

UNTERSUCHUNGEN ZU KORROSIONSERSCHEINUNGEN VON EDELSTAHL UND ALUMINIUM AN BEHÄLTNISSEN ZUR FASSADENBEGRÜNUNG

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von:

WACHMANN, PHILIP MICHAEL, Bakk.techn.

Betreuung: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Fürhacker, Maria

Wien, Juni 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt: H066419

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	4
Zusammenfassung	5
Abstract	6
1. Einleitung	7
2. Ziele und Aufgaben	9
3. Literaturüberblick	11
3.1 Korrosion	11
3.1.1 Korrosion in wässrigen Medien	14
3.1.2 Korrosion an der Atmosphäre	15
3.1.3 Korrosion im Boden	19
3.1.4 Mikrobiologisch induzierte Korrosion	22
3.2 Lochkorrosion	24
3.3 Interkristalline Korrosion	32
3.4 Passivität	33
3.5 Edelstahl	33
3.6 Aluminium	35
4. Material und Methoden	38
4.1 Pflanzsubstrat	42
4.2 Wasserspeichervlies	43
4.3 Wässrige Proben	44
4.4 Weiße Ablagerung / Salze	45
4.5 Metallproben	46
4.6 Chemische Analyseverfahren	46
5. Ergebnisse	49
5.1 Pflanzsubstrat	50
5.2 Wasserspeichervlies	54
5.3 Wässrige Proben	59
5.4 Weiße Ablagerung/ Salze	59
5.5 Metallproben	61
6. Diskussion	63
7. Schlussfolgerung	69
8. Abbildungsverzeichnis	72
9. Tabellenverzeichnis	73
10. Literaturverzeichnis	74

Danksagung

11. Anhang.....	77
12. Lebenslauf.....	95

Danksagung

Zuerst möchte ich meiner Betreuerin Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Maria Fürhacker für ihre wissenschaftliche Unterstützung und besonders für ihre Geduld und ihren Rückhalt danken.

Weiters möchte ich Birgit Schärfinger großen Dank aussprechen, da Sie mich stets mit hilfreichen Tipps unterstützen konnte.

Außerdem möchte ich Ing. Wolfgang Stach danken, der mich in die mir unbekannte Welt des Chemielabors einführte und mir bei den Untersuchungen behilflich war.

Besonders großer Dank gilt meinen Eltern, die mich während meiner gesamten Studienzeit unterstützt haben.

Meiner Schwester Dr.Cat danke ich für ihre humorvolle, transkontinentale Unterstützung.

Abschließend möchte ich meiner Partnerin Fiorella danken, die mich durch alle Höhen und Tiefen meines Lebens begleitet und ohne die es nur halb so schön, lustig, aufregend und abwechslungsreich ist!

Zusammenfassung

Das Thema der Bauwerks- bzw. Fassadenbegrünung hat vor allem im städtischen Bereich in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erlebt. An der im Zuge dieser Diplomarbeit untersuchten Bauwerksbegrünung, welche aus Edelstahl- und Aluminiumbehältnissen besteht, sind Korrosionserscheinungen festgestellt worden. Diese Arbeit stellt den Versuch dar, das Korrosionssystem zu beschreiben, um den weiteren Verlauf einschätzen zu können und um mögliche Gegenmaßnahmen zu formulieren. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurden Grundbegriffe der Korrosion erläutert und infrage kommende Risikofaktoren benannt. Um die korrosionsauslösenden Faktoren bestimmen zu können, wurden das verwendete Metall, das Pflanzsubstrat, das Wasserspeichervlies und Ablagerungen, die auf den Metalladen zu finden waren, untersucht. Die Metallproben wurden hinsichtlich ihrer Legierungszusammensetzung analysiert, dabei wurden die der Metallgüte entsprechenden Werte der einzelnen Legierungsbestandteile nachgewiesen. Die Substrat- und Vliesproben wurden anschließend auf ihre Chlorid-, Sulfat-, Nitrit- und pH-Werte überprüft. Die aus der Literatur entnommenen kritischen Grenzwerte für Korrosion werden dabei teilweise überschritten. Vor allem die als Hauptauslöser für Lochkorrosion geltenden Chloridionen können bei dünnen Feuchtfilmen auf der Metalloberfläche in sehr hohen Konzentrationen vorhanden sein. Weiters befindet sich der pH-Wert, die mittlere Temperatur und der Druck in einem Bereich der mikrobiologisch induzierte Korrosion ermöglicht. Es wurde untersucht ob zwischen der örtlichen Verteilung der Korrosionsstellen und der Verteilung der Ionen im Substrat und im Vlies ein Zusammenhang besteht. Um die gegenwärtigen korrosionsauslösenden Faktoren mit Sicherheit bestimmen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig. Diese Arbeit ist der erste Schritt, um das Korrosionssystem einzuschätzen, und soll als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen.

Schlagwörter: Fassadenbegrünung - Bauwerksbegrünung - Korrosion - Lochkorrosion - Edelstahl - Aluminium

Abstract

The topic of vertical gardening and facade greening in urban areas got a lot of attention in the last few years. Now, the aim of this diploma thesis is to analyze and define the components of the corrosion system found in a façade greening system made of aluminum and stainless steel in order to estimate its further development and suggest possible solutions. After an extensive literature search fundamental terms are described and possible risk factors are named. To determine the reasons of the corrosion process the metals, the soil, the water storage mat, and deposits from the metals surface are analyzed. The metal probes are controlled for their alloy composition. The soil and the water storage mat are tested for levels of chloride, nitrite, sulfate and pH value. The results show that the levels of certain important risk factors are above recommended standards. Particularly the concentration of chloride ions which are known as one of the main causes for pitting corrosion tends to be very high, when the liquid layer on the metals surface is very thin. In summary this study is a first step towards defining the components of the corrosion system and analyzing the involved risk factors, which provides a basis for further research to fully analyze and understand the reasons for corrosion in this façade greening system.

Keywords: facade greening - corrosion - pitting corrosion - stainless steel - aluminum

1. Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz an der Universität für Bodenkultur in Wien erstellt und beschäftigt sich mit dem Thema der Korrosion.

An einer Fassade in Wien ist eine Bauwerksbegrünung angebracht worden. Hierfür wurden Metallladen aus Edelstahl bzw. aus einer Aluminium-Magnesiumlegierung an der Fassade angebracht. Ziel war es, sowohl langfristig Betriebskosten zu sparen als auch von den positiven Effekten auf das lokale Kleinklima, auf die Staubbinding und auf die Lärminderung zu profitieren.

Die hier behandelte Art der Bauwerksbegrünung unterscheidet sich von traditionellen Techniken, bei denen zumeist Rank- oder Schlingpflanzen, die am Fuß der Mauer im Erdreich oder in Pflanztrögen wurzeln, zum Einsatz kommen. Im urbanen öffentlichen Freiraum mit seinen großteils versiegelten Flächen und einem auf motorisierten Individualverkehr zugeschnittenen Straßenquerschnitt ist die traditionelle Art der Bauwerksbegrünung meistens nicht praktikabel. Des Weiteren ist die Pflanzenauswahl dadurch stark eingeschränkt.

Patrick Blanc, der als Begründer der modernen Bauwerksbegrünung gilt, hat ein System entwickelt, bei dem die Pflanzen nicht mehr am Boden wurzeln, sondern in einer Konstruktion aus Vlies und Substrat direkt an der Wand selbst wachsen. Dadurch erweitert sich die Auswahl der in Frage kommenden Pflanzen enorm. So können neben Gräsern und Stauden auch Kräuter und Gemüse oder fruchttragende Pflanzen verwendet werden. Dieses Prinzip wurde weltweit aufgegriffen und modifiziert und so wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl an Fassadenbegrünungssystemen, die auf einer ähnlichen Funktionsweise basieren, entwickelt. Da es sich also um eine relativ neue Art der Bauwerksbegrünung handelt, gibt es für die vorliegende Problemstellung, bei der die Konstruktion aus Metallladen besteht, in der Fachliteratur noch keine Erfahrungswerte, auf die zurückgegriffen werden kann.

2. Ziele und Aufgaben

Einige aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich damit, das Ausmaß der günstigen Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf mikroklimatische Verhältnisse zu erfassen. Gerade im Hinblick auf die Klimaveränderung und steigende Schadstoffbelastungen in der Luft stellt diese Art der Bauwerksbegrünung eine ökologisch sinnvolle Maßnahme dar, um Energie zu sparen und das Leben in urbanen Bereichen aufzuwerten. So kann der winterliche Wärmeverlust um bis zu 50 Prozent reduziert werden und im Sommer ergeben sich deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen, was eine verminderte Erhitzung des Gebäudes zur Folge hat. Deshalb ist es umso wichtiger, Probleme und Risiken bei der Bauwerksbegrünung zu erkennen, zu analysieren und in weiterer Folge Gegenmaßnahmen zu formulieren, um sie effizient zum Einsatz bringen zu können.

2. Ziele und Aufgaben

An der Konstruktion einer bestehenden Bauwerksbegrünung in Wien sind etwa zwei Jahre nach der Fertigstellung Korrosionserscheinungen entdeckt worden, obwohl die als relativ gut korrosionsbeständig geltenden Materialien Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 und eine Aluminium-Magnesium-Legierung zum Einsatz gekommen sind. Die Edelstahlelemente weisen teilweise Durchrostungen auf. Bei den Spuren an den Aluminiumelementen ist nicht eindeutig erkennbar, ob es sich um einen flächigen Metallabtrag oder um Ablagerungen auf der Metalloberfläche handelt. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die korrosionsauslösenden Faktoren einschätzen zu können.

Die zentrale Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung der Korrosionserscheinungen an dem vorliegenden System zur Fassadenbegrünung hinsichtlich Ursache und weiterer Entwicklung. Der Einfluss des Wassers, also sowohl des Regenwassers, des Kondenswassers als auch des Gießwassers, in Kombination mit dem verwendeten Pflanzsubstrat auf die Korrosionsstellen der Pflanzgefäße, soll ermittelt werden. Es sollen sowohl die von Durchrostungen betroffenen Edelstahlelemente als auch die weniger stark korrodierten Aluminiumelemente auf aus korrosionstechnischer Sicht kritische Bedingungen überprüft werden. Außerdem soll kontrolliert werden, ob die Verteilung der Korrosionsstellen in Korrelation mit der Verteilung der Ionen im Substrat und im Wasserspeichervlies steht.

Ziel der Arbeit ist es, durch die Gewinnung von Proben vor Ort erste Hinweise auf korrosionsauslösende Faktoren zu erhalten, um das Korrosionssystem beschreiben zu können. Da es je nach angrenzendem Medium und verwendetem Metall unterschiedliche Arten und Auslöser der Korrosion gibt, soll versucht werden, diese komplexen Korrosionssysteme näher zu beschreiben, um die auslösenden Faktoren sowie die ablaufenden Vorgänge bestimmen zu können. Hierfür wird einerseits eine umfassende Literaturrecherche betrieben, andererseits erfolgen Analysen des verwendeten Pflanzsubstrates, des Wasserspeichervlieses und des zum Einsatz kommenden Metalls. Es sollen, wenn möglich, ein Ausblick auf die weitere

2. Ziele und Aufgaben

Entwicklung der Korrosionsstellen an den eingesetzten Metallpflanzgefäßen gegeben und eventuelle Empfehlungen zum zukünftigen Umgang formuliert werden.

Der folgende Teil beschreibt den Aufbau der Arbeit:

In Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen der Arbeit erläutert. Verschiedene Medien, in denen es zu Korrosion kommt, werden vorgestellt und die unterschiedlichen Arten der Korrosion werden beschrieben. Typische Auslöser für Korrosionsprozesse und kritische Parameter werden bestimmt, um diese mit den Daten aus den gewonnenen Proben vergleichen zu können. Das Phänomen der passiven Oxidschichten auf Metallen wird kurz erläutert und das Verhalten von Aluminium und Edelstahl in korrosiven Medien wird diskutiert.

Kapitel 4 gibt einen Überblick über das untersuchte Objekt, den Arbeitsvorgang, die untersuchten Proben und deren Gewinnung. Weiters werden die Analysemethoden für die Flüssigproben und die Feststoffproben vorgestellt.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der verschiedenen Analysen ausgewertet und dargestellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden zusammengefasst.

In Kapitel 6 werden alle Ergebnisse diskutiert und mit den aus der Literatur gewonnenen kritischen Parametern verglichen, um so Rückschlüsse auf die Ursache der Korrosionsprozesse ziehen zu können.

Kapitel 7 beinhaltet, auf Basis der Interpretation und der Diskussion, die abschließende Bewertung der Zielsetzung und der Aufgabenstellung und es wird versucht, einen Ausblick auf die zukünftige Entwicklung der Korrosionsprozesse zu geben und mögliche Gegenmaßnahmen zu formulieren. Außerdem soll auf weiterführende Untersuchungen hingewiesen werden.

3. Literaturüberblick

Im folgenden Kapitel sollen einerseits die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche dargestellt, andererseits grundsätzliche Begriffe zum Thema Korrosion, Edelstahl und Aluminium erklärt werden.

3.1 Korrosion

Unter Korrosion wird die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung verstanden. Wenn dieser Vorgang zu einer messbaren Veränderung des Werkstoffes führt, spricht man von Korrosionserscheinungen, und erst wenn es zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines Bauteils kommt, wird von einem Korrosionsschaden gesprochen (ÖNORM EN ISO 8044, 2012).

Durch die weite Verbreitung von metallischen Werkstoffen in Infrastruktureinrichtungen, Industrie, Technik, Bauwesen und vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens, kommt einer genauen Kenntnis von Korrosionsvorgängen und Strategien zur Korrosionsvermeidung eine große Bedeutung zu. Die jährlichen Kosten zur Bekämpfung und Vermeidung von Korrosionsschäden stellen einen wesentlichen Wirtschaftsfaktor dar. Aus diesen Gründen ist die Korrosionskunde ein von vielen staatlichen und privaten Einrichtungen forciertes Forschungsgebiet und nimmt eine wichtige Rolle im Bereich der Materialforschung ein.

Tostmann (2001) zufolge kann ein Korrosionssystem als offenes System verstanden werden, welches aus dem Werkstoff und dem umgebenden Medium besteht. Dabei kommt es so lange zu einem Energie- und Stoffaustausch mit der Umgebung, bis sich in dem System ein energetisches Gleichgewicht eingestellt hat. Die Korrosion ist also, nach den Gesetzmäßigkeiten der physikalischen Chemie, das Ergebnis von instabilen Zuständen im System zwischen dem metallischen Werkstoff und dem umgebenden Medium. Das Korrosionssystem ist dabei bemüht, unter Abgabe von Energie stabile chemische Reaktionsprodukte wie Oxide, Sulfide und Salze zu

bilden. Ein Korrosionssystem kann als kritisch beurteilt werden, wenn es durch eine Störgröße unerwartet vom passiven in den aktiven Zustand überführt wird und es dadurch zu Korrosionsschäden kommt.

Ein Korrosionssystem wird von den Phasengrenzen zwischen Werkstoff und Medium charakterisiert und dem heterogenen System zugeordnet. Korrosion findet dabei als ortsgebundene Reaktion an einer Phasengrenze statt, wobei die Möglichkeit besteht, dass es sich dabei um eine Dreiphasengrenze handelt, siehe Abbildung 1 (Tostmann, 2001).

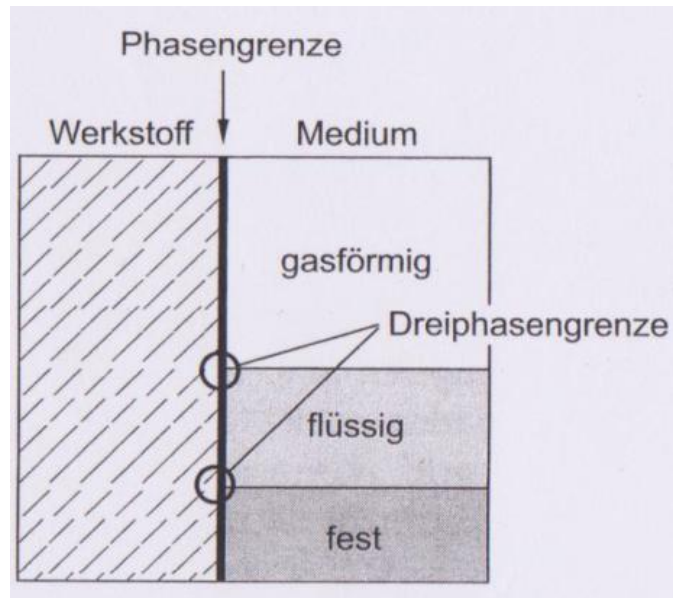


Abbildung 1: Phasengrenzen (Tostmann, 2001)

Korrosion kann als Grenzflächenvorgang bezeichnet werden, da sie stets an der Oberfläche des Werkstoffes stattfindet. Auslöser können neben chemischen, elektrochemischen und biologischen auch physikalische Vorgänge sein. Diese können aber auch nur sekundär an der Korrosion beteiligt sein. Die Intensität und Dauer des Vorgangs ist dabei zum größten Teil von der Beständigkeit des Werkstoffes gegenüber dem einwirkenden Medium abhängig (Schönburg, 2006).

Korrosion kann mithilfe von verschiedenen Merkmalen wie Korrosionsmedium, Korrosionsmechanismus, Korrosionsart, verwendetes Metall, Anwendungsgebiet und Korrosionsschutzmaßnahme eingeteilt werden. Es wird grundsätzlich zwischen elektrochemischer Korrosion, chemischer Korrosion und physikalischer Korrosion unterschieden. Elektrochemische Korrosion kommt in Verbindung mit feuchten Medien vor, chemische Korrosion findet in Verbindung mit heißen Gasen oder wasserfreien organischen Verbindungen statt, physikalische Korrosion nur an Metallen im geschmolzenen Zustand. Die oft in Handbüchern zu findende Aufteilung

nach verschiedenen Metallen hat vom systematischen Standpunkt aus nur geringe Bedeutung (Wranglén, 1985).

Da es sich im vorliegenden Fall zweifellos um elektrochemische Korrosion handelt, werden die beiden anderen Korrosionsarten nicht weiter erläutert. Grundsätzlich kann zwischen lokaler und gleichmäßiger Korrosion unterschieden werden, wobei lokale Korrosionserscheinungen in der Regel zu kritischeren Korrosionsschäden führen.

Lokale Korrosionsarten sind die Lochkorrosion, die Muldenkorrosion, Spongiose, interkristalline Korrosion, Spaltkorrosion und Kontaktkorrosion. Treten zusätzlich noch mechanische Beanspruchungen auf, kann es außerdem zu Spannungsrisskorrosion und Schwingungsrisskorrosion kommen. Das Schadensbild dieser Korrosionsarten ist örtlich begrenzt und tritt meistens zeitlich unerwartet auf. Spezifische Anionen sind Voraussetzung für die Startreaktion (Tostmann, 2001).

Laut Tostmann (2001) gehören Chlorionen und Bromionen zu den Hauptverursachern von lokaler Korrosion. Diese sogenannten weichen Anionen zeichnen sich neben einer hohen Grenzflächenpolarisation durch eine starke Adsorption aus. Sie wirken peptisierend auf kristalline Oxidgitter und sind somit in der Lage, oxidische Passivfilme in lösliche Schichten umzuwandeln.

Vorgänge, die die Korrosionsbeständigkeit eines Werkstoffes verringern, sind ungeeignete Wärmebehandlungen, Gefügeveränderungen durch Schweißen oder Kaltverfestigung sowie das Erzeugen von Eigenspannungen bei der Formgebung. Unter Wärmeeinfluss neigen einige Legierungen zur Ausscheidung von Metallcarbiden an den Korngrenzen, wobei unter Umständen Chrom und Molybdän aus den korngrenznahen Bereichen entzogen werden. Dies kann bei einer korrosiven Belastung zu einem selektiven Angriff der verarmten Zonen führen. Vor allem nichtrostende austenitische Stähle, wie es der Edelstahl 1.4301 ist, haben eine derartige Entmischungstendenz. Um dies zu verhindern, kann entweder der Kohlenstoffgehalt vermindert oder stärkere Karbidbildner wie Titan zulegiert werden. Neben der Wärmebehandlung wirkt sich auch eine hohe Kaltverformung negativ auf die Korrosionsbeständigkeit aus (Tostmann, 2001).

Neben den Korrosionserscheinungen kann auch zwischen den verschiedenen Medien unterschieden werden, in denen Korrosion vorkommt.

3.1.1 Korrosion in wässrigen Medien

Die Korrosion läuft in feuchten Medien als Elektrodenprozess ab, da das korrosive Medium aus einer Elektrolytlösung besteht. Die Auflösung des Metalls ist die anodische Reaktion, die zeitgleich mit der kathodischen Reaktion abläuft, welche unter Verbrauch des korrosiven Agens in Form von gelöstem Sauerstoff oder Wasserstoffionen stattfindet. Die Korrosionsrate von gleichmäßigen Korrosionsprozessen wird meist von der Sauerstoffdiffusion bestimmt und ist deshalb so gut wie unabhängig von kleinen Schwankungen der chemischen Zusammensetzung sowie des Gefüges. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass hartes Leitungswasser weniger korrosionsfördernd wirkt als etwa weiches Regenwasser, da die aus hartem Wasser gebildeten Kalziumkarbonatablagerungen einen gewissen Schutz vor Korrosion darstellen (Wranglén, 1985).

Die weitverbreiteten rostfreien Stähle 1.4301 und 1.4401 sind in Trinkwasser grundsätzlich korrosionsbeständig. Nur in Ausnahmefällen kann es zu Korrosion kommen. Um das Risiko abschätzen zu können, ist es wichtig, über folgende Parameter Bescheid zu wissen: den Chloridgehalt des Wassers, die Anwesenheit von Sauerstoff oder anderen starken Oxidationsmitteln, die Temperatur und das Vorhandensein von Spalten. Wenn einer oder mehrere dieser Parameter die oberen Grenzwerte überschreiten, ist die Möglichkeit für Korrosion gegeben. Grundsätzlich nimmt die Korrosivität mit steigender Wassertemperatur zu (Cottis, 2010).

Frischwasser hat im Vergleich zu Meerwasser einen sehr niedrigen Chloridgehalt. Die Materialwahl hängt somit von der chemischen Analyse und der Temperatur des Wassers ab. Durch den hohen Chloridgehalt von Meerwasser sind hier die rostfreien Stähle 1.4301 und 1.4401 von vornherein nicht für einen Einsatz geeignet. Die Widerstandsfähigkeit von nicht rostenden Stählen hängt neben dem Chloridgehalt und der Temperatur auch von weiteren Faktoren ab. Dies sind im Besonderen Schweißfehler, die Anwesenheit von Oxiden durch Schweißen oder einer anderen

Wärmebehandlung, Verunreinigung der Metalloberfläche mit Partikeln von nicht oder niedrig legierten Stählen, der pH-Wert und mikrobiologische Aktivität (Cottis, 2010).

3.1.2 Korrosion an der Atmosphäre

Die atmosphärische Korrosion ist in der Regel die Folge der zwei sich beeinflussenden Faktoren Sauerstoff und Wasser in flüssiger Form. Ist nur eines von beiden gegeben, tritt keine Korrosion auf. Sie ist das Ergebnis der Wechselwirkung zwischen metallenen Werkstoffen und klimatischen Beanspruchungen. Früher wurde zwischen Land-, Stadt-, Industrie- und Meeresklima unterschieden, wogegen heute die Unterscheidung zwischen Stadt- und Industrieklima nicht mehr von Bedeutung ist, da mittlerweile in Industriegebieten die Belastung oft geringer ist als in dicht besiedelten Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen (Tostmann, 2001).

Überlegungen zum Einsatzort bestimmen die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes. Eine starke Zunahme der atmosphärischen Korrosion ergibt sich, wenn die Luft durch Abgase verunreinigt ist, insbesondere durch Schwefeldioxid aus fossiler Verbrennung oder durch aggressive Salze in der Nähe von Schornsteinen bzw. in maritimer Umgebung. Größere Ausmaße nimmt die Korrosion dann an, wenn die Metalloberfläche mit festen Partikeln wie Staub, Schmutz und Ruß bedeckt ist, weil hierdurch Feuchtigkeit und Salze längere Zeit haften bleiben. Oftmals zeigt sich, dass Süd- und Ostseite einer Stahlkonstruktion weniger als die Nord- und Westseite korrodieren, da die von der Sonne abgewandten Seiten nach einer Benetzung durch Regen oder Tau langsamer abtrocknen (Wranglén, 1985).

Einige atmosphärische Gase sind in der Lage, die Wechselwirkung zwischen Feuchtfilmschicht und dem darunter liegenden Metall zu beeinflussen. Durch die Bildung von hygroskopischen, also wasserbindenden Partikeln begünstigen sie die Entstehung eines Feuchtfilms, außerdem kontrollieren sie dessen pH-Wert sowie die Auflösung der Oxidschicht und fördern den Austausch von Liganden (Cottis, 2010).

Prinzipiell lässt sich festhalten, dass sich in sehr reiner Luft nur geringe Korrosionserscheinungen einstellen, diese nehmen mit steigender Feuchtigkeit auch nur leicht zu. Ist die Luft stark verunreinigt, bleiben die Korrosionsraten gering, solange, bis sich eine Luftfeuchtigkeit von mehr als 70 Prozent einstellt. Danach steigt die Korrosionsrate vor allem bei Anwesenheit von SO_2 stark an. Weitere Korrosion begünstigende Faktoren sind die Anwesenheit von festem Ammoniumsulfat und Rußteilchen aus fossiler Verbrennung (Wranglén, 1985).

Die größten Probleme verursachen schwefelhaltige Verbindungen wie H_2S , Dimethylsulfid, CS_2 und SO_2 , stickstoffhaltige Verbindungen, starke Oxidationsmittel wie Ozon und Wasserstoffperoxid sowie organische Säuren (Cottis, 2010).

Hohe Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit hoher Luftverschmutzung kann die Korrosionsgefahr erhöhen, da der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit auf über 70 Prozent Kondensation und somit die Bildung eines dünnen Elektrolytfilms begünstigt. Dieser Elektrolytfilm kann unter gewissen Umständen die Ursache für elektrochemische Korrosionsprozesse sein (Wranglén, 1985).

Durch die in feuchter Luft gebildeten Adsorptionsschichten bzw. dünnen Wasserfilme wird eine elektrolytische Reaktion ermöglicht. Ist dieser Film besonders dünn, wie es bei beginnender Wasserdampfkondensation und Abtrocknung der Fall ist, verläuft die Korrosionsreaktion deutlich schneller ab als bei völliger Nässe an der Oberfläche (Tostmann, 2001).

Abbildung 2 zeigt die gemessene Korrosionsstromdichte an einer Eisenanode in Abhängigkeit zur Kondensation im Tagesverlauf. Hierbei wird deutlich, dass die höchsten Korrosionsströme bei beginnender Kondensation oder Trocknung, also in Anwesenheit von sehr dünnen Feuchtigkeitsfilmen mit maximaler Belüftung, fließen (Tostmann, 2001).

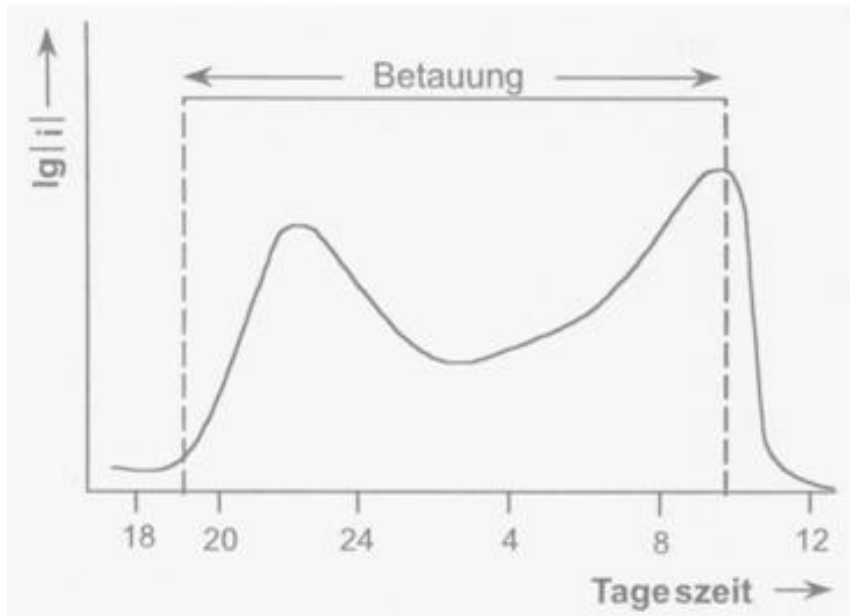


Abbildung 2: Korrosionsstromdichte im Tagesverlauf (Tostmann, 2001)

Niederschläge, die auf den Werkstoff treffen, können sich sowohl negativ als auch positiv auswirken. Treten sie häufig mit geringer Ergiebigkeit auf und ist gleichzeitig die Luftfeuchtigkeit hoch, sorgen sie für eine ständige Anwesenheit des Elektrolytes. Fallen die Niederschläge hingegen stark aus, wird das Elektrolyt verdünnt und Feststoffablagerungen werden von der Oberfläche entfernt. Die Menge des anfallenden Jahresniederschlages ist somit wenig hilfreich bei der Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit von metallischen Bauteilen (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996).

Die Ablagerung von Ruß und anderen Feststoffen auf der Metalloberfläche führt zu beschleunigter Korrosion. Insbesondere die Stähle 1.4301 und 1.4541 sind bei hoher Luftverschmutzung in gewissem Maß korrosionsgefährdet. Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei empfiehlt daher in ihrem Merkblatt 828 die periodische Reinigung der Oberflächen nichtrostender Stähle, wenn diese der Atmosphäre ausgesetzt sind. Dies führt neben dem Erhalt eines sauberen Erscheinungsbildes auch zu einer Verringerung der Korrosionsgefahr und somit zu einer verlängerten Lebensdauer des Bauteils (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996).

Es finden sich in der Literatur nur wenige Hinweise auf Korrosionsraten von nichtrostenden Stählen an der Atmosphäre. Über die Auflösungsgeschwindigkeit der einzelnen Legierungsbestandteile wie Nickel und Chrom sind scheinbar nur sehr

3. Literaturüberblick

wenige Daten verfügbar. Die Untersuchungen von Odnevall Wallinder et al. (2002) haben gezeigt, dass in einigen Versuchszeiträumen die Auflösung von Chrom aus der Oxidschicht höher war als die von Nickel, während im Großteil der Versuchszeiträume das Gegenteil der Fall war. Weiters zeigen ihre Untersuchungen, dass sich aus dem edleren rostfreien Stahl 1.4401 vor allem in chloridarmer Umgebung deutlich mehr Legierungsbestandteile lösen als aus dem unedleren rostfreien Stahl 1.4301, obwohl Gegenteiliges zu erwarten wäre.

Auf einer sauberen Metalloberfläche tritt Kondensation auf, wenn die direkt umgebende Luft eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 Prozent aufweist. Da die Oberflächentemperatur sich oftmals von der Umgebungstemperatur unterscheidet, kann es zu unterschiedlichen Luftfeuchten von oberflächennaher Luft und Umgebungsluft kommen. Die Verdunstung von Aerosolen und Regen führt unter Umständen zur Ablagerung von hygroskopischen Partikeln, wodurch schon bei wesentlich geringerer Luftfeuchtigkeit Kondensation auftritt (Cottis, 2010).

Zur leichten Einschätzung des zu verwendenden Materials wurden Listen bzw. Tabellen wie beispielsweise Tabelle 1 erstellt, die die Korrosionsbedingungen in verschiedenen Umgebungen berücksichtigen (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996).

Tabelle 1: Tabelle zur Einschätzung der Eignung von Stählen (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996)

Stahlsorte		Umgebung											
Kurzname	Werkstoff-Nr.	Land			Stadt			Industrie			Meeresnähe		
		N	M	H	N	M	H	N	M	H	N	M	H
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	X	X	X	X	X	X	X	X	+	X	X	+
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539												
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462												
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	X	X	X	X	+	+	+	+	(+)	+	+	(+)
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571												
X5CrNi18-10	1.4301	+	+	+	+	+	(+)	(+)	(+)	-	+	(+)	-
X6CrNiTi18-10	1.4541												
X6Cr17	1.4016	(+)	(+)	(+)	(+)	-	-	(+)	-	-	-	-	-
X6CrMo17-1	1.4113												

N = niedrigste Korrosionsbelastung innerhalb der jeweiligen Umgebung; gekennzeichnet z.B. durch niedrige Temperaturen und geringe Luftfeuchtigkeit (s. Tabelle 3)

M = mittlere Korrosionsbelastung innerhalb der jeweiligen Umgebung

H = höhere Korrosionsbelastung innerhalb der jeweiligen Umgebung; z.B. durch andauernde hohe Luftfeuchtigkeit, hohe Umgebungstemperaturen, besonders aggressive Luftverunreinigungen (s. Tabelle 3)

x = erfüllt grundsätzlich die Anforderungen; es könnten jedoch auch kostengünstigere Stähle ausreichen

+ = wahrscheinlich beste Werkstoffwahl im Hinblick auf Korrosionsbeständigkeit und Kosten

(+) = ausreichendes Verhalten, sofern bestimmte Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden; insbesondere sind glatte Oberflächenausführungen und regelmäßige Reinigungen erforderlich

- = voraussichtlich starke Korrosion

Während sich Stahl in den meisten Umgebungen ähnlich wie etwa Aluminium und Zink verhält, gibt es bei der atmosphärischen Korrosion einige Besonderheiten, die nur auf Stahl zutreffen. Durch die Anwesenheit von Fe(II)- und Fe(III)-Oxiden entstehen zusätzliche Reduktions- und Oxidationspfade. Neben den oft dicken und hoch porösen Rostablagerungen verschärft auch die Wechselwirkung von Eisen mit Schwefeldioxid die Korrosionsproblematik. Fe^{2+} ist in der Lage, die Reduktion von Sulfid zu Sulfat zu katalysieren, wobei Sulfationen die Auflösung von Eisen kennzeichnen (Cottis, 2010).

3.1.3 Korrosion im Boden

Die Korrosionsraten in Böden sind höher als in der Atmosphäre und teilweise sogar so hoch wie in Meerwasser. Hauptausschlaggebend dafür ist der elektrische Widerstand des Bodens, wobei ein niedriger Bodenwiderstand in der Regel zu einer hohen Korrosivität führt. Dafür verantwortlich ist die Anwesenheit von Feuchtigkeit und löslichen Salzen, da diese das Fließen von Korrosionsströmen erleichtern. Weiters sind die korrosiven Eigenschaften eines Bodens in hohem Maße von der Größe und Struktur abhängig, da eine große Oberfläche die chemische Verwitterung erhöht und somit die Bildung löslicher Salze begünstigt (Wranglén, 1985).

Böden können als poröses Korrosionsmedium betrachtet werden, welches durch mehr oder weniger feste, lösliche und hygroskopische Bestandteile sowie von lebenden Organismen gebildet wird. Die Poren enthalten zusätzlich Wasser und Luft. Organische Böden mit hohem Humusanteil und Lehm Böden können besonders gut Wasser speichern. In der Literatur lassen sich zwei verschiedene Ansätze finden, die den Zusammenhang von Korrosivität mit der Durchlüftung des Bodens zu beschreiben versuchen:

Wranglén (1985) geht davon aus, dass für das Auftreten von Korrosion ein gewisser Wassergehalt ebenso notwendig ist wie die Anwesenheit von Sauerstoff, weswegen in gut durchlüfteten Böden besonders kritische Umstände vorherrschen. Laut ihm gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen dem Wasseranteil in den Poren und steigender Korrosivität. Wenn nach dem Ende von Niederschlägen der Luftanteil in

den größeren Poren steigt, nähert sich die Korrosivität einem maximalen Wert an. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch an sich ändernden Korrosionsraten von Böden in verschiedenen geographischen Gebieten. Hier zeigen sich sehr geringe Werte in aridem Klima und sehr hohe Werte in feuchtem Klima mit belüfteten Böden, wohingegen feuchte Böden mit geringer Belüftung wie z.B. Sümpfe wieder sehr niedrige Werte hervorbringen.

Im Gegensatz dazu steht der Ansatz von Cottis (2010), dem zu Folge die Korrosionsrate von eisenhaltigen Metallen am Meisten von der Durchlüftung des Bodens beeinflusst wird und die höchsten Korrosionsraten sich in Böden mit schlechter oder sehr schlechter Durchlüftung ergeben. Ein niedriges Redoxpotenzial wird auf von schwefelreduzierenden Bakterien reduzierte Schwefelverbindungen, vor allem Sulfide, zurückgeführt. Es wurden Grenzfälle nach dem Wassergehalt festgelegt, wobei Böden, die über 20 Prozent Wasser beinhalten, als aggressiv eingestuft wurden. Auch Böden mit einem durchschnittlichen Gehalt von 120mg/kg^{-1} an löslichem Eisen gelten als aggressiv.

Wenn aus Sicherheitsgründen eine hohe Lochkorrosionsbeständigkeit gefordert wird, wie dies bei der Verwendung von Edelstahl als Erdung der Fall ist, wird in den einschlägigen Normen titanstabilisierter Stahl der Sorte 1.4571 als einziges Material zugelassen (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1997).

Die Korrosionsbedingungen im Boden variieren zwischen zwei Extremen. Zum einen ähneln sie atmosphärischen Bedingungen, zum anderen jenen, die beim Eintauchen in Wasser auftreten. Nach Wranglén macht dies den Boden zum wahrscheinlich kompliziertesten Korrosionsmedium, dem man unter natürlichen Umständen begegnet (Wranglén, 1985).

Für die Entscheidung, ob unter gegebenen Bedingungen mit Korrosion zu rechnen ist und welche Gegenmaßnahmen infrage kommen, sind Kenngrößen notwendig. Viele Daten aus Labor- und Betriebsversuchen sind in Form von Tabellen und Diagrammen vorhanden. Meistens werden dabei die korrosiven Medien in alphabetischer Reihenfolge und dazu die infrage kommenden Werkstoffe genannt. Daraus lässt sich ableiten, ob in bestimmten Systemen Werkstoffe ohne zusätzlichen Korrosionsschutz eingesetzt werden können oder nicht. Deshalb ist eine enge

Zusammenarbeit zwischen Konstrukteur und Werkstofffachmann bereits in der Planungsphase von großer Bedeutung (Tostmann, 2001).

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass alle Böden, die mit Kohle oder industriellen Abfällen verunreinigt sind, stark korrosiv wirken. Je niedriger der elektrische Widerstand des Bodens ist, desto aggressiver sind die Bedingungen für Metallwerkstoffe. Böden mit einem Widerstand $< 10\Omega\text{m}$ gelten als stark aggressiv. Der pH-Wert des Grundwassers kann zwischen 4,5 und 9,5 liegen, hat aber weniger Einfluss auf die Korrosivität des Bodens als dessen Pufferkapazität. Böden, die stark basisch gepuffert sind, haben ausreichend Restbasenkapazität, um sich günstig auf das Korrosionsverhalten auszuwirken. Böden, die stark sauer gepuffert sind, gelten als stark korrosiv. Haben die Böden hingegen nur eine minimale Pufferkapazität, wirkt sich dies nur gering auf deren Aggressivität aus. Zu einer besonders kritischen Situation kommt es, wenn H_2S aus unteren Schichten in die belüftete Zone diffundiert, wo es durch die Luft zu elementarem Schwefel reduziert wird (Cottis, 2010).

Eine große Feldstudie, die in den 1960er-Jahren England von Booth et al. (1967) durchgeführt wurde, charakterisiert aggressive Böden folgendermaßen. Sie weisen einen elektrischen Widerstand von weniger als $2000\Omega\text{ cm}$ auf und besitzen ein durchschnittliches Redoxpotenzial, welches bei einem pH-Wert von 7 kleiner als +190 mV ist. Der Redoxwert bezieht sich dabei auf die Ag/AgCl- Elektrode.

Wie kompliziert und schwer zu klassifizieren der Boden als Korrosionsmedium ist, zeigt auch der Schlussbericht der Bundesanstalt für Materialforschung, wo erwähnt wird, dass es momentan keine Möglichkeit gibt, eine erhöhte Korrosionsanfälligkeit von metallischen Oberflächen in Böden mit einfachen Mitteln nachzuweisen (BAM; 2010).

Der molybdänhaltige Stahl 1.4571 ist gegenüber dem Stahl 1.4301 in Erdböden deutlich überlegen, auch wenn in vielen Fällen Zweiterer ausreichend korrosionsbeständig ist. Liegen Zweifel bezüglich der Eignung eines Werkstoffes vor, sollte eine geeignete Edelstahlqualität aufgrund von Langzeitversuchen ausgewählt werden (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1997).

3.1.4 Mikrobiologisch induzierte Korrosion

Ein Phänomen, das in Böden und unter Wasser auftritt, ist die mikrobiologische Korrosion, die ebenfalls der elektrochemischen Korrosion zuzurechnen ist. Sie findet hauptsächlich in tiefliegenden wassergetränkten Lehmböden in Anwesenheit von sulfatreduzierenden Bakterien unter Luftabschluss statt, jedoch besteht in allen Medien, die von ihrer Zusammensetzung, pH-Wert und Temperatur her biologische Aktivitäten ermöglichen, erhöhte Korrosionsgefahr. Dafür typisch sind bräunliche, oft schleimige Beläge, die als Biofilm bezeichnet werden. Diese Biofilme stellen ein biologisches System aus wässrigem Medium, festem Substrat und Mikroorganismen dar. Die gebildeten Stoffwechselprodukte sind korrosiv wirkende organische und anorganische Säuren. Da sich diese Ablagerungen meistens verändern, bevor eine Schadensanalyse durchgeführt wird, werden die ausgelösten Schadensbilder wie Muldenkorrosion oder Lochkorrosion oft nicht als durch mikrobiologisch ausgelöste Prozesse erkannt. Mikrobiologisch induzierte Schäden wurden an Bauteilen aus unlegiertem und nichtrostendem Stahl sowie an Aluminium- und Kupferwerkstoffen festgestellt (Tostmann, 2001).

Grundsätzlich gilt, dass mikrobiologisch induzierte Korrosion ein elektrochemischer Prozess ist, der durch die Aktivität von Mikroorganismen entweder in Gang gesetzt, ermöglicht oder beschleunigt wird, ohne dabei seine elektrochemische Natur zu verändern. Es können bis zu 20 Prozent der Korrosionsschäden in der Natur darauf zurückgeführt werden (Chintan, 2004).

Die Art und Weise, wie sich mikrobiologische Stoffwechselvorgänge auf elektrochemische Korrosionsprozesse auswirken, kann laut Cottis grob in fünf verschiedene Gruppen eingeteilt werden.

- Direkte chemische Aktivitäten von Stoffwechselprodukten wie organische Säuren, schwefelige Säuren, Sulfide und chelatbildende Stoffe.
- Bildung einer elektrischen Zelle durch Abscheidung von kathodischen und leitenden Metallsulfiden.
- Kathodische Depolarisation durch das Entfernen von Wasserstoff. Dieser Mechanismus gilt als umstritten und war früher weiter verbreitet als heute.

- Lokale elektrochemische Effekte durch die Änderung der Sauerstoffkonzentration und des pH-Wertes.
- Abtragung von korrosionshemmenden Stoffen wie Nitrite und Amine.

Die wichtigste Gruppe von Mikroorganismen, die Korrosion hervorrufen können, sind die sulfatreduzierenden Bakterien. Sie kommen ausschließlich in sauerstofffreier Umgebung vor, wo sie den benötigten Kohlenstoff aus organischen Nährstoffen beziehen und Energie durch die Reduktion von Sulfat zu Sulfid gewinnen. Der Großteil der mikrobiologisch induzierten Korrosionsschäden lässt sich auf ihre Aktivitäten zurückführen. Der hervorgerufene Korrosionsprozess kann als mikrobiologisch unterstützte, chloridinduzierte Lochkorrosion bezeichnet werden. Dabei binden sich reduzierte Schwefelverbindungen an die Metalloberfläche und ermöglichen so die Entstehung von stabilen Lochkorrosionsprozessen bei deutlich niedrigeren Chloridkonzentrationen und Temperaturen, als dies sonst der Fall wäre. Hat sich einmal eine Lochkorrosionsstelle gebildet, entstehen darin saure und chloridreiche Verhältnisse. Die Lochausbreitung folgt dabei denselben Regeln wie bei jeder anderen chloridinduzierten Lochkorrosion (Cottis, 2010).

Sulfatreduzierende Bakterien können bei der Korrosion von Gusseisen, ferritischen Stählen, hochlegierten nichtrostenden Stählen, Kupfer und Nickellegierungen und hochlegierten Nickel-Molybdänlegierungen eine wichtige Rolle spielen. Da diese Bakterien in der Natur sehr weit verbreitet sind, kommen sie auch an fast allen Korrosionsstellen vor. Ihre alleinige Anwesenheit bedeutet jedoch noch nicht, dass sie für den Korrosionsangriff verantwortlich sind. Das Hauptmerkmal, das normalerweise die Beteiligung von sulfatreduzierenden Bakterien anzeigt, sind lokale Korrosionsstellen, die mit schwarzen sulfidischen Korrosionsprodukten gefüllt sind (Chintan, 2004).

Eine weitere Gruppe von Mikroorganismen, die mit Korrosion in Verbindung gebracht werden, sind die aeroben Schleimbilder. Sie produzieren Exo-polysaccharide, die eine klebrige Schleimschicht bilden, an der verschiedenste Partikel haften bleiben. Weiters berichtet Chintan noch vom eisenoxidierenden Bakterium *Gallionella*, welches für zahlreiche Fälle von Korrosion an rostfreiem Stahl verantwortlich gemacht wird. Es ist für die Anreicherung von Mangan im Biofilm verantwortlich,

wodurch die Korrosionswahrscheinlichkeit in Wassersystemen, die durch Chlorid- und Bromverbindungen verunreinigt sind, erhöht wird (Chintan, 2004).

Am Grund von Biofilmen herrschen oftmals Bedingungen, die ideal für das Wachstum von sulfatreduzierenden Bakterien sind. So finden sich hier oft viele organische Nährstoffe, kein Sauerstoff und ein niedriges Oxidations- bzw. Reduktionspotenzial. Auf diese Weise können sulfatreduzierende Bakterien auch in Systemen Korrosion hervorrufen, die auf den ersten Blick durch ihren niedrigen Nährstoffgehalt und den hohen Sauerstoffgehalt nicht für die Entstehung von anaeroben Bakterien geeignet sind. Die meisten dieser Bakterien kommen nur bei einem pH-Wert zwischen 5 und 10, einem maximalen Druck von ungefähr 500 atm und in einem Temperaturbereich zwischen 5 bis 45° C vor. Das schnellste Wachstum kann in einem Temperaturbereich zwischen 25 und 35°C beobachtet werden (Cottis, 2010).

Es hat sich als zielführend erwiesen, kleine Bodenproben direkt auf die Anwesenheit von sulfatreduzierenden Bakterien zu testen. Hierbei werden Milliprobe mit jeweils ca. 100 bis 200 mg Boden und Mikroproben mit jeweils weniger als 10mg verwendet. Wenn sich nach einer Inkubationszeit von zwei Wochen bei ungefähr 30°C sowohl die Milliprobe als auch die Mikroproben schwarz verfärbt haben, kann man von erhöhter Gefahr mikrobiologischinduzierter Korrosion ausgehen. Haben sich hingegen nur die Mikroproben schwarz verfärbt, spricht man von einem mäßig hohen Korrosionsrisiko (Cottis, 2010).

3.2 Lochkorrosion

Lochkorrosion ist ein lokalisierter Angriff, der in der Regel auf einer Metalloberfläche mit geschlossener Oxidschicht bzw. Passivschicht stattfindet und Lochfraß als Schadensbild zur Folge hat. Die Lochkorrosion geht dabei von fehlerhaften Stellen in der Passivschicht aus und kann nach kurzer Zeit zu einer vollständigen Durchlöcherung des Bauteiles führen, ohne dabei die restliche Oberfläche anzugreifen. Der Angriff erfolgt dabei meist durch Chlorid- und Bromidionen, welche

an Versetzungsstellen der Passivschicht an die Metalloberfläche vordringen (Tostmann, 2001).

Die Lochkorrosion führt in der Praxis, vor allem bei nichtrostenden Stählen und Nickelbasislegierungen, zu erheblichen Problemen. Das häufige Auftreten und die meist hohe Wachstumsgeschwindigkeit der gebildeten Löcher stellen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar und führen zu einer deutlich reduzierten Lebensdauer von betroffenen Bauteilen und Konstruktionen (Gräfen/Rhamel, 1994).

In der Literatur werden drei unterschiedliche Arten von Lochkorrosion behandelt, ohne sie dabei klar zu unterscheiden. Es folgen eine Auflistung und kurze Charakterisierung der verschiedenen Prozesse.

- Elektrochemische Depassivierung

Die elektrochemische Depassivierung ist die am weitesten verbreitete Art der Lochkorrosion und auch in der Praxis am bedeutendsten. Sie entsteht auf ansonsten passivem Metall und zeichnet sich durch ein definiertes Lochkorrosionspotenzial aus. Nur wenn dieses überschritten wird, kommt es zu Korrosion, darunter findet kein Angriff statt.

- Chemische Depassivierung

Bei der chemischen Depassivierung kommt es durch die Änderung der chemischen Zusammensetzung der umgebenden Lösung zu Lochkorrosion. Wenn beispielsweise Eisen in chloridfreier Schwefelsäure passiviert wird, in die danach Chloridionen eingebracht werden, kommt es zu Lochfraßerscheinungen. Bei diesem Vorgang kann kein kritisches Lochfraßpotenzial nachgewiesen werden. Da diese Korrosionsart nur sehr selten auftritt, spielt sie aus praktischer Sicht nur eine untergeordnete Rolle.

- Lochfraß durch Ätzen

Diese Art der Korrosion ist kristallographischer Natur und wurde hauptsächlich für die Metallografie entwickelt. Sie kommt in natürlichen Medien nicht vor (Cottis, 2010).

Soweit nicht anders beschrieben, befasst sich dieses Kapitel mit der elektrochemischen Depassivierung. Da es sich im vorliegenden Fall um Pflanzgefäße aus Edelstahl und Aluminium handelt, werden im Speziellen Lochkorrosionserscheinungen von diesen Metallen behandelt.

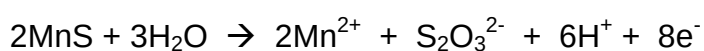
Normalerweise kann beobachtet werden, dass, sobald sich eine Lochkorrosionsstelle gebildet hat, keine weiteren Lochfraßstellen in der direkten Umgebung entstehen. Dies rührt daher, dass sich die anodische Reaktion auf das Loch beschränkt, während in den umgebenden Bereichen die kathodische Reaktion stattfindet und so die Entstehung von weiteren Lochfraßstellen verhindert wird. Wird die Lochkorrosion jedoch durch eine von außen eingebrachte Spannung hervorgerufen, können sich entstandene Löcher seitwärts, über den Großteil der Metalloberfläche, ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt dabei von der Löslichkeit des Passivfilmes in der sauren Lösung, die in der Lochkorrosionsstelle entsteht, ab. So breiten sich beispielsweise Löcher in Kadmium, Eisen und Zink sehr leicht seitwärts aus, wohingegen Löcher in Aluminium und Edelstahl örtlich begrenzt bleiben. Dies hängt mit den schlecht löslichen Passivfilmen der beiden Letztgenannten zusammen (Cottis, 2010).

Es hat sich gezeigt, dass Lochkorrosion nur dann entsteht, wenn ein bestimmtes Lochkorrosionspotenzial überschritten wird. Unter diesem Potenzial findet, unabhängig von der Versuchsdauer, keine Lochkorrosion statt. Sobald dieses Potenzial aber überschritten wird, kommt es zu Korrosion. Das Lochkorrosionspotenzial wird als das niedrigste Potenzial definiert, bei dem nach einer 10-stündigen Einwirkungsdauer keine Lochkorrosion beobachtet werden kann. Das Lochwachstum wird nur gestoppt, wenn das Repassivierungspotenzial erreicht wird. Das gleiche Metall zeigt dabei in verschiedenen Umgebungen unterschiedliche Lochkorrosionspotenziale. Je höher dabei die Konzentration von aggressiven Anionen ist, desto niedriger ist das Lochkorrosionspotenzial. Für Eisen-Chrom-Legierungen werden typischerweise Werte um 200mV angegeben. Sind sowohl aggressive Anionen als auch korrosionstechnisch inaktive Anionen vorhanden, ändert sich das kritische Lochkorrosionspotenzial so, als ob nur die aggressiven Anionen anwesend wären. Wird der Anteil der aggressiven Anionen verringert, geht dies mit einer Reduzierung des Lochkorrosionspotenzials einher (Cottis, 2010).

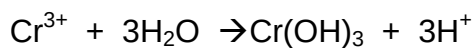
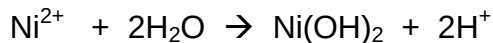
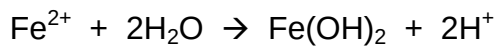
Es ist allseits bekannt, dass Cl^- -Ionen aggressiv genug sind, um Edelstahl anzugreifen und Lochkorrosion einzuleiten. Sie gelten als die Hauptverursacher von Lochkorrosion. Dies liegt an der geringen Größe, der hohen Diffusität und den stark sauren anionischen Eigenschaften. Die geringe Größe der Cl^- -Ionen ermöglicht es, den Passivfilm unter dem Effekt eines elektrischen Feldes zu durchstoßen. Das Erhöhen der Anteile von Mo oder auch Cr in der Legierung erhöht die Korrosionsbeständigkeit von Edelstählen (Ibrahim et al., 2009).

Lochkorrosion ist die am häufigsten auftretende Art der Korrosion bei Edelstahl. Durch Oxideinschlüsse im Passivfilm entstehen inhomogene Stellen, die den Ausgangspunkt für den Korrosionsangriff darstellen. Der Vorgang läuft in drei Schritten ab. Beim ersten Schritt wird die Passivschicht an einer Fehlstelle lokal aufgelöst. Durch das plötzliche Versagen der Oxidschicht kann es zu einem Austausch zwischen dem verdünnten Elektrolyt außerhalb des Loches und dem sauren Elektrolyt im gebildeten Loch kommen, wodurch der pH-Wert wieder seinen ursprünglichen Wert erreicht. In dieser Phase ist es möglich, dass es bei Edelstahl zu einer spontanen Repassivierung der Oberfläche kommt. Zu diesem Zeitpunkt spricht man von einem metastabilen Lochwachstum. Wenn es nicht mehr zu einer spontanen Repassivierung kommt, spricht man von stabilem Lochwachstum. Die inhomogenen Stellen in der aus Oxiden und Hydroxiden von Chrom und Eisen gebildeten Passivschicht weisen einen niedrigen Cr- und Mo-Gehalt auf, was darauf hindeutet, dass sich hier der Passivfilm nur unzureichend ausgebildet hat. Neben dem Hauptfaktor Chlorid konnte von Zheng et al. (2012) nachgewiesen werden, dass auch Schwefel alleine dazu in der Lage ist, Lochkorrosion an inhomogenen Stellen auszulösen.

Die Fehlstellen im Passivfilm von Edelstahl, die den Ausgangspunkt für Lochkorrosion bilden, sind oft auf Mangansulfid (MnS)-Einschlüsse zurückzuführen. Diese Einschlüsse werden durch die folgende Reaktion gelöst.



Diese Reaktion vermindert den pH-Wert in der Nähe des Einschlusses, wodurch es schlussendlich zur Auflösung von Metallen wie Fe, Ni und Cr kommt. Ein Teil der gelösten Metallionen setzt den pH-Wert aufgrund einer Hydrolysereaktion noch weiter herab. Diese Reaktion läuft folgendermaßen ab:



Die verbleibenden Metallionen diffundieren durch den dünnen Feuchtfilm und senken somit den pH-Wert der Umgebung, was zu einem weiteren Wachstum der korrodierten Stellen führt (Tsutsumi et al., 2007).

Im Fall von Aluminium in einer wässrigen NaCl-Lösung wirkt sich der pH-Wert der Lösung zwischen pH 2 und pH 11 nicht auf das Lochkorrosionspotenzial aus, das Lochkorrosionspotenzial von Edelstahl hingegen ist nur von pH-Werten bis pH 8 unabhängig und steigt bei höheren pH-Werten stark an. Die Bedingungen, die innerhalb und außerhalb der Lochkorrosionsstelle vorherrschen, unterscheiden sich stark voneinander. Nach Untersuchungen an Aluminium von Hagyard und Santhiapillai (1959) lassen sich in Lochfraßstellen, die in einer NaCl-Lösung mit einem pH-Wert von 6,2 entstanden sind, pH-Werte von etwa 3,5 nachweisen, gleichzeitig kann sich dort eine zehnmal höhere Chloridkonzentration einstellen. Weiters fanden sie heraus, dass die gebildete konzentrierte Aluminiumchloridlösung durch die Schwerkraft aus der Lochfraßstelle fließen und so weitere Stellen der Metalloberfläche aktivieren kann.

Die Konzentrationsunterschiede, die zwischen den Verhältnissen in den Lochfraßstellen von Edelstahl und der Ausgangslösung entstehen, sind noch gravierender als jene bei Aluminium. Nachdem Edelstahl einer neutralen 0,5-M-NaCl-Lösung ausgesetzt wurde, konnte innerhalb der Lochfraßstelle ein pH-Wert von 1,0 und eine Chloridkonzentration von 6,2M nachgewiesen werden (Cottis, 2010).

Nicht alle Anionen wirken sich negativ auf die Lochkorrosionswahrscheinlichkeit von Edelstahl aus. Sie steigt mit steigender Chloridkonzentration und sinkt, wenn das Verhältnis von Sulfat zu Chlorid steigt. Bei einer mäßig hohen Chloridkonzentration ist Sulfat in der Lage, Lochkorrosion zu verhindern, wenn es in etwa im gleichen oder einem höheren Ausmaß als Chlorid vorhanden ist. Wenn hohe Chloridkonzentrationen vorliegen, muss der Sulfatgehalt erheblich höher sein, damit er sich positiv auf das Korrosionsverhalten auswirkt. Da sich Natriumchlorid (NaCl) deutlich besser in Wasser löst als Natriumsulfat (Na_2SO_4), können bei einer hohen Chloridkonzentration von mehr als 2 mol/l bzw. 70 g/l nicht genug Sulfationen gelöst werden, um Korrosion zu vermeiden (Pohjanne et al., 2008).

Die Lochkorrosion von Aluminium in einer chloridhaltigen Umgebung kann, wie die von Edelstahl, durch die Chloridkonzentration, den pH-Wert der Lösung und die Temperatur beschrieben werden. Gleichzeitig können sich andere Ionen wie Sulfationen $[\text{SO}_4]^{2-}$ oder Molybdatationen $[\text{MoO}_4]^{2-}$ positiv auf das Korrosionsverhalten auswirken. Untersuchungen haben gezeigt, dass $[\text{SO}_4]^{2-}$ in der Lage sind, Chloridionen Cl^- aufzunehmen und so die Lochkorrosion zu verzögern, gleichzeitig beschleunigen sie aber das Wachstum von schon vorhandenen Lochkorrosionsstellen (Na et al., 2006).

Auch bei Aluminium besteht die Möglichkeit, dass Einschlüsse oder Anlagerungen von Schwermetallen auf der Oxidschicht den Ausgangspunkt für Lochkorrosion darstellen. Typischerweise sind die gebildeten Löcher mit dem Korrosionsprodukt gefüllt, im Fall von Aluminium mit dem sehr voluminösen, wasserunlöslichen $\text{Al}(\text{OH})_3$. Dieses haftet am anodischen Lochboden, was zu einer Verlangsamung des Lochwachstums führt. Außerdem nimmt der kathodische Oberflächenbereich bei einer hohen Lochzahl ab, was ebenfalls das Lochwachstum bremst. Der Korrosionsangriff wirkt durch die Ausblühungen deutlich stärker, als es die Lochtiefe vermuten lässt. Je höher die Lochzahl ist, desto geringer ist die Tiefe der gebildeten Löcher. Ein geringer Cu-Gehalt von etwa 0,3 Prozent kann sich positiv auf das Lochkorrosionsverhalten von Aluminium auswirken, da sich dadurch die Lochzahl steigert. Es besteht die Möglichkeit, Aluminium vor dem negativen Einfluss durch den Kontakt mit Edelstahl kathodisch zu schützen. Zu diesem Zweck werden galvanische Anoden z.B. in Form von Zinkunterlegscheiben angebracht. Diese Opferanoden

werden als erstes vom Korrosionsprozess angegriffen, erst wenn diese aufgebraucht sind, kommt es zu Korrosionserscheinungen am Aluminium (Ostermann, 2007).

Die mikroklimatischen Bedingungen spielen eine wesentliche Rolle bei der Entstehung von Lochkorrosion. Die Feuchtigkeit in der Atmosphäre kann bei entsprechendem Temperaturunterschied kondensieren und so Tröpfchen bzw. dünne Elektrolytfilme bilden. Durch das Abtrocknen steigt die Chloridkonzentration im Elektrolyt stark an. Sobald diese einen kritischen Wert $[Cl^-]_{pit}$ erreicht, setzt der Korrosionsvorgang ein. Dieser Wert liegt für Edelstahl mit der Werkstoffnummer 304 bei etwa 6M und 25°C. Die Lochkorrosionswahrscheinlichkeit wird außerdem von der relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Die kritische relative Luftfeuchtigkeit bei einem pH-Wert zwischen 4 und 7 liegt dabei zwischen 55 und 75 Prozent, was soviel wie 8,5M bzw. 4,9M an Chloridkonzentration entspricht (Tsutsumi et al., 2007).

Für Edelstahl mit der Werkstoffnummer 430 liegt die kritische Chloridkonzentration bei 4 M bei einer Luftfeuchtigkeit von etwa 80 Prozent. Edelstahl 304 ist durch seinen höheren Chromgehalt im Vergleich in einem viel größeren pH-Bereich korrosionsresistent (Hastutyet al., 2010).

Neben der Chloridkonzentration der Luftfeuchtigkeit und dem pH-Wert spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Lochkorrosion. Vor allem Stahl und Nickel-Basis-Legierungen zeichnen sich durch eine definierte kritische Lochkorrosionstemperatur aus. Sie beschreibt die niedrigste Temperatur, bei der es zu stabilem Lochwachstum kommt. Bei niedrigeren Temperaturen kann es höchstens zu metastabilem Lochwachstum kommen. Die kritische Lochkorrosionstemperatur der meisten Edelstähle liegt zwischen 10° bis 90°C (Cottis, 2010).

Bei zyklischen Korrosionstests von Edelstahl, im Speziellen bei Salzsprühtests, wird laut Japanischer Norm mit einer 5-Prozent-Natriumchloridlösung gearbeitet. Diese Konzentration kann als leicht kritisch betrachtet werden, da sie den Ausgangswert bildet, der im Verlauf des Versuches durch Trocknung der Proben noch weiter nach oben verschoben wird (JIS; 1994).

Beom et al. (2010) haben dabei die Versuche mit 5 Prozent NaCl- und mit 5 Prozent CaCl₂-Lösung durchgeführt, um die unterschiedlichen Auswirkungen dieser beiden Salze auf die Korrosion der Edelstahlprobe zu ermitteln. Sie kamen zu dem Schluss, dass sich das kritische Lochkorrosionspotenzial sowohl nach der Zugabe von NaCl als auch durch die Zugabe von CaCl₂ verringert.

Es gibt verschiedene Ansätze, um gegen die Lochkorrosion vorzugehen, wobei das Zulegieren von korrosionshemmenden Elementen am zuverlässigsten ist. Es gibt noch eine Reihe weiterer Maßnahmen, die die Lochkorrosionsbeständigkeit von Metallen erhöhen können.

Lochkorrosionshemmend wirken Alkalien, Reinigen der Oberfläche, Beizen und Polieren sowie allgemein die Legierungsbestandteile Cr, Ni, Si, Ti und Mo, da diese das Lochkorrosionspotenzial erhöhen. Nitrat und Nitrit können als Inhibitoren wirken, wenn sie in ausreichendem Maß zugesetzt werden, ansonsten blockieren diese Ionen nur einen Teil der Löcher und erhöhen gleichzeitig die Stromdichte an den übrigen Löchern (Lohmeyer, 1981).

Als besonders wirksames Mittel gegen Lochkorrosion hat sich das Zulegieren von Molybdän erwiesen, da sich dadurch die kritische Passivierungsstromdichte nur wenig erhöht und somit eine Repassivierung begünstigt wird. Bei Aluminiumlegierungen und Edelstählen beginnt die Lochkorrosion im Allgemeinen als interkristalline Korrosion. Inhomogenität im Werkstoff ist ein Mitgrund für beginnende Lochkorrosion. Tostmann (2001) hält deswegen fest, dass Maßnahmen, die zu einem homogenen Werkstoffgefüge führen, das Durchbruchpotenzial für interkristalline Korrosion erhöhen und somit einer vorzeitigen Lochkorrosion entgegenwirken.

3.3 Interkristalline Korrosion

Diese Art der Korrosion hat Übergänge zur Lochkorrosion und zur Spannungsrisskorrosion. Voraussetzungen für interkristalline Korrosion sind metallurgische oder mechanische Einflüsse, die die Korngrenzen in deren Zusammensetzung oder Ausdehnung verbreitern. Dadurch wird das Metall im Gefüge beschädigt und es kann zu Kornzerfall kommen (Tostmann, 2001).

Interkristalline Korrosion tritt häufig an austenitischen Chrom-Nickel-Stählen auf, deren Kohlenstoffgehalt etwa 0,08 bis 0,10 Prozent beträgt. Der Angriff erfolgt bevorzugt, wenn der Edelstahl vorher, etwa durch Schweißen, auf eine Temperatur von 400° bis 800°C erwärmt oder durch diesen Temperaturbereich abgekühlt wurde. Bei diesen Temperaturen läuft die Diffusion von Chrom bzw. Molybdän langsamer ab als die Bildung von Carbiden. Dadurch entstehen um die ausgeschiedenen Carbide an Chrom verarmte Regionen, die im Laufe des Vorgangs zusehends zu chromverarmten Bereichen zusammenwachsen. Wenn der Chromgehalt dabei unter 12,5 Prozent sinkt, kann in der Nähe der Korngrenzen die Passivität nicht mehr aufrechterhalten werden. Ob ein Werkstoff gegen einen interkristallinen Korrosionsangriff sensibilisiert ist, lässt sich durch eine Mischung aus Schwefelsäure, Kupfersulfat und Kupferpulver oder noch rascher durch potentiostatisches Ätzen nachweisen (Wranglén, 1985).

Die Ausscheidung von Chromcarbiden und Molybdäncarbiden in den Korngrenzen kann durch das Zulegieren von Titan, Niob oder Tantal verhindert werden. Diese Elemente bilden Carbide und Nitride, die thermodynamisch viel stabiler sind als Chromcarbid. Auch in chloridreichen Umgebungen, die keine interkristalline Korrosion auslösen, wirken sich diese Legierungsbestandteile positiv aus. Ohne sie würde sich bei der Chromverarmung das Lochkorrosionspotenzial im Korngrenzbereich soweit verringern, dass Lochkorrosion zu erwarten wäre. Es besteht die Möglichkeit, eine Sensibilisierung des Werkstoffes zu verhindern, indem man ihn rasch genug abkühlt und so das Kornzerfallsfeld nicht durchlaufen werden kann (Tostmann, 2001).

3.4 Passivität

Die Passivität von Metallen wird von Wranglén (1985) als Zustand beschrieben, bei dem die Korrosionsgeschwindigkeit durch eine schützende Schicht aus Korrosionsprodukten stark reduziert ist. Diese Oxidschichten sind normalerweise zwischen 1 und 10 nm stark. Die Passivität kann in chemische und mechanische Passivität unterteilt werden.

Die Ursache für Passivität an Edelstählen und Aluminium liegt darin, dass die in Lösung gehenden Metallionen mit den im wässrigen Elektrolyt enthaltenen Anionen eine dünne, porenfreie Deckschicht ausbilden. Durch diese kompakte und nicht sichtbare Schicht wird das Metall von der Elektrolytlösung getrennt (Tostmann, 2001).

Der Grund für das Auftreten lokaler Korrosionsprozesse liegt häufig an Unregelmäßigkeiten des passivierenden Oxidfilms. Diese Fehlstellen entstehen oft durch Inhomogenität in der Metallzusammensetzung. Bei Aluminium ist dies meist eine zweite Phase, während sich bei Edelstählen Sulfideinschlüsse dafür verantwortlich zeigen (Wranglén; 1985).

3.5 Edelstahl

Im Gegensatz zu früheren Versuchen, einen einzigen Edelstahl mit hoher Korrosionsbeständigkeit für möglichst viele verschiedene Anwendungsgebiete zu entwickeln, werden heutzutage spezielle Stähle für spezifische Anwendungen gefertigt. Dies hat zu einer Vielfalt an Stahlqualitäten geführt, die gemäß ihrer Eignung und Anwendung sehr gut korrosionsbeständig gegenüber den angrenzenden Medien sind (Tostmann, 2001).

Grundsätzlich lassen sich Edelstähle aufgrund ihrer Gefügeform in drei Gruppen einteilen. Das sind die martensitischen, die ferritischen und die austenitischen Stähle.

- Martensitische Stähle sind vorwiegend reine Chromstähle mit einem Cr-Gehalt zwischen 12 und 18 Prozent. Sie sind magnetisch und können durch Wärmebehandlung gehärtet, jedoch nicht geschweißt werden. Sie werden hauptsächlich für die Herstellung mechanisch hochbeanspruchter Konstruktionsteile und gehärteter Werkzeuge, die eine erhöhte Beständigkeit gegenüber oxidierenden Säuren erfordern, verwendet.
- Ferritische Stähle sind ebenfalls vorwiegend reine Chromstähle mit einem Cr-Gehalt zwischen 10,5 und 18 Prozent. Sie sind magnetisch, nicht härtbar und können geschweißt werden. Ihre Hauptverwendung finden sie in der Salpetersäureindustrie, bei Haushaltswaren und in der Automobilindustrie.
- Austenitische Stähle sind heutzutage die am meisten verwendeten Stahltypen. Sie enthalten neben 17 bis 27 Prozent Chrom noch zwischen 8 und 25 Prozent Nickel und teilweise noch weitere Legierungsbestandteile wie Molybdän, Kupfer, Titan, Tantal und Niob. Sie sind nicht magnetisch, nicht härtbar, aber sehr gut schweißbar (Wranglén, 1985).

Eine wichtige Aufgabe hinsichtlich der Korrosionsresistenz übernimmt dabei die Passivität des Chroms, da es unter normalen Bedingungen sogar im leicht sauren Bereich passiv ist. Es lässt sich gut als Legierungszusatz verwenden, da sich seine Passivierungseigenschaften sehr gut auf Eisen-Chrom-Legierungen übertragen. Ein Chromanteil von 16 Prozent genügt, um annähernd ein Passivierungsverhalten von reinem Chrom zu erhalten (Hömig, 1991).

Der am meisten Verwendung findende Stahl hat die Werkstoffnummer 1.4301. Wird dieses Material in mehreren Schritten auf Stufenpressen tiefgezogen oder zu komplizierten Teilen umgeformt, ist es notwendig, dass innerhalb der Analysegrenzen der DIN-Norm die gefügestabilisierenden Elemente Mangan, Chrom und Nickel im oberen Bereich liegen. Die höchste chemische Beständigkeit weisen sie dann auf, wenn die Oberflächen in metallisch blanker Form vorliegen, es dürfen also keine Verunreinigungen, Ankrustungen, Fremdmetalle, Anlauffarben oder Zunderreste an der Oberfläche haften. Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind,

kann sich der schützende Chromoxidfilm ausbilden und gleichmäßig erhalten bleiben. Meistens ist hierfür eine Nachbehandlung des Werkstückes notwendig, um Beeinträchtigungen der Oberflächengüte durch die Verarbeitung und Formgebung zu beseitigen. Somit ist in vielen Fällen nicht die Formgebung an sich, sondern die Nachbehandlung der Oberfläche besonders aufwendig. Eine möglichst schonende Formgebung wird durch eine vollständige Trennung von Werkzeug und Werkstück erreicht. Hierfür reichen konventionelle Schmiermittel nicht aus, sondern es wird mit flüssig aufzutragenden Kunststoffbeschichtungen, aufgeklebten Schutzfilmen auf Kunststoff- oder Papierbasis oder mit abwaschbaren Kunststoffüberzügen gearbeitet (Lohmeyer, 1981).

3.6 Aluminium

Reines Aluminium ist ein sehr reaktionsfreudiges Metall mit einer hohen Affinität für Sauerstoff. Trotzdem ist es unter normalen Bedingungen an der Atmosphäre sehr gut beständig. Latscha und Klein (2002) erklären dies durch die Bildung einer dünnen, geschlossenen Oxidschicht, die das darunterliegende Metall vor Korrosion schützt und sich nach einer Beschädigung rasch wieder ausbildet. Die gleiche Wirkung zeigt sich bei Kontakt mit oxidierenden Säuren. Der Passivfilm erreicht nach einer Beschädigung innerhalb von Sekunden eine Dicke von 1 nm. Es besteht die Möglichkeit, die Oxidschicht durch anodische Oxidation weiter zu verstärken. Dieser Prozess wird Eloxal-Verfahren genannt.

Lorking und Mayne (1961) haben in ihren Untersuchungen an Aluminium festgestellt, dass es möglich ist, aus korrosionstechnischer Sicht bedeutsame Anionen in drei Gruppen einzuteilen.

- Anionen, die keine komplexen Ionen mit Aluminium bilden
Diese Gruppe lässt sich noch in nichtoxidierende Anionen (z.B. Benzoate, Phosphate, Sulfate) und oxidierende Anionen (z.B. Chromat) einteilen. Ist der pH-Wert neutral, stellt sich bei diesen Anionen keine Korrosion ein. Bei den

oxidierenden Anionen ist der pH-Wert-Bereich, in dem Aluminium nicht angegriffen wird, größer.

- Anionen, die lösliche komplexe Ionen mit Aluminium bilden
Dazu zählen nicht oxidierende Anionen (z.B. Zitate, Tartrate, Borate), bei denen im neutralen pH-Wert-Bereich mit mehr Korrosion zu rechnen ist, als bei Anionen der ersten Gruppe.
- Anionen, die ebenfalls keine komplexen Ionen mit Aluminium bilden, nicht oxidierend sind und Korrosion in neutralen Lösungen auslösen (z.B. Chlorid).

Die Abtragungsrate von Aluminium im Industrieklima beträgt zwischen 2 µm und 5 µm pro Jahr. Die Abtragungsgeschwindigkeit nimmt dabei im Laufe der Zeit ab. Der Passivfilm auf der Oberfläche des Aluminiums ist dafür verantwortlich, dass es nicht zu einem gleichförmigen Metallabtrag, sondern zu überwiegend narbiger bzw. feinklöchriger Korrosion kommt. Die entstehenden Löcher erreichen im Industrieklima nach sechs Jahren eine Tiefe von 0,2 bis 0,5 mm. Durch das Zulegieren von Magnesium und Mangan werden höhere Festigkeitswerte erreicht, ohne das Korrosionsverhalten negativ zu beeinflussen. Die an Aluminium auftretende Lochkorrosion wird in wässrigen Medien von Chloridionen ausgelöst. Dabei wird der Passivfilm unter der Bildung von $AlCl_3$, welches sich auch in der Lösung in den gebildeten Löchern befindet, aufgelöst. Die Lochkorrosionsstellen repassivieren allerdings leichter als bei Edelstahl, somit entstehen in der Regel keine tiefen Löcher. Wie Tostmann (2001) ebenfalls feststellt, wirkt sich das Redoxpotenzial des umgebenden Mediums auch auf das Korrosionsverhalten von Aluminium aus. Liegt es höher als das Potenzial für interkristalline Korrosion, besteht die Möglichkeit, dass bei sensibilisierten AlMg- und AlMgMn-Legierungen neben interkristalliner auch Lochkorrosion auftritt.

In einer 20 Jahre andauernden Langzeitstudie aus den USA wurde Aluminium an ausgesuchten Stellen in Meeresnähe, in direkter Umgebung von Industrieanlagen und in ländlichen Bereichen auf seine Korrosionsresistenz getestet. Auch diese Untersuchung hat gezeigt, dass der größte Metallabtrag in den ersten beiden Jahren

erfolgt und danach nur noch geringe Abtragungsraten gemessen werden. Nach Ablauf der 20 Jahre betrug die durchschnittliche Tiefe der gebildeten Löcher in Meeresnähe weniger als 0,15 mm und somit noch weniger als die Untersuchungen von Tostmann ergaben. Auslöser für die Lochkorrosion an Aluminium können neben Verbrennungsrückständen aus Industrie und Verkehr auch Karbonate, Chloride und Kupfer, vor allem wenn diese in Kombination auftreten, sein. Insbesondere Kupfer spielt eine bedeutende Rolle, da in harten Wässern schon eine Menge von 0,02 ppm ausreichen kann, um Lochkorrosion auszulösen (Cottis, 2010).

Durch den Korrosionsprozess entsteht das wasserunlösliche $\text{Al}(\text{OH})_3$, welches sehr voluminös ist. Der Korrosionsangriff wirkt durch die gebildeten Ausblühungen deutlich intensiver, als er tatsächlich ist. Durch das am Boden der Lochkorrosionsstelle haftende $\text{Al}(\text{OH})_3$ nimmt das Lochwachstum einem parabolischen Zeitgesetz folgend ab. $I = K \times t^{1/3}$, wobei I die Lochtiefe angibt, K die Korrosionskonstante und t die Zeit. Da der Lochboden anodisch ist, nimmt der kathodische Bereich der Oberfläche mit vermehrter Lochzahl ab. Dadurch kann das Lochwachstum gebremst werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass, je mehr Löcher gebildet werden, desto weniger tief sind diese gebildeten Löcher. Es ist möglich, sich diesen Effekt zunutze zu machen, indem man etwa 0,3 Prozent Kupfer zulegiert, wodurch sich die Lochzahl wesentlich erhöht (Ostermann, 2007).

Um die mechanischen Eigenschaften von Aluminium zu verbessern, wird häufig Magnesium als Legierungsbestandteil verwendet, wodurch die schweißbare Legierung stabiler wird und die Kaltverfestigungseigenschaften merklich verbessert werden. Die hohe Korrosionsresistenz und die mechanischen Eigenschaften stellen eine gute Voraussetzung für die konstruktive Verwendung unter aggressiven Bedingungen dar. Weitere Legierungsbestandteile, die die Korrosionsbeständigkeit erhöhen, sind Zinn, Zink, Indium und Quecksilber (Cottis, 2010).

4. Material und Methoden

Dieses Kapitel soll einen Überblick über den Standort des untersuchten Objekts, den Arbeitsvorgang, die untersuchten Proben und deren Gewinnung sowie über die angewandten Analyse- und Auswertungsmethoden geben.

Die betroffenen Fassadenbegrünungselemente befinden sich an einer Fassade direkt am Wiener Margaretengürtel, welche Richtung Süden, Südwesten und Westen orientiert ist. Der begrünte Bereich erstreckt sich über sechs Geschosse. Aus Brandschutzgründen kam neben den Aluminiumelementen pro Geschos eine Reihe von Edelstahlelementen zum Einsatz. Diese sollen im Brandfall abtropfendes Aluminium auffangen und somit eine Ausbreitung des Brandes verhindern. Das Fassadenbegrünungssystem ist mit einer künstlichen Bewässerung ausgestattet, die aber nur in Ausnahmefällen wie bei lang anhaltender Trockenheit Verwendung findet. Die Düngung erfolgt dementsprechend nicht über das Gießwasser, sondern wird beim jährlichen Pflegeschnitt händisch eingebracht.

Im Zuge dieser Arbeit wurden verschiedene Proben gewonnen und anschließend im Labor analysiert. Die Auswahl der zu beprobenden Materialien fand in Absprache mit meiner Diplomarbeitbetreuerin Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Maria Fürhacker statt. Um das Korrosionssystem einschätzen zu können, wurden neben dem Pflanzsubstrat auch das Wasserspeichervlies und das verwendete Metall sowie Wasserrückstände in den Fassadenbegrünungselementen analysiert.

Als Vorarbeit wurde von mir eine Ansicht der begrünten Fassaden mittels Auto-CAD erstellt, mit deren Hilfe die gewonnenen Proben verortet werden konnten. Der Verortungsplan ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 zu sehen. Da der Zugang zu den Pflanztrögen nur mittels Steiger möglich ist, wurde die Probenentnahme im Zuge der jährlich durchgeführten Pflegearbeiten abgewickelt. Der erste Termin fand am 20.3.2013 statt. Dabei wurden an der südwestseitigen Fassade zwei Substratproben, vier Vliesproben, zwei Metallproben sowie vier Proben einer weißen Ablagerung gewonnen. Mittels Kreisbohrer wurden zwei Metallproben an Stellen entnommen, die bereits Spuren von Korrosion aufwiesen. An den darauffolgenden Terminen am 21. und 22.3.2013 wurden an der südseitigen Fassade jeweils sechs Substrat- und

4. Material und Methoden

Vliesproben entnommen. Am 27.3.2013 erfolgte die Beprobung der fensterlosen westseitigen Fassade, bei der je vier Substrat- bzw. Vliesproben gewonnen wurden. Die letzte Probenentnahme von Substrat fand am 28.3.2013 statt, hierbei wurden drei zusätzliche Proben an der südwestseitigen Fassade entnommen.



Abbildung 3: Verortungsplan Westseite und Südseite (selbsterstellt)

4. Material und Methoden

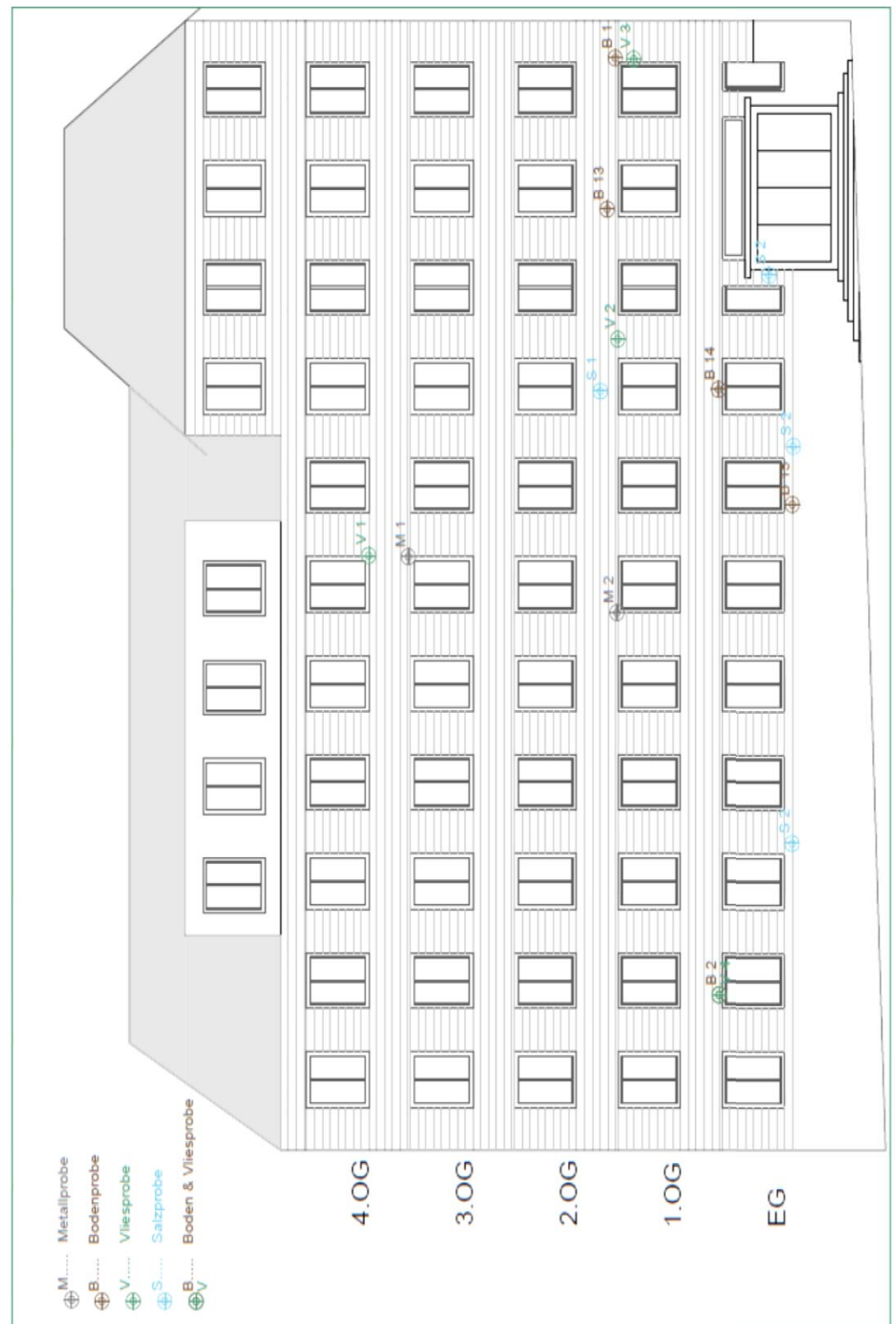


Abbildung 4: Verortungsplan Südwestseite (selbsterstellt)

4. Material und Methoden

Nach einer Periode mit starkem Niederschlag konnten am 5.6.2013 zwei Proben der Wasserrückstände in den Pflanzgefäßen gewonnen werden. Da zu diesem Zeitpunkt die Pflegearbeiten abgeschlossen waren und somit kein Steiger mehr zur Verfügung stand, konnten diese Proben nur über dem Vordach des Eingangsbereiches, welches mittels Leiter zu erreichen ist, entnommen werden. Eine der beiden Proben stammt aus einer zu diesem Zeitpunkt schon entleerten Edelstahllade und ist somit wenig repräsentativ. Zusätzlich zu der Verortung der Proben in der Auto-CAD-Vorlage wurde die gesamte Probenentnahme mittels Fotos dokumentiert. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen Edelstahlelemente, an denen es zu Korrosionserscheinungen gekommen ist.



Abbildung 5: Fortgeschrittene Lochkorrosion (selbsterstellt)



Abbildung 6: Beginnende Korrosion (selbsterstellt)

4.1 Pflanzsubstrat

Insgesamt handelt es sich um 15 Proben des Pflanzsubstrats, die fortlaufend von B1 bis B15 nummeriert sind. In Abbildung 8 ist eine der Substratproben zu sehen. Um diese Proben analysieren zu können, war es notwendig, daraus zunächst ein Eluat und anschließend ein Filtrat herzustellen. Hierfür wurden zunächst je 5g der Substratprobe in feuchtem Zustand in eine 500-ml-Schottflasche eingefüllt und anschließend mit 100ml Reinstwasser angesetzt. Daraufhin wurden die Proben 24 Stunden lang mit 150 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. Nach dem Schütteln wurde das Eluat etwa eine halbe Stunde in Ruhe stehen gelassen, damit sich feste Bestandteile und Schwebstoffe am Boden absetzen konnten. Abbildung 7 zeigt das erstellte Eluat vor der Filtration. Als nächster Schritt wurden aus den Testgefäßen mithilfe einer Kolbenhubpipette jeweils 20 ml entnommen und filtriert. Zu diesem Zweck wurde ein Metallfilterkolben mit einem 45-µm-Filter ausgestattet und mit Druckluft beaufschlagt. Die so gewonnenen Filtrate wurden in 100-ml-Glasschliffflaschen gefüllt und abschließend im Chemie-Labor des SIG BOKU mithilfe eines Ionen-Chromatographen auf Chlorid-, Fluorid-, Nitrat-, Nitrit- und Sulfatkonzentrationen untersucht. Am 3.7.2013 erfolgte zusätzlich zu der Untersuchung der Ionen eine Messung des pH-Wertes, des Redoxpotenzials und der Leitfähigkeit.

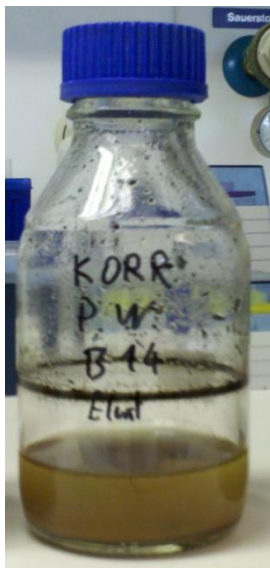


Abbildung 7: Eluat aus Substratprobe (selbsterstellt)
(selbsterstellt)



Abbildung 8: Beutel mit Substratprobe

4.2 Wasserspeichervlies

Bei den Probeentnahmen wurden insgesamt 14 Vliesproben gewonnen. Diese sind fortlaufend von V1 bis V14 nummeriert. Auch aus diesen Proben musste zunächst ein Eluat hergestellt werden. Hierfür wurden die Vliesstücke gewogen und anschließend in einer 250-ml-Schottflasche mit 50 ml Reinstwasser angesetzt und ebenfalls 24 Stunden mit 150 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. In Abbildung 9 sieht man auf der linken Seite die erstellten Eluate und auf der rechten Seite die daraus gewonnenen Filtrate. Die weitere Vorgehensweise war die Gleiche wie bei den Substratproben, die Analyse erfolgte also abschließend mittels Ionen-Chromatographen und es wurden ebenfalls die Chlorid-, Fluorid-, Nitrat-, Nitrit- und Sulfatkonzentrationen untersucht. Am 3.7.2013 erfolgte zusätzlich zu der Untersuchung der Ionen eine Messung des pH-Wertes, des Redoxpotenzials und der Leitfähigkeit, außerdem wurde die Wasserhaltefähigkeit des Vlieses gemessen. Hierfür wurde ein Stück Vlies getrocknet und danach gewogen, anschließend wurde es mit Wasser getränkt und neuerlich gewogen, durch Schütteln und Ausdrücken wurde ein halbgesättigter Zustand simuliert, dessen Gewicht ebenfalls mittels Feinwaage bestimmt wurde. Aufgrund dieser Messungen wurde außerdem die Chloridkonzentration in verschiedenen Trocknungsstadien berechnet. Da die Vliesproben unterschiedlich schwer waren, wurden alle Werte abschließend auf 1 Gramm Vlieseinwaage umgerechnet bzw. standardisiert.



Abbildung 9: Eluat und Filtrat der Vliesproben (selbsterstellt)

4.3 Wässrige Proben

Da für die Analyse der beiden wässrigen Proben das Probenvolumen zu gering war, wurden diese noch im Verhältnis 1:10 mit Reinstwasser verdünnt. Die Abbildung 10 zeigt die noch unverdünnten Proben. Die linke Probe mit großem Schwebstoffanteil stammt aus einem befüllten Aluminiumelement, während die rechte klare Probe aus einem bereits entleerten Edelstahlelement stammt. Anschließend wurden sie im Ionen-Chromatographen auf Chlorid-, Fluorid-, Nitrat-, Nitrit- und Sulfat-Ionen untersucht.



Abbildung 10: Wässrige Proben(selbsterstellt)

4.4 Weiße Ablagerung / Salze

Die auf den Aluminiumladen sichtbaren weißen Ablagerungen wurden, um Verunreinigungen zu vermeiden, mit einem Keramikmesser abgekratzt. Die Abbildung 11 zeigt exemplarisch eine Stelle, von der die Ablagerungen abgekratzt wurden. Die so gewonnenen Proben wurden mit S1 bis S4 benannt und ohne weitere Bearbeitung dem Chemielabor an der Universität für Bodenkultur zur Untersuchung auf Schwermetalle übergeben.



Abbildung 11: Ablagerung an Aluminiumlade (selbsterstellt)

4.5 Metallproben

Die beim ersten Probenentnahmetermin mittels Kreisbohrer gewonnenen Metallstücke (M1,M2) wurden ohne weitere Bearbeitung von Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Franz Ottner vom Institut für Angewandte Geologie an der BOKU mikroskopisch untersucht. Es handelt sich dabei um zwei Proben aus Edelstahl, die fortgeschrittene Korrosionsspuren aufweisen. Zusätzlich wurden drei Proben (Aluminium, Edelstahl 1, Edelstahl 2) von dem unverarbeiteten Ausgangsmaterial untersucht, wobei das Material Edelstahl 2 höher legiert ist als das zum Einsatz gekommene Material Edelstahl 1. Hierfür wurden etwa 5 x 5 mm große Stücke der Metalle an Herrn Walter Klug vom Institut für Physik und Materialwissenschaft an der BOKU übergeben. Davon wurden mittels Rasterelektronenmikroskop REM-Bilder erstellt und mithilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie eine EDX-Auswertung vorgenommen.

4.6 Chemische Analyseverfahren

Die erfolgten Analysen für die Eluat und Feststoffproben wurden am Chemielabor des SIG BOKU nach folgenden DIN Normen durchgeführt:

- DIN EN ISO 10304-1: 2009

Wasserbeschaffenheitsbestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie – Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:2009;

- DIN EN ISO 17294-2: 2003

Wasserbeschaffenheitsanwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) – Teil 2: Bestimmung von 62 Elementen (ISO 17294-2:2003); Deutsche Fassung EN ISO 17294-2:2004;

- EN 13038: 2012

Bodenverbesserungsmittel- und Kultursubstratebestimmung der elektrischen Leitfähigkeit; Deutsche Fassung EN 13038:2011;

- EN ISO 15587-2: 2002

Wasserbeschaffenheitsaufschluss für die Bestimmung ausgewählter Elemente in Wasser – Teil 2: Salpetersäureaufschluss (ISO 15587-2:2002); Deutsche Fassung EN ISO 15587-2:2002;

- DIN 38404-5: 2009

Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) – Teil 5: Bestimmung des pH-Wertes (C 5);

- DIN 38404-6

Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C); Bestimmung der Redoxspannung (C 6); die gemessenen Werte beziehen sich auf das Bezugssystem Ag/AgCl.

Es wurde bezüglich der in Tabelle 2 aufgeführten Parameter analysiert, wobei nicht für jede Art von Probe nach allen Werten gesucht wurde.

Tabelle 2: Parameter der Analyseverfahren

Parameter	als	Einheit	Bestimmungs- grenze	Norm	Verfahren
Aluminium gesamt	Al	mg/kg	0,012	DIN EN ISO 17294-2: 2003	ICP-MS-Bestimmung nach Zentr./Aufschließen
Calzium gesamt	Ca	mg/kg	0,020	DIN EN ISO 17294-2	ICP-MS-Bestimmung nach Zentr./Aufschließen
Chlorid	Cl ⁻	mg/l	< 0,1	DIN EN ISO 10304-1: 2009	IC, Anionen, LF-Detektion; Supression
Chrom gesamt	Cr	mg/kg	0,003	DIN EN ISO 17294-2: 2003	ICP-MS-Bestimmung nach Zentr./Aufschließen
Eisen gesamt	Fe	mg/kg	0,010	DIN EN ISO 17294-2: 2003	ICP-MS-Bestimmung nach Zentr./Aufschließen
elektrische Leitfähigkeit	Lf	µS/cm	1 bis 20.000	EN 13038: 2012	Leitfähigkeitselektrode, Konduktometrie
Fluorid	Fl ⁻	mg/l	< 0,1	DIN EN ISO	IC, Anionen, LF-Detektion;

5. Ergebnisse

				10304-1: 2009	Supression
MW-Aufschluss	HNO ₃ /H ₂ O ₂ Aufschluss	keine	-	EN ISO 15587-2: 2002	geschlossener Aufschluss mit MW-Heizung
Nickel gesamt	Ni	mg/kg	0,002	DIN EN ISO 17294-2: 2003	ICP-MS-Bestimmung nach Zentr./Aufschließen
Nitrat	NO ₃ -N	mg/l	< 0,1	DIN EN ISO 10304-1: 2009	IC, Anionen, LF-Detektion; Supression
Nitrit	NO ₂ -N	mg/l	< 0,1	DIN EN ISO 10304-1: 2009	IC, Anionen, LF-Detektion; Supression
pH-Wert	pH	-	0 bis 14	DIN 38404-5: 2009	Potentiometrie; pH Glaselektrode geeicht mit käuflichen Standardpuffern 4 und 7
Redoxpotenzial	Redox	mV	-2.000 bis +2.000	DIN 38404 (C6): 1984	Potentiometrie
Sauerstoff gelöst	O ₂	mg/l	0 bis 20	DIN EN 25814 (G22): 1992	Potentiometrie
Sulfat	SO ₄ ⁻	mg/l	< 0,1	DIN EN ISO 10304-1: 2009	IC, Anionen, LF-Detektion; Supression

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werde die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Messungen, Analysen und Berechnungen dargelegt werden. Um eine gute Übersicht zu gewährleisten, geschieht dies in Form von Tabellen, die die jeweils aussagekräftigsten Werte beinhalten. Eine Gesamtübersicht aller erzielten Ergebnisse befindet sich im Anhang.

5.1 Pflanzsubstrat

Die mit der Ionenchromatographie erzielten Ergebnisse sind für die Chlorid-, Nitrat- und Sulfatkonzentrationen am aussagekräftigsten. Als Grundlage zur Untersuchung diente das Filtrat, welches aus dem Pflanzsubstrat hergestellt wurde. Die Tabelle 3 soll einen Überblick über die Verteilung geben, wobei die beiden Maximalwerte rot und die beiden Minimalwerte grün hervorgehoben sind. Ergänzt werden diese Werte durch die Leitfähigkeit, den pH-Wert und das Redoxpotenzial. Anschließend wird anhand der bei der Probenentnahme erstellten Fotos überprüft, ob sich die Maximalwerte in einem verstärkten Schadensbild widerspiegeln. In Tabelle 4 befinden sich die Ergebnisse der bereits im Frühjahr 2013, also im Vorfeld dieser Arbeit, durchgeführten Messungen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Ionenchromatographie für das Pflanzsubstrat; Minimalwerte grün, Maximalwerte rot

Probenbezeichnung	Chlorid ber_ als Cl (mg/l)	Sulfat ber_ als SO4 (mg/l)	Nitrat ber_ als N (mg/l)	pH-Wert ber_ als pH (-)	Redoxpotential ber_ als Redox (mV)	Leitfähigkeit ber_ als LF (µS/cm)
B1 Eluat	0,7	14	1	8,2	210	223
B2 Eluat	5,7	96	1,6	7,7	201	499
B3 Eluat	3,6	64	<0,1	7,9	208	476
B4 Eluat	1,7	50	0,8	7,8	194	371
B5 Eluat	1,4	14	0,5	8,1	196	297
B6 Eluat	0,2	2,7	0,6	7,8	215	220
B7 Eluat	7,9	300	0,8	7,8	205	834
B8 Eluat	4,8	110	0,5	8	216	486
B9 Eluat	2,8	86	<0,1	8	226	445
B10 Eluat	1,1	10	0,2	7,7	236	289
B11 Eluat	0,7	82	0,6	8	233	416
B12 Eluat	2,2	150	4,7	7,3	241	722
B13 Eluat	1,4	49	2,9	7,8	241	334
B14 Eluat	3,3	-	0,5	7,6	234	1780
B15 Eluat	10	110	7,4	7	238	639

Wie in der Tabelle 3 ersichtlich, bewegen sich die Werte für Chlorid zwischen 0,2 mg/l und 10 mg/l. Der Sulfatgehalt zeigt eine große Varianz, mit einem Minimalwert von 2,7 mg/l und einem Maximalwert von 300 mg/l. Die meisten Proben haben nur sehr geringe Nitratanteile von weniger als 1 mg/l, der gemessene Maximalwert

5. Ergebnisse

beträgt 7,4 mg/l. Der pH-Wert der Proben bewegt sich in einem relativ engen Bereich von mindestens 7 und maximal 8,2. Die Werte für das Redoxpotenzial liegen in einem Streubereich von 194 mV bis maximal 241 mV. Die Leitfähigkeit der Proben beträgt mindestens 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und maximal 1780 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Abbildung 12 zeigt die Entnahmestelle von Probe B7, welche einen hohen Chlorid- und Sulfatgehalt und eine hohe Leitfähigkeit aufweist. In Abbildung 13 ist die Entnahmestelle der Probe B 12 zu sehen, welche einen vergleichsweise hohen Gehalt an Sulfat und Nitrat aufweist. Die in Abbildung 14 zu sehende Stelle gehört zur Probe B 15, welche den höchsten Chlorid- und Nitratgehalt besitzt.



Abbildung 12: Entnahmestelle der Probe B 7 (selbsterstellt)

5. Ergebnisse



Abbildung 13: Entnahmestelle der Probe B 12 (selbsterstellt)



Abbildung 14: Entnahmestelle der Probe B 15 (selbsterstellt)

5. Ergebnisse

In Tabelle 4 befinden sich die Ergebnisse der bereits im Frühjahr 2013, also im Vorfeld dieser Arbeit, durchgeführten Messungen für das Ausgangsmaterial des Pflanzsubstrats.

Tabelle 4: Ergebnisse der Ionenchromatographie für das Eluat des Ausgangsmaterials (mg/l) des Pflanzsubstrats bzw. Al-, Ni- und Cr- Konzentration im Feststoff (mg/kg); Minimalwerte grün, Maximalwerte rot

Probenbezeichnung	Chlorid ber_ als Cl (mg/l)	Sulfat ber_ als SO4 (mg/l)	Nitrat ber_ als N (mg/l)	Aluminium gesamt ber_ als Al (mg/kg)	Chrom gesamt ber_ als Cr (mg/kg)	Nickel gesamt ber_ als Ni (mg/kg)
1a Eluat Ziegelbruch	5,7	49,4	1,9	69,5	0,105	0,223
1b Eluat Ziegelbruch	3,8	18	1,4	56,8	0,096	0,161
2a Eluat Ziegelbruch + Erde	15,8	110	1,4	186	0,248	0,431
2b Eluat Ziegelbruch + Erde	15,9	120	1,5	80,2	0,106	0,223
Ziegelbruch				24500	10,8	14,2
Ziegelbruch + Erde				209000	13,6	18

Die Chloridwerte der Proben 2a Eluat Ziegelbruch + Erde und 2b Eluat Ziegelbruch + Erde sind höher als die Werte die bei der Untersuchung des Pflanzsubstrats festgestellt wurden, siehe Tabelle 3. Der festgestellte Sulfat- und Nitratgehalt deckt sich mit den Untersuchungen des Pflanzsubstrats. Die Proben Ziegelbruch und Ziegelbruch + Erde weisen deutlich erhöhte Werte für Aluminium und Nickel auf.

5.2 Wasserspeichervlies

Die in Tabelle 5 gezeigten Werte geben Aufschluss über die im Vlies abgelagerten Ionen. Als Grundlage für die Untersuchung diente das filtrierte Eluat. Wie im vorigen Kapitel besprochen, sind die mit der Ionenchromatographie erzielten Ergebnisse für die Chlorid-, Nitrat- und Sulfatkonzentrationen am aussagekräftigsten. Die Tabelle 5 soll einen Überblick über die Verteilung geben, wobei ebenfalls die beiden Maximalwerte rot und beiden Minimalwerte grün hervorgehoben sind. Ergänzt werden diese Werte durch die Leitfähigkeit, den pH-Wert und das Redoxpotenzial. In Tabelle 6 wird die, bei verschiedenen Sättigungszuständen berechnete Chloridkonzentration, dargestellt. Anschließend wird anhand der bei der Probenentnahme erstellten Fotos überprüft, ob sich die Maximalwerte in einem verstärkten Schadensbild widerspiegeln.

Tabelle 5: Ergebnisse der Ionenchromatographie für das Wasserspeichervlies; Minimalwerte grün, Maximalwerte rot

Probenbezeichnung	Chlorid ber_ als Cl (mg/l)	Sulfat ber_ als SO4 (mg/l)	Nitrat ber_ als N (mg/l)	pH-Wert ber_ als pH (-)	Redoxpotential ber_ als Redox (mV)	Leitfähigkeit ber_ als LF (µS/cm)
V1 Eluat	14,2	126	3,65	7,8	255	579
V2 Eluat	6,34	16,6	1,34	8,0	238	246
V3 Eluat	7,74	20,9	5,98	7,6	234	369
V4 Eluat	12,5	276	1,08	8,2	230	822
V5 Eluat	6,46	11,4	<0,1	7,5	234	293
V6 Eluat	11,1	47,5	0,63	7,8	217	351
V7 Eluat	2,77	54,4	0,92	7,7	233	591
V8 Eluat	3,33	40,9	0,95	8,0	208	200
V9 Eluat	0,84	3,98	<0,1	7,7	221	199
V10 Eluat	17,6	120	1,79	7,1	193	605
V11 Eluat	10,0	25,1	<0,1	7,8	194	256
V12 Eluat	1,01	9,89	0,11	7,3	213	159
V13 Eluat	1,55	11,1	0,24	7,2	207	160
V14 Eluat	1,69	16,8	<0,1	8,1	208	165

5. Ergebnisse

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, liegt der Chloridwert der Vliesproben zwischen 0,84 mg/l und 17,6 mg/l. Für die Messung des Sulfatgehalts ergeben sich Werte zwischen 3,98 mg/l und maximal 276 mg/l. Der Nitratgehalt ist vergleichsweise gering und beträgt zwischen weniger als 0,1 mg/l und 5,98 mg/l. Der pH-Wert der Proben liegt zwischen 7,1 und 8,2, während das Redoxpotenzial mindestens 193 mV und maximal 255 mV aufweist. Die Leitfähigkeit der Proben liegt zwischen 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 822 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Abbildung 15 zeigt die Entnahmestelle der Probe V1, welche relativ hohe Werte für Chlorid, Sulfat und Nitrat sowie das höchste Redoxpotenzial aufweist. In Abbildung 16 ist die Entnahmestelle der Probe V4 zu sehen. Diese hat den höchsten Sulfatgehalt, den höchsten pH-Wert und die größte Leitfähigkeit. Abbildung 17 zeigt die zu Probe V10 passende Entnahmestelle. Hier wurden die höchste Chloridkonzentration und die zweithöchste Leitfähigkeit gemessen.



Abbildung 15: Entnahmestelle der Probe V1 (selbsterstellt)

5. Ergebnisse



Abbildung 16: Entnahmestelle der Probe V4 (selbsterstellt)



Abbildung 17: Entnahmestelle der Probe V10 (selbsterstellt)

5. Ergebnisse

Die in Tabelle 6 dargestellten Werte geben die Chloridkonzentration bei verschiedenen Trocknungszuständen im Wasserspeichervlies an, wobei die Probe V 10 mit Abstand die höchste Konzentration aufweist.

Tabelle 6: Chloridkonzentration im Wasserspeichervlies; Minimalwerte grün, Maximalwerte rot

Probenbezeichnung	5ml/g Vlies	1ml/g Vlies	0,01ml/g Vlies
	mg/l	mg/l	mg/l
V1 Eluat	142	710	71000
V2 Eluat	63,4	317	31700
V3 Eluat	77,4	387	38700
V4 Eluat	125	625	62500
V5 Eluat	64,6	323	32300
V6 Eluat	111	555	55500
V7 Eluat	27,7	139	13900
V8 Eluat	33,3	167	16700
V9 Eluat	8,4	42	4200
V10 Eluat	176	880	88000
V11 Eluat	100	500	50000
V12 Eluat	10,1	50,5	5100
V13 Eluat	15,5	77,5	7800
V14 Eluat	16,9	84,5	8500

5. Ergebnisse

Die Werte für die Chloridkonzentration reichen im wassergesättigten Zustand von 8,4 mg/l bis zu 176 mg/l. Da bei der Abtrocknung des Wasserspeichervlies nur das Wasser aber nicht das Chlorid in die Atmosphäre übergeht steigt dadurch die Chloridkonzentration an. Wenn das Wasserspeichervlies beinahe vollständig getrocknet ist reicht die Chloridkonzentration von 4200 mg/l bis zu 88000 mg/l.

5.3 Wässrige Proben

Die beiden wässrigen Proben wurden auf ihre Konzentration von Chlorid und Sulfat untersucht. Außerdem wurden der pH-Wert, das Redoxpotenzial und die Menge des gelösten Sauerstoffs gemessen. Die Ergebnisse sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Ionenchromatographie; Minimalwerte grün, Maximalwerte rot

Probenbezeichnung	Chlorid ber_ als Cl (mg/l)	Sulfat ber_ als SO ₄ (mg/l)	pH-Wert ber_ als pH (-)	Redoxpotential ber_ als Redox (mV)	O ₂ gelöst ber_ als O ₂ (mg/l)
Pr 1 (wenig Feststoff)	2,4	12	7,8	168	6,6
Pr 2 (viel Feststoff)	40	150	7,8	140	4,1

Die Werte für Chlorid und Sulfat unterscheiden sich um mehr als eine 10er-Potenz, während beide Proben den selben pH-Wert besitzen. Das Redoxpotenzial der beiden Proben liegt relativ nahe beieinander und der Wert für gelösten Sauerstoff beträgt 4,1 mg/l bzw. 6,6 mg/l.

5.4 Weiße Ablagerung/ Salze

Die vier Proben der salzartigen weißen Ablagerungen an den Aluminiumpflanzgefäßen wurden auf ihre Zusammensetzung hin überprüft. Die Tabelle 8 zeigt die Werte für den Aluminium-, Calcium-, Chrom-, Eisen- und Nickelgehalt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchung der salzartigen Proben; Minimalwerte grün, Maximalwerte rot

Probenbezeichnung	Aluminium gesamt ber_ als Al (g/kg)	Calcium gesamt ber_ als Ca (g/kg)	Chrom gesamt ber_ als Cr (mg/kg)	Eisen gesamt ber_ als Fe (mg/kg)	Nickel gesamt ber_ als Ni (mg/kg)
S1	60	170	16	1000	12
S2	12	180	5	500	10
S3	120	13,5	37	1500	5
S4	15	270	9	1600	14

Die Werte für Aluminium liegen zwischen 15 g/kg und 120 g/kg, die für Calcium zwischen 13,5 g/kg und 270 g/kg. Die Proben enthalten mindestens 9 mg/kg und

5. Ergebnisse

maximal 37 mg/kg Chrom. Der Eisengehalt liegt durchwegs zwischen 500 mg/kg und 1600 mg/kg. Der Wert für Nickel beträgt mindestens 5 mg/kg und maximal 14 mg/kg. In Abbildung 18 ist die Stelle, an der die Probe S3 gewonnen wurde, zu sehen. Die Abbildung 19 zeigt den Ort, an dem die Probe S4 abgekratzt wurde.



Abbildung 18: Entnahmestelle der Probe S3 (selbsterstellt)



Abbildung 19: Entnahmestelle der Probe S4 (selbsterstellt)

5.5 Metallproben

Die Untersuchungen an den beiden vor Ort gewonnenen Metallproben M1 und M2 wurden jeweils an einer blanken Stelle und an einer verunreinigten bzw. korrodierten Stelle vorgenommen. Die Ergebnisse in Tabelle 9 geben die Elementverteilung an den betroffenen Stellen an. Lediglich die Probe M1 verunreinigt hat einen Anteil an C, welcher in diesem Fall bei 15,8 Prozent liegt. Die Werte für Cr liegen zwischen 9,2 und 18,5 Prozent, jene für Fe zwischen 34 und 72,3 Prozent. Der Ni-Gehalt liegt bei mindestens 5,9 Prozent und höchstens bei 8,9 Prozent. Sauerstoff wurde nur an den beiden verunreinigten Stellen einmal mit 19,2 und einmal mit 3 Prozent nachgewiesen. Die Probe M1 verunreinigt ist die Einzige, an der ein Anteil von Al, Si und Ca nachgewiesen werden konnte. Der Mn-Gehalt der Proben liegt zwischen 1 und 1,4 Prozent.

Tabelle 9: Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung

Material	C%	Cr%	Fe%	Ni%	O%	Al%	Si%	Ca%	Mn%
M1 blank		18,45	72,25	7,91					1,38
M1 verunreinigt	15,81	9,17	33,95	5,94	19,21	1,39	2,2	11,31	1,03
M2 blank		18,43	71,28	8,89					1,4
M2 verunreinigt		18,22	70,61	8,14	3,02				

Die Analyse der beiden Edelstahlproben und der Aluminiumprobe, die von dem unbearbeiteten Ausgangsmaterial angefertigt wurden, ergaben neben einigen hochauflösenden mikroskopischen Abbildungen die Mittelwerte der Elementverteilung an der Oberfläche der Legierungen. Die beiden Materialien Edelstahl 2 und Aluminium sind an der Fassade zum Einsatz gekommen. In Tabelle 10 wird die Elementverteilung der Legierungen beschrieben.

Tabelle 10: Ergebnisse der Untersuchung des Ausgangsmaterials

Material	C%	Cr%	Fe%	Ni%	Mo%
Edelstahl 1	6,21	15,26	65,75	10,04	2,12
Edelstahl 2	3,14	18,21	70,4	7,51	
	Al%	Mg%			
Aluminium	97	3			

Der C-Gehalt von Edelstahl 2 liegt bei 3,1 Prozent, der Cr-Gehalt bei 18,2 Prozent, der von Ni bei 7,5 Prozent und der Eisengehalt bei 70,4 Prozent. Der Aluminiumwerkstoff weist einen hohen Reinheitsgrad von 97 Prozent Al und 3 Prozent Mg auf.

6. Diskussion

Zum Thema der Korrosion gibt es zwar unzählige Publikationen, Fachbücher und Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften über Normen und Informationsmaterial der Metallindustrie bis hin zu Masterarbeiten und Dissertationen, zu Korrosionserscheinungen an Pflanzgefäßen zur Fassadenbegrünung konnten aber trotz intensiver Literaturrecherche keine Arbeiten gefunden werden. Dies liegt vermutlich daran, dass Fassadenbegrünungen, die nicht wie im klassischen Sinne durch rankende Pflanzen erreicht, sondern bei denen Substratbehälter an der Fassade selbst angebracht werden, eine sehr junge Technik der Bauwerksbegrünung darstellen.

Das vorliegende Korrosionssystem erweist sich als besonders kompliziert, da es nicht möglich ist, eine eindeutige Zuordnung zu einem Korrosionsmedium vorzunehmen. Die vorliegenden Umstände können als Überschneidungsbereich zwischen Bodenkorrosion, atmosphärischer Korrosion, Korrosion in wässrigen Medien und eventuell biologischer Korrosion angesehen werden. In jedem Fall liegt laut der Definition in der ÖNORM EN ISO 8044 eine Korrosionserscheinung und noch kein Korrosionsschaden vor, da die Funktion des Bauteiles noch nicht beeinträchtigt ist.

Der Vergleich der Werte von Substratproben und Vliesproben, die an derselben Stelle entnommen wurden, zeigt, dass zwischen ihnen kein direkter Zusammenhang besteht. So weist beispielsweise die Substratprobe B7 den zweithöchsten Chloridgehalt, den höchsten Sulfatgehalt und die zweithöchste Leitfähigkeit auf, während die an der selben Stelle entnommene Vliesprobe V9 die geringste Konzentration von Chlorid und Sulfat aufweist und weiters nur eine geringe Leitfähigkeit besitzt. Die ein Stockwerk weiter oben entnommene Probe B6 hat den niedrigsten Chlorid- und Sulfatgehalt, die dazugehörige Vliesprobe V8 weist durchschnittlich hohe Werte für Chlorid und Sulfat auf. Lediglich die Leitfähigkeit ist bei beiden Proben annähernd gleich groß.

Auch die örtliche Verteilung der Konzentrationen über die Fassade folgt keinen erkennbaren Regelmäßigkeiten. Es lässt sich weder ein Zusammenhang mit der

Höhe der Entnahmestelle, noch mit der Ausrichtung der jeweiligen Fassadenseite feststellen. So finden sich Substrat- und Vliesproben mit hohen Werten für Chlorid, Sulfat, Nitrat und einer hohen Leitfähigkeit sowohl in den unteren, als auch in den oberen Stockwerken und unabhängig von der Orientierung der Fassade. Gleiches gilt für die aufgetretenen Korrosionserscheinungen.

Da Korrosion als ortsgebundene Reaktion an einer Phasengrenze auftritt, sind zumindest die Stellen, an denen es zu Durchrostungen gekommen ist, gut nachvollziehbar. Im vorliegenden Fall sind dies nämlich die Bereiche, an denen Vlies und Substrat an die Atmosphäre bzw. an das Metall grenzen. Mit zunehmender Feuchtigkeit und dem damit einhergehenden Kondensationsfilm kann hier eventuell sogar von einer Vierphasengrenze gesprochen werden. Dies lässt den Rückschluss zu, dass es sich hier um einen besonders korrosionsgefährdeten Bereich handelt.

Das zum Einsatz kommende Substrat besteht neben dem Humusanteil aus Recyclingstoffen wie Ziegelbruch und Komposterde. Cottis (2010) beschreibt Böden, die mit Kohle oder industriellen Abfällen verunreinigt sind, als generell stark korrosiv. Diese Definition trifft im weiteren Sinn auf die vorliegende Situation zu. Außerdem werden von ihm Böden, die über 20 Prozent Wasser beinhalten, als aggressiv eingestuft. Da der Ziegelbruch unter anderem als Wasserspeicher fungiert und einen erheblichen Anteil an der Gesamtmasse des Pflanzsubstrats hat, wird dieser Wert zumindest zeitweise überschritten.

Laut Booth (1967) wird ein Boden als aggressiv eingestuft, wenn sein durchschnittliches Redoxpotenzial bei einem pH-Wert von 7, kleiner als +190 mV ist. Die pH-Werte der Substratproben und der Vliesproben liegen zwischen pH 7 und pH 8,2 und erfüllen somit teilweise dieses Kriterium, deren Redoxpotenziale liegen zwischen 194 mV und 255 mV, befinden sich also nicht im kritischen Bereich. Die Redoxwerte beziehen sich auf die Ag/AgCl-Elektrode.

Als weiterer negativer Faktor für die Korrosionsbeständigkeit gelten Ablagerungen von Streusalzen, von Abgasen aus dem Straßenverkehr und von Fremdeisen. Die betroffene Fassade befindet sich direkt am stark befahrenen Margaretengürtel, außerdem befindet sich in weniger als 200m Entfernung die Trasse der Südbahn samt Verschiebebahnhof der ÖBB. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese

Einrichtungen in hohem Maße kritische Stoffe emittieren. Die unmittelbare Nachbarschaft wird in Abbildung 20 verdeutlicht.



Abbildung 20: Betroffene Fassade und angrenzende Umgebung (selbsterstellt)

Cottis (2010) beschreibt die notwendigen Lebensbedingungen in Böden für Bakterien, die Korrosion auslösen können, folgendermaßen: der pH-Wert muss in einem Bereich zwischen pH 5 und pH 10 liegen, der maximale Druck darf 500 bar nicht überschreiten und es sollen Temperaturen zwischen 5° und 45°C vorherrschen. Alle gewonnenen Substrat- und Vliesproben weisen den entsprechenden pH-Bereich auf, der maximale Druck wird dank der geringen Stärke der Substratschicht bei Weitem nicht überschritten und die Temperatur liegt dank der eher milden Winter in Wien bis auf drei Monate im Jahr im definierten Bereich. Die Bedingungen für das Wachstum von korrosionsfördernden Bakterien sind somit gegeben.

Ein weiterer im vorliegenden Fall anzutreffender Faktor für ein erhöhtes Korrosionsrisiko ist eine hohe Luftfeuchtigkeit über einen längeren Zeitraum. Dies ist einerseits durch die Verdunstung des im Substrat vorhandenen Regen- und Gießwassers und andererseits durch die Verdunstung der Pflanzen gegeben. Nebenbei wird dadurch auch eine im Vergleich zur Umgebung relativ konstante

mittlere Lufttemperatur erzielt, die sich ebenfalls negativ auf die Korrosionsbeständigkeit auswirkt. Die Tabelle 11 aus dem Merkblatt 828 der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei zeigt einen Überblick über die eben angesprochenen Einflussfaktoren.

Tabelle 11: Einfluss von Luftverunreinigung, Feuchtigkeit und Temperatur (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996)

Einflußfaktor	Höhere Korrosivität	Niedrigere Korrosivität
Luftverunreinigung	hohe Luftverunreinigung, insbesondere durch SO ₂ , Chloride und Feststoffteilchen	niedrige Luftverunreinigung
Feuchtigkeit	mittlere Niederschlagsmenge mit hoher Luftfeuchtigkeit über längere Zeiträume	niedrigere Niederschlagsmenge bei niedriger Luftfeuchtigkeit oder starker häufiger Regen
Temperatur	mittlere Lufttemperatur (z.B. 10 bis 20°C) mit hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensationen	niedrige Lufttemperatur (insbesondere längere Zeiten unter 0°C) hohe Lufttemperatur bei niedriger Luftfeuchtigkeit

Ist der Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 einer städtischen Umgebung mit erhöhter Korrosionsbelastung ausgesetzt, wird von der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei eine regelmäßige Reinigung empfohlen. Diese ist aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit der Konstruktion nur mit großem Aufwand durchzuführen. Außerdem wäre es notwendig, auch die Innenseite der Konstruktion zu reinigen, wofür die Pflanzen, das Substrat und das Wasserspeichervlies entfernt werden müssten. Dies jedoch widerspricht der Idee einer pflegeextensiven Bauwerksbegrünung.

Die im Substrat und im Wasserspeichervlies gemessenen Werte für die Konzentration von Chlorid, Sulfat und Nitrat sowie der Leitfähigkeit weisen eine hohe Varianz auf. Dies legt den Schluss nahe, dass es Bereiche mit deutlich erhöhtem Korrosionsrisiko gibt. Ob sich diese großen Unterschiede aus dem eingesetzten Substrat, dem Gießwasser oder einem anderen Faktor ergeben, kann nicht gesichert bestimmt werden.

Die berechneten Werte für die Chloridkonzentration bei verschiedenen Sättigungszuständen des Wasserspeichervlieses zeigen, dass in gesättigtem bzw. relativ feuchtem Zustand keine kritischen Chloridwerte erreicht werden. Trocknet das Vlies jedoch aus, ergeben sich Werte von 80g/l und mehr. Dieser Wert kann bei beginnender Kondensation oder fast abgeschlossener Trocknung, also bei sehr dünnen Feuchtigkeitfilmen, beinahe beliebig hoch werden. Tsutsumi et al. (2007)

haben bei 25°C 6 M Chlorid als kritische Menge definiert, was etwa 213g/l Chlorid entspricht. Die kritische relative Luftfeuchtigkeit bei einem pH-Wert zwischen pH 4 und pH 7 wird von ihnen mit 55 bis 75 Prozent angegeben. Dies entspricht 8,5 M bzw. 4,9 M an Chloridkonzentration, was soviel wie 302 g/l und 174 g/l ergibt. Es kann im vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass zumindest zeitweise und örtlich begrenzt diese kritischen Werte überschritten werden.

Der Vergleich der Fotos von den Entnahmestellen der Proben, die die jeweiligen Maximalwerte aufwiesen, hat ergeben, dass eine optische Kontrolle nicht zielführend ist, da auf diese Art kein vermehrtes Schadensaufkommen auszumachen ist. Um eine Gesetzmäßigkeit, nach der die Korrosionsstellen verteilt sind, zu erkennen, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Neben dem pH-Wert und der Chloridkonzentration spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle bei Lochkorrosion. Für Edelstahl liegt die kritische Lochkorrosionstemperatur zwischen 10° und 90°C. Bis auf die Wintermonate ist dieser Temperaturbereich den Rest des Jahres gegeben (Cottis, 2010).

Die Analyse der weißen Ablagerungen bzw. Salze zeigt im Fall der Probe S3 einen hohen Wert für Aluminium. Da dieser Wert über 10 Prozent beträgt, kann davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um Korrosionsprodukte aus den Aluminiumladen handelt. Die Probe S4 hingegen enthält kaum Aluminium, dafür aber einen beträchtlichen Anteil an Kalzium. Dies lässt den Schluss zu, dass es sich in diesem Fall um Ablagerungen aus Wasser handelt. Dieser Vorgang ist aus der Natur von der typischen Bildung von Tropfsteinen bekannt.

Die Elementverteilung der Metallproben M1 und M2 unterscheidet sich kaum voneinander und sie liegt an den blanken Stellen genau im Spezifikationsbereich für den zum Einsatz gekommenen Werkstoff Edelstahl 1.4301. Die korrodierten Stellen hingegen zeugen von Korrosionsvorgängen und deren Produkten, wobei in der Probe M1 verunreinigt, im Gegensatz zur Probe M2 verunreinigt, Kohlenstoff, Aluminium, Silicium Kalzium und Mangan nachgewiesen werden konnte.

Die Messung der Proben Edelstahl 1 und Edelstahl 2 führten, wie zu erwarten, zu Werten, die die genormte Zusammensetzung der getesteten Werkstoffe

7. Schlussfolgerung

wiedergeben. Auffällig dabei ist, dass in der Probe Edelstahl 2 im Gegensatz zu den Proben M1 und M2 kein Mangan nachgewiesen wurde. Laut Lohmayer (1981) ist es bei Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 notwendig, dass innerhalb der Analysegrenzen die Legierungselemente Mangan, Chrom und Nickel im oberen Bereich liegen, wenn dieser kaltverformt wird. Dies trifft auf die Proben des Ausgangsmaterials nicht zu, jedoch wurden diese nur oberflächlich analysiert und es erfolgte kein metallurgischer Vollaufschluss.

Die Korrosionserscheinungen an der Fassade treten scheinbar zufällig verteilt auf. Der Edelstahl 1.4301 wird deutlich stärker in Mitleidenschaft gezogen, als der Aluminiumwerkstoff. Dies wird durch die nur auf dem Edelstahl zu findenden Durchrostungen deutlich und lässt sich mit dem unterschiedlichen Korrosionsverhalten der beiden Werkstoffe erklären.

7. Schlussfolgerung

Die Ursache der Korrosionserscheinungen lässt sich zum momentanen Zeitpunkt nicht zweifelsfrei feststellen, hierfür bedarf es noch weiterer Daten und Analysen. Es lässt sich aber festhalten, dass das vorhandene Wasser, also sowohl das Regenwasser, das Gießwasser als auch das Kondenswasser eine entscheidende Rolle bei der Korrosion spielen. Durch das Regen- und Gießwasser werden Bestandteile des Substrats gelöst und bei Trocknung in konzentrierter Weise abgelagert und die Feuchtfilme bzw. Elektrolytfilme, die auf der Metalloberfläche entstehen, bilden die Grundlage für elektrochemische Korrosionsprozesse.

Um den Boden besser auf seine korrosiven Eigenschaften hin überprüfen zu können, ist es notwendig, seinen elektrischen Widerstand zu ermitteln. Nach Wranglén (1985) führt ein niedriger Bodenwiderstand in der Regel zu starker Korrosivität. Außerdem sollte der Gehalt an löslichem Eisen gemessen werden, da laut Cottis (2010) Böden mit mehr als 120 mg/kg-Eisen aggressiv auf Edelstahl wirken.

Um einschätzen zu können, ob mikrobiologisch induzierte Korrosionsprozesse für die vorliegenden Korrosionserscheinungen verantwortlich sind, ist eine Überprüfung auf sulfatreduzierende Bakterien, vorzunehmen. Hierbei werden, wie schon im Literaturteil erwähnt, Milliprüben mit jeweils ca. 100-200 mg Boden- und Mikroproben mit jeweils weniger als 10mg verwendet. Wenn sich nach einer Inkubationszeit von zwei Wochen bei ungefähr 30°C sowohl die Milliprüben als auch die Mikroproben schwarz verfärbt haben, kann man von erhöhter Gefahr von mikrobiologisch induzierter Korrosion ausgehen. Haben sich hingegen nur die Mikroproben schwarz verfärbt, spricht man von einem mäßig hohen Korrosionsrisiko (Cottis, 2010).

Durch das Ausräumen der Edelstahlladen ist ein Weiterrosten sehr unwahrscheinlich, kann aber nicht zur Gänze ausgeschlossen werden. Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei empfiehlt im Zweifelsfall den molybdänhaltigen Stahl 1.4571 anstatt den im vorliegenden Fall verwendeten Stahl 1.4301 einzusetzen, da dieser in Erdböden deutlich bessere Eigenschaften besitzt (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1997).

Da es am Aluminium bis jetzt nur zu flächigem Korrosionsabtrag gekommen ist, ist die Gefahr des Auftretens von Korrosionsschäden, die den Bauteil negativ beeinflussen, weniger wahrscheinlich als beim Edelstahl, nichtsdestotrotz aber vorhanden. Das Aluminium sollte weiterführend untersucht werden. Wenn $\text{Al}(\text{OH})_3$ nachgewiesen wird, ist Lochkorrosion auch am Aluminium gegeben. Das Lochwachstum bei Aluminium wird jedoch von dem gebildeten $\text{Al}(\text{OH})_3$ gebremst. Generell lässt sich festhalten, dass, je mehr Löcher gebildet werden, desto weniger tief werden diese. Diesbezüglich kann es sinnvoll sein, eine geringe Menge Kupfer, etwa 0,3 Prozent % zuzulegen, da dadurch die Lochzahl erhöht wird (Ostermann, 2007).

Der entscheidende Vorteil von Aluminium liegt darin, dass Korrosionsangriffe vor allem in den ersten zwei Jahren erfolgen und im Anschluss nur noch gebremst stattfinden. Danach werden dementsprechend nur noch geringe Abtragungsraten gemessen. Die Wahrscheinlichkeit, dass es auch an den Aluminiumelementen zu Durchrostungen kommt, ist somit gering (Cottis, 2010).

Abhilfe könnte hier eventuell anodischer Korrosionsschutz schaffen. Diese Art des Korrosionsschutzes kann bei passivierbaren Werkstoffen, zu denen auch Aluminium gehört, angewendet werden, wenn der passive Zustand unter den herrschenden Bedingungen nicht sicher bzw. stabil über die Nutzungszeit der Konstruktion aufrechterhalten werden kann. Durch den anodischen Strom wird die metallische Oberfläche in den Passivbereich polarisiert. Der Einsatz ist besonders sinnvoll, wenn die Gefahr einer örtlichen Aktivierung nicht ausgeschlossen werden kann. In diesem Fall bewirkt ein anodischer Strom die Rückkehr in den passiven Zustand. Bei dieser Methode sind sehr enge Bereiche des Schutzpotenzials einzuhalten. Ob im vorliegenden Fall das Anbringen eines derartigen Korrosionsschutzes sinnvoll bzw. machbar wäre, ist mit Fachleuten aus der Praxis abzuklären (Cottis, 2010).

Die untersuchten Ergebnisse lassen keinen klaren Auslöser der Korrosionserscheinungen erkennen, sodass die Möglichkeit in Betracht gezogen werden muss, dass es noch andere Faktoren gibt, welche den Korrosionsprozess in Gang setzten und daher noch weitere Untersuchungen notwendig machen.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasengrenzen (Tostmann, 2001)	12
Abbildung 2: Korrosionsstromdichte im Tagesverlauf (Tostmann, 2001)	17
Abbildung 3: Verortungsplan Westseite und Südseite (selbsterstellt).....	39
Abbildung 4: Verortungsplan Südwestseite (selbsterstellt)	40
Abbildung 5: Fortgeschrittene Lochkorrosion (selbsterstellt)	41
Abbildung 6: Beginnende Korrosion (selbsterstellt)	41
Abbildung 7: Eluat aus Substratprobe (selbsterstellt)	
Abbildung 8: Beutel mit Substratprobe (selbsterstellt)	42
Abbildung 9: Eluat und Filtrat der Vliesproben (selbsterstellt)	43
Abbildung 10: Wässrige Proben(selbsterstellt)	44
Abbildung 11: Ablagerung an Aluminiumlade (selbsterstellt)	45
Abbildung 12: Entnahmestelle der Probe B 7 (selbsterstellt)	51
Abbildung 13: Entnahmestelle der Probe B 12 (selbsterstellt)	52
Abbildung 14: Entnahmestelle der Probe B 15 (selbsterstellt)	52
Abbildung 15: Entnahmestelle der Probe V1 (selbsterstellt)	55
Abbildung 16: Entnahmestelle der Probe V4 (selbsterstellt)	56
Abbildung 17: Entnahmestelle der Probe V10 (selbsterstellt)	56
Abbildung 18: Entnahmestelle der Probe S3 (selbsterstellt)	60
Abbildung 19: Entnahmestelle der Probe S4 (selbsterst.....	60
Abbildung 20: Betroffene Fassade und angrenzende Umgebung (selbsterstellt)	65

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tabelle zur Einschätzung der Eignung von Stählen (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996)	18
Tabelle 2: Parameter der Analyseverfahren	47
Tabelle 3: Ergebnisse der Ionenchromatographie für das Pflanzsubstrat	50
Tabelle 4: Ergebnisse der Ionenchromatographie für das Eluat des Ausgangsmaterials (mg/l) des Pflanzsubstrats bzw. Al-, Ni- und Cr- Konzentration im Feststoff (mg/kg).....	53
Tabelle 5: Ergebnisse der Ionenchromatographie für das Wasserspeichervlies	54
Tabelle 6: Chloridkonzentration im Wasserspeichervlies.....	57
Tabelle 7: Ergebnisse der Ionenchromatographie	59
Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchung der salzartigen Proben.....	59
Tabelle 9: Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung.....	61
Tabelle 10: Ergebnisse der Untersuchung des Ausgangsmaterials	62
Tabelle 11: Einfluss von Luftverunreinigung, Feuchtigkeit und Temperatur (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1996)	66

10. Literaturverzeichnis

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2010): Schlussbericht. Beeinträchtigung der Funktionalität nichtrostender Stähle durch unzureichende Passivschichtausbildung. Berlin.

Beom, Won-Jin; Yun, Kwi-Sub; Park, Chan-Jin; Ryu, Han-Jin; Kim, Young-Ho (2010): Comparison of influences of NaCl and CaCl₂ on the corrosion of 11Prozent and 17Prozent Cr ferritic stainless steels during cyclic corrosion test. In: *Corrosion Science* 52 (3), S. 734–739.

Booth, G. H.; Cooper, A. W.; Cooper, Pamela M.; Wakerley, D. S. (1967): Criteria of Soil Aggressiveness Towards Buried Metals. I. Experimental Methods. In: *British Corrosion Journal* 2 (3), S. 104–108.

Chintan M. Jhobalia (2004): The role of a biofilm and its characteristics in microbiologically influenced corrosion of steel. Master Thesis. Ohio University, Ohio. Fritz J. and Dolores H. Russ College of Engineering and Technology.

Cottis, Robert; Graham, Michael; Lindsay, Robert; Lyon, Stuart; Richardson, Tony; Scantlebury, David; Stott, Howard (Hg.) (2010): Shreir's corrosion. Volume 2: Corrosion in Liquids, Corrosion Evaluation. 4. Aufl., 4 Bände. Amsterdam, London: Elsevier.

Cottis, Robert; Graham, Michael; Lindsay, Robert; Lyon, Stuart; Richardson, Tony; Scantlebury, David; Stott, Howard (Hg.) (2010): Shreir's corrosion. Volume 3: Corrosion and Degradation of Engineering Materials. 4. Aufl., 4 Bände. Amsterdam, London: Elsevier.

Cottis, Robert; Graham, Michael; Lindsay, Robert; Lyon, Stuart; Richardson, Tony; Scantlebury, David; Stott, Howard (Hg.) (2010): Shreir's corrosion. Volume 4: Management and Control of Corrosion. 4. Aufl., 4 Bände. Amsterdam, London: Elsevier.

Gräfen, H.; Rhamel, A. (1994): Korrosion verstehen – Korrosionsschäden vermeiden. Ergebnisse angewandter Korrosionsforschung in Deutschland; 20 Jahre Forschungs- und Entwicklungsprogramm Korrosion und Korrosionsschutz (FE-KKs). 1. Aufl., 2 Bände. Bonn: Kuron.

Hagyard, T.; Santhiapillai, J. R. (1959): Pitting corrosion of aluminium in sodium chloride solutions. In: *J. Appl. Chem* 9 (6), S. 323–330.

Hastuty, Sri; Nishikata, Atsushi; Tsuru, Tooru (2010): Pitting corrosion of Type 430 stainless steel under chloride solution droplet. In: *Corrosion Science* 52 (6), S. 2035–2043.

Hömig, Hans E. (1991): Metall + Wasser. Eine Einführung in die Korrosionskunde. 5. Aufl., Essen: Vulkan-Verlag.

Ibrahim, Magdy A.M; Abd El Rehim, S.S; Hamza, M.M (2009): Corrosion behavior of some austenitic stainless steels in chloride environments. In: *Materials Chemistry and Physics* 115 (1), S. 80–85.

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (1996): Merkblatt 828. Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle an der Atmosphäre. Hg. v. Informationsstelle Edelstahl

Rostfrei. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei. Düsseldorf (Merkblatt, 828). Online verfügbar unter <http://www.edelstahl-rostfrei.de/page.asp?pageID=1583>, zuletzt geprüft am 23.03.2014.

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (1997): Merkblatt 833. Edelstahl Rostfrei in Erdböden. Hg. v. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei. Düsseldorf (Merkblatt, 833). Online verfügbar unter <http://www.edelstahl-rostfrei.de/page.asp?pageID=1587>, zuletzt geprüft am 23.03.2014.

Japanese Standards Association (1994): Methods of neutral salt spray testing JIS Z 2371. Online verfügbar unter <http://www.mafaco.ir/files/download/JIS-Z2371-1994.pdf>, wird zitiert als JIS, zuletzt geprüft am 23.03.2014.

Latscha, Hans P.; Klein, Helmut A. (2002): Anorganische Chemie. Chemie-Basiswissen I. 8., vollständig überarb. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokyo: Springer (Springer-Lehrbuch, 1).

Lohmeyer, Sigurd (1981): Edelstahl. Eigenschaften, optimale Verarbeitung und Korrosionsschutz hochlegierter Stähle. 1. Aufl., Grafenau/Württ: Expert Verl. (Kontakt & Studium, 70).

Lorking, K. F.; Mayne, J. E. O. (1961): The corrosion of aluminium. In: *J. Appl. Chem* 11 (5), S. 170–180.

Na, Kyung-Hwan; Pyun, Su-Il (2006): Effect of sulphate and molybdate ions on pitting corrosion of aluminium by using electrochemical noise analysis. In: *Journal of Electroanalytical Chemistry* 596 (1), S. 7–12.

Odneval Wallinder, Inger; LU, Jianshu; Bertling, Sofia; Leygraf, Christofer (2002): Release rates of chromium and nickel from 304 and 316 stainless steel during urban atmospheric exposure– a combined field and laboratory study. In: *Corrosion Science* 44 (10), S. 2303–2319.

ÖNORM (2012): Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe und Definitionen. Online verfügbar unter: <https://shop.austrian-standards.at/Preview.action;jsessionid=F5195B237C1598190C6482A79F889BCF?preview=&dokkey=455651&selectedLocale=de>, zuletzt aufgerufen am 23.03.2014.

Ostermann, Friedrich (2007): Anwendungstechnologie Aluminium. 2., neu bearb. und aktualis. Berlin [u.a.]: Springer (VDI-Buch).

Pohjanne, P.; Carpén, L.; Hakkarainen, T.; Kinnunen, P. (2008): A method to predict pitting corrosion of stainless steels in evaporative conditions. In: *Journal of Constructional Steel Research* 64 (11), S. 1325–1331.

Schönburg, Kurt (2006): Korrosionsschutz am Bau. Korrosionsgefahren am Bauwerk, Vorbeugen gegen Korrosion, Ökologie des Korrosionsschutzes, Funktions- und Werterhaltung, Korrosionsschutztechniken am Bauwerk, Korrosions- und Denkmalschutz, Gesetze, Verordnungen, Vorschriften. 1. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Tostmann, Karl-Helmut (2001): Korrosion. Ursachen und Vermeidung. Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto: Wiley-VCH.

Tsutsumi, Yusuke; Nishikata, Atsushi; Tsuru, Tooru (2007): Pitting corrosion mechanism of Type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions. In: *Corrosion Science* 49 (3), S. 1394–1407.

Wranglén, Gösta (1985): Korrosion und Korrosionsschutz. Grundlagen, Vorgänge, Schutzmaßnahmen, Prüfung. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag.

Zheng, Shuqi; Li, Chunyu; Qi, Yameng; Chen, Liqiang; Chen, Changfeng (2013): Mechanism of (Mg,Al,Ca)-oxide inclusion-induced pitting corrosion in 316L stainless steel exposed to sulphur environments containing chloride ion. In: *Corrosion Science* 67, S. 20–31.

11. Anhang

Beilage 1: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Bodenproben.....	78
Beilage 2: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Vliesproben	79
Beilage 3: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Ausgangsmetalle	80
Beilage 4: Tabelle mit allen gemessenen Werten der vor Ort gewonnenen Metallproben.....	80
Beilage 5: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Flüssigproben.....	80
Beilage 6: Tabelle mit allen gemessenen Werten der weißen Ablagerungen.....	81
Beilage 7: Tabelle mit allen gemessenen Werten des Ausgangsmaterials des Substrats.....	81
Beilage 8: Verortungsplan der vor Ort gewonnenen Proben Südwestseite	82
Beilage 9: Verortungsplan der vor Ort gewonnenen Proben Südseite und Westseite	83
Beilage 10: Probe B1.....	84
Beilage 11: Probe B2.....	84
Beilage 12: Probe B3.....	85
Beilage 13: Probe B4.....	85
Beilage 14: Probe B5.....	86
Beilage 15: Probe B6.....	86
Beilage 16: Probe B7.....	87
Beilage 17: Probe B8.....	87
Beilage 18: Probe B9.....	88
Beilage 19: Probe B10.....	88
Beilage 20: Probe B11 Beilage 21: Probe B12	89
Beilage 22: Probe B 13.....	89
Beilage 23: Probe B 14.....	90
Beilage 24: Probe B15.....	90
Beilage 25: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M1 verunreinigt.....	91
Beilage 26: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M1 blank.....	92
Beilage 27: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M2 verunreinigt.....	93
Beilage 28: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M2 blank.....	94

11. Anhang

Beilage 1: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Bodenproben

Probe Nummer	Proben-bezeichnung	Chlorid Cl (mg/l)	Fluorid F (mg/l)	Leitfähigkeit LF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Nitrat N (mg/l)	Nitrit N (mg/l)	pH Wert	Redoxpotenzial (mV)	Sulfat SO_4 (mg/l)
38287	B1 Eluat	0,7	0,2	223	1	0,1	8,2	210	14
38288	B2 Eluat	5,7	0,3	499	1,6	0,2	7,7	201	96
38289	B3 Eluat	3,6	0,3	476	<0,1	0,2	7,9	208	64
38290	B4 Eluat	1,7	0,2	371	0,8	0,2	7,8	194	50
38291	B5 Eluat	1,4	0,3	297	0,5	0,2	8,1	196	14
38292	B6 Eluat	0,2	0,2	220	0,6	0,2	7,8	215	2,7
38293	B7 Eluat	7,9	0,2	834	0,8	0,1	7,8	205	300
38294	B8 Eluat	4,8	0,3	486	0,5	0,2	8	216	110
38295	B9 Eluat	2,8	0,2	445	<0,1	0,2	8	226	86
38296	B10 Eluat	1,1	0,2	289	0,2	0,2	7,7	236	10
38297	B11 Eluat	0,7	0,2	416	0,6	0,2	8	233	82
38298	B12 Eluat	2,2	0,3	722	4,7	0,3	7,3	241	150
38299	B13 Eluat	1,4	0,2	334	2,9	0,2	7,8	241	49
38300	B14 Eluat	3,3	<0,1	1780	0,5	<0,1	7,6	234	--
38301	B15 Eluat	10	0,3	639	7,4	0,3	7	238	110

11. Anhang

Beilage 2: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Vliesproben

Probe Nummer	Proben-bezeichnung	Chlorid Cl (mg/l)	Fluorid F (mg/l)	Leitfähigkeit LF (μ S/cm)	Nitrat N (mg/l)	Nitrit N (mg/l)	pH Wert	Redoxpotenzial (mV)	Sulfat SO ₄ (mg/l)
38302	V1 Eluat	14,2	<0,1	579	3,65	<0,1	7,8	255	126
38303	V2 Eluat	6,34	<0,1	246	1,34	<0,1	8	238	16,6
38304	V3 Eluat	7,74	0,17	369	5,98	0,2	7,6	234	20,9
38305	V4 Eluat	12,5	0,23	822	1,08	<0,1	8,2	230	276
38306	V5 Eluat	6,46	0,13	293	<0,1	0,1	7,5	234	11,4
38307	V6 Eluat	11,1	0,13	352	0,63	<0,1	7,8	217	47,5
38308	V7 Eluat	2,77	0,3	591	0,92	0,2	7,7	233	54,4
38309	V8 Eluat	3,33	<0,1	200	0,95	<0,1	8	208	40,9
38310	V9 Eluat	0,84	<0,1	199	<0,1	<0,1	7,7	221	3,98
38311	V10 Eluat	17,6	0,16	605	1,79	<0,1	7,1	193	120
38312	V11 Eluat	10	<0,1	256	<0,1	0,2	7,8	194	25,1
38313	V12 Eluat	1,01	<0,1	160	0,11	<0,1	7,3	213	9,89
38314	V13 Eluat	1,55	<0,1	160	0,24	<0,1	7,2	207	11,1
38315	V14 Eluat	1,69	0,11	166	<0,1	<0,1	8,1	208	16,8

11. Anhang

Beilage 3: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Ausgangsmetalle

Probe Nummer	Probenbezeichnung	Kohlenstoff C%	Chrom Cr%	Eisen Fe%	Nickel Ni%	Molybdän Mo%	Aluminium Al%	Magnesium Mg%
	Edelstahl 1	6,21	15,3	65,8	10,0	2,12		
	Edelstahl 2	3,14	18,2	70,4	7,51			
	Aluminium						97	3

Beilage 4: Tabelle mit allen gemessenen Werten der vor Ort gewonnenen Metallproben

Probe Nummer	Probenbezeichnung	Kohlenstoff C%	Chrom Cr%	Eisen Fe%	Nickel Ni%	Sauerstoff O%	Aluminium Al%	Silicium Si%	Calcium Ca%	Mangan Mn%
	M1 blank		18,5	72,3	7,91					1,38
	M1 verunreinigt	15,81	9,17	34,0	5,94	19,21	1,39	2,2	11,3	1,03
	M2 blank		18,4	71,3	8,89					1,4
	M2 verunreinigt		18,2	70,6	8,14	3,02				

Beilage 5: Tabelle mit allen gemessenen Werten der Flüssigproben

Probe Nummer	Probenbezeichnung	Chlorid Cl (mg/l)	Fluorid F (mg/l)	Leitfähigkeit LF (μ S/cm)	Nitrat N (mg/l)	Nitrit N (mg/l)	pH Wert	Redoxpotenzial (mV)	Sulfat SO ₄ (mg/l)	O ₂ gelöst O ₂ (mg/l)
38320	Pr 1 (wenig Feststoff)	2,4	<1,0	storno	<1,0	<1,0	7,8	168	12	6,6
38321	Pr 2 (viel Feststoff)	40	<1,0	storno	<1,0	<1,0	7,8	140	150	4,1

11. Anhang

Beilage 6: Tabelle mit allen gemessenen Werten der weißen Ablagerungen

Probe Nummer	Probenbezeichnung	Aluminium Al (mg/kg)	Calcium Ca (mg/kg)	Chrom Cr (mg/kg)	Eisen Fe (mg/kg)	Nickel Ni (mg/kg)	MW-Aufschluss
38316	S3	120000	13500	37	1500	5	HNO3/H2O2
38317	S1	60000	170000	16	1000	12	HNO3/H2O2
38318	S2	12000	180000	5	500	10	HNO3/H2O2
38319	S4	15000	270000	9	1600	14	HNO3/H2O2

Beilage 7: Tabelle mit allen gemessenen Werten des Ausgangsmaterials des Substrats

Probe Nummer	Probenbezeichnung	Aluminium Al (mg/kg)	Chlorid Cl (mg/kg)	Chrom Cr (mg/kg)	Nickel Ni (mg/kg)	Nitrat N (mg/l)	Sulfat SO4 (mg/l)
	Fassadenbegrünung 1a Eluat Ziegelbruch	69,5	5,7	0,105	0,223	1,9	49,4
	Fassadenbegrünung 1b Eluat Ziegelbruch	56,8	3,8	0,096	0,161	1,4	18
	Fassadenbegrünung 2a Eluat Ziegelbruch + Erde	186	15,8	0,248	0,431	1,4	110
	Fassadenbegrünung 2b Eluat Ziegelbruch + Erde	80,2	15,9	0,106	0,223	1,5	120
	Fassadenbegrünung Ziegelbruch	24500		10,8	14,2		
	Fassadenbegrünung Ziegelbruch + Erde	209000		13,6	18,0		

Beilage 8: Verortungsplan der vor Ort gewonnenen Proben Südwestseite





11. Anhang

Beilage 10: Probe B1



Beilage 11: Probe B2



11. Anhang

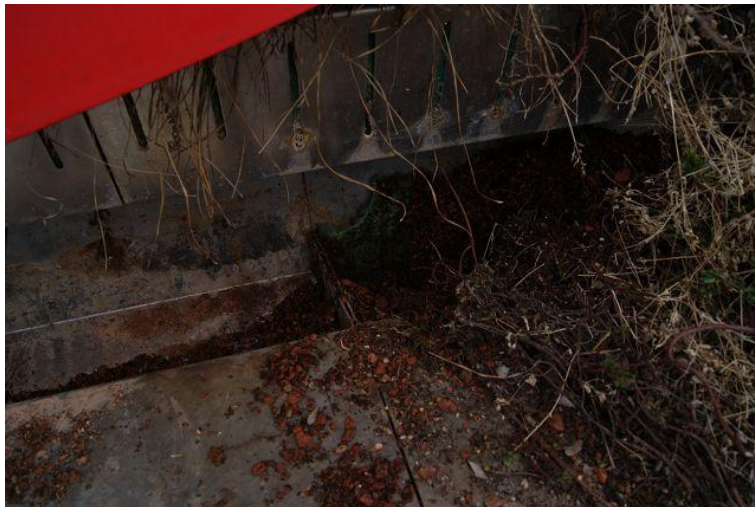
Beilage 12: Probe B3



Beilage 13: Probe B4

11. Anhang

Beilage 14: Probe B5



Beilage 15: Probe B6

11. Anhang

Beilage 16: Probe B7



Beilage 17: Probe B8

11. Anhang

Beilage 18: Probe B9



Beilage 19: Probe B10

11. Anhang

Beilage 20: Probe B11



Beilage 21: Probe B12



Beilage 22: Probe B 13



11. Anhang

Beilage 23: Probe B 14

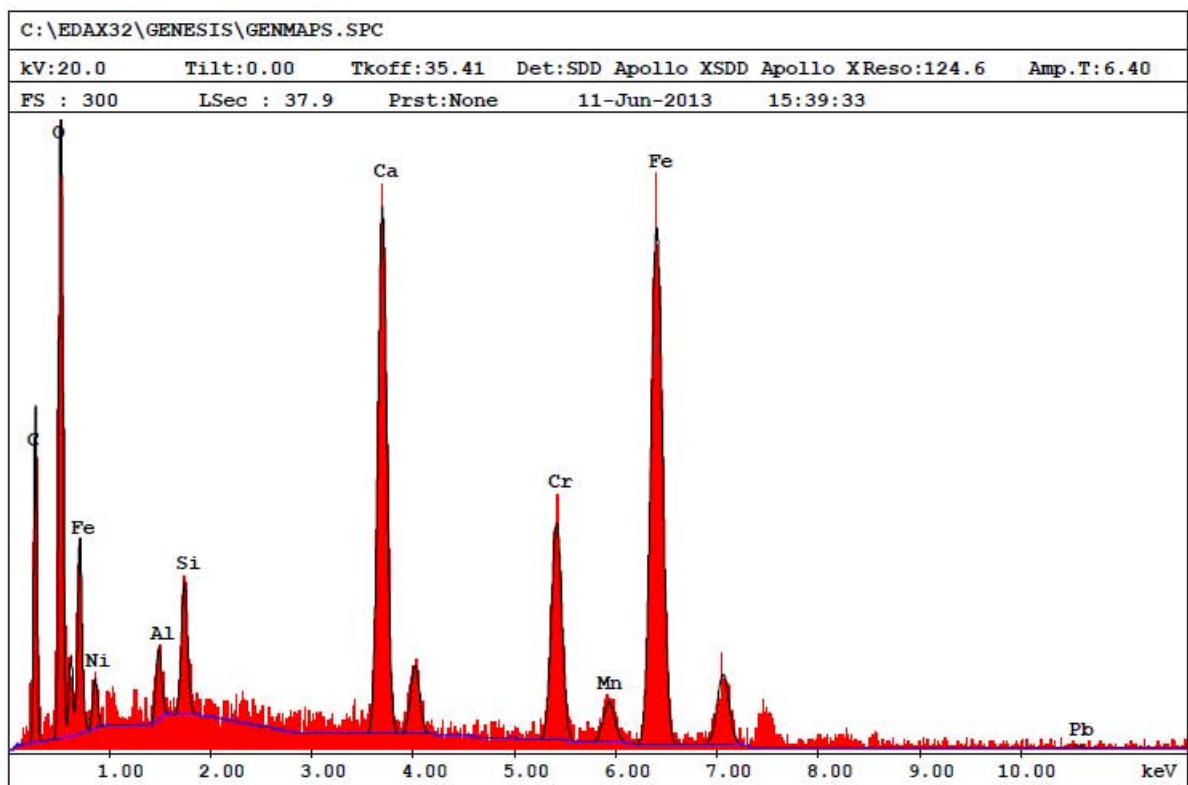
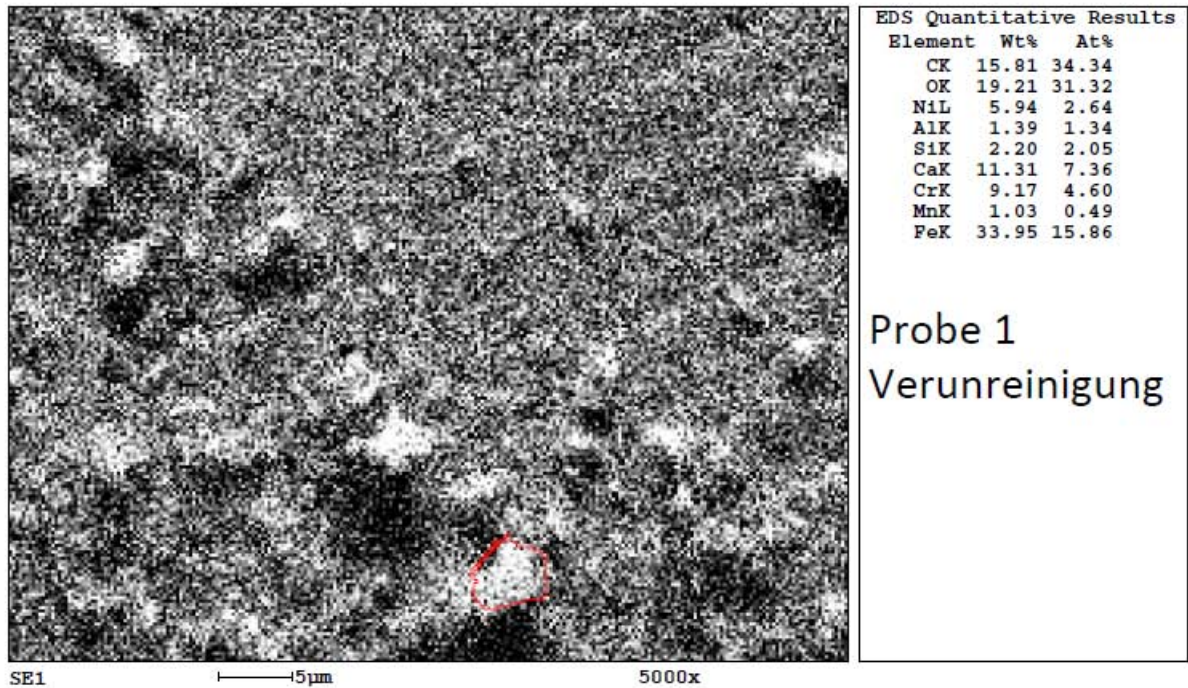


Beilage 24: Probe B15

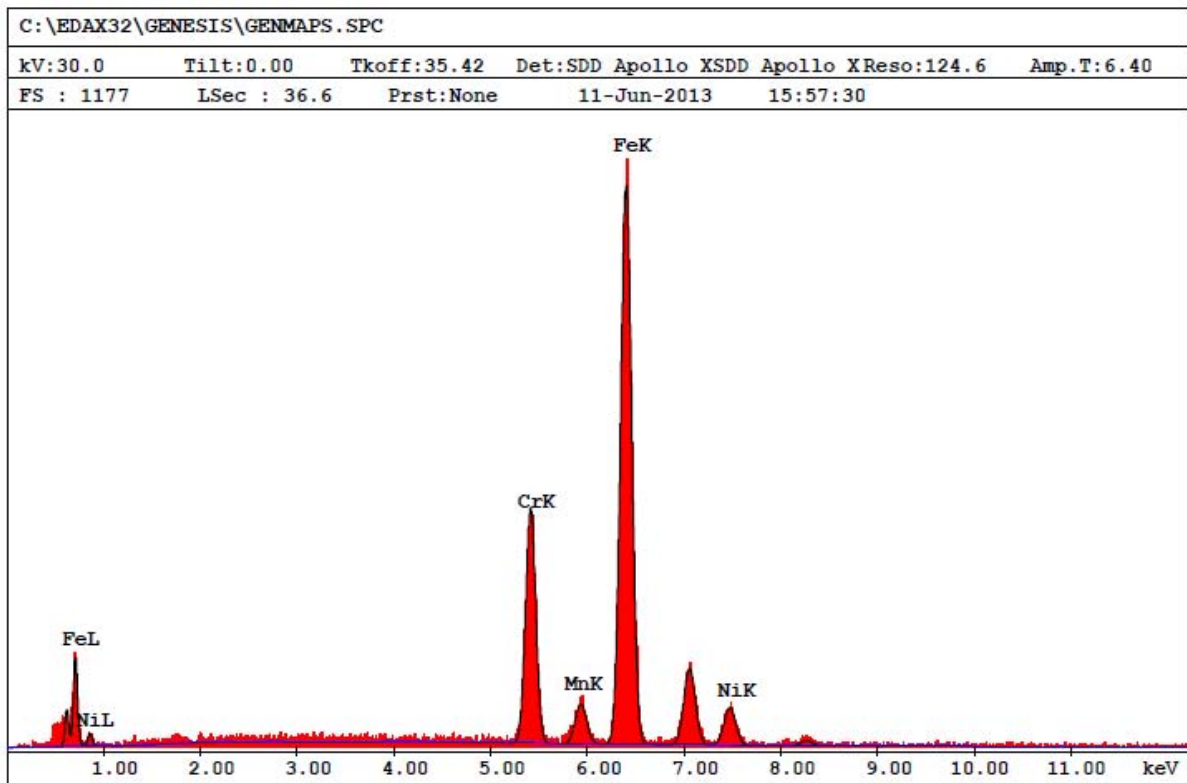
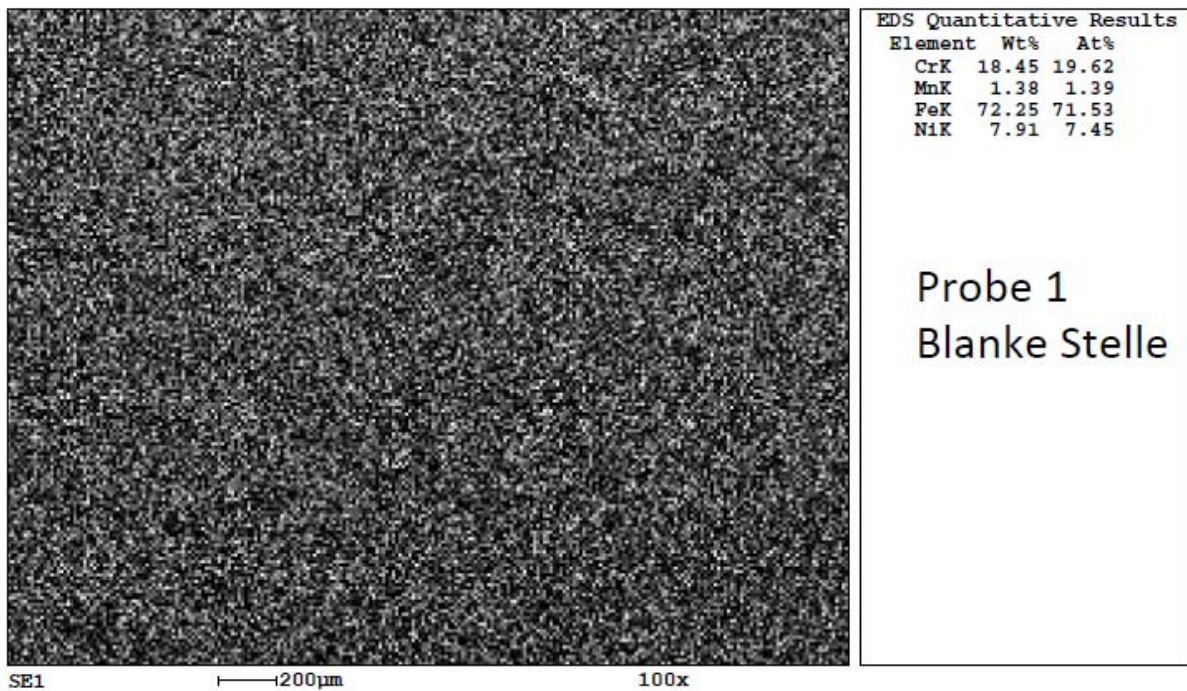
Philip WACHMANN



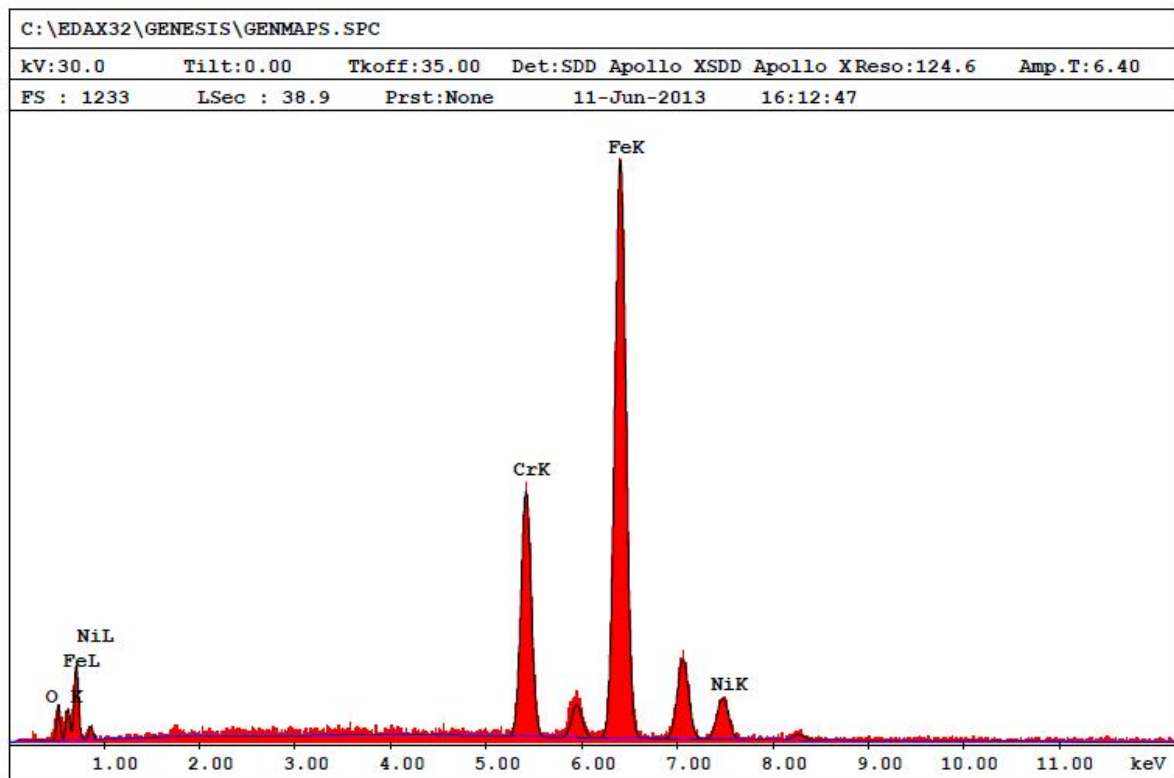
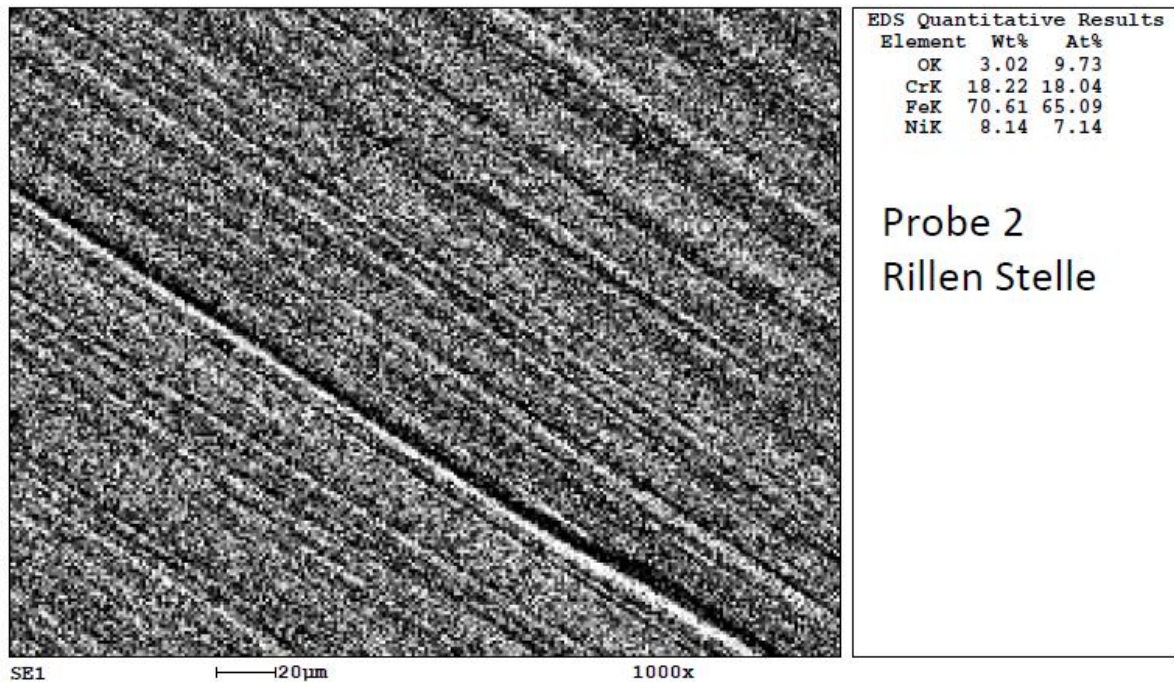
Beilage 25: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M1 verunreinigt



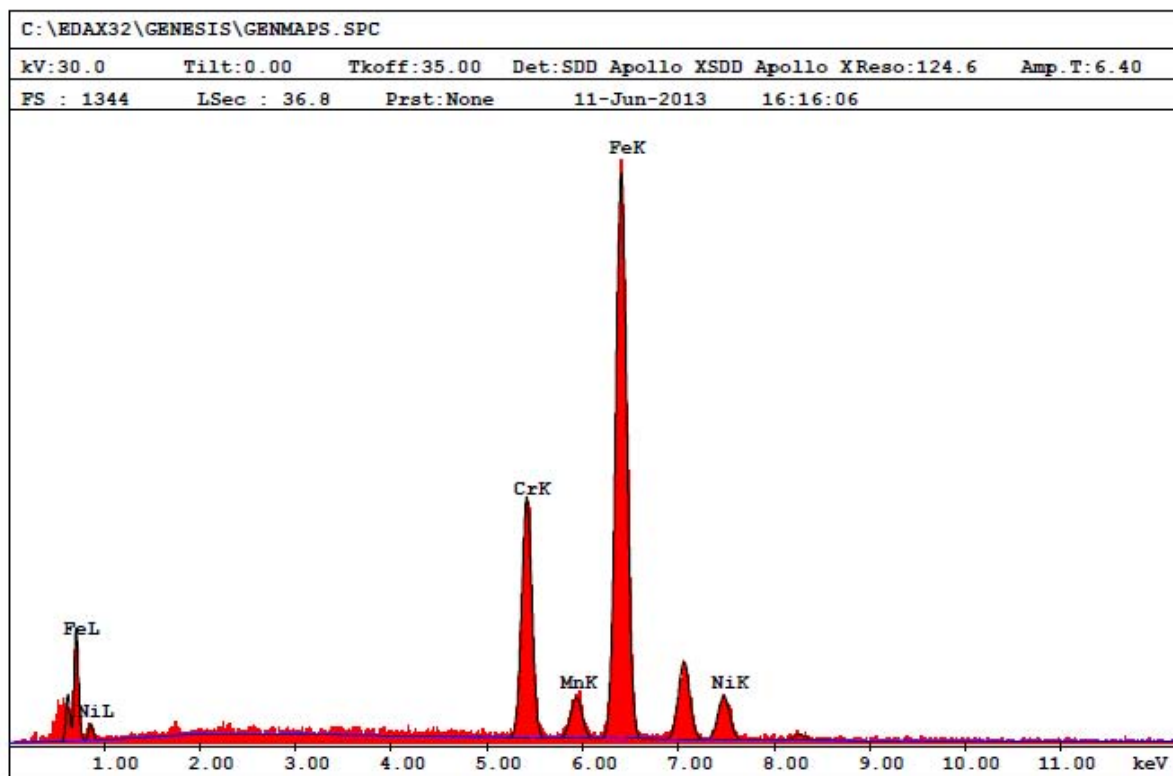
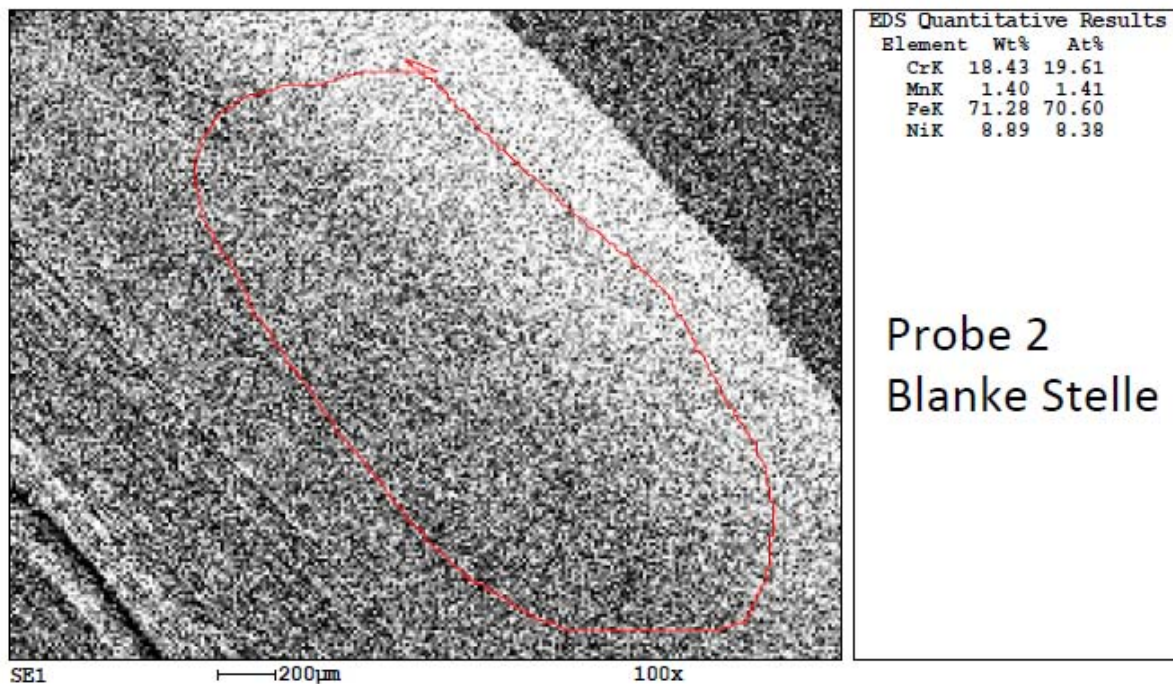
Beilage 26: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M1 blank



Beilage 27: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M2 verunreinigt



Beilage 28: REM-Bilder und EDX-Auswertung Probe M2 blank



12. Lebenslauf

Person	Philip Michael Wachmann, Bakk.techn.
E-Mail	philip.wachmann@gmx.net
Ausbildung	Volksschule Althofen Gymnasium mit 2. lebender Fremdsprache St.Veit/Glan Matura im Juni 2003
2004 bis 2006	Bachelorstudium der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur
2006 bis 09/2011	Bachelorstudium der Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur, Universität für Bodenkultur, Abschluss Bakk.techn.
2011 bis dato	Masterstudium der Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur, Universität für Bodenkultur
2012	Permakultur-Zertifikatskurs, Verein Permakultur Austria
Bisherige Tätigkeiten	Technische Zeichnungen, DI WACHMANN Landschaftsarchitektur