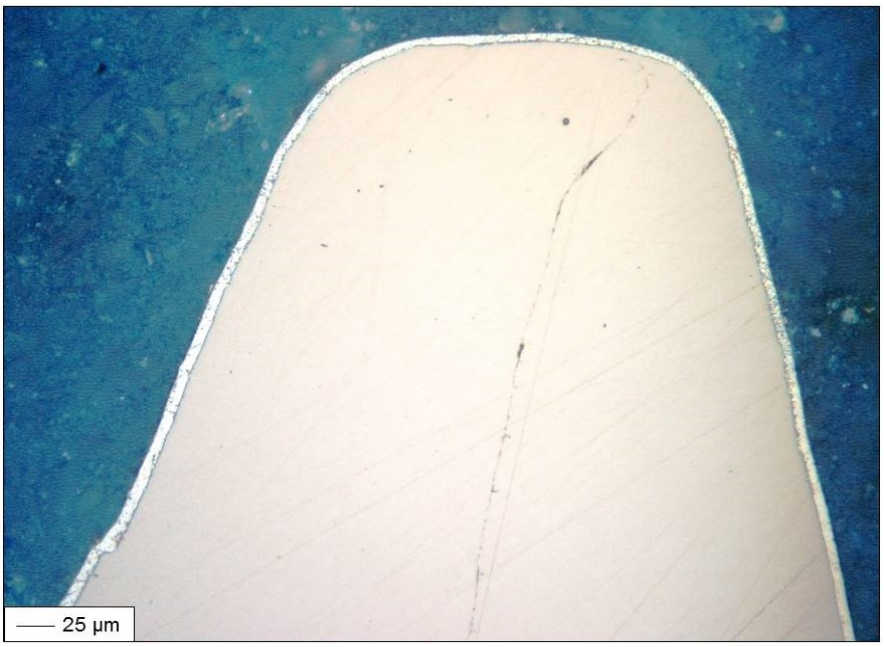


Bild 8.3:
Galvanisch verzinkte Holzschraube, Zahnflanke und Zahnspitze:
Durchgehend gleichmäßige Zinkschicht

Bild 8.4:
Galvanisch verzinkte Holzschraube, Oberflächenfehler zwischen den Zähnen: Spalte durch Zinküberzug nicht vollständig überdeckt bzw. ausgefüllt

8.3 Elektrolytisch (galvanisch) applizierter Zink-Nickel-Überzug

Herstellung

Die Verbindungsmittel wurden, wie in Abschn. 4.3 beschrieben, als Trommelware in alkalischen Bädern galvanisch mit einem Zink-Nickel-Überzug (ZnNi-Überzug) versehen.

Angaben zum Korrosionsschutz

Die angewendeten Überzugssysteme und die beim ZnNi-Überzug gemessenen Schichtdicken werden in den **Tabellen 8.5 bzw. 8.6** genannt.

Bauteil	Hersteller vom Bauteil und OS		Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz		
	Bauteil	OS	ZnNi-Überzug	Passi-vierung	Deckbe-schichtg. Db
Reihenuntersuchungen					
Holzschraube L2	1	C	Schicht-dicke siehe Tabelle 8.6	Dicksch. passivg. 2	Db 1
Bohrschraube L2	3			Dicksch. passivg. 2	keine Db
Spreizdübel L2	2			Dicksch. passivg. 2	
Kunststoffrahmen-dübel L2	1			Dicksch. passivg. 2	
Sonderuntersuchungen					
Holzschraube L1	1	C	Schicht-dicke siehe Tabelle 8.6	keine Passivierg.	keine Db
Holzschraube L1				Dicksch. passivg. 2	
Holzschraube L1					Db 1

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
U = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 8.5:
Oberflächenschutzsysteme OS der Verbindungsmittel bzw. Prüfteile mit galvanisch applizierten ZnNi-Überzügen

Bauteil	Holzschraube L1, L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmen-dübel L2	
Messbereich	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewin-de [1)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Lieferung 1 Mittelwert	6	6	-	-	-	-	-	-
Lieferung 1 Streuung	4-7	4-7	-	-	-	-	-	-
Lieferung 2 Mittelwert	14	10	4	1	8	G: 8 M: 11	4	0,5
Lieferung 2 Streuung	10-16	8-12	2-6	0-3	0-14	G: 0-13 M: 8-14	4-5	0-1
Nullstellen, Abplatzungen	Risse, Abplatzungen [1)] (nicht in Zahlen enthalten)		Nullstellen im Gewindebereich		Nullstellen an Zahnspitze		Nullstellen im Gewindebereich und am Kopf	
Lage von Verdickungen	keine		keine		keine		keine	
Oberflächen-fehler (Stahl)	vorhanden, durch ZnNi nicht überdeckt		durch ZnNi nicht überdeckt		nicht vorhanden		vorhanden, durch ZnNi nicht überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: Bereich über Materialfehlern beim Stahluntergrund

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm (Streuung und MW = Mittelwert), L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.6:
Angaben zu galvanisch aufgebrachten ZnNi-Überzügen (Trommelware) bei untersuchten Verbindungsmitteln

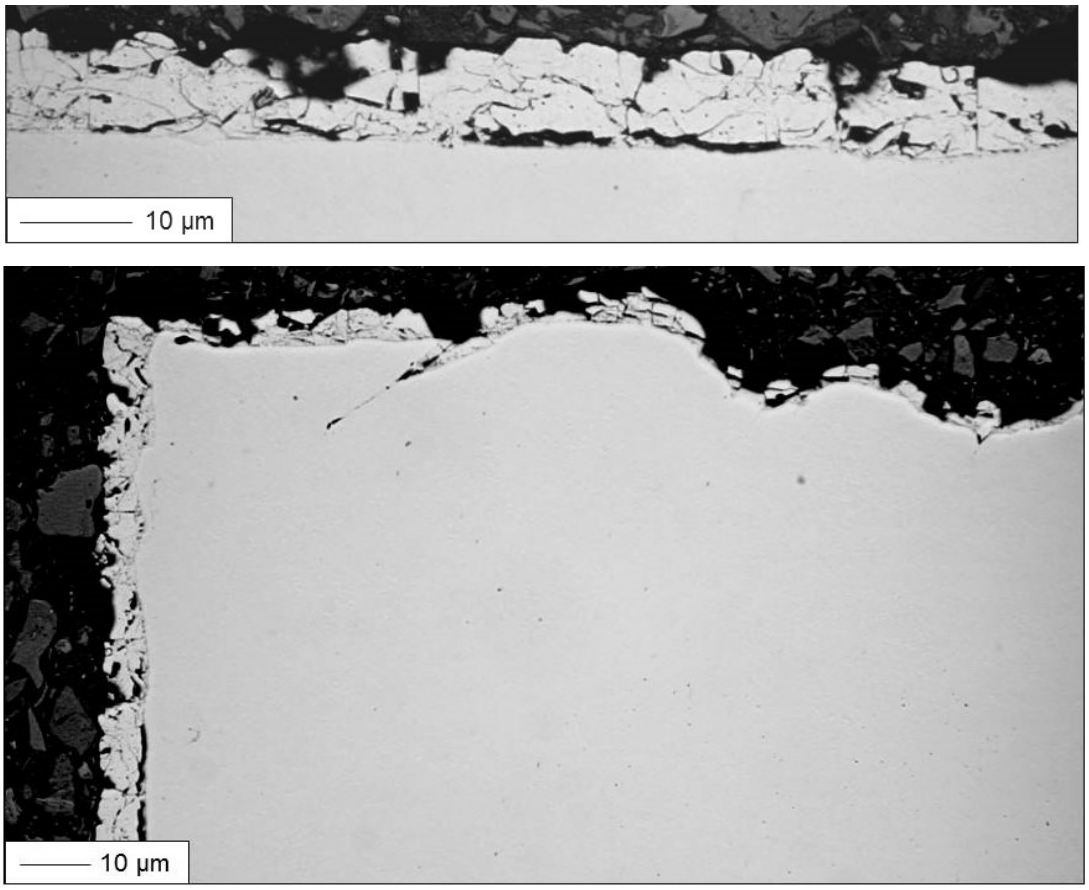
Überzugssystem. Bei den galvanisch applizierten ZnNi-Überzügen mit 15 M.-% Nickel existiert ein zusätzlicher Korrosionsschutz der Verbindungsmittel durch die Dickschichtpassivierung 2 (Abschn. 5.1 und 8.6) sowie produktbezogen (Holzschraube) eine weitere Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 1) (Abschn. 5.2 und 8.7.1). **Tabelle 8.5** beschreibt die Überzugssysteme der Verbindungsmittel mit ZnNi-Überzügen.

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurde Folgendes zur Dicke und Gleichmäßigkeit des Zinküberzuges festgestellt (**Tabelle 8.6**):

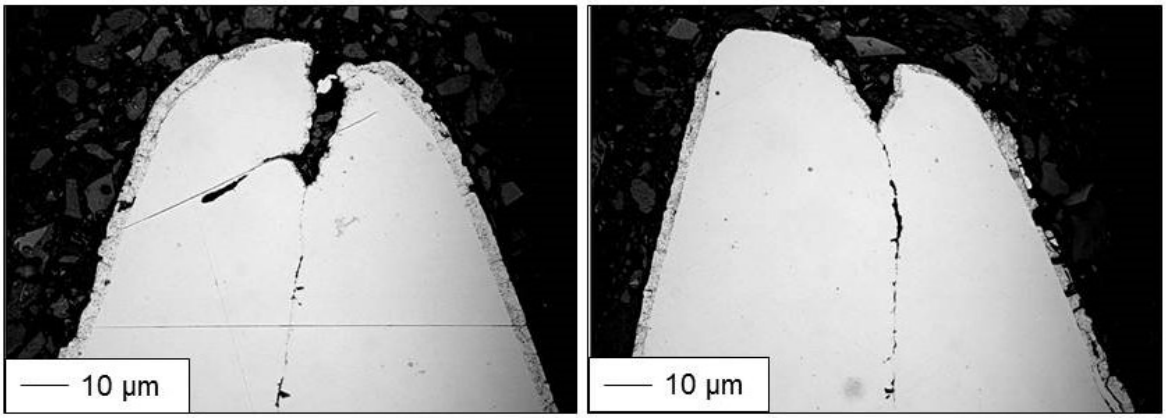
- Die Dicken der galvanisch applizierten ZnNi-Überzüge der verschiedenen Verbindungsmittel betragen im Mittel 0,5 bis 14 µm und sind demnach untereinander sehr unterschiedlich. Bei Bohrschrauben und Kunststoffrahmendübeln liegen die Überzugsdicken im Mittel unter 5 µm.
- Auch unterschiedliche Bereiche eines Bauteils weisen deutlich voneinander abweichende Überzugsdicken auf. Bei Bauteilen mit Gewinde sind die Zähne zumeist geringer, z. T. erheblich geringer verzinkt als gewindefreie (glatte) Bereiche.
- Nahezu alle als Trommelware mit einem ZnNi-Überzug versehenen Verbindungsmittel weisen lokal auch Nullstellen auf. Dieses ist in erster Linie auf herstellungsbedingte Risse und Abplatzungen des Überzuges in allen Bereichen zurückzuführen (**Bilder 8.5 bis 8.10**). Die hohe Härte und Sprödigkeit der ZnNi-Schicht führt offenbar beim Trommeln zu diesen Zerstörungen des Überzuges (siehe Abschn. 4.3).

Bei vergleichend durchgeführter Gestellware (Bleche) mit ZnNi-Überzügen wurden zwar ebenfalls zahlreiche Risse, jedoch keine Abplatzungen des Überzuges festgestellt.

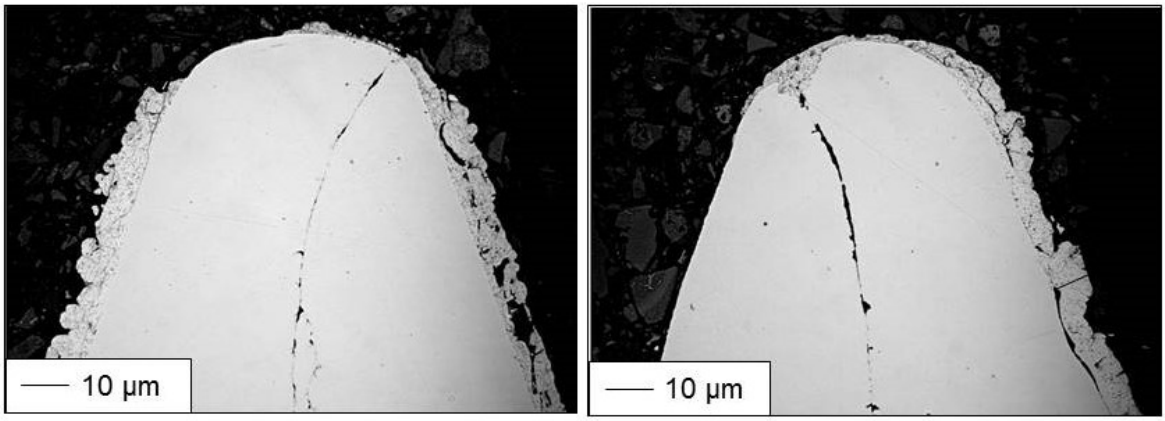
- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schrauben werden vom ZnNi-Überzug nicht überall (z. B. nicht in Spalten) überdeckt (**Bild 8.11**).



Bilder 8.5 und 8.6:
ZnNi-Überzüge bei einer Holzschraube, Flanke eines Gewindezahns (oben) und bei einem Spreizdübel (unten), Risse im ZnNi-Überzug, Enthaftungen



Bilder 8.7 und 8.8: Text nächste Seite



Bilder 8.7 bis 8.10:
ZnNi-Überzug einer Holzschraube, Gewindezähne:
Risse im ZnNi-Überzug, Enthaftungen und Abplatzungen

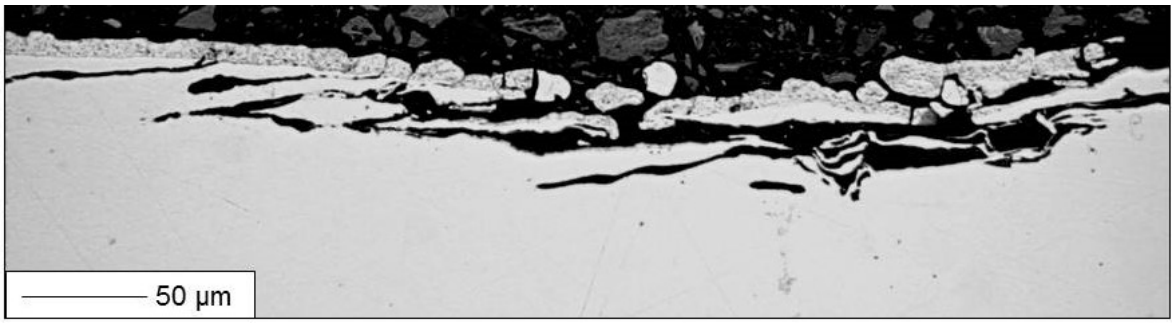


Bild 8.11:
ZnNi-Überzug einer Holzschraube, Oberflächenfehler zwischen den Zähnen:
Spalte durch ZnNi-Überzug nicht überdeckt bzw. ausgefüllt

8.4 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug

Herstellung

Die Verbindungsmittel und die Prüfteile wurden, wie in Abschn. 4.4 beschrieben, mit einem Zink-Aluminium-Lamellenüberzug (ZnAl-Lamellenüberzug) versehen. Die in der Folge genannten Überzüge, die in nicht einheitlicher Weise von Korrosionsschutz-Fachfirmen unter Verwendung von Beschichtungsmaterialien bestimmter Hersteller als Trommelware aufgebracht werden, unterscheiden sich in erster Linie darin,

- ob ein auch als zusätzlicher Korrosionsschutz wirkender Haftvermittler in Form einer Unterzinkung oder einer Phosphatierung verwendet wird,
- welches Verhältnis von Zink zu Aluminium vorhanden ist und welche Bestandteile weiterhin enthalten sind,
- in welcher Dicke und Gleichmäßigkeit der ZnAl-Lamellenüberzug appliziert wurde,
- ob und wenn ja welche Deckbeschichtung zusätzlich verwendet wurde.

8.4.1 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 1

Angaben zum Korrosionsschutz

Überzugssystem. Das Überzugssystem der Verbindungsmittel enthält zum Zwecke des Korrosionsschutzes einen im Trommelverfahren applizierten ZnAl-Lamellenüber-

zug der Firma 1, der bei >250 °C eingebrannt wurde. Bei den Kunststoffrahmendübeln wurden Teile aus 2 Lieferungen (Lieferung 1 und Lieferung 2) untersucht.

Es existieren zusätzlich eine Unterzinkung mit Passivierung (Blaupassivierung bzw. Dickschichtpassivierung 1), die als Haftvermittler und zusätzlicher Korrosionsschutz des ZnAl-Lamellenüberzuges wirken (siehe auch Abschn. 8.5 bzw. 5.1). Weiterhin wurde produktbezogen (Holzschraube) auch eine zusätzliche Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 1) aufgebracht (Abschn. 5.2 und 8.7.1). **Tabelle 8.7** beschreibt die Überzugssysteme der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 beschichteten Verbindungsmittel.

<table>
<tr><th rowspan="3">Bauteil</th><th colspan="2" rowspan="2">Hersteller vom Bauteil und OS</th><th colspan="5">Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz</th></tr>
<tr><th colspan="2">Haftvermittler</th><th colspan="2">ZnAl-Überzug</th><th rowspan="2">Deckbeschichtung Db</th></tr>
<tr><th>Bauteil</th><th>OS</th><th>Unterzinkung</th><th>Passivierung</th><th>Produktbezeichnung</th><th>Dicke</th></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td rowspan="2">1</td><td rowspan="14">B</td><td rowspan="2">K, S: 5-8
G: 2-3</td><td>Blaupassivg.</td><td rowspan="14">Firma 1</td><td rowspan="14">Schichtdicke siehe Tabelle 8.8</td><td rowspan="2">Db 1</td></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
<tr><td>Bohrschraube L2</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">U: 2-3</td><td>Blaupassivg.</td><td rowspan="12">keine Db</td></tr>
<tr><td>Bohrschraube L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">U: 2-3</td><td>Blaupassivg.</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrahmendübel L1</td><td rowspan="4">1</td><td rowspan="2">K, S: 16-26
G: 15-18</td><td>Blaupassivg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrahmendübel L1</td><td>Gelbchromatg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrahmendübel L2</td><td rowspan="2">K, S: 5-8
G: 1-4</td><td>Blaupassivg.</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrahmendübel L2</td><td>Dicksch. passivg. 1</td></tr>
</table>

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm (Streuung), L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
S = Schaft, G = Gewinde, K = Kopf, U = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 8.7:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 beschichteten Verbindungsmittel

Zusammensetzung des ZnAl-Lamellenüberzuges. Die Zink- und Aluminiumlamellen sind in einem chromfreien anorganischen Bindemittel auf Basis Siliciumoxid eingebettet. Dieser Überzug besteht nach eigenen Messungen mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (Mittelwert aus 3 sog. Flächenanalysen ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff und Sauerstoff) aus folgenden Hauptbestandteilen:

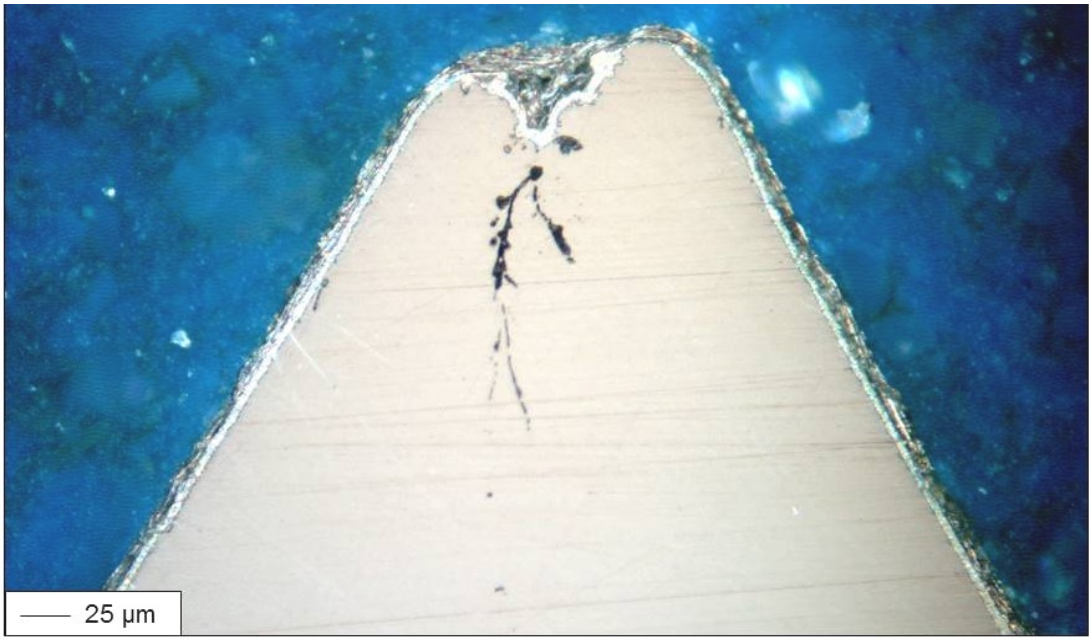
- ≈75 M.-% Aluminium,
- ≈15 M.-% Silicium,
- ≈5 M.-% Zink,
- ≈5 M.-% Magnesium.

Bauteil	Holzschraube L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmen-dübel L1, L2	
Messbereich	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewinde [1)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Lieferung 1 Mittelwert	-	-	-	-	-	-	K: 9 S: 10	7
Lieferung 1 Streuung	-	-	-	-	-	-	K: 3-22 S: 4-36	0-20
Lieferung 2 Mittelwert	K: 8 S: 9	7	9	8	8	G: 7 M: 13	K: 4 S: 6	6
Lieferung 2 Streuung	K: 0-16 S: 0-18	0-28	0-16	0-20	0-20	G: 0-20 M: 9-18	K: 0-18 S: 0-20	0-32
Nullstellen, Abplatzungen	Nullstellen überall		Nullstellen an Zahnspitze		Nullstellen überall, bis 0,1 mm Länge		L1: Nullstellen im Gewindebereich bis 0,2 mm Länge L2: Nullstellen bis 0,12 mm Länge an Zahnflanke, bis 0,5 mm Länge am Schaft	
Lage von einzelnen Verdickungen	Zahnansatz, Zahnspitze bis ≈60		Zahnansatz, Zahnspitze bis ≈50		Zahnspitze bis ≈45		L1: Zahnansatz bis ≈50 L2: Zahnansatz, Zahnflanke bis ≈50	
Oberflächenfehler (Stahl)	vorhanden, durch ZnAl überdeckt		durch ZnAl überdeckt		nicht vorhanden		vorhanden, durch ZnAl überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: lokale Verdickungen im Gewindebereich.

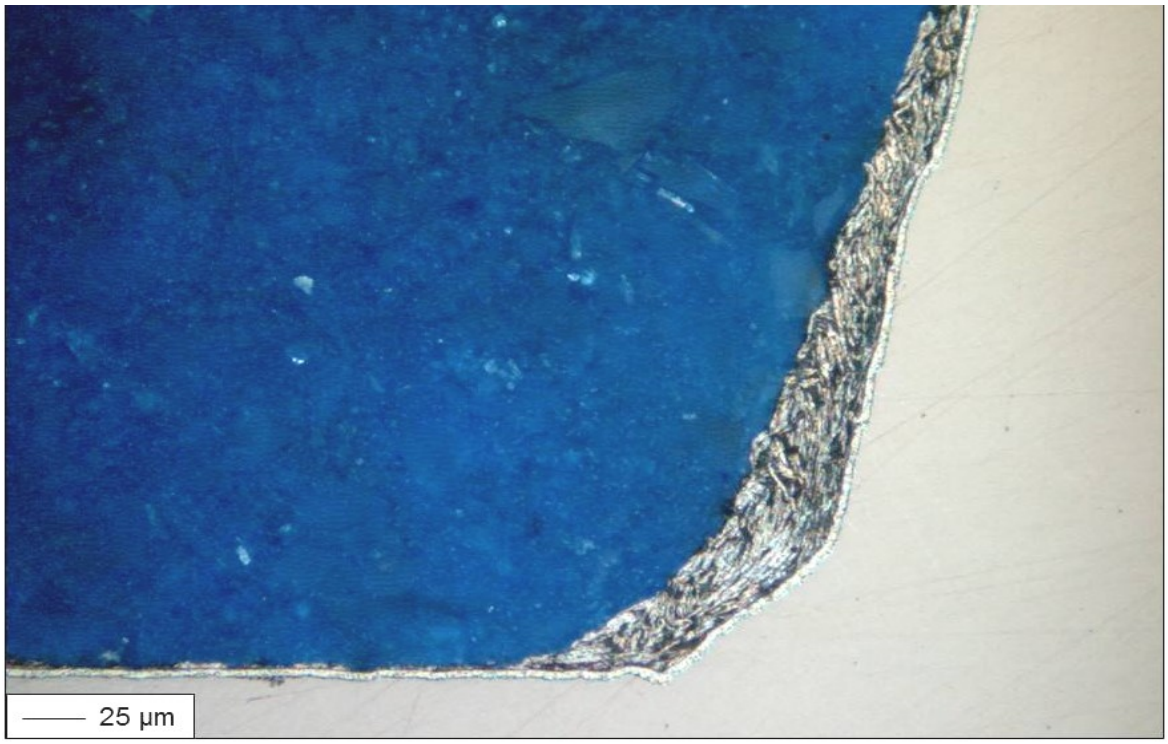
Zahlen = Dicke des Überzuges in µm (Streuung und MW = Mittelwert), L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
K = Kopf, S = Schaft, G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.8:
Angaben zu den mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 beschichteten Verbindungsmitteln



Zahnflanke und Gewindespitze

Bild 8.12: Text nächste Seite



Zahnansatz und zwischen den Zähnen

Bilder 8.12 und 8.13:
Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1, Detail des Gewindes:
Kein ZnAl-Lamellenüberzug zwischen den Zähnen, Verdickung des ZnAl-Lamellenüberzuges an Zahnansatz und Zahnspitze, extreme Schichtdickenschwankungen

Bild 8.14:
Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1, Oberflächenfehler zwischen den Zähnen: Spalte durch ZnAl-Lamellenüberzug überdeckt

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des Haftvermittlers (Unterzinkung) (**Tabelle 8.7**) und des ZnAl-Lamellenüberzuges getroffen (**Tabelle 8.8**):

- Bezüglich der Güte der Unterzinkung der verschiedenen Verbindungsmittel treffen die in Abschn. 8.2 für die galvanische Verzinkung getroffenen Aussagen zur Überzugsdicke zu.
- Die mittleren Dicken der ZnAl-Lamellenüberzüge betragen bei allen Bauteilen der Regeluntersuchungen (Trommelware) ≤13 µm. Dabei sind pro Bauteil stets extreme

Streuungen der Überzugsdicke vorhanden (**Bilder 8.12 und 8.13**): Einerseits sind bei allen Verbindungsmitteln und in allen Bereichen (außer der Mutter des Spreizdübels) Nullstellen vorhanden, wobei sich diese über Längen von wenigen Mikrometern bis zu 0,5 mm Länge erstrecken. Andererseits sind bei Bauteilen mit Außengewinde am Zahnansatz und an Zahnspitzen starke Verdickungen des Überzuges festgestellt worden.

- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schrauben werden von einem eher dünneren ZnAl-Lamellenüberzug überwiegend überdeckt (**Bild 8.14**).

8.4.2 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 2

Angaben zum Korrosionsschutz

Überzugssystem. Das Überzugssystem der Verbindungsmittel enthält zum Zwecke des Korrosionsschutzes einen im Trommelverfahren applizierten ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2, der bei 320 °C eingebrannt wurde. Bei den Kunststoffrahmendübeln wurden Teile aus 2 Lieferungen (Lieferung 1 und Lieferung 2) untersucht. Auf den ZnAl-Lamellenüberzug wurde zusätzlich eine Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 2) aufgebracht (Abschn. 5.2 und 8.7.2). **Tabelle 8.9** beschreibt die Überzugssysteme der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 versehenen Verbindungsmittel.

Bauteil	Hersteller vom Bauteil und OS		Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz			
			Haftvermittler	ZnAl-Überzug		Deck-beschichtung Db
	Bauteil	OS		Produktbe-zeichnung	Dicke	
Holzschraube L2	1	E	es ist kein Haftvermittler vorhanden	Firma 2	Schicht-dicke siehe Tabelle 8.10	Db 2
Bohrschraube L2	3					
Spreizdübel L2	2					
Kunststoffrah-mendübel L1	1					
Kunststoffrah-mendübel L2						

L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2

Tabelle 8.9:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 beschichteten Verbindungsmittel

Zusammensetzung des ZnAl-Lamellenüberzuges. Die Zink- und Aluminiumlamellen sind in einem chromfreien anorganischen Bindemittel auf Basis Siliciumoxid eingebettet. Dieser Überzug besteht nach eigenen Messungen mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (Mittelwert aus 3 sog. Flächenanalysen ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff und Sauerstoff) aus folgenden Hauptbestandteilen:

- ≈65 M.-% Zink,
- ≈20 M.-% Aluminium,
- ≈4 M.-% Titan,
- ≈7 M.-% Silicium,
- ≈2 M.-% Eisen,
- ≈1 M.-% Magnesium.

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des ZnAl-Lamellenüberzuges auf den Verbindungsmitteln getroffen (**Tabelle 8.10**):

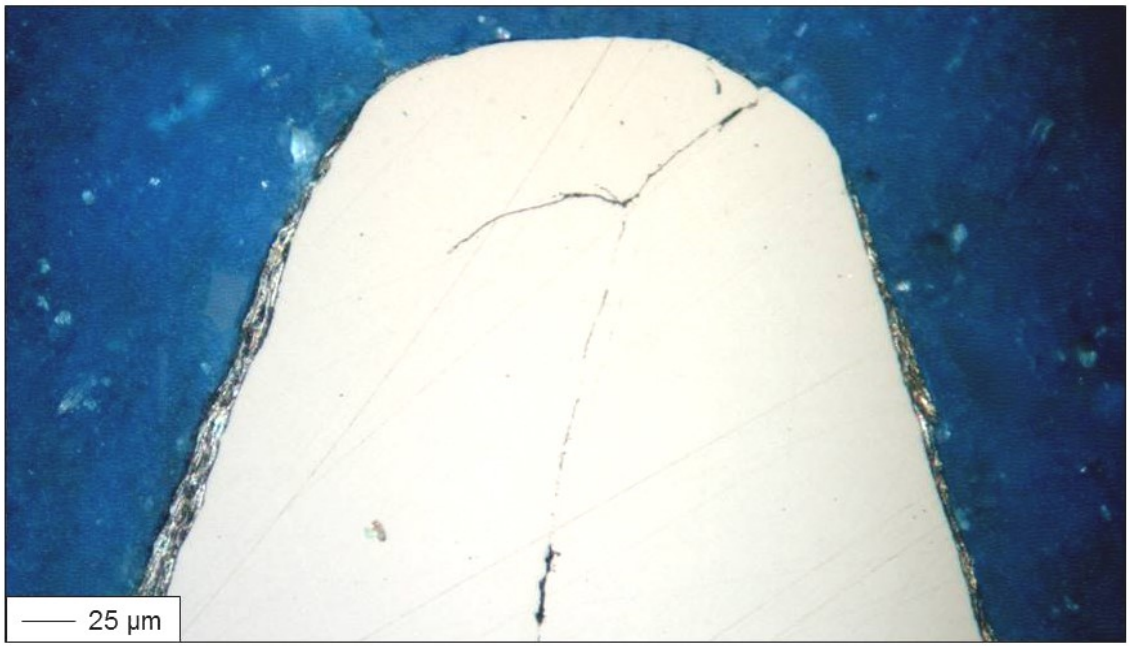
- Die mittleren Dicken der ZnAl-Lamellenüberzüge betragen bei allen Bauteilen bis auf die Mutter des Spreizdübels stets ≤10 µm. Dabei sind extreme Streuungen der Überzugsdicke vorhanden (**Bilder 8.15 und 8.16**). Einerseits sind bei allen Verbindungsmitteln an Kopf, Schaft und Gewinde Nullstellen vorhanden, wobei sich diese über Längen von bis zu 0,6 mm Länge erstrecken. Andererseits sind bei Bauteilen mit Außengewinde am Zahnansatz und an Gewindespitzen starke Verdickungen des Überzuges vorhanden.
- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schrauben werden von einem dünneren ZnAl-Lamellenüberzug überwiegend überdeckt (**Bild 8.17**).

Bauteil	Holzschraube L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmendübel L1, L2	
Messbereich	Kopf Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewinde [1)], Mutter	Kopf Schaft	Gewinde [1)]
Lieferung 1 Mittelwert	-	-	-	-	-	-	K: 3 S: 4	3
Lieferung 1 Streuung	-	-	-	-	-	-	K: 0-9 S: 1-12	1-10
Lieferung 2 Mittelwert	K: 8 S: 10	6	8	7	9	G: 8 M: 16	K: 7 S: 8	5
Lieferung 2 Streuung	K: 0-32 S: 0-25	0-16	0-28	0-15	6-14	G: 0-10 M:11-20	K: 0-38 S: 0-32	0-20
Nullstellen, Abplatzungen	Nullstellen überall, an Kopf bis 0,6 mm Länge, an Zahnspitze kein ZnAl		Nullstellen an Zahnspitze		Nullstellen an Zahnspitze		L1: Nullstellen im Gewindebereich bis 0,12 mm Länge, L2: Nullstellen überall, bis mehrere Zehntel mm an Kopf, Schaft und Gewinde	
Lage von einzelnen Verdickungen	Zahnansatz, Zahnspitze bis ≈60		Zahnansatz, bis ≈65		im Gewindegrund bis ≈70		L1: Zahnansatz bis ≈30 L2: Zahnansatz bis ≈64	
Oberflächenfehler (Stahl)	vorhanden, durch ZnAl überdeckt		durch ZnAl überdeckt		nicht vorhanden		vorhanden, durch ZnAl überdeckt	

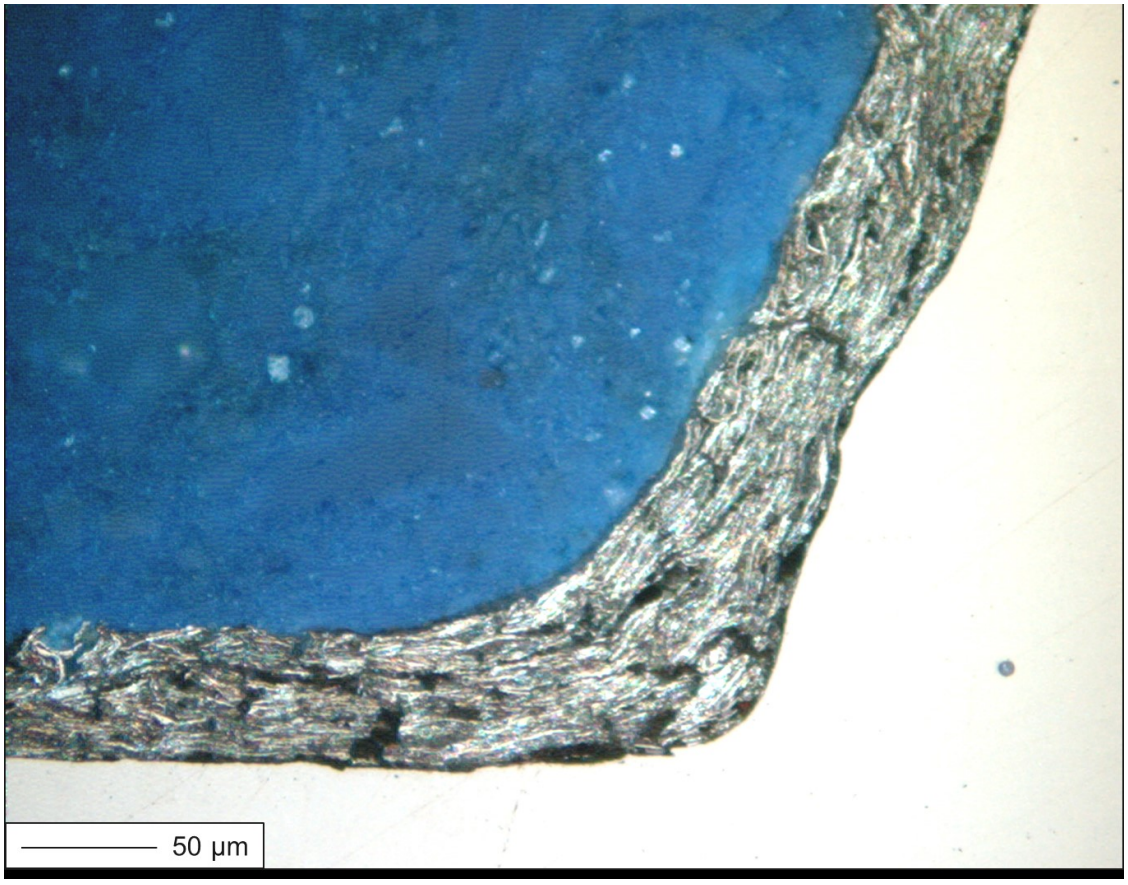
[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: lokale Verdickungen im Gewindebereich sowie der Bereich über Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund.

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm (Streuung und MW = Mittelwert), L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
K = Kopf, S = Schaft, G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.10:
Angaben zu den mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 beschichteten Verbindungsmitteln



Zahnflanke und Gewindespitze



Zahnansatz

Bilder 8.15 und 8.16:
Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2, Detail eines Gewindezahns: Kein ZnAl-Lamellenüberzug an Zahnspitze, Verdickung des ZnAl-Lamellenüberzuges an Zahnansatz, extreme Schichtdickenschwankungen

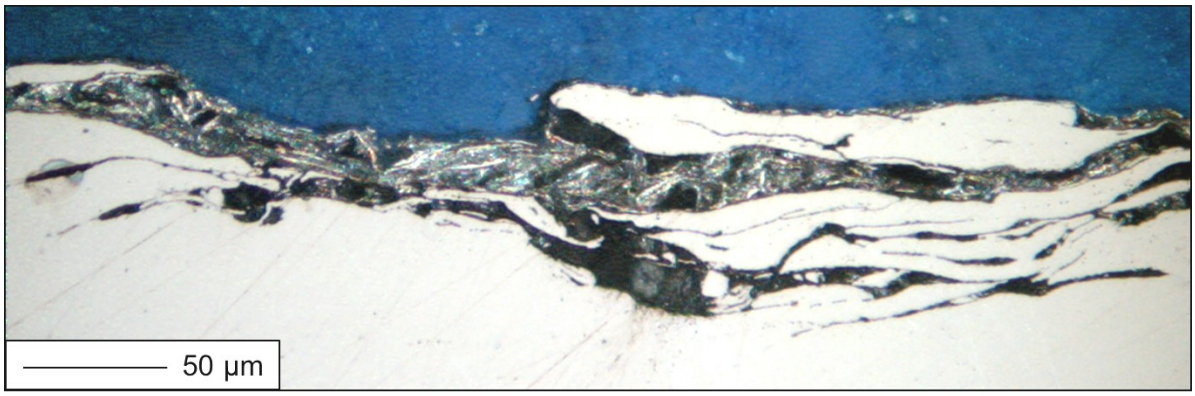


Bild 8.17:
Holzschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2, Oberflächenfehler zwischen den Zähnen:
Spalte durch ZnAl-Lamellenüberzug überdeckt

8.4.3 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 3

Angaben zum Korrosionsschutz

Überzugssystem. Das Überzugssystem der Verbindungsmittel enthält zum Zwecke des Korrosionsschutzes einen im Trommelverfahren applizierten ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3, der bei etwa 200 °C eingebrannt wurde.

Es existieren zusätzlich eine wenige Mikrometer dicke Unterzinkung und eine zusätzliche Passivierung (Blaupassivierung), die als Haftvermittler und zusätzlicher Korrosionsschutz des ZnAl-Lamellenüberzuges wirken (Abschn. 8.5 bzw. 5.1). Weiterhin wurde bei allen Verbindungsmitteln eine zusätzliche Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 1) aufgebracht (Abschn. 5.2 und 8.7.1). **Tabelle 8.11** beschreibt die Überzugssysteme der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 beschichteten Verbindungsmittel.

<table>
<tr><th rowspan="3">Bauteil</th><th colspan="2" rowspan="2">Hersteller vom Bauteil und OS</th><th colspan="4">Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz</th></tr>
<tr><th colspan="2">Haftvermittler</th><th colspan="2">ZnAl-Überzug</th><th rowspan="2">Deckbe-schichtung Db</th></tr>
<tr><th>Bauteil</th><th>OS</th><th>Unter-zinkung</th><th>Passivie-rung</th><th>Produktbe-zeichnung</th><th>Dicke</th></tr>
<tr><td>Bohrschraube L2</td><td>3</td><td rowspan="3">B</td><td>K: 4-8
G: 2-5</td><td rowspan="3">Blau-passivg.</td><td rowspan="3">Firma 3</td><td rowspan="3">Schicht-dicke siehe Tabelle 8.12</td><td rowspan="3">Db 1</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td>2</td><td>Ü: 3-8</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrah-mendübel L2</td><td>1</td><td>K: 12-28
S: 3-10
G: 3-10</td></tr>
</table>

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm (Streuung), L2 = Lieferung 2
S = Schaft, G = Gewinde, K = Kopf, U = überall

Tabelle 8.11:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 beschichteten Verbindungsmittel

Zusammensetzung des ZnAl-Lamellenüberzuges. Die Zink- und Aluminiumlamellen sind in einem chromfreien anorganischen Bindemittel eingebettet. Die Zusammensetzung ist laut Datenblatt des Herstellers wie folgt: 30 bis 35 % Zink, 1 bis 5 % Aluminium,

anorganisches Polymerisat (TiO_2-haltig) 40 bis 45 %, Xylol 10 bis 15 %, Ethylbenzol 1 bis 5 %. Der Überzug besteht nach eigenen Messungen mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (Mittelwert aus 3 sog. Flächenanalysen ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff und Sauerstoff) aus folgenden Hauptbestandteilen (organisch-chemische Verbindungen wurden nicht erfasst):

- ≈53 M.-% Zink,
- ≈25 M.-% Aluminium,
- ≈18 M.-% Titan,
- ≈3 M.-% Silicium.

Bauteil	Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmen-dübel L2	
Messbereich	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewinde [1)2)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Mittelwert MW	7	9	8	G: 7 M:12	K: 11 S: 7	5
Streuung S	0-26	3-14	4-18	G: 2-16 M: 6-17	K: 1-26 S: 2-14	2-16
Nullstellen, Abplatzungen	Nullstellen am Kopf		keine		keine	
Lage von einzelnen Verdickungen	Zahnansatz bis ≈30		keine		Zahnansatz bis ≈24	
Oberflächen-fehler (Stahl)	vorhanden, durch ZnAl überdeckt		nicht vorhanden		vorhanden, durch ZnAl überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: lokale Verdickungen im Gewindebereich sowie der Bereich über Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund

[2)] Zahnflanken eines Zahnes mit unterschiedlicher Dicke

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, K = Kopf, S = Schaft, G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.12:
Angaben zu den mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 beschichteten Verbindungsmitteln

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des Haftvermittlers (Unterzinkung) und des ZnAl-Lamellenüberzuges getroffen (**Tabelle 8.12**):

- Bezüglich der Güte der Unterzinkung der verschiedenen Verbindungsmittel treffen die in Abschn. 8.2 für die galvanische Verzinkung getroffenen Aussagen zur Überzugsdicke zu.
- Die mittleren Dicken der ZnAl-Lamellenüberzüge betragen bei allen Bauteilen bis auf die Mutter des Spreizdübels stets ≤11 µm. Dabei sind pro Bauteil starke Streuungen der Überzugsdicke vorhanden (vergleichbar Firma 1, **Bilder 8.12 und 8.13**). Der Überzug ist stellenweise sehr dünn und weist bei den Bohrschrauben auch Nullstellen auf. An Zahnansätzen verdickt sich der Überzug.
- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schrauben werden, vergleichbar Firma 1 (**Bild 8.14**), von einem eher dünneren ZnAl-Lamellenüberzug überwiegend überdeckt.

8.4.4 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 4

Angaben zum Korrosionsschutz

Überzugssystem. Das Überzugssystem der Verbindungsmittel enthält zum Zwecke des Korrosionsschutzes einen im Trommelverfahren applizierten ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, der bei 200 bis 230 °C eingebrannt wurde. Bei den Kunststoffrahmendübeln wurden Teile aus 2 Lieferungen (Lieferung 1 und Lieferung 2) untersucht. Bei den Verbindungsmitteln existiert kein Haftvermittler. Weiterhin wurde bei den Verbindungsmitteln eine zusätzliche Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 3) aufgebracht (Abschn. 5.2 und 8.7.3). **Tabelle 8.13** beschreibt die Überzugssysteme der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 beschichteten Verbindungsmittel und Prüfteile.

Bei den hier untersuchten Prüfteilen für Sonderuntersuchungen an Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 existieren auch darunter befindliche Haftvermittler in Form einer wenige Mikrometer dicke Unterzinkung bzw. einer Unterzinkung plus Phosphatierung (Abschn. 8.5).

<table>
<tr><th rowspan="3">Bauteil</th><th colspan="2" rowspan="2">Hersteller vom Bauteil und OS</th><th colspan="4">Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz</th></tr>
<tr><th colspan="2">Haftvermittler</th><th colspan="2">ZnAl-Überzug</th><th rowspan="2">Deckbeschichtung Db</th></tr>
<tr><th>Bauteil</th><th>OS</th><th>Unterzinkung</th><th>Zinkphosphat</th><th>Produktbezeichnung</th><th>Dicke</th></tr>
<tr><td colspan="8">Reihenuntersuchungen</td></tr>
<tr><td>Holzschraube L2</td><td>1</td><td rowspan="5">B</td><td colspan="2" rowspan="5">es ist kein Haftvermittler vorhanden</td><td rowspan="5">Firma 4</td><td rowspan="5">Schichtdicke siehe Tabelle 8.14</td><td rowspan="5">Db 3</td></tr>
<tr><td>Bohrschraube L2</td><td>3</td></tr>
<tr><td>Spreizdübel L2</td><td>2</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrahmendübel L1</td><td rowspan="2">1</td></tr>
<tr><td>Kunststoffrahmendübel L2</td></tr>
<tr><td colspan="8">Sonderuntersuchungen</td></tr>
<tr><td>Rohrschelle 1</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">D</td><td>Ü: 8-12</td><td></td><td rowspan="3">Firma 4</td><td>Ü: 5-20
MW: 12</td><td rowspan="3">Db 3</td></tr>
<tr><td>Rohrschelle 2</td><td>Ü: 6-10</td><td>Ü: 1-2</td><td>Ü: 5-30
MW: 18</td></tr>
<tr><td>Gewindefurchschraube</td><td>5</td><td>B</td><td colspan="2">es ist kein Haftvermittler vorhanden</td><td>Ü: 16-25
MW: 20</td></tr>
</table>

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2
Ü = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 8.13:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 beschichteten Verbindungsmittel bzw. Prüfteile

Zusammensetzung des ZnAl-Lamellenüberzuges. Die Zink- und Aluminiumlamellen sind in einem chromfreien anorganischen Bindemittel auf Basis Siliciumoxid eingebettet. Dieser Überzug besteht nach eigenen Messungen mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (Mittelwert aus 3 sog. Flächenanalysen ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff und Sauerstoff) aus folgenden Hauptbestandteilen:

- ≈63 M.-% Zink,
- ≈12 M.-% Aluminium,
- ≈8 M.-% Titan,
- ≈4 M.-% Silicium,
- ≈9 M.-% Eisen,
- ≈3 M.-% Fluor.

Bauteil	Holzschraube L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Kunststoffrahmen-dübel L1, L2	
Messbereich	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewin-de [1)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Lieferung 1: Mittelwert	-	-	-	-	-	-	K: 6 S: 10	4
Lieferung 1 Streuung	-	-	-	-	-	-	K: 0-14 S: 2-22	0-10
Lieferung 2 Mittelwert	K: 3 S: 4	3	4	3	7	G: 3 M: 5	K: 4 S: 5	3
Lieferung 2 Streuung	K: 0-10 S: 0-10	0-5	0-10	0-6	2-16	G: 0-6 M: 0-10	K: 0-16 S: 0-14	0-16
Nullstellen, Abplatzungen	Nullstellen überall, am Kopf kein ZnAl		Nullstellen überall		Nullstellen überall		L1: Nullstellen im Zahnbereich L2: Nullstellen überall, im Gewindebereich bis 0,1 mm Länge	
Lage von einzelnen Verdickungen	Zahnspitze bis ≈70		Zahnansatz bis ≈25		keine		L1: Zahnansatz bis ≈20 L2: Zahnansatz bis ≈28	
Oberflächen-fehler (Stahl)	vorhanden, durch ZnAl überdeckt		vorhanden, durch ZnAl überdeckt		nicht vorhanden		vorhanden, durch ZnAl überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: lokale Verdickungen im Gewindebereich sowie der Bereich über Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L1 = Lieferung 1, L2 = Lieferung 2,
K = Kopf, S = Schaft, G = Gewinde, M = Mutter

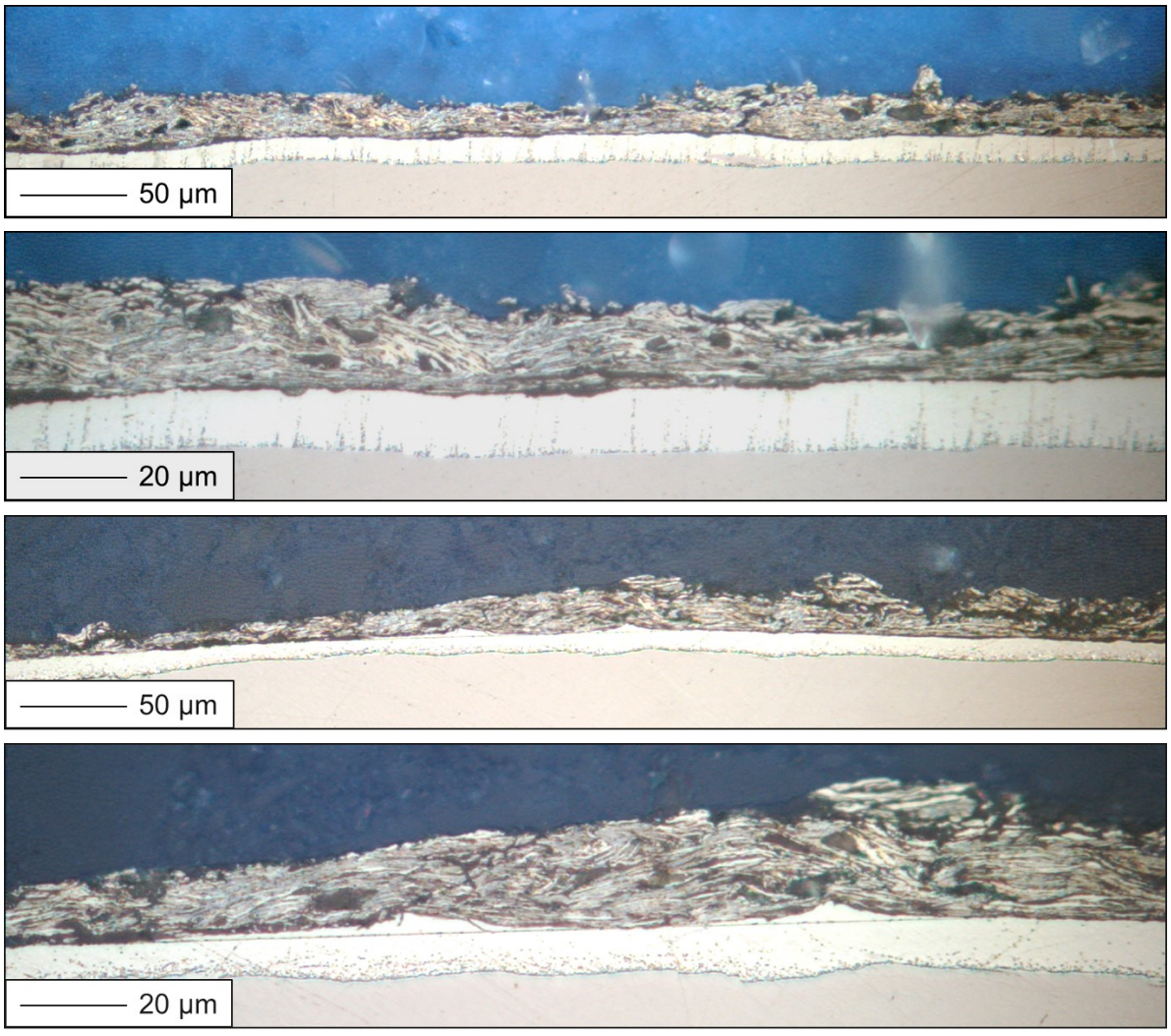
Tabelle 8.14:
Angaben zu den mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 beschichteten Verbindungsmitteln

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des Haftvermittlers (Unterzinkung, Zinkphosphatierung) und des ZnAl-Lamellenüberzuges getroffen (**Tabellen 8.13 und 8.14**):

- Die bei Sonderuntersuchungen an Rohrschellen der Bez. 1 und 2 als Haftvermittler aufgebrachte Unterzinkung weist eine gleichmäßige Schichtdicke um 10 bzw. 8 µm auf (**Bilder 8.18 bis 8.21**). Die bei der Rohrschelle der Bez. 2 zusätzlich applizierte Zinkphosphatierung ist sehr dünn, jedoch metallographisch (**Bilder 8.20 und 8.21**) und auch röntgenographisch nachweisbar.
- Die mittleren Dicken der ZnAl-Lamellenüberzüge betragen bei allen Verbindungsmitteln zumeist nur wenige Mikrometer (**Tabelle 8.14**). Dabei sind erhebliche Streuungen der Überzugsdicke vorhanden. Dadurch ergeben sich bei allen Verbindungsmitteln und in allen Bereichen dieser Bauteile Bereiche mit sehr dünnem Überzug und Nullstellen (vergleichbar Firma 2, **Bild 8.15**), wobei sich diese bis zu 0,1 mm Länge

erstrecken. Andererseits sind bei Bauteilen mit Außengewinde am Zahnansatz und an Zahnspitzen Verdickungen des Überzuges vorhanden (vergleichbar Firma 2, **Bild 8.16**).

- Bei den von einer anderen Fachfirma beschichteten Bauteilen der Sonderuntersuchungen (Rohrschellen) (**Tabelle 8.13**) sind die Überzüge mit im Mittel 12 bzw. 18 µm zwar deutlich dicker (**Bilder 8.18 bis 8.21**), weisen aber auch erhebliche Streuungen auf.
- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schraubgewinden werden von dem nur sehr dünnen ZnAl-Lamellenüberzug zumeist überdeckt (vergleichbar Firma 2, **Bild 8.17**).



Bilder 8.18 bis 8.21:
Rohrschelle 1 (Bilder 8.18 und 8.19) und Rohrschelle 2 (Bilder 8.20 und 8.21) mit einem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4

8.4.5 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 5

Angaben zum Korrosionsschutz

Überzugssystem. Das Überzugssystem der Prüfteile enthält zum Zwecke des Korrosionsschutzes einen im Trommelverfahren applizierten ZnAl-Lamellenüberzug der Fir-

ma 5, der bei 200 bis 230 °C eingebrannt wurde. Weiterhin wurde bei den Rohrschellen 3 mit dem Haftvermittler eine zusätzliche Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 3) aufgebracht (Abschn. 5.2 und 8.7.3). **Tabelle 8.15** beschreibt die Überzugssysteme der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 5 beschichteten Rohrschellen.

Bei den hier untersuchten Prüfteilen für Sonderuntersuchungen an Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 5 existieren alternativ auch ein darunter befindliche Haftvermittler in Form einer wenige Mikrometer dicken Unterzinkung plus Phosphatierung (Abschn. 8.5). Die an diesem System angestellten Sonderuntersuchungen dienen in erster Linie der Feststellung des Einflusses eines Haftvermittlers (hier Unterzinkung plus Phosphatierung, Abschn. 8.5) auf die Schutzwirkung am Beispiel von Rohrschellen (Abschn. 10.6).

Bauteil	Hersteller vom Bauteil und OS		Oberflächenschutzsystem OS – Korrosionsschutz				
			Haftvermittler		ZnAl-Überzug		Deckbeschichtung Db
	Bauteil	OS	Unterzinkung	Zinkphosphat	Produktbezeichnung	Dicke	
Rohrschelle 3	4	D	Ü: 6-9	Ü: ≈1-2	Firma 5	U: 15-95 MW: 39	Db 3
Rohrschelle 4			es ist kein Haftvermittler vorhanden			U: 15-70 MW: 30	keine Db

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm (Streuung und Mittelwert MW)
U = überall, MW = Mittelwert

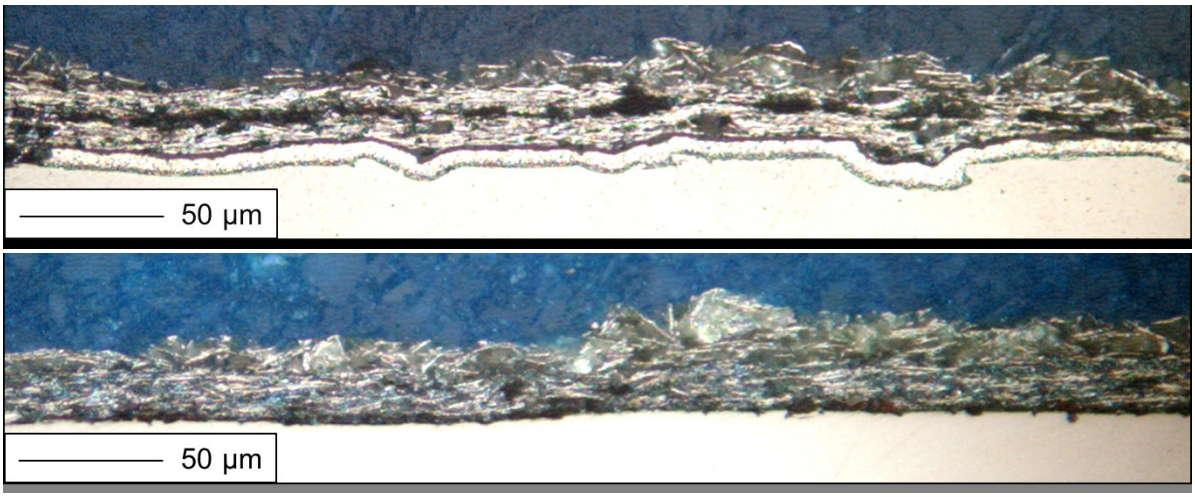
Tabelle 8.15:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 5 beschichteten Rohrschellen

Zusammensetzung des ZnAl-Lamellenüberzuges. Die Zink- und Aluminiumlamellen sind in einem chromfreien anorganischen Bindemittel eingebettet. Der Überzug besteht nach eigenen Messungen mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (Mittelwert aus 3 sog. Flächenanalysen ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff und Sauerstoff) aus folgenden Hauptbestandteilen:

- ≈61 M.-% Zink,
- ≈20 M.-% Aluminium,
- ≈4 M.-% Titan,
- ≈5 M.-% Silicium,
- ≈9 M.-% Eisen,
- ≈1 M.-% Calcium.

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des Haftvermittlers (Unterzinkung plus Zinkphosphatierung) und des ZnAl-Lamellenüberzuges getroffen (**Tabelle 8.15**):

- Die bei **Sonderuntersuchungen** auf den Rohrschellen 3 als Haftvermittler aufgebrachte Unterzinkung weist eine gleichmäßige Schichtdicke um 8 µm auf (**Bild 8.22**). Die zusätzlich applizierte Zinkphosphatierung ist sehr dünn, jedoch metallographisch und röntgenographisch nachweisbar.
- Die Überzüge sind mit im Mittel 39 bzw. 30 µm zwar vergleichsweise dick (**Bilder 8.22 und 8.23**); sie weisen aber auch merkliche Streuungen der Überzugsdicke auf.



Bilder 8.22 und 8.23:
Rohrschelle 3 (oben) und Rohrschelle 4 (unten) mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 5

8.4.6 Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 6

Angaben zum Korrosionsschutz

Überzugssystem. Das Überzugssystem der Verbindungsmittel enthält zum Zwecke des Korrosionsschutzes einen im Trommelverfahren applizierten ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6. Weiterhin existiert produktbezogen (Holzschrauben) eine zusätzliche Deckbeschichtung (Deckbeschichtung 1) (Abschn. 5.2 und 8.7.1). **Tabelle 8.16** beschreibt die Überzugssysteme der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 beschichteten Verbindungsmittel.

Bauteil	Hersteller vom Bauteil und OS		Oberflächenschutzsystem OS - Korrosionsschutz			
			Haftvermittler	ZnAl-Überzug		Deckbeschichtung Db
	Bauteil	OS		Produktbezeichnung	Dicke	
Holzschraube L2	1	F	es ist kein Haftvermittler vorhanden	Firma 6	Schichtdicke siehe Tabelle 8.17	Db 1
Bohrschraube L2	3					keine Db
Spreizdübel L2	2					
Kunststoffrahmendübel L2	1					

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L2 = Lieferung 2
U = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 8.16:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 beschichteten Verbindungsmittel

Zusammensetzung des ZnAl-Lamellenüberzuges. Die Zink- und Aluminiumlamellen sind in einem chromfreien anorganischen Bindemittel auf Basis Siliciumoxid eingebettet. Dieser Überzug besteht nach eigenen Messungen mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (Mittelwert aus 3 sog. Flächenanalysen ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff und Sauerstoff) aus folgenden Hauptbestandteilen:

- ≈53 M.-% Zink,
- ≈22 M.-% Aluminium,
- ≈13 M.-% Zinn,
- ≈10 M.-% Silicium,
- ≈2 M.-% Eisen.

Bauteil	Holzschraube L2		Bohrschraube L2		Spreizdübel L2 (Bolzen)		Ku.stoffrahmen-dübel L2	
Messbereich	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]	Kopf	Gewinde [1)]	glatter Bereich	Gewin-de [1)], Mutter	Kopf, Schaft	Gewinde [1)]
Mittelwert MW	K: 7 S: 11	6	9	9	9	G: 6 M: 14	K: 8 S: 9	6
Streuung S	K: 0-12 S: 6-20	0-14	3-14	2-12	4-14	G: 3-10 M:11-17	K: 4-16 S: 6-16	2-16
Nullstellen, Abplatzun-gen	an Zahnspitze kein ZnAl, an Kopf bis 0,5 mm Länge kein ZnAl		keine		keine		Nullstellen am Kopf	
Lage von einzelnen Verdickung.	Zahnansatz, Zahnspitze bis ≈35		keine		im Gewindegrund bis ≈40		Zahnansatz bis ≈36	
Oberflächen-fehler (Stahl)	vorhanden, durch ZnAl überdeckt		vorhanden, durch ZnAl überdeckt		nicht vorhanden		vorhanden, durch ZnAl überdeckt	

[1)] Messbereich: Zahnspitze, Zahnflanke, Bereich zwischen den Zähnen.
Bei Schichtdickenmessungen nicht berücksichtigt: lokale Verdickungen im Gewindebereich sowie der Bereich über Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, L2 = Lieferung 2,
K = Kopf, S = Schaft, G = Gewinde, M = Mutter

Tabelle 8.17:
Angaben zu Überzugssystemen der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 beschichteten Verbindungsmittel

Überzugsdicke. Mittels metallographischer Untersuchungen wurden folgende Feststellungen zur Dicke und Gleichmäßigkeit des ZnAl-Lamellenüberzuges auf den Verbindungsmitteln getroffen (**Tabelle 8.17**):

- Die mittleren Dicken der ZnAl-Lamellenüberzüge betragen bei allen Bauteilen bis auf die Mutter des Spreizdübels stets ≤11 µm. Dabei sind erhebliche Streuungen der Überzugsdicke vorhanden (vergleichbar Firma 2, **Bilder 8.15 und 8.16**). Bei Bauteilen mit Außengewinde sind im Gewindebereich lokal auch nur wenige Mikrometer dicke Überzüge und Nullstellen vorhanden. Nullstellen findet man an Zahnspitzen und an Köpfen. Andererseits sind bei Gewinden am Zahnansatz und an Zahnspitzen Verdickungen des Überzuges festgestellt worden.
- Durch die Kaltumformung bedingte Oberflächenfehler bei Schraubgewinden werden von einem eher dünneren ZnAl-Lamellenüberzug überdeckt (vergleichbar Firma 2, **Bild 8.17**).

8.5 Haftvermittler

Haftvermittler, bestehend aus einer Unterzinkung von wenigen Mikrometer Dicke und wahlweise einer zusätzlichen Passivierung (Blaupassivierung, Dickschichtpassivierung 1) oder einer Zinkphosphatierung, werden zur verbesserten Haftung von ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 3, 4 und 5 auf dem Stahluntergrund appliziert. Darüber hinaus verbessern diese auch den Korrosionsschutz.

8.6 Passivierung

Die Blaupassivierung (Cr(III)-haltig), die Dickschichtpassivierungen 1 und 2 (Cr(III)-haltig) und die Gelbchromatierung (Cr(VI)-haltig) werden alternativ auf galvanisch abgeschiedene Zink- und Zink-Nickel-Überzüge aufgebracht. Sie behindern in unterschiedlichem Ausmaß den Angriff auf den metallischen Überzug und erhöhen den Korrosionsschutz des Gesamtsystems (Abschn. 5.1). Sie wirken zudem als Haftvermittler, indem sie die Haftung für darüber befindliche Schichten verbessern.

8.7 Deckbeschichtung (Topcoat)

Deckschichten werden vor allem auf dünnen metallischen Überzügen auf Zinkbasis (auch mit zusätzlicher Passivierung) appliziert, um einen (zusätzlichen) Korrosionsschutz zu erzielen und um als Gleitmittel (Möglichkeit der Optimierung der Gleiteigenschaften) Reibbeiwerte den Erfordernissen anzupassen (Abschn. 5.2).

8.7.1 Deckbeschichtung 1

Diese Deckbeschichtung wirkt primär als Gleitmittel. Es handelt sich um eine Suspension von Festschmierstoffen in Wasser, worin die Teile getaucht und anschließend getrocknet werden. Es bildet sich ein nur wenige Nanometer dicker festhaftender, transparenter, wasserbeständiger Film, der die Beschichtung bildet. Das Gleitmittel wird üblicherweise zur Beschichtung von Schrauben zur Schmierung und zur Minimierung von Reibwertschwankungen und zur Reduzierung von Reibwerten aufgebracht.

8.7.2 Deckbeschichtung 2

Diese Deckbeschichtung wirkt primär als Gleitmittel. Es handelt sich um eine Dispersion anorganischer Produkte und einer Kombination verschiedener Schmierstoffzusätze in Wasser, worin die Teile getaucht und anschließend getrocknet werden. Dabei entsteht eine selbstschmierende 1 bis 2 µm dicke silikatische Deckschicht. Das Mittel wird zur Verbesserung der Korrosionsschutzeigenschaften, vor allem aber zur Kontrolle des Reibbeiwertes bei Gewindeteilen aufgebracht.

8.7.3 Deckbeschichtung 3

Es handelt sich um eine 5 bis 12 µm dicke Deckbeschichtung aus einem hochvernetztem Epoxy-System mit integriertem Gleitmittel auf lösemittelhaltiger Basis, das bei einer Objekttemperatur von etwa 180 bis 200 °C eingebrannt (vernetzt) wird. Das Mittel dient dem zusätzlichen Korrosionsschutz, soll Kontaktkorrosion behindern und bei Schrauben die erforderlichen Reibbeiwerte einhalten.

8.8 Kopfbeschichtung

Kopfbeschichtungen werden auf die Köpfe von Kunststoffrahmendübeln appliziert, um bei galvanisch abgeschiedenen Zinküberzügen einen zusätzlichen Schutz gegenüber atmosphärischer Korrosion zu erzielen (siehe Abschn. 7.4.2). Die an solchen Beschichtungen angestellten Untersuchungen dienten der Feststellung der Wirksamkeit unter

normalen (Stadtatmosphäre) und erhöhten (Meeresatmosphäre) atmosphärischen Korrosionsbelastungen (Abschn. 10.4.5).

8.8.1 Kopfbeschichtung 1

Die Kopfbeschichtung 1 ist eine lösemittelhaltige Hohlraumkonservierung und soll laut Produktinformation einen „sehr guten Langzeitkorrosionsschutz“ gewährleisten. Es besteht aus einem Gemisch von Korrosionsschutzadditiven auf Sulfonatbasis, Mineralölspezialraffinaten und aliphatischen Benzinkohlenwasserstoffen. Die Trockenschichtdicke des transparenten Films beträgt etwa 30 µm.

8.8.2 Kopfbeschichtung 2

Die Kopfbeschichtung 2 ist ein sog. Kantenlack. Es besteht aus Polyacrylaten gelöst in Benzinkohlenwasserstoffen. Die Trockenschichtdicke des transparenten Films beträgt 40 bis 50 µm.

8.9 Nichtrostender Stahl

Im Fall der Holzschrauben und Spreizdübel wurden auch solche aus nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II (Abschn. 6) untersucht. Diese Stähle besitzen für die meisten Anwendungen in der Befestigungstechnik eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit.

Die Holzschrauben aus dem Werkstoff 1.4567 (X3CrNiCu 18-9-4) werden in Abschn. 7.1 beschrieben. Hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit entspricht der Werkstoff 1.4567 dem Werkstoff 1.4301, mit Ausnahme des Kupferzusatzes von 3,00 bis 3,50 M.-%. Durch seinen Kupfergehalt bietet der Werkstoff 1.4567 eine sehr gute Kaltumformbarkeit (wichtig für die Herstellung von Schrauben). Die Spreizdübel aus dem Werkstoff 1.4301 (X5CrNi 18-10) werden in Abschn. 7.3 beschrieben.

9. Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte

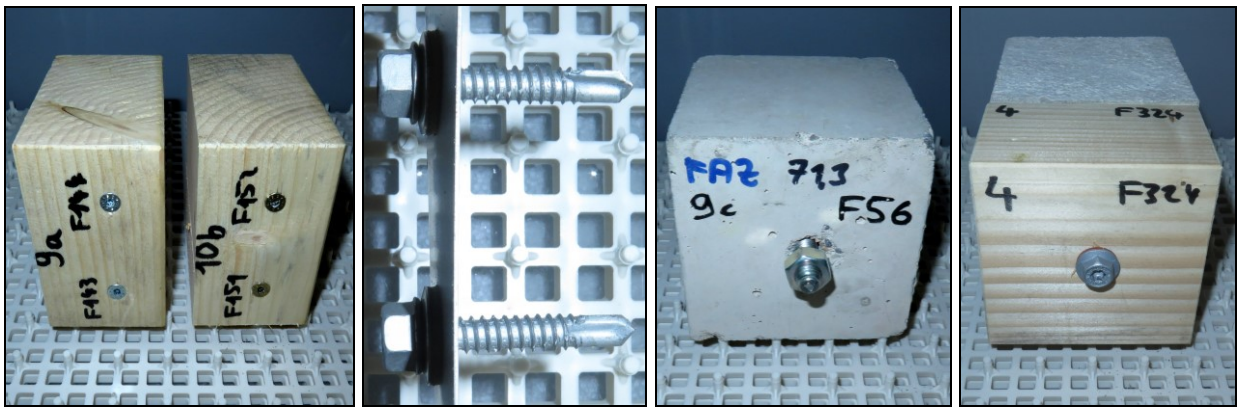
9.1 Zweck der Untersuchungen

Verbindungsmittel sind im nicht beregneten Außenbereich den jeweils vorherrschenden Luftfeuchten ausgesetzt. Beispielsweise in Stuttgart betragen die jährlichen Mittelwerte der relativen Luftfeuchte etwa 75 %, bei Streuungen zwischen etwa 45 bis 90 % (alle Werte sind auf eine Jahresmitteltemperatur von etwa 10 °C bezogen). Klimasituationen mit sehr hoher Luftfeuchte werden bei den in Abschn. 10 beschriebenen Naturversuchen nicht gesondert erfasst. Deshalb wurden Verbindungsmittel im eingebauten Zustand bei einem Konstantklima von etwa 84 % (83 bis 85 %) und 100 % relativer Luftfeuchte (im Konstantklima) ausgelagert. Die Versuche bei 100 % relativer Luftfeuchte sollen Aufschluss geben, wie sich die hier untersuchten metallischen Überzüge unter dieser Extremsituation verhalten.

9.2 Auslagerungsbedingungen

Die Auslagerung der Proben bei 84 % relativer Luftfeuchte fand in Kunststoffbehältern aus Polypropylen statt. Diese Luftfeuchte in den Behältern wurde durch die sich einstellende Sättigungsfeuchte über einer gesättigten Kaliumchloridlösung von 20 °C erreicht: Über einer solchen Salzlösung beträgt die relative Luftfeuchte 85 % (dieser Wert konnte in den Kunststoffbehältern, bei leichten Abweichungen nach unten, nicht dauerhaft konstant gehalten werden, siehe Abschn. 9.1).

Die Auslagerung der Proben bei 100 % relativer Luftfeuchte erfolgte in einem Klimaraum. Die Temperatur betrug in beiden Auslagerungsklimaten 20 °C. Der Beton und das Holz wurden vor dem Einbau der Verbindungsmittel für ca. 3 Monate im jeweiligen Konstantklima ausgelagert, bis sich die Ausgleichsfeuchte im Werkstoff eingestellt hatte. Für Metallspreizdübel und Kunststoffrahmendübel wurden die Bohrlöcher vorab hergestellt. **Bild 9.1** zeigt Proben im Einbauzustand.



Holzschrauben | Bohrschrauben | Spreizdübel | Kunststoffrahmendübel mit Anbauteil aus Holz

Bild 9.1:
Proben im Einbauzustand für Prüfung im Konstantklima

9.3 Beschreibung der Versuchskörper

Es wurden unterschiedlich korrosionsgeschützte Holzschrauben, Bohrschrauben, Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel (die Verbindungsmittel werden in Abschn. 7, die Schutzsysteme in Abschn. 8 beschrieben) im eingebauten (belasteten) Zustand bis zu 3 Jahren ausgelagert und anschließend aus dem jeweiligen Baustoff wieder „herauspräpariert“ und beurteilt. Zum Vergleich wurden einzelne Verbindungsmittel auch aus nichtrostendem Stahl untersucht. Der Einbau der Verbindungsmittel erfolgte wie im Detail in **Bild 9.2** dargestellt.

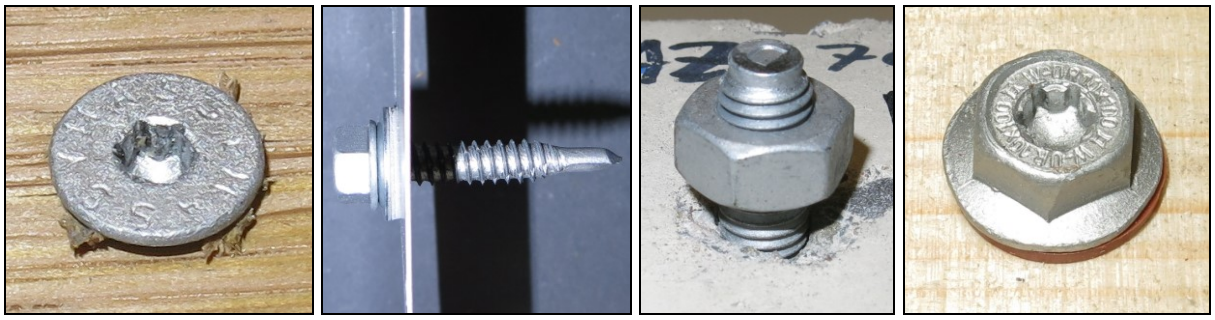


Bild 9.2:
Holzschraube, Bohrschraube, Spreizdübel (mit offenem Bohrloch), und Kunststoffrahmendübel im eingebauten Zustand

9.3.1 Holzschrauben

Unterschiedlich korrosionsgeschützte Holzschrauben, versehen mit zusätzlicher Deckbeschichtung (Gleitmittel) (Abschn. 7.1, **Bild 7.1**) wurden in Fichtenholz, imprägniertes Fichtenholz und in Eichenholz (jeweils Holzwürfel mit der Kantenlänge 125 mm) mit einem Akkuschrauber und einer Bit am Innenantrieb senkrecht zur Faser ohne Vorbohren eingeschraubt. Bei dem Holzschutzmittel (der Kesseldruckimprägnierung) der Bezeichnung „Koracit ACC“ handelt es sich um ein wasserlösliches, fixierendes borfreies Salzkonzentrat in flüssiger Form, das biozide Wirkstoffe auf Basis von Chrom- und Kupferverbindungen (Kupfer(II)oxid) enthält. Wie in Abschn. 3.3.1 unter Holzschutz ausgeführt wurde, wirken kupferhaltige Holzschutzmittel bei Nichteisenmetallen korrosiv. Hierauf wird auch im technischen Merkblatt des Holzschutzmittels hingewiesen.

Die **Holzschrauben aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen mit einem zusätzlichen Gleitmittel auf:

- Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung),
- galvanische Verzinkung,
- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1,
- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung dickschichtpassiviert),

- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 (kein Haftvermittler).

Zum Vergleich wurden auch **Holzschrauben aus nichtrostendem Stahl** 1.4567 (X3CrNiCu18-9-4) unter gleichen Bedingungen untersucht (siehe Abschn. 8.9).

9.3.2 Bohrschrauben

Unterschiedlich korrosionsgeschützte Bohrschrauben mit Sechskantkopf (Abschn. 7.2, **Bild 7.3, rechts**) wurden in ein Fassadenblech aus Aluminium AlMn1 der Blechstärke 0,75 mm mit einem Akkuschrauber und Nuss bis zur Auflage der Dichtscheibe auf dem Blech ohne Vorbohren eingeschraubt. Die Dichtscheiben waren in jedem Fall galvanisch verzinkt. Die Bleche wurden derart ausgelagert, dass die Bohrschrauben waagrecht ausgerichtet waren.

Die **Bohrschrauben aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen auf:

- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung dickschichtpassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 (kein Haftvermittler).

9.3.3 Spreizdübel

Unterschiedlich korrosionsgeschützte Spreizdübel (Abschn. 7.3, **Bild 7.4**) wurden in Würfel aus Beton einer Festigkeitsklasse C20/25 mit der Kantenlänge 100 mm eingesetzt. Die Bohrlöcher wurden mit Hammerschlag etwa 70 mm tief gebohrt. Danach wurde das Bohrloch mit Druckluft gereinigt. Die Dübel wurden 65 mm tief in den Beton gesetzt.

Die Auslagerung der Dübel erfolgte in nach außen offenen Bohrlöchern. Die Mutter auf dem Gewindeteil wurde zunächst über ein Anbauteil mit einem Drehmoment von 15 Nm angezogen, wobei der Spreizkonus gespreizt wurde. Dann wurde die Mutter wieder gelöst und das Anbauteil entfernt. Anschließend wurde die Mutter so aufgeschraubt, dass diese über der Betonoberkante einen Spalt von etwa 3 Gewindegängen bildet. Die Auslagerung der Betonkörper erfolgte derart, dass die Bohrlöcher und Dübel waagrecht ausgerichtet waren.

Die **Spreizdübel aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen auf:

- Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung),
- galvanische Verzinkung,

- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1,
- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung dickschichtpassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 (kein Haftvermittler).

Zum Vergleich wurden auch **Spreizdübel aus nichtrostendem Stahl** 1.4301 (X5CrNi18-10) unter gleichen Bedingungen untersucht (siehe Abschn. 8.9).

9.3.4 Kunststoffrahmendübel (Lieferung 2)

Unterschiedlich korrosionsgeschützte Kunststoffrahmendübel (Abschn. 7.4, **Bild 7.16**) wurden zur Befestigung eines Kantholzes aus Fichte in einen Untergrund aus Beton (Würfel der Kantenlänge 100 mm) einer Festigkeitsklasse C20/25 eingesetzt. Die Bohrlöcher wurden mit Hammerschlag etwa 55 mm tief gebohrt. Danach wurde das Bohrloch mit Druckluft gereinigt. Die Befestigung des Kantholzes erfolgte in der Durchsteckmontage. Die Dübel wurden 40 mm tief in den Beton gesetzt und die Dübelschrauben wurden mit einem Akkuschrauber am Innenantrieb (Bit) bis zur Auflage des Schraubenkopfes auf dem Dübelkragen fest eingedreht. Der offene Bereich des Spreizdübels (das Spreizelement) ragte analog der Ausführung in **Bild 10.6** etwa 30 mm tief in das auf dem Beton aufliegende Kantholz der Abmessung 60 x 60 mm.

Die Schrauben der Kunststoffrahmendübel wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen auf:

- Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung),
- galvanische Verzinkung,
- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1,
- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung dickschichtpassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 (kein Haftvermittler).

9.4 Ergebnisse und deren Bewertung

9.4.1 Bewertungskriterien

Die in die verschiedenen Bauteile (Holz, Aluminiumblech, Beton) eingebauten unterschiedlich korrosionsgeschützten Verbindungsmittel wurden in zeitlichen Abständen hinsichtlich Rotrostbildung bewertet. Diese Rostbildung als Folge von Stahlkorrosion ist unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen dann zu erwarten, wenn der metallische Überzug zumindest lokal abgetragen ist. In Gegenwart von Wasser und Sauerstoff reagiert Eisen/Stahl zunächst zu Eisen(II)-hydroxid und anschließend zu rostbraunem Eisen-(III)-hydroxid. Bei der Bewertung der Verbindungsmittel nach erfolgter Auslagerung wird unterschieden nach dem Bauteil (Holzschraube, Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) und nach der Oberflächengeometrie wie folgt:

Holzschrauben
- Kopf in der umgebenden Atmosphäre,
- Schaft und Gewinde (einschließlich der Schaftfräsen) im Kontakt mit Holz.

Bohrschrauben
- Kopf in der umgebenden Atmosphäre,
- durch das Blech geschraubtes Gewinde in der umgebenden Atmosphäre.

Spreizdübel (Bohrloch offen)
- Mutter und Gewinde in der umgebenden Atmosphäre,
- glatter Abschnitt des Gewindebolzens im Bohrloch,
- Gewinde im Bohrloch.

Kunststoffrahmendübel
- Kopf in der umgebenden Atmosphäre,
- Schaft und Gewinde im Kontakt mit der Dübelhülse im Bohrloch.

Köpfe von Schrauben und vor allem Gewinde der Verbindungsmittel werden beim Einbau mechanisch beansprucht, wodurch der Korrosionsschutz beeinträchtigt werden kann. Für mechanisch beanspruchte Bereiche wird in der Folge, zur Unterscheidung von mechanisch nicht beanspruchten Oberflächen, der Ausdruck „belastet“ verwendet.

Die detaillierten Ergebnisse der bis zu 3 jährigen Auslagerungen zum Korrosionsschutzverhalten der Überzüge sind getrennt für i.M. 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte für jeweils 1,5 und 3 Jahre nach Korrosionsschutzsystemen und Oberflächengeometrie geordnet in den **Anlagen 9.1 bis 9.15** zusammen mit den wichtigsten Angaben zum Überzug dargestellt. Der besseren Übersicht halber, werden in den folgenden Abschnitten die für die einzelnen korrosionsgeschützten Verbindungsmittel erzielten Ergebnisse jeweils nur in einer Zusammenfassung tabellarisch dargestellt. Die Angaben zur Schichtdicke des Überzuges in den Ergebnistabellen sind Abschn. 8 entnommen und dienen der Interpretation der Ergebnisse. Die Bewertung des Korrosionszustandes erfolgte anhand der flächenmäßigen Ausdehnung von Bereichen mit Rotrost nach Abtrag des metallischen Überzuges. Orientierung bei der Bewertung des Korrosionszustandes bieten die Farben in den Spalten der Auswertungstabellen:
- „grün“ steht für ohne Rotrost,

- „gelb“ steht für Rotrost auf <10 % der Oberfläche,
- „hellrot“ steht für Rotrost auf >10 %, jedoch <100 % (deutlich geringer als 100 %) Rotrost auf der Oberfläche,
- „dunkelrot“ steht für eine nahezu komplette Anrostung auf der Oberfläche.

In der Regel sind die Korrosionsverhältnisse derart, dass bei zunehmender flächenmäßigen Ausdehnung von Bereichen mit Rotrost nach Abtrag des metallischen Überzuges auch die Intensität des Stahlangriffes des nunmehr ungeschützten Stahls zunimmt.

Besonderheit bei der Korrosionsauswertung bei Kontakt mit Eichenholz. Die augenscheinliche Feststellung eines Abtrages des metallischen Überzuges und Rotrostbildung war im Fall der Holzschrauben bei Kontakt mit nassem Fichtenholz möglich, nicht jedoch bei Kontakt mit nassem Eichenholz (nach Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte). Hier war die Oberfläche bereits nach wenigen Wochen einheitlich grau/schwarz; ein Abtrag des Überzuges war nicht feststellbar. Erklärt werden kann dieser Umstand durch die chemischen Eigenschaften von nassem Eichenholz (Abschn. 3.3.1), nämlich die Bildung organischer Säuren (vor allem Essigsäure). Die Ansäuerung des ungebundenen Wassers in den Zellen des Holzes löst Zink unter Bildung von eingefärbten Zinksalzen (z. B. Zinkacetat). Auch unlegierter Stahl korrodiert in Säuren unter Bildung von Salzen. Bei Korrosion unter Sauerstoffarmut (bei Kontakt mit nassem Holz) entsteht auch Fe_3O_4 in Form von dünnen schwarzen Schichten. Diese möglichen Einfärbungen der Oberflächen lässt eine augenscheinliche Feststellung der Korrosionssituation nicht zu.

Da der Abtrag des Überzuges augenscheinlich nicht feststellbar war, wurde der Korrosionszustand der in nasses Eichenholz eingedrehten Holzschrauben mittels energiedispersiver Röntgenanalyse festgestellt, wobei die elementspezifischen Peaks des EDX-Spektrums quantitativ ausgewertet wurden. Erfasst wurden jeweils 3 Messstellen z. B. des Gewindes bestehend aus einem Gewindezahn und einem Gewindegrund. Der Mittelwert der Messungen wurde verglichen mit dem Elementgehalt der Oberfläche neuwertiger Schrauben. Folgende Bewertung des Befundes wurde vorgenommen:

- Der Beginn der Korrosion (entspricht <10 % Rotrost auf der Oberfläche, siehe oben) wurde festgestellt, sobald in der Oberfläche gegenüber Oberfläche der neuwertigen Holzschraube mehr als 1 M.-% Eisen zusätzlich festgestellt wurde.
- Deutlich mehr als 10 M.-% Eisen bei gleichzeitig noch hohen Zinkgehalten bei der Analyse wurde als >10 % jedoch <<100 % Rotrost auf der Oberfläche gewertet.
- Falls kaum noch Zink in den überwiegend eisenhaltigen Korrosionsprodukten nachgewiesen wurde, wurde dieser Befund als 100 % Stahlkorrosion gewertet.

9.4.2 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Holzschrauben

In der Folge werden die bei atmosphärischer Korrosion an Holzschrauben (**Bild 7.1**) der Lieferung 1 und 2 erzielten Ergebnisse im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Korrosionsmedium (Atmosphäre, Holz),
- Art des Korrosionsschutzes,

- Oberflächengeometrie der Holzschraube (Kopf, Schaft, Gewinde),
- Höhe der relativen Luftfeuchte beim Konstantklima,
- Dauer der Auslagerung.

Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten werden beispielhaft durch die **Bilder 9.3 bis 9.7** belegt. Das Korrosionsverhalten der Holzschrauben nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte wird in **Tabelle 9.1** dargestellt. Diese Tabelle fasst die Detailergebnisse in den **Anlagen 9.1 bis 9.7** zusammen.

Alle Holzschrauben aus nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II sind nach 3 Jahren ohne jeglichen Rostbefall. In der Folge werden deshalb nur die Ergebnisse zum Korrosionsverhalten der metallischen Überzüge näher betrachtet.

A1 Einfluss des Korrosionsmediums (Atmosphäre, Holz)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte.)

Bezüglich der Auswertung nach der Umgebung (Feuchtklima, Holz und Holzart) wurden die unter A1-1 bis A1-3 getroffenen Feststellungen getroffen. Das Verhalten in Feucht- und Trockenklima wird unter A4 verglichen.

A1-1 Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalte 4.)

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung**. Bei den in diesen Hölzern eingedrehten Schrauben ist noch keine Stahlkorrosion vorhanden (siehe **Bilder 9.3 bis 9.7**).
- **Eiche**. Im atmosphärisch berührten Kopfbereich zeigen Holzschrauben mit den unter A2 genannten Korrosionsschutzsystemen Rotrost. Der Beginn der Korrosion liegt häufig im peripheren Randbereich (Kontakt des Schraubenkopfes mit dem Holz) (siehe **Bild 9.7**) und im Bit (an geringfügigen mechanischen Verletzungen des metallischen Überzuges).

A1-2 Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalten 5 und 6.)

- **Fichte ohne Imprägnierung**. Im Nassklima trat im Untersuchungszeitraum von 3 Jahren bei korrosionsgeschützten Schrauben im Kontakt mit Fichte ohne Imprägnierung keine Stahlkorrosion auf (siehe **Bilder 9.3 bis 9.7**).
- **Fichte mit Imprägnierung, Eiche**. Rotrost wurde im Kontakt mit Holz nur bei jenen Schrauben festgestellt, die in imprägnierte Fichte und Eichenholz eingeschraubt wurden (siehe **Bilder 9.4 bis 9.7**). Dabei setzt starke Korrosion / Rotrostbildung im Kontakt mit nassem Eichenholz früher ein als im Kontakt mit nassem imprägniertem Fichtenholz.

A1-3 Vergleich des Korrosionsverhaltens in der Atmosphäre und bei Holzkontakt

(Vergleiche in **Tabelle 9.1** die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

Hinsichtlich eines Vergleiches Korrosion in der Atmosphäre (Kopf) bzw. im Kontakt mit Holz (Schaft, Gewinde) gilt für 100 % relative Luftfeuchte je nach Holzart:

Holz / Korrosionsschutz		Liefe-rung	84 % relative Luftfeuchte			100 % relative Luftfeuchte		
			Kopf	Schaft	Gewinde	Kopf	Schaft	Gewinde
			1	2	3	4	5	6
Fichte	Feuerverz.	2	62	62	62	62	62	62
	galv. Verz.		9	9	6	9	9	6
	galv. blau		9	9	6	9	9	6
	galv. gelb		9	9	6	9	9	6
	galv. dick		9	9	6	9	9	6
	ZnNi dick	1	6	6	6	6	6	6
	ZnNi dick	2	14	14	10	14	14	10
	ZnAl Fa.1[1)]		8	9	7	8	9	7
	ZnAl Fa.1[2)]		8	9	7	8	9	7
	ZnAl Fa.2		8	10	6	8	10	6
	ZnAl Fa.4		3	4	3	3	4	3
	ZnAl Fa.6		7	11	6	7	11	6
	1.4567	-						
imprägnierte Fichte	Feuerverz.	2	62	62	62	62	62	62
	galv. Verz.		9	9	6	9	9	6
	galv. blau		9	9	6	9	9	6
	galv. gelb		9	9	6	9	9	6
	galv. dick		9	9	6	9	9	6
	ZnNi dick	1	6	6	6	6	6	6
	ZnNi dick	2	14	14	10	14	14	10
	ZnAl Fa.1[1)]		8	9	7	8	9	7
	ZnAl Fa.1[2)]		8	9	7	8	9	7
	ZnAl Fa.2		8	10	6	8	10	6
	ZnAl Fa.4		3	4	3	3	4	3
	ZnAl Fa.6		7	11	6	7	11	6
	1.4567	-						
Eiche	Feuerverz.	2	62	62	62	62	62	62
	galv. Verz.		9	9	6	9	9	6
	galv. blau		9	9	6	9	9	6
	galv. gelb		9	9	6	9	9	6
	galv. dick		9	9	6	9	9	6
	ZnNi dick	1	6	6	6	6	6	6
	ZnNi dick	2	14	14	10	14	14	10
	ZnAl Fa.1[1)]		8	9	7	8	9	7
	ZnAl Fa.1[2)]		8	9	7	8	9	7
	ZnAl Fa.2		8	10	6	8	10	6
	ZnAl Fa.4		3	4	3	3	4	3
	ZnAl Fa.6		7	11	6	7	11	6
	1.4567	-						

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 9.1:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Holzschrauben (Lieferung 1 und 2) nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % rel. Luftfeuchte

- **Fichte**. Bei allen Korrosionsschutzsystemen ist sowohl im unmittelbaren Kontakt mit der Atmosphäre als auch im Kontakt mit Holz nach 3 Jahren Auslagerung noch keine Stahlkorrosion vorhanden (siehe **Bilder 9.3 bis 9.7**).
- **Imprägnierte Fichte, Eiche**. Bei allen Korrosionsschutzüberzügen, ausgenommen die Feuerverzinkung (siehe **Bild 9.3**), ist der Korrosionsangriff im Kontakt mit Holz, einschließlich der peripheren Randbereiche der Köpfe von in Eiche eingedrehten Schrauben, deutlich stärker (zum Teil starker Rotrost) als bei atmosphärischer Korrosion der Köpfe (kein Angriff bei imprägnierter Fichte, überwiegend nur geringe Rotrostbildung bei einigen Systemen im Kontakt mit Eiche) (siehe **Bilder 9.4 bis 9.7**).

Folgerungen zu A1: Einfluss des Korrosionsmediums (Atmosphäre, Holz)

Korrosion des metallischen Überzuges und Rotrostbildung bei Kontakt mit nassem Holz tritt in erster Linie dann auf, wenn es sich um Eiche handelt oder wenn das Holz (Fichte) beispielsweise ein kupferhaltiges Holzschutzmittel enthält (vergleiche hierzu in den **Bildern 9.4 bis 9.7** die Schrauben in Fichte ohne Imprägnierung mit den Schrauben in imprägnierter Fichte und Eiche). Durch die Versuche wurden die beschriebenen korrosionsbegünstigenden Eigenschaften von Eiche (Abschn. 3.3.1, Korrosionsbeanspruchung durch Holzinhaltsstoffe) und von kupferhaltigen Holzschutzmitteln in Verbindung mit zinkhaltigen Überzügen (Abschn. 3.3.1, Holzschutz) bestätigt.

A2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte.)

Das Korrosionsschutzverhalten der einzelnen Korrosionsschutzsysteme unterscheidet sich merklich nur bei Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte, nicht jedoch für 84 %. Da das Verhalten der Überzüge im Kontakt zur Atmosphäre und Holz unterschiedlich ist, erfolgt die Bewertung getrennt für beide Umgebungen (Atmosphäre, Holz).

A2-1 Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

Kopf von Schrauben in nicht imprägnierter und imprägnierter Fichte

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalte 4.)

- **Feuerverzinkung**. Die Köpfe der feuerverzinkten Holzschrauben, die in nasse nicht imprägnierte und imprägnierte Fichte eingedreht wurden, sind frei von Rotrost (siehe **Bild 9.3**).
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Die Köpfe der Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen (Schichtdicke i.M. 9 µm) ohne und mit zusätzlicher Passivierung und ZnNi-Überzügen (Schichtdicke i.M. 6 und 14 µm) mit zusätzlicher Passivierung, die in nasse nicht imprägnierte und imprägnierte Fichte eingedreht wurden, sind ebenfalls frei von Rotrost (siehe **Bilder 9.4 und 9.5**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 9.2** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Bei den

mit ZnAl-Lamellenüberzügen korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit Fichtenholz und imprägniertem Fichtenholz wurde festgestellt:
Die Köpfe der Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen aller Firmen 1, 2, 4 und 6 (Schichtdicke i.M. 3 bis 8 µm) sind bei Kontakt mit nasser Fichte ohne und mit Imprägnierung frei von Rotrost (siehe **Bilder 9.6 und 9.7**).

Fa.	Fichte		Imprägnierte Fichte		Eiche		Hv	Db
	Stahlkorrosion/ Rotrost bei Kontakt zu:		Stahlkorrosion/ Rotrost bei Kontakt zu:		Stahlkorrosion/ Rotrost bei Kontakt zu:			
	Atmo-sphäre (Kopf)	Holz (Gewinde)	Atmo-sphäre (Kopf)	Holz (Gewinde)	Atmo-sphäre (Kopf)	Holz (Gewinde)		
1	8 (0-16)	7 (0-28)					ja	ja
2	8 (0-32)	6 (0-16)					nein	ja
4	3 (0-10)	3 (0-5)					nein	ja
6	7 (0-12)	6 (0-14)					nein	ja

keine | geringe | starke | sehr starke Rotrostbildung

Db = Deckbeschichtung, Hv = Haftvermittler, Zahlen: Mittelwert (Streubereich) des Überzuges

Tabelle 9.2:
Angaben zum Schutzverhalten von ZnAl-Lamellenüberzügen beim Kopf (Atmosphäre) und dem Gewinde (Holz) im Nassklima bei in Fichte, imprägnierter Fichte und Eiche eingedrehten Schrauben und Nennung möglicher Einflüsse (siehe auch Tabelle 9.1)

Kopf von Schrauben in Eiche

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalte 4.)

- **Feuerverzinkung**. Die Köpfe der feuerverzinkten Holzschrauben, die in nasser Eiche eingedreht wurden, sind frei von Rotrost (siehe **Bild 9.3**).
- **Galvanische Zink-Überzüge**. Holzschrauben, deren Korrosionsschutz aus einem i.M. 9 µm dicken galvanischen Zinküberzug (ohne und mit Passivierung) besteht, zeigen geringe Rotrostbildung. Betroffen sind der Bit und vor allem die peripheren Randbereiche des Schraubenkopfes im Kontakt zum Holz (siehe **Bild 9.4**).
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Die Köpfe der Schrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen sind im Fall der dickeren Auflage (Schichtdicke i.M. 14 µm) frei von Rotrost (siehe **Bild 9.5**), zeigen jedoch beim dünneren Überzug (Schichtdicke i.M. 6 µm) schwache Rotrostbildung.
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 9.2** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Das Korrosionsverhalten der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2, 4 und 6 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit nassem Eichenholz ist wie folgt:
  Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 4 (ohne Haftvermittler und geringer Schichtdicke von i.M. 3 µm) und 6 (ohne Haftvermittler und einer Schichtdicke von i.M. 7 µm) zeigen im Kopfbereich (siehe **Bild 9.7**) starken bzw. schwachen Rotrost.

Keine Stahlkorrosion ist bei den Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen und erhöhter Schichtdicke von i.M. 8 µm vorhanden. Dieses sind die Überzüge der Firma 1 mit einem Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung bzw. Dickschichtpassivierung 1) (siehe **Bild 9.6**) und jene der Firma 2 (ohne Haftvermittler).

Bei den in Eiche eingedrehten Holzschrauben beginnt die Korrosion im Kopfbereich früher als bei Kontakt mit den anderen beiden Hölzern.

A2-2 Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalten 5 und 6.)

Kontakt mit nasser Fichte ohne Imprägnierung

- **Feuerverzinkung, galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge, ZnAl-Lamellenüberzüge**. Schaft und Gewinde im Kontakt mit nasser Fichte ohne Imprägnierung zeigen im Fall aller untersuchter metallischer Überzüge keinen Rotrost (siehe **Bilder 9.3 bis 9.7**).

Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte

- **Feuerverzinkung**. Die feuerverzinkten Schrauben sind im Kontakt mit nassem Holz aus imprägnierter Fichte frei von Rotrost (siehe **Bild 9.3**).
- **Galvanische Zink-Überzüge**. Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen zeigen bei Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte bei Schaft (Schichtdicke i.M. 9 µm) und Gewinde (Schichtdicke i.M. 6 µm) starke bzw. sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 9.4**).
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Schrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen zeigen bei Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte Rotrost. Im Fall der dickeren Auflage (Schaft und Gewinde: Schichtdicke i.M. 14 µm bzw. i.M. 10 µm) (siehe **Bild 9.5**) ist erwartungsgemäß flächenmäßig weniger Rotrost vorhanden als bei dünneren Überzügen (Schaft und Gewinde Schichtdicken i.M. 6 µm).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 9.2** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Das Korrosionsverhalten der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2, 4 und 6 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit nassem imprägnierten Fichtenholz ist wie folgt:
  Betroffen von Stahlkorrosion im Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte sind mit ZnAl-Lamellenüberzügen geschützte Schrauben aller Firmen.

  Folgende Unterschiede sind erkennbar:
  - Schrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 1 mit einem Haftvermittler (Unterzinkung plus Blaupassivierung oder Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1) zeigen nur im Gewindebereich starke (siehe **Bild 9.6**) bzw. schwache Rotrostbildung. Bei diesen ZnAl-Lamellenüberzügen zeigt der Überzug mit einer Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1 bei Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte demnach einen höheren Korrosionswiderstand als jener mit Unterzinkung plus Blaupassivierung.

- Schrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 2, 4 (siehe **Bild 9.7**) und 6 (alle ohne Haftvermittler) zeigen sowohl im Schaft- als auch im Gewindebereich starke Rotrostbildung. Die Korrosion ist insgesamt stärker als bei dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (siehe **Bild 9.6**).

Kontakt mit nasser Eiche

- **Feuerverzinkung**. Schaft und Gewinde feuerverzinkter Holzschrauben sind im Kontakt mit nasser Eiche frei von Rotrost (siehe **Bild 9.3**).
- **Galvanische Zink-Überzüge**. Holzschrauben mit galvanischen Zink-Überzügen (ohne und mit Passivierung) zeigen bei Kontakt mit nasser Eiche bei Schaft (Überzugsdicke i.M. 9 µm) und Gewinde (Überzugsdicke i.M. 6 µm) ausgedehnte Rotrostbildung (siehe **Bild 9.4**).
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Schrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen zeigen bei Kontakt mit nassem Eichenholz selbst im Fall der dickeren Auflage (z. B. Schaft: i.M. 14 µm) Rotrost (siehe **Bild 9.5**), allerdings weniger als bei dünnerem Überzug (Schaft: i.M. 6 µm). Bei vergleichbarer Dicke des metallischen Überzuges ist der galvanische ZnNi-Überzug bei Kontakt mit nasser Eiche etwas beständiger als der galvanische Zink-Überzug.
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 9.2** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Das Korrosionsverhalten der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2, 4 und 6 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit nassem Eichenholz ist wie folgt:
  Betroffen von Stahlkorrosion im Kontakt mit nasser Eiche sind mit ZnAl-Lamellenüberzügen geschützte Schrauben aller Firmen.

  Folgende Unterschiede sind erkennbar:
  - Schrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 1 mit einem Haftvermittler (Unterzinkung plus Blaupassivierung bzw. Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1) weisen im Schaft- und Gewindebereich (Schichtdicke i.M. 9 bzw. 7 µm) starke (siehe **Bild 9.6**) bzw. schwache Rotrostbildung auf. Bei diesen ZnAl-Lamellenüberzügen zeigt der Überzug mit einer Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1 bei Kontakt mit nasser Eiche einen höheren Korrosionswiderstand als jener mit Blaupassivierung.
  - Schrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 2, 4 (siehe **Bild 9.7**) und 6 (alle ohne Haftvermittler) zeigen sowohl beim Schaft (i.M. 4 bis 11 µm) als auch im Gewindebereich (i.M. 3 bis 6 µm) ausgedehnten Rotrost. Die Korrosion ist insgesamt stärker als bei dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1.

A2-3 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel (beide mit Dickschichtpassivierung)

In der Folge werden galvanische Überzüge mit Dickschichtpassivierung nochmals gesondert verglichen, wobei wiederum zwischen dem Kontakt zur Atmosphäre und zum Holz unterschieden wird.

Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalte 4.)

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung**. Bei den in Fichte ohne und mit Imprägnierung eingedrehten Holzschrauben wurde bei beiden Überzügen (Zink: Schichtdicke i.M. 9 µm, ZnNi: Schichtdicke i.M. 6 und 14 µm) innerhalb von 3 Jahren keine Stahlkorrosion festgestellt (siehe **Bilder 9.4 und 9.5**).
- **Eiche**. Bei in Eiche eingedrehten Holzschrauben wurde beim galvanischen Zinküberzug (Dicke i.M: 9 µm) mit Dickschichtpassivierung 1 geringfügiger Rotrost festgestellt (siehe **Bild 9.4**). Beim ZnNi-Überzug (Dicke i.M. 6 bzw. 14 µm) mit Dickschichtpassivierung 2 erfolgte innerhalb von 3 Jahren geringfügige bzw. keine Rotrostbildung (siehe **Bild 9.5**).

Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 9.1**, Spalten 5 und 6.)

- **Fichte ohne Imprägnierung**. Im Kontakt mit nasser Fichte ohne Imprägnierung wurde bei beiden galvanischen Überzügen (Zink/Gewinde: Überzugsdicke i.M. 6 µm, ZnNi/Gewinde: Schichtdicke i.M. 6 und 10 µm) mit Dickschichtpassivierung innerhalb von 3 Jahren kein Unterschied festgestellt; Schrauben mit beiden Schutzsystemen sind frei von Rotrost (siehe **Bilder 9.4 und 9.5**).
- **Imprägnierte Fichte**. Im Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte erfolgt die Rotrostbildung bei Schrauben mit galvanischem Zinküberzug und Dickschichtpassivierung 1 zeitlich früher und ist nach 3 Jahren stärker ausgeprägt als bei Schrauben mit ZnNi-Überzug mit Dickschichtpassivierung 2 (vergleiche das **Bild 9.4 mit Bild 9.5**).
- **Eiche**. Im Kontakt mit nasser Eiche erfolgt Rotrostbildung bei Schrauben mit galvanischem Zinküberzug (Zink/Gewinde: Schichtdicke i.M. 6 µm) und Dickschichtpassivierung 1 zeitlich früher und ist nach 3 Jahren auch stärker ausgeprägt als bei Schrauben mit ZnNi-Überzug (ZnNi/Gewinde: Schichtdicke i.M. 6 bzw. 10 µm) und Dickschichtpassivierung 2 (vergleiche das **Bild 9.4 mit Bild 9.5**).

A2-4 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

Die Art der Passivierung wurde lediglich bei der galvanischen Verzinkung variiert. Zum Vergleich wurde die galvanische Verzinkung auch ohne Passivierung ausgelagert. Folgende Feststellungen wurden (gemeinsam) für den Kopf in der Atmosphäre sowie für Schaft und Gewinde im Kontakt mit nasser imprägnierter Fichte und nasser Eiche getroffen:

- Durch die zusätzliche Blaupassivierung, Gelbchromatierung bzw. Dickschichtpassivierung) der Verzinkung wurde bei Holzschrauben in nassem Holz entlang der gesamten Schraube gegenüber der galvanischen Verzinkung ohne zusätzliche Passivierung kein verbessertes Schutzverhalten festgestellt. Durch die genannten Passivierungen sind an in imprägnierter Fichte und Eiche eingedrehten Holzschrauben bei der galvanischen Verzinkung bei Kontakt mit nassem Holz keine grundlegend erhöhten Schutzdauern zu erzielen.

Folgerungen zu A2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

- **Feuerverzinkung**. Die Feuerverzinkung erwies sich in der Atmosphäre und insbesondere bei Kontakt mit den korrosiveren Hölzern (nasse imprägnierte Fichte und nasse Eiche) den galvanischen Überzügen (Zink bzw. ZnNi) und ZnAl-Lamellenüberzügen gegenüber hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit deutlich überlegen (vergleiche hierzu **das Bild 9.3** mit den **Bildern 9.4 bis 9.7**). Nach 3 Jahren wurde keinerlei Stahlkorrosion festgestellt.
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Gegenüber den korrosiveren Hölzern (nasse imprägnierte Fichte und nasse Eiche) ist der galvanische ZnNi-Überzug beständiger als der galvanische Zinküberzug. Bei Kontakt mit Eichenholz kommt offensichtlich eine erhöhte Beständigkeit gegenüber organischen Säuren (Essigsäure) von ZnNi gegenüber Reinzink zum Ausdruck. Ein langzeitiger Schutz lässt sich jedoch auch bei den ZnNi-Überzügen nur durch ausreichend dicke Auflage erreichen (siehe **Bild 9.5**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Von den ZnAl-Lamellenüberzügen zeigte nur der Überzug der Firma 1 mit zusätzlichem Haftgrund (Unterzinkung plus Blaupassivierung und insbesondere plus Dickschichtpassivierung 1) bei Kontakt mit korrosiveren Hölzern (nasse imprägnierte Fichte und nasse Eiche) einen erhöhten Korrosionswiderstand (siehe **Bild 9.6**). Der zusätzliche Haftgrund schützt bei Trommelware mit den offenbar unvermeidbaren Schichtdickenschwankungen zusätzlich vor Korrosion. Die ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 2, 4 (siehe **Bild 9.7**) und 6 (alle ohne Haftgrund, ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 mit geringer Schichtdicke) erwiesen sich bei in 100 % relative Luftfeuchte ausgelagerten Bauteilen als ungeeignet.
- **Passivierung, Deckbeschichtung**. Gegenüber nasser Fichte ohne Imprägnierung weist selbst die galvanische Verzinkung ohne Passivierung eine merkliche Korrosionsbeständigkeit auf.

  Gegenüber nassem imprägnierten Fichtenholz und nasser Eiche bewirken eine Passivierung und zusätzliche Deckbeschichtung der galvanischen Verzinkung dagegen keine erkennbare Verbesserung des Korrosionsschutzes. Sowohl die kupferhaltige Imprägnierung als auch die insbesondere bei nasser Eiche freiwerdende Säure greifen die Passivierung und die nur wenige Nanometer dicke Deckbeschichtung (Gleitbeschichtung) an (siehe **Bild 9.4**).

A3 Einfluss der Oberflächengeometrie (Schaft, Gewinde) bei Kontakt mit Holz

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche in **Tabelle 9.1** die Spalten 5 und 6.)

- **Fichte ohne Imprägnierung**. Bei Kontakt mit Fichte ohne Imprägnierung erwiesen sich im Bereich von Schaft und Gewinde alle Überzüge innerhalb der Auslagerungszeit als beständig (siehe **Bilder 9.3 bis 9.7**).
- **Imprägnierte Fichte**. Bei Kontakt mit nassem imprägniertem Fichtenholz zeigen die Gewindebereiche überwiegend stärker Rotrost als die glatten Schaftbereiche (siehe **Bilder 9.4 bis 9.7**).

- **Eiche**. Bei Kontakt mit nassem Eichenholz ist im Fall aller Überzüge im Schaft- und Gewindebereich gleichstarke Rotrostbildung vorhanden (siehe **Bilder 9.4 bis 9.7**).

Folgerungen zu A3: Einfluss der Oberflächengeometrie (Schaft, Gewinde) bei Kontakt mit Holz

Hinsichtlich der Oberflächengeometrie (des Oberflächeneinflusses) bei Holzschrauben ist zwischen glattem Schaft und dem Gewinde zu unterscheiden. Wie auch in Abschn. 11 (Salzsprühtests) ausgeführt wurde, können beim Schraubenkopf und insbesondere im Gewindebereich die Überzüge Schwächen aufweisen, was auf herstellungsbedingte (Trommelverfahren) und verarbeitungsbedingte Einflüsse (Verletzung der Überzüge beim Eindrehen in vor allem Hartholz) zurückzuführen ist (siehe hierzu Abschn. 8).

Bei Auslagerung in insbesondere korrosiven Hölzern (kupferhaltige Imprägnierungen, organische Säuren bei Eiche) können sich bei erhöhter Holzfeuchte zudem holzseitige Einflüsse ungünstig auswirken:

- **Eiche** weist eine vergleichsweise hohe Aggressivität auf. Diese führte bei den Holzschrauben über die gesamte Schraubenlänge im Holz (Schaft und Gewinde) zu einer frühzeitigen und starken Korrosion des Überzuges. Besonders betroffen sind alle empfindlichen Systeme wie galvanische Verzinkung ohne und mit Passivierung und ZnAl-Lamellenüberzüge ohne Haftvermittler (Firmen 2, 4 und 6) (siehe **Bilder 9.4 und 9.7**).
- **Imprägnierungen im Fichtenholz** begünstigen ebenfalls den Korrosionsabtrag des Überzuges, allerdings in geringerem Umfang als feuchtes/nasses Eichenholz. Betroffen sind hier bevorzugt auch jene Bereiche, die bereits geschwächt sind bzw. die oben genannten Unregelmäßigkeiten beim Überzug aufweisen. Dabei handelt es sich vor allen Dingen um die Gewinde (vergleiche hierzu den Schaft- und Gewindebereich in den **Bildern 9.4 bis 9.7**).
- Bei Kontakt mit **Fichtenholz ohne Imprägnierung** haben sich Unregelmäßigkeiten beim Überzug, die bevorzugt im Gewindebereich auftreten, nicht erkennbar ausgewirkt (siehe **Bilder 9.4 bis 9.7**).

A4 Einfluss der relativen Luftfeuchte (84 und 100 %)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre. Vergleiche in **Tabelle 9.1** die Spalten 1 bis 3 mit den Spalten 4 bis 6.)

Stahlkorrosion im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre und mit Fichtenholz (ohne und mit Imprägnierung) wurde nur dann festgestellt, wenn das Holz bei 100 % relativer Luftfeuchte gelagert wurde. Bei Auslagerung von Holzschrauben im Kontakt mit Eiche ist dagegen auch bei Auslagerung bei 84 % relativer Luftfeuchte Korrosion möglich. Im Detail gelten folgende Zusammenhänge:

- **Fichte ohne Imprägnierung**. Bei Kontakt mit Fichte ohne Imprägnierung sind alle Korrosionsschutzsysteme sowohl im atmosphärisch berührten Kopfbereich als auch im Kontakt mit Holz in beiden Klimaten (84 % / 100 % relative Luftfeuchte) frei von Rotrost.

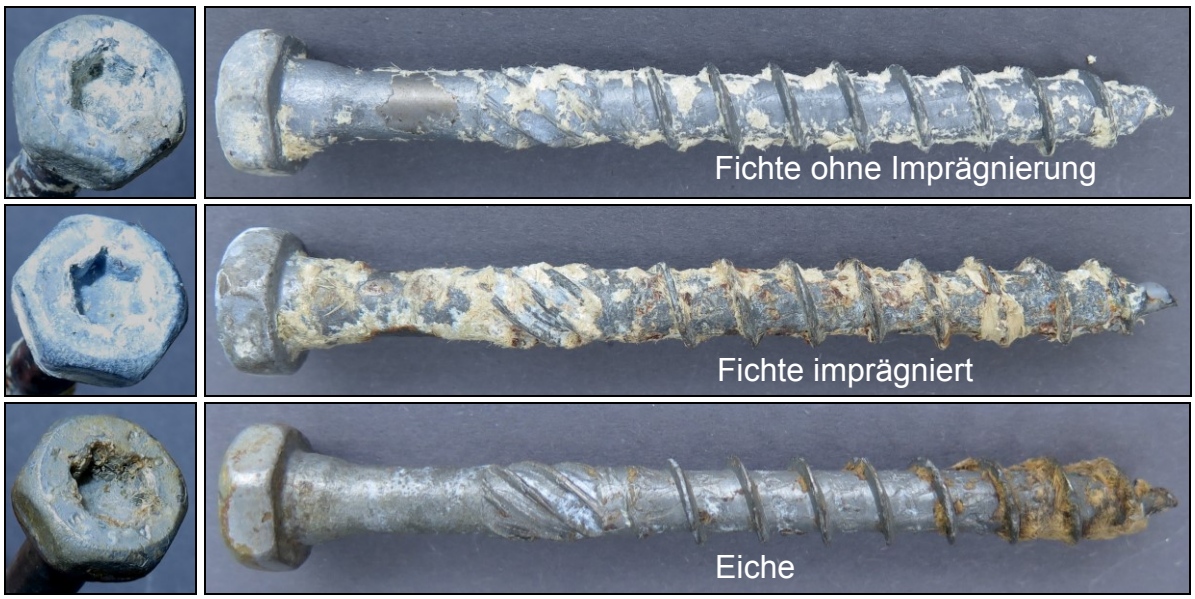


Bild 9.3:
Kleinteil(feuer)verzinkte Holzschrauben nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

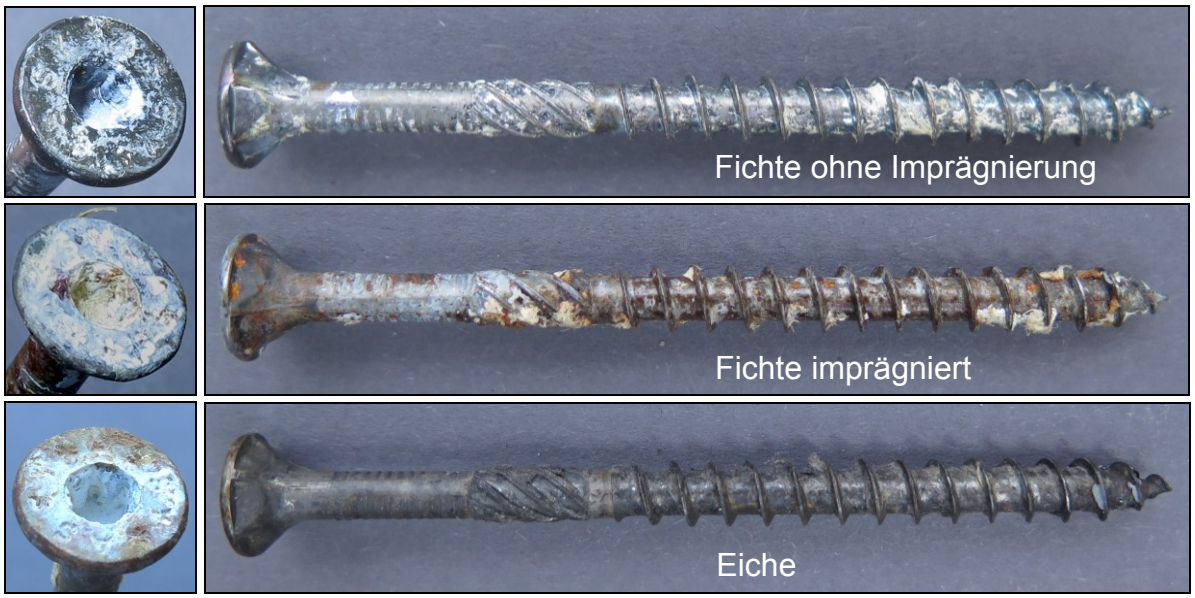


Bild 9.4:
Holzschrauben mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

- **Imprägnierte Fichte**. Die unter A1 bis A3 genannten Korrosionserscheinungen beim Stahl treffen bei Kontakt mit imprägniertem Fichtenholz nur für jene Holzschrauben zu, die bei 100 % relativer Luftfeuchte ausgelagert wurden (siehe **Bilder 9.4 bis 9.7**). Im Kontakt mit imprägniertem Fichtenholz tritt Rotrostbildung nicht auf, wenn das Holz bei 84 % relativer Luftfeuchte gelagert wurde.
- **Eiche**. Die unter A1 genannte Rotrostbildung im Kontakt mit nassem Eichenholz tritt, wenn auch deutlich geringer als bei 100 % relativer Luftfeuchte, bei einigen Korrosionsschutzüberzügen auch dann auf, wenn das Holz bei 84 % relativer Luftfeuchte

gelagert wurde. Diese Überzüge sind galvanische Verzinkung ohne Passivierung, galvanische Verzinkung mit Blaupassivierung sowie die ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 4 und 6.

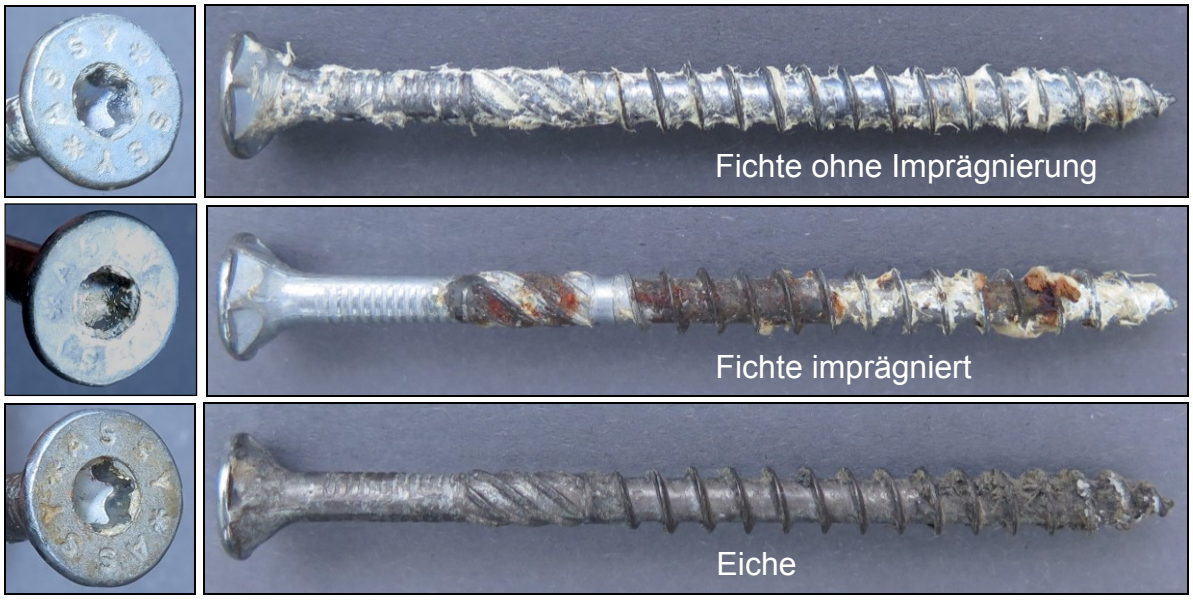


Bild 9.5:
Holzschrauben (Lieferung 2) mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

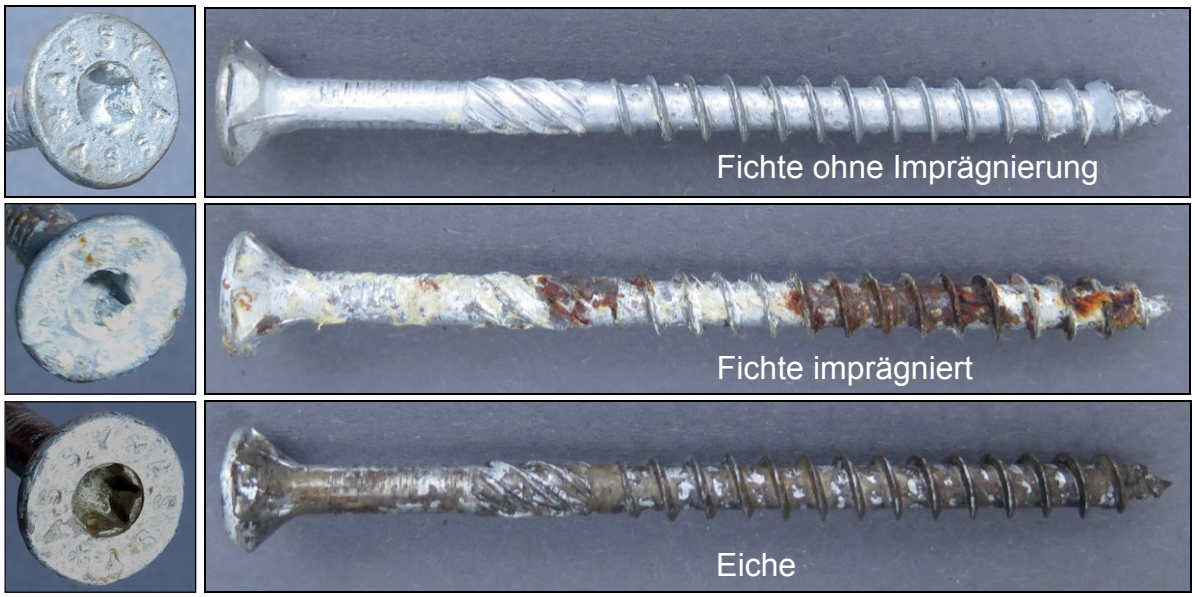


Bild 9.6:
Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung plus Blaupassivierung) nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

Folgerungen zu A4: Einfluss der relativen Luftfeuchte (84 und 100 %)

Bei **geringer Luftfeuchte** in schadstoffarmer Umgebung sind Holzschrauben nur dann besonders gefährdet, wenn diese in Eichenholz eingedreht werden. Hierzu gilt folgende Erklärung: In trockener Luft ist die Ausgleichsfeuchte in Fichte und imprägnierter Fichte zu gering, um merkliche Korrosion beim Überzug zu bewirken.

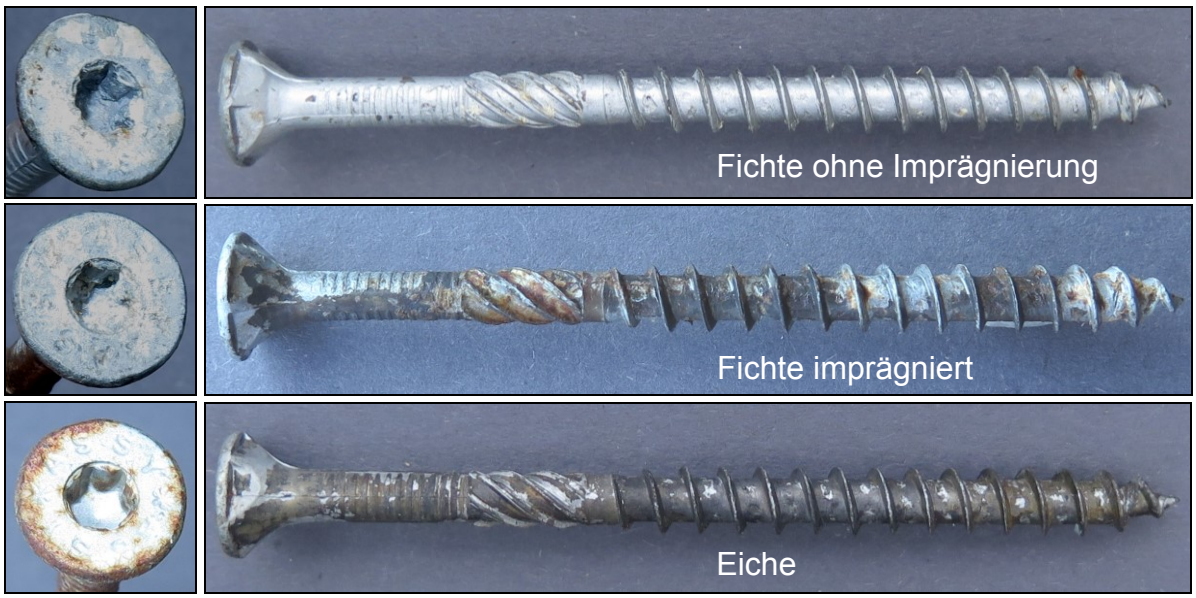


Bild 9.7:
Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (ohne Haftvermittler) nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

In Eiche reicht die Feuchtigkeit auch bei 84 % relativer Feuchte der umgebenden Luft aus, um über Hydrolyse eine gewisse Säurebildung zu bewirken. Hierdurch ist bei empfindlichen Systemen im Kontakt mit Holz Säurekorrosion möglich. Dies gilt auch für den peripheren Randbereich von Schraubenköpfen im Kontakt mit dem Holz (siehe unten: feuchte Luft).

In Gegenwart **hoher Luftfeuchte** sind Holzschrauben dann besonders hinsichtlich eines Abtrages des metallischen Überzuges gefährdet, wenn diese in Eichenholz eingedreht werden oder wenn das Holz korrosionsbegünstigende Imprägnierungen auf Kupferbasis aufweist (vergleiche hierzu in den **Bildern 9.4 bis 9.7** die Schrauben, die Fichte ohne Imprägnierung betreffen mit Schrauben, die in imprägnierter Fichte und Eiche eingedreht waren). Die Korrosion bei Kontakt mit Eichenholz ist deutlich stärker als bei 84 % relativer Luftfeuchte. Hierzu gilt folgende Erklärung:
In **Eiche** führt eine 100 %ige relative Feuchte der umgebenden Luft zu einer verstärkten Säurebildung im Holz. Hierdurch ist bei empfindlichen Systemen im Kontakt mit Holz Korrosion möglich. Dies gilt auch für den peripheren Randbereich von Schraubenköpfen im Kontakt mit dem Holz (siehe **Bild 9.7**). Eine bevorzugte Stelle der Rostbildung beim Schraubenkopf (Bit) lässt erkennen, dass die dünnen galvanischen Zink- und die ZnAl-Lamellenüberzüge beim Eindrehen wegen des hohen Eindrehwiderstandes bzw. des erforderlichen hohen Eindrehmomentes beschädigt werden. Der Beginn einer Korrosion im peripheren Randbereich des Schraubenkopfes nahe zum nassen Eichenholz hängt mit der korrosiven Wirkung von sauren Auslaugwässern zusammen (Abschn. 3.3.1, Korrosionsbeanspruchung durch Holzinhaltstoffe).

In Fichtenholz beschränkt sich die verstärkte Korrosion von Überzügen ausschließlich auf imprägnierte Fichte und Nassklima. Bei Kontakt mit nicht imprägnierter Fichte trat unabhängig vom Feuchtegehalt des Holzes keine Stahlkorrosion im Untersuchungszeitraum auf. Gleiches gilt bei Kontakt mit Holz bei relativer Luftfeuchte von 84 %. Die aus-

schließliche Stahlkorrosion im Kontakt mit **nasser imprägnierter Fichte** zeigt, dass die korrosive Wirkung der kupferhaltigen Imprägnierungen an einen höheren Elektrolytgehalt im Holz gebunden ist.

A5 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche die Angaben für 1,5 und 3,0 Jahre in den **Anlagen 9.2 bis 9.7**.)

- Zwar nimmt das Ausmaß einer Rotrostbildung bei den unter A2 genannten nicht ausreichend schützenden Korrosionsschutzsystemen (galvanische Verzinkung und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1, 2, 4 und 6) mit der Zeit zu, jedoch sind Schwächen bei diesen Systemen bei 100 % relativer Luftfeuchte häufig nach 1,5 Jahren feststellbar.

9.4.3 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Bohrschrauben

In der Folge werden die bei atmosphärischer Korrosion an Bohrschrauben (**Bild 7.3**) der Lieferung 2 erzielten Ergebnisse im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Art des Korrosionsschutzes,
- Oberflächengeometrie der Bohrschraube (Kopf, Gewinde),
- Höhe der relativen Luftfeuchte beim Konstantklima,
- Dauer der Auslagerung.

Die Aussagen zum Korrosionsverhalten werden durch die **Bilder 9.8 und 9.9** belegt. Das Korrosionsverhalten von in Aluminiumblech eingedrehten Bohrschrauben nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte wird in **Tabelle 9.3** dargestellt. Die Tabelle fasst die Detailergebnisse in den **Anlagen 9.10 bis 9.15** zusammen.

Auslagerung / Korrosionsschutz		84 % relative Luftfeuchte		100 % relative Luftfeuchte	
		Kopf	Gewinde	Kopf	Gewinde
		1	2	3	4
nicht bewittert	ZnNi dick	4	1	4	1
	ZnAl Fa.1[1)]	9	8	9	8
	ZnAl Fa.1[2)]	9	8	9	8
	ZnAl Fa.2	8	7	8	7
	ZnAl Fa.3	7	9	7	9
	ZnAl Fa.4	4	3	4	3
	ZnAl Fa.6	9	9	9	9

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 9.3:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Bohrschrauben (Lieferung 2) nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

B1 Einfluss des Schutzsystems

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Siehe **Tabelle 9.3**, Spalten 3 und 4.)

Das Korrosionsschutzverhalten der einzelnen metallischen Überzüge wird wie bei den Holzschrauben am Beispiel des Verhaltens im Nassklima gemeinsam für Kopf und Gewinde dargestellt. Bei den Bohrschrauben sind lediglich jene Systeme rotrostbehaftet, die im Gewindebereich nur sehr dünne Schichtdicken und Nullstellen aufweisen (siehe auch **Tabelle 8.6 und Tabelle 8.14**). Somit gilt:

- **Galvanischer ZnNi-Überzug**. Bohrschrauben mit sehr dünnem galvanischen ZnNi-Überzug (Schichtdicke beim Gewinde i.M. 1 µm und beim Kopf 4 µm) und Dickschichtpassivierung 2 zeigen beim Gewinde sehr starke Rotrostbildung und keine Stahlkorrosion beim Kopf (siehe **Bild 9.8 unten**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Lediglich in Aluminiumblech eingedrehte Bohrschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, ohne Haftvermittler und mit geringer Schichtdicke (Schichtdicke beim Gewinde i.M. 3 µm und beim Kopf 4 µm) zeigen sehr starke Rotrostbildung beim Gewinde und keine Stahlkorrosion beim Kopf (siehe **Bild 9.9 unten**). Alle übrigen ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 1, 2, 3 und 6 (Schichtdicke beim Gewinde und Kopf i.M. 7 bis 9 µm) weisen noch keinen Stahlangriff bzw. Rotrost auf.

Folgerungen zu B1: Einfluss des Schutzsystems

Bei den Bohrschrauben wurde im Nassklima ein unzureichender Korrosionsschutz nur im Zusammenhang mit i.M. sehr geringen Schichtdicken festgestellt:

- **Galvanischer ZnNi-Überzug**. Das sehr ungünstige Schutzverhalten dieses Überzuges im Nassklima im Bereich der stark belasteten Gewinde (siehe **Bild 9.8 unten**) kann auf die im Mittel nur sehr dünnen Überzüge (i.M. 1 µm) bei gleichzeitigem Vorhandensein von Nullstellen zurückgeführt werden.
- **ZnAl-Lamellenüberzug**. Bei den besonders stark belasteten Gewinden der Bohrschrauben erweisen sich die ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1 bis 3 und 6 (mit ZnAl-Lamellenüberzügen von im Mittel 7 bis 9 µm für Kopf und Gewinde) im Kontakt mit der feuchten Atmosphäre dem ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4 (siehe **Bild 9.9 unten**) hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit überlegen. Letztere besitzen im Gewindebereich sehr geringe Zinkauflagen von im Mittel nur 3 µm und Streuungen bis 0 µm und sie weisen auch keinen zusätzlichen Haftvermittler auf. Dieses ist bei der extremen Beanspruchung wie beim Bohren ein Nachteil.

  Die übrigen Bohrschrauben mit deutlich höherer Schichtdicke zeigen unabhängig von der Anwesenheit eines Haftvermittlers auch beim Gewinde keine Stahlkorrosion.

  Die zusätzliche dünne **Deckbeschichtung** 4 beim ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, die beim Bohren der Bohrschraube in das Blech im Gewindebereich stark beansprucht und dabei zwangsläufig beschädigt wird, zeigt offenbar keine korrosionsschützende Wirkung.

Die Befunde lassen erkennen, dass bei Trommelware ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamel-

lenüberzüge von im Mittel nur wenigen Mikrometern Dicke bei gleichzeitigen starken Schichtdickenschwankungen mit Nullstellen keinen ausreichenden Korrosionsschutz bieten, insbesondere wenn die Oberfläche - wie bei Bohrschrauben der Fall - anwendungsbedingt zusätzlich stark mechanisch beansprucht wird. Bei ZnAl-Lamellenüberzügen ist dieser Umstand vor allem dann problematisch, wenn kein zusätzlich schützender Haftvermittler vorliegt.

B2 Einfluss der Oberflächengeometrie (Kopf, Gewinde)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche in **Tabelle 9.3** die Spalten 3 und 4.)

Von den unter B1 genannten, von Stahlkorrosion betroffenen Überzügen (ZnNi-Überzug, ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4) zeigen ausschließlich die beim Eindrehen beanspruchten Gewinde Rotrost. Die Köpfe der Bohrschrauben sind im Fall aller metallischer Überzüge frei von Stahlkorrosion. Im Einzelnen gilt:

- **ZnNi-Überzüge**. Bei den von Stahlkorrosion betroffenen Schrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen zeigen die beim Eindrehen beanspruchten Gewinde mit extrem geringer bzw. geringer Schichtdicke (i.M. 1 µm), nicht jedoch die Köpfe (i.M. 4 µm), stark ausgeprägten Rotrost (siehe **Bild 9.8 unten**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Bei den rotrostbehafteten Schrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 ist das Gewinde (Schichtdicke i.M. 3 µm) ebenfalls stark rotrostbehaftet, nicht jedoch die Köpfe (i.M. 4 µm) (siehe **Bild 9.9 unten**).

Folgerungen zu B2: Einfluss der Oberflächengeometrie (Kopf, Gewinde)

Seitens der Oberflächengeometrie gilt, dass bei Bohrschrauben vor allem die stark belasteten Gewinde zu frühzeitiger Stahlkorrosion neigen. Wie auch in Abschn. 11 (Salzsprühtests) ausgeführt wurde, kann dieser Gewindeeinfluss einerseits auf herstellungsbedingte Einflüsse (sehr geringe Überzugsdicken und auch Nullstellen beim Trommelverfahren, siehe Abschn. 8) zurückzuführen sein. Andererseits ist bei den stark beanspruchten Gewinden der Bohrschrauben von einer erheblichen zusätzlichen Beschädigung der Überzüge beim Einbau auszugehen.

Das Beispiel der ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4, wonach Kopf und Gewinde mit Schichtdicken von i.M. 4 bzw. 3 µm bei gleichzeigen Vorhandensein von Nullstellen nahezu identische Überzüge aufweisen, zeigt, dass der Verarbeitungseinfluss bei Bohrschrauben offenbar überwiegt. Denn der Kopf zeigt keine Stahlkorrosion und das Gewinde dagegen ausgedehnte Stahlkorrosion (siehe **Bild 9.9 unten**).

B3 Einfluss der relativen Luftfeuchte (84 und 100 %)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre. Vergleiche in **Tabelle 9.3** die Spalten 1 und 2 mit 3 und 4.)

Die unter B1 genannten Korrosionserscheinungen (ausgedehnte Rotrostbildung beim Gewinde mit Korrosionsschutz aus ZnNi-Überzügen bzw. ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 4, siehe **Bilder 9.8 und 9.9, unten**) treffen nur für jene Verbindungsmittel zu, die bei 100 % relativer Luftfeuchte ausgelagert wurden.

Nach Auslagerung der mit ZnAl-Lamellenüberzügen geschützten Bohrschrauben bei 84 % relativer Luftfeuchte wurde in keinem Fall Rotrost festgestellt. Schrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen zeigen trotz extrem dünnen Schichtdicken von i.M. 1 µm nur leichte Ansätze einer Stahlkorrosion.

Folgerungen zu B3: Einfluss der relativen Luftfeuchte (84 und 100 %)

In Gegenwart geringerer Luftfeuchten in schadstoffarmer Umgebung unterliegen Bohrschrauben keiner erhöhten Korrosionsgefährdung. Bei nur 84 % relativer Luftfeuchte ist der Wasserdampfgehalt der Luft für eine Stahlkorrosion auch im Bereich der Schwachstellen des metallischen Überzuges zu gering. Feuchte Luft (100 % relative Luftfeuchte) bietet dagegen alle Voraussetzungen für Korrosion.

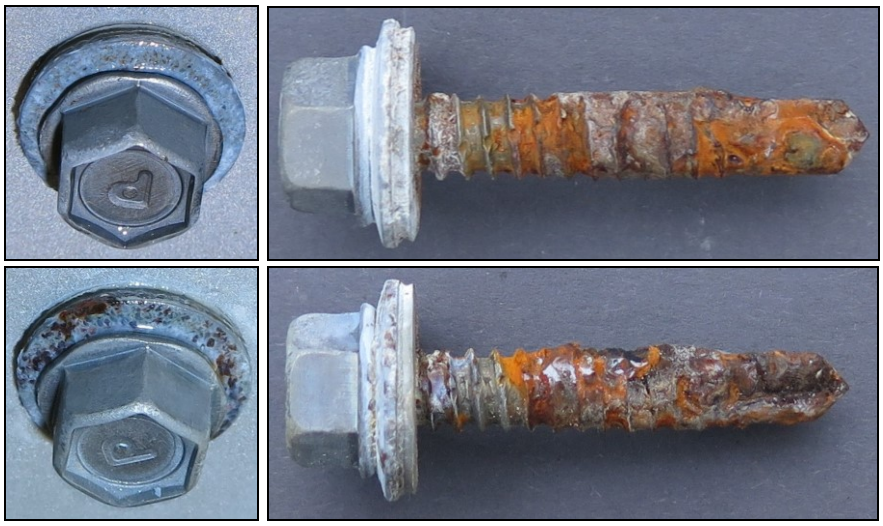


Bild 9.8:
In Aluminiumblech eingedrehte Bohrschraube mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 nach Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte;
oben nach 1,5 Jahren, unten nach 3 Jahren

Bild 9.9:
In Aluminiumblech eingedrehte Bohrschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte;
oben nach 1,5 Jahren, unten nach 3 Jahren

B4 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche die Angaben für 1,5 und 3,0 Jahre in den **Anlagen 9.10 und 9.14**.)

- Zwar nimmt das Ausmaß einer Rotrostbildung bei den unter B1 genannten nicht ausreichend schützenden Korrosionsschutzsystemen (galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4) mit der Zeit zu, jedoch sind Schwächen bei diesen Systemen bei 100 % relativer Luftfeuchte bereits nach 1,5 Jahren feststellbar (siehe **Bilder 9.8 und 9.9, oben**).

9.4.4 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Spreizdübeln

In der Folge werden die an in Beton eingesetzten Spreizdübeln (**Bild 7.4**) der Lieferung 2 erzielten Ergebnisse im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Korrosionsmedium (Atmosphäre, Beton),
- Art des Korrosionsschutzes,
- Oberflächengeometrie des Dübels im Bohrloch (Gewinde, glatter Abschnitt),
- Höhe der relativen Luftfeuchte beim Konstantklima,
- Dauer der Auslagerung.

• Auslagerung / • Korrosionsschutz		84 % relative Luftfeuchte			100 % relative Luftfeuchte		
		äußere Atmosph.	im Bohrloch		äußere Atmosph.	im Bohrloch	
		Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt
		1	2	3	4	5	6
Bohrloch offen	Feuerverz.	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40
	galv. Verz.	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. blau	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. gelb	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. dick	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	ZnNi dick	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8
	ZnAl Fa.1[1)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8
	ZnAl Fa.1[2)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8
	ZnAl Fa.2	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9
	ZnAl Fa.3	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8
	ZnAl Fa.4	3 / 5	3	7	3 / 5	3a / 3i	7
	ZnAl Fa.6	6 / 14	6	9	6 / 14	6	9
	1.4301						

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8
a = äußere 5 bis 8 Gewindezähne, i = innenliegendes Gewinde

Tabelle 9.4:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Spreizdübel (Lieferung 2) mit offenem Bohrloch nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

Die Spreizdübel wurden bei konstanter Luftfeuchte (84 % und 100 %) bei offenem Bohrloch untersucht. Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten werden beispielhaft durch die **Bilder 9.10 bis 9.12** belegt. Das Korrosionsverhalten der Spreizdübel nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte wird in einer Übersicht in **Tabelle 9.4** dargestellt. Die Tabelle fasst die Detailergebnisse in den **Anlagen 9.8 bis 9.15** zusammen.

Alle Spreizdübel aus nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II sind nach 3 Jahren ohne jeglichen Rostbefall. In der Folge werden deshalb nur die Ergebnisse zum Korrosionsverhalten der metallischen Überzüge näher betrachtet.

C1 Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche in **Tabelle 9.4** die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

Bezüglich der Auswertung nach der Umgebung (die das Bauteil umgebende Atmosphäre bzw. die Atmosphäre im nach außen offenen Bohrloch) wurden bei Auslagerung im Nassklima folgende Feststellungen getroffen:

- **Atmosphäre außerhalb des Bohrloches**. An Mutter und Gewinde außerhalb des Bohrloches wurde nur bei dem unter C2 ausgewiesenem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 Rotrost festgestellt (siehe **Bild 9.12**).
- **Bohrlochatmosphäre**. Unterhalb der Mutter im nach außen offenen Bohrloch waren beim ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 die ersten 5 bis 8 Gewindegänge stark rotrostbehaftet (siehe **Bild 9.12**). In den tieferen Bereichen des nach außen offenen Bohrlochs wurde bei keinem metallischen Überzug Rotrostbildung beim Gewinde und dem glatten Abschnitt des Bolzens festgestellt.

Folgerungen zu C1: Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre

Bei Spreizdübeln findet im Nassklima (100 % relative Luftfeuchte) frühzeitige Stahlkorrosion noch am ehesten an der Mutter und an dem Gewindebolzen in der **Atmosphäre außerhalb des Bohrloches** bzw. dem äußeren Bereich des nach außen offenen Bohrloches statt (siehe **Bild 9.12**). Am Spreizdübel innerhalb des nach außen offenen Bohrloches (**Bohrlochatmosphäre**) ist die Gefahr einer frühzeitigen Stahlkorrosion deutlich geringer. Auf die Ursache der zunächst unerwartet hohen Korrosionsbeständigkeit der metallischen Überzüge im Nassklima des Bohrloches wird in Abschn. 10.4.4 unter C4 eingegangen. Hier wird das Korrosionsverhalten der Überzüge bei normaler atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung (Meeresklima) mit dem Verhalten im Nassklima verglichen und der jeweilige besondere Korrosionsmechanismus für das unterschiedliche Korrosionsverhalten in beiden Klimaten verantwortlich gemacht.

C2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte)

C2-1 Kontakt des Dübels mit der Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre

(Siehe **Tabelle 9.4**, Spalten 4 bis 6.)

Das Schutzverhalten der einzelnen Korrosionsschutzsysteme ist, abgesehen vom ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, selbst im Nassklima insgesamt sehr gut. Die folgende detailliertere Betrachtung des Korrosionsschutzverhaltens der einzelnen metallischen Überzüge bezieht sich zusammenfassend auf die Teile Mutter, Gewinde und des glatten Abschnitts vom Gewindebolzen.

- **Feuerverzinkung**. Feuerverzinkte Dübel sind frei von Rotrost.
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Die Dübel mit galvanischen Zinküberzügen (siehe **Bild 9.10**) und galvanischen ZnNi-Überzügen sind frei von Rotrost.
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Die Dübel mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 4, ohne Haftvermittler und geringerer Schichtdicke (Gewinde und Mutter: i.M. 3 µm bzw. 5 µm) zeigen bei der Mutter und dem belasteten äußeren Gewindeabschnitt Rotrost (siehe **Bild 9.12**). Die Dübel mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1 (siehe **Bild 9.11**), 2, 3 und 6 mit deutlich höheren Schichtdicken (Gewinde: i.M. 6 bis 8 µm) sind unabhängig vom Vorhandensein eines Haftvermittlers über die gesamte Länge frei von Rotrost.

C2-2 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel (beide mit Dickschichtpassivierung)

(Siehe **Tabelle 9.4**, Spalten 4 bis 6.)

- Dübel mit beiden galvanischen Überzügen (Zink und ZnNi) zeigen unter den gewählten Korrosionsbedingungen keine Stahlkorrosion.

C2-3 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

(Siehe **Tabelle 9.4**, Spalten 4 bis 6.)

Die Art der Passivierung wurde lediglich bei der galvanischen Verzinkung variiert. Die Betrachtung des Korrosionsschutzverhaltens der einzelnen Überzüge bezieht sich zusammenfassend auf die Teile Mutter, Gewinde und des glatten Abschnitts des Gewindebolzens.

- Alle Dübel mit galvanischen Überzügen (Zink bzw. Zink plus Blaupassivierung oder Gelbchromatierung oder Dickschichtpassivierung 1) mit Zinkauflagen vom i.M. 4 bis 5 µm beim Gewindebolzen und i.M. 10 µm bei der Mutter zeigen unter den gewählten Korrosionsbedingungen keine Stahlkorrosion.

Folgerungen zu C2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

- Es zeigen lediglich jene Gewindebolzen und Muttern im Nassklima starke Rotrostbildung in den vorgenannten Bereichen, die mit einem **ZnAl-Lamellenüberzug** der Firma 4 (ohne Haftvermittler und geringer Schichtdicke) versehen sind (siehe **Bild 9.12**). Wie bei den Bohrschrauben ist dies darauf zurückzuführen, dass dieser Überzug, im Gegensatz zu anderen, beim Gewinde eine im Mittel nur sehr dünne (i.M.

3 µm) metallische Auflage mit zahlreichen Nullstellen aufweist und auch nicht über einen zusätzlichen, auch korrosionsschützenden Haftvermittler verfügt.

Umgekehrt kann gefolgert werden, dass bei Trommelware auch durch einen ZnAl-Lamellenüberzug ein zufriedenstellender Korrosionsschutz nur dann erzielt werden kann, wenn geschlossene Zinküberzüge von mindestens 5 bis 10 µm Dicke vorliegen.

Die zusätzliche dünne **Deckbeschichtung** 3 beim ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 zeigt bei der Mutter und dem Gewinde keine ausreichende zusätzliche korrosionsschützende Wirkung.

- Die vorgenannte Aussage zur Mindestschichtdicke gilt auch für den Gewindebolzen und die zugehörige Mutter mit **galvanischem Zink- und ZnNi-Überzug**.

  Bei ausreichender Schichtdicke in einer Größenordnung von etwa 4 bis 10 µm besteht bei ausschließlichem Nassklima auch keine erkennbare Notwendigkeit galvanische ZnNi-Überzüge anstelle von galvanischen Zinküberzügen zu verwenden.

- Auffallend ist im vorliegenden Fall, dass beim Dübel der galvanische Zinküberzug von i.M. 4 bis 10 µm Dicke selbst ohne zusätzliche Passivierung bei 3 jähriger Beanspruchung nach 3 Jahren im Nassklima keinen Rotrost zeigt (siehe **Bild 9.10**).

C3 Einfluss der Oberflächengeometrie

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Siehe **Tabelle 9.4**, Spalten 4 bis 6.)

Die folgende Aussage bezieht sich auf Dübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4; denn nur dieser Korrosionsschutz zeigte beim Spreizdübel im Nassklima (100% relative Luftfeuchte) Stahlkorrosion (siehe C1).

- Bei den Spreizdübeln mit **ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4** (ohne Haftvermittler und geringer Schichtdicke) weisen der äußere belastete Gewindeabschnitt und die Mutter Rotrost auf, dagegen nicht das Gewinde und der glatte Abschnitt des Gewindebolzens in den tieferen Bereichen des Bohrloches (siehe **Bild 9.12**).

Folgerungen zu C3: Einfluss der Oberflächengeometrie

Bei den Versuchen an Spreizdübeln existieren keine Befunde, die einen Vergleich zum Schutzverhalten der Überzüge bei Gewinde und glatten Bereichen unter vergleichbaren Korrosionsbedingungen zulassen.

C4 Einfluss der Luftfeuchtigkeit (84 % und 100 % relative Luftfeuchte)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre. Vergleiche in **Tabelle 9.4** die Spalten 1 bis 3 mit den Spalten 4 bis 6.)

- **100 % relative Luftfeuchte**. Die unter C1 und C3 genannten Korrosionserscheinungen am äußeren Gewindebereich und an der Mutter treffen für jene Spreizdübel zu, die bei 100 % relativer Luftfeuchte ausgelagert wurden.

- **84 % relative Luftfeuchte**. Rotrostbildung tritt nicht auf, wenn der in Beton eingebaute Dübel bei 84 % relativer Luftfeuchte gelagert wird.

Folgerungen zu C4: Einfluss der Luftfeuchtigkeit (84 % und 100 % relative Luftfeuchte)

In Gegenwart geringerer Luftfeuchten in schadstoffarmer Umgebung unterliegen Spreizdübel keiner erhöhten Korrosionsgefährdung. Bei nur 84 % relativer Luftfeuchte ist der Wasserdampfgehalt der Luft für eine Stahlkorrosion auch im Bereich der Schwachstellen des metallischen Überzuges zu gering. Feuchte Luft (100 % relative Luftfeuchte) bietet dagegen alle Voraussetzungen für eine Korrosion des metallischen Überzuges.

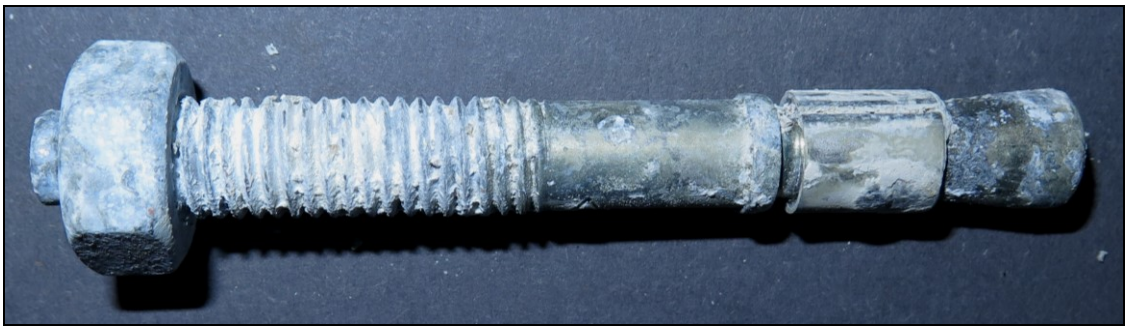


Bild 9.10:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit galvanischem Zinküberzug nach Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte, nach 3 Jahren

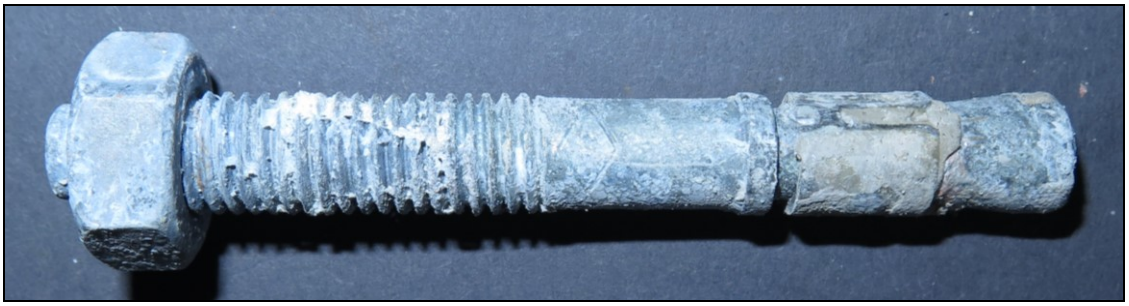


Bild 9.11:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (mit Unterzinkung plus Blaupassivierung) nach Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte, nach 3 Jahren

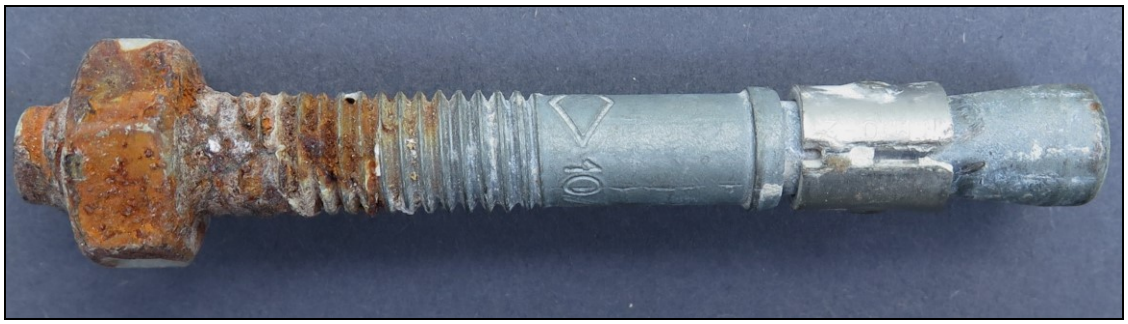


Bild 9.12:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte, nach 3 Jahren

C5 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleich der Angaben für 1,5 und 3,0 Jahre in **Anlage 9.14**.)

- Zwar nimmt das Ausmaß einer Rotrostbildung bei dem unter C2 genannten nicht ausreichend schützenden Korrosionsschutzsystem (ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4) mit der Zeit zu, jedoch sind Schwächen bei diesem System bei 100 % relativer Luftfeuchte bereits nach 1,5 Jahren feststellbar.

Abschließende Stellungnahme zum Verhalten der Überzüge im Nassklima

Es gilt bereits an dieser Stelle festzustellen, dass das insgesamt vorteilhafte Korrosionsverhalten der korrosionsgeschützten Gewindebolzen in der dauerfeuchten/nassen Umgebung des nach außen offenen Bohrloches nicht auf das Verhalten in Stadt- und Meeresatmosphäre (Abschn. 10.4.4) übertragbar ist. Bei normaler atmosphärischer Bewitterung ist das Korrosionsschutzverhalten der Überzüge sowohl in Stadt-, als auch Meeresatmosphäre erheblich ungünstiger. Zur Ursache dieses Verhaltens wird in Abschn. 10.4.4 unter C4 Stellung genommen.

Das Verhalten der metallischen Überzüge bei 100 % relativer Luftfeuchte hat lediglich Bedeutung für eine andauernde Anwendung von Dübeln in Nassklimaten (z. B. Nassräumen).

9.4.5 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 2)

In der Folge werden die an in Beton eingesetzten Kunststoffrahmendübeln (**Bild 7.16**) der Lieferung 2 erzielten Ergebnisse im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Korrosionsmedium (Atmosphäre, Beton),
- Art des Korrosionsschutzes,
- Oberflächengeometrie des Dübels im Bohrloch (Schaft, Gewinde),
- Höhe der relativen Luftfeuchte beim Konstantklima,
- Dauer der Auslagerung.

Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten werden beispielhaft durch die **Bilder 9.13 bis 9.15** belegt. Das Korrosionsverhalten der Kunststoffrahmendübel nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte wird in einer Übersicht in **Tabelle 9.5** dargestellt. Die Tabelle fasst die Aussagen in den Detailtabellen in den **Anlagen 9.8 bis 9.15** zusammen.

Die hier gewählte Umgebungsbedingung 100 % relative Luftfeuchte ist für den Einsatzbereich von Kunststoffrahmendübeln an sich untypisch, denn diese Dübel werden im Regelfall im nichtberegneten Außenbereich (z. B. bei hinterlüfteten Fassaden) eingesetzt (Abschn. 7.4).

Auslagerung / Korrosions-schutz	84 % relative Luftfeuchte			100 % relative Luftfeuchte		
	Kopf	Schaft	Gewinde	Kopf	Schaft	Gewinde
	1	2	3	4	5	6
Feuerverz.	40	40	50	40	40	50
galv. Verz.	6	6	2	6	6	2
galv. blau	6	6	2	6	6	2
galv. gelb	6	6	2	6	6	2
galv. dick	6	6	2	6	6	2
ZnNi dick	4	4	0,5	4	4	0,5
ZnAl Fa.1[1)]	4	6	6	4	6	6
ZnAl Fa.1[2)]	4	6	6	4	6	6
ZnAl Fa.2	7	8	5	7	8	5
ZnAl Fa.3	11	7	5	11	7	5
ZnAl Fa.4	4	5	3	4	5	3
ZnAl Fa.6	8	9	6	8	9	6

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 9.5:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Kunststoffrahmendübel (Lieferung 2) nach 3 jähriger Auslagerung bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

D1 Einfluss der Umgebung (Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche in **Tabelle 9.5** die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

Der Kopf der Flachkopfschraube des eingesetzten Kunststoffrahmendübels kommt mit der Atmosphäre außerhalb des Bohrloches in Kontakt. Der Schaft und das Schraubgewinde liegen im Innern der geschlitzten Dübelhülse (**Bild 7.16**) und stehen dort im Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre als auch mit der Hülse aus Polyamid.

Bezüglich des Korrosionsverhaltens in beiden genannten Umgebungen wurden folgende Feststellungen getroffen:

- **Atmosphäre außerhalb des Bohrloches**. Nur bei dem unter D2 ausgewiesenem Korrosionsschutz (ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4) wurde im atmosphärisch berührten Kopfbereich Rotrost festgestellt (siehe **Bild 9.15**).
- **Bohrlochatmosphäre**. Nur bei dem unter D2 ausgewiesenen Korrosionsschutzsystem galvanischer ZnNi-Überzug mit sehr geringem metallischem Überzug von i.M. 0,5 µm wurde im Gewindebereich im Kontakt zur Polyamid-Hülse und Bohrlochatmosphäre Stahlkorrosion festgestellt (siehe **Bild 9.14**). Beim glatten Schaft im Kontakt mit der Polyamid-Hülse fand bei keinem galvanischen und ZnAl-Lamellenüberzug (Schichtdicke i.M. 4 bis 9 µm) Rotrostbildung statt. Galvanische Überzüge und

ZnAl-Lamellenüberzüge weisen selbst bei Schichtdicken von nur i.M. 2 bzw. 3 µm beim Gewinde keine Stahlkorrosion auf (siehe **Bilder 9.13 und 9.15**).

Folgerungen zu D1: Einfluss der Umgebung (Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre)

Im Nassklima (100 % relative Luftfeuchte) sind galvanische Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge bei Kunststoffrahmendübeln auf Abschnitten außerhalb des Bohrloches und im nach außen abgeschlossenen Bohrloch, selbst bei relativ geringen bzw. sehr geringen Schichtdicken der Überzüge des Gewindes, vergleichsweise sehr beständig.

Für die Kunststoffrahmendübel gilt, wie für die Spreizdübel, dass das Korrosionsverhalten im Nassklima insgesamt wesentlich günstiger ist als in Stadt- und Meeresatmosphäre. Eine Erklärung hierfür erfolgt in Abschn. 10.4.4 im Zusammenhang mit Spreizdübeln. Hier wird das Korrosionsverhalten der Überzüge bei normaler atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung (Meeresatmosphäre) mit dem Verhalten im Nassklima verglichen und der jeweilige besondere Korrosionsmechanismus für das unterschiedliche Korrosionsverhalten in beiden Klimaten verantwortlich gemacht. Dass Kunststoffrahmendübel im Nassklima in der nach außen abgeschlossenen Bohrlochatmosphäre trotz geringer Schichtdicken keine Stahlkorrosion zeigen, kann auch auf folgenden Umstand zurückgeführt werden: Im nach außen abgeschlossenen Bohrloch ist die Sauerstoffkorrosion behindert, da eine Sauerstoffzufuhr durch den wassergesättigten Beton zum Bohrloch nicht möglich ist.

D2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte.)

D2-1 Köpfe der Dübelschraube im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Siehe **Tabelle 9.5**, Spalte 4.)

- **Feuerverzinkung**. Die Köpfe der feuerverzinkten Kunststoffrahmendübel sind frei von Rotrost.
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Die Köpfe der Kunststoffrahmendübel mit galvanischem Zinküberzug und galvanischem ZnNi-Überzug sind ebenfalls frei von Rotrost (siehe **Bilder 9.13 und 9.14**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Betroffen von Stahlkorrosion sind Schraubenköpfe mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 4, ohne Haftvermittler und geringer Schichtdicke (i.M. 4 µm) (siehe **Bild 9.15**).

  Die Köpfe von Dübelschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2, 3 und 6 sind frei von Rotrost. In diesen Fällen
  - weist der Überzug bei geringer Schichtdicke (i.M. 4 µm) einen zusätzlichen Haftvermittler auf (Firma 1)
  - oder der Überzug ist bei fehlendem Haftgrund dicker (Firma 2: i.M. 7 µm bzw. Firma 6: 8 µm) als bei Firma 4,
  - oder der Überzug ist bei vorhandenem Haftgrund dicker (Firma 3: 11 µm).

D2-2 Kontakt von Schaft- und Gewinde zur Bohrlochatmosphäre und Polyamid-Hülse

(Siehe **Tabelle 9.5**, Spalten 5 und 6.)

- **Feuerverzinkung**. Die Schaft- und Gewindebereiche feuerverzinkter Kunststoffrahmendübel sind frei von Rotrost.
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Die Kunststoffrahmendübel mit galvanischem Zinküberzug sind im Kontakt mit der Kunststoffhülse und Bohrlochatmosphäre frei von Rotrost (siehe **Bild 9.13**). Die Überzugsdicke beträgt bei Schaft und Gewinde i.M. 6 bzw. 2 µm.

  Betroffen von Stahlkorrosion im Gewindebereich sind jene Kunststoffrahmendübel, deren Korrosionsschutz aus einem galvanischen ZnNi-Überzug mit extrem dünnem Überzug beim Gewinde von i.M. <1 µm besteht (siehe **Bild 9.14**). Gewinde mit galvanischen Zink-Überzügen ohne und mit Passivierung zeigen trotz nur geringer Dicke des Überzuges (i.M. 2 µm) keine Stahlkorrosion.
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Schaft und Gewinde mit ZnAl-Lamellenüberzügen sämtlicher Firmen ohne Haftgrund (Firmen 2, 4 und 6) und mit Haftgrund (Firmen 1 und 3) mit Schichtdicken von i.M. 3 bis 9 µm sind im Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre frei von Rotrost (siehe **Bild 9.15**).

D2-3 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel

In der Folge werden galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge mit Dickschichtpassivierung miteinander verglichen:

Kontakt mit der Außenatmosphäre (Kopfbereich)

(Siehe **Tabelle 9.5**, Spalte 4.)

- Schraubenköpfe mit beiden galvanischen Überzügen (Zink bzw. ZnNi, mittlere Überzugsdicke beim Kopf 6 bzw. 4 µm) zeigen unter den hiesigen Korrosionsbedingungen keine Stahlkorrosion.

Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre und der Polyamid-Hülse

(Siehe **Tabelle 9.5**, Spalten 5 und 6.)

- Im Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre und der Polyamid-Hülse verhalten sich die Zinküberzüge und ZnNi-Überzüge mit Dickschichtpassivierung bei vergleichbarer Überzugsdicke (i.M. 6 bzw. 4 µm beim Schaft) gleichermaßen gut.

D2-4 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

(Siehe **Tabelle 9.5**, Spalten 4 bis 6.)

Die Art der Passivierung wurde lediglich bei der galvanischen Verzinkung variiert. Folgende Feststellung wurde (gemeinsam) für den Kopfbereich in der Atmosphäre sowie für den Schaft- und Gewindebereich im Kontakt mit der Bohrlochatmosphäre und der Polyamid-Hülse bei 100 % relativer Luftfeuchte getroffen:

- Schrauben mit galvanischen Zinküberzügen ohne und mit Passivierung (Zink plus

Blaupassivierung oder Gelbchromatierung oder Dickschichtpassivierung 1) mit Zinkauflagen von i.M. 2 (Gewinde) bzw. 6 µm (Schaft) zeigen keine Stahlkorrosion (siehe **Bild 9.13**).

Folgerungen zu D2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

Wie bereits unter Folgerungen zu D1 beschrieben und erläutert wurde, sind in einem nach außen nahezu luftdicht abgeschlossenen Bohrloch wegen unzureichender Sauerstoffzufuhr die notwendigen Voraussetzungen für eine technisch bedeutsame Korrosion nicht erfüllt. Daher zeigen alle Kunststoffrahmendübel mit Schichtdicken ≥2 µm bei Schaft und Gewinde im Bohrloch keine Stahlkorrosion (siehe **Bilder 9.13 und 9.15**).

Außerhalb des Bohrloches weisen nur Schrauben mit **ZnAl-Lamellenüberzügen** starke Rotrostbildung auf, während alle anderen mit Schichtdicken ≥4 µm ohne Rostbildung waren. Überzüge der Firma 4 hatten einerseits die geringste Überzugsdicke (i.M. 4 µm) und andererseits keinen Haftvermittler. Letztere ist jedoch bei dünnen ZnAl-Lamellenüberzügen mit starken Schichtdickenschwankungen erforderlich. Die zusätzliche dünne Deckbeschichtung 3 von lediglich 5 bis 12 µm Dicke kann die Mängel beim ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nicht ausgleichen (siehe **Bild 9.15** und auch Abschn. 9.4.3, Folgerungen zu B2).

D3 Einfluss der Oberflächengeometrie

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre bei 100 % relativer Luftfeuchte. Siehe **Tabelle 9.5**, Spalten 4 bis 6.)

Unter den vorliegenden Verhältnissen (Nassklima) mit geringer Korrosionsbelastung haben sich Gewindebereiche trotz geringerer Überzugsdicke gleichermaßen unauffällig gezeigt.

D4 Einfluss der relativen Luftfeuchte (84 % und 100 % relative Luftfeuchte)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre. Vergleiche in **Tabelle 9.5** die Spalten 1 bis 3 mit den Spalten 4 bis 6.)

Die unter D1 bis D3 genannten Korrosionserscheinungen am Kopf des Dübels mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 und dem Gewinde des Dübels mit ZnNi-Überzug treffen nur für Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte zu. Rotrostbildung tritt nicht auf, wenn die Kunststoffrahmendübel bei 84 % relativer Luftfeuchte ausgelagert werden.

Folgerungen zu D4: Einfluss der relativen Luftfeuchte (84 und 100 %)

Bei geringen Luftfeuchten in schadstoffarmer Umgebung unterliegen Kunststoffrahmendübel außerhalb und innerhalb des Bohrloches keiner erhöhten Korrosionsgefährdung. Hierzu gilt folgende Erklärung:

84 % relative Luftfeuchte. In Gegenwart geringerer Luftfeuchten in schadstoffarmer Umgebung unterliegen Kunststoffrahmendübel keiner erhöhten Korrosionsgefährdung. Bei nur 84 % relativer Luftfeuchte ist der Wasserdampfgehalt der Luft für eine Stahlkorrosion auch im Bereich der Schwachstellen des metallischen Überzuges zu gering.

Die Ergebnisse zur Korrosion der Überzüge von Kunststoffrahmendübeln innerhalb des verschlossenen Bohrloches stehen in Übereinstimmung mit den in Abschn. 10 beschriebenen Auslagerungsversuchen, wonach selbst ungeschützte Dübelschrauben nach 10jähriger Auslagerung im eingebauten Zustand keinerlei Korrosionserscheinungen zeigten.

100 % relative Luftfeuchte. Feuchte Luft bietet dagegen alle Voraussetzungen für eine Korrosion des metallischen Überzuges, solange die Sauerstoffzufuhr (insbesondere bei verschlossenem Bohrloch in nasser Umgebung nicht der Fall) gewährleistet ist.

D5 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche die Angaben für 1,5 und 3,0 Jahre in **Anlage 9.10 und 9.14**.)

- Zwar nimmt das Ausmaß einer Rotrostbildung bei dem unter D2 genannten nicht ausreichend schützenden Korrosionsschutzsystem (galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4) mit der Zeit zu, jedoch ist Stahlkorrosion bei diesen Systemen bei 100 % relativer Luftfeuchte bereits nach 1,5 Jahren feststellbar.

Bild 9.13:
Kunststoffrahmendübel mit galvanischem Zinküberzug nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

Bild 9.14:
Kunststoffrahmendübel mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

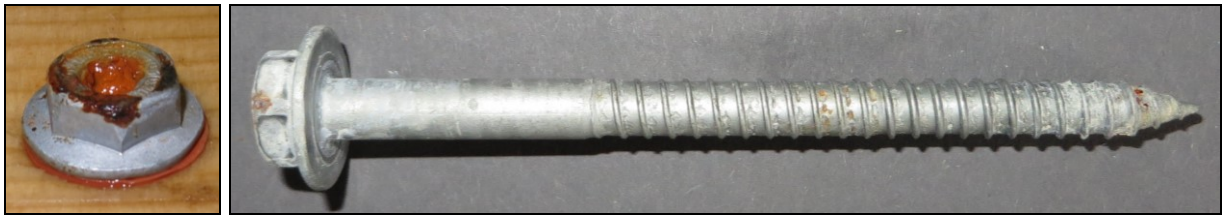


Bild 9.15:
Kunststoffrahmendübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach 3 jähriger Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte

10. Naturversuche (Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre)

10.1 Zweck der Untersuchungen

Naturversuche sind unerlässlich, um eine wirklichkeitsnahe Vorstellung zum Korrosionsverhalten von Korrosionsschutzsystemen zu bekommen. Salzsprühversuche, die gegenüber der atmosphärischen Korrosion den Korrosionsmechanismus zu Lasten jener Überzüge verändern, deren Schutzwirkung auf Deckschichtbildung beruhen, müssen zwangsläufig zu falschen Ergebnissen und Folgerungen führen, wenn man verschiedene Systeme vergleicht und Aussagen zum Langzeitverhalten erhalten möchte.

Deshalb werden vielfach Auslagerungen in Stadt- und Meeresatmosphäre (unter Bedingungen von Korrosivitätskategorien C2 bzw. C4) durchgeführt. Die Ergebnisse von Versuchen in Meeresatmosphäre geben auch Hinweise auf das Korrosionsverhalten bei intensiver Tausalzbelastung. Versuche in sog. Industrieatmosphäre mit erhöhtem Schwefeldioxidgehalt (Jahresmittelgehalte >10 µg/m³) haben kaum noch Bedeutung, weil es solche Atmosphären, zumindest in Europa, nicht mehr gibt. Im vorliegenden Fall erfolgten die Auslagerungen deshalb in Stadtatmosphäre und Meeresatmosphäre.

Die Proben wurden im Freien nicht bewittert und/oder an benachbarter Stelle bewittert (beregnet) ausgelagert. Der nicht bewitterte Zustand entspricht einigen typischen Anwendungen (z. B. Verbindungsmittel bei hinterlüftete Außenwandbekleidungen und Photovoltaik-Anlagen). Im Fall einer Salzbelastung stellen Auslagerungen im nichtberegneten Bereich eine Korrosionsverschärfung dar, da sich Salze aufkonzentrieren können und nicht durch Beregnung abgewaschen werden (Abschn. 3.2).

10.2 Auslagerungsbedingungen

Die **Bilder 10.1** und **10.2** verdeutlichen die Auslagerungssituation auf der **Insel Helgoland**. Die Proben wurden im Freien unter dem nach Norden auskragenden Vordach eines Laborgebäudes (nicht bewittert) auf einem etwa 40 m hohen Hügel des sog. Mittellandes und auf dem umliegenden Gelände (bewittert) ausgelagert.

Die Auslagerung von eingebauten Verbindungsmitteln in **Stadtatmosphäre** (bewittert/nicht bewittert) erfolgten in Stuttgart. Wesentliche Klimadaten beider Auslagerungsorte werden in **Tabelle 10.1** aufgeführt.

Auslagerungs-ort	Jahresmittelwerte			
	Temperatur (°C)	relative Luftfeuchte (%)	absoluter Wassergehalt (g/m^3)	Niederschlag (mm)
Stuttgart	10,0	75	7,03	664
Helgoland	9,1	84	7,43	719

Tabelle 10.1:
Klimadaten (Jahresmittelwerte) der Auslagerungsorte Stuttgart (Stadtatmosphäre) und Insel Helgoland (Meeresatmosphäre)

Bilder 10.1 und 10.2:
Helgoland von Osten aus gesehen, der Pfeil in Bild 10.2 kennzeichnet den Ort der Probenauslagerung auf einem vorgelagerten Hügel des Mittellandes (Stelle C1 in Bild 10.1)

Messungen der Salzbelegung bei Verbindungsmitteln auf Helgoland

Messungen der Salzgehalte mittels sog. Wischproben sind in der Lage, die Chloridbelastung ausgelagerter Verbindungsmittel festzustellen. Unveröffentlichte Messungen durch M. Faller (EMPA Dübendorf, Schweiz) ergaben für die Insel Helgoland die in **Tabelle 10.2** wiedergegebenen Verhältnisse. Bezugswerte stellen die im Mai 2016 gemessenen Werte auf beregneten Flächen im Fährhafen Cuxhaven (30 mg/m^2) und auf dem Rathausplatz in Hamburg (20 mg/m^2) dar. Folgende spezielle Örtlichkeiten (mit A bis C in **Bild 10.1** ausgewiesen) werden in der Folge näher betrachtet:

Versuchsstand C1 (etwa 50 m von der Küstenlinie entfernt, Bilder 10.1 und 10.2). Hier wurden im bewitterten Bereich 1 bzw. 7 Tage nach dem letzten erfolgten Regen Chloridgehalte von 10 bzw. 30 mg/m² festgestellt. Diese niedrigen Chloridwerte liegen in derselben Größenordnung wie auf dem Rathausplatz in Hamburg. Im nicht beregneten Außenbereich wurden etwa 300 mg/m² ermittelt.

Entfernung zum Meer (m)	7 Tage nach dem letzten Regen (9 mm), Juni 2014		1 Tag nach dem letzten Regen (15 mm), Mai 2016	
	frei bewittert	überdacht (Fassade)	frei bewittert	überdacht (Fassade)
A ≈ 5 bis 10	400 - 640	-	590 - 900	-
B ≈ 20 bis 30	130 - 200	-	20 - 30	-
C ≈ 50	20 - 30	≈300 [1)]	10 - 20	≈300 [1)]

[1)] aus vergleichenden röntgenografischen Untersuchungen abgeschätzt

Tabelle 10.2:
Messungen der Chloridgehalte (mg/m²) auf der Insel Helgoland 2014 mittels Wischproben (M. Faller, EMPA Dübendorf, Schweiz)

Stelle C2 (etwa 50 m von der Küstenlinie entfernt). Gleiches wie unter C1 gilt auch für andere bewitterte Bereiche im Ober- und Unterland. Hier wurden bei beregneten Proben in beiden Messungen ebenfalls nur sehr geringe Chloridwerte von etwa 20 mg/m² nachgewiesen.

Stelle B (Uferpromenade, ohne unmittelbares Meeresspritzwasser). In diesem Bereich 20 bis 30 m vom Meer entfernt sind die Chloridgehalte 1 Tag nach erfolgtem Regen sehr niedrig (20 bis 30 mg/m²), dagegen 7 Tage nach dem letzten Regen mit 130 bis 200 mg/m² deutlich erhöht. Nach einer Reihe regenfreier Tage findet demnach ein Anstieg der Chloridbelegung statt. Also auch unmittelbar am Meer kommt es im bewitterten Bereich (vorübergehend) zu erhöhten Chloridbelegungen, wenn es über mehrere Tage nicht regnet.

Stelle A (ungeschützte Mole im Spritzwasserbereich des Meeres). Bei wiederholter Benetzung von Konstruktionen mit Meeresspritzwasser sind die Chloridwerte, unabhängig von der Witterung, mit über 400 mg/m² immer sehr hoch.

Messungen der Salzbelegung bei Anschweißankern von Fassaden

In [1] wurde auf Anschweißankern von Fassaden 12 bis 7 m neben verkehrsreichen, wiederholt im Winter mit Tausalz behandelten Bundesstraßen im städtischen Bereich nach 23 Jahren Chloridgehalte von 25 mg/m² (12 m neben der Fahrbahn) bis 122 mg/m² (7 m neben der Fahrbahn) festgestellt.

Einordnung der Messwerte von Helgoland

Es scheint gerechtfertigt, aus Sicht der Korrosionsbelastung auch im Meeresbereich eine deutliche Differenzierung vorzunehmen. Diese sollte beinhalten, dass nicht von Meerwasser bzw. Meeressprühnebel berührte Bauteiloberflächen in Meeresnähe im Fall einer wiederholten Beregnung deutlich weniger kritisch eingestuft werden als nicht beregnete. Es wird im vorliegenden Fall vorgeschlagen, in Anlehnung an die von Faller vorgelegten Ergebnisse (**Tabelle 10.2**) die in **Tabelle 10.3** aufgeführte Einteilung der atmosphärischen Korrosionsbelastung in unmittelbarer Meeresnähe nach Korrosivitätskategorien vorzunehmen.

Chloridgehalt im Jahresmittel in mg/m²	Korros.kategorie nach DIN EN ISO 9223	Lage: unmittelbarer Küstenbereich
<50	C3	kein Sprühnebel, regelmäßige/wiederholte Beregnung
50 bis 200	C4	kein Sprühnebel, keine Beregnung
>200	C5	gelegentlich Sprühnebel, beregnet und nicht beregnet

Tabelle 10.3:
Einteilung der Korrosionsbelastung in unmittelbarer Meeresnähe aufgrund der Chloridablagerungen auf Bauteiloberflächen (nach Ergebnissen von M. Faller)

10.3 Beschreibung der Versuchskörper

Es wurden unterschiedlich korrosionsgeschützte Holzschrauben, Bohrschrauben, Spreizdübel bis zu 3 Jahren und Kunststoffrahmendübel bis zu 10 Jahren (die Verbindungselemente werden in Abschn. 7, die Schutzsysteme in Abschn. 8 beschrieben) im eingebauten (belasteten) Zustand ausgelagert und anschließend aus dem jeweiligen Baustoff wieder „herauspräpariert“ und beurteilt. Zum Vergleich wurden auch einzelne Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl untersucht.

10.3.1 Holzschrauben

Holzschrauben (siehe Abschn. 7.1, **Bild 7.1**) wurden, unterschiedlich korrosionsgeschützt, in Fichtenholz, imprägniertes Fichtenholz und in Eichenholz (jeweils Holzbalken der Abmessung 800 x 125 x 125 mm) mit einem Akkuschrauber und Bit am Innenantrieb senkrecht zur Faser eingeschraubt (**Bild 10.3**). Der Einschraubvorgang erfolgte dabei ohne Vorbohren. Es wurde hierbei unterschieden zwischen Schrauben, die volleingedreht wurden und Schrauben die zunächst volleingedreht und im Anschluss wieder bis zur Hälfte der Schraubenlänge ausgedreht wurden. Dadurch befindet sich das Gewinde der Schrauben zu etwa 2/3 Länge im Kontakt mit Holz und zu 1/3 im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre. Im zweiten Fall sollte durch eine möglicherweise frühzeitige Korrosionserscheinung geprüft werden, ob durch den Einschraubvorgang die Schutzsysteme beschädigt werden. Die Holzbalken wurden sowohl in Meeresatmosphäre als auch in Stadtatmosphäre bewittert (beregnet).

Die **Holzschrauben aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen mit einer zusätzlichen Deckbeschichtung (Gleitmittel) auf:

- Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung),
- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1,
- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler).

Zusätzlich wurden zum Vergleich **nichtrostende Holzschrauben** aus dem Werkstoff 1.4567 (X3CrNiCu18-9-4) untersucht (siehe Abschn. 8.9). Jede mögliche Variante wurde 2fach untersucht und bis zu 3 Jahren ausgelagert.

Bild 10.3:
Probekörper (Holzbalken aus imprägnierter Fichte und Eiche) für die Holzschrauben

10.3.2 Bohrschrauben

Bohrschrauben (siehe Abschn. 7.2, **Bild 7.3, rechts**) wurden unterschiedlich korrosionsgeschützt in ein Fassadenblech aus Aluminium AlMn1 der Blechstärke 0,75 mm, mit einem Akkuschrauber am Sechskantkopf mit einer Nuss bis zur Auflage der Dichtscheibe auf dem Blech eingeschraubt. Der Einschraubvorgang erfolgte dabei ohne Vorbohren. Die Bohrschrauben (**Bild 10.4**) wurden in Meeresatmosphäre bewittert (beregnet) und nicht bewittert ausgelagert, um den ungünstigeren Fall, nämlich die Möglichkeit der Aufkonzentration von Salzen (Chloride) zu untersuchen. Auch in Stadtatmosphäre wurden die Schrauben bewittert (beregnet) und nicht bewittert untersucht.

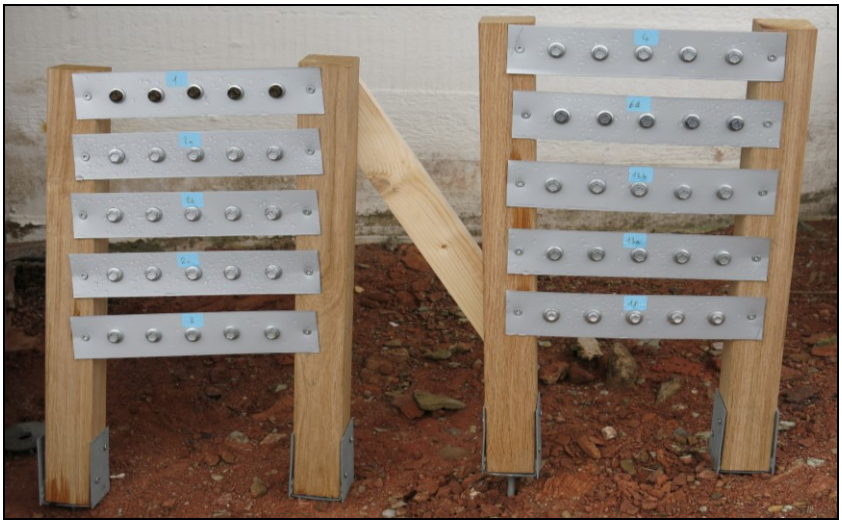


Bild 10.4:
Probekörper für die Bohrschrauben

Die **Bohrschrauben aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen auf:

- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung dickschichtpassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 6 (kein Haftvermittler).

Die Dichtscheiben waren in jedem Fall galvanisch verzinkt. Jede Variante wurde mindestens 5fach untersucht und bis zu 3 Jahren ausgelagert.

10.3.3 Spreizdübel

Spreizdübel (siehe Abschn. 7.3, **Bild 7.4**) wurden, unterschiedlich korrosionsgeschützt, in einen Untergrund aus Beton einer Festigkeitsklasse C30/37 mit den Abmessungen 360 x 500 x 100 mm eingesetzt. Die Bohrlöcher wurden mit Hammerschlag etwa 70 mm tief gebohrt. Danach wurde das Bohrloch mit Druckluft gereinigt. Die Dübel wurden 65 mm tief in den Beton gesetzt. Beim Einbau der Dübel wurde unterschieden zwischen geschlossenem Bohrloch und offenem Bohrloch. Beide Varianten sind im Bereich der Befestigungstechnik möglich. Bei der geschlossenen Variante wurde das Bohrloch mit einem ebenen Anbauteil der Abmessung 40 x 40 x 3 mm abgedichtet. Das Anbauteil wies den gleichen Korrosionsschutz wie der Dübel auf. Beim Einbau der Dübel wurde die Mutter auf dem Gewindeteil mit einem kalibrierten Drehmomentenschlüssel mit einem Drehmoment von 15 Nm angezogen und der Spreizkonus gespreizt. Im Fall des offenen Bohrlochs wurde die Mutter wieder gelöst und das Anbauteil entfernt. Danach wurde die Mutter wieder so aufgeschraubt, dass sie mit dem Beton einen Spalt von 5 mm bildet.

Die Betonkörper wurden nach dem Einsetzen der Dübel in Meeresatmosphäre sowohl im bewitterten (beregneten) Bereich als auch im nicht bewitterten (nicht beregneten) Bereich unter einem Vordach ausgelagert (**Bild 10.5**). Im Falle der Auslagerung unter dem Vordach entspricht dieses einem Einsatz der Dübel beispielsweise hinter der Bekleidung einer hinterlüfteten Fassade. In Stadtatmosphäre wurden die Betonkörper ebenfalls im bewitterten (beregneten) und nicht bewitterten (nicht beregneten) Bereich untersucht.

Die bewitterten (beregneten) Betonkörper erhielten auf allen Flächen, bis auf die Fläche mit den Dübeln, eine Polyurethanbeschichtung mit einer Grundierung aus Epoxidharz. Hierdurch sollten die Verhältnisse von ausgedehnten Körpern angenähert werden. Die bewitterten Körper wurden bei einer Neigung von ca. 30° flachgelagert, um einen ungünstigen Zustand des Einbaus nachzuvollziehen.

Die **Spreizdübel aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschrie-

bene Korrosionsschutzmaßnahmen auf:

- Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung),
- galvanische Verzinkung,
- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1,
- galvanischer Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung dickschichtpassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler).

Zusätzlich wurden zum Vergleich **nichtrostende Spreizdübel** aus dem Werkstoff 1.4301 (X5CrNi18-10) untersucht (siehe Abschn. 8.9). Jede mögliche Variante wurde mindestens 2fach untersucht und bis zu 3 Jahren ausgelagert.

Bild 10.5:
Probekörper für die Spreizdübel, links: bewittert (beregnet), rechts: nicht bewittert (nicht beregnet), Bohrloch offen und geschlossen

10.3.4 Kunststoffrahmendübel (Lieferung 1)

Kunststoffrahmendübel (siehe Abschn. 7.4, **Bild 7.16**) wurden, unterschiedlich korrosionsgeschützt, zur Befestigung eines Kantholzes aus Fichte in einen Untergrund aus Beton einer Festigkeitsklasse C30/37 eingesetzt. Die Bohrlöcher wurden mit Hammerschlag etwa 55 mm tief gebohrt. Danach wurde das Bohrloch mit Druckluft gereinigt. Die Befestigung des Kantholzes erfolgte in der Durchsteckmontage. Die Dübel wurden 40 mm tief in den Beton gesetzt und die Dübelschrauben mit einem Akkuschrauber bis zur Auflage des Schraubenkopfes auf dem Dübelkragen fest eingedreht. Dabei erfolgte das Eindrehen mit einem Bit am Innenantrieb oder alternativ mit einem Steckschlüssel (Nuss) am Außensechskant. Bei den mit den Proben bestückten Betonkörpern (**Bild 10.6, links**) ragte der offene Bereich des Spreizdübels (das Spreizelement) ana-

log der Ausführung in **Bild 10.6, rechts** etwa 20 mm tief in das auf dem Beton aufliegende Kantholz der Abmessung 60 x 60 mm.

Die Versuchskörper wurden sowohl in Meeresatmosphäre als auch in Stadtatmosphäre nicht bewittert (nicht beregnet). Dieser Versuchsaufbau sollte die Verhältnisse bei der Befestigung einer Unterkonstruktion aus Holzprofilen hinter der Bekleidung einer hinterlüfteten Fassade simulieren.

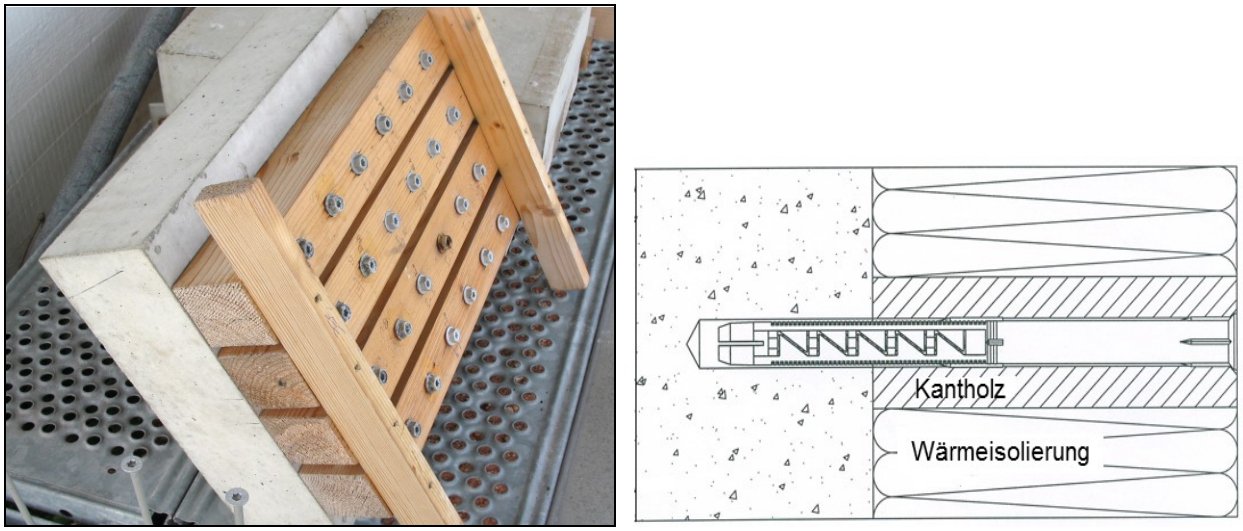


Bild 10.6:
Probekörper für die Kunststoffrahmendübel und Einbauzustand (Bild rechts aus [2])

Die Schrauben der **Kunststoffrahmendübel aus niedriglegiertem Stahl** wiesen folgende in Abschn. 8 beschriebene Korrosionsschutzmaßnahmen auf:

- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung mit Kopfbeschichtung 1 oder 2,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler).

Die galvanisch verzinkten Schrauben wurden auch mit zusätzlichen Kopfbeschichtungen versehen. Jede Variante wurde 4fach untersucht und bis zu 10 Jahren ausgelagert.

10.4 Ergebnisse und deren Bewertung

10.4.1 Bewertungskriterien

Die in den verschiedenen Bauteilen (Holz, Aluminiumblech, Beton) eingebauten, unterschiedlich korrosionsgeschützten Verbindungsmittel Holzschrauben, Bohrschrauben und Spreizdübel, wurden nach 1,5 und 3 Jahren, Kunststoffrahmendübel (Lieferung 1) nach 1,5 - 3 - 5, und 10 Jahren, hinsichtlich Rotrostbildung bewertet. Bei der Bewertung wurde, wie auch bei den Versuchen in Abschn. 9, bezüglich der einzelnen Bereiche der Verbindungsmittel unterschieden:

Holzschrauben
- Kopf (Flachteil des Senkkopfes) in der umgebenden Atmosphäre,
- Schaft und Gewinde (einschließlich der Schaftfräsen) im Kontakt mit Holz.

Bohrschrauben
- Kopf in der Atmosphäre,
- durch das Blech geschraubtes Gewinde in der umgebenden Atmosphäre.

Spreizdübel (Bohrloch offen)
- Mutter und Gewinde in der umgebenden Atmosphäre,
- glatter Abschnitt des Gewindebolzens im Bohrlochinnern,
- Gewinde im Bohrloch.

Spreizdübel (Bohrloch geschlossen)
- Mutter und Gewinde in der umgebenden Atmosphäre,
- Glatter Abschnitt des Gewindebolzens im Bohrlochinnern,
- Gewinde im Bohrloch.

Kunststoffrahmendübel
- Kopf in der umgebenden Atmosphäre,
- Schaft und Gewinde im Kontakt mit der Dübelhülse im Bohrloch.

Köpfe von Schrauben und vor allem Gewinde der Verbindungsmittel werden beim Einbau mechanisch beansprucht, wodurch der Korrosionsschutz beeinträchtigt werden kann. Für solche mechanisch beanspruchten Bereiche wird in der Folge, zur Unterscheidung von nicht beanspruchten Oberflächen, der Ausdruck „belastet“ verwendet.

Die Ergebnisse der bis zu 3 bzw. 10 jährigen Auslagerungen sind getrennt für Stadt- und Meeresatmosphäre für jeweils 1,5 - 3 - 5 und 10 Jahre nach Korrosionsschutzsystemen und Oberflächengeometrie geordnet in den **Anlagen 10.1 bis 10.22** zusammen mit den wichtigsten Angaben zum Überzug dargestellt. Die Angaben zur Schichtdicke des Überzuges in den Anlagen sind Abschn. 8 entnommen und dienen der Interpretation der Ergebnisse. Die Auswertung erfolgte, im Unterschied zum Salzsprühtest, für die einzelnen Verbindungsmittel (Holzschrauben, Bohrschrauben, Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel) getrennt, da im eingebauten Zustand und durch den Kontakt mit dem jeweiligen Baustoff (Holz, Beton) spezifische Korrosionserscheinungen möglich sind.

Die Bewertung des Korrosionszustandes erfolgte, wie bei den Untersuchungen im Konstantklima (Abschn. 9), anhand der flächenmäßigen Ausdehnung von Bereichen mit Rotrost nach Abtrag des metallischen Überzuges. Orientierung bei der Bewertung des Korrosionszustandes bieten die Farben in den Spalten der Auswertungstabellen. Hierbei gilt folgender Korrosionszustand:
- „grün“ steht für ohne Rotrost,
- „gelb“ steht für Rotrost auf <10 % der Oberfläche,
- „hellrot“ steht für Rotrost auf >10 %, jedoch <100 % (deutlich geringer als 100 %) Rotrost auf der Oberfläche,
- „dunkelrot“ steht, für eine nahezu komplette Anrostung auf der Oberfläche.

In der Regel sind die Korrosionsverhältnisse derart, dass bei zunehmender flächenmäßiger Ausdehnung von Bereichen mit Rotrost nach Abtrag des metallischen Überzuges auch die Intensität des Stahlangriffes des nunmehr ungeschützten Stahls zunimmt.

10.4.2 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Holzschrauben

In der Folge werden die bei atmosphärischer Korrosion an Holzschrauben (**Bild 7.1**) der Lieferung 1 und 2 erzielten Ergebnisse nach den in Abschn. 10.4.1 genannten Bewertungskriterien im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Korrosionsmedium (Atmosphäre, Holz),
- Art des Korrosionsschutzes,
- Oberflächengeometrie der Holzschraube (Kopf, Schaft, Gewinde),
- Ort der Auslagerung: Stadt- und Meeresatmosphäre,
- Dauer der Auslagerung.

In Meeresatmosphäre überlagert sich bei Kontakt mit Holz ein von der Holzart abhängiger Einfluss von Chloriden (siehe Abschn. 3.3.1). Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten werden beispielhaft durch die **Bilder 10.7 bis 10.11** belegt. Das Korrosionsverhalten der Holzschrauben nach 3 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (bewittert) wird in einer Übersicht in **Tabelle 10.4** dargestellt. Die Tabelle fasst die Aussagen in den Detailtabellen in den **Anlagen 10.1 bis 10.6** zusammen.

A1 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge in der Atmosphäre und im Kontakt mit Holz

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, bewittert.)

Bezüglich der Auswertung nach der Umgebung (Atmosphäre - bewittert, Holz und Holzart) wurden die unter A1-1 bis A1-3 getroffenen Feststellungen getroffen:

A1-1 Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalten 1 und 4.)

Stadt- und Meeresatmosphäre

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche**. Am atmosphärisch berührten Kopf zeigen Holzschrauben mit den unter A2 genannten geringer schützenden Korrosionsschutzsystemen Stahlkorrosion. Betroffen sind Schrauben, die sowohl in Fichte ohne Imprägnierung, in imprägnierte Fichte als auch in Eiche (Hartholz) eingeschraubt wurden. Diese Korrosion tritt bei in allen Hölzern eingedrehten Schrauben sowohl in Stadt- als auch in Meeresatmosphäre stets beginnend am peripheren Randbereich im Kontakt zum Holz auf und erfasst im Laufe der Bewitterung auch den gesamten Schraubenkopf (siehe **Bild 10.8**). Es handelt sich somit auch beim Schraubenkopf um eine durch Holzkontakt beeinflusste Korrosion.

  Rotrostbildung am Schraubenkopf ist im Mittel aller Versuche bei in Eiche eingedrehten Schrauben stärker ausgeprägt als bei Schrauben in Fichte und imprägnierter Fichte. Sie ist in Meeresatmosphäre stärker als in Stadtatmosphäre.

Holz / Korrosionsschutz		Lieferung	Stadtatmosphäre bewittert				Meeresatmosphäre bewittert				100 % relative Luftfeuchte			
			Kopf	Schaft	Gewinde		Kopf	Schaft	Gewinde		Kopf	Schaft	Gewinde	
					vG	hG			vG	hG			vG	hG
			1	2	3a	3b	4	5	6a	6b	7	8	9a	9b
Fichte	Feuerverz.	2	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
	galv. blau		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	galv. gelb		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	galv. dick		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	ZnNi dick	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	ZnNi dick	2	14	14	10	10	14	14	10	10	14	14	10	10
	ZnAl Fa.1		8	9	7	7	8	9	7	7	8	9	7	7
	ZnAl Fa.2		8	10	6	6	8	10	6	6	8	10	6	6
	ZnAl Fa.4		3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3
	1.4567	-												
imprägnierte Fichte	Feuerverz.	2	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
	galv. blau		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	galv. gelb		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	galv. dick		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	ZnNi dick	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	ZnNi dick	2	14	14	10	10	14	14	10	10	14	14	10	10
	ZnAl Fa.1		8	9	7	7	8	9	7	7	8	9	7	7
	ZnAl Fa.2		8	10	6	6	8	10	6	6	8	10	6	6
	ZnAl Fa.4		3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3
	1.4567	-												
Eiche	Feuerverz.	2	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
	galv. blau		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	galv. gelb		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	galv. dick		9	9	6	6	9	9	6	6	9	9	6	6
	ZnNi dick	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	ZnNi dick	2	14	14	10	10	14	14	10	10	14	14	10	10
	ZnAl Fa.1		8	9	7	7	8	9	7	7	8	9	7	7
	ZnAl Fa.2		8	10	6	6	8	10	6	6	8	10	6	6
	ZnAl Fa.4		3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3
	1.4567	-												

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

erhöhte Chloridgehalte

vG/hG: vorderer/hinterer Gewindebereich der Holzschraube im Holz,
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 10.4:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Holzschrauben (Lieferung 1 und 2) nach 3 jähriger Auslagerung in Stadtatmosphäre und Meeresatmosphäre (jeweils mit Bewitterung) sowie bei 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

A1-2 Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalten 2, 3, 5 und 6.)

Stadtatmosphäre

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche**. In Stadtatmosphäre trat im Untersu-

chungszeitraum von 3 Jahren bei korrosionsgeschützten Schrauben im Kontakt mit Fichte keine Stahlkorrosion auf. Im Kontakt mit imprägnierter Fichte und Eiche wurde Rotrost bei Schrauben mit den unter A2 genannten Korrosionsschutzsystemen festgestellt.

In Stadtatmosphäre ist Rotrostbildung im Kontakt mit Holz im Mittel aller Versuche bei in Eiche und imprägnierter Fichte eingedrehten Schrauben stärker ausgeprägt als bei Schrauben in Fichte.

Meeresatmosphäre

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche**. Holzschrauben mit den unter A2 genannten Korrosionsschutzsystemen, die in Meeresatmosphäre in Fichte, imprägnierte Fichte und Eichenholz eingeschraubt wurden, zeigen nach 3 Jahren im Kontakt mit dem Holz Rotrost. Dabei nimmt der Beginn und auch die Intensität der Rotrostbildung im Mittel aller Systeme in der Reihenfolge Fichte - imprägnierte Fichte - Eiche zu (siehe **Tabelle 10.4**, Spalten 5 und 6).

  Im Vergleich zur Stadtatmosphäre ist die Korrosion der Überzüge im Kontakt mit Holz in Meeresatmosphäre erheblich stärker (vergleiche in **Tabelle 10.4** die Spalten 2 und 3 mit 5 und 6).

A1-3 Vergleich: Korrosionsverhalten in der Atmosphäre und im Kontakt mit Holz

(Vergleiche in **Tabelle 10.4**, die Spalte 1 mit 2 und 3 und die Spalte 4 mit 5 und 6.)

Hinsichtlich eines Vergleiches einer Korrosion der metallischen Überzüge in der Atmosphäre (Kopf) bzw. im Kontakt mit Holz (Schaft, Gewinde) gilt getrennt für Stadt- bzw. Meeresatmosphäre und Holzart:

Stadtatmosphäre

In der nur gering korrosiven Stadtatmosphäre gilt:

- **Fichte**. Am Beispiel des anfälligeren System ZnAl-Lamellenüberzuges der Firma 4 (siehe A2) ist erkennbar:
  Die Schwachstelle liegt bei den in das nur gering korrosive Fichtenholz eingedrehten Schrauben eher im Kontakt des Kopfes mit der Atmosphäre (**Tabelle 10.4**, Spalte 1) als im Kontakt von Schaft und Gewinde mit dem Holz (**Tabelle 10.4**, Spalten 2 und 3).

  Imprägnierte Fichte. Abgesehen von dem am korrosionsanfälligsten System, ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (hier ist die Korrosion des Kopfes im Kontakt mit der Atmosphäre stärker als an Schaft und Gewinde im Holz), liegt die Schwachstelle bei in imprägnierte Fichte eingedrehten Schrauben mit bereits erfolgter Stahlkorrosion eher beim Schraubenabschnitt im Kontakt mit Holz (**Tabelle 10.4**, Spalten 2 und 3).

  Eiche. Bei in Eiche eingedrehten Schrauben mit Stahlkorrosion findet man beim Kopf in Kontakt mit der Atmosphäre und beim Gewindeabschnitt im Kontakt mit Holz überwiegend gleich starke Rotrostbildung (**Tabelle 10.4**, Spalten 1 bis 3).

Meeresatmosphäre

In der stark korrosiven Meeresatmosphäre gilt:

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung**. Im Kontakt mit Fichte (ohne und mit Imprägnierung) ist bei dem besonders korrosionsanfälligen System ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (siehe A2) Rotrostbildung beim Kopf (**Tabelle 10.4**, Spalte 4) stärker ausgeprägt als beim Schaft und Gewinde (**Tabelle 10.4**, Spalten 5 und 6). **Bild 10.11** zeigt diesen Zusammenhang.

  Bei den übrigen Korrosionsschutzsystemen (galvanische Überzüge, ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 2) ist die Rotrostbildung im Kontakt mit Fichte (ohne und mit Imprägnierung) beim Schaft und vorderen Gewindebereich (**Tabelle 10.4**, Spalten 5 und 6) deutlich stärker als am Kopf in der Atmosphäre (**Tabelle 10.4**, Spalte 4). **Bild 10.8** zeigt diesen Zusammenhang.

- **Eiche**. Im Kontakt mit Eiche ist bei galvanischen Überzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 2 und 4 der Korrosionsangriff des Kopfes in Kontakt mit der Atmosphäre und von Schaft und Gewinde in Kontakt mit Holz gleich stark (**Tabelle 10.4**, Spalten 4 bis 6). Anders verhält sich nur der ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1, der sich im Kontakt mit der Atmosphäre deutlich günstiger verhält als in Kontakt mit Holz (siehe **Bild 10.10**).

A1-4 Vergleich des Korrosionsverhaltens in der Stadt- und Meeresatmosphäre

(Vergleiche in **Tabelle 10.4** die Spalten 1 bis 3 mit den Spalten 4 bis 6.)

Im **Vergleich von Stadt- und Meeresatmosphäre** gilt gemäß den Ausführungen zu A1-1 bis A1-3 folgender Sachverhalt:

- Bei in Fichte (ohne und mit Imprägnierung) und Eiche eingedrehten Schrauben mit korrosionsanfälligen Überzügen ist die Rotrostbildung in Meeresatmosphäre grundsätzlich stärker als in Stadtatmosphäre.

Folgerungen zu A1: Korrosionsschutzverhalten der Überzüge in der Atmosphäre und im Kontakt mit Holz

Vergleich der atmosphärischen und holzseitigen Korrosion

- Die starke Rotrostbildung am Schaft und Gewinde im direkten Kontakt mit imprägnierter Fichte und insbesondere Eiche,
- der Beginn der Stahlkorrosion im peripheren Randbereich der Schraubenköpfe,
- die stärkere Korrosion in Eiche und imprägnierter Fichte im Vergleich zu nicht imprägnierter Fichte
- und auch die zumeist erheblich stärkere Rotrostbildung bei Holzkontakt gegenüber der atmosphärischen Korrosion lassen erkennen, dass bei Bewitterung die Korrosionsverhältnisse im Kontakt mit Holz eher ungünstiger sind als bei rein atmosphärischer Beanspruchung ohne Beeinflussung durch das Holz. Dieses gilt insbesondere dann, wenn es sich um Hölzer mit kupferhaltigen Imprägnierungsmitteln und Eichenholz handelt und wenn in Meeresatmosphäre ausgelagert wird (siehe unten).

- Der Beginn der Korrosion der Schraubenköpfe im peripheren Randbereich (Über-

gang zum Holz) bei allen rotrostbehafteten Schrauben ist auf den temporär erhöhten Wassergehalt der Holzoberfläche bei Bewitterung zurückzuführen (Abschn. 3.3.1, Feuchte von Holzbauteilen im Gleichgewicht mit der Atmosphäre). Dabei kommt der Schraubenkopf im Randbereich auch mit wasserlöslichen korrosionsfördernden Inhaltsstoffen des Holzes in Kontakt.

Im Kontakt mit Holz sind hinsichtlich des Korrosionsverhaltens der eingedrehten Holzschrauben zwei wesentliche Einflüsse zu unterscheiden:

- Eine Korrosionsbeanspruchung durch Holzinhaltsstoffe und
- der Einfluss der Umgebung (Stadt- und Meeresatmosphäre) bzw. die Möglichkeit eines Eindringens von Chloriden entlang der Schraubenoberfläche (die Chlorideindringung erfolgt holzspezifisch).

Einfluss der Holzart und der Holzinhaltsstoffe

Im Kontakt mit Holz nimmt die Intensität einer Stahlkorrosion in Stadt- und Meeresatmosphäre in der Reihenfolge Fichte - imprägnierte Fichte - Eiche zu. Diese von der Holzart abhängige Korrosion der Schutzsysteme ist wie folgt zu erklären:

- **Fichte (nicht imprägniert)**. Fichtenholz ist im Hinblick auf eine Korrosion von eingedrehten Holzschrauben ein eher unkritisches Holz. Deshalb ist die festgestellte Stahlkorrosion von Verbindungsmitteln in Stadtatmosphäre auch bei Bewitterung (gelegentlicher Beregnung) generell gering.
- **Imprägnierte Fichte**. Im Kontakt mit bewitterter imprägnierter Fichte wird die Korrosion anfälliger Schutzsysteme im Vergleich zu Holz ohne Imprägnierung bei sonst gleichen Randbedingungen verstärkt. Dieses zeigt, dass sich kupferhaltige Imprägnierungsmittel bei bewittertem Holz mit Wassergehalten um 20 M.-% nachteilig auswirken.
- **Eiche**. In Eiche liegt die stärkste Korrosivität der untersuchten Hölzer vor**.** Die gegenüber den vorgenannten Hölzern verstärkte Korrosion der Überzüge und des Stahls ist die Folge der hydrolytischen Säurebildung im Eichenholz. Diese findet offenbar auch bei Auslagerung der Hölzer in Stadt- und Meeresatmosphäre statt: Bei Anwesenheit von ungebundenem Wasser können die Ester der Zellulose hydrolysieren und Säure freisetzen. Dadurch ist die Feuchte (das freie Wasser) im Holz schwach essigsauer.

Einfluss der Umgebung (Stadt- und Meeresatmosphäre)

- **Fichte (ohne und mit Imprägnierung)**. Die stärkere Korrosion der in Fichte ohne und mit Imprägnierung eingedrehten Schrauben im Kopf, Schaft- und vorderen Gewindebereich bei den empfindlicheren Korrosionsschutzsystemen bei Auslagerung in Meeresatmosphäre im Vergleich zur Stadtatmosphäre ist auf Chlorideinfluss zurückzuführen.

  Für die Schraube im Kontakt mit Holz gilt: Die Chloride können gelöst in Wasser nachweislich bis zu einer begrenzten Tiefe entlang der Schraubenoberfläche eindringen (Abschn. 3.3.1). In Bereichen ohne Chloridbelegung der Schraubenoberfläche (hinterer Gewindebereich) ist in beiden Hölzern (Fichte, imprägnierte Fichte) kein

Rotrost vorhanden (**Tabelle 10.4**).

- **Eiche**. Bei den in Eiche eingedrehten Schrauben ist bei der Mehrzahl der untersuchten Systeme bei Auslagerung in Stadt- und besonders in Meeresatmosphäre die gesamte Schraubenlänge von Korrosion betroffen, ohne dass bei diesem Hartholz wegen erhöhter Pressungen auf die Schrauben Chloride im Kontakt zum Holz nachzuweisen sind (Abschn. 3.3.1). Allerdings ist die Korrosion in Meeresatmosphäre deutlich stärker als in Stadtatmosphäre. Diese verstärkte Korrosion in Verbindung mit Eiche kann somit nicht auf Chloride zurückzuführen sein. Die gegenüber der Stadtatmosphäre verstärkte Korrosion in Meeresatmosphäre ist sicherlich die Folge einer erhöhten Feuchtigkeit des Eichenholzes in Meeresatmosphäre im Vergleich zu Stadtatmosphäre (siehe **Tabelle 3.3**). Durch diese erhöhte Feuchtigkeit wird im Holz vermehrt Säure freigesetzt (siehe Abschn. 3.3.1).

A2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Meeresatmosphäre, bewittert.)

Das Korrosionsschutzverhalten der einzelnen Korrosionsschutzsysteme ist am deutlichsten bei Auslagerung in Meeresatmosphäre erkennbar. Da das Verhalten der Überzüge im Kontakt zur Atmosphäre und Holz unterschiedlich ist, erfolgt die Bewertung getrennt für beide Umgebungen (Atmosphäre, Holz).

A2-1 Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

Kopf von Schrauben, eingedreht in nicht imprägnierter und imprägnierter Fichte

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalte 4.)

- **Feuerverzinkung**. Die Köpfe der feuerverzinkten Holzschrauben, die in nicht imprägnierte und imprägnierte Fichte eingedreht wurden, sind frei von Rotrost (siehe **Bild 10.7**).
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Die Köpfe der Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen (Schichtdicke i.M. 9 µm) ohne und mit zusätzlicher Passivierung und ZnNi-Überzügen (Schichtdicke i.M. 6 und 14 µm) mit zusätzlicher Passivierung, die in nicht imprägnierte und imprägnierte Fichte eingedreht wurden, sind ebenfalls frei von Rotrost (siehe **Bilder 10.8 und 10.9**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 10.5** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Bei den mit ZnAl-Lamellenüberzügen korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit Fichtenholz und imprägniertem Fichtenholz wurde festgestellt:
  - Keine Stahlkorrosion ist im Kopfbereich von Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 1, mit einer Dicke des Überzuges von 8 µm und einem Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung), vorhanden (**Bild 10.10**).
  - Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 2, ohne Haftvermittler und Dicke des Überzuges von i.M. 8 µm, und der Firma 4, ohne Haftvermittler und geringer Dicke des Überzuges von nur 3 µm, zeigen, eingedreht in Fichte und im-

prägnierte Fichte, im Kopfbereich schwachen bzw. sehr starken Rotrost (siehe **Bild 10.11**).

Fa.	Fichte		Imprägnierte Fichte		Eiche		Hv	Db
	Stahlkorrosion/ Rotrost bei Kontakt zu:		Stahlkorrosion/ Rotrost bei Kontakt zu:		Stahlkorrosion/ Rotrost bei Kontakt zu:			
	Atmo-sphäre (Kopf)	Holz (Gewinde)	Atmo-sphäre (Kopf)	Holz (Gewinde)	Atmo-sphäre (Kopf)	Holz (Gewinde)		
1	8 (0-16)	7 (0-28)					ja	ja
2	8 (0-32)	6 (0-16)					nein	ja
4	3 (0-10)	3 (0-5)					nein	ja

keine	geringe	starke	sehr starke	Rotrostbildung

Db = Deckbeschichtung, Hv = Haftvermittler, Zahlen: Mittelwert (Streubereich) des Überzuges

Tabelle 10.5:
Angaben zum Schutzverhalten von ZnAl-Lamellenüberzügen beim Kopf (Atmosphäre) und dem vorderen Gewindebereich (Holz) in Meeresatmosphäre bei in Fichte, imprägnierter Fichte und Eiche eingedrehten Schrauben und Nennung möglicher Einflüsse (siehe auch Tabelle 10.4)

Kopf von Schrauben, eingedreht in Eiche

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalte 4.)

- **Feuerverzinkung**. Die Köpfe der feuerverzinkten Holzschrauben, die in Eichenholz eingedreht wurden, sind frei von Rotrost (siehe **Bild 10.7**).
- **Galvanische Zinküberzüge**. Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen (Schichtdicke i.M. 9 µm) ohne und mit Blaupassivierung, Gelbchromatierung und Dickschichtpassivierung 1 zeigen im Kopfbereich starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.8**). Die Rotrostbildung erfolgt bei vergleichbarer Schichtdicke (siehe galvanische Verzinkung und ZnNi-Überzug der Lieferung 1) im Falle von galvanischen Zinküberzügen noch stärker als bei den ZnNi-Überzügen mit Schichtdicken von i.M. 6 µm und Dickschichtpassivierung 2.
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Holzschrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen (Schichtdicke i.M. 6 und 14 µm) und Dickschichtpassivierung 2 zeigen im Kopfbereich starke bzw. geringe Rotrostbildung (siehe **Bild 10.9**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 10.5** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Der Beginn einer Stahlkorrosion der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2 und 4 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit Eichenholz verhält sich wie folgt:
  Keine Stahlkorrosion ist bei Überzügen mit ZnAl-Lamellenüberzügen von Holzschrauben der Firma 1, mit einer Überzugsdicke von i.M. 8 µm und einem Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung) vorhanden (siehe **Bild 10.10**).

Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 2 (Überzugsdicke i.M. 8 µm, ohne Haftvermittler) und 4 (Schichtdicke i.M. 3 µm, ohne Haftvermittler) zeigen im Kopfbereich starken bzw. sehr starken Rotrost (siehe **Bild 10.11**).

Die Stahlkorrosion aller Schraubenköpfe im peripheren Randbereich (Kontakt zum Holz) ist bei Schrauben in Eiche deutlich stärker ausgeprägt als in Fichte und imprägnierter Fichte.

A2-2 Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalten 5 und 6.)

Kontakt mit Fichte ohne Imprägnierung

- **Feuerverzinkung**. Schaft und Gewinde feuerverzinkter Holzschrauben sind frei von Rotrost (siehe **Bild 10.7**).
- **Galvanische Zinküberzüge**. Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen (Zinkauflage bei Schaft und Gewinde i.M. 9 bzw. 6 µm) ohne und mit Passivierung zeigen im Kontakt mit dem Holz bei Schaft und vorderem Gewinde starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.8**).
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Holzschrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen (Schichtdicke bei Schaft und Gewinde i.M. 6 µm) und Dickschichtpassivierung 2 zeigen geringe Rotrostbildung bei Schaft und vorderem Gewinde**.**

  Am Beispiel der beiden untersuchten ZnNi-Überzüge mit Dicken von i.M. 6 µm bei Schaft und Gewinde (Lieferung 1) bzw. 14 µm und 10 µm bei Schaft und Gewinde (Lieferung 2) ist erkennbar, dass durch eine Erhöhung der Schichtdicke frühzeitige Stahlkorrosion verhindert werden kann (siehe **Bild 10.9**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 10.5** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Das Korrosionsverhalten der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2 und 4 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit Fichte ohne Imprägnierung ist wie folgt:
  Holzschrauben der Firma 1 mit Überzugsdicken bei Schaft und Gewinde von i.M. 9 bzw. 7 µm und Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung) sind im Kontakt mit Holz frei von Rotrost (siehe **Bild 10.10**).

  Holzschrauben der Firma 2 mit vergleichbaren Überzugsdicken (i.M. 10 bzw. 6 µm bei Schaft und Gewinde), jedoch ohne Haftvermittler, zeigen im Kontakt mit Holz bei Schaft und vorderem Gewinde schwach ausgeprägten Rotrost.

  Holzschrauben der Firma 4 mit sehr geringem metallischen Überzug (i.M. 4 bzw. 3 µm bei Schaft und Gewinde) und ohne Haftvermittler, zeigen im Kontakt mit Holz bei Schaft und vorderem Gewinde stark ausgeprägten Rotrost (siehe **Bild 10.11**).

Bei allen metallischen Überzügen sind die hinteren Gewindebereiche der Holzschrauben stets frei von Rotrost.

Kontakt mit imprägnierter Fichte

- **Feuerverzinkung**. Schaft und Gewinde feuerverzinkter Holzschrauben sind frei von

Rotrost (siehe **Bild 10.7**).

- **Galvanische Zinküberzüge**. Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen (Zinkauflage bei Schaft und Gewinde i.M. 9 bzw. 6 µm) ohne und mit Passivierung zeigen im Kontakt mit dem Holz bei Schaft und vorderem Gewinde sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.8**).
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Holzschrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen (Schichtdicke bei Schaft und Gewinde i.M. 6 µm) und Dickschichtpassivierung 2 zeigen geringe Rotrostbildung bei Schaft und vorderem Gewinde**.**

  Am Beispiel der beiden untersuchten ZnNi-Überzüge mit Dicken von i.M. 6 µm bei Schaft und Gewinde (Lieferung 1) bzw. 14 µm und 10 µm bei Schaft und Gewinde (Lieferung 2) ist erkennbar, dass durch eine Erhöhung der Schichtdicke frühzeitige Stahlkorrosion verhindert werden kann (siehe **Bild 10.9**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 10.5** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Das Korrosionsverhalten der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2 und 4 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit imprägniertem Fichtenholz ist wie folgt:
  Holzschrauben der Firma 1 mit Schichtdicken bei Schaft und Gewinde von i.M. 9 bzw. 7 µm und Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung) sind auch im Kontakt mit imprägnierter Fichte im Kontakt mit dem Holz frei von Rotrost (siehe **Bild 10.10**).

  Holzschrauben der Firma 2 mit vergleichbaren Schichtdicken (i.M. 10 bzw. 6 µm bei Schaft und Gewinde), jedoch ohne Haftvermittler, zeigen im Kontakt mit Holz bei Schaft und vorderem Gewinde stark ausgeprägten Rotrost.

  Holzschrauben der Firma 4 mit sehr geringem metallischen Überzug (i.M. 4 bzw. 3 µm bei Schaft und Gewinde) und ohne Haftvermittler, zeigen im Kontakt mit Holz bei Schaft und vorderem Gewinde stark ausgeprägten Rotrost (siehe **Bild 10.11**).

Bei allen metallischen Überzügen sind die hinteren Gewindebereiche der Holzschrauben stets frei von Rotrost.

Kontakt mit Eiche

- **Feuerverzinkung**. Schaft und Gewinde feuerverzinkter Holzschrauben sind im Kontakt mit Eiche frei von Rotrost (siehe **Bild 10.7**).
- **Galvanische Zinküberzüge**. Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen (Zinkauflage bei Schaft und Gewinde i.M. 9 bzw. 6 µm) ohne und mit Passivierung zeigen im Kontakt mit dem Eichenholz beim Schaft und entlang der gesamten Gewindelänge sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.8**).
- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. Holzschrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen (Schichtdicke bei Schaft und Gewinde i.M. 6 µm) und Dickschichtpassivierung 2 zeigen starke Rotrostbildung bei Schaft und Gewinde**.** Allerdings ist auch die Korrosionsbeständigkeit der ZnNi**-**Überzüge im Kontakt mit Eichenholz begrenzt: Schrauben mit galvanischen ZnNi-Überzügen und Dickschichtpassivierung 2 zeigen nämlich bei

Kontakt mit Eichenholz selbst im Fall der dickeren Auflage (i.M. 14 bzw. 10 µm bei Schaft und Gewinde) bereits Rotrost nach 3 Jahren (siehe **Bild 10.9**).

- **ZnAl-Lamellenüberzüge** (in **Tabelle 10.5** sind die Ergebnisse in einer verkürzten Übersicht und mögliche Einflüsse auf das Korrosionsverhalten angegeben). Das Korrosionsverhalten der mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1, 2 und 4 korrosionsgeschützten Holzschrauben im Kontakt mit Eichenholz ist wie folgt:
  Holzschrauben der Firma 1 mit Schichtdicken bei Schaft und Gewinde von i.M. 9 bzw. 7 µm und Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung) zeigen im gesamten Kontaktbereich von Schrauben mit dem Eichenholz starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.10**).

  Holzschrauben der Firma 2 mit vergleichbaren Schichtdicken (i.M. 10 bzw. 6 µm bei Schaft und Gewinde), jedoch ohne Haftvermittler, zeigen im gesamten Kontaktbereich von Schrauben mit dem Eichenholz sehr starke Rotrostbildung.

  Holzschrauben der Firma 4 mit sehr geringem metallischen Überzug (i.M. 4 bzw. 3 µm bei Schaft und Gewinde) und ohne Haftvermittler, zeigen im gesamten Kontaktbereich von Schrauben mit dem Eichenholz sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.11**).

A2-3 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel (beide mit Dickschichtpassivierung)

Unterschiede im Korrosionsschutzverhalten von galvanischen Zink- und ZnNi-Überzügen jeweils mit Dickschichtpassivierung sind am ehesten bei Auslagerung in einer stark korrosiven Umgebung wie Meeresatmosphäre erkennbar. Da das Verhalten der Überzüge im Kontakt zur Atmosphäre und Holz unterschiedlich ist, erfolgt die Bewertung getrennt für beide Umgebungen (Atmosphäre, Holz). Bewertet werden Überzüge mit vergleichbarer Schichtdicke (galvanische Verzinkung und ZnNi-Überzug der Lieferung 1).

Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalte 4.)
Verglichen werden:
Zinküberzug (Schichtdicke i.M. 9 µm) und ZnNi-Überzug (Schichtdicke i.M. 6 µm), beide mit Dickschichtpassivierung.

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung**. Die in Fichte ohne und mit Imprägnierung eingedrehten Holzschrauben mit galvanischen Zink- und ZnNi-Überzügen und zusätzlicher Passivierung sind in beiden Fällen im atmosphärisch berührten Kopfbereich innerhalb von 3 Jahren frei von Rotrost.
- **Eiche**. Bei in Eiche eingedrehten Holzschrauben ist Rotrostbildung beim galvanischen Zinküberzug, beginnend im peripheren Randbereich des Schraubenkopfes im Kontakt zum Holz, nach 3 Jahren stärker ausgeprägt als beim ZnNi-Überzug (siehe **Bilder 10.8 und 10.9**).

Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalten 5 und 6.)
Verglichen werden:
Zinküberzug (Schichtdicke bei Schaft und Gewinde i.M. 9 bzw. 6 µm) und ZnNi-Überzug (Schichtdicke bei Schaft und Gewinde i.M. 6 bzw. 6 µm, Lieferung 1), beide mit Dickschichtpassivierung.

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche**. Bei in allen 3 Hölzern eingedrehten Holzschrauben ist Rotrostbildung beim galvanischen Zinküberzug nach 3 Jahren stärker ausgeprägt als beim ZnNi-Überzug (siehe **Bilder 10.8 und 10.9**).

A2-4 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre.)

Die Art der Passivierung wurde lediglich bei der galvanischen Verzinkung variiert. Dabei ist Stahlkorrosion in Stadt- und Meeresatmosphäre lediglich im Kontakt mit Holz aufgetreten, nämlich

- im peripheren Randbereich der Schraubenköpfe (Auflage der Köpfe auf dem Holz)
- und beim Schaft und Gewinde.

Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalte 4.)
Fichte ohne und mit Imprägnierung. Beim Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre, erwiesen sich die galvanische Verzinkung mit allen 3 Passivierungen (zusätzliche Blaupassivierung, Gelbchromatierung und Dickschichtpassivierung 1) jeweils als sehr beständig (kein Rotrost). Dieses steht in Übereinstimmung mit vergleichbar geschützten Kunststoffrahmendübeln, deren ausschließlich atmosphärisch beanspruchten Köpfe, selbst nach 10 Jahren in Meeresatmosphäre, noch frei von Rotrost sind (vergl. Abschn. 10.4.5).

Eiche. Beim Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre, erfolgte bei galvanischer Verzinkung mit zusätzlicher Blaupassivierung, Gelbchromatierung und Dickschichtpassivierung 1 jeweils sehr starke Rotrostbildung.

Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Siehe **Tabelle 10.4**, Spalten 5 und 6.)
Folgende Feststellungen werden (gemeinsam) für den peripheren Randbereich der Schraubenköpfe sowie für Schaft und Gewinde im **Kontakt mit Holz** getroffen:

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche**. Durch die verschiedenen Passivierungen (zusätzliche Blaupassivierung, Gelbchromatierung oder Dickschichtpassivierung 1) der Verzinkung wurde innerhalb von 3 Jahren sowohl in Stadt- als auch in Meeresatmosphäre bei Holzschrauben im Kontakt mit allen 3 Hölzern im Fall von Stahlkorrosion kein grundsätzlich unterschiedliches Schutzverhalten festgestellt: Bei allen 3 Passivierungen erfolgte Rotrostbildung mit vergleichbar hoher Intensität.

Folgerungen zu A2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

Die einzelnen Korrosionsschutzsysteme unterscheiden sich bezüglich ihres Verhaltens am ehesten in einer aggressiven Umgebung wie die Meeresatmosphäre, weshalb in der Folge diesbezügliche Ergebnisse im Vordergrund stehen.

- **Feuerverzinkung**. Sowohl bei den Schraubenköpfen, die unmittelbar der Meeresatmosphäre ausgesetzt sind, als auch beim Schaft- und Gewindebereich im Kontakt mit Holz, ist die Feuerverzinkung den galvanischen Überzügen (Zink bzw. ZnNi) und ZnAl-Lamellenüberzügen gegenüber in allen Hölzern hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit deutlich überlegen (vergleiche **Bild 10.7** mit den **Bildern 10.8 bis 10.11**).
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Bei in Fichte (ohne und mit Imprägnierung) und Eiche eingedrehten Schrauben ist der galvanische ZnNi-Überzug mit Dickschichtpassivierung 2 bei Kontakt mit Holz (dieses gilt auch für den peripheren Randbereich der Schraubenköpfe) beständiger als der galvanische Zinküberzug mit Dickschichtpassivierung 1. Im Kontakt mit Eiche wirkt sich offensichtlich eine erhöhte Beständigkeit von ZnNi gegenüber Reinzink bei Angriff organischer Säuren (Essigsäure) aus (vergleiche **Bild 10.8** mit **Bild 10.9**). Festzustellen ist jedoch, dass auch ZnNi-Überzüge bei nicht ausreichender Dicke keinen dauerhaften Korrosionsschutz bieten und in Eichenholz grundsätzlich nicht dauerhaft beständig sind.
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Bei den ZnAl-Lamellenüberzügen zeigt der Überzug der Firma 1 im Vergleich zu jenen der Firmen 2 und 4 sowohl im atmosphärischen Bereich als auch im Kontakt mit Holz das bessere Korrosionsschutzverhalten (vergleiche **Bild 10.10 mit Bild 10.11**). Dies ist in erster Linie auf die Trägerschicht aus Unterzinkung plus Blaupassivierung (diese wirken als Haftvermittler und zusätzlicher Korrosionsschutz) zurückzuführen. Bei Trommelware mit ZnAl-Lamellenüberzügen und den hier offenbar unvermeidbaren Schichtdickenschwankungen hat dieser zusätzliche Korrosionsschutz der Trägerschicht für den Schutz des Gesamtüberzuges eine wesentliche Bedeutung.

  Die ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 2 und 4 (beide ohne Trägerschicht, der Überzug der Firma 4 mit sehr geringer Schichtdicke) erwiesen sich insbesondere in der salzhaltigen Meeresatmosphäre für den dauerhaften Korrosionsschutz als ungeeignet.
- **Passivierung der galvanischen Überzüge**. Im Kontakt mit den korrosiveren Hölzern wie imprägniertes Fichtenholz und Eiche bewirken die Passivierungen der galvanischen Überzüge (Blaupassivierung, Gelbchromatierung oder Dickschichtpassivierung 1) gleichermaßen keine erkennbare Verbesserung des Korrosionsschutzes. Durch die unterschiedlichen Passivierungen (Blaupassivierung, Gelbchromatierung oder Dickschichtpassivierung 1) ließen sich bei der galvanischen Verzinkung in Stadt- und Meeresatmosphäre demnach bei Kontakt mit allen 3 Hölzern keine ausreichenden Schutzdauern erzielen.
- **Deckbeschichtung bei galvanischen Überzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen**. Im Kontakt mit den korrosiveren Hölzern wie imprägniertes Fichtenholz und Eiche bewirken die nur wenige Nanometer dicken Deckbeschichtungen (Gleitbeschichtun-

gen) bei den hier untersuchten Überzügen keine erkennbare Verbesserung des Korrosionsschutzes.

Insgesamt gesehen bieten neben der sehr beständigen Feuerverzinkung lediglich galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge mit Haftvermittler mit ausreichende Schichtdicke >7 bis 10 µm einen gewissen Langzeitschutz für Holzschrauben.

A3 Einfluss der Oberflächengeometrie (Schaft, Gewinde) bei Kontakt mit Holz

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, bewittert.)

Die Auswertung bezüglich der Oberflächengeometrie (Schaft, Gewinde) bei Kontakt mit Holz in Stadt- und Meeresatmosphäre wurde der besseren Übersicht halber für die einzelnen Hölzer getrennt vorgenommen.

Stadtatmosphäre

(Vergleiche in **Tabelle 10.4** die Spalten 2 und 3.)

- **Fichte ohne Imprägnierung**. Die in Fichte ohne Imprägnierung eingedrehten Schrauben sind im Schaft- und auch im Gewindebereich frei von Rotrost.
- **Imprägnierte Fichte**. Bezug genommen wird auf alle unter A2 genannten Holzschrauben mit Stahlkorrosion im Kontakt mit Holz. Bei diesen Schrauben sind der Schaft und der vordere Gewindebereich (Schaftfräse und die vorderen 2 Gewindegänge) nahezu gleich stark korrodiert.
- **Eiche**. Bezug genommen wird auf alle unter A2 genannten Holzschrauben mit Stahlkorrosion im Kontakt mit Holz. Bei diesen Schrauben mit Rotrostbildung ist das gesamte Gewinde stets stärker von Stahlkorrosion betroffen als der Schaft.

Meeresatmosphäre

(Vergleiche in **Tabelle 10.4** die Spalten 5 und 6.)

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung**. Bezug genommen wird auf alle unter A2 genannten Holzschrauben mit Stahlkorrosion im Kontakt mit Holz. Bei diesen Schrauben sind der Schaft und auch der vordere Gewindebereich (Schaftfräse und die vorderen 2 Gewindegänge) gleich stark korrodiert (siehe **Bilder 10.8 und 10.11**).
- **Eichenholz**. Bezug genommen wird auf alle unter A2 genannten Holzschrauben mit Stahlkorrosion im Kontakt mit Holz. Bei diesen Überzügen mit Rotrostbildung sind der gesamte Gewinde- und Schaftbereich, also der gesamte Kontaktbereich zum Holz, von gleichstarker Rotrostbildung betroffen (siehe **Bilder 10.8, 10.10 und 10.11**).

Folgerungen zu A3: Einfluss der Oberflächengeometrie (Schaft, Gewinde) bei Kontakt mit Holz

Hinsichtlich des Einflusses der Oberflächengeometrie auf das Korrosionsschutzverhalten der metallischen Überzüge von Holzschrauben im Kontakt mit Holz ist zwischen glattem Schaft und dem Gewinde zu unterscheiden. Dabei ist bei den hier durchgeführten Naturversuchen zu beachten, dass die einzelnen Bereiche entlang der Schraube

seitens der Umgebung (Stadt- bzw. Meeresatmosphäre) und der Holzart (imprägnierte Fichte bzw. Eiche), wie in der Folge ausgeführt, durch die Korrosivität der Bauteilumgebung und auch das Holz selbst unterschiedlich beeinflusst werden. Insofern kann ein ausschließlicher Einfluss der Oberflächengeometrie (Gewinde, glatter Bereich), wie im Salzsprühversuch möglich, nicht betrachtet werden. Es kann nur eine Diskussion im Zusammenhang mit den überlagernden Einflüssen, die auch primär interessiert, erfolgen.

Der Einfluss der Oberflächengeometrie der in Holz eingedrehten Schrauben kann überlagert werden

- in **Stadtatmosphäre** durch den Einfluss von Holzinhaltsstoffen bei imprägnierter Fichte und Eiche (ein Einfluss von korrosionsfördernden Stoffen aus der Bauteilumgebung auf die holzseitige Korrosion ist generell auszuschließen),
- in salzreicher **Meeresatmosphäre** einerseits wie in Stadtatmosphäre durch den Einfluss von Holzinhaltsstoffen (siehe zuvor) und andererseits zusätzlich durch den Einfluss von Chloriden im vorderen Bereich der Holzschraube bei Fichte und imprägnierter Fichte (da in diesen Hölzern Chloride zusammen mit Wasser entlang der Schraube bis zu den vorderen Gewindezähnen eindringen können); dieser Chlorideinfluss entfällt bei Eiche. Auf diese Zusammenhänge wird im Detail in Abschn. 3.3.1 eingegangen.

Tabelle 10.6 verdeutlicht zum besseren Verständnis die Einflüsse auf das Korrosionsverhalten von Schrauben im Kontakt mit Holz. Es wird zwischen Stadt- und Meeresatmosphäre unterschieden. Die Darstellung basiert auf den Ergebnissen in **Tabelle 10.4**.

Einflüsse in Stadtatmosphäre

- Ein Einfluss der **Bauteilumgebung** bezüglich Schadstoffe aus der Atmosphäre auf die Korrosion der Holzschraube ist in der schadstoffarmen Stadtatmosphäre nicht gegeben (**Tabelle 10.6a**, Spalten 1 bis 3).
- Zum Einfluss von **Holzinhaltsstoffen** gilt (**Tabelle 10.6a**, Spalten 4 bis 6):
  - Bei Fichte ist erwartungsgemäß kein Einfluss von Holzinhaltsstoffen vorhanden.
  - Bei imprägnierter Fichte besteht ein solcher Einfluss nur für den vorderen Bereich der Schraube (Schaft und vorderes Gewinde), da hier bei Bewitterung Durchfeuchtungen möglich sind.
  - Bei Eiche beeinflussen die Holzinhaltsstoffe die gesamte Länge der Schraube.

  Der genannte Einfluss von Holzinhaltsstoffen kann wie folgt erklärt werden:
  - Die Korrosion von Schrauben in Fichte ist eine (vom Feuchte- und Sauerstoffzutritt abhängige) Sauerstoffkorrosion, die in imprägnierter Fichte durch die kupferhaltige Imprägnierung in Gegenwart von Wasser verstärkt wird. Der Zutritt von Sauerstoff in die tieferen Holzbereiche könnte jedoch bei bewittertem (feuchten) Holz behindert sein, weshalb die Möglichkeit einer Korrosion mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche dann abnehmen würde.
  - Die Stahlkorrosion in Eiche über die gesamte Schraubenlänge kann als eine vom Sauerstoffzutritt unabhängige Säurekorrosion (holzseitige Ansäuerung) gedeutet werden.

- Ein **Einfluss der Holzart** ist dadurch gegeben, dass beim Eindrehen von Schrauben in Fichte und imprägnierter Fichte die Wahrscheinlichkeit, dass der Oberflächenschutz im Gewindebereich verletzt (abgemindert) wird gering ist, dagegen bei Eiche nicht auszuschließen ist (**Tabelle 10.6a**, Spalten 8 und 9). Die Intensität solcher Verletzungen ist von der Art des Holzes abhängig und bei Eiche (Hartholz) stärker als bei Fichte (Weichholz).

Stadtatmosphäre									
Holzart	Umgebungseinfluss Schadstoffe der Atmosphäre			Holzeinfluss: Inhaltsstoffe (imprägnierte Fichte u. Eiche)			Holzart: Darrdichte/Härte (Fichte, Eiche)		
	Schaft	vorderes Gewinde	hinteres Gewinde	Schaft	vorderes Gewinde	hinteres Gewinde	Schaft	vorderes Gewinde	hinteres Gewinde
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fichte									
imprägn. Fichte									
Eiche									

Tabelle 10.6a

Meeresatmosphäre									
Holzart	Umgebungseinfluss Chloride in der Atmosphäre			Holzeinfluss: Inhaltsstoffe (imprägnierte Fichte u. Eiche)			Holzart: Darrdichte/Härte (Fichte, Eiche)		
	Schaft	vorderes Gewinde	hinteres Gewinde	Schaft	vorderes Gewinde	hinteres Gewinde	Schaft	vorderes Gewinde	hinteres Gewinde
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fichte									
imprägn. Fichte									
Eiche									

vorhanden	nicht vorhanden

Tabelle 10.6b

Tabelle 10.6:
Einflüsse auf das Korrosionsverhalten von Holzschrauben im Kontakt mit Holz in Stadt- (Tabelle 10.6a) und Meeresatmosphäre (Tabelle 10.6b), jeweils mit Bewitterung

Einflüsse in Meeresatmosphäre

- Ein Einfluss der **Bauteilumgebung** bezüglich Schadstoffe (Chloride) in der Atmosphäre auf die Korrosion im vorderen Bereich der Holzschraube trifft deutlich erkennbar nur für Weichholz (Fichte, imprägnierter Fichte, **Tabelle 10.6b**, Spalte 1 und 2) zu (siehe **Bilder 10.8 und 10.11**). Bei Eiche ist ein Chlorideinfluss auf die Korrosion im direkten Kontakt mit dem Holz nicht erkennbar. Die Ursache dieses Verhaltens ist auf das unterschiedliche Eindringen von Chloriden entlang der Holzschrauben im Fichten- bzw. Eichenholz zurückzuführen (Abschn. 3.3.1).
- Zum Einfluss von **Holzinhaltsstoffen** gilt (**Tabelle 10.6b**, Spalten 4 bis 6):
  - Bei Fichte ist erwartungsgemäß kein Einfluss von Holzinhaltsstoffen festzustellen.
  - Bei imprägnierter Fichte besteht ein solcher Einfluss bevorzugt für den vorderen Bereich der Schraube (Schaft und vorderes Gewinde).

- Bei Eiche beeinflussen die Holzinhaltsstoffe die gesamte Länge der Schraube.

  Der genannte Einfluss von Holzinhaltsstoffen kann wie bei Fichte mit Imprägnierung bzw. Eiche in Stadtatmosphäre (siehe oben) durch die stattfindende Sauerstoffkorrosion (imprägnierte Fichte) bzw. Säurekorrosion (holzseitige Ansäuerung bei Eiche) erklärt werden. Die gegenüber der Stadtatmosphäre insgesamt stärkere Korrosion in Meeresatmosphäre bei Kontakt mit Eiche kann nur auf die erhöhte Feuchtigkeit des Eichenholzes in Meeresatmosphäre im Vergleich zu Stadtatmosphäre zurückzuführen sein (siehe **Tabelle 3.3**).

- Auch in Meeresatmosphäre ist ein **Einfluss der Holzart** dadurch gegeben, dass beim Eindrehen von Schrauben in Fichte und imprägnierter Fichte die Wahrscheinlichkeit, dass der Oberflächenschutz im Gewindebereich verletzt wird gering ist, dagegen bei Eiche nicht auszuschließen ist (**Tabelle 10.6b**, Spalten 8 und 9).

Aus den genannten Zusammenhängen folgt, dass bei Schrauben im Kontakt mit Holz, weitgehend unabhängig von der Oberflächengeometrie, die Korrosion des Überzuges an jenen Stellen verstärkt ist (rote Bereiche in **Tabelle 10.6**), wo die Einflüsse aus der Umgebung (Chloride), Holzinhaltsstoffen (Holzschutzmittel, Säure bei Eiche) und Holzart (Weichholz, Hartholz) dominieren.

A4 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre, bewittert.)

Mit Bezug auf die Tabellen in den **Anlagen 10.1 bis 10.6** gilt für den Einfluss der Auslagerungszeit folgende Aussage:

- Zwar nimmt das Ausmaß einer Rotrostbildung mit der Zeit zu, jedoch sind Schwächen im System im Fall eines nicht ausreichenden Korrosionsschutzes in Meeresatmosphäre bereits nach 1,5 Jahren erkennbar. In Stadtatmosphäre sind Unterschiede im Korrosionsschutzverhalten erst nach 3 Jahren, deutlich feststellbar.

- Verbindungsmittel mit stark ausgeprägter Rotrostbildung nach 3 Jahren zeigen im Regelfall auch schon frühzeitig Stahlkorrosion.

A5 Einfluss der Korrosionsuntersuchung: Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte (Konstantklima) und in Meeresatmosphäre (bewittert)

(**Grundlage**: Auslagerung 3 Jahre, Fichte, imprägnierte Fichte und Eiche.)

Die untersuchten metallischen Überzüge können einerseits gegenüber hoher Feuchtigkeit, andererseits auch gegenüber Chloriden in besonderer Weise empfindlich sein. In der hiesigen Arbeit wurden die Holzschrauben bei 100 % relativer Luftfeuchte und 20 °C (Abschn. 9.4.2) und in Meeresatmosphäre untersucht, wobei in der Folge das Verhalten gegenüber beiden Einflüssen verglichen wird. Es wird zwischen atmosphärisch berührtem Kopfbereich und Kontakt zum Holz unterschieden. Mit Bezug auf die Tabellen in den **Anlagen 9.1 bis 9.7** (Konstantklima) bzw. **10.1 bis 10.6** (Meeresatmosphäre) ist in **Tabelle 10.4** das Verhalten der Überzüge in beiden Umgebungen gegenüber gestellt.

A5-1 Kopf im Kontakt mit der umgebenden Atmosphäre

(Vergleiche in **Tabelle 10.4** die Spalten 4 und 7.)

Für die atmosphärisch berührten Köpfe der in Holz eingedrehten Schrauben gilt Folgendes bezüglich des jeweiligen Korrosionsschutzverhaltens der metallischen Überzüge in beiden Umgebungen:

- **Fichte ohne und mit Imprägnierung, Eiche**. Bei korrosionsgeschützten Schraubenköpfen, die in Meeresklima Stahlkorrosion zeigen, ist der Korrosionszustand im Nassklima (100 % relative Luftfeuchte) stets günstiger (die Rotrostbildung ist geringer) (vergleiche hierzu die **Bilder 10.8 bis 10.11** mit den **Bildern 9.4 bis 9.7**).

A5-2 Schaft und Gewinde im Kontakt mit Holz

(Vergleiche in **Tabelle 10.4** die Spalten 5 und 6 mit 8 und 9.)

Für den Schaft und das Gewinde der Schrauben im Kontakt mit Holz gilt Folgendes bezüglich des jeweiligen Korrosionsschutzverhaltens der metallischen Überzüge in beiden Umgebungen:

- **Fichte ohne Imprägnierung**. In **Meeresatmosphäre** ist bei den nicht ausreichend schützenden Systemen (galvanische Verzinkung, ZnAl-Lamallenüberzüge der Firmen 2 und 4) in den oberflächennahen Bereichen (Schaft und vorderes Gewinde) verstärkte Rotrostbildung vorhanden (siehe **Bilder 10.8 und 10.11**). Bei Auslagerung im **Nassklima** zeigen die genannten Korrosionsschutzsysteme dagegen keine Stahlkorrosion im Kontakt mit Holz (Schaft- und Gewindebereich) (siehe **Bilder 9.4 und 9.7**). Diese Aussage stimmt überein mit dem Verhalten der Schraubenköpfe in beiden Atmosphären.

- **Imprägnierte Fichte**. Bei Kontakt mit imprägnierter Fichte ist bei der überwiegenden Anzahl der metallischen Überzüge in beiden Umgebungen (Meeresatmosphäre, Nassklima) mit verstärkter Stahlkorrosion zu rechnen.

  Bei galvanischen ZnNi-Überzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 1 ist das Verhalten im Nassklima tendenzmäßig ungünstiger (vergleiche hierzu die **Bilder 10.9 und 10.10** mit den **Bildern 9.5 und 9.6**).

  Ein wesentlicher Unterschied zum Verhalten in beiden Umgebungen besteht allerdings darin, dass in Meeresatmosphäre stets lediglich Schaft und vorderer Gewindebereich Stahlkorrosion zeigen, während im Nassklima neben dem Schaft die gesamte Länge des Gewindes gleichstark rotrostbehaftet ist.

- **Eiche**. Bei Kontakt sämtlicher korrosionsgeschützter Holzschrauben mit Eiche besteht im Korrosionsverhalten kein Unterschied zwischen einer Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte und in Meeresatmosphäre. Die Rotrostbildung ist bei nicht ausreichend schützenden Überzügen (alle Überzüge außer die Feuerverzinkung) über die gesamte Schraubenlänge in beiden Umgebungen stark ausgeprägt (vergleiche hierzu die **Bilder 10.8 bis 10.11** mit den **Bildern 9.4 bis 9.7**).

Für beide Umgebungen (Meeresatmosphäre und Nassklima) gilt, dass die Korrosionsintensität in der Reihenfolge Fichte - imprägnierte Fichte - Eiche zunimmt.

Fazit. Diese Ergebnisse für den unmittelbaren Kontakt der Schrauben mit dem Holz lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für Schrauben in **Fichte ohne Imprägnierung** ist die Meeresatmosphäre somit kritischer als das Nassklima.
- Für Schrauben in **Fichte mit Imprägnierung** wirkt sich das Nassklima dagegen, bezogen auf die Gesamtlänge der Schrauben, ungünstiger aus als die Meeresatmosphäre.
- In **Eiche** wirken sich Meeresatmosphäre und Nassklima dagegen gleichermaßen stark korrosionsfördernd aus.

Bild 10.7:
Kleinteil(feuer)verzinkte Holzschrauben nach 3 jähriger Auslagerung in Meeresklima (beregnet)

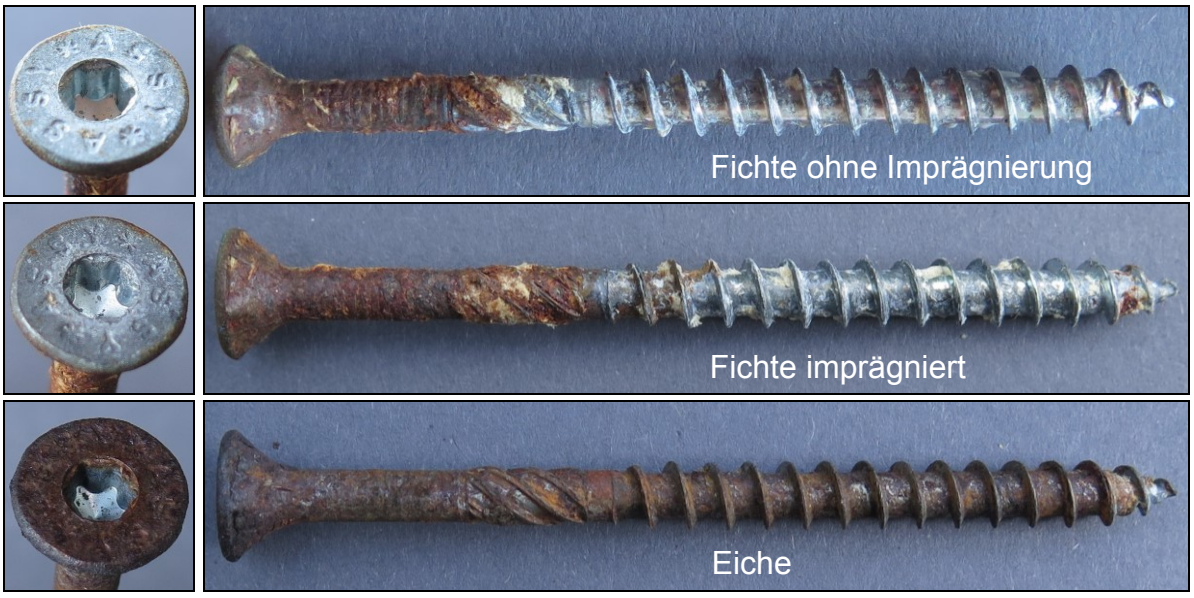


Bild 10.8:
Holzschrauben mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 nach 3 jähriger Auslagerung in Meeresklima (beregnet)

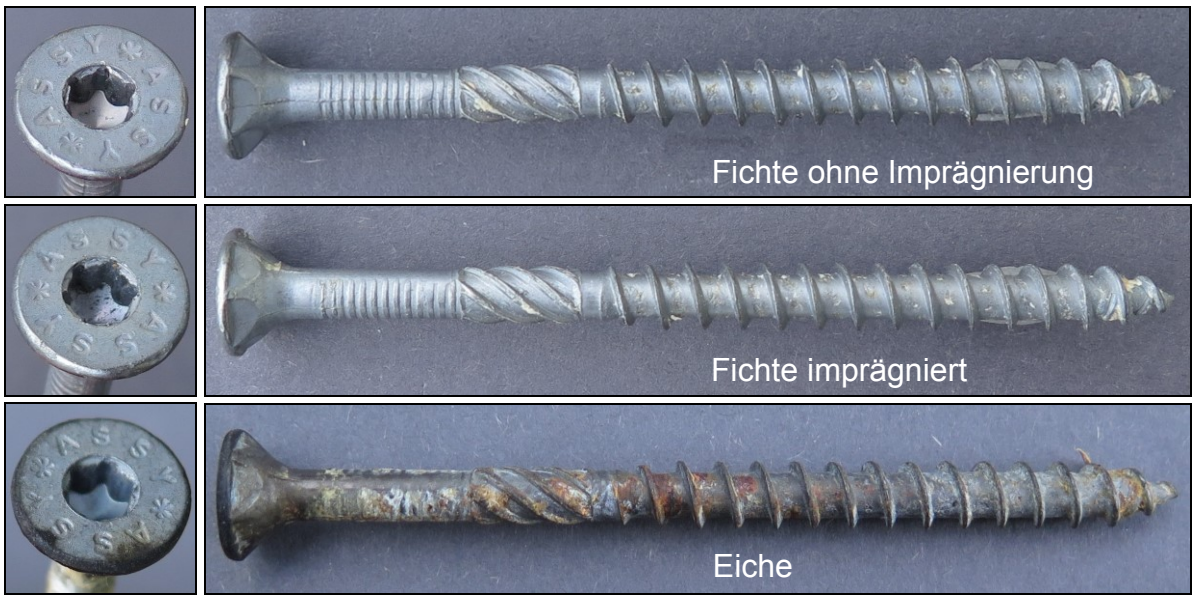


Bild 10.9:
Holzschrauben (Lieferung 2) mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 nach 3 jähriger Auslagerung in Meeresklima (beregnet)

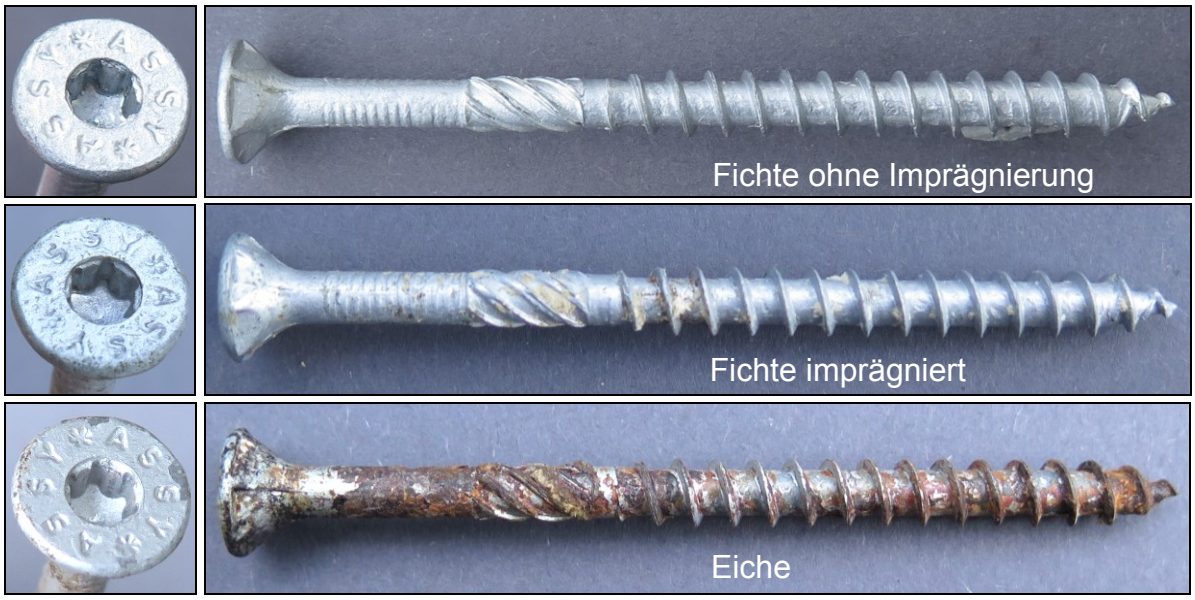


Bild 10.10:
Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung plus Blaupassivierung) nach 3 jähriger Auslagerung in Meeresklima (beregnet)

Folgerungen zu A5: Einfluss der Korrosionsuntersuchung: Auslagerung bei 100 % relativer Luftfeuchte (Konstantklima) und in Meeresatmosphäre (bewittert)

Bei den Holzschrauben gelten zum Einfluss einer korrosionsfördernden Umgebung folgende Gesichtspunkte:

- **Meeresatmosphäre**. Der Schadstoffgehalt der Umgebung (Meeresaerosole) intensiviert eine Korrosion bevorzugt im vorderen Bereich von Schrauben (Kopf, Schaft, vorderes Gewinde), die in Weichholz (**Fichte und imprägnierte Fichte**) eingedreht sind.

- **Nassklima**. Eine erhöhte Feuchte kann im **Fichtenholz** die nachteilige Wirkung einer korrosionsfördernden kupferhaltigen Imprägnierung, entlang der gesamten Schraubenlänge verstärken.

  In **Eichenholz** wirkt sich der erhöhte Säuregehalt des Holzes in Meeresatmosphäre und Nassklima entlang der gesamten Schraubenlänge gleichermaßen stark korrosionsfördernd aus und ermöglichen eine vom Sauerstoff unabhängige Säurekorrosion. Offenbar reicht das in beiden Fällen (Meeresatmosphäre, Nassklima) im Holz vorhandene ungebundene Wasser aus, dass die an die Zellulose gebundenen Ester hydrolysieren und die Säure freisetzen können.

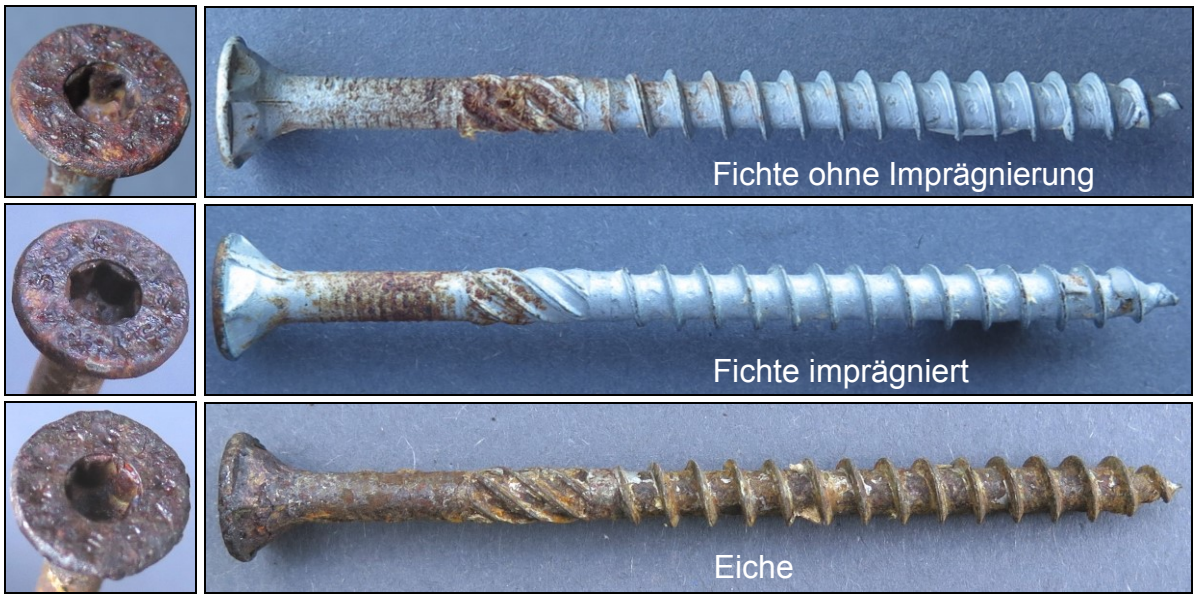


Bild 10.11:
Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (ohne Haftvermittler) nach 3 jähriger Auslagerung in Meeresklima (beregnet)

A6 Vergleich: metallische Überzüge / nichtrostender Stahl 1.4567

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, bewittert. Siehe **Tabelle 10.4**.)

Bei Kontakt mit bewittertem Holz (Schaft und Gewinde) ist die Dauerhaftigkeit für die meisten Schutzsysteme (ausgenommen Feuerverzinkung und galvanischer ZnNi-Überzug) deutlich geringer als bei nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II. Beim Schraubenkopf in Meeresatmosphäre kommt es allerdings bei den nichtrostenden Holzschrauben innerhalb von 3 Jahren zu Korrosion.

Folgerungen zu A6: Vergleich: metallische Überzüge / nichtrostender Stahl 1.4567

Aus hiesiger Sicht empfehlen sich daher für Holzschrauben in Bauholz (Fichte ohne und mit Imprägnierung), sowohl in Stadt- als auch Meeresatmosphäre anstelle von nichtrostendem Stahl als Korrosionsschutz auch eine Feuerverzinkung, galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 1.

Da der nichtrostende Stahl der Werkstoffnummer 1.4567 einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II außerhalb des Holzes (Schraubenkopf) sich auch bei direkter Bewitterung in Meeresatmosphäre als nicht ausreichend erwies, wäre hier ein höherwertigerer Stahl, z. B. 1.4401, zu empfehlen (siehe auch Abschnitt 6.4). Bei Nichtbewitterung wäre, wegen mögliche Aufkonzentration von Chloriden, sogar ein stärkerer Angriff zu erwarten.

10.4.3 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Bohrschrauben

In der Folge werden die bei atmosphärischer Korrosion an Bohrschrauben (**Bild 7.3**) der Lieferung 2 erzielten Ergebnisse nach den in Abschn. 10.4.1 genannten Bewertungskriterien im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Art des Korrosionsschutzes,
- Oberflächengeometrie der Bohrschraube (Kopf, Gewinde),
- Ort der Auslagerung: Stadt- und Meeresatmosphäre,
- Dauer der Auslagerung.

Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten werden beispielhaft durch die **Bilder 10.12 und 10.13** belegt. Das Korrosionsverhalten von in Aluminiumblech eingedrehten Bohrschrauben nach 3 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (bewittert und nicht bewittert) wird in einer Übersicht in **Tabelle 10.7** dargestellt. Die Tabelle fasst die Aussagen in den Detailtabellen in den **Anlagen 10.9 bis 10.14 und 10.17 bis 10.22** zusammen.

B1 Einfluss des Schutzsystems

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert / beregnet. Siehe **Tabelle 10.7**, Spalten 3 und 4.)

Das Korrosionsschutzverhalten der einzelnen metallischen Überzüge wird wie bei den Holzschrauben am Beispiel des Verhaltens in Meeresatmosphäre dargestellt, wobei zwischen bewittert und nicht bewittert unterschieden wird.

Bei den nicht bewitterten und bewitterten Bohrschrauben in Meeresatmosphäre sind nur jene Systeme (galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4) rotrostbehaftet, die im Kopf- und Gewindebereich sehr dünne Schichtdicken (Schichtdicke beim Gewinde: i.M. 1 µm bzw. 3 µm) und Nullstellen aufweisen (siehe **Tabelle 8.6** und **Tabelle 8.14**). In Einzelnen gilt:

- **Galvanische ZnNi-Überzüge**. In Aluminiumblech eingedrehte Bohrschrauben mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 zeigen bei extrem geringer Schichtdicke im Gewindebereich sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.12**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Die in Aluminiumblech eingedrehten Bohrschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (ohne Haftvermittler und geringer Schichtdicke) zeigen sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.13**). Alle übrigen ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 1, 2, 3 und 6 mit deutlich höheren Dicken der Überzüge (i.M. 7 bis 9 µm beim Kopf und Gewinde) weisen keinen Stahlangriff auf.

Auslagerung / Korrosionsschutz		Stadtatmosphäre		Meeresatmosphäre		100 % relative Luftfeuchte	
		Kopf	Gewinde	Kopf	Gewinde	Kopf	Gewinde
		1	2	3	4	5	6
nicht bewittert	ZnNi dick	4	1	4	1	4	1
	ZnAl Fa.1[1)]	9	8	9	8	9	8
	ZnAl Fa.1[2)]	9	8	9	8	9	8
	ZnAl Fa.2	8	7	8	7	8	7
	ZnAl Fa.3	7	9	7	9	7	9
	ZnAl Fa.4	4	3	4	3	4	3
	ZnAl Fa.6	9	9	9	9	9	9
bewittert	ZnNi dick	4	1	4	1	4	1
	ZnAl Fa.1[1)]	9	8	9	8	9	8
	ZnAl Fa.1[2)]	9	8	9	8	9	8
	ZnAl Fa.2	8	7	8	7	8	7
	ZnAl Fa.3	7	9	7	9	7	9
	ZnAl Fa.4	4	3	4	3	4	3
	ZnAl Fa.6	9	9	9	9	9	9

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 10.7:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Bohrschrauben (Lieferung 2) nach 3 jähriger Auslagerung in Stadtatmosphäre (mit und ohne Bewitterung), Meeresatmosphäre (mit und ohne Bewitterung) und 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

Folgerungen zu B1: Einfluss des Schutzsystems

Bei den besonders stark belasteten Gewinden der Bohrschrauben erweisen sich die ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1 bis 3 und 6 (mit ZnAl-Lamellenüberzügen von i.M. 7 bis 9 µm für Kopf und Gewinde) im Kontakt mit Meeresatmosphäre gegenüber dem ZnNi-Überzug und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4 hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit überlegen. Die unterlegenen Systeme haben im Gewindebereich nur sehr geringe Zinkauflagen von i.M. 1 µm (ZnNi) bzw. 3 µm (ZnAl) und Streuungen bis 0 µm sowie im Fall des ZnAl-Lamellenüberzuges auch keinen zusätzlichen Haftvermittler. Dieser Sachverhalt ist bei der extremen Beanspruchung wie beim Bohren ein wesentlicher Nachteil.

Die zusätzliche dünne **Deckbeschichtung** 3 beim ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, die beim Bohren der Bohrschraube in das Blech im Gewindebereich stark beansprucht und dabei zwangsläufig beschädigt wird, zeigt offenbar keine korrosionsschützende Wirkung.

Die Befunde lassen klar erkennen, dass bei Trommelware ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge von im Mittel nur sehr wenigen Mikrometern Dicke bei gleichzeitigen starken Schichtdickenschwankungen mit Nullstellen nur einen unzureichenden Korrosi-

onsschutz bieten, insbesondere wenn die Oberflächen anwendungsbedingt zusätzlich stark mechanisch beansprucht werden. Bei ZnAl-Lamellenüberzügen ist dieser Umstand vor allem dann problematisch, wenn kein Haftvermittler zur Anwendung kommt. Dabei spielt keine Rolle, ob die Bohrschrauben in Meeresatmosphäre bewittert oder nicht bewittert werden. Im Prinzip gilt diese Aussage auch bei Exposition in Stadtatmosphäre.

B2 Einfluss der Oberflächengeometrie (Kopf, Gewinde)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert / beregnet. Vergleiche in **Tabelle 10.7** die Spalten 3 und 4.)

- Von den unter B1 genannten, von Stahlkorrosion betroffenen galvanischen **ZnNi-Überzügen** zeigen die beim Eindrehen beanspruchten Gewinde mit extrem geringer bzw. geringer Schichtdicke (i.M. 1 µm), nicht jedoch die Köpfe (Schichtdicke i.M. 4 µm), stark ausgeprägten Rotrost (siehe **Bild 10.12**).
- Bei den ebenfalls rotrostbehafteten **ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4** (mit umfangreichen Nullstellen beim Überzug) sind Kopf (Mittelwert der Schichtdicke 4 µm) und Gewinde (Mittelwert der Schichtdicke 3 µm) nahezu gleichstark rotrostbehaftet (siehe **Bild 10.13**).

Folgerungen zu B2: Einfluss der Oberflächengeometrie (Kopf, Gewinde)

Seitens der Oberflächengeometrie gilt, dass bei Bohrschrauben vor allem die Gewinde zu frühzeitiger Stahlkorrosion neigen. Wie in Abschn. 11 (Salzsprühtests) ausgeführt wurde, ist dieser Gewindeeinfluss einerseits zurückzuführen

- auf materialbedingte Einflüsse (Oberflächenfehler beim Stahl zwischen den Gewindezähnen)
- und auf die Verhältnisse beim Trommelverfahren (im Mittel sehr geringe Überzugsdicken, besonders bei den Gewinden, und Schichtdickenschwankungen) zurückzuführen, also auf herstellungsbedingte Einflüsse (siehe oben und Abschn. 8).
- Andererseits ist bei den stark beanspruchten Gewinden der Bohrschrauben von einer erheblichen zusätzlichen Beschädigung der Überzüge beim Einbau auszugehen.

B3 Einfluss des Auslagerungsortes (Stadt- bzw. Meeresatmosphäre)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert / beregnet. Vergleiche in **Tabelle 10.7** die Spalten 1 und 2 mit 3 und 4.)

Bei den unter B1 genannten Systemen mit sehr geringer bzw. geringer Überzugsdicke (galvanische ZnNi-Überzüge, ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4) ist die Intensität der Stahlkorrosion der Bohrschraube in Stadtatmosphäre tendenziell zwar etwas geringer als in Meeresatmosphäre. Allerdings ist der Korrosionsschutz in beiden Fällen, also auch für die Stadtatmosphäre, völlig unzureichend. Bei den von Stahlkorrosion betroffenen anfälligeren Schrauben mit insgesamt nur geringer bzw. sehr geringer Dicke des metallischen Überzuges besteht bezüglich (der stark bis sehr stark ausgeprägten) Rotrostbildung sowohl bei Auslagerung in Stadt-, als auch Meeresatmosphäre kein grundlegender Unterschied zwischen nicht bewitterten und bewitterten Schrauben.

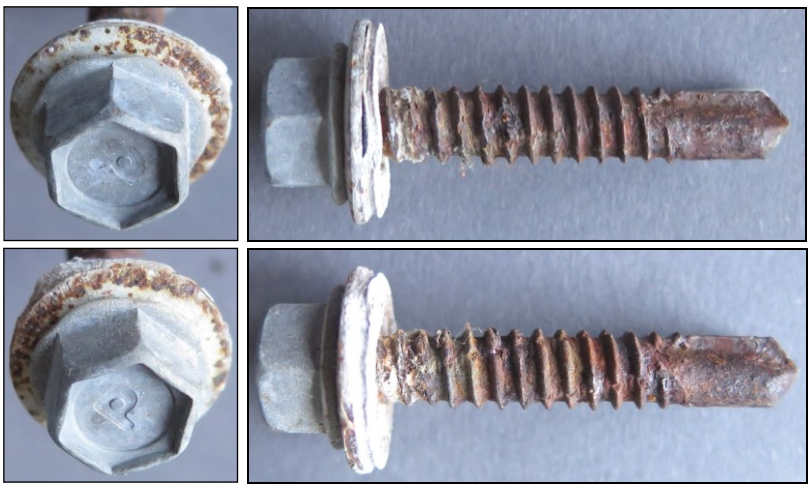


Bild 10.12:
In Aluminiumblech eingedrehte Bohrschraube mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 nach Auslagerung im Meeresklima (nicht beregnet);
oben nach 1,5 Jahren, unten nach 3 Jahren

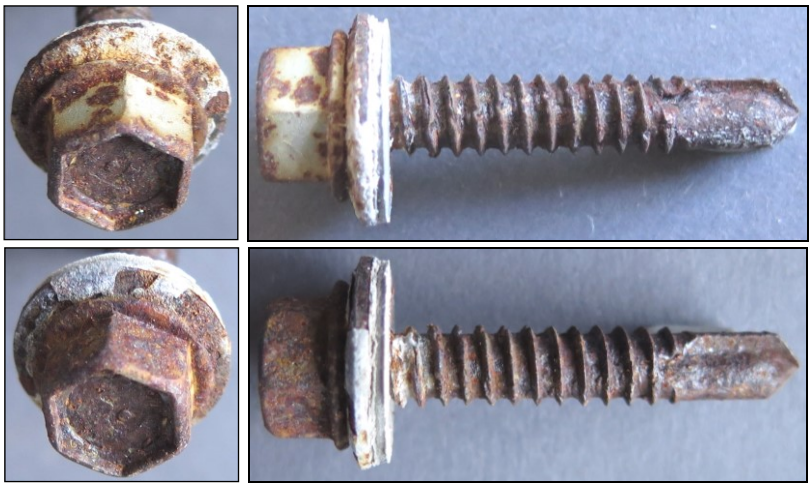


Bild 10.13:
In Aluminiumblech eingedrehte Bohrschraube mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach Auslagerung im Meeresklima (nicht beregnet);
oben nach 1,5 Jahren, unten nach 3 Jahren

Folgerungen zu B3: Einfluss des Auslagerungsortes (Stadt- bzw. Meeresatmosphäre)

Falls die Überzugsdicke bei galvanischen ZnNi-Überzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen nur wenige Mikrometer beträgt, dann ist die Korrosionsschutzwirkung insbesondere der beim Eindrehen stark mechanisch belasteten Gewinde in bewitterter und nicht bewitterter Stadt- und Meeresatmosphäre gleichermaßen unzureichend.

B4 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert/beregnet. Vergleiche die Angaben für 1,5 und 3,0 Jahre in den **Anlagen 10.9, 10.13, 10.17 und 10.21**.)

Bei den unter B1 genannten nicht ausreichend schützenden Korrosionsschutzsystemen

(galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4) ist starke Korrosionsanfälligkeit sowohl in Stadtatmosphäre, jedoch besonders in Meeresatmosphäre, bereits nach 1,5 Jahren feststellbar (siehe **Bilder 10.12 und 10.13**).

B5 Vergleich der Ergebnisse in Meeresatmosphäre und bei 100 % relativer Luftfeuchte

(**Grundlage**: Kopf- und Gewindebereich, Auslagerung 3 Jahre in Meeresatmosphäre (mit und ohne Bewitterung) und bei 100 % relativer Luftfeuchte. Vergleiche in **Tabelle 10.7** die Spalten 3 und 4 mit 5 und 6.)

Bei den wegen geringer Auflagen (Schichtdicke i.M. 4 µm) anfälligen Korrosionsschutzsystemen galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 4 zeigen am **Kopf** ausschließlich die in Meeresatmosphäre ausgelagerten Schrauben (ZnAl) starke Rotrostbildung, nicht jedoch jene im Nassklima (vergleiche **Bild 10.13 mit Bild 9.9**).

Im stark beanspruchten **Gewindebereich** mit Schichtdicken von i.M. 1 µm (ZnNi-Überzug) bzw. 3 µm (ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4) ist die Rotrostbildung im Fall beider genannter Korrosionsschutzsysteme bei einer Auslagerung in Meeresatmosphäre und im Nassklima gleichermaßen sehr stark ausgeprägt (vergleiche die **Bilder 10.12 und 10.13** mit den **Bildern 9.8 und 9.9**).

Folgerungen zu B5: Vergleich der Ergebnisse in Meeresatmosphäre und bei 100 % relativer Luftfeuchte

Bei den hiesigen, im Trommelverfahren korrosionsgeschützten Bohrschrauben, treffen sehr dünne Auflagen mit Nullstellen und extreme Beanspruchung beim Einschrauben zusammen. Unter solchen Randbedingungen ist sowohl in Stadt- als auch Meeresatmosphäre als auch im Nassklima frühzeitige Stahlkorrosion zu erwarten.

10.4.4 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Spreizdübeln

In der Folge werden die an in Beton eingesetzten Spreizdübeln (**Bild 7.4**) der Lieferung 2 erzielten Ergebnisse im Hinblick auf folgende Einflüsse ausgewertet:

- Beton bewittert im Vergleich zu Beton nicht bewittert,
- Dübelabschnitt außerhalb des Bohrlochs im Vergleich zu Dübelabschnitt im Bohrloch (offen bzw. geschlossen),
- Art des Korrosionsschutzes,
- Oberflächengeometrie des Dübels im Bohrloch (Gewinde, glatter Abschnitt),
- Ort der Auslagerung: Stadt- bzw. Meeresatmosphäre,
- Dauer der Auslagerung.

Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten werden beispielhaft durch die **Bilder 10.14 bis 10.18** belegt. Diese zeigen das Korrosionsschutzverhalten unter den kritischsten Bedingungen (Meeresatmosphäre, offenes Bohrloch). Das Korrosionsverhalten der Spreizdübel mit metallischen Überzügen und aus nichtrostendem Stahl 1.4301 nach 3 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre wird in einer

Übersicht in **Tabelle 10.8a** (Beton nicht bewittert) und **Tabelle 10.8b** (Beton bewittert) dargestellt. Die Tabellen fassen die Aussagen in den Detailtabellen in den **Anlagen 10.7 bis 10.13 und 10.15 bis 10.21** zusammen.

Zwecks besserer Übersicht zur weiteren Vorgehensweise werden die untersuchten Parameter für den Bereich der metallischen Überzüge in der folgenden Übersicht dargestellt.

<table>
<tr><td colspan="2">C1 Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre (Stadt- und Meeresatmosphäre)</td></tr>
<tr><td colspan="2">C1-1 Vergleich: Dübel (Mutter und Gewinde) außerhalb des Bohrloches und Dübel (Gewinde und glatter Abschnitt des Gewindebolzens) im Bohrloch</td></tr>
<tr><td>Beton nicht bewittert
- offenes Bohrloch
- geschlossenes Bohrloch</td><td>Beton bewittert
- offenes Bohrloch
- geschlossenes Bohrloch</td></tr>
<tr><td colspan="2">C1-2 Vergleich: Bohrloch offen und Bohrloch geschlossen (Beton nicht bewittert und bewittert)</td></tr>
<tr><td colspan="2">C1-3 Vergleich: Beton nicht bewittert und Beton bewittert</td></tr>
<tr><td>Mutter und Gewinde außerhalb des Bohrloches</td><td>Gewinde und glatter Abschnitt im Bohrloch</td></tr>
<tr><td colspan="2">Folgerungen zu C1: Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre (Stadt- und Meeresatmosphäre)</td></tr>
<tr><td colspan="2">C2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen in Meeresamosphäre am Beispiel des offenen Bohrloches</td></tr>
<tr><td colspan="2">C2-1 Verhalten der Schutzsysteme</td></tr>
<tr><td>Beton nicht bewittert</td><td>Beton bewittert</td></tr>
<tr><td colspan="2">C2-2 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel (beide mit Dickschichtpassivierung)
Beton bewittert</td></tr>
<tr><td colspan="2">C2-3 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung
Beton nicht bewittert und bewittert</td></tr>
<tr><td colspan="2">Folgerungen zu C2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen</td></tr>
<tr><td colspan="2">C3 Einfluss der Oberflächengeometrie</td></tr>
<tr><td>Beton nicht bewittert</td><td>Beton bewittert</td></tr>
<tr><td colspan="2">Folgerungen zu C3: Einfluss der Oberflächengeometrie</td></tr>
<tr><td colspan="2">C4 Vergleich: Stadt-, Meeresatmosphäre und 100 % relative Luftfeuchte
Nicht bewittert und bewittert</td></tr>
<tr><td colspan="2">Folgerungen zu C4: Vergleich: Stadt-, Meeresatmosphäre und 100 % relative Luftfeuchte</td></tr>
</table>

C5 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

C6 Vergleich: metallische Überzüge / nichtrostender Stahl 1.4301

Folgerungen zu C6: Vergleich: metallische Überzüge / nichtrostender Stahl 1.4301

Auslagerung / Korrosionsschutz		Stadtatmosphäre			Meeresatmosphäre			100 % relative Luftfeuchte		
		äußere Atmos-phäre	im Bohrloch		äußere Atmos-phäre	im Bohrloch		äußere Atmos-phäre	im Bohrloch	
		Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
nicht bewittert, Bohrloch offen	Feuerverz.	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40
	galv. Verz.	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. blau	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. gelb	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. dick	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	ZnNi dick	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8
	ZnAl Fa.1[1)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8
	ZnAl Fa.1[2)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8
	ZnAl Fa.2	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9
	ZnAl Fa.3	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8
	ZnAl Fa.4	3 / 5	3	7	3 / 5	3	7	3 / 5	3	7
	1.4301									
nicht bewittert, Bohrloch geschlossen	Feuerverz.	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40	Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert		
	galv. Verz.	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	galv. blau	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	galv. gelb	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	galv. dick	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	ZnNi dick	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8			
	ZnAl Fa.1[1)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8			
	ZnAl Fa.1[2)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8			
	ZnAl Fa.2	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9			
	ZnAl Fa.3	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8			
	ZnAl Fa.4	3 / 5	3	7	3 / 5	3	7			
	1.4301									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 10.8a:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Spreizdübel (Lieferung 2) nach 3 jähriger Auslagerung (nicht bewittert) in Stadt- und Meeresatmosphäre und bei 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

In der Folge werden in den Unterabschnitten C1 bis C5 zunächst die metallischen Überzüge abgehandelt. Zur Korrosionsschutzwirkung des nichtrostenden Stahls im Vergleich zu den metallischen Überzügen wird unter C6 Stellung genommen.

Auslagerung / Korrosionsschutz		Stadtatmosphäre			Meeresatmosphäre			100 % relative Luftfeuchte		
		äußere Atmos-phäre	im Bohrloch		äußere Atmos-phäre	im Bohrloch		äußere Atmos-phäre	im Bohrloch	
		Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde / Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
bewittert, Bohrloch offen	Feuerverz.	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40
	galv. Verz.	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. blau	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. gelb	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	galv. dick	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4
	ZnNi dick	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8
	ZnAl Fa.1[1)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8
	ZnAl Fa.1[2)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8
	ZnAl Fa.2	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9
	ZnAl Fa.3	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8
	ZnAl Fa.4	3 / 5	3	7	3 / 5	3	7	3 / 4	3	7
	1.4301									
bewittert, Bohrloch geschlossen	Feuerverz.	50 / 55	50	40	50 / 55	50	40	Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert		
	galv. Verz.	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	galv. blau	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	galv. gelb	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	galv. dick	5 / 10	5	4	5 / 10	5	4			
	ZnNi dick	8 / 11	8	8	8 / 11	8	8			
	ZnAl Fa.1[3)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8			
	ZnAl Fa.1[4)]	7 / 13	7	8	7 / 13	7	8			
	ZnAl Fa.2	8 / 16	8	9	8 / 16	8	9			
	ZnAl Fa.3	7 / 12	7	8	7 / 12	7	8			
	ZnAl Fa.4	3 / 5	3	7	3 / 5	3	7			
	1.4301									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
[2)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8

Tabelle 10.8b:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Spreizdübel (Lieferung 2) nach 3 jähriger Auslagerung (bewittert) in Stadt- und Meeresatmosphäre und bei 100 % relativer Luftfeuchte in einer Übersicht

C1 Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre (Stadt- und Meeresatmosphäre)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert.)

C1-1 Vergleich: Dübel (Mutter und Gewinde) außerhalb des Bohrloches und Dübel (Gewinde und glatter Abschnitt des Gewindebolzens) im Bohrloch

Die nachfolgenden Ausführungen für den nicht bewitterten und bewitterten Beton gelten sowohl für **Stadtatmosphäre** als auch **Meeresatmosphäre**.

Beton nicht bewittert, offenes Bohrloch

(Vergleiche in **Tabelle 10.8a oben** die Spalte 1 mit den Spalten 2 und 3 bzw. die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

- Bei dem korrosionsanfälligeren System **ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4** (siehe C2) zeigen Gewinde und Mutter außerhalb des Bohrloches (Spalten 1 und 4) und Gewinde in der Atmosphäre des nach außen offenen Bohrloches (Spalten 2 und 5) gleichermaßen sehr starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.18 oben**).
- Bei anderen Systemen mit Stahlkorrosion (**galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge** (**ohne und mit Passivierung**) (siehe **Bilder 10.15 und 10.16, oben**) **und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 2**) ist die Rotrostbildung in Stadt- und Meeresatmosphäre bei Gewinde und glattem Abschnitt im Bohrloch eher stärker als bei Gewinde und Mutter außerhalb des Bohrloches.

Beton nicht bewittert, geschlossenes Bohrloch

(Vergleiche in **Tabelle 10.8a unten** die Spalte 1 mit den Spalten 2 und 3 bzw. die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

- Bei nicht bewitterten Spreizdübeln im geschlossenem Bohrloch wurde nach 3 Jahren bei keinem der untersuchten Korrosionsschutzsysteme sowohl in Stadt-, als auch Meeresatmosphäre bei Dübelabschnitten im Bohrloch Stahlkorrosion festgestellt.

  Außerhalb des Bohrloches besteht Übereinstimmung mit dem Korrosionsverhalten beim offenen Bohrloch (siehe Ausführungen zuvor).

Beton bewittert, offenes Bohrloch

(Vergleiche in **Tabelle 10.8b oben** die Spalte 1 mit den Spalten 2 und 3 bzw. die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

- Bei dem korrosionsanfälligeren System **ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4** (siehe C2) zeigen bei Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre Gewinde und Mutter außerhalb des Bohrloches und Gewinde in der Atmosphäre des nach außen offenen Bohrloches gleichermaßen starke Rotrostbildung (siehe **Bild 10.18 unten**).
- Bei anderen Systemen mit Stahlkorrosion (**galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge** (**ohne und mit Passivierung**) **und ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1 bis 3**) ist die Rotrostbildung in Stadt- und Meeresatmosphäre bei Gewinde und glattem Abschnitt im Bohrloch eher stärker als bei Gewinde und Mutter außerhalb des Bohrloches (siehe **Bilder 10.15 bis 10.17, unten**).
- Unter den kritischsten Korrosionsbedingungen (Korrosionsbeanspruchung im offenen Bohrloch bei Bewitterung in Meeresatmosphäre) ist von den metallischen Überzügen nur der feuerverzinkte Dübel frei von Stahlkorrosion (siehe **Bild 10.14 unten**).

Beton bewittert, geschlossenes Bohrloch

(Vergleiche in **Tabelle 10.8b unten** die Spalte 1 mit den Spalten 2 und 3 bzw. die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

- Bei bewitterten Spreizdübeln mit geschlossenem Bohrloch wurde nach 3 Jahren Stahlkorrosion nur bei dem **ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4** sowohl bei unmit-

telbarem Kontakt mit Stadt- und Meeresatmosphäre (Gewinde und Mutter außerhalb des Bohrloches) als auch im Bohrloch festgestellt.

- **Alle anderen Schutzsysteme** sind sowohl außerhalb als auch innerhalb des geschlossenen Bohrloches sowohl in Stadt-, als auch in Meeresatmosphäre frei von Stahlkorrosion.

C1-2 Vergleich: Bohrloch offen und Bohrloch geschlossen

(Vergleiche in den **Tabellen 10.8a und 10.8b** jeweils die obere Teiltabelle mit der unteren.)

Bei diesem Vergleich ist nur das Verhalten **innerhalb des Bohrloches** von Interesse (außerhalb des Bohrloches ist bezüglich der Korrosion kein Unterschied zwischen Bohrloch offen und Bohrloch geschlossen zu erwarten und vorhanden).

- Sowohl beim nicht bewitterten, vor allem aber beim bewitterten Beton ist die Rotrostbildung bzw. der Abtrag des Überzuges im offenen Bohrloch stets wesentlich stärker als im geschlossenen Bohrloch. Dies gilt sowohl für die Stadt- als auch Meeresatmosphäre.

C1-3 Vergleich: Beton nicht bewittert und Beton bewittert

(Vergleiche die Ergebnisse in den **Tabellen 10.8a** mit jenen in **Tabelle 10.8b**.)

Mutter und Gewinde außerhalb des Bohrloches

- Bei Mutter und Gewinde außerhalb des Bohrlochs besteht nach 3 Jahren in Stadt- und Meeresatmosphäre im Regelfall noch kein augenscheinlich erkennbarer Unterschied im Korrosionsschutzverhalten der Überzüge zwischen nicht bewittertem und bewittertem Beton (siehe **Bilder 10.14 bis 10.18**). Stichprobenartige metallographische Untersuchungen konnten allerdings zeigen, dass der Korrosionsabtrag im Meeresbereich beim nicht bewitterten (nicht beregneten) Überzug bereits deutlich stärker ist als beim bewitterten Überzug (siehe Abschn. 10.5).

Gewinde und glatter Abschnitt im Bohrloch

- Im **geschlossenen Bohrloch** besteht nach Auslagerung bis zu 3 Jahren kein erkennbarer Unterschied im Korrosionsschutzverhalten der Überzüge zwischen bewittertem und nicht bewittertem Beton. Sowohl in Stadt- als auch Meeresatmosphäre sind die Überzüge überwiegend frei von Rotrost.
- Im **offenen Bohrloch** ist Rotrostbildung im Regelfall beim bewitterten Beton erheblich stärker ausgeprägt bzw. vorhanden als beim nicht bewitterten Beton (siehe **Bilder 10.15, 10.17 und 10.18**).

Folgerungen zu C1: Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Bohrlochatmosphäre (Stadt- und Meeresatmosphäre)

Die Korrosionsintensität entlang des Spreizdübels nimmt im Mittel der untersuchten Korrosionsschutzvarianten sowohl in Stadt- als auch in Meeresatmosphäre in folgender Reihenfolge zu:

a. **Sehr gering**:
Dübelbereiche im geschlossen Bohrloch (nicht bewittert und bewittert).

b. **Gering**:
Dübelbereiche außerhalb des Bohrloches (nicht bewittert und bewittert).

c. **Mäßig stark**:
Dübelbereiche im offenen Bohrloch (nicht bewittert).

d. **Stark**:
Dübelbereiche im offenen Bohrloch (bewittert, Stadtatmosphäre).

e. **Sehr stark**:
Dübelbereiche im offenen Bohrloch (bewittert, Meeresatmosphäre).

Vergleich offenes und geschlossenes Bohrloch (Beton jeweils nicht bewittert oder bewittert). Stahlkorrosion findet am ehesten beim glatten Abschnitt und Gewinde im bewitterten, nach außen offenen Bohrloch (Bez. d. und e.) statt und zwar sowohl in Stadt-, als auch Meeresatmosphäre. Im geschlossenen Bohrloch (nicht bewittert und bewittert, Bez. a.) ist die Korrosionsintensität des Überzuges deutlich geringer.

Aus hiesiger Sicht kann der stärkere Abtrag der metallischen Überzüge der Dübel in bewitterten Betonbauteilen mit offenem Bohrloch dadurch erklärt werden, dass bei den geneigt gelagerten Bauteilen (**Bild 10.5**) wiederholt bei **Beregnung** Flüssigwasser in die nach oben offenen Bohrlöcher, der waagerecht gelagerten Bauteilen eindringt. Es ist davon auszugehen, dass bei senkrechter Lagerung der Bauteile das Korrosionsverhalten auch bei bewitterten Bauten mit offenem Bohrloch günstiger ist, weil ein Eindringen von Flüssigwasser eher behindert ist.

Der **Wasserdampfgehalt** (Luftfeuchte) in der Bohrlochatmosphäre kann nicht als wesentliche Ursache für die erheblich stärkere Korrosion im offenen Bohrloch bewitterter Bauteile genannt werden:

- Zwar ist die Luftfeuchte im offenen Bohrloch eines bewitterten Betons deutlich höher als bei einem nicht bewittertem Beton,
- jedoch ist auch der Wasserdampfgehalt im geschlossenen Bohrloch eines bewitterten Betons hoch (Abschn. 7.3.3, **Tabelle 7.1**).

Vergleich: Stadt- und Meeresatmosphäre. Die Stahlkorrosion im offenen Bohrloch des nicht bewitterten und bewitterten Betons ist in Meeresatmosphäre eher stärker als in Stadtatmosphäre. Beim geschlossenen Bohrloch ist das Korrosionsverhalten beim nicht bewitterten und bewittertem Beton in Stadt- und Meeresatmosphäre praktisch identisch und überwiegend gleichermaßen gut.

Die starke Korrosion im bewitterten offenen Bohrloch in Meeresatmosphäre kann vor allem durch Chlorideinfluss erklärt werden. In Meeresatmosphäre wurden im offenen Bohrloch von bewitterten Betonkörpern Chloride festgestellt, nicht jedoch im nicht bewitterten offenen Bohrloch (Abschn. 7.3.3, Chloridgehalte im Bohrloch). Die Chloride dringen demnach nur zusammen mit Wasser in das Bohrlochinnere.

Für das unterschiedliche Verhalten der Dübel im Bohrloch in Stadt- und Meeresatmosphäre sind unterschiedliche Wasserdampfgehalte innerhalb des Bohrloches sicherlich von untergeordneter Bedeutung, da diese klimabedingt sind und die Klimaverhältnisse (gemäßigtes Klima) in Stuttgart und Helgoland sich nicht grundsätzlich unterscheiden.

C2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen in Meeresatmosphäre am Beispiel des offenen Bohrloches

Beim Spreizdübel interessiert in besonderer Weise das für dieses Verbindungsmittel typische Korrosionsverhalten im Bohrloch. Da im nach außen geschlossenen Bohrloch die dort vorherrschenden (milden) Korrosionsbedingungen nur zu geringen Abtragungen bei den verschiedenen Überzügen und deshalb kaum zu Stahlkorrosion innerhalb des Untersuchungszeitraums von 3 Jahren führten, ist das Leistungsvermögen der einzelnen Überzugssysteme am deutlichsten bei Spreizdübeln im offenem Bohrloch und zwar bei Auslagerung in Meeresatmosphäre erkennbar. Die folgenden Betrachtungen des Korrosionsschutzverhaltens der einzelnen Überzüge beziehen sich deshalb auf das Gewinde und den glatten Bereich des Gewindebolzens im offenen Bohrloch des nicht bewitterten und bewitterten Betonkörpers vor allem in Meeresatmosphäre. Eine vergleichende Betrachtung zum Schutzverhalten in Stadt- und Meeresatmosphäre erfolgte unter C1.

C2-1 Verhalten der Schutzsysteme

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert, offenes Bohrloch.)

Beton nicht bewittert

(Siehe **Tabelle 10.8a oben**, Spalten 5 und 6.)

- **Feuerverzinkung**. Feuerverzinkte Dübel sind frei von Rotrost (siehe **Bild 10.14 oben**).
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Dübel mit galvanischen Zinküberzügen mit Schichtdicken von i.M. 4 bzw. 5 µm bei glattem Abschnitt und Gewinde (ohne und mit Passivierung) zeigen am Gewinde stets starke Rotrostbildung. Beim glatten Abschnitt weisen nur Dübel ohne Passivierung und mit Blaupassivierung starken bzw. schwachen Rotrost infolge Stahlkorrosion auf (siehe **Bild 10.15 oben**).
  Dübel mit galvanischen ZnNi-Überzügen mit einer Schichtdicke von i.M. 8 µm bei Schaft und Gewinde und mit Dickschichtpassivierung 2 zeigen schwach ausgeprägten Rotrost im Bereich des Gewindes (siehe **Bild 10.16 oben**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Die Dübel mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 2 und 4 mit Schichtdicken von i.M. 8 und 3 µm beim Gewinde (beide ohne Haftvermittler) zeigen beim Gewinde im Bohrloch geringe bzw. sehr starken Rotrost, nicht jedoch beim glatten Abschnitt mit Schichtdicken von 9 bzw. 7 µm (siehe **Bild 10.18 oben**).

  Die Dübel mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1 und 3 mit Schichtdicken von jeweils i.M. 8 bzw. 7 µm beim glatten Abschnitt und Gewinde (beide mit Haftvermittler) sind frei von Rotrost (siehe **Bild 10.17 oben**).

Beton bewittert

(Siehe **Tabelle 10.8b oben**, Spalten 5 und 6.)

- **Feuerverzinkung**. Feuerverzinkte Dübel sind im Bohrloch frei von Stahlkorrosion (siehe **Bild 10.14 unten**).
- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Dübel mit galvanischen Zinküberzügen mit Schichtdicken von i.M. 4 bzw. 5 µm bei glattem Abschnitt und Gewinde (ohne und mit Passivierung) zeigen bei glattem Abschnitt und Gewinde sehr starken Rotrost (siehe **Bild 10.15 unten**). Dübel mit galvanischen ZnNi-Überzügen und einer Schichtdicke von i.M. 8 µm bei Schaft und Gewinde und mit Dickschichtpassivierung 2 zeigen schwach ausgeprägten Rotrost im Bereich des Gewindes (siehe **Bild 10.16 unten**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Dübel mit ZnAl-Lamellenüberzügen und Schichtdicken beim glatten Abschnitt und Gewinde von i.M. 3 bis 8 µm (ohne und mit Haftvermittler) weisen sämtlichst beim Gewinde starke bis sehr starke Rotrostbildung auf. Die glatten Abschnitte des Gewindebolzens verhalten sich nur in 2 von 5 Fällen besser als die Gewinde, wobei das Vorhandensein eines Haftvermittlers keine Rolle spielt (siehe **Bilder 10.17 und 10.18, unten**).

C2-2 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel (beide mit Dickschichtpassivierung)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Meeresatmosphäre, Beton bewittert, offenes Bohrloch. Siehe **Tabelle 10.8b oben**, Spalten 5 und 6.)

- Unter den hiesigen kritischen Korrosionsbedingungen (Beton bewittert, offenes Bohrloch, Meeresatmosphäre) ist der Korrosionsschutz der galvanischen ZnNi-Überzüge (Schichtdicke bei glattem Abschnitt und Gewinde i.M. 8 µm) mit Dickschichtpassivierung 2 dem der galvanischen Zinküberzüge (Schichtdicke bei glattem Abschnitt und Gewinde i.M. 4 bzw. 5 µm) mit Dickschichtpassivierung 1 überlegen (vergleiche die **Bilder 10.15 und 10.16, unten**).

C2-3 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Meeresatmosphäre, Beton nicht bewittert und bewittert, offenes Bohrloch. Siehe in **Tabellen 10.8a und 10.8b** jeweils die obere Teiltabelle, Spalten 5 und 6.)

- Unter den hiesigen Bedingungen (offenes Bohrloch, Meeresatmosphäre) ist unabhängig von einer Passivierung bei den Dübeln starke (nicht bewittert) bzw. sehr starke Rotrostbildung (bewittert) aufgetreten (siehe **Bild 10.15**).

  Selbst in Stadtatmosphäre erwies sich eine Passivierung ohne erkennbare zusätzliche Korrosionsschutzwirkung und konnte eine Rotrostbildung beim glatten Abschnitt und Gewinde nicht verhindern.

Folgerungen zu C2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

Nimmt man das Korrosionsverhalten der Überzüge unter den kritischen Bedingungen einer Bewitterung im offenen Bohrloch von Betonkörpern zum Maßstab, so gilt:

- In Stadtatmosphäre zeigen lediglich die Dübel mit **Feuerverzinkung** und mit **galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2** keine Stahlkorrosion.

  Auch in Meeresatmosphäre zeigen feuerverzinkte Dübel keine Stahlkorrosion (siehe **Bild 10.14**). Dübel mit ZnNi-Überzug weisen nur im Gewindebereich punktuellen Rotrost auf (siehe **Bild 10.16**).

  Beide Überzüge (Feuerverzinkung und der ZnNi-Überzug) empfehlen sich demnach für eine Anwendung im Außenbereich.

- **Galvanische Zinküberzüge** (**ohne und mit Passivierung**) und **ZnAl-Lamellenüberzüge aller Firmen** der Spreizdübel weisen sowohl in Stadt- als auch Meeresatmosphäre, insbesondere bei Bewitterung, bei den hier gewählten Schichtdicken im Bereich bis etwa 8 µm, unabhängig vom Vorhandensein eines Haftvermittlers, keinen ausreichenden Korrosionsschutz auf (siehe **Bilder 10.15, 10.17 und 10.18, unten**) und sind im Prinzip für diesen Anwendungsfall ungeeignet.

Für das genannte ungünstige Verhalten der meisten genannten Überzüge sind zwei Einflüsse hauptsächlich verantwortlich:
Zum einen verfügen die hier im Trommelverfahren hergestellten galvanischen Zinküberzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge im Mittel nur über geringe Schichtdicken. Bei den ZnAl-Lamellenüberzügen kommt hinzu, dass die Schichtdicken stark schwanken und Nullstellen aufweisen und dass in einigen Fällen zwar ein vorhandener Haftgrund temporär zusätzlich, aber unter den kritischen Bedingungen von bewitterten, nach außen offenen Bohrlöchern nicht ausreichend schützt.

Insgesamt gesehen sind Passivierungen bei galvanischen Zinküberzügen und Deckbeschichtungen bei ZnAl-Lamellenüberzügen selbst unter Bedingungen einer Stadtatmosphäre und erst recht in Meeresatmosphäre ohne erkennbare Wirkung, wenn der Beton bewittert wird und das Bohrloch offen ist.

Im nicht bewitterten Bohrloch ist die Korrosionsbeanspruchung geringer als im bewitterten. Hier bieten daher praktisch alle untersuchten Korrosionsschutzüberzüge außer dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 mit sehr geringer Schichtdicke und keinem Haftvermittler zumindest einen temporären Korrosionsschutz in Stadtatmosphäre.

C3 Einfluss der Oberflächengeometrie

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert, offenes Bohrloch.)

Beton nicht bewittert

(Vergleiche in **Tabelle 10.8a oben** die Spalten 2 und 3 sowie 5 und 6.)

- Beim nicht bewitterten Beton in Stadt- und Meeresatmosphäre ist die Schutzwirkung der Überzüge im nach außen offenem Bohrloch beim Gewinde eher geringer als auf dem glatten Abschnitt des Dübels (siehe **Bilder 10.15, 10.16 und 10.18, oben**).

Beton bewittert

(Vergleiche in **Tabelle 10.8b oben** die Spalten 2 und 3 sowie 5 und 6.)

- Beim bewitterten Beton in Stadtatmosphäre ist die Schutzwirkung der Überzüge im

nach außen offenem Bohrloch beim Gewinde geringer ausgeprägt als auf dem glatten Abschnitt des Dübels. In der korrosiveren Meeresatmosphäre besteht ebenfalls die Tendenz einer stärkeren Rotrostbildung im Gewindebereich (siehe **Bild 10.16, unten**).

Folgerungen zu C3: Einfluss der Oberflächengeometrie

- Bei Dübeln mit geringer Dicke des metallischen Überzuges (galvanische Zinküberzüge ohne und mit Passivierung) und solchen mit hohen Schichtdickenschwankungen bis in den Nullbereich und teilweise auch ohne Haftvermittler (ZnAl-Lamellenüberzüge) korrodieren bevorzugt belastete Gewindebereiche. Hierfür gelten vergleichbare Gründe, die in Abschn. 10.4.3 (Folgerungen zu B2) für die belasteten Bereiche von Bohrschrauben mit vergleichbaren Mängeln genannt wurden.

C4 Vergleich: Stadt-, Meeresatmosphäre und 100 % relative Luftfeuchte

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt-, Meeresatmosphäre, bewittert und nicht bewittert sowie bei 100 % relativer Luftfeuchte (Abschn. 9.4.4), offenes Bohrloch. Vergleiche in **Tabellen 10.8a und 10.8b**, obere Teiltabellen, jeweils die Spalten 2 und 3 bzw. 5 und 6 mit den Spalten 8 und 9.)

Außerhalb des Bohrlochs verhalten sich Mutter und Gewindebolzen in Stadt- und Meeresatmosphäre einerseits und bei 100 % relativer Luftfeuchte (abgesehen von ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4) gleichermaßen gut (vergleiche die **Bilder 10.15, 10.17 und 10.18** mit den **Bildern 9.10 bis 9.12**).

Anders ist das Verhalten im nach außen offenen Bohrloch:
In der dauerfeuchten bzw. nassen Umgebung einer Auslagerung in 100 % relativer Luftfeuchte ist das Korrosionsverhalten sämtlicher Systeme deutlich günstiger als in Stadt- und Meeresatmosphäre (vergleiche die **Bilder 10.15, 10.17 und 10.18** mit den **Bildern 9.10 bis 9.12**).

Folgerungen zu C4: Vergleich: Stadt-, Meeresatmosphäre und 100 % relative Luftfeuchte

Bei Bewitterung ist das Korrosionsschutzverhalten der Überzüge und Beschichtungen im nach außen offenen Bohrloch sowohl in der schadstofffreien Stadt-, als auch in der chloridhaltigen Meeresatmosphäre erheblich ungünstiger als im Nassklima (vergleiche die **Bilder 10.15, 10.17 und 10.18** mit den **Bildern 9.10 bis 9.12**).

Was das Verhalten in Stadtatmosphäre und in Nassklima anbetrifft, stimmt dieses mit anderen Labortests überein. So ist das Korrosionsschutzverhalten metallischer Überzüge bekanntlich in dauerfeuchter (dauernasser) Umgebung (Klimaraum) mit Wasserfilm wesentlich günstiger als z. B. in Kondenswasser - Wechselklimaten. Als Erklärung für dieses Verhalten können folgende Sachverhalte herangezogen werden:

- Im Nassklima des Klimaraums ist die Atmosphäre frei von jeglichen Verunreinigungen. Dagegen sind in der Stadtatmosphäre, zwar in geringer Konzentration, gasförmige und feste Verunreinigungen vorhanden, die Korrosionsprozesse stimulieren.

- Im Nassklima ist auf der Probenoberfläche ein durchgehender Wasserfilm vorhanden, in der Atmosphäre dagegen ist (z. B. als Folge einer Taupunktunterschreitung) die Bildung kleinster Wassertröpfchen auf der Oberfläche möglich. Im letzteren Fall ist eine Korrosionsverstärkung durch die Bildung von Mikroelementen möglich. Bei durchgehenden Wasserfilmen kommt es nicht zu dieser Elementbildung.

Die Korrosionsverstärkung in Meeresatmosphäre in Vergleich zu Stadtatmosphäre ist durch den hohen Chloridgehalt bedingt.

C5 Einfluss der Auslagerungszeit (1,5 und 3 Jahre)

(**Grundlage**: Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre. Vergleiche die Angaben für 1,5 und 3,0 Jahre in den **Anlagen 10.7 bis 10.13 und 10.15 bis 10.21**.)

- Falls Korrosionsschutzsysteme, wie der ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, nicht ausreichend schützen, ist starke Korrosion bereits nach 1,5 Jahren feststellbar.
- Verbindungsmittel mit stark ausgeprägter Rotrostbildung nach 3 Jahren zeigen im Regelfall auch schon frühzeitig Stahlkorrosion.

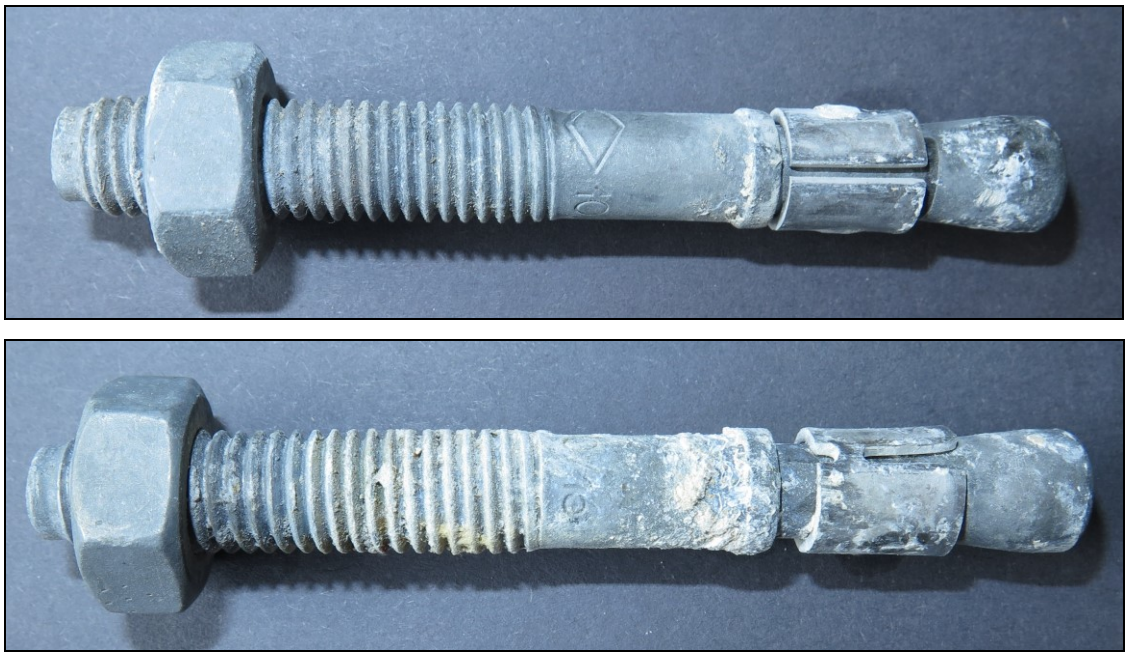


Bild 10.14:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit Feuerverzinkung nach Auslagerung in Meeresatmosphäre nach 3 Jahren, Bohrloch offen;
oben nicht bewittert (nicht beregnet), unten bewittert (beregnet)

C6 Vergleich: metallische Überzüge / nichtrostender Stahl 1.4301

(**Grundlage:** Auslagerungszeit 3 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert und bewittert, offenes Bohrloch. Siehe in **Tabelle 10.8a und 10.8b** jeweils die obere Teiltabelle.)

Bei **direkter Bewitterung** von Gewinde und Mutter außerhalb des Bohrloches in Meeresatmosphäre tritt beim nichtrostenden Stahl der Werkstoffnummer 1.4301 frühzeitig Korrosion (Rostbildung) auf, wobei metallische Überzüge überwiegend noch ohne

Rotrost sind. In (chloridfreier) Stadtatmosphäre kommt es bei dem nichtrostenden Stahl nicht zu Korrosion.

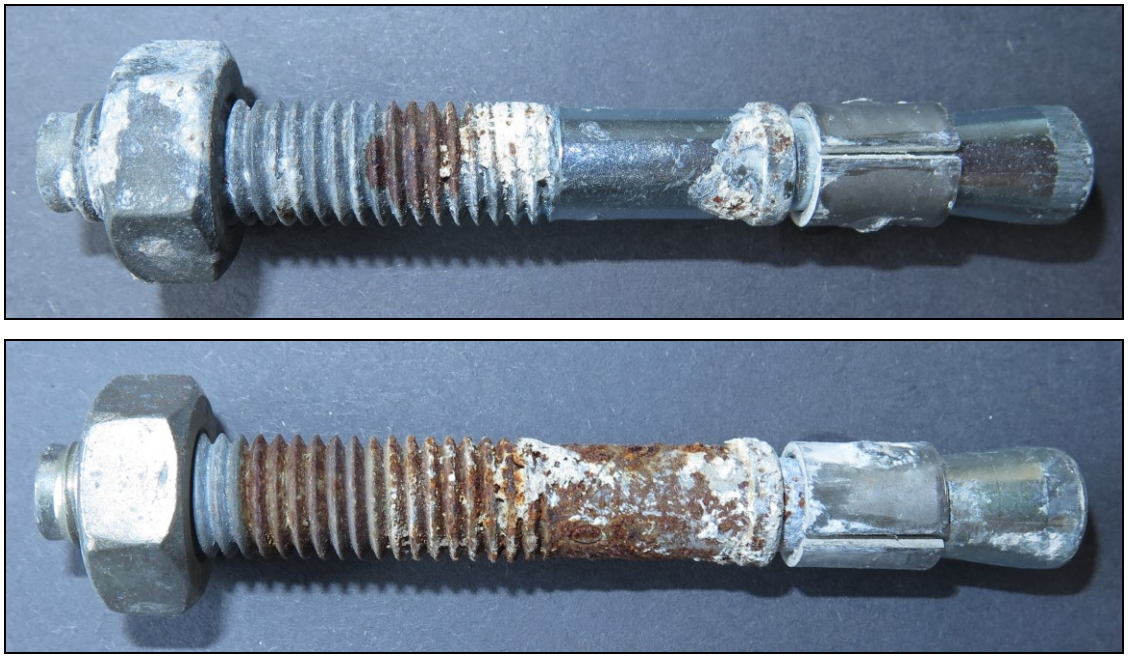


Bild 10.15:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit galvanischem Zinküberzug und Dickschichtpassivierung 1 nach Auslagerung in Meeresatmosphäre nach 3 Jahren, Bohrloch offen; oben nicht bewittert (nicht beregnet), unten bewittert (beregnet)

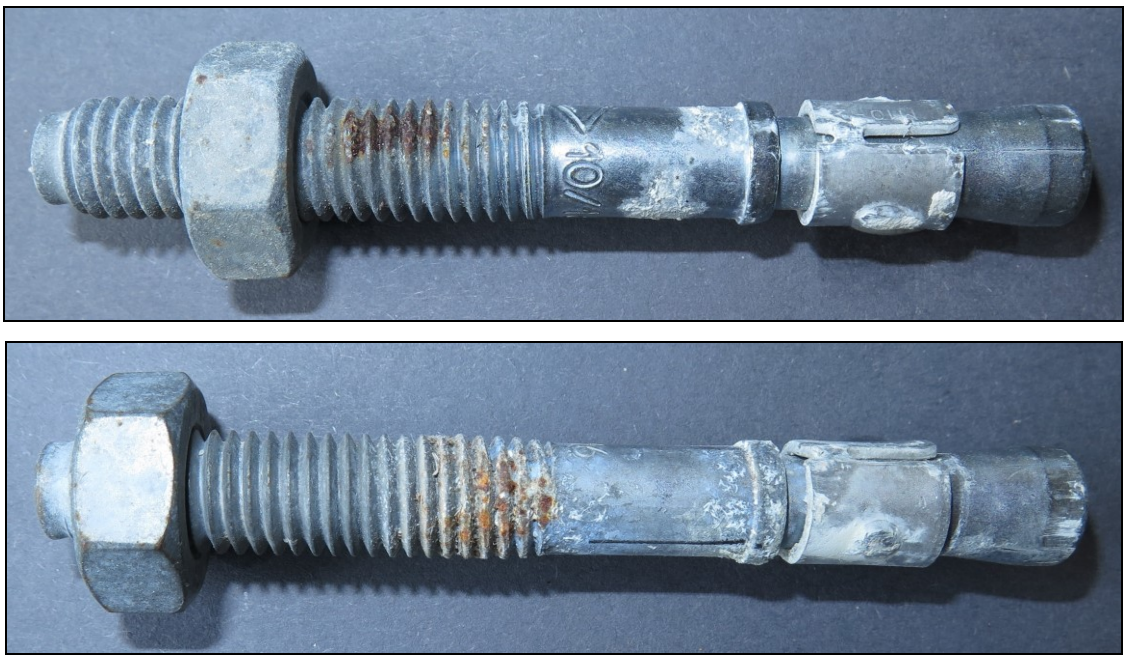


Bild 10.16:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit galvanischem ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 nach Auslagerung in Meeresatmosphäre nach 3 Jahren, Bohrloch offen; oben nicht bewittert (nicht beregnet), unten bewittert (beregnet)

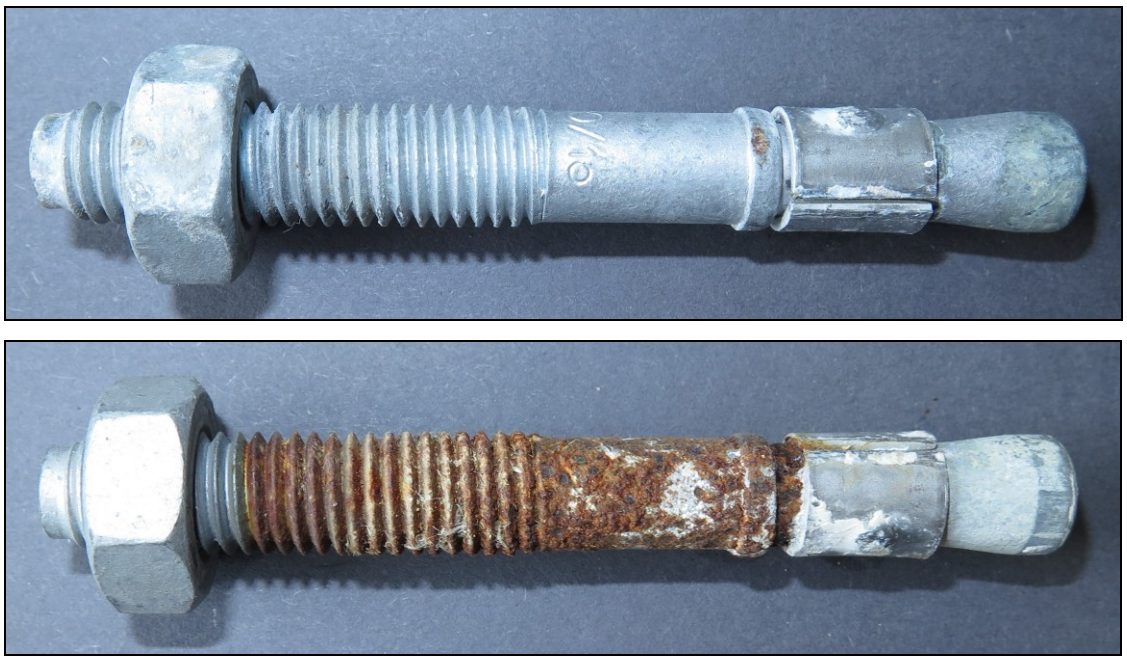


Bild 10.17:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (mit Unterzinkung plus Blaupassivierung) nach Auslagerung in Meeresatmosphäre nach 3 Jahren, Bohrloch offen;
oben nicht bewittert (nicht beregnet), unten bewittert (beregnet)

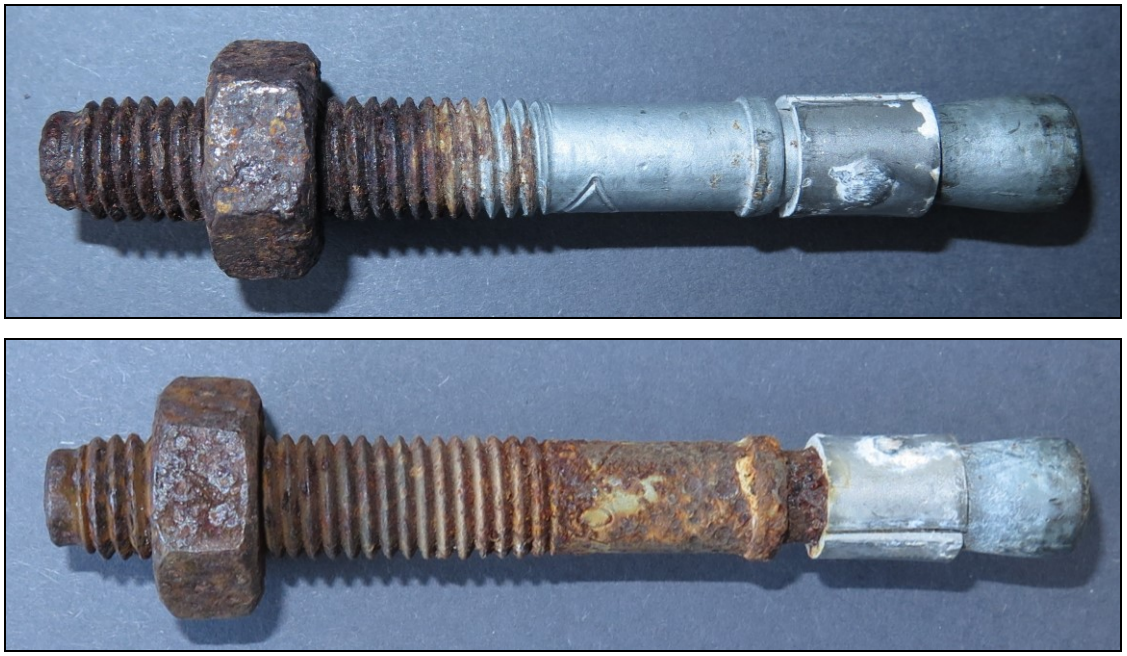


Bild 10.18:
In Beton eingesetzter Spreizdübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach Auslagerung in Meeresatmosphäre nach 3 Jahren, Bohrloch offen;
oben nicht bewittert (nicht beregnet), unten bewittert (beregnet)

Im **offenen Bohrloch** (nicht bewittert und bewittert) von Dübeln in Stadt- und Meeresatmosphäre ist die Korrosionswahrscheinlichkeit für die meisten Schutzsysteme (ausgenommen Feuerverzinkung und galvanischer ZnNi-Überzug ausreichender Schichtdi-

cke) deutlich höher als bei einem nichtrostenden Stahl der Werkstoffnummer 1.4301. Letzterer ist unter diesen Bedingungen frei von Rotrost.

Folgerungen zu C6: Vergleich: metallische Überzüge / nichtrostender Stahl 1.4301

Aus hiesiger Sicht empfiehlt sich, sowohl in Stadt- als auch Meeresatmosphäre neben der Feuerverzinkung und galvanischen ZnNi-Überzügen auch nichtrostender Stahl. Da der nichtrostende Stahl der Werkstoffnummer 1.4301 (Mutter und Gewinde außerhalb des Bohrloches) sich bei direkter Bewitterung in Meeresatmosphäre als nicht ausreichend erwies, wäre hier jedoch ein höherwertigerer Stahl, z. B. 1.4401, einzusetzen (siehe auch Abschnitt 6.4).

10.4.5 Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 1)

Kunststoffrahmendübel mit metallischem Überzug der Dübelschraube werden im Regelfall nur in nicht bewitterter Umgebung (z. B. im Hinterlüftungsraum von Fassaden) und nur mit abgeschlossenem Bohrloch verwendet. Die Spezialschraube aus galvanisch verzinktem Stahl kommt allerdings im Freien laut Zulassung [3] dann zur Anwendung, wenn der Bereich des Schraubenkopfes gegen Feuchtigkeit und Schlagregen durch eine sogenannte Kopfbeschichtung geschützt ist. Um die Notwendigkeit einer solchen Kopfbeschichtung besser abschätzen zu können, wurden bei den hiesigen Untersuchungen neben Dübeln mit verschiedenen Kopfbeschichtungen auch Schraubenköpfe ohne Kopfbeschichtung und zum Vergleich auch ungeschützte Dübelschrauben untersucht.

In der Folge werden die zur Befestigung eines Kantholzes aus Fichte in Beton eingesetzten Kunststoffrahmendübeln der Lieferung 1 erzielten Ergebnisse im Hinblick auf nachfolgende Einflüsse ausgewertet:

- Dübelabschnitt außerhalb des Bohrlochs im Vergleich zu Dübelabschnitt im Innern der Dübelhülse im Bohrloch (Hülse steht in Kontakt mit dem Beton und dem Anbauteil aus Holz),
- Art des Korrosionsschutzes und Vergleich mit ungeschützten Dübelschrauben,
- zusätzliche Kopfbeschichtung bei galvanischer Verzinkung mit Passivierung,
- Art des Eindrehens der Dübelschrauben (Antrieb bei Bit bzw. Nuss),
- Ort der Auslagerung: Stadt- bzw. Meeresatmosphäre.

Die untersuchten Korrosionsschutzsysteme werden in Abschn. 10.3.4 genannt. Für die Auswertung standen inzwischen 10 Jahre andauernde Auslagerungsversuche an in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht bewittert) an Baukörpern gemäß **Bild 10.6** zur Verfügung [4]. Für diese Auslagerungsversuche empfahl sich wegen der besonders langen Auslagerungszeit auch ein Vergleich mit den Ergebnissen des Salzsprühtests, die in Abschn. 12 (Vergleich Naturversuch und Salzsprühtest) bewertet werden.

Typische Bilder von mit einer Nuss eingedrehten Kunststoffrahmendübeln, die das zeitabhängige Korrosionsverhalten verdeutlichen, sind in den **Bildern 10.19 bis 10.25** zusammen mit den Ergebnissen von Salzsprühtests enthalten. Das Korrosionsverhalten

der Kunststoffrahmendübel nach 10 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre wird in einer Übersicht in **Tabelle 10.9** dargestellt. Diese Tabelle fasst die Aussagen in den Detailtabellen **Anlagen 10.8, 10.10, 10.11 und 10.13** zusammen.

Zwecks besserer Übersicht zur weiteren Vorgehensweise werden die untersuchten Parameter für den Bereich der metallischen Überzüge in der folgenden Übersicht dargestellt.

D1 Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Atmosphäre im Inneren der Dübelhülse im Bohrloch (Stadt- und Meeresatmosphäre)
Folgerungen zu D1: Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Atmosphäre im Inneren der Dübelhülse im Bohrloch (Stadt- und Meeresatmosphäre)
D2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen
Folgerungen zu D2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen
D3 Einfluss einer Kopfbeschichtung bei galvanisch verzinkten Überzügen (Stadt- und Meeresatmosphäre)
Folgerungen zu D3: Einfluss einer Kopfbeschichtung bei galvanisch verzinkten Überzügen (Stadt- und Meeresatmosphäre)
D4 Einfluss durch die Art des Eindrehens der Dübelschrauben
D5 Vergleich: Stadtatmosphäre und Meeresatmosphäre
Folgerungen zu D5: Vergleich: Stadtatmosphäre und Meeresatmosphäre

D1 Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Atmosphäre im Inneren der Dübelhülse im Bohrloch (Stadt- und Meeresatmosphäre)

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 10 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert. Vergleiche in **Tabelle 10.9** die Spalte 1 mit den Spalten 2 und 3 bzw. die Spalte 4 mit den Spalten 5 und 6.)

Rotrostbehaftet sind lediglich die unmittelbar der Atmosphäre ausgesetzten Köpfe der Schrauben. Im Inneren der Dübelhülse, die im Kontakt mit dem Betonkörper und dem Anbauteil aus Holz steht, wurden nach 10 jähriger Auslagerung der Bauteile in Meeresatmosphäre selbst bei ungeschützten Dübelschrauben keinerlei Anzeichen einer Stahlkorrosion festgestellt. Deshalb beziehen sich die folgenden Auswertungen lediglich auf die Köpfe der Dübelschrauben außerhalb des Bohrloches.

Folgerungen zu D1: Einfluss der Umgebung: Atmosphäre außerhalb des Bohrloches und Atmosphäre im Inneren der Dübelhülse im Bohrloch (Stadt- und Meeresatmosphäre)

Die Untersuchungen bestätigen eindrucksvoll die in Abschn. 7.4.3 (Korrosionsbeanspruchung der Dübelschraube) aus bauphysikalischen Überlegungen abgeleiteten Folgerungen:

„Wegen der genannten Zusammenhänge (keine erhöhte relative Luftfeuchte in der Dübelhülse, keine Taupunktunterschreitung an der Dübelschraube und im dübelnahen Beton) ist eine merkliche Korrosionsbeanspruchung der geschlitzten Dübelschraube innerhalb der Dübelhülse auszuschließen."

Auslagerung / Korrosionsschutz		Stadtatmosphäre			Meeresatmosphäre		
		äußere Atmosphäre	Atmosphäre im Bohrloch		äußere Atmosphäre	Atmosphäre im Bohrloch	
		Kopf	Schaft	Gewinde	Kopf	Schaft	Gewinde
		1	2	3	4	5	6
Bohrloch geschlossen, nicht bewittert	ungeschützt						
	galv. blau	14	14	8	14	14	8
	galv. blau, Kb 1	14	14	8	14	14	8
	galv. blau, Kb 2	14	14	8	14	14	8
	galv. gelb	14	14	8	14	14	8
	ZnAl Fa.1[1)]	9	10	7	9	10	7
	ZnAl Fa.2	3	4	3	3	4	3
	ZnAl Fa.4	6	10	4	6	10	4

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

[1)] ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung
Zahlen: mittlere Schichtdicke in µm, siehe Abschn. 8
Kb = Kopfbeschichtung

Tabelle 10.9:
Korrosionsverhalten (Anteil der Oberfläche mit Rotrost) der Kunststoffrahmendübel (Lieferung 1) nach 10 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (nicht bewittert) in einer Übersicht

D2 Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

(**Grundlage**: Schraubenköpfe nach 10 Jahren Auslagerungszeit in Meeresatmosphäre, nicht bewittert, ohne Kopfbeschichtung. Siehe **Tabelle 10.9**, Spalte 4.)

Zu Rotrostbildung kommt es bei Auslagerung in Meeresatmosphäre nur an den unmittelbar bewitterten korrosionsgeschützten Schraubenköpfen, dagegen nicht bei Schaft und Gewinde in der Dübelhülse.

Folgende Bewertungen treffen zu:

- **Galvanische Zinküberzüge**. Die Schraubenköpfe mit galvanischen Zinküberzügen von i.M. 14 µm Dicke (mit Blaupassivierung oder Gelbchromatierung) sind frei von Rotrost (siehe **Bilder 10.19 und 10.21**).
- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Die Schrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 2 und 4 (beide ohne Haftvermittler und mit Schichtdicken von i.M. 3 bzw. 6 µm) zeigten am Kopf bereits ab 1,5 Jahren Stahlkorrosion, die mit der Zeit zunahm. Nach 10 Jahren weisen diese Schraubenköpfe extreme Stahlkorrosion auf (siehe **Bilder 10.23 und 10.24**).

  Die Schraubenköpfe mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 mit einer Schichtdicke von i.M. 9 µm und Haftvermittler (Unterzinkung und zusätzlicher Blaupassivierung) sind frei von Rotrost (siehe **Bild 10.22**).

Folgerungen zu D2: Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

Galvanische Überzüge. Die Untersuchungen belegen, dass galvanische Überzüge mit vergleichsweise hohen Schichtdicken von i.M. 14 µm und Blaupassivierung unter den bei Kunststoffrahmendübeln herrschenden Korrosionsbedingungen selbst unter den Extrembedingungen „Meeresatmosphäre, nicht bewittert“, einen bemerkenswerten Langzeitschutz bieten. Während die bauaufsichtliche Zulassung dieser Dübel lediglich eine Anwendung in Stadtatmosphäre und mäßig belasteter Industrieatmosphäre zulässt, wobei Belastungen durch Chloride nur eine untergeordnete Rolle spielen, konnte durch die hiesigen Langzeitversuche der Nachweis erbracht werden, dass auch in Meeresatmosphäre (ohne Beregnung) eine hohe Beständigkeit vorliegt (siehe **Bilder 10.19 und 10.21**).

ZnAl-Lamellenüberzüge. Über die Dauerhaftigkeit von ZnAl-Lamellenüberzügen bei Kunststoffrahmendübeln entscheidet, wie auch bei den anderen Verbindungsmitteln, die Dicke und Gleichmäßigkeit des Überzuges der Trommelware und ob ein zusätzlicher Korrosionsschutz in Form eines Haftvermittlers vorliegt:

- Die sehr gut schützenden **ZnAl-Lamellenüberzüge der Firma 1** (siehe **Bild 10.22**) weisen im beanspruchten Kopfbereich der Kunststoffrahmendübel immerhin Schichtdicken von i.M. 9 µm auf (**Tabelle 8.8**). Zusätzlich ist, als Haftvermittler gedacht, eine Unterzinkung zwischen 16 und 26 µm plus Blaupassivierung vorhanden (**Tabelle 8.7**). Der relativ dicke Haftvermittler kann auch dem Korrosionsschutz zugerechnet werden.
- Bei den nicht schützenden **ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 2 und 4** (siehe **Bilder 10.23 und 10.24**) liegen ungünstigere Bedingungen bezüglich des Korrosionsschutzes vor. In beiden Fällen ist kein Haftvermittler vorhanden und die Schichtdicken des ZnAl-Lamellenüberzuges sind deutlich geringer als beim Überzug der Firma 1 (**Tabellen 8.10 und 8.14**).

Haftvermittler wie galvanische Zinkschichten tragen einerseits zum Korrosionsschutz bei, andererseits verhindern sie eine Unterrostung der ZnAl-Lamellenüberzüge. Das Fehlen von Haftvermittlern wirkt sich dagegen besonders dann sehr ungünstig aus, wenn nur sehr dünne ZnAl-Lamellenüberzüge vorliegen, die zudem, schon wegen der Herstellung des Überzuges als Trommelware, stark schwanken und auch stellenweise fehlen.

Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass ZnAl-Lamellenüberzüge, die an sich eingeführt wurden, das Korrosionsschutzverhalten gegenüber galvanischen Überzügen zu verbessern, keinesfalls grundsätzlich besser sind als galvanische Überzüge. Sie sind nur dann zumindest gleichwertig, wenn ein Korrosionsschutzsystem aus Haftvermittler und ZnAl-Lamellenüberzug ausreichender Dicke aufgebracht wird.

Das aufgezeigte Verhalten der galvanisch verzinkten und zusätzlich passivierten Überzüge sowie das unterschiedliche Verhalten der Schutzsysteme mit ZnAl-Lamellenüberzügen lässt auch darauf schließen, dass bei den als Trommelware applizierten ZnAl-Lamellenüberzügen, bei denen starke Schichtdickenschwankungen offenbar un-

vermeidbar sind, ein wirksamer, auch den Korrosionsschutz verbessernder Haftvermittler unverzichtbar ist, insbesondere wenn in chloridhaltiger Umgebung lange Schutzdauern erzielt werden sollen.

D3 Einfluss einer Kopfbeschichtung bei galvanisch verzinkten Überzügen (Stadt- und Meeresatmosphäre)

(**Grundlage**: Schraubenköpfe nach 10 Jahren Auslagerungszeit in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert. Siehe **Tabelle 10.9**, Spalten 1 und 4.)

Kopfbeschichtungen sind dazu gedacht, das Korrosionsverhalten zu verbessern und sind im Fall von Kunststoffrahmendübeln durch die Zulassung [3] bei einer Anwendung im Außenbereich zwingend vorgeschrieben. Im vorliegenden Fall wurde jedoch für die untersuchten Kopfbeschichtungen auf galvanischen Überzügen mit Passivierung genau das Gegenteil festgestellt. Die alternativ von verschiedenen Herstellern bezogenen unterschiedlichen Kopfbeschichtungen 1 und 2 (Abschn. 8.8) führten sowohl bei blaupassivierten (siehe **Bild 10.20**) als auch bei den in dieser Arbeit nicht beschriebenen Versuchen mit gelbchromatierten galvanischen Überzügen zu erheblichen Verschlechterungen des Korrosionsverhaltens.

Folgerungen zu D3: Einfluss einer Kopfbeschichtung bei galvanisch verzinkten Überzügen (Stadt- und Meeresatmosphäre)

Die applizierten Kopfbeschichtungen sollen bei Kunststoffrahmendübeln den Korrosionsschutz der Atmosphäre ausgesetzten Schraubenköpfe verbessern (Abschn. 7.4.2). Dabei wird davon ausgegangen, dass die galvanische Verzinkung insbesondere in Kombination mit einer Blaupassivierung nicht ausreichend ist, weshalb dieser zusätzliche Schutz erforderlich ist. Tatsächlich wurde jedoch festgestellt, dass die untersuchten Kopfbeschichtungen den Korrosionsschutz sowohl bei zusätzlicher Gelbchromatierung (in dieser Arbeit nicht aufgeführt) als auch Blaupassivierung in der Meeresatmosphäre, nicht jedoch im Stadtklima, erheblich verschlechtern (siehe **Bild 10.20**). Während galvanisch verzinkte Schraubenköpfe mit Schichtdicken von i.M. 14 µm mit zusätzlicher Passivierung in Meeresatmosphäre ohne Kopfbeschichtung mindestens 10 Jahre keine Stahlkorrosion zeigten (siehe **Bilder 10.19 und 10.21**), begann diese bei geschützten Schrauben bereits ab dem 1 Jahr der Auslagerung und nahm bis zum Ende der Auslagerung stark zu.

Die nachteilige Wirkung der nur sehr dünnen Kopfbeschichtungen (Abschn. 8.8) auf verzinkten Oberflächen in Meeresatmosphäre kann wie folgt erklärt werden [5]:

- Die Kopfbeschichtung behindert zwar den Durchtritt des korrosionsschützenden Kohlendioxids (die Durchlässigkeit organischer Beschichtungen für CO_2 ist sehr gering), wodurch die Bildung schützender Carbonatschichten auf der Zinkoberfläche behindert wird. Dagegen ist die Durchlässigkeit der Beschichtung für den korrosionsfördernden Wasserdampf im Hinblick auf eine Korrosionsbegünstigung ausreichend hoch. Als Konsequenz gilt daher, dass nur dünne Beschichtungen (die Dicke der hier untersuchten Kopfbeschichtungen beträgt lediglich 30 bis 50 µm, Abschn. 8.8) auf verzinkten Oberflächen eher ungünstiger sind als keine Beschichtungen. Sog.

Duplexsysteme, bestehend aus Zink plus Beschichtung, erfordern immer eine ausreichend dicke und zinkverträgliche Beschichtung, wenn gegenüber der ausschließlichen Verzinkung eine Verbesserung erzielt werden soll.

- Weiterhin ist bei dünnen Schichten, insbesondere auf mechanisch manipulierten Oberflächen, auch der lokale Zutritt von Chloriden an Fehlstellen nicht auszuschließen.
- Es ist auch davon auszugehen, dass lediglich auf dem Schraubenkopf aufgebrachte Beschichtungen vom Anstrichrand her unterwandert werden, insbesondere, wenn der Schraubenkopf nicht im notwendigen Maße vorbehandelt wurde.

D4 Einfluss durch die Art des Eindrehens der Dübelschrauben

(**Grundlage**: Schraubenköpfe in Meeresatmosphäre, nicht bewittert.)

Es wurde festgestellt, dass die Art des Eindrehens (Innenantrieb mit einer Bit- oder Außenantrieb mit einer Nuss) zumindest dafür verantwortlich ist, an welcher Stelle eine Stahlkorrosion beginnt. Falls eine Schraube mit dem Außenantrieb angezogen wird, findet man infolge Beschädigung (Abrieb) des Überzuges eine kreisrunde Angriffsstelle, während nach Eindrehen mit einer Bit der offenbar geschädigte Innenbereich zuerst Stahlkorrosion zeigt (siehe **Bild 10.25**).

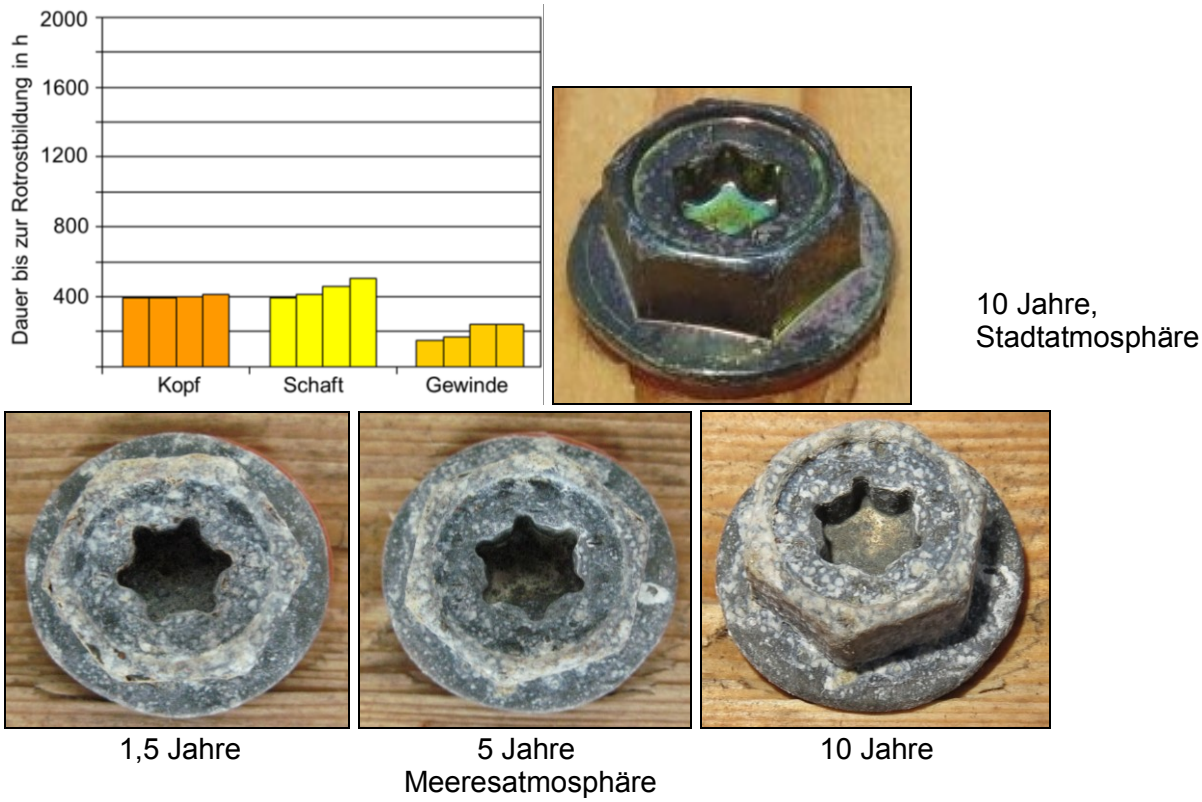
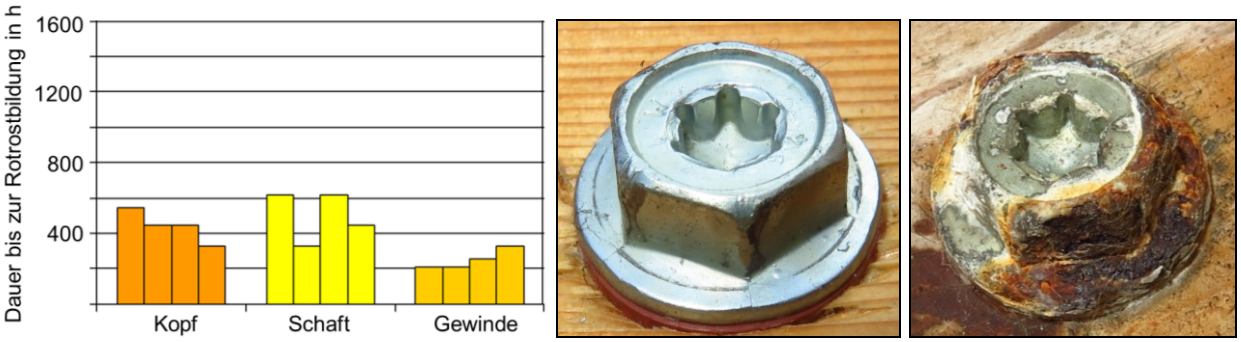
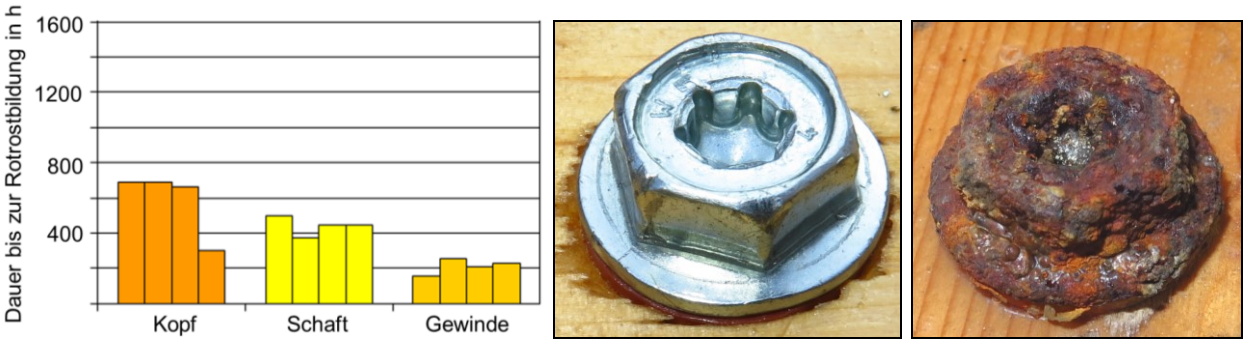


Bild 10.19:
Kunststoffrahmendübel mit galvanischem Zinküberzug und Blaupassivierung der Lieferung 1 nach Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) und Ergebnisse im Salzsprühtest [4]



Kopfbeschichtung 1



Kopfbeschichtung 2

Bild 10.20:
Kunststoffrahmendübel mit galvanischem Zinküberzug und Blaupassivierung plus Kopfbeschichtung der Lieferung 1, nach 10 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) und Ergebnisse im Salzsprühtest [4]

D5 Vergleich: Stadtatmosphäre und Meeresatmosphäre

(**Grundlage**: Auslagerungszeit 10 Jahre in Stadt- und Meeresatmosphäre, nicht bewittert, ohne Kopfbeschichtung. Vergleiche in **Tabelle 10.9** die Spalten 1 und 4.)

In der Zulassung für Kunststoffrahmendübel [3] wird gefordert, dass bei stärkerer Korrosionsbeanspruchung (z. B. in Meeresatmosphäre) ein hochwertigerer Korrosionsschutz als eine galvanische Verzinkung plus Passivierung erforderlich ist. Für solche Anwendungen werden Dübelschrauben bisher aus nichtrostendem Stahl hergestellt. In diesem Zusammenhang wurde hier festgestellt:
Galvanische Verzinkung. Bei den der Atmosphäre ausgesetzten Köpfen der Dübelschrauben (Zinkdicke i.M. 14 µm) wurde innerhalb von 10 Jahren sowohl in Stadt-, als auch in Meeresatmosphäre keine Stahlkorrosion (Rostbildung) festgestellt (siehe **Bilder 10.19 und 10.21**).

ZnAl-Lamellenüberzüge. Die mit einem ausreichend dicken und zusätzlichen Haftgrund (galvanische Verzinkung mit Blaupassivierung) versehenen ZnAl-Lamellenüberzüge (Schichtdicke i.M. 9 µm) der Firma 1 geschützten Schrauben zeigten nach 10 Jahren in Stadt-, als auch Meeresatmosphäre (siehe **Bild 10.22**) keine Stahlkorrosion. Dagegen waren die mit Systemen der Firma 2 und 4 mit geringeren Auflagen (i.M. 3 bzw.

6 µm) geschützten Schrauben ohne Haftgrund insbesondere in Meeresatmosphäre rotrostbehaftet (siehe **Bilder 10.23 und 10.24**).

Folgerungen zu D5: Vergleich: Stadtatmosphäre und Meeresatmosphäre

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ausreichend dicke **galvanische Überzüge** (hier i.M. 14 µm) mit Passivierung auch in Meeresatmosphäre eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Dies gilt selbst dann, wenn sich bei Nichtbewitterung Chloride aufkonzentrieren können (siehe **Bilder 10.19 und 10.21**). Die Vorgehensweise, bei Anwendung in chloridhaltiger Umgebung (z. B. Meeresatmosphäre) grundsätzlich andere Systeme, wie ZnAl-Lamellenüberzüge zu verwenden, geht oftmals in die falsche Richtung (siehe unten). Auch die Notwendigkeit, z. B. bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen im Meeresbereich, grundsätzlich nichtrostende Dübelschrauben bei Kunststoffrahmendübeln einzusetzen, wurde nicht bestätigt.

Falls die Überzugsdicke bei **ZnAl-Lamellenüberzügen** nur wenige Mikrometer beträgt und ein zusätzlich korrosionsschützender Haftvermittler nicht vorhanden ist, dann ist die Korrosionsschutzwirkung insbesondere der beim Eindrehen durch Bit und Nuss mechanisch belasteten Schraubenköpfe herabgesetzt und führt insbesondere in Meeresatmosphäre zu Stahlkorrosion (siehe **Bilder 10.23 und 10.24**).

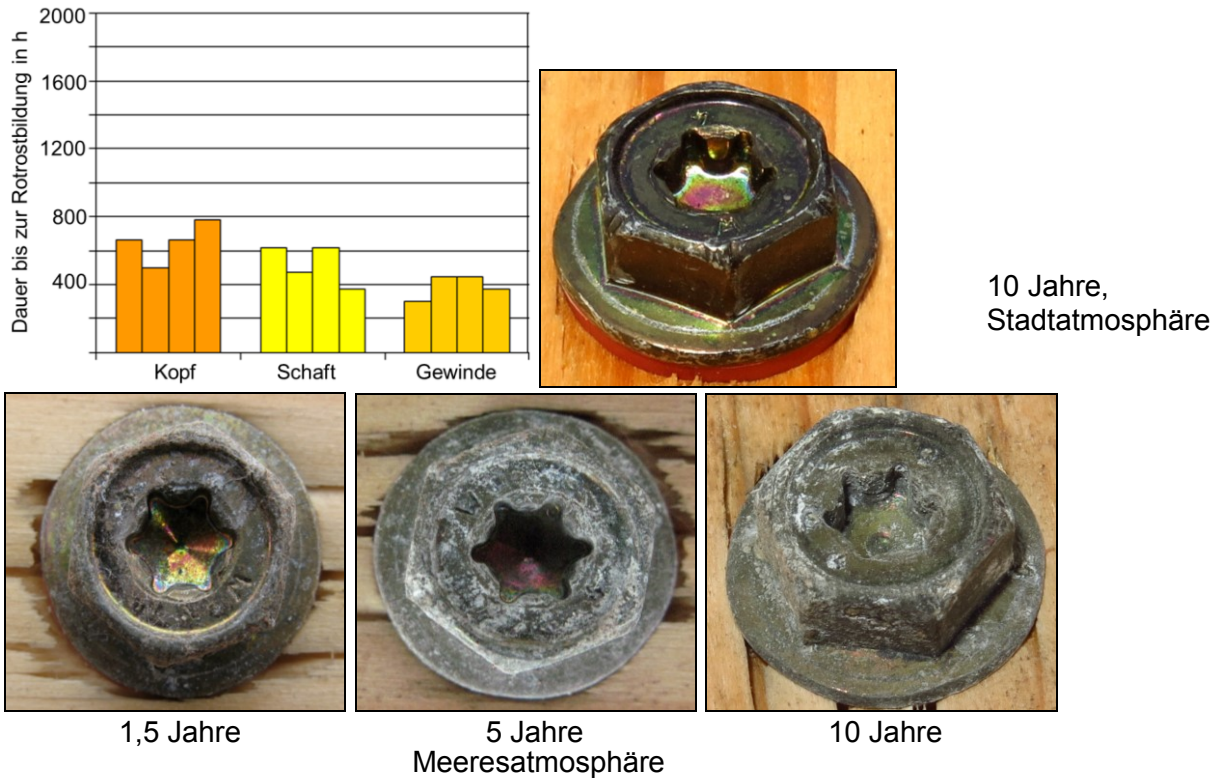
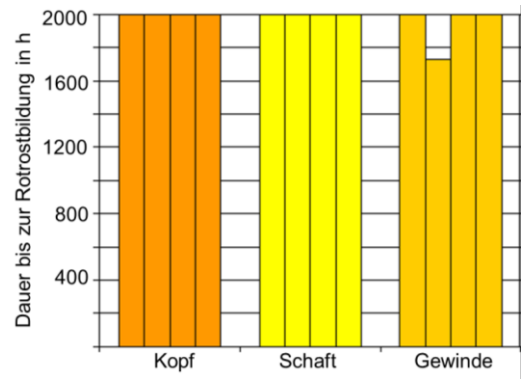
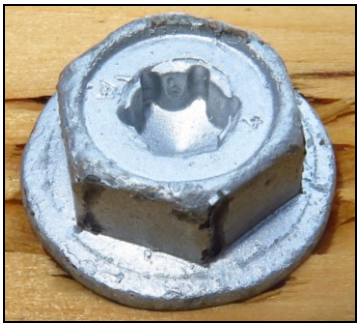


Bild 10.21:
Kunststoffrahmendübel mit galvanischem Zinküberzug und Gelbchromatierung der Lieferung 1 nach Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) und Ergebnisse im Salzsprühtest [4]

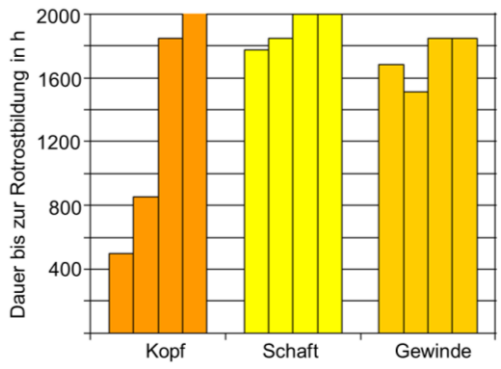


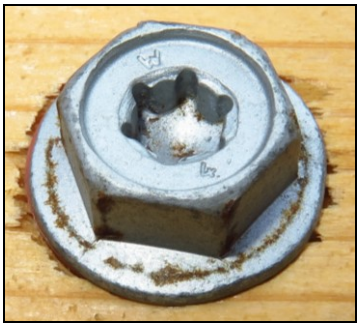


10 Jahre,
Stadtatmosphäre

1,5 Jahre | 5 Jahre Meeresatmosphäre | 10 Jahre

Bild 10.22:
Kunststoffrahmendübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (mit Unterzinkung plus Blaupassivierung), Lieferung 1, nach Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) und Ergebnisse im Salzsprühtest [4]

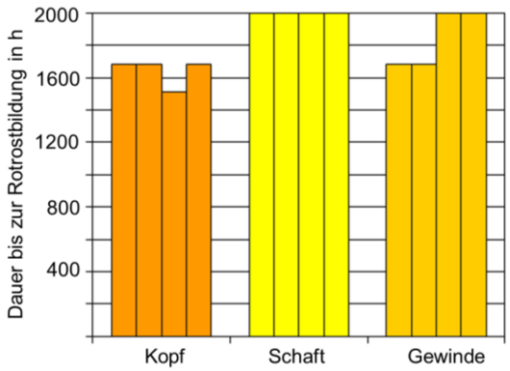


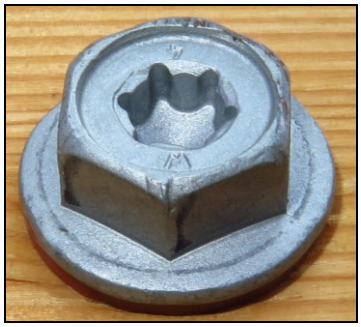


10 Jahre,
Stadtatmosphäre

1,5 Jahre | 5 Jahre Meeresatmosphäre | 10 Jahre

Bild 10.23:
Kunststoffrahmendübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2, Lieferung 1, nach Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) und Ergebnisse im Salzsprühtest [4]





10 Jahre,
Stadtatmosphäre

1,5 Jahre

5 Jahre
Meeresatmosphäre

10 Jahre

Bild 10.24:
Kunststoffrahmendübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, Lieferung 1, nach Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) und Ergebnisse im Salzsprühtest [4]

mit Bit eingedreht

mit Nuss eingedreht

Bild 10.25:
Kunststoffrahmendübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, Lieferung 1, nach 3 jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (jeweils nicht beregnet) [4]

10.5 Korrosionsverhalten von Anbauteilen

Ebene Anbauteile (z. B. Profile, Bleche, Unterlegscheiben) von Verbindungsmitteln können allen bei Befestigungssystemen möglichen Korrosionsbeanspruchungen ausgesetzt sein:

- Atmosphäre (bewittert, nicht bewittert),
- loser Kontakt mit Baustoff (bewittert, nicht bewittert).

Um den Korrosionsverlauf der verschiedenen Überzugssysteme (**Tabelle 10.10**) unter diesen Bedingungen gezielt festzustellen, wurden Anbauteile (Blechabschnitte) von Spreizdübeln (**Bild 10.5**) nach 3 jähriger Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre metallographisch untersucht. Da Art und Umfang einer Korrosion der verschiedenen Systeme nicht in jedem Fall durch einen Korrosionsabtrag zu beschreiben ist, zumal dieser bei Zinküberzügen innerhalb von 3 Jahren nur sehr gering ist, wurde der Schädigungsgrad wie folgt festgelegt und in **Tabelle 10.11** dargestellt und gekennzeichnet:

- Angriff / Abtrag bei 500-facher Vergrößerung nicht feststellbar (grün),
- Schutzsystem angegriffen, teilweise abgetragen (gelb),
- Schutzsystem abgetragen, Stahl angegriffen (rot).

Oberflächen-schutzsystem OS	Feuer-verzinkung	galvan. Zn ohne und mit Passivierung	galvan. ZnNi plus Dickschicht-passivg. 2	ZnAl-Überzug, Firma 1	ZnAl-Überzug, Firma 2	ZnAl-Überzug, Firma 3	ZnAl-Überzug, Firma 4
Überzugsdicke in µm	43 (35-50)	7 (6-8)	11 (9-13)	12 (0-27)	12 (0-22)	11 (0-25)	4 (0-19)
Haftvermittler	-	-	-	ja	nein	ja	nein
Deckbeschichtg.	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja

Tabelle 10.10:
Angaben zu Oberflächenschutzsystemen (Trommelware) der untersuchten Anbauteile (Überzugsdicke: Mittelwert und Streuung)

Oberflächen-schutzsystem OS		Feuer-verzinkung		galvan. Zn ohne / mit Dickschicht-passivierg. 1		galvan. ZnNi plus Dickschicht-passivierg. 2		ZnAl-Überzug, Firma 1		ZnAl-Überzug, Firma 2		ZnAl-Überzug, Firma 3		ZnAl-Überzug, Firma 4	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
bewittert															
Atmo-sphäre		ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
		Kontakt mit der Atmosphäre													
Stadt	A													[2]	[2]
Meer	B	26	27	30 34	31 35			38	39	42	43 [1]			46 [2]	47 [2]
		loser Kontakt mit Beton													
Stadt	C							[2]						[2]	[2]
Meer	D	28	29	32 36	33 37			40 [2]	41	44	45			48 [2]	49 [2]

Angriff / Abtrag bei 500-facher Vergrößerung nicht feststellbar	Schutzsystem angegriffen, teilweise abgetragen	Schutzsystem abgetragen, Stahl angegriffen

[1] Überzug von Stahl abgehoben (unterrostet) [2] ZnAl-Lamellenüberzug vollständig aufgelöst
Zahlen = Bild 10.xy

Tabelle 10.11:
Korrosionsverhalten von Oberflächenschutzsystemen (Trommelware) der untersuchten Anbauteile in Kontakt mit der Atmosphäre und in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung (bewittert und nicht bewittert) in Stadt- und Meeresatmosphäre

Die entsprechenden Aussagen zum Korrosionsverhalten wurden am Beispiel der Meeresatmosphäre durch die **Bilder 10.26 bis 10.49** belegt.

10.5.1 Kontakt zur Stadt- und Meeresatmosphäre (bewittert)

(In **Tabelle 10.11**: Zeilen A, B - Spalten 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13.
Siehe **Bilder 10.26, 10.30, 10.34, 10.38, 10.42 und 10.46**.)

Der Abtrag der metallischen Überzüge ist bei Bewitterung (Beregnung), abgesehen vom ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (Überzugsdicke i.M. nur 4 µm, kein Haftvermittler), sowohl in Stadt- als auch in Meeresatmosphäre sehr gering. Damit werden die Ergebnisse der visuellen Untersuchungen an den Verbindungsmitteln in bewitterter Stadtatmosphäre (Abschn. 10.4.2 bis 10.4.5) bestätigt, solange ein zusätzlicher Einfluss von Baustoffen (z. B. Eichenholz) ausgeschlossen werden kann.

Wie bereits in Abschn. 10.2 durch Messungen belegt wurde, werden in Meeresnähe bei Bewitterung (Beregnung) jegliche sich ablagernde Chloridaerosole immer wieder abgewaschen. Dadurch ist der Angriff in Meeresnähe nicht erkennbar stärker als in Stadtatmosphäre.

10.5.2 Kontakt zur Stadt- und Meeresatmosphäre (nicht bewittert)

(In **Tabelle 10.11**: Zeilen A, B - Spalten 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14.
Siehe **Bilder 10.27, 10.31, 10.35, 10.39, 10.43 und 10.47**.)

In Meeresatmosphäre ist der Korrosionsabtrag der metallischen Überzüge im nicht bewitterten Bereich deutlich stärker als im bewitterten Bereich und auch deutlich stärker als in nicht bewitterter Stadtatmosphäre. Wie bereits in Abschn. 10.2 durch Messungen belegt wurde, ist dieser Unterschied darauf zurückzuführen, dass sich in nicht bewitterter Meeresatmosphäre im Laufe der Zeit Chloride erheblich aufkonzentrieren können (**Tabelle 10.2**). Bei galvanischen ZnNi-Überzügen wird der Korrosionsangriff durch herstellungsbedingte Risse und Abplatzungen überlagert.

In Stadtatmosphäre ist der Korrosionsabtrag, abgesehen vom ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (Überzugsdicke i.M. nur 4 µm, kein Haftvermittler), innerhalb von 3 Jahren sowohl im beregneten als auch nicht beregneten Bereich sehr gering und metallographisch nicht sicher feststellbar.

10.5.3 Loser Kontakt mit dem Beton in Stadt- und Meeresatmosphäre (bewittert)

(In **Tabelle 10.11**: Zeilen C, D - Spalten 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13.
Siehe **Bilder 10.28, 10.32, 10.36, 10.40, 10.44 und 10.48**.)

Im bewitterten Außenbereich ist der Korrosionsangriff der Schutzsysteme bei Kontakt mit Beton (abgesehen von galvanischen ZnNi-Überzügen), nahezu unabhängig von der Art der Atmosphäre (Stadt, Meer), im Regelfall stark ausgeprägt und zumeist deutlich intensiver als bei direkter Bewitterung in Stadt- und Meeresatmosphäre. Ausgenommen ist der ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4, der wegen fehlendem Haftvermittler und sehr geringer Schichtdicke mit Nullstellen im Außenbereich grundsätzlich nahezu unwirksam ist (siehe Abschn. 9 und 10).

Bei dem genannten Befund ist der Einfluss von Chloriden weitgehend auszuschließen, denn die Chloride gelangen kaum in den Kontaktbereich Blech/Beton und Bleche im Kontakt mit bewittertem Beton verhalten sich in Stadt- und Meeresatmosphäre nahezu identisch. Folgende Gründe können für das unterschiedliche Verhalten angeführt werden:
Der Unterschied der Korrosion zwischen direkter Bewitterung in der Atmosphäre und Kontakt mit bewittertem Beton kann zunächst darauf zurückgeführt werden, dass die Schutzsysteme langzeitig im Kontakt mit durchfeuchteten/nassen Beton stehen. Unterhalb der Bleche ist die Möglichkeit einer Trocknung geringer. In der Atmosphäre greift lediglich wasserdampfhaltige Luft an.

Bei einigen Systemen können weitere umgebungsbedingte Einflüsse zur Geltung kommen.

- Bei den Zinküberzügen (Feuerverzinkung, galvanische Verzinkung) wird durch Dauerbefeuchtung unter Luftabschluss (also im Kontaktbereich mit nassem Beton) die Bildung schützender carbonatischer Deckschichten behindert, was das besonders ungünstige Verhalten im Vergleich zur normalen atmosphärischen Bewitterung erklärt.
- Bei ZnNi-Überzügen beruht der Korrosionsschutz nicht auf einer umgebungsabhängigen Deckschichtbildung, sondern auf einer Ausbildung besonders legierter (edler) Oberflächenfilme. Deshalb wird durch eine Kontaktierung mit feuchten/nassen Beton das Korrosionsverhalten nicht entscheidend beeinflusst.
- Bei den ZnAl-Lamellenüberzügen fällt insbesondere das extrem unterschiedliche Verhalten zwischen Kontakt mit der Atmosphäre und Kontakt mit bewittertem Beton des Überzuges der Firma 1 auf. Hier ist zu berücksichtigen, dass dieser Überzug überwiegend Aluminium enthält (Abschn. 8.4.1). Aluminium ist ein amphoteres Metall und deshalb auch gegenüber alkalischen wässrigen Medien (Wasser im Kontakt mit dem Beton) in besonderer Weise korrosionsempfindlich.

10.5.4 Loser Kontakt mit dem Beton in Stadt- und Meeresatmosphäre (nicht bewittert)

(In **Tabelle 10.11**: Zeilen C, D - Spalten 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14)
Siehe **Bilder 10.29, 10.33, 10.37, 10.41, 10.45 und 10.49**.)

Im nicht bewitterten Außenbereich ist der Korrosionsangriff der Schutzsysteme, unabhängig von der Art der Atmosphäre (Stadt, Meer) bei Kontakt mit Beton im Regelfall eher gering (abgesehen von galvanischen Zinküberzügen und ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4) und zumeist deutlich geringer als im bewitterten Außenbereich im losen Kontakt mit dem Beton. Im nicht bewitterten Außenbereich besteht kein systematischer Unterschied zwischen direktem Kontakt zur Atmosphäre und Kontakt zum Beton.

Folgende Gründe können für das genannte Verhalten im nicht bewitterten Bereich im Vergleich zur Bewitterung angeführt werden:
Die Feuchtigkeit des Betons im Kontakt mit dem Anbauteil ist im nicht bewittertem Bereich deutlich geringer als bei Bewitterung.

Das Sonderverhalten der galvanischen Zinküberzüge und des ZnAl-Lamellenüberzuges der Firma 4 ist wie folgt zu erklären:
Bei dem sehr dünnen galvanischen Zinküberzug reicht eine vorübergehende Störung der Deckschichtbildung aus, um die dünnen galvanischen Zinküberzüge abzutragen und Stahlkorrosion hervorzurufen. Der ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (Überzugsdicke i.M. nur 4 µm, kein Haftvermittler) versagt bereits bei milden Korrosionsbedingungen.

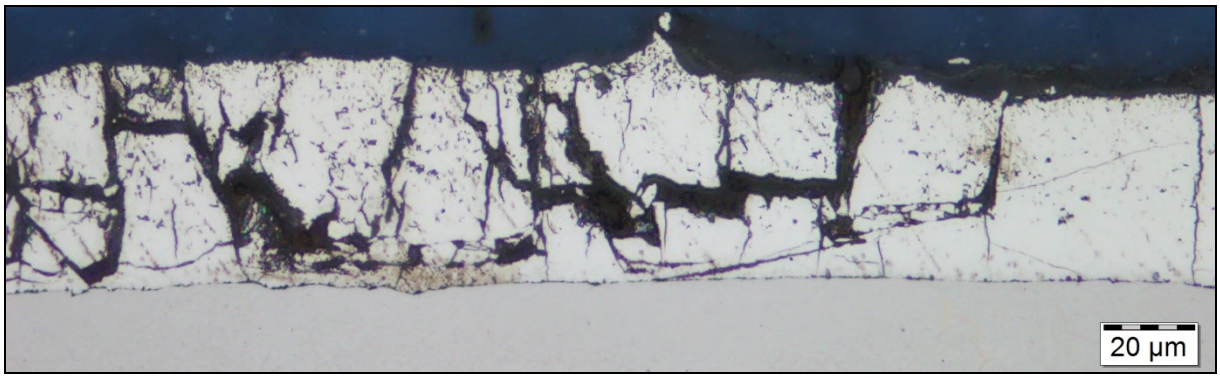


Bild 10.26:
Feuerverzinktes Anbauteil in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

Bild 10.27:
Feuerverzinktes Anbauteil in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

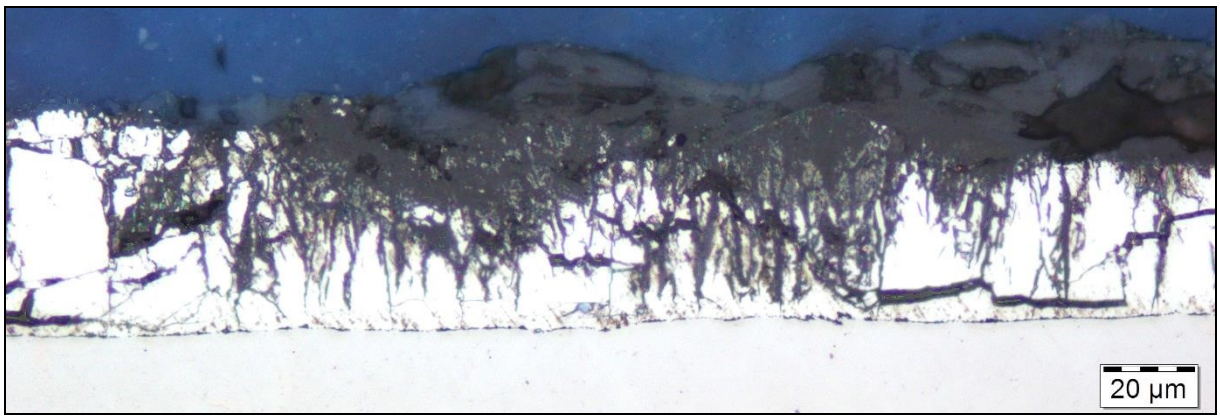


Bild 10.28:
Feuerverzinktes Anbauteil in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

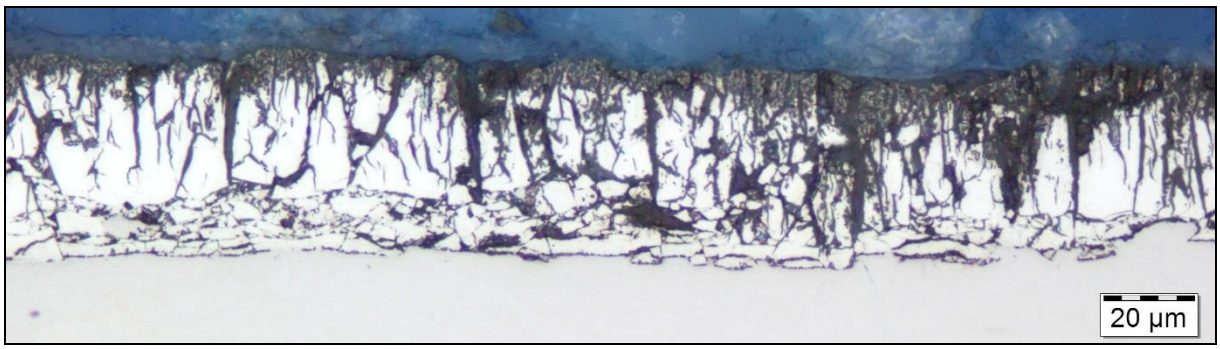


Bild 10.29:
Feuerverzinktes Anbauteil in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

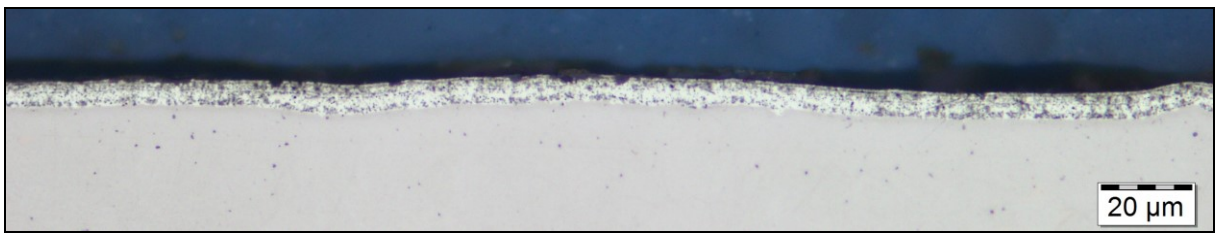


Bild 10.30:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung ohne Passivierung in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

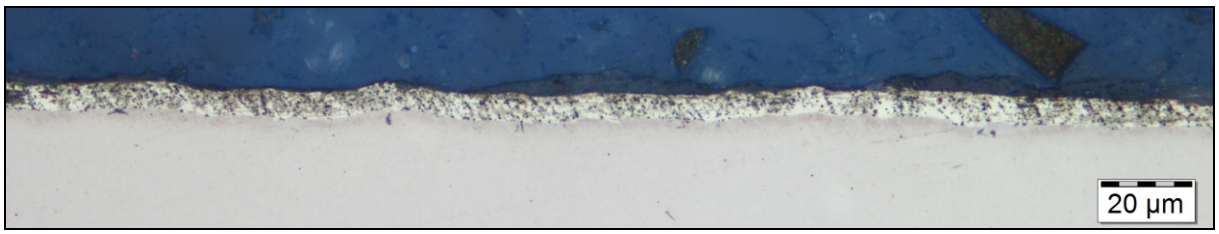


Bild 10.31:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung ohne Passivierung in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

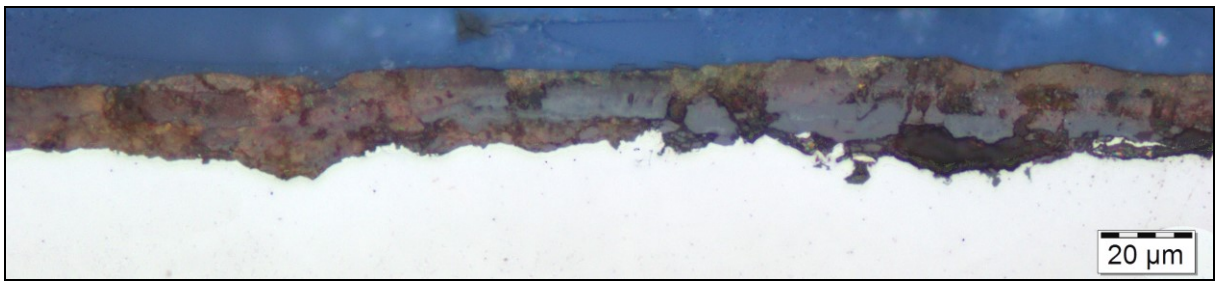


Bild 10.32:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung ohne Passivierung in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

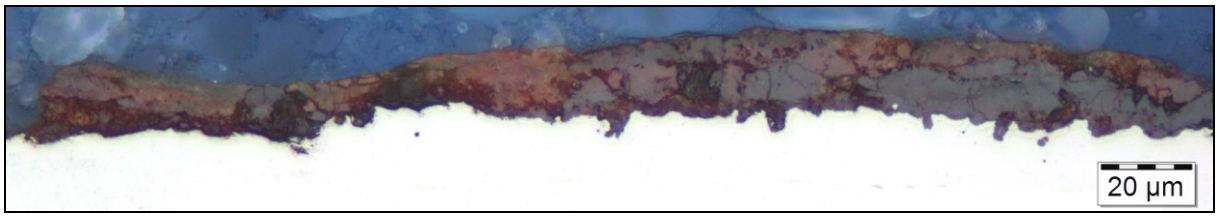


Bild 10.33:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung ohne Passivierung in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

Bild 10.34:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

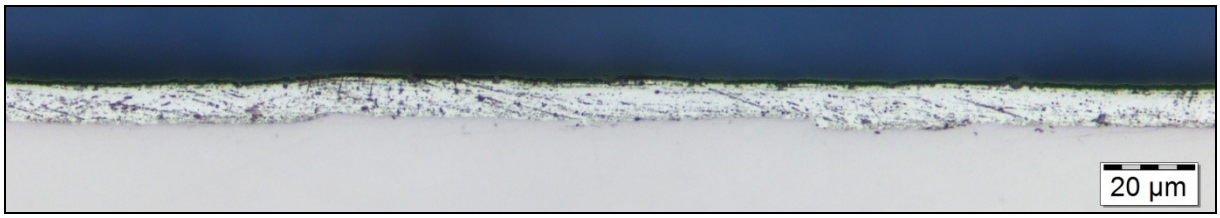


Bild 10.35:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

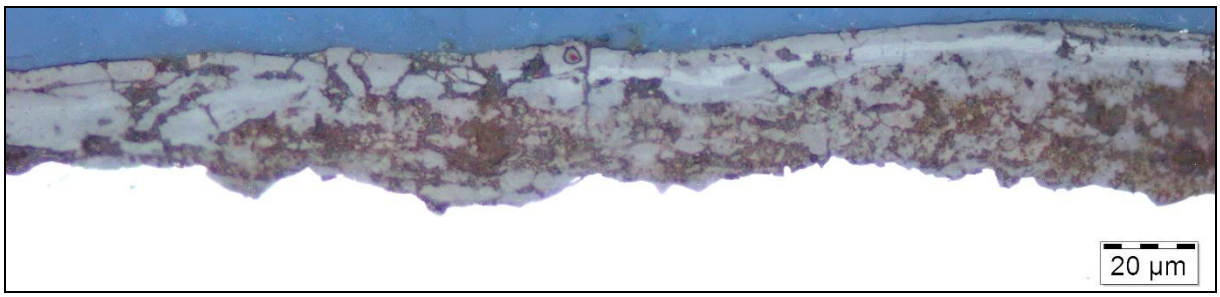


Bild 10.36:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

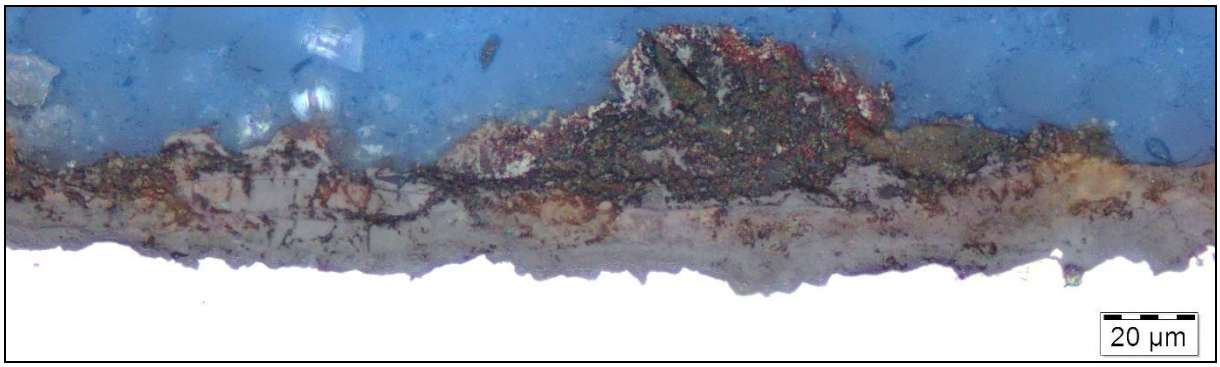


Bild 10.37:
Anbauteil mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

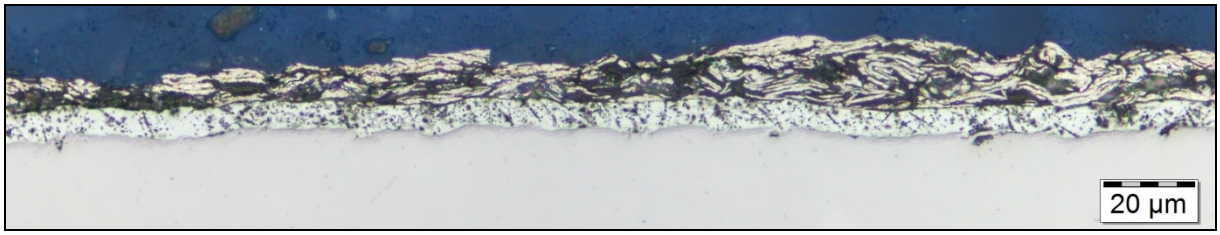


Bild 10.38:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

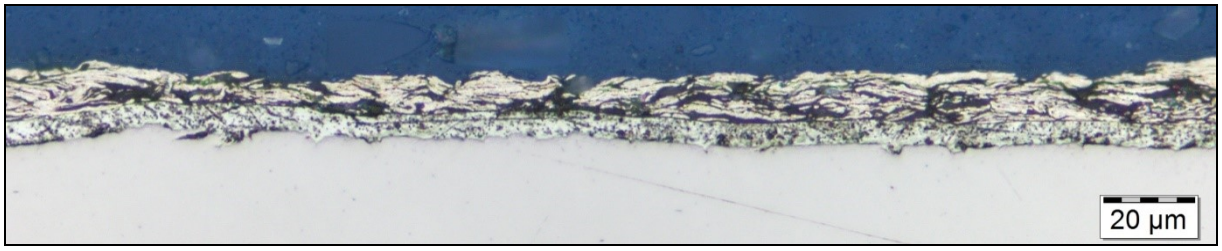


Bild 10.39:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

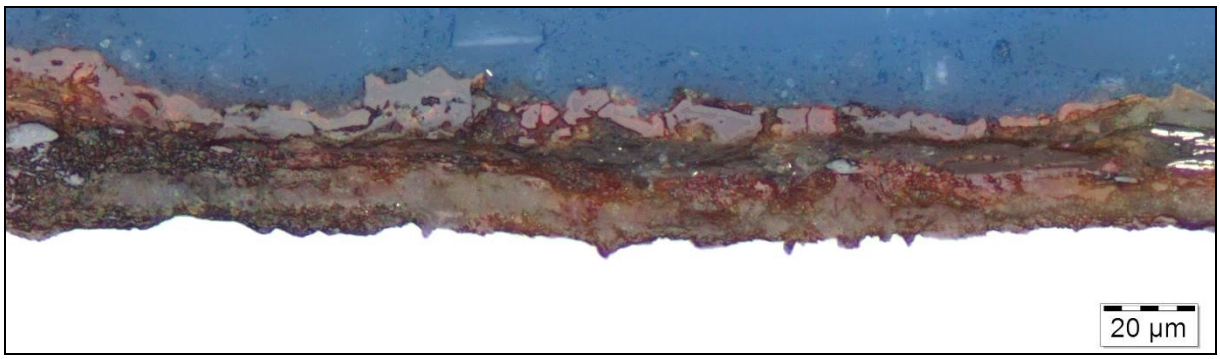


Bild 10.40:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

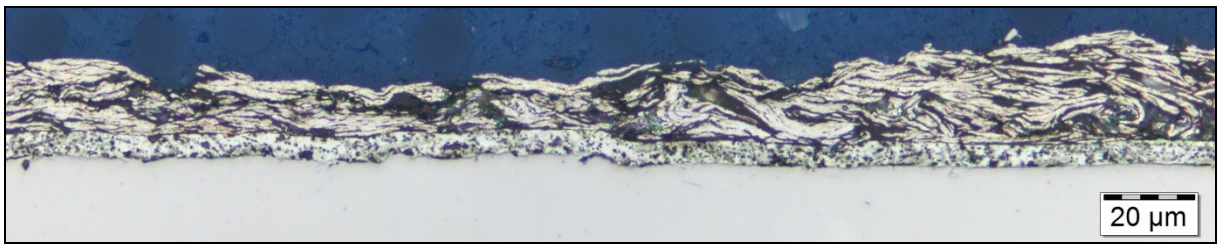


Bild 10.41:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

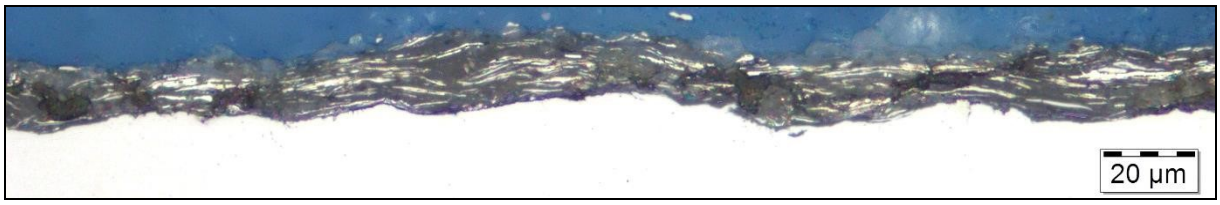


Bild 10.42:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

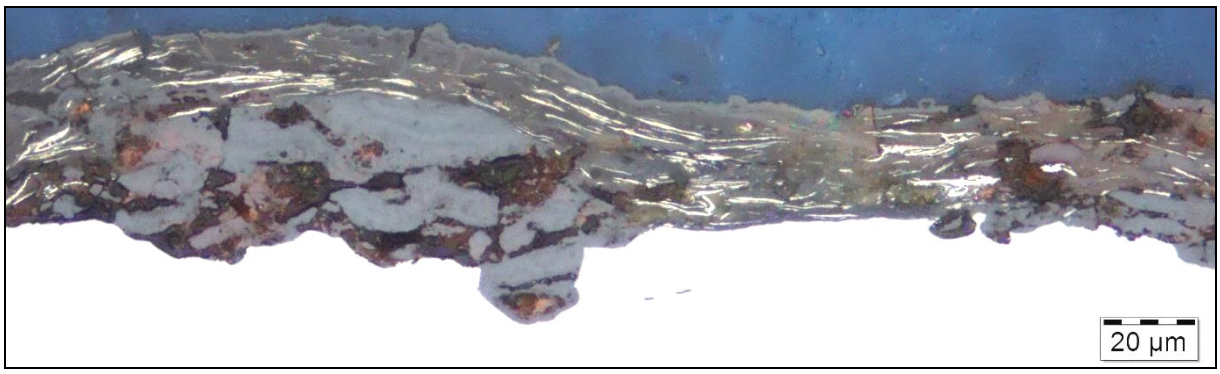


Bild 10.43:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

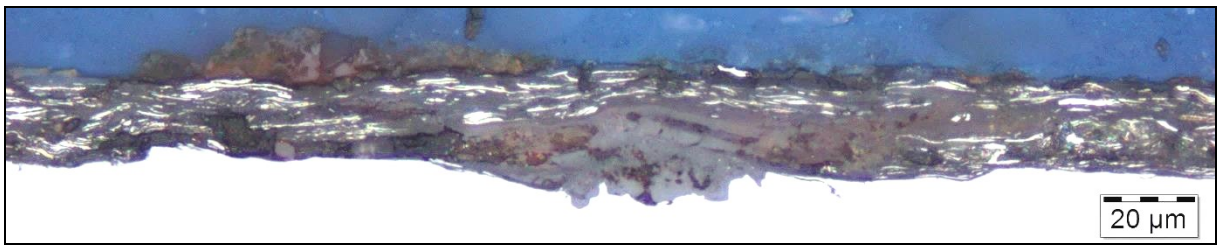


Bild 10.44:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

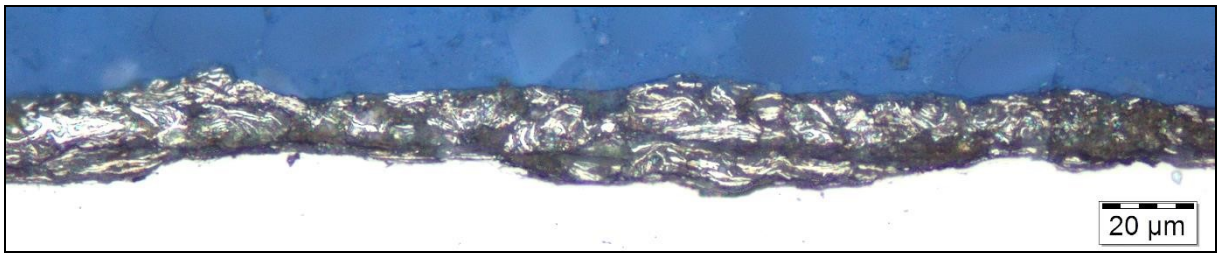


Bild 10.45:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

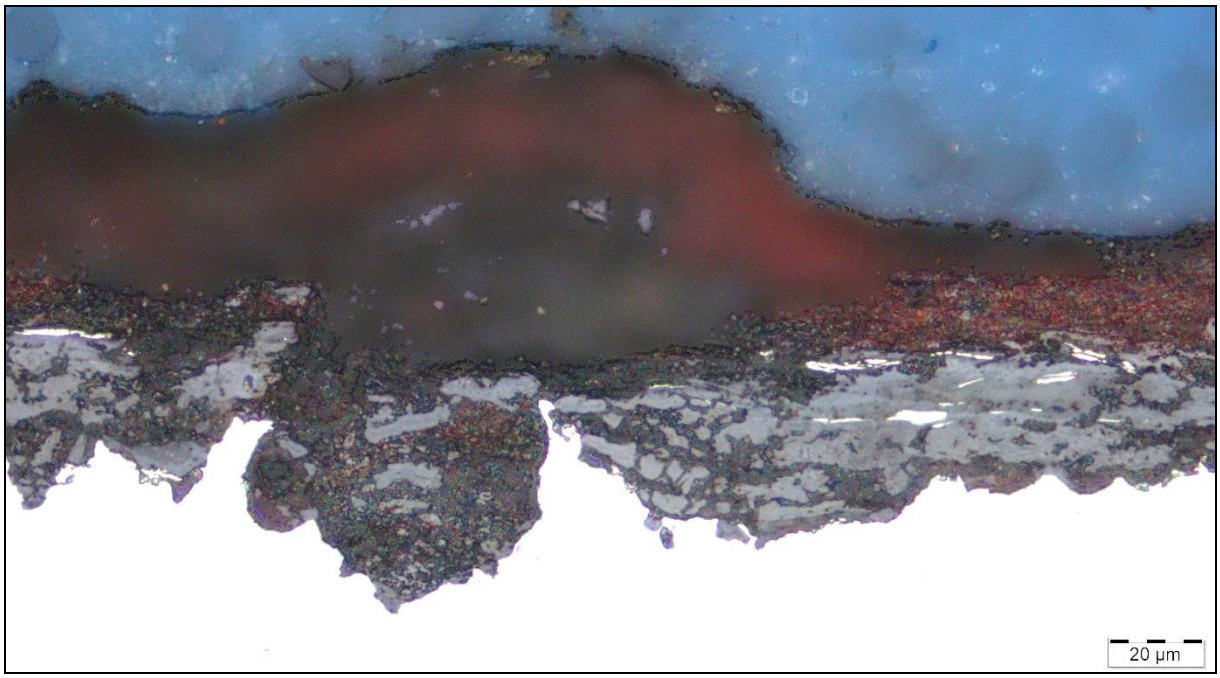


Bild 10.46:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

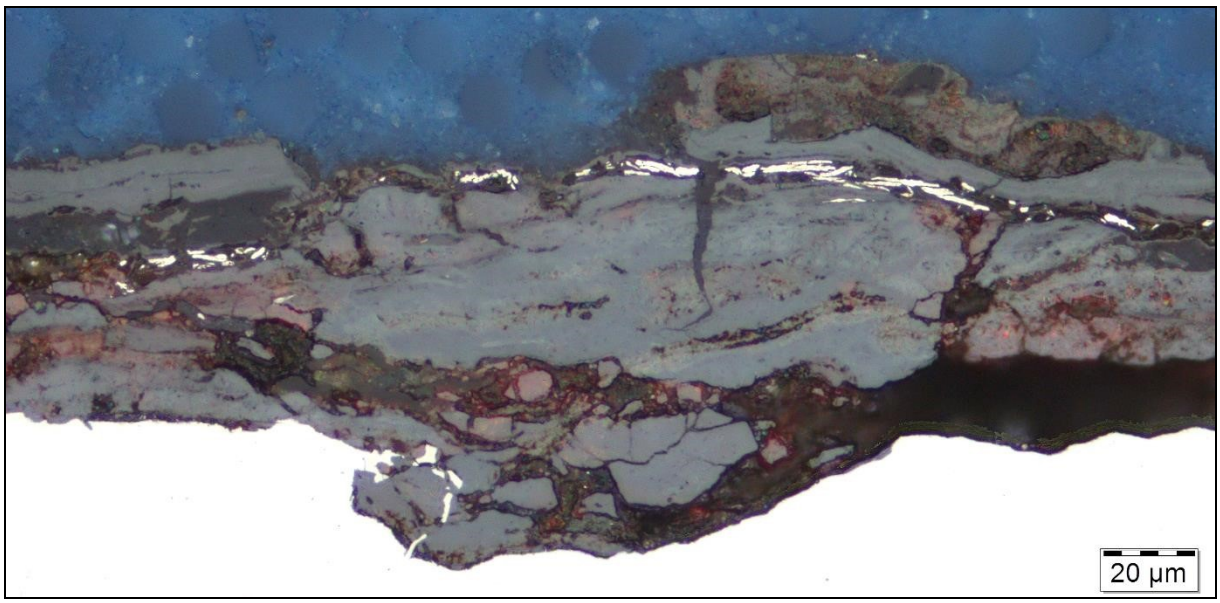


Bild 10.47:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 in Kontakt mit der Atmosphäre nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

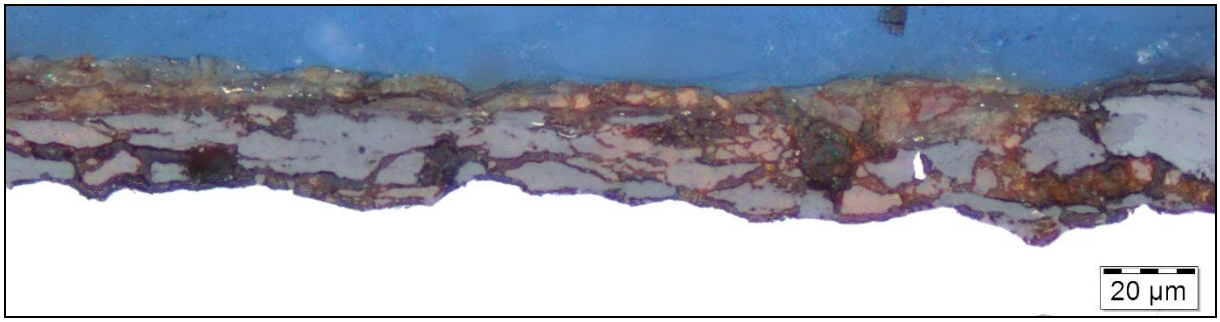


Bild 10.48:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, bewittert

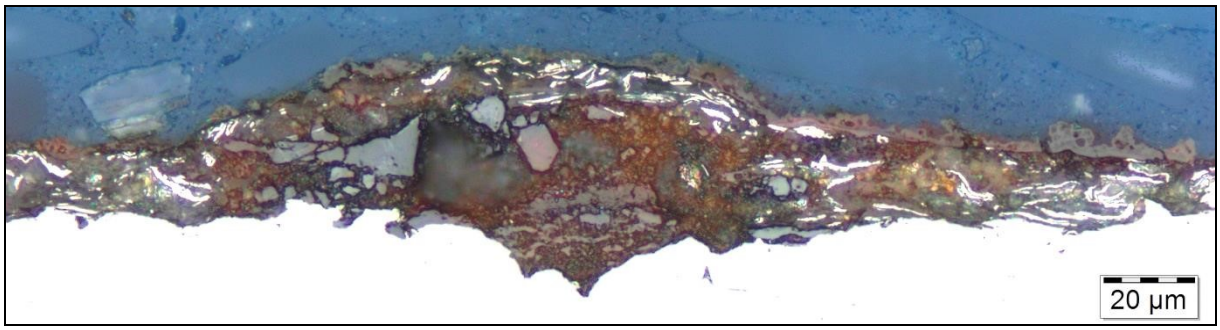


Bild 10.49:
Anbauteil mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 in losem Kontakt mit dem Beton nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre, nicht bewittert

10.6 Ergänzende Langzeituntersuchungen an korrosionsgeschützte Verbindungsmittel in Meeresatmosphäre

Die in den Abschnitt 10 an Verbindungsmitteln durchgeführten Naturversuche in Meeresatmosphäre sind überwiegend auf 3 Jahre begrenzt. Um die Ergebnisse dieser Versuche abzusichern, wurde auf gutachterliche Stellungnahmen zurückgegriffen, die ihrerseits wiederum auf Langzeituntersuchungen unter baupraktischen Bedingungen beruhen [6]. Die in der Folge behandelten Ergebnisse dieser Sonderuntersuchungen werden in Abschn. 12 den Ergebnissen aus dem Salzsprühtest gegenübergestellt.

Folgende Untersuchungen wurden ergänzt:

- Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzügen unterschiedlicher Dicke, ohne bzw. mit Haftvermittler bis zu 6 Jahren in Meeresatmosphäre (nicht bewittert).
- Köpfe von in Holz eingedrehten Holzschrauben mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen ohne und mit Passivierung sowie zusätzlicher Deckbeschichtung bis zu 7 Jahren in Meeresatmosphäre (bewittert).
- Gewindefurchschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen mit Schlagschrauber in Aluminiumprofile eingeschraubt, nach Auslagerung in Landatmosphäre.

Die Bewertung des Korrosionszustandes erfolgte, wie bei den an Verbindungsmitteln durchgeführten Naturversuchen (Abschn. 10.4.2 bis 10.4.5), nach den Bewertungskriterien in Abschn. 10.4.1.

10.6.1 Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzügen unterschiedlicher Dicke, ohne bzw. mit Haftvermittler bis zu 6 Jahren in Meeresatmosphäre (nicht bewittert).

Sachverhalt. Die folgenden Untersuchungen sollen folgenden Sachverhalt bzw. Fragestellung absichern:
Ist bei ZnAl-Lamellenüberzügen eine vorausgehende Applikation eines Haftvermittlers (galvanische Unterzinkung und/oder Zinkphosphatierung) erforderlich, um eine möglichst dauerhafte Schutzwirkung zu erzielen?

Diese Fragestellung ergab sich aus der Beobachtung, dass bei Auslagerung in praxisnahen Klimaten (Abschn. 9 und 10) offensichtlich insbesondere metallische Überzüge ohne Haftvermittler frühzeitige Anrostungen (Rotrost unter kritischen Umgebungsbedingungen (hohe Luftfeuchte, Meeresatmosphäre) zeigen. Denn bei ZnAl-Lamellenüberzügen, die im Trommelverfahren auf Kleinteile appliziert werden, werden gleichartige Produkte eines Herstellers von Anwender zu Anwender oft unterschiedlich, nämlich sowohl ohne als auch mit Haftvermittler aufgebracht.

Um den Einfluss eines Haftvermittlers auf das Korrosionsverhalten gezielt zu untersuchen, wurden Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzug ohne und mit Haftvermittler bis zu 6 Jahren in Meeresatmosphäre auf der Insel Helgoland (Korrosivitätskategorie C4) ca. 40 m vom Meer entfernt im nicht unmittelbar bewitterten Bereich ausgelagert. Der Auslagerungsort ist der Stelle C1 in **Bild 10.1** zuzuordnen und wird in Abschn. 10.2 detailliert beschrieben.

Versuchsparameter. Es wurden die in Abschn. 8.4.4 und Abschn. 8.4.5 ausgewiesenen Rohrschellen mit den in **Tabelle 10.12** nochmals zusammengestellten Korrosionsschutzmaßnahmen untersucht. Die Überzüge in der Tabelle sind in den **Bildern 8.18 bis 8.23** dargestellt.

Ergebnisse. Das korrosionsbedingte Aussehen der Rohrschellen innerhalb von 6 Jahren ist in **Bild 10.50** dargestellt. Es konnte das folgende Verhalten festgestellt werden (**Tabelle 10.13**):

- Die Variante mit Haftvermittler (Rohrschelle 3) zeigt bei hoher Überzugsdicke von i.M. 39 µm innerhalb von 6 Jahren keinen Rotrost.
- Varianten mit Haftvermittler (Rohrschelle 1 und 2) zeigen bei Überzugsdicke von i.M. 12 bzw. 18 µm in Meeresatmosphäre nur einen temporären Korrosionsschutz von etwa 5 Jahren.
- Die Variante ohne Haftvermittler (Rohrschelle 4) zeigt selbst bei vergleichsweise hoher Überzugsdicke von i.M. 30 µm bereits nach wenigen Monaten zeitlich stark zunehmenden Rotrost.

Bauteil	Hersteller vom Bauteil und OS		Oberflächenschutzsystem OS – Korrosionsschutz				
			Haftvermittler		ZnAl-Überzug		Deckbeschichtung Db
	Bauteil	OS	Unterzinkung	Zinkphosphat	Produktbezeichnung	Dicke	
Rohrschelle 1	4	D	Ü: 8-12		Firma 4	Ü: 5-20 MW: 12	Db3
Rohrschelle 2			Ü: 6-10	Ü: 1-2		Ü: 5-30 MW: 18	
Rohrschelle 3	4	D	Ü: 6-9	Ü: 1-2	Firma 5	U: 15-95 MW: 39	
Rohrschelle 4			es ist kein Haftvermittler vorhanden			U: 15-70 MW: 30	keine Db

Zahlen = Dicke des Überzuges in µm, U = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 10.12:
Oberflächenschutzsysteme OS der mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 und Firma 5 beschichteten Rohrschellen

Bauteil	Haftvermittler		Mittlere Dicke ZnAl-Überzug in µm	Auslagerungszeit in Jahren				
	Unterzinkung	Phosphatierung		0,5	1	3	5	6
Rohrschelle 1	ja	nein	12					
Rohrschelle 2	ja	ja	18					
Rohrschelle 3	ja	ja	39					
Rohrschelle 4	nein	nein	30					

keine	geringe	starke	sehr starke	Rotrostbildung

Tabelle 10.13:
Korrosionsverhalten von Rohrschellen mit dem ZnAl-Lamellenüberzug der Firmen 4 und 5

Folgerungen. ZnAl-Lamellenüberzüge bedürfen, vor allem wohl wegen der bei Trommelware offenbar unvermeidbaren Schichtdickenschwankungen, einen Haftvermittler.

Dieser übernimmt gleichzeitig die Aufgabe eines Korrosionsschutzes an Stellen mit nur geringer Dicke des ZnAl-Lamellenüberzuges.

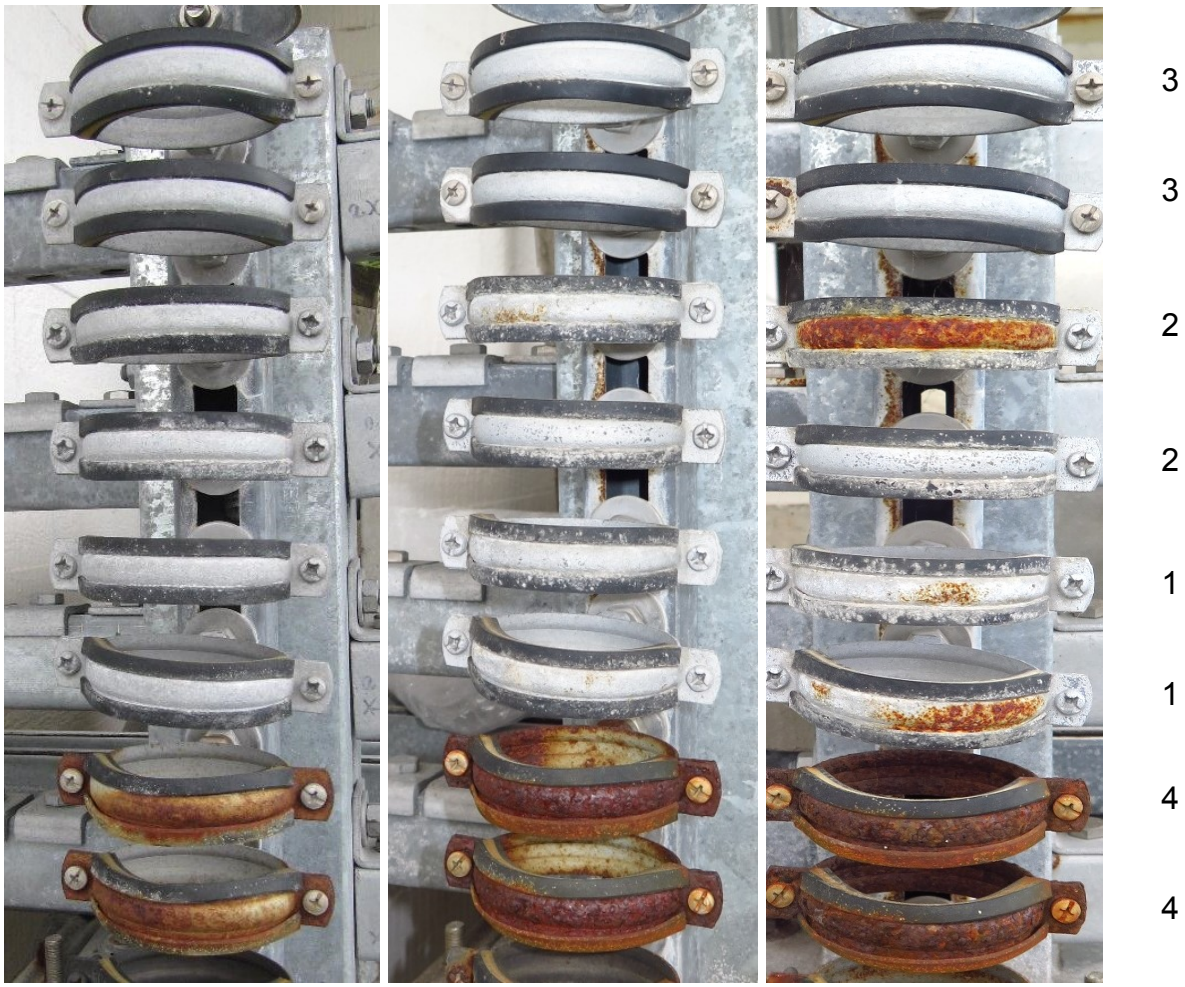


Bild 10.50:
Rohrschellen mit den in Tabelle 10.12 ausgewiesenen Korrosionsschutzüberzügen (die seitlichen Zahlen bezeichnen die Nummer der Rohrschellen mit jeweiligem Überzug)

10.6.2 Köpfe von in Holz eingedrehten Holzschrauben mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen ohne und mit Passivierung sowie zusätzlicher Deckbeschichtung bis zu 7 Jahren in Meeresatmosphäre (bewittert).

Sachverhalt. Die folgenden Untersuchungen sollen folgenden Sachverhalt bzw. Fragestellung absichern:
Sind bei im Trommelverfahren applizierten galvanischen ZnNi-Überzügen eine anschließende Passivierung und eine zusätzliche Deckbeschichtung in der Lage, unter kritischen Korrosionsverhältnissen (Meeresatmosphäre) eine wirksame Verbesserung hinsichtlich des Langzeitverhaltens zu erzielen?

Hintergrund dieser Fragestellung ist, dass sowohl bei galvanischen Zink- als auch ZnNi-Überzügen, die im Trommelverfahren appliziert werden, trotz zusätzlicher Passivierung und Deckbeschichtung in den hiesigen Auslagerungen unter natürlichen Umgebungsbedingungen (Abschn. 9 und 10) nicht in jedem Fall die vielfach publizierte hohe Be-

ständigkeit festgestellt wurde.

Die in unterschiedliche Hölzer (Fichte, imprägnierte Fichte, Eiche) eingedrehten Schrauben wurden 7 Jahre in Meeresatmosphäre auf der Insel Helgoland ca. 40 m vom Meer entfernt bewittert ausgelagert. Der Auslagerungsort ist der Stelle C1 in **Bild 10.1** zuzuordnen und wird in Abschn. 10.2 detailliert beschrieben.

Versuchsparameter. Die Schrauben (Bez. Holzschraube L1 in **Tabellen 8.5 und 8.6**, Abschn. 8.3) weisen folgenden Korrosionsschutz auf:

- Galvanischer ZnNi-Überzug (i. M. 6 µm dick),
- galvanischer ZnNi-Überzug (i. M. 6 µm dick) plus Dickschichtpassivierung 2 (Abschn. 8.6),
- galvanischer ZnNi-Überzug (i. M. 6 µm dick) plus Dickschichtpassivierung 2 plus Deckbeschichtung 1 (Topcoat, Gleitmittel, Abschn. 8.7.1).

Ergebnisse. Das Korrosionsverhalten und der Korrosionszustand nach 3, 5 und 7 Jahren sind am Beispiel der in imprägnierte Fichte eingedrehten Schrauben in **Bild 10.51** dargestellt. Des Weiteren zeigt das Bild den Korrosionszustand der in Eiche eingedrehten Schrauben nach 7 Jahren. Bei den Auslagerungen konnte bezüglich der hier beispielhaft dargestellten Schraubenköpfe folgendes Verhalten festgestellt werden:

- Die Köpfe der Holzschrauben zeigen unabhängig vom o.g. Korrosionsschutz (ZnNi-Überzug ohne und mit Passivierung bzw. Deckbeschichtung) und der Holzart (imprägnierte Fichte bzw. Eiche) bereits nach einigen Jahren starke Anrostungen.
- Nur in den ersten 3 Jahren wurde tendenzmäßig eine gewisse Verbesserung des Korrosionsverhaltens in der Reihenfolge ZnNi - ZnNi plus Passivierung - ZnNi plus Passivierung plus Deckbeschichtung (Topcoat) festgestellt. Im Laufe der Versuchszeit wurden die Unterschiede bezüglich der 3 genannten Varianten immer geringer. Dieses gilt für die in Eiche eingeschraubten Schrauben in stärkerem Maße als für solche in Fichte.
- Die Korrosion des Schraubenkopfes findet stets ihren Ausgang im Kontaktbereich zum Holz (peripherer Randbereich) und zwar bei Eiche früher als bei Fichte (ohne und mit Imprägnierung). Dieses Verhalten kann erklärt werden durch die Speicherwirkung des oberflächennahen Holzes für Feuchte und die Fähigkeit von Eiche in den Zellhohlräumen in Gegenwart von Wasser durch Hydrolyse sauer zu reagieren (Abschn. 3.3.1). Allerdings ist nach wenigen Jahren ein holzspezifischer Einfluss auf das Korrosionsverhalten nicht mehr erkennbar; alle in die 3 Hölzer eingedrehten Schrauben zeigen im Kopfbereich starke Rotrostbildung.

Metallographische Untersuchungen an den Holzschrauben (Abschn. 8.3, **Bilder 8.5 bis 8.11**) gaben Hinweise zur Ursache des genannten Korrosionsverhaltens. Sie konnten zeigen, dass die als Trommelware mit einem galvanischen ZnNi-Überzug versehenen Verbindungsmittel herstellungsbedingt Risse und Abplatzungen beim Überzug aufweisen. Auf derartigen Oberflächen mit lokalen Unterbrechungen des Überzuges ist die Wirkung einer Passivierung und einer nur weinige µm dicken Deckbeschichtung (Topcoat) begrenzt.

Fichte imprägniert, 3 Jahre

Fichte imprägniert, 5 Jahre

Fichte imprägniert, 7 Jahre

Eiche, 7 Jahre

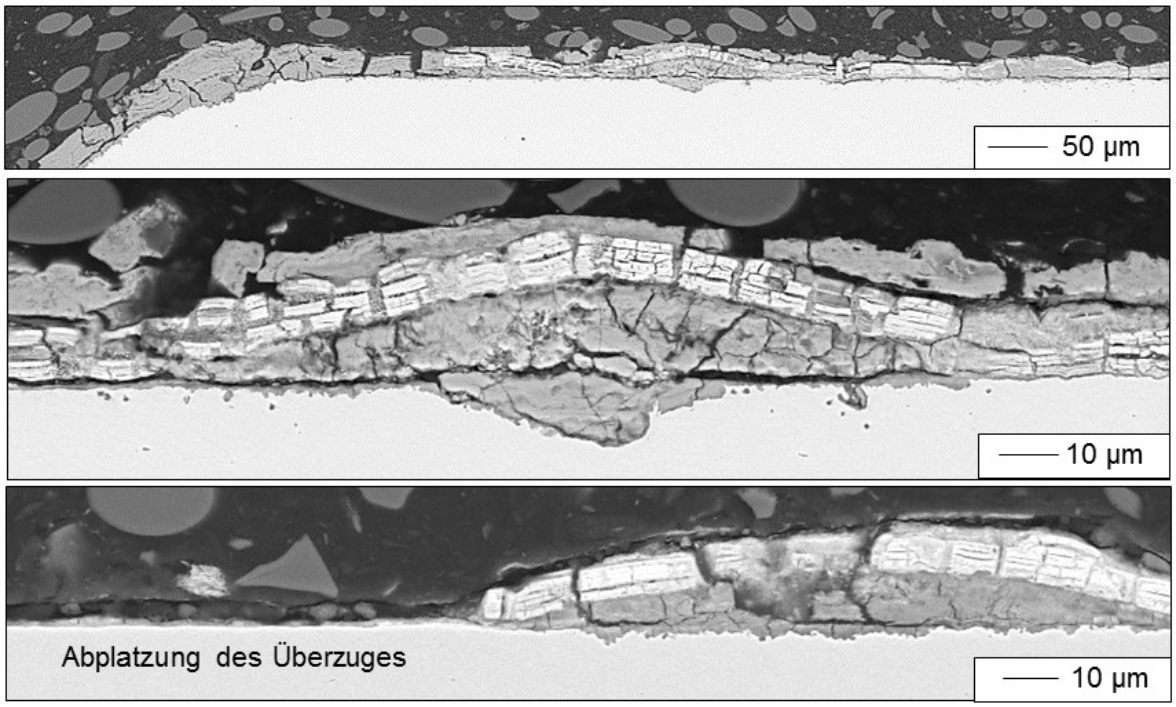
ZnNi ZnNi + Passivierung ZnNi + Passivierung + Topcoat

Bild 10.51:
Holzschrauben mit ZnNi-Überzug nach Auslagerung in Meeresatmosphäre (bewittert)

An korrodierten Holzschrauben wurde durch Schliffbetrachtungen erkannt, dass der Überzug ausgehend von Fehlstellen unterrostet wird und als Folge abplatzt (**Bilder 10.52 bis 10.54**). Dies erklärt die nur unzureichende Wirkung in Meeresatmosphäre.

Folgerungen. Diese Ergebnisse lassen folgende Folgerungen zu:

- Es besteht bei der hiesigen Trommelware keine wirksame Verbesserung des Korrosionsschutzes in Meeresatmosphäre aufgrund der zusätzlichen Passivierung und der zusätzlichen Deckbeschichtung.
- Auch der Korrosionsschutz bestehend aus galvanischem ZnNi-Überzug, Passivierung und Deckbeschichtung ist bei der hiesigen Trommelware für eine längerzeitige Anwendung in Meeresatmosphäre offensichtlich nicht geeignet.



Bilder 10.52 bis 10.54:
Korrosionserscheinungen am Kopf einer Holzschraube mit galvanischem ZnNi-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2 plus Deckbeschichtung 1 nach 3 Jahren Auslagerung in Meeresatmosphäre (bewittert)

10.6.3 Gewindefurchschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzügen mit Schlagschrauber in Aluminiumprofile eingeschraubt, nach Auslagerung in Landatmosphäre.

Sachverhalt. Gewindefurchschrauben werden im Metallbau direkt in ein vorgebohrtes Kernloch geschraubt. Die Schraube formt sich dabei spanlos ihr eigenes Gegengewinde. Mit ZnAl-Lamellenüberzügen geschützte Schrauben wurden beispielsweise in Mengen von etwa 130.000 Stück bei einer Freiland-Photovoltaikanlage in ländlicher Umgebung zur Befestigung der Photovoltaikmodule verwendet. Die mit ZnAl-Lamellenüberzug geschützten Schrauben wurden mittels eines Schlagschraubers durch eine Aluminium-Klemmplatte in eine Aluminium-Klemmleiste eingeschraubt. Um die erforderlichen hohen Anzugsmomente zu erreichen, wurde ein Schlagschrauber gewählt. Hierbei han-

delt es sich um ein Werkzeug zum Ein- und Ausdrehen von Schrauben und Muttern durch pulsartige („geschlagene“) Drehbewegungen.

Versuchsparameter. Die Schrauben (Bez. Gewindefurchschraube in **Tabelle 8.13,** Abschn. 8.4.4) weisen folgenden Korrosionsschutz auf:
ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (i. M. 20 µm dick) plus Deckbeschichtung 3 (Abschn. 8.7.3).

Ergebnisse. Nach wenigen Monaten zeigten bei nahezu 50 % der Gewindefurchschrauben die Köpfe eine (Stahl-)Korrosion mit einhergehender Rotrostbildung, hier vor allem am Bundansatz und am Sechskant. Neuwertige Schrauben, die für Versuchszwecke eingeschraubt wurden, zeigten in diesen Bereichen eine auffällige Graufärbung, eine Folge der mechanischen Beanspruchung durch den Schlagschrauber (**Bild 10.55**).

Bild 10.55:
Aussehen der Köpfe von mittels ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 geschützten Gewindefurchschrauben, die mit einem Schlagschrauber in vorgebohrte Aluminium-Leisten eingeschraubt wurden; links: eine Schraube unmittelbar nach dem Eindrehen, Mitte und rechts: nach 7 monatiger Bewitterung in ländlicher Atmosphäre

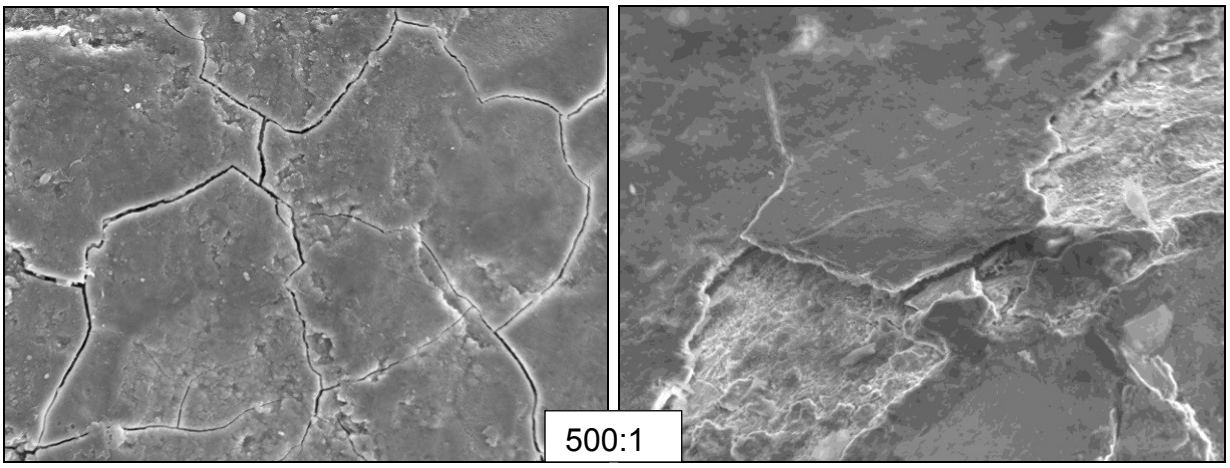


Bild 10.56:
Netzrisse und Abplatzungen des ZnAl-Lamellenüberzuges am mechanisch beanspruchten Sechskant des Schraubenkopfes

Weitere Untersuchungen konnten nachweisen, dass diese Beanspruchung beim Einschrauben starke Verletzungen der Zinkauflage zur Folge hatte. In den grau gefärbten

Bereichen am Bundansatz und am Sechskant, in welchem der Schlagschrauber angreift, ist der Überzug netzartig aufgerissen, wobei der ZnAl-Lamellenüberzug als Folge plattenartig heraus gebrochen ist (**Bild 10.56**). Diese lokalen Enthaftungen und Abplatzungen des Überzuges haben letztlich die frühzeitige Stahlkorrosion bewirkt. Ein kathodischer Korrosionsschutz fand offensichtlich nicht statt. Gründe hierfür werden in Abschn. 4.5 benannt.

Folgerungen. Die Rotrostbildung der Schraubenköpfe am Bund und auf den Kanten des Sechskants ist ausschließlich auf Beschädigungen des ZnAl-Lamellenüberzuges durch die Verwendung des Schlagschraubers zurückzuführen. ZnAl-Lamellenüberzüge neigen bei derartigen mechanischen Belastungen zu Rissbildung und Enthaftung, insbesondere wenn diese Überzüge, wie im vorliegenden Fall, ohne zusätzlichen Haftvermittler aufgebracht werden.

Literatur Abschnitt 10

[1] U. Nürnberger, C. Köse: Korrosionsverhalten von Anschweißankern aus nichtrostendem Stahl bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen aus Naturwerkstein. Bautechnik 87(2010), 373-382

[2] U. Nürnberger, J. Küenzlen: Einsatz von Kunststoffrahmendübeln bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen. Zeitschrift ql²/8 Fa. Würth. 5 (2012) Nr. 8, S.5-13

[3] Europäische Technische Zulassung ETA-08/0190, Würth Kunststoffrahmendübel W-UR, 12. August 2011

[4] J. Küenzlen, U. Nürnberger, A. Wieland: Auslagerungsversuche an in Betonbauteilen eingesetzten Kunststoffrahmendübeln unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen (Städtisches Klima, Meeresklima), 2009

[5] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

[6] U. Nürnberger: Gutachten und Langzeitauslagerungen im Auftrag von Firmen

11. Salzsprühtests

Der Salzsprühtest (auch Salzsprühnebelprüfung genannt) nach DIN EN ISO 9227 [1] ist eine standardisierte Prüfung für die Bewertung der Korrosionsschutzwirkung von organischen Beschichtungen, metallischen Überzügen und speziellen Oberflächenbehandlungen (z. B. Chromatierungen). Er wird als Prüfungsmethode für die Qualitätskontrolle eingesetzt, jedoch werden häufig auch Folgerungen für das Langzeitverhalten der Korrosionsschutzmaßnahmen unter natürlichen Umgebungsbedingungen abgeleitet.

11.1 Versuchsdurchführung

Die zu bewertenden Teile werden in eine Prüfkammer gehängt oder in einem Gestell montiert und mit der gesprühten neutralen Natriumchloridlösung beansprucht. Beim Salzsprühtest gemäß DIN EN ISO 9227 [1] sind die folgenden Parameter einzuhalten:

- pH-Wert 6,5 bis 7,2,
- Konzentration der NaCl-Lösung 50 ± 5 g/l,
- Temperatur der Kammer 35 °C ± 2 °C,
- Überdruck an der Vernebelungsdüse 0,7 bis 1,4 bar,
- kondensiertes Volumen der versprühten Lösung, welche mit einem Trichter Dmr. 100 mm in einem kalibrierten Messzylinder aufgefangen wird, 1 bis 2 ml pro Stunde.

Bei der Prüfung metallischer Überzüge auf Stahl werden diese durch Korrosion abgetragen. Die Prüfdauer bis zum Auftreten erster Korrosionserscheinungen (bei metallischen Überzügen auf Stahl ist dies der sog. Rotrost) wird in der Regel als Beurteilungskriterium herangezogen. Häufig wird die Prüfung bis zu 1000 Stunden durchgeführt.

11.2 Erfahrungen mit Salzsprühtests

Bei der Prüfung der unterschiedlichen Korrosionsschutzüberzüge liegen hinsichtlich der Zeitdauer bis zum Auftreten von Rotrost bestimmte Erfahrungswerte vor, die in vielfältiger Weise im Internet und Publikationen veröffentlicht sind. Diese beziehen sich im Regelfall auf Überzüge von Gestellware mit gleichmäßigen Überzügen (geringe Streuungen der Schichtdicke).

Die Dauerhaftigkeit metallischer Überzüge im Salzsprühtest hängt in erster Linie von der Art und Zusammensetzung des Überzuges und der Schichtdicke ab. Pro 1 µm Schichtdicke werden folgende Schutzdauern als grobe Richtwerte angenommen [2]:

- Zink pro 1 µm — 10 bis 20 Stunden,
- Zink-Nickel pro 1 µm — 100 Stunden,
- ZnAl-Lamellenüberzug pro 1 µm — 100 bis 150 Stunden.

Eine Gelbchromatierung (Dicke: 250 bis 500 nm) bringt bei galvanischen Zink- bzw. ZnNi-Überzügen zusätzlich 200 bis 300 Stunden und eine Blaupassivierung (Dicke: 25 bis 80 nm) etwa 20 bis 40 Stunden [2]. Überzüge mit zusätzlicher Passivierung und/oder Deckbeschichtungen erreichen deshalb höhere Werte.

11.3 Eigene Salzsprühtests

11.3.1 Ziel der Untersuchungen

Bei der hiesigen Prüfung an sog. **Trommelware** sollte bezüglich der Verhältnisse im Salzsprühtest festgestellt werden,

- inwieweit sich die in Abschn. 8 beschriebenen Korrosionsschutzsysteme (geprüft wurden nur Verbindungsmittel der Lieferung 2) in ihrem Verhalten untereinander und vom Verhalten eines nichtrostenden Stahls der Korrosionsbeständigkeitsklasse II unterscheiden,
- ob und inwieweit eine zusätzliche Passivierung (Blaupassivierung, Gelbchromatierung, Dickschichtpassivierung) galvanisch verzinkter Teile bzw. eine Deckbeschichtung bei ZnAl-Lamellenüberzügen die Zeit bis zum Auftreten von Rotrost heraufsetzt,
- ob sich die bei der Applikation in Trommelverfahren durch die Oberflächengeometrie der Verbindungsmittel bedingten Schichtdickenschwankungen (Abschn. 8) auf die Schutzdauer auswirken,
- ob sich die Verarbeitung der Verbindungsmittel (z. B. Eindrehen einer Holzschraube in Hartholz wie Eiche) auf das Ergebnis im Salzsprühtest auswirkt.

11.3.2 Probenherstellung

Zwecks Beantwortung der genannten Fragen wurden unterschiedlich korrosionsgeschützte Holzschrauben, Bohrschrauben, Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel (die Verbindungsmittel werden in Abschn. 7, die Schutzsysteme in Abschn. 8 beschrieben) hälftig im neuwertigen Zustand (unbelastet) geprüft. Eine zweite Hälfte dieser Verbindungsmitteln wurde in das entsprechende Bauteil eingebaut und anschließend aus dem jeweiligen Medium wieder „herauspräpariert“ und dann einem Salzsprühtest unterzogen. Für solche durch den Einbauvorgang mechanisch beanspruchten Verbindungsmittel wird in der Folge, zur Unterscheidung von nicht mechanisch beanspruchten Oberflächen, der Ausdruck „belastet“ verwendet.

Der Einbau der Verbindungsmittel mit **metallischen Überzügen** erfolgte wie folgt:

- **Holzschrauben** (Abschn. 7.1, **Bild 7.1**) wurden in Eichenholz (Holzwürfel mit der Kantenlänge 125 mm) mit einem Akkuschrauber und Bit am Innenantrieb senkrecht zur Faser ohne Vorbohren eingeschraubt.
- **Bohrschrauben** mit Sechskantkopf (Abschn. 7.2, **Bild 7.3, rechts**) wurden in ein Fassadenblech aus Aluminium (AlMn1) der Blechstärke 0,75 mm mit einem Akkuschrauber und Nuss bis zur Auflage der Dichtscheibe auf dem Blech ohne Vorbohren eingeschraubt.
- **Spreizdübel** (Abschn. 7.3, **Bild 7.4**) wurden in Betonwürfel einer Festigkeitsklasse C20/25 mit der Kantenlänge 100 mm eingesetzt. Die Bohrlöcher wurden mit Hammerschlag etwa 70 mm tief gebohrt. Danach wurde das Bohrloch mit Druckluft gereinigt. Die Dübel wurden 65 mm tief in den Beton gesetzt.
- **Kunststoffrahmendübel** mit Flachkopfschraube (Abschn. 7.4, **Bild 7.16**) wurden in eine Verbundkombination aus Beton und einem aufliegenden Kantholz mit einem Schraubenschlüssel und Innenantrieb (Bit) eingebaut.

Es wurden im unbelasteten und belasteten Zustand auch Holzschrauben und Spreizdübel aus **nichtrostendem Stahl** einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II (1.4567 bzw. 1.4301) geprüft.

Im Test wurden die unterschiedlich korrosionsgeschützten Verbindungsmittel bis zu 960 Stunden (40 Tage) den Korrosionsbedingungen des Salzsprühtests ausgesetzt und es wurde der Zeitpunkt vermerkt, nach welchem weniger bzw. mehr als etwa 10 % der Oberfläche Rotrost aufwiesen. Dabei wurde unterschieden zwischen unbelasteten (neuwertigen) und belasteten Verbindungsmitteln.

Die Ergebnisse der Salzsprühtests an kleinteil(feuer)verzinkten Verbindungsmitteln wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Diese Teile mit durchgehender Eisen-Zink-Legierungsschicht zeigten wegen Rotrostbildung dieser Legierungsschichten den kompletten Zinkabtrag bei der augenscheinlichen Beurteilung nicht ausreichend sicher an. Rotrostbildung wurde bei allen Oberflächenbereichen bereits frühzeitig festgestellt und nahm dann über einen längeren Zeitraum nur unwesentlich zu (**Bild 11.1**). Diese Rotrostbildung ist der Korrosion der Legierungsschichten zuzuschreiben. Eine exakte Festlegung der Korrosion des Stahluntergrundes war somit nicht möglich.

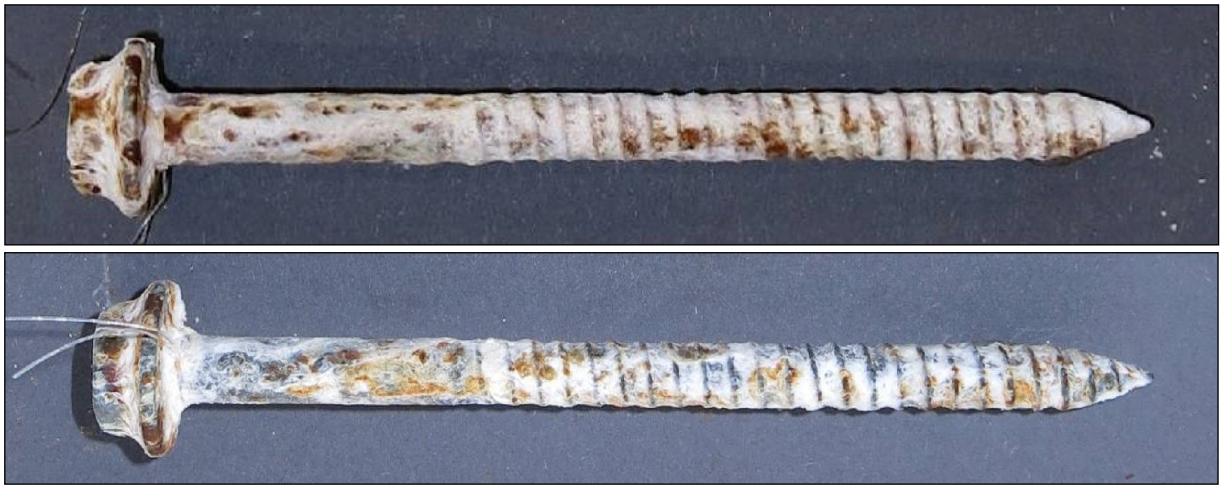


Bild 11.1:
Kleinteil(feuer)verzinkte Kunststoffrahmendübel (unbelastet) nach 264 Sunden (oben) und 696 Stunden (unten) im Salzsprühtest

11.3.3 Ergebnisse und deren Bewertung

Die Einzelergebnisse sind nach Korrosionsschutzsystemen geordnet in den **Anlagen 11.1 bis 11.10** dargestellt. Der Einfluss der Oberflächengeometrie sowie einer Belastung (Verarbeitung) wird durch die **Bilder 11.2 bis 11.7** belegt.

Unterschieden wird in der Folge jeweils nach dem Bauteil (Holzschraube, Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel), nach der Oberflächengeometrie (z. B. bei Holzschrauben: Kopf, Schaft bzw. Gewinde) und ob die Verbindungsmittel unbelastet sind oder vor dem Versuch, wie in Abschn. 11.3.2 beschrieben, belastet wurden. Die in den **Anlagen 11.1 bis 11.10** enthaltenen Angaben zum Überzug (Schichtdicke) sind Abschn. 8 entnommen und dienen der Interpretation der Ergebnisse.

Orientierung bei der Auswertung bieten die Farben in den Spalten der Auswertungstabellen (**Anlagen 11.1 bis 11.10**). Hierbei steht „grün“ für ein Verbindungsmittel ohne Rotrost, „gelb“ für etwa <10 % und „rot“ für mehr als 10 % Rotrost auf der Oberfläche des jeweiligen Verbindungsmittels.

Alle unbelasteten (neuwertigen) und belasteten Holzschrauben und Spreizdübel aus nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II wurden nach etwa 1000 Stunden ohne jeglichen Rostbefall als Folge einer nicht erfolgten Lochkorrosion ausgebaut. In der Folge werden deshalb nur die Ergebnisse zum Korrosionsverhalten der metallischen Überzüge näher betrachtet.

A Einfluss des Schutzsystems und zusätzlicher Maßnahmen

In der Folge werden die Ergebnisse des Salzsprühtests wie folgt angegeben:

- Zeit in Stunden bis zum Auftreten von Rotrost.
- Die Standzeiten werden ins Verhältnis gesetzt, wobei der Mittelwert der Standzeit der unbelasteten galvanischen Verzinkung aller Verbindungsmittel als Basiswert (1,0) dient.

A1 Vergleich aller unbelasteten Korrosionsschutzsysteme

Bezug: Beginn der Rotrostbildung/Stahlkorrosion nach lokalem Abtrag eines Korrosionsschutzsystems. Bewertet wird der Mittelwert für alle unbelasteten Verbindungsmittel, einschließlich aller Oberflächengeometrien.

Der Beginn einer Stahlkorrosion der unterschiedlich korrosionsgeschützten Verbindungsmittel verhält sich wie folgt:

	unbelastet
Galvanische Verzinkung	1,0 1(63 h)
Galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung	2,9 (180 h)
Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 4	4,5 (283 h)
Galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1	5,8 (366 h)
Galvanisch Verzinkung plus Gelbchromatierung	6,0 (378 h)
Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert)	9,4 (595 h)
Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 3	12,0 (754 h)
Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2	12,9 (814 h)
Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 2	>15,9 (>960 h)

Die Korrosionsschutzdauer der ZnNi-Überzüge (**Anlage 11.6**) ist starken Schwankungen unterworfen, da geringe Schichtdicken auf den Gewinden von Bohrschrauben und Kunststoffrahmendübeln abweichend von den übrigen Bereichen sehr frühzeitig Rotrostbildung bewirkten (**Bild 11.5**) (siehe unten: Auswertung nach Oberflächengeometrie sowie unbelastet/belastet).

Folgerungen zu A1: Vergleich aller unbelasteten Korrosionsschutzsysteme

- Im Salzsprühtest sind die galvanischen ZnNi-Überzüge und die ZnAl-Lamellenüber-

züge den galvanischen Zink-Überzügen überlegen.

- Unterschiede im Verhalten der ZnAl-Lamellenüberzüge sind auf eine unterschiedliche Dicke und Gleichmäßigkeit der Überzüge zurückzuführen und sind auch dadurch bedingt, ob und wenn ja welcher Haftvermittler bzw. welche Deckbeschichtung verwendet wurde (siehe A4).

A2 Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

Bezug: Beginn der Rotrostbildung/Stahlkorrosion nach lokalem Abtrag der galvanischen Verzinkung (mittlere Schichtdicke 2 bis 9 µm) ohne und mit Passivierung. Bewertet wird der Mittelwert für alle unbelasteten bzw. belasteten Verbindungsmittel, einschließlich aller Oberflächengeometrien.

Der Beginn einer Stahlkorrosion der unterschiedlich korrosionsgeschützten Verbindungsmittel verhält sich wie folgt:

	unbelastet	**belastet**
galvanische Verzinkung	1,0 (63 h)	0,95 (60 h)
galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung	2,9 (180 h)	2,0 (129 h)
galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1	5,8 (366 h)	4,5 (282 h)
galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung	6,0 (378 h)	4,4 (276 h)

Folgerungen zu A2: Einfluss einer zusätzlichen Passivierung

- Durch eine Passivierung lässt sich die Schutzdauer im Salzsprühtest erheblich heraufsetzen.
- Die Beständigkeit der galvanischen Verzinkung wird durch die Dickschichtpassivierung und Gelbchromatierung gleichermaßen deutlich stärker erhöht (6fach) als durch die Blaupassivierung (3fach).
- Die relative Verbesserung der Schutzwirkung durch die Passivierung ist bei belasteten Verbindungsmitteln geringer als bei unbelasteten. Dieses deutet darauf hin, dass die dünnen Passivierungen durch den Einbau beeinträchtigt werden.

A3 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel

Bezug: Beginn der Rotrostbildung/Stahlkorrosion nach lokalem Abtrag der galvanischen Verzinkung (mittlere Schichtdicke aller Überzüge 5 µm) mit Dickschichtpassivierung 1 bzw. des galvanischen ZnNi-Überzuges (mittlere Schichtdicke aller Überzüge 7 µm) mit Dickschichtpassivierung 2. Bewertet wird der Mittelwert für alle unbelasteten bzw. belasteten Verbindungsmittel, einschließlich aller Oberflächengeometrien.

Der Beginn einer Stahlkorrosion der unterschiedlich korrosionsgeschützten Verbindungsmittel verhält sich wie folgt:

	unbelastet	**belastet**
galvanische Verzinkung plus Dickschichtpassivierung 1	5,8 (366 h)	4,7 (282 h)

Zink-Nickel-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2 12,9 (814 h) 12,5 (786 h)

Demnach ist die Schutzdauer der im Trommelverfahren auf den Verbindungsmitteln aufgebrachte ZnNi-Überzüge mit Dickschichtpassivierung 2 im Mittel etwa doppelt so hoch wie jene der vorgenannten Reinzinküberzüge mit Dickschichtpassivierung 1. Jedoch weisen die ZnNi-Überzüge mit zusätzlicher Passivierung wegen sehr unterschiedlicher Schichtdicken einzelner Bereiche sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand unterschiedliche Prüfdauern bis zur Rotrostbildung auf (**Anlage 11.6**):

- Gewindefreie Bereiche (Kopf, Schaft) mit mittl. Schichtdicken von 4 bis 14 µm zeigen keinen Rotrost bis zu etwa 1000 Stunden.
- Gleiches gilt für Gewinde mit mittl. Schichtdicken von 8 bis 10 µm.
- Gewinde mit mittl. Auflagen von 0,5 bis 1 µm zeigen dagegen Rotrost bereits nach 24 bzw. 100 Stunden (**Bild 11.5**).

Folgerungen zu A3: Vergleich der Korrosionsschutzwirkung von galvanisch Zink und galvanisch Zink-Nickel

- Durch die Applikation von galvanisch Zink-Nickel anstelle von galvanisch Zink lässt sich nur dann eine Verbesserung des Korrosionsschutzes erreichen, wenn auf allen Bereichen der Verbindungsmittel (auch auf Gewinden) ein geschlossener ausreichend dicker Überzug erzielt werden kann. Dies ist bei ZnNi-Trommelware im vorliegenden Fall nicht gegeben (vergl. die Angaben für den ZnNi-Überzug in **Tabelle 8.6**).
- Durch eine zusätzliche Passivierung lässt sich die Dauerhaftigkeit nicht im gewünschten Maße verbessern, wenn der Überzug im Mittel zu dünn ist und in hohem Maße Nullstellen und Abblätterungen aufweist.

A4 Vergleich der Korrosionsschutzwirkung der ZnAl-Lamellenüberzüge

Bezug: Beginn der Rotrostbildung/Stahlkorrosion nach lokalem Abtrag der ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1 bis 4. Bewertet wird der Mittelwert für alle unbelasteten Verbindungsmittel, einschließlich aller Oberflächengeometrien.

Der Beginn einer Stahlkorrosion der unterschiedlich korrosionsgeschützten unbelasteten Verbindungsmittel verhält sich wie in **Tabelle 11.1** angegeben:

Firma	Schutzdauer unbelastet	Schichtdicke (µm), MW (Streuung)	Haft-vermittler	Deck-beschichtung
4	4,5 (283 h)	4 (0-16)	nein	ja
1	9,4 (595 h)	7 (0-32)	ja	ja[1)]
3	12,0 (754 h)	8 (0-26)	ja	ja
2	>15,8 (>960 h)	8 (0-38)	nein	ja

[1)] Deckbeschichtung nur bei Holzschrauben

Tabelle 11.1:
Angaben zur Schutzdauer von ZnAl-Lamellenüberzügen und Nennung möglicher Einflüsse

Als mögliche Einflüsse für das unterschiedliche Verhalten der ZnAl-Lamellenüberzüge der 4 untersuchten Firmen kommen folgende Einflüsse in Frage (siehe auch Abschn. 8.4): Die unterschiedliche mittlere Schichtdicke und Schichtdickenschwankungen, die Verwendung eines zusätzlich auch korrosionsschützenden Haftvermittlers unterhalb des Überzuges und die gewählte zusätzliche Deckbeschichtung. Hierzu die folgenden Ausführungen:

Dicke des metallischen Überzuges. Die mittleren Schichtdicken (ausgenommen lokale Verdickungen) des ZnAl-Lamellenüberzuges sind bei allen 4 Firmen stets im Bereich unter 10 µm (siehe auch **Anlage 11.7 bis 11.10**). Das Korrosionsschutzverhalten der Überzüge im Salzsprühtest orientiert sich (anders als unter natürlichen Umgebungsbedingungen) an der Gesamtzinkauflage, einschließlich der vereinzelt vorhandenen lokalen Verdickungen. Dieses deshalb, weil in dem wässrigen salzreichen Medium des Salzsprühtests ein kathodischer Schutz von freiliegenden Stahloberflächen durch die Opferwirkung des metallischen Überzuges ungleich stärker zum Tragen kommt als unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen. Im Salzsprühtest erfolgt somit ein kathodischer Schutz überzugsfreier Oberflächen durch noch vorhandenes Restzink.

Deshalb sind folgende Zusammenhänge feststellbar:

- Der Überzug der Firma 2 mit einer mittleren Zinkdicke sämtlicher Teile von 8 µm und
- der größten Masse an Zink auf der Oberfläche (Schichtdicken bis 38 µm) zeigt das beste Korrosionsverhalten.
- Dagegen weist der ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 mit lediglich 4 µm mittlerer Schichtdicke und geringer Masse an Zink auf der Oberfläche (Schichtdicken bis lediglich 16 µm) das ungünstigste Schutzverhalten auf.
- Die ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1 und 3 weisen im Mittel aller Bauteile Zinkdicken um 7 bzw. 8 µm auf und bezüglich der Masse an Zink liegen diese Überzüge zwischen den Vorgenannten (**Tabelle 11.1**).

Die dargelegten Zusammenhänge betreffend Dicke des metallischen Überzuges und auch Nullstellen (siehe unten) bestätigen Ausführungen in Abschn. 4.5, wonach das Kriterium des Tests „Auftreten von Rotrost“ maßgeblich von dem sich überlagernden kathodischen Schutzverhalten der Überzüge auf Zinkbasis beeinflusst wird. Dieser Schutz funktioniert in der salzreichen wässrigen Lösung des Salzsprühtests, jedoch im Regelfall nicht unter atmosphärischen Bedingungen. Demnach bieten im Salzsprühtest unabhängig von der Gleichmäßigkeit des Überzuges jene Überzüge den größtmöglichen Schutz, die eine größtmögliche Auflagemenge an Zink-Aluminium als Opferanode aufweisen, also im Mittel möglichst dick sind und auch hohe Spitzenwerte des Überzuges aufweisen. Zumindest kleinere Nullstellen beim Überzug werden kathodisch geschützt und werden dadurch nicht erkannt.

Nullstellen. Nullstellen sind mehr oder weniger häufig bei den ZnAl-Lamellenüberzügen aller 4 Firmen vorhanden. Es ist nicht erkennbar, dass durch die Häufigkeit und Ausdehnung von Nullstellen das Korrosionsschutzverhalten im Salzsprühtest wesentlich beeinflusst wird. Dieses hängt sicherlich damit zusammen, dass lokale Stellen ohne metallischen Überzug kathodisch geschützt werden (siehe oben).

Haftvermittler. Auch der Einfluss eines zusätzlichen Haftvermittlers ist bei Prüfung im Salzsprühtest offenbar von untergeordneter Bedeutung. Denn von den Überzügen der 4 Firmen hat sowohl der mit der höchsten (Firma 2) als auch der mit der geringsten Prüfdauer (Firma 4) bis zum Rostbeginn keinen Haftvermittler. Jedoch wirkt ein Haftvermittler in Form einer galvanischen Verzinkung von etwa 5 µm sicherlich als zusätzlicher Schutz.

Deckbeschichtung. Sämtliche ZnAl-Lamellenüberzüge der Firmen 1 bis 4 haben bauteilspezifisch eine zusätzliche dünne Deckbeschichtung, die Gleiteigenschaften aufweist und zusätzlich korrosionsschützend wirken soll. Auffällig ist, dass der Überzug mit der dicksten Deckbeschichtung (Firma 4: 5 bis 12 µm) das ungünstigste Korrosionsverhalten aufweist, während die Dicke der Deckbeschichtungen der anderen 3 Firmen mit deutlich besserem Verhalten im Bereich von Nanometer bis 2 µm liegen.

Folgerungen zu A4: Vergleich der Korrosionsschutzwirkung der ZnAl-Lamellenüberzüge

- Diejenigen Kriterien, die bei ZnAl-Lamellenüberzügen auf Verbindungsmitteln bei atmosphärischer Beanspruchung die Güte des Korrosionsschutzes bestimmen (Dicke und Gleichmäßigkeit des Überzuges entlang der gesamten Oberfläche, Haftvermittler, Deckbeschichtung) werden im Salzsprühtest nur unzureichend erfasst.
- Das Korrosionsverhalten wird maßgeblich durch den kathodischen Korrosionsschutz bestimmt, der unter atmosphärischer Korrosionsbeanspruchung allerdings nur eine untergeordnete Rolle spielt.

B Einfluss der Oberflächengeometrie sowie einer Belastung (Verarbeitung)

Bezug: Beginn der Rotrostbildung/Stahlkorrosion nach lokalem Abtrag der applizierten galvanischen Überzüge bzw. der ZnAl-Lamellenüberzüge. Bewertet wird der Mittelwert für die Gruppen:

- galvanisch applizierter Zinküberzug (ohne und mit Passivierung) und ZnNi-Überzug (mit Passivierung),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firmen 1 bis 4,

getrennt für die 3 Bereiche Schaft bzw. glatter Bereich, Kopf, Gewinde und getrennt nach unbelasteten bzw. belasteten Verbindungsmitteln. Als Basiswert (1,0) dient hier der Mittelwert der Standzeit vom unbelasteten Schaft bzw. glatten Bereich aller Verbindungsmittel.

B1 Galvanisch applizierte Überzüge (Zink und Zink-Nickel)

Bei den galvanisch applizierten Überzügen verhält sich der Beginn einer Stahlkorrosion wie folgt:

	unbelastet	**belastet**
Schaft / glatter Bereich	1,00 (493 h)	0,81 (400 h)
Kopf	0,87 (430 h)	0,85 (417 h)
Gewinde	0,53 (260 h)	0,41 (204 h)

Bei den galvanisch aufgebrachten Zink- und Zink-Nickel-Überzügen nimmt die Schutzdauer im Salzsprühversuch in der Reihenfolge Schaft/glatter Bereich - Kopf - Gewinde ab. Belastete Gewinde verhalten sich ungünstiger als unbelastete (siehe **Bilder 11.2, 11.5 und 11.6**).

Die gewindebedingte Abminderung der Schutzdauer hängt, nahezu unabhängig von belastet bzw. unbelastet, auch stark von der Dicke des Überzuges auf dem Gewinde ab, weshalb die Verhältnisse für diese Überzüge in **Tabelle 11.2** nochmals gesondert ausgewiesen werden.

Messbereich	mittlere Schichtdicke in µm	Korrosionsbeginn in Stunden	Verhältnisse Korrosionsbeginn Gewinde / glatte Bereiche
Holzschraube, Spreizdübel			
Kopf, Schaft, glatter Bereich	8 bis 14	>960	<0,97
Gewinde	8 bis 10	>930	
Bohrschraube, Kunststoffrahmendübel			
Kopf, Schaft, glatter Bereich	4	>960	<0,08
Gewinde	0,5 bis 1	72	

Tabelle 11.2:
Ergebnisse des Salzsprühtests an Verbindungsmitteln mit galvanischen ZnNi-Überzügen (unbelastet und belastet wurden zusammengefasst)

Es ist zu erkennen, dass die Abminderung der Schutzdauer der Überzüge im Gewindebereich bei nur sehr dünnen Auflagen deutlich ausgeprägter ist als bei erhöhten Schichtdicken des metallischen Überzuges.

B2 Zink-Aluminium-Lamellenüberzüge

Bei den ZnAl-Lamellenüberzügen der Firmen 1 bis 4 verhält sich der Beginn einer Stahlkorrosion im Mittel der 4 Firmen wie folgt:

	unbelastet	**belastet**
Schaft / glatter Bereich	1,00 (798 h)	0,96 (767 h)
Kopf	0,74 (594 h)	0,59 (474 h)
Gewinde	0,73 (587 h)	0,55 (438 h)

Auch bei den Verbindungsmitteln mit ZnAl-Lamellenüberzügen nimmt die Schutzdauer im Salzsprühversuch in der Reihenfolge Schaft/glatter Bereich - Kopf - Gewinde ab. Belastete Gewinde verhalten sich ungünstiger als unbelastete (siehe **Bilder 11.3, 11.4 und 11.7**). Auch bei den ZnAl-Lamellenüberzügen sind die gewindebedingten Abminderungen der Schutzdauer bei ZnAl-Lamellenüberzügen der Firma 4 mit der geringsten Dicke am größten (die mittl. Überzugsdicke aller Teile mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 beträgt nur 4 µm).

Folgerungen zu B: Einfluss der Oberflächengeometrie sowie einer Belastung (Verarbeitung)

- Bei allen im Trommelverfahren auf die Verbindungsmittel aufgebrachten Korrosionsschutzsystemen ist der Korrosionsschutz von Kopf und Gewinde gegenüber dem Schaft/glatten Bereich abgemindert. Die stärksten Abminderungen des Korrosionsschutzes sind bei Gewinden vorhanden, insbesondere wenn diese belastet wurden. Die **Bilder 11.2 bis 11.7** belegen den nachteiligen Einfluss der Gewinde für unterschiedliche Verbindungsmittel und Korrosionsschutzsysteme.
- Der Gewindeeinfluss ist einerseits auf materialbedingte Einflüsse (Oberflächenfehler beim Stahl zwischen den Gewindezähnen) zurückzuführen. Insbesondere bei den galvanischen Überzügen (Abschn. 8.2 und 8.3, **Bilder 8.4 und 8.11**) werden diese nicht ausreichend vom Überzug überdeckt. Andererseits sind auch die Verhältnisse beim Trommelverfahren, also herstellungsbedingte Einflüsse (siehe Abschn. 8), für das ungünstigere Abschneiden der Gewinde verantwortlich, da hier Risse, Abplatzungen und Schichtdickenschwankungen am ehesten auftreten.
- Weiterhin sind die Abminderungen beim Korrosionsschutz an Kopf und Gewinde auch auf eine Reduzierung und/oder sicherlich auch auf zusätzliche Verletzungen der Überzüge beim Einbau zurückzuführen.

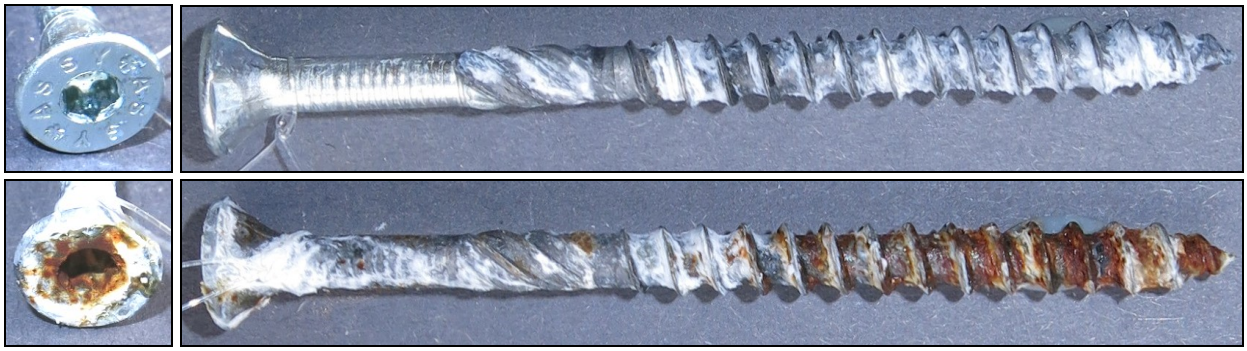


Bild 11.2:
Holzschrauben mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 nach 192 h (8 Tagen) im Salzsprühtest.
Oben: unbelastete Schraube, unten: belastete Schraube

Bild 11.3:
Holzschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung plus Blaupassivierung) nach 432 h (18 Tagen) im Salzsprühtest.
Oben: unbelastete Schraube, unten: belastete Schraube

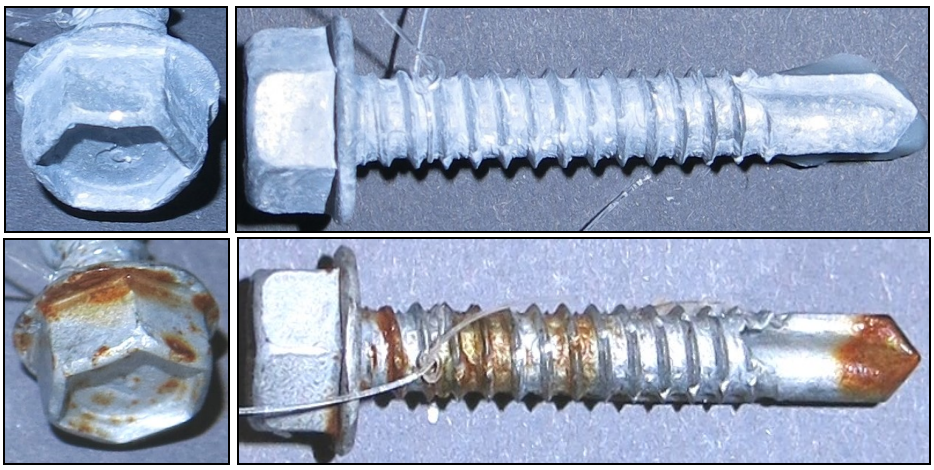


Bild 11.4:
Bohrschrauben mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 nach 96h (4 Tagen) im Salzsprühtest.
Oben: unbelastete Schraube, unten: belastete Schraube (Außenantrieb)

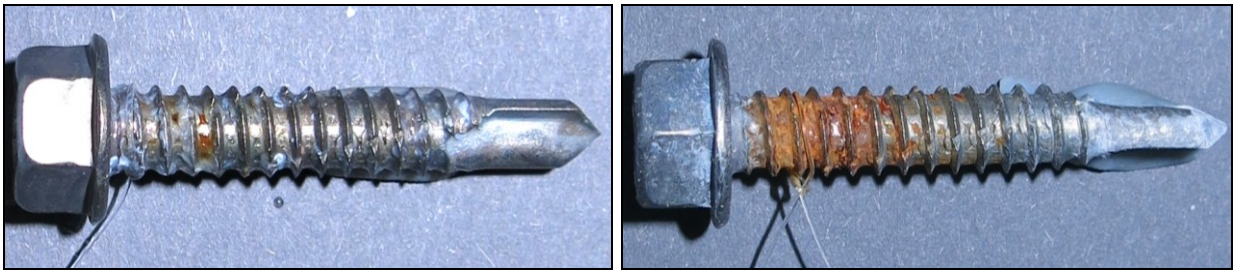


Bild 11.5:
Bohrschrauben mit galvanischem ZnNi-Überzug mit Dickschichtpassivierung 2, nach 96 h (4 Tagen) im Salzsprühtest.
Links: unbelastete Schraube, rechts: belastete Schraube

Bild 11.6:
Spreizdübel mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 nach 288 h (12 Tagen) im Salzsprühtest.
Oben: unbelasteter Dübel, unten: belasteter Dübel

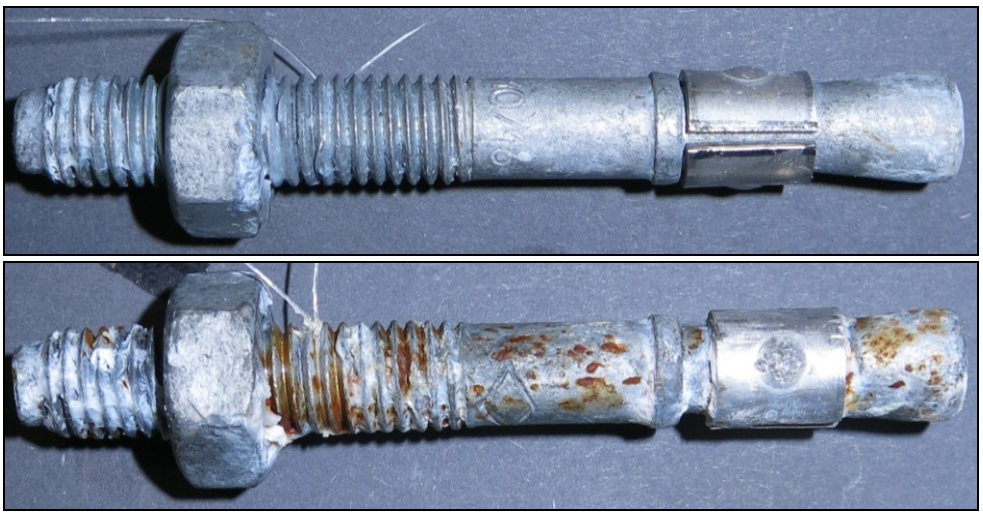


Bild 11.7:
Spreizdübel mit ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung plus Blaupassivierung) nach 288 h (12 Tagen) im Salzsprühtest.
Oben: unbelasteter Dübel, unten: belasteter Dübel

Literatur Abschnitt 11

[1] DIN EN ISO 9227 (2006) Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray test, (früher DIN 50021)

[2] P. Preikschat, R. Jansen: Chromatierungen und Passivierungen auf Zink und Zinklegierungen, Jahrbuch Oberflächentechnik 57(2001), 71-83

12. Vergleich Naturversuch und Salzsprühtest anhand von Beispielen

12.1 Einführung

Die insbesondere in Abschn. 10 aufgezeigten Ergebnisse der Auslagerungsversuche in Stadt- und Meeresatmosphäre stehen, was die Leistungsfähigkeit der einzelnen Korrosionsschutzsysteme anbetrifft, vielfach nicht in Übereinstimmung mit dem publiziertem „Wissen“. Es ist allerdings davon auszugehen, dass dieses Wissen überwiegend nicht aus langzeitigen Naturversuchen hergeleitet wurde, sondern aus Kurzzeitversuchen wie dem Salzsprühtest.

Aus diesem Grund wird in der Folge diese Thematik anhand von Beispielen, die

- in Abschn. 10.4.5 (Korrosionsschutzverhalten der Überzüge auf Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 1))
- und 10.6 (Ergänzende Langzeituntersuchungen an korrosionsgeschützte Verbindungsmittel in Meeresatmosphäre)

im Rahmen von Naturversuchen behandelt wurden, erneut aufgegriffen. Dabei wird das Verhalten bei Auslagerung in Meeresatmosphäre und bei der Prüfung im Salzsprühtest gegenübergestellt. Behandelt wird die Vergleichbarkeit der beiden Prüfmethoden (Salzsprühtest, Meeresatmosphäre), wenn bei der Bewertung der Verbindungsmittel folgende Parameter primär zu beachten sind:

- Einfluss des Korrosionsschutzsystems,
- Einfluss der Verarbeitung,
- Einfluss des Baustoffs.

Denn bei Verbindungsmitteln im eingebauten Zustand werden baustoffseitige Einflüsse (z. B. Holzinhaltsstoffe) und verarbeitungsbedingte Einflüsse (z. B. Beschädigungen des Überzuges) zwar im Naturversuch, nicht jedoch an Einzelproben im Salzsprühtest erfasst.

12.2 Vergleichende Prüfung: Untersuchung von Korrosionsschutzsystemen im Salzsprühtest und in Meeresatmosphäre

Beispiel 1:
Köpfe von Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 1) geschützt mit galvanischen Zinküberzügen oder ZnAl-Lamellenüberzügen (Trommelware).

Versuchsparameter. Die Köpfe der Schrauben der Kunststoffrahmendübel, die einerseits gemäß **Bild 10.6** 10 Jahre in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) und vergleichend als „nackte“ Schrauben im Salzsprühtest ausgelagert bzw. geprüft wurden, weisen folgenden im Trommelverfahren applizierten Korrosionsschutz auf:

- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1 (Haftvermittler: Unterzinkung blaupassiviert),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 (kein Haftvermittler),
- ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4 (kein Haftvermittler).

Detailangaben zu den in Abschn. 8 beschriebenen Korrosionsschutzüberzügen sind in **Tabelle 12.1** in einer Übersicht enthalten. Die Tabelle enthält ebenfalls eine verkürzte Zusammenstellung der Ergebnisse zum Korrosionsverhalten der Köpfe der Dübelschrauben von Kunststoffrahmendübeln nach 10 jähriger Auslagerung im Naturversuch (Meeresatmosphäre) und Angaben zum Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest. In der Tabelle sind weiterhin Bildnummern aus Abschn. 10.4.5 enthalten, welche das jeweilige Korrosionsverhalten in Meeresatmosphäre nach 10 Jahren aufzeigen.

Oberflächenschutzsystem OS	Oberflächenschutzsystem OS - Detailangaben			Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest nach … Stunden	Schutzverhalten in Meeresatmosphäre (10 Jahre)
	Haftvermittler: Unterzinkung mit Blaupassivierung	Überzugsdicke Zinküberzug / ZnAl-Überzug (µm)	Deckbeschichtung		
galv. Verzinkung, blaupassiviert	entfällt	MW: 14 S: 12-18	nein	410	Bild 10.19
galv. Verzinkung, gelbchromatiert			nein	650	Bild 10.21
ZnAl-Überzug der Firma 1	ja	MW: 9 S: 3-22	nein	2000	Bild 10.22
ZnAl-Überzug der Firma 2	nein	MW: 3 S: 0-9	Db 2	1320	Bild 10.23
ZnAl-Überzug der Firma 4	nein	MW: 6 S: 0-14	Db 3	1610	Bild 10.24

keine | sehr starke Rotrostbildung

MW = Mittelwert, S = Streuung, Db = Deckbeschichtung

Tabelle 12.1:
Korrosionsverhalten der Köpfe von Kunststoffrahmendübeln mit galvanischen Zinküberzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen nach 10 jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) und im Salzsprühtest

Der **Vergleich Salzsprühtest / Meeresatmosphäre** führt zu folgenden Aussagen:

- Im **Salzsprühtest** sind die ZnAl-Lamellenüberzüge, unabhängig von deren Gleichmäßigkeit (extreme Schichtdickenschwankungen), vorhandenen Nullstellen und auch der Applikation eines zusätzlichen Haftvermittlers, den galvanischen Zinküberzügen mit Passivierung deutlich überlegen und zeigen Rotrost stets erst nach 1300 bis mehr als 2000 Stunden. Bei galvanischen Zinküberzügen mit Blaupassivierung bzw. Gelbchromatierung beginnt Rotrost bereits nach 410 bzw. 650 Stunden.
- In **Meeresatmosphäre** ist das Schutzverhalten genau umgekehrt.
  - Galvanische Zinküberzüge mit der höchsten Schichtdicke und ohne Nullstellen, mit Blaupassivierung bzw. Gelbchromatierung, sind nach 10 Jahren noch frei von jeglichem Rotrost.
  - ZnAl-Lamellenüberzüge mit geringer Schichtdicke und Nullstellen, ohne Haftgrund, zeigen bereits ab etwa wenigen Monaten Rotrost, der bis zu 10 Jahren extrem zunimmt. ZnAl-Lamellenüberzüge mit vergleichsweise hoher Schichtdicke ohne Nullstellen, mit Haftgrund, sind auch nach 10 Jahren noch ohne Rotrost.

Es findet somit im Naturversuch, im Gegensatz zum Salzsprühtest, eine völlig andere,

aber logische Differenzierung des Korrosionsschutzverhaltens statt, die in der vorliegenden Arbeit auch in anderem Zusammenhang festgestellt wurde.

Zur Ursache des unterschiedlichen Korrosionsschutzverhaltens von galvanischen Überzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen in nicht bewitterter Meeresatmosphäre wird in Abschn. 10.4.5 unter D2 eingegangen.

Beispiel 2:
Köpfe von Kunststoffrahmendübeln (Lieferung 1) geschützt mit galvanischen Zinküberzügen (Trommelware), ohne und mit Kopfbeschichtung.

Versuchsparameter. Die Köpfe der Schrauben der Kunststoffrahmendübel, die einerseits gemäß **Bild 10.6** 10 Jahre in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) und vergleichend als „nackte“ Schrauben im Salzsprühtest ausgelagert bzw. geprüft wurden, weisen folgenden im Trommelverfahren applizierten Korrosionsschutz, hälftig mit zusätzlicher Kopfbeschichtung, auf:

- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung,
- galvanische Verzinkung plus Blaupassivierung mit Kopfbeschichtung 1 oder 2,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung,
- galvanische Verzinkung plus Gelbchromatierung mit Kopfbeschichtung 1 oder 2.

Oberflächenschutzsystem OS	Oberflächenschutzsystem OS - Detailangaben		Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest nach … Stunden	Schutzverhalten in Meeresatmosphäre (10 Jahre)
	Überzugsdicke Zinküberzug (µm)	Kopfbeschichtung		
galvanische Verzinkung, blaupassiviert	MW: 14 S: 12-18	nein	410	Bild 10.19
		Kopfbeschichtung 1	450	Bild 10.20
		Kopfbeschichtung 2	650	Bild 10.20
galvanische Verzinkung, gelbchromatiert		nein	650	Bild 10.21
		Kopfbeschichtung 1	725	
		Kopfbeschichtung 2	1080	

keine — sehr starke Rotrostbildung

MW = Mittelwert, S = Streuung

Tabelle 12.2:
Korrosionsverhalten der Köpfe von Kunststoffrahmendübeln mit galvanischen Zinküberzügen ohne und mit Kopfbeschichtung nach 10 jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) und im Salzsprühtest

Detailangaben zu den in Abschn. 8 beschriebenen Korrosionsschutzüberzügen und Kopfbeschichtungen, sind in **Tabelle 12.2** in einer Übersicht enthalten. Die Tabelle enthält ebenfalls eine verkürzte Zusammenstellung der Ergebnisse zum Korrosionsverhal-

ten der Köpfe der Dübelschrauben von Kunststoffrahmendübeln nach 10 jähriger Auslagerung im Naturversuch (Meeresatmosphäre) und Angaben zum Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest. In der Tabelle sind weiterhin Bildnummern aus Abschn. 10.4.5 enthalten, welche das jeweilige Korrosionsverhalten in Meeresatmosphäre nach 10 Jahren aufzeigen.

Der **Vergleich Salzsprühtest / Meeresatmosphäre** führt zu folgenden Aussagen:

- Im **Salzsprühtest** haben die zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit applizierten zusätzlichen Kopfbeschichtungen einen deutlich positiven Einfluss.
- In **Meeresatmosphäre** senken die Kopfbeschichtungen drastisch die Schutzwirkung des metallischen Überzuges.

Es findet somit im Naturversuch, im Gegensatz zum Salzsprühtest, eine völlig andere Differenzierung des Korrosionsschutzverhaltens statt.

Zur Ursache des unerwarteten Korrosionsschutzverhaltens der zusätzlichen Kopfbeschichtungen in nicht bewitterter Meeresatmosphäre wird in Abschn. 10.4.5 unter D3 eingegangen.

Beispiel 3:
Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzügen (Trommelware).

Versuchsparameter. Die Rohrschellen, die einerseits 6 Jahre in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) und vergleichend im Salzsprühtest ausgelagert bzw. geprüft wurden, weisen folgenden im Trommelverfahren applizierten Korrosionsschutz auf:

- ZnAl-Lamellenüberzug. Überzugsdicke i.M. 12 µm, mit Haftvermittler,
- ZnAl-Lamellenüberzug. Überzugsdicke i.M. 18 µm, mit Haftvermittler,
- ZnAl-Lamellenüberzug. Überzugsdicke i.M. 39 µm, mit Haftvermittler,
- ZnAl-Lamellenüberzug. Überzugsdicke i.M. 30 µm, ohne Haftvermittler.

Detailangaben zu den in Abschn. 8.4.4 und Abschn. 8.4.5 ausgewiesenen Rohrschellen mit den bereits in **Tabelle 10.12** zusammengestellten Überzügen, sind in **Tabelle 12.3** in einer Übersicht enthalten. **Tabelle 12.3** enthält ebenfalls eine verkürzte Zusammenstellung der Ergebnisse zum Korrosionsverhalten der Rohrschellen nach 6 jähriger Auslagerung im Naturversuch (Meeresatmosphäre) und Angaben zum Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest. In der Tabelle sind weiterhin Bildnummern aus Abschn. 10.6.1 enthalten, welche das jeweilige Korrosionsverhalten in Meeresatmosphäre nach 6 Jahren aufzeigen.

Hinsichtlich des Korrosionsschutzverhaltens der Rohrschellen nach 6 jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) in detaillierter Ausführung wird auf den Abschn. 10.6.1 verwiesen.

Der **Vergleich Salzsprühtest / Meeresatmosphäre** führt zu folgenden Aussagen:

- Im **Salzsprühtest** zeigen alle untersuchten ZnAl-Lamellenüberzüge
  - ohne und mit Haftvermittler

- sowie unterschiedlicher Überzugsdicke,
  sämtlichst eine sehr hohe Beständigkeit.

- In **Meeresatmosphäre** zeigen dagegen
  - ZnAl-Lamellenüberzüge ohne Haftvermittler frühzeitiger Rotrost als solche mit Haftvermittler,
  - ZnAl-Lamellenüberzüge mit geringer Überzugsdicke früher Rotrost als solche mit höherer Überzugsdicke.

Es findet somit im Naturversuch, im Gegensatz zum Salzsprühtest, eine völlig andere, aber logische Differenzierung des Korrosionsschutzverhaltens statt, die in der vorliegenden Arbeit auch in anderem Zusammenhang festgestellt wurde.

Bauteil	Oberflächenschutzsystem OS	Oberflächenschutzsystem OS - Detailangaben			Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest nach … Stunden	Schutzverhalten in Meeres-Atmosphäre (6 Jahre)
		Haftvermittler		Überzugsdicke ZnAl-Überzug (µm)		
		Unterzinkung	Phosphatierung			
Rohrschelle 1	ZnAl-Überzug Firma 4	ja	nein	Ü: 5-20 MW: 12	1486	Bild 10.50
Rohrschelle 2		ja	ja	Ü: 5-30 MW: 18	1486	Bild 10.50
Rohrschelle 3	ZnAl-Überzug Firma 5	ja	ja	U: 15-95 MW: 39	>1750	Bild 10.50
Rohrschelle 4		nein	nein	U: 15-70 MW: 30	1392	Bild 10.50

keine	geringe	sehr starke	Rotrostbildung

U = überall, MW = Mittelwert

Tabelle 12.3:
Korrosionsverhalten von Rohrschellen mit ZnAl-Lamellenüberzügen nach 6 jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (nicht bewittert) und im Salzsprühtest

Beispiel 4:
Köpfe von in Holz eingedrehten Holzschrauben (Lieferung 1) mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen ohne und mit Passivierung sowie zusätzlicher Deckbeschichtung (Trommelware).

Versuchsparameter. Die Holzschrauben, die einerseits in imprägnierte Fichte eingedreht 7 Jahre in Meeresatmosphäre (bewittert) und vergleichend als „nackte“ Schrauben im Salzsprühtest ausgelagert bzw. geprüft wurden, weisen folgenden im Trommelverfahren applizierten Korrosionsschutz auf:

- Galvanischer ZnNi-Überzug,
- galvanischer ZnNi-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2,
- galvanischer ZnNi-Überzug plus Dickschichtpassivierung 2 plus Deckbeschichtung 1.

Es wurden die in Abschn. 10.6.2 ausgewiesenen Holzschrauben mit den bereits in **Tabellen 8.5 und 8.6** (Bez. Holzschraube L1) zusammengestellten Überzügen untersucht.

Detailangaben zu den in Abschn. 8.3 ausgewiesenen Holzschrauben sind in **Tabelle 12.4** in einer Übersicht enthalten. **Tabelle 12.4** enthält ebenfalls eine verkürzte Zusammenstellung der Ergebnisse zum Korrosionsverhalten der Holzschrauben nach 7 jähriger Auslagerung im Naturversuch (Meeresatmosphäre) und Angaben zum Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest. In der Tabelle sind weiterhin Bildnummern aus Abschn. 10.6.2 enthalten, welche das jeweilige Korrosionsverhalten in Meeresatmosphäre nach 7 Jahren aufzeigen.

Bauteil	Oberflächenschutzsystem OS - Detailangaben			Beginn der Stahlkorrosion im Salzsprühtest nach … Stunden	Schutzverhalten in Meeres-Atmosphäre (7 Jahre)
	Überzugsdicke ZnNi-Überzug (µm)	Dickschicht-passivierung 2	Deck-beschichtung 1		
Holz-schrauben L1	MW: 6 S: 4-7	nein	nein	640	Bild 10.51
		ja	nein	720	Bild 10.51
		ja	ja	790	Bild 10.51

sehr starke Rotrostbildung

MW = Mittelwert, S = Streuung

Tabelle 12.4:
Korrosionsverhalten der Köpfe von Holzschrauben mit galvanischem ZnNi-Überzug ohne und mit Passivierung und zusätzlicher Deckbeschichtung nach 7 jähriger Auslagerung, eingedreht in imprägnierte Fichte, in Meeresatmosphäre (bewittert) und im Salzsprühtest

Der **Vergleich Salzsprühtest / Meeresatmosphäre** führt zu folgenden Aussagen:

- Der **Salzsprühtest** suggeriert eine hohe Beständigkeit der im Trommelverfahren aufgebrachten galvanischen ZnNi-Überzüge auf Holzschrauben. Die Schutzdauer des Überzuges wird zudem durch eine Passivierung und Deckbeschichtung weiter erhöht.
- In **Meeresatmosphäre** besteht hingegen nur eine geringe Korrosionsbeständigkeit. Stahlkorrosion tritt bereits nach 3 Jahren auf und nimmt in kurzer Zeit stark zu. Es besteht dauerhaft auch kein wesentlicher Einfluss von Passivierung und Deckbeschichtung auf das Korrosionsschutzverhalten.

  Hinsichtlich des Korrosionsschutzverhaltens der Köpfe von Holzschrauben nach 7 jähriger Auslagerung in Meeresatmosphäre (bewittert) in detaillierter Ausführung wird auf den Abschn. 10.6.2 verwiesen.

Beispiel 5:
Köpfe von in Fichte, imprägnierte Fichte und Eiche eingedrehten Holzschrauben (Lieferung 1) mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen (Trommelware).

Versuchsparameter. Holzschrauben mit galvanischem ZnNi-Überzug, eingedreht in Fichte, imprägnierte Fichte und Eiche wurden 7 Jahre in Meeresatmosphäre (bewittert) und als „nackte“ Schrauben im Salzsprühtest ausgelagert bzw. geprüft.

Es wurden die in Abschn. 10.6.2 ausgewiesenen Holzschrauben mit den bereits in **Tabellen 8.5 und 8.6** (Bez. Holzschraube L1) zusammengestellten Überzügen untersucht.

Der **Vergleich Salzsprühtest / Meeresatmosphäre** führt zu folgenden Aussagen:

- Im **Salzsprühtest** liegt die Schutzdauer der Holzschrauben mit ZnNi-Überzügen, abhängig vom Vorhandensein einer Passivierung ohne bzw. mit einer Deckbeschichtung, zwischen 640 und 790 h (siehe **Tabelle 12.4**).
- In **Meeresatmosphäre** (bewittert) wird diese hohe Beständigkeit bei in Holz eingedrehten Holzschrauben einerseits nicht bestätigt. Andererseits besteht ein deutlicher Einfluss der Holzart, wobei die Korrosionsbeständigkeit von galvanischem ZnNi-Überzug in der Reihenfolge Fichte - imprägnierte Fichte - Eiche abnimmt.

  Die Korrosionsbeständigkeit der galvanischen ZnNi-Überzüge, hier am Kopf, im eingebauten Zustand hängt somit neben dem Korrosionsschutzsystem wesentlich auch von Holzinhaltsstoffen (kupferhaltige Imprägnierung bei Fichte, Essigsäure bei Eiche, siehe auch Abschn. 3.3.1) ab.

12.3 Kritische Betrachtung des Salzsprühtests

Bedeutung des Salzsprühtests in der Praxis

Bewertungen des Korrosionsschutzes von Bauteilen und Verbindungsmitteln erfolgen sowohl bei Herstellern als auch in der Literatur nahezu ausschließlich auf der Grundlage durchgeführter Labortests. Dabei spielt der Salzsprühtest nach **DIN EN ISO 9227** „Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - neutrale Salzsprühnebelprüfung (NSS-Prüfung)“ [1] eine wesentliche Rolle. Die Ergebnisse aus dem Salzsprühtest werden nämlich immer wieder als Leistungsindikator für langzeitige Korrosionsverhalten unter realen Praxisbedingungen angeführt.

Folgende Argumente werden häufig für die Anwendung dieser Kurzzeit-Korrosionsprüfung im Vergleich zum Naturversuch erwähnt:

- Die Dauer der Prüfung ist vergleichsweise kurz.
- In einer kurzen Zeit erhält man Informationen zum Korrosionsschutzverhalten und erspart sich zeit- und kostenaufwendige Naturversuche.
- Diese Korrosionsprüfung dient dem Nachweis, ob die normativ geregelten Anforderungen an die Überzüge eingehalten werden.

Dabei enthält die genannte Norm folgenden wichtigen Hinweis, was die Interpretation der Prüfergebnisse betrifft:
„Nur selten besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Beständigkeit gegen die Einwirkung von Salzsprühnebel und der Beständigkeit gegen Korrosion in anderen Medien. Die verschiedenen Faktoren, welche das Fortschreiten der Korrosion beeinflussen, können sich je nach den herrschenden Bedingungen sehr unterschiedlich auswirken. Dazu gehört z. B. auch die Bildung von Schutzschichten. Die Prüfergebnisse sollten deshalb nicht als direkter Hinweis auf die Korrosionsbeständigkeit der geprüften metallischen Werkstoffe in allen Umgebungsbedingungen betrachtet werden, in denen diese Werkstoffe verwendet werden können.“

Verbindungsmittel betreffende Normen gehen, was den Korrosionsschutz betrifft, ebenfalls auf dessen Prüfung ein. Allerdings sind die Hinweise aus hiesiger Sicht wiederholt nicht eindeutig und zum Teil auch widersprüchlich, insbesondere was die Interpretation der erzielten Ergebnisse im Salzsprühtest (NSS-Prüfung) anbetrifft. So führen beispielsweise die folgenden Normen aus:

- **DIN EN ISO 4042** „Verbindungselemente - Galvanisch aufgebrachte Überzugssysteme“ [2] und
  DIN EN ISO 10683 „Verbindungselemente - Nichtelektrolytisch aufgebrachte Zinklamellenüberzugssysteme“ [3]:
  „Die Korrosionsbeständigkeit bei Kurzzeit-Korrosionsprüfungen kann nicht direkt auf das Korrosionsschutzverhalten unter bestimmten Einsatzbedingungen übertragen werden. Beschleunigte Prüfungen werden jedoch angewendet, um die Korrosionsbeständigkeit des Überzugs zu bewerten.“
- **DIN 50962** „Galvanische Überzüge - Chromatierte Zinklegierungsüberzüge auf Eisenwerkstoffen“ [4]:
  „Aus den Ergebnissen der Kurzzeit-Korrosionsprüfungen kann nicht ohne weiteres auf das Korrosionsverhalten der zinklegierungsbeschichteten und chromatierten Bauteile im Gebrauch geschlossen werden. Durch die Prüfung wird die Schutzwirkung des gesamten Schichtsystems festgestellt.“

Die zuvor erwähnten Korrosionsschutz-Normen ordnen auch bestimmte zu erfüllende Standzeiten (in Stunden) im Salzsprühtest definierten Überzugsdicken zu, damit diese Überzüge unter definierten baupraktischen Bedingungen eingesetzt werden können.

Aufgrund dieser eher widersprüchlichen Aussagen ist es verständlich, dass der Salzsprühtest wiederholt für Missverständnisse im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit von Korrosionsschutzsystemen sorgt.

Eigene Feststellungen zum Salzsprühtest

Bei den hiesigen Untersuchungen an Verbindungsmitteln, die in Trommelverfahren mittels

- galvanischen Zink- und Zink-Nickel-Überzügen
- und ZnAl-Lamellenüberzügen

geschützt sind, wurde durch den Vergleich der Ergebnisse von Salzsprühtest und Naturversuch (siehe Abschn. 12.2) festgestellt:

- Die im Salzsprühtest ermittelten Ergebnisse stimmen bezüglich der Qualität und Quantität der Schutzwirkung nicht mit dem Verhalten unter realistischen Umgebungsbedingungen (der Baupraxis) überein.
- Der Test ist nach hiesiger Ansicht weder geeignet,
  - Materialien oder Überzüge/Beschichtungen miteinander zu vergleichen,
  - noch hieraus Aussagen für deren Langzeitverhalten unter natürlichen Umgebungsbedingungen abzuleiten.

Im Salzsprühtest kann u. U. sogar ein falsches Verhalten im Hinblick auf den Langzeitschutz unter natürlichen Umgebungsbedingungen abgeleitet werden.

Ursache des unterschiedlichen Verhaltens

Der Salzsprühtest arbeitet auf Grundlage der Verstärkung der korrosionsauslösenden Faktoren wie ,,Feuchte, Schadstoffgehalt und Temperatur‘‘. Dabei wird allerdings missachtet, dass im Salzsprühtest (Dauerbefeuchtung, hohe Chloridbelastung) der Mechanismus der Korrosion gegenüber dem Verhalten in der Baupraxis (bei üblicher atmosphärischer Bewitterung und bei Kontakt mit Baustoffen) verändert wird.

Das betrifft folgende Mechanismen:

- **Abtrag bei metallischen Überzügen (Möglichkeit der Bildung von schützenden Deckschichten)**. Die Schutzwirkung von Reinzinküberzügen in der Atmosphäre und bei Kontakt mit Baustoffen wird durch die Bildung schwerlöslicher carbonatischer Deckschichten bewirkt, die sich durch Reaktion des Metalls mit der jeweiligen Umgebung bilden. Im Salzsprühtest ist die Probenoberfläche während der gesamten Prüfung nass. Die Bildung von schützenden Deckschichten wird dann zwangsläufig be- oder verhindert.

  Bei den legierten Zinküberzügen (z. B. galvanischen ZnNi-Überzügen oder ZnAl-Lamellenüberzügen) kommt es aufgrund des Legierungszusatzes zum Zink zu einer Passivierung von innen heraus (hier als „innere Passivierung“ bezeichnet). Während die äußere Passivierung von unlegiertem Zink zwar bei Wechsel von Befeuchtung und Abtrocknung (also bei normaler Bewitterung), nicht jedoch bei Dauerbefeuchtung wie im Salzsprühtest stattfindet, ist die Korrosionsschutzwirkung einer inneren Passivierung nahezu unabhängig vom Feuchtegehalt der Umgebung.

  In einer dauerfeuchten, auch salzhaltigen Umgebung verhalten sich metallische Überzüge wie Zink, dessen Korrosionsschutz (bei Luftzutritt) auf der Bildung korrosionsschützender carbonatischer Deckschichten beruht, im Vergleich zum Verhalten unter baupraktischen Bedingungen somit erheblich ungünstiger als legierte Überzüge wie beispielsweise ZnNi- und auch ZnAl-Lamellenüberzüge. Der Salzsprühtest suggeriert somit eine vielfache Überlegenheit von ZnNi-Überzügen und ZnAl-Lamellenüberzügen gegenüber annähernd gleichdicken Zinküberzügen. Unter atmosphärischen Bedingungen ist dann diese Überlegenheit nicht mehr vorhanden.

  Bei den starken Schichtdickenschwankungen und Nullstellen bei ZnAl-Lamellenüberzügen übernimmt im Naturversuch der Haftvermittler (galvanische Unterzinkung plus Passivierung, siehe Abschn. 8.5) den eigentlichen Korrosionsschutz. Dieser ist in der Atmosphäre beständig, jedoch nicht im Salzsprühtest.

- **Möglichkeit eines kathodischen Korrosionsschutzes**. Dieser funktioniert nur im Salzsprühtest, jedoch nicht unter normalen atmosphärischen Korrosionsbedingungen (siehe Abschn. 4.5). Dieses deshalb, weil in dem wässrigen salzreichen Medium des Salzsprühtests ein kathodischer Schutz von freiliegenden Stahloberflächen durch die Opferwirkung des metallischen Überzuges ungleich stärker zum Tragen kommt als unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen. Denn in dem salzreichen wässrigen Elektrolyten des Salzsprühtests, nicht jedoch in der Atmosphäre, sind alle medienseitigen Voraussetzungen für den kathodischen Korrosionsschutz gegeben. D. h., dass im Fall lokaler Fehlstellen oder bei lokalem Zinkabtrag diese Bereiche kathodisch ge-

schützt und demzufolge nicht als Schwachstelle erkannt werden. Unter atmosphärischen Bedingungen würde in diesen Bereichen ein Stahlabtrag und Rostbildung erfolgen. Vom kathodischen Korrosionsschutz profitieren (im Salzsprühtest) bei Trommelware die galvanischen ZnNi-Überzüge mit Rissen und Abplatzungen und ZnAl-Lamellenüberzüge mit hohen Schichtdickenschwankungen und Nullstellen (siehe Abschn. 8.3 und 8.4).

- **Bildung Korrosion fördernder Korrosionselemente**. Korrosionselemente können sich nur im Naturversuch ausbilden, wegen gleichmäßiger Benetzung mit chloridhaltigem Wasser, jedoch nicht im Salzsprühtest.
- **Baustoffseitige und verarbeitungsbedingte Einflüsse**. Bei Verbindungsmitteln werden baustoffseitige Einflüsse (z. B. Holzinhaltsstoffe) und verarbeitungsbedingte Einflüsse (z. B. Beschädigungen des Überzuges) zwar im Naturversuch, jedoch nicht (an Einzelproben) im Salzsprühtest erfasst.

Folgerungen

Der Salzsprühtest gemäß DIN EN ISO 9227 [1] ist somit lediglich ein Schnelltest für den Vergleich der Korrosionsschutzwirkung gleichartiger Systeme. Der Test ist völlig ungeeignet um eine realistische Aussage zum Langzeitverhalten metallischer Überzüge unter baupraktischen Verhältnissen (atmosphärische Beanspruchung, Berücksichtigung baustoffseitiger und verarbeitungsbedingter Einflüsse) zu bringen. Somit kann der Salzsprühtest Naturversuche nicht ersetzen.

Literatur Abschnitt 12

[1] DIN EN ISO 9227 (2006) Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray test, (früher DIN 50021)

[2] DIN EN ISO 4042 (2018) Verbindungselemente - Galvanisch aufgebrachte Überzugssysteme

[3] DIN EN ISO 10683 (2018) Verbindungselemente - Nichtelektrolytisch aufgebrachte Zinklamellenüberzugssysteme

[4] DIN 50962 (2013) Galvanische Überzüge - Chromatierte Zinklegierungsüberzüge auf Eisenwerkstoffen

13. Gesamtbeurteilung der Schutzsysteme auf Verbindungsmitteln

Neben den herkömmlichen Verzinkungen (Feuerverzinkung und galvanische Verzinkung) existieren seit einigen Jahren weitere „legierte“ Überzüge auf Zinkbasis wie galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge. Für eine Anwendung dieser legierten Überzüge bei Verbindungsmitteln in der Befestigungstechnik werden in der Literatur und in Angaben von Firmen vor allem folgende Hauptmerkmale herausgestellt:

- Sicherstellung der Passgenauigkeit mittels dünner metallischer Überzüge,
- Erreichen eines deutlich verbesserten Korrosionsschutzverhaltens gegenüber den ebenfalls eher dünnen galvanischen Zinküberzügen,
- Erzielung vergleichbarer Schutzdauern mit dünnen Überzügen wie bei den dickeren Feuerverzinkungen,
- preiswerte Alternativen zu nichtrostenden Stählen.

Für die Dauerhaftigkeit eines Verbindungsmittels im Außenbereich mit metallischem Überzug können folgende Einflüsse von Bedeutung sein:

- Die mechanische Beanspruchung beim Einbau,
- die korrosive Beanspruchung durch den Baustoff (Holz, Beton)
- und die korrosive Beanspruchung durch die Atmosphäre der Umgebung.

Die Möglichkeiten und Grenzen des Korrosionsschutzes derartiger Überzüge unter Berücksichtigung der vorgenannten Einflüsse wurden jedoch bisher nicht systematisch untersucht. Aussagen zum langzeitigen Korrosionsschutzverhalten der genannten metallischen Überzüge, einschließlich zusätzlicher Passivierungen und Deckbeschichtungen, werden nahezu ausschließlich aus Ergebnissen von labormäßig durchgeführten Schnelltest abgeleitet. Dabei spielt der Salzsprühtest eine dominante Rolle. Wie in Abschn. 12.3 aufgeführt wurde, ist dieser Test jedoch äußerst kritisch zu betrachten. Fachleute sind sich darin einig, dass der Salzsprühtest keine Freibewitterung ersetzt.

Die Aufgabe der hier durchgeführten Forschung bestand darin, galvanische ZnNi-Überzüge und ZnAl-Lamellenüberzüge im Hinblick auf eine Anwendung für Verbindungsmittel am Beispiel der Holzschraube im Holzbau, der Selbstbohrschraube im Metallbau sowie des Spreiz- und Kunststoffrahmendübels im Betonbau, unter Berücksichtigung der genannten mechanischen und korrosiven Beeinflussungen zu untersuchen. Bauteile aus nichtrostendem Stahl sowie feuerverzinkte (kleinteilverzinkte) und galvanisch verzinkte Verbindungsmittel wurden zum Vergleich ebenfalls untersucht. Massenartikel wie Schrauben, Muttern oder andere Verbindungselemente sind wirtschaftlich nur in Trommeln (Trommel-Galvanisier-Apparaten bei galvanischen Überzügen bzw. im Tauch-/Schleuder-Verfahren bei ZnAl-Lamellenüberzügen) mit den genannten Überzügen zu schützen. Deshalb stand die sog. „Trommelware“ im Vordergrund der Untersuchungen.

Seitens der Beanspruchung wurde die Korrosionsschutzwirkung der genannten Schutzsysteme

- unter bautechnisch relevanten Bedingungen wie Normklima (20 °C und etwa 84 bzw. 100 % relative Luftfeuchte),
- bei Auslagerung unter atmosphärischen Bedingungen (Stadtatmosphäre, Meeresatmosphäre)
- sowie in einem Kurzbewitterungstest (Salzsprühtest)

vergleichend festgestellt. Unter den Korrosionsbedingungen Normklima und Naturversuche wurden Holzschrauben, Selbstbohrschrauben, Spreizdübel und Kunststoffrahmendübel, stets im eingebauten Zustand, ausgelagert. Im Salzsprühtest wurden „nackte“ Proben geprüft, wobei auch mechanische Beanspruchungen, wie sie typisch für den Einbau sind, berücksichtigt wurden.

Zwecks Interpretation der Untersuchungsergebnisse wurden auch die korrosiven Randbedingungen (vor allem Klima, Feuchtegehalt, Chloridgehalt) in der umgebenden Außen- und Bohrlochatmosphäre (bei Dübeln) bzw. in den verwendeten Baustoffen Holz (Fichte ohne und mit Imprägnierung sowie Eiche) und Normalbeton erfasst.

Die Untersuchungen erfolgten, wie bereits oben ausgeführt, auch unter Berücksichtigung von zusätzlichen Passivierungen und Deckbeschichtungen (Topcoats), die bei einigen Überzügen als Funktionsbeschichtung zum Zwecke eines zusätzlichen Korrosionsschutzes und/oder z. B. als Gleitmittel aufgebracht werden. Da sämtliche Deckbeschichtungen, überwiegend mit Schichtdicken im Nanobereich, bei der Detailbetrachtung, zumindest bei der hier ausschließlich betrachteten Trommelware, keine erkennbare Korrosionsschutzwirkung zeigten, werden sie in der folgenden Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse nicht ausdrücklich berücksichtigt. Bei den ZnAl-Lamellenüberzügen wurde herstellerabhängig auch ein Haftvermittler in Form einer galvanischen Unterzinkung und/oder zusätzlichen Passivierung bzw. Zinkphosphatierung aufgebracht und dessen Einfluss festgestellt.

13.1 Dicke und Gleichmäßigkeit der Überzüge

Die durch **Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)** erzeugten Überzüge sind dicker als die folgenden Überzüge und weisen geringe Schichtdickenschwankungen auf. Die Streuung der Schichtdicke liegt bei den hiesigen Proben bei etwa 40 bis 60 µm und der Mittelwert beträgt etwa 50 µm. Bei Vorhandensein von Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund, die durch Kaltumformung bei der Herstellung der Verbindungsmittel bedingt sind, werden vom Zinküberzug überdeckt.

Galvanische Zinküberzüge sind vergleichsweise dünn und sehr gleichmäßig. Die Dicken liegen bei den meisten hiesigen Verbindungsmitteln i.M. bei etwa 5 bis 15 µm. Dabei sind die Überzugsdicken im Bereich von z. B. Gewinden zumeist dünner als auf ebenen Untergründen. Durch die Kaltumformung bei der Herstellung der Verbindungsmittel bedingte Oberflächenfehler beim Stahluntergrund, die bei der Holzschraube und der Dübelschraube des Kunststoffrahmendübels vorhanden sind, werden vom Zinküberzug nicht überall überdeckt.

Galvanische ZnNi-Überzüge sind ähnlich wie die galvanischen Verzinkungen dünn und überwiegend gleichmäßig. Die Dicken von galvanischen Zink-Nickel-Überzügen liegen bei den meisten hiesigen Verbindungsmitteln i.M. bei etwa 8 bis 12 µm. Dabei sind die Überzugsdicken, wie bei den galvanischen Zinküberzügen, im Bereich von z. B. Gewinden zumeist dünner als auf ebenen Untergründen. Im Gegensatz zu den galvanischen Zinküberzügen weisen galvanische ZnNi-Überzüge jedoch herstellungsbedingt (Trommelware) mehr oder weniger ausgeprägt Risse, Abplatzungen und somit auch Nullstellen auf. Bei Vorhandensein von verformungsbedingten Oberflächenfehlern beim Stahluntergrund, die bei der Holzschraube, Bohrschraube und bei Dübelschrauben von Kunststoffrahmendübeln vorhanden sind, werden vom ZnNi-Überzug nicht überall überdeckt.

ZnAl-Lamellenüberzüge ohne und mit Haftvermittler (siehe oben) weisen bei der hier untersuchten Trommelware starke Schichtdickenschwankungen auf. Es sind zahlreiche Nullstellen und selbst Bereiche ohne ZnAl-Überzug vorhanden. Im letztgenannten Fall schützt nur der Haftvermittler, falls vorhanden. Der Mittelwert der ZnAl-Überzugsdicke liegt bei den hiesigen Untersuchungen bei 3 bis 16 µm. Streuungen der Überzugsdicke zwischen 0 und mehreren Zehntel Mikrometer sind häufig vorhanden.

13.2 Gesamtbewertung der Naturversuche bezüglich der Korrosionsschutzsysteme

Aus den dargestellten Untersuchungsergebnissen unter natürlichen Umgebungsverhältnissen geht hervor, dass das Korrosionsschutzverhalten der metallischen Überzüge von Verbindungsmitteln sowohl vom Korrosionsschutzsystem, aber auch von der Geometrie der Verbindungsmittel (z. B. Schaft, Gewinde einer Schraube) und deren Einbausituation sowie der Art der Korrosionsbeanspruchung abhängt. Diese spezifische Abhängigkeit und abgeleitete Folgerungen werden in den Abschnitten 9 und 10 detailliert behandelt.

An dieser Stelle erfolgt lediglich eine Gesamtbewertung der Korrosionsschutzsysteme getrennt nach Auslagerung in Stadt- und Meeresatmosphäre, gemittelt über folgende Einflussgrößen:

- Verbindungsmittel (Holzschraube, Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel),
- Oberflächengeometrie (Kopf, Schaft, Gewinde, glatter Abschnitt),
- Umgebung (Atmosphäre - bewittert, nicht bewittert), Baustoff (Holz, Beton),
- Holzart bei Holzschrauben (Fichte, imprägnierte Fichte, Eiche),
- Einbausituation (Bohrloch offen/geschlossen bei Spreizdübeln).

Die Auswertung der 3jährigen Naturversuche erfolgte getrennt für die Auslagerung in Stadt und Meeresatmosphäre. Als Bewertungskriterium wurde die Häufigkeit von Verbindungsmitteln ohne Rotrost (Mittelwert sämtlicher Untersuchungsergebnisse) gewählt. Das Gesamtergebnis dieser Auswertung ist in den **Tabellen 13.1 a und b** dargestellt. Die Zahlen in Klammern verweisen auf die Häufigkeit der jeweils berücksichtigten Mittelwerte. Das jeweilige Korrosionsschutzverhalten der Überzüge konnte durch 6 bis 10jährige Auslagerungen bestätigt werden.

Oberflächenschutzsystem OS	Schicht-dicke [1] in µm	Passivierung	Haftvermittler	Häufigkeit von Verbindungs-mitteln ohne Rotrost
Verzinkung				
Feuerverzinkung	50 (40-62)	entfällt	entfällt	100 % (28)
galvanische Verzinkung	7 (4-14)	nein		75 % (16)
galvan. Verzinkung mit Passivierung		blau		74 % (31)
		gelb		74 % (31)
		dick		71 % (28)
galvan. Verzinkung mit Passivierung	11 (10-14)	blau, gelb, dick		100 % (20)
Zink-Nickel-Überzug				
galvan. ZnNi-Überzug + Passivierung	6 (4-6)	dick	entfällt	79 % (14)
	10 (8-14)			96 % (28)
Zink-Aluminium-Lamellenüberzug				
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 1	8 (7-13)	entfällt	Zink+Passivierg.	90 % (55)
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 2	9 (6-16)		nein	81 % (32)
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 3	8 (7-12)		Zink+Passivierg.	95 % (20)
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 4	4 (3-7)		nein	35 % (34)

Tabelle 13.1a Stadtatmosphäre

Oberflächenschutzsystem OS	Schicht-dicke [1] in µm	Passivierung	Haftvermittler	Häufigkeit von Verbindungs-mitteln ohne Rotrost
Verzinkung				
Feuerverzinkung	50 (40-62)	entfällt	entfällt	100 % (28)
galvanische Verzinkung	7 (4-14)	nein		50 % (16)
galvan. Verzinkung mit Passivierung		blau		61 % (31)
		gelb		65 % (31)
		dick		61 % (28)
galvan. Verzinkung mit Passivierung	11 (10-14)	blau, gelb, dick		100 % (16)
Zink-Nickel-Überzug				
galvan. ZnNi-Überzug + Passivierung	6 (4-6)	dick	entfällt	43 % (14)
	10 (8-14)			96 % (28)
Zink-Aluminium-Lamellenüberzug				
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 1	8 (7-13)	entfällt	Zink+Passivierg.	87 % (55)
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 2	9 (6-16)		nein	53 % (32)
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 3	8 (7-12)		Zink+Passivierg.	95 % (20)
ZnAl-Lamellenüberzug, Firma 4	4 (3-7)		nein	21 % (35)

Tabelle 13.1b Meeresatmosphäre

gut ≥90	mäßig 70 bis <90	gering 40 bis <70	sehr gering ≤40

Korrosionsbeständigkeit

[1] Mittelwert und Streuung der Mittelwerte sämtlicher Verbindungsmittel
Zahlen in Klammern: Häufigkeit der berücksichtigten Mittelwerte von Verbindungsmitteln ohne Rotrost

Tabelle 13.1:
Bewertung sämtlicher Untersuchungsergebnisse in Stadt- bzw. Meeresatmosphäre nach der Häufigkeit von Verbindungsmitteln ohne Rotrost

A1 Gesamtbewertung der feuerverzinkten Verbindungsmittel

- Bei keinem der Verbindungsmittel (100 % aller Bewertungen) wurde in Stadt- und

Meeresatmosphäre kein Rotrost festgestellt.

Folgerungen zu A1: Gesamtbewertung der feuerverzinkten Verbindungsmittel

Die Feuerverzinkung mit i.M. 50 µm Dicke weist im Vergleich zu den anderen Korrosionsschutzüberzügen den besten Korrosionsschutz auf.

A2 Gesamtbewertung der Verbindungsmittel mit galvanischer Verzinkung

- Galvanische Zinküberzüge mit 7 µm Zinkdicke (Mittelwert aller Überzüge) ohne Passivierung zeigen in Stadt- bzw. Meeresatmosphäre zu 75 bzw. 50 % keinen Rotrost.
- Eine zusätzliche Passivierung (Blaupassivierung, Gelbchromatierung, Dickschichtpassivierung) zeigt in Stadtatmosphäre mit 74, 74 bzw. 71 % der Bewertungen ohne Rotrost nahezu vergleichbare Werte wie die galvanische Verzinkung ohne Passivierung.

  In Meeresatmosphäre sind die Bewertungen ohne Rotrost mit 61, 65 bzw. 61 % nur geringfügig besser als bei der galvanischen Verzinkung ohne Passivierung (50 %) und erwartungsgemäß erfolgt der Zinkabtrag in chloridhaltiger Meeresatmosphäre schneller als in Stadtatmosphäre.
- Durch eine Erhöhung der Überzugsdicke von i. M. 7 auf 11 µm kann die Schutzwirkung bzw. Schutzdauer sowohl in Stadt- als auch Meeresatmosphäre entscheidend verbessert werden. Der verbessernde Einfluss der genannten Schichtdickenerhöhung übertrifft den Einfluss einer zusätzlichen Passivierung bei weitem. Bei Überzugsdicken im Bereich 14 µm (und zusätzlicher Blaupassivierung bzw. Gelbchromatierung) wurde selbst nach 10 Jahren in nicht bewitterter Meeresatmosphäre kein Rotrost festgestellt (siehe Abschn. 10.4.5).

Folgerungen zu A2: Gesamtbewertung der Verbindungsmittel mit galvanischer Verzinkung

Die einzelnen Passivierungsmaßnahmen (Blaupassivierung, Gelbchromatierung, Dickschichtpassivierung) bewirken bei Verbindungsmitteln, korrosionsgeschützt als Trommelware,

- in Stadtatmosphäre gegenüber der ausschließlichen Verzinkung keine
- und in Meeresatmosphäre nur eine geringfügige Verbesserung

des Korrosionsschutzes gegenüber der ausschließlich galvanischen Verzinkung.

Die Wirkung der einzelnen Passivierungen unterscheidet sich nur wenig. Eine mäßige Erhöhung der Überzugsdicke ist erheblich wirksamer als eine zusätzliche Passivierung. Mittlere Überzugsdicken im Bereich 11 bis 14 µm reichen selbst für einen langjährigen Schutz in nicht bewitterter Meeresatmosphäre aus.

Insgesamt gesehen, konnten bei ausschließlich atmosphärisch beanspruchten galvanischen Zinküberzügen die in der zuständigen Norm genannten Abtragungen für atmosphärische Korrosionsbeanspruchung (**Tabelle 4.1 und 4.2**) nicht bestätigt werden. Die bei den hiesigen Untersuchungen in bewitterter und nicht bewitterter Meeresatmosphä-

re nachgewiesenen Abtragungen für Zink auch ohne Passivierung waren stets deutlich geringer (siehe z. B. **Tabelle 10.11**, **Bilder 10.30 und 10.31**).

Bei Trommelware weisen galvanische Zinküberzüge bei nicht zu geringer Überzugsdicke (Mittelwert im Bereich 15 µm) ein vergleichbares Schutzvermögen auf wie ZnAl-Lamellenüberzüge mit Haftvermittler. Bei vergleichbarer Schichtdicke besteht bei Trommelware auch kein merklicher Unterschied im Korrosionsschutzverhalten zu galvanischen ZnNi-Überzügen.

A3 Gesamtbewertung der Verbindungsmittel mit galvanischem ZnNi-Überzug

- Galvanische ZnNi-Überzüge mit i.M. 6 µm Dicke des ZnNi-Überzuges und zusätzlicher Dickschichtpassivierung zeigen in Stadt- bzw. Meeresatmosphäre bei 79 % bzw. 43 % der Bewertungen keinen Rotrost.
- Durch eine Erhöhung der Überzugsdicke von i.M. 6 auf 10 µm kann bei gleichzeitiger Dickschichtpassivierung die Schutzwirkung bzw. Schutzdauer sowohl in Stadt-, insbesondere aber in Meeresatmosphäre entscheidend, jeweils auf 96 % verbessert werden.

Folgerungen zu A3: Gesamtbewertung der Verbindungsmittel mit galvanischem ZnNi-Überzug

Auch bei im Trommelverfahren auf Verbindungsmittel applizierten ZnNi-Überzügen wirkt sich bereits eine nur mäßige Erhöhung der Überzugsdicke stark verbessernd auf die Schutzwirkung bzw. Schutzdauer, vor allem unter den kritischen Bedingungen einer Meeresatmosphäre, aus.

Aus einem Vergleich aller Resultate kann abgeleitet werden, dass - eine vergleichbare, nicht zu geringe Überzugsdicke bei der Trommelware vorausgesetzt - bei galvanischen Zinküberzügen und ZnNi-Überzügen im Mittel aller Anwendungen als Verbindungsmittel ein vergleichbar gutes Schutzverhalten selbst unter kritischen Umweltbedingungen (Meeresatmosphäre) erreicht werden kann. Dabei sind zwischen beiden Überzügen keine wesentlichen Unterschiede vorhanden.

A4 Gesamtbewertung der Verbindungsmittel mit ZnAl-Lamellenüberzug

- Bei den ZnAl-Lamellenüberzügen mit i.M. etwa 8 µm Dicke des Überzuges und zusätzlichem Haftvermittler (Firmen 1 und 3) zeigen in Stadtatmosphäre 90 bzw. 95 % der Bewertungen keinen Rotrost. In Meeresatmosphäre sind 87 bzw. 95 % der Bewertungen ohne Rotrost.
- Bei einem ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2 von i.M. 9 µm, jedoch ohne Haftvermittler, sind in Stadt- und Meeresatmosphäre lediglich 81 % bzw. 53 % der Bewertungen ohne Rotrost.
- Wenn wie im Fall der Firma 4 die mittlere Dicke des Überzuges i.M. lediglich 4 µm beträgt und gleichzeitig kein Haftvermittler zur Anwendung kommt, ist das Resultat

erheblich ungünstiger, denn in Stadt- und Meeresatmosphäre sind lediglich 35 % bzw. 21 % der Bewertungen ohne Rotrost.

Folgerungen zu A4: Gesamtbewertung der Verbindungsmittel mit ZnAl-Lamellenüberzug

Die Ergebnisse zeigen, dass nur mit einem ausreichend dicken ZnAl-Lamellenüberzug (hier: i.M. 8 µm) und einem zusätzlichem Haftvermittler ein gutes Schutzverhalten des Überzuges, das dem einer Feuerverzinkung nahe kommt, erreicht werden kann.

A5 Fazit

Folgende Forderungen werden in der Befestigungstechnik an Verbindungsmittel, die als Trommelware mittels metallischer Überzüge geschützt werden, gestellt:

- ausreichender Korrosionsschutz in jeweiliger Umgebung (Atmosphäre, Baustoff) über die Nutzungsdauer,
- und Passfähigkeit.

Sicherstellung des Korrosionsschutzes sollte nach hiesigen Untersuchungen wie folgt erfolgen:
Falls hohe Schichtdicken um etwa 50 µm bei der Anwendung von Verbindungsmitteln nicht stören, dann bietet eine **Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)** aus hiesiger Sicht im Vergleich zu den anderen Korrosionsschutzüberzügen den besten Korrosionsschutz.

Wenn die Sicherstellung des Korrosionsschutzes und der Passfähigkeit mittels dünner metallischer Überzüge erfolgen soll, stehen

- galvanische Zinküberzüge,
- galvanische ZnNi-Überzüge und
- ZnAl-Lamellenüberzüge

zur Verfügung.

Dabei sind jedoch folgende Anforderungen an die genannten Überzüge zu stellen:

- **Galvanische Zink- und ZnNi-Überzüge**. Beide galvanischen Überzüge müssen eine ausreichende Schichtdicke vorweisen (je nach Umgebungsverhältnisse Schichtdicken um etwa i.M. 10 bis 15 µm), wobei bereits Reinzinküberzüge aus hiesiger Sicht einen langzeitigen Korrosionsschutz bieten (siehe Abschn. 10.4.5). Als Trommelware hergestellte ZnNi-Überzüge sind wegen vorhandener Risse, Abplatzungen und Nullstellen nicht grundsätzlich besser als Zinküberzüge.

  Passivierungen und Deckbeschichtungen führen bei Trommelware zu keiner wesentlichen systematischen Verbesserung des Korrosionsschutzes von galvanischen Überzügen.

- **ZnAl-Lamellenüberzüge**. Für einen langzeitigen Korrosionsschutz bedürfen ZnAl-Lamellenüberzüge, die im Trommelverfahren auf Verbindungsmitteln appliziert werden (hohe Schichtdickenschwankungen, Nullstellen), einen Haftvermittler (galvani-

sche Unterzinkung und/oder Phosphatierung). Weiterhin müssen ZnAl-Lamellenüberzüge eine ausreichende Schichtdicke von etwa i.M. 10 µm vorweisen.

Deckbeschichtungen führen bei Trommelware zu keiner wesentlichen systematischen Verbesserung des Korrosionsschutzes von ZnAl-Lamellenüberzügen. Insbesondere Deckbeschichtungen mit Schichtdicken im Nanometerbereich sind aus hiesiger Sicht als Korrosionsschutz nicht wirksam.

A6 Vergleich metallischer Überzüge mit nichtrostendem Stahl

Bei den hiesigen Untersuchungen haben Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl einer Korrosionsbeständigkeitsklasse II in Meeresatmosphäre erwartungsgemäß frühzeitig Stahlkorrosion gezeigt, dagegen nicht in Stadtatmosphäre. Bei den metallischen Überzügen wurde bei geeigneter Konzeption dagegen langzeitiger Schutz gegenüber Stahlkorrosion erreicht. Hieraus lässt sich folgern:
Metallische Überzüge und nichtrostende Stähle haben beide Berechtigung für eine Anwendung im Außenbereich. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass sinnvoll konzipierte Überzüge (siehe Ausführung zu A5) insbesondere in Stadtatmosphäre im Regelfall ausreichend sind.

Falls man Entscheidungen treffen muss, welcher Korrosionsschutz sinnvoll ist, sollte man den unterschiedlichen Korrosionsmechanimus beider Möglichkeiten in Betracht ziehen. Diese gilt insbesondere für jene Fälle, wo umgebungsbedingt (Atmosphäre, Baustoff) von erhöhter Korrosionsbeanspruchung auszugehen ist. Während in einem korrosionsauslösenden Medium wie einer chloridhaltigen wässrigen Lösung ein schützender metallischer Zinküberzug allmählich abgetragen wird, u. U. jedoch zumindest einen temporären (berechenbaren) Korrosionsschutz bietet, der u. U. für die geplante Nutzungsdauer ausreichend ist, beginnt ein nichtrostender Stahl sofort zu korrodieren, falls der Legierungsgehalt nicht ausreicht. Dieses wurde durch die hiesigen Auslagerungen in Meeresatmosphäre bestätigt. Stähle der Korrosionsbeständigkeitsklasse II (Werkstoff-Nr. 1.4301 und 1.4567) zeigten in nicht bewitterter Meeresatmosphäre bereits jeweils nach 1 Jahr Stahlkorrosion. Dieses hätte nach bisherigem Kenntnisstand dauerhaft nur durch Verwendung höher legierter Stähle einer Korrosionsbeständigkeitsklasse IV sicher vermieden werden können. Auf der anderen Seite zeigten galvanische Überzüge mit Schichtdicken um 15 µm unter denselben Korrosionsbedingungen selbst nach 10 Jahren keinen Rotrost.

13.3 Gesamtbewertung des Salzsprühtests

Bei den vergleichenden Untersuchungen im Salzsprühtest und im Naturversuch (Stadt- und Meeresatmosphäre) wurde in jedem Fall festgestellt, dass die im Salzsprühtest ermittelten Ergebnisse bezüglich der Qualität und Quantität der Schutzwirkung nicht mit dem Korrosionsverhalten unter realistischen Bedingungen (der Baupraxis) übereinstimmen. Das betrifft sowohl die Abstufung der einzelnen Korrosionsschutzsysteme untereinander, Einflüsse zusätzlicher Maßnahmen wie Passivierungen und Deckschichten und spezifische Einflüsse von Kontaktmaterialien (z. B. Holz).

Als Ursache dieses Verhaltens gilt festzustellen [1]:

- Im Salzsprühtest wird wegen Dauerbefeuchtung und hoher Chloridbelastung der Korrosionsmechanismus gegenüber dem Verhalten in der Baupraxis verändert. Das betrifft sowohl den Metallabtrag (Möglichkeit der Bildung von korrosionsschützenden Deckschichten) als auch die Möglichkeit eines kathodischen Korrosionsschutzes (dieser funktioniert nur im Salzsprühtest).
- Bei Verbindungsmitteln der Bautechnik werden baustoffseitige und verarbeitungsbedingte Einflüsse (Beschädigungen des Überzuges) nicht ausreichend erfasst.

In Abschn. 12.3 wurden die diesbezüglichen Zusammenhänge erläutert.

Der Test ist daher weder geeignet Materialien oder Überzüge/Beschichtungen miteinander zu vergleichen, noch hieraus Aussagen für deren Langzeitverhalten unter natürlichen Umgebungsbedingungen abzuleiten. Aus dem Salzsprühtest kann bei als Trommelware hergestellten Überzügen von Verbindungsmitteln u. U. sogar ein falsches Verhalten im Hinblick auf den Langzeitschutz unter natürlichen Umgebungsbedingungen abgeleitet werden. Hinzu kommt, dass Hinweise zum Salzsprühtest in Verbindungsmittel betreffende Normen wiederholt nicht eindeutig und zum Teil auch widersprüchlich sind (Abschn. 12.3).

Der Salzsprühtest kann lediglich zur Qualitätskontrolle (Bestimmung der Gleichmäßigkeit eines Produktes) bestimmter Materialien oder Korrosionsschutzsysteme eingesetzt werden. Das ist auch der ursprüngliche Zweck, zu dem der Test entwickelt wurde und zu dem er in einigen Branchen nach wie vor eingesetzt wird. Allerdings gilt zu berücksichtigen, dass bei ein und demselben metallischen Überzug (z. B. einer galvanischen Verzinkung) das Prüfergebnis (Zeitpunkt des Auftretens von Rotrost) primär von der jeweiligen Schichtdicke bestimmt wird. Deshalb wird von Fachleuten im Zusammenhang mit dem Salzsprühtest auch von einem aufwendigen Schichtdickenmessverfahren gesprochen.

Literatur Abschnitt 13

[1] U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag Wiesbaden, 1995

Universität Stuttgart

Alternative Korrosionsschutzsysteme für Verbindungsmittel in der Befestigungstechnik bei Anwendung im Außenbereich

Anlagen

E. Cenk Köse

2019

Anlagen - Abschnitt 7: Einzelergebnisse der Feuchtemessungen der Bohrlochatmosphäre und in der umgebenden Außenatmosphäre

Uhr-zeit	Bauteil senkrecht, nicht bewittert									Bauteil senkrecht, bewittert								
	Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima			Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima		
	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]
10:00	2,2	4,1	73,7	2,1	4,3	77,2	4,1	4,0	63,1	4,0	4,8	75,6	5,2	5,6	81,8	5,8	4,2	58,9
14:00	2,4	4,2	74,4	2,4	4,4	77,5	1,4	4,8	91,3	4,2	4,9	76,7	5,4	5,8	83,0	1,8	4,9	90,2
17:00	2,1	4,2	75,0	2,0	4,3	77,3	2,0	5,1	92,9	3,7	4,8	76,9	4,8	5,5	82,6	2,0	5,1	92,9
10:00	1,2	4,0	76,2	1,1	4,0	76,7	2,4	3,9	68,1	2,1	4,3	76,8	3,4	4,9	81,1	2,0	3,8	68,8
14:00	1,7	4,1	76,0	1,7	4,2	76,8	4,1	4,1	64,2	3,2	4,6	76,8	4,4	5,3	81,1	4,9	4,2	62,1
17:00	4,1	4,8	75,7	4,0	4,9	77,5	6,5	4,1	54,7	10,1	7,4	78,7	10,6	8,3	85,3	7,1	4,1	52,2
10:00	0,9	4,0	79,2	0,8	4,1	79,8	1,1	4,7	90,5	2,4	4,5	79,3	3,6	5,2	83,8	2,4	5,0	88,1
14:00	1,7	4,3	79,4	1,7	4,3	79,7	3,9	5,0	80,0	4,4	4,2	79,6	5,6	5,9	83,8	6,1	5,4	73,7
17:00	2,7	4,6	79,9	2,6	4,6	80,0	5,6	5,2	73,9	6,7	6,1	80,6	7,8	6,9	85,1	6,4	5,2	70,6
10:00	7,7	6,3	78,2	7,6	6,3	78,2	6,5	6,4	86,0	9,0	8,8	99,9	10,0	8,4	89,5	5,2	6,9	100,0
14:00	7,3	6,1	78,1	7,2	6,1	78,0	6,4	6,3	85,0	8,8	8,7	99,9	9,8	8,3	89,4	6,3	6,8	92,0
10:00	5,0	5,1	75,0	5,0	5,2	76,5	5,6	5,7	81,4	6,2	5,4	74,3	7,3	6,4	80,9	5,4	6,1	88,1
14:00	5,4	5,3	76,0	5,3	5,3	76,6	7,2	5,6	72,0	7,5	6,0	75,6	8,6	7,0	81,2	6,9	6,1	79,2
17:00	5,6	5,4	76,7	5,6	5,4	76,8	7,2	5,5	70,3	7,7	6,2	76,3	8,7	7,1	81,9	5,9	6,0	83,1
10:00	4,3	4,9	76,4	4,2	4,9	76,4	4,8	5,4	81,5	4,3	4,9	75,7	5,4	5,6	80,0	4,5	5,5	84,8
14:00	5,1	5,2	76,3	5,0	5,2	76,5	7,0	4,5	58,1	7,2	6,0	76,6	8,3	6,8	81,1	7,7	4,5	56,3
17:00	5,7	5,4	75,8	5,6	5,4	76,6	7,6	4,2	52,0	8,1	6,4	76,8	9,1	7,2	81,7	7,8	4,2	51,9
10:00	3,0	4,5	76,2	3,0	4,6	78,3	4,6	4,0	61,3	6,8	5,9	77,8	7,7	6,7	83,2	5,6	4,1	58,6
14:00	3,9	4,8	75,9	4,0	5,0	78,4	7,1	4,0	51,4	11,9	8,2	77,7	12,8	9,3	83,2	9,0	4,0	45,6
17:00	5,2	5,2	75,7	5,1	5,4	78,8	7,2	4,1	51,8	11,8	8,3	79,2	12,5	9,5	86,6	7,4	4,0	50,7

Kein Niederschlag	Regen	Schnee

rel. LF: relative Luftfeuchte WDG: Wasserdampfgehalt Temp.: Temperatur

Uhr-zeit	Bauteil senkrecht, nicht bewittert									Bauteil senkrecht, bewittert								
	Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima			Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima		
	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]
10:00	0,3	3,9	80,1	0,3	3,9	80,2	4,1	4,3	67,0	3,8	5,0	80,6	4,8	5,6	84,1	6,0	4,5	61,7
14:00	1,9	4,4	80,3	1,9	4,4	80,4	5,5	3,6	52,0	13,9	9,9	82,3	14,9	10,9	85,7	10,2	4,0	42,5
17:00	3,3	4,9	80,5	3,3	4,9	81,0	6,1	4,1	57,0	12,1	9,0	84,2	12,9	10,1	89,5	7,3	4,9	61,9
10:00	3,9	4,7	74,8	3,8	4,8	76,3	6,9	4,3	56,1	8,1	6,2	74,9	9,0	7,2	81,7	8,5	4,6	53,5
14:00	4,9	5,0	75,0	4,9	5,2	76,7	7,9	4,6	56,4	8,6	6,5	75,4	9,6	7,5	82,4	8,0	4,9	59,3
17:00	5,6	5,3	75,3	5,5	5,4	77,0	7,2	4,7	59,5	8,8	6,6	75,7	9,7	7,8	84,7	7,5	4,6	57,4
10:00	1,6	4,0	74,4	1,5	4,1	76,3	3,9	4,5	71,2	4,7	5,0	75,9	5,8	5,8	81,0	6,2	5,0	67,7
14:00	3,6	4,6	75,3	3,5	4,7	76,9	7,4	4,3	54,0	16,0	10,7	78,7	16,6	12,1	85,8	10,6	4,7	48,1
17:00	4,8	5,0	75,4	4,7	5,1	77,3	8,3	4,2	50,0	15,6	10,5	79,2	16,1	12,0	87,7	10,5	4,6	48,0
10:00	5,0	5,1	75,2	5,0	5,2	76,6	6,8	4,7	61,8	6,5	5,6	75,0	7,6	6,5	80,7	6,5	5,0	66,7
14:00	6,2	5,4	74,2	6,2	5,6	76,8	8,4	3,8	45,5	12,6	8,4	76,4	13,4	9,7	83,5	12,5	4,5	41,3
17:00	6,8	5,6	73,7	6,7	5,8	77,1	8,5	3,8	45,0	13,2	8,8	76,7	14,0	10,2	84,9	9,0	4,1	46,3
10:00	8,7	6,6	77,0	8,6	6,6	77,4	9,8	9,3	100,0	9,3	9,0	99,9	10,3	8,5	88,9	9,8	9,3	100,0
14:00	9,2	7,0	78,2	9,1	6,9	77,8	10,8	8,7	88,3	10,0	9,4	99,9	10,9	8,9	89,4	10,8	8,7	88,3
17:00	9,6	7,2	79,2	9,6	7,1	78,1	10,4	9,3	96,4	11,5	10,3	99,9	12,3	9,8	90,3	10,4	9,3	96,4
10:00	7,1	5,9	75,4	7,2	6,0	76,9	10,2	4,9	51,6	9,8	9,2	99,2	10,8	8,6	87,1	10,7	5,2	53,2
14:00	8,5	6,3	74,4	8,5	6,6	77,2	11,6	4,8	46,6	14,3	12,0	97,9	15,1	11,4	88,5	13,2	4,8	41,4
17:00	9,6	6,7	73,4	9,6	7,1	77,6	11,6	5,0	48,0	14,9	12,7	99,9	15,5	12,1	91,6	11,9	5,9	55,6

Kein Niederschlag	Regen	Schnee

rel. LF: relative Luftfeuchte WDG: Wasserdampfgehalt Temp.: Temperatur

Anlage 7.1:
Feuchtemessungen der Bohrlochatmosphäre und in der umgebenden Außenatmosphäre im Februar/März 2016

Uhr-zeit	Bauteil senkrecht, nicht bewittert									Bauteil senkrecht, bewittert								
	Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima			Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima		
	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]
10:00	16,9	10,0	69,4	17,0	10,5	72,2	16,4	10,6	75,7	17,5	12,1	80,8	17,5	12,4	83,2	19,0	10,5	64,1
14:00	16,3	9,7	69,6	16,4	10,1	72,2	16,1	11,0	80,0	18,0	15,4	99,9	17,8	12,6	83,2	18,7	11,5	71,5
17:00	16,3	9,7	69,7	16,4	10,1	72,1	16,4	9,6	69,0	17,5	14,9	99,9	17,8	12,7	83,7	18,0	10,0	65,0
10:00	16,0	9,8	72,2	16,1	10,6	77,0	16,5	8,1	57,9	17,3	14,5	98,6	17,2	12,9	88,1	21,0	8,0	43,8
14:00	17,2	10,6	72,3	17,2	11,3	77,4	18,6	8,6	54,1	19,6	16,6	98,4	19,5	15,0	89,0	20,9	8,8	48,4
17:00	17,9	11,1	72,3	18,0	11,9	77,6	19,9	9,1	52,9	20,8	17,8	98,3	20,7	16,1	89,4	22,0	9,6	49,4
10:00	21,0	12,6	68,5	21,1	13,5	73,2	20,7	11,0	61,2	22,0	15,6	80,1	22,1	16,3	83,2	21,3	11,0	58,7
14:00	20,6	12,3	68,6	20,7	13,2	73,0	19,1	11,7	71,0	21,7	15,3	80,2	21,8	16,0	83,2	23,4	12,6	59,8
17:00	20,3	12,1	68,7	20,4	12,9	73,0	19,7	11,9	70,0	21,7	15,4	80,4	21,8	16,0	83,1	19,5	11,9	70,8
10:00	16,4	11,5	82,0	16,4	12,2	87,3	17,7	11,9	79,1	17,4	13,3	89,4	17,3	13,4	90,7	22,2	12,5	63,5
14:00	17,3	12,0	81,1	17,3	12,8	86,8	18,9	12,1	74,8	19,7	15,1	88,8	19,5	15,2	90,7	23,3	13,2	63,0
17:00	17,9	12,4	80,9	17,9	13,2	86,6	19,5	12,5	74,3	21,1	16,4	89,0	21,0	16,6	90,7	24,3	13,9	62,8
10:00	18,7	11,7	72,9	18,7	12,4	77,3	18,8	13,2	82,1	19,9	16,1	93,6	19,8	15,0	87,6	21,8	13,1	68,0
14:00	19,6	12,4	73,3	19,6	13,1	77,5	21,1	11,7	63,3	22,2	18,3	93,0	22,0	17,2	88,2	25,5	11,0	46,2
10:00	18,3	11,4	72,7	18,3	12,1	77,4	19,3	11,5	69,1	19,9	16,7	97,2	19,8	15,2	88,8	23,1	11,3	54,6
14:00	19,0	11,9	72,9	19,0	12,7	77,7	20,4	11,8	66,8	21,8	18,6	96,8	21,7	17,1	89,5	26,8	12,4	48,5
17:00	19,6	12,4	73,3	19,6	13,2	78,0	19,8	13,0	76,0	23,1	20,1	97,2	23,0	18,5	90,0	23,8	13,4	62,0
10:00	23,4	14,4	68,4	23,6	15,6	73,1	21,8	14,6	76,0	23,5	20,0	94,2	23,7	17,9	83,3	23,9	15,3	70,7
14:00	22,9	14,2	69,3	23,0	15,1	73,3	22,1	14,7	75,0	23,8	20,5	95,0	23,9	18,3	84,4	24,7	16,6	73,0
17:00	22,7	14,1	69,5	22,8	14,9	73,3	22,3	13,9	70,0	24,6	21,5	95,1	24,7	19,3	84,9	25,2	14,6	62,6
10:00	18,9	11,9	73,4	19,0	12,7	77,6	20,9	10,7	58,8	20,9	17,4	95,4	20,8	16,1	88,6	23,1	10,9	52,6
14:00	19,9	12,6	73,4	19,9	13,4	77,9	21,5	11,4	60,4	23,3	19,8	94,7	23,1	18,4	89,0	26,8	10,9	42,7
17:00	20,4	13,0	73,5	20,4	13,8	78,1	21,8	11,5	60,0	24,7	21,5	94,6	24,5	20,1	89,6	24,5	11,3	50,5

Kein Niederschlag	Regen	Schnee

rel. LF: relative Luftfeuchte WDG: Wasserdampfgehalt Temp.: Temperatur

Uhr-zeit	Bauteil senkrecht, nicht bewittert									Bauteil senkrecht, bewittert								
	Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima			Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima		
	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m³]	rel. LF [%]
14:00	18,8	11,4	70,8	18,9	12,3	75,6	19,5	8,1	48,2	22,4	16,9	84,8	22,2	17,1	87,1	24,9	7,8	34,1
17:00	19,3	11,7	70,6	19,3	12,6	75,7	19,7	8,1	47,8	23,5	18,0	84,9	23,4	18,4	87,5	25,6	7,9	32,9
10:00	15,9	9,7	71,8	16,0	10,3	75,3	17,5	9,8	65,7	17,1	12,7	87,3	17,1	12,5	86,1	22,9	10,5	51,1
14:00	17,4	10,7	72,2	17,4	11,3	75,9	19,3	10,2	61,7	19,7	14,9	87,7	19,7	14,9	87,4	23,9	11,4	52,5
17:00	18,3	11,3	72,4	18,3	11,9	76,2	20,5	10,4	58,4	21,9	16,9	87,6	21,8	16,9	88,0	29,2	11,4	39,2
10:00	17,3	10,3	69,6	17,3	11,0	74,3	18,4	8,3	52,4	18,8	13,4	83,4	18,7	13,7	85,2	23,6	8,5	39,9
14:00	18,7	11,2	69,8	18,8	12,1	74,9	20,9	8,9	48,8	22,4	16,4	82,5	21,6	16,3	86,0	26,3	9,2	37,2
17:00	19,7	11,9	70,0	19,8	12,9	75,2	22,0	9,2	47,2	25,0	19,3	83,7	24,7	19,7	86,8	27,9	9,1	33,6
10:00	18,8	11,7	72,8	18,9	12,4	76,3	19,4	11,8	70,6	20,0	15,1	87,0	20,0	15,1	87,4	23,1	11,6	55,8
14:00	19,8	12,5	72,9	19,8	13,1	76,7	21,1	11,2	60,6	22,7	17,6	86,9	22,7	17,8	88,1	26,7	11,8	46,6
17:00	20,5	13,0	72,9	20,5	13,7	76,9	21,5	10,5	55,8	24,9	20,0	87,2	24,8	20,3	88,9	28,8	9,9	34,9
10:00	20,3	12,3	69,8	20,4	12,9	72,8	21,7	12,6	66,0	21,3	17,4	93,4	21,2	15,7	84,7	25,7	13,5	56,3
14:00	21,7	13,4	70,2	21,7	14,0	73,4	23,9	13,9	64,0	23,9	20,2	93,3	23,7	18,4	85,8	28,5	15,0	53,6
10:00	18,6	12,6	79,3	18,7	13,6	84,9	21,0	12,7	69,4	21,1	16,1	87,4	21,0	16,4	89,4	25,1	13,2	56,9
14:00	19,7	13,5	79,3	19,7	14,5	85,0	21,6	12,9	68,1	22,7	17,7	87,6	22,6	18,1	89,8	27,8	13,7	50,9
17:00	21,1	14,6	79,3	21,1	15,7	85,2	23,6	12,3	57,8	27,0	22,7	87,8	26,9	23,2	90,3	29,1	12,5	43,0
10:00	24,7	15,6	68,9	24,8	17,0	74,7	24,7	12,6	55,4	25,9	19,6	80,6	25,8	20,4	84,4	27,7	12,4	46,4
17:00	25,6	16,6	69,5	25,7	18,0	75,1	24,8	15,3	67,0	28,6	22,9	81,4	28,7	24,1	85,2	27,0	16,5	64,1
10:00	20,5	12,6	70,9	20,6	13,3	74,1	21,4	13,1	69,8	22,1	18,7	95,7	22,0	16,6	85,1	26,7	13,4	52,6
14:00	21,8	13,7	71,2	21,8	14,3	74,6	23,4	12,0	57,0	25,3	22,2	94,5	24,6	19,4	86,1	28,2	12,2	44,3
17:00	22,8	14,5	71,2	22,9	15,4	75,0	24,3	11,8	53,0	27,2	24,8	95,1	27,1	22,5	86,7	27,8	12,5	46,3

Kein Niederschlag	Regen	Schnee

rel. LF: relative Luftfeuchte WDG: Wasserdampfgehalt Temp.: Temperatur

Uhr-zeit	Bauteil senkrecht, nicht bewittert									Bauteil senkrecht, bewittert								
	Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima			Bohrloch offen			Bohrloch geschlossen			Außenklima		
	Temp. [°C]	WDG [g/m^3]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m^3]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m^3]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m^3]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m^3]	rel. LF [%]	Temp. [°C]	WDG [g/m^3]	rel. LF [%]
14:00	20,0	12,7	73,5	20,0	13,4	77,6	22,7	11,5	57,0	22,2	18,0	91,5	22,0	17,0	87,6	27,7	11,1	41,4
17:00	20,7	13,2	73,4	20,8	14,1	77,8	23,3	11,3	53,7	24,5	20,4	90,8	23,9	19,1	88,2	27,7	10,2	38,0
10:00	19,6	11,8	69,6	19,6	12,6	74,6	20,8	10,7	58,8	21,0	15,1	82,4	21,0	15,5	84,7	26,5	10,2	40,6
14:00	20,9	12,8	69,9	20,9	13,7	75,2	23,1	10,9	52,5	23,5	17,5	82,7	23,3	17,9	85,6	29,5	10,7	36,1
10:00	21,4	13,2	70,1	21,5	14,0	74,0	22,8	11,0	53,8	22,9	19,1	93,4	22,8	17,1	84,1	26,7	10,5	41,4
14:00	23,5	14,9	70,2	23,5	15,9	74,8	25,8	11,3	46,7	27,7	24,8	92,5	27,6	22,6	84,7	31,0	11,7	36,4
17:00	24,6	15,8	70,0	24,6	16,9	75,1	26,7	10,7	42,3	30,0	28,1	92,5	29,8	25,9	86,2	31,1	11,4	35,4
14:00	23,8	16,8	78,0	23,8	18,2	84,6	27,1	13,7	52,9	27,4	22,6	85,8	27,0	23,1	89,7	29,4	12,4	29,4
17:00	24,8	17,8	78,1	24,8	19,4	84,8	27,7	12,8	47,8	29,8	25,9	86,1	29,5	26,6	90,0	34,5	13,3	34,5
10:00	25,1	17,6	76,0	25,1	19,3	83,1	25,5	15,0	63,0	26,5	21,1	84,2	26,5	22,3	88,8	30,5	15,5	49,5
17:00	27,4	20,0	75,7	27,4	22,1	83,6	28,7	14,7	52,0	33,4	30,9	84,6	32,6	31,4	89,7	33,9	16,2	43,2
14:00	24,9	15,9	69,4	25,0	17,2	74,4	27,1	12,1	46,6	27,5	24,0	90,3	27,3	22,1	84,3	33,0	12,1	33,9
17:00	26,0	16,9	69,2	26,1	18,4	74,8	28,6	10,8	38,4	30,4	28,0	90,0	30,0	25,6	85,0	33,7	10,4	28,0

Kein Niederschlag	Regen	Schnee

rel. LF: relative Luftfeuchte WDG: Wasserdampfgehalt Temp.: Temperatur

Anlage 7.2:
Feuchtemessungen der Bohrlochatmosphäre und in der umgebenden Außenatmosphäre im Juni/Juli 2016

Anlagen - Abschnitt 9: Ergebnisse der Auslagerungen bei 84 % und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum Überzug der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	62								
Streuung	≈ 48-75								
Nullstellen	keine (Abplatzungen überall)								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.1:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung), eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	9		6	9		6	9		6
Streuung	6-10		6-7	6-10		6-7	6-10		6-7
Nullstellen	keine			keine			keine		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	9		6	9		6	9		6
Streuung	6-10		6-7	6-10		6-7	6-10		6-7
Nullstellen	keine			keine			keine		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1 und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1 und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.2:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum galvanisch applizierten ZnNi-Überzug (Lieferung 2)									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	14		10	24		10	24		10
Streuung	10-16		8-12	20-26		8-12	20-26		8-12
Nullstellen	keine, jedoch Abplatzungen								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2 und Deckbeschg. 1 (Lieferung 2)									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2 und Deckbeschg. 1 (Lieferung 2)									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.3:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	8	9	7	8	9	7	8	9	7
Streuung	0-16	0-18	0-28	0-16	0-18	0-28	0-16	0-18	0-28
Nullstellen	überall								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1 und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 mit Unterzinkung plus Dickschichtpassivierung 1 und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.4:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 1, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube								
	Fichte			Fichte imprägniert			Eiche		
Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 2									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	8	10	6	8	10	6	8	10	6
Streuung	0-32	0-25	0-16	0-32	0-25	0-16	0-32	0-25	0-16
Nullstellen	überall								
Klima	**i.M. 84 % relative Luftfeuchte**								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									
Klima	**100 % relative Luftfeuchte**								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.5:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 2, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 4									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	3	4	3	3	4	3	3	4	3
Streuung	0-10	0-10	0-5	0-10	0-10	0-5	0-10	0-10	0-5
Nullstellen	überall								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.6:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 4, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Holzschraube								
	Fichte			Fichte imprägniert			Eiche		
Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 6									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	7	11	6	7	11	6	7	11	6
Streuung	0-12	6-20	0-14	0-12	6-20	0-14	0-12	6-20	0-14
Nullstellen	Kopf, Zahnspitze								
Klima	**i.M. 84 % relative Luftfeuchte**								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									
Klima	**100 % relative Luftfeuchte**								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.7:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 6, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht feuerverzinkt		50		40	50		40	40		50
Streuung			40-65		35-50	40-65		35-50	30-60		40-65
Nullstellen			keine								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.8:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung), eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1									
1,5 Jahre	entfällt				Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.9:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit galvanischen Zinküberzügen, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum galvanisch applizierten ZnNi-Überzug											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	4	1	8, 11	8	8	8, 11	8	8	4		0,5
Streuung	2-6	0-3	0-13, 8-14	0-13	0-14	0-13, 8-14	0-13	0-14	4-5		0-1
Nullstellen	Gewindebereich		Zahnspitze						Kopf, Gewindebereich		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte									
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2										
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre										

Klima	100 % relative Luftfeuchte									
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2										
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre										

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.10:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	8	7, 13	7	8	7, 13	7	8	4	6	6
Streuung	0-16	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-18	0-20	0-32
Nullstellen	Zahnspitze		überall						überall		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	8	7, 13	7	8	7, 13	7	8	4	6	6
Streuung	0-16	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-18	0-20	0-32
Nullstellen	Zahnspitze		überall						überall		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Dickschichtpassivierung 1)									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Dickschichtpassivierung 1)									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.11:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 1, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 2											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	8	7	8, 16	8	9	8, 16	8	9	7	8	5
Streuung	0-28	0-15	0-10, 11-20	0-10	6-14	0-10, 11-20	0-10	6-14	0-38	0-32	0-20
Nullstellen	Zahnspitze		Zahnspitze						überall		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte									
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2										
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre										

Klima	100 % relative Luftfeuchte									
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2										
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre										

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.12:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 2, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 3											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	7	9	7, 12	7	8	7, 12	7	8	11	7	5
Streuung	0-26	3-14	2-16, 6-17	2-16	4-18	2-16, 6-17	2-16	4-18	1-26	2-14	2-16
Nullstellen	Kopf		keine						keine		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 3 mit Deckbeschichtung 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 3 mit Deckbeschichtung 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.13:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 3, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 4											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	4	3	3, 5	3	7	3, 5	3	7	4	5	3
Streuung	0-10	0-6	0-6, 0-10	0-6	2-16	0-6, 0-10	0-6	2-16	0-16	0-14	0-16
Nullstellen	überall										

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte									
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3										
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre										

Klima	100 % relative Luftfeuchte									
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3										
1,5 Jahre				a	i	Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert				
3,0 Jahre				a	i					

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

a = äußere 5 bis 8 Gewindezähne, i = innenliegendes Gewinde

Anlage 9.14:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 4, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 6											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	9	6, 14	6	9	6, 14	6	9	8	9	6
Streuung	3-14	2-12	3-10, 11-17	3-10	4-14	3-10, 11-17	3-10	4-14	4-16	6-16	2-16
Nullstellen	keine		keine						Kopf		

Klima	i.M. 84 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

Klima	100 % relative Luftfeuchte								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre						Proben mit geschlossenem Bohrloch wurden nicht ausgelagert			
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 9.15:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 6, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung bei i.M. 84 % relativer Luftfeuchte und 100 % relativer Luftfeuchte

Anlagen - Abschnitt 10: Ergebnisse der Auslagerungen in Stadt- und Meeresatmosphäre

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum Überzug der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	62								
Streuung	≈ 48-75								
Nullstellen	keine (Abplatzungen überall)								

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) mit Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.1:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung), eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	9		6	9		6	9		6
Streuung	6-10		6-7	6-10		6-7	6-10		6-7
Nullstellen	keine								

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre						vG hG			

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre			vG hG			vG hG			

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre						vG hG			

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre			vG hG			vG hG			

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

vG/hG: vorderer/hinterer Gewindebereich der Holzschraube im Holz

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	9		6	9		6	9		6
Streuung	6-10		6-7	6-10		6-7	6-10		6-7
Nullstellen	keine			keine			keine		

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1 und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre						vG hG			

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1 und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre						vG			
3,0 Jahre			vG hG			vG hG			

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

vG/hG: vorderer/hinterer Gewindebereich der Holzschraube im Holz

Anlage 10.2:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit galvanischen Zinküberzügen, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum galvanisch applizierten ZnNi-Überzug (Lieferung 2)									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	14		10	24		10	24		10
Streuung	10-16		8-12	20-26		8-12	20-26		8-12
Nullstellen	keine, jedoch Abplatzungen								

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2 und Deckbeschg. 1 (Lieferung 2)									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2 und Deckbeschg. 1 (Lieferung 2)									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.3:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	8	9	7	8	9	7	8	9	7
Streuung	0-16	0-18	0-28	0-16	0-18	0-28	0-16	0-18	0-28
Nullstellen	überall								

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 mit Unterzinkung plus Blaupassivierung und Deckbeschichtung 1									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.4:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 1, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 2									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	8	10	6	8	10	6	8	10	6
Streuung	0-32	0-25	0-16	0-32	0-25	0-16	0-32	0-25	0-16
Nullstellen	überall								

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre						vG hG			

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre			vG hG			vG hG			

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

vG/hG: vorderer/hinterer Gewindebereich der Holzschraube im Holz

Anlage 10.5:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 2, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Holzschraube		
	Fichte	Fichte imprägniert	Eiche

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 4									
Messbereich Überzug	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde	Kopf	Schaft	Ge-winde
Mittelwert	3	4	3	3	4	3	3	4	3
Streuung	0-10	0-10	0-5	0-10	0-10	0-5	0-10	0-10	0-5
Nullstellen	überall								

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre						vG hG			

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3									
1,5 Jahre									
3,0 Jahre			vG hG			vG hG			

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

vG/hG: vorderer/hinterer Gewindebereich der Holzschraube im Holz

Anlage 10.6:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Holzschrauben mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 4, eingeschraubt in Holz (Fichte, Fichte imprägniert und Eiche), nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht feuerverzinkt		50		40	50		40	40		50
Streuung			40-65		35-50	40-65		35-50	30-60		40-65
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, nicht bewittert							
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

Klima	Meeresklima, nicht bewittert							
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.7:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung), eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, nicht bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

Klima	Meeresklima, nicht bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, nicht bewittert									
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung										
1,5 Jahre	entfällt									
3,0 Jahre										
5,0 Jahre		Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert								
10,0 Jahre										

Klima	Meeresklima, nicht bewittert									
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung										
1,5 Jahre	entfällt									
3,0 Jahre										
5,0 Jahre		Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert								
10,0 Jahre										

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, nicht bewittert									
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung										
1,5 Jahre	entfällt									
3,0 Jahre										
5,0 Jahre		Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert								
10,0 Jahre										

Klima	Meeresklima, nicht bewittert									
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung										
1,5 Jahre	entfällt									
3,0 Jahre										
5,0 Jahre		Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert								
10,0 Jahre										

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, nicht bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

Klima	Meeresklima, nicht bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.8:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit galvanischen Zinküberzügen, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum galvanisch applizierten ZnNi-Überzug											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	4	1	8, 11	8	8	8, 11	8	8	4		0,5
Streuung	2-6	0-3	0-13, 8-14	0-13	0-14	0-13, 8-14	0-13	0-14	4-5		0-1
Nullstellen	Gewindebereich		Zahnspitze						Kopf, Gewindebereich		

Klima	Stadtklima, nicht bewittert								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, nicht bewittert								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.9:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	8	7, 13	7	8	7, 13	7	8	4	6	6
Streuung	0-16	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-18	0-20	0-32
Nullstellen	Zahnspitze		überall						überall		

Klima	Stadtklima, nicht bewittert										
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)											
1,5 Jahre											
3,0 Jahre											
5,0 Jahre	Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert										
10,0 Jahre											

Klima	Meeresklima, nicht bewittert										
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)											
1,5 Jahre											
3,0 Jahre											
5,0 Jahre	Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert										
10,0 Jahre											

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	8	7, 13	7	8	7, 13	7	8	4	6	6
Streuung	0-16	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-18	0-20	0-32
Nullstellen	Zahnspitze		überall						überall		

Klima	Stadtklima, nicht bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Dickschichtpassivierung 1)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, nicht bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Dickschichtpassivierung 1)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.10:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 1, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 2											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	8	7	8, 16	8	9	8, 16	8	9	7	8	5
Streuung	0-28	0-15	0-10, 11-20	0-10	6-14	0-10, 11-20	0-10	6-14	0-38	0-32	0-20
Nullstellen	Zahnspitze		Zahnspitze						überall		

Klima	Stadtklima, nicht bewittert										
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2											
1,5 Jahre											
3,0 Jahre											
5,0 Jahre	Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert										
10,0 Jahre											

Klima	Meeresklima, nicht bewittert										
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2											
1,5 Jahre											
3,0 Jahre											
5,0 Jahre	Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert										
10,0 Jahre											

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.11:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 2, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 3											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	7	9	7, 12	7	8	7, 12	7	8	11	7	5
Streuung	0-26	3-14	2-16, 6-17	2-16	4-18	2-16, 6-17	2-16	4-18	1-26	2-14	2-16
Nullstellen	Kopf		keine						keine		

Klima	Stadtklima, nicht bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 3 mit Deckbeschichtung 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, nicht bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 3 mit Deckbeschichtung 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.12:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 3, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 4											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	4	3	3, 5	3	7	3, 5	3	7	4	5	3
Streuung	0-10	0-6	0-6, 0-10	0-6	2-16	0-6, 0-10	0-6	2-16	0-16	0-14	0-16
Nullstellen	überall										

Klima	Stadtklima, nicht bewittert										
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3											
1,5 Jahre											
3,0 Jahre											
5,0 Jahre	Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert										
10,0 Jahre											

Klima	Meeresklima, nicht bewittert										
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3											
1,5 Jahre											
3,0 Jahre											
5,0 Jahre	Proben wurden nur bis zu 3 Jahren ausgelagert										
10,0 Jahre											

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.13:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 4, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 6											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	9	6, 14	6	9	6, 14	6	9	8	9	6
Streuung	3-14	2-12	3-10, 11-17	3-10	4-14	3-10, 11-17	3-10	4-14	4-16	6-16	2-16
Nullstellen	keine		keine						Kopf		

Klima	Stadtklima, nicht bewittert		
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1			
1,5 Jahre			Proben wurden in Stadtatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre			

Klima	Meeresklima, nicht bewittert		
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1			
1,5 Jahre			Proben wurden in Meeresatmosphäre ohne Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre			

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.14:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 6, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (nicht bewittert, nicht beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht feuerverzinkt		50		40	50		40	40		50
Streuung			40-65		35-50	40-65		35-50	30-60		40-65
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, bewittert							
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

Klima	Meeresklima, bewittert							
Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.15:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung), eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, bewittert						
Korrosion der galvanischen Verzinkung							
1,5 Jahre	entfällt						Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre							

Klima	Meeresklima, bewittert						
Korrosion der galvanischen Verzinkung							
1,5 Jahre	entfällt						Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre							

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

Klima	Meeresklima, bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Blaupassivierung								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, bewittert						
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung							
1,5 Jahre	entfällt						Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre							

Klima	Meeresklima, bewittert						
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Gelbchromatierung							
1,5 Jahre	entfällt						Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre							

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		5, 10	5	4	5, 10	5	4	6		2
Streuung			3-8, 6-14	3-8	3-5	3-8, 6-14	3-8	3-5	5-10		1-4
Nullstellen			keine								

Klima	Stadtklima, bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

Klima	Meeresklima, bewittert							
Korrosion der galvanischen Verzinkung mit Dickschichtpassivierung 1								
1,5 Jahre	entfällt							Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre								

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.16:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit galvanischen Zinküberzügen, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum galvanisch applizierten ZnNi-Überzug											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	4	1	8, 11	8	8	8, 11	8	8	4		0,5
Streuung	2-6	0-3	0-13, 8-14	0-13	0-14	0-13, 8-14	0-13	0-14	4-5		0-1
Nullstellen	Gewindebereich		Zahnspitze						Kopf, Gewindebereich		

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnNi-Überzuges mit Dickschichtpassivierung 2									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.17:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit galvanischen Zink-Nickel-Überzügen, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	8	7, 13	7	8	7, 13	7	8	4	6	6
Streuung	0-16	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-18	0-20	0-32
Nullstellen	Zahnspitze		überall						überall		

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 1											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	8	7, 13	7	8	7, 13	7	8	4	6	6
Streuung	0-16	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-20, 9-18	0-20	0-20	0-18	0-20	0-32
Nullstellen	Zahnspitze		überall						überall		

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Dickschichtpassivierung 1)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 1 (Unterzinkung mit Dickschichtpassivierung 1)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.18:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 1, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 2											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	8	7	8, 16	8	9	8, 16	8	9	7	8	5
Streuung	0-28	0-15	0-10, 11-20	0-10	6-14	0-10, 11-20	0-10	6-14	0-38	0-32	0-20
Nullstellen	Zahnspitze		Zahnspitze						überall		

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 2 mit Deckbeschichtung 2									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.19:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 2, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 3											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	7	9	7, 12	7	8	7, 12	7	8	11	7	5
Streuung	0-26	3-14	2-16, 6-17	2-16	4-18	2-16, 6-17	2-16	4-18	1-26	2-14	2-16
Nullstellen	Kopf		keine						keine		

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 3 mit Deckbeschichtung 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 3 mit Deckbeschichtung 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung)									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.20:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 3, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 4											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	4	3	3, 5	3	7	3, 5	3	7	4	5	3
Streuung	0-10	0-6	0-6, 0-10	0-6	2-16	0-6, 0-10	0-6	2-16	0-16	0-14	0-16
Nullstellen	überall										

Klima	Stadtklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3									
1,5 Jahre									Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

Klima	Meeresklima, bewittert								
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 4 mit Deckbeschichtung 3									
1,5 Jahre									Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre									

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.21:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 4, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Bauteil	Bohrschraube	Spreizdübel				Ku.rahmendübel	
	Aluminiumblech	Beton				Beton plus Anbauteil aus Fichte	
		Bohrloch offen		Bohrloch geschlossen			
	äußere Atmosphäre	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch	äußere Atmos.	im Bohrloch

Angaben zum ZnAl-Überzug der Firma 6											
Messbereich Überzug	Kopf	Gewinde	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Gewinde, Mutter	Gewinde	glatter Abschnitt	Kopf	Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	9	6, 14	6	9	6, 14	6	9	8	9	6
Streuung	3-14	2-12	3-10, 11-17	3-10	4-14	3-10, 11-17	3-10	4-14	4-16	6-16	2-16
Nullstellen	keine		keine						Kopf		

Klima	Stadtklima, bewittert		
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1			
1,5 Jahre			Proben wurden in Stadtatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre			

Klima	Meeresklima, bewittert		
Korrosion des ZnAl-Überzuges der Firma 6 mit Deckbeschichtung 1			
1,5 Jahre			Proben wurden in Meeresatmosphäre mit Bewitterung nicht ausgelagert
3,0 Jahre			

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	10 - <100 % Stahlkorrosion	100 % Stahlkorrosion

Anlage 10.22:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln (Bohrschraube, Spreizdübel, Kunststoffrahmendübel) mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzügen der Firma 6, eingeschraubt bzw. eingesetzt in Blech bzw. Beton, nach Auslagerung (bewittert, beregnet) im Stadt- und Meeresklima

Anlagen - Abschnitt 11: Einzelergebnisse im Salzsprühtest

Bauteil	**Holzschraube** - Kleinteilverzinkung - Deckbeschichtg. 1	**Bohrschraube**	**Spreizdübel** - Kleinteilverzinkung	**Ku.rahmendübel** - Kleinteilverzinkung

Angaben zum Überzug der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung)								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	62		Bohrschraube wurde nicht feuerverzinkt		40	50	40	50
Streuung	≈ 48-75				35-50	40-65	30-60	40-65
Nullstellen	keine (Abplatzungen überall)				keine		keine	

Korrosion der Feuerverzinkung (Kleinteilverzinkung) im Salzsprühtest																
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)					entfällt											
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage)																
192 (8 Tage)																
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)																
432 (18 Tage)		S K														
480 (20 Tage)		S K														
600 (25 Tage)	S K	S K														
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.1:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit Kleinteilverzinkung im Salzsprühtest

Bauteil	**Holzschraube** - Verzinkung - Deckbeschichtg. 1	**Bohrschraube**	**Spreizdübel** - Verzinkung	**Ku.rahmendübel** - Verzinkung

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	6	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		4	5	6	2
Streuung	6-10	6-7			3-5	3-8	5-10	1-4
Nullstellen	Keine				keine		keine	

Korrosion der galvanischen Verzinkung im Salzsprühtest																
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)					entfällt											
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage)																
192 (8 Tage)																
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)																
432 (18 Tage)																
480 (20 Tage)																
600 (25 Tage)																
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.2:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit galvanischer Verzinkung im Salzsprühtest

Bauteil	**Holzschraube** - Verzinkung - Blaupassivierung - Deckbeschichtg. 1	**Bohrschraube**	**Spreizdübel** - Verzinkung - Blaupassivierung	**Ku.rahmendübel** - Verzinkung - Blaupassivierung

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	6	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		4	5	6	2
Streuung	6-10	6-7			3-5	3-8	5-10	1-4
Nullstellen	Keine				keine		keine	

Korrosion der galvanischen Verzinkung plus Blaupassivierung im Salzsprühtest																
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)					entfällt											
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)		S K														
144 (6 Tage)		S K														
192 (8 Tage)		S K												S K		
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)																
432 (18 Tage)																
480 (20 Tage)																
600 (25 Tage)																
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder raußpräpariert)

Anlage 11.3:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit galvanischer Verzinkung und Blaupassivierung im Salzsprühtest

Bauteil	**Holzschraube** - Verzinkung - Gelbchromatierg. - Deckbeschichtg. 1	**Bohrschraube**	**Spreizdübel** - Verzinkung - Gelbchromatierg.	**Ku.rahmendübel** - Verzinkung - Gelbchromatierg.

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	6	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		4	5	6	2
Streuung	6-10	6-7			3-5	3-8	5-10	1-4
Nullstellen	Keine				keine		keine	

Korrosion der galvanischen Verzinkung plus Gelbchromatierung im Salzsprühtest

Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)					entfällt											
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage)																
192 (8 Tage)		S K														
240 (10 Tage)		S K														
288 (12 Tage)		S K														
336 (14 Tage)		S K														
384 (16 Tage)		S K														
432 (18 Tage)														S K		
480 (20 Tage)																
600 (25 Tage)																
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.4:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit galvanischer Verzinkung und Gelbchromatierung im Salzsprühtest

Bauteil	**Holzschraube** - Verzinkung - Dicksch.passg. 1 - Deckbeschichtg. 1	**Bohrschraube**	**Spreizdübel** - Verzinkung - Dicksch.passg. 1	**Ku.rahmendübel** - Verzinkung - Dicksch.passg. 1

Angaben zum Überzug durch galvanische Verzinkung								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	9	6	Bohrschraube wurde nicht galvanisch verzinkt		4	5	6	2
Streuung	6-10	6-7			3-5	3-8	5-10	1-4
Nullstellen	Keine				keine		keine	

Korrosion der galvanischen Verzinkung plus Dickschichtpassivierung im Salzsprühtest																
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)					entfällt											
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage)																
192 (8 Tage)		S K														
240 (10 Tage)		S K														
288 (12 Tage)		S K														
336 (14 Tage)		S K												S K		
384 (16 Tage)	S K													S K		
432 (18 Tage)	S K													S K		
480 (20 Tage)																
600 (25 Tage)													S K			
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder raußpräpariert)

Anlage 11.5:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit galvanischer Verzinkung und Dickschichtpassivierung 1 im Salzsprühtest

Bauteil	Holzschraube - ZnNi-Überzug - Dicksch.passg. 2 - Deckbeschichtg. 1	Bohrschraube - ZnNi-Überzug - Dicksch.passg. 2	Spreizdübel - ZnNi-Überzug - Dicksch.passg. 2	Ku.rahmendübel - ZnNi-Überzug - Dicksch.passg. 2

Angaben zum galvanisch applizierten ZnNi-Überzug								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	14	10	4	1	8		4	0,5
Streuung	10-16	8-12	2-6	0-3	0-14	0-13	4-5	0-1
Nullstellen	keine, jedoch Abplatzungen		Überall		Zahnspitze		Gewinde, Kopf	

Korrosion des galvanisch applizierten ZnNi-Überzuges im Salzsprühtest																
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)																
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage)																
192 (8 Tage)																
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)																
432 (18 Tage)																
480 (20 Tage)																
600 (25 Tage)																
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.6:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit ZnNi-Überzug und Dickschichtpassivierung 2 im Salzsprühtest

Bauteil	**Holzschraube** - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 1	**Bohrschraube** - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug	**Spreizdübel** - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug	**Ku.rahmendübel** - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug

Angaben zum ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 1								
Messbereich Überzug	Kopf K, Schaft S	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf K, Schaft S	Gewinde
Mittelwert	K: 8 S: 9	7	9	8	8	7	K: 4 S: 6	6
Streuung	K: 0-16 S: 0-18	0-28	0-16	0-20	0-20	0-20	K: 0-18 S: 0-20	0-32
Nullstellen	Überall		Kopf, Zahnspitze		überall		überall	

Korrosion des ZnAl-Lamellenüberzuges der Firma 1 im Salzsprühtest

Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)																
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage																
192 (8 Tage)																
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)		S K														
432 (18 Tage)		S K												S K		
480 (20 Tage)		S K												S K		
600 (25 Tage)		S K												S K		
720 (30 Tage)													S K	S K		
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.7:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 1 (Unterzinkung mit Blaupassivierung) im Salzsprühtest

Bauteil	Holzschraube - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 2	Bohrschraube - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 2	Spreizdübel - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 2	Ku.rahmendübel - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 2

Angaben zum ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 2								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	K: 8 S: 10	6	8	7	9	8	K: 7 S: 8	5
Streuung	K: 0-32 S: 0-25	0-16	0-28	0-15	6-14	0-10	K: 0-38 S: 0-32	0-20
Nullstellen	Überall		Zahnspitze		Zahnspitze		Überall	

Korrosion des ZnAl-Lamellenüberzuges der Firma 2 im Salzsprühtest																
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)																
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage																
192 (8 Tage)																
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)																
432 (18 Tage)																
480 (20 Tage)																
600 (25 Tage)																
720 (30 Tage)																
840 (35 Tage)																
960 (40 Tage)																

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.8:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 2 im Salzsprühtest

Bauteil	Holzschraube	Bohrschraube - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 1	Spreizdübel - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 1	Ku.rahmendübel - Unterzinkung - Blaupassivierung - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 1

Angaben zum ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 3								
Messbereich Überzug	Kopf, Schaft	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde [1)]	Kopf, Schaft	Gewinde
Mittelwert	Holzschraube wurde nicht mit dem ZnAl-Überzug der Firma 3 versehen		7	9	8	7 10	K: 11 S: 7	5
Streuung			0-26	3-14	4-18	2-16 3-24	K: 1-26 S: 2-14	2-16
Nullstellen			Kopf		keine		keine	

Korrosion des ZnAl-Lamellenüberzuges der Firma 3 im Salzsprühtest

Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S		Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S		Gewinde	
	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b
24 (1 Tag)	entfällt															
48 (2 Tage)																
72 (3 Tage)																
96 (4 Tage)																
144 (6 Tage																
192 (8 Tage)																
240 (10 Tage)																
288 (12 Tage)																
336 (14 Tage)																
384 (16 Tage)																
432 (18 Tage)																
480 (20 Tage)														S K		
600 (25 Tage)														S K		
720 (30 Tage)													S K	S K		
840 (35 Tage)													S K	S K		
960 (40 Tage)													S K	S K		

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

[1)] Zahnflanken eines Zahnes mit unterschiedlicher Dicke
ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.9:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 3 (Unterzinkung mit Blaupassivierung) im Salzsprühtest

Bauteil	Holzschraube - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 3	Bohrschraube - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 3	Spreizdübel - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 3	Ku.rahmendübel - ZnAl-Überzug - Deckbeschichtg. 3

Angaben zum ZnAl-Lamellenüberzug der Firma 4										
Messbereich Überzug	Kopf K Schaft S	Gewinde	Kopf	Gewinde	glatter Bereich	Gewinde	Kopf K Schaft S	Gewinde		
Mittelwert	K: 3 S: 4	3	4	3	7	3	K: 4 S: 5	3		
Streuung	K: 0-10 S: 0-10	0-5	0-10	0-6	2-16	0-6	K: 0-16 S: 0-14	0-16		
Nullstellen	Überall		überall		überall		überall			

Korrosion des ZnAl-Lamellenüberzuges der Firma 4 im Salzsprühtest																		
Prüfdauer (h)	Kopf K, Schaft S				Gewinde		Kopf		Gewinde		glatter Bereich		Gewinde		Kopf K, Schaft S				Gewinde	
	ub		b		ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub	b	ub		b		ub	b
24 (1 Tag)																				
48 (2 Tage)																				
72 (3 Tage)																				
96 (4 Tage)			S	K													S	K		
144 (6 Tage	S	K	S	K													S	K		
192 (8 Tage)	S	K	S	K											S	K	S	K		
240 (10 Tage)	S	K	S	K											S	K	S	K		
288 (12 Tage)	S	K	S	K											S	K	S	K		
336 (14 Tage)	S	K	S	K											S	K	S	K		
384 (16 Tage)	S	K	S	K											S	K	S	K		
432 (18 Tage)															S	K	S	K		
480 (20 Tage)															S	K	S	K		
600 (25 Tage)															S	K	S	K		
720 (30 Tage)															S	K	S	K		
840 (35 Tage)															S	K	S	K		
960 (40 Tage)															S	K	S	K		

keine Stahlkorrosion	<10 % Stahlkorrosion	>10 % Stahlkorrosion

ub = unbelastet (Anlieferungszustand),
b = belastet (Verbindungsmittel eingebaut und wieder rauspräpariert)

Anlage 11.10:
Angaben zur Überzugsdicke in µm und zum Korrosionsverhalten von Verbindungsmitteln mit Zink-Aluminium-Lamellenüberzug der Firma 4 im Salzsprühtest